

含缺陷承载门式刚架的金属磁记忆检测试验研究

苏三庆¹, 郭欢^{1,2}, 王威¹, 胡敬余¹, 葛静¹, 李成¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西工业职业技术学院 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 以门式刚架拟静力试验为基础, 采集并分析了含缺陷刚架的梁和柱在不同荷载等级下的法向磁信号 $H_p(y)$ 值, 研究试件未退磁状态下法向磁信号 $H_p(y)$ 值随荷载变化的规律, 以及预制缺陷与磁信号的对应关系。结果表明: 试件初始剩磁场强度较大, 试件表面的磁信号在数值上虽然会随着荷载的变化而变化, 但磁信号曲线在形状上会保持初始剩磁场的分布状态, 直至外应力能够克服残余应力的影响; 试件到达临界状态时, 即试件刚度急剧退化、屈服或者失稳时, 法向磁信号 $H_p(y)$ 值会发生突变或反转; 磁信号曲线在节点、缺陷附近由于应力集中表现出波峰波谷。因此, 可以通过磁信号的突变、反转、波峰、波谷、过零点反演试件的受力状态、应力集中和缺陷的位置。

关键词: 金属磁记忆检测; 法向磁信号; 磁场梯度; 临界状态; 应力集中

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0001-08

Experimental study on metal magnetic memory testing of carrying gable frame with defects

SU Sanqing¹, GUO Huan^{1,2}, WANG Wei¹, HU Jingyu¹, GE Jing¹, LI Cheng¹

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

2. School of Civil Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Shaanxi Xianyang 712000, China)

Abstract: Based on the pseudo-static test of the defected gable frame, collecting and analyzing the beams and columns' normal magnetic signals of $H_p(y)$ value under different load levels. The specimen is not demagnetization, the law of $H_p(y)$ value changing with load and the relationship between prefabricated defects and magnetic signals were studied. The results show that the initial residual magnetic field strength of the specimen is large, and the magnetic signal on the surface of the specimen will change with the changing of load in value, but the magnetic signal curve will maintain the distribution of initial residual magnetic field in shape until the external stress can overcome the influence of residual stress. When the specimen reaches the critical state, such as the stiffness of the specimen is sharply degraded, yielding or unstable, the $H_p(y)$ value of the normal magnetic signal will be mutated or reversal. The magnetic memory signal curve at the node and near the defect shows the peak and trough due to the stress concentration. Therefore, the stress state, stress concentration and defect location of the specimen can be retrieved by means of magnetic signal mutation, inversion, wave peak, trough and zero crossing point.

Key words: metal magnetic memory testing; normal magnetic signals; magnetic field gradient; critical state; stress concentration

近年来, 门式刚架轻型房屋结构被广泛地应用于工业厂房和公共建筑中。但由于其受力形式较复杂, 在服役过程中不可避免地产生一些隐性损伤, 在损伤积累的过程中, 微小的外界作用都可能对结构产生致命的影响^[1-4]。因此, 采用有效的无损检测方法监测其早期损伤, 可以有效防止结构突然破坏。而传统的无损检测方法如超声检测、射线检测、磁粉检测、涡流检测等对检测环境和检测人员的经验要求较高, 且无法对形成宏观缺陷之前的微观裂纹和隐性损伤进行有效检测,

因此, 难以在大型钢结构检测中推广。

在 20 世纪 90 年代, 俄罗斯学者 Doubov^[5]提出金属磁记忆检测技术, 这是一种新兴的无损检测技术。其基本原理是: 铁磁性构件在大地磁场和荷载共同作用下, 内部磁畴组织会发生定向的不可逆的重新取向, 在应力和变形集中部位形成磁极, 产生漏磁场。金属磁记忆检测技术能够对铁磁材料的早期损伤进行检测, 国内外学者^[6-9]进行了大量的试验研究, 但试验对象多为小板件或单构件, 受力形式也较单一, 很少有学者将该技

收稿日期: 2018-12-09

修改稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878548, 51578449); 陕西省自然科学基金研究计划重点基金项目(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

术应用于检测受力复杂的结构。本文通过门式刚架拟静力试验,对门式刚架在不同荷载作用下的磁信号变化进行分析,得到预制缺陷及结构受力状态同磁信号的对应关系。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验试件为1个单榀单层单跨轻型等截面门式刚架,带有预制缺陷且设置侧向支撑。

试件的原材料选用Q235钢,材性试验按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及式样制备》(GB/T 2975-2018)^[10]要求从母材中取样和加工,每种板厚加工3个相同尺寸的标准短板件,共2组。拉伸试验严格按照《金属材料低温拉伸试验方法》(GB/T 13239-2006)^[11]的规定执行。试验完成后对数据取平均值,作为理论分析依据。试件基本力学参数如表1所示。

