

文章编号 1004-924X(2013)07-1755-08

使用山嵛酸银标定中子小角散射谱仪的关键参数

陈良*, 彭梅, 孙良卫, 王燕, 陈波

(中国工程物理研究院中子物理学重点实验室和核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 为了快速标定中子小角散射谱仪的关键参数: 速度选择器的选择波长和波长分辨率以及谱仪布局下的 Q 分辨率, 采用实验方法对山嵛酸银粉末的中子小角散射实验数据进行了拟合。首先, 确定谱仪布局, 包括准直光阑孔径大小、准直长度、样品到探测器之间的距离; 其次, 在中子小角散射谱仪的机械速度选择器设置在 3 000、4 000、5 000 和 6 000 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 4 种不同转速下, 测定山嵛酸银粉末的中子小角散射谱; 最后, 对实验数据进行反演分析。通过分析, 计算出该机械速度选择器常数为 $2\,329.2 r \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{nm}$, 从而得到了 4 种不同转速所对应的选择波长分别为 0.776、0.582、0.466、0.388 nm; 通过对实验数据的拟合还得到了该速度选择器的波长分辨率(23.75%), 以及在此谱仪布局下的 Q 分辨率曲线。结果表明, 使用山嵛酸银粉末的中子小角散射能够较好地标定谱仪的关键参数, 从而支持对中子小角散射数据的正确分析和反演。

关键词: 中子小角散射谱仪; 山嵛酸银; 选择波长; 波长分辨率; 标定

中图分类号: TL817.9; O571.56 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1755

Calibration of key parameters for small angle neutron scattering spectrometer by using silver behenate

CHEN Liang*, PENG Mei, SUN Liang-wei, WANG Yan, CHEN Bo

(Key Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics and Chemistry,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: chltiger@163.com

Abstract: To calibrate quickly key parameters of a small angle neutron scattering spectrometer, such as selecting neutron wavelengths, wavelength resolution, and the Q resolution under a geometrical layout of the spectrometer, the experiment data of small angle neutron scattering for silver behenate powder were fitted. First, the geometrical layout of spectrometer was chosen including the size of circular source, sample apertures of the collimator, the source-to-sample distance and the sample-to-detector distance. Then, the spectra of small angle neutron scattering on silver behenate were obtained under four different revolving speeds of mechanical velocity selector. Finally, these experiment data were inversed and analyzed. Obtained results show that the velocity selector constant is $2\,329.2 r \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{nm}$, correspondingly, four different selecting neutron wavelengths are 0.776, 0.582, 0.466, 0.388 nm, respectively. The wavelength resolution of the velocity selector is 23.75% by fitting these experiment data and the spectrometer Q resolution curves can be obtained by using the chosen layout

收稿日期: 2013-04-10; 修订日期: 2013-05-18.

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(No. 2010A0103002)

parameter and different rotating speeds. It concludes that the key parameters of small angle neutron scattering spectrometer can be achieved by using silver behenate, which supports the exact analysis and inversion for experiment data of small angle neutron scattering.

Key words: small angle neutron scattering spectrometer; silver behenate; selection wavelength; wavelength resolution; calibration

1 引言

中子小角散射和 X 射线小角散射是研究亚微观结构和形态特征的一种重要技术手段,现已广泛应用于聚合物、生物大分子、凝聚态物理和材料科学等学科,研究领域涉及合金、悬浮物、乳液、胶体、高分子溶液、天然大分子、液晶、薄膜、聚电解质、复合物、纳米材料和分形等^[1-6]。与 X 射线相比,中子具有电中性,能量低和磁矩,因此特别适合于非破坏地研究块状材料、磁结构材料以及高分子材料^[7-17]。基于反应堆的中子小角散射谱仪,其单色化部件是机械速度选择器,通过旋转带有吸收片的鼓来选择波长。每一台中子小角散射谱仪在安装中或安装好以后,都要通过各种方式对谱仪的指标进行标定,只有通过标定后的谱仪,测量得到的数据在反演过程中才具有可信性。

