

门式刚架钢梁损伤的磁记忆检测试验研究

苏三庆, 李 成, 王 威, 郭 欢, 胡敬余, 葛 静

(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, 在工程领域中已得到较多应用, 但目前对这种技术的研究大多集中在梁、钢板等独立构件方面。本文则通过进行门式刚架拟静力试验, 对结构中刚架梁翼缘和腹板的磁记忆信号曲线进行分析, 结果发现: 在不同荷载作用下刚架左右两侧钢梁翼缘和腹板磁信号曲线的变化趋势存在较大差异, 靠近加载端的左梁磁信号增幅较大, 右梁变化幅值不大; 钢梁翼缘的磁信号在靠近柱端处存在明显异变; 钢梁跨中腹板剪应力突变处磁信号曲线表现出波谷; 磁信号梯度曲线在应力集中区存在波峰-波谷现象, 在集中荷载作用处呈峰值。

关键词: 门式刚架; 磁记忆; 应力集中; 磁畴; 波峰-波谷

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0155-07

The experimental research on the steel beam failure of gabled frame based on metal magnetic memory testing technology

SU Sanqing, LI Cheng, WANG Wei, GUO Huan, HU Jingyu, GE Jing

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

Abstract: Metal magnetic memory testing technology is a new type of non-destructive testing technology widely used in engineering fields. However, most of the research on this technology is currently focused on independent members such as beams and steel plates. In this paper, through pseudo-static test of the gabled frame, the magnetic memory signal curves of the flange and web were analyzed. Test result reveals that the variation trend of the magnetic signal curves of the left and right flanges and webs of beams under different loads is quite different. The magnetic signal of the left beam increases greatly, but the right beam of it is the opposite. The magnetic signal of the flange is obviously changed near the end of the column and appears valley in shear stress mutation zone of the web. The magnetic memory signal gradient curve has a peak-valley phenomenon in the stress concentration region and a peak value where concentrated forces acting.

Key words: gabled frame; metal magnetic memory; stress concentration; magnetic domain; peak-valley

轻型门式刚架具有结构简单、施工方便、造型美观以及经济性能优良等特点, 自 20 世纪 80 年代以来广泛应用于钢结构房屋中并且迅速发展, 在我国得到了大规模应用。近年来, 随着我国设计水平和施工技术的不断提高, 大跨空间钢结构、高层钢结构建筑、大跨钢结构桥梁等工程项目建设日益普遍。随着这些重大工程兴起的, 如何有效地对其进行早期隐性损伤的健康监测及安全性能评估成为了土木工程领域亟待解决的问题。

隐性损伤是指结构外观正常, 表面尚未形成明显的物理不连续^[1], 但内部已形成较大的应力集中区的现象, 因此, 难以及时发现。应力集中和各种微观缺陷扩展容易引起严重的脆性破坏^[2], 若不能及时发现大型钢结构中的潜在损伤状况并对关

键部位进行实时健康监测, 隐性损伤一旦凸显将会引发严重事故。目前钢结构无损检测中常用的方法有超声、磁粉、射线、渗透等, 但这些方法只能用于检测已形成的裂纹或较大的宏观缺陷^[3], 而不能对钢结构内部的隐性损伤进行早期预诊断, 且采用上述方法检测前需对试件表面进行处理, 同时要求检测人员具有较高的专业素质。因此, 需要引入一种先进的新型无损检测技术来对结构进行早期隐性损伤检测。金属磁记忆检测技术是一种基于弱磁的无损检测技术, 该技术由俄罗斯学者 Doubov 正式提出^[4], 其基本原理为: 在较为恒定的大地磁场环境中, 铁磁材料内部已存在发生磁化的区域, 即磁畴。当铁磁构件受到工况荷载的作用时, 在应力集中区域内磁畴结构会发生定向的

收稿日期: 2018-10-04

修改稿日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878548, 51578449), 陕西省自然科学基金项目(2018JZ5013)

第一作者: 苏三庆(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震设计、结构健康监测方面的研究。E-mail: sussq@xauat.edu.cn

具有磁致伸缩效应的重新取向,生成自有漏磁场,并且是不可逆的,荷载解除以后这种状态仍会得到保留,从而能够“记忆”应力集中的位置^[5],达到判别结构的早期损伤及损伤程度的目的,防止出现脆性破坏现象.同时,由于该技术操作简单,无需处理待测构件表面,且有多种磁记忆探头选择,能够适用于各类构件的检测,目前已广泛应用于石油化工、航空机械等领域.

