

文章编号: 0258-7025(2005)06-0848-04

精细表面下细小缺陷的磁光涡流成像实时探测

朱目成^{1,2}, 周肇飞², 贺春光²

(¹西南科技大学制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010
²四川大学制造学院激光应用技术研究所, 四川 成都 610065)

摘要 磁光涡流成像检测装置可实现精细表面下细小缺陷探测。在该装置中,通过物体表面上方的交流激励线圈实现传统的涡流感应,涡流所感应的磁场由法拉第效应来检测。为了实现表面下缺陷的检测目标,激光穿过安放在激励线圈中的特殊的磁光晶体,激光偏振方向在晶体中的旋转大小取决于检测区域磁场的大小,缺陷将使检测区域磁场分量发生变化并使偏振光的旋转角发生相应变化,通过一光学装置转化成“明”或“暗”图像,该光学装置由传统的显微镜、照明系统、偏振器和 CCD 图像传感器组成。给出了初步的实验探测结果。

关键词 测量; 无损检测; 涡流探伤; 磁光效应; 缺陷; 成像

中图分类号 TH878; TN247 **文献标识码** A

Real-Time Testing for Fine Defects beneath Precision Surface Using Magnetic-Optic Imaging Technique

ZHU Mu-cheng^{1,2}, ZHOU Zhao-fei², HE Chun-guang²

(¹ School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science & Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China
² Institute of Applied Laser, School of Manufacturing Science and Engineer, Sichuan University,
Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract A new, laser supported, magneto-optic/eddy current imaging technique is introduced for fine defects testing beneath precision surface. In the experimental setup, the induction of eddy currents is conventionally performed by an alternating current excitation coil above the object surface. The magnetic field induced by the eddy currents is detected by using Faraday effect. For this target, a laser beam is passed through a special magneto-optic crystal integrated in the excitation coil. The polarization direction of laser beam is rotated in the crystal depending on the local magnetic field. The area distribution of rotation angle caused by the defects is transformed into “light” or “dark” picture using an optical setup, which comprises a conventional microscope, a lighting, a polarimeter, and a CCD sensor.

Key words measurement; nondestructive testing; eddy current testing; magneto-optic effect; defect; imaging

1 引言

近年来由于激光和光电技术在信息与军事方面的飞速发展,出现了探测精细表面下细小缺陷的难题。一方面表面质量愈来愈受到重视,因为强激光、高灵敏度光电探测装置等都离不开超精细反射面;另一方面,集成电路技术与精密机械制造技术相结合的微电子机械系统(MEMS)已经引出了微型飞

行器、微型卫星、微型机器人等一系列新技术,为了使这些技术能批量生产,形成商品,需要齐全的质量检测手段。目前表面无损检测技术已经比较成熟,但对精细表面下的亚表面却没有理想的检测手段。

对精细表面下(0.5~7 mm)细小缺陷的检测,传统的方法如渗透法,只适合于检测表面开口缺陷; x, γ 射线照相法、超声波检测法等适合于探测深层

收稿日期: 2004-05-31; 收到修改稿日期: 2004-09-21

基金项目: 四川省应用基础研究(02GY029-022)资助项目。

作者简介: 朱目成(1964—),男,四川成都人,博士研究生,主要从事光电检测与传感器的教学科研工作。

E-mail: zmcheng@swust.edu.cn

内部缺陷；磁粉检测和电磁感应检测，影响因素复杂，检测分辨率低^[1,2]。磁光涡流成像(MOI)技术是一种新兴的涡流无损检测方法^[3~7]，它综合应用了法拉第电涡流效应与法拉第磁致旋光效应，可实现对亚表面细小缺陷的可视化无损检测。

2 基本原理

当一束线偏振光通过非旋光性介质时，如果沿着光的传播方向加一外磁场，则光通过介质后，它的振动面会偏转一角度 θ ，这就是法拉第磁致旋光效应或法拉第磁光效应，如图1所示^[8,9]。通过对自然旋光现象和法拉第磁光效应的研究可以得知，介质的自然旋光效应主要与晶体的微观螺旋结构有关，而磁光效应不仅与晶体结构有关，还与晶体材料的磁性、光的波长、外磁场的强度和频率以及磁化强度等参量有密切的关系。