对于一台中子小角散射谱仪,在谱仪安装好后一般都要采用相应的方式进行测量,比如速度选择器波长和波长分辨率的标定。波长的标定一般采用飞行时间谱仪和山嵛酸银;波长分辨率的标定则使用飞行时间谱仪^[18-20],使用飞行时间谱仪需要一定的中子飞行空间。山嵛酸银(SiBe)粉末为片状晶体,其外观尺寸在 0.2~2 μm,厚度在 0.1 μm 左右,在(00n)方向上有比较大的面间距,其中 $d_{(001)} = 5.838$ nm,山嵛酸银也可以作为中子小角散射波长标定标准^[21]。理想的山嵛酸银衍射峰为 δ 函数,由于谱仪分辨率的作用,测量的散射谱易发生弥散,使衍射峰展宽^[22]。本文通过分析山嵛酸银中子小角散射谱得到了中子小角散射谱仪 3 个关键参数:速度选择器选择波长,波长分辨率和谱仪的 Q 分辨率。

2 理论分析

机械速度选择器具有一个常数 C ,它与选择波长 λ 和转速 n 有如下关系^[23]:

$$C = n\lambda. \quad (1)$$

这样可以通过计算 C 获得选择波长。

中子小角散射测量是在倒易空间进行,其散射矢量有如下关系:

$$Q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (2)$$

式中: Q 为散射矢量, λ 为入射波长, θ 为散射角。

对于山嵛酸银粉末,其(00n)方向的面间距较大,在衍射峰位置的散射矢量与面间距的关系为:

$$Q_0 = \frac{2\pi}{d}, \quad (3)$$

式中: Q_0 为峰值的散射矢量, d 为面间距。由式(2)和(3)可计算入射波长。

中子小角散射谱仪 Q 标准差的贡献由谱仪几何布局和波长变化两部分组成^[24-26]:

$$\sigma_Q^2 = [\sigma_Q^2]_{\text{geo}} + [\sigma_Q^2]_{\text{wav}} = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \sigma_\theta^2 + Q^2 \frac{\sigma_\lambda^2}{\lambda^2}, \quad (4)$$

式中: σ_θ 为谱仪几何部分的标准差, σ_λ 为波长弥散的标准差。可以将几何部分标准差分解为 x 方向和 y 方向,经过计算可以算出谱仪 Q 在 x 方向的标准差:

$$\sigma_{Q_x}^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda L_2}\right)^2 \left[\left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2 \frac{R_1^2}{4} + \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1}\right)^2 \frac{R_2^2}{4} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta x_3}{2}\right)^2 \right] + Q_x^2 \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2, \quad (5)$$

式中: σ_{Q_x} 为谱仪 Q 标准差在 x 方向上的分量, L_1 和 L_2 分别为准直器两光阑之间的距离和样品到探测器之间的距离; R_1 和 R_2 分别为准直器光阑和样品光阑半径; Δx_3 是探测器单元尺寸, Q_x 为 Q 在 x 方向上的分量, $\Delta \lambda$ 是峰值波长的半宽度。

3 实验

实验所需的山嵛酸银直接从阿法埃莎公司购买,没有经过特殊处理,装在样品盒中,样品厚度为 1 mm,在匈牙利布达佩斯中子中心的中子小

角散射谱仪上测量,散射测量所选择的谱仪布局为:准直长度 4.7 m,样品到探测器中心长度 1.3 m,源光阑和样品光阑直径分别为 25 和 12 mm,速度选择器的速度分别为 3 000,4 000,5 000 和 6 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,在 4 个不同速度下测量时间分别是 1 200,1 200,900 和 600 s。这 4 个中子小角散射谱见图 1~4。在透射测量中,为避免直穿束烧坏探测器,在样品位置前加了一块树脂玻璃用来衰减中子,速度选择器转速为 6 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,使用山嵛酸银和空束测量直穿束在 60 s 的计数分别是 145 467 和 221 831,由此可以计算出透射率 T 为 0.655 7。透射率在 0.6~0.9 的情况下,样品满足散射条件,多重散射的情况就可以忽略。该中子小角散射谱仪的探测器单元为 $64 \text{ cm} \times 64 \text{ cm}$ 。

