

桶装放射性废物非破坏分析系统 测量模式设计

苏容波, 黄宪果, 涂俊, 吴中义

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为解决核设施退役过程中产生的桶装放射性废物活度非破坏测量, 在某几何条件下, 废物桶内分布条件为理想情况以及部分条件为理想情况下, 利用蒙特卡罗方法改变某些变量对探测效率进行了计算, 并对结果进行了分析, 给出了废物桶内非理想分布条件简化成理想分布条件的方法, 进而提出了桶装放射性废物非破坏测量模式及探测效率获取方法。并用此方法进行了简单的比对实验, 实验结果表明该方法是可行的。

关键词: 桶装放射性废物; 非破坏测量; 探测效率; 理想情况

中图分类号: TL751

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0591-05

Design of Measure Mode for Barreled Radwaste Non-destructive Assay System

SU Rong-bo, HUANG Xian-guo, TU Jun, WU Zhong-yi

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: To set up a non-destructive assay mode for barreled radwaste brought by the process of getting nuclear establishment out of mission, some variables were changed using the Monte-Carlo method to calculate the detecting efficiency when the distributing condition was ideal or partly ideal. The calculation result was analyzed to obtain a method to transform nonideal distributing condition to ideal distributing condition. A non-destructive assay mode for barreled radwaste and a method of getting the detecting efficiency were put forward. The comparison of calculating and experimental results indicates that this method is feasible.

Key words: barreled radwaste; non-destructive assay; detect efficiency; ideal condition

根据国家对放射性废物管理的要求, 废物产生单位应对不可燃放射性废物进行相关处理, 然后将其装入标准废物桶 (208 L), 经整备后分析出桶内废物的核素种类及活度, 最终外运至国家永久性废物库存放。

对于桶装废物的活度测量, 最为理想的分析技术是非破坏测量 (Non-destructive Assay,

NDA) 技术^[1]。非破坏测量技术的关键是如何确定探测器对被测体的探测效率, 影响探测效率的主要因素是桶内介质密度分布和放射性分布, 然而实际工作中产生的桶装废物桶内介质密度分布和放射性分布随机性很强, 因此该情况下的探测效率难以确定。本工作计算在某些特定分布下的探测效率, 通过分析给出减小影

响探测效率的方法，并给出桶装废物非破坏测量方法和自行组建测量系统结构框架设计。

1 介质密度和放射性分布对探测效率的影响

计算的几何条件作如下设定：探测器表面距废物桶表面 50 cm，被测层的厚度为 10 cm，废物桶与探测器相对几何位置示于图 1。废物桶材质为碳钢，壁厚 2 mm，内径 50 cm，计算的探测器探测效率是针对 ^{241}Am 的 59.54 keV 特征射线。

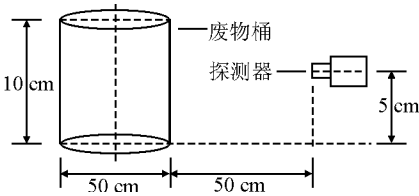


图 1 废物桶与探测器几何位置
Fig. 1 Geometry position of wastebin and detector

1.1 理想条件下的探测效率

假定废物桶内介质密度均匀分布 (1.0 g/cm^3)，放射性也均匀分布，则该条件

下结合探测器本征数据，利用蒙特卡罗方法计算^[2-4]，探测器的探测效率为 $1.233\ 90\times 10^{-5}$ 。

1.2 部分条件为理想情况下的探测效率

1.2.1 介质密度均匀分布、放射性不均匀分布
假定废物桶内介质密度均匀分布 (1.0 g/cm^3)，放射性不均匀分布，分布情况如下。

1) 放射性主体均匀分布，内有一放射性强度（单位体积内的放射性水平）不同的单元

假定内有一放射性强度不同的球体，球心在被测层的中心层面上，球心与桶的轴线距离为 20 cm，其俯视图示于图 2。改变球体的大小、角度和放射性强度（被测层主体强度定为 1），探测器探测效率计算结果列于表 1。

