

# 基于金属磁记忆检测技术的波纹斜腹板钢箱梁试验研究

苏三庆<sup>1</sup>, 路秀琪<sup>1</sup>, 王 威<sup>1</sup>, 董邴宁<sup>2</sup>, 马小平<sup>1</sup>, 叶 毅<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对桥梁波纹腹板钢箱梁, 进行了四点受弯静载试验, 采集了不同等级荷载下沿翼缘和腹板检测线方向的磁信号, 分析了弹性和塑性阶段沿检测线方向磁信号及其梯度值的变化规律, 找出了表征应力集中程度及区域的特征磁信号, 得出如下结论: 第一, 在波纹腹板钢箱梁的四点受弯试验中, 过零点的位置不能表征应力集中位置及破坏位置, 磁信号过零点的经验判断并不适用; 第二, 弹性和塑性阶段磁信号变化曲线相似, 弹性阶段的特征磁信号能够较好地表征应力集中程度, 塑性阶段特征磁信号不能很好地表征应力集中程度; 第三, 利用钢箱梁跨中挠度和磁信号梯度值绝对值曲线中的转折点可以找出钢箱梁屈服时挠度。

**关键词:** 金属磁记忆检测; 桥梁钢 Q345qC; 四点受弯; 应力集中; 磁信号曲线

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)04-0463-08

## Experimental study on tilt corrugated web steel box girder based on metal magnetic memory testing technology

SU Sanqing<sup>1</sup>, LU Xiuqi<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, DONG Lining<sup>2</sup>, MA Xiaoping<sup>1</sup>, YE Yi<sup>1</sup>

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

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The flexural loading test of tilt corrugated web steel box girder are conducted by four-point bending pattern. In the same time, the magnetic signal along the lines of flange and web direction of this beam under different load level of the whole loading process are collected. The change rule of the magnetic signal and its gradient values during the elastic and plastic stage are analyzed, and the characteristics of the magnetic signals to describe the stress concentration degree and the position of beam are extracted by experimental data. Conclusion are obtained as following: First, in the four-point bending test of corrugated web steel box girder, a zero value of magnetic signal can't indicate the stress concentration position of beam, the judgment methods of magnetic signals passing zero value may have some mistake. Second, magnetic signal curves of the elastic and plastic stage of tilt corrugated web steel box girder are similar. The magnetic signal characteristics of the elastic stage can indicate the stress concentration degree very well, while the magnetic signal characteristics of plastic phase can't indicate the stress concentration degree. Third, the deflection degree value in the mid span on the yield stage of the steel box girder can be calculated by using the mutation point of magnetic signal curve and absolute value of gradient curve.

**Key words:** metal magnetic memory (MMM); bridge steel Q345qC; four-point bending; stress concentration; magnetic signal gradient

随着我国交通建设事业的高速发展, 越来越多的大跨度和超大跨度桥梁相继建成, 在各种桥梁结构类型中钢结构桥梁由于其自重轻、加工快等优点而被青睐, 其中波纹腹板钢箱梁因其受剪承载力和稳定性较高而被应用到桥梁结构中<sup>[1]</sup>。为了解桥梁结构的安全特性对其进行定期检查是必要的, 而采用无损检测的方法可以获取结构内部的健康信息, 了解结构因累积损伤而造成的改变<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。如果能在微观缺陷扩展的早期检测到应力集中区域, 就可以避免桥梁倒塌等重大安全事故的发生。而传统的无损检测手段, 如漏磁、磁粉、超声及涡流等, 可以有效的发现已发展成形的宏观或大部分微观缺陷, 对尚未发展成形的微观缺陷和应力集中等早期损伤难以实施有效的评价<sup>[4-5]</sup>。20 世纪 90 年代后期俄罗斯学者 Doubrov 提出了一种新型的无损检测技术, 即金

收稿日期: 2017-04-26

修改稿日期: 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478383, 51508453); 陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(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、健康监测方面的研究。E-mail: sussq@xauat.edu.cn

属磁记忆检测技术<sup>[6-7]</sup>。该技术借助于天然的地磁场作用,能够对铁磁性金属构件的应力集中、早期损伤和损伤程度等进行诊断,可以防止构件的突然失效,是迄今为止对铁磁构件进行早期诊断唯一行之有效的无损检测方法<sup>[8]</sup>。

目前对金属磁记忆检测技术的研究主要集中在航空、电力、石油、化工、机械和建筑结构等领域,但是却鲜有针对桥梁钢结构检测的研究。并且,目前的试验研究主要针对静载拉伸和拉-拉疲劳试验,而对弯曲试验的研究较少。本文主要以桥梁用 Q345qC 钢为研究对象,选用典型桥梁钢结构类型波纹腹板钢箱梁进行四点受弯试验,采集钢箱梁翼缘及腹板处的磁信号,得出了受弯全过程中磁信号及其梯度的变化规律,并据此找出表征应力集中的特征参数,为金属磁记忆检测技术在桥梁钢结构方面应用提供依据。

