

申请上海交通大学博士学位论文

中低放射性废物改进型 γ 扫描 技术及活度重建算法研究

学 校： 上海交通大学

院 系： 机械与动力工程学院

班 级： A0602093

学 号： 0060209054

博 士 生： 刘 诚

学 科： 核能科学与工程

导 师： 王德忠 教授

上海交通大学机械与动力工程学院

2013 年 4 月

Ph.D. Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University

**STUDY ON THE IMPROVED GAMMA SCANNING
TECHNIQUE AND ACTIVITY RECONSTRUCTION
METHOD FOR LOW AND INTERMEDIATE LEVEL
RADIOACTIVE WASTE**

Author: Cheng LIU

Advisor: Prof. Dezhong WANG

Specialty: Nuclear Science and Engineering

School of Mechanical Engineering

Shanghai Jiao Tong University

April, 2013

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密☐，在____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密☐。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

中低放射性废物改进型 γ 扫描技术及活度重建算法研究

摘要

随着核能工业发展和放射性同位素日趋广泛应用,各种放射性废物大量产生和堆积。目前,我国核电运行以来产生的放射性废物大量贮存在核电厂的废物暂存库内,若不能得到及时处置,将可能成为影响核电安全运行的隐患。除此之外,国防产生的放射性废物、核设施退役产生的放射性废物如何安全处置也是一个迫切需要解决的问题。在对放射性废物最终处置之前,必须对放射性废物中的核素组成与活度进行准确鉴别与测量,为其暂存、运输和最终处置提供科学依据。

由于中低放废物的特殊性,目前普遍采用无损分析方法(Non-Destructive Assay, NDA)对废物桶进行测量。NDA 方法又包括:无源和有源的 γ 射线分析法、无源和有源的中子分析法、量热分析法。其中 γ 射线分析法利用样品本身发射的 γ 射线来对样品进行定量分析,且不会产生二次放射性废物,是应用最为广泛的 NDA 方法之一。废物桶的 γ 射线扫描技术经历了分段 γ 扫描技术(Segmented Gamma Scanning, SGS)和层析 γ 扫描技术(Tomographic Gamma Scanning, TGS)两个阶段。对比 SGS 技术与 TGS 技术,SGS 测量过程简单、速度快,但测量非均匀样品时具有较大的误差;TGS 可以比较精确地获得桶内物质与放射性核素的分布,但复杂的测量过程难以满足大规模探测要求。

针对上述问题,本文以研究更加快速准确的中低放射性废物活度探测技术为目的,对改进型 SGS 技术和 TGS 技术开展了研究,主要研究内容和成果包括:

(1) 双探测器改进型 SGS 技术理论及测量系统的建立

传统的 SGS 技术采用桶内每层介质与放射性核素都均匀分布的假设,因此在对非均匀分布的样品进行测量时会出现较大的误差。本文提出的双探测器改进型 SGS 技术采用桶内每层介质均匀分布的假设,但是认为放射性核素以等效的环形线源的形式存在,通过两个探测器在不同位置测到的计数率分析得到该层内核素的等效半

径。通过公式推导详细说明了该改进型 SGS 技术的理论基础,并详细介绍了其活度重建算法及测量系统布置。

(2) 双探测器改进型 SGS 技术的模拟及实验验证

采用 MCNP (Monte-Carlo N Particle) 程序对不同密度的均匀介质单点源以及多点源、非均匀介质单点源的情况进行了模拟测量,并对模拟数据进行了重建分析。对于均匀介质,在最极端的单点源情况下,双探测器改进型 SGS 对 ^{137}Cs 的活度重建结果的相对误差为:密度为 $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ 时在 $\pm 10\%$ 范围内, $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 时在 $\pm 15\%$ 范围内, $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 时在 $\pm 20\%$ 范围内, $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 时在 $\pm 25\%$ 范围内。同时,对一非均匀单点源样品也进行了实验测量。模拟测量数据和实验测量数据的重建结果均表明,双探测器改进型 SGS 技术比 SGS 技术具有更高的测量精度。

(3) 基于动网格的 TGS 图像重建研究

针对目前 TGS 技术中网格划分较粗,分辨率较低的问题,提出采用动网格进行 TGS 图像重建,并进一步提出了一种适合于 TGS 重建的自适应动网格加密算法,在点源附近区域采用小尺寸网格对“热点”进行准确定位,对不存在核素或者核素活度较低的区域采用大尺寸网格。采用 MCNP 程序对一非均匀介质的点源样品进行了 TGS 模拟扫描,对模拟数据的重建结果表明:采用动网格进行 TGS 发射重建能够在对“热点”核素进行准确定位和减少网格数量的同时减小发射重建活度误差,提高 TGS 的测量精度。

(4) 基于动网格发射重建的 TGS 测量优化研究

针对目前 TGS 测量时间过长而尚未大规模工业应用的问题,提出了减少扫描次数并利用动网格进行发射重建的解决方法。为验证该方法的可行性并确定测量优化方案,针对旋转 24 次平移 4 次的 TGS 原始扫描方案,设置了四种减少转动或(和)平移次数的简化测量方案,采用 MCNP 程序对均匀介质和非均匀介质两种样品按照各种扫描方案进行了模拟扫描,并采用固定网格进行透射重建,采用固定网格和动网格分别进行发射重建,进而研究各种简化方案的重建误差变化情况。对各测量方案下的 216 个单点源以及 100 组多点源工况的重建误差进行统计分析后对比发现:由旋转 24 次平移 4 次的标准扫描方案简化到旋转 12 次平移 4 次后,再采用动网格

进行发射重建，测量精度不会明显改变，但简化后测量次数减少一半，能够明显缩短 TGS 的测量时间。

关键词：改进型分段 γ 扫描技术，层析 γ 扫描技术，等效半径，动网格，无损测量，中低放射性废物

**STUDY ON THE IMPROVED GAMMA SCANNING TECHNIQUE
AND ACTIVITY RECONSTRUCTION METHOD FOR LOW AND
INTERMEDIATE LEVEL RADIOACTIVE WASTE**

ABSTRACT

Large amounts of low and intermediate level radioactive waste (LILW) will be produced and piled up with the nuclear power industry development and the increasing widespread application of radioisotopes. Currently, a large number of radioactive waste generated in the operation of nuclear power plant are stored in the temporary repository, and it may affect the safe operation of nuclear power if the nuclear waste can not get timely disposal. In addition, the safe disposal of radioactive waste from national defense industry and decommissioning of nuclear facilities is also an urgent problem. The distribution of the radionuclide composition and activity must be accurately measured before the final disposal of LILW to provide a scientific basis for its storage, transportation and final disposal.

Due to the particularity of LILW, non-destructive assay (NDA) method is commonly used to measure the waste drums. The γ -ray analysis method is based on the γ -ray emitted by the sample itself and does not produce the secondary radioactive waste, so it is one of the most widely-used NDA method. The γ -ray scanning technique for waste drums has undergone two stages: Segmented Gamma Scanning (SGS) and Tomographic Gamma Scanning (TGS). The SGS measurement process is simple and fast, but with a large measurement error; TGS can obtain the distribution of the material and radionuclides in the waste drum accurately, but it is difficult to meet the requirements of large-scale detection because of its complexity and long time of the measurement

process.

The research of improved SGS (ISGS) and TGS method is carried out in this paper, aiming at the more rapid and accurate detection technique for LILW. The main contents and results are as follows:

(1) The establishment of the theory and measurement system of ISGS

The traditional SGS assume that the matrix and radioactive sources are distributed uniformly in each vertical segment, resulting in a large error in measuring the non-uniform sample. The ISGS proposed in this paper assume the uniform matrix in each segment, but the radioactive sources exist in the form of an equivalent ring source, and the equivalent radius is analyzed by the count rates of two detectors at different positions. The theoretical basis of the ISGS is described in detail by formula derivation, and the activity reconstruction algorithm and measurement system layout are also presented.

(2) Simulation and experimental verification of ISGS

The simulation measurements of the cases of single source in homogeneous matrix, multiple sources in homogeneous matrix and single source in heterogeneous matrix are carried out by using MCNP code. For the homogeneous matrix, in the most extreme case of a single point source, the relative errors of reconstruction activity results of ISGS are in the range of $\pm 10\%$ at the density of 0.3g/cm^3 , $\pm 15\%$ at the density of 0.6g/cm^3 , $\pm 20\%$ at the density of 1.0g/cm^3 , and $\pm 25\%$ at the density of 1.5g/cm^3 . Meanwhile, the experimental measurement of a heterogeneous sample is also carried out. The reconstruction results of simulation measurement data and experimental data both show that the ISGS has a higher accuracy than SGS.

(3) Study of TGS image reconstruction using dynamic grids

In order to solve the problem of coarse grids and low resolution in TGS, using dynamic grids in TGS image reconstruction is proposed. A adaptive grid refinement strategy which is suitable for TGS reconstruction is developed in order to locate small size grids in the vicinity of the point source for accurate positioning of the ‘hot spots’ and

locate big size grids in the area of no or low radioactivity. The simulation measurements of a heterogeneous matrix with point sources are carried out by using MCNP code. The reconstruction results of simulation measurement data demonstrate that dynamic grids in emission reconstruction outperform the fixed grids in terms of the accuracy and 'hot spots' positioning with fewer grids in most cases.

(4) Study on the optimization of TGS detection by using dynamic grids in the emission reconstruction

Reducing the scan times and using dynamic grids in emission reconstruction is proposed to solve the problem of the long measurement time of TGS. To verify the feasibility of the solution and find the optimal scan scheme, we set five different simplified scan schemes which reduce the rotation or (and) translation number based on the original scan scheme of 24 rotating times and 4 translation times. The simulation measurements of a homogeneous sample and a heterogeneous sample with point sources are carried out by using MCNP code, and the transmission reconstruction is implemented by fixed grids, the emission reconstruction is implemented by fixed grids and dynamic grids respectively to compare the activity reconstruction error of all the scan schemes. The statistical results of the reconstruction error of 216 single point sources and 100 multiple point sources indicate that simplification of TGS scan process from 24 rotating times and 4 translation times to 12 rotating times and 4 translation times will lead to little change of the emission reconstruction error if dynamic grids are applied, but this simplification will lead to a obvious reduction of TGS scan time.

Keywords: improved segmented gamma scanning, tomographic gamma scanning, equivalent radius, dynamic grids, non-destructive assay, low and intermediate level radioactive waste

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	4
1.3 本文的主要研究内容.....	14
第二章 双探测器改进型 SGS 技术研究	16
2.1 改进型分段 γ 扫描技术原理.....	16
2.1.1 传统型 SGS 扫描及重建原理.....	16
2.1.2 改进型 SGS 扫描及重建原理.....	19
2.1.3 ISGS 重建软件.....	24
2.2 ISGS 系统布置与效率计算.....	26
2.2.1 ISGS 系统设置.....	26
2.2.2 效率刻度分析.....	28
2.3 ISGS 模拟扫描及重建结果分析.....	31
2.3.1 均匀介质单点源重建结果.....	31
2.3.2 均匀介质多点源重建结果.....	38
2.3.3 非均匀介质单点源重建结果.....	42
2.4 ISGS 实验测量及重建结果分析.....	48
2.5 本章小结.....	53
第三章 基于动网格的 TGS 图像重建研究	56
3.1 基于动网格的 TGS 重建原理.....	56
3.1.1 TGS 扫描及重建原理.....	56
3.1.2 TGS 的动网格重建原理.....	60
3.1.3 TGS 重建软件.....	64
3.2 TGS 扫描及重建设置.....	65
3.3 采用动网格的重建结果分析.....	70
3.3.1 透射重建结果分析.....	70

3.3.2 发射重建结果分析	75
3.4 本章小结	81
第四章 基于动网格发射重建的 TGS 测量优化研究.....	83
4.1 TGS 测量优化及扫描设置.....	83
4.2 模拟扫描的实验验证	85
4.3 模拟扫描及重建结果分析	87
4.3.1 透射重建结果	88
4.3.2 单点源发射重建结果	92
4.3.3 多点源发射重建结果	106
4.4 本章小结	112
第五章 结论与展望.....	114
5.1 研究总结	114
5.2 论文创新点	115
5.3 研究展望	116
参 考 文 献.....	118
攻读博士学位期间完成的论文和专利.....	128
致 谢.....	130

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

为调整能源结构、缓解化石燃料燃烧对环境造成的压力，核能正受到世界各国的广泛关注。核能的开发利用给人类社会带来了巨大经济效益和社会效益，但随着核能工业发展和放射性同位素日趋广泛应用，各种放射性废物大量产生和堆积。所谓放射性废物，是指含有放射性物质或被放射性物质所污染，其活度或活度浓度大于规定的清洁解控水平，并且所引起的照射未被排除的废弃物（不管其物理形态如何）^[1]。放射性废物与其它有害物质或一般废物不同，它的危害性不能通过化学、物理或生物的方法消除，而只能通过自身衰变或核反应嬗变来降低其放射性水平，最后达到无害化^[2]。因此，对放射性废物的管理显得尤其重要。

放射性废物产生于核工业生产的各个环节以及其他使用放射性物质的各种活动，例如：各种类型反应堆的运行、核燃料和核废物运输与核废物处理过程、放射性同位素的生产和应用过程、核武器生产和试验过程、核设施的退役过程等等^[3]。放射性废物根据其半衰期和放射性活度水平可以分为豁免废物、低水平放射性废物、中水平放射性废物和高水平放射性废物四类^[4]。中低放射性废物在核工业中的主要来源为“软废物”（工作服、手套等）、废设备、仪表、过滤器芯子等以及液体固化物，而高放废物主要是乏燃料后处理产生的高放废液及其固化体、准备直接处置的乏燃料及相应放射性水平的其他废物。实际中，中低水平放射性废物占全部放射性废物体积的 95%以上。根据 2005 年的数据，我国中低放固体废物的量粗略估计为：核技术应用约 8000 立方米，研究开发约 4200 立方米，军品遗留约 32000 立方米，核电站约 3000 立方米^[5]。而今后我国中低放废物的产生量也是巨大的，以核电站为例，据测算，一个 100 万千瓦级的核电站，每年产生的中低放废物大概为 70-100 立方米。根据国务院刚刚通过的《核电中长期发展规划（2011-2020 年）》，到 2020 年我国在运核电装机容量达到 5800 万千瓦，在建 3000 万千瓦，那么全国

核电站一年产生的中低放废物将达到 5800 立方米。核电站产生的放射性废物在经过固化和减容之后，存于水泥桶或者钢桶中，进入核电厂的废物暂存库等待最终处置。国家规定放射性废物在核电厂内堆放时间不得超过 5 年^[6,7]，而实际情况中，我国核电运行以来产生的放射性废物大量贮存在核电厂的废物暂存库内，已超过规定年限，这就使我国目前的中低水平放射性废物管理处于一个严重的不稳定状态，若不能得到及时处置，将可能成为影响核电安全运行的隐患。除此之外，国防产生的放射性废物、核设施退役产生的放射性废物如何安全处置也是一个迫切需要解决的问题。核电中长期发展规划也对放射性废物的管理问题进行了单独说明，要求在建设核电项目的同时，同步建设中低放废物处置场，以适应核电发展不断增加的中低放射性废物处理的需要^[8]。

在对放射性废物进行最终处置前，必须先对其进行准确的分类，我国规定了对不同种类的放射性废物的不同处理和处置方式，低、中放固体废物应采用近地表处置（包括岩洞处置）方式，也可采用其他具有等效功能的处置方式。高放固体废物和 α 废物应按“集中处置”的方针实施处置，应在合适的深地质层中建设一座国家地质处置库，处置全国的高放固体废物和 α 废物^[9]。为加强放射性废物的管理，我国在放射性废物的各个环节都制定了相关的标准。例如，在《GB11928-1989 低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》中要求入库废物应尽可能根据废物的放射性比活度、半衰期、毒性及废物处理的要求进行分类，分别入库贮存；在《GB11806-2004 放射性物质安全运输规程》中规定了放射性核素的基本限值和货包内容物限值；在《GB16933-1997 放射性废物近地表处置的废物接收准则》中规定了废物包装体中废物的放射性比活度的限值，且主管部门或处置场营运单位可授权某个有资格的部门或单位对废物包装体进行破坏性或非破坏性抽检，抽检项目可包括总 β - γ 和总 α 放射性活度、主要放射性核素及其比活度等等。可见，放射性废物的探测在放射性废物管理中是非常重要的环节，低、中水平放射性废物包的检测可归纳为三个方面的内容，一是废物产生单位对废物包产生过程的质量控制；二是监管单位对废物包特性实施的抽样检查；三是处置接收单位对送往处置场废物包的质量验收^[10]。在对这些废物进行处置之前，必须对其进行准确鉴别与测量，获得废物中所含核素及其

核素的量，为其暂存、运输和最终处置的方案制定提供科学依据。

中低放废物中包含有未知量的各种放射性核素，其物理、化学形态复杂，介质的平均密度变化范围很大，且桶内废物空间密度变化也很大，空间分布不均匀，不同种类的放射性核素分布也不均匀，很难获得有代表性的样品，因此采用传统的先取样再用化学分析法进行检测的做法，则必然带来很大误差，且误差的大小难以人为控制。因此，目前较为理想的是采用无损分析方法（Non-Destructive Assay, NDA）对废物桶进行整体测量和分析^[11,12]，NDA 方法主要是通过核材料的自身固有放射性（ X 、 γ 、 α 、 n 等）或外部核反应（如中子反应、 γ 反应等）激发放射性测量从而达到分析的目的^[13]。这样可以在样品的物理、化学形态不发生任何变化的情况下分析出样品中所含的放射性核素及其含量，克服了化学破坏分析法取样难的问题。对于一些难于直接测量的核素，则可以通过 NDA 方法先测得关键 γ 放射性核素的活度后，通过该核素与关键核素的比例因子^[14-16]（scaling factor）求得。

西方国家在大力发展核电建设技术的同时，也注重对后端废物管理技术能力的建设，各国成立了专门的研究机构，用于研究和开发实用、快捷的废物包检测技术，如美国成立的美国材料表征中心、美国材料和试验协会等^[10]。上世纪六十年代以后，核材料的 NDA 方法和相关仪器设备的研制已成为核安全保障和核材料管理方面最活跃的研究领域之一^[13]，并陆续开发了多种多样的核废物 NDA 探测技术。我国对核废物的 NDA 探测技术的研究起步较晚，从上世纪九十年代开始才渐渐引起我国同行的重视，并且我国多借鉴国外技术，对 NDA 技术的研究与应用还不够。另一方面，目前我国多家核电厂采用的废物桶活度测量方法多样，并缺乏统一的标准，有核电厂采用取样分析法，也有核电厂通过测量表面剂量率再按照经验公式估算桶内活度^[17]，NDA 方法仅在少数核电厂得到应用。因此，在这种情况下，开展对中低放射性废物活度探测技术的研究，不仅具有重要的科学价值，而且对提高我国放射性废物探测与管理水平具有实际意义。

NDA 方法包括：无源和有源的 γ 射线分析法、无源和有源的中子分析法、量热分析法^[13]。其中中子探测技术主要用于对 α 废物的检测。 γ 射线分析法利用样品本身发射的 γ 射线来对样品进行定量分析，且不会产生二次放射性废物，是应用最为

广泛的 NDA 方法之一。本文将针对用于中低放废物探测的 γ 射线扫描技术开展研究。

1.2 国内外研究现状

废物桶的 γ 射线扫描技术在二十世纪七十年代发展起来, 经历了分段 γ 扫描技术 (Segmented Gamma Scanning, SGS) 和层析 γ 扫描技术 (Tomographic Gamma Scanning, TGS) 两个阶段, 起初用于放射性废物桶和核返料桶中的放射性铀、钚的定量测量, 后来也扩展到中低放废物桶中其他 γ 放射性核素的测量。

分段 γ 扫描技术最先由美国的洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 的 J.L.Parker^[18] 等人于上世纪七十年代初提出。在传统的 SGS 技术中, 将废物桶沿其轴向作分层, 并假设每层的填充物质与核素均匀分布。测量时, 废物桶匀速旋转, 以提高桶内核素的分布均匀度。测得每一段计数率后, 通过计数率与核素质量 (或活度) 间的刻度因子 (包含探测效率和自吸收校正因子) 计算出各层的核素量, 求和得到整个被测样品的核素总量。G.A. Sheppard 等考虑到 SGS 探测中各层探测数据的串扰影响以及端部效应 (扫描废物桶最上和最下一层时, 由于准直器视野没有填满, 会导致最上和最下一层的测量结果偏低, 称为端部效应, 即 end effect), 提出采用解矩阵方程的方式来求各层核素活度, 并比较了奇异值分解法 (Singular Value Decomposition, SVD)、代数迭代法 (Algebraic Reconstruction Technique, ART) 和极大似然期望最大化法 (Maximum Likelihood-Expectation Maximization, ML-EM) 等不同矩阵方程解法的优劣, 模拟结果显示 ART 和 ML-EM 在各种核素分布情况下都能给出较精确的结果, 并且 ML-EM 算法略优于 ART^[19]。

由于桶内发出的射线在到达探测器前必然会经过桶内介质的衰减和吸收, 因此必须对这种自吸收效应进行校正。和所有 γ 能谱测量技术一样, 效率刻度也是 SGS 技术的一项关键内容。因此, 对 SGS 技术的研究主要集中在如何校正废物桶内材料的自吸收以及如何对整个系统进行准确的效率刻度这两个方面。

自吸收校正主要有三种方法：1、透射校正法，即通过外加透射源测量样品的透射率，继而计算出自吸收校正因子；2、平均密度法，即通过测量样品的平均密度，再根据计算得到的不同密度下的探测效率曲线来确定自吸收校正因子；3、峰比值法，即通过桶内某一核素发出的两条或多条不同能量的 γ 射线经过衰减后的计数比值来推导自吸收校正因子。Bruce Gillespie 总结了几种自吸收校正方法，并指出了各自的优缺点^[20]。在目前的废物探测系统中，前两种方法最为常用。

J.L. Parker 最先研究了自吸收校正因子的计算方法，给出了近立体角几何条件下的一维、二维、三维自吸收校正模型，并针对 SGS 提出了采用近立体角三维自吸收校正模型计算自吸收校正系数与透射率的函数关系的方法^[18]。H. Zhu 给出了一种基于蒙特卡罗的计算介质自吸收校正因子的方法，一方面可以从侧面验证实验值的可信度，一方面也为实验难以进行时提供了一种替代方法^[21]。T. H. Prettyman 则针对 SGS 和 TGS 中都可能出现的结块效应（lump effect）展开了校正算法研究^[22,23]。

在 SGS 系统的效率刻度方面，可采用实验刻度的方法，即用一系列不同质量的均匀刻度标样对 SGS 测量装置进行刻度。20 世纪 90 年代，美国洛斯阿拉莫斯国家实验室与国家标准局合作研制了专用于 SGS 刻度的铀标样和钷标样^[24]。

由于制作均匀标样，尤其是大体积标样，通常非常困难，贮存和运输也不方便，且所用标样的准确性也将直接影响测量的准确性，因此有学者开始研究其他替代方法。G.A. Sheppard 等提出了一种利用标准点源来进行刻度的替代方法，利用探测器二维响应归一化函数和点源标样计数率来进行积分得到刻度因子^[25]。Liang, J. H 等学者提出将多根细棒状源（一般为 6 或 7 根）插入废物桶的不同半径位置，并将废物桶匀速旋转，以近似模拟活度均匀分布的样品，由于细棒状源在旋转过程中可看做一个圆柱面的薄壳源，因此将这种方法称为壳状源方法（shell-source method）。Liang, J. H 指出多根棒状源与均匀样品的近似程度则跟棒状源的位置，尤其是最靠近桶壁处的源的位置，以及介质密度、射线能量等有关^[26]，Liang, J. H 还用解析的方法结合蒙特卡罗程序 EGS4 从理论上研究了 shell-source method 的可行性，计算结果表明将高纯锗探测器简化为点探测器对刻度精度带来的影响是可忽略的^[27]。M. Bruggeman 等针对 shell-source method 中因棒状源数量少导致不能完全模拟均匀

样品的问题以及刻度精度受最外侧棒源位置影响的问题,提出了一种改进方法,即通过实验测量探测效率随棒状源所在半径变化的曲线,拟合后通过积分计算均匀样品的探测效率^[28]。S. Croft 等用 6 至 7 根混合棒状源插入样品中,对一套 SGS 系统进行了刻度,给出了不同核素不同密度介质的刻度结果,认为该方法在多数情况下都有较好的精度^[29]。

随着蒙特卡罗技术以及无源效率刻度技术的发展,有学者开始研究核废物检测系统的无源效率刻度方法。A. Bosko 等指出了用 ISOCS 软件对 SGS 装置进行刻度的可行性(ISOCS 软件是由 Canberra 公司开发的无源效率刻度软件,采用蒙特卡罗方法对每个探测器进行表征,再结合积分计算的方法对用户输入的任意几何形状样品进行效率刻度),并用刻度后的 SGS 装置对混合棒状源进行了实际测量,结果表明测量值和标称值相差在 10%之内^[30]。D. Nakazawa 等人用 ISOCS 软件对多套核废物测量系统进行了刻度,并指出随着核保障的日益重要,无源效率刻度技术将更为理想^[31]。M. Toma 等人用 shell-source method 和基于蒙特卡罗方法的 GESPECOR 软件同时对一系统进行了效率刻度,发现实验刻度结果和软件计算结果相当一致^[32]。

经过多年的研究,SGS 已经是一种成熟的技术。国外已有 SGS 核废物测量系统的商业产品,例如美国 CANBERRA 公司的 WM2200 型系统及 Q² 和 IQ³ 系统^[33-35]。WM2200 型系统配有一个高纯锗探测器,可选用平均密度法或透射校正法进行自吸收校正,在标准配置下可测量体积不大于 320L,重量不大于 900kg 的样品。Q² 系统则配备了三个高纯锗探测器同时对 208L 废物桶进行测量,采用平均密度法进行自吸收校正,探测灵敏度可达到 10nCi。Q² 系统的另一个特点是将废物桶和探头放在一个 10cm 厚的大容器屏蔽室内,可起到降低本底的作用。IQ³ 系统则在 Q² 系统的基础上又增加了三个高纯锗探测器,这样就有两列探测器,每列三个,两列探测器平面成 90°,采用透射校正法进行自吸收校正,这样自发射测量和透射测量可以同时进行,进一步节省了测量时间;同时,屏蔽室厚度也增加到 15cm。IQ³ 系统可测量重量不大于 400kg,体积不大于 300L 的废物桶,对 ²³⁹Pu 的探测灵敏度小于 1mg。与此同时,欧洲的一些研究机构也开发了自己的 SGS 系统,例如德国尤利希研究中

心开发的 Gernod II 系统, 比利时 SCK 研究中心开发的 SGS 系统, 意大利开发的 SRWGA 系统等等^[36]。A. G. Espartero 还将 SGS 技术应用于西班牙国内的研究所和医疗中心运行过程中产生的小体积的低水平放射性废物探测领域, 开发了包含 NaI 和嵌入型多晶硅探测器在内的多探头小体积的活度探测系统^[37]。

SGS 的测量误差来自于多个方面, 例如: 放射性核素的不均匀分布, 吸收介质的不均匀分布, 效率刻度的误差, 端部效应, 几何尺寸的偏差, 计数的统计误差, 本底计数的波动, 解谱的误差, 系统的不稳定性等等。有学者从不同角度对 SGS 的测量误差进行了分析。Jon R. Hurd 等人从以下三个方面研究了 SGS 的测量误差: 端部效应、刻度标样(罐状标样和桶状标样)的非均匀性、刻度标样放置在旋转台的偏心位置, 认为最大的误差来自桶标样的非均匀性, 由端部效应引起的误差可从百分之几到百分之二十或更大^[38]。Tran Quoc Dung 针对 208L 钢桶从以下四个方面研究了 SGS 的测量误差: 放射性核素的不均匀分布、介质密度、介质的不均匀分布、探测器到废物桶的距离, 计算结果表明在极端的点源情况下, SGS 测量误差可从 -80% 到 300% 以上^[39]。R.J. Estep 等人指出 SGS 只适用于低密度样品, 或者中高密度均匀样品, 而对于非均匀样品测量误差可达到 100% 以上^[40]。

由于 SGS 采用每层内放射性核素和吸收介质都均匀分布的假设, 而实际上仅有一小部分核废物可以看作是均匀分布的, 大部分核废物都不满足这种均匀假设, 特别是中高密度、核素分布极不均匀、甚至有结块的样品, 放射性强度的分布和介质密度随空间几何位置变化很大, 如果仍用相同的线衰减系数来对样品进行自吸收校正, 必然对分析结果造成很大的误差。一般来说, 放射性核素在废物桶内的非均匀分布是 SGS 最大的误差来源, 桶内填充物质在废物桶内的非均匀分布也进一步增大了 SGS 的测量误差^[40,41]。

为克服分段 γ 扫描测量技术在测量中的局限性, 二十世纪八十年代末, 国外有些实验室尝试将先进的 CT (Computerized Tomography, CT) 成像技术应用到 NDA 测量技术中, 从而逐渐形成了层析 γ 扫描技术 (Tomographic Gamma Scanning, TGS) 技术。例如日本东海村原子力所的 Kawasaki 曾用多个 NaI 探头组装成简易 TGS 扫描装置, 对 TGS 的原理进行探索性研究^[42]。美国 LANL 国家实验室的 Robert J. Estep

和 T.H. Prettyman 等人采用一个 HPGe 探测器建立了一个 TGS 装置来重建样品中的组分和密度,同时对模型参数、重建算法、准直器形状、透射源的选择等进行了研究^[43-47]。美国 LLNL 国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 的 Harry E. Martz 等人用小同轴 HPGe 探头,也建立了一个简单的实验 TGS 装置,应用于高温冶金化学领域,进行镅、钚分离实验研究^[48,49]。1994 年,美国 LANL 的 Robert J. Estep 和 T.H. Prettyman 等人组成的研究小组首次开发研制成功了 TGS 原型装置^[50],LLNL 和欧洲一些国家也相继研制出了不同类型的 TGS 测量装置^[48,51,52]。

各国研制开发的 TGS 装置在原理上都是类似的,层析 γ 扫描技术主不仅对样品进行轴向分段扫描,而且将分段后的每一层再划分为若干体素,认为每个体素中的线衰减系数一致。对每一层进行平移和旋转扫描,通过透射扫描测量和发射扫描测量,分别得到样品的线衰减系数分布图和放射性强度分布图。利用透射测得的介质线衰减系数分布图来对发射扫描测得的放射性强度分布图进行精确的衰减校正,最后得到样品中核素的放射性活度三维分布。TGS 借用 PET (Positron Emission Tomography, PET) 成像测量技术,解决了 γ 射线能谱测量中由于样品介质不均匀分布而引起的射线衰减校正不准确的问题,从而大大提高了非均匀样品中放射性含量分析的准确度。各国研制的 TGS 装置的图像分辨率有所不同,例如 Kawasaki 将每层划分为 6×6 个体素,LANL 将每层划分为 10×10 个体素,LLNL 将每层划分为 14×14 个体素,显然,体素划分越多,图像分辨率越高,但所需要的扫描次数和时间也越多。

Tran Ha Anh 对 TGS 技术中金属钚结块对测量结果的影响进行了研究,认为 TGS 技术能很好地解决对结块的校正,校正结果的好坏与体素边长的选取以及放射源在废物桶中的位置有关,当体素的尺寸为 1 cm 时,对钚金属结块的探测误差在 27%之内^[53]。

C. Robert 等学者对不同能量 γ 射线对 TGS 技术衰减系数的影响进行了研究,并结合双能 CT 技术 (Dual Energy Computerized Tomography, DE-CT),建立材料密度和有效原子序数在不同能量下与衰减系数的函数关系,提高衰减校正的精确

度, 结果表明该方法计算衰减份额的精度在 10%左右^[54]。

J.C.Palacios 等学者开发了一套用于测量核废物的断层成像软件, 通过模拟数据研究发现, 对于 208 L 的废物桶, 透射测量使用的放射源能量必须大于 1.3 MeV 才能获得很好的分辨率。而对桶内放射性核素的具体位置的重建对于低能量的射线无法取得较好的效果^[55]。

在图像重建算法方面, 各国研制的 TGS 采用的图像重建方法可分为两大类: 一类是变换法, 一类是迭代法。LLNL 研制的 TGS 图像重建算法采用的是一般 CT 所用的变换法, 例如滤波反投影法^[56]。LANL 研制的 TGS 图像重建算法采用的是迭代法, 例如代数迭代法、极大似然期望最大化法、贝叶斯算法等^[57,58], 并已开发相应的软件^[59-61]。

LANL 研究的 TGS 装置已在 RFETS (Rocky Flats Environment Technology Site) 成功地进行了实验测量, 大量测量结果同破坏性分析结果相比, 二者相对误差在 10%之内^[62-64]。目前已有商业化的 TGS 装置。美国 LANL 开发的层析 γ 扫描技术转让给 ANTECH 公司^[65], LLNL 开发的层析 γ 扫描技术转让给美国废物检测公司。CANBERRA 公司也研制了 WM2900 型 TGS 系统^[66], 该系统可测量体积不大于 340L 重量不大于 1000kg 的样品, 对 200L 废物桶进行测量时, 将废物桶分为 16 层, 每层划分成 10×10 的体素, 每个体素的边长为 5.6cm, 采用 ^{152}Eu 作为透射源, 采用代数迭代法重建透射图像, 用极大似然期望最大化法重建发射图像。

γ 射线扫描技术经过了世界各国历经四十余年在 SGS 和 TGS 方向上的研究, 目前, SGS 技术分析时间短, 但对样品的假设与实际相符合的程度较低, 获得的结果准确度不够高。而 TGS 虽然分析结果较好, 但是由于其方法本身的缺陷, 使得对大型样品的分析时间较长, 工作效率较低, 因而在实际应用中的范围不广。例如, CANBERRA 公司的 WM2900 型 TGS 系统对于密度小于 0.3 g/cm^3 的 200L 钢桶, 若总探测时间为 1 小时, 对 ^{137}Cs 的可探测限可达到 $0.2 \mu\text{Ci}$, 显然, 对于密度更大或者活度更低的废物桶, 其探测时间会成倍增长, 在德国尤利希研究所的 TGS 系统实际应用过程中, 其测量一个标准废物桶需要 24 小时左右, 某些情况下甚至需要两三天时间, 这严重影响了 TGS 技术在实际工程中的应用。为寻求探测精度与探

测时间的平衡，近年来有学者开展了改进型的 SGS 分析技术。

Tran Ha Anh 在 SGS 分层的基础上，再将每层分成若干环（例如四环），假设每层的介质均匀而每环内的核素活度均匀，通过探测器在若干个不同距离进行测量，得到每环的放射性核素活度^[67,68]。但这种方法相比传统的 SGS 技术则增加了测量次数和时间，如将每层分成四环，则总测量次数也是原来的四倍。

Y.F.Bai 和 E.Mauerhofer 在桶旋转一圈的过程中每隔 30°测量一次能谱，通过计数率随角度的变化分析得到“热点”核素在桶内的位置和活度^[69,70]。Thomas Krings 则在此基础上对带有准直器的探测器的数学模型进行改进，以便更精确地描述计数率随角度的变化^[71,72]。这种方法与传统的 SGS 测量过程相比，将废物桶匀速转动改为步进转动，增加了在不同角度的能谱测量，与 TGS 相比，则减少了平动。该方法侧重于对“热点”的定位，仅对个数非常有限的“热点”重建较为有效，对非均匀性不明显的活度分布则重建效果不理想。

Chin Jen Chang 等人采用四个探测器对一层进行测量，将一层划分为 7×7 的体素，测量过程中废物桶不旋转，用非负共轭梯度（conjugate gradient with nonnegative constraint method, CGNN）和极大似然期望最大化法（maximum likelihood-expectation maximum method, ML-EM）进行图像重建，采用随机数值模拟的方法研究了各种扰动因素（例如：介质非均匀性、活度非均匀性、统计误差等）对重建结果的影响，讨论了在不同噪音水平下的最佳算法^[73]。这种方法对每层又进行了体素划分，但与 TGS 相比，则没有转动和平动，仅是围绕废物桶每 90°布置一个探测器，圆周方向共布置了四个探测器。

Tran Quoc Dung 对 Alessandra Cesana^[74]等人提出的采用两个探测器对废物桶进行测量的方法进行了改进^[75]，将两个相同的探测器设置在废物桶径向上离废物桶中心相同距离的位置，测量时废物桶匀速旋转，假设桶内物质均匀并且认为两个探测器计数率的乘积与放射源在桶内的位置无关^[76,77]，此方法主要针对内容物为布料，纸，橡胶等有机物的废物桶，测量过程非常简单，但要求探测器距离废物桶较远距离，且误差大于 SGS^[78]。

国内中低放废物 γ 扫描技术的研究最早开始于中国原子能科学研究院。原子能

科学研究院核保障室自二十世纪九十年代开始研究 SGS 技术，之后也对 TGS 技术的关键问题进行了研究。

1994 年中国原子能研究院借鉴国外技术研制了我国第一台大型高分辨率分段 γ 扫描装置^[79]，并自行开发了数据获取与处理软件系统^[80]。该装置可容纳 1-80L 已包装的核返料或废物样品，采用近立体角三维自吸收校正模型计算自吸收校正系数与透射率的函数关系。在该装置上采用均匀样品进行实验测量，发现 1 升塑料瓶和 80 升铁桶的自吸收校正因子与透射率存在很好的线性关系^[79]。吕峰等人以氟化渣为对象，研究适合于分段 γ 扫描法测量的样品基体密度范围以及样品基体密度对测量结果的影响，并用透射源的多个 γ 射线能量与透射率之间的关系进行拟和来求得样品的透射率，结果表明分段 γ 扫描技术适用于测量透射率大于 0.01 的所有中低密度非均匀样品，其测量误差与物料分布不均匀性有关^[81]。张怀礼采用铀冶金炉渣的破坏性分析结果与非破坏性检测技术中的分段 γ 扫描技术和有源中子井型符合计数装置的测量结果进行对比，实验表明分段 γ 扫描技术与破坏性分析结果差别不大，但有源中子井型符合计数装置有较大误差，指出非破坏性分析应以破坏性分析为基础^[82]。

在首台 SGS 装置的基础之上，中国原子能院进一步研制了一套适合核设施现场应用的可移动式 SGS 系统装置^[83]。该装置对盲样中 ^{235}U 含量的测量结果表明近立体角三维自吸收校正模型计算出的自吸收校正因子是准确可靠的，对中、低密度的均匀含铀样品的 γ 射线自吸收校正因子误差好于 0.5 %，同时也指出了用分段 γ 扫描方法测量非均匀物料样品时的测量误差主要来自自吸收校正因子。

周志波等人针对桶装核废物开发了一套 SGS 快速检测装置，该装置采用三个高纯锗探测器同时对废物桶进行测量，并采用蒙特卡罗方法模拟计算了探测器对样品的总探测效率，通过解 3×3 的矩阵方程组得到的放射性核素总量与标称值的偏差小于 10%^[84,85]。

在多年研究基础之上，原子能院也对 SGS 系统的设计进行了改进，将实验刻度方法改为蒙特卡罗模拟与实验刻度相结合的方法，同时在机械系统、透射源屏蔽体材料、系统软件方面都进行了不同程度的改进^[86]。在研制 SGS 装置及设备的同时，

也研制了 SGS 铀标样和钚标样^[87]。

邵强等人研究了层间串扰及测量和计算误差对串扰方程组解的影响，结果表明：在测量和计算误差存在的条件下，在串扰可接受的范围内，样品中物料的总含量受误差的影响较小，但每一分层中物料含量则对误差影响相对较敏感^[88]。王仲奇等人研究了样品层内放射性非均匀分布对 SGS 测量分析误差的影响趋势和影响程度，研究表明当实际样品的层内放射性分布偏离均匀假设时，会导致 SGS 分析结果偏离实际含量^[89]。

邓景珊等人将 SGS 的测量对象由圆柱形样品扩展至球形容器，用 SGS 方法测量球形容器内部核材料滞留量，认为球形容器内部的核材料近似球形分布，自上而下分成若干层，在每一层上近似认为滞留的核材料是均匀分布，探测器自上而下逐层进行扫描测量，实验结果表明该方法不仅可以比较准确地给出滞留核材料的总量，而且可以给出滞留核材料在反应器内部的大致分布^[90]。

在 TGS 技术方面，肖雪夫对层析 γ 扫描技术的原理，机械结构等进行了基础研究，指出层析 γ 扫描技术关键问题是效率矩阵的获取、准直器的设计、等效厚度的计算和层析 γ 扫描技术的适用性，并采用蒙特卡罗方法对准直器的纵向效率均匀性进行了研究，得出在正棱形水平两边填塞三角块形成的六面形准直器最好^[91,92]。张全虎对层析 γ 扫描技术中透射图像的重建算法进行了研究，针对粒子穿过体素的径迹长度分别提出了平均径迹长度迭代法和蒙特卡罗统计迭代法，并对透射测量进行了模拟仿真计算，结果表明蒙特卡罗统计迭代法优于平均径迹长度迭代法^[93-95]。张全虎也分析了 TGS 效率矩阵中的独立矩阵元，采用蒙特卡罗方法进行效率刻度^[96]。目前，原子能院已设计加工了 TGS 样机，正在进行应用研究工作^[97]。

上海交通大学近年来也正在开展关于 TGS 技术的研究。成雨采用蒙特卡罗方法计算 TGS 效率矩阵以替代传统试验方法，在研究过程中发现探头参数对计算结果影响很大，通过不断调整模型得到了与实验值相同的探测效率^[98]。钱楠提出一种可快速确定探测器晶体死层厚度的修正方法，并拟合出探测效率与点源位置及射线能量的函数关系，用于快速求得探测效率矩阵^[99]。翁文庆在蒙特卡罗透射测量方程的基础上对其线性化推导得出可计算的透射图像重建算法。进一步利用多个不同能

