

# 层析 $\gamma$ 扫描透射图像重建方法

张全虎, 隋洪志, 吕峰, 李泽, 顾忠茂

(中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413)

**摘要:**研究了层析 $\gamma$ 扫描(TGS)透射图像,并用两种 TGS 线性衰减系数重建方法进行 TGS 透射图像的计算机模拟仿真。结果表明:与国外文献报道的算法相比较,本文采用的两种重建方法的误差小、适应范围广,并能满足实际 TGS 装置的要求。

**关键词:**层析 $\gamma$ 扫描;线性衰减系数;图像重建

中图分类号:O242.2

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2004)02-0162-04

## Reconstruction Methods of Transmission Image in Tomographic Gamma Scanning

ZHANG Quan-hu, SUI Hong-zhi, LU Feng, LI Ze, GU Zhong-mao  
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-48, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The transmission image of tomographic gamma scanning (TGS) is researched, and the linear attenuation coefficient in TGS is simulated by means of two reconstruction methods. Simulating results indicate that the image reconstruction errors are reduced greatly by the reconstruction algorithms, the methods can meet the requirement of TGS device.

**Key words:** tomographic gamma scanning; linear attenuation coefficient; image reconstruction

层析 $\gamma$ 扫描(TGS)是美国 Los Alamos 国家实验室于二十世纪 90 年代初开发的一项用于非均匀放射性废物测量的新技术<sup>[1]</sup>,在原理和测量装置上类似于通常的 CT 技术。测量分为透射测量和发射测量。透射测量时,通过前、后准直器以及对测量对象的三维扫描,将测量对象分为若干个体素,由探测器测得的透射率,通过透射图像重建算法,重建得到介质的线性衰减系数图像。发射测量时,测量得到一放射性强度分布图,然后用由透射测量重建的介质

密度的分布图像对发射测量图像作逐点计算,逐点进行自吸收精细衰减校正,从而大大提高了非均匀样品中放射性含量的分析准确度。可见,线性衰减系数的准确重建是 TGS 技术准确测量非均匀样品放射性含量的基础和关键,因此,线性衰减系数图像重建方法是 TGS 技术的核心。

### 1 TGS 透射测量问题的数学模型

TGS 装置利用探测器的准直器,通过三维

收稿日期:2002-11-25;修回日期:2003-02-28

作者简介:张全虎(1965—),男,山西洪洞人,博士研究生,原子核物理专业

扫描测量,把整个样品划分为若干小立方体(体素),并假定每个体素内介质和放射性活度的分布是均匀的。

TGS 用一个简化的体素模型作为图像重建的基础。Estep 等<sup>[1]</sup>提出的 TGS 透射方程为:

$$V_i = \sum_{j=1}^J T_{ij} \mu_j \quad (1)$$

式中:  $V_i$  表示在第  $i$  个测量位置探测器测得的透射源  $\gamma$  射线透射率的负对数;  $T_{ij}$  是介质线性衰减厚度矩阵  $T$  的矩阵元,表示探测器在第  $i$  个透射测量位置测到的  $\gamma$  射线所经过的第  $j$  个体素的线性衰减厚度;  $\mu_j$  表示第  $j$  个体素的线性衰减系数;  $J$  为体素数。

在 Estep 描述的 TGS 算法中,  $T$  被看作是连接透射源到探测器的直线经过体素的厚度,即把透射源和探测器均视作点,称为点到点的模式。实际上, TGS 装置的透射源和探测器均有一定尺寸,透射源发射的  $\gamma$  射线有一定的角分布,对探测器有一立体张角,而且,透射源位置和探测器位置不同,经过体素的射线分布则随之有异,在这种情况下,采用点到点的数学模式进行 TGS 线性衰减系数图像重建是不符合实际情况的。

本工作从粒子输运方程出发,应用 Monte-Carlo 方法<sup>[2]</sup>得到如下粒子输运 TGS 透射方程:

$$\sum_{j=1}^J \langle t_{ij}(\vec{Q}) \rangle \mu_j = V_i \quad (2)$$

式中:  $t_{ij}(\vec{Q})$  为探测器在第  $i$  个透射测量位置、源粒子沿方向  $\vec{Q}$  经过第  $j$  个体素的径迹长度;  $\langle t_{ij}(\vec{Q}) \rangle$  为探测器在第  $i$  个透射测量位置、按源粒子进入第  $j$  个体素方向分布对  $t_{ij}(\vec{Q})$  的平均。

$t_{ij}(\vec{Q})$  即为体通量,根据体通量不同的计算方法,得到不同的线性衰减系数重建迭代算法。

## 2 迭代算法

由式(2)给出的数学模型,结合 CT 中的迭代重建算法,采用 TGS 线性衰减系数的两种新算法:平均径迹长度迭代算法<sup>[3]</sup>和 Monte-Carlo 统计迭代算法进行迭代计算<sup>[4]</sup>。

### 2.1 平均径迹长度迭代算法

把粒子每次散射后到下次碰撞前在体素内走过的径迹长度(带权)记录下来,这样就可利用径迹长度方法得到平均每个粒子 0 次碰撞贡献(粒子的平均径迹长度)<sup>[5]</sup>:

$$t_{\text{平均}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S_{2n} - S_{1n}) \quad (3)$$