## 1 金属磁记忆检测原理

金属铁磁构件受地磁场和工作荷载的共同作用,磁畴结构和分布会发生改变,并在缺陷或应力集中处出现磁畴的固定节点,以漏磁场的形式出现在铁磁材料的表面。在应力和变形集中区域发生磁畴组织定向和不可逆的重新取向,在工作荷载卸除后仍然保留,这种“记忆”部件表面缺陷和应力集中位置的现象即为磁记忆效应<sup>[9]</sup>。

应力集中<sup>[10]</sup>是由于金属铁磁构件的弯曲和形状不连续、材质不均匀以及残余应力的作用引起的,在应力集中的部位,由于局部的应力高达名义应力的几倍甚至几十倍,这些部位往往是构件在服役过程中的危险部位。处于地磁环境下的金属铁磁构件在工作荷载的作用下会在缺陷和应力集中区形成漏磁场  $H_p$  的变化,即磁场的法向分量  $H_p(y)$  具有零点值和最大梯度值,切向分量  $H_p(x)$  具有最大值<sup>[11-13]</sup>。通过检测磁场强度  $H_p$  法向和切向分量的分布规律,可以找出缺陷和应力集中的区域<sup>[14]</sup>。漏磁场  $H_p$  的分布曲线见图 1。因此,金属磁记忆检测技术可以检测早期损伤产生的位置。

## 2 试验方案

### 2.1 试验设计

试验选用桥梁用 Q345qC 钢,其化学成分和力学性能见表 1 和表 2。试验中钢箱梁是由 Q345qC 钢焊接而成,翼缘厚度为 8 mm,腹板厚度为 6 mm,腹板是依据《组合折腹板桥梁设计模式指南》、《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-

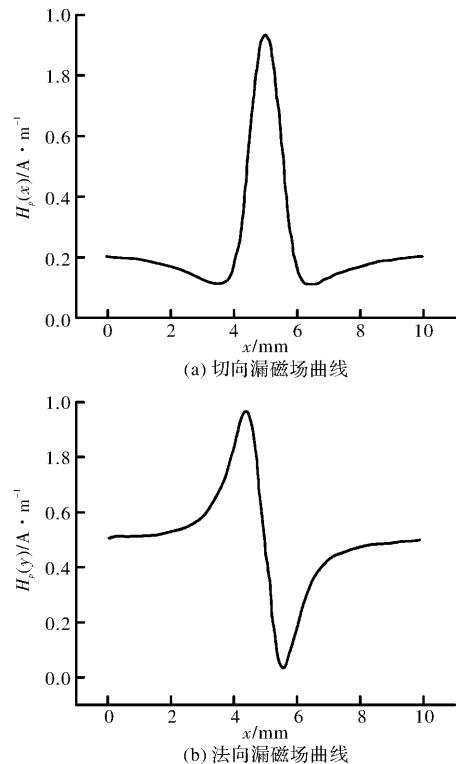


图 1 漏磁场分布曲线

Fig. 1 Leakage magnetic field distribution curve

2015),采用 1000 型波纹板的 1/4 缩尺尺寸波折而成,钢箱梁的波纹腹板在焊接时倾斜成为斜腹板。为保证钢箱梁的局部稳定,在钢箱梁的翼缘加设横向和纵向的加劲肋,钢箱梁横截面如图 2 所示。

表 1 Q345qC 钢试件化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Q345qC steel specimen

材料	化学成分/%				
	C	Si	Mn	P	S
Q345qC	$\leq 0.20$	$\leq 0.60$	1.0~1.6	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$

表 2 Q345qC 钢试件力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of Q345qC steel specimen

材料	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	伸长率/%
Q345qC	385	490~510	35

钢箱梁的总长度为 2 100 mm,加载时在梁的左右两侧各外伸 150 mm,净长度为 1 800 mm 的简支梁。加载点设置在梁的三分点处,此时钢箱梁为两端是弯剪段而中间是纯弯段的四点受弯状态。在两个加载点处设置竖向荷载分配构件。

磁信号检测线布置在钢箱梁的一侧,为避免应变片对磁信号的干扰,应变片对称贴到另一侧。磁信号检测线沿长度方向布置,上翼缘设置 1 条检测线为 s1-s1,在腹板处设置 5 条检测线,从上向

下依次命名为 f1-f1, f2-f2, f3-f3, f4-f4, f5-f5, 在下翼缘的下侧设置 4 条检测线, 从边缘向内侧依次命名为 x1-x1, x2-x2, x3-x3, x4-x4. 磁信号检测线的布置如图 3 所示, 横向检测点之间的距离为 50 mm, 两线的交点处即为检测点位置.