表1 试件基本力学参数

Tab. 1 Basic mechanical parameters of specimen

钢牌号	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
Q235	2.10×10^5	0.3	283

门式刚架依据《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》(GB 51022-2015)^[12]的规定,以《门式刚架轻型房屋钢结构图集》(02SG518-1)中GJ12-5c作为参照,取其几何尺寸的1/5模型进行试验研究。刚架主要尺寸为:檐口高度1 080 mm,跨度2 400 mm,屋面坡度1/15,如图1所示。该门式刚架梁柱截面均为300 mm高的轧制工字钢,具体尺寸如图2所示。

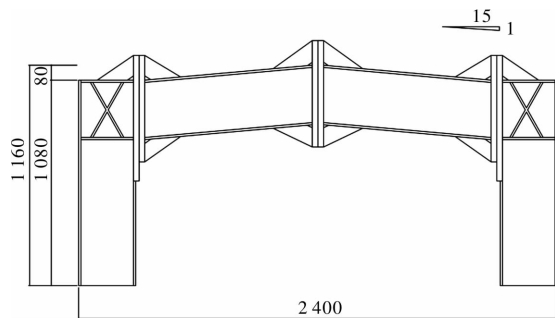


图1 刚架简图(单位: mm)

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

试件的梁柱在实验室进行拼装。梁梁与梁柱采用高强度螺栓-端板连接。端板处焊接部位均采用角焊缝,焊条选用E43型普通焊条。

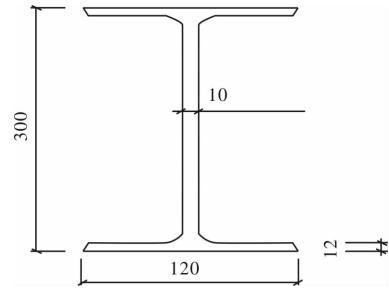


图2 梁柱截面(单位: mm)

Fig. 2 Section of the beam and column(Unit: mm)

1.2 试验设备

拼装好的门式刚架用实验室吊车安装就位,刚架柱脚用6个M30的螺栓与底梁刚接,且在柱脚两个翼缘外侧各焊接两个边长为80 mm、厚度为10 mm的三角形劲肋板。在门架的两侧加设支撑。采用100 t的MTS电液伺服结构试验机,在门式刚架左侧的梁柱节点上施加水平低周往复荷载。通过悬挂在斜梁上的3组砝码模拟竖向荷载,每一组砝码合力 $F = 1.03 \text{ kN}$ 。试验加载如图3所示。

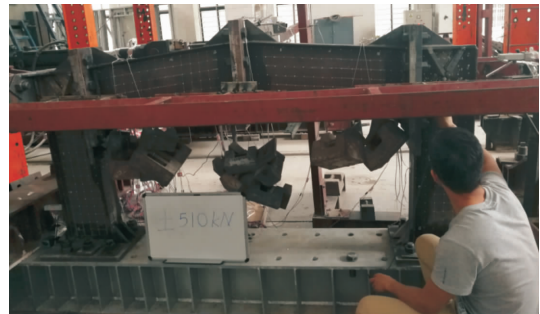


图3 试验加载图

Fig. 3 Specimen loading diagram

磁记忆检测装置为爱德森EMS-2003智能磁记忆/涡流检测仪,主要使用双通道笔式探头(TYPE: EPMS/B2)进行检测。参数设置为内时钟模式,显示模式为数字,背景磁场选择减CH1。试验中所获取的数据为减掉大地磁场后的试件表面实际磁信号值。

1.3 试验设计

加载时,采用力-位移混合控制的加载制度,即在试件屈服前采用力控制,试件屈服后改为位移控制加载,每级荷载循环3次。

每一级荷载施加完毕后,对试件进行拉向保载在线检测。检测时笔式探头垂直于试件表面,按照预定测量线采集所有点的磁信号 $H_p(y)$ 值,每个点采集3次,处理数据时取其平均值。

刚架梁检测线布置见图4。在梁腹板布置6条检测线。刚架左梁靠近加载端,其腹板上的检测

线从上到下依次记为 L1、L2、L3、L4、L5、L6, 如图 4(a)所示. 同理, 刚架右梁远离加载端, 其腹板上的检测线从上到下依次记为 L1'、L2'、L3'、L4'、L5'、L6'. 在左梁的上翼缘内侧布置一条检测线, 记为 L7, 如图 4(b)所示. 同理, 右梁上翼缘内侧布置一条检测线 L7'. 每条检测线上相邻两点之间距离为 50 mm.

预先在门式刚架左、右梁的 4 个翼缘的两侧各设置 1 个 U 型切口, 共 8 个切口, 位置分别距梁两端 300 mm 处, 切口长 30 mm、宽 3 mm. 左梁上翼缘的两个 U 型切口记为 1 区(1Q)和 2 区(2Q), 下翼缘为 3 区(3Q)和 4 区(4Q), U 型切口缺陷周围布置检测点, 检测线间距为 10 mm, 同一检测线相邻检测点之间距离为 20 mm, 缺陷具体位置及周围检测线布置情况如图 4(c)所示. 同理, 右梁上下翼缘的四个切口分别定义为 5~8 区.

