

脉冲涡流和电磁声换能器双探头无损检测

Ali Sophian¹, Rachel S Edwards², 田贵云¹, Steve Dixon²

(1. Huddersfield 大学 计算机工程学院, 英国; 2. Warwick 大学 物理系, 英国)

摘要:在许多情况下, 只应用一种 NDT 技术存在不足, 这就迫使 NDT 操作人员使用一种以上的技术以保证检测出危害被检物使用寿命或功能的缺陷。但分别实施多种技术的检测, 就会延长检验时间。介绍了一种新的 NDT 设施, 采用两种不同的非接触无损检测技术进行互补, 即电磁声换能器(EMAT)和脉冲涡流(PEC)探头。检测结果表明, 脉冲涡流和电磁声换能器因是非接触, 所以可应用于材料生产过程中的自动在线检验, 也可用于在役检验。

关键词:电磁涡流检测; 脉冲涡流检测; 电磁声探头

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)08-0443-04

Dual-Probe Using Pulsed Eddy Currents and Electromagnetic Acoustic Transducers for NDT Inspection

Ali Sophian¹, Rachel S Edwards², TIAN Gui-yun¹, Steve Dixon²

(1. The University of Huddersfield, School of Computing and Engineering, Huddersfield HD1 3DH, UK;

2. University of Warwick, Department of Physics, Coventry CV4 7AL, UK)

Abstract: In many situations, the application of only one non-destructive testing (NDT) technique is generally thought to be inadequate. This drives NDT operators to carry out the inspection using more than one technique to ensure the detection of defects that are potentially harmful to the life or function of the test object. One disadvantage will be the extended and expensive inspection time if the techniques are applied separately. In this article, the introduction of a new NDT system that utilises two different non-contact techniques in a complementary mode, namely Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) generating surface ultrasonic waves, and Pulsed Eddy Current (PEC) sensors, is reported. Being non-contact, they lend themselves to automatic on-line inspection that can benefit inspection of materials during the manufacturing process and whilst in service. This paper also highlights other potential benefits and presents some preliminary experimental results.

Keywords: Electromagnetic and eddy current testing; Pulsed eddy current; Electromagnetic acoustic transducer

目前 NDT 技术的需求强大, 迫使 NDT 行业持续不断地变化。NDT 核心技术的发展和应用也在快速地变化。不同的 NDT 技术具有不同的优缺点, 在一定程度上可实现互补。射线照相法有很高的二维空间分辨力, 并对深埋缺陷具有较高探测灵敏度, 但由于安全问题使其在许多情况下难以被采用。脉冲回波超声检测是继目视检测方法后被广泛使用的 NDT 技术, 可以应用于许多固体材料的埋藏缺陷的检测。但如为近表面缺陷、线性裂纹等, 可

能挡住更深或更严重的裂缝信号, 使超声检测技术无法准确检出缺陷并作尺寸估计。新的非接触技术, 包括激光发射和探测、电磁声换能器(EMAT)以及空气耦合换能器, 虽然可能降低一些灵敏度, 但它们却具有若干超过传统方法的优点^[1-3]。涡流技术对导体材料的表面开口和埋藏缺陷都很敏感, 并可评估其性质, 只是由于集肤效应而对穿透深度有一定的局限, 当应用此技术时, 一般只需最低限度的表面预清理。

多种无损检方法结合以解决检测需要已被广泛认同^[4]。生产厂将继续采用涡流和超声 NDT 设备

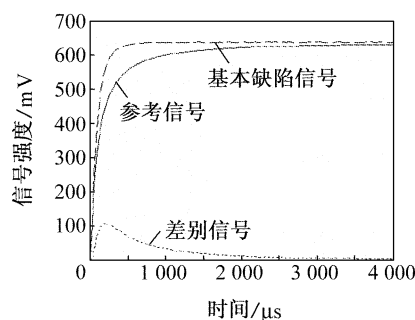
作为降低停产和运转损失的关键。对于控制加工过程,涡流和非接触超声技术优势独特且有若干互补作用,两种技术结合在单一装置中,将节省检验(特别是在线检验)时间、降低检测费用,提高效率。

