

核电厂高密度介质 400L 废物桶活度测量的半层析伽马扫描技术研究

饶开源¹ 顾卫国 唐新海 王德忠 马元巍
(上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要 半层析伽马扫描技术 (STGS) 作为一种新的改进型层析伽马扫描方法在高密度 400L 废物桶上应用效果得到验证。这种方法是一种综合 SGS 和 TGS 测量方法和重建算法的改进型方法。这种方法在 SGS 基础上将废物桶轴向分段的每层, 进一步划分为数个环状体素, 然后采用拓扑层析方法进行活度重建。针对包含三种放射性核素的 400L 超压废物桶, 蒙特卡洛方法被用于验证 STGS 方法的正确性。结果显示, SGS 对高密度 400L 桶的最大测量误差超过 100%, 而 STGS 的重建误差和统计偏差可控制在 50% 以内, 且往往是 SGS 方法的二分之一或更低。而测量时间显著短于 TGS。从整体上讲, STGS 是一种平衡了精度和测量时间, 测量高密度 400L 废物桶的有效方法。

关键词 半层析伽马扫描技术, 无损检测方法, 低中放废物

中图分类号 TL 81

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.0x0x01

Semi-Tomographic Gamma Scanning Technique for Activity Detection of 400L Radioactive Waste Drum with High Density

RAO Kaiyuan GU Weiguo TANG Xinhai Wang Dezhong Ma Yuanwei
(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract **Background:** SGS and TGS are the normal standard NDA technology for low intermediate waste drum detection. **Purpose:** This study evaluate the performance of Semi-tomographic gamma scanning (STGS) for 400L waste drum with high density. **Methods:** This method and its algorithm synthesize the principles of SGS and TGS. In this method, each segment is divided into annual voxels and tomography is used in the radiation reconstruction. The accuracy of STGS is verified by MCNP calculation for the 400L standard waste drums which contains three types of nuclides. The cases of point source and uniform materials are employed for comparison. **Results:** The results show that the reconstruction error and statistical bias for STGS can be controlled lower than 50% and is always half or less of SGS while maximum error of SGS is over 100%. The detection time of STGS is obviously shorter than TGS. **Conclusions:** Overall, STGS is an effective method for non-destructive assay of 400L radioactive waste drums with high density, which can balance accuracy and detection time well.

Key words STGS, Non-destructive Assay, Radioactive Waste

CLC TL 81

高等学校博士学科点专项科研基金(20120073130009)资助

第一作者: 饶开源, 男, 1992 年出生, 2015 年于上海交通大学攻读硕士学位, 研究领域为辐射测量与防护。

通信作者: 顾卫国, E-mail: guweiguo@sjtu.edu.cn

Supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20120073130009)

First author: RAO Kaiyuan, male, born in 1992, pursue master degree from 2015, focusing on radiation detection and protection.

Corresponding author: GU Weiguo, E-mail: guweiguo@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-11-07, 修回日期: 2017-12-01

γ 射线扫描技术主要可分为分段 γ 扫描技术 (Segmented Gamma Scanning, SGS) 和层析 γ 扫描技术 (Tomographic Gamma Scanning, TGS)。

SGS 和 TGS 技术由洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 分别于 1970 年左右和 1990 年左右提出的。SGS 将废物桶在轴向分成数层, 假定每层的介质材质和放射性核素分布均匀, 但是实际情况下由于桶内介质分布不均匀, 导致较大的系统误差。TGS 则在此基础上将每层进一步划分为若干体素, 借用层析成像技术重建核素活度的三维分布。TGS 的探测精度高, 但是探测过程复杂, 测量时间长^[1]。

