

文章编号 1004-924X(2006)05-0797-05

磁光/涡流实时成像检测系统的研究

程玉华,周肇飞,尹伯彪

(四川大学 制造学院激光技术应用研究所,四川 成都 610065)

摘要:介绍了磁光/涡流成像检测系统的基本工作原理及组成,给出了初步的实验结果,并对试验结果进行了相应的图像处理,实现了对表面及亚表面细小缺陷的可视化无损检测,克服了传统的涡流检测方法中探头尺寸相对较小而检测面积大,检测工作要消耗大量时间且不易操作的缺点,并具有探测结果可视化且直观易懂;易于保存;检测难度低;检测前不需要清除油漆等表面覆盖层,只需要保证待检测表面具有较好的反射性能;可对亚表面以及表面缺陷进行实时成像检测等优点。试验结果进一步验证了系统的正确性和重要性。

关键词:磁光效应;涡流;可视化;CCD;成像系统

中图分类号:TN206;TH878.3 **文献标识码:**A

Study on magneto-optical /eddy current imaging system for real-time testing

CHENG Yu-hua, ZHOU Zhao-fei, YIN Bo-biao

(*Institute of Applied Laser, School of Manufacturing Science and Engineering,
Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract: A magneto-optic/eddy current imaging system is used to test the defects at the surface or the subsurface of the metal samples in this paper. Excited by alternating current signals, alternating current magneto field is made from the excitation coil, transient eddy current is induced at the surface and subsurface of the metal sample, and the eddy current magnetic field can influence the induced magnetic field of the excitation coil. If there are some defects in the sample, they will vary the distribution of eddy current field, and then change the whole magnetic field. The polarization of the light will have a deflection angle when the light penetrates the optical rotation crystal film. Meantime, a magnetic-optic sensor placed parallelly to the sample surface can convert this change into optical intensity change. Finally the optical intensity change is received with CCD to realize visual nondestructive testing. The experimental results show that the system is feasible and appropriate.

Key words: magneto-optic effect; eddy current; visualization; CCD; imaging system

收稿日期:2005-09-18;修订日期:2006-08-22.

基金项目:四川省应用基础研究项目资助(No. 02GY029-022)。

1 引言

无损检测是检测技术的一个重要组成部分,是在不损伤材料和成品的条件下研究其表面和内部有无缺陷的方法。目前表面无损检测技术已经相对成熟,对材料内部缺陷的无损检测也有多种手段,但对精密表面以下的近表面却没有理想的检测手段。如^[1-2](1)磁粉探伤技术,它要求试件表面光洁度非常高,并且试件大小受设备限制,不能检验非铁磁性的材料,不能检验内部缺陷,难于确定缺陷深度;(2)射线探伤技术,实验费用高,设备笨重,调试麻烦,不能发现裂纹一类线性缺陷,并且射线对人体有害;(3)超声波探伤技术,它只能检验简单形状的试件,表面要求高,不能判定缺陷的性质,并且需要特殊的耦合剂。

涡流检测以其适用性强、非接触耦合、检测装置轻便、检测快速等优点而在冶金、化工、电力、航空、航天、核工业等部门得到较广泛的应用。磁光/涡流实时成像检测系统就是根据动态法拉第磁光效应和电涡流效应而提出的一种新的电磁涡流检测技术。

2 基本工作原理

2.1 电涡流效应^[3]

如图 1 所示,当载有交变电流的检测线圈靠近导电试件时,由于激励线圈磁场的作用,试件中会产生涡流,而涡流的大小、相位及流动形式受到试件导电性能的影响,同时产生的涡流也会形成一个磁场,这个磁场与线圈磁场方向相反,从而改变线圈的相关电参数,这就是涡流效应。图 2 是采用数字模拟技术对缺陷两侧涡流分布的仿真。对于相同的试件,化学成分、导电率等都是固定的,因而在一般情况下,涡流按照圆环状流动,如果在涡流流动的路径上有缺陷存在,其流动就会受到影响,涡流在缺陷附近将发生畸变,这一畸变的涡流将产生畸变的涡流磁场,并引起该处的垂直磁场分布变化,此时,磁光传感器将磁场的这种变化转换为相应的光强的变化,就可以判断出被检测试件的缺陷并实现实时成像。

