

钢梁弯曲应变与磁记忆效应的关系研究

王 威, 任广超, 苏三庆, 牛晓波, 赵旭冉, 徐 秦, 易术春

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 金属磁记忆检测技术是一种新型的无损检测技术, 已经在很多工程领域得到应用, 但在建筑钢结构领域中, 对这种技术的探究大都集中在应力与磁效应方面, 而本文却从应变与磁畴翻转的角度入手, 通过对钢梁四点受弯试验中应变与磁信号变化曲线的分析发现: 翼缘板受拉部位在屈服前磁信号强度数值随着拉应变的增加而增加, 当应变超过屈服应变后磁信号数值呈下降趋势, 同时腹板受压部位在钢梁屈服前磁信号强度随压应变的增加也在增加. 在整个试验过程中, 受拉或受压部位磁信号的变化幅值不大, 同一条检测线上同号弯矩区段内的不同部位磁记忆信号的变化幅值基本相近.

关键词: 应变; 磁记忆效应; 磁畴; 钢梁; 法向磁场值

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0029-07

Research on the relationship between flexural strain and metal magnetic memory for steel beam

WANG Wei, REN Guangchao, SU Sanqing, NIU Xiaobo, ZHAO Xuran, XU Qin, YI Shuchun

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

Abstract: Metal magnetic memory testing (MMMT) technology is a new nondestructive testing technology, and has been applied in many engineering fields. In the industry of structural steel building, MMMT technology is mostly concentrated on stress magnetic effective perspective, but the strain and magnetic domain relationship is very seldom studied by other researchers, which will be analyzed in this paper. The relationship curve between magnetic memory signal and the bending strain of steel beam in four points loading testing are analyzed, and some conclusions are gotten as follows: Magnetic memory signal value of flange of steel beam will increase with the strain before yielding strength in tensile position, and will decrease with strain after yielding. At the same time, the magnetic memory signal value in the compression zones will increase with the compress strain before the yielding of the steel beam. In the whole process of testing, variation range of magnetic memory signals are small with tensile strain or compress strain, and magnetic memory signal amplitude value are nearly equal in the same testing line and different points that are located in same bending direction.

Key words: strain; metal magnetic memory effective; magnetic domain; steel beam; normal component of magnetic field intensity value

金属磁记忆检测技术是一种新型的无损检测技术, 其理论最早由俄罗斯专家 Dubov 提出, 该技术基于金属磁机械效应, 可对铁磁构件的应力集中及隐性损伤部位进行早期预测^[1], 因此一经提出便受到广泛关注, 在实际工程中得到了广泛应用, 主要集中在压力容器、石油管道、钻杆等领域, 如: Doubov 等将金属磁记忆检测技术广泛应用于化工设备涡轮叶片、锅炉管道焊接质量评估等, 并提出了基于磁记忆检测技术的设备或部件的剩余使用寿命评估方案^[2]. 在国内, 王朝霞等将磁记忆检测技术运用于检测压力容器和铆接件^[3].

李午申等对焊接裂缝的检测也做了大量的研究工作.

在金属磁记忆检测技术的基础理论方面国内外也进行了大量研究. 如能量平衡学说, 从能量平衡的角度解释了铁磁性材料在地磁场和长期载荷的作用下会产生位错现象并且产生较大能量, 内部磁畴的畴壁发生不可逆的重新取向排列, 形成漏磁场释放能量来抵消因位错而产生的高能量, 从而达到能量平衡. 二维磁偶极子数值模型, 即通过分析磁记忆信号的特征, 研究不同影响因素, 如缺陷埋深, 提高值等, 对金属磁记忆信号的影

收稿日期: 2015-10-30

修改稿日期: 2016-12-29

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)

