

弯曲荷载作用下焊接钢板件金属磁记忆效应试验研究

苏三庆, 孙灏江, 王 威, 易术春

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为将金属磁记忆无损检测技术用于弯曲荷载下焊接试件的检测, 分别对 Q345b 钢有缺陷焊接试件及无缺陷焊接试件进行了三点受弯试验。通过对比两组试件在初始阶段、弹性阶段以及塑性阶段下磁记忆法向分量曲线及磁场梯度曲线, 得到焊接缺陷位置在不同阶段的特异性信号。试验结果表明: 初始阶段, 磁记忆法向分量曲线无明显特征信号, 在判断焊接初始缺陷时缺乏准确性, 而磁场梯度曲线中出现具有最大幅值的异变位置, 可以定性判断试件焊接初始缺陷位置; 弹性阶段, 有缺陷焊接试件磁记忆曲线在缺陷处产生明显异变磁记忆信号即波峰-波谷, 无缺陷焊接试件则未形成明显异变磁记忆信号。随着荷载增加, 两组试件磁场强度法向分量均呈现逐渐减小的趋势; 塑性阶段, 有缺陷焊接试件缺陷部位异变磁记忆信号发生反转, 表征了试件在该位置进入塑性阶段。无缺陷焊接试件在试件接近破坏时曲线才出现反转现象。

关键词: 磁记忆检测; 对接焊缝; 三点受弯; 波峰-波谷; 反转

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0771-06

Experimental research on metal magnetic memory effect of butt welded steel plate under bending load

SU Sanqing, SUN Haojiang, WANG Wei, YI Shuchun

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to evaluate the damage degree of butt welded steel plate under bending load through metal magnetic memory (MMM), the three-point flexural test of Q345b specimen with defect and without defect were conducted respectively. Characteristic signals were received by comparing the normal signal and gradient curve of two group specimens in its initial stage, elastic stage and plastic stage. Experimental result reveal that in initial stage, abnormal position with peak amplitude of gradient curve can qualitatively determine initial defect position. But there are no significant signal of normal component curve, which can't help judge the initial defect position accurately. In the elastic stage, the magnetic curve of defective specimen generate mutation, that is peak-valley phenomenon. As to specimen without defect, there are no significant mutation of the magnetic curve. The magnetic normal component decreased with the increase of loading. In the plastic stage, the peak-valley phenomenon is reversed with respect to elastic stage, which can help predict the whether the specimen enter the plastic stage. As to the specimen without defect, the reversal of peak-valley phenomenon occurred when the specimen is close to failure.

Key words: metal magnetic memory; Butt-welded; three-point bending; peak-valley; reverse

钢铁冶金行业迅猛发展, 使得现代结构摆脱传统混凝土结构的制约向着大跨度空间结构、超高层结构、特种结构等方向发展, 而焊接工艺作为钢结构施工过程中使用最为普遍的工艺, 在土木工程领域内得到了广泛应用。但无论机械焊接或手工焊接在加工过程中均会引入初始缺陷或是残余应力, 如果这些危险部位不能被及时发现, 会大大降低焊接结构可靠性, 甚至导致整体结构的破坏, 导致更为严重的后果。

目前在焊接结构中所采用的传统检测技术有目视检测、射线检测、超声检测、涡流检测等手

段。上述手段的检测目标为待测构件不出现非允许缺陷^[1], 仅能够识别已形成的较大裂纹或物理结构不连续的宏观缺陷, 对于焊接过程中产生的微小裂纹以及还未形成的明显物理不连续状态或是缺口效应造成的应力集中而导致的裂纹源仍旧无法检测, 这也加剧了焊接结构失效进程^[2], 且上述方法检测前需按要求对试件表面处理, 同时对操作人员的专业素质也有较高要求。因此, 在焊接构件的检测领域引入一种先进的无损检测技术就非常必要。金属磁记忆检测技术作为一种新型无损检测技术, 在较为恒定大地磁场激励下, 铁磁构件

收稿日期: 2016-08-04

修改稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478383、51578449); 陕西省自然科学基金项目(2015JM5192)