2.2 动态法拉第磁光效应

法拉第磁光效应可简单解释为^[4]:线偏振光

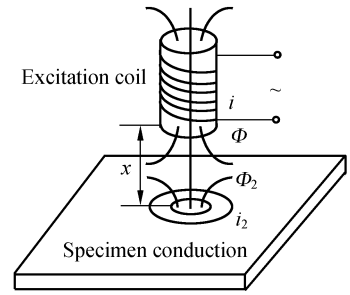


图 1 电涡流效应

Fig. 1 Eddy current effect

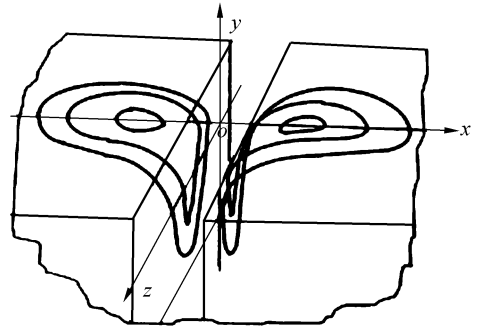


图 2 涡流在缺陷两侧的涡流场分布

Fig. 2 Distribution of eddy current field around defect

总可分解为左旋和右旋的两个圆偏振光,无外磁场时,介质对这两种圆偏振光具有相同的折射率和传播速度,通过 l 距离的介质后,对每种圆偏振光引起了相同的相位移,因此透过介质叠加后的振动面不发生偏转;当有外磁场存在时,由于磁场与物质的相互作用,改变了物质的光特性,这时介质对右旋和左旋圆偏振光表现出不同的折射率和传播速度。二者在介质中通过同样的距离后引起了不同的相位移,叠加后的振动面相对于入射光的振动面发生了旋转。示意图如图 3。

在磁光/涡流无损检测技术中,通常采用交变电场(如间歇式脉冲信号)来感应出交变磁场^[5],并用这个交变磁场来对通过磁光介质的线偏振光产生作用,而磁光介质在交变磁场作用下的法拉第效应与静态的法拉第效应有所不同。磁光效应不仅与晶体结构有关,还与晶体材料的磁性、入射光的波长、外磁场的强度和频率等参数有密切的关系。因此在应用法拉第磁光效应进行涡流检测时,要根据试件的性质,选择相应的光源、激励磁场的强度、频率及合适的磁光传感器等参量,以便

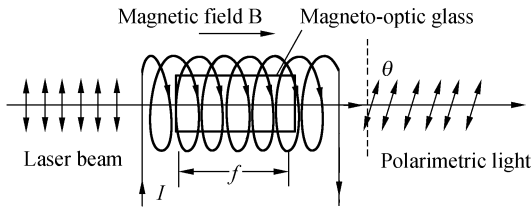


图 3 法拉第磁光效应示意图
Fig. 3 Faraday effect

在实验中获得最佳的检测效果。

根据以上两个原理可知^[6],只要在被测试件中的被测区域内产生直线流动、分布均匀的层状电涡流,此电涡流就会在空间感应出垂直于被测试件的磁场。如果试件中在该区域含有缺陷,则缺陷处电涡流的流动将发生变化,并引起该处的垂直磁场分布发生变化,此时,磁光传感元件将磁场的这种变化转换成相应的光强变化,即可对缺陷进行实时成像。

3 实验装置

本方案设计的原理如图 4 所示^[7-8]。实际装置中,采用半导体 He-Ne 激光器作为光源,激光经过偏振分光镜:一路为透射光,一路为反射光;透射光即实验中所需的单一方向的线偏振光。被测试件安放在凸透镜(目镜)靠近焦平面的位置上,线偏振透射光(偏振方向平行于纸面)通过目镜聚焦于被测试件表面,反射后再次经过透镜与原光线平行射出,然后经过 $1/2 \lambda$ 波片成为相对原透射光偏振方向旋转了 90° 的线偏振光(偏振方向垂直于纸面)。于是,光线再至偏振分光镜处就只能产生反射,而无法透射,这样既便于磁光传感器接收成像,还能转折光路,防止回光影响激光器稳定工作。线圈通电后,被测导体中的涡流产生包含缺陷信息的磁场,直接安放于被测试件表面的磁光薄膜在该磁场的作用下使反射回光的偏振面产生不同程度旋转,至偏振分光镜处被反射的程度也相应不同,再经偏振片滤除杂光干扰,成为有“亮”有“暗”的灰度图像,经过显微镜放大被 CCD 摄像头接收。最后,图像由计算机进行分析处理。

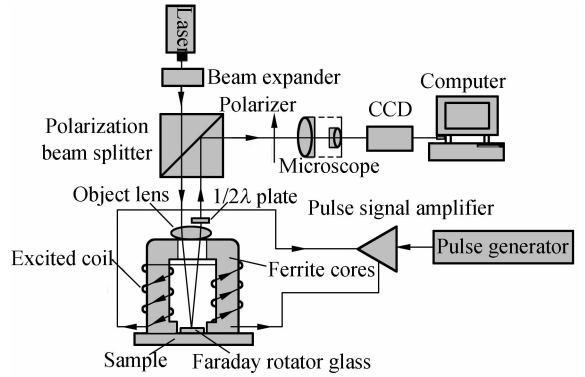


图 4 磁光/涡流成像检测系统原理图
Fig. 4 Principle configuration of magneto-optic/eddy current testing system