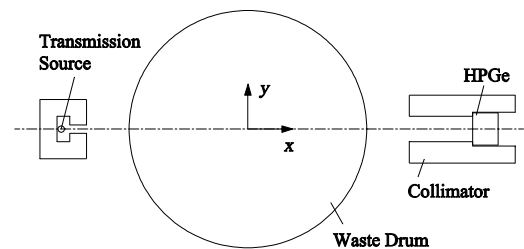
因此, 过去二十年有学者展开对改进型技术的研究。废物桶中核素的分布在实际情况往往是非均匀的, 有放射性核素聚集的区域被称为“热点”。Anh 提出了一种方法, 假设废物桶内核素主要以热点形式存在, 那么在测量过程中以足够长的时间匀速旋转废物桶, 可将热点等效为环状源, 从而较好的克服这种非均匀性。但是他主要针对 SGS 的一层进行研究, 而且假设介质均匀分布^[2]。刘诚提出的另一种方法是, 假设每层核素都以单点源方式存在或可视为单点源, 首先重建得到环状源半径, 然后利用得到的环状源半径进行效率刻度, 修正探测结果^[3]。显然这种方法对多点源重建效果较差。此外, 还有一种废物桶旋转时, 用计数率随角度变化规律来修正重建活度的方法来提高 SGS 精度^[4], 但是当一层同时存在超过三个点源时效果不理想。Tran Quoc Dung 在 SGS 的基础上, 在桶轴向上下各增加一个的探测器以优化每层探测的结果, 在一定程度上降低了 SGS 的误差^[5], 但是这种方法只针对低密度的包含碎布、防护服、鞋套、防护手套等有机材料的废物桶探测比较有效。钱楠以双探测器位于偏心位置的分段伽马扫描技术为基础, 将每层看做一个环放射源并建立环放射源半径位置与探测效率的对应关系, 这种方法的活度重建精度高于 SGS^[6]。对 TGS, 减少每层划分的体素是一种减少探测时间的有效方法, 但同时会带来精度下降的问题。为此, 刘诚提出了一种自适应网格的重建方法, 这种方法的网格划分将围绕热点区域进行自动细化, 从而达到了在精度不变的情况下测量时间减半的效果^{[7][8][9]}, 但是这种算法的可靠性有待研究。迄今为止, 这些 SGS 和 TGS 方法中没有针对高密度 400L 废物桶的研究, 而改进型层析方法在探测精度和时间平衡性上面的探索是值得进一步挖掘的。STGS 方法^[10]综合了 SGS 和 TGS 的测量策略和重建准则。这种方法中废物桶旋转而将桶内点源被视为环状源, 每

层被分成若干环状体素。层析重建方法被用于核素径向分布和环状体素内核素活度的重建。因为相对于 TGS 而言, 每层进行了一维径向划分为若干体素而非二维, 所以这种方法被称为半层析伽马扫描 (semi-tomographic gamma scanning, STGS)。

400L 废物桶与 200L 相比, 一方面随着几何尺寸的增大, 废物桶内核素发射出的射线运动径迹的吸收距离增长; 另一方面, 未来将采用超压缩等大减容比方法处理废物, 也将导致桶内介质密度增大。上述特点都引发了更强的自吸收效应。这种情况导致常规 SGS 方法测量精度差, 而 TGS 方法为了获得可靠的精度必然需要很长探测时间。STGS 方法的应用效果值得深入研究。

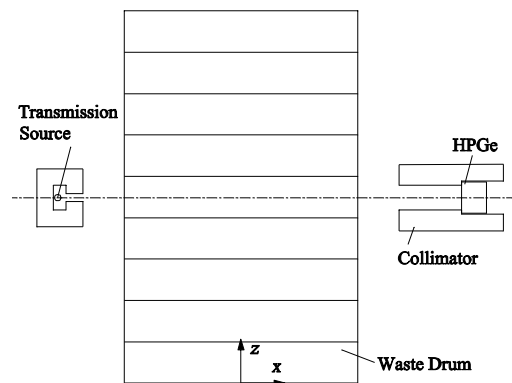
1. 基本原理

对于 400L 的低中放废物桶, 伽马扫描探测系统的原理如图 1 所示。这套系统采用了一个带准直器的高纯锗 (HPGe) 探测器。介质材料的密度可以通过称重法或者透射重建法获得。



(a)x-y 平面系统布局

(a)Layout in x-y plane



(b)x-z 平面系统布局

(b)layout in x-z plane

图 1 γ 射线探测系统原理

Fig.1 The schematic of gamma scanning detection system.

SGS 方法把废物桶轴向分成数层, 假设单层介

质密度和核素均匀分布，探测时废物桶匀速旋转，探测逐层进行。透射测量过程中，用探测器对穿透目标层介质的伽马射线进行计数。根据比尔定律，透射测量过程的公式描述如下：

$$\frac{C_k}{C_{k,0}} = \exp(-\mu_k D) \quad (1)$$

$C_{k,0}$ 为未经衰减的透射源计数率， C_k 为当探测器垂直正对准第 k 层时经废物桶填充介质衰减的透射源计数率； μ 是第 k 层填充介质的线性衰减系数， D 是废物桶等效直径。

在发射测量前，探测效率需要进行刻度。探测效率取决于几何尺寸，探测器位置，介质密度以及放射性核素能量。发射测量过程的公式如下：

$$C_k = \alpha \cdot \sum_{n=1}^N A_n \cdot E_{nk}(\rho, e) \quad (2)$$

C_k 为探测第 k 层时发射源的计数率， A_n 是第 n 个体素内核素的放射性活度， α 是伽马射线特征能为 e 时的分支比。整个探测过程经过 K 次测量，得到包含 N 个未知数由 K 个方程组成的方程组，其中 N 是废物桶被划分的层数。通过求解此方程组可以得到每层的放射性活度。

如图 2 所示，TGS 则进一步将 SGS 中的每层划分为若干体素，假设单体素内介质和核素均匀分布，通过层析成像技术重建体素的介质密度和活度。测量时采用步进方式，每次废物桶旋转步进或探测器和透射源在 y 轴方向步进，每步测量一次，保证发射活度测量线性方程组有可靠解。