第一作者: 苏三庆(1961—), 男, 教授, 博导, 主要从事结构健康监测及混凝土结构等方面的研究。E-mail: sussq@xauat.edu.cn

受到外界荷载作用时,在应力及变形集中区域内会发生具有磁致伸缩效应的磁畴组织定向及不可逆的重新取向,而这种状态在荷载解除后依旧得到保留,显著地表征出应力集中位置^[3].实现对早期损伤及损伤程度的判别,防止出现结构突然性破坏.同时,该技术无需清洁待测构件表面、操作简便,且磁记忆探头具有多种型号,对于各类构件均有较好检测效果,目前已广泛应用在航空机械、石油化工等领域.因此,该技术可以有效地检测焊接结构中由应力集中产生的裂纹源以及形成的微小缺陷^[4].

天津大学邸新杰等^[5]将金属磁记忆技术用于管道焊接裂纹的检测,通过小波分析技术研究了金属磁记忆信号与裂纹长度及深度的关系.梁志芳等^[6]证实了时间空间上焊接裂纹磁记忆信号的有效性.邢海燕等^[7]研究了焊接试件在拉压荷载下焊接钢板件的磁记忆信号,并通过该技术对焊接试件的热处理进行评价.国内许多学者在焊缝的磁记忆检测方面进行了研究,但仍集中在焊接试件在单向拉伸状态下磁记忆检测等方面,而在建筑工程中焊接试件多为受弯构件及压弯构件,承受的荷载更为复杂,因此,研究弯曲荷载作用下有缺陷焊接试件及无缺陷焊接试件在各个阶段下磁记忆信号特征的对比及其磁记忆曲线的特征信号具有较大的意义.本文以三点受弯状态下焊接试件磁记忆曲线的试验为依据,以有缺陷试件与无缺陷试件为切入点,探究了在初始状态、弹性阶段以及塑性阶段下两种试件各自对应的磁记忆曲线变化规律,为金属磁记忆检测技术在焊接结构复杂状态的定量研究,提供实验基础和数据.

1 试验概况

1.1 试件设计

试件采用 Q345b 结构钢,该材料具有良好的变形能力和较高的强度,为了探究焊缝缺陷对磁记忆信号的影响,本文采用的弯曲试件为焊接质量等级为一级的无缺陷试件和质量等级为二级的有缺陷试件.将 Q345 钢使用线切割加工为如下图 1 的试件,样品厚度为 10 mm,宽度 60 mm,长度为 500 mm,使用线切割工艺从中线处完全截断后,采用气压焊工艺对试件进行焊接,试件共加工 2 组各 4 个试件,其中有缺陷焊接试件编号分别为 1x、2x、3x、4x;无缺陷焊接试件编号分别为 1、2、3、4,在试件下表面如图 1 位置各取五条长度为 200 mm 的检测线,其中检测线 3 位于试件的中心线

上,其余四条检测线均匀分布于检测线 3 的两侧,间距均为 10 mm,各检测线的左端为起点,为保证与工程实际相符所有试件未进行退火去应力处理.

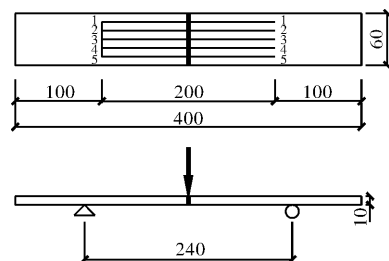


图 1 试件尺寸及检测线位置(单位:mm)

Fig. 1 The size and location of measurement lines of specimen (Unit: mm)

1.2 试验仪器及方法

利用 DLT-50 万能材料试验机进行试件的三点受弯试验,其主要技术参数:最大试验力为 2 000 kN,试验机示值相对误差 $\leq 1\%$.施加荷载时,加载点位于试件跨中,试件的净跨为 240 mm.

磁记忆信号测量设备采用爱德森 EMS-2003 智能磁记忆/涡流检测仪,探头使用 EPEMS/C2 磁记忆双通道测距(小车)笔式探头,设置为外时钟模式,步距设置为 5 mm,显示模式为时机显示.探头内置的通道(CH-1)数据作为环境磁场值,(CH-2)数据为试件表面磁场值,通过(CH-2)/(CH-1)得到试件表面的真实磁记忆信号见图 2.

