

材料与构件深部应力场及缺陷 无损探测中子谱仪径向准直器的设计

李映婵, 陈东风*, 刘晓龙*, 李眉娟, 李玉庆, 韩松柏, 陈星雨, 贺林峰, 孙凯

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

摘要: 为设计材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪的径向准直器, 实现大型工程构件的远距离准确取样, 本文分析了径向准直器的实空间和相空间取样原理, 介绍了目前径向准直器取样体积的解析与模拟计算方法, 并利用 0.2 mm 尼龙线测试了德国 E3 残余应力谱仪径向准直器的取样尺寸, 基于实验结果确定了采用 JRR3 解析方法作为径向准直器取样尺寸的计算依据。根据解析计算结果, 研究了设计参数对径向准直器取样尺寸和传输效率的影响规律, 并按照谱仪的空间几何结构, 最终设计了谱仪 1、2、3、4、5 mm 径向准直器取样系统。

关键词: 材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪; 径向准直器; 取样尺寸; 传输效率

中图分类号: O571.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2019)11-2295-07

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0068

Design of Radial Collimator of Neutron Diffractometer for Residual Stress and Defect in Material and Component

LI Yingchan, CHEN Dongfeng*, LIU Xiaolong*, LI Meijuan, LI Yuqing,
HAN Songbai, CHEN Xingyu, HE Linfeng, SUN Kai

(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The gauge principle of the radial collimator in real space and phase space was analyzed to design the radial collimator of the neutron diffractometer for residual stress and defect in material and component in order to set the gauge volume in large engineering component at far distance. The analytical formulas and simulations were introduced to calculate the gauge volume of the radial collimator. The nylon wire with diameter of 0.2 mm was used to test the gauge volume of the radial collimator at E3 instrument, Germany. According to the experimental result, the JRR3 analytical formula was chosen to design the gauge volume of the radial collimator. The effect of the parameters on gauge volume and transmission efficiency was studied systematically. Finally, the radial

收稿日期: 2019-01-30; 修回日期: 2019-05-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0403704); 国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项资助项目(51327902); 国家自然科学基金青年基金资助项目(11605293)

作者简介: 李映婵(1976—), 女, 广东深圳人, 高级经济师, 博士, 中子散射专业

* 通信作者: 陈东风, E-mail: dfchen@ciae.ac.cn; 刘晓龙, E-mail: liuxiaolong@ciae.ac.cn

网络出版时间: 2019-09-04; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190903.1428.008.html>

collimators with gauge volume were designed in combination of the spatial geometrical layout with the parameters of 1, 2, 3, 4 and 5 mm.

Key words: neutron diffractometer for residual stress and defect in material and component; radial collimator; gauge volume; transmission efficiency

现代工程结构和复杂装备之所以能安全、稳定地发挥功效,是因为建造这些结构和装备的材料具备承受外力载荷的能力。人们对结构材料研究的一个重要目标,就是提高材料能长久地承受最大应力的能力。为测量结构材料深部三维内应力分布,在中国先进研究堆上建造材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪,用于探测材料/构件深部残余应力场和宏观应力场以及材料组成相应力与晶体结构,服务于工程构件精确设计和制造及服役性能的精确评估^[1]。工程构件的准确取样是中子应力谱仪的核心技术之一,传统的取样狭缝系统通过调整样品前入射狭缝(第1狭缝)和样品与探测器之间衍射狭缝(第2狭缝)的宽度实现设定的取样体积^[2-5]。名义上的取样体积(NGV)由狭缝的宽度决定,实际的取样体积(IGV)受狭缝宽度、狭缝与样品的距离以及入射束/衍射束的发散度的影响^[6-8]。随着狭缝与样品距离的增加,取样体积随之展宽,在取样体积内沿入射束方向进入探测器的中子强度分布即空间分辨函数逐渐从帽子形变为高斯形,边缘处的中子强度分布由尖锐的类玻尔兹曼曲线变为平滑的曲线^[9]。因此,狭缝距离样品越近越好,然而,在测量大型样品时,为留出安放样品的空间,狭缝只能放在较远的距离,从而导致取样展宽,特别

