

钢结构对接焊缝隐性损伤的磁记忆检测试验研究

王 威¹, 樊 浩¹, 苏三庆¹, 杨为胜¹, 刘 静¹, 陈 畅²

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安710055; 2.西安建筑科技大学材料与矿业学院, 陕西 西安710055)

摘要: 通过施加拉伸及弯曲荷载, 分析了未焊透缺陷及无缺陷的对接焊缝钢构件的磁记忆信号. 发现漏磁场强度与外应力存在一定的对应关系, 磁场强度随拉应力的增大而增大, 随压应力的增大而减小, 在应力集中区磁记忆曲线出现波峰或波谷. 进入塑性阶段以后磁记忆曲线产生巨大突变, 磁场强度突变时刻可用于判断焊缝试件即将破坏的临界状态, 梯度峰值可用于表征未焊透缺陷试件的应力集中程度.

关键词: 磁记忆信号; 钢结构; 对接焊缝; 拉伸; 弯曲; 应力集中

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2014)04-0497-05

近年来, 我国每年都有大量的大型体育场馆、展览会馆、机场、火车站等大型钢结构落成, 2008年国家体育场鸟巢用钢4.8万t, 使用焊接材料超过2 000 t, 钢结构焊缝达到30 万延米. 钢结构的加工、安装都需要通过连接来实现, 并且连接的受力情况与构造都较复杂, 往往成为建筑钢结构的薄弱环节. 焊接作为目前钢结构的主要连接形式, 焊接质量直接影响着整个结构的安全性及使用寿命^[1]. 由于焊接节点的内力关系复杂, 同时极易受到所处环境及施工技术等多种不确定因素的影响, 使其健康状况不断恶化, 从而造成突发性的灾难事故. 按照美国90年代的估算, 因焊接接头失效引起的经济损失高达国民生产总值的5%^[2]. 可见, 对钢结构焊接质量的检测与实时监控具有重大的理论研究与工程应用价值.

目前钢结构无损检测主要采用超声、磁粉、射线、涡流和渗透等常规方法, 只能对已形成的裂纹或宏观缺陷进行检测, 无法对早期隐性损伤进行检测^[3], 更不能确定接头的潜在损伤部位与损伤临界状态, 这是造成结构突发性破坏事故发生的重要原因. 金属磁记忆检测技术具有能够对焊接结构中的微观缺陷进行早期诊断, 防止突发性破坏事故发生的潜在优势, 被认为是迄今为止能够对铁磁性材料的内部损伤进行早期诊断的惟一可行的无损检测方法^[4].

尽管国内外专家学者已将磁记忆检测技术应用于机械、压力容器、石油管道等行业, 并成功检测到了应力集中区与早期缺陷^[5], 但在土木工程钢结构探伤领域才处于起步阶段. 本文以Q235建筑钢材的对接焊缝为研究对象, 研究了不同荷载下未焊透缺陷和无缺陷两种焊缝各自对应的磁记忆信号特征及其变化规律, 寻找金属磁记忆信号作为钢结构焊缝安全诊断的依据.

1 磁记忆检测机理

磁记忆检测(MMM)是1997年俄罗斯学者杜波夫提出的一种新兴无损检测技术, 利用地磁环境中应力导致的磁场畸变对铁磁性材料进行检测. 金属磁记忆效应的本质是铁磁性材料内部的“自发磁化”现象与机械效应共同作用的结果^[6]. 物质的自旋磁矩在无外加磁场下自发取向一致的行为, 称作自发磁化, 磁化矢量的方向取决于磁结晶轴的方向. 磁化强度 M 的变化与应力 σ 或应变 ε 等力学的变化密切相关的现象称作磁机械效应. 当外加应力加大时, 会使材料中的晶格组织发生不可逆