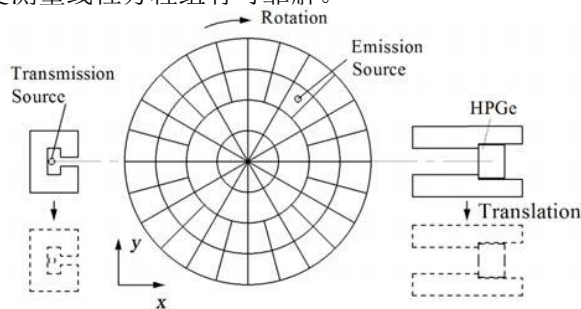


图 2 TGS 探测系统原理

Fig.2 The layout of TGS detection system

TGS 透射测量可以用以下公式描述：

$$\frac{C_{ijk}}{C_{ijk,0}} = \exp\left[-\sum_{n=1}^N (\mu_n L_n)\right] \quad (3)$$

其中 i, j, k 描述了探测器与废物桶相对位置在圆周方向，偏心方向以及轴向的序号坐标； n 描述

了废物桶中的体素编号，体素总个数为 N ； μ_n 和 L_n 分别是在透射路径上的第 n 个体素的线性衰减系数和径迹长度。

对 TGS 的发射测量过程而言，假设点源位于每个体素的几何中心，可以用以下公式描述：

$$C_{ijk} = \alpha \cdot \sum_{n=1}^N \left[A_n \cdot E_{n,ijk}(e) \cdot \exp\left(-\sum_{n=1}^N \mu_n L_n\right) \right] \quad (4)$$

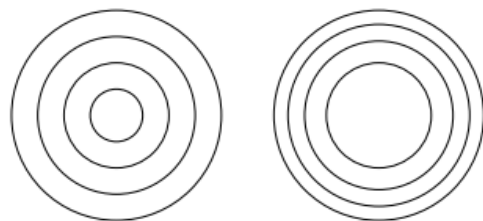
式中， C_{ijk} 为圆周方向第 i 个、偏心方向第 j 个、轴向第 k 个探测位置的计数率； α 是伽马射线分支比； A_n 是第 n 个体素中单点源活度； $E_{n,ijk}$ 是第 n 个体素中点源的不考虑衰减，针对能量 e 的探测效率； L_n 是目标点源发射的伽马射线经过路径上编号为第 n 个体素的径迹长度。

STGS 方法在 SGS 方法的基础上仍采用废物桶匀速旋转的策略，但进一步将每层径向划分为若干个环状体素，假定每个环状体素中填充介质密度和放射性核素均匀分布。图 3 展示了四种体素划分的方式，ER (Equal Radius) 是等半径划分方式，EA (Equal Area) 是等面积划分方式。因为废物桶处于匀速旋转的状态，所以点源被视为环状源。根据 TGS 的测量和重建准则，STGS 的透射和发射测量原理可用以下公式描述：

$$\frac{C_{jk}}{C_{jk,0}} = \exp\left[-\sum_{n=1}^N (\mu_n L_n)\right] \quad (5)$$

$$C_{jk} = \alpha \cdot \sum_{n=1}^N \left[A_n \cdot E_{n,jk}(e) \cdot \exp\left(-\sum_{n=1}^N \mu_n L_n\right) \right] \quad (6)$$

其中 j, k 描述了探测器位置在偏心方向和轴向的序号坐标； n 描述了废物桶中环状体素的编号，体素总个数为 N ； C_{jk} 是探测器计数率， $C_{jk,0}$ 是无衰减下的透射测量的计数率； μ_n 和 L_n 分别是在透射路径上的第 n 个环状体素的线性衰减系数和径迹长度； A_n 是第 n 个体素中单点源活度； $E_{n,jk}$ 是第 n 个体素中点源的不考虑衰减，针对能量 e 的探测效率。



(c) 四体素等半径

(d) 四体素等面积

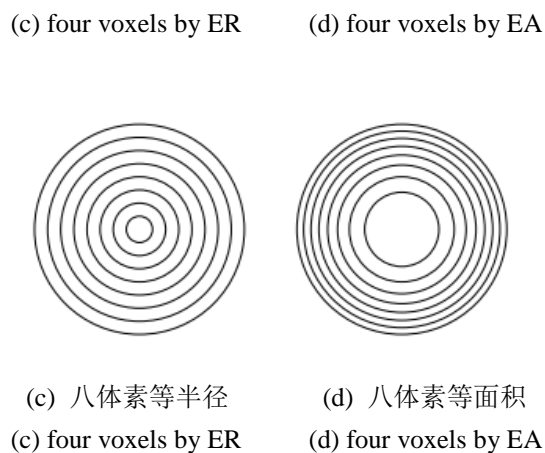


图 3 STGS 环状体素划分

Fig.3 division of annular voxels for STGS

STGS 方法的测量时间取决于径向环状体素的数目, 一般为 SGS 方法的 2-8 倍。例如, 采用四体素划分方式的 STGS 测量时间约为 SGS 方法的 4 倍, 而八体素划分则约为 8 倍。

