

金属构件残余应力测量技术进展*

王楠¹, 罗岚¹, 刘勇^{2,3}, 彭如意¹, 吴进¹

(1. 南昌大学材料科学与工程学院 南昌 330001; 2. 南昌大学 江西省轻质高强结构材料重点实验室 南昌 330001; 3. 南昌大学 江西省近净成形重点实验室 南昌 330001)

摘要:残余应力是消除外力或不均匀的温度场等作用后仍留在物体内的自相平衡的内应力,对构件的力学性能有显著影响,会引起零件发生翘曲或扭曲变形,甚至开裂,定量测量残余应力数值对改变构件疲劳寿命,预防构件发生脆性破坏具有重要意义。国内外对残余应力测量进行了深入的研究,提出了多种测试方法。详细介绍了有损及无损残余应力测量技术的测量原理及国内外目前研究现状,分析总结了影响测试精度的主要因素及改进方法;调研了目前市场上较先进的仪器设备及其供应厂家;针对盲孔法孔周围塑性变形及钻孔偏心、压痕法塑性区域半径、X射线衍射法试样内部显微组织结构、中子法零点漂移、超声波法测量尺寸带来的误差的重要改进技术;并对残余应力测量技术发展方向进行了展望。

关键词:残余应力;有损测量;无损测量

中图分类号: TH-39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.65

Research progress on stress measurement technology for metal components

Wang Nan¹, Luo Lan¹, Liu Yong^{2,3}, Peng Ruyi¹, Wu Jin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330001, China; 2. Key Laboratory of Lightweight and High Strength Structural Materials of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330001, China; 3. Key Laboratory of Near Net Forming of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330001, China)

Abstract: Residual stress is an internal stress, which remains existing after eliminating the external force or uneven temperature field and other effects. This residual stress has a significant effect on the mechanical properties of the components, which can cause the warp, distortion, or even cracking in parts. Quantitative measurement of the residual stress is of great significance to change the fatigue life and prevent the brittle failure of the components. A variety of test methods of residual stress measurement. This paper introduces the principle and the research progress of destructive and nondestructive testing methods. The accuracy influencing factors and the improvement in measuring instruments are also investigated. The advanced instruments and their suppliers are surveyed on the market. Aiming at an improvement for the deformation of the blind hole and the borehole eccentricity, plastic area radius, internal microstructure, zero drift, measurement, the improved methods are put forward and the prospect of stress testing technology is also discussed.

Keywords: residual stress; destructive testing; nondestructive testing

0 引言

残余应力是指产生应力因素消失(如:载荷去除、加工终止、温度均匀、相变完成等),但形变、体积变化仍不均匀,为保持平衡而在构件内部存留应力。残余应力是

构件力学性能最主要的影响因素之一,如拉伸残余应力会降低拉伸屈服极限、提高压缩屈服极限,压缩残余应力正好相反;宏观残余应力会产生形变、并影响疲劳寿命,微观残余应力导致组织内产生微裂纹发生脆性破坏^[1]。在服役过程中,残余应力与工作应力叠加容易产生二次变形和应力重新分布,产生变形、开裂、耐腐蚀性能及构

件整体稳定性下降,如当交变荷载工作时区域应力达到屈服点时会产生局部塑性变形;高温工作条件下产生高温蠕变开裂;腐蚀环境下产生应力腐蚀开裂。在发展新材料、制造新部件过程中,定量测量残余应力的数值与分布具有重要意义^[2]。特别是一体化快速加工制造过程,如高速、微层、微区连续熔凝为特征的激光 3D 打印 TC4 钛合金构件,连接基板处容易出现裂纹,材料残余拉应力高达 640 MPa^[3]。可以通过热处理法、自然时效法、振动法来消除残余应力,通过对 HXN5 型机车车架振动时效处理,其平均残余应力下降率约为 65%^[4]。降低有害残余应力,预测残余应力分布趋势和数值大小是十分必要的。本文对残余应力的测试方法按有损、无损两类进行测试方法进行介绍,分析比较了各种应力测试方法的误差来源及应用的局限性,探讨残余应力测量技术的发展方向。

1 有损应力测量法

1.1 盲孔法

盲孔法^[5]在 1934 年由德国学者 Mathar J 提出,现已发展的较为成熟。其原理就是在被测工件的表面贴上应变花,并对工件打孔,孔周围应力松弛,而形成新的应力/应变场分布^[6];通过标定应变释放系数 A 、 B ^[7],基于弹性力学原理可推算出工件原有残余应力及应变。如图 1 所示,由钻孔而分别在 3 个应变片上产生的应变与板上残余主应力有如下关系^[8]:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(-\theta) \\ \varepsilon_2 = \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(225^\circ - \theta) \\ \varepsilon_3 = \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(90^\circ - \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为由应变片 R_1 、 R_2 和 R_3 所测得的释放应变; σ_1 、 σ_2 为残余主应力; E 为材料弹性模量; A 、 B 为应变释放系数,其可由弹性力学 Kirsch 理论解得出^[9]:

$$\begin{cases} A = -\frac{1}{2E} \left[(1 + \mu) \frac{d^2}{4r_m^2} \right] \\ B = \frac{1}{2E} \left[3(1 + \mu) \frac{d^4}{r_m^4} - \frac{d^2}{r_m^2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量, μ 为泊松比, d 为钻孔直径, r_m 为应变片平均直径。钻孔过程中,孔壁经历了弹性变形、塑性变形和切断过程,孔壁周围产生附加应力/应变,附加应力/应变大小受孔径、孔深、距离盲孔中心远近的等因素的影响^[10]。盲孔法测残余应力时,钻孔偏心、孔周围塑性变形均会影响其测试精度^[6]。测量位置的选取应遵循以下原则:测量区域附近应力梯度小;点间距在孔径的 15 倍以上;选择典型位置^[11]。

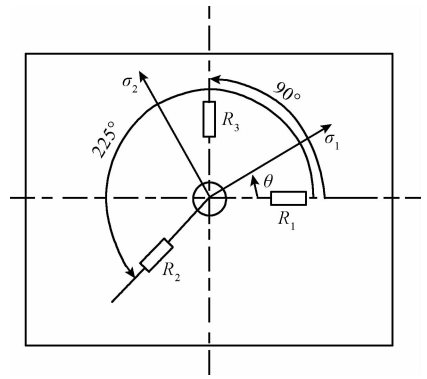


图 1 盲孔法测量原理^[6]

