

DOI: 10.11973/jxgccl240067

残余应力检测技术及其应用

侯晓东^{1,2}, 黄照文³, 高建波², 吴桂毅², 张瑞尧², 张书彦²

(1. 中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所, 北京 100029; 2. 东莞材料基因高等理工研究院, 东莞 523808; 3. 东莞理工学院材料科学与工程学院, 交叉科学研究中心, 东莞 523808)

摘要: 随着我国工业水平的不断提升, 残余应力问题日益受到重视。准确测试和控制残余应力可以实现改善材料性能、提升尺寸精度、延长寿命等目的, 进而提升关键工程构件的安全性和可靠性。因此, 残余应力检测技术在航空航天、核电、船舶等领域发挥着重要作用, 为工程构件力学性能研究和安全评估提供关键数据支持。总结了目前常用的残余应力检测技术的原理、适用范围、优缺点等, 讨论了选择残余应力检测技术时需考虑的主要因素, 指出了残余应力检测技术在科研和应用领域的发展趋势。

关键词: 残余应力检测; 中子衍射; 轮廓法; X射线衍射; 同步辐射; 深孔法

中图分类号: TG115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3738(2024)08-0041-14

0 引言

残余应力是指在无外部载荷作用时, 以平衡状态存在于构件内部的应力, 它主要在切削加工、滚压、冷拉、铸造、焊接、增材制造、热处理等加工过程中产生, 也会在服役期间因受到温度和应力等外场的长期循环作用而产生。根据应力平衡范围的尺度, 通常将残余应力分为3类^[1]: 第I类残余应力又称为宏观残余应力, 由工件不同部分的不均匀变形引起, 平衡范围包括整个工件, 尺度通常在毫米级别以上; 第II类残余应力又称为微观残余应力, 由晶粒或亚晶粒之间的不均匀变形引起, 平衡范围通常在微米级别, 该尺度与晶粒尺寸大致相当; 第III类残余应力由工件内部的点阵缺陷(如空位、间隙原子、位错等)引起, 平衡范围通常在几十至几百纳米, 接近原子尺寸级别。一般认为, 宏观残余应力是微观残余应力在不同尺度上累积的体现。

残余应力常常是有害的, 当残余应力超过临界值时, 会引起工件变形、开裂和破坏失效。此外, 残余应力还会与各种外场(如温度场、磁场等)引起的工作应力相叠加, 导致构件内应力重新分布; 该过程不仅降低构件的刚度和尺寸稳定性, 影响其疲劳强度、抗脆断性能、抗应力腐蚀开裂性能和高温蠕

变开裂性能。研究发现: 航空发动机的涡轮盘和涡轮叶片内部的残余应力会导致其在服役过程变形, 影响发动机的工作状态和效率^[2-4]; 深海油气输送管道焊缝中的残余应力可能影响管体焊缝缺陷的稳定性, 导致管体在焊缝处开裂而发生泄漏, 对海洋生态环境构成威胁^[5-7]; 核电站结构件异种金属焊缝中的缺陷与焊接残余应力直接相关, 存在较大的安全隐患^[8-10]。随着我国工业水平的提升, 人们对于高端制造、航空航天、核电能源、海洋工程等领域中存在的残余应力相关潜在危害日益重视。残余应力检测对于了解构件残余应力大小和分布, 以及进一步控制残余应力具有关键作用。残余应力检测始于20世纪30年代, 经过近百年的发展, 至今已形成了十余种检测方法^[11], 大致可分为两类: 机械释放测试法和物理测试法。机械释放测试法的原理为通过切割或钻孔等方式, 使构件中的残余应力得到部分或全部释放, 然后根据变形计算出原始的残余应力, 主要包括小孔法、环芯法、剥层法、深孔法、全释放应变法等^[12-14]; 此类方法因对被测构件进行切割破坏, 所以不可重复测试, 需在测试前制定详细的方案。物理测试法的原理为通过测试残余应力作用下材料晶体结构的变化或对其他物理场的响应变化来测定残余应力, 主要包括X射线衍射法、中子衍射法、同步辐射X射线衍射法、超声波法、磁测法和压痕法等^[15-19]; 此类方法属无损测试或近似无损测试, 构件完成测试后可以保持结构完整性并继续服役, 但该方法会受到材料组织结构的影响, 从而使测试结果失去准

收稿日期: 2024-02-05; 修订日期: 2024-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4606200); 广东省基础与应用基础研究重大专项项目(2020B0301030001)

作者简介: 侯晓东(1982—), 男, 河北张家口人, 研究员, 博士

确性和可靠性。除传统检测技术外,随着微纳米结构材料工程的发展,残余应力检测技术逐渐向微观尺度深入,如拉曼光谱技术和聚焦离子束-数字图像相关法(FIB-DIC)。工程应用中关注较多的是宏观残余应力,为了给相关研究人员提供参考。作者对目前常用的残余应力的检测技术以及应用情况进行了综述。

1 残余应力检测技术

表1汇总了常用的残余应力检测技术的原理、适用范围、相关标准、优缺点等,下文逐一进行详细介绍。

1.1 X射线衍射技术

X射线衍射方法是技术发展和工程应用最成熟的残余应力无损检测技术。其测试原理为残余应力会引起晶格畸变,从而改变晶面间距,通过X射线照射晶面发生衍射^[20],测定衍射角的变化,从而推算出晶面间距变化,进而采用布拉格方程计算得到残余应力。基于晶格畸变的X射线衍射技术最早由俄国学者阿克先诺夫于1929年提出;1961年,德国学者Machearauch进一步提出了用于二维残余应力测试的 $\sin^2\psi$ 法^[21],促进了X射线衍射检测残余应力的实际应用和发展。我国对X射线残余应力测试的研究始于20世纪60年代中后期,王仁智和张亦良等一批学者开始利用日本理学株式会社生产的X射线衍射仪测试压力容器上的残余应力,标志着我国残余应力检测工作的正式开启^[22-23]。

X射线衍射技术自提出以来不断发展完善,是目前残余应力检测的主流方法,具有精度高、标准完善、操作便捷等优点,广泛用于晶体材料的残余应力测试^[24-26];但是,其穿透深度较浅,一般可测试的表面层深度仅为10~35 μm ,属于一种表面残余应力测试方法,在表面镀层和薄膜残余应力的测试上应用较多^[27]。综合电解抛光技术,X射线衍射技术可以测得从表面到内部约1 mm深度的残余应力,可获得近表面不同深度的残余应力分布^[28]。此外,近年来发展起来的短波长X射线技术采用重金属钨靶X射线管作为射线源^[29-30],可以大大增加X射线在样品中的穿透深度,针对镁合金的穿透深度可达厘米级;但现阶段该方法的标准还不完善,且测量时间过长等问题也在一定程度上限制了该方法的广泛应用。

1.2 同步辐射X射线衍射技术

同步辐射X射线衍射技术的测试原理为基于布

拉格方程通过测试晶面间距并结合弹性力学计算得到残余应力,包括单色和多色(白光)同步辐射X射线衍射两种^[31]。单色同步辐射X射线衍射是将一束已知波长的X射线以不同角度照射到待测试样表面,收集衍射信号计算晶面间距;多色同步辐射X射线衍射是利用白光X射线以固定角度照射试样表面,收集不同能量的衍射信号计算晶面间距。一般来说,单色同步辐射X射线的光束强度相对较低,穿透能力要弱一些。

