

文章编号: 1004-4140 (2008) 01-0001-06

X 射线衍射增强成像中 DEI 峰位 CT 图像的解释

刘力, 朱佩平

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 在衍射增强成像中, 其峰位 CT 成像模式中的消光衬度产生使物体的 CT 图像边界增强的效果, 从而有效地提高了断层图像的空间分辨能力。本文提出了这种由于消光衬度引起的 DEI-CT 图像增强的额外灰度变化的一个确定的物理解释, 并通过理论模拟计算与简单圆物体实验数据的处理, 证明了这种边缘增强效果具有单像素宽、高密度圆形物体的成像特征, 有助于解读峰位 DEI-CT 图像。

关键词: 衍射增强成像; CT; 同步辐射

中图分类号: TP 391.41 **文献标识码:** A

衍射增强成像 (X-ray Diffraction Enhanced Imaging, DEI) 与 CT (Computed Tomography) 技术相结合, 是相位衬度成像的最新进展, DEI-CT 的成像模式也是多种多样的, 如峰位成像、腰位成像、趾位成像^[1-3]等。峰位成像模式 CT 技术实现较为简单, 其消光衬度产生使物体的 CT 图像边界增强的效果。DEI 峰位 CT 成像的重建图像既包含吸收图像, 也包含由 DEI 消光衬度引起的额外影像, 人们对这些额外影像的认识目前为:

1) 可明显增强物体边界影像, 提高断层图像中物体之间的可识别性;

2) 在 CT 旋转轴与分析晶体晶格面平行的 DEI 系统中^[4], 在一个横断面内这些额外影像与折射率梯度有关, 但在不同角度该梯度的数值也在变化, 似乎不满足 CT 重建的条件^[5]。

本文提出了这种由于消光衬度引起的 DEI-CT 图像的额外灰度变化的一个确定的物理解释, 分析了其成像的局域性特点, 并通过理论模拟计算与简单圆物体实验数据的处理, 证明了这种边缘增强效果具有单像素宽、高密度圆形物体的成像特征。

1 消光衬度投影的计算与近似

为简化起见, 在 DEI 峰位 CT 成像中, 取均匀圆柱物体一幅投影图像的一行 (对应于一个横断层的投影曲线) 进行研究, 取对应探测器线阵方向为 x 轴, 晶体布局对 x 方向的折射改变敏感, 采用等效直线传播 DEI 模型^[4], 关于 DEI 成像原理详见文献^[1-3]。

取弱吸收近似, 其光强分布公式近似为:

$$\frac{I(x)}{I_0} = (1 - \mu d(x)) \left(1 - \frac{\theta}{w_D}\right) = p_a(x) p_e(x) \quad (1)$$

其中, $I(x)$ 为接收的光强, I_0 为无物体时光强, μ 为该圆物体的线性衰减系数, $d(x)$ 为穿透

收稿日期: 2007-11-06。

基金项目: 国家自然科学基金 (10490194); 中国科学院高能物理研究所科技创新资助课题。

厚度, θ 为折射角绝对值, W_D 为 DEI 双晶的摇摆曲线半高宽。为简单起见, 本文假定 $\theta < W_D$ (或者对大于 W_D 的一个 θ 取值为 W_D) 及摇摆曲线为三角形, 第一项 $p_a(x)$ 表示吸收衬度, 第二项 $p_e(x)$ 表示消光衬度。取物体半径为 r , 探测器方向 x 轴, 转台中心对应 x 轴的 0 点, 对 $p_e(x)$, 用文献[6]方法计算折射角 θ , 有:

$$p_e(x) = 1 - \frac{\theta}{W_D} = 1 - \frac{2n}{W_D} \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} = 1 - \frac{2n}{W_D} f_1(x) \quad (2)$$

其中 n ($n < 1$) 为折射率因子。为避免 (2) 式计算发散, 在 $x = \pm r$ 时, 采用像素内求平均的计算方法, 即在 r 与 $r-h$ (h 为一个探测器像素长度) 之间再细分 10 个小区域, 每个区域按 (2) 计算折射角 θ , 最后平均。设半径 $r = 1.5 \text{ mm}$, 取像素长度 $h = 10.9 \mu\text{m}$, 计算出 $x = \pm r$ 时的 f_1 值为 $\sqrt{\frac{2r}{h}}$, 由于对称性, 只显示在 $(-r, 0)$ 区间的 f_1 值, 见图 1 左星线。

