

# 同步辐射 X 射线衍射增强 CT 方法研究\*

汪 敏<sup>1</sup> 胡小方<sup>1,\*\*</sup> 伍小平<sup>1</sup> 袁清习<sup>2</sup> 黄万霞<sup>2</sup> 朱佩平<sup>2</sup>

(1 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 合肥 230026)

(2 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

**摘 要** 本文将同步辐射硬 X 射线衍射增强成像方法应用于材料无损检测 CT 方法中(简称衍射增强 CT 法), 并对自制样品进行投影成像重建, 获得了非常清晰的样品内部结构图像, 并与样品的单晶吸收成像 CT 重建结果进行对比. 结果表明, 对于吸收系数相近的结构材料, 衍射增强 CT 法可得到更好的物质内部边界.

**关键词** 衍射增强成像; 同步辐射; CT

**中图分类号** O348.6 **文献标识码** A

## 0 引言

计算机层析法是一种应用广泛的无损检测方法<sup>[1]</sup>, 与成像结合起来就可以实现物体内部结构的重建. 常规的同步辐射 X 射线计算机断层成像方法, 是指同步辐射 X 射线经过单色器晶体后对物体进行吸收成像, 即吸收成像 CT 法, 这种方法目前有着广泛的应用<sup>[2,3]</sup>. 这种成像方法对于体内元素吸收系数差别大的物体优势很明显, 当物体内的元素对 X 射线的吸收系数数值相差不大时, 这种方法重建的结果很难区分出这些吸收系数相近的元素. 在实际应用中, 有多种复合材料, 其内部含有的材料组份元素对 X 射线的吸收系数较为接近, 而又需要了解这些材料组份的分布情况, 这时常规同步辐射吸收成像 CT 法将不能满足要求. 为此, 有必要探讨新的方法来实现这一目标.

近年来, 应用成像方法检测材料的信息已越来越被广泛使用<sup>[4]</sup>, 并且不断有新的成像方法出现<sup>[5]</sup>. 衍射增强方法是硬 X 射线相位衬度成像方法中近年来发展较快的一个研究领域<sup>[6-8]</sup>. 上个世纪 90 年代初, 衍射增强实验方法就开始用于非晶样品, 到 1995 年已经获得了较好的成像质量. 由于衍射增强可以提高物质边界的分辨率, 为此本文将衍射增强成像法与 CT 相结合(简称衍射增强 CT 法), 以用于体内元素吸收系数相近物体的内部结构重建分析. 简述了衍射增强 CT 方法, 并对衍射增强 CT 法与吸收成像 CT 法的实验结果进行比较.

## 1 衍射增强 CT 方法原理

### 1.1 衍射增强成像原理

文献[6,7]对衍射增强成像原理作了详尽描述.

通过单色器产生一个特定能量的准平面波穿过样品, 样品中折射率的变化将对平面波的波前产生扰动, 使波前的相位发生改变, 进而使得从样品出射的光束偏离初始方向. 光束偏离初始方向的角度为<sup>[6]</sup>

$$\Delta\alpha \approx \frac{1}{k} \frac{\partial\varphi(x)}{\partial x} \quad (1)$$

式中  $\Delta\alpha$  为光束偏离初始方向的角度,  $k$  为波数,  $\varphi(x)$  为 X 射线在  $x$  方向上的位相改变. 由式(1)可见, 波前的位相梯度相当于光束传播方向的改变. 这些方向发生改变的 X 射线携带着样品内部结构的信息, 这些信息经分析晶体放大后记录下来, 从而在图像中形成衬度.

分析晶体通常采用布拉格几何排列方式, 起角度过滤器的作用. 分析晶体接受角范围约为几个  $\mu\text{rad}$ , 超出接受角范围的 X 射线将被过滤. 这样穿过样品时发生的非相干散射以及小角散射中的大多数 X 射线被消除. 正是由于小角散射的消除, 提高了透射光强度损失的灵敏度, 这种现象称之为二次消光, 由此产生增强的衬度称为消光衬度. 进入分析晶体接受角范围内的 X 射线将被反射, 而反射强度依赖于入射角, 这种关系称为摇摆曲线<sup>[7]</sup>, 如图 1.