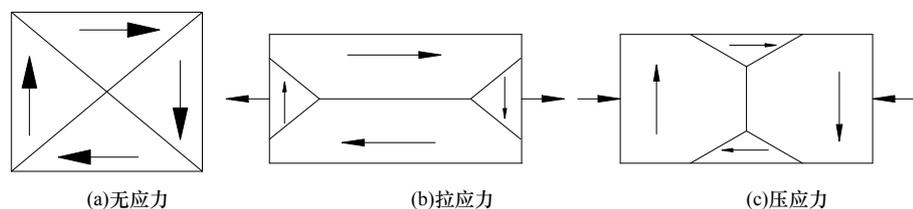


图 1 应力作用下的磁畴组织

Fig.1 Magnetic domain orientation influenced by stress

改变, 产生位错等缺陷, 在磁畴区发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向, 在地磁场的激励作用下形成磁场, 使铁磁材料对外显磁性, 如图1所示. 这种磁状态的不可逆变化在外加工作荷载消除后依然保留, “记忆”着材料所经历的应力集中位置, 即所谓磁记忆效应^[7].

收稿日期: 2013-09-20

修改稿日期: 2014-06-20

基金项目: 陕西省教育厅自然科学研究项目 (12JK0913); 国家自然科学基金项目(51478383)

作者简介: 王威 (1972-), 男, 博士, 副教授. 主要从事钢与混凝土组合结构及建筑结构安全诊断方面的研究. E-mail: wangwgh@xauat.edu.cn

虽然地磁场很微弱，但在磁记忆检测中却起着激励源的作用，这也正是磁记忆检测优于其他磁性无损检测的显著特点，即无需施加外部磁激励。在地球磁场的作用下，铁磁材料受到应力作用时的有效磁场强度为：

$$H_p = H_e + [H_e M_s (a\mu + 3b\sigma)] / [3a\mu - M_s (a\mu + 3b\sigma)] \tag{1}$$

两边对 σ 求偏导，可得：

$$\frac{\partial H_p}{\partial \sigma} = \frac{9ab\mu H_e M_s}{[3a\mu - (a\mu + 3b\sigma)M_s]^2} \tag{2}$$

其中： a, b 为分子场系数， μ 为真空磁导率， H_e 为地磁场， M_s 为磁化强度，对铁磁材料以上参数均为正^[8]，则有 $(\partial H_p / \partial \sigma) > 0$ ，即 H_p 随着拉应力 σ 呈单调递增趋势，拉应力最大处铁磁材料所散发出的有效磁场强度也为最大，反之随着压应力的增大磁场强度数值逐渐减小，在压应力最大处，磁场强度也最小。

在钢结构焊接接头位置，由于焊接不均匀、初始缺陷、热应力等原因，会使其应力状态发生改变，而应力状态的改变又会造成焊缝表面漏磁场信号的改变，因此可以通过漏磁场信号特征量的提取对构件的焊接缺陷进行描述。由于磁记忆检测可以反映出构件萌生宏观裂纹前的应力状态，进而能够达到对焊接结构可能存在的危险区域进行早期评判的目的。

2 试验方案

2.1 试验材料

选用典型的建筑钢材Q235结构钢对接焊缝试件，进行拉伸及弯曲试验，焊条采用E43型。材料屈服强度为240 MPa，极限强度为400 MPa。

试件中央检测区域长200 mm、宽30 mm、板厚10 mm，两边夹持部位各长100 mm，检测步距20 mm，在靠近焊缝区域减小检测步距至10 mm，如图2所示。试件分两组，第一组在试件内预制未焊透缺陷，制作时控制施焊方法，造成焊接未融合的缺陷；第二组严格按照焊接操作规定控制施焊过程，保证质量为无缺陷焊缝。两组焊件的焊缝位置及尺寸大小相同，如图3所示。