Fig. 1 Measurement principle of blind-hole method^[6]

夏建盟等人^[12]通过对 ABS 焊件的测量,发现焊趾区域残余应力积累,并且残余应力随测量时间延长而增大,7 min 后完全释放;候海量等人^[13]对 921A 钢残余应力经塑形修正,误差可控制在 2.5% 以内。采用实验标定误差,工作量较大,结合有限元数值分析方法,可精确模拟不同尺寸、形状的盲孔周围的应力分布情况,计算得出孔径深比及孔缘孔底形状对释放应力的影响,避免 Kirsh 通孔解所带来的误差^[10]。谭明鹤等人^[7]对 Q370qC 钢采用有限元软件 ANSYS 进行建模分析,其 1/4 模型如图 2 所示,发现 A 几乎不随荷载大小变化,而只有荷载大于 180 MPa 时 B 才随荷载变化明显。山东华云科技有限公司 HK21A 盲孔法应力检测仪应变测量范围:0 ~ ±32 767 $\mu\varepsilon$,分辨率:0.01 $\mu\varepsilon$ /字,适用应变片阻值:120 ± 0.5 Ω ,基本误差:≤ ± (测量值 0.15% ± 2%)。HK21B 盲孔法应力检测仪以计算机为中央微处理机,采用高精度测量放大器、数据采集和处理器,测量中无需调零,可直接测出残余应力值的大小及方向,实现了残余应力测量的自动化。应变测量范围:0 ~ ±30 000 $\mu\varepsilon$,应力测量范围:0 ~ ±6 000 MPa,分辨率:1 $\mu\varepsilon$,适用应变片阻值:120 ± 0.5 Ω ,基本误差:≤ ±0.15%,零点漂移:≤ 2 $\mu\varepsilon$ /h,可以根据被测工件的材料随意设置相应的释放参数。

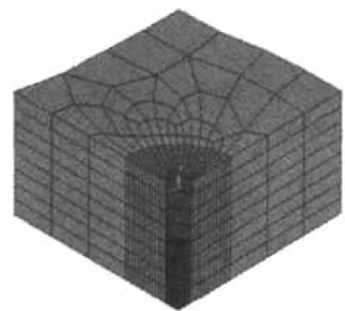


图 2 盲孔处有限元网络划分^[7]

Fig. 2 Blind holes of finite element mesh^[7]

1.2 压痕法

压痕法^[10]是基于硬度测试原理发展起来的,是一种无损或微损的应力测量技术。其原理是局部载荷作用下,存在内应力构件会因应力叠加会产生位移和应变,测量出位移 ΔZ 和应变 $\Delta \varepsilon$,可推算出构件原有表面残余应力(一般的压痕直径和深度为 $\Phi 1.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$)。压痕法测定时需要注意的问题包括^[14]:压痕测试区和周围塑性应变区控制,如果塑性应变区完全与测试区重合,则影响测量结果,塑性区完全隔绝,则测试灵敏度下降;压痕应变增量与残余应力的函数关系确立;标定实验和模拟计算,确立应变增量与材料特性之间的定量关系,以计算模拟代替标定。

陈怀宁等人^[14]探讨塑性区问题时发现:金属材料压痕直径为 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 、残余应力达到材料屈服强度时,塑性区半径约为 4 mm 。于哲夫等人^[15]探讨了不同压痕直径、残余压应力对塑形区域的影响,以及在残余压应力状况下压痕直径和应变增量之间的关系;林丽华等人^[16]采用有限元数值分析法,建立三维八节点模型来简化静载压痕残余应力的力学模型,将钢球作用力简化为一个集中力,研究在 x 轴在预应力 σ_x 的影响下,荷载 P 与位移量 ΔZ 的关系;陶杰等人^[17]利用压力荧光光谱法研究了 $5\% \text{ SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米复合材料压痕周围残余应力的大小及其分布规律。鞍山泰施科技开发有限公司的 KJS-2 型压痕残余应力测试系统应变测量范围: $\pm 16\ 000 \mu\varepsilon$,应变片灵敏系数: $1.85 \sim 2.25$,最小变化 ± 0.01 ,内嵌有压痕应力

计算公式,可由应变值直接得到应力测试结果。中科院金属研究所开发的 KJS 系列压痕法智能应力测试仪,精度: $\pm 15 \text{ MPa}$,表面基本无损坏,压痕的最大直径 $< 1.5 \text{ mm}$,最大深度 $< 0.3 \text{ mm}$ 。中航电测仪器股份有限公司的 BAI20-1BA(11)-ZKY 型应变花,灵敏度系数为 2.05。

1.3 切割法

切割法^[18]是将金属沿变形平面切开,精确测量切割面的变形轮廓,然后将测试轮廓进行拟合,将拟合结果作为有限元模型的边界条件进行弹性计算获得了内部垂直切割平面的应力分布,可以得到切割面应力的分布趋势和特征,适用于大块材料残余应力的定性测量。

2001 年 Prime M. B.^[19]将有限元法和释放技术结合起来提出切割法测试内部应力,该法可以得到某一截面上完整的内部应力分布。Brown D. W. 等人^[20]采用切割法测试了电子束管道对接焊的内部应力,测试结果和中子衍射结果非常接近,Prime M. B. 等人^[21]的研究表明该法的测试误差约为 $\pm 25 \text{ MPa}$,能满足工程和科研的测试要求。切割法由于将结构件破坏,残余应力释放完全,测量精度高。可利用电阻应变计测量释放应力,间接得到样品内的初始残余应力。北京恒奥德仪器仪表有限公司的 HAD-XL2118 系列静态电阻应变仪,应变(测量范围: $\pm 19\ 999 \mu\varepsilon$,平衡范围: $\pm 38\ 000 \mu\varepsilon$,分辨率: $1 \mu\varepsilon$,灵敏系数: $1 \sim 3$,零点漂移 $\leq \pm 3 \mu\varepsilon/4 \text{ h}$, $\leq \pm 1 \mu\varepsilon/^\circ\text{C}$),应力(测量范围: $1 \sim 10\ 000 \text{ t/kN/kg/N}$,灵敏度: $1 \sim 3 \text{ mV/V}$,综合误差: $\pm 0.2\% \pm 2$ 字,扫描速度: 10 点/s)。

