

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.06

残余应力测试与校准方法研究现状与展望

王辰辰

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 简单介绍了残余应力产生的原因及其对材料性能的影响, 分析了现阶段残余应力测试方法的基本原理、应用场合和优缺点等, 尤其是对目前普遍使用的 X 射线衍射法、中子衍射法、纳米压痕法、钻孔法等残余应力测试方法进行了详细说明。针对残余应力准确测量需求, 分析现阶段基于标样法和仪器性能校准的残余应力校准方法, 并说明了校准对残余应力准确测量的重要意义, 最后总结了残余应力测试与校准方法的发展方向。

关键词: 残余应力测量; 无损检测; 校准; X 射线衍射

中图分类号: TB931

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0056-08

Review on Measurement and Metrology Methods of Residual Stress

WANG Chenchen

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The generation of residual stress and its influence on the performance of materials are summarized. The basic principles, applications, advantages and disadvantages of the current measurement methods of residual stress are analyzed, especially for the methods of X-ray diffraction, neutron diffraction, nanoindentation and hole-drilling. In response to the need for accurate measurement of residual stress, the current calibration method of residual stress based on sample and instrument function are given. The importance of calibration for accurate residual stress measurement is emphasized. The future development of measurement and calibration methods of residual stress are prospected.

Key words: residual stress measurement; non-destructive test; calibration; X-ray diffraction

0 引言

构件在制造过程中会经历各种工艺, 由于制造工艺产生的不均匀的机械形变、温度变化和相变等, 往往使材料产生不均匀的塑性变形。去除外部作用后, 由于残留的塑性变形对材料的作用, 会在材料内部存在相应的弹性变形, 以保持构件的平衡状态, 并使材料内部产生应力, 称为内应力。德国学者 Macherauch E 将内应力分为三类^[1]: 第一类内应力在材料的较大区域存在并且被认为是均匀的, 与之相关的内力和内力矩在物体的各个截面上保持平衡, 称这种内应力为宏观内应力; 第二类内应力存在于材料的较小范围, 在足够多的晶粒范围内, 与之相关的内力和内力矩是平衡的; 第三类内应力存在于材料的极小范围内。目前, 工程上普遍将第一类内应力称为残余应力^[2]。根据 GB/T 7704-2017《无损检测 X 射线应力测定方法》中的描述, 将残余应力定义为在没有外力或外力矩作用的条件下, 构件或材料内部存在并使自身保持平衡的宏观应力^[3]。就残余应力产生方法而言, 是材料中

发生了不均匀的弹性变形或不均匀的弹塑性变形而引起的, 或者说是材料的弹性各向异性和塑性各向异性的反映。

机械构件一般都滞留有余应力, 在构件加工制造过程中, 适当的残余应力可能成为构件强化的因素, 而不适当的残余应力则可能导致构件的开裂、变形而失效。一般来说, 在构件受拉时, 构件内部的残余拉应力会降低构件强度, 降低构件疲劳寿命, 而残余压应力可提高构件疲劳寿命^[4]。在构件使用或服役过程中, 残余应力会影响构件的静强度、动强度、疲劳寿命、耐应力腐蚀能力、硬度等, 不均衡分布的残余应力是构件变形和开裂的根源^[5]。在工程应用中, 残余应力的准确测试是对构件进行性能评估、寿命预测、失效分析的重要手段, 事实上, 在各工业领域如航空航天、汽车、高铁、石油冶金、核工业等, 残余应力测试已经成为必须的检测和控制手段^[8]。

文章探讨残余应力测试和校准技术的进展与发展前景, 根据残余应力测试时是否对被测件构成损伤, 将残余应力测试方法分为无损测试和有损测试, 并对

目前已有残余应力测试方法的基本原理、优缺点等进行简要叙述。分析了针对不同残余应力测试方法的校准技术,并提出残余应力测试仪器校准时的思路。

1 残余应力测试方法研究现状

随着国内外对残余应力产生机理、材料属性等的研究以及工程和科学研究中的需要,目前,发展了很多中残余应力的测试方法^[9],根据测试方法是否对被测件构成损伤,可将其分为无损测试方法和有损测试方法。

