

中子相衬成像技术初步研究

陈 伟^{1,2} 吴 洋^{1,2} 王 健^{1,2}

1 (中国工程物理研究院 核物理与化学研究所 绵阳 621900)

2 (中国工程物理研究院 中子物理学重点实验室 绵阳 621900)

摘要 利用不同材料的中子质量衰减系数不同而获取样品内部的结构潜像,属于吸收散射衬度成像;而相衬成像是基于中子的波动性,当中子波穿过样品时,由于样品对中子的折射,不同厚度、不同材质引入的相位差不同,从而导致波前畸变,畸变的波前在穿过样品后作为次波源互相干涉成像,从而获取样品内部结构潜像。研究工作通过数值模拟方法分析了中子相衬成像过程,并基于反应堆中子照相装置进行了不同条件下的多色热中子相衬成像实验。模拟与实验结果表明,在适当准直比条件下,铝材料边缘将出现明显的边缘增强效应,该效应与准直比、样品与转换屏之间的距离密切相关。

关键词 中子, 相衬成像, 模拟, 实验

中图分类号 TL375.4

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.020201

Preliminary study on thermal neutron phase contrast radiography

CHEN Yi^{1,2} WU Yang^{1,2} WANG Jian^{1,2}

1(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2(Key Laboratory of Neutron Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Background: Conventional neutron radiography is an absorption contrast imaging method which is based on wave character. When neutron wavefront traverses the inspected sample, the variations of the thickness, material and neutron refractive index of the sample bring different phasic difference, which would cause a change in a shape of a neutron wavefront, and the aberrance wavefront interference behind the sample leads to enhancement of the image sharpness. **Purpose:** The aim is to validate thermal neutron to carry out phase contrast imaging. **Methods:** Numerical simulation of neutron edge enhancement imaging is processed by MATLAB based on reflection theory and experiment is carried out at a reactor using polychromatic thermal neutron beam line. **Results:** The thermal neutron phase contrast imaging can be realized in CMRR (Chinese Mianyang Research Reactor) neutron radiography device when the L/D is 2 000 and the distance of sample between scintillator is 60 cm. **Conclusion:** Both the simulation and experiment results show that a proper L/D condition would cause image enhancement at the edge of aluminum materials and the monochromatic neutron source is not necessary. The effect is related to L/D and the distance between sample and scintillator.

Key words Neutron, Phase contrast imaging, Simulation, Experiment

中子照相和 X 射线照相的图像对比,不难发现它与 X 射线照相技术是相互补充的。这主要表现在以下几点: (1) 中子辐射照相可以对某些低原子序

数的材料与高原子序数的材料一样进行成像,而 X 射线照相则最适用于某些高原子序数的材料成像。(2) 中子照相还可以对强放射性试样进行成像,例

第一作者: 陈伟, 男, 1990 年出生, 2012 年毕业于南京理工大学, 研究领域为反应堆应用技术。

通信作者: 吴洋, E-mail: nuclearwyang@163.com

First author: CHEN Yi, male, born in 1990, graduated from Nanjing University of Science and Technology in 2012, focusing on reactor application technology

Corresponding author: WU Yang, E-mail: nuclearwyang@163.com

收稿日期: 2015-09-14, 修回日期: 2015-11-16

如反应堆用过的元件棒的中子照相检测。中子照相可用转移(间接)曝光法,对带有放射性的材料检测时,可以消除材料自身放射性的干扰,获得良好的检测效果。(3)中子照相能检测被金属材料包裹的轻材料,如金属外壳内的有机物和无机物的状态。另外,中子照相还可对含氢材料自身缺陷进行检测。

相衬照相技术是近年发展起来的新型射线照相技术^[1]。传统的中子照相技术是以中子的粒子性为基础的,图像的衬度是由于材料对射线的质量衰减系数不同而引起的,然而某些材料对中子射线的衰减作用很小甚至没有衰减作用,或者材料内各元素之间的衰减差别很小,这样就只能记录到很低的像衬度,使得中子照相没有用武之地。而相衬成像技术的理论基础是中子的波动性,我们知道中子射线穿过物体时各个元素对中子束的折射率不同会引起位相的改变,如果将这种改变用具体的图像反映出来,就可以得到物体的内部结构图像。中子相衬成像就可以对那些对中子射线衰减很小的材料实现较高的分辨率,特别是对一些传统中子照相技术几乎无法检测的纯位相物体(铝膜等)得出较满意的检测结果。因此,位相衬度成像技术最近越来越受到人们的重视。2000年 Allman 等^[2]首次利用冷中子源得到大黄蜂的中子边缘增强效应图片,可清晰地观测到成像带来的衬度增加。

