

刘哲, 张丽. γ 射线CT放射性废物桶检测技术综述[J]. CT理论与应用研究, 2014, 23(6): 1025-1040.
Liu Z, Zhang L. Review of γ -ray CT for radioactive waste assay[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(6): 1025-1040.

γ 射线CT放射性废物桶检测技术综述

刘哲¹✉, 张丽²

1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413
2. 清华大学 a. 工程物理系; b. 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084

摘要: γ 射线CT是近年来应用日益广泛的一种非破坏性放射性废物桶检测技术。该技术能够实现对被测对象中放射源的识别、定量与定位, 为放射性废物的进一步处置和管理提供依据。本文简述了 γ 射线CT放射性废物桶检测技术的应用背景, 对其数学模型、系统设计、主要性能指标及其影响因素等进行了总结和阐述, 详细介绍了其放射性活度图像重建算法与校正方法等关键技术的相关研究进展, 并对其未来的发展方向进行了展望。

关键词: γ 射线CT; 数学模型; 系统设计; 性能指标; 图像重建算法; 校正方法

文章编号: 1004-4140 (2014) 06-1025-16 **中图分类号:** TN911.73 **文献标志码:** A

随着核能与核技术在能源、军事、工业和医疗等领域的应用日益广泛, 核燃料厂、反应堆、军用设施、医院和研究机构等每年可能产生大量不同类型的放射性固体废物^[1]。根据废物中所含放射性核素的种类及活度水平, 放射性固体废物可以划分为低放废物、中放废物、高放废物和 α 废物等^[2]。为满足安全性与经济性的需求, 对于不同等级的放射性固体废物, 一般采用不同的运输和贮存标准。因此, 在放射性固体废物处理中, 通常需要首先对废物桶中的放射性核素种类及含量进行检测, 进而决定其处置方式。

与早期的化学、质谱学、电量分析、分散波长X射线荧光分析等技术相比, γ 射线测量、中子测量、X射线荧光K吸收边分析及热量测定等非破坏性检测(Non-destructive Assay, NDA)技术不需要对放射性废物进行破坏性采样, 能够控制检测成本, 并降低工作人员及公众遭受辐射及其他危险性物质伤害的风险^[3-5]。其主要检测对象包括中低放废物、部分 α 废物以及混合废物等^[6-7]。其中, γ 射线检测技术的适用范围较广, 且不需预先测定废物中的相对核素比例, 能够直接获得核素的绝对含量^[7]。

对于较大尺寸的放射性废物桶, 其内部介质材料对 γ 射线的衰减效应会显著影响测量结果。分段 γ 扫描(Segmented Gamma Scanning, SGS)^[8]等技术假定放射性废物桶相对于探测器匀速旋转时, 其放射性活度及衰减介质在旋转平面内可视为均匀分布, 仅对均匀活度、均匀密度或低密度的被检对象较为适用。实际测量中, 放射性核素的物理和化学形态, 介质材料的类型与成分等均可能呈现复杂的分布^[6]。CT技术能够重建被测对象内部放

收稿日期: 2014-04-09。

基金项目: 大型先进压水堆核电站国家科技重大专项(2013ZX06002001)。

射性活度与衰减系数的分布,从而更精确地描述和校正放射性介质的非均匀性造成的影响。1990年前后,美国 LANL (Los Alamos National Laboratory) 的 Estep 等^[9]、LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) 的 Martz 等^[11]、日本的 Kawasaki 等^[10]、德国的 Illerhaus 等^[11]和 Eifler 等^[12]均开展了对 CT 原理与 γ 射线能谱测量相结合的放射性废物检测技术的研究。1994年,LANL 成功研制出层析 γ 扫描(Tomographic Gamma Scanning, TGS) 实验原型系统^[7]。同年,LLNL 的 A&PCT (Active and Passive Computed Tomography) 实验原型系统 IMPACT (Isotope Measurements by Passive and Active Computed Tomography) 研制成功^[13]。1995年,LANL 研制成功车载移动式 SGS/TGS 系统并进行了实地测量实验^[14-15]。同年,LLNL 研制成功车载式 A&PCT 系统 WIT (Waste Inspection Tomography)^[16],并在此后与 BIR (Bio-Imaging Research) 公司共同开发了商用 WIT 设备,经过不同实验基地的大量测试^[6, 17],于 1999 年正式投入使用^[3]。2000年前后,LANL 与 Antech、Ortec 等公司合作,实现了 TGS 设备的商业化^[18]。2007年,LANL 与 Canberra 公司合作生产的 SGS/TGS 一体化系统,首次在核电厂放射性废物桶的检测中获得商业性应用^[19-20]。

目前,国外的 γ 射线 CT 放射性废物桶检测技术、设备及应用已较为成熟,近年的研究主要集中于测量性能的改善、测量不确定性及误差来源的分析评估等方面^[21-23]。

国内在 γ 射线 CT 放射性废物桶检测技术方面的研究起步较晚,1990 年代末期,中国原子能科学研究院首先开展了该技术的初步理论研究^[24-25],进而讨论了相关的图像重建方法,并开发了实验样机^[26]。2000 年代末期起,上海交通大学研究了基于极坐标体素划分方式的 γ 射线 CT 检测方法,对相应的探测效率刻度方法和图像重建算法等均进行了探讨^[27-30]。目前,该技术在国内外尚未实现规模化的商业应用,近年的研究主要基于理论和实验室分析,对相关的图像重建算法和校正方法等提出改进和优化^[31-33]。

γ 射线 CT 放射性废物桶检测技术能够同时实现对放射性核素的识别、定量和定位^[6]。该技术在非均匀放射性、中低密度非均匀介质的复杂条件下具有良好的定量准确性,可灵活适用于不同的废物类型,有效节约了模型制作与刻度的工作量和成本;并可获取低分辨率的放射性活度及衰减介质三维图像,有利于测量的可视化和超出限定标准的废物中“热点”位置的确定^[34],也可为有源中子测量等其他技术提供位置信息等^[14]。由于放射性废物中往往含有重金属、可燃物、易挥发有机物等化学危险性物质^[35], γ 射线检测设备可以与 X 射线成像、X 射线荧光分析等技术相结合,进行综合性的测量^[16, 36]。除放射性废物检测外,该技术还可应用于军工设施与交通口岸等对特殊核材料传播的安全监控^[3-4, 19],以及核反应堆乏燃料组件的燃耗测定等^[37-39]。

1 原理

各种 γ 射线 CT 检测设备具有相同的基本原理和系统组成部分,即利用发射型计算机断层成像(Emission Computed Tomography, ECT)扫描和重建获得放射性活度分布图像。由于被测对象中的介质会对其内部发射的 γ 射线产生衰减效应,通常需结合透射型计算机断层成像(Transmission Computed Tomography, TCT)技术,利用外部放射源获取对象内部的介质衰减系数分布情形,进而校正衰减效应的影响,得到准确的放射性分布及含量。根据放射性废物桶检测的特点,其系统设计参数和性能指标等与医学等其他领域应用的 γ 射线 CT 具有一定的差异。