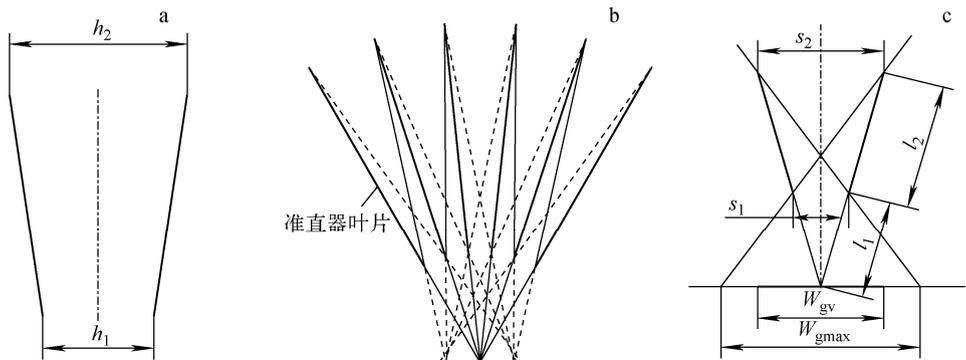
是近表面的取样使几何取样的重心与样品衍射强度的重心不重合,引起与真实应力无关的峰偏移。为克服狭缝的远距离取样展宽问题,英国 ISIS 的 EngineX 残余应力谱仪首次采用径向准直器进行取样,解决了远距离取样和多个衍射峰同时测量的问题^[10]。目前,散裂源上的残余应力谱仪均配置了径向准直器,反应堆上的大部分残余应力谱仪有狭缝和径向准直器两套取样系统。

为将径向准直器取样系统应用于材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪,实现大型工程构件的远距离准确取样,本工作通过分析径向准直器的取样原理,利用解析与模拟方法以及实验测量确定径向准直器取样尺寸的计算依据,设计谱仪 1、2、3、4、5 mm 径向准直器取样系统的参数。

1 径向准直器取样原理和空间分辨

1.1 取样原理

径向准直器的取样原理如图 1 所示, h_1 为径向准直器入口处高度, h_2 为径向准直器出口处高度, s_1 为叶片入口处距离, s_2 为叶片出口处距离, l_1 为径向准直器与样品点的距离, l_2 为径向准直器的长度^[11]。 W_{gmax} 为最大能进入准直器的宽度, W_{gv} 为中子强度分布的半高宽即



a——垂直方向截面;b——水平方向截面;c——取样尺寸几何

图 1 径向准直器取样原理

Fig. 1 Principle of gauge volume of radial collimator

取样尺寸。相邻两个叶片选择使衍射中子(白光)进入探测器的样品区域,由于所有的叶片指向中心,所以每个栅格的取样区域基本相同。

径向准直器与样品点在较远的距离可实现精确的取样,径向准直器的取样体积为一固定值,不受材料本身引起衍射束发散度的影响。然而,特定的几何结构只能实现对应的固定取样体积,1台谱仪通常配置几种离散取样尺寸如1、2、3 mm等径向准直器。

1.2 实空间和相空间的空间分辨

狭缝取样沿入射束的空间分辨曲线随狭缝与样品点的距离而变化,径向准直器沿入射束方向的空间分辨曲线如何分布以及该分布的重心与取样的几何中心是否重合至关重要。图2示出了实空间和相空间的取样,简化的径向准直器包括7个叶片,y轴表示入射中子束方向^[12]。相空间的横坐标表示入射中子束的坐标位置,纵坐标表示衍射中子束的衍射角。从纯几何的角度分析,每个栅格所引起的相空间为一棱形。由于白光中子束在各衍射角均可发生衍射,所有棱形累加后的空间分辨为三角形对称分布,如图2a所示。然而,单色中子束只能在衍射角范围产生衍射峰,图2b为约2个栅格参与取样衍射,在径向准直器固定的情况下,累加后的空间分辨为非对称分布,造成重心的几何偏移。在实际测量过程中,径向准直器将以样品台中心轴为旋转轴进行震荡,各栅格对应的棱形在衍射角区间内上下移动,叠加后的空间分辨函数仍为三角对称分布。但是,如果

