

文章编号: 1001-3806(2013)03-0277-04

激光-EMAT法非接触式无损检测金属内部缺陷研究

赵扬^{1,2} 郭锐¹ 宋江峰¹ 马健¹ 刘帅¹ 孙继华¹ 贾中青^{1,2}

(1. 山东省科学院 激光研究所, 济南 250014; 2. 山东省无损检测工程技术研究中心, 济南 250014)

摘要: 为了实现金属材料内部缺陷的非接触式无损检测,采用激光-电磁超声方法进行了理论分析和实验验证研究,取得了钢坯试样中深度为40mm、尺寸为 $\varnothing 3\text{mm} \times 30\text{mm}$ 孔洞人工伤的检测数据,检测结果与实际孔洞位置之间的测量误差约为5%。结果表明,激光-电磁超声技术适用于金属材料内部缺陷的非接触式无损检测。

关键词: 测量与计量;非接触式无损检测;激光-电磁超声技术;金属材料

中图分类号: TN247 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.001

Noncontact nondestructive detection of inner metal defects based on laser-EMAT technique

ZHAO Yang^{1,2}, GUO Rui¹, SONG Jiang-feng¹, MA Jian¹, LIU Shuai¹, SUN Ji-hua¹, JIA Zhong-qing^{1,2}

(1. Institute of Laser Research, Shandong Academy of Sciences, Ji'nan 250014, China; 2. Research Center of Nondestructive Testing Engineering of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Theoretical analysis and experiments about laser-EMAT (electromagnetic-acoustic transducer) technique were carried out for the purpose of noncontact and nondestructive detection of inner defects of metal parts. The test slab contains a $\varnothing 3\text{mm} \times 30\text{mm}$ artificial hole about 40mm beneath the surface. The testing error was about 5%. The result shows that the laser-EMAT technique is suitable for noncontact and nondestructive detection of inner metal defects.

Key words: measurement and metrology; noncontact nondestructive detection; laser-EMAT technique; metallic materials

引言

无损检测技术是产品质量控制中不可缺少的基础技术。随着现代工业和科学技术的发展,产品的复杂程度越来越高,生产及服役环境也更为苛刻(如高温、高压、强腐蚀和辐射性等),特别是在航空航天、能源与材料工业等高新技术集中的领域尤为突出,使得当前常规无损检测技术的应用受到了极大的限制^[1]。因此,空气耦合压电超声技术、电磁超声(electromagnetic-acoustic transducers, EMAT)技术和激光超声技术等非接触式无损检测技术成为国内外无损检测人员研究的热点与突破方向^[2-6]。

激光超声技术是一种全新的无损检测技术,具有传统超声检测技术的所有优点,还具有非接触检

测、高精度、高灵敏度和高速度等特点,尤其适合于高温、腐蚀性、辐射性以及被检件具有较快的运动速度等恶劣环境下使用,且容易实现快速自动化扫描检测^[7]。该技术能够同时激发表面波、纵波和横波等多种波型,因此可以同时检测不同类型的缺陷。美国 Lockheed Martin 公司于 2000 年研制出 Laser-UTTM 激光超声检测系统,并最先用于 F-22 和 F-35 等战斗机中复合材料结构的 C-扫描成像检测。2008 年,加拿大工业材料研究所联合 Tecnar Automation 公司研制了 LUT 激光超声检测系统,包括 LUT-On-Line Tube Wall Thickness Gauge 和 LUIS-Composite Inspection,分别用于高温管道壁厚检测和复合材料检测。与此同时, Rudolph Technologies 公司研制了 MetaPULSE System 激光超声检测系统,用于薄层及多层膜的检测与性能表征,目前该设备仅限于实验室研究。

目前,国外将该技术应用于金属材料检测,其存在的主要问题是:利用光学干涉仪接收激光产生的超声信号时,检测灵敏度受样品表面状态影响较大。

基金项目:山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS 2011ZZ016)

作者简介:赵扬(1982-),男,助理研究员,博士,主要从事超声无损检测与评价的相关研究。

E-mail: andyzhao527@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-07-31;收到修改稿日期:2012-08-31

因此,研究适用于表面粗糙的金属材料缺陷信号的接收方法和相应的传感器,且能够保证具有较高的检测灵敏度,是解决该技术走向实际应用的主要途径^[8]。作者提出基于激光-电磁超声技术对金属材料内部缺陷进行无损检测的方法,该方法利用激光激发超声具有远距离操控且激发声波具有高频率、高分辨力的优点,并结合 EMAT 具有非接触式、受被检材料表面状态限制很小的特点,实现了金属材料内部缺陷的无损检测。