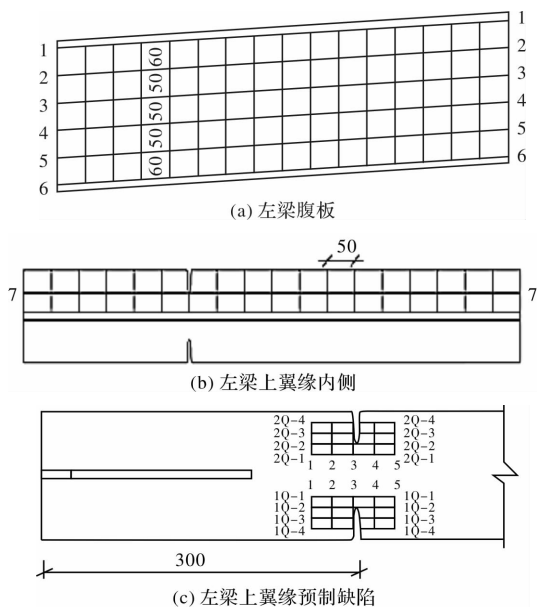


图 4 刚架梁检测线布置图(单位: mm)

Fig. 4 The testing line distribution of beam(Unit: mm)

刚架柱检测线布置方式与梁相似. 在左柱腹板布置 6 条检测线, 从左到右依次记为 Z1、Z2、Z3、Z4、Z5、Z6, 右柱腹板上的检测线从左到右依次记为 Z1'、Z2'、Z3'、Z4'、Z5'、Z6'. 在左、右柱的外翼缘内侧各布置一条检测线, 分别为 Z7、Z7'. 每条检测线上相邻两点之间距离为 50 mm.

2 试验结果分析

为防止门式刚架在进入塑性阶段之前发生分叉失稳破坏, 在加载之前, 为刚架加设侧向支撑. 初始加载 120 kN, 然后按 60 kN 的级差加载至 300 kN, 再以 30 kN 为级差加载至 570 kN, 试件

达到屈服, 屈服位移 $\Delta_y = 10.5$ mm. 试件屈服后, 转为位移控制加载.

如图 5 所示, $1.0\Delta_y$ 即 10.5 mm 循环 3 周后, 滞回曲线正反向严重不对称, 这是因为刚架反向加载时的承载力和变形能力远高于正向加载. 正向推到 14 mm 后试件失稳, 故反向拉到 $1.5\Delta_y$, 此时滞回曲线变化很大, 但反向能找到屈服点, 从这一级荷载开始, 预制 U 型切口的根处有裂纹发展, 1 区 U 型切口根处发展了 20 mm 长的裂纹, 如图 6(a)所示. 2 区 U 型切口根处没有发展裂纹, 但根据当时的受力状态, 现场人员预测了其发展裂纹的方向. 最后一级荷载欲反向拉到 $2.5\Delta_y = 26.5$ mm, 但拉到 25 mm 时, 靠近作动器的梁上翼缘的预制 U 型切口 1、2 区的两条裂纹贯通, 如图 6(b)所示, 此时裂纹发展至腹板, 如图 6(c)所示. 整个梁随时有由此截面剪断的可能, 考虑到试件的承载能力骤降以及继续加载的危险性, 试验加载过程就此结束, 撤去两侧支撑, 门式刚架卸载后的破坏形态如图 7 所示, 此时刚架上部的 3 个节点即梁梁和梁柱节点已不在一个平面内.