量下的 γ 线性衰减系数来拟合发射测量能量下的线性衰减系数，并用计算机模拟方法和实验方法来验证多能探测重建的可行性^[100,101]。

此外，阮兆林等研究了 SGS 原理，推导了不同几何条件下的自吸收系数^[102]。邓景珊等用蒙特卡罗方法模拟了 TGS 的透射和发射测量，指出了 TGS 技术的可行性和准确性^[103]。

中低放废物的 γ 射线扫描技术历经四十余年的研究，目前，SGS 已是成熟的技术，而 TGS 技术也已基本成熟。现阶段世界上对于核废物的 γ 射线扫描技术的研究有以下几个发展趋势：

（1）注重探测精度与探测时间两者的平衡

在对探测技术与方法的理论研究中，更高的探测精度是研究人员首要追求的目标，这也是 SGS 技术向 TGS 技术发展的主要原因。而在实际应用中，面对大量待测的核废物，能够对废物桶进行快速的检测也是非常重要的。但是 TGS 扫描过程复杂，耗时长，这是该技术存在的一个重要问题，也是制约 TGS 技术大规模工业应用的原因之一。因此，近年来有学者开始转向研究改进型的 SGS，这是一种介于 SGS 和 TGS 之间的测量方法，以期期望能够在测量精度和探测时间之间取得平衡并获得更大范围的应用。

（2）进一步采取技术措施来提高测量准确度

对重建算法的研究更加细化，根据研究对象的不同，放射性水平的不同，非均匀程度的不同，研究了多种图像重建算法，以便在不同场合选择最合适的算法来提高测量结果的准确度。

（3）多功能系统开发

将多种功能集成在一套测量系统内，例如：CANBERRA 公司开发了将 SGS 和 TGS 结合在一起的测量系统，可根据测量对象的实际情况选择不同的测量模式^[104]；CANBERRA 公司的 ICIS 系统（Integrated Crate Interrogation System）则是将 SGS 技术和中子探测技术结合在一起^[105]；意大利的 SRWGA 系统则是在 SGS 技术的基础上进行改造，逐步融合了分角度测量的 SGS 以及最先进的 TGS 技术^[106,107]；欧洲仪器公司还将剂量测量装置与 TGS 系统装置结合在一起，使其能够同时对桶内活

度和桶外剂量率进行测量。

(4) 小型化、移动化

实验室用固定式探测系统在现实中是最常见的，但某些场合也需要可移动式的探测系统，例如 LLNL 开发的车载式 TGS 系统，被用于对美国核管会所属的民用核设施（例如核电厂）生产的中低放固体非均匀废物进行车载巡回检测。

综上所述，由于中低放废物处置的紧迫性，对大型包装样品（例如 200L 钢桶）的放射性核素含量其进行准确快速的探测是当前研究的热点。国外的中低放废物 γ 扫描技术经过多年的发展，已形成相对成熟的技术，并已开发出相应的系统装置。我国在此方面的研究起步较晚，研究深度与应用程度还不够。由于传统 SGS 技术固有的系统误差和 TGS 扫描时间过长的问题，改进型 SGS 技术是一种在测量精度和探测时间之间取得平衡的有效途径，具有更大的应用前景。TGS 技术也正朝着提高探测精度、缩短探测时间、装置小型化移动化的趋势发展。

1.3 本文的主要研究内容

通过上述的研究现状可发现：传统的 SGS 技术已相当成熟；TGS 技术在提高精度和缩短探测时间方面还有进一步提升空间；改进型 SGS 技术是一种在精度和时间两者之间取得平衡的有效途径，也是当前的研究趋势，改进型 SGS 技术一般都基于吸收介质均匀分布而放射性核素非均匀分布的假设，目前已提出的几种改进型 SGS 技术都存在测量次数和时间多于传统的 SGS 或者精度不及传统 SGS 的问题。本文将主要针对改进型的 SGS 技术和 TGS 技术开展研究。

传统 SGS 技术的测量误差与放射性核素所在的半径位置有很大关系，由初步研究发现，探测器在不同位置测到的计数率比值与放射源所在半径存在对应关系，并且如果探测器位置选择合理，计数率比值与放射性核素所在的半径存在一一对应关系。这样，通过探测器在不同位置测到的计数率则能够分析确定该断层内核素的半径。基于此，本文提出了一种新的改进型 SGS 技术，即基于等效半径校正的双探测器改进型 SGS 技术。

目前 TGS 技术一般将每层划分为一系列的均匀网格，而 TGS 技术的测量精度往往取决于对“热点”核素的准确测量和定位，如果采用自适应的动态网格对点源附近区域进行网格加密，其它区域采用尺寸较大的粗网格，这样就能采用较少的网格实现对点源的准确定位来提高测量精度。同时网格数的减少，也为 TGS 减少扫描次数带来可能。动网格和自适应加密网格技术已应用于一些成像技术，例如，电阻抗层析成像^[108-110]，电容层析成像^[111]，正电子发射断层扫描 PET^[112]，单光子发射计算机断层扫描 SPECT^[113]，荧光分子断层扫描成像^[114,115]等等，但在 TGS 中还未有应用。

基于以上学术思想，本文进一步开展了以下工作：

(1) 双探测器改进型 SGS 技术理论的建立

推导了基于等效半径校正的双探测器改进型 SGS 技术的理论公式，对该技术的原理与测量系统布置进行了详细的介绍。

(2) 双探测器改进型 SGS 技术的模拟及实验研究

通过模拟计算获得探测器的最佳位置，并对单点源与多点源以及均匀介质与非均匀介质情况进行了模拟扫描与重建，同时针对一非均匀样品进行了实验测量，与 SGS 对比分析了双探测器改进型 SGS 技术的重建结果，对该改进型 SGS 技术进行了验证。

(3) 基于动网格的 TGS 图像重建研究

提出了一种适合 TGS 重建的动网格加密算法，并应用于 TGS 透射与发射重建，对非均匀介质的点源样品进行了 TGS 模拟扫描与动网格重建，与固定网格对比分析了动网格技术在 TGS 中应用的可行性及特点。

(4) 基于动网格发射重建的 TGS 测量优化研究

设置了几种减少转动或平动次数的 TGS 简化测量方案，对均匀介质和非均匀介质进行了模拟扫描，采用动网格技术进行发射重建，分别研究了几种不同简化方案的重建误差变化情况，并通过对比分析最终确定了能在不影响测量精度的同时缩短测量时间的 TGS 测量优化方案。

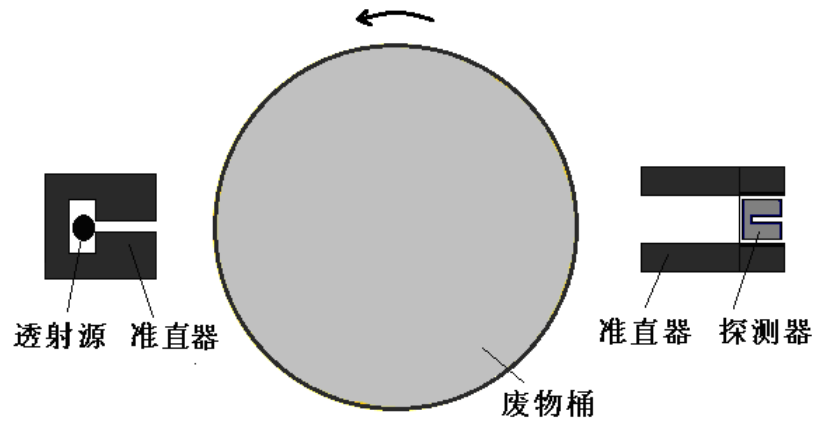
第二章 双探测器改进型 SGS 技术研究

传统的分段 γ 扫描技术 (Segmented gamma scanning, SGS) 在对废物桶进行测量时采用桶内每层介质与放射性核素都均匀分布的假设, 这使得在对非均匀分布的样品进行测量时会出现较大的误差。一般来讲, 核电厂中低放射性废物经过压缩或固化之后贮存于钢桶或水泥桶内, 这样除高密度的金属块外, 其它介质 (例如塑料、棉纱、防护用品等) 的密度差异不会太大, 因此采用桶内每层介质均匀分布的假设相对比较合理。但是, 放射性核素则极易出现不均匀分布的情况, 高活度区域往往以点源或多点源的形式存在, 这样放射性核素的均匀分布假设就存在不合理性, 这也是造成目前 SGS 技术测量精度不高的最主要原因。针对该问题, 本章提出一种新的废物桶探测及活度重建算法, 采用桶内每层介质均匀分布的假设, 并认为放射性核素以等效的环形线源的形式存在, 以解决原有 SGS 技术中放射性核素均匀分布假设带来的测量误差。由于该测量技术在扫描方式与重建原理上是基于原有的 SGS 技术, 因此称之为改进型分段 γ 扫描技术 (Improved segmented gamma scanning, ISGS)。

2.1 改进型分段 γ 扫描技术原理

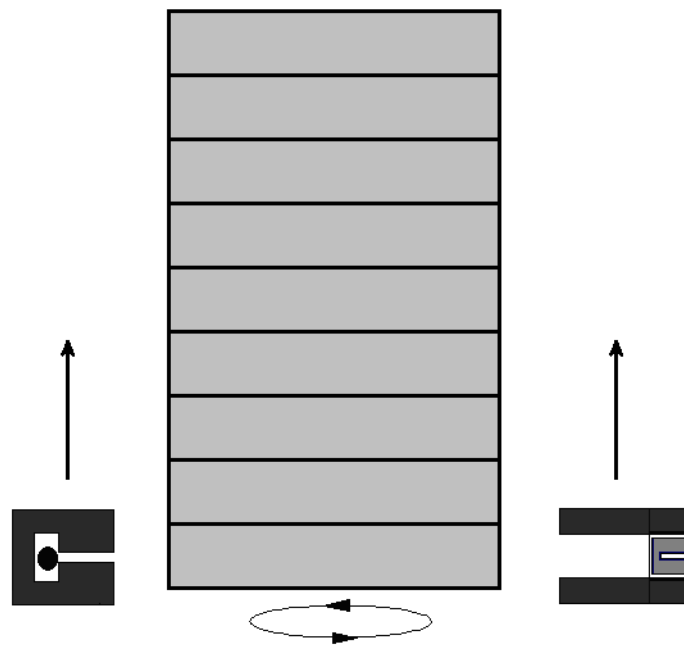
2.1.1 传统型 SGS 扫描及重建原理

如图 2-1 所示, 传统的分段 γ 扫描技术对废物桶进行测量时将废物桶垂直分为多个段层, 假设各段层内填充介质与放射性核素均匀分布。扫描时, 探测器对准废物桶中心, 废物桶以一定转速匀速旋转, 以此来减少桶内介质和放射性核素分布的不均匀度。在测得每一段的计数率后, 分别计算出各层的探测效率和自吸收校正因子, 进而计算出该段层内各核素的活度, 通过对各段层求和得到整个废物桶的核素总量。



(a) 水平截面示意图

(a) The horizontal sectional view



(b) 垂直截面示意图

(b) The vertical sectional view

图 2-1 分段 γ 扫描技术扫描过程示意图

Fig. 2-1 Sketch of scanning process of SGS

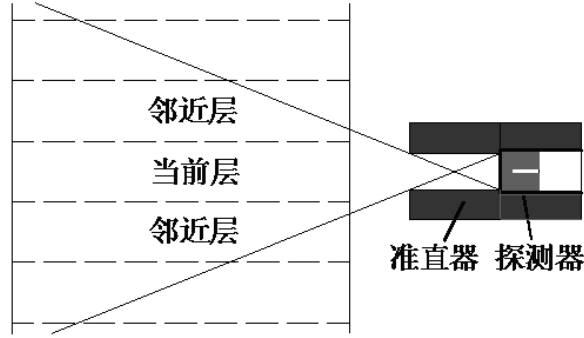


图 2-2 准直器视野示意图

Fig.2-2 Sketch of the field of collimator

一般来说，准直器不能完全排除上下邻近层发出的射线入射到探测器，如图 2-2 所示，探测器不仅能接收到准直器张口对应的当前层发出的 γ 射线，也能接收到邻近层的 γ 射线。一般将上下邻近层对当前层探测器计数的影响称为串扰。假设将整个废物桶垂直划分成 n 层，每层的活度用向量 \mathbf{I} 表示。

$$\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_n)^T \quad (2-1)$$

探测器在每层的计数率用向量 \mathbf{C} 表示，

$$\mathbf{C} = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)^T \quad (2-2)$$

考虑到层间串扰影响，探测器在第 i 层的计数率 C_i 可以表示为：

$$C_i = \sum_{j=1}^n \alpha E_{ij} I_j \quad (2-3)$$

上式中， α 为某一能量 γ 射线对应的分支比， I_j 为第 j 层放射性核素的活度， E_{ij} 表示探测器位于第 i 层高度时第 j 层的放射性核素对探测器的探测效率，此探测效率包含了材料自吸收、几何效率和探测器的本征效率等各方面的因素。

因此，考虑层间串扰影响时，如式 2-4， \mathbf{I} 与 \mathbf{C} 的关系可用传递矩阵 \mathbf{E} 表示，矩阵 \mathbf{E} 即为由 E_{ij} 组成的 $n \times n$ 大小的矩阵。在前面的介绍中，传统的分段 γ 扫描技术是基于废物桶各层介质和放射性核素都均匀分布这个假设的，因此探测效率矩阵 \mathbf{E} 也是基于该假设计算获得的。

$$\mathbf{C} = \alpha \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I} \quad (2-4)$$

对式 2-4 所示的线性方程组求解，即可得到各层的活度，将各层活度相加，即可得到废物桶的总活度。

2.1.2 ISGS 扫描及重建原理

改进型分段 γ 扫描技术 (ISGS) 对介质分布的假设与传统的 SGS 相同，即假设废物桶各段层内介质是均匀分布的，其密度和线性衰减系数相同。通过透射扫描与重建，可获得该层内物质对射线的平均衰减系数或可以换算出平均密度。

但是，本章提出的改进型分段 γ 扫描技术不再采用放射性核素均匀分布的假设，而是将各层的放射性核素等效为一个环形线源。首先对环形线源进行定义，如图 2-3 所示，ISGS 对废物桶进行扫描时同传统的 SGS 一样，废物桶以一定转速匀速旋转，在各段层介质是均匀分布的情况下，如果测量时间足够长或者废物桶旋转的圈数足够多，那么每层中相同半径的所有点源相对于探测器将具有相同的测量属性，因此可以将某一半径上的所有点源看作是均匀分布在该半径上的环形线源。这样，在该层内核素的二维不均匀分布就可以转换为环形线源在半径上的不均匀分布。

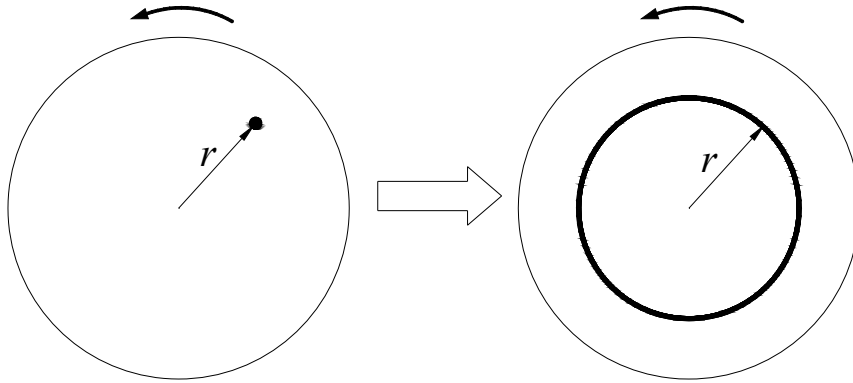


图 2-3 用环形线源代替点源的示意图

Fig.2-3 Replacing a point source with an equivalent ring source

在一个段层内，探测器测到的全能峰计数率可用以下公式表示：

$$C = \alpha \int_0^R I_{p_r} E(r) dr \quad (2-5)$$

其中, C 为探测器测到的计数率; α 为该能量射线对应的分支比; R 为废物桶半径; I 为层内对应的放射性核素总活度; p_r 为该核素活度在半径 r 上的概率密度函数, 显然 $\int_0^R p_r dr = 1$; $E(r)$ 为半径为 r 的圆形线源对探测器的全能峰探测效率, 该探测效率与探测器参数、射线能量、半径 r 、桶内介质密度等有关。

传统的分段 γ 扫描技术除假设一层内物质均匀分布外, 同时假设核素均匀分布, 那么概率密度函数 p_r 为:

$$p_r = 2r / R^2 \quad (2-6)$$

因此, 全能峰计数率为:

$$C = \alpha I \cdot \frac{2}{R^2} \int_0^R r E(r) dr \quad (2-7)$$

由上式可知, 传统分段 γ 扫描技术的探测效率是各个半径圆形线源探测效率对半径的加权平均。然而, 由于 $E(r)$ 在半径不同时变化很大, 当桶内核素不均匀分布时, 用平均的探测效率去进行重建计算必然会产生较大的误差。

如果不采用核素均匀分布的假设, 即在概率密度函数 p_r 未知的情况下, 仅仅根据式 2-5 显然是无法求解活度 I 的。为此, 与传统的 SGS 技术相比, ISGS 技术的扫描方式进行了变化, 采用两个相同的探测器进行扫描, 如图 2-4 所示, 测量时废物桶仍以一定转速匀速旋转, 采用两个相同的探测器对废物桶同时进行测量。探测器 A 的轴线对准废物桶中心, 而探测器 B 的轴线偏离废物桶中心的距离为 L 。如果没有两个探测器, 可以采用一个探测器进行先后测量, 即首先在 A 位置进行测量, 测量结束后平移到 B 位置再进行测量。

如果在某一段层内, 放射性核素仅以一个环形线源存在, A、B 两个探测器或同一个探测器在 A、B 两个位置进行扫描, 得到的计数率分别为 C_A 和 C_B , 则有:

$$C_A = \alpha I E_A(r) \quad (2-8A)$$

$$C_B = \alpha I E_B(r) \quad (2-8B)$$

上式中, $E_A(r)$ 和 $E_B(r)$ 分别为半径为 r 的环形线源对探测器 A 和 B 的全能峰探测效率, 该探测效率与探测器参数、射线能量、半径 r 、桶内介质密度等有关。

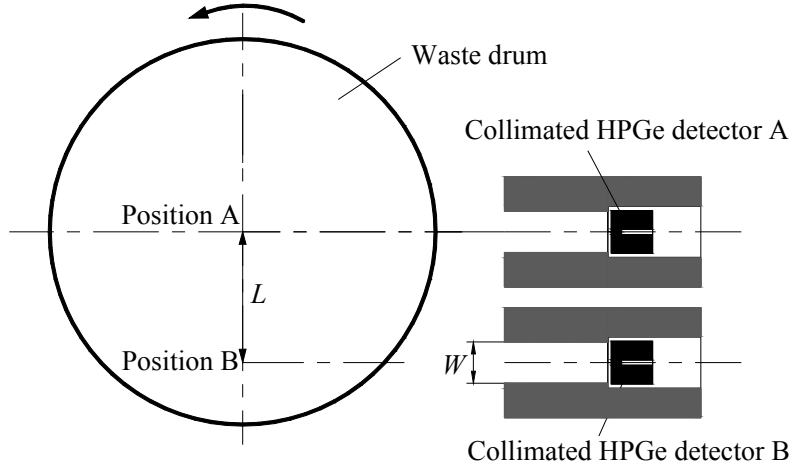


图 2-4 ISGS 探测器布局示意图

Fig.2-4 Schematic arrangement of the two detectors in ISGS

定义相对探测效率函数 $F(r)$ 为偏心探测效率与中心探测效率的比值：

$$F(r) = \frac{E_B(r)}{E_A(r)}$$

那么将式 2-8B 和式 2-8A 两式相除，有：

$$\frac{C_B}{C_A} = \frac{E_B(r)}{E_A(r)} \quad (2-9)$$

即 C_B/C_A 的值应为相对探测效率函数 $F(r)$ 曲线上的一点。

在进行效率刻度时，先将不同半径的环形线源对探测器 A 与探测器 B 分别进行刻度，再计算出 $F(r)$ 。如果 $F(r)$ 为单调函数，则通过探测器 B 与探测器 A 的计数率的比值 C_B/C_A 可以唯一确定环形线源的半径 r 。那么可以准确地获得该半径下的全能峰探测效率 $E_A(r)$ 或 $E_B(r)$ ，进而计算出活度 I 。

可见，ISGS 可以准确地测量单点源或同一半径的多点源情况，而传统的 SGS 技术在准确测量点源上是存在缺陷的。

下面再进一步分析多环形线源的情况，探测器 A 与探测器 B 测到的计数率为各环形线源计数率的积分：

$$C_A = \alpha I \int_0^R p_r E_A(r) dr \quad (2-10A)$$

$$C_B = \alpha I \int_0^R p_r E_B(r) dr \quad (2-10B)$$

将两式相除，

$$\frac{C_B}{C_A} = \frac{\alpha I \int_0^R p_r E_B(r) dr}{\alpha I \int_0^R p_r E_A(r) dr} = \frac{\int_0^R p_r E_B(r) dr}{\int_0^R p_r E_A(r) dr} \quad (2-11)$$

由于 p_r , $E_A(r)$ 和 $E_B(r)$ 均大于等于零，那么显然

$$F_{\min}(r) \leq \frac{C_B}{C_A} = \frac{\int_0^R p_r E_B(r) dr}{\int_0^R p_r E_A(r) dr} \leq F_{\max}(r) \quad (2-12)$$

即 C_B/C_A 的值应大于等于 $F(r)$ 函数的最小值且小于等于 $F(r)$ 函数的最大值，由于 $F(r)$ 为连续函数，那么在 $F(r)$ 曲线上必然存在一点，使得

$$F(r') = \frac{E_B(r')}{E_A(r')} = \frac{C_B}{C_A} \quad (2-13)$$

这里，满足上式的半径 r' 称为等效半径。如果 $F(r)$ 为单调函数，通过探测器 B 与探测器 A 计数率的比值 C_B/C_A 也同样可以唯一确定等效半径 r' 。然后，将一层内的所有放射性核素看作分布在等效半径 r' 上的环形线源，按照此等效半径可计算得到准确的探测效率，进而计算得到一层内核素的总活度。

至此，可以发现 ISGS 与传统的 SGS 的差别在于，ISGS 没有采用核素均匀分布的假设，而是通过等效半径的形式将一层内的所有放射性核素叠加到该半径下的环形线源上，通过两个探测器计数率的比值来确定等效半径，从而比较准确地得到探测效率。实际上，传统的 SGS 是 ISGS 的一种特殊工况，核素均匀分布时也存在一定的等效半径。

另外，从扫描过程上来看，传统的 SGS 只需要对废物桶进行对心扫描，而 ISGS 比传统的 SGS 要增加一次偏心扫描。测量时间上，若同时采用 A、B 两个探测器，则不会增加测量时间，若只有一个探测器，则测量时间会加倍。

同样，ISGS 也存在层间串扰的问题。假设将整个废物桶划分成 n 层，每层的活度用向量 I 表示。

$$\mathbf{I} = (I_1, I_2, \dots, I_n)^T \quad (2-14)$$

探测器 A 的计数率用向量 \mathbf{CA} 表示,

$$\mathbf{CA} = (CA_1, CA_2, CA_3, \dots, CA_n)^T \quad (2-15)$$

如式 2-16, \mathbf{I} 与 \mathbf{CA} 的关系可用传递矩阵 \mathbf{EA} 表示, 矩阵中的各元素 EA_{ij} 表示探测器 A 位于第 i 层高度时第 j 层的放射性核素对探测器 A 的探测效率, 此探测效率包含了材料自吸收、几何效率和探测器的本征效率等各方面的因素。

$$\mathbf{CA} = \alpha \cdot \mathbf{EA} \cdot \mathbf{I} \quad (2-16)$$

即

$$\begin{cases} CA_1 = \alpha(EA_{11}I_{A1} + EA_{12}I_{A2} + \dots + EA_{1n}I_{An}) \\ CA_2 = \alpha(EA_{21}I_{A1} + EA_{22}I_{A2} + \dots + EA_{2n}I_{An}) \\ \vdots \\ CA_n = \alpha(EA_{n1}I_{A1} + EA_{n2}I_{A2} + \dots + EA_{nn}I_{An}) \end{cases} \quad (2-17)$$

$\alpha I_{Ai} \cdot EA_{ii}$ 可认为是探测器 A 在第 i 层时记录到的来自第 i 层的放射性核素的计数率。

同样, 对于探测器 B 有以下方程组

$$\mathbf{CB} = \alpha \cdot \mathbf{EB} \cdot \mathbf{I} \quad (2-18)$$

即

$$\begin{cases} CB_1 = \alpha(EB_{11}I_{B1} + EB_{12}I_{B2} + \dots + EB_{1n}I_{Bn}) \\ CB_2 = \alpha(EB_{21}I_{B1} + EB_{22}I_{B2} + \dots + EB_{2n}I_{Bn}) \\ \vdots \\ CB_n = \alpha(EB_{n1}I_{B1} + EB_{n2}I_{B2} + \dots + EB_{nn}I_{Bn}) \end{cases} \quad (2-19)$$

$\alpha I_{Bi} \cdot EB_{ii}$ 可认为是探测器 B 在第 i 层时记录到的来自第 i 层的放射性核素的计数率。那么, 令

$$F(r_i') = \frac{E_B(r_i')}{E_A(r_i')} = \frac{I_{Bi} \cdot EB_{ii}}{I_{Ai} \cdot EA_{ii}} \quad (2-20)$$

第 i 层的等效半径 r_i' 就可以确定。将第 i 层内的所有放射性核素看作分布在等效半径 r_i' 上的圆形线源。在已知各层等效半径和密度的情况下 (密度可通过称重平均或透射测量求得), 即可求得传递矩阵 \mathbf{EA} 和 \mathbf{EB} 中各元素的值。故通过等效半径

不断修正传递矩阵,使矩阵中各个探测效率的值更符合真实情况,可以得到更加准确的活度信息。

根据以上分析,ISGS 的具体算法如下:

(1) 采用废物桶各层介质和放射性核素都均匀分布的初始假设,求得初始矩阵 $EA^{(1)}$ 和 $EB^{(1)}$,通过解方程组 2-16 和 2-18,得到初始活度 $I_A^{(1)}$ 和 $I_B^{(1)}$ 。

(2) 将 $EA^{(k)}$, $EB^{(k)}$, $I_A^{(k)}$ and $I_B^{(k)}$ 代入式 2-20, 计算 $F(r_i')^{(k+1)}$ ($i=1,2,3,\dots,n$) 的值, 得到各层等效半径 $r_i'^{(k+1)}$ ($i=1,2,3,\dots,n$), 再计算新的传递矩阵 $EA^{(k+1)}$ 和 $EB^{(k+1)}$, 通过解方程组 2-16 和 2-18, 得到 $I_A^{(k+1)}$ 与 $I_B^{(k+1)}$ 。

(3) 重复第 2 步, 达到一定循环步数或等效半径与活度值达到一定精度后终止。

2.1.3 ISGS 重建软件

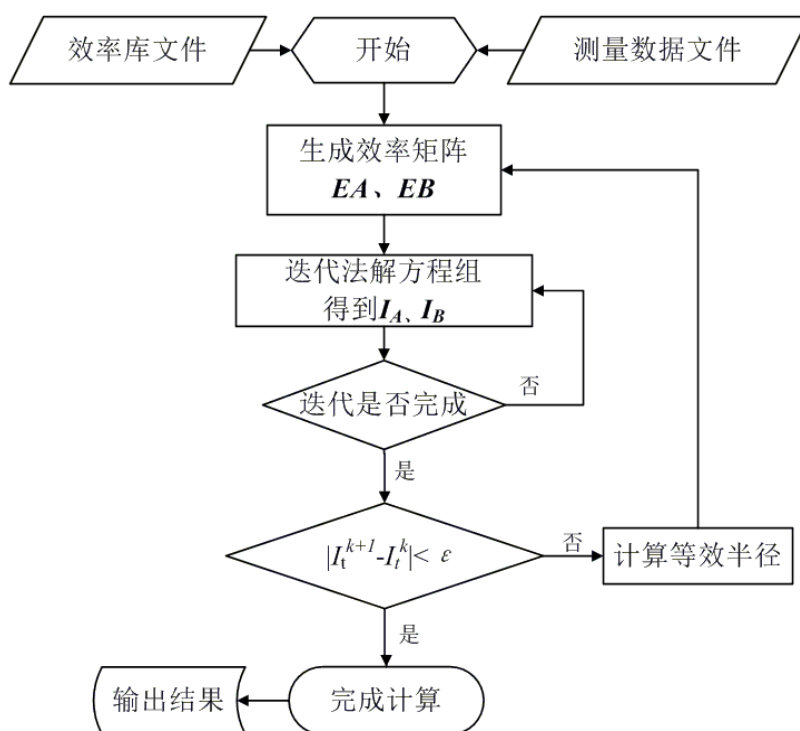


图 2-5 改进型双探测器 SGS 程序流程图

Fig.2-5 Program flowchart of ISGS

按照前面所述的双探测器 ISGS 技术的原理和算法编写了相应的重建软件，程序流程图如图 2-5 所示。首先读入效率库文件和测量数据文件，程序将自动根据能量和密度进行插值计算 $E_A(r)$ 、 $E_B(r)$ 和 $F(r)$ 函数，并生成初始矩阵 $EA^{(1)}$ 和 $EB^{(1)}$ ，通过解方程组 2-16 和 2-18，得到初始活度 $I_A^{(1)}$ 和 $I_B^{(1)}$ 。这里解方程组均采用 ML-EM^[116] 算法，迭代步数可根据迭代的残差情况调节，这里设为 200 步。根据得到的活度和传递矩阵，计算各层等效半径，根据等效半径计算新的传递矩阵，得到新的活度，重复此循环，直到活度值达到一定精度后终止。

该重建软件由 VC++ 6.0 编写，其界面如图 2-6 所示，在重建计算的过程中可随迭代的推进实时显示等效半径和各层活度值等信息。该软件除可进行双探测器 ISGS 技术的透射与发射重建计算外，也可进行传统 SGS 技术的重建计算。

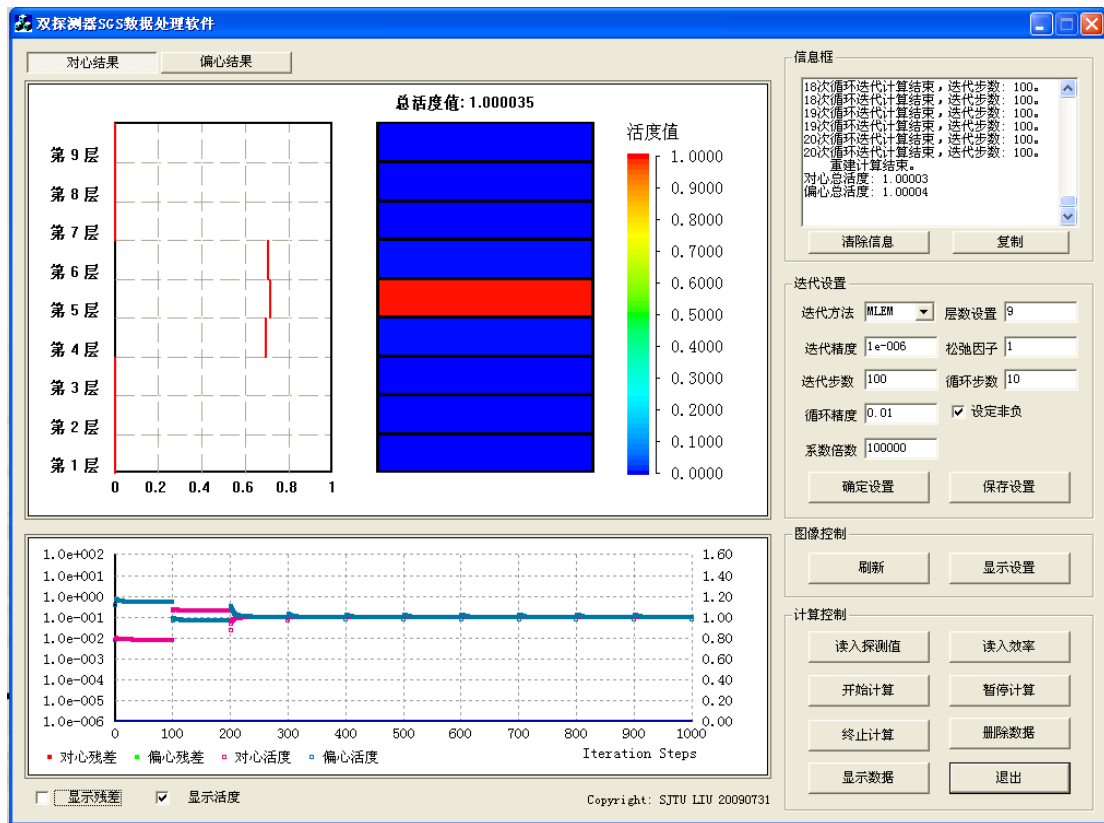


图 2-6 改进型双探测器 SGS 数据处理软件界面

Fig.2-6 ISGS data processing software interface

2.2 ISGS 系统布置与效率计算

在上面描述的 ISGS 技术中, 探测器需要在一个偏心的位置进行测量, 相对探测效率函数 $F(r)$ 与该位置的选择有直接的关系, 因此首先需要通过效率计算选择探测器的最佳位置。

效率刻度是 γ 光谱测量的一项重要工作。本文采用蒙特卡罗方法进行效率刻度。蒙特卡罗方法可以模拟由源发出的单个光子在各种介质中输运、与各种介质相互作用的随机过程以及随后产生的所有次级粒子(包括次级光子和各种带电粒子)在介质中输运、与介质相互作用的随机过程, 通过跟踪大量的由源发出的一定能量的单个光子, 可以获得服从统计分布的该能量的探测效率。蒙特卡罗方法描述简单, 只要跟踪的光子数足够多, 计算得到的探测效率就可以在很小的误差范围内与真值吻合。在效率计算的过程中分别计算了不同密度、不同能量、不同半径的 γ 环形线源对不同位置探测器的探测效率。

2.2.1 ISGS 系统设置

效率刻度针对实际的测量系统, 探测器、透射源和废物桶的位置设置如图 2-7 所示。核电厂中标准 200L 废物桶直径约 56cm, 高约 90cm, 桶壁厚 0.12cm。将废物桶分为 9 层, 每层高 10cm。探测器前端准直器长 15cm、准直器前端面距桶壁 10cm, 准直器为 6×6cm 的正方孔。探测器采用 CANBERRA 公司生产的 P 型同轴高纯锗探测器, 高纯锗晶体被厚 0.15cm 的铝壳包围, 晶体直径 6.2cm, 长度 5.95cm, 冷指井直径 0.8cm, 冷指井长度 4.5cm, 死层厚度约 0.045cm。整个探头被厚 4cm 的环形铅屏蔽层包裹。

根据前面的 ISGS 理论及重建方法的描述, ISGS 要获得较好的测量结果首先需要确定合适的探测器偏心测量位置 B, 并计算相对探测效率 $F(r)$ 函数曲线。优先的参考标准为 $F(r)$ 函数曲线要有较好的单调性, 并且该单调性具有与材料或密度的无关性。因此, 效率刻度时分别计算了探测器 B 偏离桶中心距离 $L=10.5, 14, 17.5, 21$,

24.5 cm 这 5 个不同探测器位置的 $E_A(r)$ 和 $E_B(r)$ ，得到了 $F(r)$ 函数曲线。

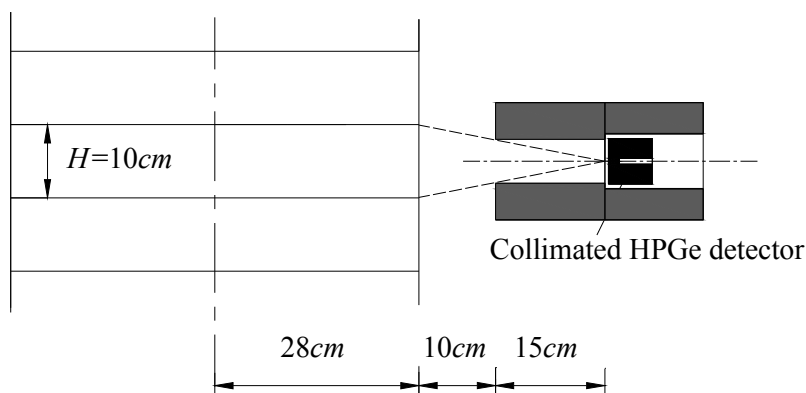


图 2-7 探测系统位置示意图

Fig.2-7 Schematic model of measurement system

效率曲线的计算采用蒙特卡罗程序 MCNP-4C。由于桶内各种有机材料对 γ 射线的质量衰减系数非常接近，如图 2-8 所示，故假设桶内填充材料为 H_2O 。考虑到废物桶每层有一定高度，因此计算时采用的是与一层高度相同的理想线源。计算采用 F8 卡，废物桶密度设为 0.3 g/cm^3 ，能量为 ^{137}Cs 的特征能量 0.6617 MeV ，准直器重要性设为 1。

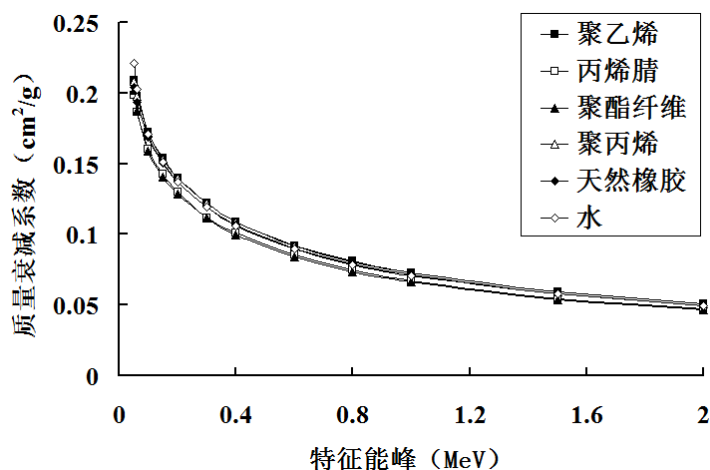


图 2-8 各种有机材料的质量衰减系数

Fig. 2-8 Mass attenuation coefficients of different matrixes

2.2.2 效率刻度分析

图 2-9 为密度为 0.3 g/cm^3 时的 $E_A(r)$ 曲线，即环形线源对探测器 A 的探测效率随半径的变化曲线。由图可知，在此密度之下，探测效率随半径增加逐渐减小。探测效率的变化趋势主要受桶内物质吸收作用以及准直器作用两方面的影响，由于准直器孔较小，在位置 A 时，随着半径的增加，源在探测器视野内的几率变小，但被桶内物质吸收衰减的份额也变小，但由于密度较低，物质吸收对于探测效率的影响没有准直器的影响大，所以探测效率呈下降趋势。当桶内物质密度变大，物质吸收对于探测效率的影响大于准直器的影响时，探测效率则会呈上升趋势。这也说明了，如果按照传统的 SGS 方法，假设每层放射源均匀分布，而忽略探测效率随放射源所在半径位置的变化，则必然带来较大误差。

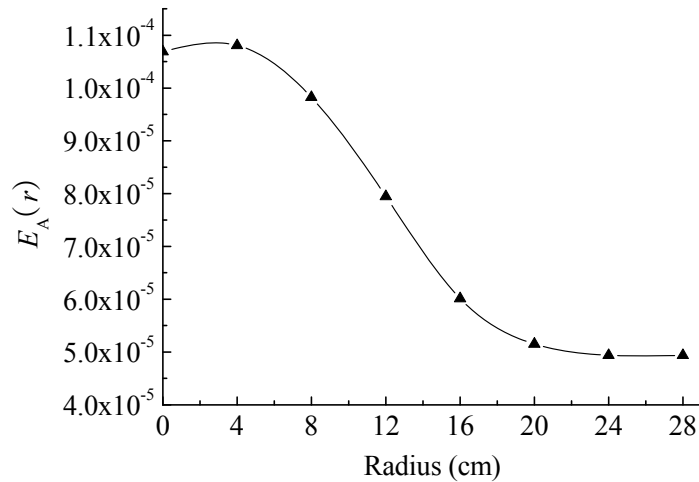


图 2-9 密度为 0.3 g/cm^3 时的 $E_A(r)$ 曲线

Fig.2-9 $E_A(r)$ as a function of radial source position ($\rho=0.3 \text{ g/cm}^3$)

图 2-10 为探测器 B 在不同位置时的 $E_B(r)$ 曲线，即环形线源对探测器 B 的探测效率随半径的变化曲线。当探测器轴线偏离桶中心较大距离时，例如 $L=17.5, 21.0, 24.5 \text{ cm}$ ，随着半径的增加，源在探测器视野内的几率变大，所以探测效率呈上升趋势。

