

残余应力测试分析技术

宋俊凯, 黄小波, 高玉魁

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘 要: 对残余应力的测试在学术研究和工程应用中越来越重要,是获取零件服役条件以及工艺制造的应力状态的重要方法,可以为零件寿命的预测和制造工艺的控制等提供重要的参考。目前,残余应力的测试方法多样。介绍了残余应力的测试方法及其所能达到的测试层深,以及几种新型的残余应力的测试方法及其适用的范围;阐述了残余应力的定义和形成机理,并对引入残余应力的常见表面形变强化工艺进行了分析,介绍了不同的工艺下形成的残余应力的特征;最后,指出了对目前残余应力测试和研究中存在的问题和发展趋势,提出了三维原位无损分析、残余应力和模拟相结合的跨学科系统研究以及形成相关的大数据库平台系统将是未来发展的方向。

关键词: 残余应力; 表面强化; 喷丸; 激光冲击强化; 疲劳; X射线衍射

中图分类号: TG115.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0075-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.013

Test and Analysis Technology of Residual Stress

SONG Jun-kai, HUANG Xiao-bo, GAO Yu-kui

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: Residual stress measurement is becoming more and more important in academic research and engineering applications and is an important method for obtaining the stress state of components service condition and the manufacturing process, which can provide important reference for the prediction of parts life and control of the manufacturing process. At present, there are various testing methods of residual stress. This paper introduced the testing methods of residual stress and the layer depth that can be achieved. At the same time, several new methods of residual stress measurement and applicable scopes were introduced. The definition and formation mechanism of residual stress were briefly described in this paper and some common surface enhancement processes that can produce residual stress in parts and characteristics of residual stress formed in different processes were introduced. This paper discussed the problems and development trend existing in the testing and research of residual stress. The test of residual stress should be more precise and efficient. The future development directions of residual stress testing are three-dimensional nondestructive analysis, combination of residual stress and simulation and big data platform system.

KEY WORDS: residual stresses; surface enhancement; shot peening; laser shock peening; fatigue; X-ray diffraction

收稿日期: 2016-03-20; 修订日期: 2016-04-05

Received: 2016-03-20; Revised: 2016-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372226); 航空科学基金项目(2014ZE38008); 中央高校基本科研业务费专项资金

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(11372226), Aeronautical Science Foundation of China(2014ZE38008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介: 宋俊凯(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为残余应力。

Biography: SONG Jun-kai (1992—), Male, Master graduated student, Research focus: residual stress.

通讯作者: 高玉魁(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表层改性及疲劳断裂等。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface layer modification, fracture and fatigue.

零件的制造工艺会在其内部产生残余应力,特别是在锻造、铸造、热处理、切削加工、表面处理、零件装配等环节中,工件的残余应力也会发生相应的变化。残余应力是零件受到外部作用及其内部组织不均匀变化共同作用的结果,可分为残余压应力和残余拉应力,其中残余压应力是有益的应力,可以延缓裂纹的生成以及扩展,残余拉应力是有害的应力。因此,残余应力的测量以及其与制造工艺关系的研究对于零件的安全性、持久性和可靠性有着非常重要的意义^[1-4]。本文除了介绍目前比较常用的一些残余应力测量方法,也对目前普遍应用的表面强化工艺进行相应的阐述。

1 残余应力及表面强化的定义

残余应力是指当外力或外力矩的作用消失后,在零件内部存在的并能保持平衡的力。从概念可以看出,残余应力不是指一个数值而是一个分布状态或称为残余应力场。残余应力不只存在压应力或拉应力而是同时存在与之平衡的拉应力或压应力。残余应力是弹性应力,理论上其数值不应该超过材料的屈服强度。

表面强化是指为了提高材料或构件的疲劳性能而对表层进行的化学、物理或力学等改性处理,包括渗碳、渗氮、碳氮共渗表面化学热处理强化和淬火、感应淬火表面热处理及喷丸、滚压、挤压、激光冲击强化等表面形变强化等。

2 残余应力的产生原因

残余应力的形成机理是,由于存在不协调、不均匀的变形,而导致物体自身为保持平衡而产生应力,如物体不同部分因热膨胀系数、屈服强度或刚度的差异导致的残余应力^[5-6]。简单来讲就是由于不同区域的热膨胀/冷却变形系数、屈服强度或刚度不同而导致的变形不协调,这些不同区域的变形有宏观的也有微观的,如同一试件不同区域的变形(诸如喷丸强化、激光冲击强化等表面形变强化时塑形变形主要是集中在表面层,而表面强化层下的大部分区域是弹性变形)、不同相结构(如复合材料或多相结构)或不同构件(如连接板上的铆钉)等。具体而言,可把残余应力形成原因归于不均匀的受力、温度、相变和缺陷引起变形。