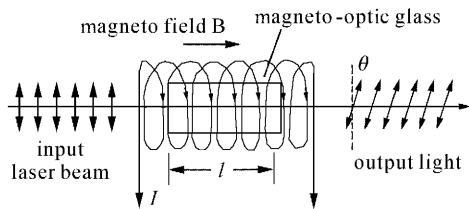


图1 法拉第磁光效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Faraday effect

法拉第旋转角为

$$\theta = V(B + \gamma M)l, \quad (1)$$

其中 γ 为磁光系数， M 为磁化强度， B 为外磁场强度， l 为介质中的光程， V 为费尔德常数，其单位为 rad/A 。

对于铁磁或者亚磁介质， $B \ll \gamma M$ ，法拉第旋转角 θ 与磁化强度成正比；对于顺磁或者抗磁介质，磁场不很强时， $B \gg \gamma M$ ， θ 的大小由磁场强度决定。为了获得较大的偏转，所用晶体材料还需具有较大的费尔德系数。掺Ce的钇铁石榴石(Ce:YIG)具有巨磁光法拉第旋转效应，是一种最具应用前景的新型磁光材料^[10,11]。

根据涡流检测原理可知，只要在被测试件中的被测区域内产生直线流动和分布均匀的层状电涡流，此电涡流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发生变化；此时，便可采用与该磁场平行放置的磁光传感元件将磁场的这种变化转换成相应的光强度的变化，即可对缺陷进行实时成像。

3 实验装置

图2是实验装置的原理图。半导体激光器发出的光，经扩束、准直后经过起偏器 P_1 成为线偏振光，然后由偏振分光镜PBS分成两路，透射光经过 $\lambda/4$ 波片成为圆偏振光，经过法拉第磁光元件(PRG)从被测导体表面反射回来后再一次经过 $\lambda/4$ 波片，成为相对透射光偏振方向旋转了 90° 的线偏振光，该偏振光在偏振分光镜处产生反射，经检偏器 P_2 和透镜组被CCD图像传感器接收，缺陷的图像由计算机显示和处理。实验装置中的法拉第晶体安装在激励线圈内以提高效率，为了能对被测导体内感应涡流的磁场更敏感，法拉第晶体应该无限接近(理论上)被测导体。该装置的核心部件一是磁光元件，二是适当的光学成像系统，以完成对缺陷的成像。对于磁光元件，要求具有以下性能：

1) 传感元件具有单轴磁性异向特性。在外磁场作用下，垂直于传感元件表面方向介质的磁化强度大，而平行于传感元件表面方向介质的磁化强度小。分别将这两个方向称为传感元件磁化的“易轴”和“硬轴”。

2) 当磁化“易轴”方向的磁场减小为零后，磁光传感元件仍将保持已有的磁化强度不变，即磁光传感元件具有“记忆”特性。

3) 传感元件材料较其他光学玻璃有更高的法拉第旋光率 θ_f 。这取决于材料成分和晶体结构，磁光传感元件的法拉第旋光率可为 $(20000^\circ \sim 40000^\circ)/\text{cm}$ ^[10,11]。

如果一束线性偏振光垂直入射并穿越该磁光传感器，光的偏振面将发生旋转，旋转的角度称为法拉

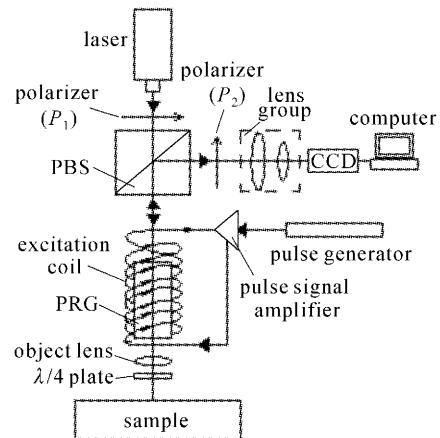


图2 磁光涡流成像检测原理图

Fig. 2 Principle configuration of magneto-optic eddy current imaging testing device