4 试验及试验结果

4.1 参数的选择

Faraday 旋转片是用液相外延生长的稀土石榴石型铁氧体单晶片研制而成。从测量的几种稀土石榴石法拉第旋转光谱可见,掺铋的稀土石榴石 $Y_{2.3}Bi_{0.7}Fe_5O_{12}$ 在波长 $1.55 \mu m$ 时 F 值为 $404^\circ/cm$,不掺铋的 $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) 晶体其值为 $216^\circ/cm$,前者法拉第旋转角要大得多^[9]。在应用法拉第磁光效应进行涡流检测时,应选择适合的晶体构成磁光传感器,宜在可能条件下选取大电流、强外磁场等参数。

试验线圈采用放置式线圈,放置式线圈在试件表面被检部位感应产生的涡流成圆形,对于缺陷方向的相应敏感度低,即受裂纹取向的影响小,加上线圈中心缠有铁氧体磁芯,利于集中磁场能量,因此检验灵敏度高。

除估算外,需在实验选取最佳的参数。

本试验使用的是:

磁光元件材料为 $Y_{2.3}Bi_{0.7}Fe_5O_{12}$, 尺寸为 $\phi 15 mm \times 1 mm$;

激光器功率 12 mW(扩束型),波长 650 nm;

激励线圈用 0.5 mm 的紫铜丝绕制;

线圈匝数	激励频率	线圈电压	线圈电流
300 匝	400 Hz	40 V	3.8 A

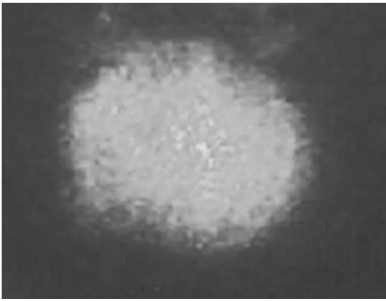
4.2 试件的选择

试件为:尺寸为 $80 mm \times 50 mm \times 5 mm$ 的

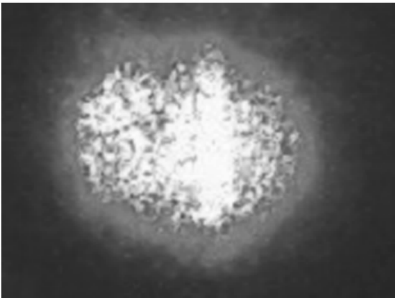
铜片,表面采用线切割加工出槽长 15 mm,槽宽 0.4 mm,深度为 4 mm 的凹槽缺陷,在凹槽表面覆盖一层厚度为 0.5 mm 的铜片,铜片表面经过细磨处理,非常光滑,避免其他缺陷成像干扰。

4.3 试验结果及处理

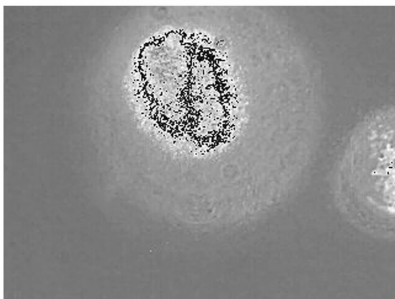
线圈不通电,用 CCD 摄像头记录正对缺陷孔位置处的光学成像,将这个图像作为参考图像。经过读取图像,分析灰度值等处理,可认为光斑中不含有明显缺陷。然后,给线圈通以间隙式脉冲激励,经过一段时间,获得磁光图像,经过图像处理,与参考图像相比较,可认为光斑中含有一个凹形缺陷。实验结果如图 5(a)、(b)所示。



(a) 线圈未通电,表面下有凹槽的光学成像
(a) Optical image of groove without excitation signal



(b) 线圈通电后,正对表面下凹槽位置的磁光成像
(b) Magneto-optical image



(c) 与边缘轮廓比较的图像
(c) Image of comparing with edge figure



(d) 二值化图像

(d) Binary image



(e) 边缘轮廓图像

(e) Image of edge figure



(f) 处理后的图像

(f) Processed image

图 5 成像和图像处理

Fig. 5 Imaging and image processing

所获的磁光图像中存在大量的干扰,如:光发送的变化,少数石榴石磁畴变化、各种噪声。直接从所获得的磁光图像中很难区分出哪个是完好的、哪个是有缺陷的,因此,采用图像处理技术以增强磁光成像的效果、提高检测可靠性和提高图像检测分辨率是十分必要的。本系统根据实时的要求,选用执行效率高的 VC 作为开发工具^[1],设计了磁光图像的处理系统。图像处理系统的主要功能是信号采集和处理,通过对采集的图像进行增强放大以及滤波处理,提取有用的测量(缺

