

脉冲涡流无损检测技术的研究进展

周德强¹, 田贵云², 王海涛², 尤丽华¹

(1. 江南大学 机械工程学院, 无锡 214122; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 脉冲涡流检测技术是涡流检测技术的一个新兴分支, 其宽频谱的激励方式使得脉冲涡流检测技术在航空航天、压力容器、铁路和管道等领域广泛应用。综述了脉冲涡流检测技术在金属缺陷、应力和热成像等方面的研究进展, 分析了脉冲涡流检测技术的发展方向。

关键词: 脉冲涡流; 缺陷; 应力; 热成像

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)10-0025-05

The Recent Developments of Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technology

ZHOU De-Qiang¹, TIAN Gui-Yun², WANG Hai-Tao², YOU Li-Hua¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Pulsed eddy current testing(PECT) is a new eddy current testing technology. As the wide spectrum of the excited current or voltage, it is widely used in aerospace, pressure vessels, railways, pipe and so on. The recently research progress including the defect of metal, stress of components, and thermal imaging of pulsed eddy current were discussed. The future trend of development was analyzed.

Keywords: Pulsed eddy current; Defect; Stress; Thermal imaging

脉冲涡流无损检测是一种发展前景广阔的无损检测新技术, 由于脉冲含有很宽的频谱, 感应的电压信号含有丰富的材质状态信息^[1-3]。脉冲涡流检测技术采用矩形脉冲作为输入, 在激励线圈中产生交变的磁场, 而交变的磁场在被测导体中感应出涡流, 该涡流受到试件的导电性能和导磁性能的影响(导电性、导磁性又与试件的组织、成分、硬度、应力应变和缺陷等有关), 涡流的反作用磁场与激励线圈中产生的磁场矢量合成, 能够被霍尔传感器或检测线圈检测到, 得出被测试件的导电性能和有无缺陷等情况。因此, 脉冲涡流检测技术在航空航天、压力容器、铁路和管道等领域广泛应用。

1 脉冲涡流检测技术的优势

1.1 缺陷检测

收稿日期: 2011-05-31

作者简介: 周德强(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为传感器技术、电磁无损检测与评估。

脉冲涡流检测技术是一种独特而低成本的高速大规模检测技术, 它与 X 射线检测技术相比, 对人体无辐射危害, 能在恶劣环境下工作, 设备价格较便宜, 测试操作的技术水平要求也较低; 与超声波检测技术相比, 无需使用耦合剂; 与磁粉检测技术相比, 可在任何导电媒质中应用; 与液体渗透检测技术相比, 不仅可检测物体的表面缺陷, 还可检测其内部缺陷。脉冲涡流无损检测技术是涡流检测技术的一个新兴分支, 是一种可实现定量检测导电材料表面及近表面缺陷深度的有效方法^[4], 对于金属部件内部出现的缺陷, 脉冲涡流是目前被证实非常有效的缺陷定量检测技术。

1.2 应力检测

脉冲涡流应力检测方法与其他无损检测方法相比, X 射线衍射法检测受晶粒度影响较大, 仅能测量表面宏观与微观应力或残余应力, 且检测设备价格昂贵, 测试操作的技术水平要求也比较高。超声波检测的深度比衍射法更深, 但必须使用耦合剂, 而且对复杂形状被测体、小而薄、不均匀被测材料检测更

困难。而磁弹性检测是一种磁性无损检测方法,它以磁滞效应、巴克豪森效应为基础,检测磁噪声和应力,可用于检测残余应力、组织结构、表面缺陷等。该方法具有方便、快速和准确的特点,但只适用于磁性材料。中子衍射法和同步衍射法在测量应力时具有很高的分辨力,然而实验设备非常稀缺,仅限于若干欧美国家实验室。材料的压阻效应使得脉冲涡流检测方法在残余应力检测方面有巨大优势,国内外研究学者对其进行了大量深入研究^[5-12],应力与材料电导率的相关性,证实脉冲涡流无损检测技术能够有效检测磁性材料与非磁性材料的应力。