1.1 残余应力无损检测技术

残余应力无损检测方法又称为物理式残余应力测试方法^[10],主要包括X射线衍射法、中子衍射法、磁测法、超声法和纳米压痕法等。其中,X射线衍射法、中子衍射法的理论相对完善,技术成熟度较高,但在实际测试中,仍存在一定的局限性。

1.1.1 X射线衍射法

在目前残余应力的各种无损测试方法中,X射线衍射法是最可靠和实用的。该方法理论比较成熟,经过80多年的发展,测试手段和方法完善,广泛应用于机械工程和材料科学领域^[11-13]。关于X射线衍射法残余应力测定技术和方法,GB/T 7704-2017《无损检测X射线应力测定方法》中有明确的说明和规定。

X射线衍射技术测定残余应力也是欧美国家认为最可靠的方式。欧盟制定并公布的X射线衍射法残余应力测定标准EN 15305-2008“Non-destructive Testing-Test Method for Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction”,详细介绍了X射线衍射法测定残余应力的基本原理、测量仪器、材料特性及测量结果处理方法等^[14-15]。

上海材料研究所、上海理工大学、西安交通大学、爱斯特应力技术有限公司等国内多家研究单位、高校和企业都对X射线衍射法残余应力测试技术进行了研究,部分企业还开发相关测试产品。

X射线衍射法残余应力测试的基础是:在材料内部存在残余应力时,材料会产生一定的应变,而该应变在微观尺度上表现为材料晶格间距的变化,X射线穿透金属晶格时会发射衍射,X射线衍射法是通过测量材料晶格间距的变化衡量残余应力的数值^[16]。

利用X射线衍射法测量残余应力的原理如图1所示,X射线源照射在材料表面一束波长为 λ 的射线,在 2θ 角位置接收到的X射线反射强度最大,最大位置一般称为衍射峰。

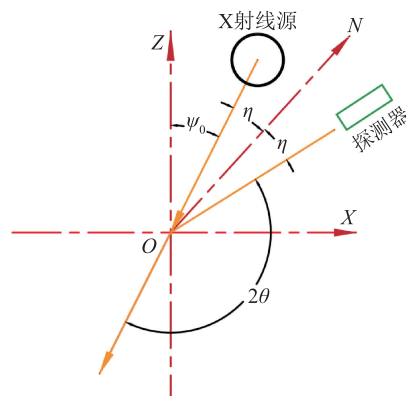


图1 X射线衍射法残余应力测试原理图

在材料内部有应力存在时,平行于应力方向的晶面之间的间距 d 会减小,则根据布拉格定律^[17-18]为

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

通过衍射角度 θ 和X射线波长可以计算材料晶面间距 d 。在材料内部存在应力时,晶面间距变化为 d_1 ,可得到材料的应变为

$$\varepsilon = \frac{d_1 - d}{d} \quad (2)$$

根据弹性力学理论,各向同性材料的应变可以由三个方向的应力表示,经过计算可以得到材料中的残余应力。

X射线衍射技术不仅可以用于多种材料残余应力的测量^[19-20]还能用于涂层和薄膜残余应力的测量^[21]。但X射线残余应力检测仍存在:设备比较昂贵;因为X射线在金属中的穿透能力有限,只能检测表面残余应力;对被测材料表面要求较高等缺点。

1.1.2 中子衍射法

中子衍射法测量残余应力的工作在20世纪80年代已经开始^[22-25],但因为设备昂贵且工程中应用较少,所以一直以来发展比较缓慢。近年来,中子衍射技术测量残余应力正越来越受到重视,尤其是在2000年以后,美国、英国、法国、德国、澳大利亚、俄罗斯等国都陆续建立了中子应力装置。

与X射线衍射法类似,中子衍射法测量残余应力的基本原理也是基于材料晶格间距的变化,根据中子束波长和布拉格角,计算产生布拉格峰的晶格间距,通过晶格间距的改变量,计算材料因为应力产生的应变,进而利用弹性力学基本原理计算得到残余应力^[27]。

相比较于X射线衍射法,中子衍射法穿透力较强,可用于测量体积较大的固体材料内部的残余应力,利用中子衍射法测量三维残余应力分布。在复合材料应力检测和研究中,中子衍射法不会受到表面效应的影