作者简介: 王威(1972—), 男, 教授. 主要研究方向为钢与混凝土组合结构及结构安全诊断. E-mail: wangwgh@xauat.edu.cn

响等。

近年来,一些大跨度空间钢结构、大型厂房钢结构等,因受力复杂,建筑体量庞大,存在较多的安全隐患且事故频发。如:桥式吊车在行进的过程中对吊车梁施加反复荷载,因而在裂纹萌生阶段不易察觉,而裂纹一旦扩展就会迅速发展成宏观裂缝,造成疲劳破坏。又如钢结构构件的一些连接节点处,因施工需要往往要开凿孔洞或设置一些连接构件,在这些部位容易形成一些尖锐的凹槽或突起,在承受荷载时会造成应力集中,随着荷载的继续增大这些部位往往是最先发生破坏的地方。可见对建筑钢结构进行早期的检测以确定其薄弱部位显得尤为重要。而目前的无损检测技术如超声探伤,磁粉检测,渗透等检测方法只能对已经发展成型的宏观裂缝进行检测,不能提前预警,金属磁记忆检测技术可以在宏观的裂纹形成前对铁磁材料早期的应力集中及隐性损伤部位进行预测,因此在建筑钢结构无损检测领域具有很好的应用前景^[4-6]。

建筑钢结构的主要受力构件如:梁、板、柱、墙等往往要承受很大的弯矩,而现有关于金属磁记忆检测技术的探究大多集中在拉伸试件的试验探究,并且大都通过应力变化来分析相应的磁记忆信号变化。而本文则从应变的角度,来分析钢梁弯曲应变所引起的磁畴翻转及磁机械效应的变化过程,并寻找应变与磁记忆效应的对应关系。

1 试验方案

试验通过研究构件的压缩和拉伸过程来获取构件表面的磁信号,并建立铁磁构件磁记忆信号特征与应力应变发展过程的关系,而四点受弯钢梁纯弯段内既存在受拉部位也存在受压部位,因此可以通过构件的四点受弯试验来展开研究。

1.1 试验材料

Q235 钢材为建筑钢结构常用钢材,试验选用 Q235 钢材,化学成分及力学性能如表 1、表 2 所示。

选取两组试件,其长度分别为 1.8 m 和 1.5 m 的 14 号热轧工字钢,每组试件各两根,共计 4 根。每根试件在腹板处选取间距相等的五条检测线,在翼缘板处选取间距相等的三条检测线,共计 8 条检测线。为防止加载时构件发生侧向滑移,支座设置于距试件两端各 0.15 m 处,即 1.8 m 的试件其跨度为 1.5 m,1.5 m 的试件其跨度为 1.2 m,腹板的检测线从上到下分别命名为 1-1', 2-2', 3-3',

4-4', 5-5'。同样翼缘板等间距的三条检测线分别命名为 1-1', 2-2', 3-3'。每条检测线设置若干检测点,相邻检测点的距离为 50 mm。采用 BX120 系列箔式电阻应变计。测试线和测量点的分布如图 2 图 3 所示。

表 1 Q235 钢材化学成分表

Tab. 1 Chemical composition of Q235 steel

元素	C	P	S	Si	Mn
含量	≤0.12~0.20	≤0.045	≤0.045	≤0.30	0.30~0.70

表 2 Q235 钢材力学性能表

Tab. 2 Mechanical properties of Q235 steel

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
数值	235	375~460	≤26

1.2 试验方法及设备

在试件受力段的两个三分点翼缘板上方,居中处各设置一个方钢垫块,两个垫块通过钢筋焊接连接,以此作为转换构件,使试件达到四点受弯的目的,垫块尺寸为 80 mm×80 mm×80 mm。试验加载示意如图 1 所示。

