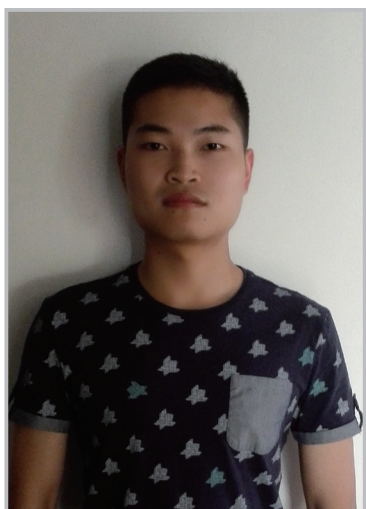


叶片的无损检测及其再制造 质量评价技术现状*

Status of NDT and Evaluation Technology of Blade Quality in Remanufacturing

中国人民解放军装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室 朱学耕 董世运 徐滨士



朱学耕

中国人民解放军装甲兵工程学院硕士,研究领域为超声无损检测,主要对废旧航空零件再制造性评估以及对再制造航空零件质量进行评估。

未来残余应力测定技术将朝着无损、快捷、在线测量等方向发展。随着科技的进步,无损检测也会向无损评价的方向发展,其理论研究和应用也将会受到更多关注。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.088

气中的水、微粒等发生相互作用,使叶片易产生疲劳裂纹^[1-2]与冲蚀磨损,甚至导致叶片断裂。由于叶片造价昂贵,更换成本太高,为使叶片处于良好的工作状态,需要用无损检测的手段对叶片进行定期检查,并对失效叶片进行再制造^[3]修复,使其恢复或超越之前的性能要求。

叶片的损伤形式分析

(1)疲劳裂纹。汽轮机转子叶片数量多、形状不一,每一个叶片都处于高温、高压、高速运转的环境中,其叶根连接在叶轮上,承受着数十吨甚至上百吨的离心力、弯曲应力、振动应力和热冲击等载荷,在材料承受交变应力持续作用下,萌生出位错、滑移、相变等内部缺陷,并逐渐演化

成为宏观裂纹^[4],裂纹在循环应力和腐蚀作用下扩展,最终会导致叶片断裂,使汽轮机无法正常工作,带来巨大的经济损失。

(2)冲蚀磨损。叶片在高速旋转时受空气中水与微小颗粒的冲击,表面材料发生磨损,易出现腐蚀坑并在此处应力集中,埋下隐患,影响叶片正常工作,是叶片在工作中失效的重要原因。

损伤叶片的再制造研究进展

目前,对损伤叶片的处理方式主要是更换与修复。叶片制造成本高,损伤后直接更换经济效益低,以涡轮叶片为例,目前国外发达国家在多数情况下都是对损坏的叶片采取修理的措施而不是更换,由于其带来的巨

叶片是航空发动机、汽轮机、风力发电机等重要组成部件,在服役中通过高速旋转将风能、热能转化为电能、机械能,或者将电能转化为风能。由于叶片服役环境复杂,工作中主要承载巨大的离心力、热应力等交变载荷,加之叶片在高速旋转中与空

* 基金资助:国家973项目(编号2011CB013405,2011CB013403)。

大的经济效益已成为各国研究的热点,如美国已成功掌握了叶片裂纹的激光修复技术^[5],我国在损伤叶片的修复方面较发达国家还有一定差距,但也进行了大量的探索。

叶片在高温环境中高速旋转会在表面发生磨损与氧化,影响叶片性能,甚至导致叶片停用。针对飞机发动机压气机叶片榫头表面磨损,成都航利集团利用纳米电刷镀技术对某型发动机高压压气机整流叶片榫头的微动磨损进行修复^[6],与普通镀层相比,含有纳米颗粒的复合电刷镀镀层硬度显著提高,渗氢量大幅度降低,使其使用寿命由再制造前的300~500h延长至再制造后至少1000h。在对叶片表面氧化物修复方面,大连理工大学的朱小鹏等^[7]采用TEMP-6型强流脉冲离子束装置开展了强流脉冲离子束表面再制造技术的研究。研究表明,利用强流脉冲离子束辐照材料强烈的热-力学效应,应用于涡轮叶片表面的清洗维修,可有效去除涡轮叶片基体因高温氧化形成的氧化物,辐照表面反复重熔使叶片表面微观缺陷焊合,获得光滑平整的修复表面,并且叶片表面质量优于原始叶片,实现了HIPIB辐照在涡轮叶片表面再制造方面的应用,为重新制备热障涂层提供了条件。

