

残余应力测试技术的进展与动向

王庆明¹, 孙 渊²

(1. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237; 2. 上海电机学院 机械工程学院, 上海 200240)

摘要:针对几种常见的残余应力测试方法的研究进展与应用现状,指出了较为成熟的残余应力测试方法是盲孔法和 X 射线法,但盲孔法受限于对测试对象有损伤,X 射线法受限于测试条件的苛刻,其它的残余应力测试方法在有效性、准确性和操作简便性等方面还不能很好地满足工业需求。而利用压痕法测量残余应力是一个值得关注的研究动向,在局部压载作用下,材料的压入响应与材料中的残余应力有着密切的关联,所以压痕法测试准确性好,其测试结果与盲孔法的测试结果相似程度较高,又能避免对测试对象的较大损伤,可望进一步发展为简便有效的残余应力测试方法。

关键词:局部载荷;压入响应;残余应力

中图分类号:TH123.4;TH823.3;TH16

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)01-0011-05

Research development on the test methods of residual stress

WANG Qing-ming¹, SUN Yuan²

(1. College of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. College of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: According to the research development on the ordinary test methods of residual stress, it was pointed out that the more suitable test methods were blind-hole and X-ray method. But the blind-hole drilling method may hurt specimen, X-ray method request strict test environment, and the other test methods can't fulfill industrial demand on effectiveness, accuracy and operation convenience. The residual stress measuring based on indentation has been considered noteworthy. The indentation response is related to residual stress existing in components. So the values from indentation response are in good agreement with that from the blind-hole method, meanwhile specimen hurt may be avoided, the residual stress measuring technology based on indentation response will definitely display its engineering application prospects.

Key words: local load; indentation response; residual stress

0 引 言

残余应力问题一直受到人们的关注。在机械加工过程中,外力和温度变化引起的不均匀塑性变形是产生残余应力的主要原因。在铸造、锻造、焊接及各类切削加工过程中,工件均会由于受外力和温度的作用而引起残余应力。残余应力的产生、叠加及释放过程造成零件内部应力状况的重新分布,就可能影响零件的尺寸和形位精度以及零部件的装配精度,降低零件的抗疲劳强度、抗应力腐蚀及抗蠕变开裂的能力,最终影响到机器设备的性能与使用寿命。因此,分析残余应

力的产生机理、探究有效的残余应力测试方法与改善零件中残余应力状况具有非常重大的意义^[1-3]。

事实上,在各工业领域如机械、水利水电、热电核电、航空航天、石油化工、冶金、铁路、交通等行业,残余应力测试技术及其应用研究始终受到高度重视,特别是加入世贸组织以来,为了与国际接轨,残余应力测试已成为许多行业必需的检验和控制手段。

目前,残余应力的测试方法很多^[4],按其对于被测构件是否具有破坏性,可分为有损测试法和无损测试法两大类。有损测试法的主要原理是破坏性的应力释放,使其释放部分产生相应的位移与应变,测量出这

些位移和应变,经换算得到构件原有的应力。常用的方法有钻孔法、取条法、切槽法、剥层法等,在钻孔法中为了降低构件因钻孔而受损伤的程度,可用盲孔法、浅盲孔法。无损测试法是多年来科研人员一直探索的方法,目前无损测试的方法有 X 射线法、中子衍射法、超声波法、磁性法等。但是鉴于这些方法的应用都有一定的局限性,因此残余应力测试技术至今仍是一个有待深入研究的课题,残余应力测试技术的研究,无论对于基础研究,还是对于工程应用都有十分重要的意义。

