

金属材料点蚀缺陷的无损检测方法综述

张 博¹, 张宝俊¹, 张 登², 郑 贇³

(1.中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016; 2. 中国特种飞行器研究所结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北荆门 448035; 3. 德国弗劳恩霍夫协会无损检测研究所, 萨尔布吕肯, 萨 尔州 66123)

摘 要:点蚀缺陷会直接影响金属材料的使用性能与服役寿命, 对其进行有效的无损检测与评估为预测疲劳寿命提供数据支撑具有重要意义。通过阐述点蚀缺陷的特点, 指出了点蚀缺陷参数与疲劳性能之间的对应关系。通过介绍以漏磁、脉冲涡流和超声导波为主的点蚀缺陷无损检测基本原理, 总结了这些方法用于点蚀缺陷无损检测的现状, 对比分析了多种无损检测方法从理论模型、信号分析到工业应用的关键环节。通过分析点蚀缺陷检测时不同无损检测方法在信号处理方面的特殊性, 指出了点蚀缺陷的可视化成像结合图像处理与信号分析是准确提取点蚀缺陷信息和定量化分析的关键基础问题, 积极开展非接触式点蚀无损检测方法研究对提升检测精度与工业应用推广具有重要意义。

关键词:金属材料其他学科; 金属材料; 点蚀; 无损检测; 评估

中图分类号: TH878 文献标志码: A

Research process of nondestructive testing pitting corrosion in metal material

ZHANG Bo¹, ZHANG Baojun¹, ZHANG Deng², ZHENG Yun³

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen, Hubei 448035, China; 3. Fraunhofer IZFP, Saarbrücken, Saarland 66123, Germany)

Abstract: Pitting corrosion directly affects the usability and service life of metal material, so the effective nondestructive testing and evaluation on pitting corrosion is of great significance for fatigue life prediction because of data supporting. The features of pitting corrosion are elaborated, and the relation between the pitting corrosion parameters and fatigue performance is pointed out. Through introducing the fundamental principles of pitting corrosion including mainly magnetic flux leakage inspection, pulsed eddy current and guided waves, the research status of nondestructive testing technology for pitting corrosion is summarized, and the key steps of nondestructive testing technologies are compared and analyzed from the theoretical model, signal processing to industrial applications. Based on the analysis of the signal processing specificity of different nondestructive

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-06-10; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金(51605468); 中国科学院金属研究所创新基金(2015-PY07)

第一作者简介: 张 博(1984—), 男, 辽宁抚顺人, 助理研究员, 博士, 主要从事材料无损检测与评估方面的研究。

E-mail: zb@imr.ac.cn

张 博, 张宝俊, 张 登, 等. 金属材料点蚀缺陷的无损检测方法综述[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(6): 507-514.

ZHANG Bo, ZHANG Baojun, ZHANG Deng, et al. Research process of nondestructive testing pitting corrosion in metal material[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(6): 507-514.

testing technologies in detecting pitting corrosion, the visualization combined with image processing and signal analysis are indicated as the critical problems of accurate extraction of pitting defect information and quantitative characterization for pitting corrosion. The study on non-contact nondestructive testing technologies is important for improving the detection precision and its application in industries.

Keywords: other subjects of metal material; metal material; pitting corrosion; nondestructive testing; evaluation

金属材料结构受到介质的作用而发生状态改变形成新相从而产生腐蚀损伤,而腐蚀损伤对国民经济和国防建设的危害十分严重,不仅会导致生产停顿、材料结构失效、资源损耗、有害物质泄漏等,而且可能导致重大经济损失甚至灾难性后果。据统计,全世界每年因腐蚀而报废的金属量相当于金属年产量的20%~40%,发达国家年均解决腐蚀损伤的费用占国民经济的2%~4%,而且成逐年增加的趋势^[1]。世界各国每年都要投入大量人力和物力进行腐蚀检测与防护,腐蚀检测已成为现代科学技术研究的重要领域之一,及时准确地发现腐蚀损伤并评估其损伤程度对于金属材料结构的安全性及经济性具有重要意义^[2-3]。

1 点蚀损伤的特点

点蚀作为腐蚀损伤的初始阶段,是由于金属表面在拉应力或化学物质作用下,因保护层遭到破坏并出现局部穿透,使金属基体直接暴露在腐蚀环境中形成局部腐蚀小孔并向纵深发展的一种腐蚀破坏形式^[4]。点蚀的发生与扩展可以分为2个阶段,即点蚀成核与生长。关于点蚀成核的原因有2种说法^[5]:一是当金属表面上氧的吸附点被氯离子所取代时就发生了点蚀;二是由于氯离子半径小,可穿过钝化膜进入膜内,产生的导电感应离子造成了膜在特定点上维持较高的电流密度,使阳离子随机运动,当膜-溶液界面的电场达到某一临界值时,就发生点蚀。点蚀核形成之后会继续生长,至临界尺寸时,便出现宏观蚀坑。对于蚀坑扩展机理有很多学说,比较公认的一种学说认为是蚀坑内发生的自催化闭塞电池作用过程^[6]。

