

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.011

机械裂纹无损检测方法综述*

周志新

(中国船舶重工集团公司第七一五研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对机械裂纹扩展以及检测的问题, 对常用的裂纹无损检测方法进行了叙述, 具体介绍了磁粉检测和渗透检测技术的发展现状。对近年来新兴的激光超声检测技术、电磁超声检测技术、超声红外热成像检测技术、脉冲涡流及涡流阵列检测技术的特点、作用原理进行了详细的说明, 对比了相对传统检测技术的优势, 对各新型无损检测技术的发展方向进行了总结分析。研究表明: 未来新型裂纹无损检测方法的发展趋势将由人工向智能化、全自动化、图像化检测发展, 复合模式检测在新技术中的应用愈加广泛, 检测仪器设备的发展以降低能耗和提高信噪比为主, 新型裂纹无损检测技术在特殊工程领域的应用将更加专业化。

关键词: 无损检测; 现状; 新兴; 趋势

中图分类号: TH878; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1138-06

Overview of NDT methods for mechanical cracks

ZHOU Zhi-xin

(No. 715 Research Institute of China Shipbuilding Industry Co., Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the problem of mechanical crack propagation and testing, the commonly used crack nondestructive testing (NDT) methods were narrated, in detail, the current situation of the development of magnetic particle testing (MT) and penetration testing (PT) technology was introduced. The characteristics, action principle of several NDT methods emerged in recent years were detailed described, especially in the laser ultrasonic testing technology, electromagnetic acoustic testing technology(EMAT), ultrasonic infrared thermography testing technology, pulsed eddy current (PEC) and eddy current array (ECA) testing technology. The advantages opposite to the traditional testing technology were compared, and the future development trend of the new crack testing methods was prospected. The results indicate that, there will be developed from artificial to intelligent, automated and visualized, and the composite pattern testing will be more widely used in the new NDT methods. The development of testing instruments will take reducing energy consumption and improving the noise-signal ratio as the principal. The application of new crack NDT methods will be more professional in special fields of engineering.

Key words: nondestructive testing (NDT); present situation; emerging; trend

0 引言

各种形式的裂纹广泛地存在于工程装备构件中, 使用过程中交变载荷的作用使构件内裂纹不断扩展。当裂纹扩展到快速发展阶段, 易引起机械装备构件的脆性断

裂, 危害极大, 易造成惨重的人员伤亡和经济损失^[1]。因此, 有必要采用有效的方法对机械装备加强裂纹的监测与控制, 对具有危害性的裂纹及时修复。

常见的裂纹检测方法分为有损检测和无损检测。有损检测需对试件取样, 通过电子显微镜或者金相分析等

收稿日期: 2017-01-29

基金项目: 国家科技部重点研发计划资助项目(2016YFC1400503)

作者简介: 周志新(1991-), 男, 浙江平湖人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事声学海洋仪器制造工艺方面的研究。E-mail: 531920610@qq.com

方法观察检测裂纹。无损检测则无需取样,避免了对构件物理结构的破坏。常见的裂纹无损检测技术有:超声波检测(ultrasonic testing, UT)、渗透检测(penetration testing, PT)、射线检测(radiographic testing, RT)、磁粉检测(magnetic particle testing, MT)、涡流检测(eddy current testing, ET)、漏磁检测(magnetic flux leakage testing, MFL)、声发射(acoustic emission, AE)等。

本研究将针对机械裂纹扩展以及检测的问题,对常用的裂纹无损检测方法进行叙述,具体介绍磁粉检测和渗透检测技术的发展现状。

1 裂纹形成机理及分类

机械裂纹主要来源于材料中的细小缺陷,比如材料的气孔、夹渣、砂眼以及焊缝的不均匀等,设备在长期的工作中,缺陷处应力较为集中,慢慢汇合成细小的裂纹。交替应力使得裂纹进一步汇聚和扩展,直至达到临界点后裂纹会快速扩展,进而引发结构的破坏性断裂。