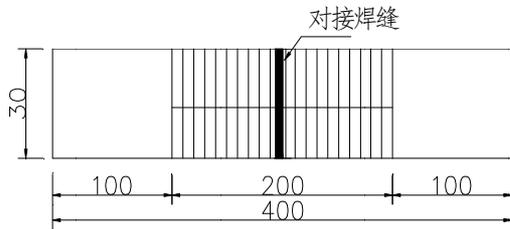


图2 试件形状及测量点标记
Fig.2 Specimen shape and measured points

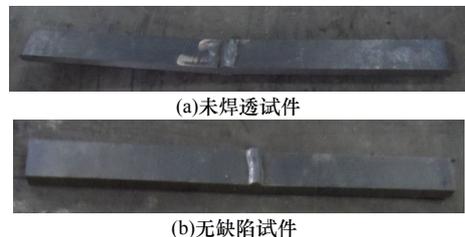


图3 未焊透及无缺陷焊缝试件
Fig.3 Weld specimens of incomplete penetration defects and those without defects

2.2 试验仪器及方法

拉伸试验在 WAW-2000 电液伺服万能试验机上进行，弯曲试验在 WE-60 型万能材料试验机上进行，如图4所示。磁场信号采集设备选用高精度的WT10B型数字高斯计，精度0.01 mT。

拉伸试验按0 kN、71 kN、120 kN 三级加载，三点受弯试验按0 kN、2.5 kN、4 kN 三级加载，分别对应材料的初始强度、屈服强度、极限强度。试件在试验机上缓慢加载至预定荷载后取下，水平放置于测量平台上，将高斯计探头紧贴构件表面测量线逐点测量，以减小提高高度的影响。整个试验过程都在试验室环境下进行，测量过程均置于测量平台同一位置并按南北方向放置，使试件在各个阶段处于同一外界环境，有效消除了外界环境的改变对缺陷漏磁场所造成的影响^[9]。

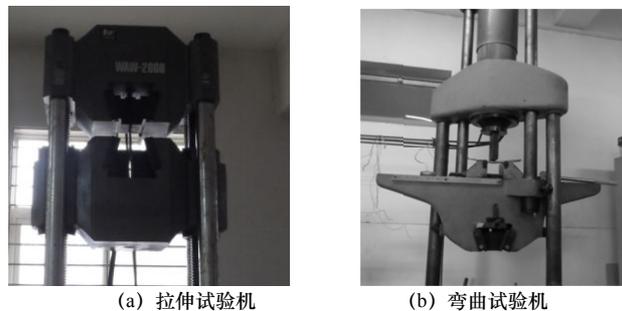


图4 焊缝试件的拉伸与弯曲试验
Fig.4 Tensile test and bending test of weld specimens

3 试验结果及分析

3.1 拉伸荷载下的磁记忆信号分析

图 5(a)为未焊透缺陷试件在不同拉伸荷载作用下的磁记忆信号特征图。考虑到工程实际应用环境, 未对试件做消磁处理, 故未加载时试件的磁场强度并不为零。初始状态, 在荷载为 0kN 时焊缝附近磁记忆曲线有一尖端突出, 说明在初始状态已有较大漏磁场存在, 试件中部预制的未焊透缺陷存在磁记忆信号的突变, 表明了磁记忆信号变化与焊接缺陷有一定的对应关系。