式中:  $S_{1n}$  为源点到射线穿入体素的平面间的距离;  $S_{2n}$  为源点到射线穿出体素的平面间的距离;  $N$  为源粒子数。

平均径迹长度迭代算法为:

$$\sum_{j=1}^J (t_{\text{平均}})_{ij} \mu_j = V_i \quad (4)$$

### 2.2 Monte-Carlo 统计迭代算法

根据穿透率的 Monte-Carlo 统计估计,可得到与 Estep 算法类似的 Monte-Carlo 统计迭代算法为:

$$(t_{\text{统计}})_{ij} = -\frac{1}{\mu_j} \ln \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp(-\mu_j x_{ijn}) \right] \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J (t_{\text{统计}})_{ij} \mu_j = V_i \quad (6)$$

式(5,6)中:  $(t_{\text{统计}})_{ij}$  表示由源发出的  $N$  个粒子在第  $i$  个测量位置处穿过第  $j$  个体素时,等效为一个粒子的径迹长度;  $x_{ijn}$  表示由源发出的第  $n$  条射线在第  $i$  个测量位置处穿过第  $j$  个体素的径迹长度。

## 3 TGS 透射图像重建

### 3.1 图像重建样品模型

样品由 9 个相同大小的体素(边长为 5 cm 的立方体)组成(图 1)。透射源到样品中心的距离为 26.2 cm,探测器中心到样品中心的距离为 43.9 cm。探测器为边长 5.55 cm 的立方体。

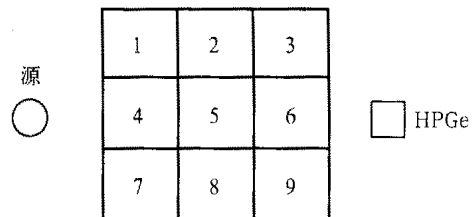


图 1 TGS 透射扫描示意图

Fig. 1 Sketch of transmission TGS scanning

3.2 计算机模拟仿真

由已建立的 TGS 透射测量计算机模拟仿真平台,得到不同预置线性衰减系数的模拟测量值  $V_i$ ,用 3 种线性衰减系数重建方法(点-点重建算法、平均径迹长度迭代算法和 Monte-Carlo 统计迭代算法)得到的重建值以及与预置值的相对偏差列于表 1。

由表 1 可见:算法 1 的相对偏差最大,算法

3 的相对偏差最小,算法 2 的相对偏差介于算法 1 和算法 3 的相对偏差之间。

4 结论

在研究分析文献[1]报道的 TGS 模型线性衰减系数重建算法基础上,用两种新的算法:平均径迹长度迭代算法和 Monte-Carlo 统计迭代算法进行了 TGS 图像重建。计算机模拟仿真

表 1 线性衰减系数的重建值及相对偏差

Table 1 Reconstruction values of linear attenuation coefficient and their relative deviation