按在机械构件上的位置特点可将裂纹划分为表面型、深埋型纹和穿透型 3 大类,其中对深埋型裂纹的检测难度较大,一般需要借助无损检测技术。按裂纹形成的力学特性以及外观特点可将其分为张开型、滑移型以及撕开型裂纹。其中张开型裂纹最危险,受力情况最不利,裂纹扩展速度快,需要进行有效的监控。

2 裂纹无损检测的常用方法

目前常用的裂纹无损检测方法中,磁粉检测、渗透检测技术发展历史悠久、技术成熟,在实践中应用最为广泛。

2.1 磁粉检测技术

早在上世纪二十年代,美国人霍克就在操作机床时发现,吸附于被磁化工件表面的铁屑分布的纹理与裂纹分布非常吻合,于是他提出了利用该现象来检测工件表面裂纹的方法^[2],裂纹的磁粉检测技术由此逐步发展起来。

磁粉检测技术的基本方法是将铁磁性材料工件磁化,磁粉会在裂纹处漏磁场附近聚集,显现出与裂纹形状吻合的磁痕,从而确定裂纹的形状和尺寸。磁粉检测成本低廉,可重复性好^[3],灵敏度高,可发现宽度接近 0.1 μm 的表面裂纹。检测中对裂纹的发现直观有效,通常肉眼即可观察。由于施加磁粉基本不受工件外形限制,可有效地用于形状复杂的结构件裂纹探伤。但磁粉检测只能用于铁磁性材料的检测,对深埋型裂纹难以检测,且对工件表面光滑程度有一定要求。检测范围相对

较小,常用于结构件重点部位检测,对技术人员经验要求较高。精密零部件在检测之后通常需要退磁处理,增加了检测成本和时间。

近年来,国内外的便携式磁粉检测设备已经逐步系列化、专业化。国内常采用的断电相位控制器取代了以往的自耦变压器,可无级调节磁化电流,使设备愈加小型化。在使用功能上更加集成化,多功能的充电式智能磁粉探伤机可满足野外作业的多种需求^[4]。磁化方法上更加专业化,针对不同检测场合目前常用的磁化方法有:单磁轭法、交叉磁轭法、触头法、线圈法、复合磁化法等。低频交流磁轭法的深入研究及实际应用使磁粉探伤已经能检测出 6 mm 深的焊缝缺陷。在磁痕图像的后处理和裂纹识别方面^[5-6],计算机技术的应用、图像灰度阈值分割算法的完善不仅提高了磁粉检测的自动化程度^[7-8],也降低了裂纹缺陷的漏检率。国外,早在上世纪 90 年代,美国卡耐基梅隆大学的 GUNATILAKE P 等人^[9]针对飞行器表面裂纹检测设计的磁粉检测系统就已实现全自动化。在磁粉的材料上,荧光磁粉的应用更加广泛,采用荧光磁粉获得的磁痕图像与背景对比率可达到 300:1^[10],大大提高了裂纹的识别率。纳米 Fe_3O_4 磁流体的研究则对于未来磁粉检测的新型材料应用奠定了基础^[11]。

2.2 渗透检测技术

渗透检测技术起源于上世纪初,通过液体的毛细现象检测表面开口型裂纹。用于检测的液体称为渗透液,常见的有两种,其一是含有荧光物质,另外一种带有着色能力,对应的检测方法分别称为荧光法和着色法。渗透液均匀涂于检测件表面后会通过毛细作用渗入开口型裂纹的深处,清洗去除多余的渗透液,并在工件上涂上色差较大的显示液,处于裂缝深处的渗透液会通过毛细作用再次被吸附至工件表面。荧光法需要在弱光处紫外灯下显像,着色法则直接显像,所得图像即为表面裂纹的分布情况。一般情况下,荧光法的检测灵敏度更高,常用于设备关键部件、存在应力集中和疲劳裂纹的场合。