响而具有明显优势。但中子衍射应力测试设备建造和运行费用昂贵,中子流的流强较弱,在残余应力测量中,运行时间较长,且无法测量材料表面的残余应力^[22]。

1.1.3 超声波法

超声波法残余应力测试技术已经广泛应用于飞机铝材、铁路钢轨、焊接板和压力容器等残余应力测试中^[19,28],超声波法测量残余应力的基本原理是超声波声弹性效应,通过测定材料内超声波传播速度计算应力分布^[30]。声弹性效应即施加在材料上的内应力的变化会改变超声波在材料中传播速度的变化,因此可以利用超声波的声弹常数于应力之间的特定关系实现材料残余应力的测试^[31]。

根据超声波类型,可以将超声波残余应力测试方法分为激光超声法、电磁超声法、纵波脉冲反射法、横波双折射法、斜入射 SH 波法、表面波法和临界折射纵波法^[32]。相关研究表明,沿着应力方向传播的超声纵波对应力最为敏感,如图 2 所示,临界折射纵波 V11 的波速相对变化量最大^[33]。近年来,对于超声临界折射纵波法残余应力测试技术的研究越来越多^[34-35],北京理工大学的徐春广教授、宋文涛博士等均对超声临界折射纵波残余应力测试方法进行了研究。

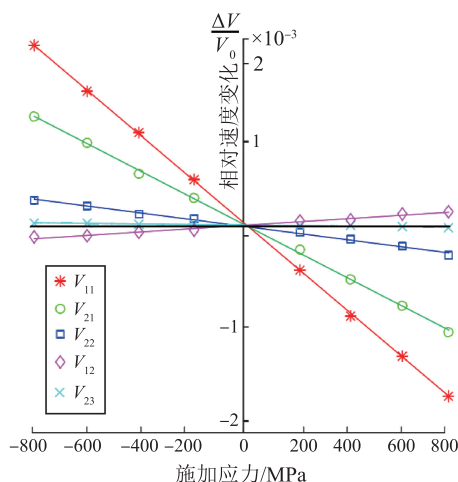


图 2 声速-应变关系图^[33]

超声波法残余应力测量深度与超声波发射功率有关,在理论上只要超声波发生功率足够大,可穿透任意厚度的构件,因此,在大型构件三维应力测试中应用广泛。超声波法相较于 X 射线衍射法残余应力测量精度低,且超声波波形、超声波传播方向、材料组织和应力状态等都会影响超声波在材料中的传播速度,受耦合效果、材料组织均匀性、温度等影响较大,但该方法测试仪器简单便携,且超声波对人体健康相对

安全,因此超声波法是一种比较有发展潜力的残余应力测试方法。

1.1.4 磁测法

磁测法残余应力检测技术^[36-37]主要分为磁记忆法、磁噪声法、磁应变法和磁声发射法^[10]。

磁记忆法基于金属材料的自发磁化现象、磁机械效应、磁致伸缩和磁弹性效应进行残余应力的测试^[38]。铁磁材料在载荷的作用下,发生上述物理现象,引起磁畴位移,导致金属磁特性不连续。在外部载荷去除后,金属磁特性仍会存在。金属在应力集中区域的表面会出现漏磁场,通过测量该磁场强度,便可以检测出应力集中的部位^[39]。

磁噪声法即巴克豪森磁噪声法,铁磁材料在磁化过程中产生的磁畴转动和磁畴壁位移^[40],使材料内部产生非连续性的电磁脉冲,通过测量磁感应强度变化来获得材料内部电磁脉冲信号,即可测量出材料的残余应力^[41]。

磁应变法通过铁磁材料磁化现象的改变,计算材料应力状态。当材料内有残余应力时,会使材料磁畴移动和转向受阻,因此降低磁化率。通过应力与铁磁材料磁导率之间的关系,可以计算出材料的残余应力值。

磁声发射法利用铁磁材料在磁致伸缩效应下,其体积变化产生的应变使材料产生弹性波,通过声发射仪器,测量弹性波的数值,进而计算出材料的残余应力值。磁声发射可以实现动态无损检测,且检测深度大,灵敏度高^[42]。

利用磁测法测量残余应力对环境要求较低,测量速度快,但只适合铁磁材料的检测,测试原理相较于 X 射线衍射法、中子衍射法等相对模糊,且会出现磁污染等现象,因此,应用范围较小。