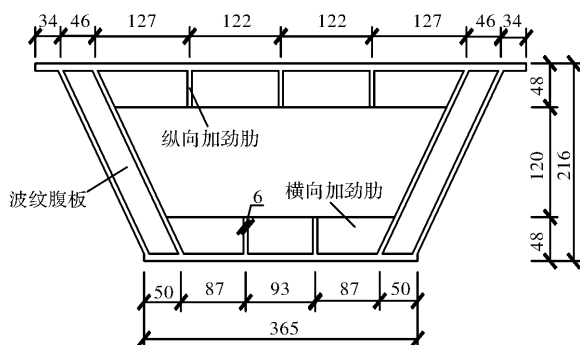


图 2 钢箱梁横截面 (单位: mm)

Fig. 2 Steel box girder cross section (unit: mm)

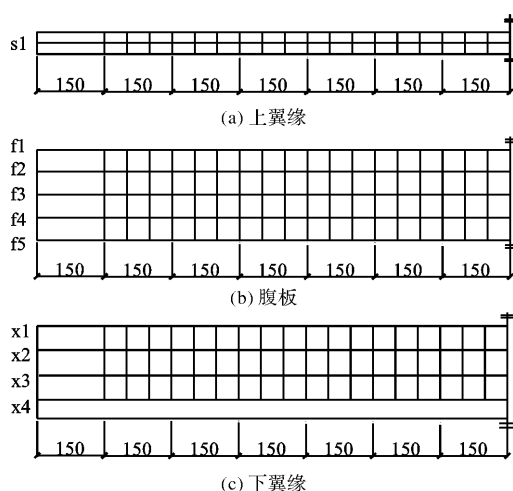


图 3 磁信号检测线布置 (单位: mm)

Fig. 3 Magnetic signal detection line layout (unit: mm)

## 2.2 试验设备及方法

本试验是在 YAJ20000 电液伺服压剪机上进行, 其最大试验力为 2 000 kN. 磁信号检测仪器选用爱德森 EMS-2003 智能磁记忆/涡流检测仪, 将其设置为数字显示模式, 采用双通道笔式探头, 背景磁场抑制选为“—CH1”, 以抑制地磁场强度获取真实的磁记忆信号.

试验在加载之前要将竖向荷载分配构件加到钢箱梁上, 在加载点处进行对中、调整, 确保集中力加到三分点处, 并且要对试验仪器进行调试, 确保正常工作. 试验之前进行材性试验, 根据材性试验得出应力-应变曲线, 并参考文献[12], 计算出钢箱梁的屈服时集中荷载为 798 kN, 极限的承载力为 1 150 kN, 达到极限承载力时停止加载, 设置加载等级为 0 kN、200 kN、400 kN、600 kN、800 kN、1 000 kN、1 100 kN、1 150 kN. 在未加载

时采集初始磁信号值, 每加载一级后检测一次磁信号值, 检测时采用在线检测的方式.

## 2.3 误差减小措施

在试验过程中外界因素的影响会导致试验结果产生误差, 为减少偶然误差的影响, 在检测每个点时读出三组数据, 摒弃其中明显错误的磁信号值, 对剩余的值取平均值. 并且在每次检测之前都要对磁信号检测仪器进行归一化, 将连接的探头与大地磁场做校准, 使仪器和探头相互匹配, 减小不必要的干扰. 在检测时探头贴到试件表面与检测点垂直, 避免了提离值的改变对磁信号的影响. 同时, 整个试验都是在实验室环境中进行, 并且对磁信号的采集都是在线采集, 减少因周围环境的变化对磁信号造成的影响.

## 3 试验结果及分析

试件从零载开始加载到承载能力极限状态后停止加载, 得出在加载全过程中翼缘和腹板磁信号的变化规律. 在加载完成后发现试件的上翼缘在加载点附近发生局部屈曲, 且有较大的挠曲变形, 腹板处没有出现明显的屈曲现象, 而下翼缘的变形挠度最大. 其主要原因是波纹腹板的平面外刚度比较大, 整体稳定性高, 在荷载作用下不易发生挠曲变形.

在试验完成后对加载全过程中钢箱梁腹板和下翼缘上的磁信号进行分析, 发现腹板处 5 条磁信号检测线表现出较大的相似性, 则选取应力较大并且受焊缝等其他因素影响较小的检测线 f4-f4 分析. 而在下翼缘处的 4 条磁信号曲线也表现出相似的变化规律, 则取受干扰较小的 x3-x3 检测线上的磁信号进行分析.

### 3.1 初始阶段磁信号曲线

在初始阶段, 钢箱梁上翼缘、腹板和下翼缘的磁信号变化规律如图 4 所示.

从图 4 中可以看出, 在试件未加载时, 腹板和上、下翼缘磁信号波动大, 有多处过零点的现象, 磁信号曲线均无明显规律. 这主要是因为试件在前期的加工和运输过程中, 经过辊压、磨削和焊接<sup>[15]</sup>等工艺, 使得试件内部产生磁畴壁移动和磁畴的转动, 磁畴壁的不可逆的迁移导致试件内部出现无规律的剩磁场, 从而影响磁信号的变化.

### 3.2 弹性阶段磁信号曲线

弹性阶段腹板及下翼缘磁信号变化如图 5 所示.

