

应用激光偏振干涉法研究铝试件阳极氧化后 氧化铝膜的厚度变化

陆 鹏

(中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 上海 200090)

摘要:采用激光偏振干涉法研究金属铝在阳极氧化过程中表面的氧化铝膜的厚度变化。对传统的激光偏振干涉光路进行改造,建立了一套实时观测和记录金属铝表面氧化处理过程的试验系统。从试验记录和干涉条纹分析可以直接得到氧化过程中铝表面产生氧化铝膜厚度变化的大小。

关键词:阳极氧化; 激光偏振干涉; 沃拉斯顿棱镜; 表面处理

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2011)11-0010-03

Study on Thickness Change of Alumina Protective Layer after Anodic Oxidation Treatment by Laser Polarizing Interferometry

LU Peng

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: This paper presented a study of thickness change of aluminium surface under anodic oxidation treatment by the way of laser polarizing interferometry. A reconstruction was carried out with traditional laser polarizing interferometry arrangement to establish a set of real-time experimental system, which could inspect and record the course of test. According to the test record and analysis of interference fringe, the thickness change of aluminium surface under the process mentioned above would be gained directly.

Keywords: Anodic oxidation treatment; Laser polarizing interferometry; Wollaston prism; Surface disposal

铝及铝合金因加工成型容易,比其它金属材料轻,应用越来越广泛。而铝及铝合金化学性质非常活泼,必须进行一定防护处理:如电镀、喷涂有机保护和氧化处理。其中,氧化处理^[1]是最容易实现以及最常用的防护处理措施之一。

铝及铝合金的氧化分为化学氧化和电化学氧化(俗称阳极氧化^[2])。阳极氧化处理是使铝制品获得抗腐蚀性和装饰性表面的方法,在工业上广泛使用。该工艺像电镀的逆过程:即工件(铝片)为电解电路的阳极,通电时金属进行内部的反应,以增加通常存在于铝表面很薄的氧化铝保护层(膜)的厚度。

阳极氧化应用广泛,在以下主要特性上铝的阳

极氧化综合性能优于化学氧化:

(1) 耐蚀性 表面硬质氧化膜较厚,质地更加致密,故耐腐蚀性更强。

(2) 硬度和耐磨性 最高可达 HV500,硬度和耐磨性是一致的。

(3) 装饰性 既保持金属的光泽和质感,又可以染色成丰富多彩的彩色。

将铝片试件放在适当的电解液中,将其作为阳极,通过电流使铝的表面得到一层作为保护的氧化膜,由于温度、电解液浓度、时间长短等因素影响,可能造成表面氧化不均匀。文章针对这一问题展开研究。

光学干涉法是非接触式观测,具有灵敏度高的特点($0.5 \mu\text{m}/\text{条纹}$),光线传播又十分迅速,适宜用于研究透明介质场(空气、液体等)中待测件的某一瞬间的变化。近年来,这一方法作为一门测量和研

收稿日期:2011-04-21

基金项目:残余应力沿深度分布测试仪的研制(国家自然科学基金 10772117)

作者简介:陆 鹏(1977—),男,高工,主管设计师,研究方向为柴油机结构与强度。

究透明流场中温度和浓度分布的新技术,在相关领域已获得了广泛的应用。

文章对传统的渥拉斯顿棱镜(Wollaston)偏振相移干涉光路加以改造,并与一个阳极氧化单元相结合,发展出一套用来检测铝表面氧化保护层厚度变化的试验系统。Wollaston 棱镜是偏振相移干涉中的关键光学元件,光线经过 Wollaston 棱镜被分成参考光和物光,同时经过待测流场,两者同轴干涉,所以具备很好的干涉性,周围环境对干涉条纹造成的干扰相比其它干涉方法要小。在传统的偏振相移干涉光路中放置 CCD 图像采集系统,可以实时观测并采集反映氧化铝膜厚度变化的条纹信息。再对此条纹进行分析,可实现铝阳极氧化过程中表面氧化铝膜厚度变化的精确计算。

