

基于磁记忆的钢梁弯曲应力表征技术研究

苏三庆, 曾发荣, 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: 金属磁记忆检测技术是一种新型的无损检测技术。通过对 Q235B 工字钢梁试件进行四点受弯试验, 分析其表面的磁记忆信号, 发现: 试件翼缘的磁记忆信号曲线形状与对应的弯矩图相似, 均在纯弯段相等, 在两端弯剪段近似呈线性分布; 在剪应力突变处, 磁记忆信号梯度 K 值“过零点”且出现正负突变现象; 试件腹板的磁记忆信号在荷载作用点处呈峰值, 磁记忆信号梯度出现峰-峰值 K_{\max} 且过零点; 不同的变形阶段, 磁记忆信号与应力表现出相似的变化趋势。

关键词: 建筑钢结构; 磁记忆; 受弯钢梁; 应力集中

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)04-0463-6

Research on the bending stress characterization technique of steel beam based on metal magnetic memory

SU Sanqing, ZENG Farong, WANG Wei, YI Shuchun

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

Abstract: Metal Magnetic Memory Technology is a new type of non-destructive testing techniques. By the Q235B beam specimens of four-point flexural testing, the surface magnetic memory signals of the beam was analyzed, with some result obtained therein. The bending moment diagram and the flange of magnetic memory signal curve shape is similar, both in pure bending segment is equal, and perform linear distribution approximation at the ends of the bending shear segment. In shear stress mutation, the magnetic gradient memory signal K value pass zero point, and have the mutation phenomenon from positive to negative value. Magnetic memory signal of the web of steel beam has a peak value in loading point, and the gradient of magnetic memory signal have a peak to peak value of K_{\max} and pass zero point. Magnetic memory signal and stress development showed a similar trend at different deformation stages.

Key words: Building steel structure; metal magnetic memory; bending steel beam; stress concentration.

大跨空间钢结构、高层建筑钢结构、大跨钢结构桥梁的健康监测与安全评定技术正变成土木工程领域所面临的瓶颈问题。钢结构的主要损伤源为应力集中区, 结构和构件因应力集中和各种微观缺陷扩展而引发的脆性破坏现象非常严重^[1]。发生这类事故的主要原因就是没有一个很好的方法能对大型钢结构中潜在的损伤及构造关键部位的材性变化和早期损伤状况进行实时监测。常规的钢结构无损检测方法, 如超声、磁粉、射线、渗透等方法只能对已形成的裂纹或宏观缺陷进行检测^[2-3], 不能对钢结构的隐性损伤进行早期检测。隐性与显性相对, 指没有形成明显的物理不连续, 而难以得到及时发现, 且一旦凸显将造成重大灾难^[4]。金属大部分为晶体, 即各分子间按照一定规律形成点阵结构, 因此分子间的排列具有一定的规律, 同时晶体中也存在一些微观缺陷如空位、固溶、位错等。这些微观缺陷在应力的作用下会进一步发展, 进而形成不明显的物理不连续, 以位错为例, 在应力作用下位错会沿滑移面产生滑移运动, 导致位错密度增加, 产生很高

的应力能并形成应力集中, 进而导致隐性损伤的出现。虽然隐性损伤最终会形成宏观缺陷, 但宏观缺陷萌生前所费的时间在整个过程中比例较大, 而且在隐性损伤积累的过程中, 微小的外界作用都有可能对结构造成致命的影响。其自由发展的后果往往是无任何明显征兆的结构突然垮塌^[5]。因此, 及时找出钢结构构件断裂前的危险区域及应力集中区域并进行在线监测, 对于钢结构的损伤检测和评估具有重要的理论基础和实际工程应用价值。

以典型建筑钢材 Q235B 工字钢构件为研究对象, 通过四点受弯试验, 分析了整个受弯过程中磁场信号及梯度的变化规律。研究了磁记忆信号及梯度与试件工作应力之间的曲线关系, 以期磁记忆检测技术运用于建筑钢结构提供一定的理论基础。

1 金属磁记忆检测原理

金属磁记忆检测是20世纪90年代初由俄罗斯学者杜波夫提出的^[6-8]。铁磁材料在其未被磁化之前, 内部早已存在自发磁化的小区域, 这些小区域称为

磁畴。铁磁构件在使用过程中,受到荷载和地磁场的共同作用,在应力和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和不可逆的重新取向,这种磁状态的不可逆变化在工作荷载消失后会得到保留,记忆着构件应力集中区位置,这就是金属材料的磁记忆效应。