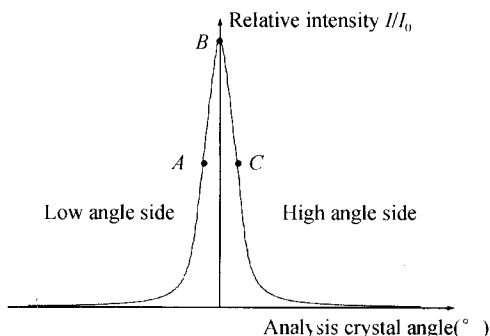


图 1 分析晶体的摇摆曲线

Fig. 1 The rocking curve of analysis crystal

当分析晶体放置在摇摆曲线的峰位, 即分析晶体的接受角与单色器晶体的出射角重合时, 其成像结果类似于常规(单晶)X 射线照片, 但是由于滤掉了散射光而显现出增强的衬度, 称之为表观吸收像.

\*国家自然科学基金重点项目(10232030)、面上项目(10472113)与 BSRF 共同资助

\*\* Tel: 0551-3601248 Email: huxf@ustc.edu.cn

收稿日期: 2005-06-28

表现吸收像不同于常规吸收像,常规吸收像中,小角散射的 X 射线无法从透射光中分离出来而出现在图像中,造成常规吸收像中没有消光衬度. 消光衬度的出现使得表现吸收像有比常规吸收像大得多的衬度. 当分析晶体放在摇摆曲线的一侧,即分析晶体的接受角偏离单色器晶体的出射角时,X 射线穿过样品时产生的微小折射将改变其经分析晶体衍射的强度,从而产生折射衬度. 摇摆曲线陡峭的斜坡扮演了衬度放大器的角色,斜坡越陡峭,由折射引起的光强改变越大,则相应的折射衬度越大<sup>[6,7]</sup>. 而摇摆曲线的两侧半高宽处的点为最陡峭的点,本文在这两点处以及摇摆曲线的峰位处都进行了实验研究.

### 1.2 CT 原理

CT 的基本思想如下,首先应用 X 射线对物体在不同的角度进行投影成像,获得一系列投影像后,由式(2)得到不同角度投影像中各条射线的投影数据<sup>[9]</sup>

$$p_{\phi}(x_r) = \int_L u(x, y) dl = \ln(\bar{I}_{\phi}(x_r) / I_{\phi}(x_r)) \quad (2)$$

式中  $\phi$  为射线的投影角,  $x_r$  为投影射线的坐标,  $u$  为元素对 X 射线的线性吸收系数,  $L$  为投影射线在物体中经过的路径,  $\bar{I}$ 、 $I$  分别为 X 射线在入射物体前

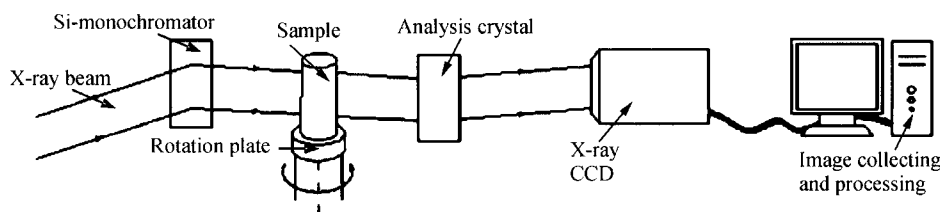


图 2 衍射增强 CT 实验装置  
Fig. 2 Schematic diagram of diffraction-enhanced computed-tomography

处理运算,进而得到样品内部微结构的重建图像<sup>[3]</sup>.

本次实验分别采用了衍射增强 CT 法和吸收成像 CT 法,以进行两种方法的比较. 吸收成像 CT 法仅在图 2 中除去分析晶体即可.

## 2 实验

### 2.1 样品说明

实验样品为直径  $d=4$  mm 的圆柱状有机玻璃,见图 3. 在该样品上加工了 4 个直径  $d=0.8$  mm 的

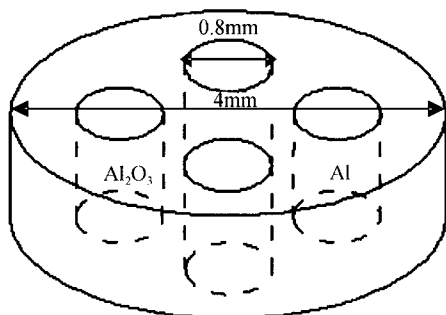


图 3 样品示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the sample

与后的光强. 计算出全部投影数据后,可由不同算法计算出  $u(x, y)$  值,典型算法有迭代算法及滤波反投影算法<sup>[9]</sup>. 由于本文采用的滤波反投影算法进行重建运算,因此这里介绍一下滤波反投影算法求解  $u(x, y)$  的过程<sup>[9]</sup>

$$u(r, \theta) = \int_0^{\pi} h(x_r) * p(x_r, \phi) |_{x_r = r \cos(\theta - \phi)} d\phi \quad (3)$$