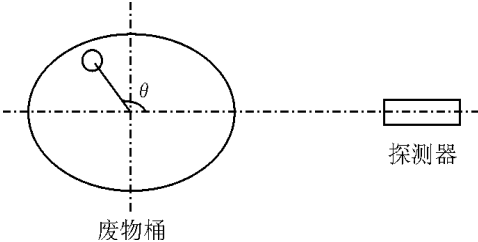


图 2 球体位置俯视图
Fig. 2 Planform of sphere position

表 1 探测效率计算结果
Table 1 Result of detect efficiency

强度	不同内径、不同角度下的探测效率					
	2 cm, 0°	2 cm, 90°	2 cm, 180°	8 cm, 0°	8 cm, 90°	8 cm, 180°
0.001	$1.233\ 90\times 10^{-5}$	$1.234\ 80\times 10^{-5}$	$1.233\ 90\times 10^{-5}$	$1.137\ 57\times 10^{-5}$	$1.251\ 50\times 10^{-5}$	$1.253\ 73\times 10^{-5}$
0.01	$1.233\ 91\times 10^{-5}$	$1.234\ 79\times 10^{-5}$	$1.233\ 90\times 10^{-5}$	$1.138\ 45\times 10^{-5}$	$1.251\ 36\times 10^{-5}$	$1.253\ 57\times 10^{-5}$
0.1	$1.234\ 03\times 10^{-5}$	$1.234\ 77\times 10^{-5}$	$1.233\ 87\times 10^{-5}$	$1.147\ 27\times 10^{-5}$	$1.249\ 88\times 10^{-5}$	$1.252\ 01\times 10^{-5}$
100	$1.367\ 75\times 10^{-5}$	$1.210\ 38\times 10^{-5}$	$1.208\ 14\times 10^{-5}$	$5.251\ 43\times 10^{-5}$	$5.637\ 04\times 10^{-6}$	$5.265\ 77\times 10^{-6}$
1 000	$2.360\ 60\times 10^{-5}$	$1.029\ 25\times 10^{-5}$	$1.017\ 12\times 10^{-5}$	$7.746\ 02\times 10^{-5}$	$1.466\ 31\times 10^{-6}$	$8.564\ 07\times 10^{-7}$
10 000	$5.596\ 42\times 10^{-5}$	$4.389\ 31\times 10^{-6}$	$3.945\ 40\times 10^{-6}$	$8.172\ 61\times 10^{-5}$	$7.530\ 83\times 10^{-7}$	$1.023\ 77\times 10^{-7}$
1 000 000	$7.611\ 03\times 10^{-5}$	$7.140\ 13\times 10^{-7}$	$6.925\ 16\times 10^{-8}$	$8.222\ 93\times 10^{-5}$	$6.689\ 67\times 10^{-7}$	$1.344\ 76\times 10^{-8}$

由表 1 可知：在介质密度均匀分布的情况下，若该单元所含放射性主体所含放射性相比较少（几十分之一或更小），则探测效率受该单元与探测器间几何位置的影响非常小，或基本不受其影响，且实际情况下计算的探测效率与放射性均匀分布下计算的探测效率差别较小，该情况下的放射性分布可认为是均匀的；

若该单元所含放射性主体所含放射性相当或是倍数关系，则探测效率受该单元与探测器间几何位置的影响很大，必须考虑该单元与探测器间的几何位置。

若是被测层含有 1 个或多个强放射性单元，在测量时间内废物桶被旋转多圈，从整体考虑，强放射性单元以废物桶的轴心为中心形

成一个个均匀的环状物，该种单元非常多则可近似为盘状，这些强放射性单元在被测层内放射性水平占主体地位，将其强度定为 1。经计算，该情况下探测效率为 $1.243\ 51\times 10^{-5}$ ，该分布下对废物桶作旋转处理后，其放射性分布可

认为是均匀的。

2) 放射性分层均匀分布，各层强度不同
假定桶内放射性分为均匀的两层，各层强度不同，将上层放射性强度定为 1，改变下层的强度，探测器探测效率计算结果列于表 2。

表 2 密度均匀分布、放射性分两层均匀分布下仪器探测效率计算结果

Table 2 Result of instrument detect efficiency on uniformity distributing of density and uniformity distributing double-deck of radioactivity

下层强度	10^5 探测效率	下层强度	10^5 探测效率	下层强度	10^5 探测效率	下层强度	10^5 探测效率
0.001	1.234 41	0.1	1.234 60	100	1.236 53	10 000	1.236 55
0.01	1.234 43	10	1.236 35	1 000	1.236 55	1 000 000	1.236 55

假定桶内放射性分为均匀的 3 层，各层强度不同，将上层放射性强度定为 1，改变各层的强度，探测器探测效率计算结果列于表 3。

由表 2 和 3 可知：介质密度均匀分布情况

下，被测体内放射性分层均匀，即使各层之间放射性强度差异很大，实际情况下计算出的探测效率与放射性均匀分布下计算的探测效率差别较小，可认为该情况下放射性是均匀分布的。

表 3 密度均匀分布、放射性分 3 层均匀分布下仪器探测效率计算结果

Table 3 Result of instrument detect efficiency on uniformity distributing of density and uniformity distributing three-ply of radioactivity