渗透检测有诸多优势和磁粉检测方法相近,如应用广泛,检测成本较低,裂纹显示直观,检测的灵敏度也较高。检测还不受检测件材料的约束,不仅能用于各种金属材料的表面裂纹检测,也适用于陶瓷等非金属材料^[12]。但是,由于渗透剂具有刺激性,长期接触易引起皮肤和呼吸系统的损伤,荧光渗透剂显像过程中所用的紫外线也容易对眼睛造成伤害^[13]。渗透液对检测环境的温度比较敏感,以 10 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$ 环境中使用效果为佳^[14]。检测过程中需掌握好渗透以及显像的时间,过短可能未渗透完

全, 过长则易导致显像模糊。渗透检测对工件表面状况要求较高^[15], 不适用于表面粗糙度较大或多孔性材料的检测。检测前通常需对工件清洗、研磨等预处理。对于裂纹宽度小于 1 μm 的腐蚀裂纹或应力裂纹, 由于裂纹形成初期开口过小, 渗透剂渗入困难, 难以进行有效地检测^[16], 常需借助其他无损检测方法。

未来渗透检测的发展方向将以荧光法为主, 特别是在压力容器的裂纹检测上应用将更加普及。喷罐式检测剂的推广使用让渗透检测变得方便快捷, 提高了检测效率和作业环境适应能力。新型检测剂的研制也会向更加绿色环保、可重复使用方向发展。

3 新型 NDT 技术研究现状

近年来, 随着裂纹检测技术的不断进步和检测需求的改变, 萌生了很多基于以往无损检测技术发展起来的新型裂纹检测以及裂纹识别技术。

3.1 激光超声检测技术

以激光作为超声源的激光超声技术在近几年研究和迅速发展^[17-18], 已被运用到裂纹无损检测中。激光超声的激发机制有热弹效应、热蚀效应两种^[19]。前者激光能量较低, 金属表面温度升高产生热应力波, 即超声波。后者高能激光能将材料表层原子瞬间气化等离子体, 释放过程中对试件的反作用力激发超声波。热蚀效应激发的超声波强度较大, 能获得更高的信噪比, 常用于试件内部裂纹的检测。相比传统的 UT 探伤技术, 激光超声检测裂纹优势诸多, 可非接触式检测, 无需耦合剂, 无污染, 对材料表面要求较低, 并且具有较高的超声激励效率。激光超声可运用于大面积构件的快速检测, 甚至可实现对工作状态下运动构件的在线检测。

国内外对于激光超声的激发以及信号接收已有大量研究。在激发原理上, 倪辰荫^[20]提出了扫描激光源技术 (scanning laser source, SLS), 可有效检测与超声波传播方向相对平行的表面裂纹, 而不再受超声波波长限制; 为解决激光超声信号接收灵敏度较低的问题, 付华等^[21]设计了一种基于光偏转法的光差分激光超声检测系统, 将超声在样品表面的扰动信息转化成光信号, 并经过差分、放大, 可有效提高激光超声检测信号接收的灵敏度; 毛赢等^[22]则提出了一种利用激光作为超声激发源, 电磁探头接收信号的激光电磁超声检测系统, 结合激光超声的高激励效率和 EMAT 的高接收能力两者优点, 该系统成功检测出了样品的内部裂纹, 具有较好的实用价值; 在信号处理上, 张超等人^[23]提取了裂纹处超声波入射与反射干涉能量特征, 根据声学互易原理完

成了整个波场的可视化, 借助时间和空间域上的傅里叶变换分离出入射波和反射波能量, 完成了裂纹的定位和成像; 国外的 MASTER Z M 等人^[24]同样采用了提取裂纹处超声散射信号的算法, 对裂纹进行定量分析, 与提取干涉信号可谓异曲同工。