以下笔者将阐述脉冲涡流(PEC)和 EMAT 双探头结合技术,并给出初步实验结果。

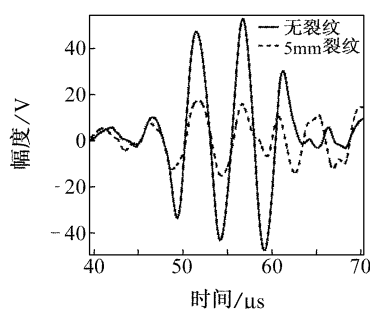
1 双探头设计

1.1 PEC 检测

涡流检测技术适用于自动在线检验。近年来,PEC 技术由于频谱宽的特性引起人们的关注。线圈的每一次激发可获得更多的信息,并且激发的不连续性使通过激发线圈的电流更高。低频部分使涡流在试件中渗入较深,特别是固态电磁传感器与探头相结合而取代传统的检出线圈。PEC 技术已应用于包括飞机中的搭接接头、厚度测量和镀层厚度测量^[5-10]。图 1a 为获得的典型 PEC 信号,差别信号的峰值以及到达时间有助于分析测量信号(差别信号是由测量信号减去参考信号导出的)。



(a) PEC 响应



(b) EMAT 超声信号

图 1 典型的 PEC 和 EMAT 信号

PEC 系统的优点是^[11]: ① 无需参数设置即可进行复杂构件的大面积扫查。② 在后处理时具有补偿提离和边缘效应的能力。③ 探测速度可与多频涡流相比拟。④ 测试设备的费用明显低于多频

涡流。另外,PEC 技术还可对特殊构件(如紧固件)的干扰信号进行有效区分^[12]。

1.2 EMAT 检测

非接触超声检测技术应用历史悠久,但直到目前无损检测界才予以重视。EMAT 技术根据洛伦兹力和/或磁弹性机理,可以不加耦合剂而在导电或导磁材料试件中激发超声信号^[1,2]。文中 EMAT 产生的是 100~400 kHz 的低频宽带超声信号,主要是在平表面上产生瑞利波,可以深入材料 5 mm。按照不同的应用采用不同形式的线圈,对于铁轨或其他曲面试件,其表面波(严格来说是导波)作用与瑞利波类似,所以可给予同样的处理。瑞利波的能量大部分是在试件表面下一个波长的范围^[13],所以使用低频声波测量深度可达 20 mm。EMAT 采用一发一收的方式(图 2),即一个 EMAT 产生信号而另一个则在一固定距离处接收信号。如果在这两个换能器之间存在缺陷,则瑞利波可能部分地被缺陷挡住。用宽带信号可以研究那些频率被裂缝挡住的缺陷,并用以测量裂缝的深度,从 5 mm 深槽的任一侧以 EMAT 测得的典型波形见图 1b^[1,14]。

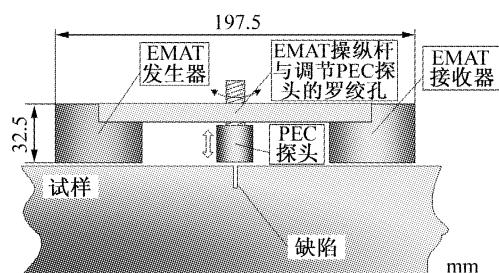


图 2 双探头检测示意图

采用一发一收的 EMAT 可对处于发射和接收之间的任何缺陷都很敏感,并由最深的缺陷提供主导信号。这样就能快速检测出试件中两点之间的较深的缺陷。在慢速扫查时的测量表明,接近缺陷的表面波信号得以加强,正如直接在两个 EMAT 通过的信号被从缺陷反射回来的信号干涉而加强。这一现象可用以对缺陷准确定位^[14]。目前尚在研究的应用包括能提高检验速度和深度的在线钢坯检测和铁轨检验(特别是测定边角裂缝),该技术的可靠性已超过常用的非接触超声检测技术^[1,14]。

1.3 PEC 与 EMAT 技术的结合

由上可知,PEC 与 EMAT 技术的结合优点众多。首先,两种技术都是非接触,适用于热的或动态被检构件的在线检验。与其他多重技术一样,检验时间大大缩短,节省检验费用。两种方法都不受探

头与试件间的非电磁或绝缘材料的影响,所以表面清理时间很短。缺陷的检出和定量程度增高,信号分析的误差大大减少。多重传感器较之单一传感器仪器的众多优点已得到业界公认^[15,16]。

两种技术各有不同的穿透深度和深度灵敏度,因此其结合较各自独立使用时检验深度更大。例如,与 EMAT 技术相比,PEC 对测定较浅裂缝具有较高的灵敏度,而低频 EMAT 则对测定较深(深度达 20 mm)表面开口的裂缝具有较高的灵敏度。

作为与试件的电磁特性敏感的技术,PEC 与其他涡流技术一样,在每次应用时需要根据试件的材料进行校准。但在此可用 EMAT 信号来校准 PEC 设备,从而降低对材料的依赖性。EMAT 对各种电磁特性的敏感性较低,其超声信号主要取决于缺陷的尺寸。两种技术也可以对缺陷深度的变化作出比较。表 1 为 PEC 与 EMAT 技术优缺点比较。

