

焊接裂纹磁场模拟及磁光成像检测

马女杰, 高向东, 代欣欣, 张南峰

(广东工业大学 广东省焊接工程技术研究中心, 广州 510006)

摘 要: 研究交变磁场下的焊缝裂纹磁化规律, 针对碳钢 (Q235) 焊缝裂纹, 进行交变电磁场励磁下焊缝磁光成像无损检测的仿真和试验. 基于交变励磁下焊缝励磁规律的仿真模型, 研究裂纹间隙分别为 0.03, 0.05, 0.07 和 0.1 mm 的焊缝表面磁通密度 (磁感应强度) 模曲线分布差异. 钢板对接间隙分别限定为 0.03, 0.05, 0.07 和 0.1 mm 后, 通过激光焊接钢板两端来模拟仿真试验中的裂纹. 进行磁光成像无损检测试验, 并将试验结果与仿真结果进行对比. 结果表明, 在仿真试验与工艺试验中, 焊接裂纹感应磁场的变化规律基本相同, 磁感应强度不会因采样起始点不同出现较大的差异.

关键词: 焊缝裂纹; 交变磁场; 磁光成像; 仿真模拟

中图分类号: TG 441.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400239

0 序 言

为保证焊接产品质量, 必须对焊接缺陷进行有效的检测, 其中焊缝裂纹检测最受关注. 目前检测焊接裂纹的方法主要有射线检测法、超声波检测法、渗透检测法、磁粉检测法、漏磁检测法和涡流检测法等^[1-3]. 射线检测法设备大、成本高、对人体伤害大. 超声波检测时需要耦合剂, 对操作人员的要求较高. 渗透检测法易受人为因素影响, 对表面潮湿或者存在涂层的试样检测效果不佳. 磁粉检测法要求被测焊缝必须是顺磁性材料, 且需要对焊缝进行前处理. 漏磁检测法和涡流检测法只适合导电材料表面和近表面的检测^[4], 难以判断缺陷的种类、形状和大小.

磁光成像是基于法拉第磁光效应的新方法^[5]. 目前对焊接缺陷的磁光成像检测基本都是基于恒定磁场励磁, 可对微小缺陷进行成像, 磁光图像存在易饱和丢失焊缝信息的不足. 针对以上问题, 采用模拟焊缝裂纹进行仿真与试验, 分析不同间隙裂纹在交变磁场中感应磁场的规律, 进而对交变磁场下焊缝裂纹励磁特征进行总结, 优化交变励磁下焊缝磁光成像无损检测方法.

1 交变励磁磁光成像检测

磁光成像基于法拉第磁致旋光效应, 单色高功率光经过起偏器变为线偏振光, 通过磁光薄膜及反射镜片, 偏振光经检偏器检偏后被成像元件接收形成光强图^[6-7]. 线偏振光的偏振方向在磁场中会出现一定角度的旋转, 旋转角 θ 与光波在介质中经过的路程 d 和介质中光的传播方向上的磁感应强度分量 B 成正比, 即

$$\theta = VBd \quad (1)$$

式中: V 为费尔德 (Verdet) 常数. 励磁源选择交变电磁铁后, 磁极和磁场强度 H 随时间变化, 在铁磁焊件中, 磁感应强度 B 关系式变为

$$B = \mu_0 M + \mu_0 H \quad (2)$$

式中: M 为铁磁材料的磁化强度; μ_0 为相对磁导率. 铁磁焊件材料的磁化关系也可表示为

$$B = \mu_{Fe} H \quad (3)$$

式中: μ_{Fe} 为铁磁焊件材料的磁导率, 它随磁场强度 H 变化而变化.

磁光成像传感器所选择的励磁场要根据磁光薄膜的磁滞回线特性来确定, 被测焊缝的磁感应强度不能超过 2.5 mT, 否则磁光薄膜饱和, 磁光图像出现过亮或过暗现象, 丢失焊缝信息^[8]. 励磁源选择交变电磁场进行磁光成像试验, 成像更清楚^[9-10]. 焊缝由于磁滞现象的存在, 不经历完整的磁滞回线. 在工件励磁的过程中, 外场突然改变方向, 这时

工件的磁化状态并不沿原路折回,而是沿一条新的曲线移动.若外场的变化方向又改变,工件的磁化是形成新的小磁滞回线,磁光成像传感器的采样频率的选择决定焊缝励磁过程中新磁滞回线的形成特点^[11].