1.1.5 纳米压痕法

纳米压痕法^[10]是一种涉及多学科的科学技术,是新兴的残余应力测试方法,也是公认最具发展潜力的方法之一^[43]。纳米压痕法测量残余应力借鉴了硬度试验方法和盲孔法残余应力测量方法,是根据应力场干涉理论而形成的一种全新的残余应力测试方法^[43]。纳米压痕技术在薄膜材料力学性能测试中,可以在不分离薄膜与基底材料的情况下,得到如弹性模量、硬度、屈服强度、加工硬化指数等材料性能参数^[44-46]。

纳米压痕理论主要基于: Suresh 理论模型^[47]、Lee 理论模型^[48]、Swadener 理论^[49]和 Xu 模型^[50]。可以用于等双轴残余应力和非等双轴平面应力的计算。研究

表明, 利用不同的理论模型计算得到的残余应力之间存在差异^[51], 说明相关理论模型与实际材料压痕之间存在很多因素的影响, 目前只能在一定的条件下适用。

纳米压痕法测量残余应力作为一种新兴残余应力测试方法, 相关理论还不成熟, 在测试方法、计算方法、面积函数、影响因素等方面仍待深入的研究。但因其适用性强, 且可以进行微区测试, 随着理论的完善和有限元技术的发展, 纳米压痕法将成为残余应力测试的重要手段之一。

1.2 残余应力无损检测技术

残余应力无损检测方法也称为机械法, 主要原理是通过破坏材料, 实现应力的释放, 通过测量应力释放过程材料产生的位移或应变, 计算得到材料原有的应力。常用的无损检测残余应力方法有钻孔法、切槽法、剥层法等。

1.2.1 钻孔法

钻孔法属于部分破坏的残余应力测试方法, 是目前工程上最常用的残余应力测试方法^[10]。ASTM 协会已经将其列入了标准 E837 - 81, 确定了使用钻孔应变测量确定残余应力的标准方法。2014 年, 我国颁布了 GB/T 31310 - 2014《金属材料残余应力测定钻孔应变法》标准^[52], 对钻孔法残余应力测试方法进行了规范。

钻孔法测定残余应力主要原理是在材料上钻孔使残余应力松弛, 利用应变片测量应力松弛引起的应变, 进而计算出残余应力。钻孔法可以根据是否将孔钻通分为盲孔法和通孔法, 两者测量原理相同, 但应变释放系数计算方法不同。通孔法应变释放系数可以通过 Kirsch 理论解直接计算出, 盲孔法则需用实验标定^[10]。盲孔法对材料的损伤程度要低于通孔法^[53]。

利用钻孔法测试残余应力的精度受多方面因素影响, 如钻孔直径、深度、速度、应变片粘贴位置、应变片尺寸等。因此, 在使用钻孔法测量残余应力时, 务必按照国标中规定的程序和方法进行。

1.2.2 切槽法

切槽法残余应力测试方法也是一种半破坏的应力释放法^[10]。切槽法的基本原理是在材料上切槽形成残余应力释放区, 利用应变片或应变花测量应力释放产生的应变, 求出切槽部位的残余应力。

对于单向应力状态, 使用切槽法测试残余应力时, 将应变片粘贴在测点位置, 在测点周围切割出两条直线形细槽, 如图 3 所示, 则可以通过应变片的变化, 计算出测点位置的残余应力。

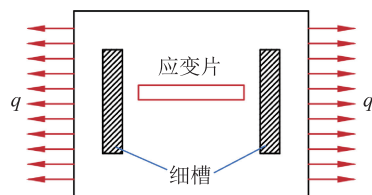
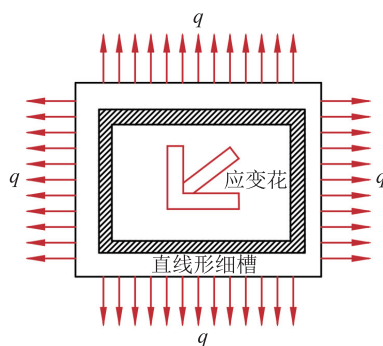
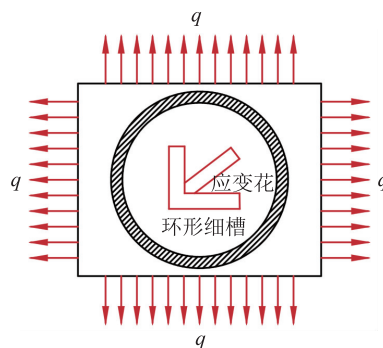