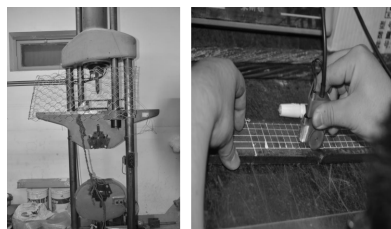


图 2 加载设备及测量设备

Fig. 2 The loading equipment and detection system

为了观察不同应力状态下磁记忆信号的变化规律,采用分级加载的方式,试件的加载等级为:0 kN、2 kN、4 kN、6 kN、8 kN、10 kN、12 kN.到达规定荷载后保载 2 min,并在卸载后记录两组试件跨中残余挠度,数据见图 3.为避免试验机等铁磁材料造成的影响,取下试件按照南北方向放置进行离线检测.检测时,探头沿着检测线自南向北以 0.1 m/s 的匀速滑动在试件表面,并保证传感器垂直于试件表面且提离值恒定.

2 试验结果分析

试验结束后,对试验数据整理发现,两组试件在初始阶段即 0 kN 荷载时,各试件间数据存在

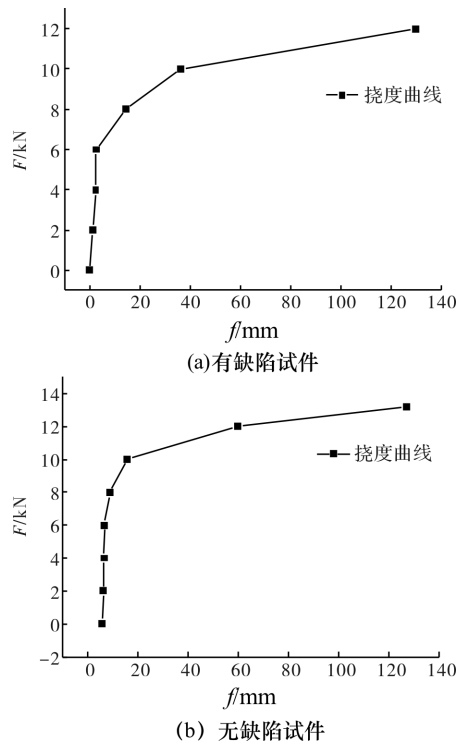


图3 试件力—挠度曲线

Fig. 3 Force versus deflection curve

较大离散性. 各试件在同级荷载作用下, 其中 2、3、4 号检测线的数据基本一致, 而 1、5 号检测线的数据差异较大, 初步分析是由于 1、5 号检测线距试件边缘过近且试件加工时残余应力较大导致数据离散. 因此在进行数据分析时, 同一试件的检测数据采用 2、3、4 号检测线上的数据的均值.

2.1 焊接试件初始状态的磁记忆信号变化

试件焊接结束, 自然条件下冷却至室温后, 将试件按南北方向放置在试验室测量其表面初始磁记忆信号, 部分测量结果如图 4 所示. 两组试件磁记忆曲线仅有 2x 号试件过零点位置在焊缝处, 其余试件在焊缝位置并无过零点现象, 因此磁记忆信号法向分量过零点这一经典判据^[3]在表征焊接试件初始缺陷位置时缺乏准确性与实用性.

由图 4 可知, 两组试件磁记忆信号法向分量分布表现出几个异同点, 两组试件在远离焊缝位置时磁记忆信号法向分量的分布呈现随机分布, 在接近焊缝热影响区出现突变, 即磁记忆信号出现波峰-波谷, 对比发现有缺陷试件磁记忆信号法向分量在缺陷处均对应于极值点位置, 而无缺陷试件法向分量在跨中对应于波峰-波谷之间. 焊缝由于受到温度影响会产生残余应力和变形, 会导致焊缝位置磁记忆信号法向分量具有突跃性变化. 焊接缺陷位置由于试件不连续而产生空气隙, 且空气磁导率低于铁磁试件磁导率, 导致试件在该位

置磁导率急剧下降产生漏磁场^[8], 此处磁记忆信号法向分量应出现极值点. 而两组试件在远离焊缝位置也出现了波峰-波谷, 这是因为铁磁试件在制造及运输安装过程中经过多道工序, 如锻造、铣削、磨削等, 在各工序中均会引入不同的力、热、磁等因素, 产生外界干扰磁场, 即焊接试件的磁记忆信号是多种初始效应的叠加, 导致在实际检测过程中, 磁记忆信号曲线出现了多个波峰-波谷, 因此只依靠这一特性去定性判断焊接初始缺陷位置会出现较大误差.