表 1 PEC 与 EMAT 技术的比较

技术	优点	缺点
涡流 (PEC)	对电磁特性敏感 非接触 低成本 高分辨力 便携	限于导体材料 限于表面或近表面缺陷 对每一试件材料需作校准
超声 (EMAT)	非接触 宽频,穿透深度大 快速探测 低成本 便携	限于导电或导磁材料 对表面或近表面缺陷不灵敏 一发一收方法分辨力较低

图 2 设计的双探头设备可使 PEC 探头的位置在垂直方向调节,用手摇车方式保持对缺陷深度的控制,缺陷的总长则用调节活动杆长度来确定。

2 试验研究

2.1 双探头的相互作用

理论上由于 PEC 和 EMAT 技术工作于不同的频率和不同的物理原理,不存在相互干扰。实验也证明两种探头同时工作时,并未观察到其信号有所改变。但是,对于铁磁性试样,实验表明 EMAT 的电磁铁有助于 PEC 信号的放大,比较结果见图 3。图 3 显示,当 EMAT 的间距(也就是磁铁间距)减小时,PEC 信号被放大,因此可以减小手动滑杆的长度,使 PEC 信号达到最大放大。但是 EMAT 的间距有一个最低值,这是由于瑞利波的到达时间需要

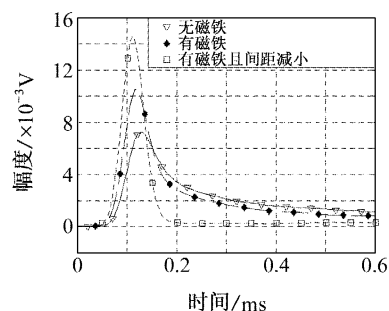


图 3 铁磁性材料的 EMAT 电磁铁对 PEC 信号的影响

迟于从激发电流脉冲(应具有最小体积波的干扰)引起的电噪声时间的末端。

2.2 穿透深度

PEC 和 EMAT 两种技术对缺陷的最佳灵敏度有不同的深度范围。PEC 对较浅的表面或近表面缺陷较为敏感;EMAT 则能度量较深的表面开口缺陷。图 4 铝试件制作有若干条模拟缺陷(不同深度的槽),两种方法的试验结果如图 5。图 5 表明,PEC 探头不能区分超过 15 mm 深的缺陷。图中曲线的斜率表明 PEC 探头对 <5 mm 深的缺陷灵敏度较高。EMAT 检出浅槽的超声信号幅度稍有差异,可能由于槽的深度稍有差异。无论如何,较深的槽对信号幅度具有决定性的影响,并且裂缝的测量深度可达 20 mm。对瑞利波的频率成分改变的分析

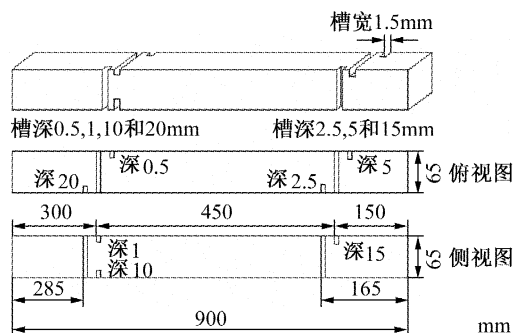


图 4 槽深度校准试件

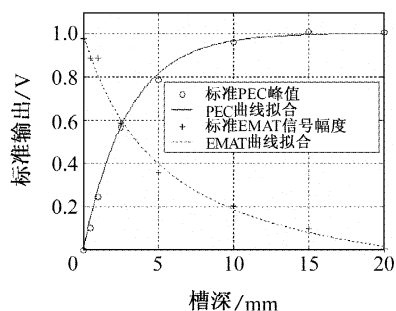


图 5 PEC 和 EMAT 技术在铝试块上的深度校准

能得出更可靠的裂缝测量深度。EMAT 对浅槽的灵敏度低于 PEC,但对深度 >5 mm 的槽却更为灵敏,这就表明两种技术的检验深度能够互补。

2.3 表面和近表面缺陷检测

实验试样如图 6,其上制作有不同方向和深度的表面下孔。图 7 为两种探头扫查 10 mm 深的表面开口槽或下表面孔的结果。PEC 峰值(左轴线)表示缺陷的最大值,超声峰值(右轴线)表明接收 EMAT 正处于缺陷上,即对超声信号的加强。若 EMAT 向缺陷两侧移动便会使信号降低。两种技术均能检测出表面开口槽和 1.75 mm 深、 $\phi 1.5$ mm 的下表面孔。缺陷信号处为距离刻度为零,且 EMAT 测量装置移动 75 mm、接收 EMAT 出现零值。检测结果表明,两种技术对槽和孔的检出位置是相符的,两种独立的技术有能力检出缺陷并进行定位,并且采用数据合成可以提高检出的准确性和几率。