由于激光设备系统复杂, 价格高昂, 并且检测灵敏度有待提高, 在实际裂纹检测中激光超声检测尚未广泛应用。但由于其具有远距离非接触式的特点, 未来在特殊领域, 特别是高温高压环境、核电领域、腐蚀性环境中的应用将更加普遍。

扫描激光源技术检测裂纹示意图如图 1 所示。

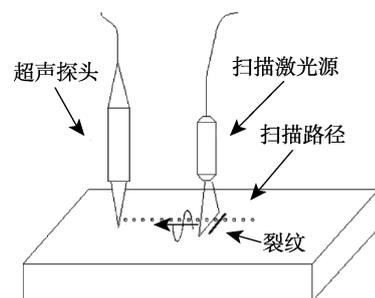


图 1 扫描激光源技术检测裂纹示意图

3.2 电磁超声检测技术

电磁超声检测 (electromagnetic acoustic, EMA) 是指在金属材料表面施加变化的电磁场, 产生的洛伦兹力以及材料自身的磁致伸缩效应激发出应力波, 从而产生超声波的一种无损检测技术。该技术与激光超声有诸多共同优点, 不需要耦合剂, 可非接触式, 并能在较为极端的环境温度下进行快速检测^[25-26]。但是电磁超声的核心部件—电磁超声换能器 (electromagnetic ultrasonic transducer, EMAT) 存在换能效率低下的问题, 比普通的压电式换能器低 20 dB~40 dB, 所以回波信号的信噪比较低, 过高的发射功率又容易使换能器线圈发热。

近年来, 国内外学者在 EMA 检测技术方面的研究主要旨在提高 EMAT 的换能效率, 以及改进回波信号的提取和后处理方法。在 EMAT 的设计上, 王帅等^[27]在换能器线圈上采用了扁平铜线, 并用振荡电路进行激励, 有效降低了 EMAT 在工作时的发热量; 翟国富等^[28]针对螺旋线圈 EMAT 建立了电磁场的解析模型, 通过分析洛伦兹力分布规律得出了永磁体直径为线圈直径 1.5~2 倍, 厚度与直径相等的设计原则; 国外的 MACLAUCHLAN D 等^[29]设计了 32 通道的相控阵 EMAT, 大大提高了超声的指向性, 能够更好地识别微小裂纹。在 EMA 检测接收信号的处理方面, 为了提高信噪比, 国内外学者提出了不少分析算法, 比如递归分

析法,小波变化,自适应降噪,相敏检波算法等。也有学者通过电路设计上的 FPGA 技术进行降噪,有效地提高了回波信号的信噪比。

目前,相控阵技术、谐振技术、聚焦技术等的应用已经使 EMAT 功能逐步完善。EMA 检测在国内已经有一定的应用,特别是高温管道的检测,铁轨裂纹检测方面有一定的普及^[30]。国内关于 EMA 检测的理论研究已接近国际水平,但在工业领域的推广应用仍有一段路要走。

电磁超声裂纹检测系统图如图 2 所示。

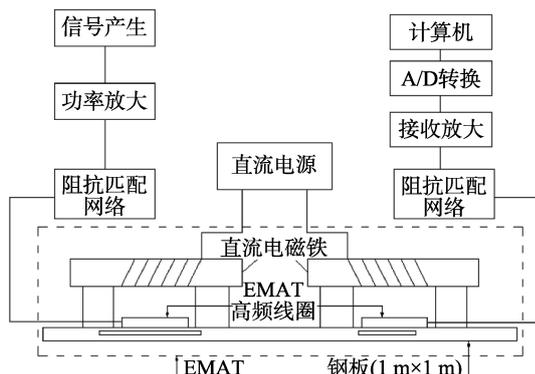


图 2 电磁超声裂纹检测系统图

3.3 超声红外热成像检测技术

超声红外热成像检测技术是一种近年来出现的新型裂纹检测方法,它是利用超声脉冲作用于试件,试件内部的缺陷在热弹效应、滞后效应或者裂纹表面相互摩擦过程中会产生热能^[31],使缺陷处产生局部温升,然后通过红外热像仪获得材料表面热图像,进行计算机分析和处理,从而获取有效的裂纹信息。由于超声可在试件内部传播较远的距离,并且红外成像设备可大面积地摄取热图像,该检测技术可大范围快速检测缺陷和裂纹。超声在试件内只对缺陷部位加热,故该检测技术灵敏度较高,特别是对于金属以及陶瓷材料的表面型裂纹检测非常有效^[32]。