1) 不均匀弹塑性变形。一个零件的表面与内部变形的不均匀或局部与整体变形的不均匀都有可能产生残余应力。一个构件的不同部分变形不同也可产生残余应力。

2) 不均匀温度分布。如焊接和热处理等均可由温度分布的不均匀导致变形的不均匀,从而形成热应力;此外,由于温度分布导致材料性能存在差异,因此材料在不同温度下的变形行为是研究残余应力形成的关键。

3) 不均匀相变。在热处理时还可导致相变的发生,当然相变的发生不只是温度的一个变化结果,形变同样也可诱发相变,典型的相变有马氏体相变、沉淀相的析出、相间的共格关系等都有可能因相变的不均匀产生残余应力。不同的相结构有不同的弹性模量和变形行为,甚至不同的相结构所承受的残余应力相差很大性质完全相反,因此搞清楚这些相的弹塑性变形是研究残余应力的前提。

4) 不均匀缺陷。材料和构件中难免存在各种缺陷,如夹杂物、位错、孪生、扭折等都是晶体变形中常见的缺陷,此外变形中晶体的转动和变形的协调性也非常重要,这是晶格畸变产生微观残余应力的主要原因。

3 残余应力的特点及作用

残余应力对疲劳性能和应力腐蚀开裂性能具有重要影响,对裂纹的萌生和扩展具有很大作用^[6-7]。残余压应力降低了疲劳平均应力,减小了疲劳应力比,从而延长疲劳寿命和提高疲劳强度,但无法改变对疲劳性能影响较大的交变应力幅值,此外残余应力在交变载荷的作用下还可能发生松弛,因此对残余应力作用的定量评价变得困难。残余应力对应力腐蚀的影响也是因附加的拉伸或压缩作用而使裂纹萌生或/和扩展进程得以加剧或延缓。

通过对构件进行表面强化处理,可以形成一定的弹塑性变形层,并获得残余压应力。因此,残余应力在材料中的分布通常可以看作是由不均匀的弹塑性变形而形成的。需要进一步指出的是,本文所研究的残余应力只从宏观的角度进行论述,主要阐述表面强化残余应力。从微观角度来论述残余应力,可认为残余应力是塑性变形的微观不均匀过程,且主要是由形变量和应变速率引起以及受测试构件的材料内部位错或孪晶或者缺陷等影响。因此,塑性变形程度会因晶粒不同而不同,甚至在单个晶粒中的程度也不

同,也有可能只存在于少数滑移带中。尽管微观残余应力需要明确变形机制才能得到精确的数据,但它对于解释疲劳机理非常重要。关于表面强化引起的残余应力场特性的论述如下。

1) 喷丸强化残余应力在对构件中引入残余压应力的表面强化方法中,喷丸法是一种比较常用的方法。在喷丸过程中,材料的表层呈塑性延展,而材料表层下弹性约束回弹抑制了这种塑性变形表层的延展,从而形成了残余应力^[8-12]。由喷丸强化引起的残余应力场的形成机理如图 1 所示,可定义一些用于分析其残余应力场的特性的特征参数^[13-14]。

2) 孔挤压残余应力

孔挤压常用来提高带孔构件的抗疲劳强度。孔挤压强化,即采用工作环直径大于孔直径的高硬度挤压工具,经充分润滑后从孔中强行通过,使孔壁金属表层发生弹塑性变形的一种工艺。根据工艺的不同,将孔挤压分为芯棒直接挤压和开缝衬套挤压。由于孔周承受径向外载的拉应力的作用,故构件的孔周边

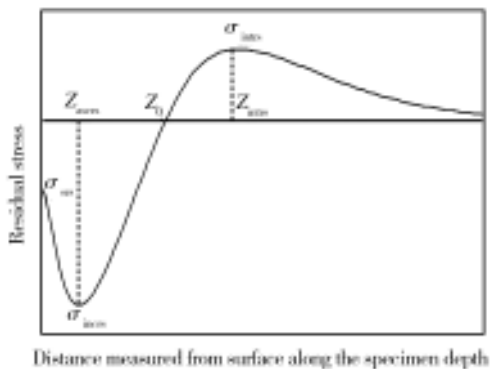


图 1 典型的喷丸残余应力分布图

Fig. 1 Schematic residual stress field caused by shot peening

将形成切向的塑性变形区。形成的塑性区的直径比原构件孔略大,且当挤压棒通过后,塑变层受到外弹性层的约束,形成有利的切向残余压应力。该残余压应力的值受过盈量、孔边距、构件厚度和构件材料的影响。由孔挤压强化引起的残余应力的分布如图 2 所示^[15-20]。