裂纹修复是航空发动机涡轮叶片修理工作中的难题,目前国内对涡轮叶片裂纹的修复工艺研究甚少,一般利用普通熔焊技术对叶片裂纹进行修复,由于普通熔焊的电弧在工件上分布宽,热输入量大,会在界面上造成晶界液化,在焊接拉应力作用下,会形成液化裂纹,同时在热影响区极易出现热裂纹,影响叶片修复质量。为了避免液化裂纹产生,成都航利集团开发出微弧等离子低应力焊接技术^[8],焊接能量集中,弧长变化对焊接质量影响小,有效降低了焊接应力,成功控制了焊接缺陷的产生。为避免修复过程中出现热裂纹,空军

第一航空学院在激光熔覆具有超快速加热和超快速冷却的过程、对基材的热输入量少、热影响区小等优势的基础上,基于激光熔覆技术在叶片裂纹修复中的新工艺,设计出了涡轮叶片裂纹的激光修复系统^[9],得出了修复工艺过程和主要工艺参数。

叶片在产生疲劳裂纹后,由于继续承受交变应力,最终会发生断裂或出现缺肉,目前针对此失效形式主要采用堆焊技术成型,同时探索了激光熔覆技术^[10],为提高修复工艺,哈尔滨工业大学孟庆武等^[11]利用相同的原材料分别采用激光熔覆及氩弧堆焊技术,在铸造镍基合金试样表面上制备涂层,研究表明:该堆焊成型技术存在成型精度低、热影响区深、堆焊层耐磨性差、界面处有裂纹等缺点,而激光熔覆技术具有高能量集中的优势,制备的涂层组织细小致密,硬度高于堆焊涂层的硬度,较堆焊技术有很大优势,为涡轮叶片尖端部型腔成型探索了新的工艺。

叶片质量的无损检测评价

1 叶片损伤的无损检测

以汽轮机和航空发动机叶片为例,叶片在服役过程中根据失效部位不同可概括为表面失效与内部失效,为了更好地对叶片进行再制造修复,恢复其之前的性能,需要对叶片的失效部位进行正确判断,对于叶片的表面磨损、缺肉等失效形式直接用肉眼就能观察清楚,但对于一些裂纹缺陷有时无法直接观察、识别,因此难以确定其失效位置,在不损坏工件的前提下,可以用无损检测的方法^[12]对其进行确定。

国内外对叶片检测的常用方法有:渗透检测、磁粉检测、涡流检测、射线检测、超声检测,主要应用于对叶片表面/近表面、表面以下的缺陷检测。以上检测方法有着各自的优点和局限性,检测缺陷的类型和性能指标都有所差异,下面根据缺陷位置

的不同对每种方法进行说明。

1.1 叶片表面/近表面缺陷检测

火力发电厂中的汽轮机叶片和航空发动机中高压涡轮叶片及叶根等部位的表面由于受到冲刷、磨损或腐蚀,经常出现损伤,形成腐蚀坑或冲刷槽,引起叶片表面的应力集中而导致叶片在高速工作状态下产生微细裂纹,严重时甚至会使叶片断裂。目前,对工件表面质量检验常用的方法是表面超声波探伤,但此方法受工件表面形状、表面光洁度影响很大,汽轮机叶片形状复杂,在工作中受汽蚀作用,表面非常粗糙,因此利用超声表面波探伤有困难。鉴于受叶片的材质、几何形状、表面状况、工作环境等条件的限制,决定采用渗透探伤法。渗透检测技术^[13]采用渗透剂渗入工件表面开口缺陷,在清除工件表面的渗透剂后,从缺陷回渗的渗透剂可显示缺陷的位置、形状和大小。按照渗透成分可以分为荧光、着色及荧光着色渗透检测法3类^[14]。

利用原有的荧光渗透检测方法对某型高压涡轮工作叶片进行检测时,渗透液会进入工件狭长、不规则的型腔以及与型腔垂直的小通孔,导致清洗困难,然而在保证检测灵敏度的情况下,会造成清洗不足,缺陷无法判断;在保证检测背景的前提下,又会造成过清洗,缺陷无法显示。为了解决这一矛盾,中航工业南方航空工业有限公司在原有荧光渗透检测的基础上,通过改变检测工艺的顺序以及细化检测过程,在对某型高压涡轮叶片进行缺陷检测时,克服了以上不足,为盲孔、型腔类零件的荧光渗透积累了经验^[15]。除此之外,文献[16]利用溶剂去除型渗透探伤方法对汽轮机叶片的表面进行探伤,在利用显像剂吸附渗透液的过程中,在叶片的表面产生清晰可见的缺陷图像,消除了设备的重大隐患,确保机组的安全稳定运行。