本研究主要探讨了残余应力测试技术的进展与动向。

1 残余应力测试方法研究的基本状况

各工业发达国家都很重视残余应力测试技术的研究,并取得了很多研究成果。欧洲最重要的残余应力会议—The European Conference on Residual Stress (ECRS) 已举行了 7 届,欧洲各国的残余应力工作者每次均十分踊跃地参加,且特别重视 X 射线法、中子衍射法的研究,美国在 X 射线法、中子衍射法测量残余应力的研究工作中取得了很大的成绩,日本也十分重视残余应力方面的研究。在我国,全国性的残余应力学术交流会已举行多届,近年来相关的科研人员在典型构件的残余应力状态分析和测试方法,在加工制造工艺方面如何减少残余应力,以及降低残余应力对机械构件产生的不良效应等方面都做了大量研究。从已发表的文献数量及我国人员参与国际会议的情况来看,我国对残余应力的研究日益重视。随着我国工业技术的高速发展,由残余应力引起的问题将更为突出,残余应力测试技术的应用研究将促进我国工业水平的进一步发展。

残余应力的数值分析也称为残余应力的定量预测,即利用数值计算方法,对构件的残余应力分布状况进行预见性的定量分析,这是近几年研究课题的手段之一。目前,借助于有限元分析软件,数值模拟计算和实验相结合成了残余应力测试技术研究的主要方法。

2 主要残余应力测试方法的研究现状

2.1 盲孔法

盲孔法是目前工程上最常用的残余应力测量方法,美国 ASTM 协会已将其纳入标准。近年来各国研究者继续对盲孔法作了大量的研究工作,从实际操作中的各种工艺因素、误差来源等方面进行了深入分析,使其日趋完善。

由于盲孔法的计算公式是根据通孔的简化力学模型推导出的,与实际情况存在偏差,对此,一般采用有限元数值分析的方法,分别对不同尺寸、形状的盲孔周围的应力分布情况进行计算,得出孔径深比及孔缘孔底形状对释放应力的影响,避免 Kirsch 通孔解所带来的误差,同时又可省去大量人工实验标定的繁琐。由于在钻孔过程中,钻头使孔壁经历了弹性变形、塑性变形和切断过程,因而在孔壁周围由于局部塑性变形而产生附加应力场,使粘贴在该区域内的应变片感受到附加应变,其大小受孔径、孔深、钻进速度、钻头类型、钻刃锋利程度、应变片尺寸及其到盲孔中心的距离等因素的影响。Steinzig 等对盲孔法测量过程中的钻削附加应变所引起的误差作了详细的分析讨论,张晓宏等用有限元方法对小孔法测量残余应力时孔边塑性应变变量进行分析及修正,以提高测试精度^[5]。侯海量等为探讨简单易行的盲孔法测量焊接残余应力应变释放系数 A、B 的标定,根据盲孔法测量残余应力时应变释放系数 A、B 试验标定原理和强度理论,建立了三维有限元模型,分别对盲孔法测量 921A 钢焊接残余应力应变释放系数进行了有限元标定和孔边应力集中有限元塑性修正,并由此得出了应变释放系数随孔深与孔径比值的关系式和应变释放系数随形状改变的塑性修正公式;将有限元标定结果与试验标定结果、通孔应变释放系数理论解进行比较,使得有限元标定结果与试验结果、通孔应变释放系数理论值有较好的一致性,经塑性修正,计算结果与试验测量结果的偏差大大减小^[6]。刘一华等对盲孔法中释放系数进行数值计算方法的研究^[7];黄晶等运用盲孔法研究厚板焊接残余应力的状况及影响因素^[8];刘晓红等使用基于孔边形状改变比能的 A、B 系数修正法,以消除孔边塑性变形对残余应力测试精度的影响^[9]。综上所述,在盲孔法测试技术方面又有了较详细地探讨,使之趋于完善和成熟。

2.2 X 射线衍射法

盲孔法尽管是最常用的残余应力检测方法,但却或多或少会对构件造成损伤,这在很多情况下是不被允许的,例如对于压力容器,就绝不允许破损。这使得人们必须去研究别的检测方法,其中,X 射线法较为成熟。

早在 1961 年,德国的 Machearauch 提出了 X 射线应力测定的 $\sin 2\psi$ 法,使应力测定的实际应用向前迈进了一大步;随后 Cheekier 将其简化成 $0 \sim 45^\circ$ 法,由于测试手续的简化而颇受欢迎,日本学者成功地设计了 X 射线应力测定仪,对于残余应力测试技术的发展