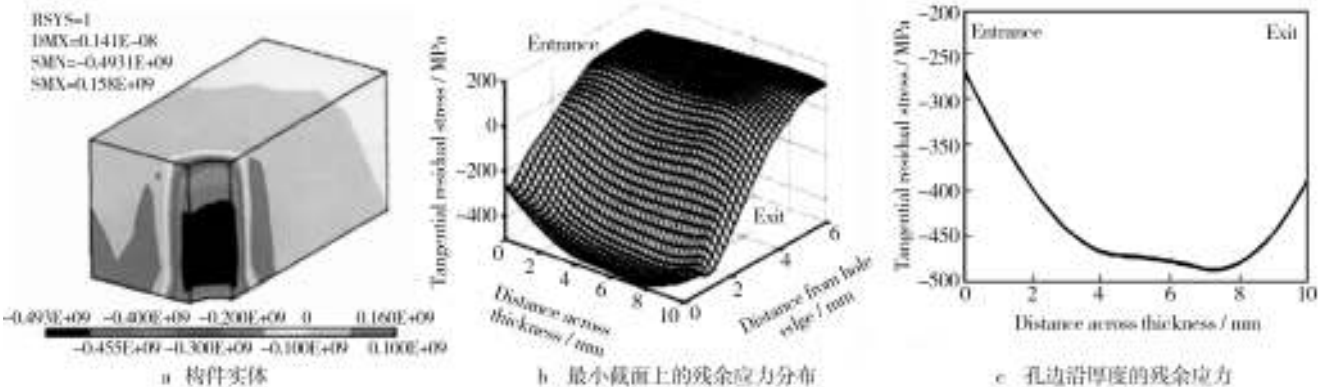


图 2 经孔挤压的 7050-T7451 铝合金的径向残余压力分布图^[8]

Fig. 2 Tangential residual stress distribution of hole cold expanded 7050-T7451 aluminum alloy in^[8]:

a) The whole component, b) Smallest cross-section plane, c) Hole edge along thickness

对图 2 中特性进行分析可知:残余应力在孔边周围沿厚度方向变化很大,入口最小,中间最大。因此,可以证明二维模型不能准确评估构件的疲劳寿命,具有一定的局限性。

3) 激光冲击残余应力

激光冲击强化的原理是激光束以脉冲形式射向金属表面的涂层,涂层在吸收激光束的能量后产生大量的等离子体,在约束层的约束作用下,产生高强度的冲击波,使材料表层产生塑性变形,进而在表层形成残余压应力层^[14]。由激光冲击引起的典型的残余应力分布如图 3 所示。而残余应力的值取决于工艺参数和受喷材料。主要的参数有:脉冲能量、脉冲时

间和脉冲宽度。此外,应该注意的是,必须避免任何类型的热操纵,否则会引起残余拉应力。因此,吸附层必须足够厚以防止工件本身的热效应,特别是在重叠照射的情况下,吸附层不应该受到连续性破坏,这种伤害可能会在最后照射阶段导致工件的热效应。如图 3 中所示,对容易塑性形变合金,不同脉冲次数会有不同残余应力值。

4) 超声冲击残余应力

相比传统的喷丸,超声冲击会产生更深的残余应力层^[22-27]。与喷丸对比发现,超声产生的残余应力值和喷丸产生值近乎相等,但最大残余压应力值和最大残余拉应力值要高于喷丸,如图 4 所示。

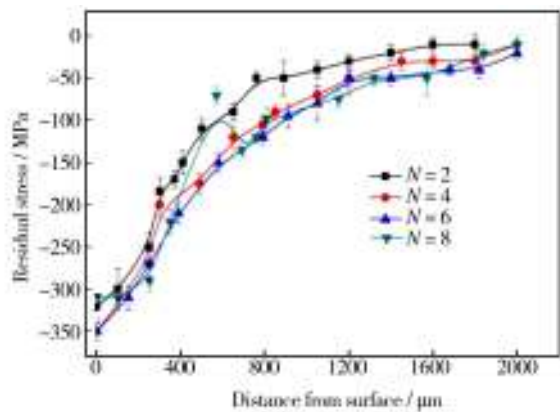


图3 激光冲击引起的7050-T7451铝合金的残余压力分布图^[21]
Fig.3 Residual stresses caused by laser shock peening in 7050-T7451 aluminum alloy^[21]