同步辐射X射线相对于传统X射线具有高能量、高亮度、高准直、高偏振、窄脉冲等多种优点,其穿透深度更大,能够实现更高的时间和空间分辨率。较高的空间分辨率有利于获得工程材料涂层、近表面以及裂纹尖端的应变分布,实现百微米范围的微区衍射和晶格应变测量;较高的时间分辨率则有利于开展原位加载情况下的动态应变以及相变应力演化信息的研究。该技术与小角X射线散射或小角中子散射结合,还可获取残余应力与缺陷尺寸和分布相关的信息,从而进一步开展材料裂纹尖端断裂机理的相关研究^[32]。STEUWER等^[33]利用同步辐射测试了铝锂合金裂纹尖端应变场,进一步获取了疲劳过载过程中裂纹尖端的应力演变,为认识材料在复杂加载条件下的力学行为提供了参考。同步辐射光源属稀缺资源,目前全球范围内的同步辐射光源实验室及仪器设备包括法国ESRF光源ID31/ID15、德国BESSY光源EDDI、英国DIAMOND光源I12、中国上海光源科学中心超硬多功能光束线站BL12SW、中国北京怀柔高能同步辐射光源谱仪工程材料线站ID07(在建)等。

1.3 中子衍射技术

中子衍射技术的测试原理同样为基于布拉格方程获取晶面间距并结合弹性力学计算残余应力^[34-35],包括基于反应堆中子源和基于散裂中子源两种类型。反应堆中子源通过核反应堆产生的稳定中子束进行衍射,其特点为运行稳定、建设成本相对较低、适合长时间连续测试,相关谱仪有德国FRMII的STRESS SPEC、法国ILL的SALSA、澳大利亚ANSTO的KOWARI、中国先进研究堆(CARR)和绵阳研究堆(CMRR)应力谱仪等;散裂中子源通过加速器产生高能质子束轰击重金属靶材产生的中子进行衍射,其特点为衍射角度和波长测量范围广、数据采集速率快、信息量大,适合研究复杂材料和原位加载试验,相关谱仪有英国ISIS中子源

表1 残余应力检测技术对比

Table 1 Comparison of residual stress detection techniques

分类	方法	原理	适用范围	相关标准	优缺点
无损	常规X射线衍射法	通过X衍射测得晶面间距,基于布拉格方程(应力与晶面间距的关系)计算残余应力	实验室和现场,适用于晶体材料(如金属和陶瓷材料)	GB/T 7704—2017 EN 15305—2008 ASTM E915—10	优点:空间分辨率高,约1 mm,可以精确地测定材料表层的残余应力 缺点:射线穿透能力有限、受材料类型限制
	同步辐射X射线衍射法	通过衍射角扫描或能量色散法测得晶面间距,基于布拉格方程计算残余应力	实验室,适用于晶体材料(如金属材料)	无	优点:空间分辨率极高,约0.1 mm,亮度和准直性高,射线穿透能力较强(约毫米到厘米级),可原位实时测试内部残余应力 缺点:测试资源稀缺、成本高,试验条件要求高
	中子衍射法	通过衍射角扫描或飞行时间法测得晶面间距,基于布拉格方程计算残余应力	实验室,适用于晶体材料(如金属材料)	GB/T 26140—2023 ISO 21432—2019	优点:中子穿透能力强(厘米级以上),可测试高密度、大体积试样内部残余应力;精确测量原子尺度结构 缺点:测试资源稀缺、成本高
	超声临界折射纵波	通过超声探头测量速度差/时差,基于应力与速度差/时差的标定曲线计算残余应力	实验室和现场,适用于金属和非金属材料	GB/T 32073—2015	优点:超声波传播距离较长,可检测深层缺陷;成本低、设备便携 缺点:分辨率低,高度依赖操作人员的经验和技能
	磁测法	通过精密传感器和高精度的测量电路将磁导率变化转变为电信号(如电流或电压值),从而计算残余应力大小	实验室和现场,适用于铁磁性金属材料	GB/T 33210—2016	优点:检测速率快,可以实现实时监测;操作简便、设备便携 缺点:适用材料有限,与其他方法符合性不高
近似无损	压痕应变法	基于应力与叠加应变的标定曲线计算残余应力	实验室和现场,适用于金属材料	GB/T 24179—2023	优点:可用于现场快速检测;适用范围广 缺点:高度依赖操作人员的经验和技能;只反映材料局部力学性能,无法完全代表整体性能
	仪器化压入法	基于残余应力与压入载荷和深度的关系计算残余应力	实验室和现场,适用于金属和非金属材料	GB/T 39635—2020 ISO/TS 19096—2023	优点:空间分辨率高,达到微米甚至亚微米级;可用于综合性能测定;适用复杂环境 缺点:数据解析复杂,初期投入较高
	FIB-DIC	结合聚焦离子束与数字图像相关技术,通过局部应力释放,测试试样移除后特征区域的表面应变,基于胡克定律计算残余应力	实验室,适用于金属和非金属材料,尤其是涂层材料	无	优点:提供纳米到微米尺度的高精度形变测量,微观检测能力强 缺点:设备昂贵,操作复杂
半破坏性	小孔法		实验室和现场,适用于金属和非金属材料	GB/T 31310—2014 ASTM E837—20	优点:原理和技术路线发展成熟;成本低、适用性广 缺点:空间分辨率有限,约10 mm
	深孔法	通过局部应力释放,测试弹性应变,基于柯西公式计算残余应力	实验室和现场,适用于金属材料和非金属材料	无	优点:能够测试材料深层的残余应力分布;准确性相对较高 缺点:对试样破坏性强,操作繁琐
	环芯法		实验室和现场,多应用于汽轮机行业	JB/T 8888—2018	优点:方法标准化、测试结果可靠;成本低、操作简便 缺点:应用范围有限,多用于焊缝区域,对于非焊接构件的适用性较差
破坏性	轮廓法	通过测试切割面释放后的位移轮廓,基于有限元计算切割面残余应力。	实验室,适用于金属材料	T/CISA 063—2020	优点:空间分辨率高,约0.1 mm;可测试大尺寸或复杂形状构件的内部残余应力,且不受结构取向影响 缺点:试验条件苛刻,数据处理复杂

的ENGIN-X、美国SNS中子源的VULCAN、日本J-PARC中子源的TAKUMI、中国中子工程材料衍射谱仪等。其中,中国中子工程材料衍射谱仪依托散裂中子源(CSNS),由东莞材料基因高等理工研究院和散裂中子源科学中心合作共建,是国内首台基于飞行时间技术的中子工程材料衍射谱仪,为工程材料应力研究提供了重要的试验资源。

中子衍射技术在大尺寸工程部件残余应力测试方面有显著优势,这是因为与X射线相比,中子无电荷且具有很强的穿透能力,能够穿透厚重的工程材料,结合力学加载、高温、低温等复杂环境条件设置,可以实现大体积材料的内部残余应力原位测试,TURSKI等^[36]通过中子衍射技术检测了尺寸为880 mm×870 mm×315 mm的冷铸WE43镁合金厚板的残余应力和分布,有效验证了有限元模型,采用工艺优化解决了产品开裂问题。中子衍射技术也可应用于复杂结构工程部件残余应力测试,可通过对试样进行三维形貌扫描建模,输入并关联到实验室坐标系和运动控制系统,设置扫描路径和测试时间后自动测试试样内部残余应力的三维分布。中子衍射技术也常常用于焊接管道的残余应力测试。WEN等^[37]采用英国ISIS中子源的ENGIN-X谱仪测试了油气输送双面埋弧焊UOE直缝焊管道残余应力,其样品尺寸为4 mm×4 mm×4 mm,测试时间依据中子穿透路径设定,最长为25 min,结果表明焊缝处最大拉伸残余应力仅为250 MPa,不到母材钢板实际屈服强度(516 MPa)的1/2。与同步辐射X射线衍射法类似,中子衍射法也存在资源稀缺、成本高昂等问题,并且中子衍射数据的处理和解析相对复杂,需要专业的技术和软件支持,这也增加了试验的分析难度和时间成本。