作出了巨大贡献。国内对 X 射线应力测定的研究是从 20 世纪 60 年代中期开始的,在上世纪 70 年代初北京机电研究所就研制成功了我国第一代 X 射线应力测定仪。

由于 X 射线衍射法的无损性,这种方法向来在焊接结构残余应力测量中的应用研究十分广泛。例如,在国外采用 X 射线衍射法测量不锈钢管焊件内表面的残余应力,采用阶梯状小孔法和 XRD 两种方法对不同焊接方法的残余应力进行了对比和分析^[10],测量 WASPALOY 合金的电子束焊板的残余应力^[11]等。国内近年来 X 射线法的应用研究也很活跃,采用 X 射线法测量经感应加热淬火后的 45 号钢试样内部的残余应力的原理和方法也进行了研究^[12];对液化石油气球罐的残余应力运用 X 射线法进行测量,以分析球罐裂纹与残余应力水平的关系^[13]。

X 射线法由于是通过直接测量晶体的原子间距来得到构件的变形信息,具有较高的精度。然而,这种方法对粗晶等材料的测试目前尚有困难,某些材料很难找到衍射面,X 射线测试设备也比较复杂。

由于穿透深度极浅,在测内部应力时必须剥层。例如为研究大锻件淬火残余应力的形成和分布规律,通过对大截面试样的逐次剥层测定了 18Cr2Ni4W 钢 $\phi 60$ mm 和 $\phi 100$ mm 试样中淬火残余应力的分布^[14]。为获知内部残余应力,从对构件破坏性角度来看,X 射线法已成为有损检测方法。

2.3 中子衍射法

中子衍射法可以直接获得内部残余应力分布同时又对测试对象无损,近年来国外关于中子衍射法在残余应力测量中的应用研究也有报道。

欧洲很重视中子衍射法规范研究,Mochizuki^[15]以中子衍射法对碳钢管焊接接头沿层深的残余应力进行了分析和验证;Annibali^[16]利用中子衍射法测量汽车齿轮中的残余应力以及 Al-Cu 冷焊过程中的残余应力均取得了很大的进展。由于每次测试都必须先测出自由状态下的晶体晶格原子面间距或掠射角(也称作布拉格角),因此在实际残余应力的测试中,中子衍射法的应用还存在许多困难,但是,对于实验用小试样或教学用的实物模型,用中子衍射法测量残余应力被认为是一种有效的手段。但目前在国内还未有中子衍射法测试残余应力的研究与应用报道。

2.4 磁测法

1975 年 Lord 首先在交变磁场中发现了镍杆中的 MAE 现象,1979 年日本学者 Kusanagi 等研究了在低

碳钢磁化过程中的 MAE 规律,提出了这种效应用于检测和评价工件表面残余应力的可行性,20 世纪 80 年代初期,Ono 与 Shihata 在 Kusanagi 工作的基础上,通过对磁测法全面系统的研究,提出了新 MAE 理论模型。在国内,也从应力状态的差异对 MAE 强度影响的角度对磁测法进行了应用研究。近年来,许承东等同样利用磁弹性方法测试了钢轨中残余应力的分布^[17];江克斌等利用磁测法对 T 型焊接试件焊缝附近不同层深处的焊接残余应力进行了实际测量^[18];刘小渝利用磁测法测试出桥梁钢构件的焊接应力状况^[19]。磁测法主要是针对大型构件,其缺点是只能测磁性材料,而且对于材质比较敏感,容易影响测试结果的准确性,且每次测试都需要事先标定。

2.5 超声波法

近年来超声波法仍处于试验研究阶段,Fukuoka 等用超声波法测定了圆盘镶嵌试样的焊接应力分布^[20];贺玲凤等介绍了利用激光超声和瑞利波测量残余应力的方法及主要的测量装置,描述了采用这种方法对轧制 H 型钢残余应力的测量过程,并对测量结果进行了分析^[21];路浩等使用特制变角度超声波探头,选用对应力变化敏感的临界折射纵波作为测量波形,对低碳钢双丝焊对接平板横向残余应力场进行了测量^[22]。由于利用超声波法测定的结果要受到材料性能、工件形状和组织结构的影响,测量的灵敏度较低,为了测定介质中的声速变化,必须用高灵敏度的设备和仪器来测定,测定过程比较烦琐。