1 试验装置及原理

1.1 试验系统光路

试验光路如图 1 所示,所有元件放置在自振频率<5 Hz 的自平衡防振台上。光源为单纵模线偏振固体泵浦激光器,波长为 532 nm。激光器 1 发出的激光,在经过半球扩束镜 2 后,被 $\phi 150$ mm 非球面准直镜 3 转变为平行光,经同视场直径的偏振片 4 及四分之一波片 5,然后通过 Wollaston 棱镜 6,再经过四分之一波片 7 和偏振片 8,形成干涉光栅,再经过透明窗口 9,穿过待测样品(铝片)浸泡的槽液区域 10,投射在铝片 11 上。铝片通电前的条纹为均匀密度直线型的干涉条纹,被 CCD12 采集到计算机中进行存储。然后,给铝片通电进行阳极氧化处理,表面由于氧化层厚度的变化,上述干涉条纹将随之发生变化,同样再被 CCD12 采集到计算机中。比较通电前后(氧化前后)的条纹,从而分离出铝表面很薄的氧化铝膜的厚度变化量。

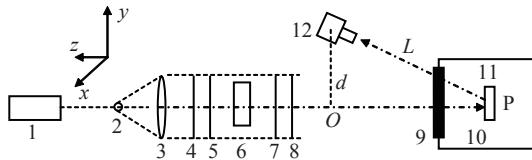


图 1 金属铝氧化表面变形测量系统

图 1 中虚线及箭头代表干涉变形条纹最终被 CCD 采集的过程。透明窗口的左边朝向光源称之为前表面,另一面则为后表面,前后表面需要根据光源的波长进行处理,为了增加透过率,需在其表面真空镀增透膜。第一片偏振片 4 为起偏镜,第二片偏

振片 8 为检偏镜。此时可在试件 11 上产生均匀的直线型的光栅干涉条纹,条纹的密度及方向可由检偏镜的旋转来调节。当通电氧化时,试件 11 表面的条纹将发生变化,并通过连接到计算机上的 CCD 摄像头记录下来。

1.2 偏振干涉原理

一束光入射到 Wollaston 棱镜上,会分裂成两束偏振方向垂直的光,一束寻常光(O 光),另一束为非常光(E 光)^[3],如图 2 所示,分裂角可近似由下式确定:

$$\epsilon = 2\sin^{-1}[(n_o - n_e)] \cdot \operatorname{tg}\alpha \quad (1)$$

式中 n_o, n_e 是 Wollaston 棱镜对 O 光和 E 光的折射率,现在的 Wollaston 棱镜常用人工生长水晶制造, $n_o > n_e$,被分裂的两束光在经过后面的偏振片 8 后,将在铝片上产生一系列的载波条纹,条纹间距为:

$$s = \frac{\lambda f}{\epsilon u} \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长; f 为成像透镜的焦距; u 为 Wollaston 棱镜离成像透镜焦点的距离。根据式(2),可以调节载波条纹的疏密。一般条纹密,则灵敏度提高。但是受限于 CCD 的像素大小及分辨率,不能无限密,需要试验摸索。

铝片通电前,上面的条纹为均匀的直线条纹,如图 3(a),CCD 接收的条纹图灰度^[4]分布为:

$$I(x, y) = I_0 \{1 + \gamma(x, y) \cos[2\pi f_0 + \Phi(x, y)]\} \quad (3)$$

式中 I_0 代表背景光强; $\gamma(x, y)$ 为对比度; $\Phi(x, y)$ 为位相函数; f_0 为载波空间频率。

对式(3)进行傅里叶变换,可得到位相 $\Phi(x, y)$,再对于铝片通电后的条纹同样处理,将得到位相 $\Phi^1(x, y)$,将两者相减得到由于通电产生变形的位相变化^[5]:

$$\Delta\Phi(x, y) = \Phi^1(x, y) - \Phi(x, y) \quad (4)$$

根据文献^[5]的计算公式,可以求得铝片上每点的变形信息,即为厚度变化量:

$$z = \frac{L \cdot \Delta\Phi(x, y)}{2\pi f_0 d + \Delta\Phi(x, y)} \quad (5)$$

式中 L 为 CCD 中心到待测铝片的距离; d 为 CCD 中心到测试光路轴心投影点的距离。由图 1 可以看出,在试验过程中,形成的干涉条纹所经过的是同一路径,为同轴干涉。这样设计可以减少试验过程中

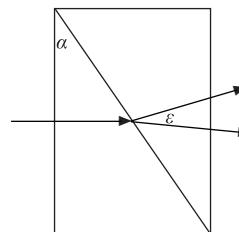


图 2 Wollaston 棱镜分裂角

系统对震动和空气扰动的敏感度。

考虑到光线透过液体及两次穿过透明视窗折射率及光程影响,式(5)修正为:

$$z = \frac{L \frac{n_p}{n_1} \cdot (1 + \cos\theta) \cdot \Delta\Phi(x, y)}{2\pi f_0 d + \Delta\Phi(x, y)} \quad (6)$$