由图 5(a)可知, 弹性阶段上翼缘的磁信号值

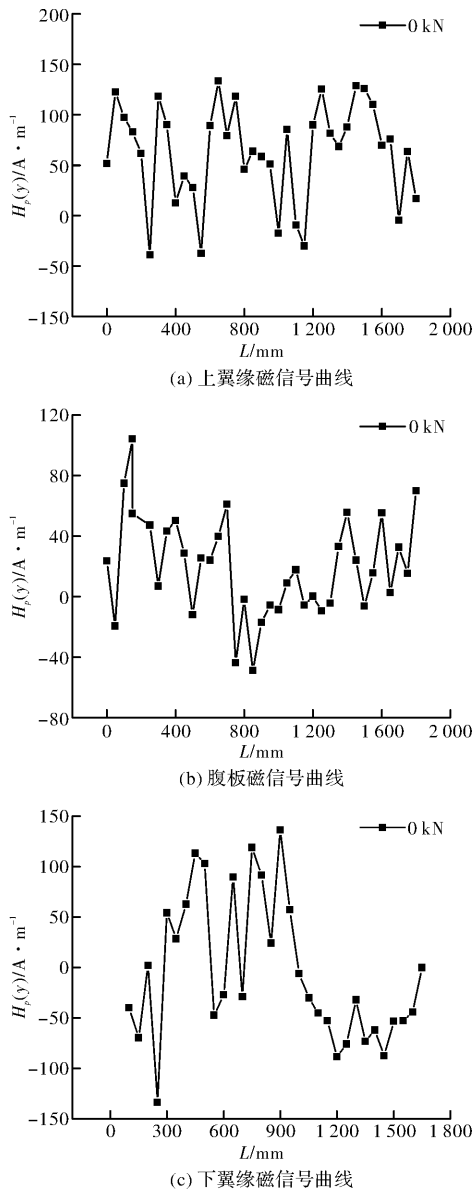


图4 初始状态磁信号曲线

Fig. 4 The initial state magnetic signals curves

基本为正值,并且随着荷载的不断增大表现出比较明显的规律性.磁信号曲线沿着钢箱梁两端向中间基本呈线性下降,在中间磁信号值基本不变,维持在30 A/m左右,并且随着荷载的不断增大,在水平段的磁信号值变化不大.这与四点受弯时弯矩图类似.由磁信号的变化曲线可以看出在 $L=500\sim 600$  mm和 $L=1\,250\sim 1\,300$  mm范围内出现“拐点”.而集中力加载点在600 mm和1 200 mm位置处,这与集中力加载位置略有偏差,主要是因为集中力加载时有竖向荷载分配传力构件,使得应力集中区域向外偏移.

从图5(b)中可以发现腹板处磁信号值有正有负,其过零点的位置不能表征应力集中区域.随着荷载的不断增大,磁信号曲线变得有序,在应力集中区域出现“波谷”现象,范围在 $L=300\sim$

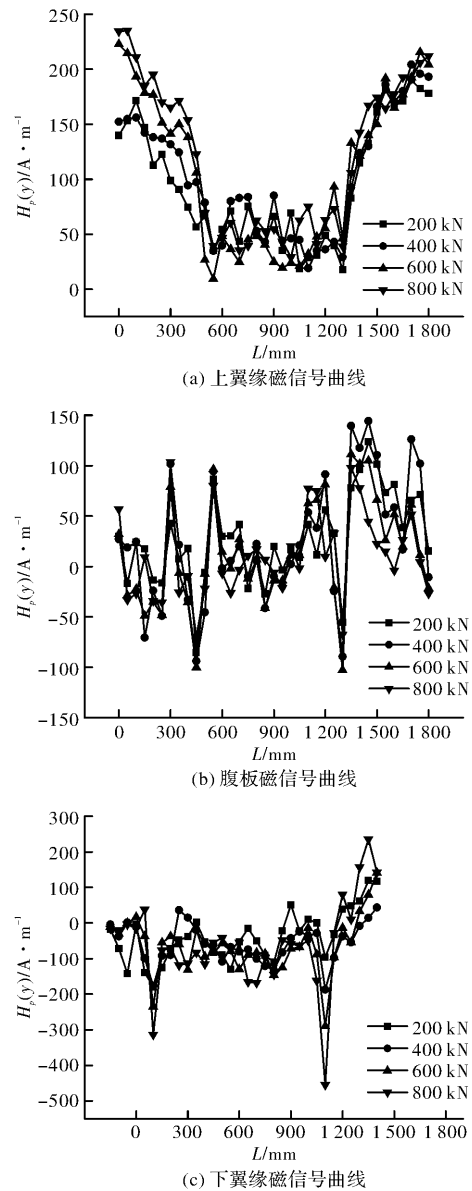


图5 弹性阶段磁信号曲线

Fig. 5 The elastic stage magnetic signal curves

550 mm和 $L=1\,200\sim 1\,350$  mm内,“波谷”高度值约为250 A/m,在200 kN到600 kN之前“波谷”高度值不断增大,在800 kN时有略微减小.