3 残余应力测试方法的动向

盲孔法的测试原理是由于材料去除导致内应力释放而产生相应的位移与应变,通过测量出这些位移和应变,经换算得到构件原有的内应力,而人们注意到存在内应力的构件表面在局部载荷作用下因应力叠加也会产生位移与应变,测量出这些位移和应变,经换算也有可能推断出构件原有的内应力。因此,近年来基于硬度测试原理发展了压痕法^[23-24]。

压痕法的优点在于此项测试技术属于基本无损或者说是微损范围(事实上,硬度测试可以用作成品检验,就是因为其压痕的局部性),这对于各种不允许因材料去除而导致安全隐患的工程构件有重要的实际意义;而相对于其它无损检测方法,压痕法则由于物理背景较清晰,相关理论较成熟,测试结果与盲孔法测试结果比较接近,因此较为可靠。压痕法的出现是残余应力测试技术发展中值得关注的一个动向。

3.1 压入问题的研究方法

压痕法的测试原理属于所谓压入问题,即用一定几何形状的压头对固体材料表面实施准静压加载,考察材料的压入响应。

在材料学领域,压入响应用来获取材料的力学性能参数。而残余应力研究人员感兴趣的是,对于存在残余应力的试件,如何通过压入响应来判别残余应力的类型和大小。

压入过程一般经历 3 个阶段:第 1 阶段是弹性压入阶段,材料处于弹性应力状态;第 2 阶段是过渡阶段,材料开始由弹性应力状态进入塑性应力状态,但发生塑性变形区域并未达到自由表面,发生塑性变形的材料始终处于周围弹性材料的约束之中;第 3 阶段是全面塑性流变阶段,压痕处开始屈服并产生塑性变形和塑性流动,此时,自由表面对塑性变形的弹性约束不复存在。

压入问题的研究大致可以分为经验方法和理论研究两类:

(1) 经验方法以实验为依据,分析压入过程带来的各种现象,如压头的压入深度、被压材料在压头周围可能出现的隆起或沉陷、卸载后材料的回弹以及压痕的形状等,通过对实验数据的处理,最终获得某些参量间的经验关系。

(2) 理论研究方法以连续介质力学为基础,通过对压入过程的各种理论分析,获得所需研究问题中某些参量间的函数关系,理论方法包括弹性方法、滑移线方法、近似模型方法和数值方法。

3.2 压痕法的研究动向

压痕法是在硬度测量法的基础上发展起来的,早在上世纪 50 年代,人们就定性地发现试样表面硬度与其表面残余应力间存在反比关系,也就是说,当试样表面存在拉应力时,其硬度值将降低,而存在压应力时硬度值将升高。

但由于硬度是一个综合物理量,且硬度值的测量精度依赖于压痕直径的测定,误差很大,没有考虑塑性变形历史对硬度的影响因素,因而用来测试残余应力将存在很大的误差,该方法在理论上也缺乏严密性、科学性,难以建立残余应力与硬度值之间的直接力学数学模型,而压痕法是通过测出局部载荷作用下因应力叠加产生的位移量与应变量,由此推断出构件原有的内应力,这就避免了硬度法的缺陷,被认为是一种很有前景的残余应力测试方法。