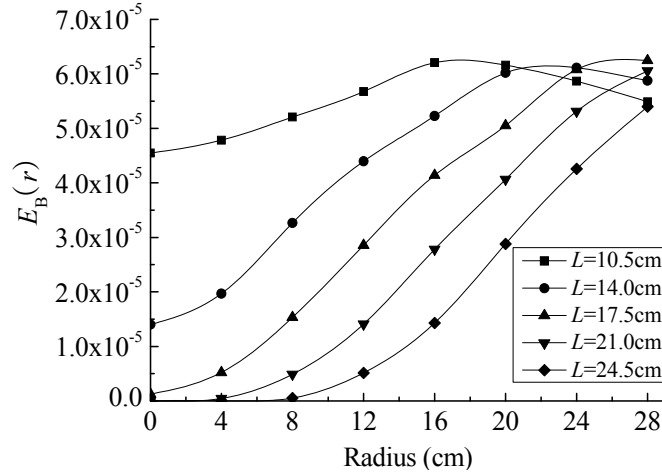
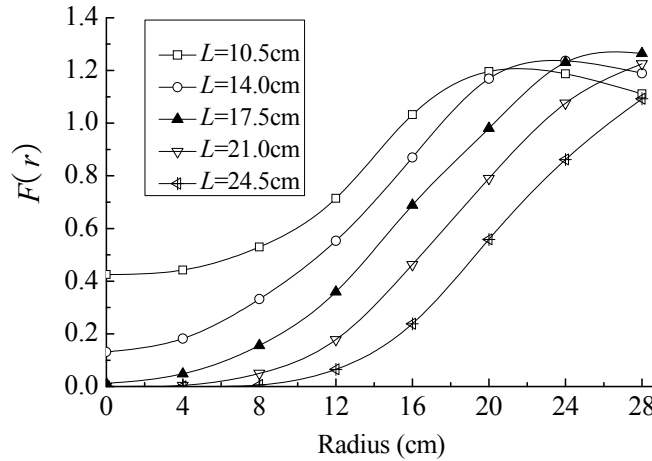
图 2-10 探测器 B 在不同位置时的 $E_B(r)$ 曲线 ($\rho=0.3 \text{ g/cm}^3$)Fig.2-10 $E_B(r)$ at different Detector B positions as a function of radial source position ($\rho=0.3 \text{ g/cm}^3$)图 2-11 探测器 B 在不同位置时的 $F(r)$ 曲线Fig.2-11 $F(r)$ at different Detector B positions as a function of radial source position

图 2-11 是探测器 B 在不同位置时的 $F(r)$ 曲线,即环形线源的偏心探测效率与中心探测效率的比值随半径的变化曲线。等效半径只有在 $F(r)$ 是单调函数时才能唯一确定, $L=17.5, 21, 24.5\text{cm}$ 都满足单调的要求。但是,考虑到曲线在较大斜率时反推等效半径精度较高,且 $L=17.5\text{cm}$ 时的曲线在整个半径范围内都有合适的斜率和取值范围。而另外的曲线,如 $L=14\text{cm}$ 时曲线在 20 至 28cm 区间内分布比较平坦, $L=21\text{cm}$ 或 $L=24.5\text{cm}$ 时曲线在 0 至 8cm 区间内分布比较平坦。因此,选择 $L=17.5\text{cm}$

作为探测器 B 的最佳位置。

同时，为研究桶内物质密度对 $F(r)$ 曲线的影响，分别计算了 $L=17.5\text{cm}$ 时不同物质密度下的 $F(r)$ 曲线。由图 2-12 可以看出，在各种密度下 $F(r)$ 曲线基本都是单调递增的，各曲线比较靠近。并且，当密度变大时，曲线尾端的单调性更好。因此，探测器偏心位置选择在 $L=17.5\text{cm}$ 时 $F(r)$ 曲线的单调性也不受桶内物质密度的影响。

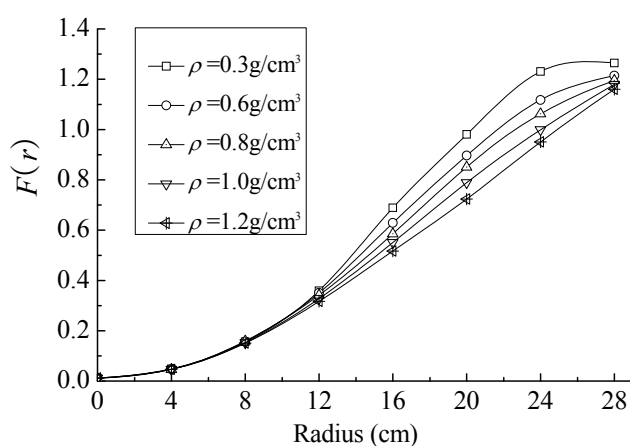


图 2-12 不同密度下的 $F(r)$ 曲线 ($L=17.5\text{ cm}$)

Fig.2-12 $F(r)$ at different densities at $L=17.5\text{ cm}$

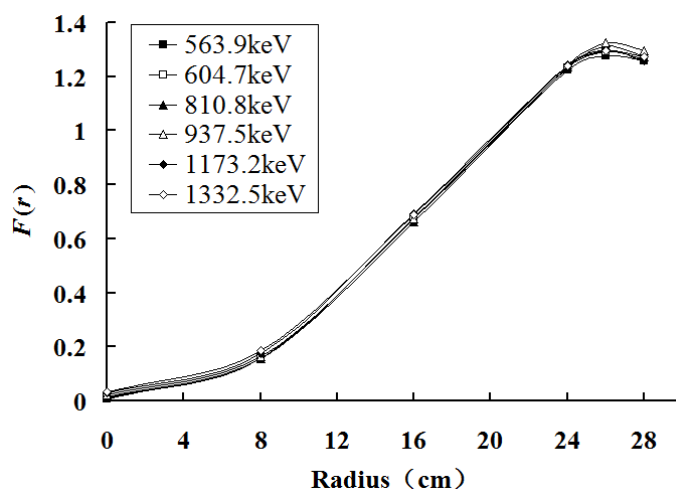


图 2-13 不同射线能量下的 $F(r)$ 曲线 ($L=17.5\text{ cm}$)

Fig.2-13 $F(r)$ at different energy at $L=17.5\text{ cm}$

以上是用 ^{137}Cs 的特征能量 0.6617MeV 时计算得到的 $F(r)$ 曲线, 为了考察其它核素及其特征能峰对 $F(r)$ 曲线单调性的影响, 又选择了 ^{122}Sb 、 ^{134}Cs 、 ^{58}Co 、 $^{110}_{\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{60}Co 在密度为 0.3 g/cm^3 的物质进行了效率计算, 对应的特征能量依次分别为: 0.5639MeV 、 0.6407MeV 、 0.8108MeV 、 0.9375MeV , ^{60}Co 选择了 1.1732MeV 与 1.3325MeV 两种。 $F(r)$ 曲线如图 2-13 所示, 可以发现这些曲线非常接近, 这说明此时 $F(r)$ 曲线的单调性也不受射线能量的影响。

通过以上分析, 后续的计算及重建都选取 $L=17.5\text{cm}$ 作为探测器 B 的最佳位置。

2.3 ISGS 模拟扫描及重建结果分析

为验证双探测器 ISGS 方法的有效性和准确性, 对不同密度介质、不同位置的 ^{137}Cs 点源采用蒙特卡罗方法进行了模拟扫描, 并同传统 SGS 方法的重建结果进行了对比分析。

2.3.1 均匀介质单点源重建结果

单点源是放射性核素非均匀分布的极端情况, 传统的 SGS 在测量单点源时往往会带来极大误差, 因此先分析单点源的情况。

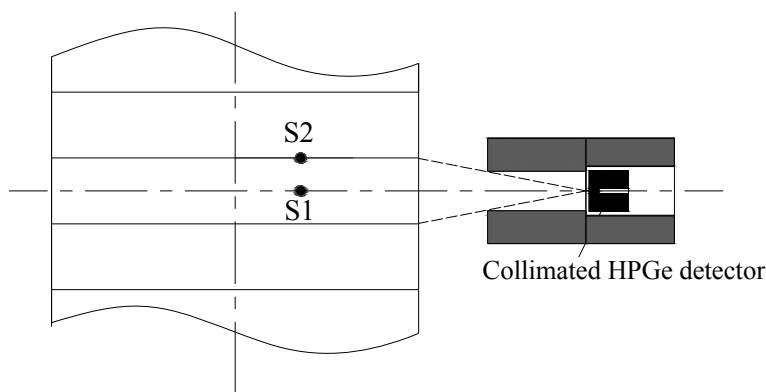


图 2-14 两种点源的示意图

Fig.2-14 Sketch map of two kinds of point sources

首先针对均匀介质的情况，对 4 种不同密度的介质、8 个不同半径位置、2 种不同垂直高度的点源进行了模拟。4 种不同密度分别是 0.3, 0.6, 1.0, 1.5g/cm³。8 个不同半径位置分别是半径 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28cm。2 种不同高度的点源分别是位于层内中心高度位置的点源 S1 和位于两层交界位置的点源 S2，如图 2-14 所示。

表 2-1 位于层中心的 12cm 半径位置的点源的重建结果
Tab.2-1 Results of the first six loops for the case of a point source

循环 次数	$\rho=0.3 \text{ g/cm}^3$		$\rho=0.6 \text{ g/cm}^3$	
	$r' \text{ (cm)}$	$I_{\text{measured}} / I_{\text{true}}$	$r' \text{ (cm)}$	$I_{\text{measured}} / I_{\text{true}}$
1	-	1.33	-	1.16
2	12.31	0.95	12.24	0.95
3	12.40	0.95	12.40	0.96
4	12.40	0.95	12.39	0.96
5	12.40	0.95	12.39	0.96
循环 次数	$\rho=1.0 \text{ g/cm}^3$		$\rho=1.5 \text{ g/cm}^3$	
	$r' \text{ (cm)}$	$I_{\text{measured}} / I_{\text{true}}$	$r' \text{ (cm)}$	$I_{\text{measured}} / I_{\text{true}}$
1	-	0.87	-	0.56
2	12.78	0.94	12.60	0.92
3	12.64	0.94	12.55	0.92
4	12.66	0.94	12.56	0.92
5	12.66	0.94	12.55	0.92

在 ISGS 重建过程中，对等效半径的求解需要经过若干次循环迭代，表 2-1 列出了 4 种密度下位于层中心的半径位置为 12cm 的点源在不同循环次数下的重建结果。活度重建结果以测量值与真实值的比值 ($I_{\text{measured}} / I_{\text{true}}$) 的形式给出，如式 2-21，测量值 I_{measured} 即为求解探测器 A 的方程组 2-16 得到的各层活度值的总和。

$$I_{\text{measured}} = (1, 1, 1, \dots, 1)(I_{A1}, I_{A2}, I_{A3}, \dots, I_{A9})^T = \sum_{i=1}^9 I_{Ai} \quad (2-21)$$

重建活度的相对误差定义为：

$$\Delta I = \frac{I_{measured} - I_{true}}{I_{true}} \times 100\% \quad (2-22)$$

从表 2-1 中可以看出，一般经过 3 到 4 个循环之后，等效半径和活度值就基本不再变化或者变化很小，并且等效半径的误差在 $\pm 0.7\text{cm}$ 以内。重建得到的活度与真实活度的比值在 4 个密度下依次为 0.95、0.96、0.94、0.92，即相对误差在 8% 以内。

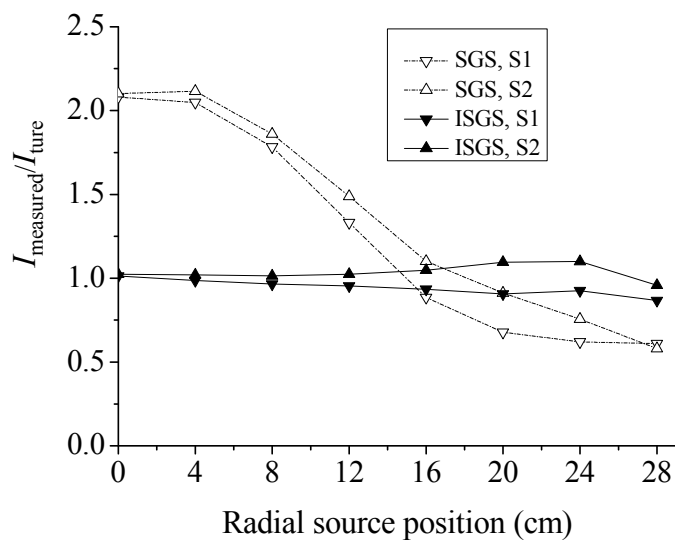
下面对不同半径位置的点源重建结果进行分析，图 2-15 至 2-18 为 4 种不同密度下的重建活度与等效半径的分布情况。图中虚线为传统 SGS 的重建结果，实线为 ISGS 的重建结果。在同一个半径下，分为层内中心高度位置的点源 S1 与位于两层交界位置的点源 S2 两种情况。

由图 2-15 与图 2-16 可知，当介质密度为 0.3g/cm^3 和 0.6g/cm^3 时，传统的 SGS 重建获得的活度随着点源半径的增大呈明显的下降趋势，靠近桶中心的点源重建值大于真实值，靠近桶壁的点源重建值小于真实值，尤其密度为 0.3g/cm^3 时的下降趋势更明显。在 0.3g/cm^3 时，SGS 重建得到的靠近桶中心的点源的活度比值超过 2，即相对误差超过 100%；靠近桶壁处活度比值接近 0.5，即相对误差达到 -50%。在 0.6g/cm^3 时，靠近桶中心点源的活度比值达到 1.6，即相对误差达到 60%；靠近桶壁处活度比值小于 0.8，即相对误差超过 -20%。然而，ISGS 的重建误差与之相比有了明显的降低，无论是 S1 点源还是 S2 点源，在整个半径范围内， 0.3g/cm^3 密度下的重建活度比值在 0.9 至 1.1 之间，即相对误差在 $\pm 10\%$ 范围内； 0.6g/cm^3 密度下的重建活度比值基本在 0.85 至 1.15 之间，即相对误差在 $\pm 15\%$ 范围内。

当密度为 1.0g/cm^3 时，如图 2-17 所示，两种探测方法的重建结果比较接近，SGS 的重建活度比值范围为 0.75 至 1.2，ISGS 的重建活度比值范围为 0.8 至 1.2 之间，即重建活度的相对误差范围为 $\pm 20\%$ 。

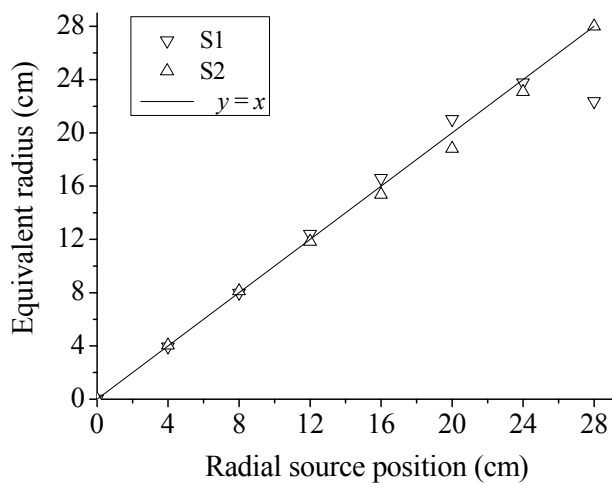
当密度增加到 1.5g/cm^3 时，重建结果如图 2-18 所示。传统的 SGS 重建结果随着点源半径的增大呈明显的上升趋势，靠近桶中心的点源重建值小于真实值，靠近桶壁的点源重建值大于真实值，活度比值范围为 0.4 至 1.8，即相对误差的范围为 -60% 至 80%。然而，ISGS 的重建活度比值范围为 0.75 至 1.26，相对误差约为 $\pm 25\%$ ，

明显低于 SGS 的重建误差。



(a) 重建活度

(a) The reconstruction activity

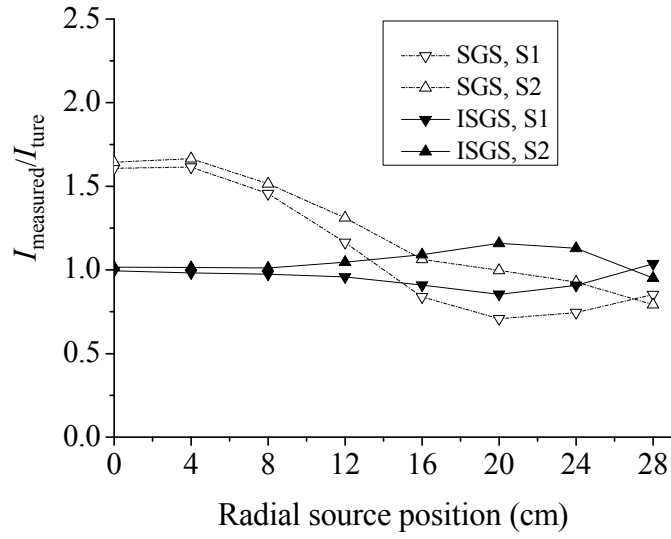


(b) 等效半径

(b) The equivalent radius

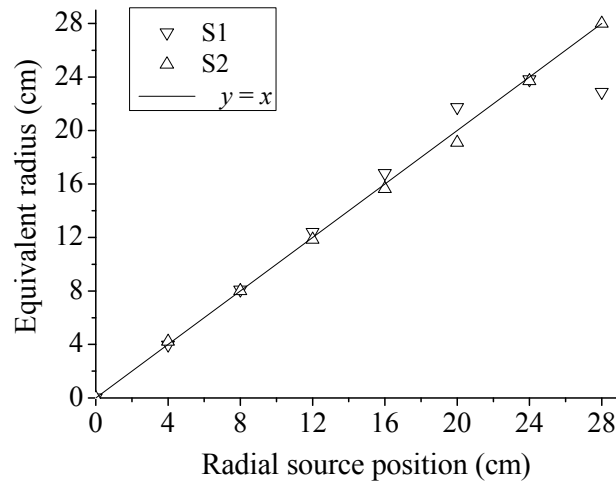
图 2-15 均匀介质情况下 ($\rho = 0.3 \text{ g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果

Fig.2-15 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of homogenous matrices at $\rho = 0.3 \text{ g/cm}^3$



(a) 重建活度

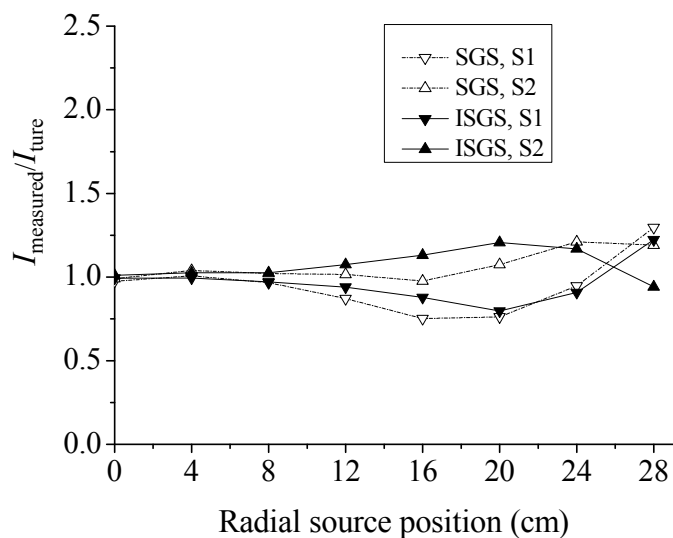
(a) The reconstruction activity



(b) 等效半径

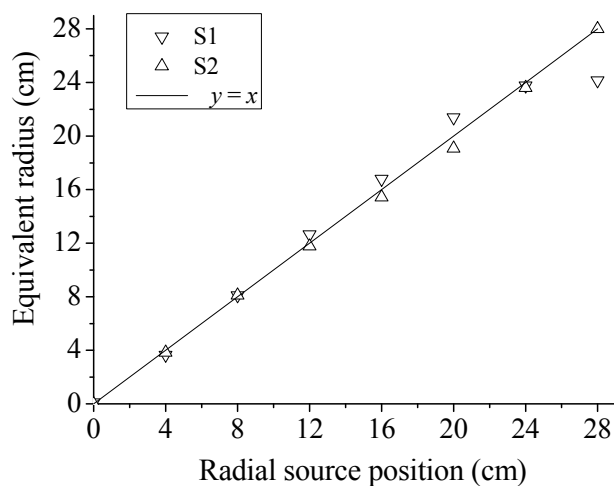
(b) The equivalent radius

图 2-16 均匀介质情况下 ($\rho = 0.6 \text{ g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果Fig.2-16 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of homogenous matrices at $\rho = 0.6 \text{ g/cm}^3$



(a) 重建活度

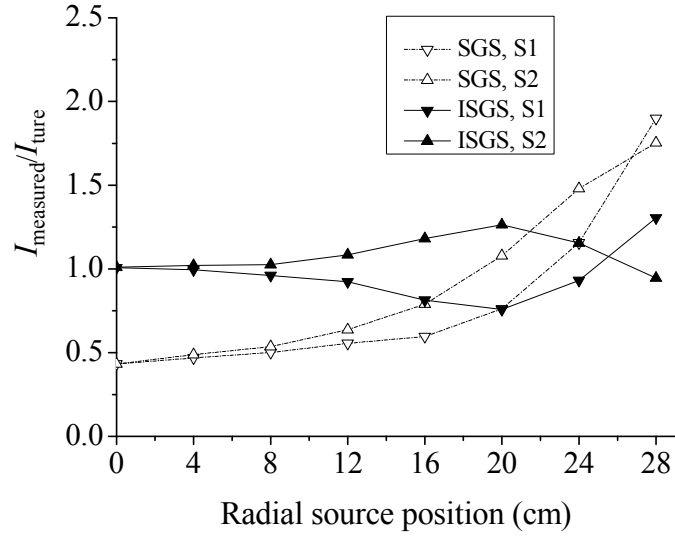
(a) The reconstruction activity



(b) 等效半径

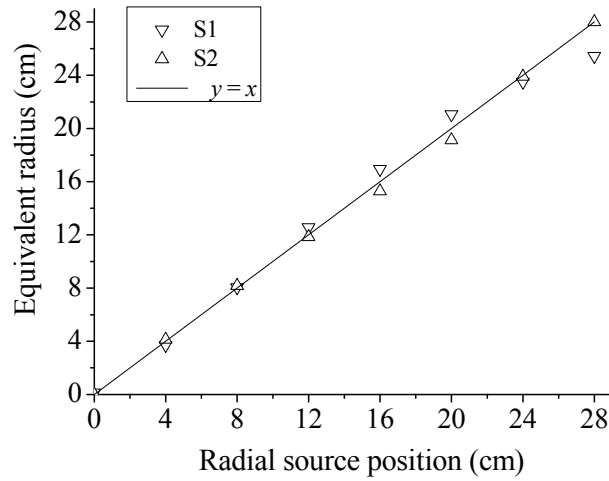
(b) The equivalent radius

图 2-17 均匀介质情况下 ($\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果Fig.2-17 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of homogenous matrices at $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$



(a) 重建活度

(a) The reconstruction activity



(b) 等效半径

(b) The equivalent radius

图 2-18 均匀介质情况下 ($\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果Fig.2-18 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of homogenous matrices at $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$

由于探测器计数率主要受桶内物质吸收作用以及准直器准直作用两方面的影响，如准直器开孔相对较小，随着半径的增加，源在探测器视野内的几率变小，会

导致计数率变小；但随着半径的增加，放射源发出的射线被桶内物质吸收衰减的份额也变小，这会导致计数率变大。当密度为 0.3g/cm^3 和 0.6g/cm^3 时，物质吸收对于计数率的影响没有准直器的影响大，所以传统 SGS 的重建结果呈下降趋势。当密度为 1.5g/cm^3 时，物质吸收对于计数率的影响大于准直器的影响，所以传统 SGS 的重建结果呈上升趋势。可以预见，当密度大于 1.5g/cm^3 时，其重建结果上升趋势会更明显。这个现象也反应了传统的 SGS 在对放射性核素极不均匀的样品进行测量时存在的缺陷，而 ISGS 则不存在这种误差特征。

对于等效半径，在 4 种不同密度下它与实际半径的函数关系均接近于 $y=x$ ，这说明 ISGS 对单点源的情况能够在较少的循环步数内比较准确地得到等效半径，且接近于真实的点源半径。由此可见，ISGS 能够比较准确地获得点源所在的半径，而不是如传统的 SGS 假设核素均匀分布，因此对于核素不均匀分布，尤其是点源情况，能够更准确地计算探测效率，从而大大提高重建的精度。

对比位于层中心高度的点源 S1 与位于两层交界位置的点源 S2 的重建结果，前者的重建结果大部分都小于真实值，而后的重建结果大部分都大于真实值，并且随着半径的增加或者介质密度的增大，S1 和 S2 的重建结果差别变大。这是因为考虑到废物桶每层有一定高度，因此在计算探测效率库文件时采用的是均匀分布在一层高度的理想线源，这种线源与点源的偏差必然会导致重建结果的偏差。当点源半径增加或者介质密度增大时，高度位置对于探测器计数率的影响将更加明显，因此 S1 和 S2 的重建结果差别变大。而减弱这种效应的办法可能是减小每一层的高度，同时也缩小准直器孔径。

2.3.2 均匀介质多点源重建结果

除了对单点源情况进行了模拟测量外，还对 25 种多点源情况进行了模拟。每种情况中点源个数和点源位置都随机选取。密度也分为 0.3 、 0.6 、 1.0 、 1.5g/cm^3 这 4 种工况。

下面举一例进行说明，如图 2-19 所示，7 个点源分布在第 4 到 6 层，双探测器

ISGS 的重建结果列在表 2-2 中。 r' 为等效半径, I_A' 为探测器 A 重建得到的活度与真实总活度的比值, 下标数字为层编号。 $I_{\text{measured}}/I_{\text{true}}$ 为总活度与真实活度的比值。可以看出, 仅需要 3 到 4 个循环, 就可基本确定等效半径和活度结果。

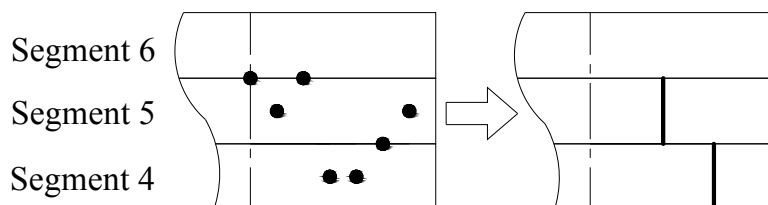


图 2-19 一种多点源工况的示意图

Fig.2-19 Sketch map of a multiple sources case

表 2-2 一种多点源工况的重建结果

Tab.2-2 Results of the first seven loops for a multiple sources case

循环次数	r_4' (cm)	r_5' (cm)	r_6' (cm)	I_{A4}'	I_{A5}'	I_{A6}'	$I_{\text{measured}}/I_{\text{true}}$
1	-	-	-	0.307	0.733	0.178	1.217
2	15.714	12.144	0.000	0.225	0.758	0.039	1.023
3	18.788	11.060	0.000	0.240	0.723	0.037	1.000
4	18.705	11.081	0.000	0.240	0.724	0.037	1.001
5	18.699	11.080	0.000	0.240	0.724	0.037	1.001
6	18.700	11.080	0.000	0.240	0.724	0.037	1.001
7	18.700	11.080	0.000	0.240	0.724	0.037	1.001

图 2-20 至图 2-23 为四个不同密度多点源情况下, 重建活度与真实活度比值的分布情况。横坐标为随机选取的多点源情况的编号, 一共是 25 组多点源情况; 纵坐标是重建活度比值。

图 2-20 与图 2-21 显示, 在密度为 0.3 、 0.6g/cm^3 情况下, ISGS 重建活度的误差明显低于 SGS 重建活度的误差, ISGS 的重建活度与真实值之比均靠近 1, 而 SGS 的重建活度基本都大于真实活度。密度为 0.3g/cm^3 情况下, ISGS 对 25 组多点源重建的活度比值均值为 0.98, 与 1 偏差最大的值为 0.96, 即相对误差最高为 4%, 而

SGS 重建活度比值的均值为 1.29, 与 1 偏差最大的值为 1.51, 即相对误差最高达到 50%。密度为 0.6g/cm^3 情况下, ISGS 对 25 组多点源重建的活度比值均值为 1.04, 与 1 偏差最大的值为 1.14, 即相对误差最高为 14%, 而 SGS 重建活度比值的均值为 1.15, 与 1 偏差最大的值为 1.30, 即相对误差最高为 30%。

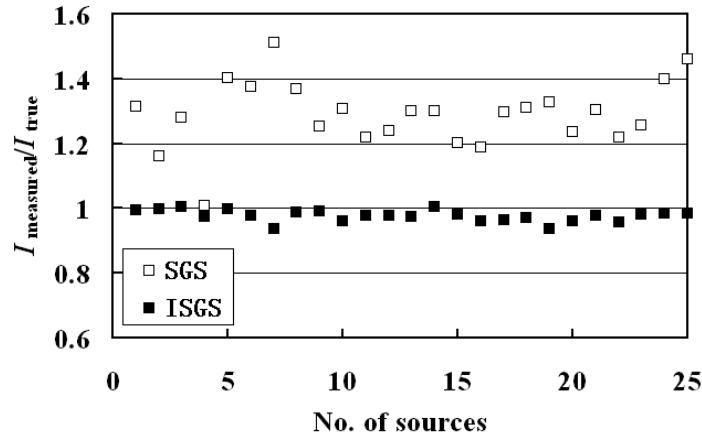


图 2-20 多点源重建结果 (0.3g/cm^3)

Fig.2-20 The reconstruction results of a multiple sources case at 0.3g/cm^3

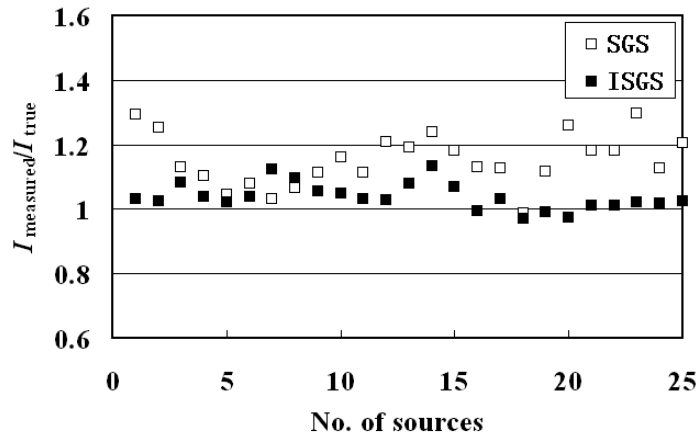


图 2-21 多点源重建结果 (0.6g/cm^3)

Fig.2-21 The reconstruction results of a multiple sources case at 0.6g/cm^3

当密度为 1.0g/cm^3 情况下, 如图 2-22 所示, ISGS 与 SGS 重建活度的比值差异不大, 均值分别为 1.06 与 0.99, 与 1 偏差最大的值分别为 1.16 与 0.95, 从数据上

看 SGS 的重建结果更好一些。该情况与单点源的重建情况类似,在密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 时,单点源的 ISGS 与 SGS 重建结果就相近,因此多点源情况重建结果也相近。

当密度增加为 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 时,如图 2-23 所示,SGS 重建的活度比值则基本小于 1,且误差大于 ISGS 的重建活度。ISGS 对 25 组多点源重建的活度比值均值为 0.99,与 1 偏差最大的值为 0.78,即相对误差最高为-22%,而 SGS 重建活度比值的均值为 0.84,与 1 偏差最大的值为 0.64,即相对误差最高达到-36%。

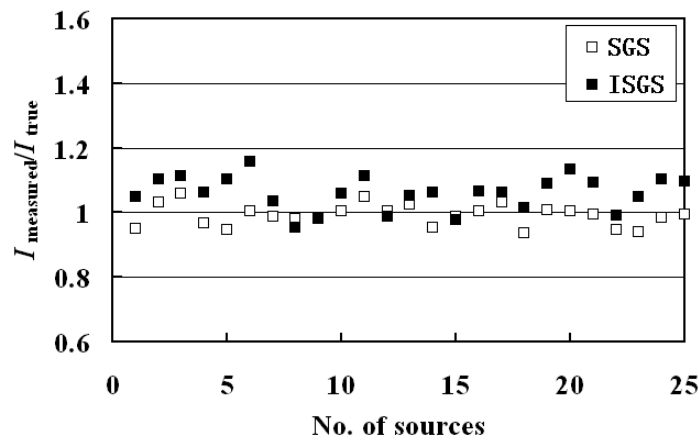


图 2-22 多点源重建结果 ($1.0\text{g}/\text{cm}^3$)

Fig.2-22 The reconstruction results of a multiple sources case at $1.0\text{g}/\text{cm}^3$

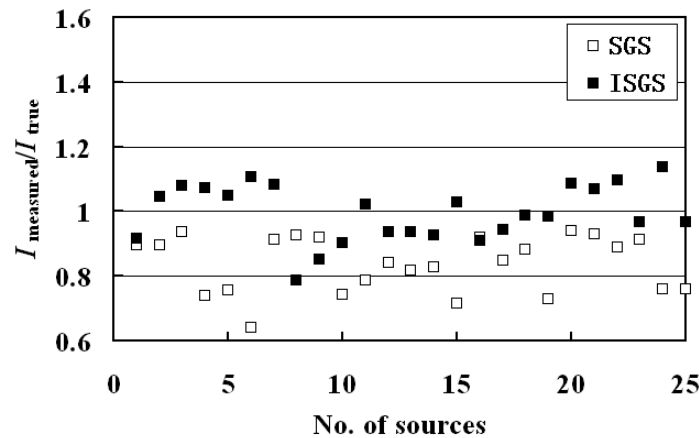


图 2-23 多点源重建结果 ($1.5\text{g}/\text{cm}^3$)

Fig.2-23 The reconstruction results of a multiple sources case at $1.5\text{g}/\text{cm}^3$

由上述分析可见, 对于均匀介质多点源情况, 在密度较小时 ISGS 的重建误差较小, 在密度为 0.3 与 0.6g/cm^3 时最大误差分别为 4% 与 14% , 随着密度的增加, 重建误差也增加, 在密度为 1.5g/cm^3 时最大误差为 22% (取绝对值)。SGS 的重建误差随密度的增加变化比较复杂, 是先减小然后增加, 在密度为 0.3 与 0.6g/cm^3 时最大误差分别为 50% 与 30% , 在密度为 1.5g/cm^3 时最大误差为 36% , 而在密度为 1.0g/cm^3 时误差达到最低。从整体上看, ISGS 重建活度的误差要低于 SGS。

2.3.3 非均匀介质单点源重建结果

为验证 ISGS 技术测量非均匀介质样品的有效性, 对如图 2-24 所示的点源分布在非均匀介质中的情况进行了模拟扫描。样品每层分为密度不同的两部分, 根据密度的不同分为 4 种情况: (1) $\rho_1=0.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.4\text{g/cm}^3$; (2) $\rho_1=0.4\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$; (3) $\rho_1=0.8\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.2\text{g/cm}^3$; (4) $\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.8\text{g/cm}^3$ 。其平均密度分别是 0.3 , 0.6 , 1.0 , 1.5g/cm^3 。点源分别置于如图 2-24 所示的 12 个水平位置, 依次编号为 1 至 12, 其中 1 至 4 位于两部分的交界处, 所在半径位置依次是 3.5 , 10.5 , 17.5 , 24.5cm , 5 至 8 位于密度较小的区域, 9 至 12 位于密度较大的区域, 其所在半径位置同 1 至 4。对于点源的垂直位置, 和前面类似, 仍然模拟了 2 种不同高度的点源, 分别是位于层内中心高度位置的点源 S1 和位于两层交界位置的点源 S2。

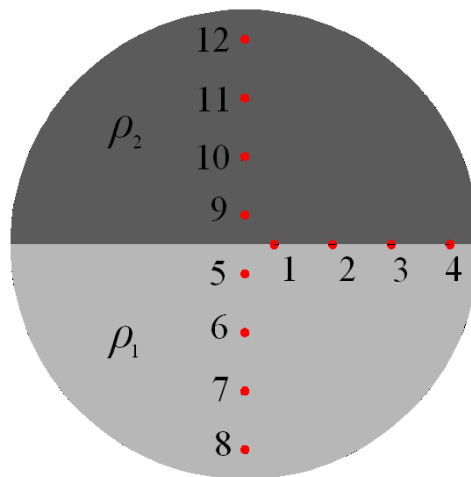
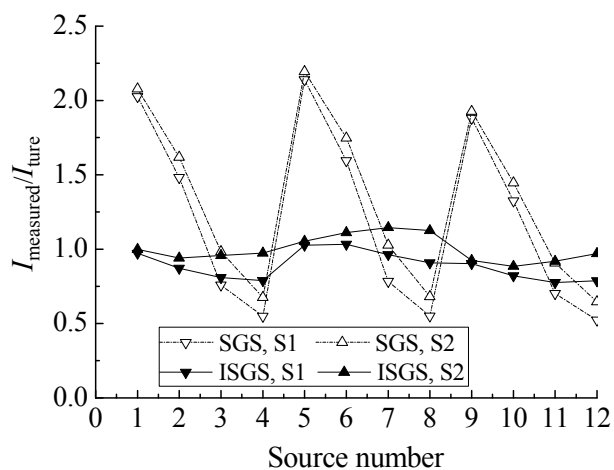


图 2-24 非均匀介质及点源位置示意图

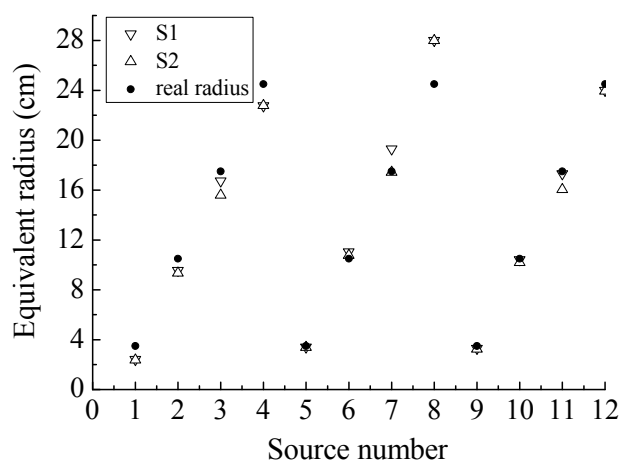
Fig.2-24 Sketch map of a point source at different positions in a heterogeneous matrix

对于非均匀介质的 ISGS 与 SGS 重建结果的对比见图 2-25 至图 2-28，图中的横坐标为点源的编号，从 1 至 12。



(a) 重建活度

(a) The reconstruction activity

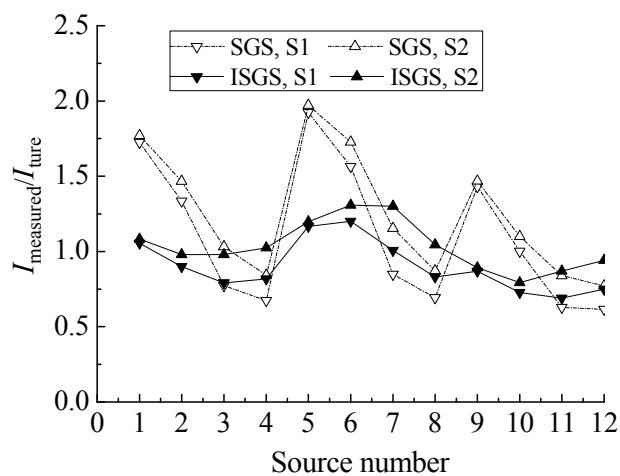


(b) 等效半径

(b) The equivalent radius

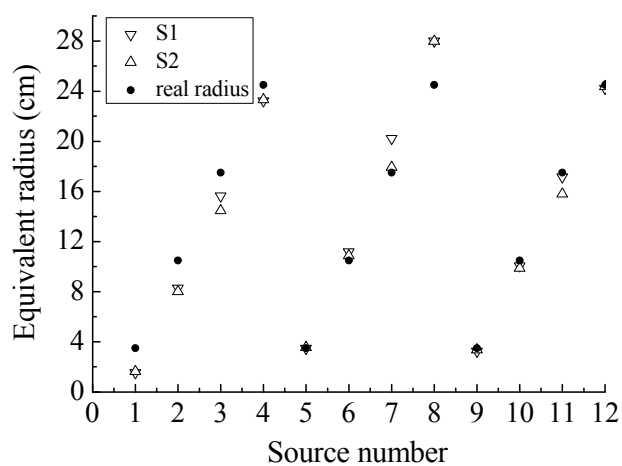
图 2-25 非均匀介质情况下 ($\rho_1=0.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.4\text{g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果

Fig.2-25 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of heterogeneous matrices at $\rho_1=0.2\text{g/cm}^3$ and $\rho_2=0.4\text{g/cm}^3$



(a) 重建活度

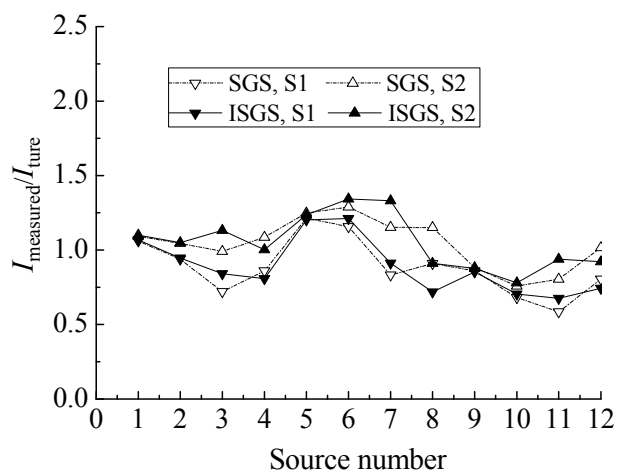
(a) The reconstruction activity



(b) 等效半径

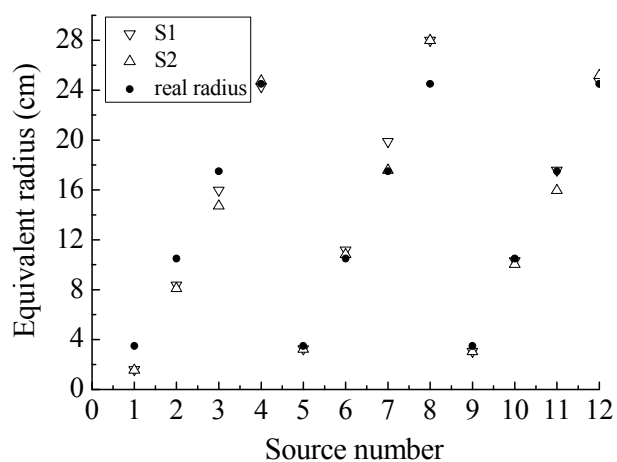
(b) The equivalent radius

图 2-26 非均匀介质情况下 ($\rho_1=0.4\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果Fig.2-26 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of heterogeneous matrices at $\rho_1=0.4\text{g/cm}^3$, $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$