图3 单向应力状态下切槽法残余应力测量^[10]

对于双向应力状态, 一般需要在测点位置粘贴应变花的方式测量, 切槽可以选择直线形细槽或环形细槽, 如图 4 所示。



(a) 直线形切槽



(b) 环形切槽

图4 双向应力状态下切槽法残余应力测量^[10]

切槽法残余应力测试操作比较简单, 应变数据测量方便, 对结构的损伤相对于剥层法较小, 但其对结构的损伤仍会降低材料的力学性能。现阶段没有关于切槽法的国际标准、国家标准和行业标准, 因此, 详细的操作和注意事项没有明确的规定, 不同操作人员得到的结果可能会有所不同。

1.2.3 剥层法

剥层法测量残余应力是一种发展时间较早的方法, 剥层法可以得到构件深度方向的残余应力分布, 因此可以用来测量三维残余应力。

剥层法的基本原理通过逐层去除材料, 使残余应力释放, 残余应力的释放引起材料应变, 利用应变片测量应变即可得到剩余部分的残余应力值。剥层法一

般使用机械切削或电化学腐蚀等方法将材料逐层去除，使用机械切削的方法剥层时，会引进应力，不同的机械切削方法引入的应力类型和大小不同。

剥层法可以用于各向异性材料残余应力的测量，

主要用于测量材料厚度方向的残余应力，但随着测量厚度的增大，对构件的损伤会越来越大。

表 1 列出了残余应力主要测试方法及其优缺点、应用场合等。

表 1 残余应力测试方法及优缺点

分类	测试方法	优势	劣势
无损检测法	X 射线衍射法	理论成熟、精度高、使用广泛	设备昂贵、检测深度浅、有一定的辐射
	中子衍射法	可检测三维应力、空间分辨率高	设备建造和运行费用昂贵、运行时间长、无法检测表面残余应力
	超声波法	安全、可检测表面和内部残余应力、便携、成本低	受耦合效果、材料组织影响较大
	磁测法	可动态检测、检测深度大、灵敏度高	只可用于铁磁材料、原理不清晰、会产生磁污染
	纳米压痕法	适用性强、可进行微区检测	理论不成熟
有损检测法	钻孔法	精度高、理论成熟、应用广泛	影响因素较多、需要标定、有损
	切槽法	操作简单、数据测量方便、损伤较小	没有详细的操作和注意事项
	剥层法	可以测量厚度方向的应力	损伤较大

2 残余应力校准方法研究现状

合理的校准方法是保证测试结果准确可靠的关键技术手段。相对于残余应力测试方法，对相应校准方法的研究较少。针对不同测试技术相应的校准方法也有所不同，但目前，大部分都是通过各种方法制作标样^[3,54-59]，实现残余应力测量仪器的校准。在 X 射线衍射法、中子衍射法的校准中，也涉及了部分仪器的校准要求和方法。

2.1 标样类校准方法^[3,54-59]

标样类校准方法即通过制备定值残余应力的标样或试块，使用残余应力测试仪器测量标样的残余应力值，通过比较仪器测量值与标样设计值，完成残余应力的校准。标样法校准的关键的问题为标样的制备和定值。

关于标样的制备，现有的方法基本原理均为通过不同方式在某种形状和尺寸的构件上进行加载，利用理论力学和材料力学原理，计算加载构件中的应力作为标样的标准值。

GB/T 7704-2017 附录 D 中提出使用等强度梁法通过实验测定 X 射线弹性常数和应力常数。等强度梁结构如图 5 所示，在梁的各横截面上的最大正应力均相等。根据梁的尺寸、加载砝码质量、当地重力加速度可计算出梁的横截面的应力值，将该应力值作为标