在地磁场环境下构件承受荷载,表面形成漏磁场,表现为集中区切向漏磁分量 $H_p(x)$ 达到最大值,法向漏磁分量 $H_p(y)$ 的符号发生变化,存在过零点。因此,利用磁检测仪通过测定铁磁构件表面 $H_p(y)$ 的变化趋势便可以推断构件的应力集中区域,对结构的早期损伤进行判定,从而降低和防止构件出现突发性破坏。

金属磁记忆检测技术的研究主要集中在以受拉构件为主的应力施加及断裂前后的磁记忆信号变化情况,且都是定性化分析,无法定量分析磁记忆信号与应力的关系。建筑钢结构领域,主要受力构件是以梁、板、柱为主的受弯构件及压弯构件,从受力分析的角度来说拉伸试验的磁记忆研究无法满足钢结构的基本需求。相比于拉伸试验,弯曲试验做得较少,特别是在建筑钢结构领域,目前很少有相关的研究报道。针对建筑钢结构受弯构件及压弯构件的磁记忆检测研究,目前该方法仍处于探索阶段,尚有大量基础问题有待开展研究。然而,对于金属构件的早期损伤,特别是尚未成形的隐性不连续性变化,利用过零点评判难以进行有效的评价^[9]。对于受弯构件是否有效,有待进一步试验研究。

2 试验方案

2.1 试验材料

选用建筑钢结构常用Q235B钢,其化学成分及力学性能见表1和表2。

表1 材料化学成分
Tab.1 Chemical composition of materials

Name	Material/%				
	C	Si	Mn	P	S
Q235B	≤0.12~0.2	≤0.30	0.3~0.7	≤0.045	≤0.045

表2 材料力学性能
Tab.2 Mechanical properties of materials

Name	Yield stress/MPa	Tensile stress/MPa	Elongation/%
Q235B	≥235	375~460	≥26

试件加工成长度为1.8 m及1.5 m的14号热轧工字钢2组,每组两根试件,共4根试件,依次编号为试件1、试件2、试件3、试件4。调节支座使其分别形成跨度 L 为1.5 m和1.2 m的简支梁,左右各留0.15

m的外伸长度,防止加载时发生侧滑。在钢梁跨度三分点处上翼缘正上方居中设置两个80 mm×80 mm×80 mm的方钢垫块,并用两根钢筋焊接固定,作为转换构件,使其形成四点受弯的受力形式。腹板等间距的选取5条检测线,从上翼缘开始分别命名为1-1'、2-2'、3-3'、4-4'和5-5';翼缘等间距的选取3条检测线,分别命名为1-1'、2-2'和3-3',各检测点之间的距离均为50 mm。取 $L=1.2$ m试件检测线分布如图1所示。

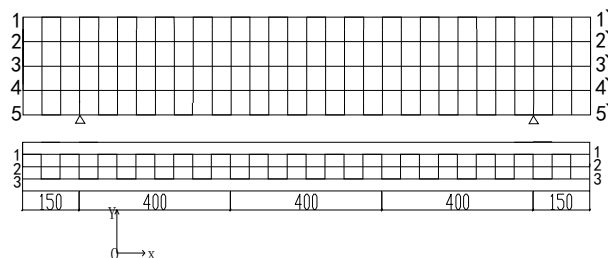


图1 试件检测线分布
Fig.1 The testing line distribution

2.2 试验仪器及方法

四点受弯试验在YAW5000型液压伺服压剪试验机上进行。磁场信号采集设备选用高精度的WT10E型数字高斯计,主要技术指标:量程范围0~6 mT,分辨率0.001 mT及0.000 1 mT,频率范围10~200 Hz,相对湿度20%~80%,显示单位mT/Gs, 1 mT=10 Gs。