2 焊接裂纹磁场分布仿真

为模拟裂纹在交变磁场中的磁场分布,设计励磁模型如图1所示,包括铁芯、线圈和被测焊件,模型的主要参数见表1,其中 l 和 h 分别表示磁芯和焊件的长与高.励磁频率为50 Hz,采样频率为

75 frame/s,计算可知磁光图像每三帧为一周期.以缺陷中心上方0.5 mm处为测量原点,获得的第4,5,6条磁通密度模曲线应该分别与第1,2,3条曲线重合.

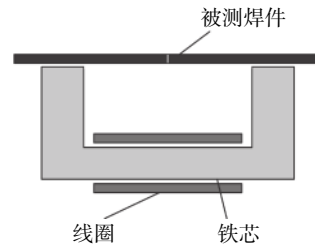


图1 焊缝励磁模型

Fig. 1 Model of weld excitation

表1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

磁芯 ($l \times h$)/mm	磁轭 w /mm	线圈匝数 n (匝)	线圈直径 d /mm	钢板 ($l \times h$)/mm	磁轭 u_r ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	裂纹间隙 g /mm	线圈电压(有效值) U /V	钢板参数 u_r ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
42×30	10	700	0.5	50×2	10 000	0.03, 0.05, 0.07, 0.1	10 V	4 000

图2为间隙0.1 mm裂纹的仿真磁通密度模分布曲线,图2a表示前三次和前八次采样获得的磁通密度模曲线,图2b表示30次采样获得的磁通密

度模曲线.由图2a对比可知,第4~6个采样点获得的磁通密度模曲线并没有与第1~3个采样点获得的曲线重合,出现了第4个与第3个、第5个和第2个、第7个和第1个、第6个和第8个采样点获得的曲线比较接近的结果.由图2b可知,随着励磁时间的增加,磁通密度模曲线分布趋于稳定,集中在一个区域.与理论上分布在三个区域的情况不同.

由于磁化历史(即励磁频率)的影响,第4个采样点获得的曲线是第3个采样点经历了磁场强度先变大后变小,然后反向增加(即退磁)后获得的曲线,磁滞现象使第4个采样点与第3个采样点获得曲线比较接近.由于交变电磁场励磁,焊缝的磁感应强度不断在励磁退磁中交替变化,焊件的磁导率就会随着磁感应强度的变化而变化.焊件磁导率不同,经过焊件的磁通不同,使焊件上方的漏磁场大小不同,磁通密度模曲线分布结果会受到影响.

图3是不同裂纹间隙焊缝表面的磁通密度模曲线图,分析可知,裂纹的间隙越小,磁通密度模的最大值越小.随着裂纹间隙的增加,磁通密度模曲线在焊缝两边分布的范围稍有扩大.裂纹仿真曲线反向突变,表明有裂纹的焊缝,其感应磁场有明显的N极和S极的分界区域.图3b是无缺陷焊缝表面的磁通密度模曲线图,表明无缺陷时磁通密度模无突变,焊缝表面磁感应强度分布均匀.

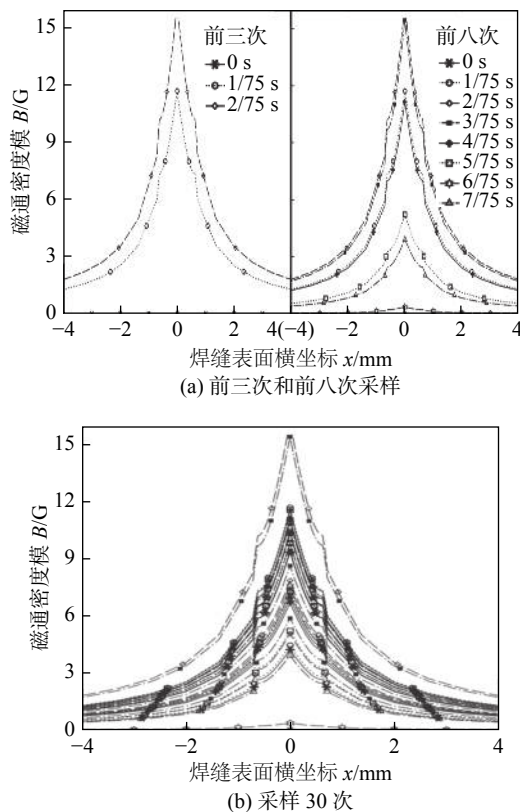


图2 间隙0.1 mm裂纹的磁通密度模分布曲线

Fig. 2 Magnetic flux density profile distribution curve with a crack gap of 0.1 mm