国内外的研究目前还主要停留在理论研究和实验室试验阶段,更多的侧重于数学模型的推导以及检测可行性的验证,在工程应用方面的研究相对欠缺,特别是在一些新型材料和特殊环境下的应用研究相对较少。在数学模型的建立方面,缪鹏程等人^[33]对超声激励下的缺陷发热过程建立了数学模型,并进行了有限元仿真,仿真结果与实验室试验符合,并且得出了高能的超声脉冲不会助长缺陷本身的扩展;英国的 MORBIDINI M 等^[34]研究了裂纹的形态与其振动阻尼的关系,并推导了温升和能量衰减的相关公式;陈大鹏等人^[35]同时对 T 型接头的碳纤维板、存在内部裂纹的有机玻璃和激光焊接的

钢板进行了试验,验证了超声红外热成像检测在多种材料检测中均有较高的灵敏度;在热图像的处理方法上,冯辅周等人^[36]提出了采用基于控制标识符的分水岭分割和骨架描述法实现超声红外热像技术中裂纹信息的识别与重构,最后得到了与裂纹实际分布形状高度吻合的计算机重构图像。

随着热像仪性能的逐渐完善,未来一段时间内,超声红外热成像检测技术主要发展将更侧重于超声激励能耗的降低,脉冲频率的调制以及热图像的后处理算法的改进及裂纹的自动识别。

超声红外热成像裂纹检测系统图如图 3 所示。

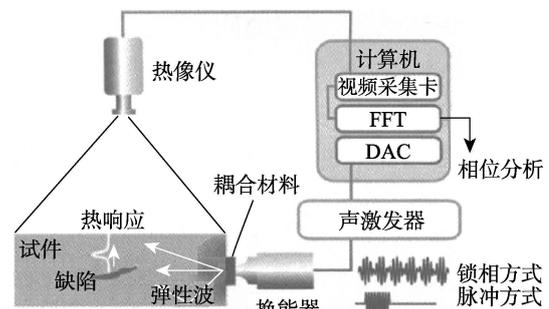


图 3 超声红外热成像裂纹检测系统图

3.4 脉冲涡流及涡流阵列检测技术

涡流检测技术主要原理是处于变化磁场中的金属材料内部会激发出电涡流,涡流在内部阻抗作用下出现损耗并形成反磁通,与原激发线圈的磁场耦合形成反馈。当检测过程中遇到裂纹,检测件表面的反磁通会明显产生变化。通过分析回路中谐振频率及幅频特性信息即可获得裂纹的相关信息。涡流检测可有效地用于多层金属结构内部裂纹的检测。

按信号频率特征来分,以往的涡流检测技术主要以单频和多频为主。近年来出现的脉冲涡流检测技术 (pulsed eddy current, PEC) 的激励信号以宽带方波脉冲的型式作用于激发线圈,线圈的脉冲磁场迅速衰变,检测件上感应的瞬态电涡流也能更快地反馈至回路中。宽带脉冲式的激励信号不仅提高了整个检测系统的响应速度,同时能给检测系统提供更丰富的反馈信息,便于裂纹的量化计算。脉冲涡流检测系统的成本远低于多频涡流检测设备,而且具有更深的穿透能力,利于检测深埋型裂纹。