2. 蒙卡方法

针对 STGS 方法的模拟验证以 400L 废物桶为目标。蒙特卡罗配合数值计算方法^[11]被用于效率刻度和探测的验证。考虑到介质材料的线性衰减系数与放射性核素发出射线能量的关系, 我们选用三种不同的核素用作模拟计算, 分别是 Ba-133 (0.356MeV), Cs-137 (0.662MeV), Co-60 (1.333MeV)。针对高密度废物桶, 例如水泥桶, 密度通常在 2g/cm^3 左右。因此我们选用的填充介质按密度分为三种, 分别是 1.5g/cm^3 , 2.0g/cm^3 以及 2.5g/cm^3 。

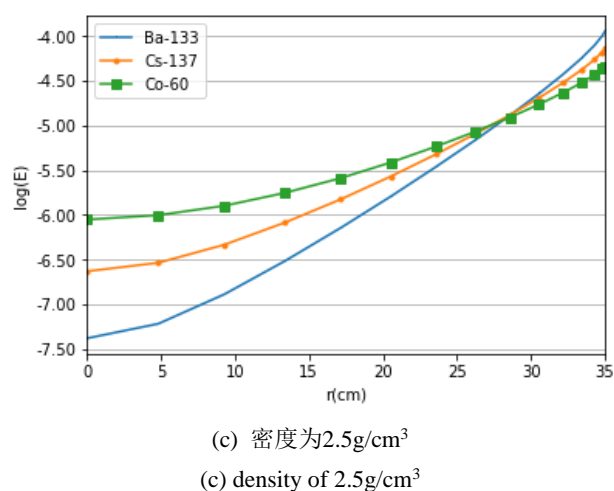
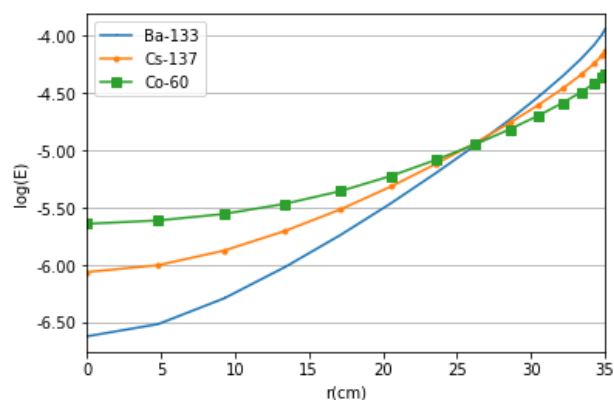
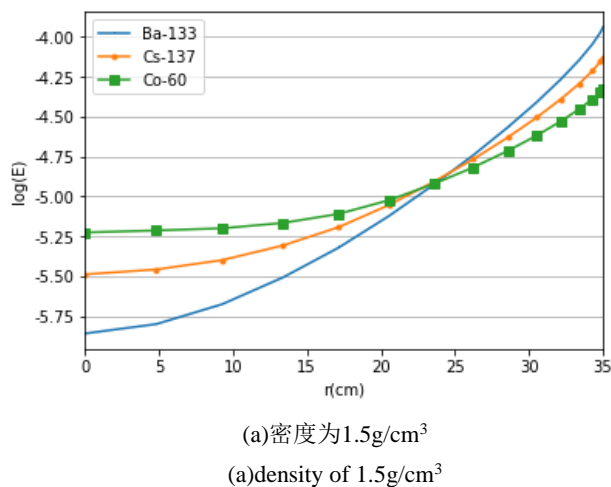


图4 等效环源探测效率随其半径变化

Fig.4 The detection efficiency of the ring source versus its radius in the waste drum

在探测仿真的过程中, 我们采用了 Canberra 公司的探测效率为 40% 的同轴高纯锗 (HPGe) 探测器。探测器晶体直径为 6.2cm, 长度为 5.95cm, 被厚度为 1.5mm 的铝质层包裹。探测器的铅屏蔽层厚度为 4cm, 距离废物桶心 56cm。准直器为铅质, 直径为 8cm, 方形孔宽 5cm, 高 5cm。根据探测器自身参数以及与废物桶的相对位置, 可以得到不同位置环状源的探测效率分布, 正如图 4 所示, r 为环源半径。探测效率同样受到填充介质和放射性核素的影响。根据以往的研究成果, 当介质密度相对较小, 例如小于 0.5g/cm^3 这种情况下, 探测效率随着环源半径的增加而减少^[10]。当环源半径很大时, 只有那些在准直器视野内的源位置可以得到较高的探测效率, 而多数源位置的探测效率都很低。当密度