国内许多学者对金属磁记忆检测进行了各方面研究,但仍主要集中在分析独立构件在单一受力状态下的磁记忆信号变化等方面.付美礼等^[6]对 Q345 低合金钢不同厚度板状试件进行静载拉伸实验,研究了不同厚度的光滑试件表面磁记忆信号在不同拉应力下的变化规律.邢海燕等^[7]研究了铁磁材料在三点弯曲应力状态下,不同试验载荷作用下的弯曲变形状况与磁记忆信号的对应关系.在实际建筑工程中,结构中的梁、柱等主要受力构件的受力状况更加复杂,而目前的研究却相对不足.因此,针对结构内的构件在各个阶段下磁记忆信号的检测研究具有较大的意义.本文旨在通过门式刚架拟静力试验磁记忆信号特征的对比研究,探究钢梁在不同荷载作用下的磁记忆曲线变化规律,为金属磁记忆检测技术在结构复杂应力状态中的研究,提供一定的实验基础及数据参考.

1 试验概况

1.1 试件设计

试件为单层单跨等截面轻型门式刚架,刚架采用几何相似比 $S_L = 1/5$ 的缩尺模型,模型主要尺寸为:跨度 2.4 m,檐口高度 1.08 m,屋面坡度 1/15,见图 1.刚架柱、梁均为等截面构件,采用 300 mm 高的轧制工字钢.刚架翼缘宽厚比为 9.6,腹板高厚比为 27.5,均满足《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》^[8] 中 6.1.1 翼缘宽厚比不应大于 15 $\sqrt{235/f_y}$ 和腹板高厚比不应大于 250 $\sqrt{235/f_y}$ 的规定.刚架所用钢材采用 Q235B 级钢,经过实测其弹性模量 $E = 2.10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,屈服强度 $f_y = 283 \text{ N/mm}^2$.梁柱节点采用端板竖放形式,端板结构图见图 2.梁、柱的焊缝均为角焊缝.柱脚采用刚接形式,由 6 个 10.9 级 M30 摩擦型高强度螺栓连接.此外按照相似比要求,需要人工配重来满足要求,在柱顶及两横梁跨中施加集中荷载,配重以吊铸铁块的方式实现.

1.2 测点布置

在刚架梁腹板处等间距的设置 6 条检测线,从

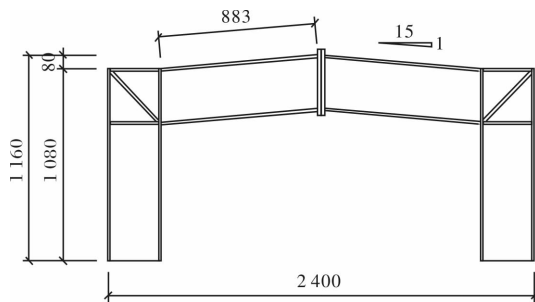


图 1 刚架试件简图(单位: mm)

Fig. 1 Configuration of the frame (Unit: mm)