表 1 有损测量法

Table 1 Destructive testing technology

名称	应力种类	误差来源	精度	先进仪器厂家
盲孔法	σ_1	钻孔偏心、孔周围塑性变形、应变释放系数 $A、B$	HK21A 范围: $0 \sim \pm 32\ 767 \mu\varepsilon$; 分辨率: $0.01 \mu\varepsilon/\text{字}$; 误差: $\leq \pm (\text{测量值 } 0.15\% \pm 2\%)$;	山东华云科技有限公司
			HK21B 范围: $0 \sim \pm 30\ 000 \mu\varepsilon$; $0 \sim \pm 6\ 000 \text{ MPa}$; 分辨率: $1 \mu\varepsilon$ 误差: $\leq \pm 0.15\%$	(盲孔应力检测仪 HK21A、HK21B); 意大利 Sint 公司(MTS3000-Restan 盲孔应力仪)
压痕法	σ_1	压痕塑性区半径	KJS-2 范围: $\pm 16\ 000 \mu\varepsilon$;	鞍山泰施科技开发有限公司
			应变片灵敏系数: $1.85 \sim 2.25$; KJS-3: 精度 $\pm 15 \text{ MPa}$ $\Phi < 1.5 \text{ mm}$;	(KJS-2 型压痕应力测试仪);
			深度 $< 0.3 \text{ mm}$; BAI20-1BA(11)-ZKY: 灵敏度 2.05	中科院金属所(KJS 系列压痕法智能应力测试仪); 中航电测仪器股份有限公司 (BAI20-1BA(11)-ZKY 型应变花); 济南辉腾机电设备有限公司 (HT-40ISM 系列压痕法应力应变测试系统)
切割法	σ_1, σ_3	无	HAD-XL2118 系列 范围: $\pm 19\ 999 \mu\varepsilon$;	北京恒奥德仪器仪表有限公司
			灵敏系数: $1 \sim 3$; $1 \sim 10\ 000 \text{ t/kN/kg/N}$ 灵敏度: $1 \sim 3 \text{ mV/V}$; 综合误差: $\pm 0.2\% \pm 2$ 字	(HAD-XL2118 系列静态电阻应变仪)

注: σ_1 是材料宏观形变均匀的结果,即宏观残余应力; σ_2 为各个晶粒或晶粒区域之间的不协调形变,即微观残余应力; σ_3 由位错或点缺陷引起,即“晶格畸变应力”或“超微观应力”

2 无损应力测量法

2.1 超声波法

超声波法是通过超声波在材料内部的传播特性,即拉应力引起声波传播时间变长声速变慢,压应力相反,利用应力引起的声双折射效应对应力进行测量^[22]。应力改变引起声速变化很微小,100 MPa 大约只引起声速 0.1% 的变化^[23]。临界折射纵波(L_{CR})是折射角为 90° 时的折射纵波,其对应力最敏感,应用也最为广泛^[24-29]。 L_{CR} 波的应力计算方法如下:

$$R = \frac{1}{K_i} \left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right) \quad (3)$$

式中: t_0 、 t 为无应力状态和应力状态下声波的传播时间, K_i 为声弹性常数。超声波穿透能力较强,可以无损检测构件内部及表面的残余应力,且超声检测仪器便于携带,可用于室外及现场测量。但超声法在测量应力时需做标定实验,且受探头与构件之间声耦合层厚度变化、构件材料组织、环境温度的影响^[30]。

陈辉^[31]提出了一种修正微观组织对 L_{CR} 波影响的方法,通过预实验和计算得到修正的应力系数和零声时偏差值(母材和焊接区域零应力状态传播时间差),提高了超声法测试的精确度。卢超等人^[32]通过边界元分析,分析了 L_{CR} 波在构件中的传播特性,且证实探头晶片尺寸和晶片工作频率均会影响 L_{CR} 波的能量分布;陆浩等人^[33]使用特制变角度超声波斜探头产生了 L_{CR} 波,测量装置如图 3 所示。 L_{CR} 波在薄壁结构测量过程中,由于激发 Lamb 波、Stonely 波等特殊波形,特别是在低应力状态下,杂波叠加,影响信号的稳定,使得测量无法进行^[23]。张世平等人^[23]对测试系统进行了改进,缩小了探头尺寸,提高了探头的灵敏度,且改进系统使用特殊的信号处理方法,实现 2 mm 薄壁构件的残余应力的测量,测量数据波动范围在 0.3 MPa 以内。汪磊等人^[34]提出一种相位-频率法,由相位-频率曲线的斜率来确定声波传播时间,精确度高。潘勤学等人^[35]推导出了齿轮残余应力测量时所需应力系数的求解算法,得出齿轮的应力系数为 12.52 MPa/ns;并且通过对 L_{CR} 波衰减规律的研究,确定了适合残余应力测定的 L_{CR} 波频率 96 kHz。赵东升等人^[36]通过热处理、超声法来消除金属构件的残余应力,均能够将残余应力由拉应力转变为压应力,但超声法消应力仅限于表面。美国的 USM-3 超声波螺栓应力测试仪,自动化程度高,可测量长度为 5 ~ 500 mm 的工件,分辨率为 0.000 1 mm。巨力科技有限公司的 URST 型超声残余应力测试仪,测量范围:2 ~ 150 mm(厚度方向),25 ~ 1 000 mm(长度方向),残余应力监测错误率 0.1 MPa。

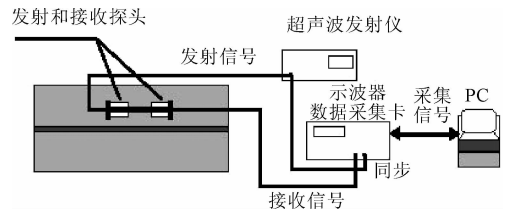


图 3 超声波测量应力装置^[33]