式中  $h(x_r)$  为滤波函数,  $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$ . 因此当选好滤波函数  $h(x_r)$  后,可由式(3)求出物体内任一点  $(x, y)$  的  $u$  值. 对于特定能量的 X 射线,各元素的线性吸收系数  $u$  值是固定的,因此由  $u$  值可知物体内部各层所含的元素及所含元素的分布情况. 由于在获取物体内部信息时未给物体造成损伤,所以 CT 是一种无损检测方法.

### 1.3 双晶衍射增强 CT 成像法

双晶衍射增强 CT 成像系统如图 2. 系统由光源、单色器(Si(111)单晶)、样品、分析晶体(Si(111)单晶)、X 射线 CCD 以及图像存储设备组成<sup>[6,7]</sup>,通过旋转样品在不同角度下进行成像,获得样品一系列不同角度的投影像,采用 CT 算法对投影像进行

处理运算,进而得到样品内部微结构的重建图像<sup>[3]</sup>. 本次实验分别采用了衍射增强 CT 法和吸收成像 CT 法,以进行两种方法的比较. 吸收成像 CT 法仅在图 2 中除去分析晶体即可.

### 2.2 实验过程及图像处理

实验是在北京同步辐射实验室 4W1A 光束线上进行的, X 射线能量范围为 3~22 keV,单色光斑尺寸为 6 mm×4 mm,本次实验选用的 X 射线能量为 14 keV. 实验共进行了吸收成像和衍射增强成像. 衍射增强成像时,对分析晶体置于摇摆曲线的三个不同位置分别成像,其位置分别为摇摆曲线左侧半高处(A)、摇摆曲线峰位处(B)以及摇摆曲线右侧半高处(C),其具体位置参见图 1. 实验时,对样品每旋转 0.2° 投影一次,即投影间隔  $\Delta\phi = 0.2^\circ$ ,投影数  $N_{\phi} = 900$ . 投影像采用 X 射线 CCD 进行采集,其像素分辨率为 10.9  $\mu\text{m}$ ,灰度分辨率为 8 bits,曝

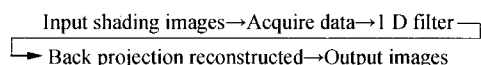


图 4 滤波反投影算法流程图  
Fig. 4 Flow chart of reconstruction algorithm

光时间为 200 ms. 上述四种不同成像方法的投影像采集后,均采用相同的滤波反投影算法进行重建运算,得到样品不同成像方法的重建图像. 滤波反投影算法重建过程如图 4<sup>[2,3]</sup>.

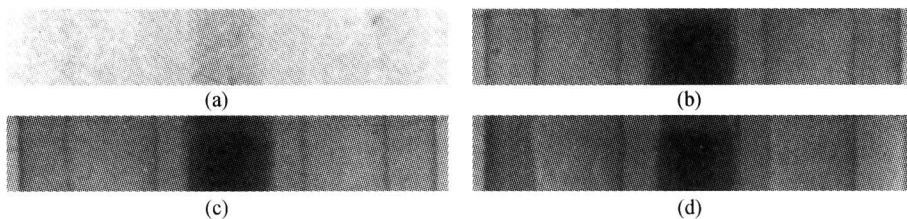


图 5 样品在 0°时四种成像方法的投影像  
Fig. 5 The shading image of the sample in four imaging methods at 0° visual angle

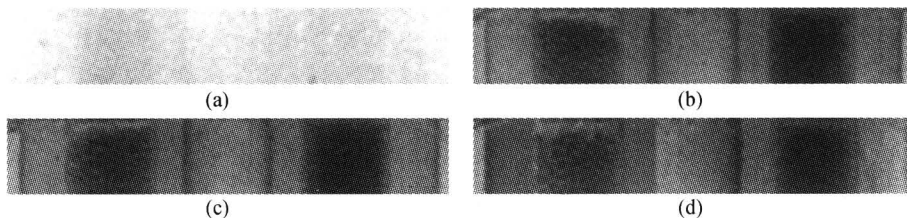


图 6 样品在 90°时四种成像方法的投影像  
Fig. 6 The shading image of the sample in four imaging methods at 90° visual angle

收成像方法的投影图, (b)、(c)、(d)分别为分析晶体置于摇摆曲线 A、B、C 点处时衍射增强成像方法的投影图, 摇摆曲线见图 1.