第旋转角,由下式给出:

$$\theta = \frac{\Theta_f(\mathbf{k} \cdot \mathbf{M})h}{|\mathbf{k}| |\mathbf{M}|}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{k} 为通过传感器的入射光波矢量, h 为传感器的厚度, \mathbf{M} 为薄膜介质的磁化强度矢量, $|\mathbf{k}|$, $|\mathbf{M}|$ 分别为矢量的模。注意, \mathbf{M} 的方向总是“向上”或“向下”,并一直沿磁化的“易轴”方向。

如果一束线性偏振光垂直入射并穿过有恒定的磁化强度 \mathbf{M} 作用的磁光传感器,并反射经过同样的区域,那么,相对于磁化强度矢量 \mathbf{M} 的法拉第旋转角的积累与 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{M}$ 成正比。即

$$\Delta(\mathbf{k} \cdot \mathbf{M}) = \mathbf{k} \cdot \Delta\mathbf{M} + \mathbf{M} \cdot \Delta\mathbf{k} = -2\mathbf{k} \cdot \mathbf{M}$$

因为 $\Delta\mathbf{M} = 0$, $\Delta\mathbf{k} = -2\mathbf{k}$, 因此,在图2反射光路安排下,法拉第旋转角将是原来的2倍。这就增强了缺陷的磁光涡流成像的效果。

4 测试示例

4.1 参量设定

在磁光涡流成像检测中,选择适当的晶体材料的磁光传感元件、光波波长、外磁场强度和频率等参量,以获得最佳的检测效果。实验中的激光器为:功率12 mW(扩束型)半导体激光器,波长650 nm,红光,光斑直径为10 mm;磁光元件材料为 $Y_{2.3}Bi_{0.7}Fe_5O_{12}$, 尺寸为 $\phi 16 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$;激励线圈用0.4 mm的紫铜丝绕制,线圈的电气参量如表1所示。

表1 激励线圈的参量

Table 1 Parameter of excitation coil

Turns of excitation coil	1000
Excitation frequency /kHz	10
Coil voltage /V	10
Coil current /A	2.5

4.2 试验样件

用一块尺寸为 $120 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的航空铝合金作为试件;样件正面有三个钻孔缺陷(盲孔),孔与孔之间以及孔与边缘之间的间隔均为5 mm,如图3所示。孔的直径分别为1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm。孔深分别为9.5 mm, 8.5 mm, 8.0 mm。铝件表面经精细加工,表面光洁,具有良好的反光性能。因为检测装置采用了反射光路安排(以增大法拉第旋转角,是原来的2倍),待测件表面质量好,成像中的噪声成分就少,对缺陷的检测准确性就高,这就增强了缺陷的磁光涡流成像的效果。

钻孔标样的主要优点是简单,此类标样的制作和复制花费少,不需用昂贵的工具或机械,一个标样同另一个标样的响应一致性相当高,一般在百分之几以内,对缺陷检测敏感。

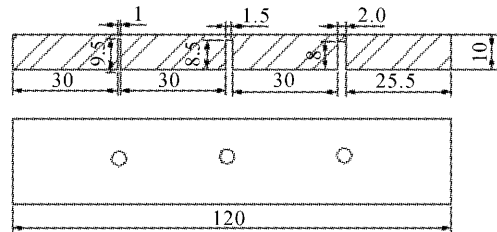


图3 测试样件

Fig. 3 Specimen tested /mm

4.3 测试结果

实验测试结果如图4所示。用CCD摄像头记录线圈没有通电时航空铝合金背面正对缺陷孔位置的光学成像如图4(a)所示;然后,给线圈通以间隙式脉冲激励(方波),在样件上扫描,对于表层下深度分别为0.5 mm, 1.5 mm, 2.0 mm的孔缺陷扫描得到图4(b), (c), (d)三幅图像,从图中可明显看出,图像的光斑中含有一个圆形缺陷,且可以初步看出,在相同频率的激励下,缺陷孔距表面越近,其磁光成像就越是清晰(图4未经过图像处理)。