本文通过编制模拟仿真程序,模拟中子相衬边缘增强效应成像,使用宽能区的入射中子得到了非单色冷、热中子的边缘增强效应成像结果;同时在反应堆上进行了不同条件下的多色热中子边缘增强效应成像实验,定性得到影响成像的因素,与模拟结论一致。

1 中子相衬成像原理及模拟研究

1.1 原理及基本模拟方案

相位衬度的产生主要是由于射线在物体中的折射引起的,而中子的折射率和 X 射线的折射率表达式相近,包含了相位项 δ 和吸收项 β ,即:

$$n=1-\delta-i\beta \quad (1)$$

在这里我们只考虑相位项 δ ,那么对于中子,折射率又可以表示为:

$$n=1-\lambda^2 N(b \pm p)/2\pi \quad (2)$$

式中: N 是单位体积内质子数; λ 是中子的波长; b 是原子核散射系数; p 是由于电子自旋引起的磁散射系数。一般情况下, $1-\delta$ 的差值在 10^{-6} 左右,但

是由于中子的波长很小,所以中子射线穿过物体时的相位衬度反映非常灵敏,即使物体内部的折射率变化不大或者物体的体积较小,也会造成很大的波前相位畸变,这就会导致各个波前的传播方向不一致,从而使波面重叠而形成干涉^[3],如图 1 所示。

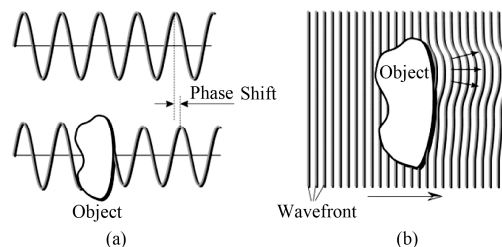


图 1 相衬成像基本原理图

Fig.1 Principle of phase contrast imaging.

目前,实现相衬成像的方法有三种:干涉法、衍射增强法和同轴轮廓法。干涉法较难实现,它需要光源具有很好的相干性及单色性,并对系统的稳定性要求也很高;衍射增强法是利用晶体布拉格衍射摇摆曲线随角度的变化分辨很小的相位变化梯度,这种变化很灵敏,所以衍射增强法具有较高的信噪比,而且需求的条件相对没有干涉法高,是现在广泛应用的一种相衬成像方法;同轴轮廓法相对前两种方法有光路简单、对光源单色及相干性要求较低以及成视场较大的优点,是本文研究的重点。

同轴轮廓成像又称菲涅尔衍射成像。当一系列均匀的相干光波穿过物体时,如果是弱吸收物体,中子波的强度不会发生太大变化,但是波面会发生畸变,畸变的波面在传播过一定距离后和未发生畸变的波面发生干涉,那么这时就相当于位相的变化转化成了强度的变化,此即为同轴轮廓成像的基本原理,下面是对这种现象的理论说明。

沿 z 方向传递的平面波 $\exp(ikz)$ 经过物体后变为 $\exp\{-i\phi(x)-\mu(x)\}$,对于弱吸收和相位物体:

$$q(x) \approx 1 + i\phi(x) - \mu(x) \quad (3)$$

在 $z > 0$ 的连续平面内,用近轴近似的方法,根据菲涅尔理论,波函数 $f(x,z)$ 用菲涅尔基尔霍夫积分展开再采用傅立叶变换得:

$$F(u,z) = \sigma(u) - \Phi \sin(\pi \lambda z u^2) - M \cos(\pi \lambda z u^2) + i[\Phi \cos(\pi \lambda z u^2) - M \sin(\pi \lambda z u^2)] \quad (4)$$