| 组数    | 体素 | 预置 $\mu$ 值 | 算法 1      |           | 算法 2      |           | 算法 3      |           |
|-------|----|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|       |    |            | 重建值       | 相对偏差      | 重建值       | 相对偏差      | 重建值       | 相对偏差      |
| 第 1 组 | 1  | 0.060 3    | 0.068 6   | - 0.137 6 | 0.060 3   | 0         | 0.060 3   | 0         |
|       | 2  | 0.143 3    | 0.143 0   | 0.002 1   | 0.142 7   | 0.004 2   | 0.143 3   | 0         |
|       | 3  | 0.143 3    | 0.134 8   | 0.059 3   | 0.143 4   | - 0.000 7 | 0.143 3   | 0         |
|       | 4  | 0.060 3    | 0.060 2   | 0.001 7   | 0.059 8   | 0.008 3   | 0.060 3   | 0         |
|       | 5  | 0.000 1    | - 0.000 7 | 8         | 0.000 2   | - 1       | - 0.000 1 | 2         |
|       | 6  | 0.060 3    | 0.060 3   | 0         | 0.060 1   | 0.003 3   | 0.060 3   | 0         |
|       | 7  | 0.143 3    | 0.134 5   | 0.061 4   | 0.143 4   | - 0.000 7 | 0.143 3   | 0         |
|       | 8  | 0.060 3    | 0.060 6   | - 0.005   | 0.060 2   | 0.001 7   | 0.060 3   | 0         |
|       | 9  | 0.000 1    | 0.007 9   | - 78      | - 0.000 4 | 5         | 0.000 1   | 0         |
| 第 2 组 | 1  | 0.404 1    | 0.390 4   | 0.033 9   | 0.403 9   | 0.000 5   | 0.404 1   | 0         |
|       | 2  | 0.143 3    | 0.157 2   | - 0.097 0 | 0.142 3   | 0.006 9   | 0.143 3   | 0         |
|       | 3  | 0.143 3    | 0.128 7   | 0.101 9   | 0.141 9   | 0.009 8   | 0.143 3   | 0         |
|       | 4  | 0.060 3    | 0.074 4   | - 0.233 8 | 0.058 9   | 0.023 2   | 0.060 3   | 0         |
|       | 5  | 0.404 1    | 0.354 3   | 0.123 2   | 0.399 5   | 0.011 4   | 0.404 1   | 0         |
|       | 6  | 0.060 3    | 0.078 4   | - 0.300 2 | 0.063 4   | - 0.051 4 | 0.060 3   | 0         |
|       | 7  | 0.143 3    | 0.128 5   | 0.103 3   | 0.142 7   | 0.004 2   | 0.143 3   | 0         |
|       | 8  | 0.060 3    | 0.078 6   | - 0.303 5 | 0.062 9   | - 0.043 1 | 0.060 3   | 0         |
|       | 9  | 0.000 1    | - 0.018 1 | 182       | - 0.004 0 | 41        | 0.000 1   | 0         |
| 第 3 组 | 1  | 0.0404 1   | 0.451 9   | - 0.118 3 | 0.454 3   | - 0.124 2 | 0.404 7   | - 0.001 5 |
|       | 2  | 0.636 8    | 0.605 6   | 0.049 0   | 0.598 8   | 0.059 7   | 0.636 5   | 0.000 5   |
|       | 3  | 0.636 8    | 0.598 4   | 0.060 3   | 0.607 0   | 0.046 8   | 0.636 3   | 0.000 8   |
|       | 4  | 0.636 8    | 0.573 6   | 0.099 3   | 0.561 2   | 0.118 7   | 0.635 7   | 0.001 7   |
|       | 5  | 0.404 1    | 0.373 2   | 0.076 5   | 0.399 8   | 0.010 6   | 0.404 1   | 0         |
|       | 6  | 0.060 3    | 0.127 5   | - 1.114 4 | 0.120 1   | - 0.991 7 | 0.061 2   | - 0.014 9 |
|       | 7  | 0.143 3    | 0.136 6   | 0.046 8   | 0.154 0   | - 0.074 7 | 0.143 6   | - 0.002 1 |
|       | 8  | 0.060 3    | 0.095 4   | - 0.582 1 | 0.082 4   | - 0.366 5 | 0.060 4   | - 0.001 7 |
|       | 9  | 0.143 3    | 0.092 4   | 0.355 2   | 0.096 5   | 0.326 6   | 0.142 7   | 0.004 2   |

注:算法 1 为点-点重建算法;算法 2 为平均径迹长度迭代算法;算法 3 为 Monte-Carlo 统计迭代算法



结果表明:两种新算法重建的线性衰减系数图像质量比文献[1]报道的算法均有明显改善,而 Monte-Carlo 统计迭代算法的效果更好。

感谢王仲奇研究员对本工作的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Estep RJ, Prettyman TH, Sheppard GA. Tomographic Gamma Scanning to Assay Heterogeneous Radioactive Waste [J]. Nucl Sci Eng, 1994, (118):145~152.
- [2] 裴鹿成,张孝泽.蒙特卡罗方法在粒子输运中的应用[M].北京:科学出版社,1980.175~179.
- [3] 肖雪夫.放射性废物无损测量中 TGS 图像重构技术的若干问题研究[D].北京:中国原子能科学研究院保健物理部,2001.
- [4] 张全虎,吕峰,隋洪志,等. Monte-Carlo 统计迭代图像重建算法[J].原子能科学技术,2003,37(6):555~557.
- [5] 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,1996.73~74.

## 应用中子和同步辐射衍射的残余应力分析

### Analysis of Residual Stress by Diffraction Using Neutron and Synchrotron Radiation

著者:M. E. Fitzpatrick。2003 年 Taylor & Francis 出版社出版。

残余应力是许多工业部门中存在的问题,它可导致元件的早期失效。因此,了解元件中的残余应力状况对于表面工程流程的质量控制以及准确评估疲劳负荷下的元件寿命均是至关重要的。

中子与同步 X 射线衍射法在进行应力分析的主要技术方法。本书介绍了这两种方法的原理及其在材料和工程问题上的广泛应用。书中的 20 篇论文均由残余应力分析领域中的国际一流专家撰写,内容涵盖了应用衍射方法的应力分析的理论基础、实际操作和重要的应用实例,其中包括焊件、复合材料及陶瓷中内应力的测定。书中还讨论了对结构样品的测量问题。

全书分 5 部分,内容如下:1) 中子与同步辐射在材料研究中的一般应用,包括中子用于材料表征和同步辐射用于材料研究 2 篇文章;2) 应用衍射进行残余应力测定的方法和问题,包括宏应力的表征、测量应变产生的残余应力的计算以及点阵应变响应的各向异性等 5 篇文章;3) 测量技术,包括应用恒定波长的中子衍射和同步 X 射线辐射用于应力测量等 4 篇文章;4) 研究范围,包括应用同步加速器 X 射线衍射的应力梯度研究和应用中子衍射的近表面应力测量等 3 篇文章;5) 应用,包括复合材料、焊件中的中子残余应力测量、陶瓷材料中的残余应力等 6 篇文章。

摘自中国原子能科学研究院《科技信息》