利用荧光渗透检测方法对叶片

进行缺陷检测时,不需要复杂的设备,经济性好,能够清晰地显示缺陷的位置,但是叶片在使用一段时间后,表面常会被腐蚀^[17],缩短了叶片的使用寿命。渗透检测方法不能估计裂纹的深度,且只适用于检测表面缺口裂纹,对于叶片近表面以及叶片内部的缺陷则无法显示。

虽然汽轮机叶片的几何形貌比较复杂,超声表面波探伤有一定难度,但是叶片材料比较均匀,磁化后磁力线能够在叶片的内部均匀通过,基于这一特点能够利用磁粉检测的技术对叶片的表面及近表面缺陷进行表征^[13]。

利用磁粉检测技术的基本原理,为了增强磁痕与工件表面的对比度,提高微小缺陷检测灵敏度,在磁粉探伤方法中,常用的是荧光磁粉检测方法^[18]。文献[19]在对汽轮机叶片工作状况进行分析的基础上,给出对叶片荧光磁粉探伤的检验措施,在叶片边缘、叶根侧面等处发现有磁痕聚积,并对其进行复检和技术评定,发现未有超标准的磁痕显示,通过对汽轮机叶片检测,使工作人员准确把握质量,并为汽轮机叶片的质量检验提供借鉴;在此基础上,目前空军各修理厂对发动机叶片裂纹检测大多采用磁粉探伤与超声波检测相结合的方法,在文献[20]中,首先利用磁粉探伤对飞机发动机压缩机一级叶片的裂纹进行检测,然后利用超声表面波检测方法对缺陷进行确定,二者取长补短,相互结合。山东省电力试验研究所的张炳法^[21]还利用湿磁法对叶片探伤工艺进行了系统研究,研究表明,湿磁法能够使用较细的磁粉,其潜在检测灵敏度比干磁法高,非常适用于叶片检测,为叶片检测提供一种新的思路。

磁粉检测方法操作简单、检测费用低,具有较高的检测灵敏度,但是只适用于铁磁性材料,在利用磁粉检测技术对叶片进行检测时,需要对其

进行拆装,在一定程度上增加了检测周期,大亚湾核电运营管理有限责任公司在对 MARK II 型低压转子末级叶片进行检测时,拆装叶片周期大约有 8~9 天^[22],而且在拆装的过程中容易导致机械损伤,影响检测效率。

涡流检测技术^[13]同样适用于对工件的表面和近表面缺陷进行检测,在检测中要求汽轮机和航空发动机的叶片为金属材料,并能够完成对叶片原位探伤,在一定程度上克服了磁粉检测技术的局限性。基于涡流检测的原理,中国南方航空工业有限责任公司利用涡流检测技术对飞机发动机涡轮工作叶片榫头裂纹进行了原位探伤^[23],成功地发现榫头处的疲劳裂纹;Zenzinger 等^[24]基于脉冲涡流热成像检测技术,对航空发动机涡轮叶片和榫头上的裂纹进行检测,发现此方法能够检测出渗透检测法无法检测的内部小缺陷;南昌航空大学宋凯、刘堂先等^[25]建立了航空发动机涡轮叶片三维有限元模型,设计了双线圈阵列涡流裂纹检测简化模型,研究了阵列涡流线圈扫查具有一定曲率的涡轮叶片表面时感应电动势的变化,得到了不同长度的纵向裂纹和不同深度的横向裂纹同阵列涡流线圈感应电动势变化的对应关系,为发动机涡轮叶片的工程检测实践奠定了理论基础;吉林化工学院邵泽波、宋树波^[26]还将涡流检测方法应用于汽轮机末级叶片的原位探伤,对叶片的尖边、排气边、进气边以及叶根处的缺陷进行了检测,缺陷信号显示清晰、效果良好,证实了该方法在汽轮机叶片检测中的优越性。虽然涡流检测方法能够很好地应用在叶片的缺陷检测中,但是目前也只是对形状规则的叶片或者叶片中形状规则的部分进行检测,且检测的深度仅限于叶片的表面和近表面,对于复杂形状叶片以及叶片内部缺陷的检测还有一定的局限性。