式中: $F(u,z)$ 是波函数 $f(x,z)$ 的傅立叶变换; u 是物体中或成像平面上的空间频率; M 和 Φ 分别是 μ 和 ϕ 的傅立叶变换。

对 μ 和 ϕ 作一阶近似得：

$$F(u, z) = \sigma(u) - \Phi(u) \sin(\pi \lambda z u^2) - M(u) \cos(\pi \lambda z u^2) \quad (5)$$

式中：第一项 $\sigma(u)$ 表示直接传递的波，第二和第三项分别表示吸收和位相的成像衬度。函数 $\cos(\pi \lambda z u^2)$ 和 $\sin(\pi \lambda z u^2)$ 分别是振幅强度和位相强度的衬度传递函数。对于纯位相物体或吸收很小的物体，则：

$$F(u, z) = \sigma(u) - \Phi(u) \sin(\pi \lambda z u^2) \quad (6)$$

当 u 很小时， $\sin(\pi \lambda z u^2) \approx \pi \lambda z u^2$ ，那么式(6)变为：

$$F(u, z) = \sigma(u) - \pi \lambda z u^2 \sin(\pi \lambda z u^2) \quad (7)$$

再对其作反变换得：

$$I(x) = |f(x)|^2 \approx 1 + \frac{\lambda z}{2\pi} \phi''(x) \quad (8)$$

由上面的推导可以看到，同轴轮廓法得到的图像强度和相位的二阶梯度有关，所以这种方法可以对图像边缘，也就是相位变化最大的地方进行增强，从而提高图像的分辨率。

近年来，针对同轴轮廓法的成像机理又衍生出了一种折射相衬成像理论，该理论认为当畸变的波前发生干涉后，这种位相发生的变化就转换成强度的变化，这就是相衬成像的基本原理。图2是不同元素的热中子吸收系数图^[4-5]，可见在有相同吸收系数的情况下，可以通过不同的相移系数分辨元素。

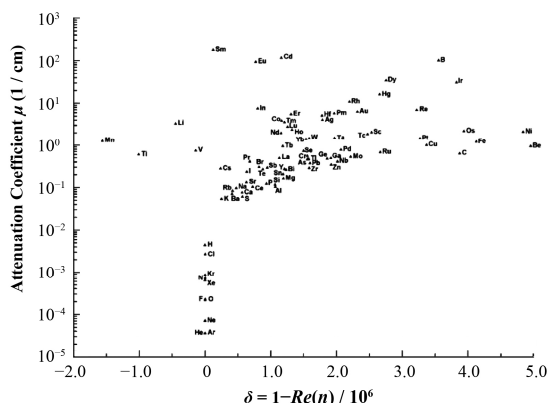


图2 不同元素热中子吸收系数和相移系数图^[4-5]

Fig.2 Thermal neutron absorption coefficient and phase shift coefficient of different elements^[4-5]

当只考虑相移时， $n=1-\delta$ ，或写成：

$$n = \sqrt{1 - \frac{V_{\text{opt}}}{E_0}} = \sqrt{1 - \frac{2\pi\hbar^2}{mE_0} Nb} \approx 1 - \frac{\pi\hbar^2}{mE_0} Nb \quad (9)$$

式中： m 为中子质量； E_0 为入射中子能量； N 为介质原子密度； b 为中子相干散射长度。热中子相移项 δ 一般为 10^{-6} ，冷中子的 δ 一般为 10^{-5} 。则中子波穿过物体时，相位变化和折射率的关系为：

$$\Phi(x, y, z, k) = -k \int_{-\infty}^z \delta(x, y, z', k) dz' \quad (10)$$

式中： k 为波数； δ 为折射率的相移项。

考虑中子束在样品中某不同材料表面发生折射，并遵从斯涅尔公式：

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (11)$$

式中： α_1 和 α_2 代表中子的入射角和折射角； n_1 和 n_2 为折射面两边不同材料的折射率。由相变带来的角偏离为：

$$\alpha_{\text{final}} = \frac{1}{k} \nabla \perp \Phi = \nabla \perp \int \delta(s) ds \quad (12)$$

式中： α_{final} 是最终中子出射方向和入射方向的夹角； s 是中子传播路径； $\delta=n-1$ 。这种基于折射的相衬成像不需要中子源很高的空间相干性，只要由于折射造成的束偏离能够被探测器所分辨，就能得到预期相衬图像。