点蚀的发生部位具有较强的随机性,通常在点蚀发生区域易形成疲劳源^[7-8]。点蚀在结构表面形成腐蚀坑改变了结构的表面状态,进而导致了局部或全面的损伤,这取决于点蚀坑深度、应力水平和材料疲劳裂纹等因素的综合影响^[9]。点蚀-疲劳交互作用时,一般把点蚀当作表面裂纹由点蚀动力学控制裂纹增长速率建立模型,当点蚀增长到临界尺寸(应力强度因子达到疲劳裂纹的门槛值),或者是疲劳裂纹增长速率超过点蚀增长速率时,在点蚀坑处萌生疲劳裂纹。疲劳裂纹在点蚀坑处成核,继而经过点蚀增长、点蚀向疲劳裂纹形成的过渡阶段、短裂纹扩展、长裂纹扩展直至金属结构的破坏。PAO等^[10]对点蚀坑处成核的裂纹起始阶段进行了研究,通过扫描电镜进行疲劳断口观测以分析裂纹成核过程。SANKARAN等^[11]提出点蚀坑平均深度是评价铝合金结构寿命的重要标准之一,并对不同腐蚀坑形貌对寿命影响的不同进行了对比分析。JONES等^[12]对两种不同厚度的铝合金试验件进行了试验研究,根据从蚀坑到裂纹的转变过程提出了蚀坑表面积、邻近蚀坑、蚀坑深度是决定裂纹从何处、何时形成的重要因素。ROKHLIN等^[13]对不同深度的点蚀坑处的裂纹成核及扩展进行了分析,对点蚀坑等效为三维表面裂纹的可行性进行了试验验证。DOLLEY等^[14]通过预腐蚀试验形成不同的点蚀坑后进行疲劳试验,研究了不同腐蚀程度的点蚀对寿命的影响,获得了结构疲劳寿命的概率分布与蚀坑尺寸的概率分布具有较强的相关性的结果。

2 点蚀缺陷的无损检测方法研究现状

点蚀缺陷与金属结构寿命紧密相连,及时准确发现点蚀部位与可靠评估金属结构寿命对保障装置安全运行具有至关重要的作用。点蚀作为腐蚀缺陷的一种,常用的无损检测方法包括:漏磁、脉冲涡流以及超声导波无损检测。

2.1 点蚀缺陷的漏磁无损检测研究现状

漏磁无损检测方法的原理是对铁磁性材料施加磁场进行磁化处理,如果被磁化的铁磁材料存在缺陷,会引起缺陷区域及其附近区域的磁导率降低而磁阻增加,通过磁敏检测元件测量磁通溢出到工件表面形成漏磁场的大小,建立漏磁场和缺陷之间的量化关系以实现缺陷检测。漏磁无损检测的3个主要研究方向分别是漏磁检测理论分析、漏磁检测仪器研制和漏磁检测信号处理。

1)漏磁检测理论分析

ATHERTON^[15-16]利用二维有限元分析方法研究了管道压力对磁导率的影响,通过对漏磁场分布的分析建立了漏磁信号与裂纹集合参数之间的对应关系。李路明等^[17-18]通过理论仿真和实验验证分析了输油管壁的点蚀缺陷的差异,研究结果表明仿真计算得出的径向磁通密度异常峰值与实验获得的真实测量值具有较强的线性相关性。李路明等^[19]还研究了铁铸件缺陷的漏磁探伤方法,采用有限元法分析了磁体几何尺寸对磁化效果的影响以及解释了漏磁检测中各种参量之间的关系。戴光等^[20]建立了不同尺寸的管道腐蚀有限元模型,通过分析漏磁场叠加的影响获得了漏磁场参数随缺陷尺寸变化的规律,研制了扫描范围为 $55\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times (4\sim 12.5)\text{ mm}$ 的三磁化单元管道外检测仪,通过检测实验对不同位置、尺寸的腐蚀缺陷和内外壁缺陷的检测效果进行了验证。