从图5(c)中可以看出下翼缘表面磁信号变化规律与腹板处变化规律相似,但下翼缘磁信号值大都为负值.在 $L=350\sim 450$  mm和 $L=1\,350\sim 1\,500$  mm范围内,右边的“波谷”高度值明显高于左边,这是由于初始加载时试件表面和加载装置表面没有完全重合,使得加载时右边的集中力高于左边,右边的“波谷”高度值大于左边.最大的“波谷”高度值为500 A/m左右,在200 kN之前磁信号的“波谷”高度值较小.在200 kN之后磁信号的“波谷”高度值不断增大.

### 3.3 塑性阶段磁信号曲线

塑性阶段腹板和下翼缘磁信号变化规律如图6

所示.从图6(a)中可以看出,在塑性阶段,上翼缘的磁信号变化曲线与弹性阶段相似,但随着荷载的不断增大,“拐点”位置变得不明显.腹板和下翼缘的磁信号变化规律与其弹性阶段类似,但随着荷载的不断增大,“波谷”高度值呈现减小的趋势,在承载能力极限状态,“波谷”高度值为塑性阶段最小.在弹性阶段,上翼缘纯弯段的磁信号值基本维持在30 A/m左右,腹板纯弯段磁信号值在0 A/m左右,下翼缘纯弯段内的磁信号值基本恒定在-100 A/m左右.根据腹板和下翼缘磁信号出现“波谷”的位置以及上翼缘磁信号出现“拐点”的位置可以初步预判应力集中位置.而在塑性阶段,腹板的下翼缘“波谷”高度值不能反映应力集中程度.在本试验中,上翼缘磁信号大部分是正值,没有“过零点”的现象,腹板磁信号“过零点”位置多,下翼缘磁信号主要为负值,没有“过零点”现象.因此,磁信号“过零点”位置不能直接反映应力集中位置,则“过零点”现象这种经验判断应力集中区域的方式,在本试验中并不适用.

#### 4 磁记忆特征信号分析

为了对应力集中区域和应力集中程度进一步判断以及研究磁信号梯度 $K$ 沿检测线 $L$ 方向的变化规律,定义曲线中“峰-峰值”高度和水平位置的特征参数,如图7所示.其中, $H_{lb}$ 和 $H_{lt}$ 分别表示左边“峰-峰”的下峰和上峰与起始点的距离, $H_{rb}$ 和 $H_{rt}$ 分别表示右边“峰-峰”的下峰和上峰与起始点的距离, $V_l$ 和 $V_r$ 分别表示左边和右边“峰-峰”的垂直距离.

##### 4.1 弹性阶段磁信号梯度曲线

弹性阶段腹板和翼缘磁信号梯度曲线如图8所示.从图8中可以发现在弹性阶段磁信号梯度曲线表现出一定的规律性,并且随着荷载的增加而改变.

从图8(a)中可以发现,上翼缘的磁信号梯度在 $L=450\sim 600$  mm和 $L=1\,250\sim 1\,350$  mm处出现“峰-峰值”,有“过零点”现象但不能准确反映应力集中位置.在左边的弯剪段磁信号梯度值基本为负值,当 $L=450\sim 600$  mm时出现负的“峰-峰值”,随着荷载增大, $V_l$ 和 $V_r$ 基本呈增大的趋势.在纯弯段,磁信号梯度值没有明显变化,基本恒定在零附近.而在 $L=1\,250\sim 1\,350$  mm位置处出现正的“峰-峰值”,并且随着荷载增大, $V_l$ 和 $V_r$ 基本呈增大的趋势,在右边的弯剪段磁信号梯度值基本为正值.则弹性阶段上翼缘可以根据磁信