Fig. 3 Ultrasonic measurement devices of stress^[33]

2.2 磁性法

目前应用的磁性方法有两种:磁噪声法和磁应变法。磁噪声法测量基本原理是利用铁磁性物质的磁致伸缩效应。应力会导致铁磁性材料畴壁间距的改变,从而影响巴克豪森(磁感应强度 B 随磁场强度 H 改变呈现不连续的跳跃)发射信号的强弱,其测量装置^[37]如图 4 所示。磁应变法是利用材料的磁各向异性进行应力测量,存在应力时磁导率会发生相应变化,测量时传感器与材料表面构成的磁回路磁阻变化,进而导致磁回路的磁通量发生变化,磁性应变仪示意图如图 5 所示^[38]。磁应变法不能测大残余应力(大于 300 MPa),此时应力与磁导率的关系呈非线性。磁性法设备小巧、测试步骤简单、测量速度快;但难以直接测得多点应力值,仅能测得单点处主应力差与磁测参数间的定量关系^[39],通过水平或垂直的励磁方式来研究材料的磁特性和磁力间的关系,并建立与应力之间的定性、定量关系是该领域的研究热点^[40-43]。该法测试材料种类仅限于测定如钢、铁等铁磁性材料中的应力;此外,与超声波法一样,磁性法虽可以测量材料内部应力,但测量结果受材料微观结构(空隙、空隙、裂纹等)干扰较大。黄海鸿等人^[44]提出一种金属磁记忆检测技术,可以快速检测到构件的危险区域,并可通过磁记忆信号梯度值指示应力集中情况。

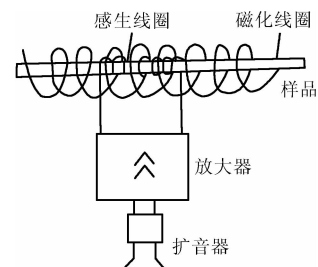
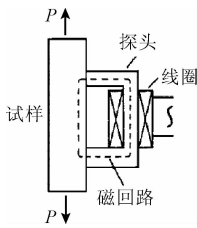


图 4 巴克豪森噪声观察原理^[37]

Fig. 4 Schematic diagram of observation of Barkhausen noise^[37]

俄罗斯 TSC-3M-12 型应力集中磁检测仪(设备尺寸 230 mm × 105 mm × 40 mm),有多达 12 个测量通道,测量步长 1 ~ 128 mm,扫描速度(步长为 1 mm 时)0.2 ~

图5 磁性法探头工作原理^[38]Fig. 5 Measurement principle of probe about magnetism method^[38]

0.5 m/s,每个通道测量的相对误差 < 5%,长度测量的相对误差 < 5%。芬兰 Stresstech 公司研发的便携式检测仪 Rollscan 250、300、350 三种型号和非便携式 500、600 两种型号,可以实现复杂形状工件、粗晶材料残余应力的精准分析,其检测深度在 0.01 ~ 1.5 mm。德国 Fraunhofer 无损检测研究所研制了 3MA-I、3MA-II,集成了 4 种不同微磁测量方法(包括巴克豪森噪声、多频率涡流、增量磁导率、切线磁场谐波分析),可测定材料表面及浅表面的硬度、残余应力、硬化层深度和加工缺陷,并能对边缘层在 0 ~ 8 mm 范围内的部件进行快速评估。国外应力磁检测仪相比国内仪器价格较贵。南京航空航天大学研发出便携式巴克豪森检测仪样机,可实现对钢轨的应力检测,检测精度在 10 MPa 以内。北京化工大学陈娟等人研发的基于磁巴克豪森效应的钢轨应力检测系统,能够对钢轨内部的应力进行实时在线检测,测量误差在 0.5 MPa,具有精度高、响应速度快、可视化效果好等优点。西安交大冉启芳等人^[38]研制成可测三维残余应力的磁性法应力测定仪。山东华云机电科技 HC21B 型残余应力磁检测仪,其分辨率: ≤ 1 MPa、测量误差: < 25 MPa、测量深度: 0 ~ 5 mm。

2.3 X 射线衍射法

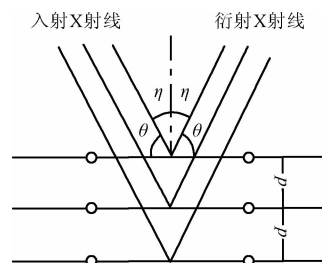
X 射线衍射法也是一种无损检测技术,残余应力存在时,各晶面间距随之改变,如图 6 所示,衍射峰位置也会随之移动,测定晶面族的面间距变化便可得出应力值^[45]。材料表面某一方向残余应力可由式(4)计算。

$$\sigma = \frac{E}{2(1+\mu)} \times \cot\theta_0 \times \frac{\pi}{180} \times \frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\theta)} = km \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量, μ 为泊松比, θ_0 为无应力时的布拉格角, θ 为有应力时的布拉格角, k 为应力常数, m 为应力因子。测量时选取尽可能高的衍射角,减小由衍射角测量不准引起的应力误差,目前常规的 X 射线应力仪的测角器 2θ 角度范围是 $143^\circ \sim 163^\circ$ 或 $110^\circ \sim 170^\circ$ 。试样内部显微组织也会影响测量精度,当晶粒粗大时,参加衍射

的晶粒数过少,导致衍射强度和线型不稳定,通常使入射线摆动来提高测量精度,摆动角 $\pm(1^\circ \sim 3^\circ)$ 。X 射线衍射法测残余应力具有快速、准确可靠和能测量小区域应力的特点。测量表面残余应力时(几个到几十个微米深度),若试件表面有污染射线容易被这些物质吸收或散射造成测量误差^[46]。