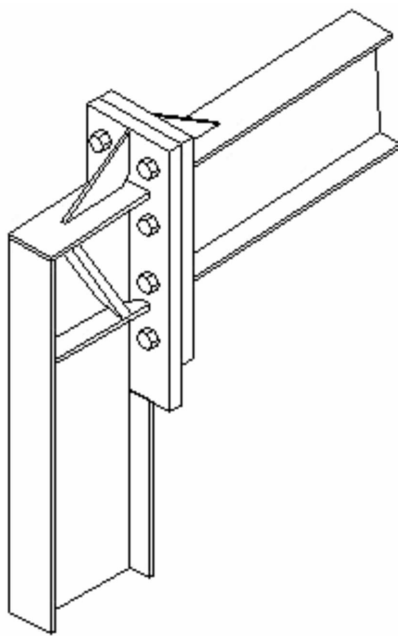


图 2 端板结构图

Fig. 2 Diagram of end-plate

上至下编号分别为 1-1'、2-2'、3-3'、4-4'、5-5' 和 6-6'; 上下翼缘外侧等间距设置 3 条检测线,编号分别为 1-1'、2-2' 和 3-3', 各检测点之间的水平距离均为 50 mm. 左侧刚架梁的检测线分布如图 3 所示, 检测点编号自左向右依次为 1 至 17. 右侧刚架梁检测线的布置方式与左侧相同, 检测点编号与左梁对称.

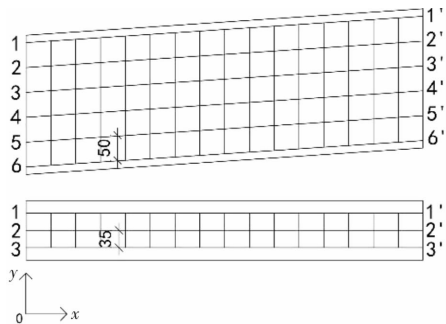


图 3 试件检测线分布(单位: mm)

Fig. 3 Testing line distribution (Unit: mm)

1.3 试验设备及加载测量方案

刚架共放置4个位移计,分别测量两个柱脚、右侧柱顶和梁跨中的水平位移。刚架共设置10个应变片,12个应变花。拟静力试验在MTS电液伺服结构试验机上进行,磁场信号采集设备采用EMS-2003智能磁记忆检测仪,探头采用EPEMS/C2磁记忆双通道笔式探头。

试验前对刚架位置进行调整,使刚架中线与液压作动器中线对正。为了分析刚架梁在不同应力状态下磁记忆信号的变化规律,对试件进行分级加载,加载等级依次为60 kN、90 kN、120 kN……荷载逐级增加30 kN,每一级加载完成后停机保载检测磁信号。加载时先进行预加载,以检验试件的就位情况和仪表的状态,然后按荷载控制进行加载,每级荷载循环三周,直到结构发生失稳或破坏。测量信号采用手动的方式,为减小提离高度对检测结果的影响,检测过程中笔式探头紧贴且垂直于构件表面,每个测量点均重复测量三次以减小随机误差的影响。全部试验都在结构试验机上在线测量,保证了试件在各个阶段都处在相同的环境磁场中,能够减小外界环境的变化对磁信号检测所造成的影响。

2 试验结果分析

刚架试件在加载至约400 kN时开始进入屈服阶段,最终现象为左侧靠近作动器的梁、柱发生侧向失稳,结构整体未发生明显破坏,试件失稳后的形态如图4所示。对整个试验过程中得到的检测数据进行整理分析,可发现在不同大小的荷载作用下,腹板表面各条检测线上的磁信号变化趋势较为相似,翼缘处也是如此。因此本文分别选择左右刚架梁的腹板检测线4-4'和翼缘检测线3-3'作为研究对象,进行磁记忆信号分析。