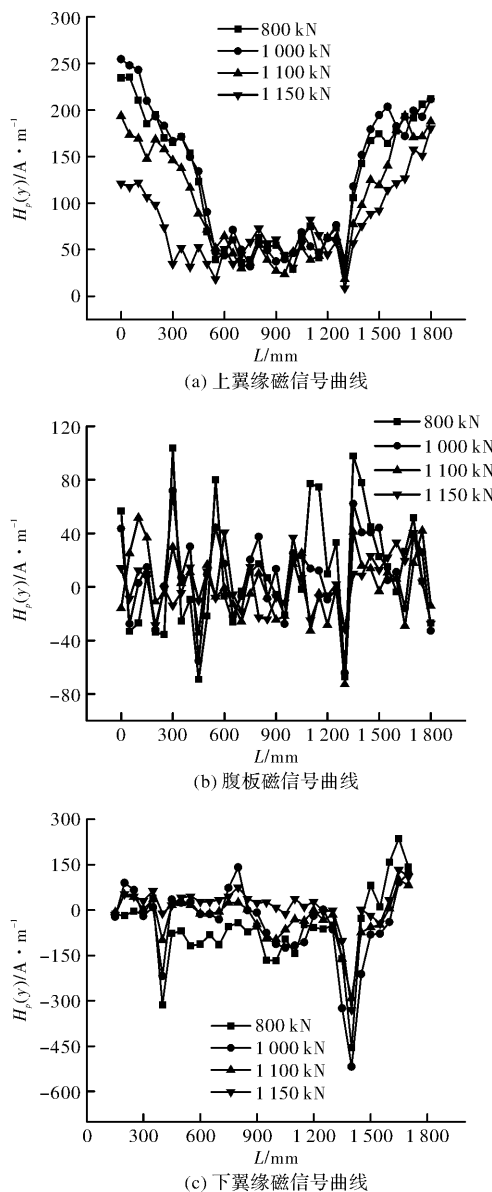


图6 塑性阶段磁信号曲线

Fig. 6 The plastic stage magnetic signal curves

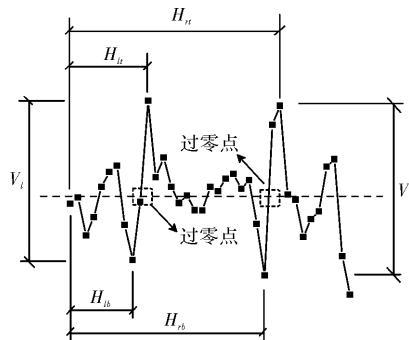


图7 磁信号特征曲线

Fig. 7 The magnetic signal characteristic curves

号梯度值“峰-峰值”高度 $V_l$ 和 $V_r$ 判断应力集中程度,而通过 $H_{lb}$ 、 $H_{lt}$ 和 $H_{rb}$ 、 $H_{rt}$ 可以判断应力集中位置.

从图8(b)中可以看出腹板的梯度曲线在 $L=400\sim 500$  mm和 $L=1\,250\sim 1\,350$  mm范围内出现

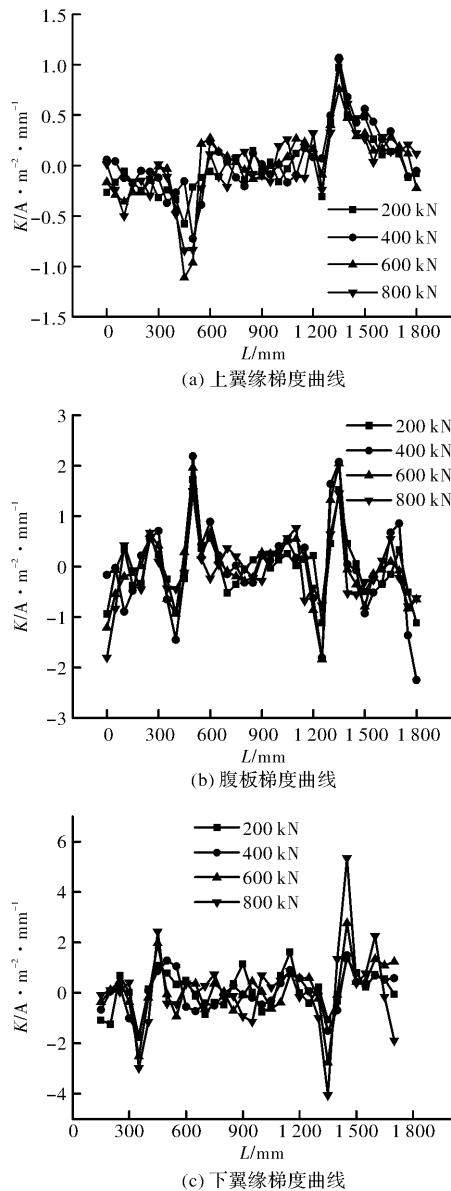


图8 弹性阶段磁信号梯度曲线

Fig. 8 The elastic stage gradient magnetic signal curves

“过零点”和“峰-峰值”现象, 并且两边的“峰-峰值”高度并不对称,  $V_r$  比  $V_l$  要大. 这是因为在初始加载时竖向传力构件与钢箱梁上翼缘左侧没有完全接触, 加载过程中右侧集中力较大, 导致磁信号梯度曲线右侧的“峰-峰值”高度值比左侧要大. 在弹性阶段随着应力的不断增大,  $V_l$  和  $V_r$  基本呈增大的趋势,  $H_{lb}$ 、 $H_{lt}$  和  $H_{rb}$ 、 $H_{rt}$  基本保持不变, 而在纯弯段磁信号梯度值基本恒定在零附近. 因为纯弯段只有弯矩没有剪力, 腹板主要承受剪应力, 而纯弯段没有剪应力使得腹板处的应力非常小, 则磁信号基本恒定为零, 则在纯弯段的磁信号梯度曲线也基本为零.

从图 8(c) 中可以看出下翼缘的梯度曲线也在左右两侧出现了“峰-峰值”以及“过零点”的现象, 左侧的在  $L=350\sim 500$  mm 位置处, 右侧“峰-峰”

值及过零点现象在  $L=1\ 350\sim 1\ 450$  mm 位置处, 并且由于加载时接触面的偏差, 使得右边的集中力比左边的偏大,  $V_r$  也比  $V_l$  要大. 随着荷载的不断增大,  $V_l$  和  $V_r$  基本呈增大的趋势,  $H_{lb}$ 、 $H_{lt}$  和  $H_{rb}$ 、 $H_{rt}$  基本保持不变, 纯弯段的磁信号梯度曲线基本为零. 在下翼缘纯弯段的应力基本恒定为常数, 梯度曲线在纯弯段基本恒定为零.