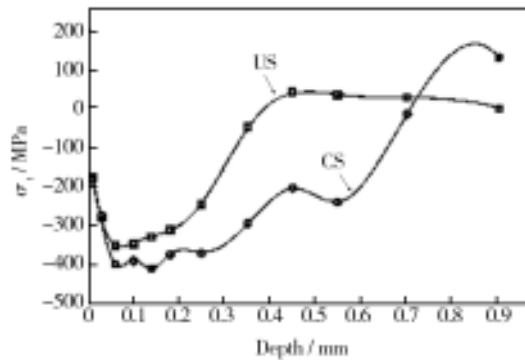


图4 超声冲击引起的(US)和传统喷丸引起的(CS)2014-T6铝合金残余应力的比较^[22]
Fig.4 In-depth profile of residual stress in 2014-T6 aluminum alloy produced by conventional shot peening(CS) and ultrasonic peening(US)^[22]

4 测试分析技术

对残余应力的作用进行定量评价或控制的前提是要精确获知残余应力数值及其分布状态,因此残余应力的测试分析非常重要。残余应力的测试分析包括无损检测和有损检测和有限元分析方法,由于笔者从事的是X射线衍射残余应力的测试分析,在此侧重X射线衍射残余应力的测试技术并结合自己的经验来谈一些常用的残余应力测试分析技术。

1) X射线衍射

X射线衍射主要是利用晶体X射线衍射的布拉格方程,依据晶体衍射峰的偏移方向和幅度来确定残余应力的性质和大小。

X射线衍射法测定的残余应力是距表面几到几

十微米内的表层残余应力的平均数值,它的优点是无损检测,测量速度和精度高,但测定深层残余应力需要逐层抛光剥层和测定,而且对测定结果需要考虑剥层的影响并予以校正,尤其是表层残余应力分布梯度较大时其校正显得尤为重要。图5是目前国际上较为先进的高能X射线残余应力仪,它是同济大学2012年从加拿大引进的多功能高功率设备,具有Cr、Mn、Mo、V、Fe、Co、Cu等X光管,可测定钢铁材料、钛合金、铝合金、锆合金、镁合金、铍合金、镍基高温合金(包括单晶和定向凝固合金)、TiAl金属间化合物、陶瓷材料等的残余应力。该设备的功率可达2200 W,最小准直器光斑为0.2 mm,可开展局部残余应力的研究。不同材料残余应力测定时,X射线衍射分析的推荐参数和选用X光管靶材情况见表1。



图5 X射线衍射残余应力仪

Fig.5 X-ray diffraction residual stress analyzer

表1 常用材料残余应力测试X射线衍射条件
Tab.1 Residual stress measurement conditions for common materials by X-ray diffraction method

Material	Anode	K _β filter	$\{hkl\}$	$2\theta/(^{\circ})$
γ-Fe	Mn	Cr	$\{311\}$	152
α-Fe	Cr	V	$\{211\}$	156
α-Ti	Cu	Ni	$\{213\}$	142
	V	Ti	$\{103\}$	140
Al	Cr	V	$\{311\}$	140
	Cu	Ni	$\{422\}$	137
Ni	Mn	Cr	$\{311\}$	152 ~ 162
Co	Mn	Cr	$\{311\}$	153 ~ 159
Cu	Mn	Cr	$\{311\}$	149
Mo	Fe	Mn	$\{310\}$	153
Zr	Fe	Mn	$\{213\}$	147
W	Co	Fe	$\{222\}$	156
α-Al ₂ O ₃	Cu	Ni	$\{146\}$	136
γ-Al ₂ O ₃	Cu	Ni	$\{844\}$	146
	V	Ti	$\{440\}$	128

此外为了减小测试误差,一般多选用衍射角高的峰位来测定残余应力,但高角衍射峰的形状不好时(如衍射晶面的重复因子低、峰形不对称、峰背比差等),可考虑选择低角的衍射峰形好的峰位进行分析。如待测的材料或零件存在织构或一定的择优取向,建议一方面是增大衍射光斑,另一方面可考虑增加衍射光线的摆动角度使参与衍射的晶粒增加,以减小或消除这些不利因素的影响。对于单晶或定向材料,则需要先测定其取向然后再测定残余应力。

近年来日本还研制出了采用二维面探方法测定残余应力的 $\cos \alpha$ 法,这是一次曝光,不是传统 $\sin 2\psi$ 法的多次曝光。二维面探设备和采用 V 靶测定的钛合金德拜环如图 6 所示。

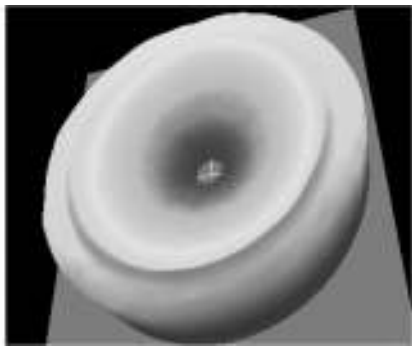


图 6 钛合金(103)的德拜环

Fig. 6 The Debye-Scherrer ring of (103) for Ti-6Al-4V titanium alloy

2) 同步辐射(Synchrotron radiation)