在对消光衬度贡献大的区域: $|x| = r - \delta$, $\delta > 0$ 为小量, 忽略 δ 高次项, f_1 近似为:

$$f_1(x) \approx f_m(x) = \sqrt{\frac{r}{2(r - |x|)}} \quad (3)$$

$x = \pm r$ 时上式不成立, 此时可补充 f_m 值为 $\sqrt{\frac{2r}{h}}$ 。

2 单像素宽圆环物体的投影曲线

首先论证消光衬度引起圆物体的 CT 图像与一个单像素宽圆环物体的吸收衬度 CT 图像之间的等价性。对一个圆心在转台中心点, 线性衰减系数为 μ' , 外半径 r , 内半径 $r-h$ 的二维圆环物体, 其吸收衬度投影分布 (即投影线穿过圆环体的长度) 为:

$$p_a^{\text{ring}}(x) = 1 - 2\mu'h \frac{\sqrt{r^2 - x^2} - \sqrt{(r-h)^2 - x^2}}{h} = 1 - 2\mu'h f_2(x) \quad (4)$$

对 $x = \pm r$ 时的 f_2 值, 需要另外单独计算, 结果为 $\sqrt{\frac{2r}{h}}$ 。 f_2 在 $(-r, 0)$ 区间的值, 见图 1 左点线。同样, 在 $|x| = r - \delta$ 区域, 忽略 δ 高次项, f_2 近似为:

$$f_2(x) \approx f_m(x) = \sqrt{\frac{r}{2(r - |x|)}} \quad (5)$$

由 (3), (5) 可见, 在 $|x| = r - \delta$ (小量 $\delta > 0$) 区域, f_1 与 f_2 有相同的近似表达式, 在数值上 f_1 、 f_2 与 f_m 非常接近, 见图 1 左。若采用 FBP-RAMP (应用 RAMP 滤波器的滤波反投影重建法, 这也是最常用的重建方法) 重建, 在重建反投影中起作用的是投影曲线的导数^[7], 对比三者的导数, 发现彼此非常接近, 见图 1 右。

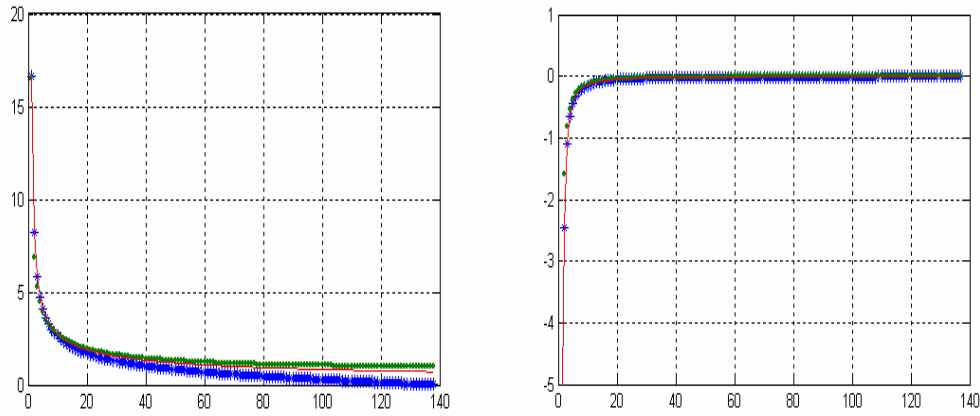


图 1 左 在 $[-r, 0]$ 区间 f_1 (*), f_2 (.) 与 f_3 (线) 的曲线 ($x=0$ 对应下标 138)

图 1 右 在 $[-r, 0]$ 区间 f_1 (*), f_2 (.) 与 f_3 (线) 的导数曲线 ($x=0$ 对应下标 138)

若圆环物体的线性衰减系数 $\mu' = \frac{n}{W_D h}$, 则以上结果说明, 圆物体的消光衬度投影 $p_e(x)$ 与一个线性衰减系数为 μ' 的单像素宽圆环物体的吸收衬度的完整 CT 投影 $p_a^{\text{ring}}(x)$ 近似相等, 其导数也近似相等。由此可以预言, 由 $p_e(x)$ 做断层重建, 得到的将是一个非常接近于单像素宽圆环物体的圆环图像, 其半径等于圆物体半径。

3 重建结果的对比及分析

由理论模拟方法 (1) 生成上述圆物体的消光衬度投影 $p_e(x)$, 以及由 (4) 生成一个线性衰减系数为 $\mu' = \frac{n}{W_D h}$ 的单像素宽圆环物体的吸收衬度投影 $p_a^{\text{ring}}(x)$, 见图 2。180 度内投影角度数为 360 个, 进行 FBP-RAMP 重建, 结果见图 3。