1.1 数学模型

传统 CT 理论中, 对于 ECT 测量, 探测器在某一测量位置处测得某能量的射线强度 I_e , 可以认为是被测物体内部该能量下的放射性活度 f 在垂直于探测器端面的一条直线上, 经衰减后的积分投影 g , 即

$$g(E, \theta, t) = I_e(E, \theta, t) = \int_L f(E, l) a(E, l, \theta, t) dl = \iint f(E, x, y) a(E, x, y, \theta, t) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (1)$$

其中, E 为射线能量, 坐标系 xOy 的原点定义在探测器旋转扫描的中心, $l = (x, y)$, θ 为探测器的旋转角度, t 为探测器的中心线与原点的距离, 如图 1 (a) 所示。

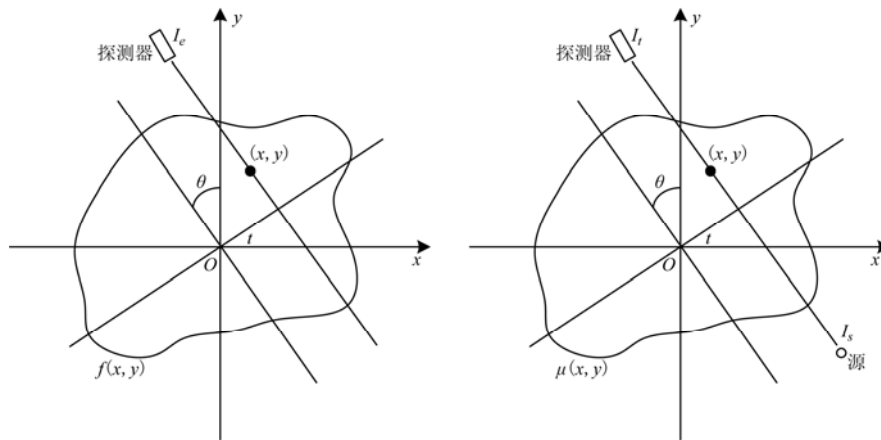


图 1 CT 投影示意图

Fig.1 Illustrations of CT projection

由点 (x, y) 发射的射线到达探测器处的总衰减 a 可表示为:

$$a(E, x, y, \theta, t) = \exp \left(- \left(\int_x^{x_d} \int_y^{y_d} \mu(E, x', y') \delta(x' \cos \theta + y' \sin \theta - t) dx' dy' \right) \right) \quad (2)$$

其中, (x_d, y_d) 为探测器前端面中心坐标, μ 为被测物质的线性衰减系数。由于衰减效应 a 的影响经常较显著且不均匀, 一般需要在重建中进行衰减校正。

为获知线性衰减系数 μ 的分布, 可利用外部射线源, 进行 TCT 扫描和重建。强度为 I_s 的外部射线源, 经被测物体衰减后, 被探测到的射线强度 I_t 满足

$$\ln \left[\frac{I_s(E, \theta, t)}{I_t(E, \theta, t)} \right] = \iint \mu(E, x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy \quad (3)$$

如图 1 (b) 所示^[6, 40]。

在放射性废物桶检测中, 为提高计数效率和统计性, 系统设计中往往采用相对较大的探测器直径和较短的准直器长度。因而, 探测器相对于被测对象具有较宽的视野, 且在大尺寸的被测对象中, 探测器的视野随距离的增加变化显著, 如图 2 所示。另一方面, 对于

不同的放射源位置, 探测器的效率响应也具有明显的差异。由此, 传统的 δ 响应函数和线积分投影理论不再适用, 探测器获得的放射性活度投影可表示为:

$$g(E, \theta, t) = \iiint_V f(E, \mathbf{r}) \varepsilon(E, \mathbf{r}, \theta, t) a(E, \mathbf{r}, \theta, t) d\mathbf{r} = \iiint_V f(E, x, y, z) \varepsilon(E, x, y, z, \theta, t) a(E, x, y, z, \theta, t) dx dy dz \quad (4)$$

其中, $\mathbf{r} = (x, y, z)$, 衰减 a 可表示为:

$$a(E, \mathbf{r}, \theta, t) = \frac{1}{\Omega(\mathbf{r}, \theta, t)} \int \exp\left(-\int_{L(\mathbf{r}, \Omega)} \mu(E, \mathbf{r}') d\mathbf{r}'\right) d\Omega \quad (5)$$

Ω 为点 (x, y, z) 对探测器所张的立体角^[41]。 ε 为探测效率, 与探测器的几何、物理特性及点与探测器的相对位置有关, 故在重建中通常需要进行几何校正。

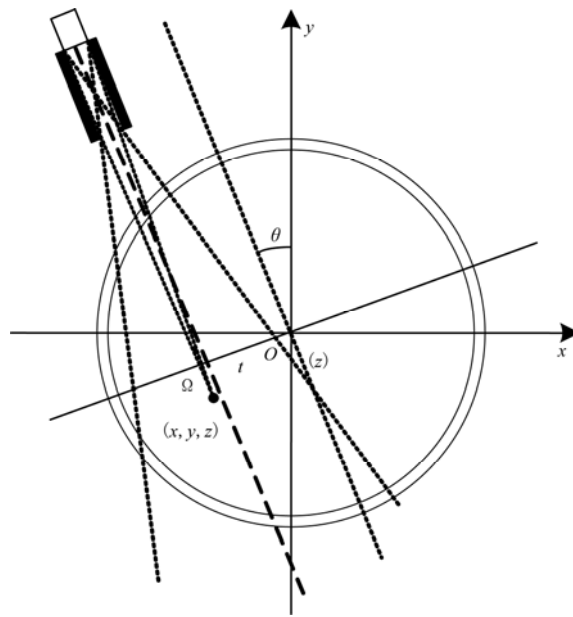


图2 与系统几何设计相关的探测器视野及响应变化

Fig.2 Changes in FOV and response of the detector corresponding to the geometry in system design

若将被测放射性强度分布 f 及其 CT 投影 g 分别离散化为向量 \mathbf{f} 、 \mathbf{g} , 上述投影关系可表示为矩阵形式:

$$\mathbf{g} = \mathbf{H}\mathbf{f} \quad (6)$$

其中 \mathbf{H} 为系统矩阵, 其元素

$$h_{ij} = \iiint_V \varepsilon(E, x, y, z, \theta_j, t_j) a(E, x, y, z, \theta_j, t_j) dx dy dz \quad (7)$$

式中 i, j 分别为图像及投影向量 \mathbf{f}, \mathbf{g} 的元素标号。考虑到被测对象与探测器的距离相对较远, 在体素空间 V_i 内部, 衰减项 a 变化不显著, 故 h_{ij} 可近似表示为^[7, 41]:

$$h_{ij} = \varepsilon_{ij} a_{ij} \quad (8)$$

其中,

$$\varepsilon_{ij} = \iiint_{V_i} \varepsilon(E, x, y, z, \theta_j, t_j) dx dy dz \quad (9)$$

1.2 系统设计

与其他 CT 系统类似, γ 射线 CT 放射性废物桶检测系统主要由放射源、探测器、机械系统、数据处理及控制系统等部分构成^[6-7, 42-43]。

1.2.1 放射源

ECT 测量的放射源即为废物桶中待检测的放射性核素, 主要包括 ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Am 和 ^{228}Th 等核反应材料和超铀元素, ^{137}Cs , ^{60}Co 和 ^{133}Ba 等常见的裂变产物或医学、工业用放射性核素, 以及 ^{40}K , ^{211}Pb 和 ^{214}Bi 等常见的天然本底核素^[1, 6, 35, 43-44]。