2)漏磁检测仪器研制

英国 Silverwing 公司研制适用于管道内腐蚀检测的 Pipescan 管道腐蚀漏磁检测系统,该系统采用3种形式的扫面探头,检测厚度的范围为 $6\sim 15\text{ mm}$,检测直径为 $2.4\sim 48\text{ mm}$ ^[21]。加拿大 BJ 管道公司将三维漏磁传感器技术应用于管道腐蚀检测中,检测缺陷最小误差可达 $6\sim 7\text{ mm}$,缺陷深度检测精度 $\pm 10\%$ 的置信水平高于 80% ^[22]。厦门爱德森公司研制的 MFL-4000 漏磁检测系统具有8个检测通道,检测厚度范围 $6\sim 12\text{ mm}$,可覆盖管径 $45\sim 60\text{ mm}$,对于 6 mm 壁厚的工件最大检测精度为壁厚 20% 的腐蚀坑^[23]。杨理践等^[24-26]针对高精度管道漏磁检测研发了 $\Phi 720\text{ mm}$ 长输管道内检测仪器,并成功进行了 120 km 的工业性试验。

3)漏磁检测信号处理

赵乃卓等^[27]利用脉冲漏磁技术对输油管道进行腐蚀检测,由于利用脉冲激励所产生多种频率的信号提高了对管道深层缺陷的检测能力。李詠^[28]将管道漏磁检测的健康数据、缺陷数据和非缺陷数据整合,考虑到每个传感器采集数据的相关性,采用一阶差分预处理方法对数据进行了前值处理,提出基于漏磁检测数据重要性的动态范围阈值判断方法,以将健康数据和缺陷数据分离,并实现漏磁检测数据的分类压缩。张国光^[29]基于漏磁信号特征提出了缺陷定量化方法,分析了横向缺陷尺寸、走向和极靴距离与信号的对应关系。

2.2 点蚀缺陷的脉冲涡流无损检测研究现状

常规涡流无损检测技术以单一频率的正弦信号作为激励,通过分析感应信号的幅值和相位等稳态信息以实现缺陷检测,但无法进行定量分析。与常规涡流无损检测技术相比,脉冲涡流无损检测技术由于脉冲宽频谱包含了丰富的结构信息,仅需要一次性扫描就可以检测出表面、近表面缺陷并包含缺陷深度,通过对瞬态时域信号进行分析,可以进一步对金属结构及缺陷进行定量评价。脉冲涡流检测技术的发展趋势主要体现在2个方面,即脉冲涡流的理论依据和检测模型与脉冲涡流检测信号特征提取技术。

1)脉冲涡流的理论依据和检测模型

美国 Iowa State University 无损评估中心利用脉冲涡流技术实现了对飞机多层结构缺陷的定量检测,研究表明峰值与腐蚀程度有关,过零时间与缺陷深度信息密切相关^[30-31]。加拿大国防部飞行器研究中心认为当腐蚀量不变时脉冲涡流感应信号强度与提离无关,基于此现象提出了提离交叉点的方法以消除提离效应对检测结果的影响,同时即使在有提离存在的情况下,有研究人员对机身结构中出现的腐蚀缺陷进行了成像检测^[32-33]。英国 QinetiQ 公司和澳大利亚航空与航海研究实验室-AMRL 研制了针对飞机机身复杂结构进行检测的脉冲涡流检测系统 TRECSCAN,与线圈传感器相比,采用霍尔传感器直接测量磁场提高了涡流的渗透深度和磁场空间分辨率,对缺陷信号采用时间分割方法以获取特征幅值,通过单通道 C 扫描实现了对多层金属结构中出现的腐蚀和裂纹缺陷进行定量分析^[34]。美国通用电气公司研究与发展中心分析了激励参数对脉冲涡流成像结果的影响,研究表明,对于特定的脉冲涡流探头,通过优化设计激励脉冲的形状可以得到理想的检测结果^[35]。

2)脉冲涡流检测信号特征提取技术

周德强等^[36-38]采用磁传感器对多层导电结构材料进行了试验分析,通过主成分分析法提取信号特征量以实现表面、近表面的缺陷的分类识别,结果表明该分类算法优于传统的峰值、峰值时间以及过零时间的特征分类。杨宾峰等^[39-40]对脉冲涡流检测信号进行 FFT 变换后比较了频谱与参考信号的分离点,以实现不同深度裂纹的分类,提高了缺陷分类识别的准确率,并用实验验证了所采用方法的正确性。高军哲等^[41-42]结合脉冲涡流检测信号的频谱特点,提出基于谱相对变化量以实现不同类型缺陷的分类。