随着荷载的增加, 磁记忆曲线信号强度呈现逐渐增大趋势。这是由于, 荷载作用下拉应力逐渐增大, 对磁畴的转向起到了推动作用, 磁畴的磁化作用逐渐转向到拉应力的作用方向上, 促使该方向上的漏磁场强度增加。但各级荷载下漏磁场增加幅度有明显不同, 记各级加载下峰值的变化值为 ΔH_p , $\Delta H_{p1} = H_{p1} - H_{p0}$, $\Delta H_{p2} = H_{p2} - H_{p1}$, 其中 H_{pu} 、 H_{py} 、 H_{p0} 分别对应极限荷载、屈服荷载、初始荷载下的漏磁场强度。在荷载增加到屈服荷载 71 kN 时, 增加幅度相对较小, 峰值增加值 $\Delta H_{p1} = 0.12 \text{ mT}$ 。当荷载达到极限荷载 120 kN 时, 磁记忆信号曲线继续变陡, 峰值出现剧烈变动 $\Delta H_{p2} = 0.41 \text{ mT}$, 与屈服荷载时的 ΔH_{p1} 相比增大约 3.5 倍, 此刻应力集中达到最大, 取下试件进行观察, 发现焊缝连接处已出现严重破损。说明, 构件进入极限阶段的危险时刻 ΔH_p 会产生很大的突变, 可根据法向漏磁场变化值 ΔH_p 迅速增强时刻作为焊缝构件即将破坏的判据, 从而及时采取有效措施, 避免因焊缝的突然破坏而引起结构失效。

图 5(b)为无缺陷焊缝试件在不同拉伸荷载作用下的磁记忆信号特征图。初始状态荷载为 0kN 时, 法向磁场变化较为平缓, 无明显尖端突出。随着荷载的增加, 磁记忆信号值逐渐增大, 同时在 $l=60 \text{ mm}$ 附近有较大波动。当荷载增大到 120 kN 时, 漏磁场强度急剧增大, 在 $l=60 \text{ mm}$ 处出现明显峰值, 应力集中达到最大, 取下试件观察钢材已出现宏观裂纹, 但焊缝处并无明显宏观变化。表明该试件的对接焊缝质量良好, 而钢材本身由于内部初始缺陷等原因在 $l=60 \text{ mm}$ 附近出现较大应力集中, 此处为构件的危险位置。

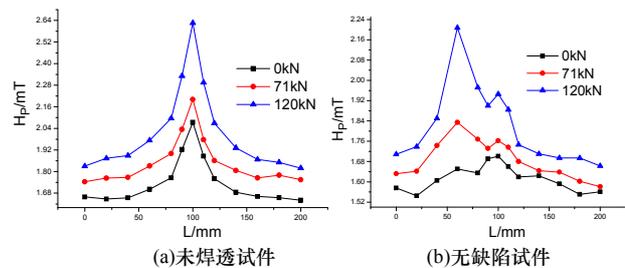


图 5 拉伸荷载下各试件磁记忆信号分布图
Fig.5 Magnetic memory signal distribution of weld specimens under tensile loads

3.2 弯曲荷载下的磁记忆信号分析

由于试件底面与顶面分别承受拉应力与压应力, 对底部和顶面分别进行磁记忆信号采集, 未焊透试件底面在不同弯曲荷载下的磁记忆检测结果如图 6(a)所示。可以看出, 整个加载过程中, 漏磁场曲线与拉伸荷载下曲线形状一致, 初始阶段焊缝位置已有明显峰值, 随荷载增加磁记忆信号不断增强。但在试件两端约 0~50 mm 和 150~200 mm 范围内, 磁场信号较为接近, 这是由于在弯曲荷载的作用下, 试件两端应力较低, 从而磁记忆信号也较弱。

图 6(b)为未焊透试件顶面在不同弯曲荷载作用下的磁记忆信号特征图。由于存在未焊透缺陷, 初始阶段焊缝位置的磁记忆曲线即有尖端突出。随着荷载增加到 2.5 kN, 漏磁场强度出现较大波动, 呈现出多个较明显的波峰与波谷。三点受弯荷载作用下, 试件顶部产生压应力, 而焊缝及其周边的热影响区域始终是高应力集中部位, 但其集中程度并不完全随着荷载的增加而有规律的改变。主要原因是, 未焊透缺陷导致在焊缝周边附近出现不均匀应力集中现象。当对试件施加压应力时, 残余拉应力与部分外加应力相互抵消, 残余压应力与外加应力相互叠加, 磁记忆曲线在缺陷附近出现多个波峰与波谷。当荷载值增加到 4kN 时, 压应力作用下试件的应力集中已经很严重, 试件中部出现明显的波谷。各级荷载下的漏磁场