1.2 叶片内部缺陷检测

叶片在加工制造过程中由于加工材料本身的问题、制造工艺不良以及加工过程中的疏漏等原因,有可能存在气孔、夹杂等缺陷,这些缺陷隐藏在叶片内部,肉眼无法观察,在叶片服役过程中潜伏着巨大危害,有可能导致叶片内部出现裂纹,甚至导致叶片断裂,造成巨大损失;叶片在再制造过程中熔覆层与基体的结合面处是否有裂纹、再制造后的叶片是否能够继续服役,这些都需要评价,在不损坏工件的前提下,无损检测的方法发挥着重要的作用,在常用的 5 大无损检测手段中渗透检测、磁粉检测、涡流检测仅限于对叶片的表面或者近表面进行检测,无法检测叶片内部,针对这些问题国内、外利用射线和超声检测的方法进行了探索。

射线探伤法包括普通透壁测量法、X 射线衍射法、康普顿(Compton)效应测量法、X 射线层析法、中子照射法以及阳电子湮没法等。射线检测^[13]指当射线穿过物体时,射线与物质的原子将发生复杂的相互作用,导致透射射线强度衰减,而缺陷部位对射线的衰减不同于无缺陷的部位,用胶片记录透射射线强度进行分析,即可检测出物体内部的缺陷。在国外,赫尔辛基(Helsinki)工科大学已经采用 X 射线衍射法进行了一些测量。VTT 公司已采用实时的射线检测设备进行了汽轮机叶片的测量^[17]。在我国,北京航空航天大学^[27]、中国科学院金属研究所^[28]、南昌航空大学^[29]均利用 X 射线检测方法对叶片缺陷进行了检测,其中北京航空航天大学杨民等将射线探测技术与计算机技术有机的结合在一起,推动了射线照相技术向数字化的方向发展;孔凡琴、路宏远实现了基于数字射线成像的航空发动机涡轮叶片缺陷尺寸的自动测定^[30]。武汉汽车工业大学赵志、彭光俊^[31]将双胶片技术应用在铸钢风机叶片 X 射线检测中,提高了检测灵敏度,减少了曝光量,

取得了良好的效果,并利用微机评片技术对大量的胶片进行分析,实现了对风机叶片更加方便、快速、准确的检测,该技术目前也是射线无损检测技术的一个新的发展方向。然而,目前如何以一种快速的工业射线检测技术代替胶片技术仍是我国射线检测领域首要解决的问题,北京航空航天大学大学的梁丽红等^[32]了解并研究非晶体面阵探测器的成像特性,率先将非晶硅面阵探测器成像技术应用在工业射线检测中,并在某航空发动机叶片的工业检测中取得了较好效果,由于该方法提高了检测效率,其代替胶片成像已成为今后射线检测的发展方向。

射线检测技术对叶片形状以及材料没有特殊要求,且检测灵敏度比较高,缺陷成像直观,能够较好地对缺陷进行定量,但是,射线对人体有辐射,检测成本又高,为避免这些问题,人们探索了超声检测方法。

超声检测方法具有操作简单易行、方便快捷、检测效率高等优势已广泛应用于工业检测中。超声波穿透能力强、方向性好、声波能量集中,利用超声检测方法可以对几米深的缺陷进行检测。日本日立公司针对汽轮机叶片在叶根处易产生疲劳裂纹这一问题,利用超声检测的方法进行了大量研究工作^[33],研究发现:受叶片几何形状的限制,检验方法一般采用高频、小尺寸、横波斜探头进行检测。在我国,福建省电力试验研究院杜德源等^[34]采用微型常规横波探头利用一次波和二次波探伤的方法对T形叶根处的缺陷进行检测,取得满意效果,解决探头放置困难的问题,为其他叶根探伤提供了良好的参考价值。常规超声检测方法能够较好地检测出缺陷,但是由于其检测盲区较大,易导致漏检,检测区域小,需要重复多次才能完成对叶片的检测,效率低下。为了解决这一问题,美国电力科学研究协会(EPRI)开发出一

种相控阵超声波技术,用以更快、更准确地对核电用汽轮机组件进行无损检测,美国的Arizona公共供电公司和Alliant能源公司在停电检修期间用该技术对汽轮机叶轮叶片焊接区进行了成功检验,为相控阵技术在叶片超声检测中的应用奠定了基础。