很小时，介质的线性衰减系数也很小，导致大半径环源的探测效率相对于桶心更低。

当前研究的工况都是密度相对较大的情况。当介质密度为 1.5g/cm^3 , 2.0g/cm^3 , 2.5g/cm^3 时，相对来说密度足够大，线性衰减系数很大，桶心位置环源的探测效率会显著降低。当核素位于靠近桶心的位置时，低能射线的探测效率更低，因为射线在桶内介质的运动径迹较长，低能射线在废物桶中的线性衰减系数更大，被探测器捕捉到的射线计数率相对更低。而当核素位于靠近桶边缘的位置时，低能射线的探测效率更高，这是因为射线在桶内的运动径迹较短，不同能量射线的衰减较为相似，而探测器晶体对低能射线的探测效率较高。

为了有效分析 STGS 的探测精度，我们将 SGS 与 STGS 方法进行对比。废物桶在实验中被分成了 10 层，每层高 10.5cm 。STGS 方法针对每层，采用了如图 3 所示的四种环状体素划分方法。与探测方法相对应的探测器偏心测量位置 Δy 分别为：SGS 为 0cm ，STGS 四环状体素为 $0, 7, 14, 21\text{cm}$ ，STGS 八环状体素为 $0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28\text{cm}$ 。

3. 结果与讨论

每层的总活度通过求每个环状体源的活度和来得到。重建误差 (E_r) 的定义如下：

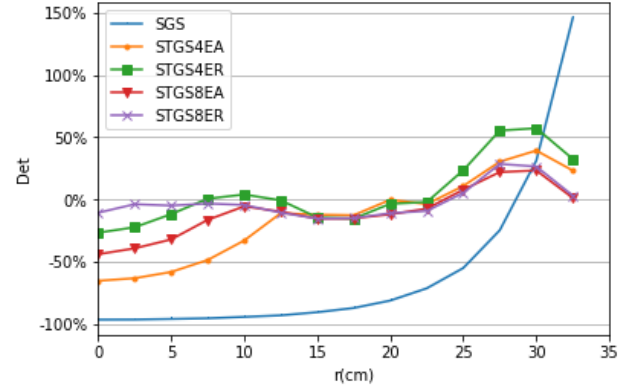
$$E_r = \frac{A - A_{\text{real}}}{A_{\text{real}}} \times 100\% \quad (7)$$

A 是某核素重建出的活度， A_{real} 是相似核素的真实活度。

蒙卡方法对 14 个不同的半径的单点源位置进行模拟测量和重建，结果如图 6 所示。采用的核素种类包括 Ba-133 (0.356MeV)，Cs-137 (0.662MeV)，Co-60 (1.333MeV)。

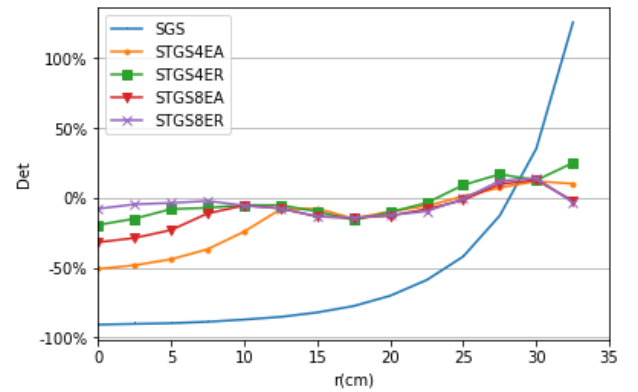
针对高密度 400L 废物桶的特殊工况，SGS 方法误差往往超过 100% 或接近 100%。从图中可以看出，当点源位于半径位置小于 25cm 的位置时，SGS 方法的误差均在 50% 以上，离桶心越近的位置越接近 -100%。而 STGS 方法的误差在多数情况下都小于 SGS。针对 ER 和 EA 划分方法做对比可以发现，ER 划分在桶心位置误差更小，而 EA 在桶边缘的位置误差更小，桶半径一半的位置差别很小，总体上二者误差差别不大。STGS 八环状体素划分的方式相对于四体素虽然在测量时间上增加了一倍，但精度的提升非常明显，误差降低了接近一半。对于实验涉及的五种测量方法，误差的变化规律是较为一致的。随着能量的降低，密度的增大，误差都进一

步增大。而 Ba-133 在密度为 2.5g/cm^3 的工况，是误差最大最为极端的情况。在这种工况下，STGS4ER 方法会在单点源位于半径 30cm 处时，出现一个误差明显增大的情况，这是由于 STGS4ER 最外层环状体素中核素的实际分布偏离均匀假定，而呈现出的一个误差极大分布的情况。另外，Ba-133 密度 2.0g/cm^3 和 Cs-137 密度 2.5g/cm^3 这两种工况条件较为接近的情况，误差的偏离也存在相似的分布。