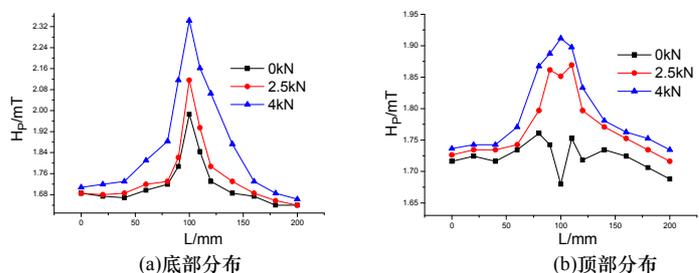


图 6 弯曲荷载下未焊透缺陷焊缝试件磁记忆信号图
Fig.6 Magnetic memory signal distribution of weld specimen of incomplete penetration defects under bending loads

强度 ΔH_p 变化更加明显, 由于未焊透缺陷试件焊缝处有较大的初始不均匀拉应力, 屈服阶段以前磁场曲线变化较为缓慢, 由初始与屈服时的凸曲线骤变为极限荷载时的凹曲线, ΔH_p 突变时刻可有效判断压应力作用下焊缝构件的临界状态.

无缺陷焊缝试件, 底面在不同弯曲荷载下的磁记忆检测结果如图 7(a)所示. 弯曲荷载下试件底面受拉, 在初始阶段, 磁记忆曲线较为平缓, 但在焊缝附近有轻微波峰与拐点出现. 随着外荷载的增加, 焊缝处的漏磁场继续增强, 逐渐形成较为明显的波峰, 表明焊缝位置应力集中较为严重, 取下后可见试件底面已有明显裂纹. 虽然构件焊缝处并未预制缺陷, 但由于焊缝处焊接初始应力较大, 同时受弯作用时焊缝正好位于试验压头正下方, 导致此处应力集中程度更加明显.

图 7(b)为试件顶面在弯曲荷载作用下的磁记忆曲线, 荷载为 0 kN 时, 曲线无明显尖端; 荷载增大到 2.5 kN 时, 磁场强度有所降低. 由于初始及加工热影响等原因, 焊缝位置有残余应力存在, 加载过程中荷载产生的压应力与残余拉应力相互抵消, 该处应力集中程度减小, 试件中部磁场强度减小, 磁记忆曲线呈现轻微波谷现象, 总体仍较为平缓. 当达到极限荷载 4kN 时, 焊缝处应集中达到最大值, 曲线出现明显波谷, 同时 ΔH_p 变化显著.

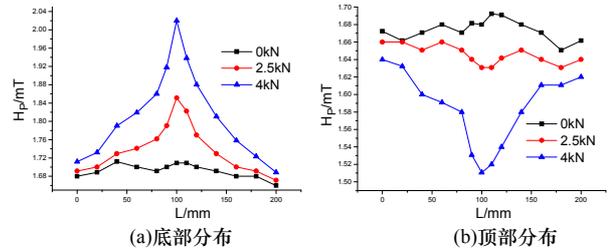


图 7 弯曲荷载下无缺陷焊缝试件磁记忆信号分布
Fig.7 Magnetic memory signal distribution of weld specimen without defects under bending loads

3.3 未焊透缺陷和无缺陷焊缝试件磁记忆信号对比分析

对比图 5(a)、5(b)及图 6(a)、图 7(a), 在拉应力作用下, 各试件磁记忆曲线形状相似, 但随着荷载的增加, 漏磁场曲线产生显著差别. 记梯度为 $K = dHp/dLK$, 梯度最大值为 $|K_{max}|$, 磁场强度最大值为 H_{pmax} , 信号特征对比见表 1.