跨度为 1.5 m 的钢梁试件,其腹板及翼缘板测量线布置如图 2 所示,其中测点的布置为图中网格交点处。图 3 为跨度 1.8 m 的钢梁测点布置。

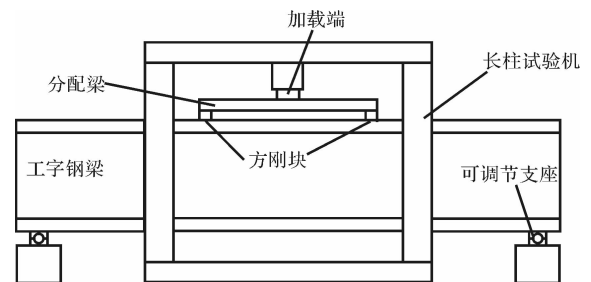


图 1 加载示意图

Fig. 1 Experimental loading

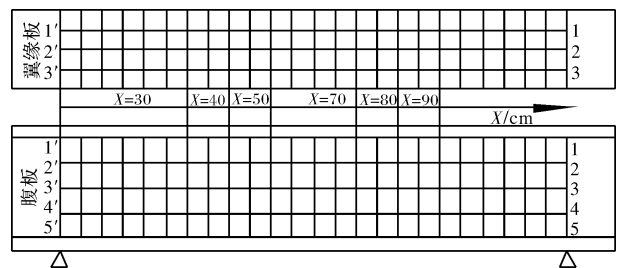


图 2 长 1.5 m 钢梁测试线及测点布置

Fig. 2 The testing line and points distribution of long equal 1.5 m steel beam

试验在 YAW5000 型液压伺服压剪试验机上进行,磁信号用高斯计进行采集,其主要技术指标为:量程为 0~6 mT,精度为 0.001 mT,频率范

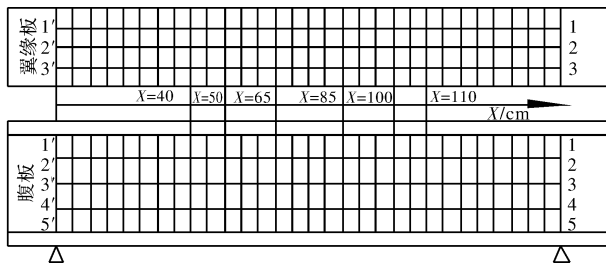


图3 长1.8 m钢梁测试线及测点布置

Fig. 3 The testing line and points distribution of long equal 1.8 m steel beam

围和显示单位分别为: 10 ~ 200 Hz, mT/GS, 1 mT=10 GS.

下面介绍本次试验的加载及测量方案:

开始加载前应对试件支座进行调平对中, 检查加载点的转换构件, 保证构件处于四点受弯状态, 受力点处于三分点处. 不考虑构件的塑性发展可计算得到跨度为 1.5 m 的试件其屈服强度在 88 kN 左右, 跨度为 1.2 m 的试件其屈服强度为 109 kN, 采用分级加载的方式, 跨度 $L=1.5$ m 时, 分别加载至 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 kN 及失稳时; 跨度 $L=1.2$ m 时, 加载至 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120 kN 及失稳时; 进行在线检测并取其对应位置的应变值.

采用在线测量的方式, 通过高斯计获取试件表面磁信号, 测量时应使探头在测试点处保持一段时间以便获取稳定的磁信号, 同时每个测点应测量两到三次, 以减小偶然误差. 对于本次试验, 每个测点进行五次测量, 将所得 5 个数值中的最大值及最小值去掉后, 中间 3 个数值求取均值, 将均值作为最终的检测数据. 1.5 m 试件每条测线共 25 个检测点, 1.8 m 试件每条测线共 31 个检测点, 检测时从左到右依次检测, 测量过程中探头始终与试件表面接触以减小提离距离的不稳定带来的误差. 因全程在线测量, 可保证每次获取的磁信号都有相同的环境磁场, 又因在试验的时间段内实验室的环境磁场波动不大, 试验机周围环境磁场可近似看作为恒定数值, 同时考虑钢梁的实际工作环境, 因此并没有对构件进行消磁. 由于高斯计探头为霍尔元件, 因此在测量每个测点时, 可手动改变探头的摆放方向来分别获取钢梁表面磁信号的法向分量和切向分量.

2 试验结果分析

试件加载至失稳后试验停止, 将整个加载过

程中所获取的数据进行整理后分析发现: 在承受相同荷载作用下, 同一试件的各检测线上磁信号所表现出的磁记忆变化特征基本相似. 因此在两组试件中各选一个, 以腹板检测线 1-1', 及翼缘板检测线 2-2' 为例进行分析.