TCT 测量的外部放射源可分为经准直的 γ 射线源与 X 射线源两类。由于被测对象中核素成分复杂, γ 射线源在选用上要求具有多个覆盖较宽能量范围的特征峰, 其能量与被测核素的特征峰尽可能相近, 并具有相当的分支比。此外, 源核素应具有相对长的半衰期^[45]。常用的 γ 射线源包括 ^{152}Eu , $^{166\text{m}}\text{Ho}$, ^{75}Se , ^{133}Ba 和 ^{192}Ir , 以及 ^{133}Ba , ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的混合源等^[1, 7, 19-20, 35, 46-48]。为减少操作人员的暴露剂量, 一般需对 γ 射线源进行屏蔽, 并设计为可开关的形式^[19, 43]。针对被测对象中易含有高密度介质的特点, 2009 年, Canberra 公司的 Croft 等^[60]利用高能量的 Co 源和束流调整器, 分别在高、低放射源亮度下进行测量并结合其投影数据, 有效克服了低亮度下计数统计性差和高亮度下探测器死时间长、易饱和的问题, 扩大了可测量对象的密度和均匀性范围^[21]。X 射线源可由 X 光机^[49]或加速器^[6, 11]产生, 与 γ 射线源相比, 其能量和亮度均可以调节, 能够提高灵活性, 减少测量时间。LLNL 的 WIT 系统即采用了 2 MeV 加速器产生的 X 射线源^[6, 16]。1999 年, Coutant 等^[49]使用不同滤波材料调节 X 射线源的能谱, 将获得的两种不同能量分布的 X 射线分别作为外部放射源, 进行双能 TCT 测量, 以提高线性衰减系数的测量准确性。

为获得被测放射性核素的绝对活度, 一般需要使用已知活度的刻度源对系统进行刻度。刻度源核素的选择标准与 TCT 放射源相似, 常用的核素包括 ^{152}Eu , $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 与 ^{133}Ba , ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的混合等^[6, 22-23, 50]。

探测器的信号堆积和死时间等会导致计数的损失, 因此有时还需要使用计数率损失校正源。计数率损失校正源主要包括放射性核素源与脉冲源两类。对于放射性核素源, 要求具有较长的半衰期, 特征峰的数量少、分支比高且与待校正的能量相近, 并且不存在裂变和激发产物的干扰。低能量的校正源应具有较高的活度, 高能量校正源则相反^[51]。常见的核素有 ^{109}Cd 和 ^{60}Co 等^[52-54]。使用脉冲源^[19]则可避免衰变、散射和峰区计数不准确等问题, 具有更高的准确性^[51]。

1.2.2 探测器

多数系统采用高分辨率的 HPGe 探测器, 以获取准确的能谱响应和感兴趣能量的相应活度。其在 1.3 MeV 的能量分辨率可达 2 keV, 效率为 7.6 cm 直径的 NaI 探测器在 1.3 MeV 能量下效率的 60%~90%^[3, 6-7, 34, 43-44]。因成本等因素, 多采用单探测器逐点扫描的方式。LLNL 与 BIR 公司 1999 年投入使用的 WIT 系统采用了 6 个外部放射源和 6 个 HPGe 探测器, 使测量时间大大缩短^[3, 6]。

使用能量分辨率相对低, 但成本较小、应用更简便的其他探测器类型, 有可能增大探测器数量, 缩短采集时间。早期 Kawasaki 等^[10]的实验中使用了 20 个 NaI 探测器。1995 年, 匈牙利的 Levai 等^[55]提出了多个室温小 CdZnTe 探测器与单个 HPGe 探测器相配合的方案, 并进行了模拟实验。1997 年, LANL 的 Estep 等使用 120 个 NaI 探测器实现 TCT 测量, 通过提出基于全能谱的材料基集 (Material Basis Set, MBS) 方法, 获得了较 HPGe 探测器更高的准确性^[54, 56]。1999 年, Coutant 等^[49]使用 22 个 BGO 探测器进行了 TCT 实验。

探测器的准直器可选用 Pb、W 等材料, 准直孔的截面形状主要有圆形、方形、菱形和六边形等^[6-7, 19, 41]。LLNL 与 BIR 公司的 WIT 系统在准直器中增加隔板, 以改善探测器响应的空间不均匀性^[6]。LANL 与 Canberra 公司的 SGS/TGS 一体化系统采用 6 片交叉放置和可开合的 W 准直层, 能够根据被测对象的放射性和密度等调节准直孔径, 并对高放射性对象使用 Pb 吸收器进行衰减, 以防止探测器的饱和, 提高测量的动态范围^[19-20, 22, 43]。

根据放射性废物桶检测的需求, 探测器的电子学部分应能够适应较宽的放射性活度动态范围, 并具有大量、高速的数据传输能力^[19, 43]。

1.2.3 机械系统

由于多数系统采用单探测器平行束扫描方式, 机械系统需要具有空间三个方向的平动自由度及水平面内的旋转自由度^[7, 43]。此外, 多数商用系统还能够实现自动的废物桶加载和卸载^[6, 43]。

γ 射线 CT 检测系统常与垂直分段式测量的系统结合设计。LANL 与 Canberra 公司的 SGS/TGS 一体化系统通过调节准直孔径与探测器距离, 可对不同表面剂量和重量的被测对象分别选用 TGS 或 SGS 测量模式及相关测量参数^[19, 22]。LLNL 与 BIR 公司的 WIT 系统则首先对被测对象进行快速的分段式测量, 以确定其核素种类、填充高度和活度的大致分布等, 进而调整 CT 测量的分辨率和时间等参数^[6, 17, 46]。

此外, 系统设计中也可综合中子检测、X 射线成像以及 X 射线荧光分析等技术, 更全面地反映和融合被测对象的多方面信息^[6, 35-36, 57]。

1.3 主要性能指标及其影响因素

γ 射线 CT 检测技术可测量 10~100 L 量级的罐装或桶装核废物, 对于常见的标准 200 L 或 208 L 核废物桶, 可测量的放射性活度动态范围约为 0.1 μ Ci~100 mCi 量级, 超铀元素质量约为 0.1~100 g 量级^[3, 6-7, 18, 41, 43]。其主要性能指标包括空间分辨率、灵敏度、测量时间、测量不确定度和信噪比等^[1, 6, 43-44]。

探测器与准直器的几何参数, 如探测器与被测对象的距离, 准直器孔径、高宽比及截面形状等, 均直接影响系统的空间分辨率、灵敏度与测量统计性。一般来说, 准直器孔径越小、高宽比越大, 空间分辨率越高, 而探测效率越低, 测量的灵敏度与信噪比越差。