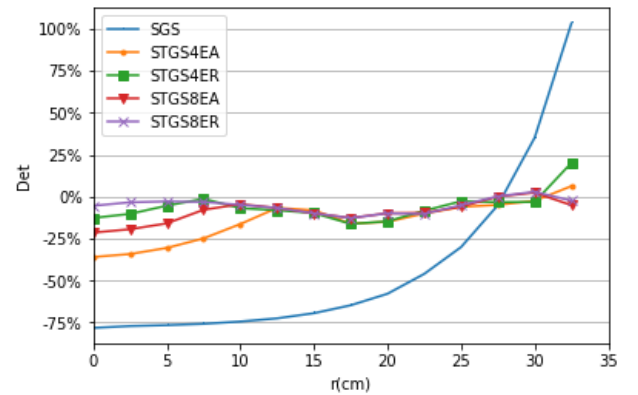
(a) Ba-133 源，介质密度 1.5g/cm^3

(a) Ba-133 in the material of 1.5g/cm^3



(b) Cs-137 源，介质密度 1.5g/cm^3

(b) Cs-137 in the material of 1.5g/cm^3



(c) Co-60 源，介质密度 1.5g/cm^3

(c) Co-60 in the material of 1.5g/cm^3

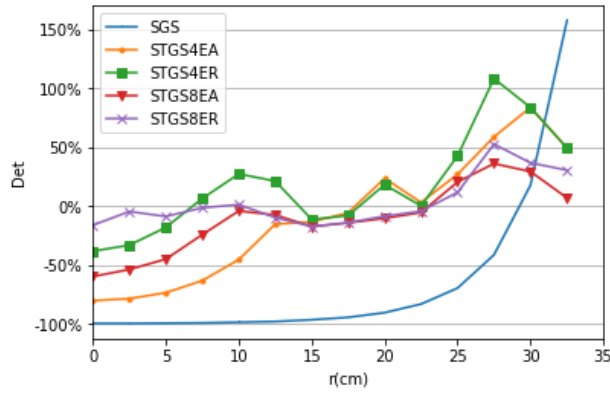
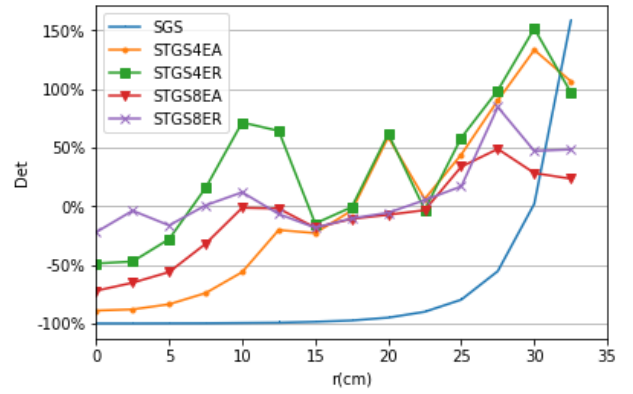
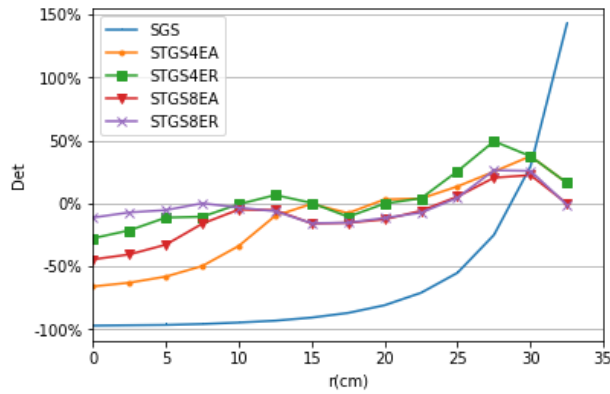
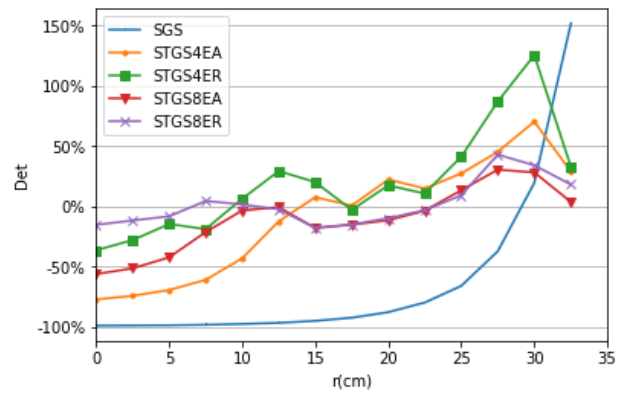
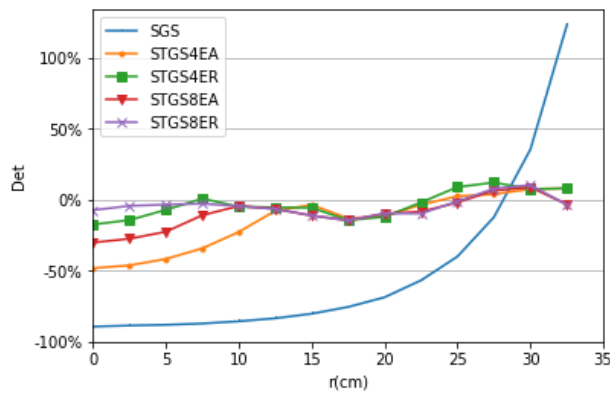
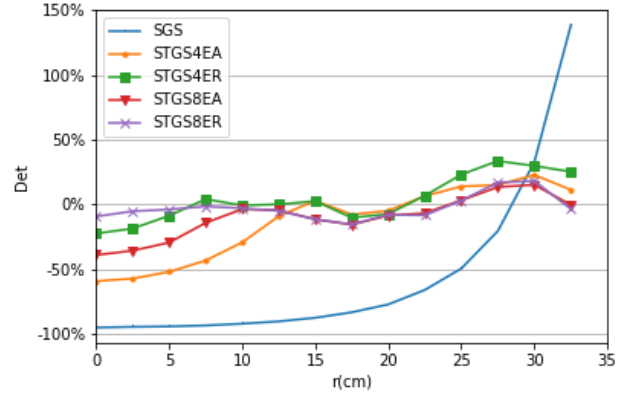
(d) Ba-133 源, 介质密度 2.0g/cm³(d) Ba-133 in the material of 2.0g/cm³(g) Ba-133 源, 介质密度 2.5g/cm³(g) Ba-133 in the material of 2.5g/cm³(e) Cs-137 源, 介质密度 2.0g/cm³(e) Cs-137 in the material of 2.0g/cm³(h) Cs-137 源, 介质密度 2.5g/cm³(h) Cs-137 in the material of 2.5g/cm³(f) Co-60 源, 介质密度 2.0g/cm³(f) Co-60 in the material of 2.0g/cm³(i) Co-60 源, 介质密度 2.5g/cm³(i) Co-60 in the material of 2.5g/cm³