同步辐射检测残余应力的原理是利用电磁辐射所产生的波,在零件表面发生衍射判断原子间距发生的变化进而推导出残余应力。该电磁辐射是相当于光速速度的带电粒子在弧形轨道上运动时发出的,同时又可以称为“同步加速器辐射”或“同步光”。与传统的 X 光相比,同步辐射波长具有亮度强、波谱宽、准直度高、脉冲性和偏振性等独特性能(图 7),测定残余应力时可以选用不同晶面和测定不同深度,可开展空间分辨率高的残余应力无损测定和结合试验台开展某些原位实验,它的缺点是因使用多级加速器而占地面积大和运行投入成本高。

3) 中子散射

中子散射和同步辐射一样,都是利用晶体衍射的布拉格方程来计算出应变再算出残余应力,与其他方法相比,中子散射的穿透层较深,铝合金为 200 mm,钢铁材料为 80 mm,空间分辨率目前最好的为 0.5 mm,因此测定残余应力时获得的是至少 0.5 mm 内的

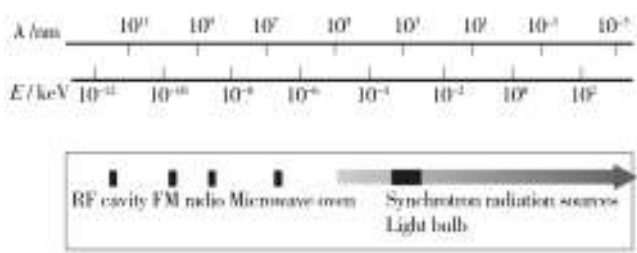


图 7 同步辐射光的波长、能量及与其他光源的比较^[28]

Fig. 7 Spectral range of synchrotron radiation as compared to those of other radiation sources^[28]

平均残余应力^[28]。它的优点是可不损原位测定材料内部的残余应力,缺点是测定的数值是较大区域内的平均应力,对测定残余应力梯度分布,尤其是喷丸强化的残余应力分布很难精确测定,而且设备投入大运行费用高。

4) 超声残余应力检测

超声波法的原理是零件内的应力如果发生变化,则其内部的残余应力也会发生变化(材料的声弹效应),通过测定超声波在零件内部传播速度的变化可以计算出残余应力^[29—30]。超声波具有较好的方向性,因此可以按照一定的方向发射。由于超声波具有较强的穿透性,因此不需要对零件进行破坏就可以测试零件内部的残余应力。采用超声波方法测试残余应力可以不接触零件,可以保证零件表面不受损伤。超声波的辐射较小,因此使用相对安全。超声波法测量残余应力目前已在工程上得到了应用并展现出了良好的发展前景^[31—33]。

5) 钻孔法

钻孔法是在需要测试残余应力处贴上应变片并在该点钻一个孔,由于钻孔后在孔的附近区域应力重新分布,因此应变片受到应力释放的作用发生应变,得到应变值后进行相关的运算,即可以得到该点的残余应力值,包括两个主应力以及一个主方向角(图 8)^[1,34—37]。

6) 磁噪声法

当零件的微观组织、晶粒大小、缺陷和残余应力发生变化时,探测线圈会检测到噪声(BN)发生变化。磁噪声法就是利用 BN 信号的变化计算出残余应力的数值。当零件为正磁致伸缩材料时,如果外磁场与残余应力平行,则 BN 信号与拉应力成正比,与压应力成反比,需要注意的是,磁场的方向也可以影响 BN 信号。把零件有残余应力的 BN 信号值和无残余应力相比,代入相应的公式即可求出一对主应力^[38—42]。

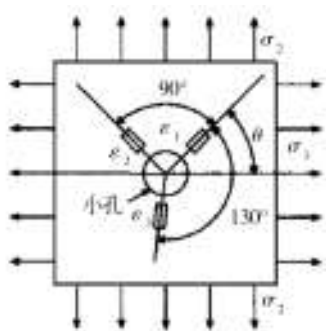


图8 钻孔示意图

Fig. 8 Sketch map of drilling holes

目前美国已经开发出采用磁噪声法测试残余应力的仪器,同时该仪器也可以评价零件的组织 and 检测零件的缺陷,设备示意图如图9所示。

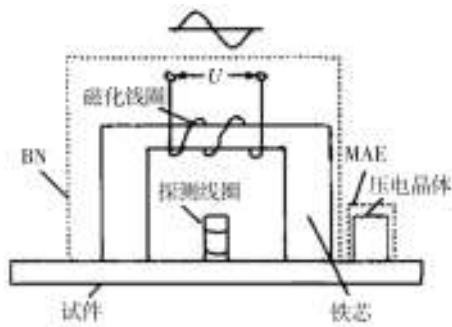


图9 可以进行BN与MAE两种检测的多功能磁弹性仪

Fig. 9 Multi functional magnetic elastic equipment that can carry out BN and MAE test

