

中子相衬层析成像方法

陈建文[†] 高鸿奕 朱化凤 谢红兰 李儒新 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2004 年 7 月 2 日收到, 2004 年 8 月 16 日收到修改稿)

介绍了中子相衬和中子层析的工作原理, 提出了中子相衬层析成像方法. 这种方法兼备了相衬和层析的各自优点, 不采用干涉术, 能高分辨率地重构待测样品的三维空间位相分布, 能测试和分辨吸收系数非常相近样品的空间结构.

关键词: 相衬, 层析, 中子相衬, 中子层析

PACC: 0788, 2925D, 6112G

1. 引言

自从 1932 年发现中子以来, 中子已经成为一门独立的学科, 并且已经在工业、农业、医学、国防等诸多方面获得了应用, 也取得了引人瞩目的成果. 这些都是和中子的基本特性分不开的.

中子具有一定的静止质量, $m_0 = 1.674920 \times 10^{-24}$ g, 根据物质波动理论, 由德布罗意公式可以得到中子的波长:

$$\lambda = \sqrt{\frac{81.8}{E}}.$$

例如: 一个热中子其能量 $E = 25$ meV, 它的波长为 0.181 nm, 该值接近于原子大小; 又如一个共振中子 $E = 1$ MeV, 它的波长 $\lambda = 2.86 \times 10^{-5}$ nm. 通常探测仪器的分辨率和它的波长成反比, 因此, 当中子作为显微镜的照明源时, 极限分辨率为波长的 1/2, 足以观察原子核内部的精细结构, 可见其诱惑力是多么大.

中子不带电荷, 因此它射入物质时不仅不与核外电子相互作用, 不需要克服核库仑力的障碍, 因而即使是低能粒子, 也能进入原子核内, 引起各种核反应.

除了氢、锂、硼等个别元素外, 中子质量吸收系数远比 x 射线小, 特别是在重元素里, 中子的穿透能力很强, 在轻元素里, 穿透能力较差, 其行为正好与

x 射线相反.

x 射线透射显微术的衬度机理是当 x 射线和物质相互作用时, 在入射方向上光子数减少, 并遵循 Beer 定律. 而中子也具有这种特性.

从上面介绍可以看出, 例如中子和显微成像技术结合起来, 对于超微细结构的研究, 洞察自然界的奥秘, 将提供一个有效的工具.

近年来, 随着反应堆技术和加速器中子技术的不断发展, 中子在许多领域获得了极为广泛的应用, 特别是中子层析成像技术、中子相衬和中子相衬层析技术, 可以作为一种无损检验的有效工具, 用来研究物体的三维密度和位相结构.

2. 中子相衬成像技术

或许是在 x 射线相衬成像技术的启迪下, 澳大利亚和欧洲的一个联合小组, 发展了一种同轴中子相衬成像方法. 他们采用冷中子, 相应的德布罗意波波长为 0.433 nm, 成功地观察到黄蜂的腿关节和翅膀的某些细节^[1].

我们知道, 无论是光波或者物质波, 当通过物体时, 要产生散射和吸收, 在离样品适当距离将获得清晰的样品吸收衬度像, 这是常规显微和层析的成像基础.

从 x 射线光学中已经知道: x 射线的折射率 $n_s = 1 - \delta$, $\delta = r_0 \lambda^2 N_a f / 2\pi$, 式中 λ 为 x 射线波长, r_0

* E-mail: j_w_chen@yahoo.com

为经典电子半径, N_{at} 为单位体积内原子数密度, f 为原子散射因子. 从中子光学可知, 中子的折射率具有与 x 射线相同的形式, 即 $n_n = 1 - \lambda_n^2 N(b \pm p) / 2\pi$, 式中 N 也为单位体积内的质子数, λ 为中子波长, b 为原子核散射系数, p 为由于电子自旋引起的磁散射系数. 从上面可以看出, 折射率 n 两种形式几乎一致, 对于同样的波长, 中子 $\delta(\lambda_n^2 N(b \pm p) / 2\pi)$ 比 x 射线的 δ 值小一个数量级. 尽管 $1 - \delta$ 和 1 的差值只有 10^{-6} , 但当使用非常小的 λ 值时, 即使不太大的厚度或密度的变化, 也可能产生相当大的位相畸变. 如果采用相干光或部分相干光通过物体时, 除了吸收以外, 还要产生位相变化, 即发生波前的畸变. 这种波面畸变导致部分波面的传播方向发生变化, 使波面重叠而形成干涉, 这样, 位相变化转化成强度变化, 这是相衬成像的物理基础, 也是相衬层析的物理基础^[2], 更为重要的是, 这种图像不经任何重构技术, 可直接获得位相变化图像. 这是相衬和全息的根本区别.