由图 5、6 中的 (a) 图可见, 由于有机玻璃对 14 keV 的 X 射线吸收非常少, 所以采用单晶吸收成像时, 有机玻璃边界无法分辨, 并且对于吸收较大的 Al 粉及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉, 其边界也不是很清晰. 由图 5、6 中的 (b)、(c)、(d) 知, 采用衍射增强成像时, 有机玻璃、

### 3 实验结果及分析

图 5、图 6 分别给出了四种方法对样品在两个不同角度进行成像的投影图. 图 5、6 中的 (a) 为吸

Al 粉及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉的边界都很清晰. 由这些图像可知, 当分析晶体处在摇摆曲线 A、B、C 三个不同位置时, 其成像结果差别不明显.

图 7 为四种成像方法获得的投影像进行 CT 重建的结果, 图中所示图片为样品中间层的横截面图. 其中 (a) 为单晶吸收成像的 CT 重建图, (b)、(c)、(d) 为分析晶体置于摇摆曲线 A、B、C 点时衍射增强成像方法的 CT 重建图.

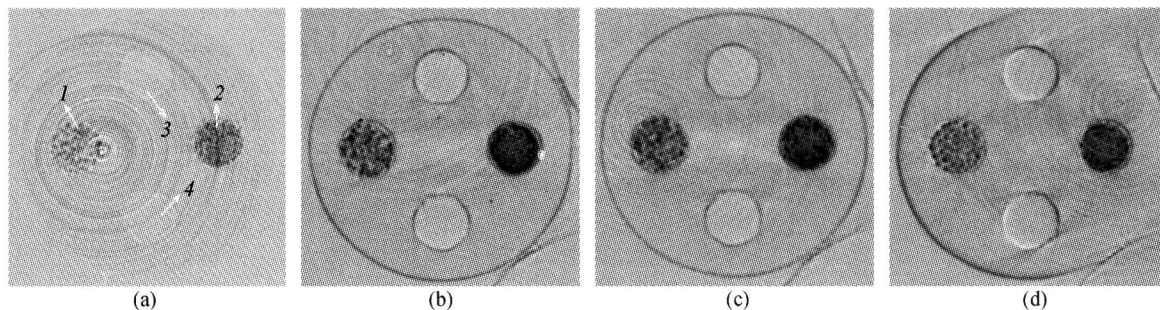


图 7 样品四种成像方法的 CT 重建横截面图  
Fig. 7 The reconstruction cross-section image of the sample in four imaging methods

图 7(a) 中 1 为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉, 2 为 Al 粉, 3、4 为空气, 图中一圈圈细圆形的条纹为重建图像伪迹, 由光源的不均匀性及滤波反投影算法形成. 由图 7 可知, 吸收成像 CT 法重建的结果无法分辨出样品的外边界, 内孔边界也不明显. 而在衍射增强 CT 法中, 当分析晶体位于摇摆曲线 A、B、C 处时, 其重建结果清晰地显现出样品的外边界及内部四孔的边界. 为了更清楚的说明衍射增强 CT 法重建结果的边界增强作用, 现定义边界增强系数计算公式为

$$\omega = \frac{\max(|t_b - t_1|, |t_b - t_2|)}{|t_1 - t_2|} \tag{4}$$

式中,  $\omega$  定义为边界增强系数,  $t_1$ 、 $t_2$  分别表示边界两侧不同物质的灰度值,  $t_b$  为边界上点的灰度值.  $\omega = 1$ , 表示边界既无增强也无削弱;  $\omega > 1$ , 表示边界增强, 且  $\omega$  值越大, 边界增强越明显;  $\omega < 1$ , 表示边界削弱. 文中采用式 (4) 计算了四种方法重建结果中空气与有机玻璃边界的增强系数, 计算结果见表 1. 应用式 (4) 计算增强系数时,  $t_1$ 、 $t_2$  分别取空气

与有机玻璃灰度的平均值,  $t_b$  取边界点上的灰度平均值, 故而表 1 中的结果为边界的平均增强系数. 由于  $Al_2O_3$  粉及 Al 粉颗粒的边界非常复杂, 因此本文没有讨论它们与空气及有机玻璃间的边界增强系数.

表 1 空气与有机玻璃的边界增强系数表

成像类型	(a)	(b)	(c)	(d)
w	1.68	5.28	5.33	5.16

由表 1 可知, 衍射增强 CT 法的确对物质的边界有增强作用, 同时可知, (b)、(c)、(d) 三种方法对边界的增强作用相差不大. 以上分析表明衍射增强 CT 法的重建结果能更好的给出吸收系数相近结构材料间的边界.