衍射束的发散度小于相邻叶片的夹角,并且径向准直器的震荡范围不足以覆盖较大的衍射角范围,将出现图2b所示的非对称分布,引起重心的几何偏移。

2 取样尺寸的计算方法

径向准直器的取样尺寸计算方法包括解析计算和模拟方法,本文通过径向准直器的取样实验测量对已有的计算方法进行验证,确定本工作采用的径向准直器取样尺寸计算方法。

2.1 解析计算

英国 EngineX 谱仪是第1台配置径向准直器的中子残余应力谱仪,它采用式(1)计算取样尺寸 W_{gv} ^[12]。

$$W_{gv} = s_1(l_1 + l_2)/l_2 \quad (1)$$

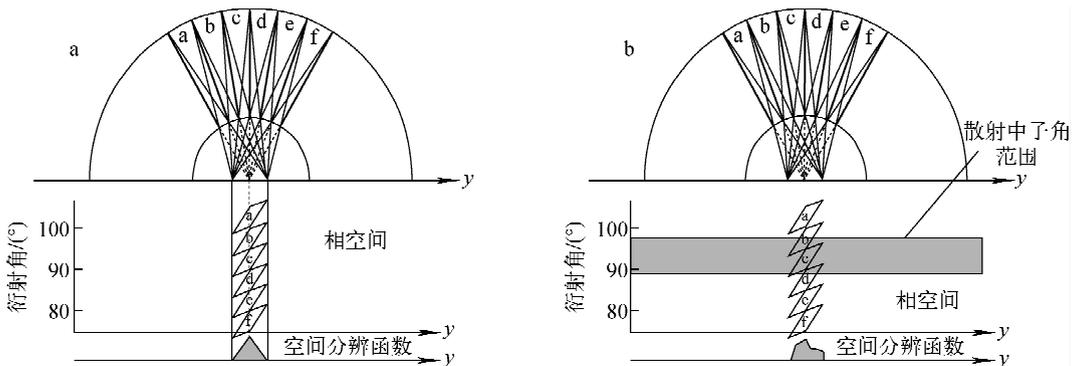
日本 JRR3 中子应力谱仪采用式(2)计算取样尺寸,式(2)的计算结果是式(1)的1.18倍^[11]。

$$W_{gv} = (2\ln 2)^{0.5} s_1(l_1 + l_2)/l_2 = 1.18s_1(l_1 + l_2)/l_2 \quad (2)$$

2.2 模拟计算

Wang 发展了径向准直器的模拟软件 RADFOCUS,其模拟思路是将待测样品区域划分为点源,利用 MCNP 方法追踪从各点源发射并通过径向准直器的有效中子,最终累加各点源位置的有效中子,得到空间分辨和取样体积^[13]。

Šaroun 编写了中子残余应力谱仪专用的模拟软件 SimRes,该软件的特点是仅追踪到达



a——白光中子束;b——单色中子束

图2 径向准直器空间分辨示意图

Fig. 2 Spatial resolution of radial collimator

探测器的有效中子^[14-15]。因此,如图3所示,在正对径向准直器的区域设置一系列测试点,模拟样品在各测试点产生的中子计数,通过该软件输出径向准直器的取样空间分布从而获得取样尺寸 W_{gv} 。

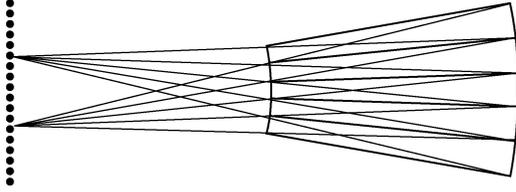
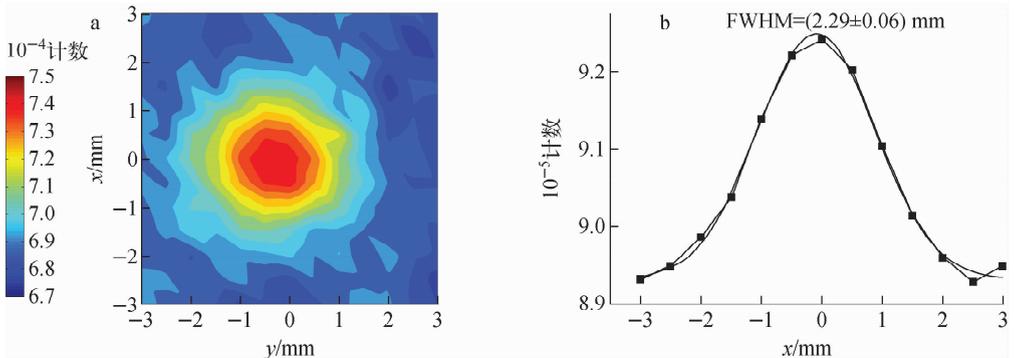


图3 SimRes 软件模拟径向准直器的取样
Fig. 3 Simulation of gauge volume
of radial collimator using SimRes software