表 1 拉应力下两种焊缝试件磁记忆信号特征对比
Tab.1 Comparison of magnetic memory signal with two weld specimens under tensile stress

试件		$H_{pmax} /(\text{mT})$			$ K_{max} /(\times 10^2 \text{ mT/mm})$		
		0MPa	240MPa	400MPa	0MPa	240MPa	400MPa
无缺陷	拉	1.68	1.74	1.92	0.4	0.51	0.95
	弯	1.71	1.85	2.02	0.05	0.4	0.70
未焊透缺陷	拉	2.13	2.25	2.66	1.55	1.65	2.70
	弯	1.99	2.11	2.31	1.15	1.50	1.25

分析表 1 试验数据可知, 随着荷载的增加, 磁记忆曲线峰值 H_{pmax} 、梯度峰值 $|K_{max}|$ 都有明显变化. 由于存在未焊透缺陷, 初始即有较大的应力集中, 虽然试件的力学性能相

同, 但在相同外加荷载下表现出的磁场强度并不一致. 总体而言: 未焊透缺陷试件的曲线峰值 H_{pmax} 大于无缺陷试件, 且其数值为无缺陷试件的 1.2 倍左右. 而梯度峰值 $|K_{max}|$ 在图 5(a)、图 6(a)中存在未焊透缺陷, 初始状态就有明显波峰, 随着荷载的增加, 波峰变得更加突出, 梯度较大; 而在图 5(b)、图 6(b)中初始曲线较为平缓, 试件在屈服与极限状态时, 梯度较小. 对比未焊透缺陷试件 $|K_{max}|$ 是无缺陷试件 3 倍左右, 即相对磁特性参数 H_{pmax} 而言, 利用梯度峰值 $|K_{max}|$ 来表征未焊透缺陷的损伤程度可能更加敏感. 这与未焊透属于面积缺陷^[10], 对应力集中十分敏感有关.

值得注意的是, 由表 1 同时可以发现, 对于存在未焊透缺陷的受弯试件, 其底面在拉应力作用下, 400 MPa 时的梯度峰值 $|K_{max}|$ 出现反常为 1.25, 反而小于应力为 240 MPa 时的梯度峰值 1.50, 与其他应力作用下的 $|K_{max}|$ 呈现了一种不同的变化趋势. 这可能是由于试件存在初始缺陷, 未加载时试件表面的磁记忆信号在缺陷处已具有较大的值, 而缺陷两侧由于未承受任何应力, 因而使其具有较小数值, 造成初始阶段梯度 $|K_{max}|$ 有了较大值. 随着底面弯曲拉应力的增加, 试件缺陷两侧的磁记忆信号逐渐增强. 当应力达到 400 MPa 时, 缺陷两侧的磁记忆信号增长幅度甚至超过了缺陷位置处, 也就造成了 $|K_{max}|$ 反而出现减小的情况.

对比图 6(b)、图 7(b), 在同样的压应力作用下, 未焊透缺陷的试件的磁记忆效应, 随荷载的增加, 出现一定的波动情况; 而无缺陷试件磁记忆效应, 随应力的增加, 磁场强度一直减小. 两试件从屈服阶段到极限阶段漏磁场强度变化值 ΔH_p 骤变, 出现明显波谷, 此处应力集中程度最大, ΔH_p 可有效表征压应力

作用下构件的危险临界状态。

4 结论与建议

(1)通过磁记忆信号变化能够提前判断出焊缝的缺陷位置, ΔH_p 迅速增强时刻可作为焊缝构件即将破坏的判据。

(2)磁场强度与外应力存在明显的对应关系, 拉应力作用下, 磁记忆曲线在应力集中处出现明显波峰; 压应力作用下, 磁记忆曲线在应力集中区出现明显波谷。

(3)梯度 $|k_{\max}|$ 反应了应力集中程度, 表征未焊透缺陷的应力集中程度比磁场强度峰值 $H_{p_{\max}}$ 更为敏感。

(4)在钢结构对接焊缝实际检测中, 可利用两个磁特性物理参量 $H_{p_{\max}}$ 和 $|k_{\max}|$ 来反映构件的缺陷位置及发展状况, 并利用 ΔH_p 作为出现临界状态的一个判据, 达到早期损伤监测的目的。考虑到实际检测过程中, 受外界环境影响波动较大, 建议选取一组标准焊缝对比试件, 用以和实际检测过程中的结果进行比对, 借此判断出钢构件的损伤状态。