1.4 小孔法

小孔法,也称盲孔法,其测试原理为在材料表面钻一个小孔以破坏原有应力平衡,使周围区域产生弹性应变,通过应变片测试应变,并利用弹性力学计算残余应力。小孔法根据成孔方法可分为4类:低速钻孔(转速小于1 000 r·min⁻¹)、高速钻孔(转速高达400 000 r·min⁻¹)、喷砂打孔和电化学成孔。其中:低速钻孔法成本低,操作简便,广泛应用于工程实践中;高速钻孔法大幅度提高了测试效率,同时减少钻孔引起的热影响;喷砂打孔法适用于对表面粗糙度要求不高的情况,但对操作环境有一定要求;电化学成孔法不会对材料产生机械损伤,但对设备和技术

要求较高。小孔法最早由德国学者Mather于1934年提出,至今已得到大量的研究^[12-14, 38]。美国材料与试验协会(ASTM)于1981年正式颁布了《小孔法测量残余应力标准试验方法》标准,后经过多次修订不断完善,形成了现有的ASTM E837-20标准。我国也发布了包含高速钻孔方法A和低速钻孔方法B的GB/T 31310—2014《金属材料 残余应力测定 小孔应变法》标准^[39]。

小孔法具有设备简单、成本低廉、操作便捷等优点,尤其在对大型构件进行现场测试时,其优势更为显著,广泛用于焊接结构、铸造件、热处理件等工程构件的残余应力测试,但也存在测试精度低等问题。用激光散斑干涉法替代传统电阻应变片来测试小孔周围的应变,可提高残余应力测试精度。乌克兰巴顿焊接研究所已基于激光散斑干涉法成功研制出激光全息小孔法设备,具有很高的测试精度和操作便捷性。

1.5 环芯法

环芯法的测试原理为在材料表面加工一个环形槽以使残余应力重新分布并释放,从而使周围材料产生弹性应变,基于测得的弹性应变,利用弹性力学计算残余应力^[40]。环芯法最早由德国学者Milbradt于1951年提出,经过多年发展,已成为大锻件转子残余应力测试的标准方法^[41-44]。上海电气上重铸锻有限公司等企业采用环芯法测试汽轮机大型转子锻件的残余应力,结果显示环芯法与X射线衍射法的测试结果有良好的一致性^[42]。

环芯法操作相对简单实用,能够提供局部区域的残余应力分布信息,这对于研究复杂构件如焊接接头或热处理件的应力集中现象尤为重要,但是该方法会对材料的局部产生破坏,且测试结果受钻孔精度和应变片安装质量的影响较大。常用的改进与优化方法包括:提高设备精度,通过提升钻孔设备和应变片的精度,可以更准确地测试释放后的应变;采用数字图像相关(DIC)和激光干涉法等光学技术替代传统的应变花,减少对材料的破坏,提高测试效率和精度;利用大数据分析和人工智能算法优化数据处理过程,提高残余应力分析的准确性和可靠性。

1.6 压痕应变法

压痕应变法的测试原理为采用球形压头通过机械加载在工件被测区域内制造一定尺寸的压痕,利用应变仪测量由压痕导致的应变增量,通过对比标定弹性应变与应变增量关系计算原始残余应力,根

据测得的弹性应变增量基于弹性力学和标定计算常数计算残余应力分布。压痕应变法会在被测表面留下较小的压痕,但是一般不会影响构件的使用,可看作近似无损测试。压痕应变法最早由陈亮山在1993年第七届全国焊接学术会议上提出,随后由于哲夫等^[45]采用数值分析方法进行了理论分析验证。经过30 a的发展,压痕应变法的测试灵敏度和稳定性稳步提升,已形成相应的国家标准GB/T 24179—2023《金属材料残余应力测定 压痕应变法》^[46]。

压痕应变法的优点在于操作简便快捷,测试所需空间小,具有一定的工程实用性,目前我国工程现场测试中正逐步取代低速钻孔法。然而,该方法仅适用于硬度不大于50 HRC的金属材料的表面残余应力测试,且在新材料应用前需要进行应力计算系数试验或数值模拟标定。尽管如此,压痕应变法仍被认为是一种非常有应用前景的残余应力测试方法^[47-49]。

1.7 超声波法

超声波法的测试原理为利用沿应力方向传播的超声临界折射纵波波速与应力之间的线性关系对构件内部的残余应力进行定量表征^[18]。超声应力检测装置主要包括声波发射器、接收器、换能器、脉冲/回波系统、数据采集和信号处理单元、数据分析软件、显示和存储设备以及控制系统^[50]。发射器产生高频超声波,换能器将其传入材料中,接收器接收反射波并将其转化为电信号,数据采集系统记录这些信号,信号处理单元进行噪声滤除和信息提取,数据分析软件通过计算超声波传播特性与材料应力状态的关系来评估残余应力。

超声波法作为一种无辐射污染的无损检测技术,不会对被测材料造成损伤,具有快速、低成本等特点,且仪器便携,非常适合于工程现场的应力检测,能够在短时间内完成大面积的应力检测。超声波由于方向性好、发射定向,所以穿透深度大,特别适用于对涂覆层下的残余应力进行测试。徐春广等^[50]利用超声法对新疆克拉玛依“西气东输”管道焊缝残余应力进行现场检测,得到的残余应力较高的位置和后续的爆管验证试验所得的危险区域基本符合,是超声法现场测试残余应力的成功案例。然而,超声法得到的是被测区域的平均残余应力,其空间分辨率比较小,并且由于声速受到被测试样温度、晶粒尺寸等方面的影响,测得的残余应力数据波动较大,重复性不好,在实际工程应用中,需要进行相应的数值补偿。目前,为了提高超声波法的测试精

度,研究者正在探索新的数据处理算法和测试技术,不断更新换代超声波测试设备,以减少温度、材料晶粒尺寸等因素的影响,提高残余应力测试精度。

1.8 轮廓法

轮廓法是目前测试精度最高的有损检测技术之一,其理论基础为Bueckner叠加原理,即内部存在残余应力的试样沿特定截面切开时,应力释放并重新分布进而导致变形。该方法操作步骤如下:利用电火花线切割将试样沿需要评估残余应力的截面完整切开,使用三坐标测量机对切割面的三维形貌进行变形测试,将收集到的变形数据进行数据处理,并通过线弹性有限元模型三维建模来计算导致微变形的原始残余应力分布。轮廓法最早由美国劳斯阿拉莫斯国家实验室的工程师Prime博士于2000年在第六届国际残余应力会议上提出^[51],经过20 a的发展与完善,已得到广泛应用^[1]。

轮廓法的优势在于测试精度高和适用范围广,其空间分辨率主要取决于轮廓测试点阵的密度和有限元网格的划分,一般测量点间距和对应的有限元建模网格尺寸最小可至100 μm 左右,测试精度最高可达 ± 20 MPa。轮廓法能够提供垂直于切割面的二维残余应力分布,适用于外形尺寸复杂、应力梯度变化较大的试样,并且不受微观结构(如大晶粒或有明显织构取向)的影响,适用于内部结构复杂的试样^[52-53]。轮廓法的缺点在于计算应力方向单一、测试深度较小等,在测试精度、数据处理和设备标准化等方面仍有进步空间,需要持续的技术创新和方法优化。通过将轮廓法与X射线衍射法相结合,基于应力叠加原理可以获得测试切割面上另外两个方向的应力分布,实现构件残余应力的三维测试^[54];该方法排除了单一方法可能引入的技术性系统偏差,可以获得更为可靠的数据结果,还可以基于结果的对比分析,精准找出解决材料和装备制造以及设备运行存在的问题,从而提出并制定切实有效的解决方案。通过使用特大部件切割设备可以提高轮廓法的测试深度,对镍合金最高可以超过600 mm,相比中子衍射技术(30 mm)大大提高。

总的来说,轮廓法虽然存在一些问题,但还是凭借其独特的优势以及不断的技术改进优化被广泛用于航空、航天、核电、石油天然气、先进制造、铁路和轮船制造等领域的残余应力检测。