孟龙晖等人^[47]利用有限单元法(finite element method, FEM)修正法对 X 射线法测得的 Ti6Al4V 管件表面残余应力进行修正,误差不超过 2 MPa,精度很高,由 FEM 分析结果,测量管状外壁残余应力时,当 $\lambda \geq 1.11$ (轴向长度与外径比值)时,可忽略边缘效应。朱宏喜等人^[48]提出了一种利用 X 射线透射衍射法测量金属薄板材料应力各向异性的实验方法,测量过程快速,精确度高。商执亿^[49]通过对 W6Mo5Cr4V2 高速钢进行电解腐蚀剥层实验,确定在剥层速度为 2.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 时,可较好的掌握剥层深度。日本 Pulstec 公司开发出世界首款基于全二维探测的新一代 X 射线残余应力分析仪 u-x360n,采用单角度一次性入射(省去测角仪),60 s 可获得 500 个数据点进行残余应力数据拟合,特别适合复杂形状、狭窄空间及野外测量工作。爱斯特应力公司推出的 RS-2016 型 X 射线三维应力分析仪,测试平面尺寸为 500 mm \times 400 mm, 2θ 为 $117^\circ \sim 168^\circ$ 、分辨率为 0.0375°,仪器自动完成逐点测试并生成应力分布云图。该公司的 X-350A 系列共有 3 种型号, X-350A θ - θ 扫描型, 2θ 为 $120^\circ \sim 170^\circ$; X-350A45170 型, 2θ 为 $45^\circ \sim 170^\circ$; X-350AL 型同倾非对称测角仪;该系列采用双束对焦,仅需几秒至十几秒即可完成测试。此外,短波长 X 射线 XL-X 型应力分析仪可测工件 40 mm 铝当量厚度,应力测定误差 20 MPa,衍射体积 0.1 mm \times 0.2 mm \times 2 mm(可调),外形尺寸 130 cm \times 155 cm \times 200 cm,可用于分析材料内部的应力大小及分布。芬兰应力技术有限公司便携式 MM-64640-00 应力分析仪的 2θ 为 $117^\circ \sim 170^\circ$ 、测点行程误差小于 0.003 mm、角精度 0.029°/像素,微型 X 射线管(Cr、Cu、Co、Ti、Mn), 5 ~ 30 kV/0 ~ 10 mA/300 W 可调。

图6 晶体对 X 射线的衍射^[45]Fig. 6 Crystal X-ray diffraction^[45]

2.4 中子衍射法

中子衍射方法和 X 射线衍射法原理类似,而中子穿透深度较大,因此可以探测大块材料内部(厘米量级)的残余应力分布^[50]。原位中子衍射技术可以测量第 2 类残余应力^[51]。中子衍射峰位的精确性受衍射强度的影响,在反应堆功率、衍射晶面和规范体积等一定的条件下,衍射强度主要取决于测试时间^[47]。董平等人^[52]在不同测试时间下对铍环上同一点进行 4 次重复性测试,其光路示意图如图 7 所示,结果显示随时间延长,峰强度增加,曲线变光滑,通过测试时间,可明显降低中子衍射效应的误差。中子衍射测量残余应力耗时且费用昂贵,通常需要样品的标准体积较大(10 mm³),且空间分辨率较差,对材料表层残余应力的测量无能为力(>100 μm 及以上区域)^[50]。

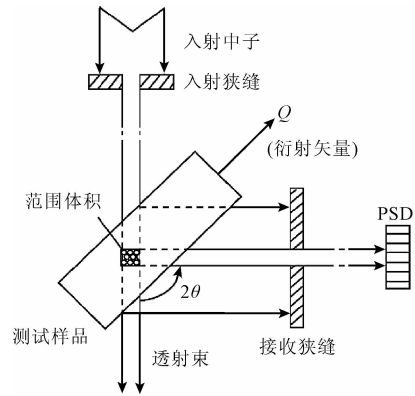


图 7 中子应力谱仪光路示意图^[52]
Fig. 7 Schematic diagram of beam path for spectrometer^[52]

表 2 无损测量法

Table 2 Nondestructive testing technology

名称	应力种类	误差来源	精度	先进仪器厂家
X 射线衍射法	σ_1 、 σ_2 、 σ_3	衍射晶面的选定; 试样表面状态; 试样内部显微组织结构	FEM 模拟误差 < 2 MPa; 2θ 范围为 45° ~ 170°; 可测 40 mm 铝当量厚度工件; 测试尺寸 500 mm × 400 mm	ST(Stress Technologies) 应力有限公司(RS-2016 型 X 射线三维应力分析仪;X 射线应力测定仪 X-350A、X-350A45170、X-350AL); 日本 Pulstec 公司(X 射线残余应力分析仪 u-X360n); Stresstech Oy(便携式 MM-64640-00 应力分仪) Proto 公司(iXRD 300W、大功率单晶应力分析仪、微区应力分析仪 3 000W)
			中子注入量率 10 ⁶ ~ 10 ⁷ cm ⁻² · s ⁻¹ ; 空间分辨率 10 mm ³ ; 衍射角误差 < 0.006°; 探测尺寸 cm 数量级	CARR 的残余应力谱仪; REST 残余应力谱仪
中子衍射法	σ_1 、 σ_2	衍射强度;PSD; 零点偏移和 波长;空间分辨率	中子注入量率 10 ⁶ ~ 10 ⁷ cm ⁻² · s ⁻¹ ; 空间分辨率 10 mm ³ ; 衍射角误差 < 0.006°; 探测尺寸 cm 数量级	CARR 的残余应力谱仪; REST 残余应力谱仪
磁性法	σ_1 、 σ_3	材料微观结构	TSC-3M-12;测量误差 < 5%;HC21B: 分辨率: ≤ 1 MPa 测量误差: < 25 MPa, 测量深度: 0 ~ 5 mm;Rollscan:0.01 ~ 1.5 mm(内部) 3MA-II:0 ~ 8mm(边缘);国内: 测量精度 10 MPa;测量误差 0.5 MPa	芬兰 Stresstech 公司 (便携式检测仪 Rollscan250、300、350; 非便携式检测仪 Roboscan500、600); Fraunhofer Institute (微结构与应力分析仪 3MA-I、3MA-II); 山东华云机电科技有限公司 (HC21B 型残余应力磁检测仪)
超声波法	σ_1	探头与构件之间声耦合层厚度变化; 构件材料组织; 环境温度	USM-3;5 ~ 500 mm(长度)分辨率: 0.000 1 mm;URST;2 ~ 150 mm(厚度), 25 ~ 1 000 mm(长度); 测量误差 0.1 MPa	芬兰 Stresstech 公司 (USM-3 超声波螺栓应力测试仪); 巨力科技有限公司 (超声残余应力测试仪 URST)