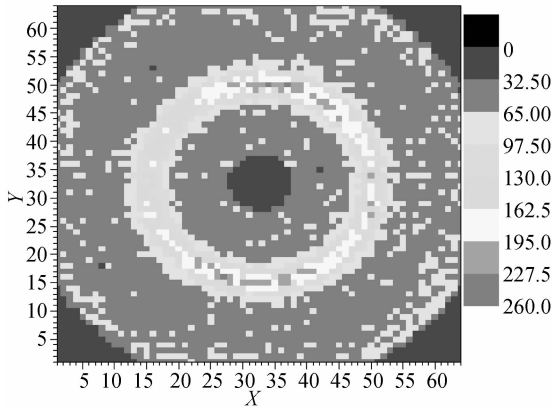


图 1 SiBe 在 3 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下的散射谱

Fig. 1 Scattering spectrum of SiBe at 3 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

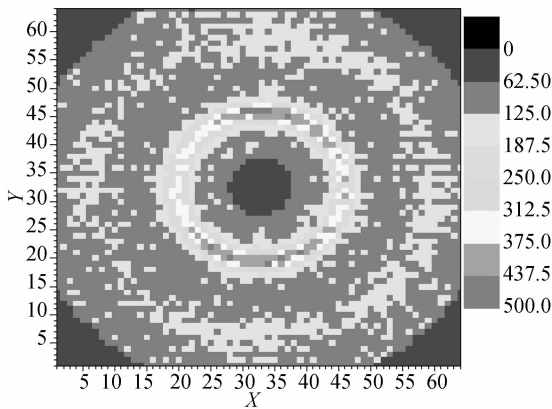


图 2 SiBe 在 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下的散射谱

Fig. 2 Scattering spectrum of SiBe at 4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

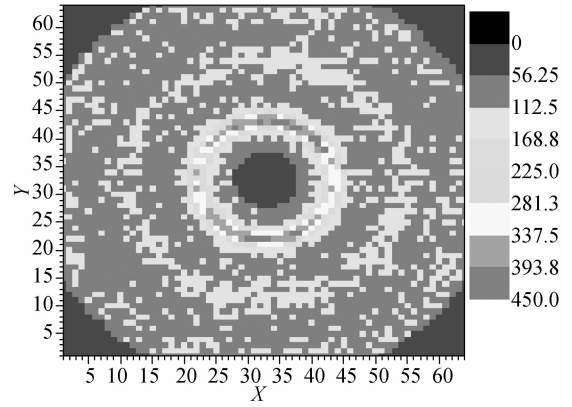


图 3 SiBe 在 5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下的散射谱

Fig. 3 Scattering spectrum of SiBe at 5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

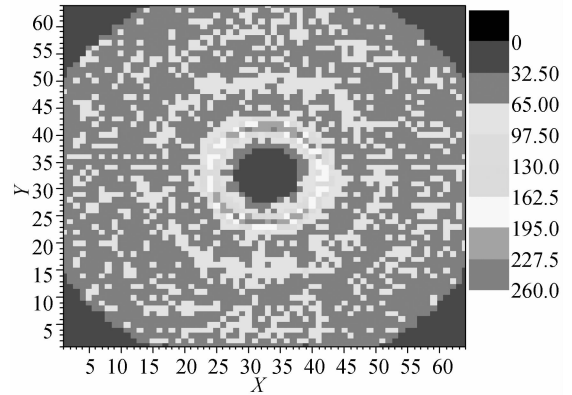


图 4 SiBe 在 6 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下的散射谱

Fig. 4 Scattering spectrum of SiBe at 6 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$