试验前,对钢梁及支座进行对中、调平,检查设备的运转情况,保证构件处于四点受弯状态。通过《钢结构设计规范》(GB50017-2003)计算得到:不考虑钢梁的塑性发展时,试件1和试件2,即跨度 $L=1.5$ m时,屈服强度在88 kN左右;试件3和试件4,即跨度 $L=1.2$ m时,屈服强度在109 kN左右。为充分了解试件应力增长过程中磁记忆信号的变化情况,对所有试件分级加载,使其产生弹性变形和塑性变形。为此,试件1及试件2,分别加载至0 kN、10 kN、20 kN、30 kN、40 kN、50 kN、60 kN、70 kN、80 kN、90 kN、100 kN及失稳时停机保载进行磁信号检测;试件3及试件4分别载至0 kN、10 kN、20 kN、30 kN、40 kN、50 kN、60 kN、70 kN、80 kN、90 kN、100 kN、110 kN、120 kN及失稳时停机保载进行磁信号检测。检测过程中高斯计探头紧贴构件表面并与测量线相互垂直,以减小提离高度的影响。采用手动测量,每个测量点重复测量两次以减小随机误差的影响。整个试验都在试验机上在线测量,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磁信号所造成的影响。

3 试验结果分析

试件1及试件2实际屈服强度为255 MPa,破坏最严重的部位处于 $X=42\sim 58$ cm处;试件3及试件4实际屈服强度为260 MPa,破坏最严重的部位处于 $X=30\sim 44$ cm处,试件失稳后的形态如图2所示.对检测数据进行整理,发现两组试件中的翼缘和腹板的重复试验表现出相同的变化趋势.因此分别选取试件1和试件3中腹板检测线LINE1及翼缘检测线1-1'的磁信号为分析对象进行研究.



图2 失稳后破坏形态

Fig.2 Buckling failure pattern

3.1 初始阶段磁记忆信号变化

初始阶段翼缘及腹板检测线1-1'的磁记忆信号分布如图3和4所示.

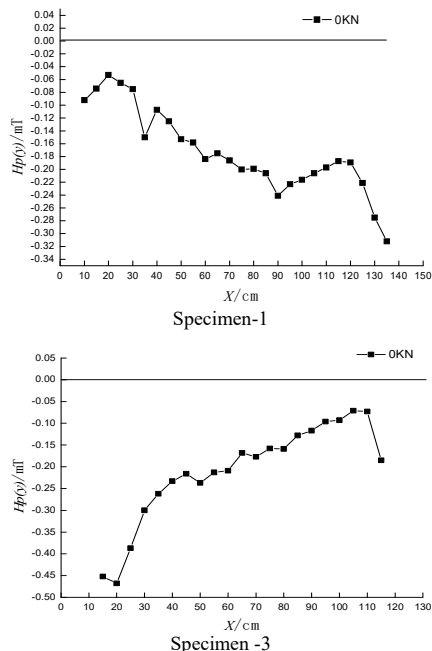


图3 初始阶段翼缘表面磁记忆信号

Fig.3 Magnetic memory signal of flange in the initial stage

试验开始前,先对未加载的试件进行初始磁记忆信号的检测,两试件翼缘板测量线1-1'及腹板沿检测线1-1'检测结果分别如图3及图4所示.可以看出,磁信号呈无规则变化且过零点现象在不同构件中都不相同.由于钢结构构件在加工及运输过程中,材料曾受到的切削、磨损、冲击机震动等外荷

载作用,这些均导致材料磁性能的改变,使之受到不同程度的磁化,相当于在构件表面施加一外磁场.因此试件表面磁记忆信号强度不为零,或者产生无规律的初始磁信号.

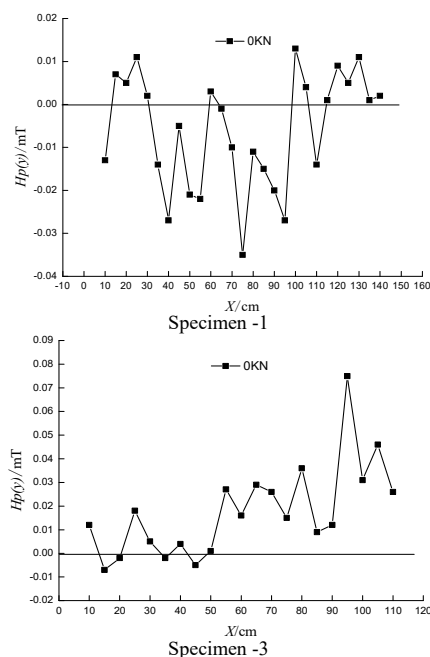


图4 初始阶段腹板表面磁记忆信号

Fig.4 Magnetic memory signal of web in the initial stage

3.2 加载过程中磁记忆信号变化

加载过程中,翼缘沿测量线1-1'的磁记忆信号曲线如图5所示.