注:σ₁ 是材料宏观形变均匀的结果,即宏观残余应力;σ₂ 为各个晶粒或晶粒区域之间的不协调形变,即微观残余应力;σ₃ 由位错或点缺陷引起,即“晶格畸变应力”或“超微观应力”

近几年,中子衍射残余应力分析工作进入蓬勃发展时期。美国的洛斯阿拉莫斯国家实验室、英国的卢瑟福-阿普尔顿实验室、中国原子能科学研究院在建的中国先进研究堆(China advanced research reactor, CARR),其用

途之一是进行中子衍射实验研究。依托 CARR 建造了一台残余应力谱仪(设计功率为 60 MW,满功率运行下反射层未扰热中子注量率为 8 × 10¹⁴ cm⁻² · s⁻¹)是中国第 1 台中子测量谱仪^[53],该谱仪配置了一维位置灵敏探测

器(position sensitive device, PSD),可快速获得小样某晶面的衍射峰。PSD 包含 100 多道,无需步进扫描,能直接覆盖一完整的衍射峰,然而,PSD 各道的灵敏度并不一致,各道的位置坐标与衍射角之间存在几何转换关系,入射束和机械零位之间也存在零点偏移,谱仪投入使用前需要精确校准这些参数,精确的谱仪校准是获得高质量衍射峰数据和准确残余应力测量的前提^[54]。双聚焦 Si(311)单色器聚焦能力强^[53],提高了强度和分辨率,在散射角 80°附近谱仪的分辨率可达 0.2%。刘晓龙等人^[54]设计了灵敏度校准、几何校准以及零点和波长校准 3 个实验,准确获得了谱仪的校准参数,角度误差最大不超过 0.006°。残余应力谱仪(residual stress spectrometer, REST)与 CARR 两种中子应力谱仪的中子注入量率分别为 $1.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,起飞角分别为 24°~90°,41°~106°,均采用双聚焦 Si(311)单色器,其中 CARR 中子应力谱仪测试尺寸最小可达 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ^[2]。

3 结 论

在各工业领域,残余应力测试技术和应用研究受到高度重视,目前测试方法还较少,且各测试方法均有一定的局限性。目前,应用较多为盲孔法和 X 射线衍射法。盲孔法主要关注的是应变释放系数的数值分析和实验标定问题,在大量研究的基础上,其在测量准确性方面有了新的进展,但此方法会对测试对象造成损伤,限制了其适用范围。X 射线作为一种无损检测方法,测范围只能在表面薄层中,且对测试表面要求较高。而磁性法主要针对大型构件的残余应力测试,但它仅限于对磁性材料测试;中子衍射主要针对大型构件的内部残余应力,国内外研究均处于发展阶段;超声测定残余应力时受材料性能、工件形状和组织结构的影响较大,测试灵敏度不高;压痕法测试虽然是有损检测,但对材料的损伤较小。现有测试仪器大多需要手动更换样品及转动样品角度、人工计算数据、制定定标曲线,工作量大;通过计算机控制及计算模拟技术的发展,未来仪器有望实现自动完成样品测试计算应力分布云图方向发展。

参考文献

- [1] 付学义,刘莉. 残余应力的危害及对策[J]. 包钢科技, 2006,32(增刊1):82-84.
- [2] 李峻宏,高建波,李际周,等. CARR 中子残余应力谱仪的设计与应用[J]. 原子能科学技术,2010,44(4):484-488.
- [3] 刘延辉,瞿伟成,朱小刚,等. 激光 3 D 打印 TC4 钛合金工件根部裂纹成因分析[J]. 理化检验:物理分册,2016,52(10):682-685.
- [4] 李妍. HXN5 型机车车架振动消除残余应力研究[J]. 考试周刊,2015(A1):195-196.
- [5] MATHAR J. Determination of inherent stress by measuring the deformations around drilled holes [J]. Technical Report Archive & Image Library, 1934, 56(2):245-254.
- [6] 刘力力,樊黎霞,董雪花. 盲孔法测定径向锻造身管表面残余应力方法研究[J]. 兵工学报,2012,33(6):712-717.
- [7] 谭明鹤,王荣辉,黄永辉. 盲孔法测残余应力中应变释放系数的修正方法[J]. 热加工工艺,2007,36(19):65-68.
- [8] 陆才善. 残余应力测试一小孔释放法[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991:10-24.
- [9] 杨珂,李桓,朱宵阳,等. 盲孔法测量中厚板机器人横焊接头的残余应力[J]. 中国科技信息,2017(7):72-73,76.
- [10] 王庆明,孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向[J]. 机电工程,2011,28(1):11-15,41.