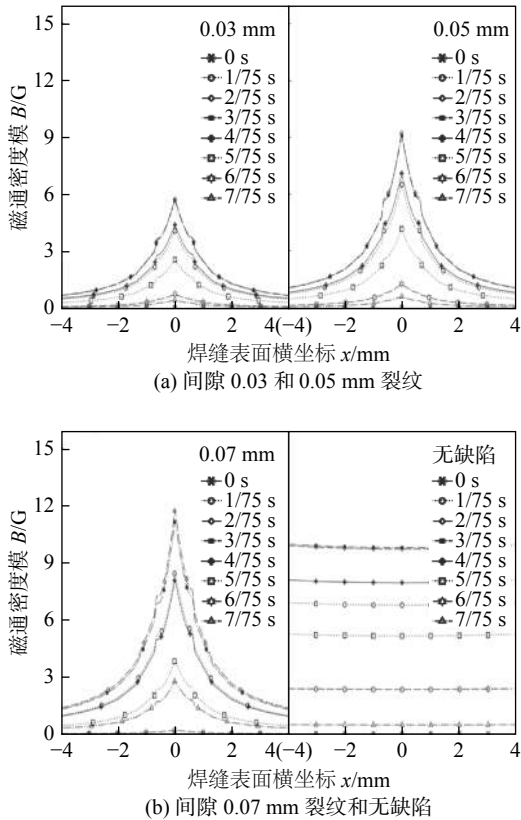


图 3 裂纹磁通密度模曲线

Fig. 3 Magnetic flux density curve of cracks

3 磁光成像焊缝无损检测试验

与仿真条件相同, 试验用钢板尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$. 钢板对接间隙分别限定为 0.03, 0.05, 0.07 和 0.1 mm 后, 用激光焊接钢板两端模拟仿真试验中的裂纹, 进行磁光成像无损检测试验, 试验系统如图 4 所示.

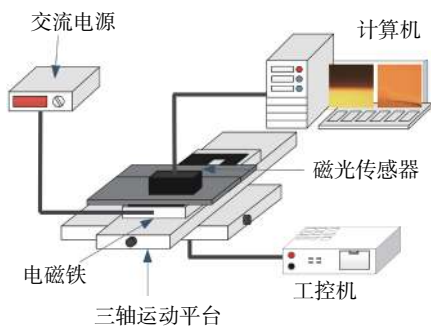


图 4 磁光成像试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of magneto-optical imaging test system

试验时选择励磁频率 50 Hz 的正弦交变磁场, 传感器的提高度为 0.5 mm, 采样频率为 75 frame/s. 试验发现在励磁电压为 10 V 时, 磁光图像的效果最好. 表 2 为交变磁场激励下焊件的实物图和对应

的磁光成像.

焊缝存在缺陷, 横截面积变小 (或变大), 磁通量减少 (或增加), 导致磁力线在缺陷处挤压, 产生漏磁场. 磁光成像传感器通过检查磁场的微小变化来反映缺陷的形态特征. 根据获得的磁光图像光强分布区域可以判断缺陷的类型, 如表 2, 裂纹的磁光图像具有带状分界区域. 不同焊缝形态经励磁产生的漏磁场不同, 获得的磁光图像灰度值反应焊件上方漏磁场强弱. 无缺陷焊件和带有裂纹的焊件的磁光图像有明显差异, 无缺陷的磁光图像光强分布均匀, 没有 N 极、S 极之分, 裂纹的磁光图像有明显的带状分界线, 验证了仿真模拟的结果.