1 原理

1.1 超声波激励与接收原理

利用激光入射至金属材料表面所引起的热弹效应,激励出超声波(包括纵波、横波和 Rayleigh 波),当超声波在材料表面及内部传播时,质点发生位移,带正电荷的晶格在偏置磁场的作用下受力,产生交变电流。这个交变电流将导致被测导体的表层出现交变的磁场,而这个交变磁场漏出导体,在被测导体上方的线圈中感生出电动势。这样,就可以由 EMAT 传感器的检测线圈接收到^[9]。EMAT 传感器是利用电磁效应来接收金属材料中的超声波信号,其能量转换是在被测工件表面的趋肤层内直接进行的,所以不需要与工件接触,且不需要任何耦合介质。EMAT 传感器对于被测物体表面要求不高,而且可对高温物体和表面粗糙的物体直接检测。

1.2 内部缺陷检测原理

利用线型激光源可以在材料中同时激发出表面波、纵波和横波,其中纵波和横波可以用来检测材料内部的缺陷。线型激光源在材料中激发出的纵波及横波其声场指向性理论计算公式为^[10]:

$$A_1 \propto \frac{s_1^3 \cos\theta \sin 2\theta (s_1^2 - s_1^2 \cos\theta)^{1/2}}{4s_1^3 \cos^2\theta \sin 2\theta (s_1^2 - s_1^2 \cos\theta)^{1/2} + (s_1^2 - 2s_1^2 \cos^2\theta)^2} \quad (1)$$

$$A_1 \propto \frac{-s_1^4 \cos 2\theta \sin 2\theta}{s_1^4 (1 - 2\cos^2\theta)^2 + 4s_1^3 \cos^2\theta \sin 2\theta (s_1^2 - s_1^2 \cos\theta)^{1/2}} \quad (2)$$

式中 s_1 和 s_1 分别表示材料中纵波和横波的慢度, θ 为指向角。

图 1 中给出了 45# 钢中纵波与横波的声场指向性理论计算结果,对比可以发现,线型激光源激励的横波指向性更为集中,更利于缺陷检测,其声束与法线间夹角为 30° ~ 38°。

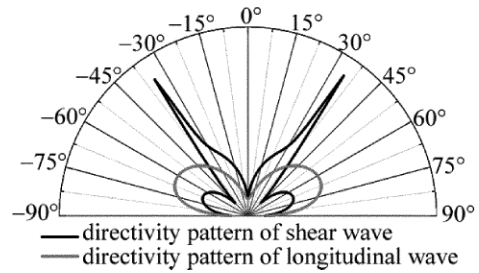


Fig. 1 Longitudinal and shear directivity patterns for a laser line source in 45# steel

利用线型激光光源可以激发出的横波进行检测时,根据电磁感应原理,当横波电磁超声传感器与被检材料表面之间的距离一定情况下,横波电磁超声传感器位于缺陷正上方时所接收到的缺陷衍射波信号幅度最大,该状态下的信号用于判定缺陷的水平位置及尺寸(见图 2)。深度 d 可以由下式计算出:

$$d = \frac{v^2 t^2 - l^2}{2vt} \quad (3)$$

式中 d 为缺陷深度, v 是钢轨中的横波声速, t 为接收到衍射波的时间, l 为线型激光光斑与横波电磁超声传感器之间的距离。

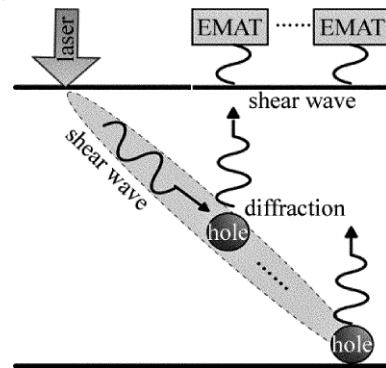


Fig. 2 Diagram of testing inner defect based on the method of laser ultrasonic diffraction

2 检测系统与试样

研究中采用的是作者自主设计的激光-EMAT 检测系统^[11],如图 3 所示。其中激光由脉冲重复频率为 1Hz ~ 20Hz 的 YAG 调 Q 激光器发射(波长为 1064nm),并由特定设计参量的透镜系统进行光束聚焦。信号接收采用自制的横波 EMAT 传感器完