- WANG Q M, SUN Y. Progress and trend of residual stress testing technology [J]. *Electrical Engineering*, 2011, 28 (1): 11-15,41.
- [11] 房元斌,王勇,王灿,等. 高强钢 Q890 中厚板残余应力测量技术[J]. *电焊机*, 2016, 46(10):85-89.
FANG Y B, WANG Y, WANG C, et al. High-strength steel Q890 plate thickness residual stress measurement technology [J]. *Welding Machine*, 2016, 46 (10): 85-89.
- [12] 夏建盟,黄池光,许晶玮,等. 基于盲孔法的 ABS 热焊板件残余应力测量[J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(3): 96-99.
XIA J M, HUANG CH G, XU J W, et al. Residual stress measurement of ABS hot-welded plate based on blind hole method [J]. *Application of Engineering Plastics*, 2016, 44 (3): 96-99.
- [13] 候海量,朱锡,刘润泉,等. 盲孔法测量 921A 钢焊接残余应力的应变释放系数研究[J]. *船舶工程*, 2003, 25(1):57-60.
HOU H L, ZHU X, LIU R Q. Blind hole 921A steel welding residual stress measurement by strain release factor [J]. *Ship Engineering*, 2003, 25 (1): 57-60.
- [14] 陈怀宁,林泉洪,陈静,等. 冲击压痕法测量残余应力中的塑性区问题[J]. *焊接学报*, 2001, 22(5):21-23.
CHEN H N, LIN Q H, CHEN J, et al. Study on the plastic zone problem in residual stress measurement by impact indentation [J]. *Journal of Welding*, 2001, 22(5): 21-23.
- [15] 于哲夫,赵颖华,陈怀宁,等. 冲击压痕测量残余应力的方法[J]. *沈阳建筑工程学院学报:自然科学版*, 2001, 17(3):200-202.
YU ZH F, ZHAO Y H, CHEN H N, et al. Impact indentation method for measuring residual stress [J]. *Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering University: Natural Science Edition*, 2001, 17 (3): 200-202.
- [16] 林丽华,陈立功. 静载压痕残余应力测量的简化模型[J]. *上海交通大学学报*, 1998, 32(2):91-94,108.
LIN L H, CHEN L G. FEM Analysis of simplified model for residual stress measuring process with statics indentation [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1998, 32(2): 91-94, 108.
- [17] 陶杰,崔益华,李杨. SiC/Al₂O₃ 纳米复合材料压痕残余应力压谱法测量研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(2):270-273.
TAO J, CUI Y H, LI Y. Study on indentation residual stress percolation of SiC / Al₂O₃ nanocomposites [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25 (2): 270-273.
- [18] 刘川,庄栋. 基于轮廓法测试焊接件内部残余应力[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(8):54-59.
LIU CH, ZHUANG D. Internal welding residual stress measurement based on contour method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48 (8): 54-59.
- [19] PRIME M B. Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut[J]. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 2001, 123(2): 162-168.
- [20] BROWN D W, HOLDEN T M, CLAUSEN B, et al. Critical comparison of two independent measurements of residual stress in an electron-beam welded uranium cylinder: Neutron diffraction and the contour method[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(3):864-873.
- [21] PRIME M B, SEBRING R J, EDWARDS J M, et al. Laser surface-contouring and spline data-smoothing for residual stress measurement [J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(2):176-184.
- [22] 徐虹,滕宏春,崔波,等. 残余应力非破坏性测量技术的发展现状简介[J]. *理化检验:物理分册*, 2003, 39(11):595-598
XU H, TENG H CH, CUI B, et al. Introduction to the development of residual stress non-destructive measurement technology [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis: Physics*, 2003, 39 (11): 595-598.
- [23] 张世平,路浩,朱政,等. 薄壁 LY12 铝合金焊接残余应力超声波法无损测量及验证[J]. *焊接学报*, 2009, 30(9):25-28.
ZHANG SH P, LU H, ZHU ZH, et al. Non-destructive measurement and verification of residual stress of thin-walled LY12 aluminum alloy welding [J]. *Journal of Welding*, 2009, 30 (9): 25-28.
- [24] HUGHES D S. Ultrasonic velocity in an elastic solid[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(3):294-301.
- [25] TATSUO T, YUKIO I. Acoustical birefringence of ultrasonic waves in deformed isotropic elastic materials[J]. *International Journal of Solids Structures*, 1968, 14(4):383-389.
- [26] FUKUOKA H, TODA H, YAMANE T. Acoustoelastic stress analysis of residual stress in a patch-welded disk[J]. *Experimental Mechanics*, 1978, 18 (7): 277-280.
- [27] YABDALLAHOU H, WALASZEK, PEYRAC C, et al. The use of ultrasonic in the optimization of welding processes [J]. *Welding International*, 2001, 15 (4): 1-12.

- [28] EGLE D M, BRAY D E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 59(3):741-744.
- [29] MAN C, LU W Y. Towards an acoustoelastic theory for measurement of residual stress[J]. Journal of Elasticity, 1987, 62(17):159-182.
- [30] 虞付进, 赵燕伟, 张克华. 超声检测表面残余应力的研究与发展[J]. 表面技术, 2007, 36(4):72-75.
YU F J, ZHAO Y W, ZHANG K H. Study and development of residual stress on ultrasonic surface [J]. Surface Technology, 2007, 36(4):72-75.
- [31] 陈辉. 一种可修正微观组织差异影响的超声波残余应力测量方法: 中国, CN201610343184.0 [P]. 2016-10-12.
CHEN H. A method for measuring ultrasonic residual stress that can modify the microstructure difference effect; CN201610343184.0 [P]. 2016-10-12.
- [32] 卢超, 黎连修, 涂占宽, 等. 临界折射纵波探头声束特性的边界元分析与测量[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12):2570-2575.
LU CH, LI L X, TU ZH K, et al. Boundary element analysis and measurement of beam characteristics of critical reflective longitudinal wave probe [J]. Journal of Instrument & Instrumentation, 2008, 29(12):2570-2575.
- [33] 路浩, 刘雪松, 杨建国, 等. 低碳钢双丝焊平板横向残余应力超声波法测量[J]. 焊接学报, 2008, 29(5):30-32.
LU H, LIU X S, YANG J G, et al. Measurement of transverse residual stress ultrasonics by low carbon steel double wire weld plate [J]. Journal of Welding, 2008, 29(5):30-32.
- [34] 汪磊, 王斌, 柴军辉, 等. 基于“相位-频率”测量法的 LCR 波技术在薄板残余应力测量中的应用研究[J]. 无损探伤, 2015, 39(2):10-13.
WANG L, WANG B, CHAI J H, et al. Application of LCR wave technique based on "phase-frequency" measurement method in residual stress measurement of thin plate [J]. Nondestructive Testing, 2015, 39(2):10-13.
- [35] 潘勤学, 刘帅, 肖定国, 等. 基于超声技术的齿轮残余应力测量方法研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(9):1757-1765.
PAN Q X, LIU SH, XIAO D G, et al. Research on gear residual stress measurement method based on ultrasonic technology [J]. Journal of Ordnance Industry, 2015, 36(9):1757-1765.
- [36] 赵东升, 黄震宇, 缪唐军, 等. 焊接残余应力的非接触无损测量实验[J]. 实验室科学, 2017, 20(2):26-28.
ZHAO D SH, HUANG ZH Y, LIAO T J, et al. Non-contact non-destructive measurement of welding residual stress [J]. Laboratory Science, 2017, 20(2):26-28.
- [37] 温旭东, 陈亚茹, 魏立万, 等. 用磁性法测定大型球罐残余应力[J]. 石油化工设备, 2001, 30(4):46-48.
WEN X D, CHEN Y R, WEI L W, et al. Determination of residual stress of large spherical tank by magnetic method [J]. Petrochemical Equipment, 2001, 30(4):46-48.
- [38] 冉启芳, 吕克茂. 残余应力测定的基本知识—第三讲磁性法和超声波测残余应力的基本原理和各种方法比较[J]. 理化检验: 物理分册, 2007, 43(6):317-321.
RAN Q F, LV K M. Basic knowledge of--the third lecture of residual stress measurement of magnetic method and principle and method of measuring residual stress by ultrasonic method [J]. Physical and Chemical Testing: Physical Volumes, 2007, 43(6):317-321.
- [39] 王振山. 磁测应力原理及应用[C]. 第6届全国残余应力会议交流论文集, 1985.
WANG ZH SH. Principle and application of magnetic stress [C]. The 6th National Conference on Residual Stress Conference, 1985.
- [40] SHOKROLLAHI H, JANGHORBAN K, MAZALEYRAT F, et al. Investigation of magnetic properties, residual stress and densification in compacted iron powder specimens coated with polyepoxy [J]. Materials Chemistry & Physics, 2009, 114(2):588-594.
- [41] WILSON J W, GUI Y T, BARRANS S. Residual magnetic field sensing for stress measurement [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2007, 135(2):381-387.
- [42] PEARSON J, SQUIRE P T, MAYLIN M G, et al. Biaxial stress effects on the magnetic properties of pure iron [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5):3251-3253.
- [43] ZWANZIGER J W, WERNERZWANZIGER U, ZANOTTO E D, et al. Residual internal stress in partially crystallized photothermorefractive glass: Evaluation by nuclear magnetic resonance spectroscopy and first principles calculations[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(8):116-214.
- [44] 黄海鸿, 姚结艳, 刘儒军, 等. 基于金属磁记忆技术的车桥桥壳损伤检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7):770-776.
HUANG H H, YAO J Y, LIU R J, et al. Damage detection of axle axle based on metal magnetic memory