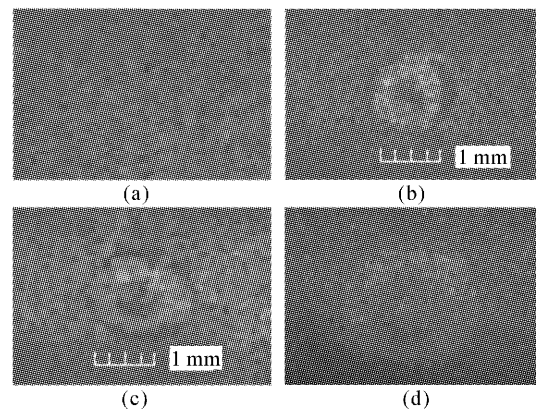


图4 缺陷的光学成像与磁光涡流成像

Fig. 4 Optical imaging and magneto-optic/eddy current imaging of defects

5 结 论

新型磁光涡流成像检测装置综合利用法拉第磁光效应和电涡流效应,将缺陷引起的磁场变化转化为激光偏振光偏振面的变化,经过检偏器后再转换为光的强度变化,从而产生了“明”或“暗”的缺陷图形。这种方法不仅保持了传统涡流探伤方法的优

点,而且用激光-磁光传感元件取代了测量线圈,简化了传统涡流检测中的信号处理问题,实现了对亚表面细小缺陷的可视化无损检测。

磁光涡流成像检测的深度主要取决于涡流的渗透深度(与矩形脉冲信号频率有关),检测(成像扫描)面积的大小取决于激光光斑的直径大小。该检测技术特别适用于被检面积大(如飞机机身铝组件、钢和钛合金铝结构)的表层及亚表层缺陷(如腐蚀、靠近铆钉处的疲劳裂纹)检测,可实现微纳米级的精度测量^[3,4]。

参 考 文 献

- 1 Ren Jilin. Electromagnetism Nondestructive Testing [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1989
任吉林. 电磁无损检测[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989
- 2 Xu Baiqiang, Ni Xiaowu, Shen Zhonghua *et al.*. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the plate material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 621~625
许伯强,倪晓武,沈中华等. 激光激发板状材料中超声波的有限元数值模拟[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 621~625
- 3 U. Radtke, R. Zieke, H. G. Rademacher *et al.*. 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**: 251~268
- 4 D. K. Thome, G. L. Fitzpatrick, R. L. Skaugset. Aircraft corrosion and crack inspection using advanced magneto-optic imaging technology[C]. *SPIE*, 1996, **2945**: 365~373
- 5 Dai Rong, Yan Zhanqiu, You Fenghe. Magneto-optic/eddy current imaging — A new NDT technique[J]. *NDT*, 1999, **21**(12): 546~548
戴蓉,燕战秋,游凤荷. 磁光/涡流成像——一种新的无损检测技术[J]. 无损检测, 1999, **21**(12): 546~548
- 6 Rinke J. Wijngaarden, K. Heeck, M. Welling. Fast imaging polarimeter for magneto-optical investigations[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(6): 2661~2664
- 7 Pavel Novotny, Maxim Morozov, Lubomir Hudec. On the application of magneto-optic films in NDE[J]. *NDT & E International*, 2002, **35**: 227~232
- 8 Ai Yanbao, Jin Yongjun. Faraday magneto-optical rotation effect and its application[J]. *Physics & Engineering*, 2002, **12**(5): 50~51
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
- 9 Qian Dongliang, Chen Liangyao, Zheng Weimin *et al.*. A method to measure completely the magneto-optical Kerr and Faraday effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 474~480
钱栋梁,陈良尧,郑卫民等. 一种完整测量磁光克尔效应和法拉第效应的方法[J]. 光学学报, 1999, **19**(4): 474~480
- 10 M. Shamonin, T. Beuker, P. Rosen *et al.*. Feasibility of magneto-optic flaw visualization using thin garnet films[J]. *NDT & E International*, 2000, **33**: 547~553
- 11 Zhang Qingli, Yin Shaotang, Wang Aihua *et al.*. Research progress of the laser crystal GGG species [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2002, **19**(6): 481~484
张庆礼,殷绍唐,王爱华等. GGG系列激光晶体研究进展[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(6): 481~484