(a) 重建活度

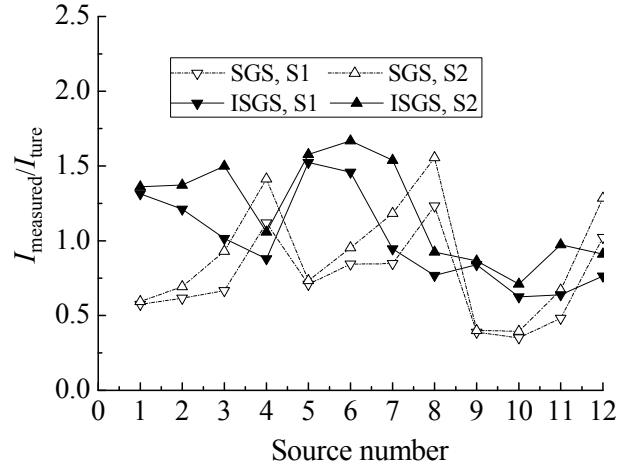
(a) The reconstruction activity



(b) 等效半径

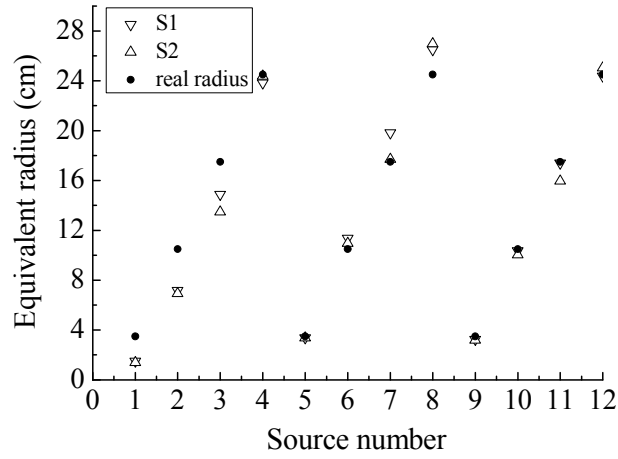
(b) The equivalent radius

图 2-27 非均匀介质情况下 ($\rho_1=0.8\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.2\text{g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果Fig.2-27 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of heterogeneous matrices at $\rho_1=0.8\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.2\text{g/cm}^3$



(a) 重建活度

(a) The reconstruction activity



(b) 等效半径

(b) The equivalent radius

图 2-28 非均匀介质情况下 ($\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.8\text{g/cm}^3$) SGS 和 ISGS 重建结果Fig.2-28 Reconstruction results of SGS and ISGS for the cases of heterogeneous matrices at $\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.8\text{g/cm}^3$

从图中可以看出,传统的 SGS 重建结果与点源所在半径位置存在很大关系,当平均密度为 0.3g/cm^3 和 0.6g/cm^3 时,如图 2-25 与图 2-26 所示,重建结果随着点源半径的增大呈明显的下降趋势,靠近桶中心的点源重建值大于真实值,靠近桶壁的点源重建值小于真实值。而当平均密度为 1.5g/cm^3 时,如图 2-28 所示,传统的 SGS

重建结果随着点源半径的增大呈明显的上升趋势, 靠近桶中心的点源重建值小于真实值, 靠近桶壁的点源重建值大于真实值。点源 9 至 12 的重建结果要小于点源 5 至 8 的重建结果, 这是因为点源 9 至 12 位于密度较大的区域, 物质对射线的衰减作用更加明显。从图中可以看出, 平均密度为 0.3g/cm^3 和 0.6g/cm^3 时, 双探测器 ISGS 的重建结果要明显优于传统的 SGS。

表 2-3 给出了双探测器 ISGS 与传统的 SGS 对于非均匀介质情况的重建结果对比。

表 2-3 四种非均匀介质情况的活度重建结果对比

Tab.2-3 Comparison of the activity results for the four cases of heterogeneous matrices

密度	工况	平均相对误差(%)	I_{max}	I_{min}	I_{max}/I_{min}
$\rho_1=0.2\text{g/cm}^3$ $\rho_2=0.4\text{g/cm}^3$	SGS, S1	54.8	2.139	0.523	4.090
	SGS, S2	51.2	2.194	0.646	3.396
	ISGS, S1	12.2	1.033	0.776	1.331
	ISGS, S2	7.2	1.145	0.884	1.295
$\rho_1=0.4\text{g/cm}^3$ $\rho_2=0.8\text{g/cm}^3$	SGS, S1	39.6	1.923	0.615	3.127
	SGS, S2	36.4	1.972	0.772	2.554
	ISGS, S1	17.1	1.201	0.690	1.741
	ISGS, S2	12.5	1.308	0.793	1.649
$\rho_1=0.8\text{g/cm}^3$ $\rho_2=1.2\text{g/cm}^3$	SGS, S1	18.7	1.214	0.585	2.075
	SGS, S2	13.7	1.289	0.748	1.723
	ISGS, S1	19.0	1.211	0.675	1.794
	ISGS, S2	14.7	1.343	0.780	1.722
$\rho_1=1.2\text{g/cm}^3$ $\rho_2=1.8\text{g/cm}^3$	SGS, S1	32.5	1.233	0.350	3.523
	SGS, S2	33.9	1.556	0.394	3.949
	ISGS, S1	25.5	1.524	0.625	2.438
	ISGS, S2	30.7	1.668	0.710	2.349

在平均密度为 0.3g/cm^3 时, 传统的 SGS 重建结果的平均相对误差大于 50%, 而 ISGS 重建结果的平均相对误差为 10% 左右, 有了明显的降低。平均密度为

0.6g/cm³ 时, 传统的 SGS 重建结果的平均相对误差大于 35%, 而 ISGS 重建结果的平均相对误差为 15% 左右, 也有明显的降低。平均密度为 1.0g/cm³ 时, ISGS 重建结果的平均相对误差基本与传统的 SGS 相同。平均密度为 1.5g/cm³ 时, ISGS 重建结果的平均相对误差与传统的 SGS 相比, 也有一定幅度的降低。

在 0.3、0.6、1.0、1.5g/cm³ 这 4 个平均密度下, 双探测器 ISGS 重建结果的最大相对误差分别是 22%、31%、34%、67%, 而传统 SGS 的最大相对误差达到 119%、97%、42%、65%。这种重建误差的变化规律同均匀介质时的情况相类似。

从重建结果的范围上来看, 平均密度为 0.3g/cm³ 和 0.6g/cm³ 时, ISGS 相比 SGS 在 $I_{\text{measured}}/I_{\text{true}}$ 的最大值 (I_{max}) 上有明显的降低, 使之更接近于 1。平均密度为 1.5g/cm³ 时, ISGS 相比 SGS 在 $I_{\text{measured}}/I_{\text{true}}$ 的最小值 (I_{min}) 上有明显的提高, 使之更接近于 1。 $I_{\text{measured}}/I_{\text{true}}$ 最大值与最小值的比值 ($I_{\text{max}}/I_{\text{min}}$) 在一定程度上能体现重建结果的波动性, 该比值应越小越好。从表中可以看出, 在四个平均密度下, ISGS 相比 SGS 在该比值上都有不同程度的降低。

综合来看, 在本文所设置的非均匀介质单点源的情况下, ISGS 的重建结果总体上优于 SGS。除此之外, 双探测器 ISGS 得到的等效半径也和真值基本相符, 其中点源 1 至 4 的等效半径比真值略小。

2.4 ISGS 实验测量及重建结果分析

为验证改进型分段 γ 扫描技术, 除了进行模拟扫描及重建以外, 还进行了实验测量。探测器的相关参数, 以及实验中探测器、透射源和废物桶的位置布局见本章效率刻度部分的介绍。

试验台架照片如图 2-29 所示, 该台架可进行 SGS 与 ISGS 扫描。中间圆盘用于放置废物桶, 圆盘底座内设置有电机与变速箱, 采用联轴器连接可使圆盘匀速旋转。圆盘底座可整体进行平动, 以满足探测器对废物桶的偏心测量。圆盘的两边各有升降平台, 一端放置探测器与准直器, 另一端放置透射源与准直器, 两个平台由传动装置控制实现同步升降。

图 2-30 显示的为 CANBERRA 公司生产的 P 型同轴高纯锗探测器与准直器, 准直器将探头部分包裹在内部。废物桶、探测器与透射源的布置如图 2-31 所示, 探测器与透射源的准直器均为铅块加工制造。对于废物桶的设置, 首先在圆盘上放置预先准备好的填充材料, 然后放置发射源, 最后将 200L 的钢桶扣在圆盘上。实验中采用的透射源是 ^{152}Eu 液体源, 活度为 0.5mCi 。桶内发射源为实际废物桶中常见的 ^{137}Cs 点源, 标定日期为 2001 年 2 月, 标定活度 $0.978\mu\text{Ci}$, 实验时活度约为 $0.813\mu\text{Ci}$, 即 30080Bq 。



图 2-29 实验台架照片

Fig.2-29 The picture of the experimental system



图 2-30 探测器及准直器照片

Fig.2-30 The picture of the detector and collimator



图 2-31 废物桶、探测器、透射源照片

Fig.2-31 The picture of the waste drum, detector and transmission source

废物桶内的物质与点源布置如图 2-32 所示，为非均匀分布的填充介质。如表 2-4 所示，填充介质主要由三种材料组成，主要是水、木头与粉煤灰砖，密度分别为： 1.0g/cm^3 、 0.6g/cm^3 、 1.54g/cm^3 ，同时列出材料了对 γ 射线的参考线性衰减系数 μ ，该 μ 值对应的光子能量为 ^{137}Cs 的特征能量 0.6617MeV 。桶内点源位置设置了 4 个， a 、 b 、 c 、 d 位置对应的半径分别为 0、10、20、14cm。

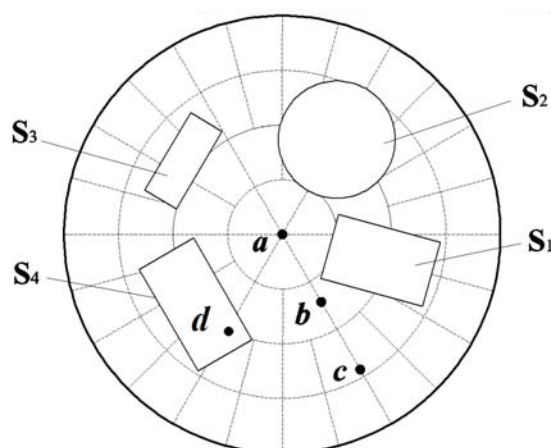


图 2-32 测量样品示意图

Fig. 2-32 Sketch of measurement sample

表 2-4 桶内填充材料

Tab.2-4 Filling material in the drum

编号	材料	密度 (g/cm^3)	μ 参考值 (cm^{-1})
S ₁	水	1.00	0.0858
S ₂	水	1.00	0.0858
S ₃	粉煤灰砖	1.54	0.1155
S ₄	木头	0.60	0.0515

实验中, 探测器在 A 位置与 B 位置分别对各不同点源测得的计数率 C_A 、 C_B 见表 2-5, 点源位置由字母 a 、 b 、 c 、 d 等表示。若出现多个字母则表示多点源情况, 即相应位置同时存在点源, 计数率是对应多个单点源测得的计数率的叠加。

表 2-6 列出了重建结果的对比。由表中数据可以发现, 除了在位置 d 的点源外, 在其它所有的测量情况下 ISGS 重建后的活度对真实活度的相对误差均在 10% 以内。然而, SGS 重建后的活度相对误差最高达 44%, 大多数情况都超过 10%, 在单点源与多点源的情况下均不同程度地大于 ISGS 的重建误差。ISGS 对位置 d 点源的重建误差较大是因为该点源处于填充材料内, 该处点源局部衰减较大, 远大于桶内平均衰减系数, 因此导致计算后的活度偏小。

表 2-5 探测器测量计数率

Tab.2-5 Measured count rates of HPGe detector

点源位置	C_A	C_B	C_B/C_A
a	3.0621	0.0000	0.00
b	2.5201	0.4155	0.16
c	1.6753	1.3088	0.78
d	1.6391	0.8429	0.51
ab	5.5822	0.4155	0.07
bc	4.1954	1.7243	0.41
cd	3.3144	2.1517	0.65
abc	7.2575	1.7243	0.24
bcd	5.8345	2.5672	0.44
$abcd$	8.8966	2.5672	0.29

表 2-6 实验重建结果对比

Tab.2-6 Comparison of the reconstruction results in experiments

点源	实际半径 (cm)	等效半径 (cm)	相对误差 (%)	
			ISGS	SGS
a	0	0	-6.89	43.99
b	10	8.12	-3.62	18.51
c	20	17.36	0.68	-21.22
d	14	14.00	-17.37	-22.92
ab	-	4.76	-4.24	31.25
bc	-	12.60	-0.94	-1.36
cd	-	15.96	-7.71	-22.07
abc	-	9.80	-0.84	13.76
bcd	-	12.88	-6.87	-8.54
$abcd$	-	10.92	-4.36	4.59

图 2-33 为 ISGS 与传统的 SGS 方法重建活度的相对误差随等效半径的变化曲

线。采用传统的 SGS 方法进行重建，当点源靠近桶心重建的活度较大，而当点源靠近壁面重建活度较小，这两个位置都表现为较大的相对误差。该分布规律同前面模拟扫描在密度为 0.3g/cm^3 和 0.6g/cm^3 时的重建结果相似。ISGS 重建后的活度在整个半径范围内相对误差都比较小，不存在传统 SGS 的误差特征。

由此可见，实验重建结果也表明 ISGS 方法对单点源、多点源在非均匀分布介质中能够获得较传统 SGS 方法更高的测量精度。

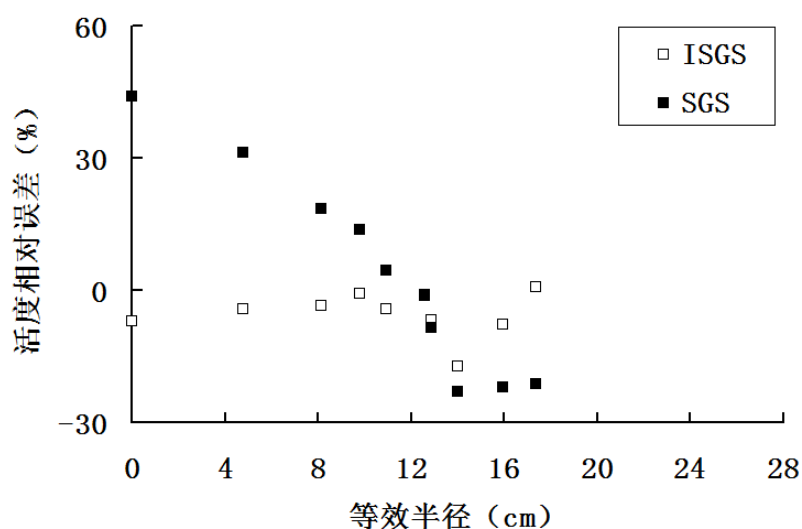


图 2-33 实验重建的活度分布

Fig. 2-33 The distribution of the reconstruction activity in experiments

2.5 本章小结

本章针对传统分段 γ 扫描技术因核素均匀分布假设造成较大测量误差的问题，提出一种新的改进型分段 γ 扫描技术，对该技术的原理与测量系统布置进行了详细的介绍，并结合 SGS 对比分析了该技术对 ^{137}Cs 核素在单点源与多点源以及均匀介质与非均匀介质中的重建结果，发现 ISGS 重建结果绝大多数情况下要优于 SGS 重建结果。

ISGS 不采用 SGS 的核素均匀分布的假设，而是通过等效半径的形式将一层内的所有放射性核素叠加到该半径下的环形线源上，通过两个探测器计数率的比值来

确定等效半径,从而比较准确地得到探测效率,以提高重建活度的精度。通过对所建立的标准 200L 钢桶测量系统的效率分析,得到了探测器的最佳布局位置,即两个探测器分别对准废物桶中心和偏离桶中心 17.5cm 处。

对不同密度的均匀介质单点源情况进行了模拟测量与重建。与 SGS 相比,ISGS 对不同半径的点源均有较高的重建精度。SGS 重建结果受点源半径与密度影响,在密度较小时重建活度随半径增加呈下降趋势,在密度较大时变化趋势则相反。SGS 在密度为 0.3g/cm^3 时重建活度的相对误差在-50%至+100%之间;密度为 1.5g/cm^3 时在-60%至+80%之间。ISGS 在整个半径范围内均能维持较小的重建误差,在密度为 0.3、0.6、1.0、 1.5g/cm^3 时,重建活度相对误差范围分别为: $\pm 10\%$ 、 $\pm 15\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 25\%$, ISGS 的重建误差随密度的增大呈缓慢增大的趋势,但均明显低于 SGS。

对不同密度均匀介质的多点源情况也进行了模拟测量与重建。同单点源情况类似,SGS 的重建误差随密度增加变化比较复杂,在密度为 0.3 与 0.6g/cm^3 时最大相对误差(取绝对值,后相同)分别为 50%与 30%,在密度为 1.5g/cm^3 时最大相对误差为 36%,在密度为 1.0g/cm^3 时达到最低。ISGS 重建活度的最大相对误差在密度为 0.3 与 0.6g/cm^3 时分别为 4%与 14%,在密度为 1.5g/cm^3 时最大相对误差为 22%。因此,ISGS 与 SGS 在密度为 1.0g/cm^3 时重建误差相近,但其它密度下 ISGS 对多点源的重建误差整体要低于 SGS。

SGS 和 ISGS 对非均匀介质样品的测量误差与样品的密度和非均匀程度有关。在文中设置的不同密度的非均匀介质单点源情况下,平均密度为 0.3、0.6、1.0、 1.5g/cm^3 时,SGS 的最大相对误差分别达到 119%、97%、42%、65%,ISGS 的最大相对误差分别是 22%、31%、34%、67%。虽然重建误差均大于同等密度下均匀介质的情况,但从误差范围和波动性来看,ISGS 的重建结果总体上仍优于 SGS。

除模拟测量外,本文也对一非均匀样品进行了实验测量,实验结果显示 ISGS 重建后的活度与真实活度的相对误差基本在 10%以内,SGS 重建后的活度相对误差最高达 44%,大多数情况都超过 10%。

双探测器 ISGS 在重建中引入了等效半径,无论在模拟测量中,还是在实验测量中,重建时只需要 3 至 4 个循环就可以实现等效半径与重建活度的稳定,且等效

半径接近于实际点源的半径。由此可见, ISGS 能够比较准确地获得点源所在的半径, 这对于核素不均匀分布的情况, 尤其是点源情况, 能够更为准确地计算探测效率, 因此比 SGS 具有更高的测量精度。

第三章 基于动网格的 TGS 图像重建研究

分段 γ 扫描技术 (SGS) 以及前一章所述的改进型分段 γ 扫描技术 (ISGS) 是基于每层介质均匀分布的假设, 重建后获得的是各层放射性核素活度的总和, 如果要获得各段层截面上介质与放射性核素的分布, 进一步提高活度的测量精度, 那么需要采用更为先进的层析 γ 扫描技术 (Tomographic Gamma Scanning, TGS)。但是, TGS 的扫描过程比 SGS 复杂, 探测器除了上下移动外, 还需要水平移动, 且需要在废物桶旋转过程中每隔一定角度测量一个能谱。TGS 扫描过程复杂导致对大型样品的测量耗时长, 这是该技术存在的一个重要问题, 也是 TGS 至今还未得到大规模工业应用的原因之一。目前对 TGS 的重建基本都是采用固定网格划分, 受限于扫描时间和扫描次数, TGS 的网格划分一般较粗, 对介质与放射性核素非均匀分布的样品进行重建时会存在一定的误差。事实上, 大多数情况下废物桶内的放射性核素是非均匀分布的, 一般都是以多点源的形式存在, 而整体测量精度也取决于能否对这些高活度的“热点”核素进行准确的定位与测量。因此, 在重建过程中如果采用小尺寸网格对这些“热点”进行准确定位, 对不存在核素或者核素活度较低的区域采用大尺寸网格, 这样可以有效地利用有限的网格实现更为准确的活度重建计算。针对该情况, 本章提出了一种动态网格重构方法, 并对其在层析 γ 扫描技术的透射与发射重建上的应用进行了研究。

3.1 基于动网格的 TGS 重建原理

3.1.1 TGS 扫描及重建原理

层析 γ 扫描技术对中低放射性废物桶进行探测时, 首先将废物桶垂直方向上分为若干段层, 再将每层又划分为若干体素, 结合 CT 原理, 分别对各段层进行透射与发射扫描。通过透射重建得到每层的线衰减系数或密度分布图, 从而进行精确的

自吸收衰减校正，再通过发射重建得到样品中核素的放射性活度分布。

对某一层进行透射和发射扫描的示意图如图 3-1 所示，探测器和透射源分别置于废物桶的两边，且探测器及其准直器与透射源准直器在一条轴线上。TGS 的透射扫描是指利用桶外的透射源发出的 γ 射线穿透废物桶，通过测量射线在废物桶内的衰减来获得各体素介质对光子的衰减系数或介质密度。其具体过程为：首先在未放置废物桶前测量透射源的能谱，然后放置废物桶并再次测量射线能谱，该能谱不仅包含由透射源发出的经废物桶衰减后的射线信息，也包含废物桶内放射性核素发出的射线信息。通过透射重建可得到各能量下桶内介质的衰减系数，再利用衰减系数与密度的对应关系可进一步获得介质的密度。TGS 发射扫描是利用探测器测量桶内放射性核素发出的射线能谱，通过发射重建可得到桶内各个体素的放射性核素活度。一般来讲，选择的透射源有多条 γ 射线，被分析的发射源 γ 射线能量在这多条 γ 射线能量范围内，并且选取的透射源与桶内发射源在特征峰能量上不存在重叠，透射扫描与发射扫描可以同时进行。

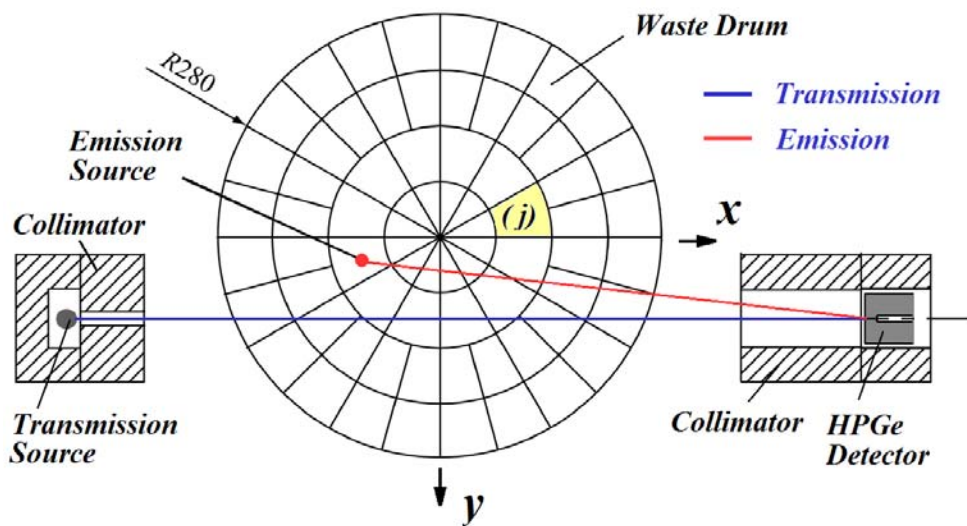


图 3-1 TGS 扫描过程示意图

Fig. 3-1 The sketch of scanning process in TGS

TGS 技术是对被测废物桶进行三维立体扫描，需要经过转动、平动以及升降等

机械动作过程来实现,从而获得不同角度、不同水平位置、不同高度的扫描结果。一般来讲,对于某一段层的扫描过程是通过废物桶转动、探测器平动来实现,即探测器在某一位置测量结束后,废物桶随即转动一定角度并停止,探测器再进行下一次的测量,这样依次重复直至废物桶转完一圈;转动测量完成后,探测器或者废物桶进行平动,改变探测器与透射源连线相对桶心的垂直距离,在新的平动位置上继续进行转动测量,这样直至完成所有的平动测量。完成一层的扫描之后,探测器垂直升降至下一层继续进行扫描,直至完成对所有断层的扫描。

在进行 TGS 透射与发射重建时,需要划分一定数量的网格,假定网格内介质均匀分布,放射性核素处于该网格的中心。图 3-1 也显示了废物桶内网格的示意图,按一定顺序将各网格依次编号,编号用字母 j 表示。

在透射扫描 (Transmission Scanning) 中,透射源发出的射线会与桶内物质相互作用而产生衰减,根据比尔定理:

$$CT_i = C_0 \cdot \exp\left(-\sum l_{ij} \cdot u_j\right) \quad (3-1)$$

上式中, C_0 为在未放置废物桶时探测器对透射源测得的没有经过衰减的计数率, CT_i 为第 i 次测量时透射源发出的射线经衰减后被探测器测得的计数率, l_{ij} 为第 i 次测量时的连接透射源与探测器的射线在第 j 个网格内的径迹长度, u_j 为第 j 个网格内物质的线性衰减系数。

式 3-1 可以变化为:

$$v_i = \sum l_{ij} \cdot u_j \quad (3-2)$$

其中,

$$v_i = -\ln(CT_i / C_0) \quad (3-3)$$

即计数率比值 (透射率) 的自然对数。

因此,对一段层截面的透射扫描可用向量形式来描述:

$$\mathbf{v} = \mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\mu} \quad (3-4)$$

上式中, \mathbf{v} 为表示对数透射率的列向量, $\boldsymbol{\mu}$ 为表示各网格线性衰减系数的列向

量,

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= (v_1, v_2, v_3, \dots, v_I)^T \\ \mathbf{u} &= (u_1, u_2, u_3, \dots, u_J)^T \end{aligned}$$

其中, I 为测量的总次数, J 为网格的总数目。 \mathbf{L} 为 $I \times J$ 大小的系数矩阵, 矩阵中各元素 l_{ij} 的值即为第 i 次测量时第 j 个网格内的射线径迹长度, \mathbf{L} 也叫厚度矩阵。通过解方程组 3-4 即可得到各网格内物质的线性衰减系数 μ_j 。

在完成透射重建后, 获得的线性衰减系数将用于后续的发射重建。对于第 i 次测量时探测器测得的来自桶内发射源的计数率有:

$$CE_i = \sum_{0 < j \leq J} \alpha \varepsilon_{ij} a_{ij} A_j \quad (3-5)$$

上式中, α 为分支比, A_j 为第 j 个网格内放射性核素的活度 (若无核素则活度为零), ε_{ij} 为不考虑桶内物质衰减时第 i 次发射测量时探测器对于第 j 个网格内核素的探测效率, a_{ij} 为衰减校正因子, 即在第 i 次发射测量中由第 j 个体素发射的光子到达探测器前被衰减的份额, 由下式进行计算:

$$a_{ij} = \prod_{k \leq J} \exp(-l_{ijk} \cdot \mu_k) \quad (3-6)$$

其中, l_{ijk} 为第 i 次发射测量时连接第 j 个网格核素至探测器的直线穿过第 k 个网格的径迹长度 (若直线不穿过某网格, 则 l_{ijk} 为零)。

因此, 发射扫描过程可以写成如下的向量形式:

$$\mathbf{CE} = \alpha \mathbf{F} \cdot \mathbf{A} \quad (3-7)$$

其中, \mathbf{CE} 为表示发射扫描计数率的列向量, \mathbf{A} 为表示各网格活度的列向量。

$$\begin{aligned} \mathbf{CE} &= (CE_1, CE_2, CE_3, \dots, CE_I)^T \\ \mathbf{A} &= (A_1, A_2, A_3, \dots, A_J)^T \end{aligned}$$

\mathbf{F} 为经衰减校正的探测效率矩阵, 是 $I \times J$ 大小的矩阵, 具体形式如下。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} a_{11} & \cdots & \varepsilon_{1j} a_{1j} & \cdots & \varepsilon_{1J} a_{1J} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{i1} a_{i1} & \cdots & \varepsilon_{ij} a_{ij} & \cdots & \varepsilon_{iJ} a_{iJ} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{I1} a_{I1} & \cdots & \varepsilon_{Ij} a_{Ij} & \cdots & \varepsilon_{IJ} a_{IJ} \end{bmatrix}$$

通过解方程组 3-7 即可得到各网格内放射性核素的活度。

可见, TGS 透射重建与发射重建的实质是对式 3-4 与式 3-7 两个线性方程组的求解。求解大型方程组多采用迭代算法, 由于核事件发生是随机的, 因此本文中采用的是一种基于统计模型的迭代法——极大似然期望最大化法 Maximum Likelihood -Expectation Maximization algorithm (ML-EM)^[116], 具体计算公式为:

$$x_j^{(k+1)} = \frac{x_j^{(k)}}{\sum_{i=1}^I a_{ij}} \sum_{i=1}^I \frac{a_{ij} b_i}{\langle a^i, x^{(k)} \rangle} \quad (3-8)$$

其中, $x_j^{(k)}$ 为第 k 次迭代时, 第 j 个网格的求解值, 如果是透射测量, x 则为线性衰减系数, 如果是发射测量, x 则为放射性核素的活度; a_{ij} 为系数矩阵内第 i 行第 j 列的元素, 如果是透射测量, 系数矩阵则为厚度矩阵 \mathbf{L} , 如果是发射测量, 系数矩阵则为衰减校正的探测效率矩阵 \mathbf{F} ; b_i 为与第 i 次测量相关的值, 如果是透射测量, b 则为对数透射率, 如果是发射测量, b 则为发射扫描计数率。

3.1.2 TGS 的动网格重建原理

在 TGS 重建中, 无论是透射重建还是发射重建, 能否对大密度或大活度区域进行准确重建将在很大程度上影响最终结果的准确性。首先, 物质密度越大对射线的衰减也越大, 由式 3-6 可知, 这将直接影响衰减校正因子的计算, 因此大密度区域的重建误差与小密度区域相比会更大程度地影响后续的发射重建。其次, TGS 测量的最终目的就是要准确地获得废物桶内放射性核素的分布和总活度, 很多情况下放射性核素是以点源、多点源的形式存在, 因此 TGS 的整体测量精度也取决于能否对这些高活度的“热点”区域进行准确的定位与测量, 如果采用自适应的动态网格对点源附近区域进行网格加密, 其它区域采用尺寸较大的粗网格, 这样就能采用较少的网格实现对点源的准确定位来提高测量精度, 同时网格数的减少也能在一定程度上缩短重建计算时间。

采用动网格进行 TGS 重建, 其目的就是对重建值较大的区域进行网格加密, 以此提高重建的精度。考虑到 TGS 重建的特点, 透射重建与发射重建均采用逐次

加密的重构方法。该方法是先设置较少的网格单元（粗网格）进行首次重建计算，如果密度或者活度在某一区域内较大那么该区域所在的网格将具有较大的重建值，那么依据重建值大小对网格进行排序并选择若干网格进行加密，然后再次进行重建计算，再进行网格加密，从而实现由粗网格到细网格的动态重构。该网格重构过程比较适合 TGS 的重建计算，是一种比较容易实现网格动态分配的方法。

为便于对网格加密过程的控制及算法实现，且由于扫描次数的限制，不能对网格进行无限加密，故预先对最小的网格单元进行了规定（这种最小的网格单元被称为基网格），其它大小的网格都是这些基网格组合而成的。基网格划分如图 3-2 所示，圆周方向划分 48 个，半径方向划分 8 个，共计 384 个网格。采用这种极坐标网格划分而非普通的正方形网格划分的主要原因是：一、废物桶截面本身为圆形，如果采用正方形网格，则在四个角上将有一定数量的网格被浪费，且重建出来的图像在圆周边界上会存在锯齿；二、极坐标网格具有旋转对称性，旋转一定角度后各网格中心点将和旋转前重合，在计算探测效率矩阵时可减少很大一部分工作量，而正方形网格不具备这种特性。

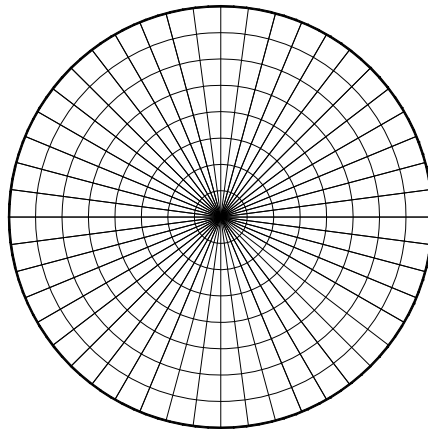


图 3-2 TGS 重建中的最小网格划分示意图

Fig.3-2 The division sketch of the smallest grids in TGS reconstruction

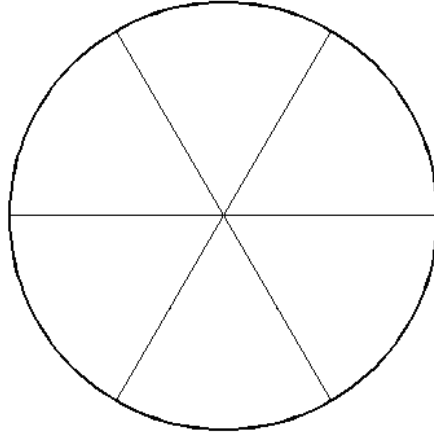


图 3-3 TGS 重建中的初始网格划分示意图

Fig.3-3 The division sketch of the initial grids in TGS reconstruction

TGS 的动网格重建首先是从初始网格开始，初始网格为最粗的网格划分，如图 3-3 所示，即周向划分 6 个，半径方向不划分，共计 6 个网格。网格加密规则是：依据前一次的重建结果，将所有网格单元按重建值从大到小进行排序，从重建值最大的网格单元开始依次进行判断，如果同时满足如下四个条件，则对该网格单元进行分解加密。

网格加密的四个条件为：

(1) $x_j \geq \xi \cdot \bar{x}$ ，即该网格的重建值大于某一阈值。阈值的选定一般是由该段层截面内的平均值 \bar{x} 乘以某一系数 ξ (设定的常数)。该系数的选取需要依据具体情况，如果重建值最大值与最小值差异较大，该系数一般选取较大，即只要求几个最大值的网格单元进行加密，较小值的网格不加密。

(2) $N_{\text{step}} \leq N_{\text{max,step}}$ ，即一次网格加密时，被加密的网格数量小于规定值，这样可以保证还有一定的网格余量用于下一次的网格加密。

(3) $N_{\text{total}} \leq N_{\text{max}}$ ，即加密后的总网格数量不大于规定的最大网格数。一般来讲最大网格数选择为测量次数，即解方程时未知数个数不大于方程的个数。需要提到的是，TGS 重建中采用的迭代方法为基于统计模型的迭代方法，当未知数个数少于或大于方程个数时，均能够最大程度地接近真实解。但是一般来讲，为了提高求解

的可靠性，会增加约束使未知数个数不大于方程的个数。

(4) 该网格单元非基网格单元，即不是最小网格单元，可以进行再次的分解加密。如果该网格单元已为基网格单元，则不再进行加密。

以上四个条件分别从重建值的大小、每步的网格加密数量、网格单元总数量以及是否基网格单元四个方面来进行网格加密的控制。

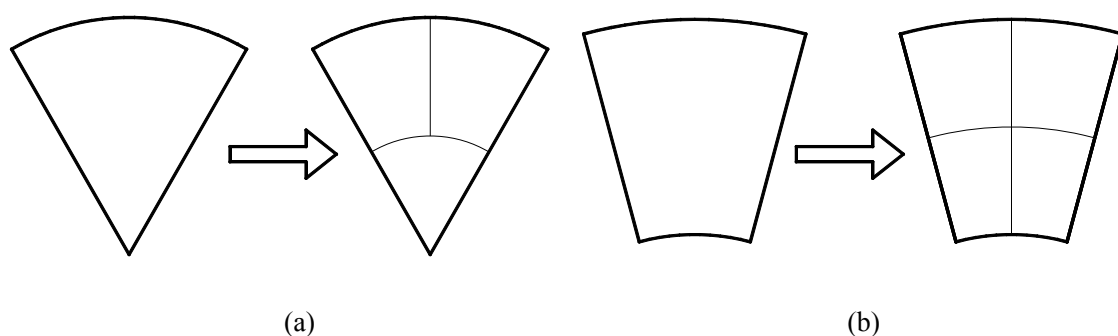


图 3-4 网格加密方式示意图

Fig.3-4 Sketch of grids refinement

网格的分解加密如图 3-4 所示，分为两种情况：一、如果网格顶点在桶心处则该网格单元一分为三；二、如果网格顶点不在桶心处，则该网格单元一分为四。

图 3-5 为采用动网格进行点源发射重建时网格加密过程的示意图。图 3-5 (a) 中黑点为点源所在位置，半径为 24.5cm，角度为 90° 。图 3-5 (b) 为初始网格，图 3-5 (c) 为经过第一次加密后的网格分布情况，图 3-5 (d) 为经过第三次加密后的网格分布情况。可见，从初始网格开始，经过三次加密即在点源附近实现最小网格单元的划分，最后的网格单元数为 20 个。

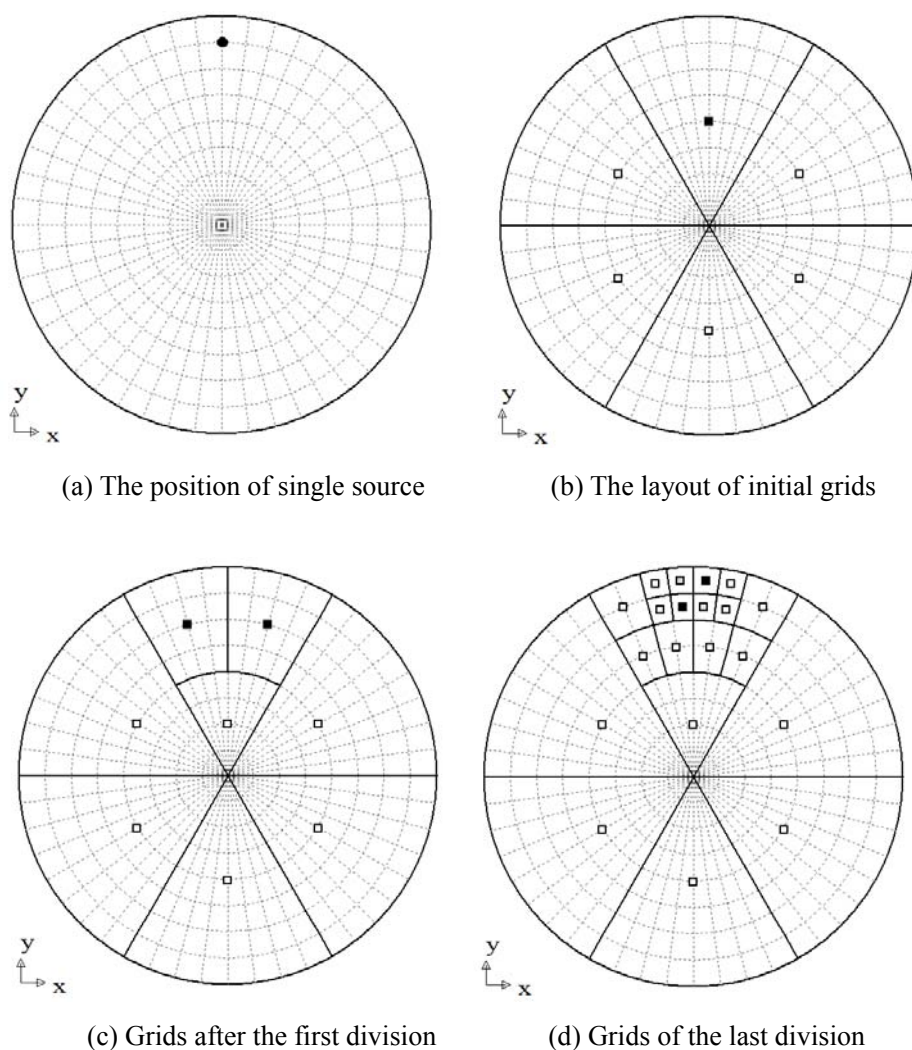


图 3-5 动网格生成示意图

Fig. 3-5 Sketch of dynamic grids generation

3.1.3 TGS 重建软件

TGS 的重建软件采用 VC++ 2010 进行编制，其窗口界面如图 3-6 所示。由于该软件是用于算法的调试，因此窗口布置与控件设置相对简单。

该软件除了包括上章介绍的 SGS 与 ISGS 重建计算功能外，同时也能够实现 TGS 的透射重建与发射重建，可选择不同类型的固定网格与动网格进行重建。软件在运行过程中，首先读取扫描设置文件，获取 TGS 扫描时的设置参数。然后依次读取库文件、透射扫描数据文件与发射扫描数据文件。在完成数据读取后，调用计

算线程进行网格生成、效率矩阵的计算与线性方程组的迭代计算。在重建结束后，能分别显示透射重建的密度分布图与发射重建的网格示意图与活度分布图，并在文本框显示重建的相对误差。