陷)信息,得到缺陷的轮廓。具体的处理过程如图5(c)、(d)、(e)所示,得到最终的结果如(f)。

本系统采用图像处理技术以增强磁光成像的效果、消除图像的噪声、提取有用的图像信息、使(缺陷)图像轮廓清晰,这就大大提高了 MOI 检测(缺陷)的可靠性和图像分辨率。

5 结束语

本文主要介绍了磁光/涡流成像检测系统的基本工作原理及组成,给出了初步的实验结果,并

对试验结果进行了相应图像处理,实现了对表面及亚表面细小缺陷的可视化无损检测。磁光/涡流成像检测系统把激光技术应用于涡流检测中^[12-13],克服了传统的涡流检测方法中探头尺寸相对较小而检测面积大,检测工作要消耗大量时间且不易操作的缺点,并具有探测结果可视化且直观易懂;易于保存;检测难度低;检测前不需要清除油漆等表面覆盖层,只需要保证待检测表面具有较好的反射性能;可对亚表面以及表面缺陷进行实时成像检测等优点,具有相当重要的现实意义。

参考文献:

- [1] IBRAHIM E. Modeling of magneto-optic eddy current inspection of hidden flaws in aircraft skins[C]. 16th National Radio Science conference, NRSC'99, Ain Shams University, Cairo, Egypt, 1999; 23-25.
- [2] 陶旺斌,周在杞. 电磁检测[M]. 北京:航空工业出版社, 1995.
TAO W B, ZHOU Z Q. *Electro magnetism testing* [M] Beijing; Aviation Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [3] 徐可北,周俊华. 涡流检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
XU K B, ZHOU J H. *Eddy current testing* [M] Beijing; Mechanical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [4] DAHLBERG E D, PROKSCH R. Magnetic microscopies: the new additions[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 200(8): 720-728.
- [5] 邬冠华,任吉林,吴彦. 磁光/涡流成像技术中的法拉第磁光效应的研究[J]. 无损检测, 2001, 23(10): 415-420.
WU G H, REN J L, WU Y. Research on the Faraday magneto-optic effect used in magneto-optic/eddy current imaging technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2001, 23(10): 415-420. (in Chinese)
- [6] 戴蓉. 磁光涡流成像—一种新的无损检测技术[J]. 无损检测, 1999, 21(12): 54-56.
DAI R. Magneto-optic/ eddy current imaging -A new NDT technique[J]. *Nondestructive Testing*, 1999, 21(12): 546-548. (in Chinese)
- [7] 艾延宝,金永君. 法拉第磁致旋光效应及应用[J]. 物理与工程, 2002, 12(5): 50-51.
AI Y B, JIN Y J. Faraday magneto/optical rotation effect and its application[J]. *Physics and Engineering*, 2002, 12(5): 50-51. (in Chinese)
- [8] RADTKE U, ZIELKE R, RADEMACHER H G. Application of magneto-optical method for real-time visualization of eddy currents with high spatial resolution for nondestructive testing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(3): 251-268.
- [9] NOVOTNY P, MOROZOV M. On the application of magneto-optic films in NDE[J]. *Nondestructive Testing & Evaluation International*, 2002, 35(4): 227-232.
- [10] 赵渊博,赵慧洁. 挠性接头薄筋厚度在线测量图像分割方法研究[J]. 光学精密工程 2005, 增(13): 153-157.
ZHAO Y B, ZHAO H J. Study on image segmentation method for on-line measurement of tendon thickness for flexible connector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, S1(13): 153-157. (in Chinese)
- [11] SHIH W C L, FITZPATRICK G L, COLES D E. The magneto-optical imager: A 2001 perspective[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2001, 43(12): 814-817.
- [12] 任吉林,吴彦,邬冠华. 磁光成像技术在航空构件涡流检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2001, 26(12): 36-38.
REN J L, WU Y, WU G H. The application of magneto-optic imaging technology in testing aircraft components [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001, 26(12): 36-38. (in Chinese)
- [13] 李玉和,李庆祥,王东生. [J]. 光学精密工程, 2005, S1(13): 65-68.
LI Y H, LI Q X, WANG D SH. Design and study on a novel micro-detecting device for superfinish surface scratch [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, S1(13): 65-68. (in Chinese)

作者简介:程玉华(1979—),男,山东潍坊人,在读博士,主要从事测试计量技术及仪器方面的研究(偏重于激光应用方面的研究)。cyh365@xeah.net