7) 裂纹柔度法

裂纹柔度法测试残余应力的原理是以线弹性断裂力学为理论基础,如果在零件的表层引入一条裂纹,则在裂纹周边的残余应力会发生释放,相应的残余应变的具体释放量可以进行测试,进而可以得出应变、位移或转角等量值,最终可以计算出残余应力^[43-45]。

8) 扫描电子显微镜^[35-36,46-48]

扫描电子声显微镜(SEAM)是依据热波成像的原理,把声学技术和电子显微镜技术结合的针对不透明材料的无损检测方法。如果材料的热学或热弹性质发生微小变化,则热波在试样中的传播会发生相应的变化并可以进行成像,热学或热弹性质和晶格结构紧密相关,进而可以表征晶格微观结构的变化,可以用于残余应力的测试。由于热波可以穿透几百微米或毫米量级的深度,与X射线衍射方法相比,SEAM可以无损检测表面和表层的残余应力分布,且由于其

有分层成像的功能,有可能测定残余应力的三维分布。

9) 激光超声检测法^[49-50]

激光超声检测法的原理是利用检测的材料自由表面上传播的表面波声速的变化来计算残余应力的大小。激光超声具有非接触、宽带、空间和时间分辨率高等特点,可以实现对声速的高精度测量。目前一般采用铍铝石榴石脉冲激光来激发声表面波,采用外差激光干涉仪进行接受信号,测得表面波声速在不同位置上的相对变化,进而可以计算出材料的残余应力分布。

除此之外,还有微观压痕法、纳米压痕、多孔差方法等。

除了X射线衍射在研究和工程上最常用外,同步辐射和中子散射技术在研究中也逐渐开展起来,并在未来无损原位测定材料和构件的内部残余应力分布具有很大优势。

5 结语

残余应力测试未来的发展趋势将是精确快速的三维原位无损分析,与模拟仿真相结合,以原理模型为依据和以应用为导向的综合多方面的跨学科系统研究,并形成大数据库平台系统。同时,在测量精度、测定有效性、特殊材料残余应力测定、装配残余应力测定等方面还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 蒋刚,谭明华. 残余应力测量方法的研究现状[J]. 机床与液压,2007,35:213—220.
JIANG Gang, TAN Ming-hua. Present Research Status of Measuring Residual Stress [J]. Machinetool and Hydraulics,2007,35:213—220.
- [2] 王仁智. 表面喷丸强化技术[J]. 中国表面工程,1991,1:36—48.
WANG Ren-zhi. Shot Peening Strengthening Technology [J]. China Surface Engineering,1991,1:36—48.
- [3] 高玉魁. 喷丸对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金拉-拉疲劳性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2004,14(1):60—63.
GAO Yu-kui. The Shot Peening Effects of Ti-10V-2Fe-3Al Titanium Alloy on Tensile Tensile Fatigue Property [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals,2004,14(1):60—63.
- [4] GAO Yu-kui. Effect of Shot-peening on Microstructure of

- TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536—1539.
- [5] WITHERS P J. Residual Stress Part 1: Measurement Techniques[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17: 355—365.
- [6] WITHERS P J. Residual Stress Part 2: Nature and Origins[J]. Materials Science and Technology, 2001, 17: 366—375.
- [7] SCHIJVE J. Fatigue of Structures and Materials[M]. [s. l.]: Springer, 2009.
- [8] 高玉魁, 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- GAO Yu-kui. Surface Integrity Theory and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [9] 李向斌, 王仁智. 喷丸强化对材料旋转弯曲疲劳强度影响的定量研究[J]. 材料工程, 1995, 10: 26—28.
- LI Xiang-bin, WANG Ren-zhi. Quantitative Investigation of Influence of Shot Peening upon the Rotating Bending Fatigue Strength of Material[J]. Materials Engineering, 1995, 10: 26—28.
- [10] 李金魁, 姚枚, 王仁智. 喷丸残余应力场特征值规律的研究[J]. 应用科技, 1990, 4: 30—36.
- LI Jin-kui, YAO Mei, WANG Ren-zhi. Research of Shot Peening Residual Stress Characteristic Value[J]. Applied Science and Technology, 1990, 4: 30—36.
- [11] 李瑞鸿. 喷丸强化与表面完整性对 300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1418—1423.
- LI Rui-hong. Influence of Shot Peening and Surface Integrity on the Fatigue Properties of 300M Steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1418—1423.
- [12] 高玉魁. 高强度钢喷丸强化残余压应力场特征[J]. 金属热处理, 2003, 28(4): 42—44.
- GAO Yu-kui. Characteristics of Compressive Residual Stress Fields in High-strength Steel Caused by Shot Peening[J]. Metal heat treatment, 2003, 28(4): 42—44.
- [13] GAO Yu-kui. Bending Fatigue Strengths/Limits of Smooth Specimens with and without Surface-enhanced Layer of Aeronautical Metallic Alloys[J]. International Journal of Structural Integrity, 2011(2): 357—365.
- [14] GAO Yu-kui. An Analysis of Residual Stress Fields Caused by Shot Peening[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33: 1775—1778.
- [15] 刘晓龙, 高玉魁. 孔挤压强化残余应力场的三维有限元模拟和实验研究[J]. 航空材料学报, 2011(31): 24—27.
- LIU Xiao-long, GAO Yu-kui. 3D Finite Element Simulation and Experimental Test on Residual Stress Field by Hole Cold Expansion[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011(31): 24—27.
- [16] SHAO Xiao-jun. FEM Simulation and Experimental Test on Residual Stress of Cold Expansion Hole of Rectangular Plate[J]. Key Engineering Materials, 2007, 348/349: 745—748.
- [17] LIU Yong-shou. Effect of Cold Expansion on Crack Opening Displacement and Stress Intensity Factor[J]. Key Engineering Materials, 2010, 417/418: 477—480.
- [18] PAPANIKOS P, MEGUID S A. Three-dimensional Finite Element Analysis of Cold Expansion of Adjacent Holes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1998, 40: 1019—1028.
- [19] PAPANIKOS P, MEGUID SA. Elasto-plastic Finite-element Analysis of the Cold Expansion of Adjacent Fastener Joles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92/93: 424—428.
- [20] KIM C. Finite Element Analysis of the Residual Stress by Cold Expansion Method under the Influence of Adjacent Holes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153/154: 986—991.
- [21] GAO Yu-kui. Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 3823—3828.
- [22] BENAMARJ. Residual Stress and Mechanical Surface Treatment, Current Trends and Future Prospects[C]. Proceedings of the 4th International Congress on Residual Stresses (ICRS), 1994, 90: 1154—1163.
- [23] TAO N R, WANG Z B, TONG W P. An Investigation of Surface Nanocrystallization Mechanism in Fe Included by Surface Mechanical Attrition Treatment[J]. Acta Mater, 2002, 50: 4603—4616.
- [24] LIU G, LU J, LU K. Surface Nanocrystallization of 316L Stainless Steel Induced by Ultrasonic Shot Peening[J]. Mater Sci Eng, 2000, 286: 91—95.
- [25] 王吉孝. 16MnR 钢焊接接头表面纳米化及接头抗 H₂S 应力腐蚀性能[J]. 焊接, 2005(2): 13—16.
- WANG Ji-xiao. Surface Nanocrystallization of 16MnR Low Alloy Steel Welded Joints and Investigation on Resisting H₂S Stress Corrosion of Welded Joint[J]. Weld, 2005(2): 13—16.
- [26] LIU G, WANG S C, LOU X F. Low Carbon Steel with Nano-structured Surface Layer Induced by High-energy Shot Peening[J]. Scr Mater, 2001, 44: 1791—1795.
- [27] WU X, TAO N, HONG Y. Microstructure and Evolution of Mechanically-induced Ultrafine Grain in Surface Layer of Al-alloy Subjected to USSP[J]. Acta Mater, 2002, 50: 2075—2084.
- [28] Fitzpatrick M E. Analysis of Residual Stress by Diffraction