由于在研究中会涉及到很多点源工况的重建计算，该软件也设置了批处理功能，能根据计算列表进行批处理并依次输出重建结果。

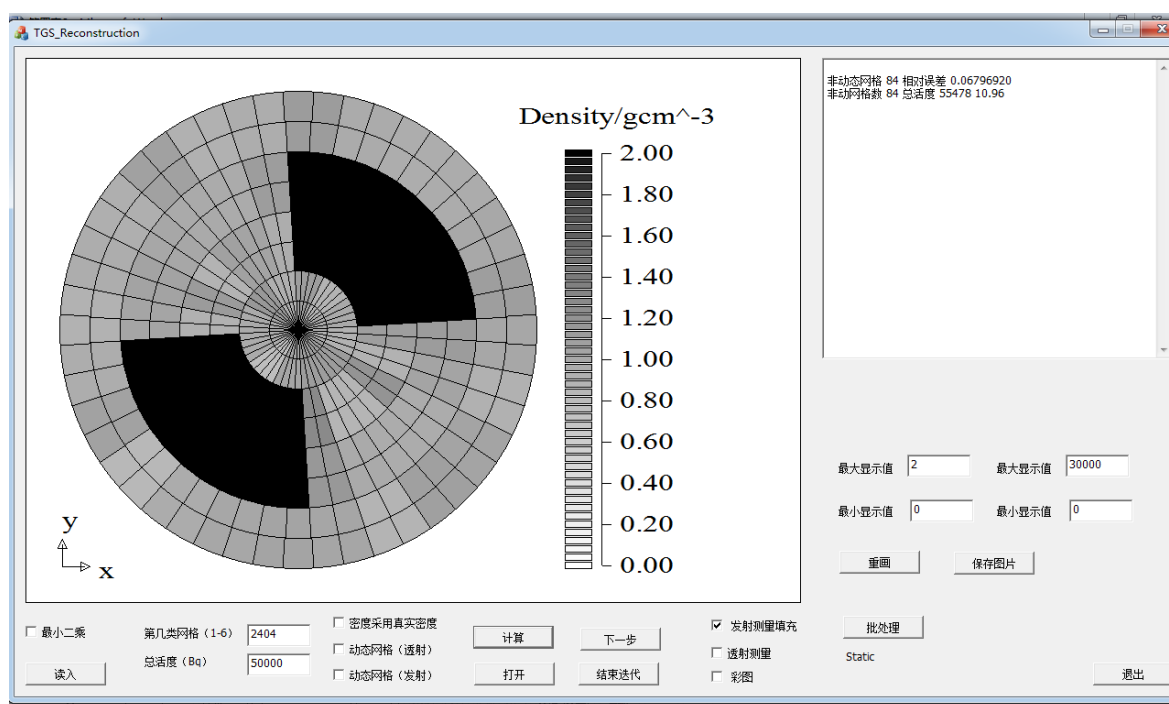


图 3-6 TGS 重建软件窗口

Fig. 3-6 The software of TGS reconstruction

3.2 TGS 扫描及重建设置

对放射性废物桶进行完整的 TGS 扫描时需将废物桶沿轴向，即桶高方向分为若干段层，逐层进行转动与平动测量。在扫描完成后，再逐层进行透射与发射重建，其中发射重建需要考虑层间串扰的影响。由于本文主要是研究动网格在重建中的应用，各层间的动网格重建方法是类似的，因此在后续研究与分析中仅对一个段层进行 TGS 模拟扫描与重建。

探测器、透射源和废物桶的位置布局见图 3-7。核电厂中标准 200L 废物桶直径

约 56cm，高约 90cm，桶壁厚 0.12cm。探测器前端准直器长 15cm、准直器前端面距桶壁 10cm，准直器为 $6\times 6\text{cm}$ 的正方孔。探测器采用 CANBERRA 公司生产的 P 型同轴高纯锗探测器，高纯锗晶体被厚 0.15cm 的铝壳包围，晶体直径 6.2cm，长度 5.95cm，冷指井直径 0.8cm，冷指井长度 4.5cm，死层厚度约 0.045cm。整个探头被厚 4cm 的环形铅屏蔽层包裹。发射源采用常见的 ^{137}Cs 点源，能量 0.6617MeV。透射源采用 ^{152}Eu ，选择 0.34427、0.7789、0.964MeV 三个能量的数据进行重建得到线衰减系数，再转换为密度即得到废物桶内物质的密度分布。

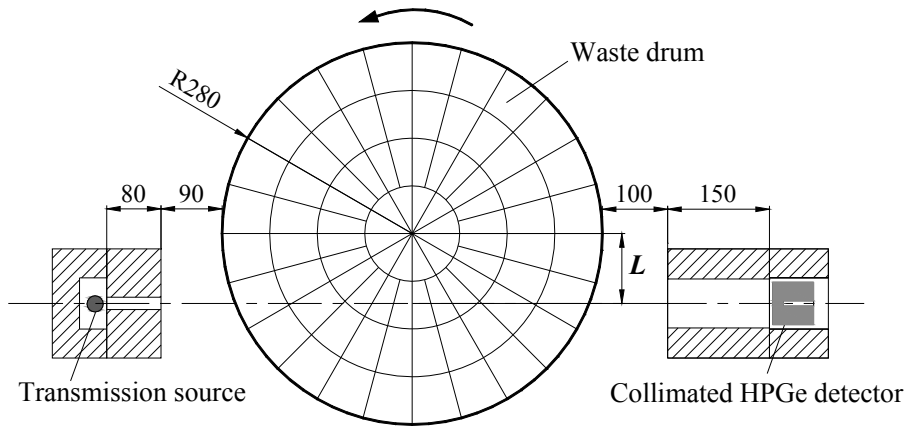


图 3-7 TGS 测量系统布局

Fig. 3-7 The layout of TGS detection system

本研究中对一层进行扫描的转动和平动设置规定如下：废物桶转动次数为 24 次，每次转动角度 15° ；探测器平动次数为 4 次，分别在 4 个不同的偏心距离（即图 3-7 所示的 $L=3.5, 10.5, 17.5, 24.5\text{ cm}$ 处）进行测量。因此对废物桶一层的扫描中探测器需总共进行 96 次测量，采集 96 个能谱。

废物桶内的模拟测量样品采用的是随意布置的非均匀分布样品，如图 3-8 所示。填充介质由两种不同密度构成，其中浅色区域的密度为 1g/cm^3 ，深色区域的密度为 2.5g/cm^3 。

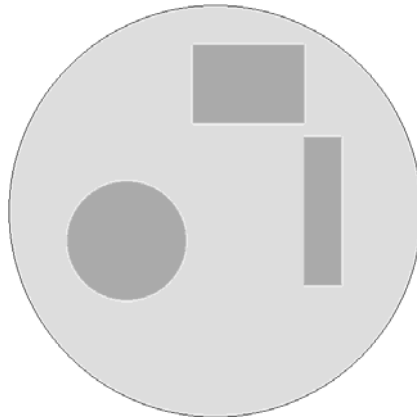


图 3-8 探测样品密度分布图

Fig. 3-8 Sketch of density distribution of the measurement sample

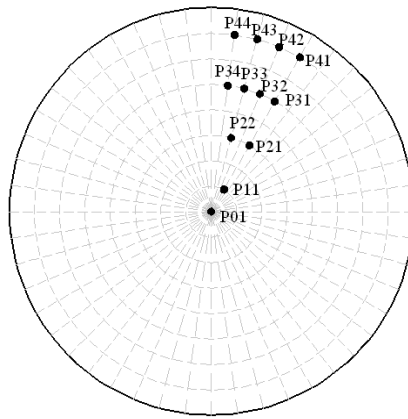


图 3-9 探测样品发射源位置布置图

Fig. 3-9 The positions of emission sources in the measured sample

表 3-1 探测样品发射源位置极坐标

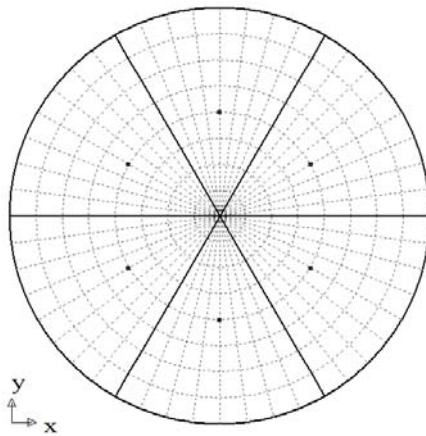
Tab.3-1 The polar coordinates of emission sources in the measured sample

符号	半径 (cm)	角度 (°)	符号	半径 (cm)	角度 (°)
P01	0	60	P33	17.5	75
P11	3.5	60	P34	17.5	82.5
P21	10.5	60	P41	24.5	60
P22	10.5	75	P42	24.5	67.5
P31	17.5	60	P43	24.5	75
P32	17.5	67.5	P44	24.5	82.5

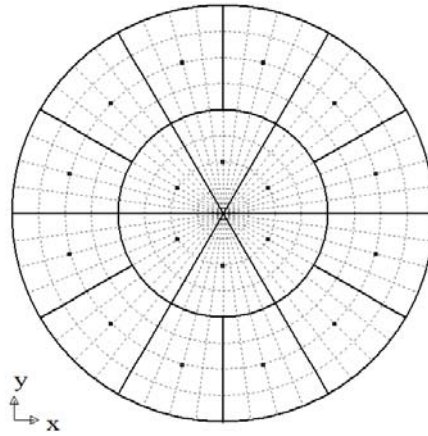
测量样品中放射性核素位置如图 3-9 所示,一共选择了 12 个不同的位置,分别处于 5 个不同半径,4 个不同夹角。其中半径较小时,由于点源会比较靠近,因此第 0 与第 1 个半径上选择了 1 个点源位置,第 2 个半径上选择了 2 个点源位置。所有的点源位于极角 60° 至 90° 度之间。该 12 个不同点源位置的极坐标如表 3-1 所示。

TGS 扫描过程采用蒙特卡罗方法进行模拟,使用 MCNP-4C 程序获得了透射扫描和发射扫描的计数率用于之后的重建计算。

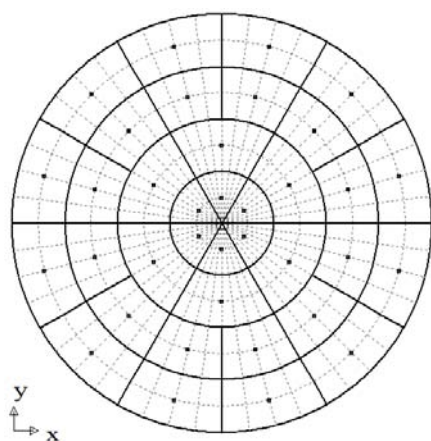
为进行对比分析,TGS 重建采用固定网格与动态网格分别进行,其中动网格是从初始粗网格逐步加密生成的,固定网格是预先划分的具有一定数量且相对均匀的网格。为了对比不同网格数量下固定网格与动网格的重建结果,固定网格根据网格数量的不同,设置了五种不同结构,如图 3-10 所示,网格划分数量分别是 6 个、18 个、36 个、66 个和 84 个。固定网格在半径方向是均匀划分的,相同半径的圆周方向也是均匀划分的。由于测量次数为 96 次,因此最密的网格单元设置为 84 个,如图 3-10 (e) 所示,在半径方向划分 4 段,每段长度 7cm;在圆周方向除最内圈划分 12 个角度外,其它外面三圈划分 24 个角度,夹角为 15° 。动网格的初始网格如图 3-10 (a) 所示,网格数为 6 个。



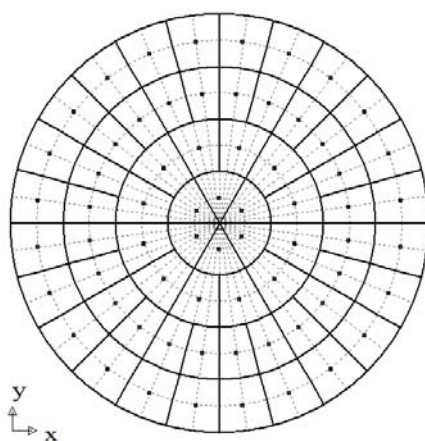
(a) 6 网格类型
(a) Type of 6 grids



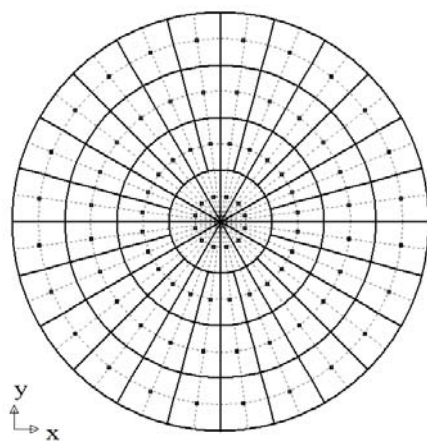
(b) 18 网格类型
(b) Type of 18 grids



(c) 36 网格类型
(c) Type of 36 grids



(d) 66 网格类型
(d) Type of 66 grids



(e) 84 网格类型
(e) Type of 84 grids

图 3-10 TGS 重建中的五种固定网格示意图

Fig. 3-10 Sketch of five types of fixed grids for TGS reconstruction

在 3.1 节中介绍了本研究中网格加密的条件, 这里针对一层样品的扫描和重建, 具体的加密条件参数设置如下: (1) $\zeta=0.25$, 即选择被加密的网格重建值需大于平均值的 0.25 倍; (2) $N_{\max, \text{step}}=18$, 即一次加密的网格数不大于 18 个; (3) $N_{\max}=96$, 即加密后的网格总数不大于 96。

3.3 采用动网格的重建结果分析

为便于重建结果分析，定义了透射重建误差 ΔT 与发射重建误差 ΔE ，如式 3-9 和 3-10 所示：

$$\Delta T = \frac{1}{\bar{\rho}_{true}} \sqrt{\sum \frac{S_j}{S} \cdot (\rho_j - \rho_{j,true})^2} \quad (3-9)$$

$$\Delta E = \frac{\sum A_j - A_{true}}{A_{true}} \times 100\% \quad (3-10)$$

式 3-9 中， S_j 为第 j 个网格的面积， S 为废物桶截面总面积， ρ_j 为第 j 个网格的重建密度， $\rho_{j,true}$ 为第 j 个网格的真实密度， $\bar{\rho}_{true}$ 为截面内真实平均密度。式 3-10 中， A_j 为第 j 个网格的重建活度， A_{true} 为真实的总活度。

式 3-9 所示的 TGS 透射重建误差是重建后各网格密度相对于真实密度的平均偏差，由于各网格面积不同，因此采用面积比进行加权平均，同时除以真实平均密度进行无量纲化。式 3-10 所示的 TGS 发射重建误差为重建后各网格的总活度相对于实际总活度的相对误差。

3.3.1 透射重建结果分析

透射重建首先采用了如图 3-10 (d) 所示的固定网格进行，网格数量为 66 个。重建后的密度分布如图 3-11 所示，由于该分布图是将网格信息与重建数据导入到图形处理软件 Tecplot 2010 里处理获得的，故图中网格为基网格，仅用于显示，不代表重建时采用的网格。

在透射重建中，网格内的物质被认为是均匀分布的，由于网格形状与物质填充的实际分布存在差异，因此非均匀介质的透射重建结果与实际密度分布相比有一定的不同。但是，图 3-11 显示三个高密度区域的位置同实际相比还是比较吻合的。由式 3-9 计算的固定网格透射重建误差 ΔT 为 0.41。

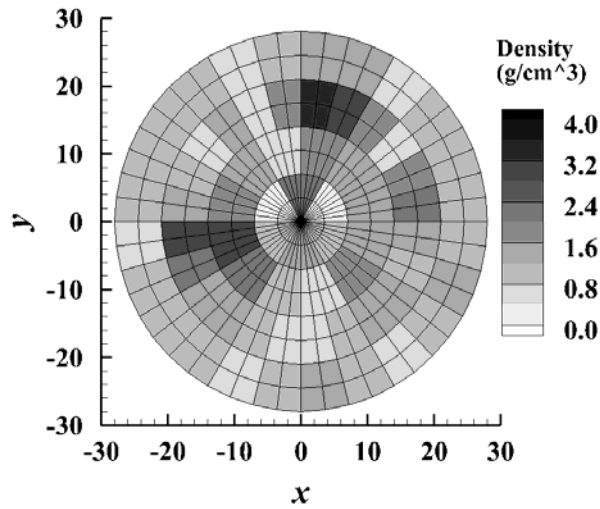


图 3-11 固定网格透射重建的密度分布

Fig. 3-11 The density distribution after transmission reconstruction using fixed grids

图 3-12 与图 3-13 是采用动网格后的透射重建的结果，其中图 3-12 是网格加密后最终生成的网格单元分布图，网格单元数量为 96 个。与固定网格相比，该加密网格显示在若干区域网格得到加密，出现了更小尺寸的网格，这些网格加密区域也同实际的高密度区域的位置相吻合。图 3-13 为采用动网格重建后的密度分布图，透射重建相对误差 ΔT 为 0.49，该值大于固定网格的重建结果，可见采用目前的动网格技术透射重建的精度变差。

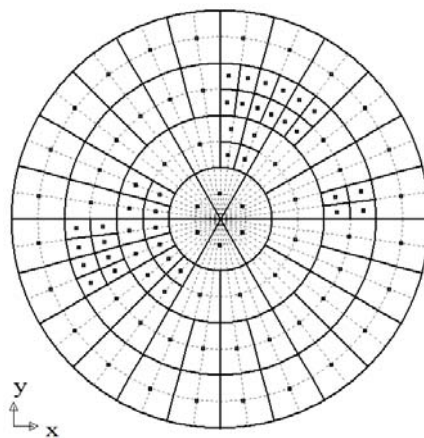


图 3-12 动网格透射重建的最终网格布置

Fig. 3-12 The final layout of grids after transmission reconstruction using dynamic grids

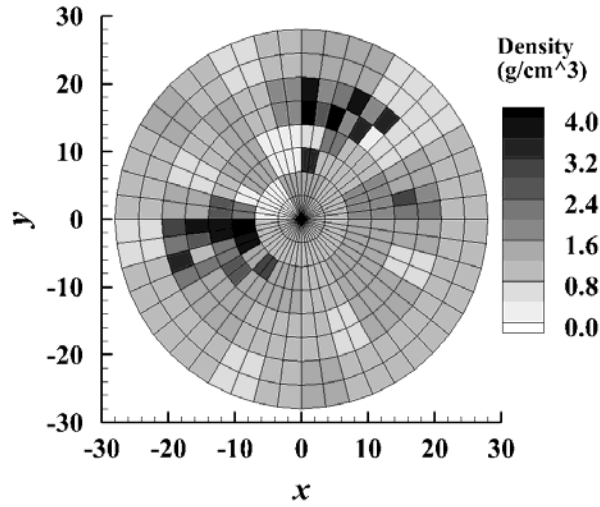


图 3-13 动网格透射重建的密度分布

Fig. 3-13 The density distribution after transmission reconstruction using dynamic grids

动网格透射重建的相对误差大于固定网格的原因，需要结合 TGS 透射扫描的原理与线性方程组的求解进行分析。固定网格与动网格在透射重建中的主要差别是高密度区域的网格被细化，如图 3-12 所示。但是，网格被细化也同时造成了网格几何尺寸的变小，那么外透射源射线穿过该网格的概率将会降低，径迹长度变小，并且网格几何尺寸小到一定程度后可能会出现无透射源射线穿过该网格的现象。由前述的透射重建原理可知，透射重建线性方程组的系数矩阵的元素是透射源射线穿过各网格的径迹长度，因此网格几何尺寸的变小引起径迹长度的改变将直接影响系数矩阵中各元素的值。

结合式 3-8 极大似然期望最大化迭代法，各列的系数之和 ($\sum a_{ij}$) 处于分母上。对于透射重建的系数矩阵，各行对应的是各个不同位置的测量过程，因此有 96 行；各列对应的是按序号排列的网格单元，因此列数等同于重建时的网格单元数。那么，第 j 列的系数之和 ($\sum a_{ij}$) 表示在所有位置的测量中透射源射线经过第 j 个网格的径迹长度总和。如果网格太小，径迹长度总和也会减小，甚至若无射线经过该网格，径迹长度总和将会为零。这样，由于 $\sum a_{ij}$ 处在分母位置，该值过小甚至接近于零会导致线性方程组的求解过程中存在很大的迭代误差。

下面针对固定网格与动网格透射重建的系数矩阵, 对各列的系数之和 ($\sum a_{ij}$) 进行概率统计分析。统计公式如式 3-11 所示, 统计范围是 0 至 100cm, 分为 10 个区间, 区间长度为 10cm, 式中 P_k 为处于第 k 个统计区间的概率, n_k 表示径迹长度之和处于第 k 个统计区间的网格单元数, N 表示总的网格单元数。

$$P_k = \frac{n_k}{N} \quad (3-11)$$

各网格的径迹长度之和的概率统计分布如图 3-14 所示。由图可知, 固定网格的径迹长度之和主要分布在 40 至 80cm 之间, 但是动网格重建时小于 40cm 的区间也有较大的概率分布, 尤其是位于 0 至 10cm 这种最小区间的概率超过了 20%。可见, 采用动网格进行 TGS 的透射重建, 出现了网格加密后网格几何尺寸变小且透射源射线通过该网格的概率被大大降低的现象, 这也造成了透射重建的迭代计算出现了较大的迭代误差。

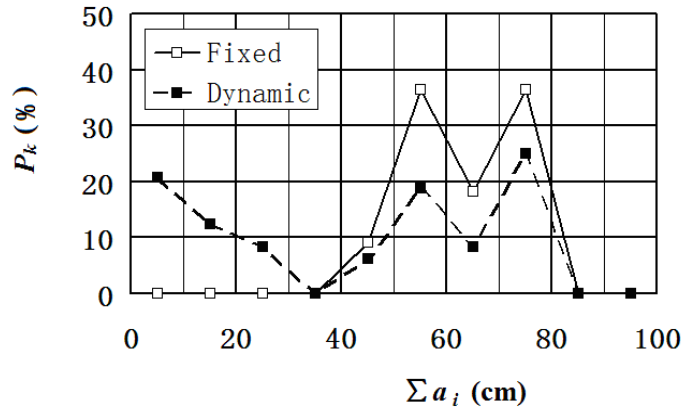


图 3-14 各网格径迹长度之和的概率分布

Fig. 3-14 Probability distribution of the track length subtotal in each grid

以上分析说明, 对于透射重建, 网格单元尺寸太大或太小都受到制约, 如果尺寸太大则图像重建的分辨率太低, 如果尺寸太小则透射源射线在网格单元内的径迹长度减小, 这些都会造成较大的透射重建误差。因此, 透射重建的网格大小设置要适中, 且分布要均匀, 避免网格尺寸差异太大。

如果要采用较多的网格提高重建分辨率且保证重建的精度，那么只有增加扫描的次数，如增加转动次数或平动次数，这样来增加径迹长度的总和。图 3-15 与图 3-16 为增加扫描次数后采用动网格透射重建的网格分布与密度分布。该扫描的平动次数为 7 次，步长 3.5cm，初始偏心距离为 3.5cm；转动次数为 48 次，步长为 7.5°，因此测量次数增加到 336 次。为了进行对比，该处透射重建的网格设置与前面 96 次扫描相同。采用动网格重建后，最终的网格单元数为 87 个，数量略少于图 3-12 显示的 96 个，网格单元分布相似。最后得到的透射重建相对误差 ΔT 为 0.33，有了大幅度降低。

但是 TGS 增加测量次数就会增加扫描时间，而 TGS 扫描时间过长本来已是 TGS 存在的问题，因此后续分析还是以 96 次扫描为准。考虑到动网格的透射重建误差增加，故后面的发射重建采用的密度分布是基于固定网格透射重建得到的。

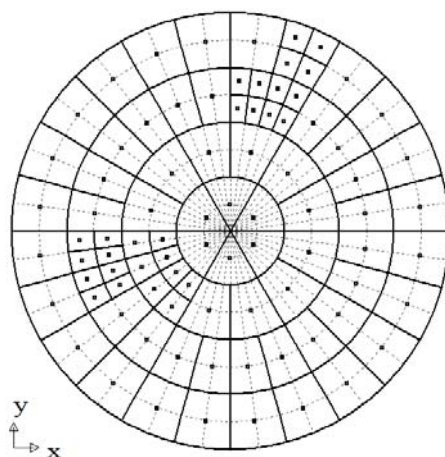


图 3-15 增加扫描次数后动网格透射重建的最终网格布置

Fig. 3-15 The final layout of grids after transmission reconstruction using dynamic grids when the scanning number increases

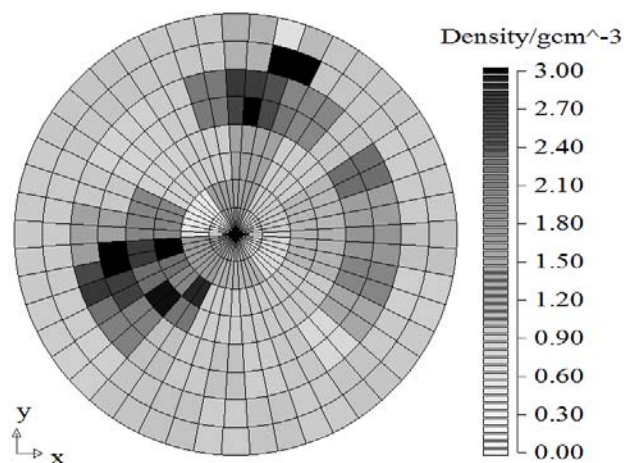


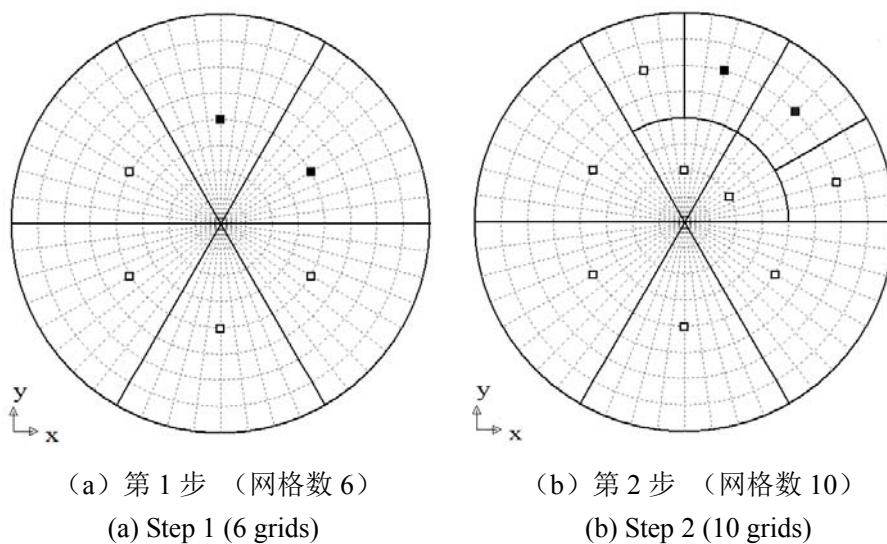
图 3-16 增加扫描次数后动网格透射重建的密度分布

Fig. 3-16 The density distribution after transmission reconstruction using dynamic grids when the scanning number increases

3.3.2 发射重建结果分析

发射重建分为固定网格与动网格两种方式, 其中固定网格的划分如图 3-10 所示的 5 种不同的划分。

图 3-17 显示的是对处于 P41 位置的点源进行发射重建时动网格的生成过程。



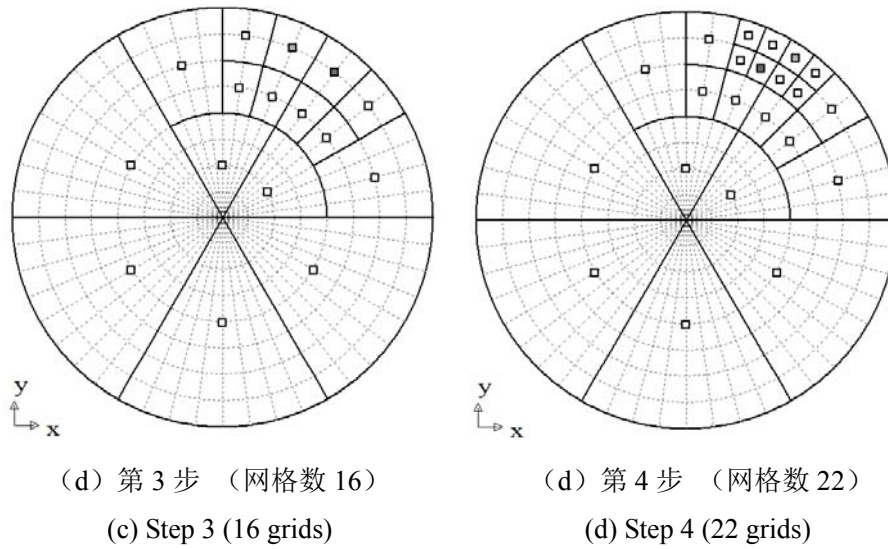
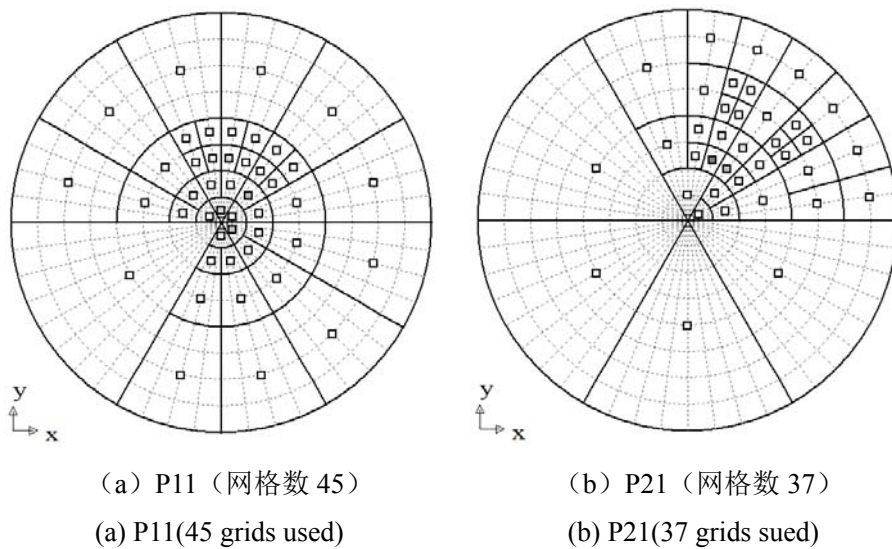


图 3-17 点源 P41 发射重建时网格生成过程

Fig. 3-17 Grids generation during emission reconstruction for P41 point source

最初的网格数为 6 个，如图 3-17 (a) 所示；依据初次重建结果对活度较大的网格单元进行第一次加密，图 3-17 (b) 所示的网格数达到 10 个；依据加密后的网格再次进行重建计算，然后再加密，随后两步的网格数分别为 16 与 22 个。这样，通过 4 次重建，其中 3 次网格加密，就完成了动网格的发射重建。且图 3-17 (d) 显示的最终加密的网格分布中，在 P41 位置周围实现了最小网格单元的加密效果。



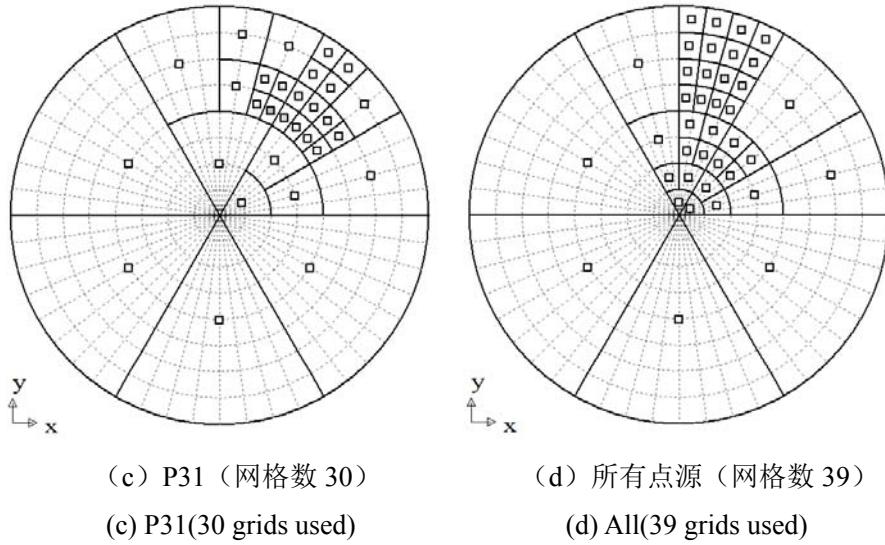


图 3-18 点源 P11、P21、P31 及多点源发射重建时最终网格布置

Fig. 3-18 The final layout of dynamic grids for P11, P21, P31 and all points

图 3-18 例举了 P11、P21、P31 等点源在动网格发射重建中生成的最终网格布置，图 3-18 (d) 为多点源情况，即将所有 12 个点源发射扫描数据进行叠加再进行发射重建。由图可知，P11、P21、P31 及多点源情况的发射重建最终的网格数量分别为 45、37、31、39，位于桶心的点源 P11 加密后的网格数量稍多。

从网格的加密次数上看，图 3-17 显示的 P41 位置的点源位于近壁面处，只要进行 4 次重建（1 次初始网格、3 次网格加密）即完成了整个动网格的发射重建。对于点源位于桶心情况，对网格单元的加密次数会稍多，总体上看对一层进行动网格的发射重建一般需要 3 到 4 次网格加密过程。

对于重建时间，动网格发射重建存在多次网格加密与重建计算，但是由于动网格初始网格数较少，加密过程中的网格数，甚至最终网格数都会少于固定网格，这样未知数的减少会使得单次重建计算需要的迭代步数与时间都要小于固定网格，因此动网格重建的总时间相比固定网格重建时间不会显著增加，甚至会有所减少。

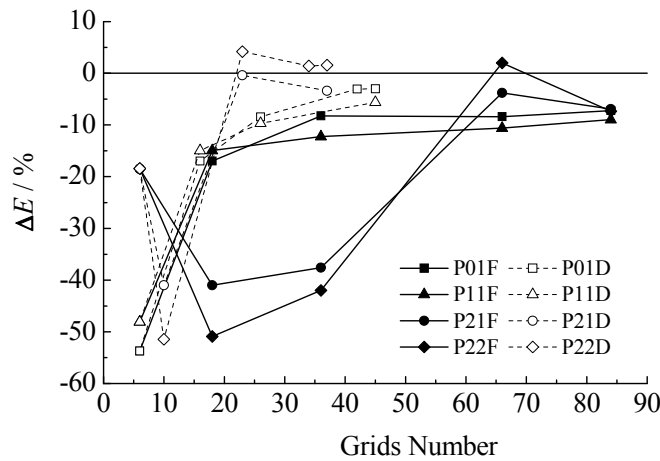
采用固定网格与动网格进行发射重建的结果对比见图 3-19，图中横坐标为重建时的网格数，纵坐标为由式 3-10 计算得到的发射重建误差。对于图中各曲线的符号，前三个字符表示点源的位置，第四个字符表示重建的网格方式，F 表示固定网格，

D 表示动网格。对于固定网格重建，网格数分别为图 3-10 中显示的五种固定网格划分的网格单元数；对于动网格重建，网格数分别为每次网格加密过程中的网格单元数。

由图 3-19 可以发现，当网格单元数较少，即网格较粗时，发射重建的结果与真实结果间的偏差较大；随着网格单元数的增多，网格单元尺寸逐渐变小，发射重建误差也逐渐减小，并最终趋于稳定。这说明，网格单元较小时，总会存在一个网格单元其中心更接近于点源，这样探测效率会更准确，因此重建误差较小。

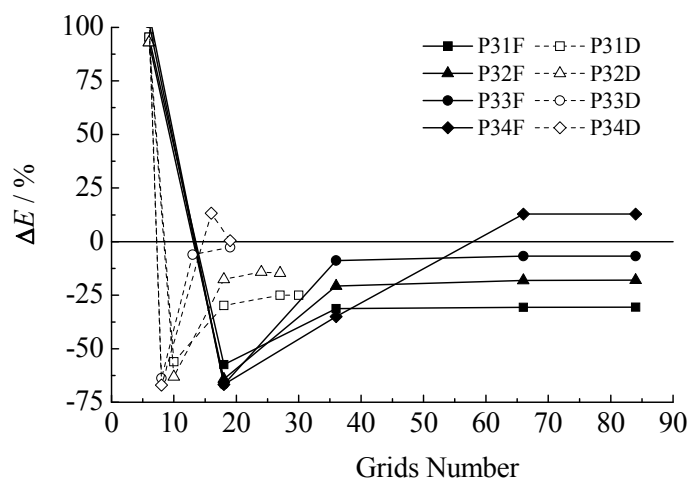
当然，也会存在偶然情况，在网格较粗时，某一网格单元中心本来就非常接近于点源位置，这样重建误差也较小。如图 3-19 (a) 中的 P21 与 P22，当网格单元数为 6 时，重建误差就小于网格数为 18 的情况。

对比不同位置的点源，处于废物桶中心的若干点源的重建活度误差整体上比较小，靠近桶壁的点源重建活度误差相对较大。这是由于靠近桶壁位置的点源，在某一旋转角度下会非常接近探测器，而探测器附近区域的探测效率随空间位置变化非常大，这样网格中心与点源位置的较小偏差都会造成较大的探测效率偏差，这将会影响发射重建的迭代计算结果准确度。



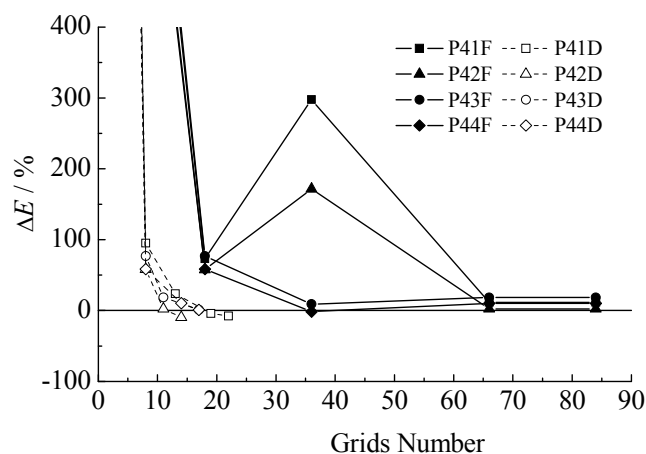
(a) 靠近桶心的 4 个点源

(a) Inner four point-sources



(b) P3 半径的 4 个点源

(b) Four point-sources at P3 radius



(c) P4 半径的 4 个点源

(c) Four point-sources at P4 radius

图 3-19 固定网格与动网格对单点源发射重建结果对比

Fig. 3-19 Comparison of emission reconstruction results for single point source between fixed grids and dynamic grids

对比固定网格与动网格的发射重建结果,在单点源情况下,动网格的最终网格单元数都比较少,大约采用三分之一的网格就可以达到或超过固定网格在网格单元数最多时的重建效果。在相同的网格数下,动网格的发射重建误差要小于固定网格

的重建结果,尤其是在靠近桶壁处的点源,动网格的发射重建误差远低于固定网格。这说明使用动网格技术在对点源附近区域进行网格加密后,点源与所在网格单元的中心更接近,探测效率计算的准确性的增加能够大大减小重建的误差。与之对比的是,废物桶中心区域的探测效率对空间位置的敏感性降低,对点源的准确定位不能显著提高探测效率的准确性,因此使用动网格导致的重建误差的降低不如靠近桶壁处点源明显。

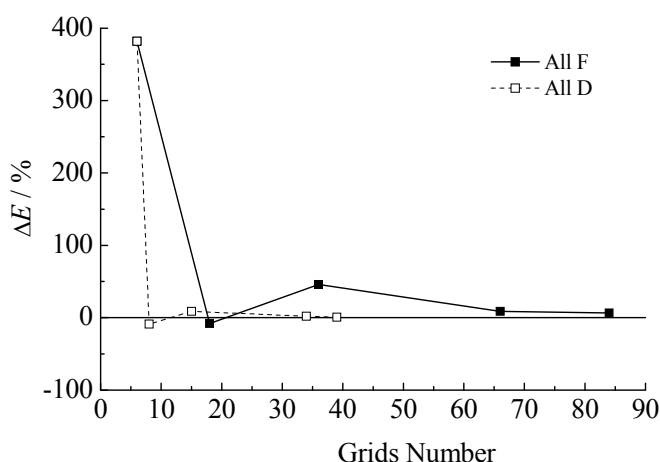


图 3-20 固定网格与动网格对多点源发射重建结果对比

Fig. 3-20 Comparison of emission reconstruction results for multi-sources between fixed grids and dynamic grids

对于多点源情况,如图 3-20 所示,动网格重建最终的网格数也明显少于固定网格,并且重建误差也低于固定网格。由此可见,发射重建采用动网格在对核素的准确定位以及减少网格单元数上具有明显的优势。

表 3-2 为各点源在最终网格情况下发射重建的活度误差对比,其中固定网格选择为单元数为 84 的网格类型(如图 3-10 (e) 所示),动网格的网格单元数是依据最终的加密情况。通过对比可以发现,动网格的网格单元数远少于 84,单点源时网格单元数最少为 14,最多为 45。在重建精度上,13 种点源情况(包括多点源)中有 12 种情况的动网格发射重建误差都不同程度地小于固定网格重建误差,最大的变化由偏差 18.45%降低到 0.89%。由此可见,在相同的 TGS 扫描下,并且均采用

固定网格进行透射重建的情况下, 采用动网格进行发射重建不仅能够减少网格数量, 而且具有更小的发射重建误差, 最终提高了 TGS 的测量精度。

另外需要提到的是, 与单点源相对比, 多点源情况下固定网格重建的活度偏差反而不大, 这是由于目前选择的 12 个点源位置在 30° 夹角内分布比较均匀, 由于不同位置的发射重建误差有正有负, 因此叠加后的总误差减小了。