1.9 聚焦离子束-数字图像相关(FIB-DIC)技术

近年来,材料微纳米加工工艺技术得到快速发

展。了解材料的微纳米力学行为、分析与控制加工过程中工件产生的微观残余应力,对于设计与制备具有良好力学性能匹配的材料、提升工件的服役能力具有重要作用。为了更好地表征材料微纳米尺度上的残余应力分布,研究者开发出一种新型的FIB-DIC技术,将聚焦离子束(FIB)和数字图像相关(DIC)技术相结合,利用FIB进行微纳米级别的切割和成像,同时利用DIC对切割前后的图像进行分析,从而获得材料表面的微小应变分布,并结合胡克定律将应变数据转换为应力。MCCARTHY等^[55]首先使用FIB技术在薄膜材料表面切取悬臂试样,研究了应力释放对薄膜曲率变化的影响;KANG等^[55]开发了FIB铣槽技术,并结合基于DIC的高分辨应变绘图软件,成功测试了薄膜材料的微观残余应力分布,证实了FIB-DIC技术的可行性。为完善与发展FIB-DIC技术的理论基础与试验手段,研究者先后研发出如钻孔法、环芯法、铣槽法、H条型法与显微悬臂法等材料切取技术,并与高分辨扫描电镜(SEM)等显微表征手段结合,以提高其应变空间分辨率和测试精度^[56-65]。ZHU等^[58]使用FIB-DIC微纳米压痕技术测试了未来聚变反应堆用Eurofer97焊接件中的残余应力分布,发现焊接热影响区表现出约30%的拉伸残余应力软化现象,认为在微观尺度上观察到的残余应力是造成宏观残余应力的主要原因。YUE等^[59]使用FIB-DIC环芯铣削技术研究了机加工Ti-6Al-4V合金表面残余应力对硬度的影响,发现残余压应力与微观结构变化的共同作用导致表面硬度增加,且残余压应力的释放不会引起表面微观结构的显著变化。KROTTENTHALER等^[61]研究发现,通过铣槽法或环芯法切取试样会引入梯度分布应变场,从而导致残余应力测试出现误差。基于此,他们提出了一种创新的材料切取技术——H条型法^[62],通过在试样表面采用高精度设备切出尺寸和位置精确的H形切口,使得切口区域产生可控的局部应变场,并根据已有的力学模型或者有限元分析,将这些应变数据转化为残余应力的分布信息。H条型法凭借其精细的切割方式和高精度的应变分析,为解决铣槽法或环芯法等传统方法的误差问题提供了有效的途径,不仅提高了测试精度,也为材料性能研究和工业应用提供了重要的技术支持。通过与SEM结合,FIB-DIC技术的空间分辨率可达到微纳米级别,并且通过SEM还可以对工件进行实时观察,精确定位特定的组织结构,从而获得目标区域的

微观残余应力分布^[64]。

FIB-DIC技术具有空间分辨率和测试精度高等优点,在材料微观残余应力测试上有着独特的优势,被广泛应用于涂层材料、薄膜材料、金属材料、高分子材料、复合材料的残余应力测试;但该方法存在仪器笨重、操作成本高、不适合现场测试等缺点,这也限制了其在工业上的进一步应用。

1.10 仪器化压入技术

残余应力会影响材料的力学性能,因此可以将应力状态下的力学性能与无应力状态下的力学性能进行对比来评估残余应力的分布状态。例如,材料内存在的垂直于硬度测试压入方向的单/双轴残余拉应力会在压入过程中累积在最大剪切应力面上,导致更大的塑性形变,从而降低硬度,反之则增加硬度,而残余压应力的影响面可能不与最大剪切应力面重合,因此对硬度影响有限^[66]。基于硬度反映残余应力分布理论提出的仪器化压入(也称纳米压痕)技术,通过记录和分析压入过程中的试验力和压入深度曲线来获得被测材料的压入硬度、模量和屈服强度等力学参数^[67],再通过诸如La Fontaine和Suresh等力学模型将力学性能参数转化为残余应力。La Fontaine模型^[68]是较早被提出可以将硬度转化为残余应力的解析模型,然而,由于硬度受到残余应力的影响有限,变化值一般不会超过10%,且模型中的假设条件为无应力均匀半空间,与实际并不相符,因此该模型的准确性和适用范围受到很大限制^[69-70]。为了进一步理解残余应力对硬度测试影响的内在机理,TSUI等^[71]选取材料固有属性弹性模量为参考,研究了残余应力变化对材料弹性模量的影响,结果表明残余拉应力使弹性模量降低,残余压应力使弹性模量增加,与硬度的变化高度相似。但是,弹性模量作为材料固有属性,不应该受到残余应力的影响。通过进一步分析,TSUI等^[72]发现:残余应力实际上是通过影响接触刚度,改变了基于接触力学计算得到的接触面积、硬度和模量结果,而通过直接测量接触面积计算得到的模量和硬度是不变的;有限元数值模拟结果表明,残余应力会影响到压痕周围的堆积和压陷,这也是残余应力会影响硬度和模量测试结果的根本原因。基于这个结论,建立了使用接触面积评估残余应力的Suresh解析模型,该模型以压入力-位移加载曲线为依据,通过有无应力状态的接触面积比来计算残余应力^[73]:相比无应力试样,存在残余拉应力试样的压入力-位移加载曲线

斜率会降低,而存在残余压应力试样的压入力-位移加载曲线斜率会增加。Suresh模型推动了仪器化压入技术检测残余应力的发展,但是需要对压痕大小进行直接测量,这在一定程度上限制了其推广应用。LEE等^[74]对Suresh模型进行了优化改进,利用无应力状态试样的压入载荷-深度曲线计算模量,并利用该模量作为输入条件,计算得到残余应力试样的实际接触深度和接触面积,进而得到压入载荷和接触面积之间的经验函数,并在此基础上计算残余应力,结果表明此方法的计算准确性更高。

仪器化压入技术为近似无损检测技术,具有操作简单、适用范围广、数据信息丰富、标准化程度高、能够快速获得多个力学性能参数的优点,广泛用于工业领域尤其是管道残余应力的现场测试上,并且在核电领域也有很好的应用前景。但是,该技术不适用于软质材料,存在需要对比基准,计算模型普适性、可靠性和一致性还需要进一步系统研究等问题^[75]。

1.11 深孔法

深孔法的测试原理为基于弹性应变释放假设,通过测量不同深度截面上的孔径变化量,计算得到材料内部应力沿深度方向的分布规律。深孔法最早由英国接研究所的Leggatt等开发,并由英国布里斯托大学的Smith等进一步发展应用^[76]。

深孔法穿透力强,可测试不同厚度(最深可达

450 mm)金属材料中的残余应力,是评估厚截面材料内部残余应力的有效工具;测量精度较高,对于钢、铝和钛,其测试精度分别可达30, 10, 15 MPa,满足多数工程需求。深孔法通过按增量步套取圆柱体并多次测量参考孔直径,可以有效避免塑性变形的影响,提高测试准确性,并且通过逐步优化和完善操作步骤,可以在不显著影响被测部件结构完整性的前提下进行有效测量。经过多年发展,深孔法技术相对成熟,有完善的理论基础和丰富的试验支撑,但是也存在准备工作复杂、成本较高、测试时间较长、环境条件要求高、后期处理复杂、误差来源多样(如参考孔表面粗糙度、空气塞规测量重复性、弹性模量和应力释放时塑性区的影响等)等问题,在选择和应用该技术时,应充分考虑优缺点,结合具体情况权衡,以期达到最佳测试效果^[77-78]。

2 残余应力检测技术的选择

每种残余应力检测技术都各有优缺点,需要综合考虑多方因素来进行选择,如测试目标、成本和时间、测试环境、材料类型、试样形状尺寸、测试深度、空间分辨率、结果不确定度、设备和操作人员经验和残余应力特征等,表2列出了常见因素及考虑重点。一般来说,对于工业应用场景,X射线衍射法因具有实时现场测试和操作简便等优点而应用最为广泛,若待测试样为大晶粒或者具有明显织构取向的金属