1.3 脉冲涡流热成像

脉冲涡流热成像技术与其他无损检测技术相互补充,由于信号处理技术的进步,该技术被广泛用于航空结构关键部件缺陷的检测。传统热成像检测技术直接采用加热灯加热金属材料表面,进而采用红外热像仪对缺陷进行成像,这种检测方法的缺点是:垂直表面的缺陷检测困难;被测对象表面热的反射造成测量信号难于检测;与脉冲涡流热成像相比,它很难在短时间内加热金属表面^[13]。另外一种热成像方式是加热金属表面采用振动加热,机械能转换为热能,从而可以检测金属表面,这种检测方式需要接触金属表面^[14]。脉冲涡流热成像方式是采用脉冲涡流加热金属表面,交变的脉冲磁场产生的涡流能够迅速加热金属表面,然后采用红外热成像仪对缺陷进行成像,其优势是能够快速检测大面积区域,检测材料范围广^[15]。

2 脉冲涡流检测国内外研究进展

2.1 脉冲涡流检测理论研究

1968年,Dodd和Deed在线性、各向同性、均匀两层导电媒质的条件下,建立了涡流探头问题的数学模型,开启了涡流问题的解析解,随后还研究了带有缺陷的涡流问题的数学模型^[16-18],引起了国际涡流专家广泛关注。A A Kolyshkin、Uzal、希腊学者Theodoros Theodoulidis、美国爱荷华州立大学无损评估中心John Bowler教授等进一步完善了涡流问题的解析解^[19-26]。以上研究学者均以线圈检测为模型进行理论研究,而英国Newcastle大学田贵云教授领导的团队将线圈检测的解析法进一步延伸,采用固态磁传感器作为信号拾取器件,对多层导电结构材料进行检测,并将该解析法结果与数值仿真结果、试验结果进行了比较,发现该结果精确、效率

高、计算速度快^[27-28]。上述研究均采用圆柱型探头或矩形探头进行解析法研究,对其他形状的探头结构的理论探索有待进一步研究。

2.2 脉冲涡流缺陷检测技术

2.2.1 脉冲涡流信号特征提取技术

美国Iowa State University无损评估中心采用电流脉冲作为激励,霍尔传感器作为信号拾取器件,对飞机机身结构缺陷进行检测,提取峰值和峰值时间作为评估缺陷的特征量,结果表明两个特征量分别与缺陷的损伤严重程度和深度有关^[29-31],并研制出了脉冲涡流无损检测仪器;英国Qinetiq公司与澳大利亚航空和航海研究实验室合作开发了一套名为TRESCAN的脉冲涡流检测系统^[32-33];加拿大国防研究部门研究人员也开发了一套名为AVRD的脉冲涡流系统^[34-36]。这些脉冲涡流仪器开发的机理,均是在时域里进行的脉冲涡流信号特征提取。脉冲涡流采用矩形脉冲输入激励线圈,激励脉冲中含有很宽的频谱,其丰富的频谱信息并没有得到真正的利用。因此,可以进一步对脉冲涡流信号的时域与频域结合起来分析,探索出新的脉冲涡流信号特征提取技术,应用于金属部件缺陷的检测,使得灵敏度更高、检测深度更深。

2.2.2 缺陷定量与分类识别新技术

英国Newcastle大学田贵云等采用主成分分析方法,将提取的特征应用于表面裂纹、亚表面裂纹与腐蚀裂纹的分类,其分类性能优于传统的峰值、峰值时间特征分类^[37]。他们提出了一个“时间上升点”的脉冲涡流信号新特征,研究认为,它与电磁波在金属中的传播时间有关,可与其他特征(如峰值、峰值时间)集成,分类的精确性更高^[38]。我国学者杨宾峰等提出一种“频谱分离点”的识别方法^[4],实现了表面与亚表面缺陷的分类。Tianlu Chen等提出形状特征量与传统的峰值点特征分类性能比较,发现形状特征量与峰值点的组合分类性能更好^[39]。在缺陷定量检测方面,我国学者罗飞路领导的研究团队,采用最小二乘曲线拟合法,实现了对不同形状截面的缺陷定量检测^[4]。从以上文献分析得出,缺陷定量检测方面并没有与涡流在导体中传播的物理机理相联系;而缺陷分类识别主要集中在时域或频域,并没有将两者结合起来综合分析。因此,进一步的研究应结合涡流在导体中的传播机理,将信号时域与频域结合分析,探求一种更为精确的缺陷定量检测与分类识别新方法。