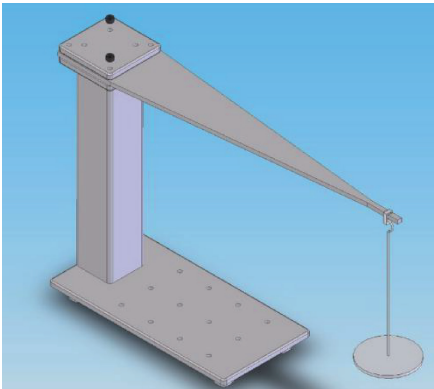
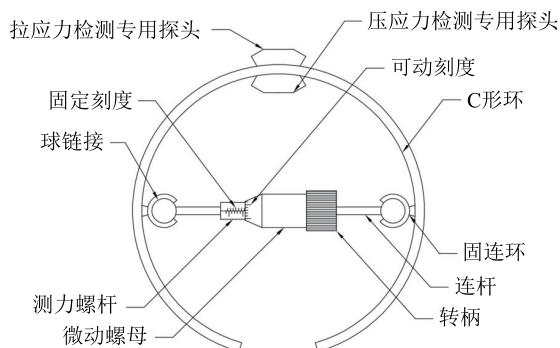


图 5 等强度梁加载示意图

另外一种普遍使用的试块制备方法是通过标准拉压试验机对一定尺寸的试块加载，通过计算试块垂直于加载方向的截面积和标准拉压试验机加载力值，得到试块应力值，对 X 射线衍射法、超声波法、钻孔法等残余应力测试方法进行校准。

除此之外，通过螺栓预紧力、装配挤压、C 形环^[34,58]等方式的标样制备方法也被应用于残余应力的校准。

上述所有通过制作标样的方式，均是使用不同的加载方式对试块进行加载，计算加载力在试块中的应力值。但试块自身的初始应力值即使经过调控也不可能完全消失，这就导致试块最终的应力值与施加的应力值之间存在偏差，使校准结果产生偏差。对于同一

图6 C形环校准方法示意图^[34]

个试块，在使用同种方法制作标样时，应力的变化量与施加的力值变化量之间具有相关性，在材料弹性变形范围内，可以认为两者的变化量为线性变化，进而可以实现残余应力测试设备相对量的校准。

2.2 残余应力测试仪器的校准

不同的残余应力测试方法对应的测试仪器不同，相应的校准方法也不同，国际和国内相关标准中对X射线衍射法残余应力测量仪器性能校准提出了要求。

在欧洲标准 EN 15305 - 2008 和 EN13925 - 3^[60] 中规定了X射线衍射设备和测角仪性能的校准方法，通过获得角度偏差曲线、宽度曲线、幅值强度曲线、形状分析曲线等完成X射线衍射设备的校准。

对于残余应力测试仪器性能的直接校准，相关研究非常少。除上述对X射线衍射设备的校准外，中国原子能科学研究院对中子残余应力谱仪的校准开展了研究^[61]，但整体对于仪器本身的校准仍然很少。仪器性能直接关系到对测量结果的评估，是实现残余应力准确测量非常重要的环节，在后续研究中，应注重对残余应力测试仪器性能的校准。

3 总结与展望

经过分析，残余应力无损测试技术不会对构件造成损伤，也不会改变材料的力学性能，相对于有损测试具有明显的优势，但每种残余应力无损测试方法都存在其局限性。其中X射线衍射法测量残余应力是目前残余应力无损测试方法中理论相对成熟、操作也相对简单的方法，但在实际工程应用中的测试结果往往与预期结果之间差别较大；纳米压痕方法，物理背景清晰、理论成熟、测试结果与有损检测中的钻孔法结果比较接近，是残余应力测试技术发展一个值得关注的方向。有损测试方法相对于无损测试方法发展更加成熟，测试设备和仪器价格便宜、操作简单，钻孔

法是最成熟、最简便、测量结果最准确的残余应力测试方法之一，但为了保证测量结果的准确，必须严格按照规定步骤操作。

现阶段，对于残余应力的校准方法的研究明显不足，而校准是保证残余应力测试结果准确可靠的必要手段，也有助于残余应力测试技术进步和测试理论的完善。目前，标准残余应力标样(试块)的制备方法均无法保证试块绝对应力值的准确，也就直接导致使用标样(试块)对残余应力测试仪器校准存在很大的误差，且单纯的依靠制备标样无法完全解决残余应力校准的问题。应当从测试方法、测试仪器本身性能出发，探索仪器的校准方法和测量方法的验证技术，将残余应力溯源至国际基本量，再结合材料检验的特性，完善测试方法，最终保证残余应力测试结果的准确性。