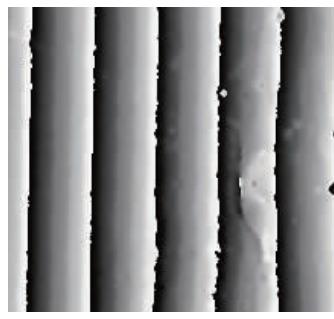
式中 n_p 为电解液对真空的相对折射率; n_1 为空气相对真空的折射率; θ 为图像采集方向与试件表面法线的夹角。总之,试验通过通电前后条纹的变化量来获取 z 的变化量,即为铝片在电压下,表面氧化铝膜厚度的变化量。

2 试验及结果分析

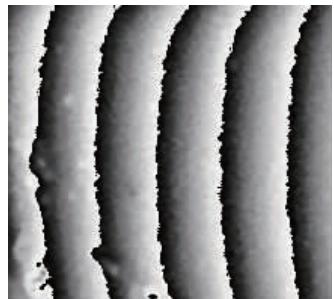
试验装置的布置如图 1 所示。其中,待测样品为通电的铝片。在进行试验观测之前,应用白光对光路的成像特性进行调节,并调节 CCD 镜头的焦距和对比度,以获得最好的清晰度。应用本系统,研究恒定槽液电压、温度等条件下氧化铝膜厚度与氧化时间的关系。

试验所用 CCD 为 JAI A1 型,该 CCD 可以实现对试验过程的监测,还可以通过它连续采集图像来记录完整的试验过程。

试验中首先采集初始条纹,根据式(3),计算出氧化开始前的初始位相,见图 3(a)。同样,当氧化过程中某一时刻,采集变形条纹,也可获得氧化产生



(a) 加电压前



(b) 加电压后

图 3 铝片上的条纹位相图

变形的条纹位相,见图 3(b)。根据式(4),两者相减即可得到由于氧化产生的位相变化量。再根据式(6)最终得到阳极氧化时铝表面氧化铝膜厚度改变量,见图 4。 x 和 y 坐标显示了铝片的位置及尺寸, z 为氧化铝膜厚度改变量。

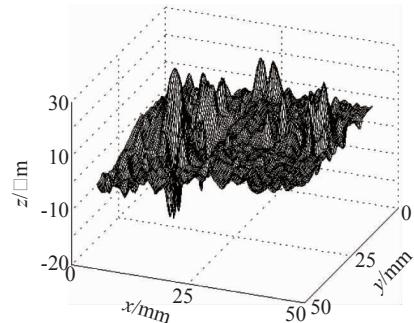


图 4 铝片表面氧化铝厚度的测量结果

阳极氧化是个长时间的过程,文章以时间为变量,其它条件恒定,即恒定槽液电压(40 V)、温度(20 °C)、电流密度(10 A/dm²)、槽液浓度等,对不同阳极氧化时间点的试验和计算,最终总结了如下氧化铝膜厚度与氧化时间的关系曲线,见图 5。

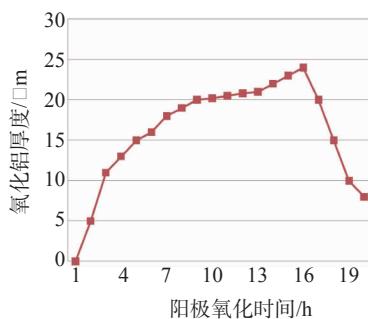


图 5 铝片表面氧化铝膜厚度与氧化时间的关系

从图 5 可以看出:阳极氧化中氧化铝膜的生长过程是增厚和溶解这一矛盾过程中展开的。通电瞬间,由于铝的亲和力特别强,在铝表面迅速生成一层致密无孔的氧化膜,厚度增长的速率很快。此时的膜具有很高的绝缘电阻,称之为阻挡层。由于在形成氧化铝时体积要膨胀,使得阻挡层变得凹凸不平,在膜层较薄的地方,氧化膜首先被电解液溶解并形成空穴,接着电解液通过空穴到达铝基体表面,使电化学反应能够继续进行。这使得铝表面处理从微观角度来看不是非常均匀的,只有选择合适的氧化时间、电流密度、温度等才能满足实际要求。