经多方比较，决定采用 MATLAB 软件完成模拟计算程序的编制，该程序是美国 Mathworks 公司出品的数学软件，可方便地进行图像运算和绘制。通过它编写程序模拟跟踪大量中子的径迹行为有较高的效率，且可以方便地进行结果查看，用其模拟中子相衬现象在数学和软件上都是可行的。

相衬实验平台包含中子源、样品和探测器。模拟计算原理如图3所示，在 $z=0$ 处， X - Y 平面内放置一个二维方形平面（边长为 l_1 ）中子源；为简化模型，在 $z=L_1$ 处放置一个低能中子弱吸收材料的小球（如铝、碳等），半径为 R ；在 $z=L_1+L_2$ 处放置方形（边长 l_2 ）中子探测器。

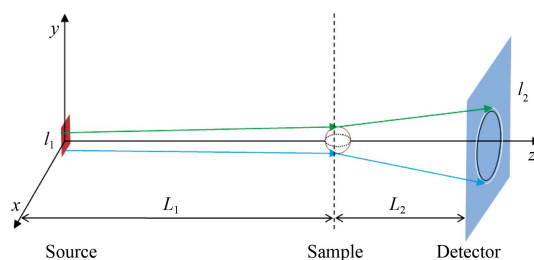


图3 相衬成像模拟物理模型示意图

Fig.3 Physical model of neutron edge enhancement imaging.

模拟过程主要有三个步骤：首先在中子源平面上采用蒙特卡罗方法随机抽样一个源中子，该中子能量分布服从正态能谱分布，出射方向方位角在一定范围内均匀随机分布；第二步跟踪该中子，如果该中子与样品相交，则计算该中子与样品的相互作用，即中子入射和出射两次折射过程，记录中子最后的出射方位角；最后根据中子的方位角使其在探

测器对应位置累积, 采用 MATLAB 自建栅元。重复以上三个步骤, 抽样大量中子数后即可在探测器平面上得到中子相衬图样, 该图像的统计性与抽样中子数相关。

模拟主要考虑: 由于样品为弱吸收材料, 故不考虑中子在样品内部的衰减; 探测器上的结果为累积中子注量分布, 略去了闪烁屏对成像的影响; 按照正态分布能谱抽样不同能区的中子, 对冷中子最可几能量为 0.0025 eV, 热中子最可几能量为 0.025 eV, 能量的连续分布使不同能量中子对相同材料具有不同的折射率, 使模拟接近真实情况; 中子的方位角范围根据准直比来决定, 不模拟超过该范围的中子; 整个系统放置在真空中, 不考虑中子在空间中的损失。

1.2 模拟结果及分析

1.2.1 不同相干强度的影响

关于光源的空间相干性可用相干长度来标定:

$$l_t = r\lambda/s \quad (13)$$

式中: s 是源的横向截面, 即源的尺寸; r 是物源距离; λ 是波长。所以从理论上说, 中子源距离成像屏越远 (准直比大), 中子源尺寸越小, 中子束的相干性就越好, 但是如果它们之间的距离太远或者中子源限束太大, 又会不可避免地导致到达成像屏处的中子注量率降低, 严重影响成像效果, 因此有必要进行前期模拟研究, 分析适合中子相衬成像的理论最佳实验条件。

模拟样品选择半径为 2 mm 的铝材料小球, 源-物距 8 000 mm, 物-探测器距 800 mm, 模拟不同源尺寸下的相衬成像情况, 采用热中子能谱输入, 每幅图像模拟 1.4×10^9 个中子。

图 4 为不同准直比情况下的相衬成像模拟结果。随着源边长尺寸的增加, 准直比下降, 几何不锐度的增加使相衬成像图像模糊最终无法识别。

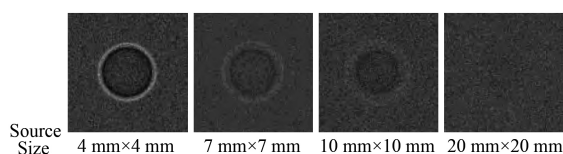


图 4 不同准直比情况下铝制小球成像模拟
Fig.4 Imaging simulation of different L/D by aluminum ball.