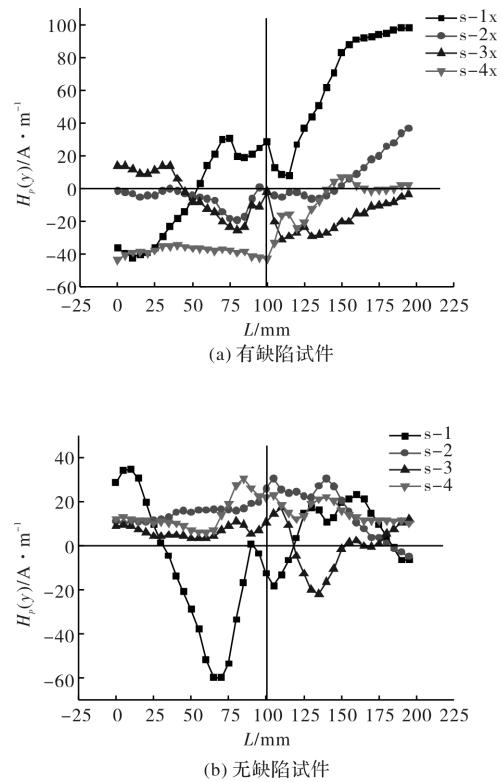


图4 初始阶段试件磁记忆法向分量曲线

Fig. 4 The normal signal curve in initial stage

在焊接初始缺陷位置已知的前提下, 磁记忆曲线仍旧表现为随机分布现象, 因此只有通过一定的手段排除干扰, 才能使缺陷位置得到准确判断. 而试件表面的磁信号反映的是应力集中区的自由漏磁场的积分场^[9], 为了得到焊接缺陷位置处特征信号, 采用微分法对磁信号法向分量进行微分, 将两组试件初始状态磁记忆信号法向分量通过公式(1)计算得到各自磁场梯度曲线^[4], 由于两组试件受到各种加工工艺的影响, 导致磁记忆曲线在远离焊缝位置其梯度曲线较为离散, 为了方便分析数据在图 5 中给出仅给出一条曲线.

$$K = \frac{K_P(y)_{(i+1)} - H_P(y)_{(i)}}{\Delta L} \quad (1)$$

式中: $H_P(y)_{(i+1)}$ 、 $H_P(y)_{(i)}$ 为第 $i+1$ 点和第 i 点处的磁场强度法向分量, $\Delta L = 5 \text{ mm}$.

由图5可知,对于有缺陷的试件在预制缺陷位置处,磁场梯度值的幅值远大于其他位置,出现明显的波峰-波谷,且此处的异变现象最为明显,其余3个缺陷试件的磁场梯度曲线在跨中缺陷处也产生了幅值远大于其余位置的异变现象.对比无缺陷试件1在跨中位置的波峰-波谷,其幅值不具有代表性,异变也不显著.两组试件的梯度曲线在焊缝两侧均出现了两个幅值远大于试件两端梯度值的波峰,且左侧数值大于右侧,但其幅值并未超过缺陷位置处的幅值,这是由于试件在焊接过程中由于温度差异,导致试件焊缝与母材连接位置存在较大内应力,使焊缝两侧磁场梯度产生远大于试件两端的幅值.

对比有缺陷试件与无缺陷试件现象,磁记忆信号法向分量无明显特征信号,在判断焊接初始缺陷时缺乏准确性,容易造成误判,而通过磁场梯度曲线中出现的具有最大幅值的畸变位置可以准确的判断焊接初始缺陷的位置;同时对于焊接质量较好的无缺陷试件,其梯度曲线在焊缝位置的幅值不具有代表性.