表 3-2 发射重建结果
Tab.3-2 Emission reconstruction results

发射源	固定网格重建		动网格重建	
	网格数	ΔE (%)	网格数	ΔE (%)
P01	84	-7.20	45	-3.00
P11	84	-8.98	45	-5.62
P21	84	-6.91	37	-3.39
P22	84	-7.33	37	1.56
P31	84	-30.62	30	-25.04
P32	84	-17.99	27	-14.65
P33	84	-6.78	19	-2.66
P34	84	12.81	19	0.47
P41	84	11.62	22	-7.78
P42	84	2.42	14	-9.55
P43	84	18.45	17	0.89
P44	84	10.18	17	1.04
All	84	6.56	39	0.76

3.4 本章小结

本章将动网格技术应用于层析 γ 扫描 (TGS) 技术的图像重建中, 对动网格的重建原理进行了详细介绍, 对非均匀介质的点源样品进行了 TGS 模拟扫描与动网

格重建，发现动网格在发射重建中能取得理想效果。

TGS 动网格图像重建技术是针对密度或活度较大的区域进行网格加密，透射重建与发射重建均采用逐次加密的网格重构方法，即先设置较少的网格单元进行首次重建计算，在密度或活度较大区域进行网格分解，然后再进行重建计算，逐步实现由粗网格到细网格的动态重构。

对比固定网格与动网格的重建结果发现，在透射重建中动网格的重建效果不理想。主要原因是网格被加密后尺寸减小，透射源射线穿过加密网格的概率被降低，使得通过该网格单元的径迹长度减小，这会造成求解线性方程组出现较大误差，从而产生较固定网格更大的透射重建误差。因此，透射重建的网格大小设置要适中，且分布要相对均匀。

在发射重建中，动网格的重建效果比较理想。对于不同位置的单点源与多点源情况，动网格发射重建一般需要经过 3 至 4 次的网格加密即可完成对点源附近的网格加密。加密完成所需的网格单元数少于固定网格，大约采用三分之一数量的网格就可以达到或超过固定网格的重建效果。在重建精度上，当网格数相近时，动网格的发射重建误差要明显小于固定网格的重建误差，尤其对靠近桶壁处的点源优势更加明显，这是由于动网格在对点源附近区域进行网格加密后，点源与所在网格单元的中心更接近，探测效率计算准确性的增加能够大大减小重建的误差。

因此，在相同的 TGS 扫描下，并且均采用固定网格进行透射重建的情况下，采用动网格进行发射重建不仅能够实现对核素的准确定位和减少网格数量，还能减小发射重建活度误差，提高 TGS 的测量精度。

第四章 基于动网格发射重建的 TGS 测量优化研究

层析 γ 扫描技术 (TGS) 在对废物桶一个断层进行扫描的过程中, 需要获取多个位置多个角度下的测量能谱, 而分段 γ 扫描技术 (SGS) 只需在废物桶匀速旋转的过程中测量一个能谱; TGS 测量的机械动作涉及到废物桶的步进转动和探测器的平动, 相比 SGS 更为复杂, 也需要更多的机械设备动作时间。因此, TGS 的总体测量耗时会远远大于 SGS, 这一直是制约 TGS 大规模工业应用的一个重要因素。因此, 如何在保证 TGS 测量精度的同时, 减少 TGS 的测量时间, 这是一个需要研究的关键问题。

通过前一章的研究发现, 利用自适应动网格进行 TGS 发射重建能够对放射性核素进行准确定位, 使用较少数量的网格能够获得更高精度的重建结果。因此, 该技术为前述问题带来一个潜在的解决方案, 即在减少转动或平动扫描次数后, 再利用动网格进行发射重建, 如仍能获得较好的测量精度, 则可达到测量优化的目的。本章将对此开展研究, 对比分析简化测量情况下固定网格与动网格发射重建误差的变化规律, 确定测量优化方案。

4.1 TGS 测量优化及扫描设置

本章中 TGS 的测量优化是指通过对 TGS 重建技术的改进, 在不降低测量精度的前提下, 对 TGS 扫描过程进行简化, 以缩短测量时间。

一般来讲, 缩短 TGS 测量时间的办法有多种, 例如增加探测器的个数, 进行多个探测器的并行扫描, 又例如从图像重建的迭代算法入手, 提高在计数率较少和数据噪声较大时的活度重建精度, 缩短单个能谱的测量时间, 等等。实际上, 这些方法都存在一定的局限性, 增加探测器的个数必然会增加系统成本, 不符合经济性原则; 改进迭代算法也只能很有限地提高精度和缩短时间。本文提出的缩短测量时间的方法是扫描过程简化, 即减少 TGS 扫描时的转动次数或平动次数, 这是缩短

TGS 测量时间最直接的途径。然而，减少扫描次数在 TGS 的透射与发射重建中实质就是减少线性方程组的方程个数，这不仅会引起未知数个数的相应减少，即网格单元数减少，而且在减少对未知数的约束后，将直接导致重建精度的降低。因此，为保证测量精度，将引入前一章介绍的动网格重建技术，对比分析简化测量情况下固定网格与动网格发射重建误差的变化，确定测量优化方案。

为研究不同程度的扫描简化对测量精度的影响，本文设置了若干扫描方案，如表 4-1 所示，根据平动与转动次数不同分为五种测量工况。废物桶转动分为三种情况：转动 6 次（角度步长为 60° ）、转动 12 次（角度步长为 30° ）、转动 24 次（角度步长为 15° ）。探测器在 y 方向平动分为两种情况：平动 2 次（步长 14cm），平动 4 次（步长 7cm）。以废物桶圆心为几何坐标中心，探测器在 y 方向上的初始位置均为 3.5cm。这五种扫描方案中，Case24×4 即转动 24 次平动 4 次为标准扫描方案，其他四种为简化方案。

表 4-1 TGS 简化扫描方案
Tab.4-1 The simplified scanning scheme of TGS

测量工况	转动		平动	
	次数	步长 $\Delta A (^\circ)$	次数	步长 $\Delta L (cm)$
Case 06×4	6	60	4	7
Case 12×2	12	30	2	14
Case 12×4	12	30	4	7
Case 24×2	24	15	2	14
Case 24×4	24	15	4	7

根据表 4-1 列举的五种扫描方案，扫描次数依次为 24、24、48、48、96 次。对此，透射与发射重建时固定网格的设置如图 4-1 所示，不同的扫描次数对应的网格数分别为 24、42、84。

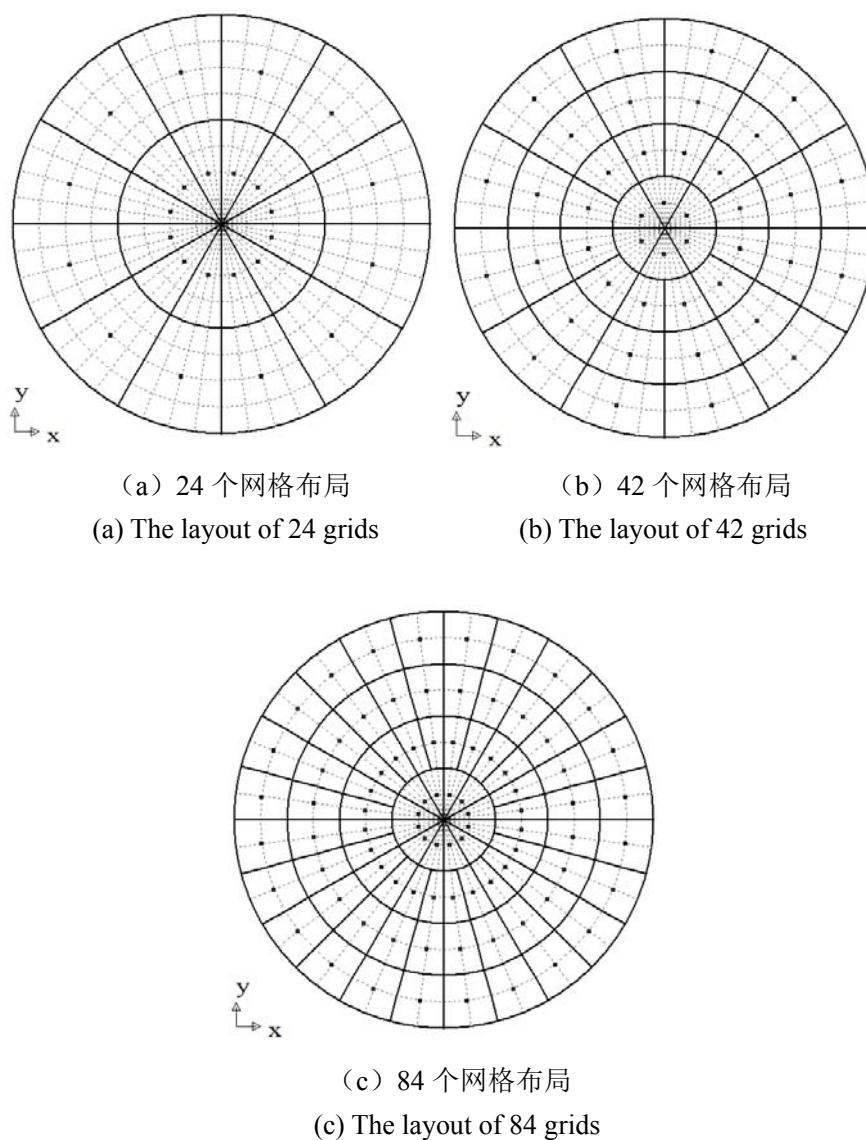


图 4-1 三种类型的固定网格划分方式

Fig.4-1 The three types of fixed grid layouts

4.2 模拟扫描的实验验证

为对比分析各种测量方案下重建误差的变化，必然要先获得大量样品的 TGS 扫描数据以用于之后的重建计算。由于本文中大量 TGS 扫描数据均由蒙特卡罗程序 MCNP-4C 模拟计算获得，因此需要先验证模拟扫描数据的准确性，故采用 MCNP-4C 程序针对已有的实验系统和数据进行了模拟，并将模拟数据和实验数据

进行对比。其中,实验所使用的桶内放射源为 ^{137}Cs 点源,分别置于桶内两个不同位置,如图 4-2 所示,第一个位置是半径 9cm,测量时的初始角度为 175° ,第二个位置是半径 19cm,测量时的初始角度为 130° 。该源于 2007 年 10 月份标定,标定活度为 $7.4 \times 10^6 \text{Bq}$,通过换算在实验时的活度为 $6.6 \times 10^6 \text{Bq}$ 。填充的材料为尼龙,密度为 1.15g/cm^3 。该实验的扫描设置为转动 24 次,平动 4 次,共计 96 次测量。MCNP-4C 模拟扫描的设置与之相同。

模拟扫描数据与实验数据对比如图 4-3 所示,图中的横坐标为扫描次序,纵坐标为发射扫描时探测器的计数率。通过对比可以发现,实验测量与模拟计算的结果非常吻合。其中 1 至 24 次测量是在偏心距离为 3.5cm 时的扫描结果,由于对废物桶的偏心距离最小,扫描中具有最大的计数率峰值。图 4-3 (a) 中点源的实验时计数率峰值为 242,模拟计算的计数率峰值为 248,两者的相对误差为 2.5%。其它峰值相对较小,实验与模拟的两者差异也较小。图 4-3 (b) 中点源的实验时计数率峰值为 1087,模拟计算的计数率峰值为 1095,相对误差为 0.7%。由此可见,采用蒙特卡罗方法和 MCNP-4C 程序能够比较准确地模拟 TGS 扫描过程。

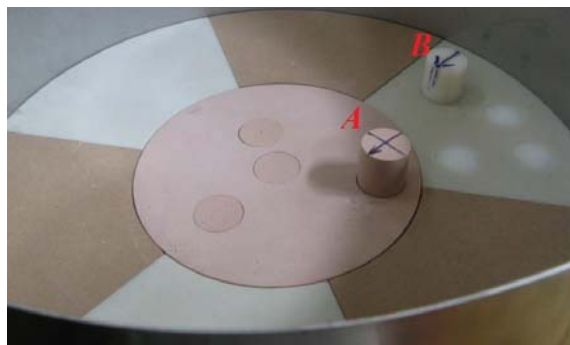
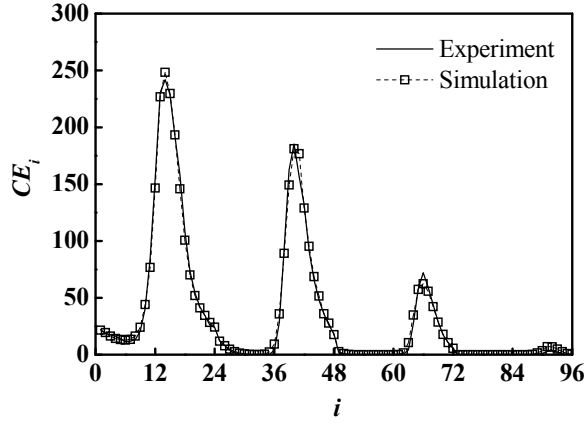
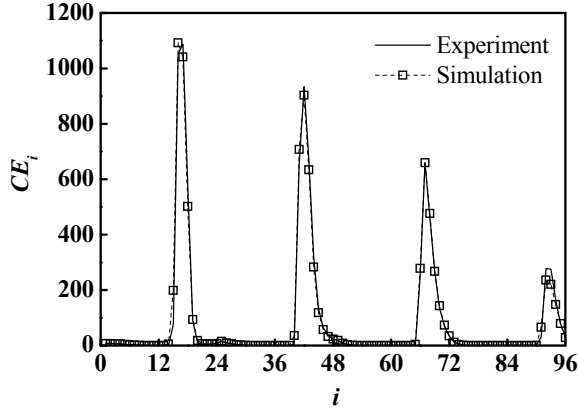


图 4-2 实验样品及点源位置照片

Fig.4-2 The picture of the experimental sample and point source location



(a) 点源 A (半径 9cm, 初始角度 175°)

(a) Point source A ($R=9\text{cm}$ and $A=175^\circ$)

(b) 点源 B (半径 19cm, 初始角度 130°)

(b) Point source B ($R=19\text{cm}$ and $A=130^\circ$)

图 4-3 发射扫描的实验与模拟数据对比

Fig.4-3 The comparison of experiment and simulation data of emission scanning

4.3 模拟扫描及重建结果分析

桶内填充介质设置了均匀与非均匀两种情况, 如图 4-4 所示。均匀介质密度为 1.0g/cm^3 , 非均匀介质由两种密度组成: 浅色区域密度为 1.0g/cm^3 、深色区域密度为 2.5g/cm^3 。

由于所设置的均匀和非均匀介质样品均为轴对称, 因此发射源布置在 0 至 180° 的半圆区域。发射源以点源形式布置, 如图 4-5 所示, ^{137}Cs 点源分别位于三个不同

半径位置上：3.5cm，14cm，24.5cm。各半径下点源周向个数为 72 个，从角度为零（位于横坐标轴上）开始，相邻点源间的角度间隔为 2.5° 。

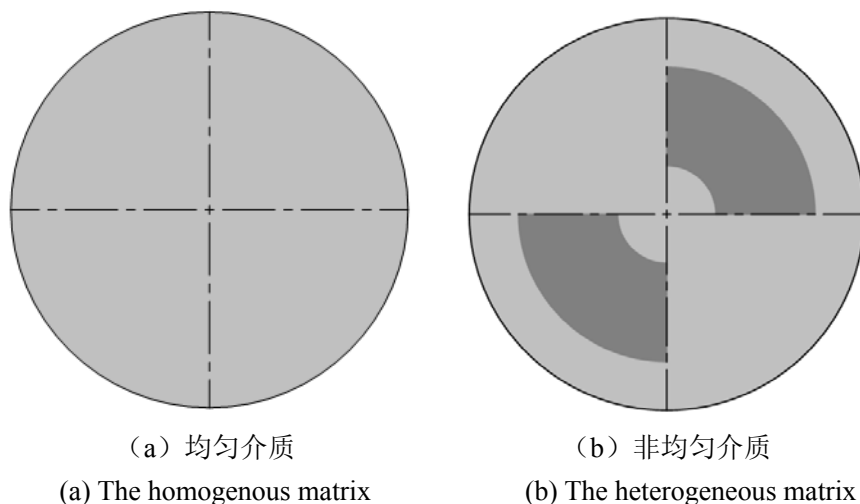


图 4-4 介质分布示意图

Fig.4-4 The layout of matrix

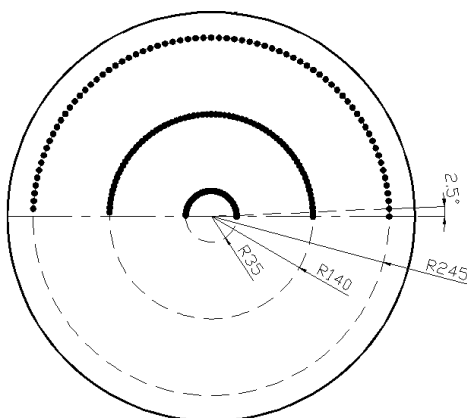


图 4-5 发射源分布示意图

Fig.4-5 The layout of emission sources

4.3.1 透射重建结果

对如图 4-4 所示的两种介质进行透射扫描和重建，采用固定网格进行重建后的密度分布如图 4-6 与图 4-7 所示。

图 4-6 是五种不同测量方案下均匀介质透射重建后的密度分布图，从 Case06 \times 4 到 Case24 \times 4，其透射重建误差分别为：0.051、0.048、0.033、0.105、0.074。可见，

对于均匀介质，并不是测量次数越多网格单元数越多其透射重建的精度就越高。

图 4-7 是五种不同测量方案下非均匀介质透射重建的密度分布图，从 Case06×4 到 Case24×4，其透射重建误差分别为：0.498、0.499、0.119、0.171、0.068。从密度分布上看，图 4-7 (a) 显示的密度分布同实际差距最大，图 4-7 (b) 显示的密度分布由于网格划分原因导致在桶心与桶壁区域同实际差距较大，图 4-7 (d) 显示的密度分布在靠近桶壁区域同实际差距较大，图 4-7 (c) 与图 4-7 (e) 显示的密度分布同实际比较符合。平动 4 次的扫描方案 Case06×4、Case12×4、Case 24×4 的透射重建误差依次为：0.498、0.119、0.068，是随着转动次数的增多而误差逐渐减小。平动 2 次的扫描方案 Case12×2、Case24×2 的透射重建误差依次为：0.499、0.171，也是随着转动次数的增多而误差逐渐减小，但是在相同测量次数下要大于平动 4 次扫描的重建情况，如 Case24×2 的透射重建误差 0.171 要大于 Case12×4 的透射重建误差 0.119。

对于均匀介质，TGS 扫描由 Case24×4 简化到 Case12×4，其透射重建的误差由 0.074 变为 0.033，由 Case24×4 简化到 Case24×2，其透射重建的误差由 0.074 变为 0.105。对于非均匀介质，测量次数减少后，透射重建误差增大，并且平动次数减少对透射重建误差的影响相比转动次数减少要更大一些。例如，由 Case24×4 简化到 Case12×4，其透射重建的误差由 0.068 增加到 0.119，而由 Case24×4 简化到 Case24×2，其透射重建的误差由 0.068 增加到 0.171，前者的误差增加幅度更小。但从总体上来说，由 Case24×4 简化到 Case12×4 或 Case24×2，其透射重建误差变化均较小。

由第二章的分析可知，SGS 技术的重建精度受两个因素的影响，一个是对发射源的探测效率计算，另一个是桶内介质的衰减。同样，在 TGS 技术中，这两个因素也不同程度地影响发射重建。尤其是第一个因素，在网格较粗时，网格不能对点源准确定位，这会大大影响探测效率计算的准确性。在这种情况下，介质密度误差造成的影响可能相对次要。并且，由于第三章 3.3.1 节中叙述的原因，透射重建采用动网格不一定能降低重建误差。因此基于以上两方面的原因，本章中透射重建不再采用动网格重建，而全部采用固定网格进行重建，重建后得到的密度与衰减系数分布将用于后续的发射重建。

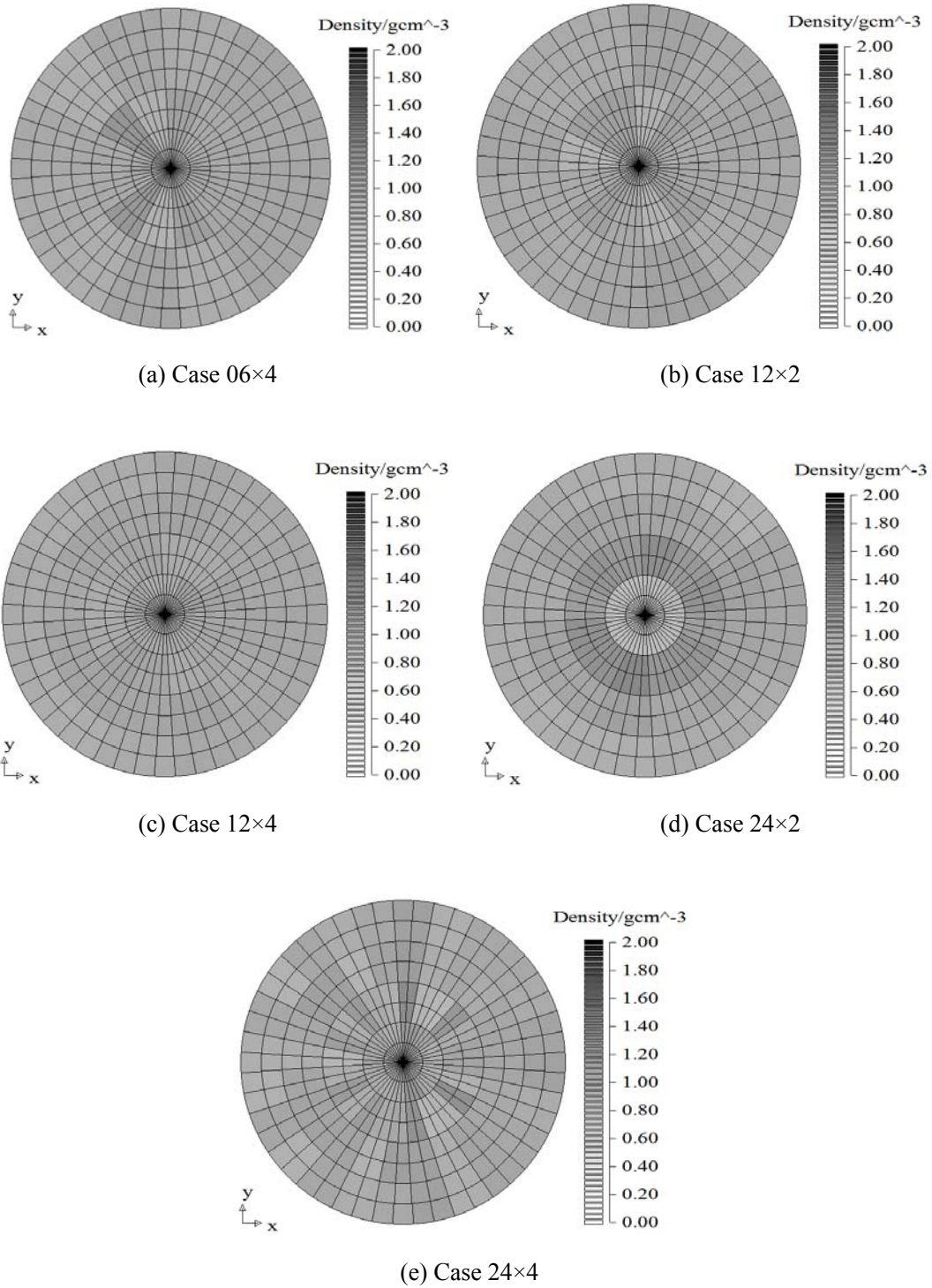


图 4-6 均匀介质透射重建密度分布图

Fig.4-6 The density distribution after transmission reconstruction in the homogenous matrix

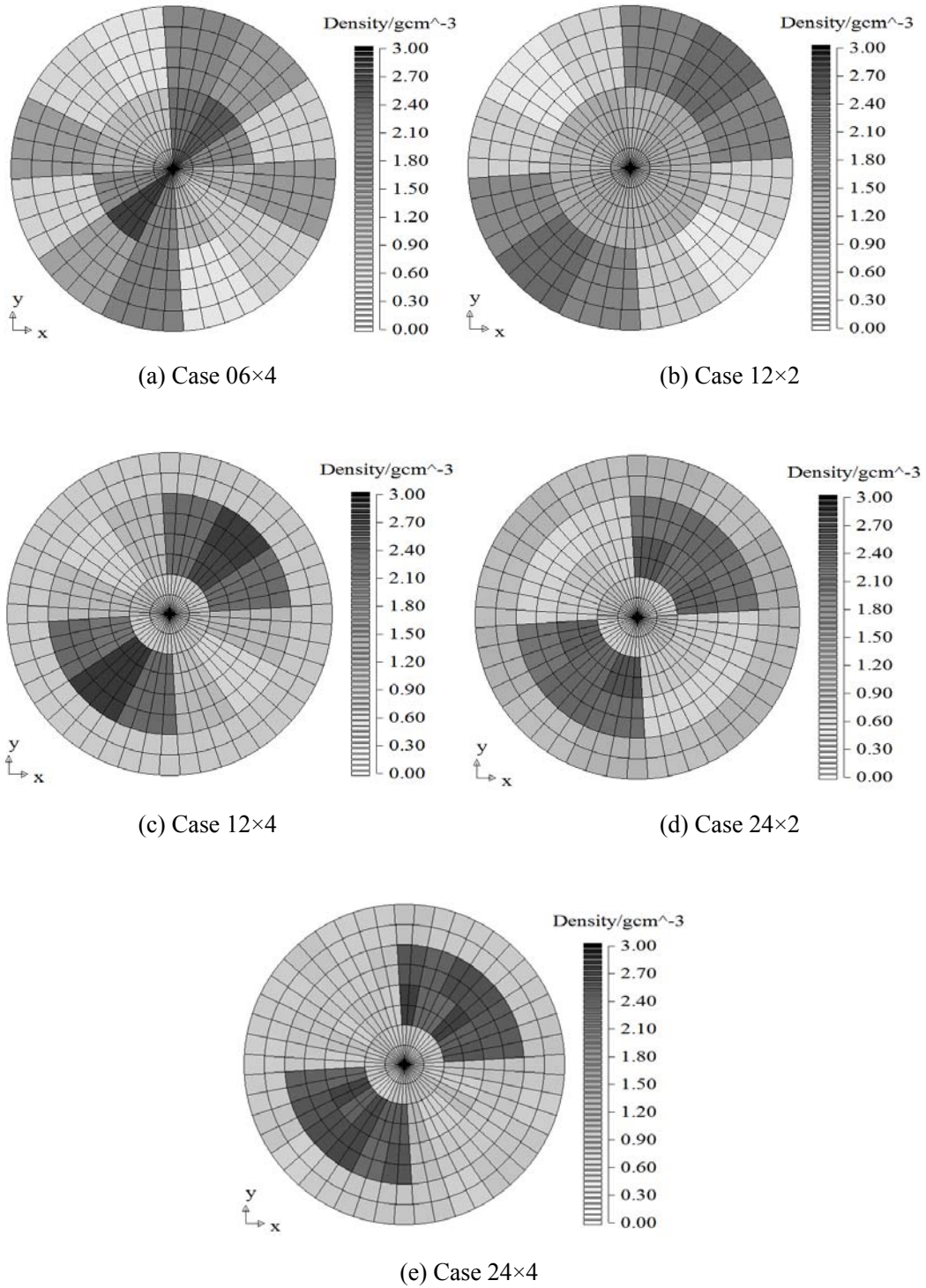


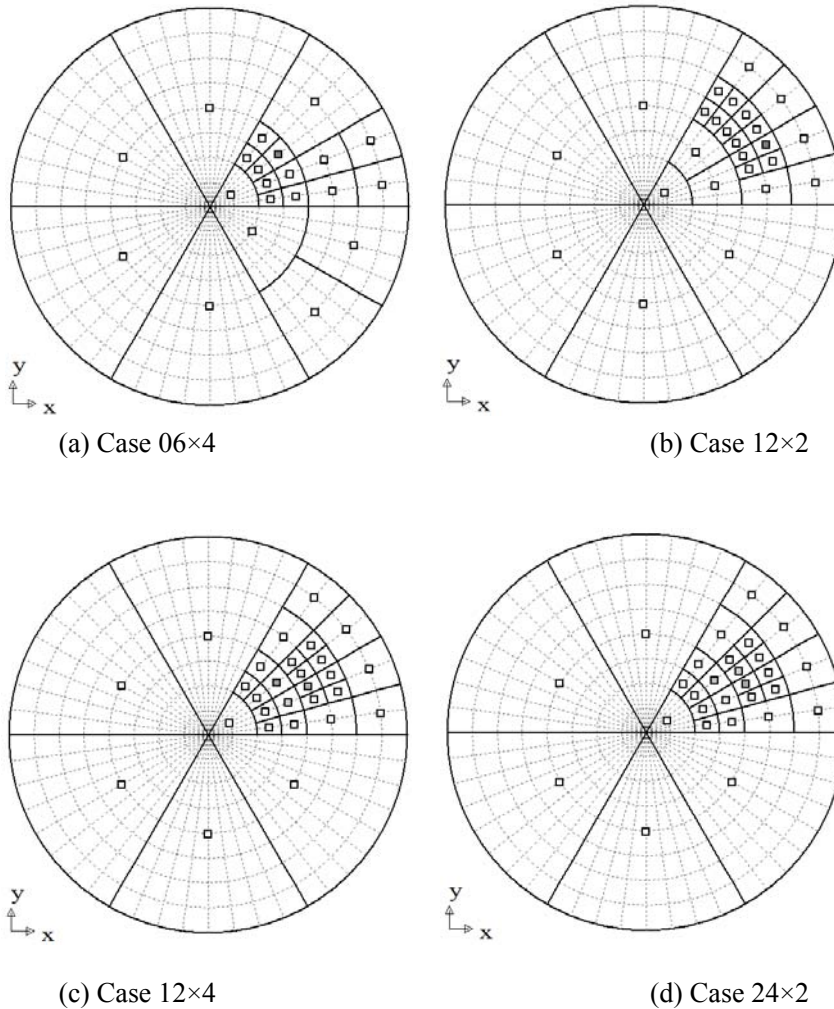
图 4-7 非均匀介质透射重建密度分布图

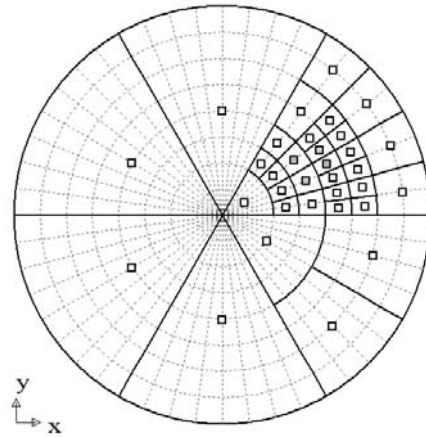
Fig.4-7 The density distribution after transmission reconstruction in the heterogenous matrix

4.3.2 单点源发射重建结果

发射重建采用动网格与固定网格分别进行。其中动网格的重建原理在第三章已经介绍，本章的动网格重建采用的是相同的算法与软件。

关于五种不同测量方案下对单点源发射重建的动网格最终分布情况，以位于半径 14cm、角度 30° 处的点源为例进行说明，如图 4-8 所示。由于在均匀和非均匀两种介质情况下的动网格最终分布情况基本相同，因此只列出均匀介质发射重建的动网格分布情况。





(e) Case 24×4

图 4-8 单点源发射重建最终的网格分布图 ($R=14\text{cm}$, $A=30^\circ$)Fig.4-8 The final layout of grids after refinement in emission reconstruction for the point emission source at $R=14\text{cm}$ and $A=30^\circ$

由图 4-8 可见, 围绕该点源, 其周边的网格得到不同程度的加密, 其它区域则依然是初始的网格结构。根据动网格的加密规则, 终止网格加密的依据是该网格单元是否已为最小网格以及网格单元总数是否达到规定的上限。在不同的测量方案中, 动网格重建时网格数量上限的选取是依据测量次数。加密后的网格单元数最少为 Case06×4 测量方案, 有 21 个网格, 最高为 Case24×4 测量方案, 有 33 个网格。这些网格单元的数量均低于对应的固定网格的单元数量。实际上, 在绝大多数情况下, 采用动网格重建的最终网格数量都低于对应的固定网格的单元数量。

对于半径在 3.5cm 与 24.5cm, 角度为 30° 处的点源, 在对 Case24×4 测量方案进行动网格发射重建后, 最终加密网格的分布情况如图 4-9 所示。半径为 3.5cm 的点源最后网格数为 33 个, 而半径为 24.5cm 的点源最后网格数为 20 个。这是由于当点源靠近桶中心时, 该处的网格相对密集, 易造成重建值在各网格内进行分摊, 因此动网格加密时加密的网格单元数相对较多, 即造成网格的过量消耗; 而如果点源靠近桶壁处, 由于该处网格间的间距相对较大, 因此重建值不易被分摊, 这样网格加密的目标明确, 所需要的网格单元数就会大大减少, 图 4-9 (b) 所示的加密后的网格分布则比较理想。

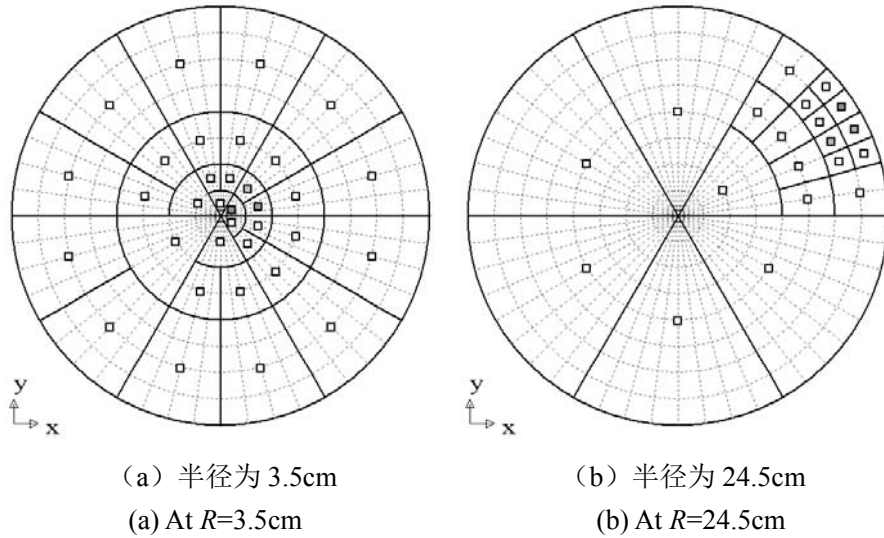


图 4-9 半径为 3.5 与 24.5cm 两个点源在 Case 24×4 时发射重建最终的网格分布图 ($A=30^\circ$)

Fig.4-9 The final layout of grids after refinement in emission reconstruction of Case 24×4 for the point emission source at $R=3.5, 24.5\text{cm}$ and $A=30^\circ$

接下来将对发射重建结果误差进行讨论，用到了前一章定义的发射重建误差 (ΔE)，即发射重建后各网格内核素活度的总和相对于真实总活度的相对误差。

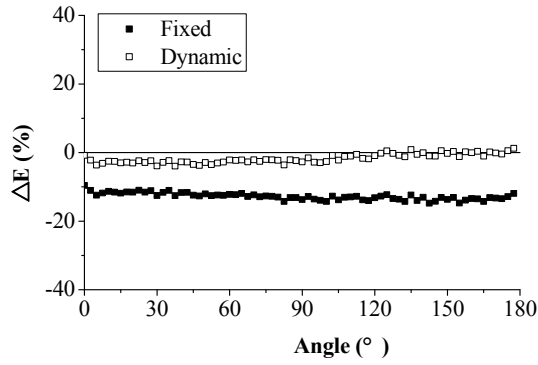
对两种不同介质下各个不同位置的点源进行了固定网格与动网格的发射重建，两种类型网格的发射重建误差的对比见图 4-10 至图 4-15。图中，横坐标为点源的角度，纵坐标为发射重建误差 (ΔE)。图 4-10 至图 4-12 针对的是废物桶内为均匀介质的情况，图 4-13 至图 4-15 针对的是废物桶内为非均匀介质的情况，依次对应的点源半径分别为 3.5cm，14cm 与 24.5cm。

图 4-10 至图 4-15 显示点源半径对发射重建误差存在影响，半径越大各测量情况下发射重建误差也越大。这是由于点源半径越大，该点源越靠近桶壁，根据前面分析可知，靠近桶壁的点源其空间位置对探测器的探测效率敏感性更高，这使得点源位置与网格中心有差距时探测效率的计算会存在更大的偏差，从而导致重建结果的误差较大。这一点在图 4-11 与图 4-12 所示的固定网格重建的误差曲线呈周期性变化的现象中也能得到进一步验证。当点源在角度增加的过程中，该点源的位置与周围最近的几个网格的距离也是呈周期性变化，因此探测效率及重建误差也会受这种周期性变化的影响。例如图 4-12 (c) 与 (d) 所示的 Case12×4 与 Case24×2 两种

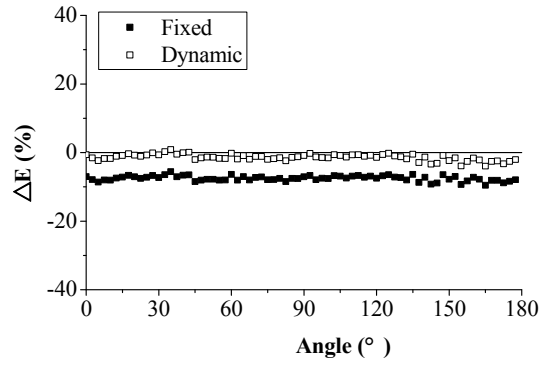
测量方案，重建采用的固定网格是图 4-1 (b) 所示的 42 个网格，最外圈的相邻网格夹角为 30° 且最外圈网格的中心位于半径 24.5cm，因此当点源角度为 15° 时点源与网格中心重合，发射重建误差则接近于零；而当点源角度为 30° 时点源位于两网格交界处，发射重建误差则最大。并且由于网格夹角为 30° ，故在 0 至 180° 范围应有 6 个周期性变化，这与图中曲线的周期性分布规律也是吻合的。

以上分析也进一步说明，在发射重建中对点源的准确定位，尤其是网格中心与点源能够最大程度的靠近可大大降低发射重建的误差。

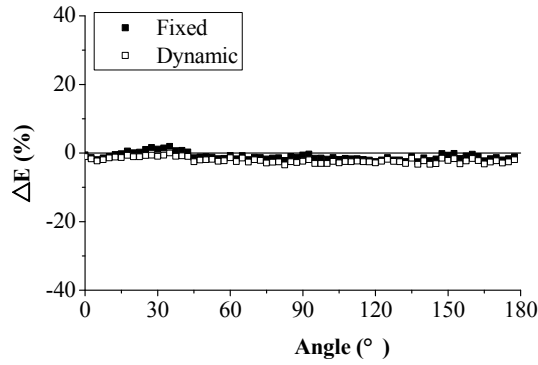
对比固定网格与动网格的发射重建误差，图 4-10 至图 4-12 均显示，除 Case 24×4 测量方案外，其它测量方案下动网格的发射重建误差均明显小于固定网格的发射重建误差，尤其是扫描次数较少的测量方案，其动网格的发射测量误差要大幅小于固定网格的重建情况。对于半径为 3.5cm 的均匀介质单点源情况，前两种测量方案（Case06×4 与 Case12×2，测量次数均为 24 次）中动网格与固定网格重建结果的差异比较明显，后三种方案（Case12×4、Case24×2、Case24×4）动网格与固定网格的发射重建误差均较小。在半径为 14cm 时，前四种测量方案（Case06×4、Case12×2、Case12×4、Case24×2）差异比较明显。在半径为 24.5cm 时，前四种测量方案（Case06×4、Case12×2、Case12×4、Case24×2）的固定网格发射重建的误差呈明显的周期性变化，最大误差达到 90% 以上，而动网格的发射重建误差在前两种测量方案（Case06×4、Case12×2）下基本在 $\pm 20\%$ 以内，后三种测量方案（Case12×4、Case24×2、Case24×4）下基本在 $\pm 10\%$ 以内。因此，在均匀介质中动网格在不同测量方案下的发射重建精度较固定网格有非常明显的优势。



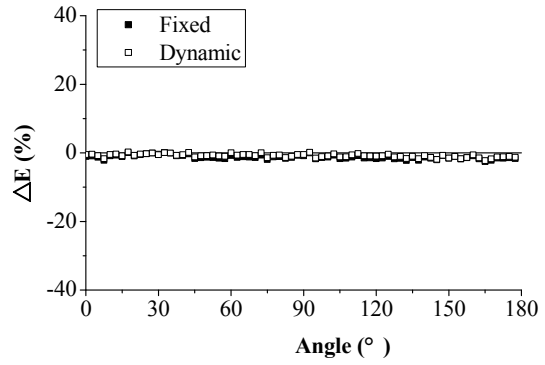
(a) Case 06×4



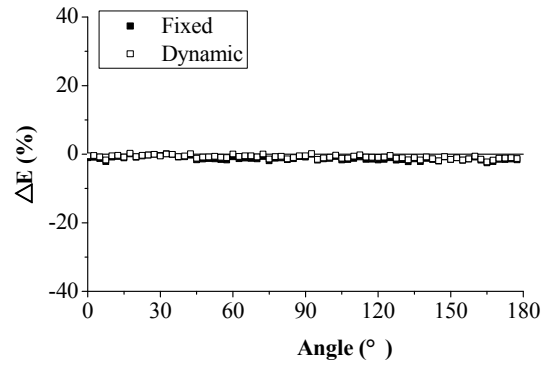
(b) Case 12×2



(c) Case 12×4



(d) Case 24×2



(e) Case 24×4

图 4-10 均匀介质半径为 3.5cm 时单点源发射重建误差对比

Fig.4-10 The comparison of ΔE in emission reconstruction for single source at $R=3.5$ cm the homogenous matrix