参考文献 Reference

- [1] 王若林, 高巍, 叶肖伟, 等. 焊接结构疲劳破坏的若干问题[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2013, 46(2): 194-198.
WANG Ruolin, GAO Wei, YE Xiaowei, et al. Some issues of fatigue failure of welded structures[J]. Journal of Wuhan University: Engineering, 2013, 46(2): 194-198.
- [2] 李生田, 刘志远. 焊接结构现代无损检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
LI Shengtian, LIU Zhiyuan. Non-destructive testing technology of new welding structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [3] YANG L.J., LIU B., CHEN L.J., et al. The quantitative interpretation by measurement using the magnetic memory method (MMM)-based on density functional theory [J]. NDT&E International, 2013, (55): 15-20.
- [4] DUBOV A A, DEMIN E A, MILYAEV A I. The experience of gas pipeline stress-strain 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.
- [5] 杨理践, 刘斌, 高松巍, 等. 金属磁记忆效应的第一性原理计算与试验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(8): 1-7.
YANG LiJian, LIU Bin, GAO Songwei, et al. First-principles calculation and experimental study of metal magnetic memory effects[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(8): 1-7.
- [6] 李一, 任尚坤. 铁磁试件静载拉伸时应力磁化的反转效应[J]. 钢铁研究学报, 2013, 5(3): 30-33.
LI Yi, REN Shangkun. Magnetization Reversal of Ferromagnetic Specimens Under the Static Tension Conditions[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 5(3): 30-33.
- [7] 王正道, 姚凯, 丁克勤. 金属磁记忆法研究进展[J]. 无损检测, 2009, 31(12): 1011-1014.
WANG Zhengdao, YAO Kai, DING Keqin. Development of Metal Magnetic Memory Testing Technique[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(12): 1011-1014.
- [8] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
REN Jilin, LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: Science press, 2008.
- [9] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 尹大伟. 拉伸及疲劳载荷对低碳钢磁记忆信号的影响[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 742-744.
DONG Lihong, XU Binshi, DONG Shiyun, YiN Dawei. Influence of Tension and Fatigue Load on the Low Carbon Steel Magnetic Memory Signals[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 742-744.
- [10] 倪真. 钢结构焊接缺陷对施工质量的影响[J]. 钢结构, 2013, 28(3): 66-71.
NI Zhen. The Influence of welding defects on construction quality for steel structure [J]. Steel Structure, 2013, 28(3): 66-71.

Experimental detection on implicit damage of butt weld of steel structure by magnetic memory testing

WANG Wei¹, FAN Hao¹, SU Sanqing¹, YANG Weisheng¹, LIU Jing¹, CHEN Chang²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Techn., Xi'an 710055, China;
2. School of Materials & Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Magnetic memory signal of incomplete penetration defects and those without defects of butt weld steel specimens are analyzed under tensile and bending loads. The results show that there are some correlations between the normal magnetic field and the stress. Magnetic field intensity strengthen will increase as the tensile stress increase, and decrease as the compressive stress increase. The magnetic memory curve appear peak value or across the area of stress concentration. The curve has an abrupt change when the specimens arrive at the plastic stage, and the magnetic field intensity moment of abruptly change can be used to judge the critical state of specimens. The maximum gradient can be used to reflect the degree of stress concentration of weld incomplete penetration.

Key words: magnetic memory signal; steel structure, butt weld; tensile; bending; stress concentration

(本文编辑 吴海西)