2.3 点蚀缺陷的超声导波无损检测研究现状

超声导波在金属材料内部传播过程中遇到损伤或缺陷时与其发生相互作用,发生反射和透射现象以及产生新的导波模态,可对由传感器采集的导波信号进行有效分析与特征提取,结合有效的缺陷辨识方法以实现金属材料损伤缺陷程度的评估。与常规超声波技术相比,超声导波的优势在于传播距离远及声场遍布整个金属材料结构内部。由于超声导波的声场遍及整个金属材料内部,接收到的超声导波信号不仅包含了有关激励和接收两点间结构整体性的信息,而且意味着可以检测构件的内部缺陷与表面缺陷。针对点蚀缺陷检测,超声导波无损检测技术的研究方向集中在导波传播理论模型与数值分析和导波信号处理两个方面。

1) 导波传播理论模型与数值分析

LOWE 等^[43-44]通过实验分析了不同位置、不同长度缺陷信息与其反射系数的关系,研究了导波在周向刻槽缺陷管道中的模态转换以及长距离管道中的频散特性,并通过对导波信号进行 FFT 分析了导波模态,结果表明有限元分析结果与实验结果一致。CAWLEY 等^[45]利用有限元方法对不同直径的管道进行导波数值模拟分析,总结了 $L(0,2)$ 导波反射系数与缺陷轴向、周向和径向尺寸扩展的变化趋势规律。DEMMA 等^[46-47]研究了缺陷沿管道轴向扩展对 $L(0,2)$ 导波反射的影响, $L(0,2)$ 导波反射系数随缺陷轴向扩展而呈现类周期性半正弦趋势变化,其原因在于具有一定轴向长度的缺陷具有前、后两个导波反射截面,两截面反射的导波由于相位差异使得叠加后的导波幅值相比单一截面时增大或减小。NISHINO 等^[48-49]利用宽带激光超声系统在弯管中激发导波并利用小波分析研究了导波在弯管中的传播特性,发现 $L(0,1)$ 模态在弯管中传播时发生了模态转换,出现了 $F(1,1)$ 模态,而且 $V(1,1)$ 模态的幅度与管弯曲角度正相关。HAYASHI 等^[50]使用半解析有限元法模拟了导波在管中的传播过程,并生成专用应用软件以仿真各种模态导波在管中的传播特性。董为荣等^[51]对 $T(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态导波在管中的传播过程进行了有限元数值模拟,给出了缺陷回波反射系数与缺陷横截面积之间的关系曲线。何存富等^[52]利用 ANSYS 软件对弯管的缺陷损伤进行了数值模拟,数值模拟结果与实验检测结果基本相符,证明了弯管内的腐蚀缺陷检测可以用超声导波技术实现。邓菲等^[53-54]利用传感器环形阵列研究了管道导波检测中的位移圆周分布调制聚焦技术,实现了将检测能量聚焦于缺陷所在圆周的任一位置。孙钦蕾等^[55]研究了磁致伸缩导波技术对输气和输液钢管缺陷的无损检测能力,验证了磁致伸缩导波技术对输气和输液管道无损检测的可行性。

2) 导波信号处理分析技术

SIQUEIRA 等^[56]通过频率带通滤波器和小波分析来提高导波信号的信噪比。NUNEZ 等^[57]利用时间反转法研究了多模态的导波传播特性。邓菲^[58]在理论上证明了时间反转聚焦效应可用于管道导波缺陷的检测和定位,同时对含有裂纹及孔型小缺陷的管道进行了有限元数值模拟。HAYASHI 等^[59]将接收信号分解为单一模态的波形信号,利用时间反转技术对任意时间的管道表面上的空间波形图像进行重构,进而确定缺陷位置。DAVIES 等^[60-61]提出了管道超声导波快速聚焦方法,并对其进行了仿真和实验验证,极大提高了成像效率。HYEON 等^[62-63]对钢管进行了超声导波检测,通过对导波信号进行加窗 FFT 和时频局部化处理提高了回波信号的信噪比。CHO 等^[64]通过实验验证了混合边界元技术,利用局部扫频技术获得了更多的缺陷信息,并以此作为神经网络系统缺陷分类器的信息源,同时指出模态选择是决定管中 Lamb 波进行缺陷分类和定征成功与否的关键因素。

3 点蚀缺陷无损检测的特殊性

点蚀缺陷将引起金属材料产生应力集中,使裂纹很快从点蚀坑处萌生。点蚀与裂纹萌生不存在对应关系,点蚀只是增大发生疲劳断裂的概率。当金属材料表面出现大量点蚀缺陷时,从统计学观点看发生疲劳裂纹萌生的概率接近 1。与金属材料的其他类型缺陷相比(如裂纹、夹杂等),点蚀缺陷是一种典型的早期、微型缺陷,其隐蔽性强、萌生期长短不一、受环境影响大等特征造成了点蚀缺陷无损检测的难点在于早期点蚀缺陷损伤并不是集中分布的,其聚集度很难引起常规无损检测技术的特征响应。