表 2 交变励磁下焊缝裂纹磁光图像

Table 2 Magneto-optical image of weld cracks under alternating excitation

缺陷类型	实物图	第1帧	第2帧	第3帧
无缺陷				
裂纹间隙 0.1 mm				
裂纹间隙 0.07 mm				
裂纹间隙 0.05 mm				
裂纹间隙 0.03 mm				

提取表 2 磁光图像第 200 列灰度值, 如图 5 所示, 水平直线表示磁光传感器饱和, 即提取出的磁光图像灰度值为 256, 无法反映焊缝裂纹信息. 裂纹间隙 0.03 mm 的磁光图像饱和区域最大, 其次是 0.05 mm, 然后是 0.07 mm, 饱和区域最小的是 0.1 mm. 这验证了裂纹的间隙越小, 磁通密度模最大值越小的仿真结果. 裂纹灰度值分布曲线有较大的拐点, 无缺陷焊缝磁光图像的灰度值分布曲线比较平缓, 没有突变区域. 由于仿真获得的是磁通密度模曲线, 故裂纹的仿真曲线只有一个拐点, 而其完好的灰度值曲线有两个拐点, 验证了有裂纹的焊缝, 其感应磁场有明显的 N 极和 S 极的分界区域.

由图 5a 和图 5b 对比可知, 图 5a 的第 1, 2, 3 条线分别与图 5b 的第 2, 3, 1 条线的趋势一致, 表明采样时间起始点不同, 磁场分布相同. 验证了励磁频率与采样频率一定时, 经过一定时间形成新的磁场回线, 焊缝感应磁场值稳定在一个区域内.

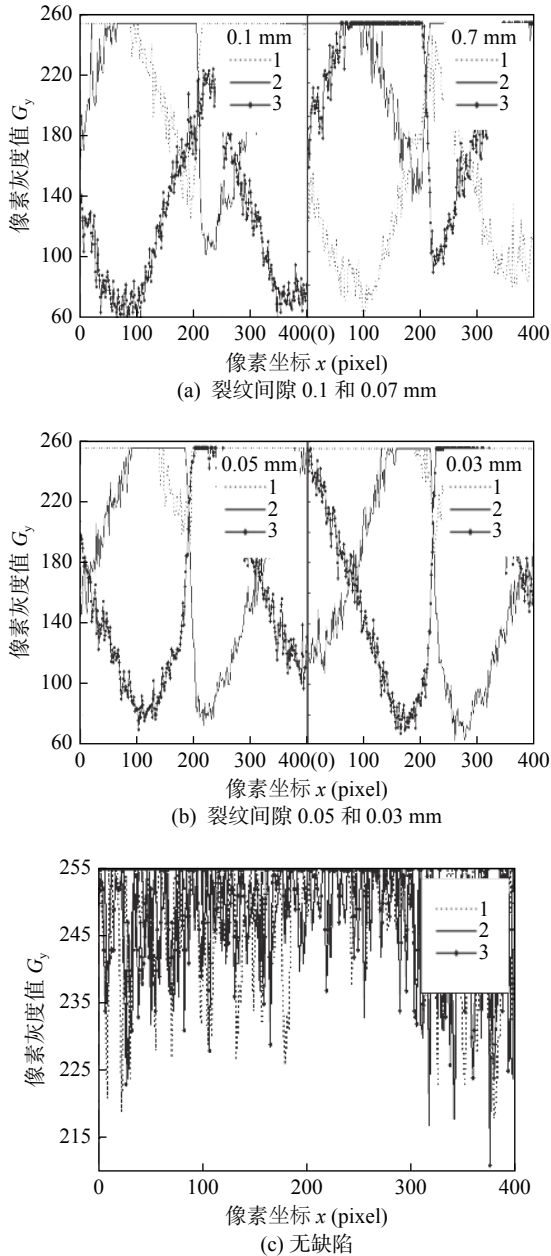


图 5 焊缝裂纹磁光图像灰度值
Fig. 5 Gray value of weld cracks

磁光传感器的标定值为每毫米对应 102 个像素点. 提取裂纹灰度值分布曲线拐点处的像素值 x , 如表 3 所示, 裂纹间隙越大, 拐点像素值差越大, 根据磁光图像上像素点计算出来的裂纹间隙值越大. 验证了随着裂纹间隙的增加, 磁通密度模曲线在焊缝两边分布的范围稍有扩大的仿真结果.