4 结果和讨论

4.1 速度选择器波长的确定

山嵛酸银粉末面间距 $d(001) = 5.838 \text{ nm}^{-1}$,根据式(3)可算出 $Q_0 = 0.010 76 \text{ nm}^{-1}$,即在此位置有一个衍射峰。从上图可以看出,散射谱是各向同性的。探测器单元为 $64 \text{ cm} \times 64 \text{ cm}$,每个单元有一个计数,而每个单元面积约为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,在计算时,把计数集中于单元的中心;图上中心位置计数很少,是因为为了避免透射束对探测器的影响,放置了一个束流阻挡器。为方便计算,选择一维计数,根据峰值对应的 Q 值为定值,确定峰值所在单元对中心的距离,再根据式(2)计算确定峰值波长 λ 的值,由于速度选择器具有常数 C ,因此对所测量得到的常数求平均,再根据平均

求得修正后的波长,如表 1 所示。速度选择器转速与波长的关系如图 5 所示,即可得到任何速度下的波长。

表 1 速度选择器转速与波长的关系

Tab.1 Relationship of wavelength and rotation speed

转速 $r \cdot \text{min}^{-1}$	峰值波长 (nm)	速度选择器常数 C	C 的平均为 23 292, 修正后的波长
3 000	0.786	23 580	0.776
4 000	0.578	23 120	0.582
5 000	0.471	23 550	0.466
6 000	0.382	22 920	0.388

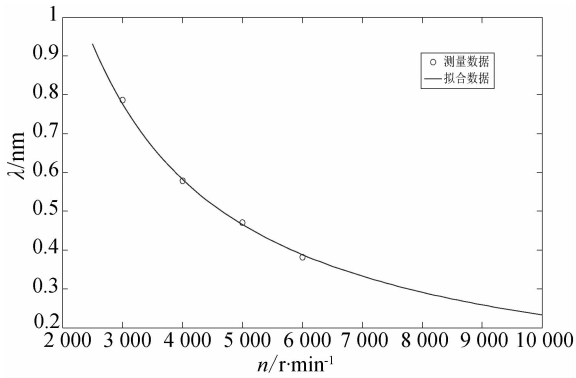


图 5 速度选择器转速与波长的关系

Fig.5 Relationship of wavelength and rotation speed

4.2 速度选择器波长分辨率

实验所得到的数据是探测器在测量时间内的所有计数,从图 1~4 可以看出,山嵛酸银的中子小角散射谱是各向同性的,因此可以将此数据转换成一维形式,将所得到的计数通过下式转变成山嵛酸银的绝对微分散射截面^[24,27]:

$$I_S(Q) = I_0(\lambda) T d \frac{d\sum(Q)}{d\Omega} \Delta\Omega, \quad (6)$$

式中: I_S 为实际测量的散射强度, I_0 为入射中子束流强度, T 为样品的透过率, d 为样品厚度, $d\sum/d\Omega$ 为样品的绝对微分散射截面, $\Delta\Omega$ 为从样品处指向探测器单元的立体角,而 I_0 由下式给定:

$$I_0(\lambda) = \varphi(\lambda) A_2 \epsilon t, \quad (7)$$

式中: $\varphi(\lambda)$ 为样品位置的注量率, A_2 为被辐照样品的面积, ϵ 为探测器效率, t 为测量时间。根据式(6)和(7)可以将测量的散射强度转换为绝对微分散射截面。山嵛酸银粉末的衍射峰可以表示为:

$$I(Q) = \frac{C}{1 + (|Q - nQ_0| / \xi)^m} + B, \quad (8)$$

式中: $I(Q)$ 为山嵛酸银的强度, Q_0 为衍射峰值所对应的 Q , n 为与衍射峰相对应的值(为 1、2、3), ξ 是面间距, m 为待定系数, C 、 B 为常数。通过调整 C 、 B 和 m 的值,可以得到尖锐的衍射峰。由于谱仪分辨率的作用,使得尖锐的山嵛酸银衍射峰展宽,使用分辨率高斯函数求和对散射谱进行拟合:

$$S(Q) = \sum A_n \left(\frac{1}{2\pi\sigma_{Q_n}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{(Q_n - nQ_b)^2}{2\sigma_{Q_n}^2} \right], \quad (9)$$

式中: A_n 为比例因子, Q_b 为衍射峰附近的拟合值,通过选择合适的 Q_b 和 $\Delta\lambda/\lambda$,得到拟合曲线如图 6~9 所示。