从图5可见,施加弯曲荷载以后,各试件表面磁记忆信号均由初始阶段无序分布转变为有一定规律性的磁场分布.随着荷载增大,翼缘所受的弯曲拉应力也逐渐增大.弹性阶段,磁记忆信号曲线近似呈“梯形”,并且在试件中心区域(纯弯段)近似呈线性分布.这种力-磁效应的作用使得在四点受弯过程中,在纯弯段区域内,由于翼缘截面所受的应力水平相同且在同一方向上,因而产生均匀磁化所致.在弯剪区域内,各翼缘截面所承受的应力水平不同而产生不均匀磁化所致.进入塑性阶段,磁记忆信号曲线与弹性阶段呈相似性,具有相同的变化规律,直至失稳后出现突变现象.这是由于钢梁分岔失稳造成的,即在屈曲前后时刻,试件从初始的平衡位形突变到与其相近的另一平衡位形,表现出平衡位形的分岔现象,应力应变发生突变,最终导致磁记忆信号发生突变.

由此可见,受弯试件磁记忆信号曲线形状变化趋势与试件在荷载作用下的弯矩图(如图6)具有较强的相似性,均在纯弯段相等,在两端弯剪段近似呈线性分布.因此,利用磁记忆信号在检测线上的

变化曲线预测受弯试件的弯矩分布情况,可以推断出容易发生应力集中的位置,起到安全预警的作用.

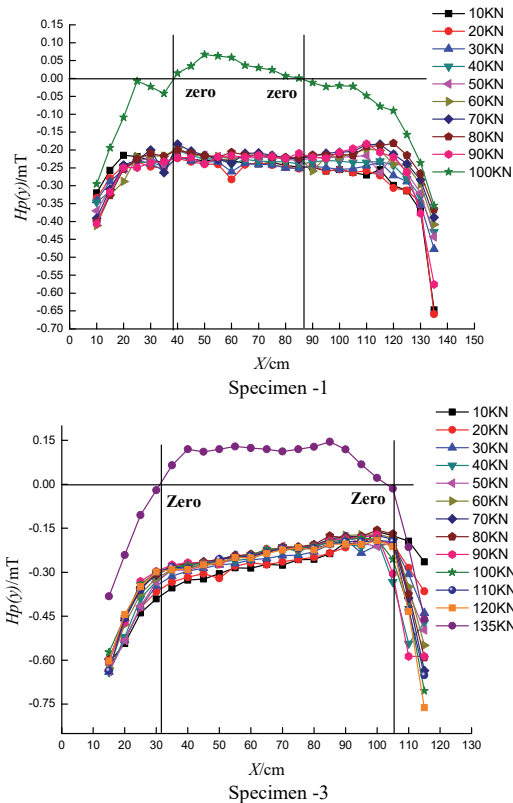


图 5 钢梁翼缘在不同荷载作用下的磁记忆信号
Fig.5 Magnetic memory signals of flange of steel beam with different loading

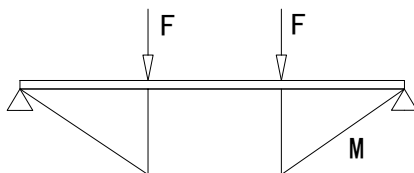


图 6 钢梁弯矩图
Fig.6 The bending moment diagram of steel beam

图 5 与图 6 相比,钢梁翼缘的磁记忆信号梯形水平段要比钢梁弯矩图略宽的原因是,试验时通过在钢梁跨度三分点处,上翼缘正上方居中设置两个 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的方钢垫块,并用两根钢筋焊接固定,作为转换构件,使其形成四点受弯的受力形式.荷载是通过这两个方钢试件将力作用在上翼缘板上的,因此以这两个方钢垫块的作用点为中心的周围区域存在很大的局部应力,在翼缘板上,这个局部应力的范围不仅包含一部分纯弯段,同时也包含一部分弯剪段,上翼缘在这部分弯剪段具有的应力水平与纯弯段相差不大,因此其磁记忆信号也具有与纯弯段相似的特征.也就出现了磁记忆信号的梯形水平段比之弯矩图梯形的水平段向外扩展了一定距离.图 5 与图 7 相比,翼缘的磁记忆信号有明显的“拐点”,但腹板的磁记忆信号却有明显的

“波谷”.

加载过程中,腹板中沿测量线 1-1' 的磁记忆信号曲线如图 7 所示.