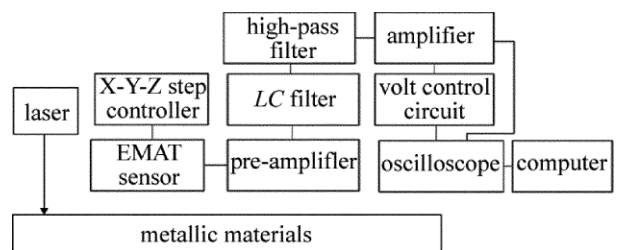


Fig. 3 Diagram of laser-EMAT detection system

成 并将信号送至所设计的前置放大器、LC 滤波器及压控电路进行滤波和逐级放大处理,而后由 Tek-tronix MSO-4054 示波器采集送至计算机处理。

作者选取了半圆柱形和长方体形两块 45# 钢为实验试样,尺寸分别为 $\varnothing 124\text{mm} \times 58\text{mm}$ 和 $290\text{mm} \times 290\text{mm} \times 45\text{mm}$,分别用于横波声场指向性测试和缺陷检测测试,在长方体形试样中加工了内部型人工工伤孔洞,深度为 40mm,尺寸为 $\varnothing 3\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。

3 结果与讨论

3.1 线型激光光源在 45# 钢中激励的横波声场指向性测试结果

利用所研制的激光-EMAT 检测系统对半圆柱形试样进行测试,相邻测试点间隔为 10° ,EMAT 传感器紧贴于试样表面。图 4 中给出了实验测试结果及理论计算结果,可以发现,实验测试曲线与理论计算曲线的变化趋势上基本一致,最大值之间存在一定的偏差,其原因可能是测试点间隔选择较大所致。

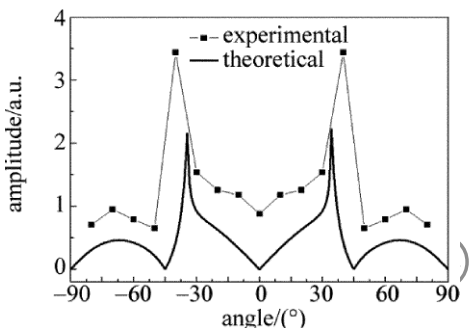


Fig. 4 Theoretical and experimental results of shear wave directivity in 45# steel

3.2 EMAT 传感器与试样表面间距 L_s 对检测灵敏度的影响

利用 3 维步进装置调整 EMAT 传感器的位置并对缺陷进行扫查,在接收到的缺陷衍射回波幅度最大值固定 EMAT 的水平位置,然后仅调节其与试样表面间距来研究 L_s 值对检测灵敏度的影响。图 5 中给出了 L_s 值分别为 1mm, 3mm, 5mm, 7mm 和 9mm 条件下的检测结果,其中通道 2 的信号为直接经放大器处理的结果,通道 3 的信号为经压控电路处理结果。

通过观察可以发现,在 $t = 29\mu\text{s}$ 处出现缺陷的衍射横波信号,当 $L_s = 1\text{mm}$ 时,通道 2 的缺陷衍射横波信号能量约为 4V,随着 L_s 值的增大,裂纹检测信号的幅值骤减,当达到 9mm 时,缺陷检测信号已经难以辨认,此种情况下可以适当提高前置放大器的放大倍数及滤波器的滤波放大范围以进行有限度