由于点蚀缺陷与裂纹型突变性缺陷不同,其深度浅、形状复杂的特征会导致缺陷漏磁场十分微弱,因而传感器的输出信号将十分微弱,这对采集传感器的灵敏度提出了很高要求,此外,漏磁信号特征简单,对缺陷信号特征量进一步分析造成较大困难。此外,如果漏磁检测速度较快,磁力线密度减小会严重影响检测精度。利用脉冲涡流技术检测点蚀缺陷其本质特征是反映被测工件的磁导率、电阻率、壁厚和传感器提高等信

息,由于上述信息耦合在一起,从一维信号检测出相关信息的难度很大,因此,一方面要对信号进行预处理,抑制噪声以提高检测信号信噪比,另一方面要寻找特征量以实现信息分离。裂纹缺陷在某一截面损失量不大,点蚀缺陷与裂纹缺陷类似,由于点蚀缺陷变化缓慢难以造成金属材料在横截面积的损失,因此不会产生很强的超声导波反射信号。厚度减薄的点蚀区域表现出不对称性,使得入射声波的散射可能在一定程度上附加到反射波中,同时,发生一定的模态转换导致多模态导波相互干扰,影响了检测结果的准确性。

4 研究展望

以漏磁、脉冲涡流和超声导波技术为主的点蚀缺陷无损检测方法,从理论模型构建与数值分析到实验验证与仪器研发都取得了重大成果,但是点蚀缺陷的量化分析是各个研究方法中都亟待解决的关键基础问题。通过可视化成像技术结合图像处理与信号分析为解决点蚀缺陷的量化分析提供了解决思路:基于无损检测方法将点蚀缺陷进行可视化成像,通过图像处理与信号分析提取检测图像的特征信息,实现量化表征点蚀缺陷。利用高阶谱分析、小波分析与盲源分离技术等现代信号处理方法准确分析与提取特征信号,利用超分辨率重建技术对特征信号进行2D或3D图像重构不仅是点蚀无损检测的重要研究方向,也是提升其他无损检测方法检测可靠性与准确性的必由之路。基于点蚀缺陷的特征信息,利用神经网络与深度学习等先进模式识别方法进行处理与分析对于预测点蚀缺陷的发生具有重要现实意义。此外,目前对点蚀缺陷的无损检测方法大多是接触式检测,耦合剂通常会影响到检测结果分析的准确性,积极开展非接触式的点蚀缺陷无损检测方法研究势在必行。虽然激光超声、电磁超声等典型非接触式无损检测方法已在金属材料缺陷检测中发挥了重要作用,但检测信号的灵敏度不高是制约非接触式无损检测方法应用于工业现场的重要因素,如何提高检测信号接收灵敏度是突破非接触式点蚀缺陷无损检测瓶颈的关键基础问题,通过数值解析或者仿真分析激光超声、电磁超声在金属材料内形成的复杂声场与多模态超声波是有针对性地构建非接触式接收系统以提高检测灵敏度的先决条件。

参考文献/References:

- [1] 张有宏. 飞机结构的腐蚀损伤及其对寿命的影响[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
ZHANG Youhong. Projected Area Approach for Pitting Corrosion Fatigue Life Prediction[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [2] 黄平申. 油田埋地管线腐蚀检测与防护技术分析[J]. 全面腐蚀控制, 2016, 30(6):31-33.
HUANG Pingshen. Corrosion detection and protection technology analysis of buried pipeline in oil field[J]. Total Corrosion Control, 2016, 30(6):31-33.
- [3] 何宏, 江秀汉, 李琳. 国内外管道腐蚀检测技术的现状与发展[J]. 油气储运, 2001, 20(4):7-10.
HE Hong, JIANG Xiuhuan, LI Lin. Present situation and development of pipeline corrosion inspection technology at home and abroad[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(4):7-10.
- [4] 李晓刚, 付冬梅, 董超芳, 等. 点蚀安全评定系统的研制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(5):285-288.
LI Xiaogang, FU Dongmei, DONG Chaofang, et al. Fitness for service software system for pitting defects[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(5):285-288.
- [5] 刘秀晨, 安成强. 金属腐蚀学[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- [6] 孙柞东. 军用飞机典型铝合金结构腐蚀损伤规律及加速腐蚀试验方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2005.
SUN Zuodong. Study on Corrosion Damage of the Typical Aluminum Alloy of Air Force Plane and the Test of Accelerate Corrosion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [7] 黄小光, 许金泉. 点蚀演化及腐蚀疲劳裂纹成核的能量原理[J]. 固体力学学报, 2013, 34(1):7-12.
HUANG Xiaoguang, XU Jinquan. Energy principle for pit evolution and corrosion fatigue crack nucleation[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34(1):7-12.
- [8] 李旭东, 孔光明, 穆志韬. 穿透型疲劳裂纹扩展与铝合金局部点蚀损伤特征参数的依存性分析[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(11):1049-1057.
LI Xudong, KONG Guangming, MU Zhitao. Dependent analysis of through out crack propagation on localized pitting corrosion parameters of aluminum alloy[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(11):1049-1057.
- [9] 穆志韬, 邢玮, 周立建. 基于神经网络与蒙特卡洛方法的疲劳寿命可靠性分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(1):55-60.
MU Zhitao, XING Wei, ZHOU Lijian. Fatigue life prediction and reliability analysis based on the neural network and Monte Carlo method[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2012, 27(1):55-60.