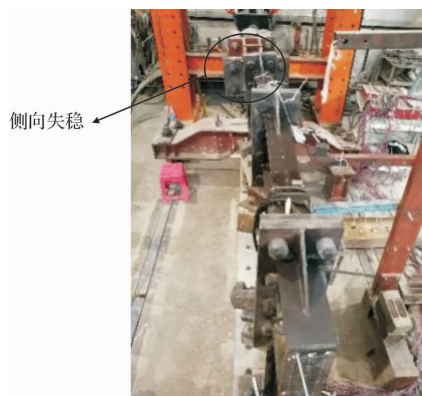


图4 失稳后破坏形态

Fig. 4 Buckling failure pattern

2.1 初始阶段磁记忆信号变化规律

在试验开始前左右两刚架梁腹板检测线4-4'和翼缘检测线3-3'的磁记忆信号分布如图5和图6所示。

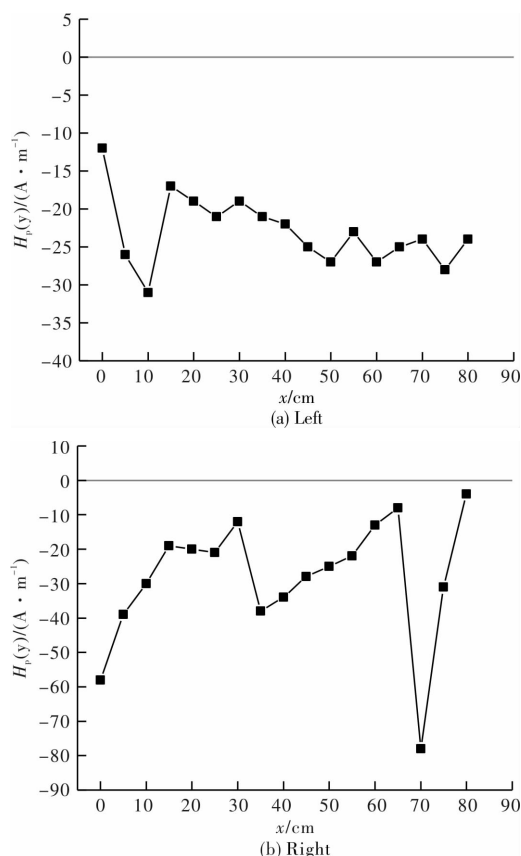


图5 初始阶段梁腹板表面磁信号分布

Fig. 5 Magnetic signal of web at initial stage

结构安装完成后,在零载状态下对刚架梁进行磁信号检测,得到梁的初始磁信号分布。从图5及图6可以发现,初始阶段磁信号的变化属无规则变化且在腹板中信号值始终为负值,没有出现过零点现象,而翼缘中的过零点现象也没有规律。由于刚架在加工及运输过程中,型钢材料经过切削、焊接等加工工艺,并受到震动冲击等外荷载作用,也没有进行退磁处理,这些均会导致材料受到不同程度的磁化,造成试件内部磁畴转动和畴壁的不规则移动。因此,试件表面出现无规律的初始磁信号。故在此阶段通过磁记忆信号法向分量值过零点这一经典判据在表征试件初始缺陷位置时可靠性不足。