文献[25]采用数值分析方法,探讨了在冲击压痕

法中,不同压痕直径、不同残余压应力对塑性区域的影响,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。文献[26]采用三维八结点等参元的有限元数值分析方法,对静载压痕残余应力测量的力学模型进行了简化,将通过钢球作用于试件上的作用力简化为一个集中力,研究在 x 轴向预应力 σ_x 的影响下, P 与压入位移量 Δz 的关系。文献[27]设计了小锤下摆冲击的简易试验装置,首先对钢板作单向拉伸,使拉应力稳定在 σ ,测得此时测点的纵向弹性应变值 ε_{e1} ,然后以小锤下摆对准钢球施加冲击吸收功,使其在测点形成一定的压痕,测定此时的应变值 ε_{e2} ,将 ε_{e1} 减去 ε_{e2} 即得形成压痕叠加应力过程产生的应变增量 $\Delta\varepsilon$,另外利用简单台式老虎钳设计了静压压痕试验装置,获取 $\Delta\varepsilon$ - σ 标定曲线,由压痕形成过程所产生的应变增量值推算出残余应力。文献[28]利用有限元方法分析了不同残余应力下压入载荷-深度曲线图,得到标定曲线,通过实际得到的压入载荷-深度曲线与标定曲线分析比较,推断出实际材料中的残余应力。文献[29]分析了试件中存在的拉、压残余应力对压痕尺寸和压头周围材料隆起量的影响。针对目前压痕法的理论与实验研究都还不太成熟的现状,文献[30]从理论分析、数值分析和测试实验等方面对压入问题进行了研究,分析了存在残余应力的构件材料表面在局部载荷作用下发生塑性变形时的压入响应,探讨了材料性能特别是残余应力对压入响应的影响规律。

近几年来,利用压痕法测试残余应力的应用研究正在积极展开,如文献[31]采用冲击压痕法,对激光-氩弧复合热源焊接镁合金 AZ31B 焊缝部位的残余应力沿焊缝方向和垂直焊缝方向上的残余应力进行了测试;文献[32]利用常规的维氏显微硬度压痕法研究和测量了材料中微区的残余应力,推导了残余应力与压痕面积比之间的理论公式;文献[33]应用压痕法测量水电站特大型混流式水轮机转轮叶片组焊后的残余应力;文献[34]运用纳米压痕法测量电沉积镍镀层的残余应力;文献[35]利用压痕法测试以振动焊接方式焊接的构件中的残余应力。

4 结束语

在各工业领域,残余应力测试技术和应用研究始终受到高度重视,目前,尽管残余应力的测试方法很多,但由于残余应力问题的复杂性,各种测试方法在有效性、准确性和操作简便性等方面还不能满足工业需求,实际应用的残余应力测试技术均存在一定的应用局限。研究开发残余应力的有效测试方法仍是各国研

究者需要解决的重要问题。

在残余应力测试方面的文献中,较多的还是关于盲孔法的应用研究,主要关注点是应变释放系数的数值分析和实验标定问题,由于各国研究者继续对盲孔法作了大量的研究工作,使其在测量准确性方面又有了新的进展,但盲孔法对测试对象会造成损伤,影响了它的应用范围。X射线法作为一种经典的无损检测方法,近年来的应用研究也很活跃,但由于穿透深度极浅,只能测试表面很薄一层材料内的残余应力,同时X射线测试设备比较复杂,对测试表面的要求也比较高,因此X射线法受限于测试条件的苛刻。

关于中子衍射法,近年来国外在残余应力测量中的应用研究也有报道,但在国内未见到这方面的文献。磁测法的应用主要是针对大型构件的残余应力测试,由于对材质比较敏感,容易影响测试结果的准确性。超声波法的应用近年来也有报道,但由于利用超声波法测定的结果要受到材料性能、工件形状和组织结构的影响,测量的灵敏度较低,因此超声波法仍处于试验研究阶段。可见,这几种残余应力测试方法在有效性、准确性和操作简便性等方面还不能很好满足工业需求。

利用压痕法测量残余应力是一个值得关注的研究动向,在局部载荷下,材料的压入响应与材料中的残余应力有着密切的关联,压痕法测试准确性较好,其测试结果与盲孔法的测试结果相似程度较高,同时又避免了对测试对象的较大损伤,近年来,利用压痕法测试残余应力的应用研究正在积极展开,显示了发展为简便有效的残余应力测试方法的前景。

参考文献(References):