1.2.2 不同物屏距离的影响

模拟样品是半径为 2 mm 的铝材料小球, 源-物距 8 000 mm, 源尺寸为边长 4 mm, 模拟不同物-屏距下的相衬成像情况, 采用热中子能谱输入, 每幅

图像模拟 1.4×10^9 个中子。

图 5 为不同物-屏距情况下的相衬成像模拟结果。随着物屏距的增加, 相衬效应增强, 但同时也带来几何不锐度的增加, 使边缘变得模糊。

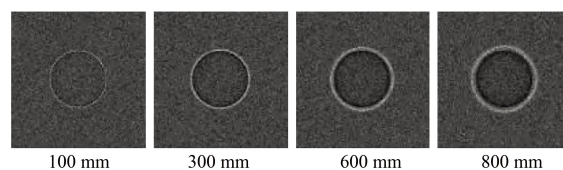


图 5 不同物-屏距情况下铝制小球相衬成像模拟
Fig.5 Imaging simulation of different distances between object and screen by aluminum ball.

1.2.3 不同中子能谱的影响

模拟样品是半径为 2 mm 的铝材料小球, 考虑源-物距 8 000 mm, 物-屏距 800 mm, 源尺寸为边长 4 mm, 模拟不同中子能谱的相衬成像情况, 每幅图像模拟 1.4×10^9 个中子。

图 6 为不同中子能谱情况下的中子相衬模拟结果。低能量中子能引起高的折射率, 带来更强的边缘增强效应。

模拟结果显示, 对多色热中子源, 当准直比达到 1 000 时已能出现典型的边缘增强效应; 相衬效应与材料相关, 不同折射率将带来不同强度乃至相反的相衬效应; 准直比越高、物-屏距越大、中子能量越低, 相衬效应越明显; 但在一定准直比条件下, 过大的物屏-距会使图像模糊, 减弱相衬成像效果。

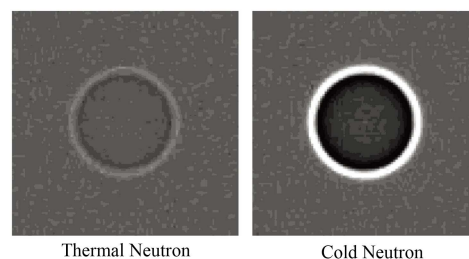


图 6 不同中子能谱情况下铝制小球相衬成像模拟
Fig.6 Imaging simulation of different neutron spectra by aluminum ball.

2 实验研究

实验研究主要在中国工程物理研究院 CMRR (Chinese Mianyang Research Reactor) 反应堆上进行。实验装置布局如图 7 所示, 反应堆产生的多色热中子经不同尺寸光阑引出辐照样品成像, 用于中子束流限束的光阑直径从 4 mm 到 125 mm 不等。转换屏为 200 μm 厚度 $^6\text{LiF}+\text{ZnS}$ 闪烁屏。CCD 相机采用 PI 深制冷科学级相机, 制冷温度达到 -110°C , 像素数 2 048 $\times$ 2 048。

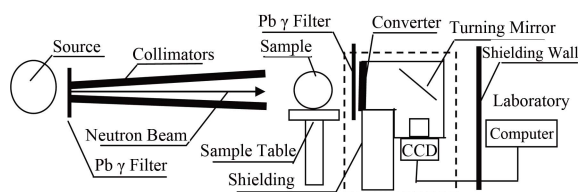
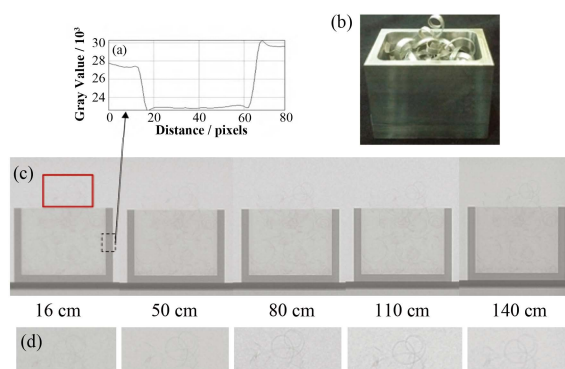


图 7 实验布局示意图

Fig.7 Schematic of the fast neutron radiography facility.