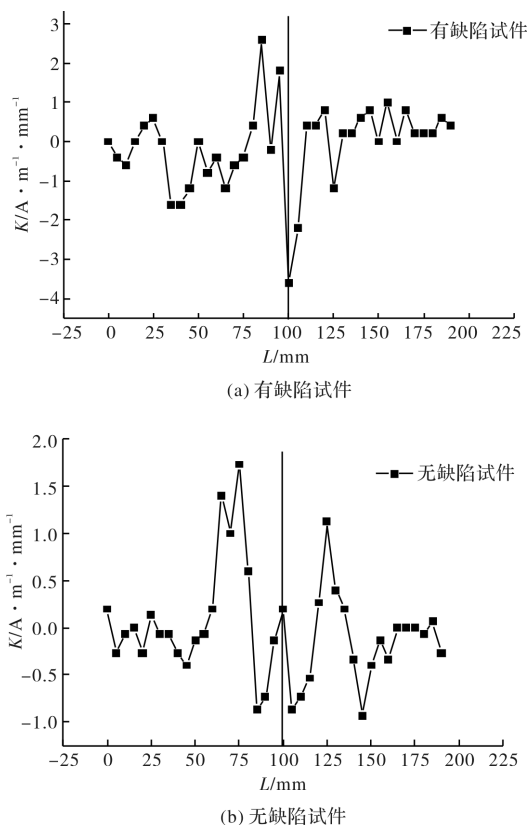


图5 初始阶段试件磁记忆法向分量梯度曲线

Fig.5 The gradient curve of normal signal in initial stage

2.2 焊接试件加载过程中磁记忆信号变化

对检测数据整理,发现两组试件在施加荷载后,其重复试验表现出相近的现象.因此此处只选

取试件1x和试件1为分析对象进行研究.

图6为弹性阶段,两组试件受拉一侧磁场强度的法向分量分布曲线.由图6(a)可知,仅施加2 kN的荷载后,有缺陷试件磁记忆曲线出现显著变化,在跨中缺陷处产生唯一的异变磁记忆信号即波峰-波谷,且磁记忆曲线整体表现出线性,使缺陷处特征信号显现出来.随着荷载增加,磁场强度法向分量呈现逐渐减小趋势,而这一现象与光滑试件在弹性阶段,试件磁场强度随应力的增大而增强不符^[10].这是因为焊接试件焊缝位置有较大初始残余拉应力,这种残余应力是一种没有荷载作用下的内应力,在试件焊缝附近会自相平衡,而焊缝两侧垂直于焊缝方向的残余应力分布规律具有普遍性即靠近焊缝处为拉应力远离焊缝处为压应力^[11].试件在受到施加的外荷载时,在试件下表面产生拉应力,导致焊缝处的残余压应力逐步减小,对于磁记忆曲线而言,磁畴在地磁场的激励与外界拉压应力共同作用下,会引起相反的磁畴转向,产生一个与初始磁场相反的等效磁场,即弹性阶段的焊缝附近的磁畴会随着外加荷载的增大转向相反方向,由于所施加的每一级荷载差值相同,所驱动的磁畴数量一定且其驱动下磁畴转动角度相同,上述原因导致磁记忆曲线在弹性阶段随荷载逐渐减小.

由图6(b)可知,无缺陷试件在施加荷载后,试件表面的磁场强度与初始阶段相比变化较小,曲线多次出现波峰-波谷,且整体没有表现出线性,未形成明显的异变磁记忆信号.这是由于焊接质量好,使焊缝整体性较好,且该区域外加应力差别不大,处于这一区域的磁畴在拉应力的作用下逐步转向,而整体的曲线随着荷载的增大呈现逐渐减小的趋势,这与有缺陷试件在弹性阶段变化规律类似.

图7为塑性阶段,两组试件受拉一侧磁场强度的法向分量分布曲线.

由图7(a)可知,在施加完8 kN的荷载后,缺陷部位异变磁记忆信号即波峰-波谷发生反转,这是由于拉应力作用下产生的等效磁场不断增强最终克服原有的初始磁场.随着荷载继续增大,这一特征信号得到了保持并且表现出波峰-波谷间差值不断增大,且导致试件的磁记忆曲线在缺陷位置出现反转.