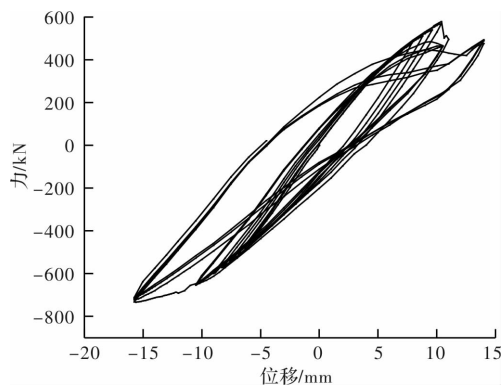


图 5 力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curve

2.1 磁信号 $H_p(y)$ 整体分析

2.1.1 刚架梁表面磁信号 $H_p(y)$ 整体分析

由于本试验加载等级较多, 检测线分布也密,



(a) $1.5\Delta_y$ 时 1 区缺陷萌生裂纹



(b) 2.5Δ时梁翼缘上1,2区的缺陷贯通



(c) 2.5Δ时梁腹板处由梁翼缘萌发一条裂纹

图6 梁裂纹观测图

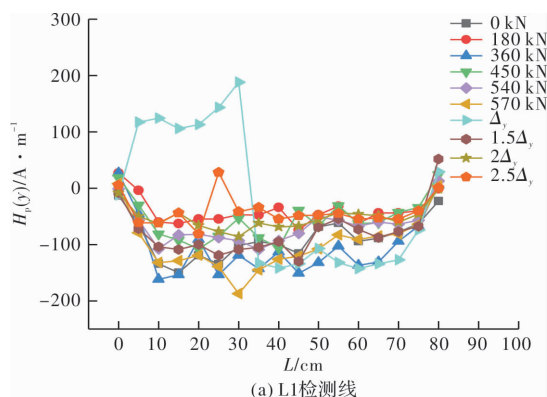
Fig. 6 Observation diagram of crack in beam



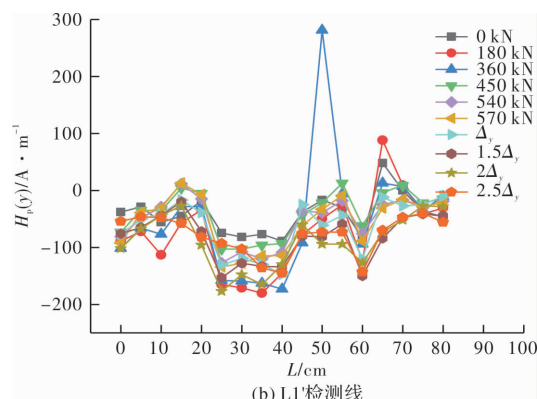
图7 卸载后的破坏形态

Fig. 7 Failure pattern after unloading

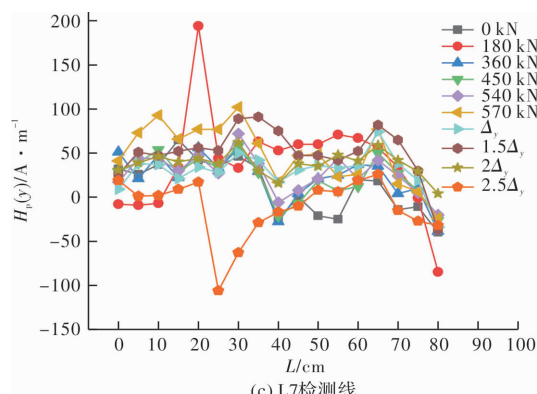
数据量庞大,故取L1、L1'、L7、L7'检测线在选取的10级荷载作用下的磁信号 $H_p(y)$ 曲线进行分析,如图8所示。



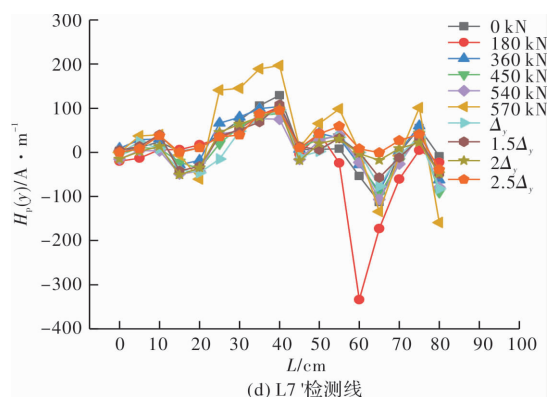
(a) L1检测线



(b) L1'检测线



(c) L7检测线



(d) L7'检测线

图8 刚架梁表面磁信号变化

Fig. 8 Magnetic memory signal changes of beams

由图8可以看出:零载时磁信号的变化属无规则变化,且L1、L1'检测线磁信号整体为负值,无过零点现象。门式刚架在加工、运输、组装、吊装、安装过程中,经过切削、焊接等加工工艺,且受到震动冲击等外荷载作用。这些均会造成试件内部磁畴转动和畴壁的不规则移动,导致材料受到不同程度的磁化,而该试件由于体积过大,很难进行退磁处理,因此试件表面出现无规律的初始磁信号。另外,同一条检测线的磁信号受初始磁信号的影响较大。当外力不足以克服初始残余应力的影响时,试件表面磁信号在数值上虽然会随着荷载的变化而发生改变,但是在形状上依然会保持初始剩磁场分布规律。

由图8(a)可以看出,左梁腹板进入屈服阶段

后, 磁信号发生突变, $1.0\Delta_y$ 位移控制下, 以 40 cm 为界, 左侧磁信号陡然增大, 突破了初始磁信号的影响, 但是在后续加载中, 左侧磁信号又回落到屈服前水平。另外, 30 cm 处磁信号发生突变, 此处正是腹板处萌生新的裂纹的位置。由此说明磁信号突变可以表征结构受力状态突变和损伤的位置。由图 8(b)可以看出, 右梁腹板磁信号在加载过程中, 整体并未出现突变的情况, 其原因可能是试验所取用的荷载级差较大, 且右梁距离加载端较远, 因此未能准确定位到使磁信号发生突变的荷载; 60 cm 处, 磁信号出现波谷, 此处距右梁上翼缘两处 U 型缺口很近, 为该检测线应力集中部位。