2.1 翼缘受拉部位磁信号与应变关系

下面分别对跨度为 1.2 及 1.5 m 的试件弯剪段及纯弯段进行分析:

由图 4 可看出: 翼缘板表面磁信号随应变变化关系基本相同, 在应变很小的加载初期, 试件左侧磁信号绝对值大于右侧磁信号绝对值, 这说明试件在加载前本身具有的磁场强度左侧要大于右侧, 由于加载初期应变较小, 无论是磁畴壁的移动还是滑移面的滑移, 量值都很小, 基于磁机械效应的磁场增加并不明显, 甚至还会出现减小的现象. 但当应变 $\epsilon > 0.02\%$ 后, 磁信号变化规律与应变变化规律具有很强的正相关性, 此时随着应变的增加磁信号数值增加明显, 当应变达到 $0.10\% \sim 0.12\%$ 时曲线达到极值, 在这个过程中可看到在四个测点处磁信号数值的变化范围在 $0.05 \sim 0.08$ mT 之间, 四个测点的磁信号变化范围相差不大, 但是左侧磁信号极值的绝对值依然大于右侧磁信号的绝对值. 因此可知, 在经历了相同的应变发展过程后, 各个测点的磁信号变化范围及变化规律是一致的, 且具体数值是不对应的, 变化范围一定时, 磁信号的极值点数值是由初始值确定的.

当磁信号到达极值点后, 随着应变的增加磁信号数值开始减小. 这说明当应变达到 $0.10\% \sim 0.12\%$ 时, 磁场已至饱和状态, 试件内部磁畴重新取向已基本完成, 磁畴壁的移动已达最大. 磁畴重新取向后其方向具有一定的规律性, 因此宏观上表现为具有一定的磁场强度. 当应变超过磁信号极值点所对应的数值后, 磁信号数值开始下降, 这是由于试件达到屈服后应力变化不大, 而应变速率加大, 此时试件内部的晶格结构遭到破坏, 磁畴壁的移动方向受到很大影响, 磁信号取向原本表现出的规律遭到破坏, 同时滑移面的位移及滑移速率都在增加, 高位错密度的位错缠结形成非常强的钉扎, 阻碍了磁畴壁的移动. 因此应变与磁信号的变化规律呈现递减状态.

下面对 1.5 m 钢梁进行分析:

由图 5 可看出 1.5 m 试件腹板上磁信号与应变的关系曲线与 1.2 m 试件的关系曲线走势相似, 当应变达到 0.12% 左右时会出现一个极大值点.