强度		10^5 探测效率	强度		10^5 探测效率	强度		10^5 探测效率
2 层	3 层		2 层	3 层		2 层	3 层	
10	100	1.230 93	0.1	100	1.229 29	1 000	0.01	1.243 47
100	1 000	1.230 96	0.1	0.1	1.229 03	100	10	1.242 39
0.01	1 000	1.229 29	100	0.1	1.243 35	1 000	100	1.242 49

3) 放射性极端分布

假定放射性集中且均匀分布在与废物桶底部平行的厚度为 1 mm 的一圆盘上(图 3)，探测器探测效率与圆盘和被测层底部间距离 h 的关系列于表 4。假定放射性集中且均匀分布在一直径为 2 cm 的球体上，球体中心在被测层的中心层面上，球体中心与桶的轴线距离为 20 cm，其俯视图示于图 2，探测器探测效率与角度 θ 的计算结果列于表 5。

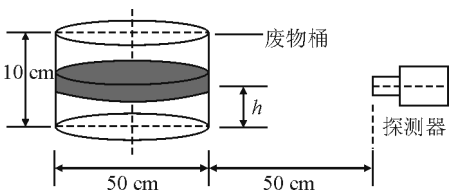


图 3 放射性集中分布在一圆盘上的示意图
Fig. 3 Scheme of radioactivity concentrate distributing on one disk

表 4 密度均匀分布、放射性集中分布在一圆盘上仪器探测效率计算结果

Table 4 Result of instrument detect efficiency on uniformity distributing of density and uniformity distributing on one disk of radioactivity

h/cm	10^5 探测效率	h/cm	10^5 探测效率	h/cm	10^5 探测效率
0	1.218 07	3	1.240 53	6	8
1	1.228 23	5	1.242 51	1.242 78	1.234 39

表 5 密度均匀分布、放射性集中分布在一球体上仪器探测效率计算结果
Table 5 Result of instrument detect efficiency on uniformity distributing of density and uniformity distributing on one sphere of radioactivity

$\theta/(^{\circ})$	探测效率	$\theta/(^{\circ})$	10^5 探测效率	$\theta/(^{\circ})$	10^5 探测效率
0	$7.642\ 54\times 10^{-5}$	90	$6.591\ 26\times 10^{-7}$	180	$1.175\ 20\times 10^{-8}$
45	$1.848\ 88\times 10^{-5}$	135	$3.799\ 39\times 10^{-8}$		

由表 4 和 5 可知：在介质密度均匀分布的情况下，即使被测体内放射性集中分布在一薄圆盘上，实际情况下计算出的探测效率与放射性均匀分布下计算的探测效率误差较小，可认为该情况下放射性是均匀分布的；若放射性集中在某单元内，则探测效率受该单元与探测器间几何位置的影响很大，必须考虑该单元与探测器间的几何位置。

1.2.2 放射性均匀分布、介质密度不均匀分布
假定废物桶内放射性均匀分布，介质密度

不均匀分布，介质密度分布情况如下。
1) 桶内废物介质密度主体均匀分布 (1.0 g/cm^3)，内有一密度不同的单元
假定内有一密度不同的球体，球体中心在被测层的中心层面上，改变球体的大小和密度，探测器探测效率计算结果列于表 6。
2) 桶内废物介质密度分层均匀分布
假定桶内介质密度分布为均匀的 3 层，各层密度不同，改变各层的密度，探测器探测效率计算结果列于表 7。

表 6 放射性均匀分布、介质密度不均匀分布下仪器探测效率计算结果
Table 6 Result of instrument detect efficiency on uniformity distributing of radioactivity and asymmetry distributing of medium density

密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	10^5 不同内径、不同角度下的探测效率					
	2 cm, 0°	2 cm, 90°	2 cm, 180°	8 cm, 0°	8 cm, 90°	8 cm, 180°
0.1	1.236 73	1.234 87	1.233 87	1.244 33	1.250 56	1.252 02
0.4	1.236 25	1.234 70	1.233 79	1.250 00	1.245 48	1.246 85
0.7	1.235 73	1.234 72	1.233 71	1.245 89	1.240 43	1.241 73
1.5	1.233 40	1.234 42	1.233 50	1.226 60	1.227 02	1.228 26
2.0	1.232 68	1.234 28	1.233 37	1.139 58	1.218 20	1.219 98
2.5	1.232 46	1.234 15	1.233 24	1.143 24	1.210 14	1.211 82
3.0	1.232 00	1.234 03	1.233 11	1.162 19	1.202 31	1.203 77

表 7 放射性均匀分布、介质密度分层均匀分布下仪器探测效率计算结果
Table 7 Result of instrument detect efficiency on uniformity distributing of radioactivity and delamination uniformity distributing of medium density