由图 8(c)可以看出, 左梁上翼缘内侧表面磁信号在进入屈服阶段后有微小增幅, 但在随后的加载过程中, 磁信号回落到之前水平, 这一现象与腹板相同; $2.5\Delta_y$ 循环后结构整体失稳破坏, 磁信号发生反转; 25 cm 处磁信号出现极值, 此处试验时形成贯通裂纹, 并且在 25 cm 附近悬挂有砝码, 这使得该范围内的应力集中程度更加严重; 接近 65 cm 处磁信号表现为波谷, 是由刚架梁翼缘端部加劲板焊接时产生残余应力导致的。由图 8(d)可以看出, 右梁上翼缘内侧磁信号在刚架屈服时, 磁信号值有较大增幅; 在刚架失稳时, 磁信号值没有出现反转等突变, 这是因为右梁距离加载点较远, 梁本身并没有失稳; 在 60 cm 处, 磁信号值为过零点, 且加载至 180 kN 时该部位磁信号有明显突变, 此处为右梁上翼缘两处 U 型缺口所在位置, 为该检测线应力集中部位。

刚架在屈服荷载或屈服位移作用下, 梁腹板和翼缘上的磁信号都有相应增幅。刚架失稳时, 左梁翼缘上的磁信号发生反转。另外, 磁信号波峰波谷处和试件缺陷处对应良好。磁信号过零点可以反应试件的应力集中位置。因此, 可以通过磁信号的突变、反转、波峰、波谷、过零点反演试件的受力状态和缺陷的位置。

2.1.2 刚架柱表面磁信号 $H_p(y)$ 整体分析

柱腹板选择左右柱在结构上对称的两条检测线 Z1 和 Z6' 进行磁信号分析。同理, 左右柱均选择外翼缘内侧 Z7、Z7' 检测线进行分析, 如图 9 所示。

从图 9 看出, 零载阶段沿检测线测量门式刚架柱表面的磁信号, 依然不具有一定的规律性且同一条检测线的 $H_p(y)$ 值曲线在不同的荷载等级下有着相似的变化趋势, 而曲线的变化与试件的初