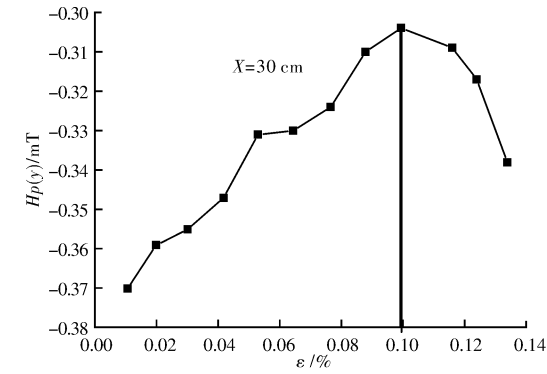
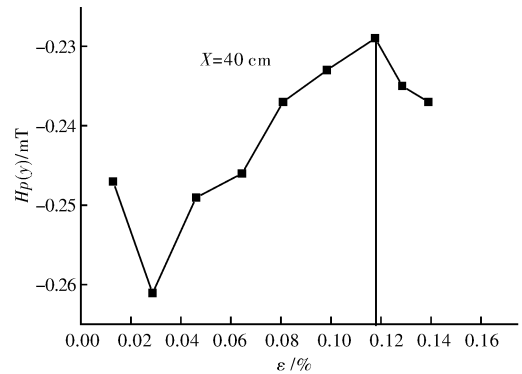
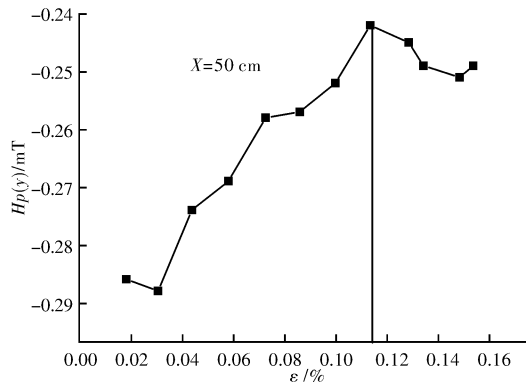
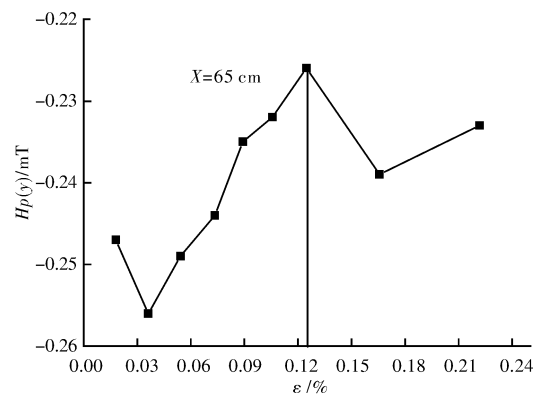
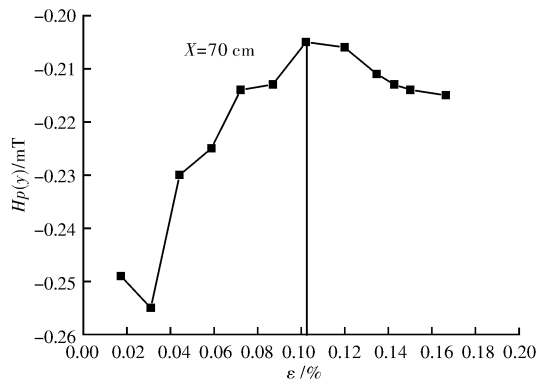
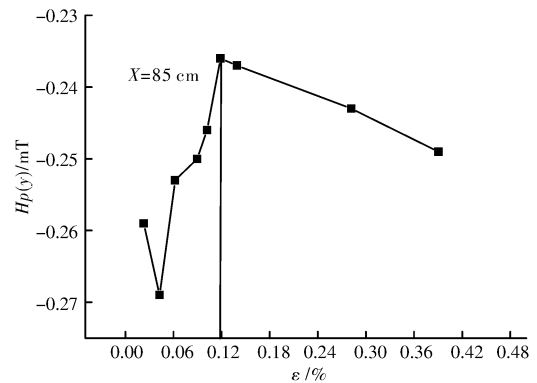
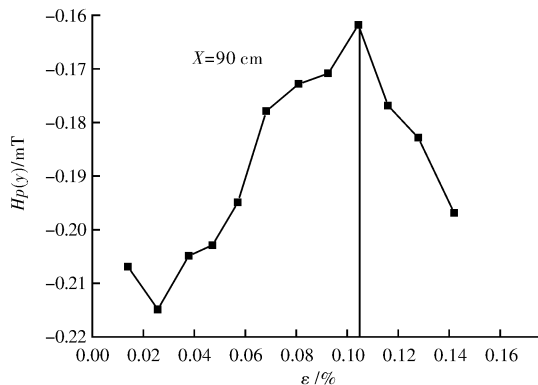
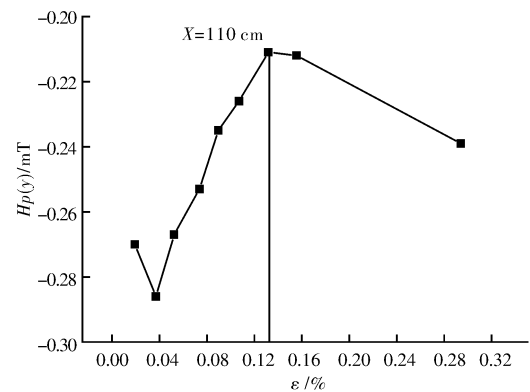
(a) $X=30$ cm(a) $X=40$ cm(b) $X=50$ cm(b) $X=65$ cm(c) $X=70$ cm(c) $X=85$ cm(d) $X=90$ cm(d) $X=110$ cm

图 4 跨度 1.2 m 钢梁翼缘测试线上应变与磁信号关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of magnetic memory signals and strains in testing lines on flange of steel beam of 1.2 m span

图 5 跨度 1.5 m 钢梁翼缘测试线上应变与磁信号关系线

Fig. 5 Relationship curve of magnetic memory signals and strains in testing lines on flange of steel beam of 1.5 m span