参考文献

- [1] 张定栓, 何家文. 材料中残余应力的X射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999: 3-6.
- [2] 刘佳, 王威强, 张泰瑞, 等. 残余应力测试及压入试验模拟研究进展[J]. 化工机械, 2020(4): 420-425.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 7704-2017 无损检测 X射线应力测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [4] 巴发海, 刘宇希. 残余应力的产生及其对构件性能的影响[J]. 无损检测, 2020, 42(9): 1-5.
- [5] 徐春广, 李培禄. 无应力制造技术[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 113-132.
- [6] Withers P J, Bhadeshia H. Residual stress Part II - nature and origins[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(4): 366-375.
- [7] Schijve, Jaap. Fatigue of Structures and Materials[M]. Springer Netherlands, 2009.
- [8] 王庆明, 孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向[J]. 2011, 28(1): 11-15.
- [9] Steinzig M, Takahashi T. Residual Stress Measurement Using the Hole Drilling Method and Laser Speckle Interferometry-IV: Measurement Accuracy[J]. Experimental Techniques, 2003, 27(6): 59-63.
- [10] 高玉魁. 残余应力基础理论及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
- [11] 郑卜祥, 宋永, 席峰. 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): 275-280.
- [12] 周上祺. X射线衍射分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.
- [13] 耿红霞, 王连红, 李航飞. X射线衍射技术测量残余应力在研究生实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索,

- 2018, 37(8): 211–282.
- [14] 施新华, 武立宏, 栗春. 欧美最新 X 射线衍射残余应力测定标准介绍[J]. 理化检验 – 物理分册, 2011, 47: 623–628.
- [15] EN 15305 – 2008. Non-destructive Testing-Test Method for Residual Stress Analysis by X-ray Diffraction[S]. European: European Committee for Standardization, 2008.
- [16] Moore M G, Evans W P. Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis[C]// SAE Technical Paper, 1958.
- [17] 高玉魁, 张志刚. 残余应力的测量与模拟分析方法[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(4): 251–254.
- [18] 宋俊凯, 黄小波, 高玉魁. 残余应力测试分析技术[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 75–82.
- [19] 邓云华, 李晓延, 李庆庆. 钛及钛合金 X 射线应力测试参数的选择[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 31–34.
- [20] Wu B, Zhang J, Liu C. Residual stress measurement in electron beam welded joints of 50 mm thick titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S4): 44–48.
- [21] 杨帆, 费维栋, 蒋建清. X 射线衍射技术在薄膜残余应力测量中的应用[J]. 功能材料, 2007, 38(11): 1745–1749.
- [22] 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.
- [23] Allen A J, Coppola R, Hutchings M T. Study of residual stress in a ferritic steel electron beam test using neutron diffraction weldment[J]. Materials Letters, 1995, 24(4–6): 265–268.
- [24] Liu C K, Li N, Zhao W X. Requirements of microstructure and residual stress evaluation of aeronautical materials for neutron scattering and synchrotron radiation techniques[J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 2(14): 133–134.
- [25] Wronski S, Baczmanski A, Dakhlaoui R. Determination of Stress Field in Textured Duplex Steel Using TOF Neutron Diffraction Method[J]. Acta Materialia, 2007, 55(18): 6219–6233.
- [26] 师俊东, 耿长建, 邢丕臣. 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.
- [27] 刘昭. 镍基多晶高温合金的中子衍射应力分析研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
- [28] Clotfelter W N, Risch E R. Ultrasonic Measurement of Stress in Railroad Wheels and in Long Lengths of Welded Rail[J]. Rail, 1974.
- [29] Brokowski A, Deputat J. Ultrasonic Measurement of Residual Stressed in Rails[C]// American Society for Nondestructive Testing, Proc 11th World Conference on Nondestructive Testing, 1985: 592–598.
- [30] 西拉德. 超声检测新技术[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [31] 矫宝法, 王祯, 高晓蓉. 德国车轮轮辋超声应力检测技术[J]. 铁道技术监督, 2011, 39(1): 31–35.
- [32] 杨顺民. 临界折射纵波检测残余应力的关键影响因素研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [33] Egle D M, Bray D E. Measurement of Acoustoelastic and Third-Order Elastic Constants of Rail Steel[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1976, 59(3): 741–744.
- [34] 宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [35] Song W T, Pan Q X, Xu C G. Residual Stress Nondestructive Testing for Pipe Component Based on Ultrasonic Method[C]// Nondestructive Evaluation/testing, 2014: 163–167.
- [36] Lu J, James M, Roy A G, et al. Handbook of Measurement of Residual Stresses[M]. 1996.
- [37] 舒迪. 金属磁记忆 – 磁巴克豪森噪声融合检测应力系统的研究及应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [38] Doubove A, Kolokolnikov S. The Metal Magnetic Memory Method Application for Online Monitoring of Damage Development in Steel Pipes and Welded Joints Specimens[J]. Welding in the World, 2013, 57(1): 123–136.
- [39] 徐坤山, 姜辉, 仇性启. 金属磁记忆检测中测量方向和偏离值的选取[J]. 磁性材料及器件, 2016, 47(4): 41–45.
- [40] 沈功田, 郑阳, 蒋政培. 磁巴克豪森噪声技术的发展现状[J]. 无损检测, 2016, 38(7): 66–74.
- [41] Jiles D C. Dynamics of Domain Magnetization and Barkhausen Effect[J]. Czechoslovak Journal of Physics, 2000, 50(8): 893–924.
- [42] 王金凤, 樊建春, 仝钢. 磁声发射无损检测方法研究进展[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(5): 72–75.
- [43] 刘金娜, 徐滨士, 王海斗. 材料残余应力测定方法的发展趋势[J]. 理化检验 – 物理分册, 2013, 49(10): 677–682.
- [44] 吴燕, 周定国, 王思群. 纳米压痕技术在木材科学中的应用[J]. 世界林业研究, 2007, 20(3): 51–55.
- [45] 谢存毅. 纳米压痕技术在材料科学中的应用[J]. 物理, 2001, 30(7): 432–434.
- [46] 李青, 刘士峰. 纳米压痕理论在残余应力检测方面的技术进展[J]. 新技术新工艺, 2013, (3): 118–120.
- [47] Suresh S, Giannakopoulos A E. A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5755–5767.
- [48] Lee Yun-Hee, Kwon D. Measurement of residual-stress effect by nanoindentation on elastically strained 100 W[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(5): 459–465.