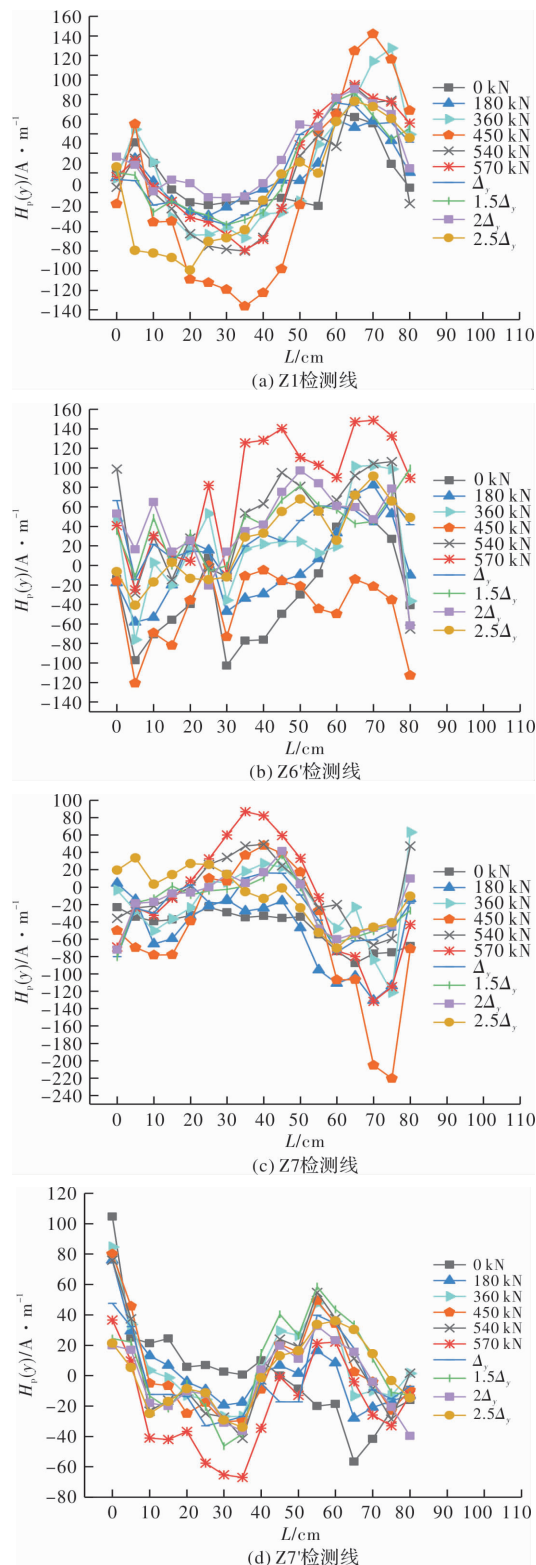


图 9 刚架柱表面磁信号变化

Fig. 9 Magnetic memory signal changes of column
始磁信号分布规律有关, 这点与刚架梁磁信号规律相同。

由图 9(a)可以看出, 加载到 450 kN 时, 左柱腹板上磁信号绝对值整体上最大, 450 kN 是门式刚架受力状态改变的一个关键点, 此时构件的刚度退化剧烈。加载到 570 kN 时, 磁信号值相较

450 kN 时还要小一些,这是因为 450 kN 后,试件刚度退化趋于平缓.构件失稳时, $L=0\sim 20$ cm 范围内,磁信号有较大增幅,此处因梁柱节点附近受力情况比较复杂,剪应力和正应力同时存在,所以这些区域应力值较大,最先进入塑性状态,最终导致构件失稳. $L=70$ cm 处为磁信号波峰,这是因为柱脚外翼缘在此高度处有两个加劲肋,焊接时产生较大残余应力,且在水平往复荷载作用下,此处应力集中严重.图 9(b)表明,右柱腹板在 450 kN(刚度退化严重)及 570 kN(构件开始屈服)时,磁信号发生突变.

图 9(c)所示 Z7 磁信号变化规律与左柱腹板 Z1 检测线相似,但数值大致相反,这是因为翼缘与腹板 Z1 检测线距离很近,受力形式相似,都受弯矩影响较大,所以磁信号曲线形状相似,但翼缘和腹板垂直,检测磁信号时探头垂直各检测线,二者检测磁信号时探头实际相差 90 度,而磁信号为矢量,受检测方向的一定影响,二者的磁信号波峰波谷刚好相反;弹塑性阶段,各曲线形状相似且数值接近; $L=70$ cm 处靠近柱脚,由于柱脚与节点板焊接残余应力较大,且在水平往复荷载作用下,柱脚附近的应力比较大,尤其加载到 450 kN 时,试件刚度退化急剧,应力集中较为明显,磁信号出现波谷;试件屈服时,磁信号有小幅增大.图 9(d)为 Z7' 磁信号,曲线在零载阶段较平缓;弹塑性阶段,各曲线形状相似且数值接近,屈服阶段,磁信号值达到最大.

总之,门式刚架柱在 450 kN 时,试件变形较大,刚度退化严重,达到一个临界状态,内部磁畴结构因试件产生较大变形而发生重组,导致磁信号有较明显的突变.试件屈服或失稳时,磁信号也表现出些许增幅和突变,但没有 450 kN 时剧烈,可能是受到门式刚架侧向支撑的影响,试件屈服之后的刚度退化趋于平缓,而试件失稳后,变形急剧增加,消耗大部分外力功,从而减少磁化功,导致磁信号在失稳后迅速降低.从微观角度分析,变形的持续增加导致位错明显,位错对磁畴壁产生钉扎效应^[13],使得磁信号减小.

2.1.3 刚架预制缺陷表面磁信号 $H_p(y)$ 分析

选取 1 区缺陷 1-Q1 检测线和 1-Q2 检测线的磁信号分析,如图 10 所示.

从图 10 可以看出,在整个加载过程中,磁信号在 3 点,即缺陷边缘处发生突变.

即使在零载状态下,磁信号在 3 点处也出现了突变,对于切口试件,磁场的突变在未加载时就

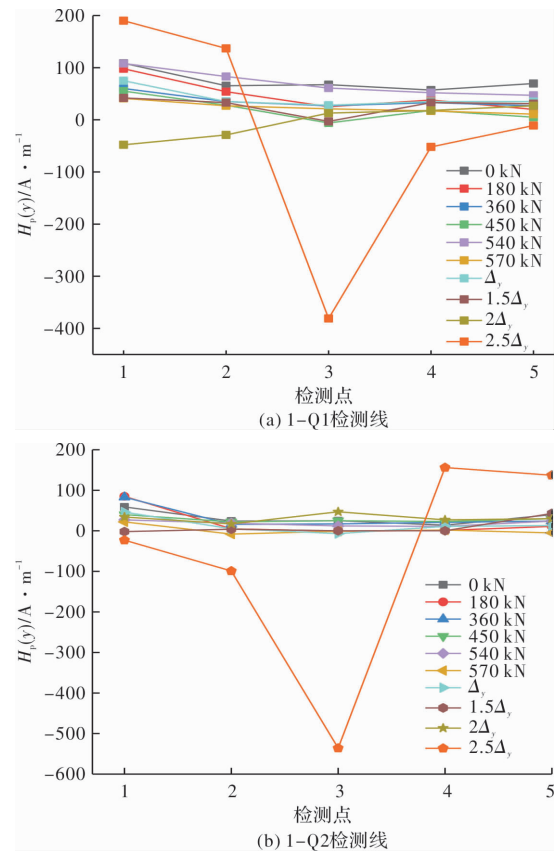


图 10 刚架梁 1 区缺陷磁信号变化

Fig. 10 Magnetic signal changes in 1 area of beam

已出现,这是由宏观几何缺陷造成的.