国内外学者对于脉冲涡流信号的分析 and 提取研究较为广泛,普遍采用提取时域特征对缺陷定量。比如盛永生^[37]在对脉冲涡流检测裂纹时的反馈信号便采用了时域分析,提取反馈信号峰值时间点的信息,完成了裂纹的识别和定位;脉冲涡流信号的频域信息同样丰富,

若能结合时域和频域的信息特征,对裂纹能更好地定量分析^[38],在检测仪器的研制上,美国的爱荷华州立科技大学(Iowa State University)对脉冲涡流检测技术的研究较早,早在 21 世纪初就为美国空军研制了检测飞机内部腐蚀等缺陷的脉冲涡流检测设备^[39],并有相关专利;国内的爱德森电子有限公司在多频、多通道的涡流检测仪有系列成熟的产品。在脉冲涡流检测设备方面的研发国内仍相对空缺。

对于表面积较大、形状相对复杂的构件,单探头涡流检测效率低下的弊端愈加明显,从多探头、多通道技术发展而来的涡流阵列(eddy current array, ECA)检测技术应运而生。

涡流阵列检测技术是把一系列涡流探头按一定的形式逐个布置于特定的平面或者空间曲面,构成一个阵列。工作时,各个探头按特定的时间顺序进行切换,同时将各自的信号传输至处理系统进行计算分析。阵列式涡流传感器完成单次扫描的过程大大缩短了检测的时间,其单次扫描的过程同等于以往单个探头进行往返步进扫描的过程。探头的布置方式灵活多变,可快速检测外形轮廓较复杂的零部件,大幅提高检测效率。近几年涡流阵列检测技术无论在传感器的设计或者信号的后处理算法的研究上均得到了进一步的发展。丁华等人^[40]在建立有限元模型的基础上具体分析了涡流阵列探头在检测裂纹时输出信号特征;焦胜博等人^[41]则设计出一种可用于柔性平面检测的涡流阵列传感器,并且能用于实时在线监测;罗飞路等人^[42]针对涡流阵列多激励场的理论计算问题推导了传感器的磁场分布,得到了阵列传感器的阻抗变化解析式,提出了阵列传感器线圈单元近似互感的计算式。

单探头和阵列式探头扫查过程示意图如图 4 所示。

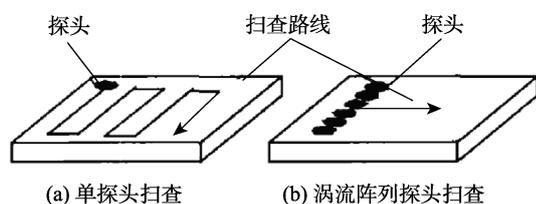


图 4 单探头和阵列式探头扫查过程示意图

基于传统涡流检测技术发展而来的脉冲涡流、涡流阵列等新技术不仅增加了涡流的检测深度,也提高了大面积检测时的速度,相信在不久的将来,航天航空、高铁等领域会有更广泛的应用。

4 裂纹 NDT 技术发展趋势分析

随着计算机技术、电子信息技术的进步,现代的裂

纹检测技术以无损检测为主,并逐渐由人工向智能化、自动化的检测发展。由近年来新兴的无损检测技术可以看到,多模式复合检测在工程应用中越来越广泛,正由单一模式向复合方式发展,比如激光-超声复合,电磁-超声复合,声-红外复合等。检测设备的研究以降低能耗和提高信噪比为主,介质材料的可重复使用以及绿色环保是未来发展的一个重要趋势。在一些高温高压环境、核电领域、航空航天领域等特殊环境的裂纹检测将更加专业化,新型裂纹检测技术将得到更广泛的实际应用。此外,随着高清摄像及图像采集设备的迅速更新换代,未来裂纹无损检测的图像化亦将是一个重要趋势。