2.2.3 脉冲涡流提离效应的消除

提离效应的消除一直是脉冲涡流检测技术的难点。加拿大国防研究部门研究人员提出了“提离交叉点”(Lift-off point of Intersection, LOI)的概念,即检测对象相同,只有探头提离(探头和检测对象之间的距离)变化的情况下,脉冲涡流时域信号总会相交于一点;其在理论与试验基础上对该现象进行了解释,“提离交叉点”是由于提离变化而导致脉冲涡流信号的幅度和相位漂移^[36]。S Giguère 等为克服金属损耗及亚表面裂槽检测过程中提离效应的影响,采用提离点补偿的方法来减小提离效应^[40]。田贵云教授领导的研究团队在时域里通过参考信号与归一化技术,将检测过程分成两个阶段来减小提离效应^[41]。该团队通过解析法针对脉冲涡流提离效应进行了研究,在不同的激励频率下(高频与低频),脉冲涡流渗透深度对提离效应有着不同的影响,指出:提离不变性发生在脉冲涡流磁信号的一阶导;提离相交点是一个范围而并不单一^[42]。因此,针对在高频与低频两种不同激励频率下,即涡流渗透深度是否超过金属厚度,通过有限元仿真技术与实验相结合,提出一种消除提离效应的新方法。

2.3 脉冲涡流应力检测新方法

残余应力是影响航空铝合金早期质量的重要参数,因此对机械零部件进行早期诊断成为必然趋势。目前国内外脉冲涡流对残余应力的检测研究不多,主要集中在涡流检测残余应力。Anton I Lavrentyev 等采用超声和涡流两种无损检测方法对喷丸加工的金属表面进行了检测,研究结果表明,超声对应力的灵敏度非常小,由于喷丸密度的变化,涡流测量的电导率变化与压应力相关^[5]。Peter B Nagy 领导的研究团队采用涡流技术进行了大量的研究,他们报道了一个新的高频涡流电导率测量系统,频率达到 50 MHz。该系统的重复性、精确性、测量速度比以前的测量系统更高^[6-12]。然而,涡流检测残余应力效率低下,对检测激励频率要求更高,涡流检测深度不深。针对涡流检测应力的不足,田贵云教授领导的研究团队对此展开了大量研究,文献[43]采用有限元仿真与实验相结合,证实脉冲涡流信号的峰值能够评估导电材料的电导率分布及应力所处的状态;文献[44]首先推导了脉冲涡流圆形探头测量应力的原理,即圆柱型探头测量的是某一圆形区域的电导率平均值,矩形探头可以测量某一方向所占比重比较大的电导率平均值,并采用两种类型的脉

冲涡流探头(圆柱形探头与矩形探头),对四种不同且存在不同程度塑性变形的铝合金(即存在一定残余应力),进行了弹性变形拉伸试验,验证了上述脉冲涡流探头测量的电导率平均值原理;通过试验指出,脉冲涡流差分信号的峰值与应力并非成线性关系,这是由于铝合金拉伸试验前存在一定的残余应力,并采用脉冲涡流差分信号的峰值一阶导对残余应力大小进行了评估。由于脉冲涡流检测应力受多种因素的影响,如被测导电材料化学成分、微结构、被测导电材料的硬度、表面粗糙度、温度等多因素的影响。因此,需要进一步展开对其他影响因子的研究,进一步完善脉冲涡流技术对应力的检测精度。

2.4 脉冲涡流热成像检测技术

脉冲涡流热成像技术是一种新出现的无损检测技术,组合了脉冲涡流技术与红外热成像技术,具有快速大面积检测的优点。Ilham Zainal Abidin 等采用有限元仿真技术仿真了脉冲激励下的铁轨斜槽裂纹的瞬时温度分布,有助于理解脉冲涡流产生的热在铁轨裂纹中的分布,提出了脉冲涡流温度分布特征,并通过实验进行了验证,证实提出的温度分布特征值的有效性^[45]。J Wilson 等设计了一套脉冲涡流热成像系统,激励脉冲频率范围为 150~400 kHz。通过实验,该系统能够在很短的时间内探测到金属裂纹。同时,该论文指出,温度上升阶段与下降阶段提供了缺陷深度与其他尺寸信息,温度下降阶段与亚表面缺陷密切相关^[46]。四川大学杨随先教授针对铁轨边缘裂纹难以识别的问题,采用有限元仿真进行了脉冲涡流热成像研究。研究指出,在早期脉冲涡流加热阶段,裂纹尖点与其他裂纹处相比,温度上升最快;电感器垂直裂纹放置,缺陷检测灵敏度最高;旋转电感器方向检测可以评估裂纹方向^[47]。以上研究可以得出,脉冲涡流热成像技术中激励频率高达 150 kHz,检测深度不深,提高脉冲涡流热成像仪的检测深度仍然是目前研究中的难点。