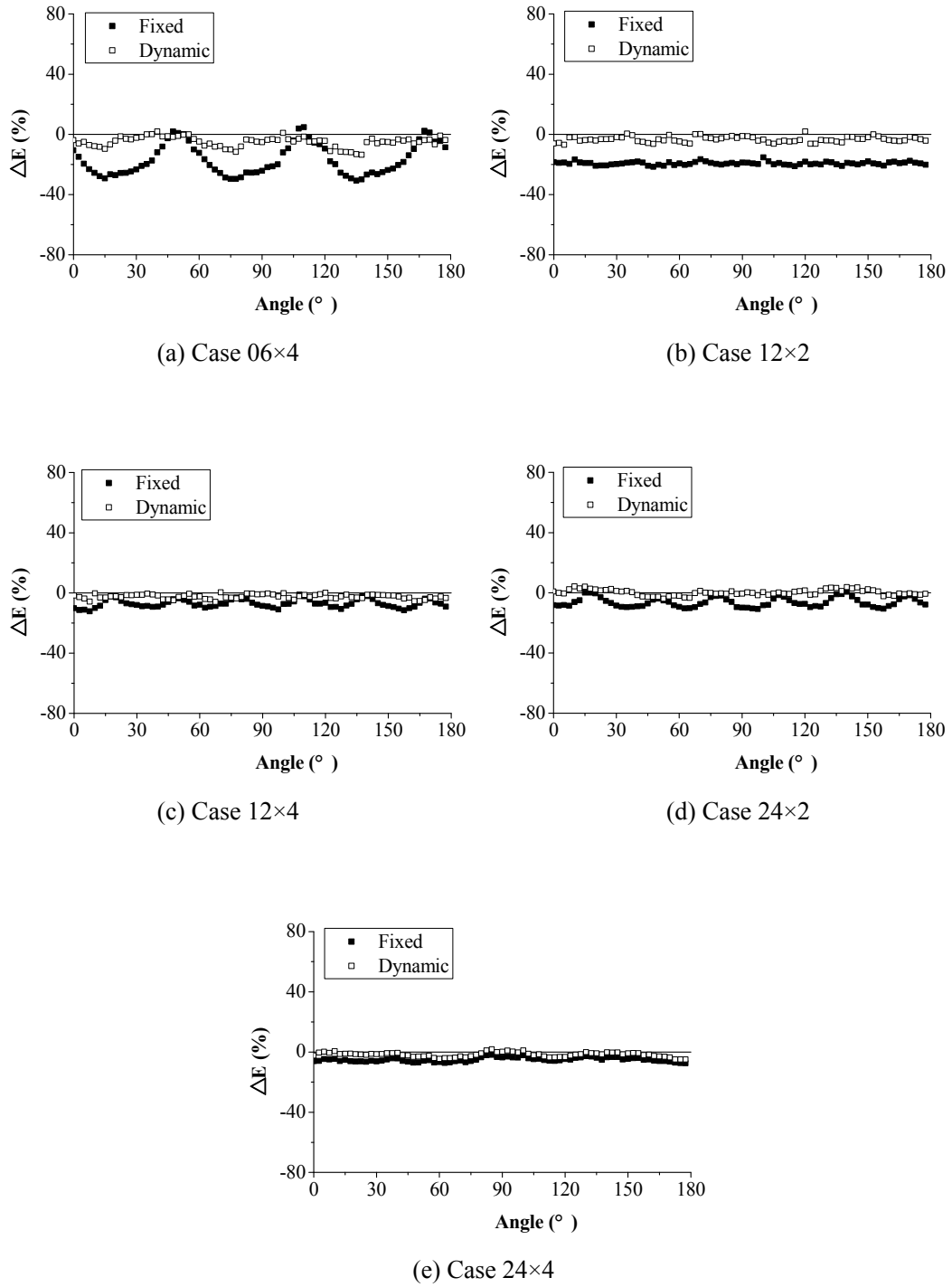


图 4-11 均匀介质半径为 14cm 时单点源发射重建误差对比

Fig.4-11 The comparison of ΔE in emission reconstruction for single source at $R=14$ cm in the homogenous matrix

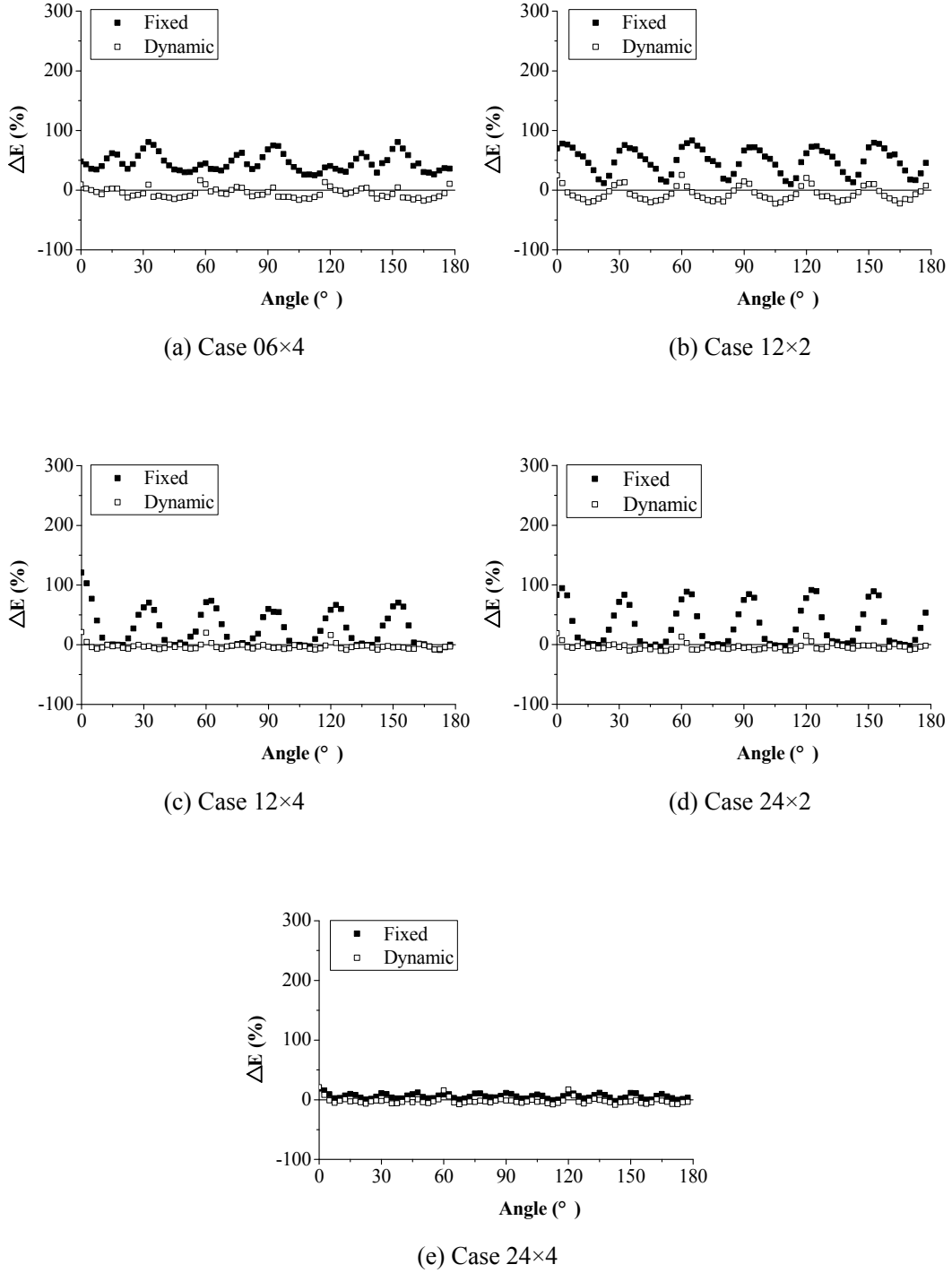


图 4-12 均匀介质半径为 24.5cm 时单点源发射重建误差对比

Fig.4-12 The comparison of ΔE in emission reconstruction for single source at $R=24.5$ cm in the homogenous matrix

对于非均匀介质的发射重建，由于介质的非均匀性以及透射重建误差的影响，发射重建误差随点源角度的变化规律则比较复杂，不再具有均匀介质发射重建误差的分布规律。从误差分布上看，非均匀介质的发射重建误差要大于均匀介质的重建误差，在最大误差值上要大 2 至 3 倍。

点源的半径同样对发射重建误差具有影响，半径较小时误差整体较小，半径较大时误差整体较大，该规律同均匀介质的发射重建误差是类似的。这也从一个侧面说明，网格对点源的准确定位相比一定程度的密度误差对发射重建精度的影响更大。对比动网格与固定网格的发射重建结果，在点源半径为 3.5cm 时，如图 4-13 所示，前两种测量方案（Case06×4 与 Case12×2）动网格的重建误差要明显小于固定网格，整体上存在 10%左右的差异。后三种测量方案（Case12×4、Case24×2、Case24×4），动网格与固定网格的重建误差相差不明显。该现象同均匀介质的发射重建情况也类似。当点源半径为 14cm 时，如图 4-14 所示，动网格对五种测量方案的重建误差整体上都要小于固定网格，尤其是存在高密度的 0 至 90°四分之一圆区域，发射重建误差要小一半左右。由于该区域的点源是处于高密度物质内部，前面的透射重建分析也表明密度分布同实际密度分布存在差异，尤其是高密度区域密度差异更加明显，因此这对效率计算的误差以及发射重建的精度有更大的影响。当点源半径为 24.5cm 时，动网格的发射重建误差更明显地低于固定网格的发射重建误差。同点源半径为 14cm 时的情况一样，在 0 至 90°的四分之一圆区域内，由于透射重建后密度误差的影响，尤其是前两种测量方案（Case06×4 与 Case12×2）由于网格划分的原因密度误差更大，这造成了发射重建误差更为明显。对于后三种测量方案（Case12×4、Case24×2、Case24×4），采用动网格的发射重建误差均非常小，远低于固定网格的发射重建误差。由此可见，对于非均匀介质，虽然密度误差对发射重建存在影响，但是动网格的发射重建误差在各种测量方案下均能不同程度地低于固定网格的重建误差。

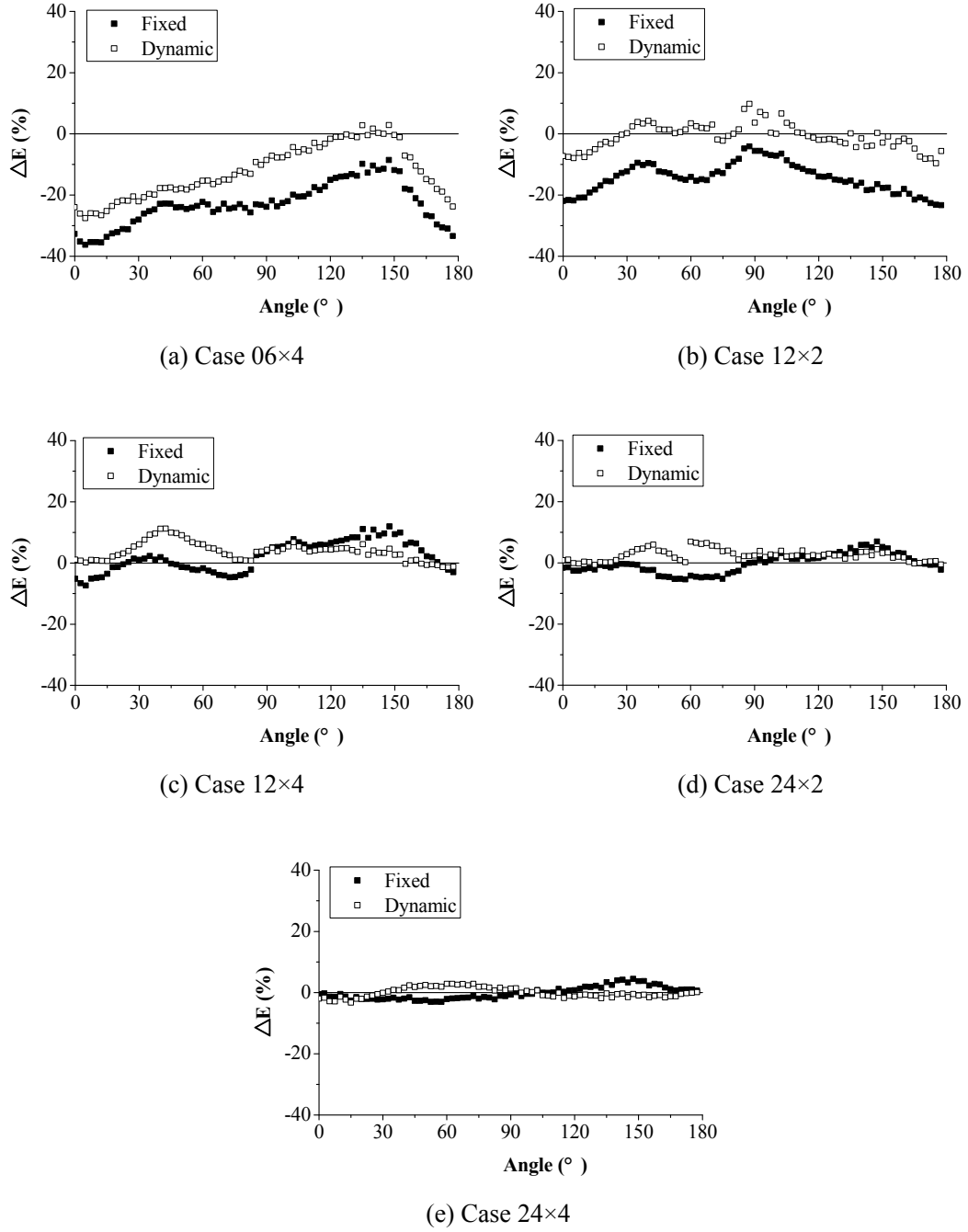


图 4-13 非均匀介质半径为 3.5cm 时单点源发射重建误差对比

Fig.4-13 The comparison of ΔE in emission reconstruction for single source at $R=3.5$ cm in the heterogeneous matrix

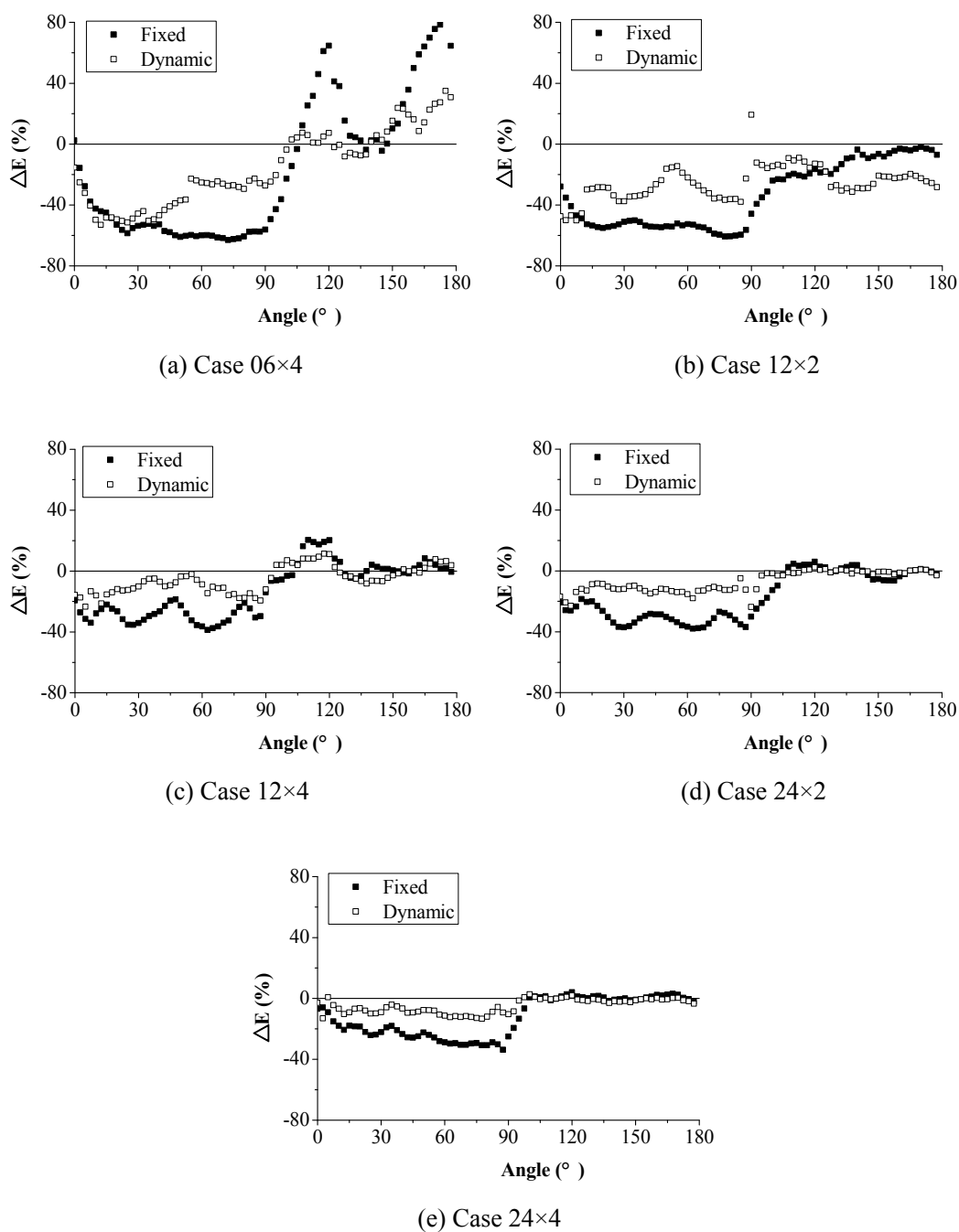


图 4-14 非均匀介质半径为 14cm 时单点源发射重建误差对比

Fig.4-14 The comparison of ΔE in emission reconstruction for single source at $R=14$ cm in the heterogeneous matrix

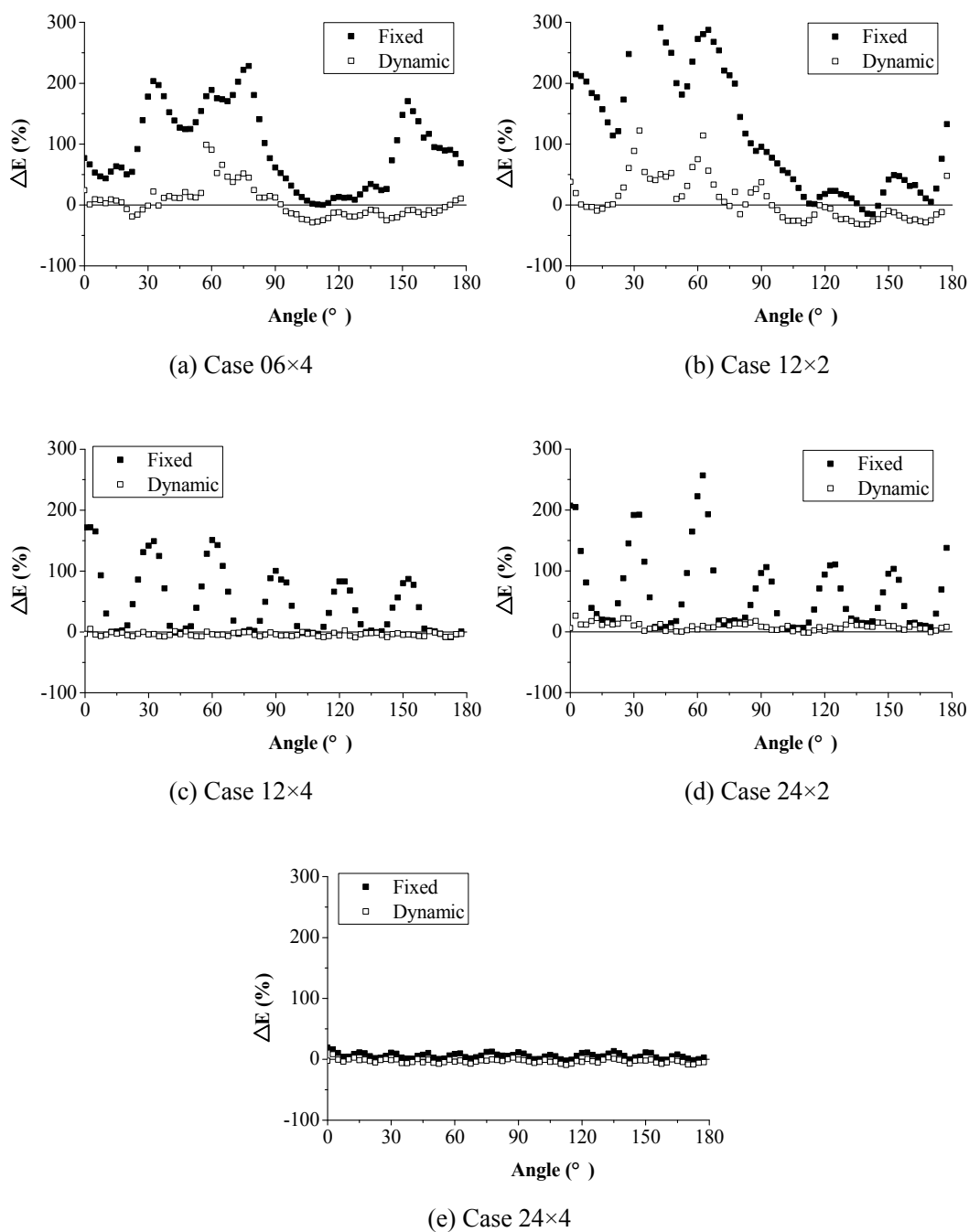


图 4-15 非均匀介质半径为 24.5cm 时单点源发射重建误差对比

Fig.4-15 The comparison of ΔE in emission reconstruction for single source at $R=24.5$ cm in the heterogeneous matrix

为进一步对重建结果进行对比, 将各点源发射重建的最终网格数、重建误差进行统计平均, 均匀介质与非均匀介质的统计结果分别如表 4-2 与表 4-3 所示。表中 $\overline{N_{ER,F}}$ 与 $\overline{N_{ER,D}}$ 分别表示发射重建中固定网格与动网格使用的平均网格数, 其中在相同测量方案下固定网格数是相同的, 但动网格的最终网格数量会存在差异, 因此采用平均值来反映整体的网格数量。对于发射重建误差, 由于值存在正负, 因此对重建误差先求绝对值再进行平均, 表中 $|\overline{\Delta E_F}|$ 与 $|\overline{\Delta E_D}|$ 分别表示固定网格与动网格的发射重建平均误差。

表 4-2 均匀介质单点源发射重建的结果统计

Tab.4-2 The statistical results of emission reconstruction to single source in the homogenous matrix

点源半径	测量情况	$\overline{N_{ER,F}}$	$ \overline{\Delta E_F} $ (%)	$\overline{N_{ER,D}}$	$ \overline{\Delta E_D} $ (%)
$R=3.5\text{cm}$	Case 06×4	24	12.76	18	1.86
	Case 12×2	24	7.52	18	1.45
	Case 12×4	42	1.32	30	2.11
	Case 24×2	42	1.23	31	0.86
	Case 24×4	84	1.38	40	2.80
$R=14.0\text{cm}$	Case 06×4	24	17.44	23	5.08
	Case 12×2	24	19.26	23	3.38
	Case 12×4	42	7.11	27	2.44
	Case 24×2	42	6.36	28	1.57
	Case 24×4	84	5.12	32	1.94
$R=24.5\text{cm}$	Case 06×4	24	45.67	19	8.26
	Case 12×2	24	48.87	17	12.14
	Case 12×4	42	27.21	18	4.73
	Case 24×2	42	32.38	18	5.54
	Case 24×4	84	5.76	19	4.15

表 4-3 非均匀介质单点源发射重建的结果统计

Tab.4-3 The statistical results of emission reconstruction to single source in the heterogeneous matrix

点源半径	测量情况	$\overline{N_{ER,F}}$	$ \overline{\Delta E_F} $ (%)	$\overline{N_{ER,D}}$	$ \overline{\Delta E_D} $ (%)
$R=3.5\text{cm}$	Case 06×4	24	23.02	22	12.68
	Case 12×2	24	14.37	21	3.30
	Case 12×4	42	4.54	29	3.94
	Case 24×2	42	2.62	28	2.52
	Case 24×4	84	1.74	35	1.36
$R=14.0\text{cm}$	Case 06×4	24	43.21	24	24.22
	Case 12×2	24	33.64	24	26.19
	Case 12×4	42	17.62	28	8.68
	Case 24×2	42	18.04	28	7.40
	Case 24×4	84	13.18	33	5.18
$R=24.5\text{cm}$	Case 06×4	24	93.43	20	19.12
	Case 12×2	24	125.92	18	26.98
	Case 12×4	42	48.01	19	4.23
	Case 24×2	42	64.41	19	8.95
	Case 24×4	84	6.00	19	3.51

首先对比固定网格与动网格发射重建的网格单元数，表中显示无论是均匀介质还是非均匀介质，动网格所需要的网格单元数基本都会少于固定网格，尤其是 Case24×4 这种测量方案，动网格只需要固定网格一半甚至更少的网格单元。而且，点源半径为 24.5cm 时动网格数量更少。由此可见，单点源动网格重建时能够节省网格数量，尤其是在后三种测量方案，这种优势尤为明显。

再对比发射重建误差，动网格重建的平均误差明显地低于固定网格重建的平均误差。在均匀介质时，点源半径为 3.5cm 时除前两种测量方案外两者相差不大，误差均低于 3%；当点源半径增大，重建误差的差异则更为明显，点源半径为 14cm 时

动网格的平均重建误差基本在 5% 以内, 而固定网格平均误差的最大值接近 20%; 当点源半径为 24.5cm 时除 Case12×2 外其它测量方案的平均重建误差均在 10% 以内, 而固定网格平均误差的最大值接近 50%。因此, 尽管随着点源半径增大, 固定网格重建的误差也增大, 但是采用动网格后平均重建误差均较低。

对于不同的测量方案, 如果以平均误差为 10% 作为参考值, 固定网格只有 Case24×4 在所有情况下平均重建误差小于该值, 而动网格除 Case12×2 外其它全部小于该值。由此可见, 对于均匀介质单点源的情况, 当测量方案简化到 Case06×4 (24 次测量) 时, 利用动网格进行发射重建, 平均重建误差都不会超过 10%。对照图 4-10 至图 4-12, 动网格发射重建的误差最大值也不超过 25%。

对于非均匀介质, 由于受到透射重建密度误差的影响, 发射重建平均误差相对较大。当点源半径为 3.5cm 时, 除 Case06×4 测量方案外, 其他情况下动网格发射重建的平均误差都低于 5%; 固定网格的前两种测量方案误差较大, 分别为 23% 与 14%, 后面三种测量方案平均误差也都低于 5%。当点源半径为 14cm 时, 所有测量方案的固定网格发射重建平均误差均大于 10%, 最高达到 43%, 而动网格后三种测量方案的平均误差小于 10%。当点源半径为 24.5cm 时, 动网格后三种测量方案的发射重建平均误差全低于 10%, 固定网格的前四种测量方案平均误差均较大, 最高超过 100%。同样, 如果以 10% 作为参考值, 后三种测量方案动网格发射重建的平均误差均小于该值, 而固定网格只有 Case24×4 测量方案接近该参考值, 其它均大于该值。由此可见, 对于非均匀介质单点源的情况, 当测量方案简化到 Case12×4 (48 次测量) 时, 利用动网格进行发射重建, 平均重建误差不会超过 10%。对照图 4-13 至图 4-15, 后三种测量方案的动网格重建误差最大值也不超过 20%。

当然, 对于非均匀介质的发射重建, 重建误差同介质的具体分布是相关的。对于目前研究的非均匀介质, 单点源情况下测量方案从 Case24×4 简化到 Case12×4, 动网格的平均发射重建误差并没有明显的降低。并且, 从 Case24×4 简化到 Case12×4, 扫描次数能减少一半, 即测量时间能缩短一半。

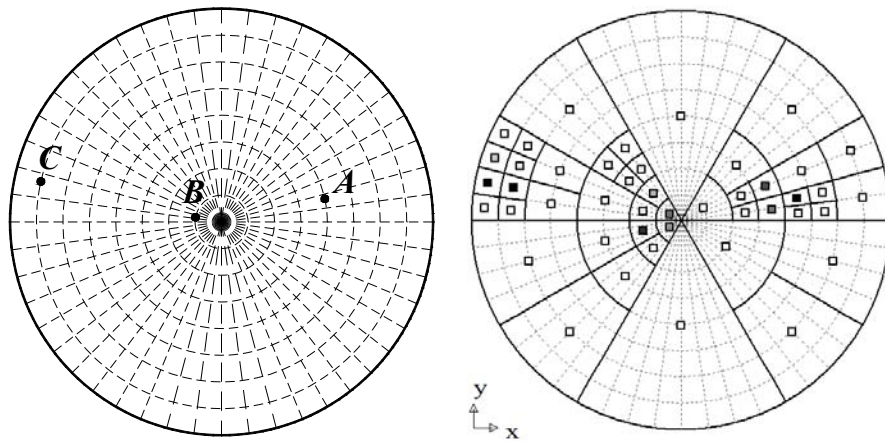
对比 Case12×4 和 Case24×2 这两种方案, 相比标准方案 Case24×4, 前者是转动次数减少一半, 后者是平动次数减少一半, 两者在整体测量时间上都缩短一半, 但

是前者的发射重建误差要更低,可见减少转动次数比减少平动次数在保证 TGS 探测精度上效果更好。这一点在透射重建的分析中也是相同的。

4.3.3 多点源发射重建结果

前一小节分析了单点源的发射重建情况,在实际测量中可能会存在多个点源,本小节将仅针对三点源的情况进行研究。点源的选取是依据前面介绍的所有单点源 ($72 \times 3 = 216$ 个) 在不限半径的情况下随机抽取 3 个点源进行组合。一共随机抽取了 100 个组合,每种组合的测量数据是将对应单点源的发射扫描数据进行叠加获得的。填充介质与前面相同,仍分为均匀介质与非均匀介质两种。

图 4-16 显示的是一种三点源组合在采用动网格进行发射重建后网格的最终分布情况。图 4-16 (a) 显示的是三点源在截面上的分布情况, A、B、C 三个点源的半径分别为 14cm、3.5cm、24.5cm, 角度分别为 12.5° 、 170° 、 167.5° 。动网格的最终网格分布如图 4-16 (b) 所示, 最终的网格数为 44 个, 分别在三个点源周围都形成了最小尺寸的网格加密。该网格数与图 4-1 (b) 所示的 42 个固定网格数相近, 但远远少于图 4-1 (c) 所示的 84 个固定网格数。

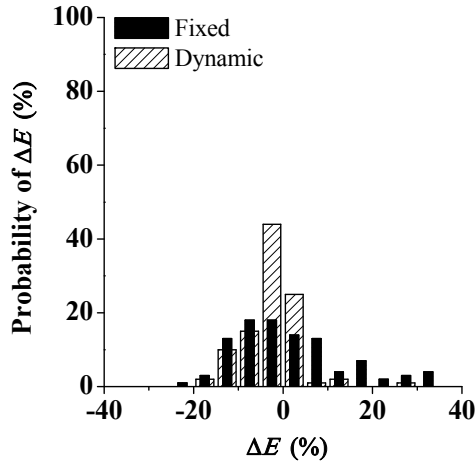


(a) 发射源位置 (b) 动网格最终分布
(a) The position of emission sources (b) The final layout of grids

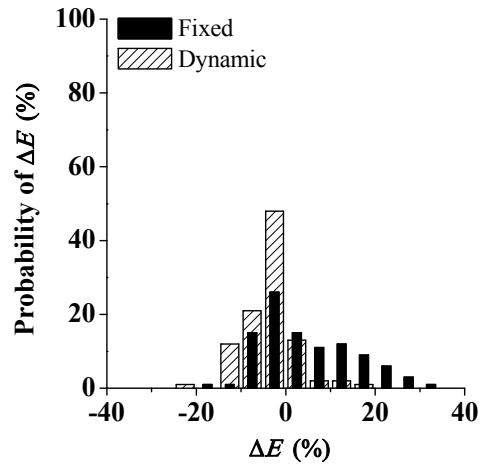
图 4-16 一种多点源布置与最终网格分布图

Fig.4-16 The layout of emission sources and final grids

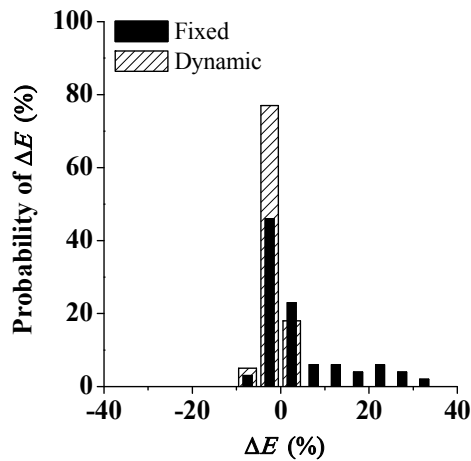
由于 100 个点源组合是随机抽取的, 因此对发射重建误差的分析采用概率统计的方法。根据各自的误差分布情况, 进行统计分析时均匀介质的发射重建误差所取区间为-40%至 40%, 分为 16 个统计区间, 每个小区间的间隔为 5%; 非均匀介质的发射重建误差所取的区间为-96%至 96%, 分为 16 个统计区间, 每个小区间的间隔为 12%。图 4-15 与图 4-16 分别为均匀介质与非均匀介质 100 组点源组合的发射重建误差的概率分布柱状图。横坐标为发射重建误差, 纵坐标为 100 个点源组合的发射重建误差在各个小区间内的概率, 其中黑色填充代表固定网格重建情况, 斜线填充代表动网格重建情况。



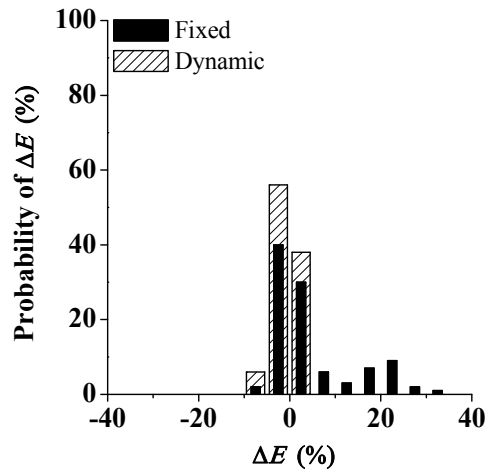
(a) Case 06×4



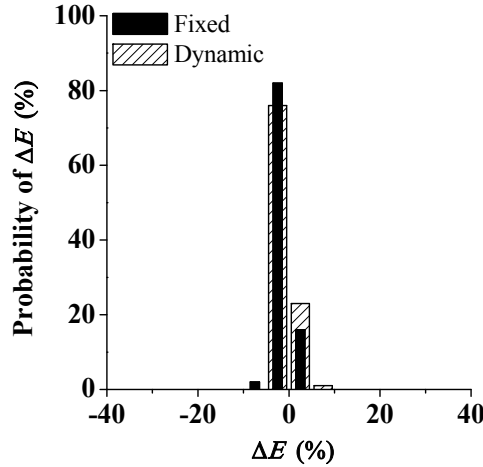
(b) Case 12×2



(c) Case 12×4



(d) Case 24×2



(e) Case 24×4

图 4-17 均匀介质中多点源发射重建误差 ΔE 的概率分布Fig.4-17 The probability distribution of ΔE in emission reconstruction of multi-sources in the homogenous matrix

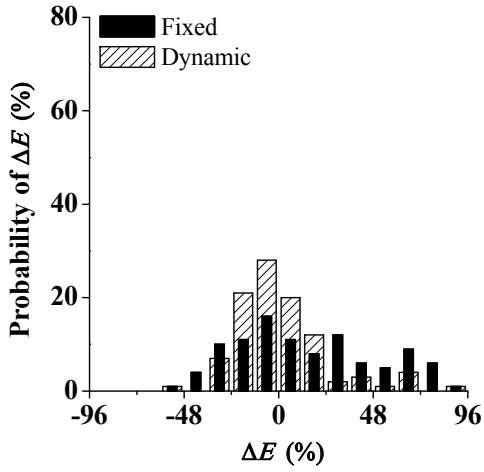
对于不同测量方案下三点源在均匀介质中的发射重建误差,如图 4-17 所示,测量次数越多其发射重建误差的概率分布范围越窄,Case06×4 测量方案的发射重建误差主要分布在-20%至 20%区间内,而 Case24×4 测量方案的发射重建误差则主要分布在-5%至 5%区间内。

对比动网格与固定网格的重建情况,动网格发射重建误差在五种测量方案下分布区间都窄于固定网格,且概率峰值较高,两者仅在 Case24×4 测量方案下相接近。动网格后三种测量方案的发射重建误差主要分布在-5%至 5%之间,而固定网格仅在最后一种测量方案才达到这样的分布。可见,动网格对均匀介质三点源的情况也同样具有较低的发射重建误差,尤其是后三种测量方案的发射重建误差的主要分布区间接近,从 Case24×4 简化到 Case12×4,采用动网格进行重建的精度不会明显下降。

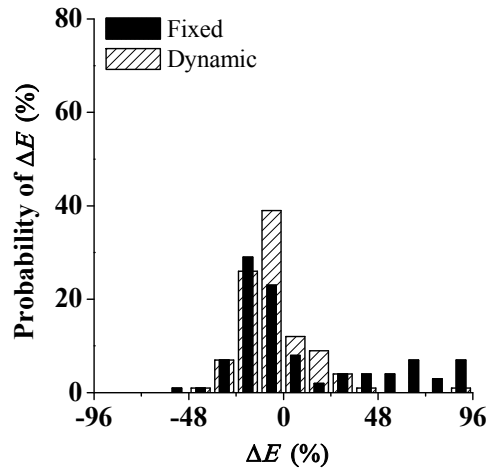
三点源在非均匀介质发射重建中的整体规律同均匀介质相似,如图 4-18 所示,对于 Case06×4 测量方案,固定网格重建误差主要分布区间在-48%至 96%之间;而 Case 24×4 测量方案的重建误差主要分布区间在-24%至 12%之间。需要提到的是,该误差范围要明显小于单点源非均匀介质发射重建时的误差范围,主要原因是在不同位置的点源的发射重建误差有大有小,也有正有负,因此多点源组合后重建误差

会有一定的抵消,从而小于单点源的情况。

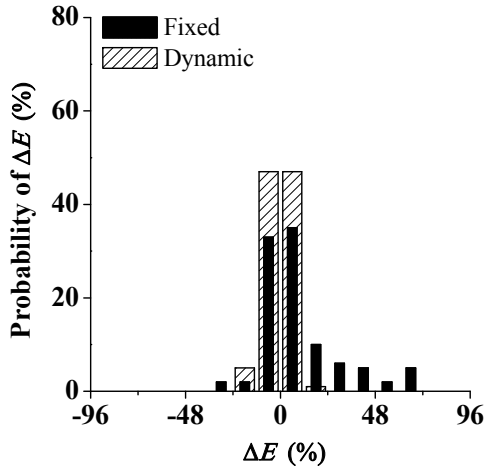
对比动网格与固定网格在非均匀介质中的重建情况,动网格重建后误差的分布区间也同样要窄于固定网格,两者也仅在 Case24×4 测量方案下相接近。对于后三种测量方案,发射重建误差主要分布在-12%至 12%之间,在-24%至-12%之间的概率小于 5%。这同样也表明,动网格对三点源非均匀介质的发射重建也具有较高的重建精度,而且从 Case24×4 简化到 Case12×4,对目前的非均匀介质采用动网格进行重建的精度也不会明显下降。



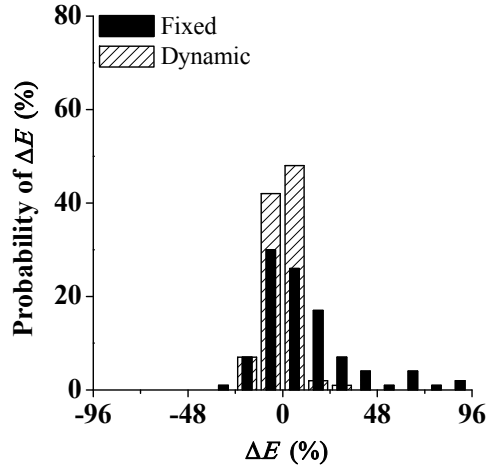
(a) Case 06×4



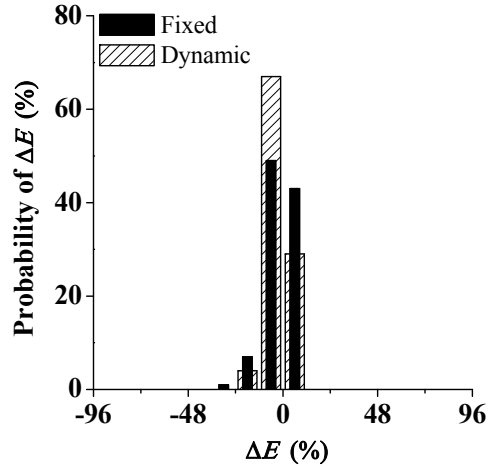
(b) Case 12×2



(c) Case 12×4



(d) Case 24×2



(e) Case 24×4

图 4-18 非均匀介质中多点源发射重建误差 ΔE 的概率分布Fig.4-18 The probability distribution of ΔE in emission reconstruction of multi-sources in the heterogeneous matrix