随着科技的发展,以及工业上对检测要求的提高,相控阵超声检测技术以聚焦和偏转的特点^[35-36]逐渐取代常规超声检测而广泛地应用在对汽轮机叶片和航空发动机叶片的无损检测中。大亚湾核电站汽轮机转子末级叶片采用GEC-A设计制造的MARK II型叶片枞树型叶根^[22],其末级叶片易出现裂纹,利用新型超声相控阵原位检查技术对叶片的主要区域进行全面扫描,排除了安全隐患,并使原来对叶片拆装检测的工期大大缩减,提高了检测效率。在叉型叶根检测方面,河南省电力公司利用超声相控阵检测技术,对汽轮机叶片叉型叶根进行分区检测^[37],对叶根重要部位实现了全面覆盖,并利用超声相控阵实时成像技术,使检测结果呈现直观,易于判断。汽轮机菌型叶片的检测现状是在不拆卸叶片的情况下采用超声表面波对叶型进行检测,利用横波或纵波对叶根进行检测,但是常规叶片的检测存在很多不完善的地方甚至出现漏检,给机组安全工作埋下隐患,文献[38]利用超声相控阵检测技术能够较好地分辨叶片上叶型边缘、顶部、根部及叶片叶根第一菌处的人工缺陷,数据判断准确,解决了菌型叶片超声检测的难题。长春理工大学江文文等^[39]利用相控阵超声检测技术对航空发动机涡轮叶片进行无损检测,并与常规超声检测进行比较,凸显出相控阵超声检测技术能够直观显示缺陷位置和形状等特点。

相控阵超声检测技术是超声无损检测技术的重大进步,它能够很好地完成对复杂工件的检测,与常规超

声无损检测相比主要有以下优点。

(1) 扫查范围大。叶片形状复杂,能放置探头的位置较少,探头移动困难,因此常规探头扫描范围有限。在无法移动探头位置情况下,相控阵探头可以通过计算机控制声波延时率使声束能在一定角度范围内偏转,扩大其扫描范围,解决了常规超声探头对复杂形状叶片无法检测的难题,提高了检测效率。

(2) 降低漏检率。由于检测环境的限制,常规超声探头无法在叶片上较大范围地移动,因此无法在不同的位置对检测区域进行重复检查,相控阵超声探头可以在同一位置对不同区域进行重复扫描,降低了漏检率,检测结果更加可靠。

虽然说相控阵超声检测技术相对于常规超声检测有很多的优势,但是它仍然没有摆脱超声检测对被检工件表面粗糙度的要求,对于表面粗糙度过大的工件声波散射严重,造成检测效果不好甚至无法检测。

1.3 其他无损检测技术

在对叶片的无损检测方法中,除了上述的检测方法外,还有一些其他的无损检测手段,如:工业CT技术、红外热波无损检测方法、金属磁记忆方法等。与传统的无损检测方法相比,他们有许多优点,在叶片的检测中发挥着良好的作用。研究表明:利用工业CT技术能够对飞机发动机涡轮叶片进行扫描成像^[40],并且能够探测到接近0.0508mm的精确尺寸和小到0.0254mm的裂纹^[41];电子科技大学光电信息学院的孙国栋、吴云峰等^[42]采用红外热波技术对航空涡轮叶片内部冷却风道的缺陷进行检测,与传统红外检测不同的是,它通过主动控制激励热源和分析测量样件表面的温度场变化获得样件表面及内部的结构信息,从而达到检测目的,提高了检测效率;金属磁记忆检测方法能够实现对金属构件的微观缺陷、早期失效和损伤等进行诊

断,是目前唯一一种对金属部件早期损伤诊断的行之有效的方^[43]。文献^[44]分析了该方法在汽轮机转子叶片检测中的结果,发现叶片中应力集中部位,对叶片早期故障检测中的前景进行了预测和分析。

2 残余应力的无损测定

叶片的全寿命周期可看作由疲劳期、过渡期和裂纹扩展期3个阶段组成。由于过渡期和裂纹扩展期相对较短,为了确保叶片在工作中不会发生断裂,需要在疲劳期就能对其进行准确的安全监控。目前,工程上广泛使用的叶片缺陷检测方法,比如涡流探伤、磁粉探伤等,只能对叶片宏观裂纹进行检测,无法对叶片材料微观结构的变化提供有效监测,不能对疲劳期的叶片质量做出有效评价^[45]。国内外大量研究表明,残余应力对机械零部件疲劳强度、抗应力腐蚀能力、尺寸稳定性和使用寿命有着重要影响,残余应力的变化反映了其材料微观结构的变化^[46-47]。因此,通过对叶片残余应力的测定,总结其变化规律可以对叶片安全性进行评估。