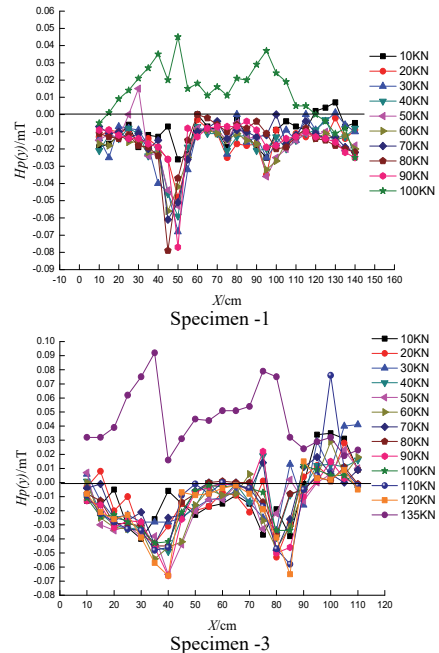


图 7 钢梁腹板处磁记忆信号变化
Fig.7 Change curve of magnetic memory signal of web of steel beam

从图 7 可见,施加弯曲荷载以后,各试件表面磁信号有明显的“波谷”现象,随着荷载增大,腹板所受的剪应力也逐渐增大,“波谷”处的磁信号也越来越大,出现峰值.磁记忆信号曲线呈“波谷”,这是由于应力的存在导致试件在地磁场中被磁化的结果^[10].加载作用点范围内腹板承受局部应力水平远远高于其他位置的应力水平,致使磁记忆信号出现“波谷”.随着荷载的增大,逐渐进入塑性阶段,加载点处的应力集中程度越来越大,磁记忆信号也越来越大,“波谷”现象也越来越明显,直至在失稳前达到峰值.失稳后发生突变现象,这是由于钢梁分岔失稳造成的,应力应变发生突变,从而引起磁记忆信号发生突变.因此,可利用磁记忆信号峰值评判试件的应力集中区,峰值越大,表明试件应力集中程度越高,发生屈曲的可能性越大.

从以上试验可以得出,在弯曲应力作用下磁记忆信号几乎全部为负值,仅有个别过零点现象且过零点位置与应力最大位置相隔很远, Doubov 所提出的“过零点”判据,在其他领域应用较多,对受拉试件的宏观缺陷评判较为有效,但对于应力集中评判效果不佳.本试验中的试件处于应力集中状态,表面无宏观缺陷,且处于受弯状态,即使在失稳后也不会出现宏观缺陷,故“过零点”并不适用于受弯荷载作用下的磁记忆表征.

4 应力表征分析

考虑到 $H_p(y)$ 曲线的斜率变化情况, 对曲线进行微分, 即 $K=dH_p(y)/dx$, 分析其梯度变化的情况, 如图 8 及图 9 所示。

4.1 翼缘的应力表征分析

加载过程中, 翼缘中沿测量线 1-1' 的磁记忆信号梯度曲线如图 8 所示。

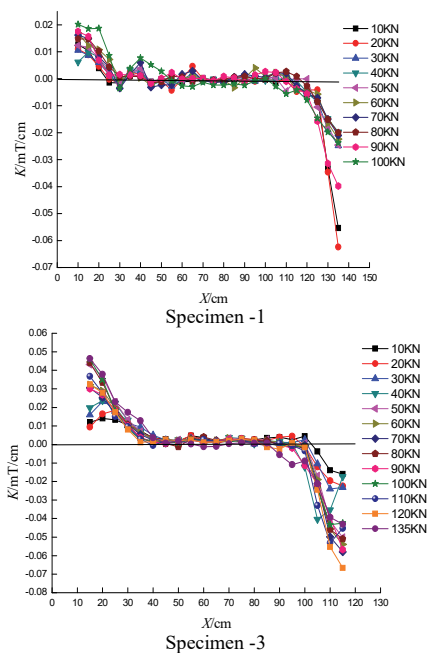


图 8 翼缘在受弯应力作用下的梯度曲线
Fig.8 Gradient curve of flange with bending stress

如图 8 所示, 分析整个加载阶段, 无论是弹性阶段, 塑性阶段还是屈曲后, 磁场梯度的变化趋势相同, 即在纯弯段内, 磁场梯度 K 值近似线性变化且接近于零, 在弯剪段内 K 值逐渐向两支座处增大。为进一步研究 K 值与剪应力之间的关系, 给出试件的磁记忆信号梯度 K 在检测线上的简化图及剪应力分布图, 如图 9 和图 10 所示。