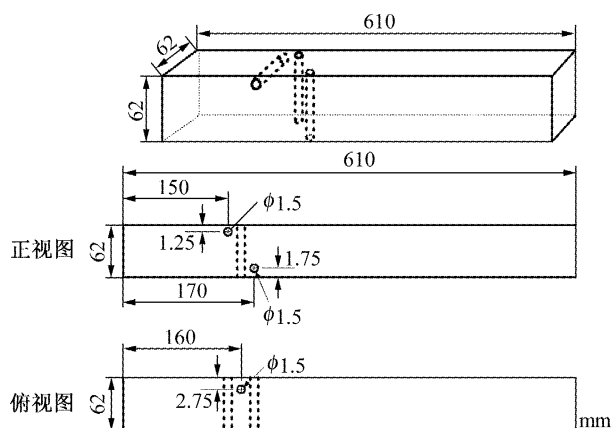
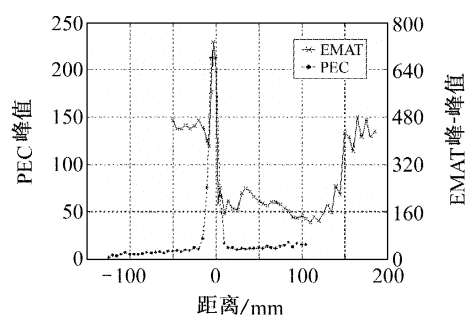
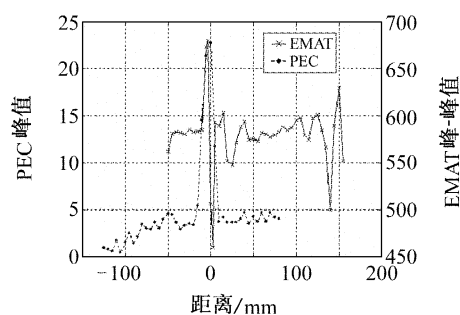


图 6 具有表面下、水平状态孔的试样



(a) 10 mm 表面槽



(b) 表面下水平孔

图 7 双探头扫查结果

3 结论

基于 PEC 和 EMAT 的非接触双探头设施已被提出并为目的已经设计并构建了这一设备的样板。已经发现各装置互不影响,EMAT 的电磁铁对钢铁试样有助于放大 PEC 信号。下一步的工作内容包括对设施和校准的改善以及为提高检出率、缺陷定位和尺寸度量而采用数据合成技术。

致谢:本工作由 ERSRC 提供 GR/S 24428/01(Huddersfield)和 GR/S 24435/01(Warwick)。(下转第 468 页)

国产首套焦炭自动采样制样系统效力攀钢四高炉

攀研科技产业有限责任公司是四川省省级高新技术企业。2006 年公司凭借其人才和技术优势,接受攀枝花新钢钒股份有限公司技术质量部的委托,研制四高炉用焦炭自动采样制样系统。目前,项目“冶金焦炭检测系统的建立与改进”已通过攀钢(集团)公司鉴定。其中,由攀研科技产业有限责任公司根据该项目工艺自主研发的国产首套焦炭自动采样制样系统成套设备,已正式投入攀钢四高炉使用。经生产现场严格检验表明,该设备先进,已完全取代手工操作,能及时准确地将焦炭质量及其波动的情况提供给高炉操作人员,使其通过及时调剂,促进高炉稳定顺行和优质、高产、低消耗。该系统技术路线

合理,工艺先进,设备可靠,在解决焦炭自动采样制样过程中容易出现的磨损、搭桥、堵塞、卡筛及众多采样制样设备的高度集成等关键技术上有重大突破。同时,在焦炭粒度样制取方面,还具有修订相关国家标准的潜在价值。开发的多粒级筛分称量机具有不卡筛、无残留、筛透性好、筛分效率高的优点,取得了国家专利。该系统为国内首创,具有完全的自主知识产权,与国外同类型系统相比具有性价比高的优点,与国内同类型系统相比具有高度自动化的优点。该系统的成功运用,实现了攀钢焦炭质量检测工作的自动化和规范化,在国内同行中达到了领先水平。(唐诗全,彭宏亮)