图 6 单发射点源仿真重建结果

Figure 6. The reconstruction results of one point emission source in simulation

针对大数据量的重建结果, 我们采用统计学方法进行分析。用于估计整体误差情况的参数除了最大和最小重建误差之外, 还有重建误差均方根值 (root mean square, RMS), 其定义如下:

$$RMS=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^NE_r^2}$$

(8)

其中 N 统计分析中是重建误差 (E_r) 的总个数。

正如表 1 所示, SGS 在高密度材料中的重建误差很大, 误差最大值均在 100% 以上, 而 RMS 值不低于 65%, 基本都在 90% 以上。针对放射性点源位于接近桶心位置的数种情况, SGS 方法的重建结果采信度很低。例如, 针对点源位于桶心这种极端情况, 对于 Ba-133 这种发射低能伽马射线的核素, 当介质密度为 1.5g/cm³, 2.0g/cm³, 2.5g/cm³ 时, 用 SGS 方法重建出的核素活度分别约为实际值的 1/50, 1/200 以及 1/700。

而在多数情况下, STGS 方法的重建结果则具备较好的采信度, 测量值与实际值之比最大值基本

不超过 2 倍, 测量值与实际值之比最小值基本不低于 20%。尤其是采用 8 体素划分方式的 STGS 测量方法, 误差基本可以控制在 50% 以内, 具备较好的测量重建精度。

密度为 1.5g/cm³ 时, 四体素划分 RMS 小于 45%, 而八体素划分小于 25%。密度为 2.0g/cm³ 时, 八体素划分 RMS 小于 30%, 而四体素划分方法对于 Cr-51 和 Cs-137 这两种核素而言, RMS 小于 45%。密度为 2.5g/cm³ 时, 八体素划分 RMS 小于 40%, 而四体素划分方法对于 Cr-51 和 Cs-137 这两种核素而言, RMS 小于 85%。对比 STGS 的四种划分方法可知, 八环状体素划分方式明显优于四体素, 而 ER 划分方式比 EA 略优。

表 1 均匀介质中点源的仿真统计结果 (单位: %)