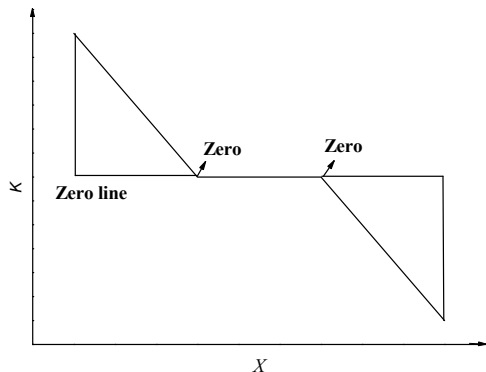


图 9 磁场梯度 K 值简化图
Fig.9 Simplified diagram of magnetic gradient K

从图 9 及图 10 可以看出, 翼缘表面的磁记忆信号梯度 K 值与对应的剪应力呈现一致的规律性变

化。在剪应力突变处, 翼缘表面的磁记忆信号梯度“过零点”且出现正负突变现象, 因此可利用此信号特征定性的找到应力集中部位或集中荷载作用点, 进而评判应力集中程度。

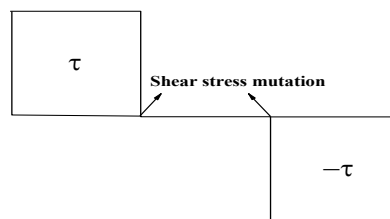


图 10 剪应力分布图
Fig.10 Shear stress distribution

4.2 腹板的应力表征分析

加载过程中, 腹板中沿测量线 1-1' 的磁记忆信号梯度曲线如图 11 所示。

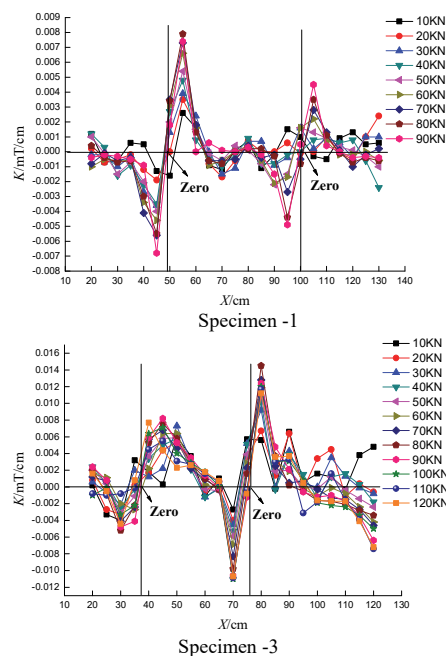


图 11 腹板在受弯应力作用下的梯度曲线
Fig.11 Gradient curve of web with bending stress

由图 11 可见, 两根试件梯度曲线虽然在数值上略有差异, 但是表现出相同的变化规律, 每级荷载作用下, 磁场梯度 K 在集中荷载处呈现较大值, 在其他位置呈现较小值。分析整个加载阶段, 随着荷载的增大, 加载区域内的 K 值缓慢增加, 在屈曲前梯度曲线呈明显尖端, 出现峰-峰极值。加载过程中通过峰-峰值之间的过零点逐渐向某一区域靠近, 最终出现在试件屈曲最严重的部位, 失稳后, 峰-峰值反转且幅值减小。

由图 11 可见, 两加载点处的峰-峰极值并非相等。以 $L=1.5\text{ m}$ 试件为例进行分析, 在 $X=40\sim60\text{ cm}$ 范围内, 峰-峰值 $K=0.016\text{ mT/cm}$, 波动较大, 而在 $X=90\sim110\text{ cm}$ 范围内, 峰-峰值 $K=0.004\text{ mT/cm}$, 波

动较小. 观察试件的破坏形态发现, 试件在 $X=40\sim 60$ cm 范围内的塑性变形比 $X=90\sim 110$ cm 范围内的变形大很多, 而在 $X=50$ cm 处变形最为严重. 即试件在达到梯度峰-峰值 K_{\max} 以前, 试件可保持稳定, 当达到 K_{\max} 时, 试件屈曲. 因此, 可利用腹板在受弯荷载作用下的梯度曲线峰-峰值 K_{\max} 作为构件屈曲前危险时刻的判断依据: 峰-峰值之间的过零点可作为评判应力集中位置的参考判据, 梯度峰-峰值 K_{\max} 可作为评判应力集中位置的确定性判据.