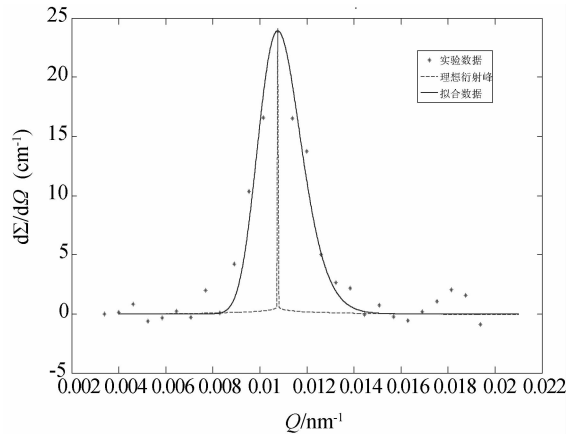


图 6 SiBe 在 3 000 r · min⁻¹ 下的拟合数据

Fig.6 Fitting data of SiBe at 3 000 r · min⁻¹

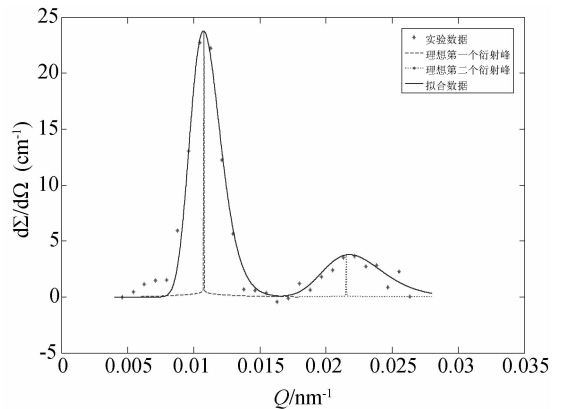


图 7 SiBe 在 4 000 r · min⁻¹ 下的拟合数据

Fig.7 Fitting data of SiBe at 4 000 r · min⁻¹

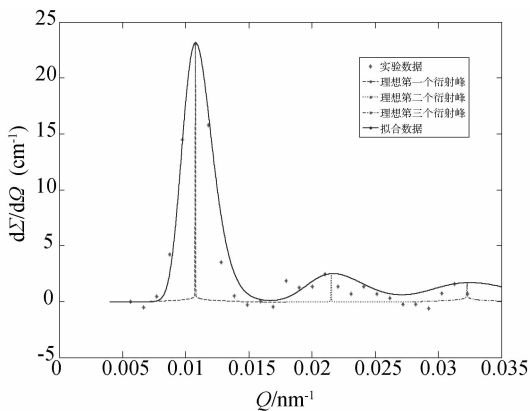


图 8 SiBe 在 5 000 r · min⁻¹下的拟合数据

Fig. 8 Fitting data of SiBe at 5 000 r · min⁻¹

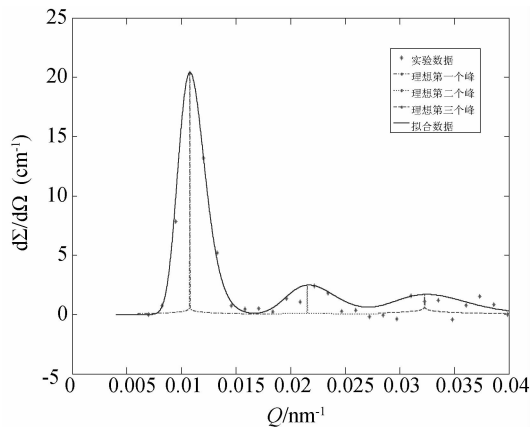


图 9 SiBe 在 6 000 r · min⁻¹下的拟合数据

Fig. 9 Fitting data of SiBe at 6 000 r · min⁻¹

通过拟合,除速度选择器在 3 000 r · min⁻¹ 情况下得到的 $\Delta\lambda/\lambda$ 值为 20%,其他转速得到的 $\Delta\lambda/\lambda$ 值为 25%,根据波长分辨率是速度选择器本身的性质,因此可以对所得到的 4 个波长分辨率进行简单平均,可得到该速度选择器波长分辨率为 23.75%。该拟合结果与该速度选择器波长弥散在