Table 1. The statistical results for the point emission source in uniform filling material(unit:%)										
密度 (g/cm ³)	探测类型	Ba-133			Cs-137			Co-60		
		Max.	Min.	RMS	Max.	Min.	RMS	Max.	Min.	RMS
1.5	SGS	146.18.	-96.78	88.02	125.43	-90.87	78.99	103.33	-78.17	66.41
	STGS4EA	39.34	-65.54	36.64	11.92	-51.01	26.17	6.29	-35.95	19.05
	STGS4ER	57.34	-26.82	26.48	25.03	-19.40	13.07	20.15	-16.26	10.32
	STGS8EA	23.30	-44.12	21.88	12.74	-31.80	15.72	2.39	-21.41	11.13
	STGS8ER	28.58	-15.42	13.45	14.17	-14.27	9.16	2.91	-12.79	6.72
2.0	SGS	157.05	-99.27	93.76	142.53	-96.96	87.39	123.55	-89.48	77.48
	STGS4EA	83.75	-79.97	52.49	37.53	-65.87	35.80	8.15	-48.25	24.53
	STGS4ER	108.22	-38.06	44.41	49.34	-27.65	21.37	12.29	-17.41	9.82
	STGS8EA	36.18	-59.50	29.68	22.48	-44.41	21.75	8.89	-30.17	14.59
	STGS8ER	52.64	-17.11	21.08	26.36	-15.75	12.82	10.44	-14.53	7.80
2.5	SGS	158.02	-99.85	96.44	151.57	-99.05	92.11	138.13	-95.16	84.67
	STGS4EA	133.30	-88.91	73.14	70.42	-77.32	47.39	22.69	-59.40	31.13
	STGS4ER	151.54	-48.75	67.88	125.65	-36.43	46.74	33.46	-22.58	17.58
	STGS8EA	48.88	-72.01	36.83	30.50	-56.21	27.65	15.06	-39.19	18.61
	STGS8ER	84.63	-22.08	31.02	42.97	-17.81	18.02	18.04	-15.52	9.69

4. 结论

半层析伽马扫描 (Semi-tomographic gamma scanning, STGS) 方法在 400L 高密度废物桶上的测量效果得到了验证。针对不同密度下单点源极端分布的情况进行对比分析可得到以下结论:

(1)影响 STGS 方法重建误差的因素包括探测的核素种类以及填充介质。针对单点源情况采用八

体素划分方式, 当密度分别为 1.5g/cm³, 2.0g/cm³ 和 2.5g/cm³ 时, RMS 值分别小于 25%, 30% 和 40%。

(2)针对 400L 高密度废物桶, SGS 方法误差往往接近甚至超过 100%, 而 STGS 方法仍具备可靠的表现。SGS 在接近桶心位置的重建结果基本为实际值的百分之一, 而 STGS 在接近桶心位置的误差则可控制在 60% 以内。在多数情况下 STGS 的 RMS 是 SGS 的二分之一甚至更低。

(3)针对 400L 高密度废物桶, STGS 八体素

划分方式精度可靠, 是最佳测量方案。STGS 八体素测量方案误差绝对值基本不超过 60%, RMS 值不超过 40%, 而 ER 比 EA 略优。

(4) STGS 方法作为一种平衡性的改进型方法, 尽管测量时间约是 SGS 的 2-8 倍, 而测量精度不如 TGS, 但是其整体表现是非常出色的。

参考文献

- 1 Kirkpatrick J M, Leblanc P J, Nakazawa D, et al. A Mobile Automated Tomographic Gamma Scanning System[C]// Waste Management Conference. 2013.
- 2 Anh T H, Thanh N D, Dung T Q. Evaluation of performance of a new gamma technique for assay of radioactive waste[J]. Annals of Nuclear Energy, 2005, 32(13):1516-1523.
- 3 Liu C, Wang D Z, Bai Y F, et al. An improved segmented gamma scanning for radioactive waste drums, Nuclear Science and Techniques, 2010, 21(4):204-208.
- 4 Krings T, Mauerhofer E. Reconstruction of the activity of point sources for the accurate characterization of nuclear waste drums by segmented gamma scanning[J]. Applied Radiation & Isotopes Including Data Instrumentation & Methods for Use in Agriculture Industry & Medicine, 2011, 69(6):880-9.
- 5 Dung T Q, Phuc P T, Son T T, et al. Evaluation of combination of different methods for determination of activity of radioactive waste in sealed drum[J]. Journal of Fluorescence, 2013, 21(21):1831-3.
- 6 Qian N, Gu W G, Wang C, et al. Research of Two-measurement Position Segmented Gamma Scanning System[J]. Atomic Energy Science & Technology, 2015, 49(01):147-153.
- 7 Gu W G, Liu C, Qian N, et al. Study on detection simplification of tomographic gamma scanning using dynamic grids applied in the emission reconstruction[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 58(8):113-123.
- 8 Gu W G, Liu C, Qian N, et al. Study on detection simplification of tomographic gamma scanning using dynamic grids applied in the emission reconstruction[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, 58(8):113-123..
- 9 顾卫国, 王德忠, 刘诚, 等. 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):505-512.
- 10 Gu W G, Rao K Y, Wang D Z, et al. Semi-Tomographic Gamma Scanning Technique for Non-Destructive Assay of Radioactive Waste Drums[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(6):2793-2800.
- 11 钱雅兰, 王德忠, 顾卫国, 等. 核废物桶检测中探测效率的数值方法[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(1):1-5.