对比图 8(b) 和图 8(c) 可以发现下翼缘与腹板的磁信号梯度曲线表现出相似的规律, 而下翼缘的  $V_l$  和  $V_r$  要比腹板处的要大, 但都可以依据  $V_l$  和  $V_r$  即左右两侧的峰-峰高度值可以进一步确定应力集中程度,  $H_{lb}$ 、 $H_{lt}$  和  $H_{rb}$ 、 $H_{rt}$ , 即左右两侧的上、下峰的位置, 可以辅助确定应力集中区域.

在弹性阶段, 可以依据钢箱梁磁信号梯度曲线峰-峰高度值  $V_l$  和  $V_r$  判断应力集中程度,  $H_{lb}$ 、 $H_{lt}$  和  $H_{rb}$ 、 $H_{rt}$ , 即左右两侧“峰-峰”中上、下峰的位置, 辅助确定应力集中区域.

#### 4.2 塑性阶段磁信号梯度曲线

塑性阶段腹板和翼缘磁信号梯度曲线如图 9 所示.

对比图 8 和图 9 可以发现塑性阶段上、下翼缘处磁信号梯度曲线与弹性阶段变化规律相似. 由于腹板的磁信号梯度都比较小, 其“过零点”和“峰-峰值”现象不明显, 但可以发现随着应力的增大, “峰-峰值”会降低, 则此时“过零点”可以表征应力集中位置, “峰-峰”高度值不能较好的表征应力集中程度. 塑性阶段上翼缘出现“过零点”和“峰-峰值”的位置在  $L=450\sim 600$  mm 和  $L=1\ 250\sim 1\ 350$  mm 附近, 下翼缘出现“过零点”和“峰-峰”值的位置在  $L=350\sim 500$  mm 和  $L=1\ 350\sim 1\ 450$  mm 附近, 这分别与其弹性阶段位置相同, 则此时磁信号梯度曲线“过零点”位置可以辅助判断应力集中的位置. 但是随着应力的增大“峰-峰值”会不断降低, 并且在承载能力极限状态的“峰-峰值”为最小值, 故此时  $V_l$  和  $V_r$  即磁信号梯度曲线中“峰-峰”高度值不能表征应力集中程度.

在塑性阶段, 不能依据钢箱梁磁信号梯度曲线“峰-峰”高度值  $V_l$  和  $V_r$  判断应力集中程度, 而  $H_{lb}$ 、 $H_{lt}$  和  $H_{rb}$ 、 $H_{rt}$ , 即左右两侧“峰-峰”中上、下峰的位置, 可以辅助确定应力集中区域.

#### 4.3 跨中挠度与对应位置梯度值对应关系研究

为了解磁信号与挠度之间的关系, 作跨中挠度对应位置处磁信号梯度绝对值的变化曲线, 如图 10 所示.

从图 10 中可以看出, 在弹性阶段, 磁信号梯

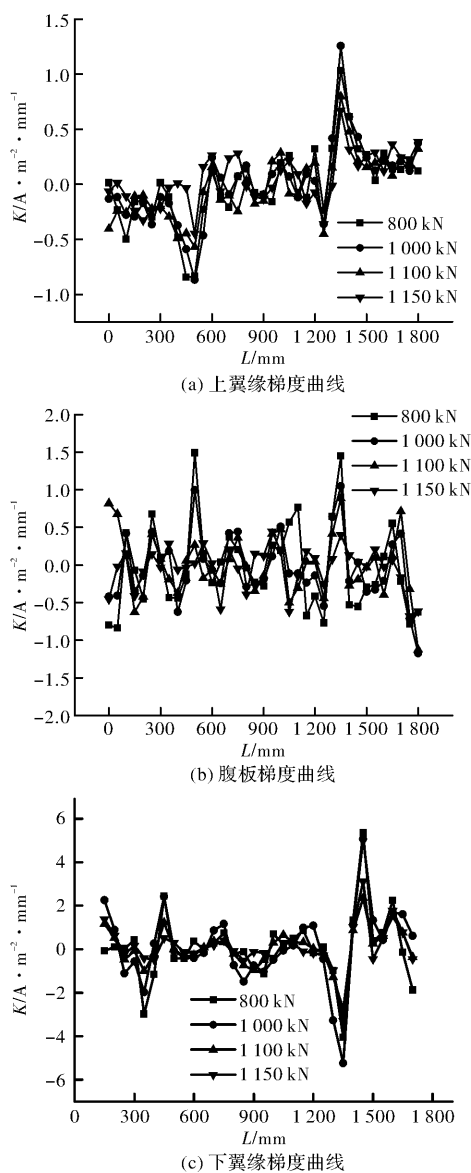


图9 塑性阶段磁信号梯度曲线

Fig. 9 The plastic stage gradient magnetic signal curves

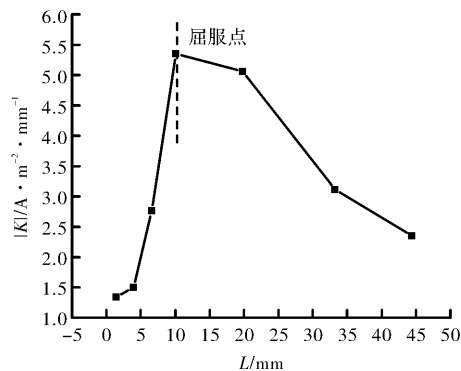


图10 钢箱梁挠度变化与磁信号梯度绝对值关系曲线

Fig. 10 The relationship between absolute value of gradient and the deflection of steel box girder