12%~30%之间是吻合的。

4.3 谱仪 Q 分辨率

中子小角散射谱仪 Q 分辨率与谱仪布局密切相关,特别是准直长度、样品到探测器之间距离以及准直光阑半径,还与速度选择器所选择波长有关,它不是常量,而是与 Q 有关的函数。

$$\frac{\sigma_{Q_x}}{Q} = \frac{1}{Q} \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda L_2}\right)^2 \left[\left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2 \frac{R_1^2}{4} + \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1}\right)^2 \frac{R_2^2}{4} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta x_3}{2}\right)^2 \right] + Q_x^2 \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2}, \quad (10)$$

式中: L_1 、 L_2 分别是准直长度和样品到探测器之间的距离, R_1 、 R_2 分别是源光阑和样品光阑半径, Δx_3 是探测器单元尺寸。根据式(10)可以算出在这次实验中,4种不同转速下所得到的谱仪 Q 分辨率如图 10 所示。

从图 10 可以看出,在小 Q 区域,Q 分辨率较大,这是因为在小 Q 区域几何布局占有绝对优势;在同一个 Q 值下,波长越长,其 Q 分辨率越小。在大 Q 区域,波长分辨率占有优势,几何布局影响小。

5 结 论

在中子小角散射谱仪的机械速度选择器分别在 3 000、4 000、5 000 和 6 000 r · min⁻¹ 的转速下,对山嵛酸银粉末进行测试,对得到的散射谱进行分析,得到了谱仪的 3 个关键参数:速度选择器选择波长和波长分辨率、谱仪布局下的 Q 分辨率。这 4 种速度所选择的波长分别是 0.776、0.582、0.466 和 0.388 nm;并通过数据拟合得到该速度选择器波长分辨率为 23.75%;在此小角谱仪布局情况下,其谱仪 Q 分辨率曲线也已经得到。谱仪的这 3 个关键参数对实验的数据的正确反演分析具有极大的用处。

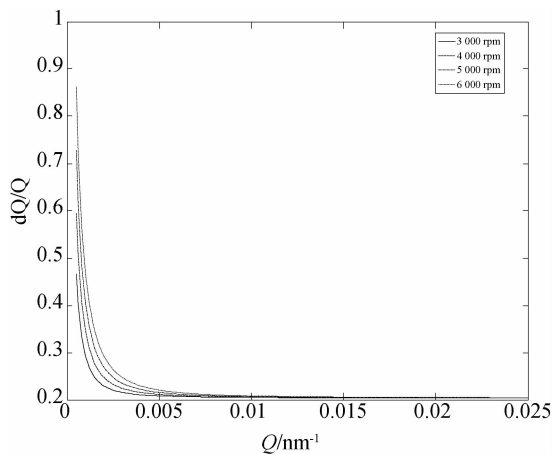


图 10 Q 分辨率与 Q 的关系

Fig. 10 Relationship of Q resolution and Q

参考文献:

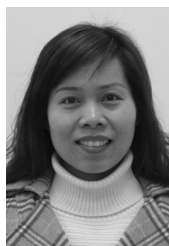
- [1] 闫冠云,黄朝强,孙光爱,等. 降感 RDX 微观结构的 X 射线小角散射分析[J]. 含能材料,2010,18(05):492-496.
YAN G Y, HUANG CH Q, SUN G A, *et al.*. RDX Micro-structure by SmallAngle X-Ray Scattering [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010,18(05):492-496. (in Chinese)
- [2] 闫冠云,田强,黄朝强,等. 热损伤奥克托金(HMX)缺陷的 X 射线小角散射研究[J]. 物理学报,2012,61(13):136101:1-7.
YAN G Y, TIAN Q, HUANG CH Q, *et al.*. A small-angle X-ray scattering study of micro-defects in thermally treated HMX [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012,61(13):136101:1-7. (in Chinese)
- [3] 沈业青,邓敏,陆安群. 利用同步辐射 X 射线小角散射研究超低水灰比水化水泥早期微结构[J]. 硅酸盐学报,2012,40(5):691-695.
SHEN Y Q, DENG M, LU A Q. Early age micro-structure of hydrating cement with ultra-low water to cement ratio investigated by synchrotron SAXS [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012,40(05):691-695. (in Chinese)
- [4] 程伟东,孙民华,李佳云,等. Cu₆₀Zr₃₀Ti₁₀ 非晶合金弛豫和晶化过程的小角 X 射线散射研究[J]. 物理学报,2006,55(12):6732-6676.
CHENG W D, SUN M H, LI J Y, *et al.*. Small angle X-ray scattering research of the relaxation and crystallization process in Cu₆₀ Zr₃₀Ti₁₀ amorphous alloy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006,55(12):6732-6676. (in Chinese)
- [5] 孙光爱,陈波,吴二冬,等. 蠕变镍基单晶高温合金微观结构与界面特征的 X 射线小角散射研究[J]. 物理学报,2011,60(1):016102-016108.
SUN G A, CHEN B, WU E D, *et al.*. Small angle X-ray scattering study of the microstructure and interface characteristics of single crystal superalloys during creep process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(01): 016102-016108. (in Chinese)
- [6] XIA Q Z, CHEN B, LEBEDEV V T, *et al.*. Investigation on defects in mg and al alloys under dynamic loading by the samll-angle scattering method [J]. *Physica B*, 2006, (385-386):614-616.
- [7] 李新喜,王燕,黄朝强,等. 展盘产生的中子脉冲特性[J]. 光学精密工程,2009,17(9):2112-2119.
LI X X, WANG Y, HUANG CH Q, *et al.*. Neutron pulse speciality produced by chop disk [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2112-2119. (in Chinese)
- [8] 李新喜,王燕,黄朝强,等. 中子反射谱仪的闸门与会聚导管组合设计[J]. 光学精密工程,2009,17(12):2983-2989.
LI X X, WANG Y, HUANG CH Q, *et al.*. Optimized combination of shutters and focus neutron guides for neutron reflectometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(12):2983-2989. (in Chinese)
- [9] 王晓影,李建,谢超美,等. 中子衍射应力谱仪垂直聚焦单色器的优化设计[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1880-1885.
WANG X Y, LI J, XIE CH M, *et al.*. Optimal simulation of vertical monochromator of neutron diffraction residual stress instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1880-1885. (in Chinese)
- [10] 陈波,夏庆中,LEBEDEV V T. 富勒烯-PVP 聚合物链团结构的中子小角散射实验研究[J]. 物理学报,2005,54(6):2821-2825.
CHEN B, XIA Q ZH, LEBEDEV V T. Experimental study of fullerene-PVP polymers by small-angle neutron scattering [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005,54(6):2821-2825. (in Chinese)
- [11] NAGORNYI A V, PETRENKO V I, AVDEEV M V, *et al.*. Analysis of small_angle neutron scattering from very dilute magnetic fluids [J]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2010,4(6):976-981.
- [12] KULVELIS Y V, LEBEDEV V T, TRUNOV V A, *et al.*. Structure of complexes of sulphuretted tetraphenylporphine with Poly_N_vinylpyrrolidone according to the data of Small_Angle Neutron scattering [J]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011, 5(1):113-119.
- [13] MARCANO N, GÓMEZSAL J C, ESPESO J I, *et al.*. Mesoscopic magnetic states in metallic alloys with strong electronic correlations: a percolative scenario for CeNi_{1-x}Cu_x [J]. *Physical Revive Letters*, 2007,98: 166406-199409.
- [14] ULBRICHT A, HEINTZE C, BERGNER F, *et al.*. SANS investigation of a neutron-irradiated Fe - 9 at%Cr alloy [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2010,407:29-33.
- [15] KULVELIS Y V, LEBEDEV V T, TRUNOV V