1994 年, Estep^[58]的研究表明, 当准直器长度或高宽比一定时, 探测效率分别正比于体素尺寸的 4 次方和 2 次方。1995 年, Keto 等^[59]研究认为, 对于点源和大型均匀源, 测量的信噪比分别与空间分辨率的 2.5 次方和 3.5 次方成正比。在放射性废物桶的检测中, 测量统计性与空间分辨率相比, 往往更显著地影响活度的检出和定量。另一方面, 统计性与测量时间直接相关, 而空间分辨率的提高除导致统计性的迅速下降外, 还会增大所需的采样点数, 使测量及重建时间显著增加^[50, 58-59]。1995 年, Keto 等^[59]提出准直器的高宽比选取以 5:1~10:1 为宜。2007 年, Kane 等^[50]指出, 当准直孔径与体素尺寸相近时, 系统在空间分辨率与灵敏度等方面的综合性能最好。实际测量中, 通常选取约 2~7 cm 的准直器孔径和 2.5:1~10:1 的高宽比^[6-7, 19, 34, 43-44]。对于标准 200L 或 208L 放射性废物桶, 断层图像像素数一般为 $10 \times 10 \sim 100 \times 100$ 量级, 层数通常为 10~20 层^[6, 12, 19, 44, 49]。此外, 1994 年, Estep 等研究了探测器空间响应均匀性的影响因素, 通过计算和比较不同准直孔截面形状下垂直方向的探测效率变化, 指出使用菱形或六边形准直孔可以获得近似均匀的垂直方向响应; 而通过在连续运动中采样, 则可使水平方向响应更为平滑, 同时节约采样的时间^[7, 58]。

测量统计性及相应的测量时间不仅与探测效率相关, 还受到被测对象的填充高度、活度水平与介质密度等的影响。根据不同的被测对象特点和系统设计参数, 测量时间为数十分钟至数十小时不等^[6-7, 14, 19]。

测量不确定度由系统不确定度和随机不确定度构成^[60], 反映了系统的准确性和精密度。测量不确定度的主要来源包括放射源活度和衰减介质分布的非均匀性, 计数统计性, 以及重建算法或校正、刻度方法等引入的误差等。此外, 机械运动的不一致性、部分容积效应、自衰减效应和低质量偏移等也可能导致不确定度的产生^[23, 60]。1994 年, Estep 等^[7]研究了最极端非均匀的单点源情形下, 源的不同径向和轴向位置对活度重建结果的影响。2004 年, Croft 等^[60]的研究表明, 随着点源位置由被测对象中心向边缘的变化, 重建活度呈现由低到高的径向偏差。此外, LLNL 与 LANL 等均通过大量实验研究了其系统在不同衰减介质密度及分布条件下的适用性^[6-7]。对于统计误差导致的不确定性, 一般可使用基于 Poisson 模型的 Monte-Carlo 随机化 (Monte-Carlo Randomization, MCR) 方法进行模拟估计^[19, 21-22, 61]。

2 关键技术及方法

γ 射线 CT 放射性废物桶检测的关键技术包括放射性活度图像的重建和校正方法, 以及谱分析技术等。

2.1 放射性活度图像重建算法

由于投影数较少, 放射性活度图像重建一般采用迭代方法。早期的一些研究中使用非负约束的最小平方法 (Non-negative Least Squares, NNLS) 或代数重建算法 (Algebraic Reconstruction Technique, ART) 等^[1, 10, 53]。考虑到投影数据往往具有较低的统计性和信噪比, 目前的重建中普遍采用统计迭代算法, 以期望最大化 (Expectation Maximization, EM) 算法最为常见^[6-7, 30, 34, 58], 此外也使用最大熵 (Maximum Entropy, ME)^[31, 45]算法等。一些工作中使用 NNLS 等重建的结果作为 EM 迭代的初值^[19, 22]。1998 年, Chang 等^[62]比较了非负约束的共轭梯度法 (Conjugate Gradient, CG) 与极大似然期望最大化法 (Maximum

Likelihood Expectation Maximization, MLEM) 重建的准确性与噪声条件下的置信水平。同年, Burr 等^[63] 比较了加权最小平方 (Weighted Least Squares, WLS)、MLEM、基于 Bayesian 图像先验假设的岭回归 (Ridge Regression, RR)、基于邻域空间相关性的马尔可夫链蒙特卡罗 (Markov Chain Monte-Carlo, MCMC) 以及变量误差 (Errors-in-variable, EIV) 等算法的重建质量, 认为 MLEM 与 MCMC 算法的效果最佳。1999 年, Thierry 等^[41] 针对 MLEM 算法收敛较慢, 且在迭代次数增加时病态性增强的问题, 在重建中应用了基于 Poisson 或 Gauss 统计模型的最大后验概率 (Maximum A Posteriori, MAP) 方法。二者分别利用基于迟一步 (One Step Late, OSL) 思想的 EM 迭代与 ARTUR 松弛算法求解, 重建结果表明 MAP-EM-OSL 算法在区分多个放射源方面具有良好特性, ARTUR 算法则具有更快的收敛速度。2003 年, Thierry 等^[64] 针对 HPGe 探测器探测效率较低的问题, 在基于 Poisson 分布模型和半二次正则化方法的 MAP-EM 算法中, 引入基于衰减系数重建图像的若干先验约束, 包括放射性活度分布区域、基于梯度和边界提取的局部平滑函数等。该算法能够在数据统计性不足或降采样条件下, 获得较好的边缘增强特性和较低的重建误差, 从而缩短可能的测量时间。2012 年, Liu 等^[65] 利用全变分 (Total Variation, TV) 约束的 ART 算法进行图像重建, 与 MLEM 算法相比, 前者在保持图像质量的前提下有效提高了收敛速度, 缩短了重建时间。2013 年, 顾卫国等^[32] 针对废物桶内放射性核素非均匀分布的特点, 提出了自适应的动网格加密方法, 对活度较大的点源附近区域进行网格加密, 有效减少了重建误差。

对于低活度或高密度的被测对象, 由于测量能谱的信噪比较低, 重建算法中的非负约束易导致活度重建结果的正向偏移, 即低质量偏移问题。1995 年, Prettyman 等^[53] 提出对感兴趣能窗内的总计数和康普顿本底计数分别进行 Poisson 统计描述和 EM 求解的方法, 能够避免康普顿本底减除产生的负测量值, 抑制重建图像的偏差。1997 年, Goodman^[66] 和 Jackson 等^[67] 同样对能谱总计数和康普顿本底计数分别以 Poisson 分布估计, 并采用约束的共轭梯度法 (Constrained Conjugate Gradient, CCG) 求解。2001 年, Estep 等^[68] 提出以全部投影的总计数作为校正因子, 以改善低质量偏移问题。

2.2 放射性活度图像重建校正方法

由公式 (4) 可知, 探测器的效率响应与介质材料的衰减效应均直接影响测量的结果。此外, 散射效应、团块状放射源的自衰减效应等也可能对测量结果产生影响^[41, 52]。因此, 在放射性活度图像的重建中, 需要分别采用不同的技术对上述各类因素进行校正。

由于活度图像重建普遍采用迭代方法, 系统矩阵模型的准确性对重建结果影响显著。大量研究工作均在系统矩阵模型中分别描述探测器的几何响应和衰减效应, 从而通过迭代重建同步校正此二种效应的影响。LLNL 的 USCF 或 APCT 模型基于多射线积分思想, 分别对各射线或射线束的探测器响应与衰减效应进行描述^[40, 59, 67]。LANL 的系统模型在描述探测器几何响应和衰减效应的基础上, 采用了三角形函数权重的像素模型^[69]。2010 年, 刘诚等^[30] 针对极坐标体素划分方式, 建立了相应的探测器响应及衰减效应模型。