- [1] CURFS C, KIRSTEIN O, STUDER A J, et al. Residual stress measurements in Australia: present and future[C]// Materials Science Forum, Residual Stresses VIII, Proceedings of the 7th International Conference on Residual Stresses, ECRS-7, 2005:218-222.
- [2] BEGHINI M, BERTINI L. Recent advances in the hole drilling method for residual stress measurement[J]. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 1998, 7(2): 163-172.
- [3] BELASSEL M, PINEAULT J, BRAUSS M E. Comparison and evaluation of residual stress measurement techniques[J]. **Proceedings of the 2006 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics**, 2006(2): 756-762.
- [4] STEINZIG M, TAKAHASHI T. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry part IV: measurement accuracy[J]. **Experimental Techniques**, 2003, 27(6): 59-63.
- [5] 张晓宏,赵海燕,蔡志鹏,等. 小孔法测量残余应力时孔边塑性应变的有限元分析及修正[J]. **机械工程学报**, 2005, 41(3): 193-200.
- [6] 侯海量,朱 锡,刘润泉. 盲孔法测量焊接残余应力应变释放系数的有限元分析[J]. **机械强度**, 2003, 25(6): 632-636.
- [7] 刘一华,贺 晖. 盲孔法中释放系数的数值计算方法[J]. **机械强度**, 2008, 30(1): 33-36.
- [8] 黄 晶,刘宇光,张 涛,等. 厚板焊接残余应力的试验研究[J]. **中国舰船研究**, 2009, 4(5): 33-37.
- [9] 刘晓红,苏文桂,张运泉,等. 屈服状态下盲孔法测量残余应力孔边应力释放系数修正[J]. **铸造技术**, 2010, 31(1): 36-39.
- [10] LU J, BOUHELIER C, LIEURADE H P, et al. Study of residual welding stress using the step-step hole drilling and X-ray diffraction method[J]. **Welding in the World**, 1994, 33(2): 118-128.
- [11] STONE H J, WITHERS P J, ROBERTS S M, et al. Comparison of three different techniques for measuring the residual stress in electron beam-welded plate of Waspaloy[J]. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 1999, 30(7): 1797-1808.
- [12] 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.
- [13] 张亦良,徐学东,王泽军. 1500 m³ 液化石油气球罐残余应力分析[J]. **石油化工设备**, 2004, 33(6): 9-12.
- [14] 张 海. 大锻件淬火残余应力的测定及研究[J]. **物理测试**, 2001(3): 26-30.
- [15] MOCHIZUKI M, HAYASHI M, HATTORI T. Numerical analysis of welding residual stress and its verification. Using neutron diffraction measurement[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 2000, 122(1): 98-103.
- [16] ANNIBALI G, BRUNO G, FIORI F, et al. Neutron-diffraction measurements for residual stress analysis in automotive steel gears[J]. **Applied Physics A: Materials Science & Processing**, 2002, 74(6): 1698-1700.
- [17] 许承东,刘学文,李 强. 磁弹性方法无损测试钢轨残余应力分布的实验研究[J]. **北方交通大学学报**, 2004, 28(4): 76-78.
- [18] 江克斌,肖叶桃,郭永涛. T型焊接试件焊接残余应力分布的测定[J]. **焊接学报**, 2008, 29(1): 53-56.
- [19] 刘小渝. 磁测法测试钢结构桥梁的焊接残余应力[J]. **重庆交通大学学报**, 2010, 29(1): 38-41, 84.