在极大值点出现之前,磁信号的数值随着应变的增加而增加,1.5 m 试件四个测点处的磁信号在加载初期有一个极小值点,大约在 $\epsilon=0.04\%$ 左右时出现,这个极小值点所对应的磁信号数值到初始值的幅值很小,大约在0.01 mT 左右,由于试件较长,其初始磁信号的无规律性也更加明显,并且在荷载作用初始阶段,由于荷载很小,应变速率同样很小,磁畴壁的位移方向并不具有一定的规律性,只有当应变发展到一定阶段且滑移面有一定位移时,磁场的变化才能表现出一定的规律性,此时初始条件下试件本身的自有磁场并不能影响磁信号的变化规律。

当应力达到比例极限时 Q235 钢材的应变约为0.1%,达到屈服强度时,应变约为0.15%。由图4(a)~(d)及图5(a)~(d)可看出,在翼缘板检测线上,所测得的磁信号与应变关系曲线都在应变约为0.10%~0.12%时达到极值,随后有不同程度的下降,假若磁信号的变化由应力决定,那么当应变达到极值点所对应的应变时,试件相应的应力应有小幅度增加,磁信号也应有小幅增加,或者有小幅度波动,而从图中所得结果来看,从应力角度不能解释极值点后磁信号数值下降这一现象。从应变角度分析,在比例极限前应力应变呈线性关系,应变速率均匀,此时的磁信号也随应力应变的增加而增加,当到达比例极限后应力应变为非线性变化,尤其是到达屈服强度后应力基本保持不变,而应变急剧增加,应变速率的增加导致试件内部的微观结构迅速破坏,在之前重新排列的晶格组织再度发生变化,此时的磁畴取向及磁畴壁的移动开始向无规则方向发展,磁畴的取向经历了最初的无规则取向到加载后向重新统一取向,再到试件屈服后的无规则取向的发展过程。铁磁构件在受到外力作用时磁矩的重新取向及磁畴壁的位移与偏转,其根本原因还是应力的作用导致铁磁体发生应变,因此可以认为引起磁畴的重新取向与磁畴壁位移的直接原因是材料的应变^[7-11]。

正是由于磁畴取向的一致才让试件表现出一定的磁特性,这种磁特性是应变与地磁激励共同作用的结果。在无外加磁场的情况下,单纯的应力应变并不能使铁磁构件表面表现出磁特性。同时,由于应力应变的作用,试件在出现缺陷时磁阻增加并出现漏磁也是一个原因。然而对于未加载前本身就存在的缺陷,或者在试件本身的一些复杂边

界处,其磁场也会表现出突然的增加或减小,这种现象是由于磁力线从试件内部穿出或者由空气介质进入试件内部的过程中,试件表面形状发生改变,进而导致磁场方向改变的原因,并不能用本文所述的应变发展过程来解释。

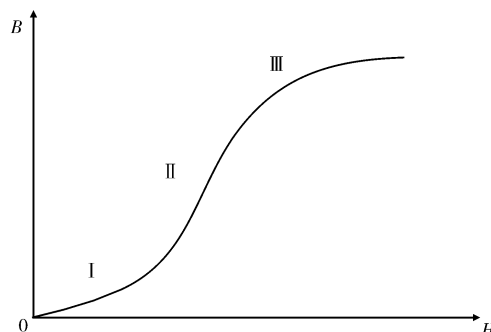


图6 磁化曲线

Fig. 6 Magnetizing curve

从磁化曲线的角度分析来看,磁化曲线反映了铁磁体在外加磁场条件下磁性的变化过程,它说明铁磁体存在一种磁饱和状态^[12],而磁记忆检测技术中虽没有外加磁场的作用,但自身磁畴取向的改变也可看成一种磁化现象,从获得的磁记忆检测曲线可以看出,加载后期随着应力应变继续增加,铁磁体表面的磁场强度出现极值点,这也说明了,磁记忆检测技术是遵循磁化曲线所描述的磁化规律,并存在一个磁化的饱和状态。

2.2 腹板受压部位磁信号与应变关系

分析图7和图8,发现四点受弯试验在加载点处试件出现很大的局部应力,而腹板的1-1'检测线处于五条检测线的最上方,在其三分点处的局部应力应变较腹板其他检测点的应力应变大,为研究应力应变对磁信号变化的影响机理,选择这两个靠近加载点处的磁信号进行分析。从以上四条曲线可以看出,随着应变绝对值的增大磁信号的绝对值也随着增大,这说明应变的发展确实可以解释磁信号的变化特征。