4.3 磁记忆信号与应变的关系

给出试件在不同应变下磁记忆信号的变化情况, 如图 12 所示.

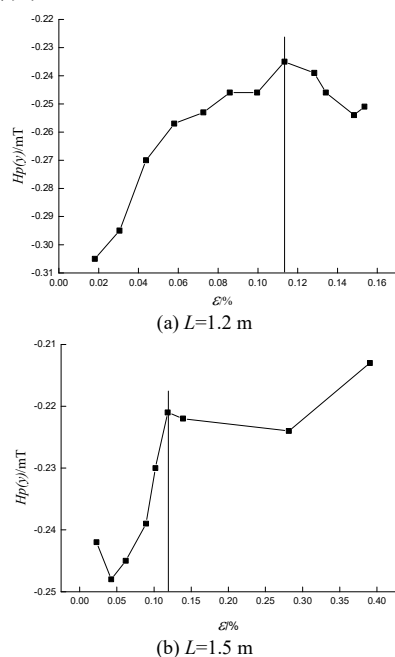


图 12 钢梁翼缘磁记忆信号-应变图
Fig.12 Magnetic memory signal-strain diagram for flange of steel beam

对于 Q235 低碳钢而言, 应力达到比例极限 σ_p 时的应变约为 0.1%, 达到屈服强度 σ_y 时的应变约为 0.15%, 此时可认为应力达到了弹性变形的终点. 同时达到 σ_y 后, 在一个较大的屈服平台 (约从 $\varepsilon=0.15\%$ 到 $\varepsilon=0.25\%$). 如图 12 所示, 当应变值小于 0.1% 时, 即试件达到比例极限 σ_p 之前, 磁记忆信号强度呈线性减小; 当应变值在 0.1%~0.15% 时, 即试件在比例极限 σ_p 与屈服强度 σ_y 之间时, 磁记忆信号逐渐增大; 当应变值大于 0.15% 时, 既试件在强化阶段时, 磁记忆信号又缓慢减小.

弹性阶段初期, 地磁场引起的磁记忆信号比较微弱, 而由于初始状态受到外界磁场及其他设备仪器的影响, 在一定加载范围内为克服初始状态的不

稳定性, 磁记忆信号有局部增强现象. 弹性阶段后期, 由有效场理论可知, 应变使试件在不同的部位产生应力, 应力使磁记忆信号强度减弱, 最终向磁滞状态逼近, 所以随着应力的增大磁记忆信号强度逐渐减小. 塑性变形的不同阶段, 畴壁与孤立位错、位错缠结和位错胞结构的作用机制是不同的. 塑性变形的初始阶段, 材料主要是孤立的位错和少量的位错缠结, 这些对于畴壁运动是可以克服的, 这就导致不可逆的磁化过程及表面磁场开始增加; 随着塑性变形的增加, 孤立的位错开始减少, 高位错密度的位错缠结形成非常强的钉扎, 这些是应力不能克服的, 大量的畴壁不能运动导致不可逆磁化过程的减小, 因此表面磁场变化率开始减小; 进一步的塑性变形, 使位错胞结构产生了更高的钉扎能, 它们将进一步阻止畴壁的运动, 使得表面磁场稳定下来. 因此, 不同的变形阶段, 磁记忆信号与其应力状态呈一一对应的关系.

5 结论

(1) 试件翼缘的磁记忆信号曲线形状与试件在荷载作用下的弯矩图相似, 均在纯弯段相等, 在两端剪弯段近似呈线性分布; 在剪应力突变处, 磁记忆信号梯度 K 值“过零点”且出现正负突变现象, 可定性的找出应力集中部位或集中荷载作用点.

(2) 试件腹板的磁记忆信号在荷载作用点处呈峰值, 沿检测线方向的磁记忆梯度出现峰-峰值 K_{\max} 且过零点, 可判定其应力集中区.

(3) 不同的变形阶段, 磁记忆信号与对应应力表现出相似的变化趋势, 并从微观机理解释了这一现象.

参考文献 References

- [1] 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, 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, 2008, 32-36.
- [2] 郑盼盼, 陈冷, 何飞, 等. 材织构在线检测技术的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32 (2) : 293-300.
ZHENG Panpan, CHEN Leng, HE Fei, et al. Progress in on-line texture measurement technology of metal sheets[J]. Journal of materials science & engineering, 2014, 32(2): 293-300.

(下转第476页)