5 结束语

针对机械装备裂纹检测问题,本文详细综述了近年来裂纹无损检测技术的发展现状,对常用的磁粉检测、渗透检测的优缺点进行了比较分析,对新型的激光超声检测、电磁超声检测、超声红外热成像检测、脉冲涡流及涡流阵列检测的技术特点、研究现状进行了详细的论述,并对工程实际应用情况进行了说明,对未来发展方向进行了总结分析。分析结果表明:未来裂纹无损检测技术将以智能化、全自动化、复合模式化、图像化检测为主要发展方向,检测仪器设备及介质材料的研究以降低能耗、提高信噪比为主,新型裂纹无损检测技术在特殊领域的工程应用将更加细化,更好地发挥新技术的优势。

参考文献(Reference):

- [1] 殷玉枫, 曾光, 徐格宁, 等. 起重机箱型梁疲劳裂纹与寿命预估[N]. 中国工程机械学报, 2010, 8(3): 274-278.
- [2] 中国机械工程学会无损检测学会. 磁粉探伤[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [3] CARTER D, GONZALES K. Nondestructive inspection methods for railroad castings[J]. 2010 Joint Rail Conference, 2010(2): 191-201.
- [4] 郑国恒, 杨洁, 李秀红, 等. 充电式智能磁粉探伤机的研制[J]. 无损检测, 2007, 29(1): 9-11.
- [5] 厉荣宣, 沈希忠. 图像处理技术的荧光磁粉探伤法[J]. 上海应用技术学院学报: 自然科学版, 2014, 14(4): 323-327.
- [6] 王家英, 关钰, 黄芳, 等. 数字图像处理技术在自动磁粉探伤系统中的应用[J]. 无损检测, 2001, 23(5): 209-212.
- [7] 陆宝春, 李建文, 王婧, 等. 基于特征差异性的荧光磁粉探伤图像分割算法[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(6): 797-800.
- [8] BAKUNOV A S, KOROLEV A Y, KUDRYAVTSRV D A, et al. A set of magnetic fluorescent-penetrant inspection[J].