2000 年, Allaman 等人^[1]完成了一个中子相衬的实验, 实验装置如图 1 所示. 从中子源发出的中子束经针孔以后, 变成一个球面波入射到样品上, 在距样品 1.8m 处, 放置一探测器, 就可获得样品的位相衬度像. 上述方法的缺点是不能给出样品中位相信息的三维分布.

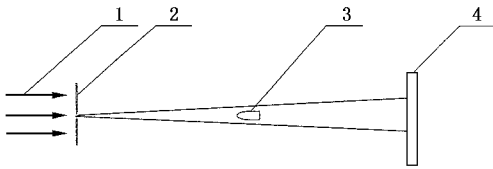


图 1 中子相衬的实验装置图 1 为中子源, 2 为针孔, 3 为样品, 4 为探测器

3. 中子层析成像

当中子束通过衰减系数 μ 、厚度为 l 的介质时, 其衰减遵循 Beer 定律

$$I = I_0 \exp(-\mu l).$$

当物体在投影方向衰减系数不均匀时, 应有线积分:

$$I = I_0 \exp\left[-\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x_r, y_r) dy_r\right].$$

当介质不但在投影方向, 而且在投影的垂直方向也不均匀时, 上式成为

$$I_\phi(x_r) = I_0 \exp\left[-\int_{-\infty}^{+\infty} \mu(x_r, y_r) dy_r\right].$$

对上式等号两边取对数, 使方程线性化, 得到新函数:

$$\lambda_\phi = -\ln \frac{I_\phi(x_r)}{I_0} = \int \mu(x_r, y_r) dy_r.$$

层析任务就是用所测得的 $\lambda_\phi(x_r)$ 得到 $\mu(x_r, y_r)$ 的分布. 经过几代数学家们的努力, 发展了各种各样的方法. 通常用以下两种方法进行图像复原: 代数法(包括迭代法、回投影法), 解析法(包括拉冬法、傅里叶滤波法、卷积法、滤波回投影法等).

一个有趣的现象是, 硬 x 射线的吸收系数随着原子序数的增加而不断增加, 中子束却不能, 除几个元素如氢、锂、硼、镉以外, 中子的吸收系数远远低于硬 x 射线.

对于大部分重金属, x 射线穿透深度受到限制, 而中子确大有作为, 某种意义上中子层析和 x 射线层析相互补充. 特别要提出的是, 氢元素对中子有较大的吸收, 因此, 中子层析对一些含氢有机材料的检测, 如润滑油、塑料、金属外壳内的密封圈等很灵敏, 对某些复杂的、要求非常苛刻的、运用在汽车行业上和宇航工业的大型重金属元件, 中子层析也非常有价值.

2001 年, Koerner 等人^[4]完成了一个中子层析实验, 实验装置如图 2 所示, 平行中子束入射到置于转动平台的样品上, 中子经样品吸收以后, 用闪烁体 [$ZnS(Ag)$ 、 ZrF_2] 记录接收不同角度下的投影值. 每入射一次中子, 闪烁体将转换为级联光子, 然后经铝镜反射到 CCD 相机上, 输入计算机, 当计算机读到来自于 CCD 相机上的信号以后, 控制转动平台转动一个角度, 进行下一轮中子束曝光. 为了避免散射光对 CCD 的影响, 闪烁体、铝镜和 CCD 相机都放置在暗箱中, 在取得足够的投影数据以后, 计算机将给出整个样品图像. 由于基于吸收衬度机理, 这种层析的最大缺点是:

- (1) 不能给出样品中位相的三维空间分布;
- (2) 如果两个吸收系数相近的元素, 这种方法难以分辨, 例如对于生物组织的测试, 对比度差、分辨率低.

4. 中子相衬层析成像方法

为了解决相衬成像和层析成像的缺点, 本文建议将这两种方法结合在一起, 就获得中子相衬层析

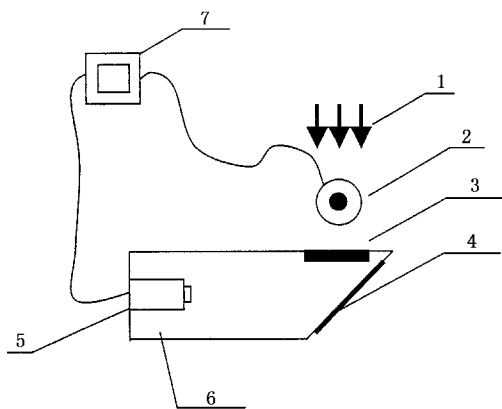


图2 中子层析实验装置图 1 为中子源 2 为带有样品的转动平台 3 为闪烁体 4 为铅镜 5 为 CCD 6 为暗箱 7 为计算机

成像.现在假定平面单色中子波 $\exp[-ikz]$ 照明一待测样品,而待测物体的尺寸与 λ 相比很大,作傍轴近似,由菲涅耳-基尔霍夫积分,可求出其后的单色场为

$$f(x, z) = \left(\frac{j}{\lambda^2}\right)^{1/2} \exp(-jkz) \int q(x') \exp\left(\frac{-jk(x-x')^2}{2z}\right) dx'$$