此外,脉冲涡流无损检测方法与其他电磁无损检测方法的集成也是目前无损检测的研究方向。文献[48]报道了脉冲涡流探头与电磁超声换能器的集成,脉冲涡流探头能够有效检测近表面缺陷,电磁超声换能器检测表面缺陷存在一定问题,但能够有效检测深层缺陷,两种检测方法能够相互补充。文献[49]报道了涡流无损检测方法与巴克豪森噪声、声发射等电磁无损检测方法的集成,采用线圈与带通滤波器分离出相应的电磁信号,该方法能够同时检

测到材料缺陷、残余应力以及微结构的变化信息。

3 结论

脉冲涡流无损检测技术与其他无损检测方法相比,在金属缺陷、应力、热成像检测方面具有独特的优势。由以上国内外研究进展得出,该技术如下几个方面有待进一步研究:

(1) 除圆柱形探头或矩形探头的解析法研究外,对其他形状的探头结构理论探索有待进一步研究。

(2) 脉冲涡流缺陷信号特征提取、缺陷定量与分类识别仍然是目前研究的难点。

(3) 需要进一步展开对被测导电材料化学成分、微结构、被测导电材料的硬度、表面粗糙度、温度等多因素的影响研究,完善脉冲涡流技术对应力的检测精度。

(4) 脉冲涡流热成像技术中激励频率高达150kHz,检测深度不深,提高脉冲涡流热成像仪的检测深度仍然是目前研究中的难点。

(5) 脉冲涡流检测技术与其他电磁无损检测技术的集成对于检测复杂缺陷、材料的应力、微结构变化等,也是目前脉冲涡流无损检测研究的方向。

参考文献:

- [1] Moulder J C, Bieber J A, Ward W W, et al. Scanned pulsed eddy current instrument for non-destructive inspection of aging aircraft[J]. SPIE, 1996, 2945(2): 2—13.
- [2] Lebrun B, Jayet Y, Baboux J C. Pulsed eddy current application to the detection of deep cracks[J]. Materials Evaluation, 1995, 53(11): 1296—1300.
- [3] Lebrun B, Jayet Y, Baboux J C. Pulsed eddy current signal analysis: application to the experimental detection and characterization of deep flaws in highly conductive materials[J]. NDT&E International, 1997, 30 (3): 163—170.
- [4] 杨宾峰,罗飞路,张玉华,等.飞机多层结构中裂纹的定量检测及分类识别[J].机械工程学报,2006,42(2): 63—67.
- [5] Anton I Lavrentyev, Paul A Stucky, William A Veronesi. Feasibility of ultrasonic and eddy current methods for measurement of residual stress in shot peened metals[J]. Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, American Institute of Physics, 2000: 1621—1628.
- [6] Mark P Blodgett, Peter B Nagy. Eddy current assessment of near-surface residual stress in shot-peened nickel-base superalloys[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2004, 23(3): 107—123.
- [7] Feng Yu, Peter B Nagy. Simple analytical approximations for eddy current profiling the near-surface residual stress in shot-peened metals[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(2): 1257—1266.
- [8] Feng Yu, Peter B Nagy. Dynamic piezoresistivity calibration for eddy current nondestructive residual stress measurement[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2005, 24(4): 143—151.
- [9] Feng Yum, Peter B Nagy. On the influence of cold work on eddy current characterization of near-surface residual stress shot-peened nickel-base superalloys[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2006, 25(3): 107—122.
- [10] Bassam A Abu-Nabah, Peter B Nagy. Iterative inversion method for eddy current profiling of near-surface residual stress in surface-treated metals[J]. NDT&E International, 2006(39): 641—651.
- [11] Bassam A Abu-Nabah, Peter B Nagy. High-frequency eddy current conductivity spectroscopy for residual stress profiling in surface-treated nickel-base superalloys[J]. NDT&E International, 2007(40): 405—418.
- [12] Bassam A Abu-Nabah, Feng Yu, Waled T Hassan, et al. Eddy current residual stress profiling in surface-treated engine alloys[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2009, 24(1): 209—232.
- [13] Milne J M, Reynolds W N. The nondestructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography[J]. SPIE, 1984(520): 119—122.
- [14] Morbidini M, Cawley P, Lowe M J S, et al. A quantitative investigation of thermosonics[C]. WCNDT, Montreal, Canada: 2004.
- [15] Riegert G, Pfleiderer K, Gerhard H, et al. Modern methods of NDT for inspection of aerospace structure [C]. Berlin, Germany: ECNDT, 2006.
- [16] Dodd C V, Deeds W E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(6): 2829—2837.
- [17] Luquira J W, Deeds W E, Dodd C V. Alternating current distribution between planar conductors[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(10): 3983—3991.
- [18] Cheng C C, Dodd C V, Deeds W E. General analysis of probe coils near stratified conductors[J]. Int J