模拟计算结果图 3 表明, 圆物体的消光衬度形成的断层图像与单像素宽圆环物体的吸收投影形成的图像几乎完全一样, 对比度都集中在宽度 1~2 像素的圆环内, 在此之外的图像区域“很干净”, 灰度为 0。在 DEI 消光投影图像中虽然在边界处有一定扩展效应 (即所谓的区域衬度^[6]), 但经过 CT 重建形成宽度极窄的圆环图像, 这说明 DEI-CT 可具有比 DEI 透视更好的细节分辨能力。

对来自实验的峰位 DEI-CT 数据, 存在噪声和系统的空间模糊 (blurring), 此外, 双晶夹角不一定严格为 0。图 4 为一个直径 3 mm 圆柱尼龙棒的峰位 DEI-CT 实测数据的一行形成的投影 SINO 图, 采用北京同步辐射装置, 其实验参数为^[4]: 能量 $E = 10 \text{ keV}$, $WD = 7.75 \text{ s}$ ($1 \text{ s} = 4.848 \mu\text{rad}$), 双晶夹角为 1.7 s , 由文献[6]方法计算得线性衰减系数为 0.258, 折射率为 2.6315×10^{-6} , 探测器单元为 $1 \text{ bin} = 10.9 \mu\text{m}$, 180 度内投影角度数为 360 个, 按照传统 CT 重建的做法, 对衬度求负对数, 进行 FBP-RAMP 重建, 结果见图 5 左。图 5 右为同条件下的模拟数据的重建图像 (无噪声、无模糊的理想尼龙均匀圆柱)。

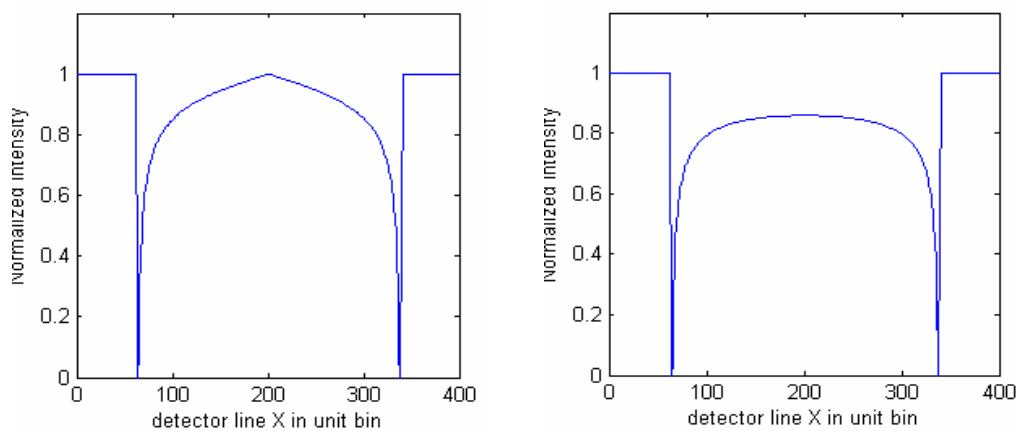


图2 模拟生成的圆物体消光衬度投影（左）与圆环物体的吸收衬度投影（右）

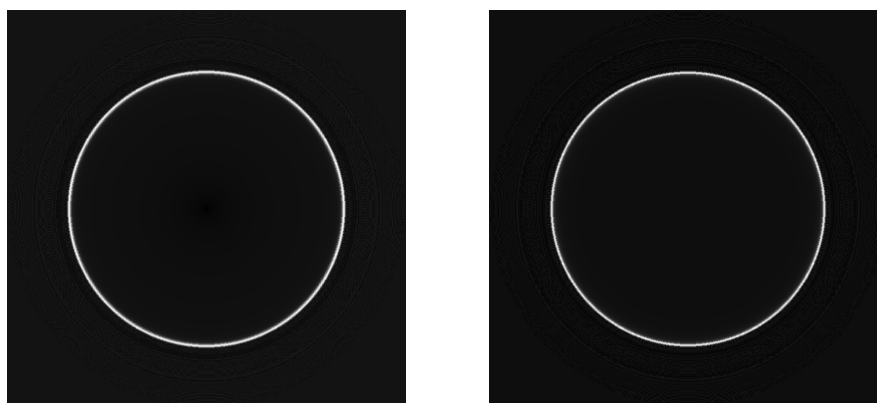


图3 模拟消光衬度投影与圆环物吸收投影的重建结果

由图 5 可见，消光衬度表现为比吸收衬度（圆环内）更高亮度的圆环影像，若去除消光衬度引起的圆环影像，就得到尼龙棒的普通的吸收断层图像，图像亮度正比于线性衰减系数或物质密度。在本实验中， μ' 理论计算（4）的单像素平均值为 6.4 mm^{-1} ，是尼龙棒 μ