试件被拉到 $1.5\Delta_y$ 时,1 区 U 型切口根处发展了 20 mm 长的裂纹,1Q-1 检测线靠近 3 号点位置的磁信号出现过零点;1Q-2 检测线 3 点出现过零点.

试件被反向拉到 $2.5\Delta_y$ 时,即失稳破坏后,左梁上翼缘的预制 U 型切口 1 区、2 区的两条裂纹贯通,此时 1Q-1 检测线和 1Q-2 检测线 3 号点位置的磁信号显著突变,绝对值达到最大.

以上现象说明:法向磁信号 $H_p(y)$ 曲线在缺陷附近会突变,过零点处即为缺陷位置,且随着荷载的增大及缺陷的发展,磁信号会出现异变峰.

2.2 刚架磁信号梯度 K 整体分析

为了更好的对应力集中部位进行判断,对磁信号进行微分,得到其梯度,即 $K=dH_p(y)/dL$.下面以门式刚架梁和柱的翼缘为研究对象,分析其梯度变化规律.

2.2.1 刚架梁翼缘检测线磁信号梯度 K 分析

取左右梁上翼缘内侧检测线为研究对象,分析其磁信号梯度,如图 11 所示.

从图 11 可以看出:刚架左梁距离梁左端 30 cm 处有 U 型切口,这些预制缺陷导致梁左端的应力集中程度比右端大,使得磁信号梯度曲线表

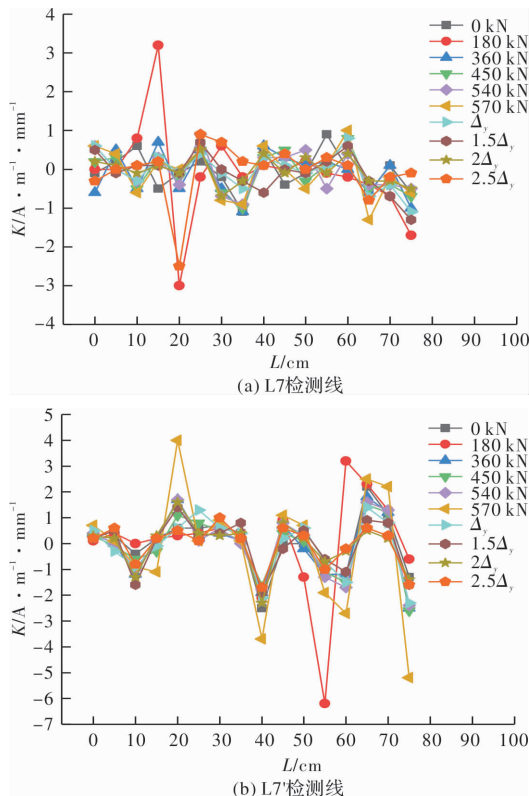


图 11 刚架梁翼缘处磁信号梯度曲线

Fig. 11 Magnetic signal gradient on the flange of beam

现为左端波动程度比右端大, 而右梁, 由于 U 型切口在距离梁右端 30 cm 处, 所以梯度曲线大致表现为右端波动程度比左端大。因此可以通过磁信号梯度的波动程度来大致反映应力集中的部位。

2.2.2 刚架柱翼缘检测线磁信号梯度 K 分析

取左右柱外翼缘内侧检测线为研究对象, 分析其磁信号梯度, 如图 12 所示。

图 12(a)表明: 左柱外翼缘内侧检测线各阶段磁信号梯度曲线基本一致, 在屈服和失稳时, 曲线无明显反转。加载到 450 kN 时, 曲线有较大增幅。图 12(b)表明: 右柱外翼缘内侧检测线各阶段磁信号梯度曲线基本一致, 在屈服时, 曲线略有增幅。