- Nondestr Test, 1971(3):109—130.
- [19] Kolyshkin A A, Smolyakov A P, Remi Vaillancourt. Analytical solution in eddy—current testing of double—layer media with depth—varying magnetic properties[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 1991, 28(2):4360—4365.
- [20] Uzal E, Rose J H. The impedance of eddy current probes above layered metals whose conductivity and permeability vary continuously[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 1993, 29(2):1869—1873.
- [21] Erol Uzal, John C Moulder, Screeparma Mitra, et al. Impedance of coils over layered metals with continuously variable conductivity and permeability: theory and experiment[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(3):2076—2089.
- [22] Kolyshkin A A, Vaillancourt R. Analytical solutions to eddy-current testing problems for a layered medium with varying properties[J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 1997, 33(4):2473—2477.
- [23] Theodoulidis T P, Tsiboukis T D, Kriegis E E. Analytical solutions in eddy current testing of layered metals with continuous conductivity profiles [J]. Magnetics, IEEE Transactions on, 1995, 31(3):2254—2260.
- [24] Bowler J, Johnson M. Pulsed eddy current response to a conducting half space[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(3):2258—2264.
- [25] Fangwei Fu, John Bowler. Transient eddy-current driver pickup probe response due to a conductive plate [J]. IEEE Transactions on magnetics, 2006, 42(8): 2029—2037.
- [26] Theodoros Theodoulidis. Developments in calculating the transient eddy-current response from a conductive plate[J]. IEEE Transactions on magnetics, 2008, 44(7):1894—1896.
- [27] Yong Li, Theodoros Theodoulidis, Gui Yun Tian. Magnetic field-based eddy-current modeling for multi-layered specimens[J]. IEEE Transactions on magnetics, 2007, 43(11):4010—4015.
- [28] Yong Li, Gui Yun Tian, Anthony Simm. Fast analytical modeling for pulsed eddy current evaluation [J]. NDT&E International, 2008(41):477—483.
- [29] 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.
- [30] Moulder J C, Bieber J A. Pulsed eddy current measurements of corrosion and cracking in aging aircraft [J]. Materials Research Society Symposium Proceedings of Nondestructive Characterization of Materials in Aging Systems, 1998(503):263—268.
- [31] Rummel W D, Bowler J R. Integrated quantitative nondestructive evaluation (NDE) and reliability assessment of aging aircraft structures[J]. Final Report for The United States Air Force Office of Scientific Research, 2001(27).
- [32] Smith R A, Hugo G R. Deep corrosion and crack detection in aging aircraft using transient eddy current NDE[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 1999, 14:1401—1408.
- [33] Smith R A, Hugo G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft—capabilities and limitations[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2001, 43(1):14—25.
- [34] Lepine B A, Giguere J S R, Forsyth D S, et al. Applying pulsed eddy current NDI to the aircraft hidden corrosion problem[J]. Review of Progress in QNDE, 2000(11):449—456.
- [35] Giguere S, Lepine B A, Dubois J M S. Pulsed eddy current technology: characterizing material loss with gap and lift off variations[J]. Res Nondestr Eval, 2001(13):119—129.
- [36] Mandache C, Lefebvre J H V. Transient and harmonic eddy currents: Lift-off point of intersection [J]. NDT&E international, 2006(39):57—60.
- [37] Ali Sophian, Gui Yun Tian, David Taylor, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT [J]. NDT&E International, 2003(36):37—41.
- [38] Gui Yun Tian, Ali Sophian. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors [J]. NDT&E International, 2005(38):77—82.
- [39] Tianlu Chen, Gui Yun Tian, Ali Sophian, et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT [J]. NDT&E International, 2008, 41(6):1—10.
- [40] 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(3):119—129.
- [41] Gui Yun Tian, Sophian A. Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT&E International, 2005, 38(4):319—324.
- [42] Gui Yun Tian, Yong Li, and Catalin Mandache.