2.2 加载过程中磁记忆信号变化规律

加载过程中,刚架左右钢梁翼缘中沿检测线3-3'的法向磁信号变化情况如图7所示。

从图7可以看出,刚架在施加荷载后,翼缘上的磁信号分布情况与初始阶段相比发生较大变化,各级荷载下的信号存在比较明显的规律性,又由

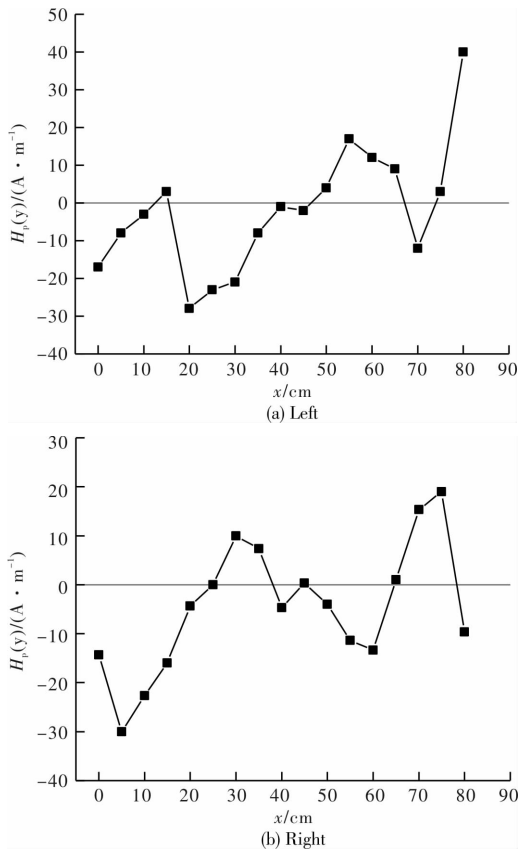


图6 初始阶段梁翼缘表面磁信号分布

Fig. 6 Magnetic signal of flange at initial stage

于加载级数多,为便于分析,本文选取全部数据中7级荷载下的磁记忆信号曲线进行研究.首先能够发现两刚架梁磁信号随荷载的变化情况有较大区别.在各级荷载作用下左端刚架梁翼缘磁信号曲线之间的离散程度较大,磁信号数值整体上随着荷载的增加发生不同幅度的增大.而右端刚架梁在不同荷载下各点处磁信号数值变化幅度不大,整个加载过程中没有发生突变现象,仅个别检测点的磁信号有较大离散.导致这种现象的原因是左侧梁靠近加载端,直接受到左侧节点区传来的荷载,在加载初期时翼缘应力较小,磁畴壁移动的量值很小,基于磁效应的磁场增加并不明显,甚至出现减小的现象.在逐级增加的水平力作用下,应力集中程度越来越大,翼缘应变也逐渐增大,试件内部微观结构发生改变,磁畴壁的移动及磁畴取向逐渐统一,宏观上表现为磁信号数值增加,磁信号变化规律与应力具有一定的正相关性.右端刚架梁中由于没有发生应力突增,翼缘应力水平较稳定,所以磁信号没有发生突变现象而是在一定范围内小幅波动.因此,可以通过磁记忆信号的变化幅度来反映试件中的应力情况.如果增幅越大,则说明试件中应力发生了突变,发生破坏的可能性也就越大.

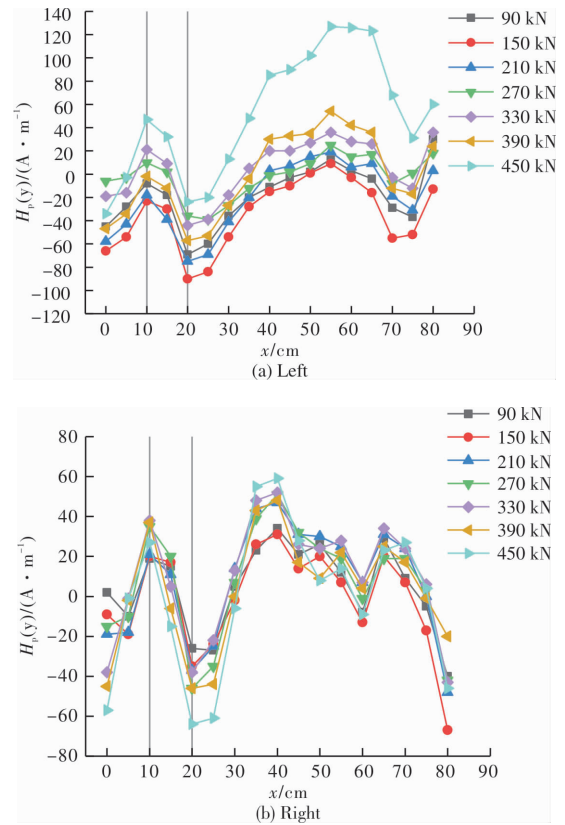


图7 刚架梁翼缘处磁记忆信号变化

Fig. 7 Magnetic memory signal changes at the flange of steel beam

同时还可以发现两刚架梁在距离柱端10~20 cm区域内的磁记忆曲线均发生显著变化,出现明显异变磁信号即表现出波峰-波谷现象.刚架梁与端板采用焊缝连接方式,并焊有加劲肋,由于在施焊过程中焊接热循环的作用,钢梁受到不均匀加热影响,在焊缝处往往会造成较大的初始残余拉应力.这种残余应力是一种内应力,不由外荷载作用而产生,在试件焊缝附近能够自相平衡,而残余应力在焊缝两侧垂直于焊缝方向的分布具有普遍性规律,即靠近焊缝位置处为拉应力远离焊缝位置处为压应力^[9].结构受到液压试验机施加的水平推力,在翼缘表面产生的拉应力与初始残余应力相抵消,远离焊缝处的残余压应力逐渐减小.结合试验数据,在拉应力的作用下引起距离柱端10~20 cm区域内的翼缘中一定数量磁畴的磁化方向改变,驱动磁畴转向相反方向,在大地磁场的激励下产生一个与初始磁场相反的磁场,导致磁场强度减弱,在磁记忆曲线上表现为数值下降并出现波峰-波谷的现象.由此可知在应力集中区域附近磁畴会由拉压应力的变化而转向不同方向,因此可利用磁信号曲线波峰-波谷出现的位置来评判试件的应力集中区,预测其应力状况,对结构