2.2.1 几何校正

探测器几何响应的描述方法, 主要包括探测器对放射源的立体张角估算、多射线积分以及模拟实验等类型。LANL 的模型中以探测器对放射源的立体张角表征其几何响应^[69]。1999 年, Thierry 等^[41] 推导了方形准直孔情形下立体张角的近似函数表示, 并采用体积权

重,改善了放射源的定位与定量效果。2012年,Liu等^[70]推导了圆形准直孔情形下探测器对放射源的立体张角与其相对位置的函数关系式。LLNL使用的USCF或APCT模型则基于多射线积分方法,USCF模型在探测器视野内均匀选取多条射线,分别描述其径迹及衰减情形,以反映相应探测位置下各图像体素对投影的贡献;APCT模型对USCF模型进行改进,将探测器视野均匀划分为多条射线束,并以与图像体素相应的各段射线束的体积作为权重^[40, 59, 67]。

2.2.2 衰减校正

衰减校正的基本方法包括平均密度法、能谱峰差异分析法和衰减系数图像法等^[43],以利用衰减系数图像进行校正的方法最为常见。衰减系数图像一般通过TCT测量及重建获得。

衰减系数图像的重建通常使用滤波反投影(Filtered Back-projection, FBP)^[1, 6, 49, 59, 71]或ART^[7, 19, 22, 30, 49]算法,其中,FBP算法一般需要相对较高的采样数和空间分辨率。一些研究中也使用K-T条件等约束的最小平方法^[10, 58]。由于TCT测量中,探测器的尺寸及其效率响应的非均匀性等因素,2003年,张全虎等^[26, 72]提出了径向基函数神经网络算法,以及基于径迹长度等效的平均径迹长度与Monte-Carlo统计迭代算法^[26, 73]。2008年,翁文庆等^[27]结合数值分析方法对Monte-Carlo统计迭代算法进行了改进。

利用衰减系数图像进行衰减校正时,由于放射性废物桶检测中衰减介质种类及分布的多样性,常见于医学ECT应用的预处理或后处理衰减校正方法的适用性较弱。因而,通常在系统矩阵模型中描述并计算与衰减系数图像相关的衰减效应因子,并通过迭代重建实现衰减校正^[40-41]。对于某一系统矩阵元素相应的体素和探测器位置,一般可沿该体素中心至探测器前端面中心的直线,近似计算其衰减效应^[7]。2012年,周志波等^[33]提出将体素和探测器分别等效为点源或点探测器阵列,以体素内各点源至各点探测器的直线上衰减效应的平均值作为相应探测位置下的衰减效应因子,提高了计算的精确程度。

为更准确校正被测放射源的衰减效应,通常需要获取多个能量下的衰减系数图像,并将其映射为待校正的放射源能量下的衰减图像^[28, 30, 48]。常用的方法包括材料基集(Material Basis Set, MBS)法和有效原子序数法等。MBS法假定衰减介质可分解为一系列基材料的线性组合,通过对各能量下的衰减系数进行拟合,求解介质中基材料的组成比例,进而获得待校正能量下的衰减系数。该方法适用于高、低原子序数介质混合的被测对象,一般将被测介质分解为一种高原子序数材料与一种低原子序数材料的组合^[19, 22, 45, 49]。1997年,由于使用NaI探测器进行TCT测量时,衰减介质的散射等易导致较大的能谱形状变化和能量峰计数误差,Estep等^[54]和Sullivan等^[56]提出了基于全能谱的材料基集法,将实验获取的各基材料下的参考能谱作为线性分解的基,对测量的全能谱数据进行拟合。与使用HPGe探测器测得的能量峰净计数相比,该方法能够获得更准确的衰减系数图像。1998年,Estep等^[47]又进一步验证了该方法对HPGe探测器应用的可行性。有效原子序数法分别描述了导致射线衰减的光电效应和康普顿效应与射线能量及介质材料的关系,并通过拟合求解介质的有效原子序数和电子密度,进而获得其在待校正能量下的衰减系数。该方法能够应用于TCT测量数据均在较高能量下获得等不适用MBS法的情形^[21, 45]。

2.2.3 散射校正

散射效应是各种CT测量均需要解决的问题。在放射性废物桶检测方面,目前尚无用于散射效应估计的公认方法。1997年,Sullivan等^[56]根据Nishina散射角分布公式估计经一

次散射后入射探测器的光子, 并认为经多次散射后被探测的光子满足近似随机的分布。1999 年, Thierry 等^[41]提出测量能谱中的康普顿坪应符合近似的 Galton 形式, 并通过能对能谱中散射成分的估计, 实现散射效应的补偿。

2.2.4 自衰减校正

自衰减效应来源于约 1 mm~1 cm 大小的团块状 U、Pu 等高原子序数核素。由于放射源自身密度较大, 其衰减效应对活度测量结果的影响不可忽略, 而其尺寸远小于 TCT 测量的空间分辨率, 无法利用获取衰减系数图像的方法进行衰减校正^[7, 34, 52, 74]。自衰减效应与射线能量、源核素成分以及团块尺寸等有关^[52]。U、Pu 及其他超铀核素的重建活度常以标准活度下的质量表示^[6], 未经自衰减校正的核素活度称为其表观质量。2001 年, Anh 等^[75]通过数值模拟方法研究了团块的尺寸、形状, 其在体素中的位置, 以及体素大小、介质密度等对表观质量的影响。除影响自衰减效应的因素外, 表观质量也与衰减校正的准确性相关^[74]。

自衰减校正的基本思想是利用自衰减效应随射线能量的变化关系, 根据核素的不同能量射线经自衰减后的强度差异, 推定未经自衰减的核素活度。其实现方法主要包括公式拟合法、无限能量外推法、特殊模型法及查找表法等^[74, 76]。

公式拟合法使用包含核素实质量等未知参数的经验公式描述表观质量与能量的关系, 并通过拟合求解实质量。常用的 Fleissner 公式含有 4 个未知参数, 需要多个能量峰的数据才可求解。为扩大其适用的核素范围, 可根据被测对象将其中 1~2 个参数取确定值。该公式主要应用于被测核素在不同能量下的表观质量比小于 2.5 的情形^[74]。根据棒状、球状、圆柱状放射源的自衰减效应表达式^[77], 2008 年, Croft 等^[74]提出了对简单团块形状的通用公式。该公式在弱衰减效应下近似线性, 在强衰减效应下则近似于反比例函数, 其求解仅需要 2 个能量峰的计数。

无限能量外推法认为表观质量可表示为能量倒数的函数, 通过对表观质量与相应能量的倒数进行曲线拟合与外推, 得到能量无限大处的表观质量, 即为核素的实质量。该方法一般采用幂函数或样条函数等作为拟合函数, 其实现简便, 对不同类型被测对象的独立性较好, 并可适用于 Fleissner 公式等的拟合不收敛的情形^[52, 74]。