(下转第 35 页)

图 12 在实际检测时,此管端拍胶片判定合格。图 12(c)图像与胶片成像相当,较难判断出缺陷,但灵敏度可以满足标准要求,图 12(b)和(d)中的图像缺陷很容易被发现。

以上图像格式实际上为 RAW 格式,与单反数码相机相同,即所谓的原始图像格式,非常适合于专业人士进行后期图像处理。

6 平板成像测试结论

(1) 成像质量 质量效果非常良好。

(2) 成像的剂量 测试 17.5 mm 壁厚钢管采用 120 kV,2 mA 的 X 射线能量即可清晰成像,可见剂量很低。帧速率和成像剂量值的关系为:帧速率越高,所需的剂量值越大;帧速率低,图像质量通常会更好。

(3) 成像的时间 通常平板成像帧速率在 1~2 帧/s,抓图时间在 10 s 左右。

(4) 成像的评判时间 平板成像通过计算机图像评判,既方便又快捷,随着软件的不断更新会体现出更大的优势。

(5) 成像检测结果的保存与管理 平板成像数字化的检测结果可通过计算机管理,更安全更方便,成本更低。

(6) 寿命 根据实际应用情况来看,早期的平板成像设备在螺旋焊管生产线连续三班使用已有 4 年的时间,至今使用效果良好。

(7) 动态成像 现在比较成熟的工业平板帧速率为 0.1~30 帧/s。用作实时检测,对检测速度有较严格的要求。30 帧/s 的帧速率所需的成像剂量

(上接第 29 页)

Study of Lift-Off Invariance for Pulsed Eddy-Current Signals[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1):184—191.

[43] 周德强,田贵云,王海涛,等.脉冲涡流技术在应力检测中的应用[J].仪器仪表学报,2010,31(7):1588.

[44] Maxim Morozov, Gui Yun Tian, Philip J. Withers. The pulsed eddy current response to applied loading of various aluminium alloys[J]. NDT&E International, 2010(43):493—500.

[45] Ilham Zainal Abidin, Gui Yun Tian, John Wilson, et al. Quantitative evaluation of angular defects by pulsed eddy current thermography[J]. NDT&E International, 2010(43):537—546.

[46] Wilson J, Tian G Y, Abidin I Z, et al. Pulsed eddy

大约与影像增强器相当,但平板图像质量会更好。但高速下 30 帧/s 的图像会有一定的拖尾现象,垂直于运行方向的像质计会变得模糊。但是,平行于运行方向的像质计则会显示很高的灵敏度。这种情况对于气孔、夹渣等缺陷的影响会小些,这类缺陷有人认为适度的拖尾会更利于发现缺陷。对于平行于运行方向裂纹影响很小,但是,速度对垂直于运行方向的小裂纹的影响是非常大的,这点在检测时要引起足够的重视。

7 平板成像存在的问题

平板成像是一个新兴的检测技术,应用好这项技术也会遇到很多的问题,主要有以下几个方面:

(1) 检测人员总是习惯于用胶片的方法来评判数字化图像,不利于平板优势的体现。

(2) 需要有各个行业的平板数字化检测的执行标准。

(3) 需要有相关的平板数字化检测规程和评判方法。

参考文献:

- [1] Sensor Panel Imaging Copyright[M]. Varian Medical Systems, Inc,1999.
- [2] Flat Panel X-ray Imaging Ginzton Technology Center.
- [3] ASTM E 2597—2007 Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays1.
- [4] 103—2009 成品油输送管道用钢管通用技术条件
- [5] 蒋太秋,张圣光,王坤显,等. DR 平板检测技术在螺旋埋弧焊管检测中的应用[J]. 焊管,2010,33(2):57—59.

current thermography: system development and evaluation[J]. Insight, 2010,52(2):87—90.

[47] Suixian Yang, Gui Yun Tian, Ilham Zainal Abidin, et al. Simulation of edge cracks using pulsed eddy current stimulated thermography[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol133(1), doi:10.1115/1.4002710.

[48] Edwards R S, Sophian A, Dixon S, et al. Data fusion for defect characterization using a dual probe system[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2008, 144(1):222—228.

[49] Gui Yun Tian, John Wilson, Maxim Morozov. Complementary electromagnetic nondestructive evaluation [J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2011(30A,B):1256—1263.