- Using Neutron and Synchrotron Radiation [M]. London, 2003.
- [29] 西拉德. 超声检测新技术[M]. 北京:科学出版社,1991.
XI La-de. New Technology of Ultrasonic Testing [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [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: 72—75.
YU Fu-jin, ZHAO Yan-wei, ZHANG Ke-hua. Research and Development of Surface Residual Stress Testing Based on Ultrasonic Wave [J]. Surface Technology, 2007, 36: 72—75.
- [31] MURNAGHAN F G. Finite Deformation of an Elastic Solid [M]. New York: Wiley, 1951.
- [32] BACH F, ASKEGAARD V. General Stress-velocity Expressions in Acous-toelasticity [J]. Experimental Mechanics, 1979, 19: 69—76.
- [33] HAYES M, RIVLIN R S. Surface waves in Deformed Elastic materials [J]. Archive of Rational Mechanics and Analysis, 1961, 8: 359—380.
- [34] 袁发荣. 残余应力测试与计算[M]. 长沙:湖南大学出版社, 1987.
YUAN Fa-rong. Measurement and Calculation of Residual Stresses [M]. Changsha: Hunan University Press, 1987.
- [35] LU J. Handbook of Measurement of Residual Stresses [M]. Lilburn: Fairmont Press, 1996.
- [36] ASTM E837-94a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method [S].
- [37] 何世平. 应用云纹干涉测量工艺应力分布[J]. 力学学报, 1993, 25(4): 485—491.
HE Shi-ping. Test on the Distributing of Residual Stress by Moiré Interferometry [J]. ACTA Mechanica Sinica, 1993, 25(4): 485—491.
- [38] 沈炜良. 柴油机缸体铸件残余应力测试及消除的研究[J]. 铸造技术, 2004(9): 689—690.
SHEN Wei-liang. Elimination of Residual Stress of Diesel Engine Cylinder Body Casting [J]. Foundry Technology, 2004(9): 689—690.
- [39] 刘翠荣. 磁性法测定 A633D 钢焊接接头残余应力的研究[J]. 太原重型机械学院学报, 2002(1): 16—21.
LIU Cui-rong. Study of Residual Stress at Weld Joints of A633D Steel Using Magnetic Flux Test [J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Institute, 2002(1): 16—21.
- [40] 谢俊,程金树. 谈微晶玻璃残余应力的测量方法[J]. 玻璃, 2003(6): 21—23.
XIE Jun, CHENG Jin-shu. Measurement of Residual Stress in Glass Ceramic [J]. Glass, 2003(6): 21—23.
- [41] 庄同信. 磁法检测应力仪的研制及其应用[J]. 新技术应用, 2002(5): 21—25.
ZHUANG Tong-xin. Magnetic Stress Examine Device and Application [J]. New Technology Application, 2002(5): 21—25.
- [42] 卢成磊. 巴克豪森效应在铁磁材料残余应力测量中的应用[J]. 科研成果与学术交流, 2005(4): 176—182.
LU Cheng-lei. Application of Barkhausen Noise to the Measurement of the Residual Stress of Ferromagnetic Materials [J]. Scientific Research Achievement and Academic Exchange, 2005(4): 176—182.
- [43] 张旦闻. 裂纹柔度法在 7075 铝合金板残余应力检测中的应用[J]. 材料热处理学报, 2006, 27: 127—131.
ZHANG Dan-wen. Application of Residual Stress Test Using Crack Compliance Method in 7075 Aluminum Alloy Plate [J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2006, 27: 127—131.
- [44] 唐志涛. 基于裂纹柔度法的铝合金预拉伸板内部残余应力测试[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17: 1404—1410.
TANG Zhi-tao. Measuring Residual Stresses Depth Profile in Prestretched Aluminum Alloy Plate Using Crack Compliance Method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17: 1404—1410.
- [45] 王秋成. 7075 铝合金板材残余应力深度梯度的评估[J]. 航空学报, 2003, 24: 336—339.
WANG Qiu-cheng. Evaluation of Residual Stress Depth Profiling in 7075 Aluminum Alloy Plates [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24: 336—339.
- [46] ROGERS R. Plasma Processes in Micro-electronic Device Manufacturing [J]. Vacuum, 2002, 65.
- [47] 袁发荣. 残余应力测试与计算[M]. 长沙:湖南大学出版社, 1987.
YUAN Fa-rong. Measurement and Calculation of Residual Stresses [M]. Changsha: Hunan University Press, 1987.
- [48] BALK L J, DAVIES D G, KULTSCHER N. Investigation of Si-Fe Transform Sheets by Scanning Electron Acoustic Microscopy (SEAM) [J]. IEEE Trans Magn, 1984, 20(5): 1466—1468.
- [49] 潘永东. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布[J]. 声学报, 2004(3): 254—257.
PAN Yong-dong. Distribution of Residual Stress in Aluminum Alloy by Laser Ultrasonic Testing [J]. Journal of Sound, 2004(3): 254—257.
- [50] 战宇,刘常升,张凤鹏,等. 激光超声表面波检测薄板残余应力的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 406—409.
ZHAN Yu, LIU Chang-sheng, ZHANG Feng-peng, et al. Numerical Simulation of Laser Ultrasonic Surface Wave Measurement of Residual Stress [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(3): 406—409.