强度			10^5 探测效率	强度			10^5 探测效率
1 层	2 层	3 层		1 层	2 层	3 层	
0.1	0.2	2.7	0.869 356	0.8	1.2	1.0	1.250 91
0.3	0.5	2.2	1.026 65	0.1	1.2	1.7	0.845 647
0.5	0.8	1.7	1.064 56	1.2	0.8	1.0	1.270 91
1.4	0.1	1.5	1.039 10	0.4	1.0	1.6	1.095 91

由表 6 可知，在放射性均匀分布下，被测层内结块越小、与主体密度差异越小，实际情况计算出的探测效率与密度均匀分布下的越接近。由表 7 可知，各层间密度差异越小，实际

情况计算出的探测效率与密度均匀分布下的越接近。显然，在该情况下若将这 10 cm 厚的被测层分为若干层来测量，则分出来的每一层厚度越小其密度分布越接近均匀分布。

2 非破坏测量系统测量方法与结构设计

桶装放射性废物非破坏测量系统的测量思路与方法如下：将桶装废物放置在旋转台上匀速旋转，根据外加标准放射源经桶装废物作用后的透射率将废物进行密度分层；逐层进行旋转测量，每层的探测效率根据外加标准放射源在该层的透射率计算获得，进而算出该层活度；对各层计算结果求和给出最终结果。其系统结构示意图如图 4 所示，标准源及其屏蔽体、准直平板和探测器及其环状准直器通过一支架连接在一起，可一起联动，且准直平板支架还可单独上下移动。

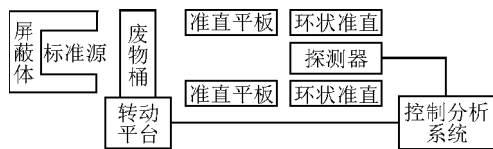


图 4 非破坏检测系统结构示意图

Fig. 4 Scheme of non-destructive measure system

测量时划分出的每一层经旋转后可视为由以桶的轴线为中心密度和放射性均匀分布的小环状物组成，但各环状物的密度和放射性强度不同。实际的核设施退役和放射性废物整备工作中，放射性废物按载体密度经简单分类和去污处理后再装入 208 L 标准的废物桶，实际的桶装废物处处存在放射性，放射性不会只集中在某个部位；低密度（如防护用品和擦拭棉纱等）、中密度（如土壤、建筑垃圾等）载体介质密度分布不均匀但差别不大，根据理论计算分析结果可知，每层均可视为均匀分布；高密度（如钢铁切割件等）载体介质在桶内因存在空隙和结块致使密度差异很大，但经分层旋转处理后，每一被测层对透射源的吸收可等效为一均匀介质的吸收。因此，进一步简化可认为，桶装放射性废物经分层、旋转后，被测量的每一层可视为对标准源的吸收均匀（相当于某一介质密度均匀分布的物质）和放射性均匀分布。

在某工号的退役中，利用该思想作了粗略的比对验证，将一批标准样（工程中所采样品，经处理后装入固定的样品盒再进行相对测量，测量结果视为真实值，这些样品材质、密度各异）装入标准废物桶形成两桶桶装废物，对

其进行简单的非破坏测量（未分层，整桶测量 1 次），测量结果列于表 8。

表 8 活度测量结果比对

Table 8 Contrast on result of activity measurement

桶序号	活度/MBq	
	非破坏测量	各样品相对测量总合
1#	0.512	0.430
2#	0.129	0.113

桶装放射性废物活度测量的主要目的是对废物进行分级，对其处置时按放射性等级选择处置方式，如半衰期大于 30 a 的废物，比活度低于 4×10^6 Bq/kg 的是低放废物，比活度高于 4×10^{10} Bq/kg 的是高放废物，介于两值之间的是中放废物。由此可知，即使有数倍的误差也基本不影响废物的分级。这两桶废物的非破坏测量结果与真实值相差在 20% 内，可用非破坏测量结果对废物进行分级。

3 结论

综上所述，可利用分层扫描测量方法建立一套非破坏测量系统，根据废物特性进行实验研究，通过大量的测量实验和验证实验，确定一种可行的测量、分析与计算方法，使测量数据得到认可，满足废物处置要求。

参考文献：

[1] 杨明太, 张连平. 桶装废物的非破坏分析[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23 (6): 600-603.
YANG Mingtai, ZHANG Lianping. Non-destructive assay of nuclear waste in drum[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(6): 600-603(in Chinese).
[2] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
[3] 武祯, 李君利. 用于探测器校正因子计算的 Monte-Carlo 方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46 (9): 1 585-1 588.
WU Zhen, LI Junli. Monte-Carlo method for calculating particle radiation detector correction factors[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(9): 1 585-1 588 (in Chinese).
[4] HENDRICKS J, MCKINNEY G W. MCNPX user's manual, Version 2.5.0[R]. US: LANL, 2005.