由1.2 m 试件左侧测点的磁信号变化曲线可以看出,随着压应变的增加,磁信号绝对值经过了一个快速的增长阶段,这个阶段大致在应变从零至0.06%的区域内,紧接着曲线发展接近平缓,这说明磁场强度向饱和发展,而右侧曲线也大致经过了一个相似的发展过程。虽然1.5 m 试件两个测点处的磁信号曲线发展趋势不如1.2 m 试件的明显,但曲线也有微微的下凹。

受压腹板测试线上的磁信号强度与应变表现出

很强的相关性,并没有出现翼缘板测试曲线先增大后减小的特性,也没有极值点的出现.可以看出试件在承受拉力与压力时其磁信号的变化特征并不相同.金属在承受压力后内部发生很大的塑性流动,

原来的枝状晶格结构遭到破坏,进而形成新的晶格组织,此时试件内部的孔隙裂纹被压合,组织更加均匀,内部更加密实,磁畴的偏转会进一步发展,因此才会出现与受拉测试曲线不同的特征.

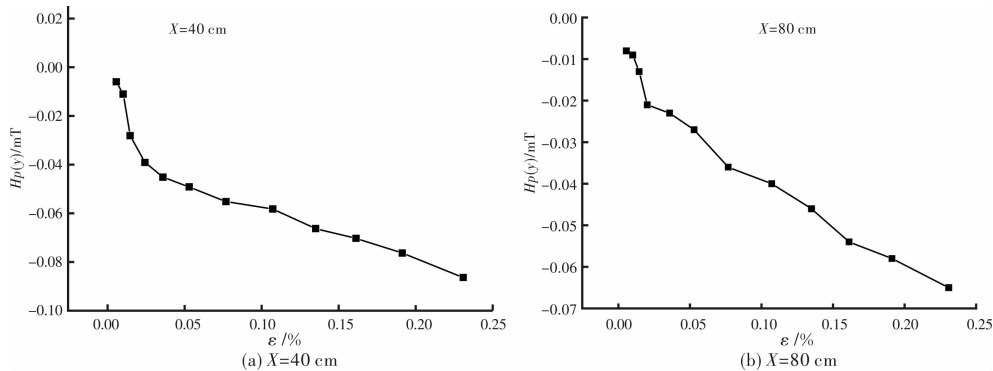


图 7 跨度 1.2 m 钢梁腹板测试线上压应变与磁信号关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of compression strains and magnetic memory signals in testing lines on flange of steel beam of 1.2 m span

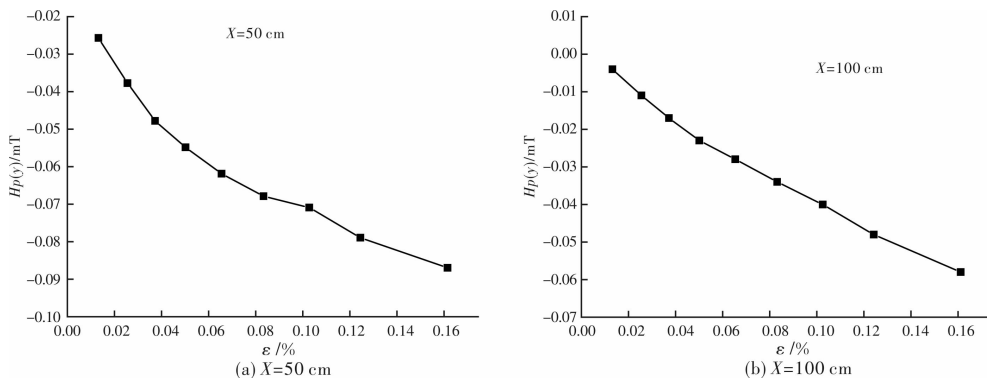


图 8 跨度 1.5 m 钢梁腹板测试线压应变与磁信号关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of compression strains and magnetic memory signals in testing lines on flange of steel beam of 1.5 m span

3 结论

(1)在受拉状态下,磁记忆信号法向分量随着应变的增加而增加,当应变达到 $0.1\% \sim 0.12\%$ 后, $H_p(y)-\epsilon$ 曲线出现极值点,磁记忆信号开始下降.