中可能发生危险的部位进行早期预警。

加载过程中, 刚架左右钢梁腹板中沿检测线 4-4' 的法向磁信号变化情况如图 8 所示。

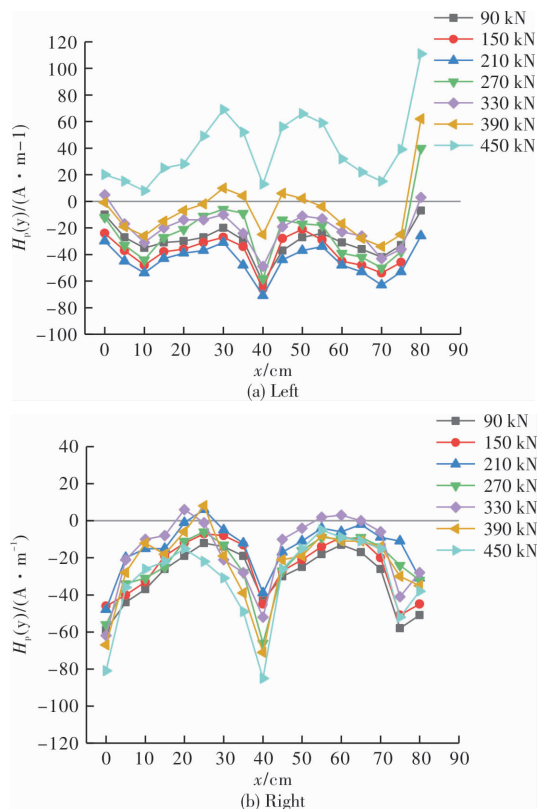


图 8 刚架梁腹板处磁记忆信号变化

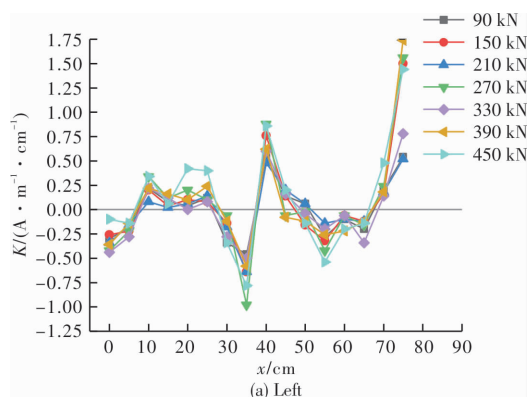
Fig. 8 Magnetic memory signal changes at the web of steel beam

比较图 7 与图 8 可以发现, 在不同荷载作用下刚架左侧梁腹板和翼缘的磁信号之间有相似的变化趋势, 总体趋势均为: 由于荷载逐渐增大, 磁场强度随应力的增大而增强, 磁信号数值也越来越大, 最终出现峰值, 且在 450 kN 荷载作用下左侧结构失稳后磁信号都发生大幅度增加的突变现象. 出现该现象的原因是由于结构发生分岔失稳, 梁内应力应变发生突变, 从而导致磁信号数值突变. 刚架右侧梁中腹板和翼缘的磁信号也存在相似性, 但是与左侧不同, 由于没有发生失稳, 因此磁信号未出现突变现象, 离散度较小. 从图 8 中可以发现, 左右梁腹板表面的磁记忆信号均有明显的“波谷”现象, 而“波谷”的位置都出现在 $x=40$ cm 处即梁的跨中. 在试验过程中, 梁的跨中位置受到配重用的集中荷载作用, 所以在跨中及附近区域内腹板的局部剪应力水平远高于其他位置处的剪应力水平, 致使磁记忆信号曲线产生“波谷”. 随着水平荷载不断增大, 刚架腹板跨中位置的应力集中程度越来越大, 磁信号曲线表现出的“波谷”现象也越来越明显, 并在失稳前达到峰值. 因