特殊模型法将待校正核素的分布近似描述为球状团块与分散状态的组合, 其自衰减效应主要与球状团块的比例、球体直径及射线能量等有关。由于自衰减效应对于团块形状相对不敏感, 形状随机的小团块在旋转观测中可近似为球体, 故该模型能够有效反映被测核素的分布特征。该方法一般含有 3 个未知参数, 主要适用于不同能量下待校正核素的表观质量比小于 2 的情形^[40, 74, 78-79]。

查找表法利用数值模拟等方法建立不同射线能量、核素状态、团块形状等参数下的自衰减因子数据库, 通过插值方法获得待校正核素的实质量。该方法应用简便, 并可适用于不同特征的测量对象^[74]。

对于 U 核素的自衰减校正, 由于其特征射线的能量较低, 且能量峰相近, 上述自衰减校正方法的适用性较弱。一般可将 U 核素的特征射线自衰减产生的 X 射线荧光亮度, 与其衰变产物的特征 X 射线亮度进行比较, 定性分析自衰减因子的可能范围。由于二者的能量相近, 由衰减效应导致的亮度变化可以忽略, 故其亮度比即可反映 X 射线荧光的产额, 进而估计自衰减因子的大小。该方法主要适用于团块尺寸较小的情形^[18, 74]。此外, 2008 年, Croft 等^[74]提出利用能谱分析方法, 将测量能谱在相近能量处的相对效率, 与已知介质模

型的测量能谱相比较, 定性分析被测对象中是否有团块状核素的存在。

2.2.5 探测效率刻度

探测效率主要由几何探测效率和本征探测效率构成^[80]。几何探测效率一般可使用 2.2.1 节所述的各种模型进行描述和校正, 本征探测效率的刻度则通常需要采用实验方法。

探测器的物理与几何参数一定时, 本征探测效率主要与入射射线的能量及入射位置、方向等有关, 而以射线能量的影响最为显著。一般通过测量不同能量下本征探测效率的变化曲线, 采用插值方法获得待刻度能量下的本征效率^[19, 23, 56, 76]。常用的刻度源主要包括点源或多棒状源等类型。对于点刻度源, 可以测量其在一系列位置下的平均探测效率^[60]。多棒状源则一般按照螺旋面等规律排列, 以模拟均匀分布的大型放射源^[19, 22-23, 50]。

部分研究中利用实验方法或 Monte-Carlo 模拟方法同时刻度探测器的几何与本征探测效率, 获得其总效率响应函数。LLNL 与 BIR 公司的 WIT 系统使用具有多个特征射线能量的 ^{152}Eu 点源, 分别在相对探测器的不同径向位置及距离处进行效率测量, 以刻度在准直器中增加隔板后的总效率响应变化^[6, 17]。Baas 等^[57]、张全虎^[26]与成雨等^[29, 80]通过 Monte-Carlo 模拟计算方法, 分别刻度不同体素及探测器相对位置下的探测效率, 并据此建立系统矩阵模型。成雨等进一步分析和修正了 Monte-Carlo 模拟中探测器的物理模型, 以获得更准确的刻度结果。

2.3 能谱分析

被测对象中放射性核素种类的正确识别, 以及 ECT 与 TCT 重建中各能量峰数据的准确获取, 均要求实现有效的能谱分析^[3]。能谱分析的主要内容包括本底估计、寻峰及峰面积计算等^[40]。

LANL 与 Canberra 公司的 TGS 系统整合了 NDA2000、MGA 等成熟的商业能谱分析软件^[22, 43]。LLNL 与 BIR 公司的 WIT 系统等主要采用最小平方拟合方法进行能量峰相近区域的解析^[6]。

3 结论

γ 射线 CT 检测技术能够对放射性活度及介质非均匀分布的被测对象进行准确的活度定量, 并可提供直观的活度分布图像及实现放射性“热点”的定位, 在放射性废物桶检测中具有广泛的应用前景。其主要局限在于测量时间较长, 对低活度或高密度对象的检测性能受到计数统计性的限制等。

未来的研究中, 可以通过增加探测器数量、与分段式测量技术相结合等方式, 减少测量的时间^[6, 34, 40]。CdZnTe、HgI₂ 等室温探测器的发展, 有可能为增大探测器数目, 或降低系统成本提供有效的途径^[4]。此外, 与 X 射线技术、中子技术等综合测量与数据融合也是该技术未来的发展趋势^[4, 6, 40]。

参考文献

- [1] Martz HE, Azevedo SG, Roberson GP, et al. Considerations for an active and passive scanner to assay nuclear waste drums, UCRL-JC-105265[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1990.
- [2] GB9133-1995, 放射性废物的分类[S].

- [3] Lawrence Livermore National Laboratory. Award-winning system assays radioactive waste with radiation[EB/OL]. (2007-11-8)[2014-3-27]. <https://www.llnl.gov/str/Roberson.html>.
- [4] Prettyman TH, Reilly TD, Miller MC, et al. Advances in nuclear instrumentation for safeguards, LA-UR-96-3757[R]. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [5] Stewart JE, Walton RB, Phillips JR, et al. Measurement and accounting of the minor actinides produced in nuclear power reactors, LA-13054MS, UC-700[R]. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [6] Camp DC, Martz HE, Roberson GP, et al. Nondestructive waste-drum assay for transuranic content by Gamma-ray active and passive computed tomography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002, 495: 69-83.
- [7] Estep RJ, Prettyman TH, Sheppard GA. Tomographic Gamma scanning to assay heterogeneous radioactive waste[J]. Nuclear Science and Engineering, 1994, 118: 145-152.
- [8] Martin R, Jones DF, Parker JL. Gamma-ray measurements with the segmented Gamma scanner, LA-7059-M[R]. Los Alamos Scientific Laboratory, 1977.
- [9] Estep RJ. Assay of heterogeneous radioactive wastes by low-resolution tomographic Gamma scanning[R]. Transactions of American Nuclear Society, 1990, 62(178).
- [10] Kawasaki S, Kondo M, Izumi S, et al. Radioactivity measurement of drum package waste by a computed-tomography technique[J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part A, Applied Radiation and Isotopes, 1990, 41(10/11): 983-987.
- [11] Illerhaus B, Goebbels J, Kettschau A, et al. Non-destructive waste form and package characterization by computerized tomography[C]//Proceedings of Material Research Society Symposium, 1989, 127.
- [12] Eifler P, Merz E, Odoj R. Determination of the nuclide inventory of radioactive waste barrels by using a tomographic method[C]//Proc of International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications, 1994: 8-10.
- [13] Roberson GP, Martz HE, Deckman DJ. Characterization of waste drums using nonintrusive active and passive computed tomography, UCRL-JC-118317[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1994.
- [14] Prettyman TH, Betts SE, Estep RJ, et al. Field experience with a mobile tomographic nondestructive assay system, LA-UR-95-3501[R]. Los Alamos National Laboratory, 1995.
- [15] Taggart DP, Betts SE, Vigil JJ. LANL's mobile nondestructive assay and examination systems for radioactive wastes, LA-UR-96-1272[R]. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [16] Bernardi RT, Martz HE. Nuclear waste drum characterization with 2 MeV X-ray and Gamma-ray tomography[C]//Proceedings of SPIE, X-ray and Ultraviolet Sensors and Applications, 1995, 2519: 140-371.
- [17] Martz HE, Roberson GP, Hollerbach K, et al. Computed tomography of human joints and radioactive waste drums, UCRL-JC-133381[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [18] Hansen JS. Application guide to tomographic Gamma scanning of uranium and plutonium, LA-UR-04-7014[R]. Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [19] Venkataraman R, Villani M, Croft S, et al. An integrated tomographic Gamma scanning system for non-destructive assay of radioactive waste[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 579: 375-379.
- [20] Venkataraman R, Croft S, Villani M, et al. The next generation tomographic Gamma scanner[C]//27th Annual Meeting ESARDA (European Safeguards Research and Development Association) Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, 2005.
- [21] Croft S, Kane SC, Mc Clay P, et al. Extending the dynamic range of the TGS through the use of a dual intensity transmission beam: United States, US 2008/0084960 A1[P]. 2008.
- [22] Mena N, Nakazawa D, Yang H, et al. An integrated waste assay system using tomographic and segmented Gamma scanning for nuclear power plant applications[C]//WM Conference, 2010.
- [23] Nakazawa D, Bronson F, Croft S, et al. The efficiency calibration of non-destructive Gamma assay systems using semi-analytical mathematical approaches[C]//WM Conference, 2010.