对 x 作傅里叶变换

$$F(u, z) = \exp(-jkz) Q(u) \exp(j\pi\lambda zu^2).$$

又

$$q(x) = \exp[j\phi(x)],$$

对弱吸收物体

$$q(x) \approx 1 + j\phi(x),$$

故

$$F(u) \approx \delta(u) - \Phi \sin\chi - i\Phi \cos\chi,$$

式中

$$\chi(u) = \pi\lambda zu^2,$$

Φ 为 ϕ 的傅里叶变换,再作傅里叶逆变换

$$f(x) \approx 1 - \phi^* F(\sin\chi) + j\phi^* F(\cos\chi).$$

在 $\sin\chi = 1$ 时,即 $z = \frac{1}{\sqrt{2\lambda u}}$ 得到满足时,则观察平面上强度分布为

$$I(x) \approx 1 - 2\phi(x).$$

此式与 x 射线相衬成像技术一致.中子相衬层析成像装置如图 3 所示.

本实验选用加速器中子源,加速器中子源采用各类加速器加速带电粒子去轰击靶核,产生中子.中子的单色性取决于带电粒子的单色性,因此加速器

中子源的最大优点是可产生单能中子.

采用一个具有矩形或圆形截面的钢管或钢筒构成准直器准直中子,其发散度等于孔径和长度的比值,显然只要缩小孔径,增加长度,可以大大改善发散度,这样做将损失出射中子的通量.

为使中子单色化,通常选用两块较大的单晶铅,用衍射方式,使不同波长的中子产生角色散,进行单色化.并且单晶铅还有一定的曲率半径,使其具有聚焦功能,其原理和光栅谱仪相类似.

单色化了中子束入射到放置在转动平台上的样品上,含有样品位相和强度信息在某一特定距离上被闪烁体接收,转化成可见光,为了防止中子直接入射损伤 CCD,通过一铅镜将光信号传递到 CCD 上,当完成一次记录后转动样品台,进行下一轮记录,像普通层析技术一样,接收到足够多的信息以后,用计算机就可以重构出待测样品的三维位相信息.

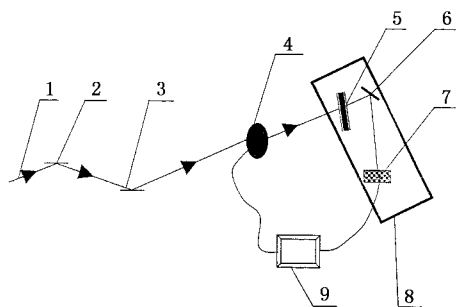


图3 中子相衬层析成像装置图 1 为中子源 2,3 为单晶铅 4 为含有样品转动平台 5 为闪烁体 6 为铅镜 7 为 CCD 8 为暗箱 9 为计算机

中子相衬层析成像兼备了相衬和层析的各自优点,能高分辨率地重构待测样品的三维空间位相分布,能测试和分辨吸收系数非常相近样品的空间结构,这一点是非常难能可贵的.这对于生物组织而言非常有利.不采用干涉术能测到样品的三维位相空间分布.

本文介绍的中子相衬层析成像系统也可以用来进行中子相衬和中子层析成像研究,该系统在生物医学、材料结构、考古学、航天航空、宇宙化学和兵器工业等方面有着极为广泛的应用前景.这一新的技术、新的方法,为人们探索新的自然规律提供了一个强有力的工具.

- [1] Allaman B E , McMahon P J and Nugent K A 2000 *Nature* **408** 159
- [2] Huang W X *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1040 (in Chinese) 黄万霞等 2002 物理学报 **51** 1040]
- [3] Gao D C *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2357 (in Chinese) 高大超等 2000 物理学报 **49** 2357]
- [4] Koerner S *et al* 2001 *Nucl. Instr. Methods in Phys. Res. A* **471** 69

Neutron phase contrast tomographic imaging method

Chen Jian-Wen Gao Hong-Yi Zhu Hua-Feng Xie Hong-Lan Li Ru-Xin Xu Zhi-Zhan

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences ,Shanghai 201800 ,China*)

(Received 2 July 2004 ; revised manuscript received 16 August 2004)

Abstract

The principle for neutron phase contrast and tomography is presented in this paper. The imaging method for neutron phase-contrast tomography is suggested. It has the merits of both neutron phase contrast and tomography. The 3D space distribution for phase objects can be reconstructed with high resolution without using interferometry. The objective space structure with near absorption coefficient can be detected and resolved.

Keywords : phase contrast , tomography , neutron phase contrast , neutron tomography

PACC : 0788 , 2925D , 6112D