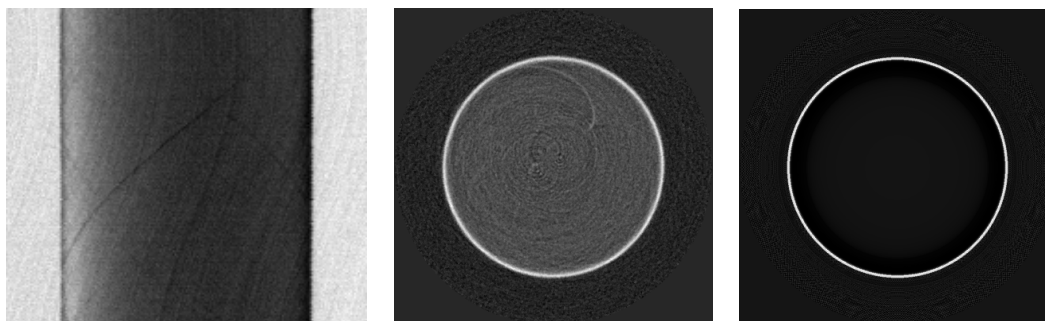


图4 尼龙棒 SINO 图

图5 实测峰位 DEI-CT 重建图像与模拟数据的重建图像

值的 25 倍,可等效认为是一种环状高密度物质。在理论模拟计算的重建图像中,取空气的线性衰减系数为 0,亮边亮度最大值正比于 μ' ,为内部尼龙亮度值的 10 倍以上,但在实际测量中,由于噪声、系统模糊、理论模型与实际情况的差距(尤其是所用理论模型在大折射角时不准确)等原因,实测图像中“硬边”的单像素亮度没有理论预言的大,且消光衬度产生的“硬边”有一定的展宽。

4 总结

本文通过对比分析 DEI-CT 峰位投影图像中的消光衬度的分布与虚拟的单像素宽、具有确定数值的高密度圆环物体的吸收投影分布,显示了两者的类高度相似性,解释了重建后二者断层图像具有相似影像的原因,并对消光引起的物体边缘增强的物理局域性和等效的物理意义给予了合理解释。在物体边缘处,通常吸收衬度变化不大,而相对而言消光衬度变化大,二者作用区域不同,这样即使在有吸收的情况下,消光衬度也可给出物体边界图像的一个高对比度(亮)的、非常局域的“硬边”影像。本文讨论虽然用了简单圆柱物体,且计算中采用了许多近似与假定,但其结果可推广到简单形状或边界切线不重合物体的 DEI-CT 峰位成像,对解读 DEI-CT 峰位图像有帮助。

参考文献

- [1] Chapman L D, Thomlinson W C, Johnston R E, et al. Diffraction-enhanced x-ray imaging[J]. Phys Med Bio, 1997, 42(11): 2015-2025.
- [2] 朱佩平, 王寓越, 袁清习, 等. 两块晶体衍射增强成像方法研究[J]. 物理学报, 2005, 54(1): 58-63.
- [3] 黄志峰, 李政, 康克军, 等. X 射线衍射增强相衬成像相位信息提取方法研究[J]. 高能物理与核物理, 2005, 29(S1): 133-136.
- [4] 黄志峰. 衍射增强成像的相位信息提取方法和 CT 重建算法研究[D]. 北京: 清华大学工程物理系, 2006.
- [5] 朱佩平, 吴自玉. X 射线相位衬度成像[J]. 物理, 2007, 36(6): 443-451.
- [6] Keyrilainen J, Fernandez M, Suortti P. Refraction contrast in X-ray imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, 488: 419-427.
- [7] Kak A C, Malcolm S. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York, IEEE Press, 1988.

CT Image Explanation in Peak Diffraction-Enhanced Imaging

LIU Li, ZHU Pei-ping

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: In X-ray Diffraction Enhanced Imaging (DEI), the extinction contrast in peak CT mode can intensify

the boundary of the object, and effectively raise the special resolution of the tomographic image. In this article, a definite physical explanation is given to this intensifying effect. By theoretic calculating and BSRF experimental data processing, it is demonstrated that this extinction contrast leads in CT image a fictitious one-pixel wide round ring with a very high mass density, and thus intensifies the image of edges of the round object

Key words: diffraction-enhanced imaging; tomography; synchrotron radiation

作者简介: 刘力 (1962—), 男, 中国科学院高能物理研究所副研究员, 主要从事射线成像、图像重建与处理方向的研究, Tel: 010-88200020, E-mail: liuli@ihep.ac.cn。