- [24] 肖雪夫, 吕峰, 刘大鸣. 蒙特卡罗方法选择 TGS 准直器的最佳形状[J]. 原子能科学技术, 1998, 32(3): 201-207.
Xiao XF, Lu F, Liu DM. Selection of optimum shape of the collimator for TGS using Monte Carlo methods[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1998, 32(3): 201-207.
- [25] 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 图像重构技术[J]. 辐射防护, 2001, 21(1): 1-10.
Xiao XF, Xia YH, Lu F, et al. Tomographic Gamma scanning for nondestructive assay of heterogeneous solid radioactive waste in drum[J]. Radiation Protection, 2001, 21(1): 1-10.
- [26] 张全虎. 层析 γ 扫描(TGS)重建技术的研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003.
Zhang QH. Research on the reconstruction techniques for tomographic Gamma scanning[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003.
- [27] 翁文庆, 王德忠, 张勇, 等. 层析 γ 扫描透射图像重建算法研究[J]. 核技术, 2008, 31(5): 396-400.
Weng WQ, Wang DZ, Zhang Y, et al. Reconstruction algorithm of transmission image in tomographic Gamma scanning[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(5): 396-400.
- [28] 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[J]. 辐射防护, 2008, 28(1): 24-28.
Weng WQ, Wang DZ, Zhang Y, et al. The method of multi-energy Gamma rays to rectify linear attenuation coefficient in image reconstruction of tomographic Gamma scanning[J]. Radiation Protection, 2008, 28(1): 24-28.
- [29] 成雨. 层析 γ 扫描技术效率矩阵刻度模型研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
Cheng Y. Study on the scale model of efficiency matrix of tomographic Gamma scanning[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2008.
- [30] 刘诚, 王德忠, 戚屯锋, 等. 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.
Liu C, Wang DZ, Qi TF, et al. Tomographic Gamma scanning technique for radioactivity detection of nuclear waste drum[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2010, 44(9): 1287-1291.
- [31] 张全虎, 李锋, 惠卫华, 等. 层析 γ 扫描技术研究[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2010, 40(8): 983-991.
Zhang QH, Li F, Hui WH, et al. Research on tomographic Gamma scanning technique[J]. Scientia Sinica: Physics, Mechanics & Astronomy, 2010, 40(8): 983-991.
- [32] 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.
Gu WG, Wang DZ, Liu C, et al. Analysis on reconstruction technique using dynamic grids in tomographic Gamma scanning method for radioactive waste drum[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(4): 505-512.
- [33] 周志波, 隋洪志, 王仲奇. TGS 连续扫描模式下样品自发射数据分析方法研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(2): 151-154.
Zhou ZB, Sui HZ, Wang ZQ. Study on TGS Emission data-analysis under continual scanning mode[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(2): 151-154.
- [34] Estep RJ, Prettyman T, Sheppard G. Tomographic Gamma scanning (TGS) to measure inhomogeneous nuclear material matrices from future fuel cycles, LA-UR-93-1637[R]. Los Alamos National Laboratory, 1993.
- [35] Martz HE, Roberson GP, Azevedo SG, et al. Characterization of waste drums using nonintrusive NDE/NDA methods, UCRL-JC-115724[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1993.
- [36] Roberson GP, Ryon RW, Bull NL. Characterization of mixed waste for sorting and inspection using non-intrusive methods, UCRL-ID-119298[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1994.
- [37] Jacobsson S, Andersson C, Hakansson A, et al. A tomographic method for verification of the integrity of spent nuclear fuel assemblies[J]. Nuclear Technology, 2001, 135(2): 131-145.
- [38] Oleinik SG, Boltenkov VA, Maslov OV. Passive computer γ tomography of nuclear fuel[J]. Atomic Energy, 2005, 98(3): 227-229.

- [39] Dobrin RI, Craciunescu T, Pavelescu M. Candu and triga fuel burn-up determination using axial and tomographic Gamma-scanning[J]. *Romanian Reports in Physics*, 2011, 63(4): 1009-1017.
- [40] Martz HE, Roberson GP, Camp DC, et al. Active and passive computed tomography: Mixed waste focus area final report, UCRL-ID-131695[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1998.
- [41] Thierry R, Pettier J, Desbat L. Simultaneous compensation for attenuation, scatter and detector response for 2D-emission tomography on nuclear waste with reduced data[C]//1st World Congress on Industrial Process Tomography, 1999: 542-551.
- [42] Roberson GP, Martz HE, Decman DJ, et al. Active and passive computed tomography for nondestructive assay, UCRL-JC-132310[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1998.
- [43] Canberra. WM2900 TGS Tomographic Gamma Scanner [EB/OL]. (2014-3-27). http://www.canberra.com/products/waste_safeguard_systems/Gamma-waste-systems.asp.
- [44] Martz HE, Roberson GP, Robert-Coutant C. Quantitative waste assay using Gamma-ray spectrometry and computed tomography[C]//14th Annual European Safeguards Research and Development Association (ESARDA), 1992: 273-280.
- [45] Estep RJ, Prettyman TH, Sheppard GA. Comparison of Attenuation correction methods for TGS and SGS: Do we really need selenium-75, LA-UR-96-2575[R]. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [46] Martz HE, Decman DJ, Roberson GP, et al. Gamma ray scanner systems for nondestructive assay of heterogeneous waste barrels, UCRL-JC-126865[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1997.
- [47] Estep R, Miko D, Melton S, et al. A demonstration of the gross count tomographic Gamma scanner (GC-TGS) method for the nondestructive assay of transuranic waste, LA-UR-98-3248[R]. Los Alamos National Laboratory, 1998.
- [48] Estep RJ, Prettyman TH, Sheppard GA. Reduction of TGS image reconstruction times using separable attenuation coefficient models[C]//Winter Meeting of the American Nuclear Society (ANS), 1995, 73: 208-209.
- [49] Robert-Coutant C, Moulin V, Sauze R. Estimation of the matrix attenuation in heterogeneous radioactive waste drums using dual-energy computed tomography[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, 422: 949-956.
- [50] Kane SC, Croft S, McClay P, et al. Relative performance of a TGS for the assay of drummed waste as function of collimator opening[C]//Proc. of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, 2007: 1-5.
- [51] Croft S, Venkataraman R, Villani MF, et al. Uncertainty in rate loss corrections based on counting a periodic pulser[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2005, 63: 575-582.
- [52] Prettyman TH, Sprinkle JK, Sheppard GA. Performance of an advanced lump correction algorithm for Gamma-ray assays of plutonium, LA-UR-94-2477[R]. Los Alamos National Laboratory, 1994.
- [53] Prettyman TH, Cole RA, Estep RJ, et al. A maximum-likelihood reconstruction algorithm for tomographic Gamma-ray nondestructive assay[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1995, 356: 470-475.
- [54] Estep RJ, Melton S. Using NaI detectors for tomographic Gamma scanning, LA-UR-97-56[R]. Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [55] Lévai F, Nagy Z, Dung TQ. Low resolution combined emission-transmission imaging techniques for matrix characterization and assay of waste[C]//17th Esarda Symposium, 1995: 319-324.
- [56] Rawool-Sullivan MW, Estep RJ, Miko D. Estimation of obliquely scattered Gamma-ray response functions in the gross-count tomographic Gamma scanner (GC-TGS) method[C]//Proc of IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1997: 774-778.
- [57] Baas HW, Blaauw M, Bode P, et al. Collimated scanning towards 3D-INAA of inhomogeneous large samples[J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1999, 363: 753-759.
- [58] Estep RJ. A preliminary design study for improving performance in tomographic assays, LA-12727-MS, UC-700[R]. Los Alamos National Laboratory, 1994.
- [59] Keto E, Azevedo S, Roberson P. Preliminary 2D design study for A&PCT, UCRL-ID-120523[R].