- [10] PAO P, GILL S, FENG C. On fatigue crack initiation from corrosion pits in 7075-T7351 aluminum alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(5):391-396.
- [11] SANKARAN K K, PEREZ R, JATA K V. Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: Modeling and experimental studies [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2001, 297(1/2):223-229.
- [12] JONES K, HOEPPNER D W. Prior corrosion and fatigue of 2024-T3 aluminum alloy [J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(10):3109-3122.
- [13] ROKHLIN S I, KIM J Y, NAGY H, et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 62(4/5):425-444.
- [14] DOLLEY E J, LEE B, WEI R. P. The effect of pitting corrosion on fatigue life [J]. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2000, 23:555-560.
- [15] ATHERTON D L. Finite element calculations and computer measurements of magnetic flux leakage patterns for pits [J]. *Ndt & E International*, 1997, 30(30):159-162.
- [16] ATHERTON D L. Magnetic inspection is key to ensuring safe pipelines [J]. *Ndt & E International*, 1997, 87(32):32-40.
- [17] 李路明, 郑鹏, 黄松岭, 等. 表面裂纹宽度对漏磁场 Y 分量的影响 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1999, 39(2):43-45.
LI Luming, ZHENG Peng, HUANG Songling, et al. Effects of surface crack width on Y component of magnetic flux leakage field [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(2):43-45.
- [18] 李路明, 杨海青, 黄松岭, 等. 便携式管道漏磁检测系统 [J]. *无损检测*, 2003, 25(4):181-183.
LI Luming, YANG Haiqing, HUANG Songling, et al. A portable magnetic flux leakage testing system for pipelines [J]. *Nondestructive Testing*, 2003, 25(4):181-183.
- [19] 李路明, 黄松岭, 李振星, 等. 铸铁件的漏磁检测方法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, 42(4):474-476.
LI Luming, HUANG Songling, LI Zhenxing, et al. Magnetic flux leakage testing methods for cast iron lids [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, 42(4):474-476.
- [20] 戴光, 李鹏, 李良, 等. 基于脉冲涡流检测的管道腐蚀仿真与实验研究 [J]. *化工设备与管道*, 2016, 53(2):63-66.
DAI Guang, LI Peng, LI Liang, et al. Simulation and experimental study of corrosion occurred in piping by using pulsed eddy inspection technology [J]. *Process Equipment & Piping*, 2016, 53(2):63-66.
- [21] 廖晓玲, 王飞, 赵丹, 等. 工业管道漏磁检测技术及发展现状综述 [J]. *价值工程*, 2016, 35(10):236-237.
LIAO Xiaoling, WANG Fei, ZHAO Dan, et al. Review on industrial pipeline magnetic flux leakage testing technique and its development situation [J]. *Value Engineering*, 2016, 35(10):236-237.
- [22] 曹丽娜. 管道漏磁检测数据分析专家系统的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
CAO Lina. Study on Expert System of Magnetic Flux Leakage Data Analysis of Pipeline [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [23] 雒新宇. 在用工业管道腐蚀的漏磁外检测技术研究 [D]. 保定: 河北大学, 2014.
LUO Xinyu. Studies of Magnetic Flux Leakage Testing Technology of Corrosion for In-Service Industrial Pipeline [D]. Baoding: Hebei University, 2014.
- [24] 杨理践, 刘斌, 高松巍. 弱磁场中漏磁检测技术的研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2011(1):89-92.
YANG Lijian, LIU Bin, GAO Songwei. Study on magnetic flux leakage testing in weak magnetic field [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011(1):89-92.
- [25] 杨理践, 史金阳, 高松巍. 管道缺陷漏磁信号分类与识别方法的研究 [J]. *通信市场*, 2009(11):162-167.
YANG Lijian, SHI Jinyang, GAO Songwei. Research on method of classification and recognition on signal of magnetic flux leakage in defect of pipeline [J]. *Telecom Market*, 2009(11):162-167.
- [26] 杨理践, 毕大伟, 高松巍. 油气管道漏磁检测的缺陷量化技术的研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2009, 17(8):1489-1491.
YANG Lijian, BI Dawei, GAO Songwei. Quantitative study for pipe defects on oil-gas pipe magnetic flux leakage inspection [J]. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(8):1489-1491.
- [27] 赵乃卓, 林贤洪. 基于脉冲漏磁的管道腐蚀缺陷检测的研究 [J]. *压电与声光*, 2011, 33(6):996-1001.
ZHAO Naizhuo, LIN Xianhong. Research of pipeline corrosive defect testing based on pulsed magnetic flux leakage [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, 33(6):996-1001.
- [28] 李詠. 管道漏磁检测数据的分类压缩方法的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
LI He. Research on Classification Compression Method of Pipeline Magnetic Flux Leakage Data [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [29] 张国光. 管道漏磁检测中漏磁信号与缺陷特征关系的研究 [J]. *化工自动化及仪表*, 2008, 35(2):39-42.
ZHANG Guoguang. Research on relation between magnetic leakage signal character and defect character in magnetic flux leakage detecting in pipeline [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2008, 35(2):39-42.
- [30] TAI C C, ROSE J H, MOULDER J C. Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements [J]. *Rev Sci Instrum*, 1996, 67(11):3965-3972.
- [31] BIEBER J A, SHALIGRAM S K, ROSE J H, et al. Time-gating of pulsed eddy current signals for defect characterization and discrimination in aircraft lap-joints [J]. *Review of Progress in QNDE*, 1997, 16B:1915-1921.