2.3 实验测量结果

为确定径向准直器取样尺寸的计算依据,利用直径 0.2 mm(远小于取样尺寸)尼龙线的非相干散射作为散射源,通过实验测量尼龙线在各点产生的探测器计数强度获得准确的取样尺寸。为提高计数强度的统计性,采用图4所示的二维网格点(尼龙线位置)开展取样尺寸的实验测量,入射狭缝宽度为 2 mm、高度为 10 mm,入射狭缝到样品台中心的距离为 100 mm;径向准直器 $s_1 = 1.447$ mm, $s_2 = 5.425$ mm, $l_1 = 200$ mm, $l_2 = 550$ mm。图5a为 中子光路几何平面内的计数强度云图分布,将二维云图沿 y 方向累加获得径向准直器的取样强度分布,如图5b所示,利用高斯函数拟合获得径向准直器的取样尺寸为 (2.29 ± 0.06) mm。



a——二维云图;b——沿 y 方向累加的强度分布

图5 中子光路几何平面内的强度分布

Fig. 5 Distribution of intensity in geometrical plane of neutron optics

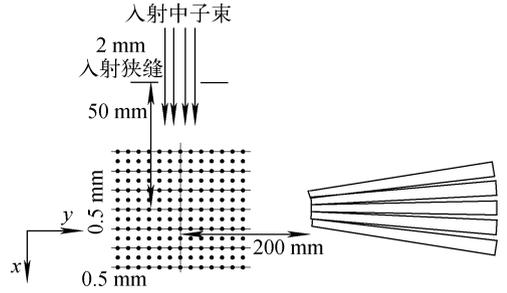


图4 E3 中子残余应力谱仪
径向准直器取样尺寸实验

Fig. 4 Experimental design of gauge
volume of radial collimator at E3 neutron
residual stress diffractometer

为比较各种解析与模拟方法的准确性,利用中子束实验测量 E3 谱仪径向准直器的取样尺寸^[16]。E3 谱仪径向准直器取样尺寸的解析与模拟计算结果列于表1,从表1可看出,JRR3的解析计算结果与实验测量结果吻合。因此,本工作采用 JRR3 的解析计算公式设计材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪径向准直器的参数。

3 径向准直器参数对取样和传输效率的影响

由于径向准直器需绕样品台中心轴震荡旋转,对特定的谱仪来说,各种取样的径向准直器需选择相同的 l_1 与 l_2 。为优化设计径向准直器,需综合研究各参数对取样尺寸和传输效率的影响规律。

表 1 E3 谱仪径向准直器取样尺寸的实验测量、解析与模拟计算结果

Table 1 Experimental measurement, analytical calculation and simulation calculation of gauge volume for radial collimator at E3 instrument

实验测量 W_{gv}/mm	解析计算 W_{gv}/mm		模拟计算 W_{gv}/mm	
	EngineX	JRR3	SimRes	RADFOCUS
2.29±0.06	1.97	2.32	1.93	1.85

3.1 取样尺寸

固定 s_1 , 取样体积随 l_1 减小而减小, 随 l_2 增大而增大, 那么, 在 s_1 即叶片间距较大的情况下, 较小的取样体积可通过较小的 l_1 和较大的 l_2 实现。表 2 给出各种设计参数的比较, 从表 2 可看出, 对于相同的取样体积, 较小的 l_1 和较大的 l_2 可选择较大的 s_1 , 这有利于降低制造成本和难度。对于固定的 l_1 和 l_2 , 取样尺寸与 s_1 呈正比。

3.2 传输效率

径向准直器的传输效率 f 可近似为式(3)。

$$f \approx 1 - t/s_1 \quad (3)$$

从式(3)可看出, 传输效率主要受叶片厚度 t 和 s_1 的影响。 t 越小, 传输效率越高; s_1 越大, 传输效率越高。国际上提供径向准直器的公司中, 日本准直器公司使用总厚度为 0.05 mm 的叶片, 叶片两面各喷涂了 0.01 mm 吸收热中子的 Gy_2O_3 ; 丹麦准直器公司使用总厚度为 0.08 mm 的叶片, 叶片两面各喷涂了 0.015 mm 吸收热中子的 Gy_2O_3 。

为测试 0.05 mm 厚度叶片的热中子穿透率, 在中国先进研究堆中子水平孔道上的中子成像装置上测试了热中子垂直入射叶片的透射率, 叶片放入中子束流后的中子透射率分布如图 6 所示, 平均透射率为 11.9%。衍射中子束与径向准直器叶片之间的夹角非常小, 穿透叶片的中子束路径将远大于叶片厚度, 中子束强度的衰减与穿透深度呈指数下降, 可认为杂散的热中子将被叶片全部吸收。因此, 日本准直器公司 0.05 mm 叶片和丹麦准直器公司 0.08 mm 叶片均能满足设计要求。