- technology [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2014, 28(7): 770-776.
- [45] 张持重, 李冬梅, 庞绍平, 等. 采用 X 射线法测算金属材料内部残余应力的研究[J]. 吉林化工学院学报, 2001, 18(4): 73-75.
ZHANG CH ZH, LI D M, PANG SH P, et al. Study on residual stress in metallic materials by X-ray method [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2001, 18 (4): 73-75.
- [46] 郑卜祥, 宋永伦, 席峰, 等. 对接焊铝合金板材残余应力的 X 射线测试[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 275-281.
ZHENG B X, SONG Y L, XI F, et al. X-ray test of residual stress of butt welded aluminum alloy sheet [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 275-281.
- [47] 孟龙晖, 何宁, 杨吟飞, 等. 利用 FEM 修正法测量 Ti6Al4V 管件表面残余应力[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(5): 71-75.
MENG L H, He N, YANG Y F, et al. Using FEM correction method to measure the surface residual stress of Ti6Al4V pipe [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47 (5): 71-75.
- [48] 朱宏喜, 李全安, 陈君, 等. X 射线透射法测量金属板各向异性的实验研究[J]. 实验室科学, 2016, 19(4): 6-8, 11.
ZHU H X, LI Q AN, CHE J, et al. Experimental study on anisotropy of metal plate by X-ray transmission [J]. Laboratory Science, 2016, 19 (4): 6-8, 11.
- [49] 商执亿. 电解腐蚀在高速钢残余应力测量中的应用[J]. 工具技术, 2015, 49(7): 104-106.
SHANG ZH Y. Application of electrolytic corrosion in residual stress measurement of high speed steel [J]. Tool Technology, 2015, 49 (7): 104-106.
- [50] 孙光爱, 陈波. 中子衍射残余应力分析技术及其应用[J]. 核技术, 2007, 30(4): 286-289.
SUN G AI, CHEN B. Neutron diffraction residual stress analysis technology and its application [J]. Nuclear Technology, 2007, 30 (4): 286-289.
- [51] 徐小严, 吕玉廷, 张荻, 等. 中子衍射测量残余应力研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(9): 117-122.
XU X Y, LU Y T, ZHANG D, et al. Research progress of neutron diffraction measurement residual stress [J]. Materials Review, 2015, 29 (9): 117-122.
- [52] 董平, 王虹, 李建, 等. 铍环焊接残余应力的中子衍射测试与有限元分析[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12): 2255-2260.
DONG P, WANG H, LI J, et al. Neutron diffraction test and finite element analysis of residual stress in beryllium ring welding [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49 (12): 2255-2260.
- [53] 李峻宏, 高建波, 李际周, 等. CARR 中子残余应力谱仪的设计与应用[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(4): 484-488.
LI J H, GAO J B, LI J ZH, et al. Design and application of CARR neutron residual stress spectrometer [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44 (4): 484-488.
- [54] 刘晓龙, 刘蕴韬, 陈东风, 等. 中国先进研究堆中子残余应力谱仪校准[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(8): 1486-1490.
LIU X L, LIU Y T, CHEN D F, et al. Calibration of neutron residual stress spectrometer in china advanced research reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(8): 1486-1490.

作者简介



王楠, 现为南昌大学本科生, 主要研究方向为材料物理性能。

E-mail: 1259365042@qq.com

Wang Nan is currently an undergraduate student in Nanchang University. Her main research interest is material physical properties.



罗岚(通讯作者), 分别在 2001 年和 2003 年于同济大学获得学士学位和硕士学位, 2008 年于南昌大学获得博士学位, 现为南昌大学副教授, 主要研究方向为高通量实验技术(固态薄膜组合筛选及金属 3D 打印技术)及材料计算。

E-mail: luolan1190@sina.com.cn

Luo Lan (Corresponding author) received her B.Sc. and M.Sc. degrees both from Tongji University in 2001 and 2003, respectively, and received her Ph.D. degree from Nanchang University in 2008. Now she is an associate professor in Nanchang University. Her main research interests include high-throughput experimental techniques (combinatorial materials chips, additive manufacturing for metallic components) and materials computation methods.