目前,传统残余应力的测定方法主要分为机械释放法^[48]和物理检测法^[49]。机械法理论完善、技术成熟,但是会对工件造成一定破坏;物理检测法主要包括X射线法、超声法^[50]和磁性法^[51],属于无损检测法,对工件不会造成破坏。由于叶片造价昂贵,采用机械法对其进行应力检测对叶片损伤太大,因此在实际中需要用物理检测法对其残余应力进行评估。磁性法测定残余应力的准确性不高,而且只能用于铁磁性材料,尤其是不宜用来测定存在过高残余应力的构件。超声波法尚处于实验室阶段,因很多关键技术没有解决,还不能用于现场实测。由于X射线衍射法可以直接测量出残余应力的绝对值且结果较为精确,美国汽车工程师学会和日本材料学会都把X射线衍射法作为测定材料应力的标准方法。我国

上海交大等高校与黎阳航空发动机公司等生产单位也均采用X射线衍射法来测定叶片表面的残余应力。空军第一航空学院刘建勋等针对航空发动机叶片的疲劳断裂问题,采用X射线衍射分析方法,对模型发动机压气机叶片进行了残余应力测试。分析了叶片表面不同部位残余应力随工作寿命和损伤情况的变化规律,探讨了将残余应力应用于叶片使用安全评定的可行性。结果表明,通过检测叶片表面残余应力,可以评估叶片的疲劳损伤状况,解决叶片的安全使用评定问题^[52]。

随着检测技术的进步,出现了很多新型残余应力测定方法:多孔差方法^[53]、裂纹柔度法^[54-55]、磁记忆应力检测法^[56]、扫描电子显微镜法^[57]、激光超声检测法^[58]。除此之外还有用核超精细结构效应进行应力测定的方法,其中有木斯保尔效应^[59]、核磁共振^[60]和核声共振^[61]等3种。这些方法需昂贵设备,试验条件复杂,因此发展缓慢。

通过测定叶片的残余应力状况,可以早期预测叶片有可能出现残缺的部位,针对具体的叶片部位监测其残余应力,找出各个危险点残余应力的变化规律,同时综合其他一些相关因素,可以判断叶片的损伤程度,实现对叶片质量进行安全评定,该方法在工程上可操作、实用性强,能够有效地控制叶片断裂故障的发生。

展 望

无损检测技术在叶片缺陷检测和残余应力测定中发挥着重要的作用。在叶片缺陷检测过程中,每种无损检测方法都有自己的优点和缺点,但是总的来说有以下发展趋势:(1)检测设备与计算机技术相结合,使检测结果数字化,便于对数据进行储存与分析;(2)检测技术将向更快捷、更效率的方向改善;(3)在处理检测结果上将与小波分析技术相结合,更

好地对缺陷信号进行识别。

此外,叶片残余应力的测定将在叶片安全性评估中发挥更加重要的作用,能够在叶片失效前发现问题,避免重大的人员和设备损失,目前工业上对叶片残余应力的测定主要利用X射线检测法,随着技术的发展,金属磁记忆方法及超声表面波方法将在工程上可操作性、使用性方面得到提高,在叶片残余应力的测定中发挥重要作用,未来残余应力测定技术将朝着无损、快捷、在线测量等方向发展。随着科技的进步,无损检测也会向无损评价的方向发展,其理论研究和应用也将会受到更多关注。

参 考 文 献

- [1] Lakshmi M R V, Mondal A K, Jadhav C K, et al. Overview of NDT methods applied on an aero engine turbine rotor blade. *Aero Engine Inspection*, 2013, 9(55):482-486.
- [2] Gaumann M, Henry S, Cleton F. All Epitaxial laser metal forming analysis of microstructure formation. *Material Science and Engineering*, 1999, 271:232-237.
- [3] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 21世纪的再制造工程. *中国机械工程*, 2000, 11(1/2):36-38.
- [4] 黄桥生, 陈红冬, 龙毅, 等. 汽轮机枞树型叶根超声相控阵检测新技术. *现代电子技术*, 2012, 35(19):114-116.
- [5] Gandy D W, Frederick G, Viswanathan R, et al. Overview of hot section component repair methods. *ASM Utilities and Energy Sector Conference on Gas Turbine Materials Technologies*, 2000:1-36.
- [6] 黄选民, 赵云强, 杜宇, 等. 纳米电刷镀技术在发动机叶片再制造中的应用. *航空制造技术*, 2011(6):78-80.
- [7] 朱小鹏, 董志宏, 刘臣, 等. 强流脉冲等离子束表面再制造技术原理与应用. *中国表面工程*, 2006, 19(5):143-145.
- [8] 任天明, 何黎明. 某型航空发动机涡轮叶片再制造. *航空维修与工程*, 2011(2):71-73.
- [9] 汪定远, 夏成宝, 王东锋, 等. 基于激光熔覆技术的航空发动机涡轮叶片裂纹修复新工艺. *新技术新工艺*, 2010(8):72-73.
- [10] Brandt M, Sun S, Bishop A. *Laser*