各种设计参数的径向准直器的传输效率列于表 2。从表 2 可看出, 取样尺寸为 0.5 mm 和 1 mm 时, 0.05 mm 叶片对应的传输效率高于 0.08 mm 的约 10%, 传输效率对 s_1 较敏感且

效率较低, 在取样尺寸不小于 2 mm 时, s_1 对传输效率的影响不明显。因此, 径向准直器叶片的设计厚度为 0.05 mm。

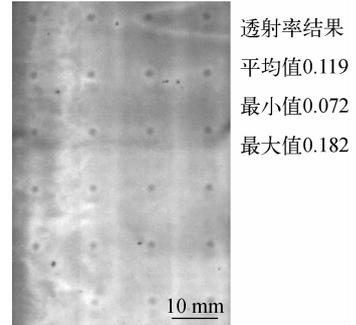


图 6 0.05 mm 叶片的热中子透射率分布
Fig. 6 Transmission efficiency distribution of thermal neutrons through layer with thickness of 0.05 mm

4 径向准直器的设计参数

径向准直器相比于狭缝的优势在于远距离对大型样品进行精确取样, 避免发生样品与光学部件的碰撞, 因此, 需根据谱仪的研究对象确定合适的 l_1 。德国 E3 谱仪的径向准直器 $l_1 = 200$ mm, 由于其样品台尺寸较小, 澳大利亚 Kowari 的径向准直器 $l_1 = 500$ mm, 根据其大承重样品台和样品环境进行设计^[17]。由于工程谱仪的样品台较大, 样品环境也较复杂, 较大的 l_1 能满足大样品和样品环境的需要, l_1 选择为 500 mm。径向准直器放在样品台与探测器之间, 较小的 l_2 会使 s_1 较小, 从而提高制造难度、降低传输效率。较大的 l_2 会与探测器及其屏蔽的空间发生冲突。最终, 根据谱仪的预留空间, 选择 $l_2 = 250$ mm。为满足探测器在高度方向全覆盖取样, 径向准直器入口的高度选择 150 mm, 出口的高度选择 230 mm。

表 2 各种设计参数的径向准直器的传输效率

Table 2 Transmission efficiency of radial collimator with different parameters

取样尺寸/ mm	s_1 /mm	l_1 /mm	l_2 /mm	5°通道数	传输效率/%	
					$t=0.05$ mm	$t=0.08$ mm
0.5	0.311	200	550	56	83.9	74.3
0.5	0.254	300	450	103	80.3	68.5
0.5	0.198	400	350	176	74.7	59.5
0.5	0.141	500	250	309	64.6	43.4
1	0.621	200	550	28	92.0	87.1
1	0.508	300	450	51	90.2	84.3
1	0.395	400	350	88	87.4	79.8
1	0.282	500	250	154	82.3	71.7
2	1.243	200	550	14	96.0	93.6
2	1.017	300	450	26	95.1	92.1
2	0.791	400	350	44	93.7	89.9
2	0.565	500	250	77	91.2	85.8
3	1.864	200	550	9	97.3	95.7
3	1.525	300	450	17	96.7	94.8
3	1.186	400	350	29	95.8	93.3
3	0.847	500	250	51	94.1	90.6
4	2.486	200	550	7	98.0	96.8
4	2.034	300	450	13	97.5	96.1
4	1.582	400	350	22	96.8	94.9
4	1.130	500	250	39	95.6	92.9
5	3.107	200	550	6	98.4	97.4
5	2.542	300	450	10	98.0	96.9
5	1.977	400	350	18	97.5	96.0
5	1.412	500	250	31	96.5	94.3

根据谱仪分辨率的计算,1个衍射峰覆盖的角度范围约 2° ,考虑到剧烈塑性变形样品衍射峰的展宽以及径向准直器的往返匀速振荡范围,径向准直器的衍射角覆盖范围设计为 5° 。

根据表2描述的 $l_1=500$ mm, $l_2=250$ mm所对应各种取样体积的传输效率,取样尺寸为

0.5 mm时,传输效率仅64.6%,且制作难度非常大,同时考虑到大样品的取样尺寸通常大于0.5 mm,因此,舍弃0.5 mm的取样尺寸。综合考虑上述因素,最终确定配置取样体积为1、2、3、4、5 mm的径向准直器取样系统,其主要参数列于表3。