表 3 裂纹磁光图像的像素极值

Table 3 Pixel extremum of the magneto-optical image of the crack

裂纹间隙 g_1/mm	点一像素值 $x_1(\text{pixel})$	点二像素值 $x_2(\text{pixel})$	像素值差 $\Delta x(\text{pixel})$	图像测得间隙 g_2/mm
0.03	—	217	—	—
0.05	163	259	96	0.94
0.07	103	217	114	1.12
0.1	99	220	121	1.19

4 结 论

(1) 磁光图像有带状明暗过渡带时, 证明检测的焊缝有裂纹, 过渡带区域越大, 感应磁场过渡区域越大, 漏磁场越强, 裂纹间隙越大.

(2) 交变励磁下磁光成像无损检测, 由于磁滞现象, 焊缝感应磁场的大小变化稳定于一个值附近, 磁光成像传感器采样获得的光强图不会因为采样起始点不同, 出现较大的磁感应强度大小差异.

参考文献:

- [1] 张元良, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述[J]. 机械工程学报, 2013, 53(7): 80-90.
Zhang Yuanliang, Zhang Hongchao, Zhao Jiayu, *et al.* Review of non-destructive testing for remanufacturing of high end equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 53(7): 80-90.
- [2] 耿荣生, 景鹏. 蓬勃发展的我国无损检测技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 1-7.
Geng Rongsheng, Jing Peng. On the flourishing development of NDT techniques in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 1-7.
- [3] Shan Baohua, Duan Zhongdong, Ou Jinping. Study of ultrasonic phased array inspection imaging technology for NDT[J]. China Welding, 2006, 15(3): 1-5.
- [4] 王超, 丛正, 王凯, 等. 基于双频数据融合的电涡流焊接缺陷检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 15-20.
Wang Chao, Cong Zheng, Wang Kai, *et al.* Eddy current defect detection on welds based on dual-frequency data fusion[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 15-20.
- [5] Koschny M, Lindner M. Magneto-optical sensors accurately analyze magnetic field distribution of magnetic materials[J]. Advanced Materials and Processes, 2012, 170(2): 13-16.
- [6] 莫玲, 高向东, 萧振林, 等. 激光焊磁光彩色成像焊缝检测方法[J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 37-40.
Mo Ling, Gao Xiangdong, Xiao Zhenlin, *et al.* Weld detection of

- laser welding using magneto-optical color imaging[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 37 – 40.
- [7] Cheng Y, Deng Y, Bai L, *et al.* Enhanced laser-based magneto-optic imaging system for nondestructive evaluation applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(5): 1192 – 1198.
- [8] Richert H, Schmidt H, Lindner S, *et al.* Dynamic magneto-optical imaging of domains in grain oriented electrical steel[J]. Steel Research, 2016, 87(2): 232 – 240.
- [9] 高向东, 蓝重洲, 陈子琴, 等. 焊接缺陷磁光成像动态检测与识别 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1135 – 1141.
Gao Xiangdong, Lan Chongzhou, Chen Ziqin, *et al.* Dynamic detection and recognition of welded defects based on magneto-optical imaging[J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2017, 25(5): 1135 – 1141.
- [10] Le M, Lee J, Shoji T. A simulation of magneto-optical eddy current imaging[J]. NDT and E International, 2011, 44(8): 783 – 788.
- [11] Gao Xiangdong, Ma Nüjie, Du Liangliang. Magneto-optical imaging characteristics of weld defects under alternating magnetic field excitation[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9972.

第一作者简介: 马女杰, 女, 1991 年出生, 博士研究生. 研究方向为无损检测. Email: 931527513@qq.com

通信作者简介: 高向东, 男教授, 博士研究生导师. Email: gaoxd666@126.com

[上接第 52 页]

- [11] Zhang C, Gong B, Deng C, *et al.* Orientation dependence of deformation and failure in a C-Mn weld metal[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2017, 250: 163 – 171.
- [12] Seok M Y, Kim Y J, Choi I C, *et al.* Predicting flow curves of two-phase steels from spherical nanoindentation data of constituent phases: Isostrain method vs. non-isostrain method[J]. International Journal of Plasticity, 2014, 59(10): 108 – 118.

第一作者简介: 刘畅, 男, 1994 年出生, 硕士研究生. 主要从事焊接结构完整性研究. Email: 530505593@qq.com

通信作者简介: 邓彩艳, 女, 副教授. Email: dengcy@tju.edu.cn