- [32] LEPINE B A, WALLACE B P, FORSYTH D S. Pulsed eddy current method developments forbidden corrosion detection in aircraft structures[J]. *NDT & E International*, 1999, 4(1): 1-10.
- [33] GIGUERE S, LEPINE B A, DUBOIS J M S. Pulsed eddy current technology: Characterizing material loss with gap and lift-off variations [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2001(13):119-129.
- [34] SMITH R A, HUGO G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft-capabilities and limitations [J]. *Insight*, 2001, 43(1): 14-25.
- [35] PLOTNIKOV Y A, NATH S C, ROSE C W. Defect characterization in multi-layered conductive components with pulsed eddy current [J]. *Review of Progress in QNDE*, 2002, 21A:1976-1983.
- [36] 周德强,田贵云,尤丽华,等. 基于频谱分析的脉冲涡流缺陷检测研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(9):1948-1953.
ZHOU Deqiang, TIAN Guiyun, YOU Lihua, et al. Study on pulsed eddy current defect signal detection technology based on spectrum analysis[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(9):1948-1953.
- [37] 周德强,张斌强,田贵云,等. 脉冲涡流检测中裂纹的深度定量及分类识别[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(6):1190-1194.
ZHOU Deqiang, ZHANG Binqiang, TIAN Guiyun, et al. Quantification of depth and classification of cracks using pulsed eddy current test technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6):1190-1194.
- [38] 周德强,田贵云,王海涛,等.小波变换在脉冲涡流检测信号中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2008, 27(10):115-120.
ZHOU Deqiang, TIAN Guiyun, WANG Haitao, et al. Application of wavelet transformation in pulsed eddy current signal processing[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(10):115-120.
- [39] 杨宾峰,张辉,荆毅飞,等. 基于脉冲激励的远场涡流检测机理及缺陷定量评估技术[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2012, 13(6): 45-49.
YANG Bin Feng, ZHANG Hui, JING Yifei, et al. Inspection principle and defect quantitative estimation of pulsed remote field eddy current technique[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2012, 13(6):45-49.
- [40] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等.基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2011, 12(1):73-77.
YANG Bin Feng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, et al. Quantification of crack defect using a new pulsed eddy current sensor[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2011, 12(1):73-77.
- [41] 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]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(28):154-160.
GAO Junzhe, PAN Mengchun, LUO Feilu, et al. Spectrum analysis and defect classification of pulsed eddy current testing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(28):154-160.
- [42] 高军哲,潘孟春,罗飞路,等.谱分析型多频涡流检测的信号处理方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(1):16-22.
GAO Junzhe, PAN Mengchun, LUO Feilu, et al. Research on signal processing method of multi-frequency eddy current testing based on spectrum analysis[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2011, 25(1):16-22.
- [43] LOWE J S, ALLEYNE D N, CAWLEY P. Defect detection in pipes using guided waves [J]. *Ultrasonics*, 1998(36):147-154.
- [44] ALLEYNE D N, LOWE M J S, CAWLEY P. The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1998, 65:635-641.
- [45] CAWLEY P, LOWE M J S, SIMONETTI F, et al. The variation of the reflection coefficient of extensional guided waves in pipes from defects as a function of defect depth, axial extent, circumferential extent and frequency[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2002, 216:1131-1143.
- [46] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The reflection of guided waves from notches in pipes: A guide for interpreting corrosion measurements [J]. *NDT International*, 2004, 37:167-180.
- [47] DEMMA A, CAWLEY P, LOWE M, et al. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 114(2):611-625.
- [48] NISHINO H, TAKEMOTO M, CHUBACHI N. Estimating the diameter thickness of a pipe using the primary wave velocity of a hollow cylindrical guided wave [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(6):1077-1079.
- [49] NISHINO H, YOSHIDA K, CHO H, et al. Propagation phenomena of wideband guided waves in a bended pipe[J]. *Ultrasonics*, 2006(44): 1139-1143.
- [50] HAYASHI T, KAWASHIMA K, SUN Z Q. Guided wave propagation mechanics across a pipe elbow[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2005, 127:322-327.
- [51] 董为荣,帅建,许葵.管道腐蚀缺陷超声导波检测数值模拟研究[J]. *机械强度*, 2008, 30(6):988-993.
DONG Weirong, SHUAI Jian, XU Kui. Numerical simulation study of corrosion detection in pipes using ultrasonic guided waves[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2008, 30(6): 988-993.
- [52] 何存富,孙雅欣,刘增华.弯管缺陷超声导波检测的有限元分析[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(4):289-294.
HE Cunfu, SUN Yaxin, LIU Zenghua. Finite element analysis of defect detection in curved pipes using ultrasonic guided waves[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(4):289-294.
- [53] 邓菲,吴斌,何存富.基于时反导波检测的管道缺陷圆周定位研究[J]. *声学学报*, 2008, 33(1):28-34.
DENG Fei, WU Bin, HE Cunfu. The analysis of crack locating in pipes using time-reversal guided waves[J]. *ACTA Acustica*, 2008, 33(1): 28-34.