表2 选择残余应力检测技术的主要考虑因素

Table 2 Main considerations for choosing residual stress testing techniques

主要因素	具体说明
测试目标	确定需要测试的应力方向和分布等关键信息,明确测试位置(表面/内部)、测试区域大小以及分布信息的详细程度(应力的点/线/面/体分布)
成本和时间	对于用到大科学装置(如中子衍射法或同步辐射X射线衍射法)的测量,要预留出足够的成本和时间
测试环境	一般来说,实验室测试可选择的方法更多,测试精度也更高;现场测试环境在一定程度上会增加测量误差,需要在安全性和操作性上做好详细的试验方案
材料类型	金属材料适用的测试方法较多,在选择衍射法的时候要考虑晶粒大小和取向分布等;非金属材料(如陶瓷材料)使用小孔法、压痕法和轮廓法等可以满足一些基本测试需求;高分子材料测试方法尚不成熟,测试难度高
试样尺寸和形状	一般来说,小试样、曲率较大的试样、复杂形状试样、大且厚的试样测试难度高,需要考虑仪器设备的载物空间、射线路径、测量分辨率等
测试深度	不同方法对应的测试深度不同,这也受到材料类型的影响
空间分辨率	采集信号所代表的试样体积单位,往往和应力测试云图中的像素点相对应。对于小试样或者应力分布梯度较大的区域,需要考虑采用具有较高空间分辨率的测量方法
结果不确定度	不确定度和检测原理、设备和数据分析方法相关,需要认真评估主要不确定度来源;检测设备校准和操作人员培训等措施可以在一定程度上改善不确定度
设备和操作人员	需要考虑测试设备的安全性和可操作性;需要对测试设备进行必要的校准和验证,对操作人员提供必要的业务知识培训
残余应力特征	在测试之前对被测试样应力状态有一个大致的判断(比如最大应力的范围、大约的梯度分布等),可以有效优化试验方案,提高测试成功率

材料,可考虑采用小孔法或者环芯法代替;对于测试精度和空间分辨率不高的应用场景,可考虑采用成本低、效率高的超声法或磁测法;对于需要测试大构件内部残余应力时,可考虑采用中子衍射法或同步辐射X射线衍射法,但这两种技术成本高、时间长,如果不介意损坏待测试样,可考虑采用深孔法或轮廓法。此外,也可以多种方法结合来进行残余应力检测,以实现互补和相互验证。例如,欧洲核电安全条例要求采用两种不同测试原理的残余应力检测技术对核电异种金属焊接管道进行残余应力测试^[70],一般先采用中子衍射法进行无损检测,再利用轮廓法得到更高空间分辨率的环向和轴向残余应力分布云图。总的来说,在开展应力检测工作之前,要综合考虑多方因素,做好测试方案。

3 应用案例

3.1 航空发动机部件的残余应力检测

随着航空发动机研制和生产技术的深入发展,高端装备制造对构件残余应力检测与调控的测试精度、操作便捷性、普适性等提出了更高要求^[79]。航空发动机中高温合金涡轮盘经热锻后,由于塑性变形不均匀会在厘米级宏观尺寸范围内引起较高的残余应力。STARON等^[80]使用中子衍射技术对热锻高温合金涡轮盘内部的残余应力进行测试,结合有限元模拟获得了涡轮盘件固溶冷却温度场和残余应力场;ZHANG等^[81]结合中子衍射法和X射线衍射技术,分别对涡轮盘制造过程中、固溶处理和时效处理后从表面到内部的残余应力分布进行检测,为关键工程构件的低应力制造和延长服役寿命提供重要依据。涡轮后机匣由于自身体积大、结构复杂,不能使用无应力试样作为无应力状态晶面间距的测试标样,必须在机匣原件选定的位置完成应力测试后将其切割释放应力,再进行无应力标定。师俊东等^[82]使用中子衍射法检测机匣残余应力分布,并通过主应力(周向)方向的泊松效应即衍射矢量方向的拉应变,推算出周向受到的压应力作用,并进一步计算获得其周向平均压应力。航空发动机转子叶片是航空发动机的关键零部件之一,对发动机的可靠性和安全性具有重要影响,工程上通常会在叶片表面施加一定的残余压应力场以提高叶片的稳定性和使用寿命^[82]。刘建勋等^[83]使用X射线衍射法检测不同工作时间下叶片表面的残余应力演变,发现叶片表层残余应力会随着工作时间的延长而逐渐衰减,叶片易

损部位和载荷集中部位的残余应力衰减更为迅速。

3.2 核电站安全端构件的残余应力检测

焊接是核电设备中常见的连接成形方式。核电设备服役环境恶劣,焊接结构除需长期承受高温、高压作用外,还承受着中子辐照、启停堆功率变化引起的压力突变等作用。焊缝作为焊接结构的薄弱环节,其质量和性能直接关系到核电设备的安全运行和服役寿命。一回路主管道被称为核电站的“主动脉”,AP1000压水堆一回路主管道多采用大型316LN超低碳控氮奥氏体不锈钢整体锻造管,采用窄间隙全自动非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG)进行焊接。谷雨等^[84]使用盲孔法检测了主管道的焊接应变场和残余应力场,发现焊接过程中的变形主要集中在焊接初始阶段,焊缝收缩量随着焊接厚度的增加而增加,主管道的焊接残余应力主要集中在热影响区,其轴向应力略高于环向应力。谷雨等^[85]研究发现,使用盲孔法测得CAP1400核电站接管和安全端模焊接接头的环向与轴向焊接残余应力均为拉应力,最大焊接残余应力位于安全端镍基合金堆焊层与对接焊缝熔合线附近。此外,对于大型焊接结构上的残余应力分布,特别是焊缝内部或应力梯度较大的位置,采用一般的测试方法难以准确获得残余应力分布,结合数值模拟法成为了解决该问题的最佳途径。李晓波^[86]采用有限元数值模拟的方法计算了核电压力容器安全端异种焊接接头在温度耦合场下的残余应力场,为定量预测焊接接头残余应力场下裂纹扩展和疲劳断裂提供了依据。结合实际检测结果开发可靠的数值计算方法,将有助于工程人员预测实际焊接结构的残余应力分布,评价核电设备的安全服役寿命^[87-88]。

3.3 船舶安全结构的残余应力检测

船舶制造领域中热切割成形和焊接组装的复杂钢结构应用较多。同一个工件在经过热切割、焊接等连续加工后,会生成切割残余应力和焊接残余应力,作为先序工艺的切割应力场和后续工艺的焊接温度场相互作用,最后生成一种耦合残余应力场。相较于单项工艺产生的残余应力场,耦合应力场的影响因素更多,分布形式更复杂。残余应力与船舶运行期间的货物压力和波浪弯矩等外部载荷的叠加,会使结构载荷达到屈服应力,降低船舶的结构强度和安全性。CHUKKAN等^[89]使用中子衍射法对船舶用DH36钢的平板对接接头以及T型焊接接头的残余应力分布进行研究,并基于实际测量数据对

焊接结构进行有限元模拟,在焊缝附近获得相似的残余应力分布规律,阐明了后续加载过程中焊缝附近残余应力的演变过程。朱海洋等^[90]结合X射线衍射法和小孔法对超声冲击处理前后EQ56自由对接接头和EQ47拘束角接头的焊接残余应力变化进行研究,结果显示超声冲击区域的焊接拉应力全部转化为压应力,且压应力大小均匀,均值分别达到母材理论屈服强度的0.5~0.8和1.1~1.3倍。安少鹏^[91]针对外加载荷与残余应力的叠加作用,运用有限元分析方法对计入工艺残余应力的船体强度校核方法以及残余应力对船体强度的影响规律进行了总结,分析了焊接顺序、构件尺寸、板厚等因素对残余应力分布的影响,用于指导残余应力的控制和消除工作。