- A, *et al.*. Investigation of polymer hydrogels with memory effect for cefazolin immobilization by Small_angle neutron scattering [J]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2012, 6(5):825-832.
- [16] TOMCHUK O V, AVDEEV M V, AKSENOV V L, *et al.*. Comparative structural characterization of the water dispersions of detonation nanodiamonds by Small_Angle neutron scattering [J]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2012, 6(5): 821-824.
- [17] LEBEDEV V M, LEBEDEV V T, ORLOV S P. Small_Angle neutron scattering studies on the structure of radiation defects in Neutron_Irradiated synthetic quartz [J]. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2012, 6(5):718-721.
- [18] 丁大钊,叶春堂,赵志祥. 中子物理学[M]. 北京:原子能出版社,2001:748.
DING D ZH, YE CH T, ZHAO ZH X. *Neutron Physics* [M]. Beijing: Atom Energy Press, 2001. (in Chinese).
- [19] ROSTA L. Multi-disk neutron velocity selectors [J]. *Physica B*, 1989, 156-157: 615-618.
- [20] HAMMOUDA B. Multidisk neutron velocity selectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1992, 321:275-283.
- [21] GILLES R, KEIDERLING U A. Wiedenmann silver behenate powder as a possible low-angle calibration standard for small-angle neutron scattering [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 1998, 31:957-959.
- [22] PEDERSEN J S. Resolution effects and analysis of small-angle neutron scattering data [J]. *suppliment au Journal de Physique I*, 1998, 3(12):491-498.
- [23] 陈良,彭梅,孙良卫,等. 机械速度选择器特征参数计算[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(7):925-928.
CHEN L, PENG M, SUN L W, *et al.*. Characteristic parameters calculation of mechanical velocity selector [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2010, 30(7):925-928. (in Chinese)
- [24] 陈良,彭梅,王燕,等. 中子小角散射谱仪Q分辨率计算和对形状因子影响分析[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(5):530-533.
CHEN L, PENG M, WANG Y, *et al.*. Q resolution calculation of small angle neutron scattering spectrometer and analysis of form factor [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2011, 31(5):530-533. (in Chinese)
- [25] MILDNER D F R, HAMMOUDA B, KLINE S R. A refractive focusing lens system for small-angle neutron scattering [J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2005, 38:979-987.
- [26] PEDERSEN J S. Resolution effects and analysis of small-angle neutron scattering data [J]. *Journal De Physique IV*, 1993, 3(12):491-498.
- [27] 魏国海,刘祥锋,李天富,等. 中子小角散射实验及原始数据的处理[J]. 核技术, 2010, 33(4):253-257.
WEI G H, LIU X F, LI T F, *et al.*. Small angle neutron scattering experiment and raw data reduction [J]. *Nuclear Techniques*, 2010, 33(4):253-257. (in Chinese)

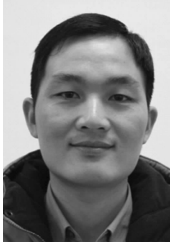
作者简介:



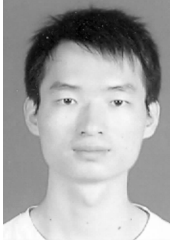
陈良(1970—),男,四川仪陇人,工程师,1991年于辽宁本溪冶金专科学校毕业,2006年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事中子小角散射技术方面的研究。E-mail: chltiger@163.com



彭梅(1974—),女,四川广安人,助理研究员,1997年于重庆大学获学士学位,2003年于重庆大学获得硕士学位,主要从事中子小角散射技术实验方面的研究。E-mail: pm740509@163.com



孙良卫(1981—),男,江苏连云港人,助理研究员,2003年于南京大学获学士学位,主要从事中子小角散射技术方面的研究。E-mail: sunliangwei@163.com



王 燕(1983—),男,湖南张家界人,助理研究员,2006年于上海交通大学获硕士学位,主要从事中子反射技术及应用方面的研究。E-mail: wangyan3591@163.com



陈 波(1958—),男,四川成都人,博士,研究员,博士生导师,1988年于成都科技大学获得硕士学位,1998年于四川大学获得博士学位,主要从事中子散射技术与应用方面的研究。E-mail: chenbo_58@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)