- [54] 邓菲,吴斌,何存富.基于时间反转的管道导波小缺陷检测数值分析[J].北京工业大学学报,2008,34(7):673-677.
DENG Fei, WU Bin, HE Cunfu. A time reversal guided wave inspection method for small defects in pipes[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(7):673-677.
- [55] 孙钦蕾,李爱华,范江玮,等.钢管无损检测中的磁致伸缩导波技术试验研究[J].河北工业科技,2015,32(6):521-526.
SUN Qinlei, LI Aihua, FAN Jiangwei, et al. Research of magnetostrictive ultrasonic guided wave technique in nondestructive test of steel pipes[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2015, 32(6):521-526.
- [56] SIQUEIRA M H, GATTSC E, SILVA R R, et al. The use of ultrasonic guided waves and wavelets analysis in pipe inspection[J]. Ultrasonics, 2004, 41(10): 785-797.
- [57] NUNEZ I, NEGREIRA C. Efficiency parameters in time reversal acoustics: Applications to dispersive media and multimode wave propagation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(3):1202-1209.
- [58] 邓菲.基于时间反转的单通道管道导波检测新方法[J].机械工程学报,2011,47(6):17-21.
DENG Fei. A time reversal guided wave inspection method based on one signal generator tunnel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6):17-21.
- [59] HAYASHI T, MURASE M. Defect imaging with guided waves in a pipe[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 117(4): 2134-2140.
- [60] DAVIES J, CAWLEY P. The application of synthetically focused imaging techniques for high resolution guided wave pipe inspection[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Proceedings, 2007, 894(1): 681-688.
- [61] DAVIES J, CAWLEY P. The application of synthetic focusing for imaging crack-like defects in pipelines using guided waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(4): 759-771.
- [62] HYEON J S, ROSE J L. Guided wave tuning principles for defect detection in tubing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1998, 17(1):27-36.
- [63] HYEON J S, ROSE J L. Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders[J]. Ultrasonics, 1999, 37(5):355-363.
- [64] CHO Y, HONGERHOL T, ROSE J L. Lamb wave scattering analysis for reflector characterization[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1997, 44(1):44-52.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 14 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此,本编辑部特向这些专家表示敬意,对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

段俊法 方攸同 封 筠 郭彦平 何 明 胡士强 胡 振 李 健
李青春 梁兴雨 刘庆锁 刘占阳 秦玉明 瞿雄伟 孙晓云 王常勇
王广林 王海侨 王拉省 王立新 王秀梅 王珍珍 吴 化 武建军
武文俊 夏志明 赵树旗 张建伟 张琼华 张兴祥 张智勇 周华成

(本刊编辑部)