4 结束语

残余应力直接影响工程构件的加工质量、服役安全和使用寿命,选择合适的检测技术往往能产生事半功倍的效果。目前,主要的残余应力检测技术有X射线衍射法、中子衍射法、超声临界折射纵波法、磁测法、压痕应变法、仪器化压入法、FIB-DIC、小孔法、深孔法、环芯法、轮廓法等。不同技术各有优缺点,进行选择时需注意综合考虑测试目标、成本和时间、测试环境、材料类型、试样形状尺寸、测试深度、空间分辨率、结果不确定度、设备、操作人员经验和残余应力特征等因素。目前残余应力检测技术已广泛应用于航空发动机部件、核电站安全端构件和船舶安全结构等领域。

尽管残余应力检测技术取得了长足进展,但仍面临一些挑战,主要问题包括:检测精度和灵敏度在某些条件下仍有待提高;不同检测技术在不同材料和结构中的适用性差异较大,难以实现通用化;检测过程复杂且成本高,尤其是对深层和大尺度结构的检测;对检测设备和操作人员的技术要求高,影响了检测技术的普及和应用。随着装备构件制造工艺及服役性能的不断优化,工程构件残余应力检测技术日新月异,逐步趋向于有损测量与无损测量技术结合、三维测量与平面测量技术结合、高温性能与低温性能研究结合、微观结构与宏观结构研究结合、大科学装置与便携式测试设备结合、试验研究与理论分析结合的“六大结合”的综合发展方向。在这样的发展趋势下,未来的主要科研方向包括:开发高灵敏度和高分辨率的检测方法,以满足精细化检测需求;

研发适用现场和在线应用场景的无损内部应力检测方法;推进多技术融合,实现残余应力的全方位、多尺度检测;优化检测设备和工艺,降低检测成本并提高操作简便性;开展人工智能和工业机器人辅助的残余应力测试研究,进一步提升测试效率和测试结果的准确性;大力推进测试设备的校准和溯源、标准样品开发等方面的计量工作,逐步完善残余应力检测技术规范 and 标准体系,进一步提升残余应力检测结果的可靠性和准确性。

参考文献:

- [1] TABATABAEIAN A, GHASEMI A R, SHOKRIEH M M, et al. Residual stress in engineering materials: A review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(3): 2100786.
- [2] XIAO G J, CHEN B Q, LI S C, et al. Fatigue life analysis of aero-engine blades for abrasive belt grinding considering residual stress[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 131: 105846.
- [3] SHAO Z Y, ZHANG C C, LI Y K, et al. A review of non-destructive evaluation (NDE) techniques for residual stress profiling of metallic components in aircraft engines[J]. *Aerospace*, 2022, 9(10): 534.
- [4] ALIPOORAMIRABAD H, KIANFAR S, PARADOWSKA A, et al. Residual stress measurement in engine block: An overview[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 131(1): 1-27.
- [5] HASAN ALHAFADHI M, KRALLICS G. Simulation of the residual stress in a multi-pass oil and gas pipe weld joint[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1527(1): 012005.
- [6] MOSLEMI N, ABDI B, GOHARI S, et al. Influence of welding sequences on induced residual stress and distortion in pipes[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 127995.
- [7] WU Y, ZOU R, WANG Y H, et al. Residual stress in oil and gas pipelines with two types of dents during different lifecycle stages[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(6): 1832-1844.
- [8] TAN L, ZHAO L Y, ZHAO P C, et al. Effect of welding residual stress on operating stress of nuclear turbine low pressure rotor[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52(8): 1862-1870.
- [9] WU X. On residual stress analysis and microstructural evolution for stainless steel type 304 spent nuclear

- fuel canisters weld joint: Numerical and experimental studies[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2020, 534: 152131.
- [10] XIONG Q R, QU Y X, ROBIN V, et al. Residual stress assessment for dissimilar metal welds in nuclear power plant[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2023, 206: 105018.
- [11] GUO J, FU H Y, PAN B, et al. Recent progress of residual stress measurement methods: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(2): 54-78.
- [12] BOBZIN K, WIETHEGER W, KNOCH M A, et al. Comparison of residual stress measurements conducted by X-ray stress analysis and incremental hole drilling method[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(6): 1218-1228.
- [13] RAZUMOVSKII I A, USOV S M. Development of the hole-drilling method as applied to the study of inhomogeneous residual stress fields[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, 50(8): 727-734.
- [14] OLSON M D, DEWALD A T, HILL M R. Precision of hole-drilling residual stress depth profile measurements and an updated uncertainty estimator[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(3): 549-564.
- [15] ZHANG W Y, GUO D, WANG L, et al. X-ray diffraction measurements and computational prediction of residual stress mitigation scanning strategies in powder bed fusion additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 61: 103275.
- [16] JIANG W C, WAN Y, TU S T, et al. Determination of the through-thickness residual stress in thick duplex stainless steel welded plate by wavelength-dependent neutron diffraction method[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 196: 104603.
- [17] YILDIRIM C, JESSOP C, AHLSTRÖM J, et al. 3D mapping of orientation variation and local residual stress within individual grains of pearlitic steel using synchrotron dark field X-ray microscopy[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 197: 113783.
- [18] ACEVEDO R, SEDLAK P, KOLMAN R, et al. Residual stress analysis of additive manufacturing of metallic parts using ultrasonic waves: State of the art review[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 9457-9477.
- [19] LEE J, MARIMUTHU K P, HAN G, et al. A dual indentation method for evaluating intrinsic material properties of metals under residual stress[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 4181-4191.
- [20] 胡建民,王蕊,王春婷,等. 晶体X射线衍射模型和布拉格方程的一般推导[J]. *大学物理*, 2015, 34(3): 1-2.
- HU J M, WANG R, WANG C T, et al. General derivation of crystal X-ray diffraction model and Bragg's equation[J]. *University Physics*, 2015, 34(3): 1-2.
- [21] 程时美. 不同X射线残余应力测定方法的原理与应用[J]. *理化检验(物理分册)*, 2021, 57(11): 13-19.
- CHENG S M. Principle and application of different X-ray residual stress measurement methods[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2021, 57(11): 13-19.
- [22] 付绍娟,王汉利. 聚全氟乙丙烯中六氟丙烯的表征及计算方法研究进展[J]. *有机氟工业*, 2022(2): 49-52.
- FU S J, WANG H L. Research progress in characterization and calculation methods of hexafluoropropylene in FEP[J]. *Organo-Fluorine Industry*, 2022(2): 49-52.
- [23] 张亦良,程咏梅,徐学东,等. X射线法测试1 500 m³乙烯球罐焊接残余应力的现场应用[J]. *实验力学*, 1997, 12(1): 162-168.
- ZHANG Y L, CHENG Y M, XU X D, et al. Determination the welding residual stress in a spherical vessel by X ray method in the working field[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1997, 12(1): 162-168.
- [24] LODH A, THOOL K, SAMAJDAR I. X-ray diffraction for the determination of residual stress of crystalline material: An overview[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2022, 75(4): 983-995.
- [25] 吴杰,党嘉强,李宇罡,等. 应力超声滚压表面强化机理和抗疲劳性能研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(9): 127-136.
- WU J, DANG J Q, LI Y G, et al. Study on strengthening mechanism and anti-fatigue performance of stress ultrasonic rolling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(9): 127-136.
- [26] 丁子珊,滕益康,郭森现,等. 考虑微观影响的磨削残余应力解析模型研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(23): 372-390.
- DING Z S, TENG Y K, GUO M X, et al. Research on analytical model of grinding residual stress considering the influence of microstructure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(23): 372-390.
- [27] 周安阳,郭伟玲,黄艳斐,等. 磁场对合金材料服役性能影响的研究进展[J]. *材料导报*, 2024, 38(10): 196-208.
- ZHOU A Y, GUO W L, HUANG Y F, et al. Research progress of influence of magnetic field on service