此, 可综合利用磁记忆信号的峰值和增幅这两个标准对试件的应力集中区进行定性评判, 即通过试件表面磁场的强弱变化推知试件的变形程度. 如果发现试件中某些部位的磁信号增幅很大且出现峰值, 则表明这些部位应力集中程度较高, 需要及时采取措施消除隐患, 避免对建筑结构造成严重危害. 此外, 从图 8 中还能够发现, 两侧钢梁腹板的磁信号曲线都关于梁中线近似对称, 而在“波谷”两侧的变化特征则有不同. 左侧钢梁的磁信号曲线在 $x=0\sim30$ cm 和 $x=50\sim80$ cm 这两个区域内先降低后升高, 呈下凸现象, 形成两个较缓的“波谷”, 右刚架梁在这两个区域内的磁信号则表现为上凸现象, 形成两个较缓的“波峰”. 可见左右梁内的应力水平并不相同, 磁畴畴壁位移和磁化矢量转向存在差异, 导致产生不同强度的等效磁场.

从上述试验还可以看出, 在不同荷载作用下刚架梁腹板的磁记忆信号几乎全部为负值, 仅有个别过零点现象, Doubov 所提出的“ $H_p(y)$ 值过零”判据受到条件限制而无法适用, 且该判据对于评判宏观缺陷较为有效, 但在本试验中钢梁表面在加载过程中直至失稳后都未出现宏观缺陷. 此外, 过零点是试件在呈现一定程度磁有序化后的正负磁极分界点, 若仅采用这一准则来判断试件的应力集中部位缺乏准确性, 判别效果也不理想. 而试件表面的磁信号反映的是应力集中区的自有漏磁场的积分场^[10], 为了得到应力集中处的特征信号, 对磁信号曲线进行微分得到各自的磁场梯度曲线, 即 $K=dH_p(y)/dx$, 分析其梯度变化情况.

加载过程中梁腹板沿检测线 4-4' 的磁记忆信号梯度曲线如图 9 所示. 由图 9 可见, 刚架左右钢梁腹板的梯度曲线在数值上略有差异, 但都表现出相同特征. 在不同荷载作用下, 磁场梯度 K 在集中荷载作用的跨中处表现为峰值, 并且该处的幅值远大于其他位置, 出现明显的波峰-波谷, 其



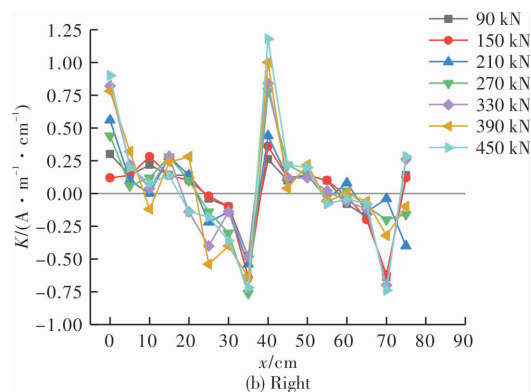


图9 腹板磁记忆信号梯度曲线

Fig. 9 Gradient curve of web magnetic signal

他位置则没有这种畸变现象。在整个加载阶段中,跨中梯度峰值有随荷载增大而逐渐增加的趋势,当结构失稳时曲线出现了峰-峰极值。试验加载过程中梯度曲线波峰-波谷之间的过零点位置较为稳定,在靠近集中荷载作用处的小范围内移动。

对比左右钢梁在跨中位置的波峰-波谷,在 $x=30\sim 40$ cm 范围内,左侧钢梁腹板梯度曲线幅值为 $1.72 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,右侧幅值为 $1.94 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,存在明显异变,两者幅值相近且具有代表性。因此,可利用构件在荷载作用下的梯度曲线作为确定构件危险部位的判断依据,磁场梯度曲线峰值处应力集中程度较大,通过具有最大幅值的畸变出现的位置可准确判断应力集中的位置,峰-峰值之间形成的过零点也可以作为参考判据。在分析磁记忆信号法向分量的基础上,进一步利用梯度曲线的评判方法可提高准确性,不易产生误判。