试验中,所得的干涉条纹图片的清晰度比较差,这是由于光要通过有一定折射率和光能吸收率的各

(下转第 41 页)



图 10 Sobel 算子边缘提取



图 11 缺陷提取

除了缺陷还会有两条边界线,文章采用二值图像边界跟踪法,取得这两条边界线后将其亮度值置为零,这样缺陷最终被完整的分离了出来,如图 11 所示。

3.3 缺陷定量计算

缺陷提取后,为了衡量缺陷是否会对铁轨性能产生影响,需要一些客观的指标,一般采用简单区域描绘子作为区域的特征。常用的简单区域描绘子如下^[9]:

- (1) 周长 区域边界的长度,即位于区域边界上的像素数目。
- (2) 面积 区域中的像素总数。
- (3) 致密性 周长²/面积。
- (4) 区域的质心。
- (5) 区域的最小外接矩形。

系统采用面积作为缺陷区域的特征。输入二值图像后,采用连接成分标记来辨识二值图像中每一个对象,即统计图像中缺陷的个数。然后计算每个缺陷所包含的像素数目,图 11 中两个缺陷包含的像素数目分别为 51 和 41。在相机标定后,根据图像

(上接第 12 页)

个光学元件和电解液,且受限于 CCD 分辨率等硬件环境。文章引入位相技术成功克服了这个难点,减少了噪声,突出了变形量,可以取得较为精确的结果。试验中,电解液的运动和铝片表面吸附作用,对干涉条纹图的清晰度也会产生一定影响。目前,系统完善和相关条纹的后续处理工作还在进行当中。

3 结论

文章利用激光偏振干涉条纹的方法测量金属铝片在电化学氧化过程中表面氧化铝的增长过程。采用该偏振干涉系统,可以满足实时观测和记录试验过程的要求,并且通过条纹分析,可以进一步了解在此过程中金属表面变形分布的情况。通过改变电压、温度、电流密度、槽液浓度等参数,还可作为进一

像素尺寸和物体实际尺寸的比例关系,即可求出缺陷的实际面积大小。

4 结语

给出了铁轨表面缺陷检测的系统设计方案,提出了一种有效的缺陷检测算法。通过试验,验证了算法的有效性。由于系统具有投入成本低,检测效率高,实时检测等优点,具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 冯小琴,宋文爱,马锦红.铁轨磨损检测系统[J].国外电子测量技术,2008(10):32—34.
- [2] 刘蕴辉,刘铁,王权良,等.基于图像处理的铁轨表面缺陷检测算法[J].计算机工程,2007(11):236—238.
- [3] 孟佳.钢轨表面缺陷识别系统的设计与研究[D].成都:西南交通大学,2005.
- [4] 静宁,高品贤,林建辉.计算机视觉技术在列车运行状态综合检测中的应用[J].计算机系统应用,2010(6):158—161.
- [5] 韩九强,胡怀中,张新曼.机器视觉技术及应用[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [6] 史增辉.钢轨表面擦伤光学检测方法的研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [7] 官鑫,赵智雅,高晓蓉.图像处理技术在钢轨表面缺陷检测和分类中的应用[J].铁路计算机应,2009(6):27—30.
- [8] 陈黎,黄心汉,王敏.带钢缺陷图像的自动阈值分割研究[J].计算机工程与应用,2002(7):244—246.
- [9] 张铮,王艳平,薛桂香.数字图像处理与机器视觉[M].北京:人民邮电出版社,2010.

步研究的课题和进行其它对照试验,这必将成为该领域新的研究热点。

参考文献:

- [1] 潘新亮.金属表面处理新工艺新技术及全过程质量控制检验标准规范实用手册[M].北京:中国知识出版社,2010.
- [2] 刘文韬.铝合金、铝合金制品挤压成形与表面处理、阳极氧化及喷涂焊接工艺技术实用手册[M].宁夏:宁夏大地出版社,2007.
- [3] 姚启钧.光学教程[M].北京:高等教育出版社,1980.
- [4] 张政,何世平.一种高灵敏度形状检测新技术[J].力学学报,1995,27(3):344—350.
- [5] 王俊兰,毕晓鹏,周鹏,等.傅里叶变换投影栅线法测量大物体的变形[J].实验力学,1998,13(3):74—80.