- performance of alloy materials[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(10): 196-208.
- [28] XIE L C, JIANG C H, LU W J, et al. Investigation on the residual stress and microstructure of (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V composite after shot peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(9): 3423-3427.
- [29] JI P F, ZHANG J, ZHENG L, et al. Comparison of residual stress determination using different crystal planes by short-wavelength X-ray diffraction in a friction-stir-welded aluminum alloy plate[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(21): 12834-12847.
- [30] 叶升平, 钟涵, 郑森木, 等. 残余应力超声检测在铝合金锻环机械加工中的应用[J]. *航天制造技术*, 2024(2): 29-32.
- YE S P, ZHONG H, ZHENG S M, et al. The application of residual stress ultrasonic testing technology in aluminum alloy ring forging machining[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2024(2): 29-32.
- [31] SEDIGH RAHIMABADI P, KHODAEI M, KOSWATTAGE K R. Review on applications of synchrotron-based X-ray techniques in materials characterization[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2020, 49(3): 348-373.
- [32] WITHERS P J. Fracture mechanics by three-dimensional crack-tip synchrotron X-ray microscopy[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2015, 373(2036): 20130157.
- [33] STEUWER A, RAHMAN M, SHTERENLIKHT A, et al. The evolution of crack-tip stresses during a fatigue overload event[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(11): 4039-4052.
- [34] TENGATTINI A, LENOIR N, ANDÒ E, et al. Neutron imaging for geomechanics: A review[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, 27: 100206.
- [35] JEFFRIES C M, ILAVSKY J, MARTEL A, et al. Small-angle X-ray and neutron scattering[J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, 1: 70.
- [36] TURSKI M, PARADOWSKA A, ZHANG S Y, et al. Validation of predicted residual stresses within direct chill cast magnesium alloy slab[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(5): 1547-1557.
- [37] WEN K I, ABE Y. A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1(1): 1-11.
- [38] 王楠, 罗岚, 刘勇, 等. 金属构件残余应力测量技术进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(10): 2508-2517.
- WANG N, LUO L, LIU Y, et al. Research progress on stress measurement technology for metal components[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(10): 2508-2517.
- [39] 胡龙, 刘红艳, 成慧梅, 等. 超高强耐磨钢NM500多层多道对接接头残余应力的研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(4): 335-344.
- HU L, LIU H Y, CHENG H M, et al. Study on residual stress of multi-layer and multi-pass butt-welded joint for ultra-high strength wear-resistant steel NM500[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(4): 335-344.
- [40] WANG J L, LU Y R, LI H H, et al. Large area co-assembly of nanowires for flexible transparent smart windows[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(29): 9921-9926.
- [41] 陈忠安, 孙国超, 赵玉津, 等. 环芯法测定残余应力适用范围的拓展[J]. *机械工程材料*, 2015, 39(12): 47-50.
- CHEN Z A, SUN G C, ZHAO Y J, et al. Extension of applicable range of measuring residual stress by ring-core method[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2015, 39(12): 47-50.
- [42] 王庆伟. 环芯法和X射线法测量大型轮盘锻件的残余应力[J]. *大型铸锻件*, 2018(3): 52-54.
- WANG Q W. Ring core method and X-ray method for measuring the residual stresses in large disk forgings[J]. *Heavy Casting and Forging*, 2018(3): 52-54.
- [43] 周新灵, 张小伍, 李兴东, 等. 测试大型汽轮机转子残余应力的环芯法和X射线法[J]. *理化检验(物理分册)*, 2008, 44(4): 196-197.
- ZHOU X L, ZHANG X W, LI X D, et al. Ring core method and X-ray method of testing residual stress of large steam turbine rotor[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2008, 44(4): 196-197.
- [44] 于思奇. 环芯法测量大型电站转子残余应力[J]. *一重技术*, 2019(4): 62-64.
- YU S Q. Measurement of residual stress in large rotors for power plants by ring core method[J]. *CFHI Technology*, 2019(4): 62-64.
- [45] 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*, 2001(3): 200-202.
- YU Z F, ZHAO Y H, CHEN H N, et al. Impacted indentation method of measuring residue stress[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 2001(3): 200-

- 202.
- [46] 张亚,戴忠晨,李东风,等. 6082铝合金中厚板高频脉冲MIG对接焊工艺及接头的残余应力[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 76-80.
ZHANG Y, DAI Z C, LI D F, et al. Welding procedure & residual stress of 6082 6082-T6 aluminum alloy medium plate butt welded joint by high-frequency pulse MIG welding process[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(12): 76-80.
- [47] 孟宪陆,陈怀宁,林泉洪,等. 不同残余应力场中静载压痕周围的塑性区问题[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(6): 50-53.
MENG X L, CHEN H N, LIN Q H, et al. Plastic zone around indentation under different residual stress[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(6): 50-53.
- [48] 陈怀宁,胡凯雄,吴昌忠. 压痕应变法测量残余应力的不确定度分析[J]. 中国测试, 2010, 36(1): 24-27.
CHEN H N, HU K X, WU C Z. Uncertainty evaluation in measuring residual stress by indentation strain method[J]. China Measurement and Test, 2010, 36(1): 24-27.
- [49] 陈静,阚盈,姜云禄,等. 压痕应变法应力计算函数和低合金钢力学性能的关系[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 133-138.
CHEN J, KAN Y, JIANG Y L, et al. Relationship between stress calculation function of indentation strain-gage and mechanical properties of lowalloy steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 133-138.
- [50] 徐春广,宋文涛,潘勤学,等. 残余应力的超声检测方法[J]. 无损检测, 2014, 36(7): 25-31.
XU C G, SONG W T, PAN Q X, et al. Residual stress nondestructive testing method using ultrasonic[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(7): 25-31.
- [51] LIN S, BAI X P, WANG H Y, et al. Roll-to-roll production of transparent silver-nanofiber-network electrodes for flexible electrochromic smart windows[J]. Advanced Materials, 2017, 29(41): 1703238.
- [52] 余其芳,成雨萱,韦有翔,等. 电弧增材制造过程形性调控方法及在线质量监测技术研究进展[J]. 焊接技术, 2023, 52(3): 1-13.
YU Q F, CHENG Y X, WEI Y X, et al. Review on shape control and online monitoring of wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. Welding Technology, 2023, 52(3): 1-13.
- [53] EVANS A, JOHNSON G, KING A, et al. Characterization of laser peening residual stresses in Al 7075 by synchrotron diffraction and the contour method[J]. Journal of Neutron Research, 2007, 15(2): 147-154.
- [54] PAGLIARO P, PRIME M B, ROBINSON J S, et al. Measuring inaccessible residual stresses using multiple methods and superposition[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(7): 1123-1134.
- [55] MCCARTHY J, PEI Z, BECKER M, et al. FIB micromachined submicron thickness cantilevers for the study of thin film properties[J]. Thin Solid Films, 2000, 358(1/2): 146-151.
- [56] ALINAGHIAN M, ALINAGHIAN I, HONARPISHEH M. Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2019, 2(2): 131-139.
- [57] ZENG Z Y, NGUYEN T A K, DANG N M, et al. FIB-DIC ring-core measurement of the residual stress on HiPIMS W/Cu and Cr/Cu multilayer thin films[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 483: 130768.
- [58] ZHU B, WANG Y Q, DLUHOŠ J, et al. A novel pathway for multiscale high-resolution time-resolved residual stress evaluation of laser-welded Eurofer97[J]. Science Advances, 2022, 8(7): eabl4592.
- [59] YUE Q B, LI Y F, LIANG C, et al. Quantitative evaluation of residual stress and microstructural effects on the surface hardness of machined Ti-6Al-4V alloy with microscopic characterization techniques[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 327: 118382.
- [60] KORSUNSKY A M, SEBASTIANI M, BEMPORAD E. Focused ion beam ring drilling for residual stress evaluation[J]. Materials Letters, 2009, 63(22): 1961-1963.
- [61] KROTTENTHALER M, SCHMID C, SCHAUFLEER J, et al. A simple method for residual stress measurements in thin films by means of focused ion beam milling and digital image correlation[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 215: 247-252.
- [62] KROTTENTHALER M, BENKER L, MUGHAL M Z, et al. Effect of elastic anisotropy on strain relief and residual stress determination in cubic systems by FIB-DIC experiments[J]. Materials and Design, 2016, 112: 505-511.
- [63] WANG Q H, XIE H M, LIU Z W, et al. Residual stress assessment of interconnects by slot milling with FIB and geometric phase analysis[J]. Optics and Lasers in