由图7(b)可知,无缺陷试件在荷载达到12 kN时,试件挠度已达到59.82 mm时,曲线才出现反转现象,在跨中附近出现明显的异变磁记忆信号,

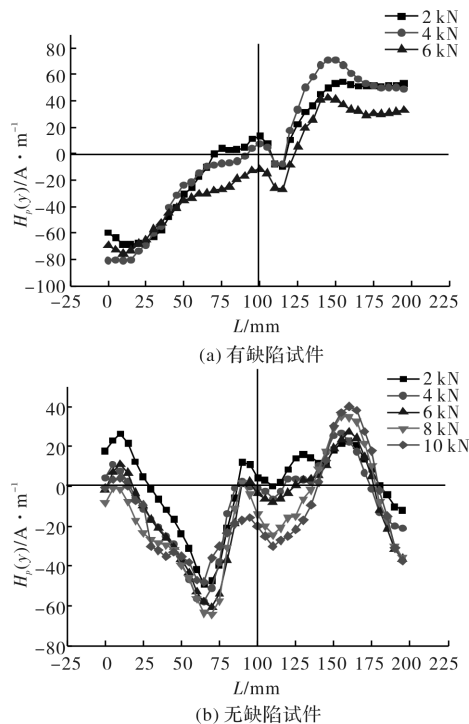


图6 弹性阶段试件磁记忆法向分量曲线

Fig. 6 The normal signal curve in elastic stage

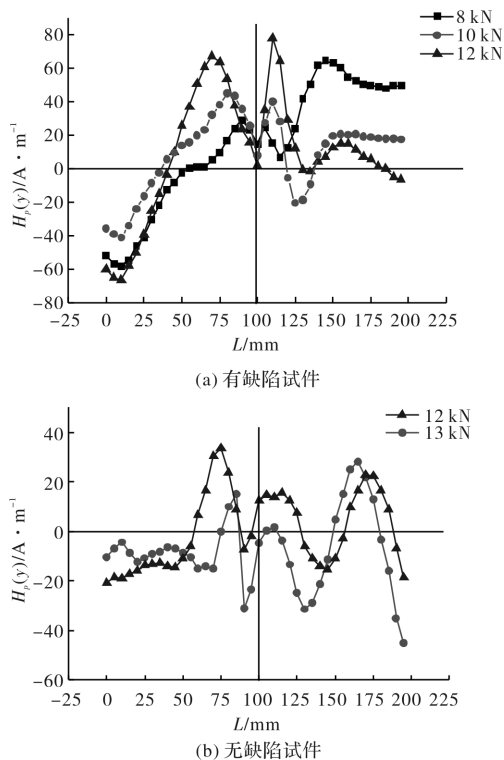


图7 塑性阶段试件磁记忆法向分量曲线

Fig. 7 The normal signal curve in plastic stage

且随荷载增加畸变现象也更为显著。试件在发生屈服后焊缝区域内会发生塑性流动,直至接近试件极限强度时才会产生不均匀塑性变形即明显的应力集中位置,而最终破坏位置即应力集中部位却与材料的内部不均匀性有关,因而有一定的随机性,导致无缺陷试件在塑性阶段磁场异变位置在

跨中附近分布较为离散。

有缺陷试件磁场异变信号在各个阶段均有表征,但其产生原因却不同。初始阶段,基于漏磁场理论^[8],异变信号是由试件不连续即初始缺陷的存在导致;弹性阶段,则基于磁弹性理论^[12],即对于缺陷位置处其应力水平高于其他位置,且弹性阶段磁畴的结构与转向也与所受应力大小成线性关系;塑性阶段,缺陷处局部应力及应变较之前增长数倍,导致此处晶格组织顺着滑移面运动产生位错,且这种缺陷随荷载增大而进一步加剧并逐渐发展成为宏观应变,最终表现为试件发生剧烈的挠度变形,而在试件内部由于位错对于磁畴壁具有钉扎效应,荷载增加使缺陷处塑性程度更加严重,产生大量增值位错在此处聚集、堆积,此处的晶格位于相同应力集中场中,最终会发展为相同变形且转向相同方向^[13],以上因素叠加作用导致塑性阶段磁畴运动阻力增大,使缺陷位置畸变愈发显著。