(2)在受压状态下磁记忆信号法向分量随着压应变的增加而减小,与受拉状态不同的是加载过程中并没有出现极值点.

(3)在整个加载过程中,与应力相比,应变能更好的解释受拉状态下 $H_p(y)-\epsilon$ 曲线先上升后下降的趋势.

(4)在受拉状态下,随着应变的发展磁畴取向趋于一致,而当进入屈服阶段后应变速率增加导

致磁畴取向又趋于混乱,进而导致磁记忆信号法向分量随应变的增加开始下降.同时也可通过受拉状态下 $H_p(y)-\epsilon$ 曲线的极值点来划分屈服前与屈服后两个阶段.

参考文献 References

- [1] 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.
- [2] TANASIENKO A G, Suntsov S I, Dubov A A. Chemical equipment inspection with using of metal magnetic memory [J]. Khimicheskoe I Neftegazovoe Mashinostroyeniye, 2002, 36-38.
- [3] 王朝霞,张卫民. 弱磁场下管件表面磁场的分布特征 [J]. 无损检测, 2007, 29, (8): 437-439.

- WANG Zhaoxia, ZHANG Weimin. Surface field distribution characteristics in weak magnetic field[J]. Non-destructive Testing, 2007, 29 (8): 437-439.
- [4] 王威. 基于磁记忆漏磁特性的钢结构构件潜在损伤早期诊断的基本理论及应用技术研究[R]. 上海: 同济大学博士后研究报告, 2008.
- WANG Wei. The basic theory and application of NDT&E based on metal magnetic memory and magnetic flux leakage testing for initial potentially damage of steel structural member[R]. Shanghai: Tongji University Post-Doctoral Research Work Report, 2008.
- [5] 王威, 樊浩, 杨为胜, 等. 钢结构隐性损伤的磁记忆识别机理及试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(5): 139-145.
- WANG Wei, FAN Hao, YANG Weisheng, et al. Identification mechanism and experiment of metal magnetic memory in steel structure implicit damage testing[J]. Structure Engineers, 2014, 30(5): 139-145.
- [6] 樊浩, 王威, 苏三庆, 等. 基于磁记忆的钢结构应力表征技术[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(5): 705-711.
- FAN Hao, WANG Wei, SU Sanqing, et al. Steel stress characterization technique based on magnetic memory[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2014, 32(5): 705-711.
- [7] 王威, 易术春, 苏三庆, 等. 建筑钢试件拉伸应力与其磁记忆效应漏磁场梯度的对应关系研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 341-346.
- WANG Wei, YI Shuchun, SU Sanqing, et al. Research on the relationship between magnetic flux leakage gradient by metal magnetic memory effect and tensile stress of building steel specimen [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 341-346.
- [8] 苏三庆, 曾发荣, 王威等. 基于磁记忆的钢梁弯曲应力表征技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(4): 463-468.
- SU Sanqing, ZENG Farong, WANG Wei, et al. Research on the bending stress characterization technique of steel beam base on metal magnetic memory[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech (Natural Science Edition), 2015, 47(4): 463-468.
- [9] JILES D C. Theory of the magneto-mechanical effect [J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1995, 28(2): 1537-1542.
- [10] 任吉林, 王东升, 宋凯, 等. 应力状态对磁记忆信号的影响[J]. 航空学报, 2007, 28(3): 724-728.
- REN Jilin, WANG Dongsheng. Influence of Stress State on Magnetic Memory Signal[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 724-728.
- [11] 任吉林, 王进, 范振中. 一种磁记忆检测定量分析的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 431-435.
- REN Jilin, WANG Jin, FAN Zhenzhong. New method for metal magnetic memory quantitative analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 431-435.
- [12] 任吉林, 孙金立, 周培. 磁记忆二维检测的研究与工程应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 8-15.
- REN Jilin, SUN Jinli, ZHOU Pei. Engineering Application Prospect and Research on Magnetic Memory in Two-dimensional Testing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 8-15.

(编辑 桂智刚)