量多个温度点,而且精度低、误差大。本系统标定过程中,采用黑体炉模拟被测目标以采集不同温度下信号电压的大小,同时采用了3层BP神经网络算法对数据进行了标定,其算法简单,而且易于编程实现。

在本研究中,调试工作分模块进行,包括软件调试、硬件调试以及系统联调,经多次测量调试,在0~60℃的工作环境温度中,测温范围为400~1600℃,精度可达±1%,分辨率为1℃,响应时间小于200ms,达到了系统的设计要求。

4 结束语

光学点温测温仪,实质上是光学点波的计量表达了温度的正确性。系统结合点像望远镜原理采用精密的光学结构以及高性能的LPC2132芯片,可长可短的传感器光纤使测温仪能在恶劣环境中可靠应用,明显提高了测温性能,很好地解决了非接触式测点温的问题。

参考文献(References):

- [1] 陈尧生. 光学创新型测温仪的研制[J]. 机械工人:热加工,2005(8):60-61.
 - [2] FRANCIS T S Yu. 光信息技术及应用[M]. 冯国英,译. 北京:电子工业出版社,2006:159-178.
 - [3] 傅里叶. 热的解析理论[M]. 桂质亮,译. 北京:北京大学出版社,2008.
 - [4] 洪正平. 用光的波动理论分析薄透镜成像[J]. 山东师范大学学报:自然科学版,2007,22(3):122-123.
 - [5] 马科斯·波恩,埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭荪,译. 北京:电子工业出版社,2005:221-233.
 - [6] 米磊,姚胜利,李强,等. 一维自聚焦透镜及其应用[J]. 光子学报,2007,36(9):1624-1627.
 - [7] 赵家贵. 新编传感器电路设计手册[M]. 北京:中国计量出版社,2002.
 - [8] 苏维嘉,李建康. MMA7260Q在汽车制动性能检测中的应用[J]. 机电工程技术,2008,37(2):80-81.
 - [9] 唐慧鹏,王友鹏. 基于LPC2132的红外测温仪的研究[J]. 压电与声光,2008,30(2):161-163.
 - [10] 郭天祥. 51单片机C语言教程[M]. 北京:电子工业出版社,2009. [编辑:柴福莉]
-
- (上接第15页)
- [20] 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.
 - [21] 贺玲凤,潘桂梅,小林昭一. 利用激光超声测量H型钢梁的残余应力[J]. 华南理工大学学报,2001,29(7):20-23.
 - [22] 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.
 - [23] CARLSSON S, LARSSON P L. On the determination of residual stress and strain fields by sharp indentation testing, part I: theoretical and numerical analysis[J]. **Acta Materialia**, 2001, 49(12):2179-2191.
 - [24] CHEN Xi, YAN Jin, ANETTE M K. On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation[J]. **Materials Science and Engineering A**, 2006, 416(1-2):139-149.
 - [25] 于哲夫,赵颖华,陈怀宁. 冲击压痕测量残余应力的方法[J]. 沈阳建筑工程学院学报,2001,17(3):200-202.
 - [26] 林丽华,陈立功,顾明元. 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.
 - [27] 林丽华,陈立功,顾明元. 球面压痕测残余应力试验方法研究[J]. 机械强度,1998, 20(4):303-306.
 - [28] SURESH S, GIANNAKOPOULOS A E. A new method for estimating residual stress by instrumented sharp indentation[J]. **Acta Materialia**, 1998, 46(16):5755-5767.
 - [29] 孙渊,王庆明. 残余应力影响压痕尺寸和隆起量的研究[J]. 机械强度,2009, 31(1):63-67.
 - [30] 孙渊. 局部载荷压入响应及其在残余应力测试中的应用研究[D]. 上海:华东理工大学机械工程学院,2009.
 - [31] 王红阳,迟明生,黄瑞生,等. 激光-氩弧复合热源焊接镁合金残余应力分析[J]. 焊接学报,2006,27(11):33-36.
 - [32] 陈超,潘春旭,傅强. 采用显微硬度压痕法测量微区残余应力[J]. 机械工程材料,2007,31(1):8-11.
 - [33] 林太举. 特大型混流式水轮机转轮残余应力测试[J]. 水电站机电技术,2008,31(5):44-46.
 - [34] 章莎,周益春. 应用纳米压痕法测量电沉积镍镀层残余应力的研究[J]. 材料导报,2008,22(2):115-118.
 - [35] 曾庆林,张立华,徐济进,等. 振动焊接技术在工程中的应用[J]. 机械研究与应用,2009(4):75-77. [编辑:张翔]