- Engineering, 2010, 48(11): 1113-1118.
- [64] MASSL S, THOMMA W, KECKES J, et al. Investigation of fracture properties of magnetron-sputtered TiN films by means of a FIB-based cantilever bending technique[J]. Acta Materialia, 2009, 57(6): 1768-1776.
- [65] SABATÉ N, VOGEL D, GOLLHARDT A, et al. Digital image correlation of nanoscale deformation fields for local stress measurement in thin films[J]. Nanotechnology, 2006, 17(20): 5264-5270.
- [66] SIMES T R, MELLOR S G, HILLS D A. A note on the influence of residual stress on measured hardness[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1984, 19(2): 135-137.
- [67] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [68] LA FONTAINE W R, PASZKIET C A, KORHONEN M A, et al. Residual stress measurements of thin aluminum metallizations by continuous indentation and X-ray stress measurement techniques[J]. Journal of Materials Research, 1991, 6(10): 2084-2090.
- [69] DOERNER M F, NIX W D. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments[J]. Journal of Materials Research, 1986, 1(4): 601-609.
- [70] LEE Y H, KWON D. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters[J]. Acta Materialia, 2004, 52(6): 1555-1563.
- [71] TSUI T Y, OLIVER W C, PHARR G M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research, 1996, 11(3): 752-759.
- [72] TSUI T Y, OLIVER W C, PHARR G M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research, 1996, 11(3): 752-759.
- [73] SURESH S, GIANNAKOPOULOS A E. A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5755-5767.
- [74] LEE Y H, KWON D. Measurement of residual-stress effect by nanoindentation on elastically strained (100) W[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(5): 459-465.
- [75] HOU X D, JENNETT N M. A method to separate and quantify the effects of indentation size, residual stress and plastic damage when mapping properties using instrumented indentation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(45): 455304.
- [76] LEGGATT R H, SMITH D J, SMITH S D, et al. Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1996, 31(3): 177-186.
- [77] HOSSAIN S, TRUMAN C E, SMITH D J. Finite element validation of the deep hole drilling method for measuring residual stresses[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, 93: 29-41.
- [78] CEGLIAS R B, ALVES J M, BOTELHO R A, et al. Residual stress evaluation by X-ray diffraction and hole-drilling in an API 5L X70 steel pipe bent by hot induction[J]. Materials Research, 2016, 19(5): 1176-1179.
- [79] ZHANG Q W, SHI K H, GU J B, et al. Effect of carbon content near the decarbonization phase boundary on the physical and mechanical properties of WC-6% Co cemented carbides[J]. Journal of Superhard Materials, 2022, 44(5): 350-357.
- [80] CIHAK U, STARON P, CLEMENS H, et al. Characterization of residual stresses in turbine discs by neutron and high-energy X-ray diffraction and comparison to finite element modeling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 437(1): 75-82.
- [81] ZHANG Z W, FENG Y F, TAN Q, et al. Residual stress distribution in Ni-based superalloy turbine discs during fabrication evaluated by neutron/X-ray diffraction measurement and thermomechanical simulation[J]. Materials and Design, 2019, 166: 107603.
- [82] 师俊东, 耿长建, 邢丕臣, 等. 基于中子衍射技术的航空发动机部件残余应力测试分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 59-65.
- SHI J D, GENG C J, XING P C, et al. Test and analysis on residual stress of aeroengine components based on neutron diffraction[J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 59-65.
- [83] 刘建勋, 翟旭升, 谢岩甫, 等. 基于状态辨识的航空发动机转子叶片剩余寿命模型[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(1): 1-5.
- LIU J X, ZHAI X S, XIE Y F, et al. Residual life model of aero-engine rotor blades based on condition identification[J]. Gas Turbine Experiment and

- Research, 2022, 35(1): 1-5.
- [84] 谷雨,余燕,左波,等. AP1000核电站主管道焊接变形与残余应力研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(15): 154-156, 160.
GU Y, YU Y, ZUO B, et al. Research on welding deformation and residual stress for main pipe of AP1000 nuclear power plant[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(15): 154-156, 160.
- [85] 谷雨,张俊宝,余燕. CAP1400核电站接管和安全端焊接变形与残余应力研究[J]. 压力容器, 2016, 33(6): 8-11.
GU Y, ZHANG J B, YU Y. Investigation on welding deformation and residual stress for nozzle safe-end welded joints of CAP1400 nuclear power plant[J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(6): 8-11.
- [86] 李晓波. 核电压力容器安全端焊接接头残余应力场数值模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
LI X B. Numerical simulation of residual stress field of welded joint at safety end of nuclear power pressure vessel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [87] 李云龙. 氧化预处理对超细晶硬质合金材料性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022, 50(6): 83-89.
LI Y L. Effect of oxidation pretreatment on properties of ultrafine grain cemented carbide material[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2022, 50(6): 83-89.
- [88] 林炳焜,徐晓,金挺,等. 贯穿件J形坡口焊接残余应力分析[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 70-74.
LIN B C, XU X, JIN T, et al. Analysis of weld residual stress of J-groove weld in penetrate part[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(1): 70-74.
- [89] CHUKKAN J R, WU G Y, FITZPATRICK M E, et al. Residual stress redistribution during elastic shake down in welded plates[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 165: 21004.
- [90] 朱海洋,刘川,邹家生. 超声冲击对海洋工程大厚度高强钢焊接残余应力的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2015, 29(3): 229-233.
ZHU H Y, LIU C, ZOU J S. Effect of ultrasonic impact treatment on residual stress of large-thickness and high-strength steel welding structure in offshore engineering[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 29(3): 229-233.
- [91] 安少鹏. 基于船舶结构安全的工艺残余应力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
AN S P. Research on process residual stress based on ship structure safety[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.

Residual Stress Detection Technology and Its Applications

HOU Xiaodong^{1,2}, HUANG Zhaowen³, GAO Jianbo², WU Guiyi², ZHANG Ruiyao², ZHANG Shuyan²

(1. Division of Mechanics and Acoustics, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China; 2. Research Institute of Interdisciplinary, Dongguan 523808, China; 3. Centre of Excellence for Advanced Materials, School of Materials Science and Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: With the continuous improvement of China's industrial level, the issue of residual stress is receiving more and more attention. Accurate measurement and control of residual stress can improve material properties, enhance dimension precision, extend lifespan, further enhance the safety and reliability of key engineering components. Therefore, the residual stress detection technology plays a significant role in fields such as aerospace, nuclear power and shipbuilding, and provide critical data support for the mechanical performance research and safety assessment of engineering components. The principles, applicable scopes, advantages and disadvantages of current residual stress detection technologies are summarized. The main factors need to be considered when choosing suitable detection technologies are discussed. The development trends of residual stress detection technology in scientific research and application fields are pointed out.

Key words: residual stress measurement; neutron diffraction; contour method; X-ray diffraction; synchrotron radiation; deep hole drilling method