3 结论

(1) 磁记忆信号法向分量曲线在两种情况下图形大致相似,在判断焊接初始缺陷时缺乏准确性,容易造成误判,因此要结合其它特性作进一步甄别,而通过磁场梯度曲线中出现的具有最大幅值的畸变位置可以准确的判断焊接初始缺陷的位置。

(2) 弹性阶段,有缺陷试件的磁记忆曲线在缺陷处产生明显的异变磁记忆信号即波峰-波谷;无缺陷试件未形成明显的异变磁记忆信号,随着荷载的增加,两组试件磁场强度的法向分量呈现逐渐减小的趋势。

(3) 有缺陷试件的缺陷部位异变磁记忆信号即波峰-波谷发生反转表征试件在该位置进入塑性阶段。无缺陷试件在试件接近破坏时曲线才出现了反转现象,出现明显的异变磁记忆信号。

参考文献 References

- [1] 鲍爱莲,庄明辉,尹冬松,等. 焊接检测[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 21-30.
BAO Ailian, ZHUANG Minghui, YI Dongsong, et al. Welding inspection[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005: 21-30.
- [2] 王威,樊浩,苏三庆,等. 钢结构对接焊缝隐性损伤的磁记忆检测试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 497-501.

- WANG Wei, FAN Hao, SU Sanqing, et al. Experimental detection on implicit damage of butt weld of steel structure by magnetic memory testing[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4): 497-501.
- [3] DUBOV A A, DEMIN E A, MILYAEV A I. The experience of gas pipeline stressstrain state control with usage of the metal magnetic memory method as compared with conventional methods and stress control means[J]. Welding in the World, 2002, 46 (9): 29-33.
- [4] DOUBOV A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory [J]. Welding in the World, 2002, 46 (6): 317-312.
- [5] 邸新杰,李午申,严春妍,等. 基于金属磁记忆的宏观焊接裂纹识别方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18 (12): 1475-1478.
- DI Xinjie, LI Wushen, YAN Chunyan, et al. Inspection method of welding cracks based on metal magnetic memory[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18 (12): 1475-1478.
- [6] 梁志芳,李午申,王迎娜,等. 金属磁记忆法检测焊接裂纹的时间空间有效性[J]. 焊接学报, 2006, 27 (8): 9-11.
- LIANG Zhifang, LI Wushen, WANG Yingna, et al. Available time and dubious zone size of welding crack by metal magnetic memory method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27 (8): 9-11.
- [7] 邢海燕,陈鑫或,黄保富,等. 拉压荷载下焊缝的磁记忆表征及热处理评价[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(1): 100-104.
- XING Haiyan, CHEN Xinyu, HUANG Baofu, et al. MMM characterization of welded joint and heat treating evaluation under tension and compression loading [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35 (1): 100-104.
- [8] 徐章遂,徐英,王建斌,等. 裂纹漏磁场定量原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005:21-30.
- XU Zhangsui, XU Ying, WANG, Jianbin, et al. The principle and application of crack leakage magnetic quantitative test[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 21-30.
- [9] 任吉林,罗声彩. 金属磁记忆二维定量检测试验研究[C]//全国第九届无损检测学术年会. 上海:全国无损检测学会, 2010 :473-481.
- REN Jilin, LUO Shengcai. Two-dimensional quantification testing of metal magnetic memory [C]//The National Ninth Annual Conference Proceedings of Non-destructive Testing. Shanghai: National Society for Nondestructive Testing, 2010:473-481.
- [10] DONG L H, XU B S, DONG S Y et al. Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel[J]. NDT&E International, 2009, 42: 323-327.
- [11] 陈绍蕃,顾强. 钢结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:224-230.
- CHEN Shaofan, GU Qiang. Steel structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 224-230.
- [12] 任吉林,林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- REN Jilin, LIN Junming. Metal magnetic memory testing technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 22-24.
- [13] 田民波. 磁性材料[M]. 北京:清华大学出版社,2001: 152-159.
- TIAN Minbo. Magnetic materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001:152-159.

(编辑 沈 波)