- Lawrence Livermore National Laboratory, 1995.
- [60] Croft S, Venkataraman R, Villani M. On the accuracy of the tomographic Gamma scanner for the assay of drummed waste[C]//WM Conference, 2004.
- [61] Estep RJ, Miko D, Melton S. Monte carlo error estimation applied to nondestructive assay methods, LA-UR-00-2164[R]. Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [62] Chang C, Anghaie S. Iterative reconstruction and statistical optimization for the nondestructive assay of distributed Gamma source in a large nuclear waste container[C]//IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(2): 146-153.
- [63] Burr TL, Mercer DJ, Prettyman TH. Comparison of Bayesian and classical reconstruction of tomographic Gamma scanning for assay of nuclear material, LA-UR-98-2380[R]. Los Alamos National Laboratory, 1998.
- [64] Thierry R, Pettier JL, Eck D. Edge-preserving regularization in emission tomography with transmission CT boundary information: Characterization of waste drums[C]//Nuclear Science Symposium Conference Record, 2003 IEEE. IEEE, 2003, 3: 1738-1742.
- [65] Liu Z, Zhang L, Hao J. Radiation intensity image reconstruction in TGS using ART algorithm with geometrically-corrected system matrix and TV constraint[C]//IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, 2012.
- [66] Goodman D. Maximum likelihood estimation with poisson (Counting) statistics for waste drum inspection, UCRL-ID-127361[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1997.
- [67] Jackson JA, Goodman D, Roberson GP, et al. An active and passive computed tomography algorithm with a constrained conjugate gradient solution, UCRL-JC-130818[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1998.
- [68] Estep RJ, Brandenburg R, Wachter J. Low-mass bias issues in tomographic Gamma scanning (TGS), LA-UR-01-3764[R]. Los Alamos National Laboratory, 2001.
- [69] Prettyman TH, Mercer DJ. Performance of analytical methods for tomographic Gamma scanning, LA-UR-97-1168[R]. Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [70] Liu Z, Zhang L, Jiang XL. A geometrical correction method for radioactive intensity image reconstruction in tomographic Gamma scanning[C]//Proc of SPIE 8506, Developments in X-ray Tomography VIII, 85061L, 2012.
- [71] 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[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(6): 551-555.
- Deng JS, Haruyama M, Takase M, et al. Coupled transmission CT and emission CT monte-carlo simulation assay for radioactive waste drum[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(6): 551-555.
- [72] 张全虎, 张其欣, 吕峰, 等. 基于径向基函数神经网络的线性衰减系数的重建算法[J]. 计算物理, 2003, 20(5): 439-442.
- Zhang QH, Zhang QX, Lu F, et al. Reconstruction algorithm of radial function neural networks for linear attenuation coefficients[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2003, 20(5): 439-442.
- [73] 张全虎, 隋洪志, 吕峰, 等. 层析 γ 扫描透射图像重建方法[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(2): 162-165.
- Zhang QH, Sui HZ, Lu F, et al. Reconstruction methods of transmission image in tomographic Gamma scanning[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(2): 162-165.
- [74] Croft S, McElroy RD, Philips S, et al. A review of recent developments in self-attenuation correction leading to a simple dual energy lump correction model for use in the quantitative Gamma assay of plutonium[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008, 276(3): 677-683.
- [75] Anh TH, Dung TQ. Evaluation of performance of Gamma tomographic technique for correcting lump effect in radioactive waste assay[J]. Annals of Nuclear Energy, 2001, 28: 265-273.
- [76] Curtis D. Advancements in nuclear waste assay[D]. Birmingham: University of Birmingham, 2007.

- [77] Croft S, Curtis D, Wormald MR. The calculation of self attenuation factors for simple bodies in the far field approximation[C]//Proc of the ICEM: The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, 2005.
- [78] Prettyman TH, Foster LA, Estep RJ. Detection and measurement of Gamma-ray self-attenuation in plutonium residues, LA-UR-96-2620[R]. Los Alamos National Laboratory, 1996.
- [79] Prettyman TH, Sprinkle JK, Sheppard GA. A weighted least-squares lump correction algorithm for transmission-corrected Gamma-ray nondestructive assay, LA-UR-93-2632[R]. Los Alamos National Laboratory, 1993.
- [80] 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[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(9): 1471-1473.
Cheng Y, Weng WQ, Bai YF, et al. Analysis and correction of scale model of tomographic Gamma scanning efficiency matrix[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(9): 1471-1473.

Review of γ -ray CT for Radioactive Waste Assay

LIU Zhe^{1✉}, ZHANG Li²

1.China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

2.a).Department of Engineering Physics; b).Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: γ -ray CT is one of the non-destructive technologies increasingly applied for radioactive waste assay in recent years. The radioactive sources in the target objects can be identified, quantified and located by γ -ray CT, offering the bases for further disposal and management of the radioactive waste. In this paper, the application background of γ -ray CT for radioactive waste assay is briefly described, and the mathematical models, system designs of the technology are summarized, as well as its main performance indices and influencing factors. Furthermore, the research developments in key techniques about the algorithms and correction methods for radioactivity image reconstruction are introduced in detail. Finally, an outlook to future developments of the technology is given.

Key words: γ -ray CT; mathematical model; system design; performance index; image reconstruction algorithm; correction method



作者简介: 刘哲[✉] (1986—), 女, 2013 年获得清华大学硕士学位, 目前为中国原子能科学研究院辐射安全研究所研究实习员, 主要从事辐射监测仪器与方法、辐射成像等方面的研究, Tel: 010-69357737, E-mail: liuz04@gmail.com。