表 3 径向准直器的设计参数

Table 3 Parameters designed for radial collimator

取样尺寸/mm	s_1 /mm	s_2 /mm	l_1 /mm	l_2 /mm	5°通道数	传输效率/%
1	0.282	0.424	500	250	154	82.3
2	0.565	0.847	500	250	77	91.2
3	0.847	1.271	500	250	51	94.1
4	1.130	1.695	500	250	39	95.6
5	1.412	2.119	500	250	31	96.5

5 结论

1) 为设计材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪的径向准直器,分析了径向准直器的取样原理和空间分辨,并调研了径向准直器设计的解析公式与模拟方法,通过与实验结果比较,确定设计方法采用 JRR3 解析计算公式。

2) 综合研究了设计参数对径向准直器取样体积和传输效率的影响规律,并按照谱仪的空间几何结构,最终确定配置取样体积为 1、2、3、4、5 mm 的径向准直器取样系统。

3) 计算了取样体积为 1、2、3、4、5 mm 径向准直器的参数,最终完成了材料与构件深部应力场及缺陷无损探测中子谱仪的径向准直器设计。

参考文献:

[1] LIU Xiaolong, LIU Yuntao, HAN Songbai, et al. Design and optimization of the monochromator for the new residual stress diffractometer[J]. *Material Science Forum*, 2015, 850: 148-152.

[2] EZEILO A N, WEBSTER G A. Advances in neutron diffraction for engineering residual stress measurements[J]. *Textures and Microstructures*, 1999, 33: 151-171.

[3] PRIESMEYER H G, LARSEN J, MEGGERS K. Neutron diffraction for non-destructive strain/stress measurements in industrial devices [J]. *Journal of Neutron Research*, 1994, 2(1): 31-52.

[4] 刘晓龙,李眉娟,刘蕴韬,等. 中国先进研究堆中子残余应力谱仪实验软件设计[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(5): 915-920.

LIU Xiaolong, LI Meijuan, LIU Yuntao, et al. Experimental software design of neutron residual stress diffractometer at China Advanced Research Reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(5): 915-920(in Chinese).

[5] LIU Xiaolong, WIMPORY R C, GONG Hai, et al. The determination of residual stress in quenched and cold-compressed 7050 aluminum alloy T-section forgings by the contour method and neutron diffraction[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(11): 6 049-6 057.

[6] HUTCHINGS M T, WITHERS P J, HOLDEN T M, et al. Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction[M]. 1st

ed. London: Taylor and Francis, 2005.

[7] WEBSTER G A. ISO/TTA3 Polycrystalline materials: Determinations of residual stresses by neutron diffraction[S]. Geneva: Technology Trends Assessment, 2001.

[8] WEBSTER P J, MILLS G, WANG X D, et al. Impediments to efficient through-surface strain scanning[J]. *Journal of Neutron Research*, 1996, 3: 223-240.

[9] LORENTZEN T. Numerical analysis of instrumental resolution effects on strain measurements by diffraction near surface and interface[J]. *Journal of Neutron Research*, 1997, 5: 167-180.

[10] SANTISTEBAN J R, DAYMOND M R, JAMES J A, et al. ENGIN-X: A third-generation neutron strain scanner[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2006, 39: 812-825.

[11] TORII S, MORIAI A. The design of the radial collimator for residual stress analysis diffractometer of J-PARC[J]. *Physica B*, 2006, 385-386: 1 287-1 289.

[12] WITHERS P J, JOHNSON M W, WRIGHT J S. Neutron strain scanning using a radially collimated diffracted beam[J]. *Physica B*, 2000, 292: 273-285.

[13] WANG D Q, WANG X L, ROBERTSON J L, et al. Modeling radial collimators for use in stress and texture measurements with neutron diffraction[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2000, 33: 334-337.

[14] ŠAROUN J, KULDA J. Modern developments in X-ray and neutron optics[M]. Berlin: Springer, 2008.

[15] ŠAROUN J, KULDA J. RESTRAX: A program for TAS resolution calculation and scan profile simulation[J]. *Physica B*, 1997, 234-236: 1 102-1 104.

[16] WIMPORY R C, MIKULA P, ŠAROUN J, et al. Efficiency boost of the materials science diffractometer E3 at BENSC: One order of magnitude due to a horizontally and vertically focusing monochromator[J]. *Neutron News*, 2008, 19: 16-19.

[17] BRULE A, KIRSTEIN O. Residual stress diffractometer KOWARI at the Australian research reactor OPAL: Status of the project[J]. *Physica B*, 2006, 385-386: 1 040-1 042.