repair of steam turbine blades. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3240-3244.

[11] 孟庆武, 杨胜群, 耿林, 等. 涡轮叶片激光熔覆涂层技术探索. 材料研究与应用, 2009, 3(2):123-126.

[12] 冉启芳. 无损检测方法的分类及其特征简介. 无损检测, 1999, 21(2):75-80.

[13] 邓娟, 许万忠, 易春霞. 五种常规的无损检测方法. 航空维修与工程, 2004(3):62.

[14] 胡学知. 压力容器无损检测——渗透检测技术. 无损检测, 2004, 26(7):359-363.

[15] 苏清风, 戴雪梅, 朱晓星. 某型高压涡轮工作叶片的荧光渗透检测工艺改进与细化. 无损探伤, 2010, 34(3):30-32.

[16] 金剑勇. 火力发电厂汽轮机叶片的渗透探伤. 无损探伤, 2000(6):38-39.

[17] Pitknen J, 罗漫红. 燃气轮机叶片变异和缺陷的无损检测方法. 国外机车车辆工艺, 2002(6):31-33.

[18] Pitkanen J, Hakkarainen T, Jeskanen H, et al. NDT methods for revealing anomalies and defects in gas turbine blades. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, 2000:15-21.

[19] 金万里. 汽轮机叶片的荧光磁粉探伤检验. 无损探伤, 2003, 27(1):28-30.

[20] 郭海欧. 飞机某型发动机压缩机一级叶片裂纹检测研究. 无损探伤, 2004, 28(5):45-46.

[21] 张炳法. 汽轮机末级叶片湿磁法探伤方法的研究. 山东电力技术, 1995(3):37-40.

[22] 范岩成. MARK II型低压转子末级叶片原位叶根的超声相控阵检查. 无损检测, 2012, 34(3):69-72.

[23] 石剑, 吕健. 飞机发动机涡轮工作叶片榫头裂纹的原位涡流探伤. 无损检测, 2008, 30(6):383-386.

[24] Zenzinger G, Bamberg J, Satzger W, et al. Thermo-graphic crack detection by eddy current excitation. Thermographic NDT, 2007, 22(3):101-111.

[25] 宋凯, 刘堂先, 李来平, 等. 航空发动机涡轮叶片裂纹的阵列涡流检测仿真研究. 航空学报, 2014, 34(X):1-8.

[26] 邵泽波, 宋树波. 汽轮机叶片的涡流检测. 无损检测, 2002, 24(10):444-445.

[27] 廉德良, 魏天阳. 低压涡轮工作轮射线照相工艺的探讨. 无损探伤, 2006, 6:38-39.

[28] 郭广平, 凌海军, 刘庆珍, 等. 空心叶片残留型芯影像的射线照相对比度. 无损检测, 2009, 31(7):544-547.

[29] 杨民, 吴美金, 魏东波, 等. 双能

透照模式下涡轮叶片 DR 图像融合方法. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(12):1494-1497.

[30] 孔凡琴, 路宏远. 基于数字射线成像的航空发动机涡轮叶片缺陷尺寸的自动测定. 兵工学报, 2005, 26(3):335-337.

[31] 赵志, 彭光俊. 铸钢风机叶片 X 射线检测及微机评片技术. 武汉汽车工业大学学报, 2000, 22(6):72-75.

[32] 梁丽红, 孔凡琴, 路宏年. X 射线非晶硅面阵探测器 B 级像质的研究. 无损检测, 2006, 27(3):113-116.

[33] 周路生, 严智, 张宝军, 等. 核电厂汽轮机低压转子叶片叶根超声检测技术. 无损检测, 2009, 31(9):703-705.