## 4 结论

本文将双晶衍射增强成像方法与 CT 结合起来, 对自制样品进行内部结构重建运算, 得到了很好的实验结果, 并与单晶吸收成像的 CT 重建结果进行比较. 结果表明, 双晶衍射增强 CT 法的重建结果可以清楚地给出物质内部不同结构材料间的边界, 尤其在对吸收系数相近结构材料间的边界分辨上远高于吸收成像 CT 法. 并且在衍射增强 CT 法中, 可通过调节分析晶体的位置来得到不同需要的结果.

致谢: 中国科技大学蒋锐、江帆、卢斌与北京同步辐射实验室形貌站王鸾越参与了本文的实验工作.

### 参考文献

- 1 万雄, 陶建文, 于盛林. 扇束辐射层析技术重建三维流场. 光子学报, 2004, **33**(2): 252~256  
Wan X, Tao J W, Yu S L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 252~256
- 2 胡小方, 景小宁, 赵建华, 等. 应用 SR-CT 技术研究陶瓷材料的孔隙结构及密度分布. 实验力学, 2003, **18**

(4): 485~489

Hu X F, Jing X N, Zhao J H, et al. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, **18**(4): 485~489

- 3 景小宁, 胡小方, 赵建华, 等. SXR-CT 技术应用研究烧结陶瓷三维微结构拓扑形貌. 材料科学与工程学报, 2003, **21**(3): 327~330  
Jing X N, Hu X F, Zhao J H, et al. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2003, **21**(3): 327~330
- 4 沈剑峰, 施柏焯. 金属材料次表面缺陷成像检测系统及其应用. 光子学报, 2004, **33**(10): 1207~1209  
Shen J F, Shi B X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1207~1209
- 5 赵宝升, 陈敏. 采用多狭缝条纹管实现激光三维成像. 光子学报, 2004, **33**(12): 1425~1427  
Zhao B S, Chen M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1425~1427
- 6 黄万霞, 袁清习, 田玉莲, 等. 同步辐射硬 X 射线衍射增强成像新进展. 物理学报, 2005, **54**(02): 677~681  
Huang W X, Yuan Q X, Tian Y L, et al. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(02): 677~681
- 7 朱佩平, 王鸾越, 袁清习, 等. 两块晶体衍射增强成像方法研究. 物理学报, 2005, **54**(01): 58~63  
Zhu P P, Wang J Y, Yuan Q X, et al. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(01): 58~63
- 8 孙存英, 黄富泉, 赵道木, 等. 边界衍射波理论公式的准确性数值分析. 光子学报, 2002, **31**(6): 758~761  
Sun C Y, Huang F Q, Zhao D M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 758~761
- 9 庄天戈. CT 原理与算法. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 30~62  
Zhuang T G. *The theory and arithmetic of computed-tomography*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992. 30~62

## Study on the Technique of Diffraction-enhanced Computed-tomography by Synchrotron Radiation X-ray

Wang Min<sup>1</sup>, Hu Xiaofang<sup>1</sup>, Wu Xiaoping<sup>1</sup>, Yuan Qingxi<sup>2</sup>, Huang Wanxia<sup>2</sup>, Zhu Peiping<sup>2</sup>

*1 Chinese Academy Sciences Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

*2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy Sciences, Beijing 100039*

Received date: 2005-06-28

**Abstract** In this paper, the diffraction-enhanced imaging method was applied to the non-destructive testing of computed-tomography. With this technique, the 2-D cross-section image of the self-designed sample was reconstructed. The reconstructed images depict clearly the inner structures of the sample. By comparing these images with the reconstructed image obtained by the absorption imaging computed-tomography, the result indicates that the technique of diffraction-enhanced computed-tomography can acquire better boundary among these elements that their absorption coefficients are very close in the object.

**Keywords** Diffraction-enhanced imaging; Synchrotron radiation; Computed-tomography



**Wang Min** was born on July 11, 1979, in Anhui Province, P. R. China. He received B. Sc degree in Department of Mechanical Manufacturing Engineering of Hefei University of Technology in 2001. Since then, he has become a postgraduate and doctor candidate in Department of Modern Mechanics of University of Science and Technology of China. His interests cover optical nondestructive testing techniques and applications, especially the synchrotron radiation x-ray computed-tomography technique (SXR-CT).