度值的绝对值变化较小, 主要因为初始磁信号受环境及其他因素的影响, 加上开始加载时应力能还不足以引起磁畴转动和磁畴壁的移动, 磁信号的变化并不明显. 同时, 此阶段的荷载较小, 造

成钢箱梁挠度的变化也较小. 而在弹性阶段的中后期, 在应力的作用下磁畴壁会定向转动, 应力所产生的等效场不断增大, 在该过程中磁信号变化剧烈, 而钢箱梁的跨中挠度变化并不大. 在弹性阶段结束后, 磁信号梯度值绝对值和挠度的变化曲线开始下降, 利用该转折点可以找到发生屈服时的钢箱梁的挠度. 进入塑性阶段后, 钢箱梁的挠度增大, 磁信号的变化速率不断减慢.

## 5 结论

(1)在波纹腹板钢箱梁四点受弯试验中, 钢箱梁翼缘和腹板的应力集中位置磁信号变化没有出现“过零点”的现象, 腹板和下翼缘出现“波谷”, 上翼缘出现“拐点”, 磁信号梯度值在腹板和下翼缘出现“过零点”.

(2)弹性阶段和塑性阶段磁信号及其梯度值的变化规律相似, 利用腹板和下翼缘磁信号“波谷”高度值和梯度值的“峰-峰值”高度可以较好的表征应力集中程度.

(3)利用磁信号梯度绝对值曲线的转折点位置可以对钢箱梁屈服时跨中最大挠度进行初判.

## 参考文献 References

- [1] 黄炳生, 蒋萌, 庄晖. 波纹腹板钢梁研究与应用进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2010, 32(5): 100-105.  
HUANG Bingsheng, JIANG Meng, ZHUANG Hui. Research and application of steel corrugated web beam [J]. Journal of Nanjing of Technology (Natural Science Edition), 2010, 32(5): 100-105.
- [2] 裴强, 郭迅, 张敏政. 桥梁健康监测及诊断研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 61-67.  
PEI Qiang, GUO Xun, ZHANG Minzheng. A review of health monitoring and damage detection of bridge structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(2): 61-67.
- [3] 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, 32-36.  
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.

- [4] 任吉林, 林俊明, 池永滨, 等. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.  
REN Jilin, LIN Junming, CHI Yongbin, et al. Metal magnetic memory testing technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [5] 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, 476.  
SU Sanqing, ZENG Farong, WANG Wei, et al. Research on the bending stress characterization technique of steel beam based on metal magnetic memory[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(4):463-468, 476.
- [6] DOUBOV A A. A study of mental properties using the method of magnetic memory[J]. Mental Science and Heat Treatment, 1997, 39(9/10):401-402.
- [7] DOUBOV A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory effect [J]. Welding in the world, 1998, 41:196-198.
- [8] 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. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(3):341-346.
- [9] 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 testing method in remanufacturing quality control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [10] 张路根, 兰清生, 张琦, 等. 基于磁记忆检测方法的45钢应力集中评价[J]. 无损检测, 2018, 40(2):38-41.  
ZHANG Lugen, LAN Qingsheng, ZHANG Qi, et al. Stress concentration evaluation of 45 steel based on magnetic memory detection method[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(2): 38-41.
- [11] 王威, 樊浩, 苏三庆, 等. 钢结构对接焊缝隐性损伤的磁记忆检测试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4):497-501.  
WANG Wei, FAN Hao, SU Sanqing, et al. Experimental detection on implicit damage of butt weld of steel structure by magnetic memory testing[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(4):497-501.
- [12] 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. The steel structure[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [13] 苏三庆, 高波, 王威, 等. 建筑钢板件力磁效应的ANSYS有限元模拟研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(6):771-775, 782.  
SU Sanqing, GAO Bo, WANG Wei, et al. Research on ANSYS finite element simulation of stress-magnetization effect on tensile steel plate[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(6):771-775, 782.
- [14] YAO K, WANG Z D, DENG B, et al. Experimental research on metal magnetic memory method[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(3):305-314.
- [15] 苏三庆, 孙灏江, 王威, 等. 弯曲荷载作用下焊接钢板件金属磁记忆效应试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(6):771-776.  
SU Sanqing, SUN Haojiang, WANG Wei, et al. Experimental research on metal magnetic memory effect of butt welded steel plate under bending load[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(6): 771-776.

(编辑 桂智刚)