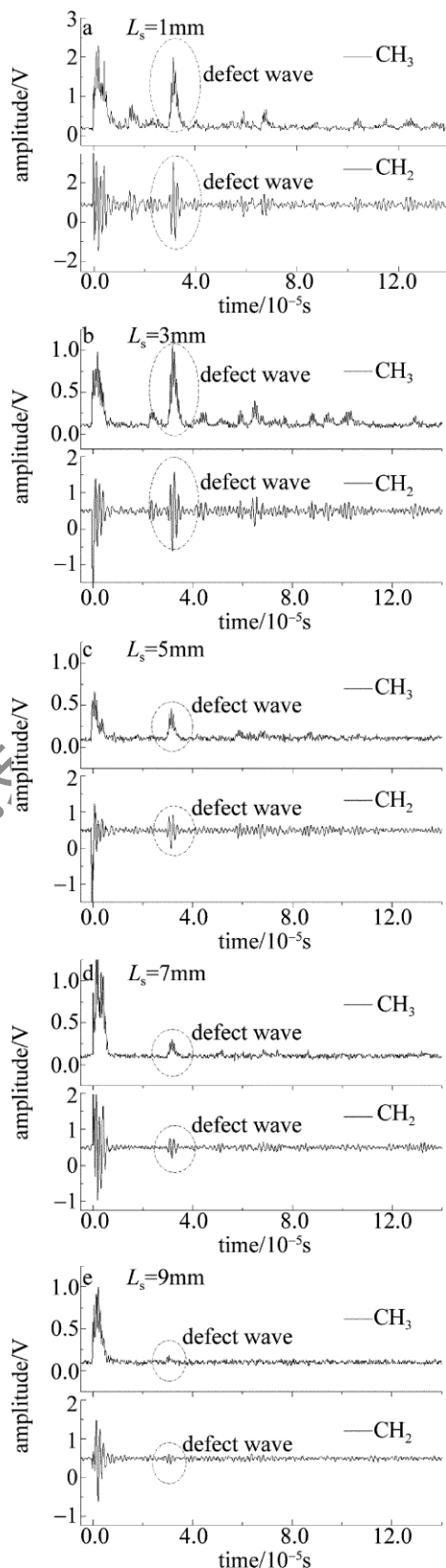


Fig. 5 Results of laser-EMAT testing at various L_s

的缺陷信号可识别度的改进。对不同 L_s 值测得的缺陷衍射横波信号幅度进行曲线拟合,见图 6,拟合结果为 $y = 8.0599e^{-0.683x}$,回归系数 $R^2 = 0.9958$ 。

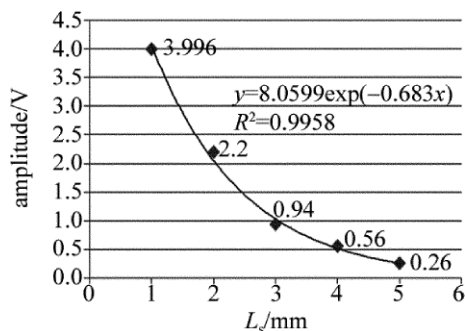


Fig. 6 Relation of lift-off value L_s and amplitude of defect signal

根据(3)式计算出缺陷的深度为38mm,与实际深度的相对误差为5%。

4 结论与展望

激光-电磁超声检测技术利用光声转化的原理在被检材料中激发超声波,利用基于电磁效应转化的EMAT传感器来接收超声信号,进而通过测量缺陷的衍射回波信号来确定材料中缺陷的位置。作者从理论计算及实验测试角度,讨论了激光-电磁超声检测技术在检测45#钢中的声场分析以及内部缺陷的检测结果。本文中采用的激光-电磁超声检测技术无需耦合剂,且不受被检材料形状及表面粗糙度的限制,在高温、腐蚀和高速运转的金属材料和结构的无损检测领域具有广阔的应用前景和巨大应用价值。

参考文献

[1] SHARPLES S D, STRATOUDAKI T, ELLWOOD R J, *et al.* La-

ser ultrasonics for detection of elastic nonlinearity using collinear mixing of surface acoustic waves [J]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1211: 287-294.

- [2] RENALDAS R, RYMANTAS K, EGIDIJUS Z, *et al.* Ultrasonic air-coupled testing of square-shape CFRP composite rods by means of guided waves [J]. NDT & E International, 2011, 44(7): 645-654.
- [3] VALLEN F H, DIXON S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet [J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 171-175.
- [4] MIRKO S, VALENTINA C, SIVIA C, *et al.* Pre-processing of data coming from a laser-EMAT system for non-destructive testing of steel slabs [J]. ISA Transactions, 2012, 51(1): 181-188.
- [5] AHMED A, MOHARMED A, DENIS M, *et al.* Laser ultrasonics detection of an embedded crack in a composite spherical particle [J]. Ultrasonics, 2012, 52(1): 39-46.
- [6] LIU J Sh, XU Zh H, GU G Q. Numerical study on improvement of signal-to-noise ratio of surface acoustic waves based on laser array [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 403-406 (in Chinese).
- [7] ROBERT E, GREEN J R. Non-contact ultrasonic techniques [J]. Ultrasonics, 2004, 42(1/9): 9-16.
- [8] POUET B, BREUCNOT S, CLEMENCEAU P. An innovative interferometer for industrial laser ultrasonic inspection [J]. AIP Conference Proceedings, 2005, 760: 273-280.
- [9] HUANG S L, ZHAO W, ZHANG Y S, *et al.* Study on the lift-off effect of EMAT [J]. Sensors and Actuators, 2009, A153(2/3): 218-221.
- [10] JOHANNA R, BERNSTEIN J, SPICER B. Line source representation for laser-generated ultrasound in aluminum [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(3): 1352-1357.
- [11] ZHAO Y, LIU W, GUO R, *et al.* Investigation on the principle of laser-EMAT technique and its application [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(3): 59-63 (in Chinese).