- Russian Journal of Nondestructive Testing**, 2005, 41(3): 170-174.
- [9] GUNATILAKE P, TSUYAMA O, TOSHIMITSU T, et al. Automatic magnetic particle testing system for square billets[J]. **Industry Applications Conference**, 1995(2): 1558-1590.
- [10] 陆宝春, 李建文, 陈吉明, 等. 荧光磁粉探伤自动缺陷识别方法研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2010, 34(6): 803-808.
- [11] 洪 勇, 史红兵, 张俊斌, 等. 纳米 Fe_3O_4 磁流体应用于磁粉无损检测的探讨[J]. 化学工程与装备, 2015(8): 223-225.
- [12] 陈翠丽. 轴承用陶瓷球荧光渗透检测[J]. 无损检测, 2014, 36(11): 59-61.
- [13] 富 阳. 有限空间内渗透检测对人员的危害及防护[J]. 无损检测, 2010, 32(2): 138-139, 142.
- [14] 季龙华, 许遵言, 相海清. 低温下不同渗透材料渗透灵敏度对比[J]. 无损检测, 2014, 36(10): 19-21.
- [15] 杨 波, 胡学知, 龚 固, 等. 工件表面状态对渗透检测的影响及对策[J]. 无损检测, 2016, 38(8): 55-59.
- [16] 王 玲. 航空发动机零件渗透检测的局限性[J]. 无损检测, 2015, 37(5): 78-80.
- [17] 陈清明, 蔡 虎, 陈祖海. 激光超声技术及其在无损检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 53-57.
- [18] 施德恒, 陈玉科, 孙金峰, 等. 激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J]. 激光杂志, 2004, 25(5): 1-4.
- [19] 杨依光, 赵 峰, 王 飞, 等. 管道壁厚及焊缝缺陷激光超声检测技术[J]. 油气储运, 2015, 34(7): 751-754.
- [20] 倪辰荫. 扫描激光源法激发声表面波用于金属表面裂纹检测的研究[D]. 南京:南京理工大学信息物理与工程系, 2005.
- [21] 付 华, 池继辉. 基于激光超声表面波的模具微裂纹无损检测的研究[J]. 光电子技术, 2010, 30(1): 29-32.
- [22] 毛 赢, 翡翠祥. 基于激光电磁超声的裂纹检测研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(10): 1337-1340, 1368.
- [23] 张 超, 季宏丽, 裘进浩, 等. 激光超声检测中干涉特征提取算法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 1-9.
- [24] MASTER Z M, MICHAELS T E, MICHAELS J E. Incident wave removal for defect enhancement in acoustic wave field imaging[J]. **Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation**, 2007, 894(1): 665-672.
- [25] 高会栋. 电磁超声技术在焊缝检测中的应用[J]. 无损检测, 2010, 32(11): 850-856.
- [26] 苏日亮, 康 磊, 冯剑钊, 等. 基于电磁超声斜入射 SV 波的厚壁管道裂纹检测系统[J]. 无损检测, 2010, 32(8): 641-644.
- [27] 王 帅, 陈 鹏, 刘美全. 电磁超声连续脉冲激发方式探讨[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(1): 14-16.
- [28] 翟国富, 汪开灿, 王亚坤, 等. 螺旋线圈电磁超声换能器解析模型与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 147-154.
- [29] MACLAUHLAD D, CLARK S, COX B. Recent advancements in the application of EMATs to NDE[R]. Lynchburg: BWXT Services, Non Destructive Evaluation and Inspection Systems, 2004.
- [30] 陈 鹏, 韩德来, 蔡强富, 等. 电磁超声检测技术的研究进展[J]. 理论与方法, 2012, 31(10): 18-21, 25.
- [31] 江 涛, 杨小林, 阚继广. 超声红外热成像无损评估技术[J]. 无损检测, 2009, 31(11): 884-886.
- [32] 张淑仪. 超声红外热像技术及其在无损评价中的应用[J]. 应用声学, 2004, 23(5): 1-6.
- [33] 缪鹏程, 米小兵, 张淑仪, 等. 超声红外热成像检测中缺陷发热的瞬态温度场的有限元分析[J]. 南京大学学报, 2005, 41(1): 98-104.
- [34] MORBIDINI M, CAWLEY P. The detectability of cracks using sonic IR[J]. **Journal of Applied Physics**, 2009, 105(9): 159.
- [35] 陈大鹏, 张存林, 李晓丽, 等. 超声红外热成像技术在无损检测领域中的应用[J]. 激光与红外, 2008, 38(8): 778-780.
- [36] 冯辅周, 张超省, 袁 建, 等. 超声红外热成像技术中裂纹的识别和重构[J]. 无损检测, 2011, 33(11): 17-20.
- [37] 盛永生. 脉冲涡流裂纹检测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 2011.
- [38] 高军哲, 潘孟春, 罗飞路, 等. 脉冲涡流检测的谱分析方法与缺陷分类识别[J]. 中国机电工程学报, 2011, 31(28): 154-160.
- [39] MOULDER J C, BIEBER J A. Pulsed eddy current measurements of corrosion and cracking in aging aircraft[J]. **MRS Online Proceedings Library**, 1997, 503(1): 263.
- [40] 杜金强, 何宇廷, 丁 华. 基于涡流阵列的裂纹检测仿真分析[J]. 无损检测, 2011, 33(7): 21-24.
- [41] 焦胜博, 丁 华, 何宇廷, 等. 基于涡流阵列传感器的金属结构裂纹监测方案可行性研究[J]. 传感器与位系统, 2013, 32(8): 43-46, 49.
- [42] 刘 波, 罗飞路, 何赞泽, 等. 多激励涡流阵列探头阻抗分析[N]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 122-126.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

周志新. 机械裂纹无损检测方法综述[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1138-1143.

ZHOU Zhi-xin. Overview of NDT methods for mechanical cracks[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1138-1143.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>