实验中使用的样品为一盛有铝屑的空心铝盒，其外尺寸为 $40\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ，内尺寸为 $34\text{ mm} \times 24\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 。样品放置在距离光阑 8 m 远的位置，通过调整光阑孔径来获得不同的准直比。当光阑直径为 4 mm 时，不同物-屏距情况下的成像结果如图 8 所示，物-屏距 16 cm 时曝光 7 min ，物-屏距 50 cm 和 80 cm 时曝光 8 min ，物-屏距 110 cm 曝光 9 min 。

图 8 光阑直径 4 mm 时不同物-屏距情况下边缘增强效应成像结果

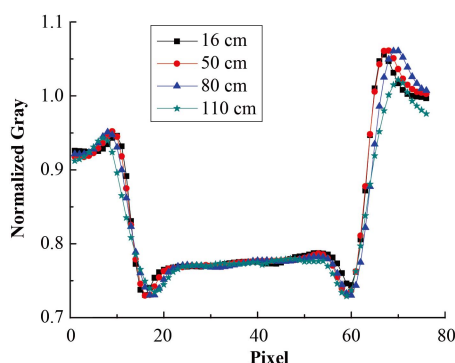
(a) 局部灰度曲线, (b) 实物照片, (c) 不同物-屏距成像结果, (d) 不同物-屏距成像结果实线方框处放大图像

Fig.8 Neutron edge enhancement imaging results at different distances between object and screen

(the diameter of aperture is 4 mm).

(a) Local gray curve, (b) Photo of sample, (c) Imaging results at different distances between object and screen, (d) Local amplification images of (c)

将不同物-屏距情况下铝盒边缘位置(图 8 中虚线框位置)的灰度曲线作对比(图 9), 可见在 5 种物-屏距情况下铝盒边缘均出现了增强效应。当物-屏距较小时, 受限于探测器分辨率, 增强效果较弱。随着物-屏距的增大, 增强效果变强。但当物-屏距过大时, 几何不锐度影响增加, 边缘增强效果被模糊。对于该套实验布局 and 此种样品, 增强效果最佳位置位于物-屏距 $50\text{--}80\text{ cm}$ 附近。

图 9 光阑直径 4 mm 不同物-屏距情况下铝盒边缘灰度曲线Fig.9 Neutron edge enhancement imaging gray curves at different distances between object and screen (the diameter of aperture is 4 mm).

3 结语

根据目前研究结果可得出以下结论:

1) 热中子因能谱非单色导致光源相干性不是很强, 但经理论和实验验证亦可实现中子相衬成像。
2) 理论模拟结果表明单色性更好的冷中子源相衬成像结果应强于热中子源, 这是下一步研究的方向。

3) 依托蒙特卡罗方法构建的中子相衬成像仿真程序计算结果和实验结果相近, 当热中子束流准直比为 2000 左右, 样品为铝材料时, 均为物屏距离达到 600 mm 左右相衬效果最明显, 证明折射理论解释中子相衬成像是可行的, 该程序在中子相衬成像实验条件分析或预判中可发挥重要指导作用。

4) 增大束流准直比和物屏距离均可增强相衬成像效果, 但物屏距离过大带来的几何不清晰度增大又抵消上述效果, 因此对于不同的实验条件和样品特质, 存在一个最佳实验条件的选取问题。

参考文献

- 1 肖体乔, 徐洪杰, 陈敏, 等. 一种新型 X 射线相衬成像实验室系统[J]. 核技术, 2003, **26**(10): 743–747
XIAO Tiqiao, XU Hongjie, CHEN Min, *et al.* A new type of laboratory system for X-ray phase-contrast imaging[J]. Nuclear Techniques, 2003, **26**(10): 743–747
- 2 Allman B E, McMahon P J, Nugent K A, *et al.* Phase radiography with neutron[J]. Nature, 2000, **406**(9): 158–159
- 3 Thewlis J. Neutron radiography[J]. British Journal of Applied Physics, 1956, 7: 345–350
- 4 Thornton J, McMahon P J, Allman B E, *et al.* The detection and sizing of flaws in components from the hot-end of gas turbines using phase-contrast radiography with neutrons: a feasibility study[J]. NDT & E International, 2003, **36**: 289–295
- 5 Lehmann E, Lorenz K, Steichele E, *et al.* Non-destructive testing with neutron phase contrast imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section A, 2005, **542**: 95–99