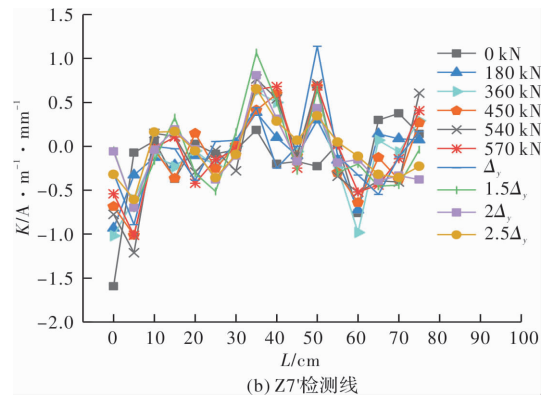
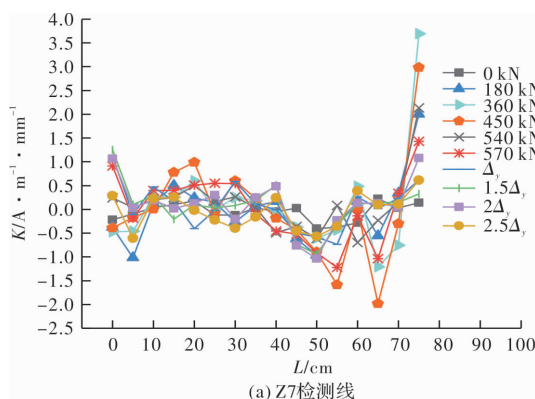


图 12 刚架柱翼缘处磁信号梯度曲线

Fig. 12 Magnetic signal gradient curve on the flange of column

3 结论

(1) 刚架在屈服荷载或屈服位移作用下, 梁腹板和翼缘上的磁信号有相应增幅。刚架失稳时, 左梁翼缘上的磁信号发生反转。另外, 磁信号波峰波谷处和试件缺陷处对应良好。磁信号过零点可以反映试件的应力集中位置。

(2) 刚架柱在屈服时, 磁信号没有表现出很强烈的增幅和突变, 原因是受到门式刚架两侧支撑的影响。加载到 450 kN 时, 试件变形较大且刚度退化严重, 检测到的磁信号发生了明显的突变, 二者有一定的对应关系。

(3) 总体上, 构件的初始状态决定了磁信号曲线及梯度曲线的走势, 但构件在刚度急剧退化、屈服或者失稳时, 磁信号曲线会发生明显突变或反转, 且磁信号曲线在节点、缺陷附近由于应力集中表现出波峰波谷。这说明水平循环荷载改变了试件的受力状态, 而应力集中导致磁信号曲线出现极值。因此, 可以通过磁信号的突变、反转、波峰、波谷、过零点反演试件的受力状态和缺陷的位置。

参考文献 References

- [1] 孙灏江. 基于磁记忆检测的建筑钢构件弯曲试验和特征参数研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
SUN Haojiang. Study on bending test and characteristic parameters of building steel members based on magnetic memory test [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2017.
- [2] 王正道, 姚凯, 沈恺, 等. 金属磁记忆检测技术研究进展及若干讨论[J]. 实验力学, 2012, 27(2): 129-139.
WANG Zhengdao, YAO Kai, SHEN Kai, et al. Research progress and discussion on metal magnetic

- memory detection [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 27 (2): 129-139.
- [3] 姚凯. 基于金属磁记忆法的铁磁材料早期损伤检测与评价的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
YAO Kai. Experimental study on early damage detection and evaluation of ferromagnetic materials based on metal magnetic memory method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [4] 冷建成. 基于磁记忆技术的铁磁性材料早期损伤诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LENG Jiancheng. Study on early damage diagnosis of ferromagnetic materials based on magnetic memory technique [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2012.
- [5] DUBOV A A. A study of metal peoperties using the method of magnetic memory [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 1997, 39(9): 401-405.
- [6] SU S Q, YI S C, WANG W, et al. Bending experimental study on the relationship between strain and metal magnetic memory field of steel beam [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2018, 60(7): 380-386.
- [7] YI S C, WANG W, SU S Q. Bending experimental study on metal magnetic memory signal based on von Mises yield criterion [J]. *International Journal of Applied Electromagnetic and Mechanic*, 2015, 49 (4): 547-556.
- [8] 徐滨士, 董丽虹. 再制造质量控制中的金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
XU Binshi, DONG Lihong. Metal magnetic memory detection technology in remanufacturing quality control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [9] 邢海燕, 孙晓军, 杨文光, 等. 不同倾斜角度角焊缝磁信号定量特征研究[J]. *压力容器*, 2016, 33(12): 49-58.
- XING Haiyan, SUN Xiaojun, YANG Wenguang, et al. Quantitative characteristics of magnetic memory signals in fillet welds with different tilt angles [J]. *Pressure Vessel*, 2016, 33 (12): 49-58.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Standardizationadministration of China. Sampling position and sample preparation for mechanical properties test of steel and steel products : GB/T 2975-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料低温拉伸试验方法: GB/T 13239-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Standardizationadministration of China . Room temperature tensile test method for metallic materials : GB/T 13239-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范: GB 51022-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for steed structure of light-weight buildings with gabled frames: GB 51022-2015 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [13] 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.

(编辑 沈 波)