[34] 林德源, 陈开路, 陈秉忠, 等. 汽轮机叶片 T 形叶根的超声横波探伤. 无损检测, 2005, 27(10):556-558.

[35] 钟志民, 梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用. 无损检测, 2002, 24(2):69-71.

[36] 李雯雯. 超声相控阵技术的声场模拟和实验系统研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2011.

[37] 靳峰, 杨旭, 刘文生, 等. 叉型叶根超声相控阵检测技术研究. 热加工工艺, 2013, 42(24):217-221.

[38] 黄桥生, 彭碧草, 沈丁杰, 等. 汽轮机转子菌形叶片超声相控阵检测. 热力透平, 2013, 42(2):138-140.

[39] 江文文, 柏逢明. 航空发动机涡轮叶片相控阵超声检测研究. 长春理工大学学报, 2011, 34(4):66-69.

[40] Muralidhar C, Lukose S N, Subramanian M P. Evaluation of turbine blades using computed tomography. Proceedings of National Seminar and Exhibition on Non-Destructive Evaluation, Hyderabad, 2006:7-9.

[41] 张胜利. 国外检验发动机叶片的新方法. 航空科学技术, 1994(3):28-30.

[42] 孙国栋, 吴云峰. 涡轮叶片红外热波无损检测技术研究. 红外, 2009, 30(6):39-43.

[43] 戴光, 王文江, 李伟. 不同构件的磁记忆检测及分析方法研究. 无损检测, 2002, 24(6):262-266.

[44] 郭钢, 徐锋. 磁记忆诊断技术在汽轮机叶片早期故障诊断上的应用. 炼油与化工, 2011, 22(1):30-32.

[45] 刘建勋, 魏东, 刘成武, 等. 航空发动机叶片残余应力检测及安全评定研究. 科学技术与工程, 2009, 9(11):2877-2879.

[46] 张定铨. 残余应力对金属疲劳强度的影响. 理化试验 (物理分册), 2002, 38(6):231-235.

[47] 李富凯. 残余应力场中材料的疲

劳行为. 西安矿业学院学报, 1998, 18(2):154-157.

[48] 王秋成, 柯映林, 邢鸿燕. 板类构件内部残余应力测试技术研究. 浙江大学学报 (工学版), 2005, 39(3):381-384.

[49] 陈会丽, 钟毅, 王华昆. 残余应力测试方法的研究进展. 云南冶金, 2005, 34(3):52-54.

[50] Shang C H, Heerden D V, Gavens A J, et al. An X-ray study of residual stress and bending stress in freestanding Nb/Nb5Si3 microlaminates. Acta Materialia, 2000, 48(13):3533-3543.

[51] Webster G A, Wimpory R C. Non-destructive measurement of residual stress by neutron diffraction. Journal of Mater Processing Technology, 2001, 117(3):395-399.

[52] 刘建勋, 魏东, 刘成武, 等. 航空发动机叶片残余应力检测及安全评定研究. 科学技术与工程, 2009, 9(11):2877-2879.

[53] Schilling C G, Blave G T. The measurement of triaxial residual stresses in railroad rail measurement and analysis techniques. Experimental Techniques, 1984, 8(9):25-31.

[54] Vaidyanathan S, Finnie I. Determination of re-sidual stresses from stress intensity factor measurements. Journal of Basic Engineering, 1971, 93:242-246.

[55] Wang Q C, Ke Y L, Xing H Y, et al. Evaluation of residual stress relief of aluminum alloy 7050 by using crack compliance method. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(5):1190-1193.

[56] 姚凯. 基于金属磁记忆法的铁磁材料早期损伤检测与评价的实验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[57] 徐虹, 腾宏春, 崔波, 等. 残余应力非破坏性测量技术的发展现状简介. 理化检验 (物理分册), 2003(11):595-598.

[58] 潘永东, 钱梦馨, 徐卫疆, 等. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布. 声学报, 2004(3):254-257.

[59] 谢俊, 程金树, 郑宏伟, 等. 谈微晶玻璃残余应力的测量方法. 玻璃, 2003(6):21-23.

[60] Park J W, Ferracane J L. Measuring the residual stress in dental composites using a ring slitting method. Dental Material, 2005, 21(9):882-889.

[61] Martinez-Perez M L, Borlado F J, Mompean C R, et al. Measurement and modeling of residual stresser in straightened commercial eutectoid steel rods. Acta Materialia, 2005, 53(16):4415-4425. (责编 亿霖)