将 100 组三点源的发射重建误差以及最终网格数进行统计平均，其中均匀介质的统计结果见表 4-4，非均匀介质的统计结果见表 4-5。

首先对比网格单元数，无论是均匀介质还是非均匀介质，动网格的最终数量在前四个测量方案下与固定网格基本相同，但在 Case24×4 测量方案下则明显少于固定网格，基本上是固定网格数量的一半。后三种测量方案下动网格发射重建最终网格单元数都在 40 左右，这比单点源的动网格发射重建需要的网格单元数要多，可见点源增加后，对网格的消耗量会增加。

再对比发射重建平均误差，在均匀介质时固定网格重建误差在前四种测量方案下为 6%至 9%范围内；而动网格重建误差小于该值，在 1%至 5%范围内，尤其 Case12×4 与 Case24×2 这两个方案的平均重建误差小于 2%，低于固定网格的 6%。在非均匀介质时，固定网格在前两种测量方案下平均误差达 30%左右，中间两种测量方案平均误差下降到 15%左右；而动网格前两种测量方案的发射重建平均误差为 15%左右，后三种测量方案的平均误差在 6%以内。

表 4-4 均匀介质多点源发射重建的结果统计

Tab.4-4 The statistical results of emission reconstruction to multi-sources in the homogenous matrix

测量情况	$\overline{N_{ER,F}}$	$ \overline{\Delta E_F} $ (%)	$\overline{N_{ER,D}}$	$ \overline{\Delta E_D} $ (%)
Case 06×4	24	6.98	24	3.23
Case 12×2	24	8.38	24	5.02
Case 12×4	42	6.38	40	1.51
Case 24×2	42	6.18	42	1.90
Case 24×4	84	1.74	45	1.94

表 4-5 非均匀介质多点源发射重建的结果统计

Tab.4-5 The statistical results of emission reconstruction to multi-sources in the heterogeneous matrix

测量情况	$\overline{N_{ER,F}}$	$ \overline{\Delta E_F} $ (%)	$\overline{N_{ER,D}}$	$ \overline{\Delta E_D} $ (%)
Case 06×4	24	29.73	24	16.93
Case 12×2	24	30.53	24	13.56
Case 12×4	42	14.04	39	4.54
Case 24×2	42	16.11	40	5.46
Case 24×4	84	3.93	44	3.54

如果以平均误差为 5%作为参考值，采用动网格时均匀介质的重建误差基本都小于该值，非均匀介质时后三种测量方案也基本小于该值（Case24×2 为 5.46%）；而固定网格仅最后一种测量方案的平均发射重建误差小于该值，其它测量方案尤其在非均匀介质时平均误差要远大于该参考值。因此，对于三点源的情况，如果采用动网格进行发射重建，TGS 扫描由 Case24×4 简化到 Case12×4，发射重建误差也不会有明显的下降。而且，Case12×4 的发射重建平均误差低于 Case24×2 的发射重建平均误差。

以上的分析结果与单点源的分析结果相似，由此可见 TGS 在扫描过程上进行简化，让转动次数减半、平动次数不变，此时透射重建仍采用固定网格、发射重建采用动网格，无论是单点源还是三点源，无论是均匀介质还是非均匀介质，发射重

建后的活度在精度上不会有明显的变化。通过该简化, TGS 的扫描次数会减半, 测量时间也会缩短一半。

4.4 本章小结

本章针对 TGS 测量时间过长的问题, 结合上一章介绍的动网格技术, 研究在减少转动或平动扫描次数情况下的 TGS 重建误差变化情况, 以期望获得 TGS 的测量优化方案, 在不影响测量精度的同时缩短测量时间。

本章针对均匀介质与非均匀介质两种样品, 通过蒙特卡罗方法模拟了三个半径 (3.5cm、14cm、24.5cm) 上共计 216 个点源 (每个半径上 72 个点源, 角度间隔 2.5°) 的 TGS 透射与发射扫描。并通过模拟数据与实验测量数据的对比, 验证了蒙特卡罗方法模拟 TGS 扫描测量的准确性。

为研究 TGS 测量过程的最佳简化方案, 依据转动与平动次数的不同本章选用了五种不同的测量方案。利用这五种不同的测量方案对上述在不同位置的点源测量数据进行了透射与发射重建。重建的对象包括单点源与多点源, 其中多点源测量数据由 216 个位置单点源测量数据随机抽取三个点源叠加生成。其中, 透射重建采用了固定网格, 发射重建同时采用了固定网格与动网格。

通过对固定网格与动网格发射重建结果的对比, 可以发现:

在网格数量上, 前两种测量方案 (Case 06 \times 4 与 Case 12 \times 2) 固定网格与动网格数量相当, 但在后三种测量方案 (Case12 \times 4、Case24 \times 2、Case24 \times 4) 中动网格的网格数量要小于固定网格, 尤其在半径为 24.5cm 处的单点源动网格重建的最终网格数量在 20 左右, 明显少于固定网格。在多点源情况下, 动网格的网格数量会增加, 后三种测量方案的最终网格数量在 40 左右, 也少于固定网格。

在发射重建误差上, 对于不同测量方案, 随着总测量次数的减少, 固定网格的发射重建误差峰值逐渐增大。但是, 采用动网格进行发射重建后, 均能维持较小的发射重建误差, 除在 Case24 \times 4 方案下固定网格与动网格的发射重建误差均较小外, 其它测量方案下动网格的发射重建误差均不同程度地低于固定网格, 尤其对半径较

大的点源、非均匀介质时，这种差异更为明显。对于多点源的情况，由于各点源误差的叠加，发射重建误差要小于单点源的情况，但是动网格的发射重建误差也低于固定网格。

对各测量方案下的重建误差进行统计平均并进行对比。对于单点源情况，在均匀介质情况下，固定网格只有 Case24×4 在所有情况下平均重建误差小于 10%，而动网格除 Case12×2 外其它全部小于 10%；在单点源非均匀介质情况下，固定网格在除半径为 3.5cm 时的后三种方案与半径为 24.5cm 的最后一种测量方案外，其它测量方案均大于 10%，但是动网格除前两种测量方案外，其它测量方案均小于 10%。对于多点源情况，虽然均匀介质时固定网格与动网格的平均重建误差均小于 10%，但是固定网格仅有 Case24×4 小于 5%，而动网格在后三种测量方案下均小于 5%；在多点源非均匀介质情况下，固定网格仅有 Case24×4 小于 5%，其它测量方案均大于 10%，而动网格在后三种测量方案下均小于 5%。由此可见，若采用固定网格则仅有 Case24×4 测量方案能在不同情况下都保持较低的发射重建误差，而采用动网格则在后三种测量方案下均能保持较低的发射重建误差。因此，如果采用动网格技术进行 TGS 发射重建，将测量方案由 Case24×4 简化到 Case24×2 或 Case12×4，测量精度不会明显改变，并且 Case12×4 相比 Case24×2 重建误差更低。

通过上述研究可以发现，对一个断层的废物桶进行测量，通过应用动网格技术进行发射重建，可以在减少一定测量次数的同时，不显著影响测量精度。从目前选定的方案来看，比较理想的方案是由 Case24×4 简化到 Case12×4，此时测量次数能减少一半，在单次测量时间不改变的情况下，整体测量时间能够减少一半。

第五章 结论与展望

5.1 研究总结

本文在充分调研了用于中低放射性废物活度探测的 SGS 和 TGS 技术研究现状及趋势的基础之上,以提高测量精度、缩短测量时间、开发更为快速实用的中低放射性废物活度探测技术为目的,对改进型 SGS 技术与 TGS 技术的原理及活度重建算法进行了深入的研究。

论文的主要工作和结论如下:

(1) 双探测器改进型 SGS 技术理论及测量系统的建立

首次提出了活度重建中等效半径的概念,并进一步提出了基于等效半径校正的双探测器改进型 SGS 技术。通过公式推导详细说明了该改进型 SGS 技术的理论基础,并对该改进型 SGS 技术的活度重建算法及测量系统布置进行了详细的介绍。通过 MCNP 程序对标准 200L 钢桶测量系统进行模拟,得到了探测器的最佳布局位置,即两个探测器分别对准废物桶中心和偏离桶中心 17.5cm 处。

(2) 双探测器改进型 SGS 技术的模拟及实验验证

开发了传统型 SGS 和双探测器改进型 SGS 的活度重建算法软件。采用 MCNP 程序对均匀介质单点源、均匀介质多点源、非均匀介质单点源的情况进行了模拟测量,对一非均匀单点源样品进行了实验测量。对模拟测量数据和实验测量数据的重建结果表明,双探测器改进型 SGS 技术比传统 SGS 技术具有更高的测量精度。对于均匀介质,在最极端的单点源情况下,双探测器改进型 SGS 对 ^{137}Cs 的活度重建结果的相对误差为:密度为 0.3g/cm^3 时在 $\pm 10\%$ 范围内, 0.6g/cm^3 时在 $\pm 15\%$ 范围内, 1.0g/cm^3 时在 $\pm 20\%$ 范围内, 1.5g/cm^3 时在 $\pm 25\%$ 范围内。

(3) 基于动网格的 TGS 图像重建研究

提出了一种适合于 TGS 重建的自适应动网格加密算法,对动网格的加密准则和参数进行了介绍,并开发了固定网格和动网格的 TGS 图像重建算法软件。采用

MCNP 程序对一非均匀介质的点源样品进行了 TGS 模拟扫描, 对模拟数据的重建结果表明: 动网格在发射重建中能取得理想的效果, 采用动网格进行发射重建能够减小误差, 提高 TGS 的测量精度, 尤其对靠近桶壁处的点源优势更加明显, 还能实现对放射性核素的准确定位并减少网格数量, 大约采用三分之一数量的网格就可以达到或超过固定网格的重建精度; 而在透射重建中, 动网格的重建精度不如固定网格理想。

(4) 基于动网格发射重建的 TGS 测量优化研究

针对旋转 24 次平移 4 次的标准 TGS 扫描方案, 设置了四种减少转动或(和)平移次数的 TGS 简化测量方案, 采用 MCNP 程序对均匀介质和非均匀介质两种样品中的 216 个单点源以及 100 组多点源工况按照各种扫描方案进行了模拟扫描, 采用固定网格进行透射重建, 采用固定网格和动网格分别进行发射重建, 分别研究了几种不同简化方案的重建误差变化情况。结果表明: 随着总测量次数的减少, 固定网格的发射重建误差峰值逐渐增大; 但是, 采用动网格进行发射重建后均能维持较小的误差, 尤其对半径较大的点源、非均匀介质时, 固定网格与动网格发射重建结果的差异更为明显。对各测量方案下的重建误差进行统计平均后对比可发现: 若采用动网格进行发射重建, 由旋转 24 次平移 4 次的标准扫描方案简化到旋转 24 次平移 2 次或旋转 12 次平移 4 次, 测量精度不会明显改变, 但简化后测量次数减少一半, 能够明显缩短 TGS 的测量时间。从目前选定的方案来看, 最理想的方案是由旋转 24 次平移 4 次简化到旋转 12 次平移 4 次。

5.2 论文创新点

本论文主要对改进型 SGS 技术与基于动网格的 TGS 技术开展了研究, 主要创新点如下:

(1) 首次提出了双探测器改进型 SGS 技术

本文首次提出的基于等效半径的双探测器改进型 SGS 技术与传统的 SGS 技术相比, 在测量和重建原理上有了明显的突破, 其思路是通过等效半径不断修正效率

矩阵,使效率矩阵更加准确,从而使求解方程组获得的活度结果更逼近真值。该方法能够突破传统 SGS 对核素均匀分布的假设,在核素不均匀分布情况下取得理想的测量结果。这种改进型 SGS 技术的基础理论、重建算法及等效半径的概念目前还未有其他人在公开文献中发表。

(2) 首次将动网格技术应用于 TGS 图像重建

本文首次将动网格技术应用于 TGS 图像重建,提出了一种适合于 TGS 重建的自适应动网格加密算法,其主要目的是对点源准确定位,在采用较少网格的同时提高重建精度。尽管动网格在其它研究中已得到应用,但在 TGS 图像重建中的动网格算法还未见公开发表。

(3) 采用动网格技术进行 TGS 优化,缩短测量时间

本文首次将动网格技术应用于 TGS 测量优化研究。利用动网格在 TGS 发射重建中能够对点源进行准确定位并提高重建精度的特点,研究在减少测量次数时仍保持较高重建精度的 TGS 测量优化方案。结果表明,在减少一半的测量次数后,再用动网格技术进行发射重建,测量精度仍基本相同。该研究对 TGS 现存的测量耗时长、应用受限的问题具有重要的意义,且相关研究目前未见公开发表。

5.3 研究展望

在上述研究工作的基础上,本文提出的双探测器改进型 SGS 技术和基于动网格发射重建的 TGS 技术仍需进一步完善才能达到实际应用的程度,以后的研究可从以下方面去开展:

对于动网格技术在 TGS 图像重建中的应用,本文仅针对废物桶中一层样品的二维情况进行了研究,而实际中的 TGS 发射重建是三维情况,从二维升级到三维,网格的加密方式以及网格加密准则中参数的选定都会有所不同,这是需要进一步研究的。

SGS 技术和 TGS 技术都涉及到对方程组的求解,尤其是 TGS 的发射重建,涉及的方程未知数较多,本文中均采用的是基于统计模型的经典 ML-EM (Maximum

Likelihood Expectation-Maximization) 算法, 除此之外, 还有一些更快速的统计迭代法被学者提出, 例如 OS-EM (Ordered-subset EM) 算法^[117]、SAGE (space-alternating generalized EM) 算法^[118,119]、OSL-EM (one-step-late EM) 算法^[120]等等; 将这些算法应用于 SGS 和 TGS, 并寻找在不同的噪声水平下的最佳算法, 也需要进行更加细化和深入的研究。

γ 扫描技术的测量精度与系统几何尺寸 (例如: 每层的高度、准直器的形状、探测器到废物桶的距离等) 有一定的关系, 选择最佳的几何尺寸也能在一定程度上提高测量精度, 这需要在以后的研究中进行优化和完善。

本文对双探测器改进型 SGS 技术和基于动网格发射重建的 TGS 技术只进行了少量的实验研究和验证, 未能开展更多的实验工作。以后将进一步开展大量的实验研究, 对不同种类的中低放废物进行测量, 一方面可对本文所提出的技术与方法进行验证, 一方面也可发现其在实际测量中可能遇到的问题。

在对放射性废物桶中的活度进行探测的过程中, 都需要对测量不确定度和可探测限进行分析, 尤其在工程应用中, 相关部门和单位都对测量不确定度和可探测限非常重视。在本文中并没有涉及到此方面的研究内容, 在以后的工作中将进行针对性的研究。

本文采用改进型 γ 扫描技术对核电厂 200L 钢桶进行了模拟测量和实验测量, 并取得了较好的活度重建结果, 但在核电厂的放射性废物包装体中, 除最常见的 200L 钢桶外, 还有大量的水泥桶, 以及部分其他尺寸的钢桶 (例如 400L 钢桶), 在以后的工作中将针对不同类型的废物桶开展应用研究。

参 考 文 献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局, GB/ T 4960.8-2008 核科学技术术语第 8 部分: 放射性废物管理, 2008
- [2] 罗上庚, 放射性废物处理与处置, 北京: 中国环境科学出版社, 2007
- [3] 罗上庚, 放射性废物概论, 北京: 原子能出版社, 2003
- [4] 国家环境保护局, GB9133-1995 放射性废物的分类, 1996
- [5] 潘自强, 我国放射性废物管理中一些值得重视问题的讨论, “21 世纪初辐射防护论坛” 第四次会议暨低中放废物管理和放射性物质运输学术研讨会, 北京, 2005.6
- [6] 国家技术监督局, GB 11928-1989 低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定, 1990
- [7] 国家技术监督局, GB 14589-1993 核电厂低、中水平放射性固体废物暂时贮存技术规定, 1994
- [8] 国家发展和改革委员会, 核电中长期发展规划 (2005-2020 年), 北京: 国家发展和改革委员会, 2007
- [9] 国家质量监督检验检疫总局, GB14500-2002 放射性废物管理规定, 2003
- [10] 郭喜良, 徐春艳, 杨卫兵等, 国外低中水平放射性废物包检测实践及启示, 辐射防护, 2011, 31 (3): 184-192
- [11] Reily D, Ensslin N, Smith H, et al. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, Los Alamos National Laboratory, 1991
- [12] Becker G, McIlwain M, Connolly M. Transuranic and Low-Level Boxed Waste Form Nondestructive Assay Technology Overview and Assessment, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 1999
- [13] 杨明太, 核材料的非破坏性分析, 核电子学与探测技术, 2001, 21 (6): 501-504
- [14] S. Niese, W. Boden. Scaling factors for activated corrosion products in low-level-waste from power reactors, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1995, 198(1):161-167
- [15] P. Ormai, A. Fritz, J. Solymosi, et al. Inventory determination of low and intermediate level radioactive waste of paks nuclear power plant origin, Journal of

- Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1996, 211(2):443-451
- [16] T. Kim, K. Kim, C. Yun, et al. Estimation method for determination of radioactivity within LILW for land disposal, WM'05 Conference, February 27-March 3, 2005, Tucson, AZ
- [17] 黄来喜, 何文新, 陈德淦, 大亚湾核电站放射性固体废物管理, 辐射防护, 2004, 24 (3-4): 211-226
- [18] Parker J L. The use of calibration standards and the correction for sample self-attenuation in gamma-ray nondestructive assay. Los Alamos National Laboratory Document, LA-10045, Rev. 1986
- [19] G.A. Sheppard, T.H. Prettyman, E.C. Piquette. Accounting for segment correlations in segmented gamma-ray scans, Los Alamos National Laboratory Document, LA-UR-94-2561, 1994
- [20] Bruce Gillespie, Michael Zebarth. Comparison of a variety of gamma attenuation correction techniques for different waste matrices. 14th Annual Symposium on Safeguards and Nuclear Management, May 1992, Salamanca, Spain
- [21] H. Zhu, S. Croft, R. Venkataraman, S. Philips. An MCNPTM Based Method to Determine the Matrix Attenuation Correction Factors for a Gamma Box Counter. 48th INMM Meeting, 2007
- [22] T.H. Prettyman, J.K. Sprinkle, Jr, et al. A weighted least-squares lump correction algorithm for transmission-corrected gamma-ray nondestructive assay, Los Alamos National Laboratory Document, LA-UR-93-2632, 1993
- [23] T.H. Prettyman, J.K. Sprinkle, Jr, et al. Performance of an advanced lump correction algorithm for gamma-ray assays of plutonium, Los Alamos National Laboratory Document, LA-UR-94-2477, 1994
- [24] Hsue S T, Stewart J E. Guide to nondestructive assay standard preparation, criteria, availability and practical considerations, Los Alamos National Laboratory Document, La-13340-Ms, 2000
- [25] G.A. Sheppard, E.C. Piquette. Point-source calibration of a segmented gamma-ray scanner, Los Alamos National Laboratory Document, LA-UR-94-2482, 1994
- [26] Liang, J. H., Jiang, S. H., Chou, G. T., et al. A theoretical investigation of calibration methods for radwaste radioactivity detection systems. Applied Radiation and Isotopes. 1996, 47 (7), 669-675

- [27]Liang, J. H., Jiang, S. H., Chou, G. T., et al. Parametric study of shell-source method for calibrating radwaste radioactive detection systems. *Applied Radiation and Isotopes*. 1998, 49 (4), 361-368.
- [28]M. Bruggeman, J. Gerits, R. Carchon. A minimum biased shell-source method for the calibration of radwaste assay systems. *Applied Radiation and Isotopes*, 1999, 51(3):255-259
- [29]S. Croft, R.D. McElroy. The calibration of segmented gamma scanning using rod sources, WM'05 Conference, February 27-March 3, 2005, Tucson, AZ
- [30]A. Bosko, G. Geurkov, S. Croft, R. Venkataman. Advanced Approach for calibration of the segmented gamma scanner for the radioassay of drummed waste. 2006 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record:212-213
- [31]D. Nakazawa, F. Bronson, S. Croft, et al. The Efficiency Calibration of Non-Destructive Gamma Assay Systems Using Semi-Analytical Mathematical Approaches. WM2010 Conference, March 7-11, 2010, Phoenix, AZ
- [32]M. Toma, O. Sima, C. Olteanu. Experimental and simulated studies for the calibration of a radioactive waste assay system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 580(1):391-395
- [33]WM2200 series segmented assay system, CANBERRA,USA,
<http://www.canberra.com/products/780.asp>
- [34]WM2110 series Q2 low level waste assay systems, CANBERRA,USA,
<http://www.canberra.com/products/779.asp>
- [35]IQ3 automated low level waste system, CANBERRA,USA,
<http://www.canberra.com/products/776.asp>
- [36]Bücherl T, Kaciniel E, Lierse Ch, Synopsis of gamma scanning systems, European Network of Testing Facilities for the Quality Checking of Radioactive Waste Packages, Report WG-A-01,1998
- [37]A. G. Espartero, G. Pina, J. A. Suarea. Development and application of a radioactivity characterization system for low-level radioactive waste, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, 422:790-794
- [38]Jon R. Hurd, Steven M. Long, Thomas E. Sampson. Bias investigation of a 55-gallon drum-sized segmented gamma scanner. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-93-2624, 1993

- [39] Tran Quoc Dung, Calculation of the systematic error and correction factors in gamma waste assay system, *Ann. Nucl. Energy*, 1997, 24 (1):33–47
- [40] R.J. Estep, T.H. Prettyman, G.A. Sheppard. Tomographic gamma scanning (TGS) to measure inhomogeneous nuclear material matrices from future fuel cycles. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-93-1637, 1993
- [41] Tran Quoc Dung, Some theoretical results of gamma techniques for measuring large samples, *Nucl. Instrum. Methods A*, 1998, 416:505-515
- [42] S. Kawasaki, M. Kondo, S. Izumi, and M. Kikuchi. Radioactivity Measurement of Drum Package Waste by a Computed-Tomography Technique, *Appl. Radiat. Isotopes*, 1990, 41(10-11) :983-987
- [43] R.J. Estep, K. Sherwood. A prototype tomographic gamma scanner for assaying 208-liter drums, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-91-61, 1991
- [44] Prettyman, T.H., Gardiner, R.P., Russ, J.C., Verghese, K. A combined transmission and scattering tomographic approach to composition and density imaging. *Applied Radiation and Isotopes*, 1993, 44(10-11):1327-1341
- [45] Robert J. Estep, A preliminary design study for improving performance in tomographic assays, Los Alamos National Laboratory, LA-12727-MS, 1994
- [46] R.J. Estep, T.H. Prettyman, G.A. Sheppard. Reduction of TGS image reconstruction times using separable attenuation coefficient models, Winter meeting of the American Nuclear Society (ANS), San Francisco, CA (United States), 29 Oct - 1 Nov, 1995
- [47] R.J. Estep, T.H. Prettyman, G.A. Sheppard. Comparison of attenuation correction methods for TGS and SGS Do we really need selenium-75, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-2575, 1996
- [48] T.F. Wang, H.E. Martz, G.P. Roberson, et al. Three dimensional imaging of a molten-salt-extracted plutonium button using both active and passive gamma-ray computed tomography. *Nuclear Instrument and Methods In Physics Research A*, 1994, 353: 672-677
- [49] Jessie A. Jackson, Dennis Goodman, G. Patrick Roberson, Harry E. Martz. An Active And Passive Computed Tomography Algorithm With A Constrained Conjugate Gradient Solution, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-130818

-
- [50] R.J. Estep, T.H. Prettyman, G.A. Sheppard. Tomographic gamma scanning to assay heterogeneous radioactive waste. Nuclear Science and Engineering, 1994, 118(3):145-152
- [51] Jacobsson S, Hakansson A, Andersson C, et al. A Tomographic Method for Verification of the Integrity of Spent Nuclear Fuel. ISSN 1104-1374, ISBN SKI-R-98/17--SE. Swedish Nuclear Power Inspectorate, 1998
- [52] P. Eißer, E. Merz, R. Odoj, Determination of the nuclide inventory of radioactive waste barrels by using a tomographic method, Proc. Int. Symp. on Computerized Tomography for Industrial Applications, 8-10 June, 1994, Berlin, DGZfp
- [53] Tran Ha Anh, Tran Quoc Dung. Evaluation of performance of gamma tomographic technique for correcting lump effect in radioactive waste assay, Annals of Nuclear Energy, 2001, 28(3): 265-273
- [54] C. Robert Coutant, V. Moulin, R. Sauze, et al, Estimation of the matrix attenuation in heterogeneous radioactive waste drums using dual-energy computed tomography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, 422:945-956
- [55] Palacios J. C., Longoria L. C., Santos J., Perry R. T., A PC-based discrete tomography imaging software system for assaying radioactive waste containers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, Vol. 508, 500–511
- [56] D.C. Camp, H.E. Martz, G.P. Roberson, et al. Nondestructive waste-drum assay for transuranic content by gamma-ray active and passive computed tomography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 495:69-83
- [57] T.H. Prettyman, R.A. Cole, R.J. Estep, G.A. Sheppard. A Maximum-likelihood reconstruction algorithm for tomographic gamma-ray nondestructive assay. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1995, 356:470-475
- [58] Thomas L. Burr, David J. Mercer, Thomas H. Prettyman. Comparison of bayesian and classical reconstructions of tomographic gamma scanning for assay of nuclear materials. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-98-2380, 1998
- [59] R.J. Estep, TGS_FIT: Image reconstruction software for quantitative low-resolution tomographic assays, Los Alamos National Laboratory, LA-12497-MS, 1993
- [60] T.H. Prettyman, D.J. Mercer. Performance of analytical methods for tomographic gamma scanning. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-97-1168, 1997
- [61] Robert J. Estep, Connie Buenafe, Sheila Melton. Integration of TGS and CTEN

- assays using the CTEN FIT analysis and databasing program. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-00-2162, 2000
- [62] T.H. Prettyman, S.E. Berr, R.J. Estep, et al. Field experience with a mobile tomographic nondestructive assay system. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-95-3501, 1995
- [63] David J. Mercer, Stephan E. Betts, Thomas H. Prettyman, et al. Tomographic gamma scanning of uranium-contaminated waste at rocky flats. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-98-2922, 1998
- [64] J.P. Lestone, T.H. Prettyman, J.D. Chaves. Performance of a tomographic-gamma-scanner on RETFS waste containing macroscopic lumps of plutonium. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-00-3086, 2000
- [65] ANTECH Ltd. Automated Data Review And Technical Supervisor For The Tomographic Gamma Scanner(TGS), 2002
- [66] WM2900 TGS Tomographic gamma scanner, CANBERRA, USA,
<http://www.canberra.com/products/1117.asp>
- [67] Tran Quoc Dung. New measuring technique for assay of radioactive materials in waste drums, *Progress in Nuclear Energy*, 1998, 33(4):403-420
- [68] Tran Ha Anh, Nguyen Duc Thanh and Tran Quoc Dung, Evaluation of performance of a new measuring technique for assay of radioactive waste, *Ann. Nucl. Energy*, 2005, 32 (13):1516-1523
- [69] Y.F. Bai, E. Mauerhofer, D.Z. Wang, R. Odoj, An improved method for the non-destructive characterization of radioactive waste by gamma scanning, *Appl. Radiat. Isotopes*. 2009, 67(10):1897-1903
- [70] 白云飞, 中低放射性废物危险元素探测方法研究, 博士学位论文, 上海交通大学, 2010
- [71] Thomas Krings, Eric Mauerhofer. Reconstruction of the activity of point sources for the accurate characterization of nuclear waste drums by segmented gamma scanning, *Applied Radiation and Isotopes*, 2011, 69(6):880-889
- [72] Thomas Krings, Eric Mauerhofer. Reconstruction of the isotope activity content of heterogeneous nuclear waste drums, *Applied Radiation and Isotopes*, 2012, 70(7):1100-1103
- [73] Chin Jen Chang, Samin Anghaie. Iterative reconstruction and statistical

- optimization for the nondestructive assay of distributed gamma source in a large nuclear waste container, IEEE transactions on nuclear science, 1998, 45(2):146-153
- [74] Alessandra Cesana, Mario Terrani, Giancarlo Sandrelli. Gamma activity determination in waste drums from nuclear plants, Applied Radiation and Isotopes, 1993, 44(3):517-520
- [75] Tran Quoc Dung. Modification to the technique using two detectors for assay of radioactive waste drums. 1997, Ann. Nucl. Energy, 24 (8):645-657
- [76] Tran Quoc Dung, Nguyen Duc Thanh, Luu Anh Tuyen, et al. Evaluation of a gamma technique for the assay of radioactive waste drums using two measurements from opposing directions, Applied Radiation and Isotopes, 2009, 67(1):164-169
- [77] Tran Quoc Dung. A simple gamma technique for the assay of radioactive waste drums, International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, 2010, 5(4):290-297
- [78] Tran Quoc Dung, Nguyen Duc Thanh, Luu Anh Tuyen, et al. Experimental study of systematic errors of gamma technique for assay of radioactive waste drums, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1360_ICRR_2007_CD/papers/D.%20Tran.pdf
- [79] 朱荣保, 谭亚军, 袁晓鑫等, 大型高分辨分段 γ 扫描装置的研制, 原子能科学技术, 1994, 28 (1): 16-24
- [80] 谭亚军, 朱荣保, 吴昕等, 分段 γ 扫描装置数据获取与处理软件系统的研制, 原子能科学技术, 1994, 28 (1): 26-31
- [81] 吕峰, 曹斌, 辛标等, 分段 γ 扫描自吸收校正法分析残渣和废物中的铀、钚含量, 原子能科学技术, 1998, 32 (5): 445-449
- [82] 张怀礼, 吴继宗, 石有卿等, 铀冶金炉渣的破坏性分析及对 NDA 分析仪器 SGS 和 AWCC 的校验, 原子能科学技术, 1998, 32 (3): 269-273
- [83] 吕峰, 曹斌, 辛标等, 可移动式高分辨率分段 γ 扫描现场测量装置的研制, 原子能科学技术, 1998, 32 (3): 239-244
- [84] 周志波, 桶装核废物快速检测方法研究, 硕士学位论文, 中国原子能科学研究院, 2007
- [85] 周志波, 何丽霞, 邵婕文等, 放射性废物快速非破坏性检测装置算法研究, 原子能科学技术, 2008, 42 (2): 144-148
- [86] 何丽霞, 王仲奇, 隋洪志等, 分段 γ 扫描系统物理设计的改进, 中国原子能科

- 学研究院年报, 2006, 285
- [87]何丽霞, 吕峰, 赵学军等, 分段 γ 扫描标样的非破坏性分析法检验, 原子能科学技术, 2007, 41 (2): 248-251
- [88]郜强, 王仲奇, 王奕博等, 分层 γ 扫描层间串扰影响研究, 原子能科学技术, 2011, 45 (2): 212-216
- [89]王仲奇, 宗波, 郜强等, 分层 γ 扫描定量分析层内放射性非均匀分布影响分析, 原子能科学技术, 2012, 46 (1): 103-108
- [90]邓景珊, 李泽, 甘霖等, 分层 γ 扫描方法测量球形容容器核材料滞留量, 核电子学与探测技术, 2007, 27 (5): 895-900
- [91]肖雪夫、夏益华、吕峰等, 用于固体放射性废物无损定量测量的 TGS 图象重构技术, 辐射防护, 2001, 21 (1): 1-10
- [92]肖雪夫, 夏益华, 吕峰等, 蒙特卡罗方法选择 TGS 准直器的最佳形状, 原子能科学技术, 1998, 32 (3): 201-207
- [93]张全虎, 隋洪志, 吕峰等, 层析 γ 扫描透射图像重建方法, 原子能科学技术, 2004, 38 (2): 162-165
- [94]张全虎, 隋洪志, 吕峰等, Monte-Carlo 统计迭代图像重建算法, 原子能科学技术, 2003, 37 (6): 555-557
- [95]ZHANG Quanhua, HUI Weihua, WANG Dong, et al. A novel algorithm for transmission image reconstruction of tomographic gamma scanners, Nucl Sci Tech, 2010, 21:177-181
- [96]张全虎, 层析 γ 扫描重建技术的研究, 博士学位论文, 中国原子能科学研究院, 2003
- [97]隋洪志, 何丽霞, 周志波等, γ 无损测量技术在放射性废物检测中的应用, 2007年核化工三废处理处置学术交流会, 厦门
- [98]成雨, 翁文庆, 白云飞等, 层析 γ 扫描技术效率矩阵计算模型分析与修正, 上海交通大学学报, 2008, 42 (9): 1471-1473
- [99]钱楠, 王德忠, 白云飞等, HPGe 探测器死层厚度及点源效率函数研究, 核技术, 2010, 33 (1): 25-30
- [100] 翁文庆, 王德忠, 张勇等, 用多个能量探测方法校正层析 γ 扫描透射图像重建中射线衰减系数, 辐射防护, 2008, 28 (1): 24-28
- [101] 翁文庆, 王德忠, 张勇等, 层析 γ 扫描透射图像重建算法研究, 核技术, 2008, 31 (5): 396-400

- [102] 阮兆林, 黄宪果, 邢世雄, 废物包装体核素分析方法研究, 核电子学与探测技术, 2001, 21 (4): 310-313
- [103] 邓景珊, 春山满夫, 高漱操等, 透射式 CT 与自射线式 CT 检测核废物桶蒙特卡罗模拟, 原子能科学技术, 2001, 35 (6): 551-555
- [104] Ramkumar Venkataraman, Marcel Villani, Stephan Croft, et al. An integrated tomographic gamma scanning system for non-destructive assay of radioactive waste. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 579:375-379
- [105] ICIS Integrated Crate Interrogation System (ICIS)
http://www.canberra.com/products/waste_safeguard_systems/gamma-neutron-waste-systems.asp
- [106] Troiani Francesco, Cherubini Nadia, Dodaro Alessandro, et al. L/ILW Waste Characterization by the ENEA multi-technique gamma system SRWGA, Proceedings of the International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, 2003, 2:871-875
- [107] Dodaro Alessandro, Frazzoli Franco Vittorio, Remetti Romolo, Segmented gamma scanning of conditioned radioactive wastes: Development, experimental validation, and application of an angular scanning procedure for hot-spot characterization, Nuclear Technology, 2003, 144(1):130-140
- [108] Marc Molinari, Barry H Blott, Simon J Cox, et al. Optimal imaging with adaptive mesh refinement in electrical impedance tomography, Physiological Measurement, 2002, 23(1):121-128
- [109] Marc Molinari, Simon J Cox, Barry H Blott, et al. Adaptive mesh refinement techniques for electrical impedance tomography, Physiological Measurement, 2001, 22(1):91-96
- [110] Min Chan Kim, Kyung Youn Kim, Kyung Jin Lee, et al. Electrical impedance imaging of phase boundary in two-phase systems with adaptive mesh regeneration technique, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(7):954-963
- [111] Huaxiang Wang, Lei Tang, Zhang Cao. An image reconstruction algorithm based on total variation with adaptive mesh refinement for ECT, Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18(5-6):262-267
- [112] Hongqing Zhu, Huazhong Shu, Jian Zhou, et al. Conditional entropy maximization for PET image reconstruction using adaptive mesh model, Computerized Medical Imaging and Graphics, 2007, 31(3):166-177
- [113] Jovan G. Brankov, Yongyi Yang, Miles N. Wernick. Tomographic image reconstruction based on a content-adaptive mesh model, IEEE transactions on

- medical imaging, 2004, 23(2):202-212
- [114] Daifa Wang, Xiaolei Song, Jing Bai, Adaptive-mesh-based algorithm for fluorescence molecular tomography using an analytical solution, *Optics Express*, 2007, 15(15):9722-9730
- [115] Vadim Y Soloviev, Lada V Krasnosselskaia, Dynamically adaptive mesh refinement technique for image reconstruction in optical tomography, *Applied Optics*, 2006, 45(12):2828-2837
- [116] Shepp L A, Vardi Y. Maximum likelihood reconstruction for emission tomography, *IEEE Trans Med Imag*, 1982, MI-1: 113-122
- [117] H. M. Hudson, R. S. Larkin, Accelerated image reconstruction using ordered subsets of projection data, *IEEE Trans Med Imag*, 1994, 13: 601-609
- [118] J. A. Fessler, A. O. Hero, Space-alternating generalized expectation-maximization algorithm, *IEEE Trans Signal Proc*, 1994, 42(10): 2664-2677
- [119] J. A. Fessler, A. O. Hero, Penalized maximum-likelihood image reconstruction using space-alternating generalized EM algorithms, *IEEE Trans Imag Proc*, 1995, 4(10): 1417-1429
- [120] P. J. Green, Bayesian reconstructions from emission tomography data using a modified EM algorithm, *IEEE Trans Med Imag*, 1990, 9(1): 84-93

攻读博士学位期间完成的论文和专利

已发表的论文

- 1、LIU Cheng, WANG Dezhong, BAI Yunfei, QIAN Nan. An improved segmented gamma scanning for radioactive waste drums[J]. Nuclear Science and Techniques, 2010, 21(4): 204-208, SCI 收录
- 2、LIU Cheng, GU Weiguo, QIAN Nan, WANG Dezhong. Study of Image Reconstruction Using Dynamic Grids in Tomographic Gamma Scanning[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, 23(5): 277-283, SCI 收录
- 3、LIU Cheng, WANG Dezhong, BAI Yunfei, ZHANG Jige, MA Yuanwei. Evaluation of Performance of an Improved Segmented Gamma Scanning Method for the Activity Determination of Radioactive Waste Drums[C], 19th International Conference on Nuclear Engineering, 2011, EI 收录
- 4、刘诚, 王德忠, 戚屯锋, 李守平, 王川, 张稳。核废物桶放射性探测的层析 γ 扫描技术[J], 上海交通大学学报, 2010, 44 (9): 1287-1291, EI 收录
- 5、刘诚, 王德忠, 李厚文, 白云飞, 钱楠, 张适, 张继革。基于双探测器校正的分段 γ 扫描技术研究[J], 核技术, 2010, 33 (5): 342-345
- 6、Weiguo GU, Cheng LIU, Nan QIAN, Dezhong WANG. Study on detection simplification of tomographic gamma scanning using dynamic grids applied in the emission reconstruction[J], Annals of Nuclear Energy, 2013, 58:113-123, SCI 收录
- 7、顾卫国, 王德忠, 刘诚, 钱楠。放射性废物桶层析 γ 扫描动网格重建技术分析[J], 上海交通大学学报, 2013, 47 (4): 83-90, EI 收录
- 8、翁文庆, 王德忠, 张勇, 刘诚, 杨永亮。用多个能量探测方法校正层析 γ 扫描透射图像重建中射线衰减系数[J], 辐射防护, 2008, 28 (1): 24-28
- 9、翁文庆, 王德忠, 张勇, 刘诚, 杨永亮。层析 γ 扫描透射图像重建算法研究[J],

核技术, 2008, 31 (5): 396-400, EI 收录

- 10、易珂, 王德忠, 李厚文, 刘诚, 钱楠, 王斌。现场物体计数系统测量标准 200L 钢桶放射性物质活度的不确定度分析[J], 原子能科学技术, 2009, 43 (10): 865-870, EI 收录
- 11、钱楠, 王德忠, 白云飞, 刘诚, 张勇, 杨永亮。HPGe 探测器死层厚度及点源效率函数研究[J], 核技术, 2010, 33 (1): 25-30

已授权的专利

- 1、王德忠, 刘诚, 钱楠, 白云飞, 顾卫国。发明专利: 双探测器分段 γ 扫描测量装置及其扫描方法。申请号: 201010597029.4, 授权公告号: CN102135625 B

致 谢

当写下论文的最后一段时，心中的感受不可言语，有对过去求学岁月的感慨，也有对顺利完成学业的欣喜，更有对在漫漫求学路上曾经帮助过我的每一个人的感激和感谢之情。在即将完成博士学业之际，我在此谨对多年来给予我关心、帮助和支持的老师、同学及亲人致以最衷心的感谢！

师从王德忠教授已经七年了，从本科的专业课学习到本科毕业设计，再到博士阶段的指导，王老师无论在学业上还是在生活上都给予了我无微不至的关怀。王老师在学术上渊博的学识、工作上严谨的态度、为人上谦逊的处事都让我获益良多，也必将受益终生。王老师的谆谆教诲，我永远铭刻在心，并将是我一生的财富。我要借此机会向王老师表示深深的谢意！

感谢课题组的张继革老师对我的研究工作提出很多宝贵的意见和建议，赵红英老师在生活方面给予了细心的关怀和问候，在此表示诚挚的谢意！

感谢课题组已经毕业和在读的兄弟姐妹，感谢你们和我一起度过了充满快乐而又艰辛的博士阶段，感谢你们对我的帮助，与你们一起度过的时光将是我一生的记忆。

我能做出今天的成绩，离不开家人的帮助和支持。在只身求学的日子里，总是有父母亲的叮咛嘱托想起在耳边，总是能透过千里看到你们期望的目光，你们对我无私的奉献和支持让我走过了风风雨雨，对你们的感激我唯有终生回报！

感谢我的丈夫顾卫国，陪我一起在这个校园中走过了七个春夏秋冬，你对我的理解、支持是我人生最大的财富。感谢我的女儿，你的出生带给了我无尽的欢乐，我将用我的一生去爱护你保佑你。

本文研究工作得到国家自然科学基金（No. 10675084）的资助，在此表示感谢。最后，感谢在百忙之中抽出时间评阅本论文和参加答辩会的各位老师。