磁化曲线拐点位置 3, 即 $B_3 = B_{\mu m}$ 。此时磁化曲线的斜率最大, 磁导率 μ 达到最大值, 即 $\mu_3 = \mu_m$ 。 R_{mm} 则接近最小值。可使得内磁阻远小于外磁阻, 则总磁阻 $R_m \approx R_{mw}$, 可近似认为是其最小值。

(4) 设铁心截面积由 S_3 增大到 S_4 , 磁化工作点将急速下降, 其磁导率 μ 随之下降。也就是说, 这时铁心截面积 S 在线性扩大, 同时磁导率 μ 又在非线性地迅速缩小, 而 R_m 和 I 则几乎不随 S 变化。因此, 这时增大 S , 不能使励磁电流 I 减小, 反而增大了设备的体积和重量, 给现场探伤带来不便。

综上所述, 为使磁通主要沿铁心通过, 基本没有溢出铁心的漏磁通, 则磁化不能超过饱和点位置 1, 即 S 必须满足 $S \geq S_1$; 为使励磁电流 I 最小, 并有效利用 S , 则磁化必须不低于磁化曲线拐点位置 3, 即 S 必须满足 $S \leq S_3$ 。因此, 必须有:

$$S_3 \geq S \geq S_1$$

$$\text{或} \quad \frac{\Phi}{B_{\mu m}} \geq S \geq \frac{\Phi}{B_s} \quad (13)$$



(上接第 446 页)

参考文献:

- [1] Palmer S B, Dixon S. Industrially viable non-contact ultrasound[J]. Insight, 2003, 45(3): 211.
- [2] Frost H. Electromagnetic-Ultrasound Transducers: Principles, Practice and Applications in Physical Acoustics XIV[C]. New York: 1979; 179.
- [3] Bray E, Stanley PK. Nondestructive Evaluation-A tool in Design, Manufacturing, and Service [C]. CRC Press Inc, 1997.
- [4] Gros X E, Bousigue J, Takahashi K. NDT data fusion at pixel level[J]. NDT & E International, 1999, 32(5): 283—292.
- [5] Tian G Y, Sophian A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensor[J]. NDT & E International, 2005, 38(1): 77—82.
- [6] Yang H C, Tai C C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate[J]. Measurement Science & Technology, 2002, 13 (8): 1259—1265.
- [7] Robers M A, Scottini R. Pulsed eddy current in corrosion detection [C]. The 8th ECNDT. Barcelona: 2002.
- [8] Lepine B A, Giguere J S R, Forsyth D S, et al. Applying pulsed eddy current NDI to the aircraft hidden corrosion problem[C]. In Aging Aircraft 2001. Orland-

式(13)表明铁心的截面积 S 不能太大, 也不能太小, 其取值范围需满足使铁心工作在磁化曲线的膝点附近。

4 结论

(1) 交流电磁轭的磁通 Φ 几乎不随铁心截面积 S 变化, 故不能以增大截面积 S 来增大磁通 Φ 。

(2) 交流电磁轭铁心截面积 S 的取值范围应满足 $\Phi/B_{\mu m} \geq S \geq \Phi/B_s$ 。为兼顾 I 和 S , 建议使铁心工作在磁化曲线的膝点附近, 即取 $S \approx S_2$ 。

参考文献:

- [1] 俞大光. 电工基础[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1965.
- [2] 贺湘琰. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [3] GB/T 12604. 5—1990 无损检测术语 磁粉检测[S].
- [4] 林锡忠. 论电磁轭铁心磁导率对磁通和励磁电流的影响[J]. 无损检测, 2005, 27(6): 300.
- [5] do Florida; 2001.
- [9] 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.
- [10] Smith R A, Hugo G R. Deep corrosion and crack detection in aging aircraft using transient eddy-current NDE[C]. In Aging Aircraft 2001. Orlando Florida: 2001.
- [11] Smith R A, Hugo G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft-capabilities and limitations [J]. Insight, 2001, 43(1): 14—25.
- [12] Rose J H, Uzal E, Moulder J C. Pulsed eddy-current characterization of corrosion in aircraft lap splices: Quantitative modeling[C]. Proc of the SPIE. 1999: 164—176.
- [13] Viktorov I A. Rayleigh and Lamb Waves[M]. New York: Plenum Press, 1967.
- [14] Edwards R S, Dixon S, Jian X. Enhancement of the Rayleigh wave signal at surface defects[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37: 2291—2297.
- [15] Gros X E. NDT Data Fusion[M]. London: Arnold, 1977.
- [16] Hall D L, Llinas J. An introduction to multisensor data fusion[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85 (1): 6—23.

(马铭刚 译)