3 结论

(1)左右钢梁翼缘和腹板磁记忆信号法向分量曲线的变化趋势存在明显差异,具体表现为左侧钢梁翼缘和腹板表面磁信号随荷载增加变化幅度较大,整体有增大的趋势;右侧钢梁磁信号的变化趋势与左侧相比并不明显,变化幅度小,根据此差异并结合试验最终现象进一步分析,发现通过试件表面磁场的强弱变化能够推知试件的变形程度,可综合利用磁记忆信号的峰值和增幅两个标准对试件的应力集中区进行定性评判。

(2)左右钢梁翼缘的磁信号在靠近柱端处均出现明显的波峰-波谷现象,柱端附近焊缝较多导致该处应力集中程度大,应力集中区域附近的磁畴在拉压应力作用下会发生方向改变,引起磁信号的突变,因此可利用磁信号曲线波峰-波谷特征判

断试件应力集中区的位置。

(3)磁记忆信号法向分量曲线若无明显特征信号,利用磁信号梯度曲线中具有最大幅值的畸变出现的位置可准确判断应力集中区的位置,从而避免误判,梯度曲线过零点也可以作为参考判据,提高准确性。

参考文献 References

- [1] 王威,章红梅,张富文,等. 钢结构磁性无损检测中的几个基本技术问题[J]. 结构工程师, 2008, 24(6): 120-127.
WANG Wei, ZHANG Hongmei, ZHANG Fuwen, et al. Several basic technologies in the magnetic NDT&E for steel structure[J]. Structural Engineers, 2008, 24(6): 120-127.
- [2] 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.
- [3] 郑盼盼,陈冷,何飞,等. 金属板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.
- [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): 312-317.
- [5] 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.
- [6] 付美礼,包胜,柏树壮,等. 拉应力对不同厚度 Q345 钢磁记忆信号的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(6): 178-182.
FU Meili, Bao Sheng, Bai Shuzhuang, et al. Influence of tensile stress on magnetic memory signal in Q345 steel with different thicknesses[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6): 178-182.

(下转第 183 页)

- of thin-walled columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 289-299.
- [12] YOUNG B, RASMUSSEN K. Tests of fixed-ended plain channel columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2): 131-139.
- [13] YOUNG B, RASMUSSEN K. Design of lipped channel columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2): 140-148.
- [14] YOUNG B, SILVESTRE N, CAMOTIM D. Cold-formed steel lipped channel columns influenced by local-distortional interaction: strength and DSM design [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(6): 1059-1074.
- [15] KWON Y B, KIM B S, HANCOCK G J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 278-289.
- [16] LOUGHLAN J, YIDRIS N, JONES K. The Failure of thin-walled lipped channel compression members due to coupled local-distortional interactions and material yielding[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61(6): 14-21.
- [17] BEBIANO R, SILVESTRE N, CAMOTIM D. GBTUL-a code for the buckling analysis of cold-formed steel members[C]//19th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, Missouri, U. S. A: 2008: 61-79.

(编辑 桂智刚)

(上接第 160 页)

- [7] 邢海燕,樊久铭,李雪峰,等. 基于磁记忆机理的铁磁材料弯曲变形状态研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1017-1020.
- XING Haiyan, FAN Jiuming, LI Xuefeng, et al. Bend deformation state of ferromagnetic materials based on metal magnetic memory theory[J]. Journal of harbin institute of technology, 2006, 38(7): 1017-1020.
- [8] 中国建设标准化协会. 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程: CECS 102—2002 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- CECS. Technical specification for steed structure of light-weight buildings with gabled frames: CECS 102-2002[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.
- [9] 陈绍蕃,顾强. 钢结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- CHEN Shaofan, GU Qiang. Steel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [10] 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.

(编辑 桂智刚)