- [49] Aljat B, Pharr G M. Measurement of residual stresses by load and depth sensing spherical indentation[J]. Mrs Proceedings, 1999, 594(7): 2091–2102.
- [50] Xu Z, Li X. Estimation of residual stresses from elastic recovery of nanoindentation[J]. Philosoph Magaz, 2006, 86(19): 2835.
- [51] 董美伶, 金国, 王海斗. 纳米压痕法测量残余应力的研究现状[J]. 材料导报, 2014, 28(2): 107–113.
- [52] 国家质量监督检验检疫总局 GB/T 31310–2014 金属材料残余应力测定钻孔应变法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [53] 陈岚树, 董军, 彭洋. 用于残余应力现场检测的 DIC–盲孔法研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(3): 37–44.
- [54] ASTM E 915–10 Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement[S]. American: ASTM, 2010.
- [55] 杨艳慧, 刘东, 王建国. 一种残余应力挠度法校准装置的标准样制备方法: CN202010400356. X[P]. 2020.
- [56] 徐春广, 李志向, 宋剑峰. 残余应力梯度分布定值试块设计及使用方法: CN201710975003. 0[P]. 2017.
- [57] 刘科虹, 刘洋, 武松. 一种外环挤压内饼制备残余应力定值试块方法: CN201410702354. 0[P]. 2014.
- [58] 徐春广, 白晓光, 宋文涛. 一种用于拉伸残余应力定值校准的 C 形环装置: CN201310465140. 1[P]. 2013.
- [59] 徐春广, 靳鑫, 李骁. 一种用于拉压残余应力超声检测系统的自动校准方法: CN201310659777. 4[P]. 2013.
- [60] EN 15925–3 Non-Destructive Testing-X ray Diffraction from Polycrystalline and Amorphous Materials-Part 3: Instruments[S]. British: European Committee for Standardization, 2005.
- [61] 刘晓龙, 刘蕴韬, 陈东风. 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.

收稿日期: 2021–03–01

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2019205B002)

作者简介

王辰辰(1990–), 男, 工程师, 主要研究领域为动态压力测试与校准、超声无损检测与校准、残余应力测试与校准领域。参与多项科研技术基础课题、工信部民机课题, 获得集团级科技奖 1 项, 授权发明专利 2 项。

