

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407633

单 U 肋正交异性钢桥面板力磁关系研究*

苏三庆¹ 梁嘉欣¹ 王 威¹ 廖文恺¹ 左付亮² 李俊廷¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安 710055; 2. 内蒙古科技大学土木工程学院 包头 014000)

摘 要:金属磁记忆检测技术是一种新型的无损检测技术,能够识别铁磁材料的早期损伤。为推进该技术在桥梁钢领域损伤检测方面的应用,针对钢箱梁内部单 U 肋正交异性钢桥面板,进行了静力受弯试验,采集了 U 肋腹板在不同荷载等级下的磁信号数据,并结合 ANSYS 有限元软件获取其应力,建立了 U 肋腹板沿高度方向的力磁曲线及其应力集中区应力与磁信号、磁信号梯度的关系曲线,分析了力特征参数与磁特征参数之间的关系。研究结果发现:沿检测线方向,各检测线的法向、切向磁信号值均随荷载增大呈减小趋势,且在同一荷载等级下法向磁信号曲线较切向磁信号波动小,分布更平缓;U 肋腹板的法向磁信号沿高度方向的变化曲线存在“波峰-波谷”现象,与其应力分布具有良好的对应关系,可通过该现象判断应力集中区域;将应力集中区域磁梯度 K 曲线的“陡升”现象作为实际工程中构件即将达到屈服强度的危险预警信号;力磁相关特征参量 $\mu_{\sigma}-\lambda_k$ 曲线具有良好的线性关系,根据该曲线可初步判断构件应力集中区的应力集中程度。

关键词: U 肋;金属磁记忆检测;应力集中;磁信号;有限元法

中图分类号: TN98; TG115. 28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430. 25

Study on the stress-magnetization relationship of single
U-rib orthotropic steel brige decks

Su Sanqing¹ Liang Jiaxin¹ Wang Wei¹ Liao Wenkai¹ Zuo Fuliang² Li Juntaing¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, China)

Abstract: Metal-magnetic memory detection technology is a new type of non-destructive testing technology, which can identify the early damage of ferromagnetic materials. In order to promote the application of this technology in the field of bridge steel damage detection, the static bending test was carried out for the single U-rib orthotropic steel bridge deck inside the steel box girder, the magnetic signal data of the U-rib web under different load levels were collected, and the stress was obtained by combining with ANSYS finite element software, and the force-magnetic curve of the U-rib web along the height direction and the relationship curve between the stress in the stress concentration area and the magnetic signal and magnetic signal gradient were established, and the relationship between the force characteristic parameters and the magnetic characteristic parameters was analyzed. The results show that along the direction of the detection line, the normal and tangential magnetic signal values of each detection line decrease with the increase of load, and the normal magnetic signal curve fluctuates less than that of the tangential magnetic signal under the same load level, and the distribution is more gentle. The normal magnetic signal of the U-rib web has a “peak-trough” phenomenon along the height direction, which has a good correspondence with the stress distribution, and the stress concentration area can be judged by this phenomenon. The “steep rise” phenomenon of the magnetic gradient K curve in the stress concentration area can be taken as the danger warning signal of the yield strength in the actual engineering component. The $\mu_{\sigma}-\lambda_k$ curve of the force-magnetic correlation characteristic parameter has a good linear fit, and the stress concentration degree of the stress concentration area can be preliminarily judged according to the curve.

Keywords: U-rib; magnetic memory detection of metals; stress concentration; magnetic signal; finite element method

收稿日期: 2024-06-28 Received Date: 2024-06-28

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(52378314, 52278214)、陕西省自然科学基金基础研究重点项目(2022JZ-21)、西部装配式建筑产业化协同创新中心科研计划项目(N202203)、秦创原创新驱动科研项目(YJZX20210008)资助

0 引 言

正交异性钢桥面板由纵肋、横肋和面板焊接成整体而成,因其结构自重轻、受力性能好等优点被广泛应用于大跨度桥梁结构中^[1]。随着已建桥梁使用年限增长,正交异性钢桥面板的各种隐性病害(局部应力集中、微观缺陷等)相继出现。然而,与显性损伤不同,早期的隐性损伤在结构外部没有表现出来或者难以直接被观察到。当早期损伤不断累积扩展到很大程度上时,构件的强度、刚度和稳定性大幅降低,甚至微小的外部作用可能会导致结构发生突然性的脆性破坏^[2]。因此,如何尽早发现其早期损伤,特别是及时找到临界屈服应力状态,成为评估钢结构可靠度和有效避免工程损失的必要解决问题。传统的无损检测方法(如:超声导波^[3]、X 射线^[4]、磁粉、涡流^[5]、渗透等)对已发展成形的宏观缺陷有较好的检测效果,能很好地对其可能出现的损伤进行判断,但是上述方法尚不能在早期微观损伤检测中有较好的应用^[6]。

1997 年俄罗斯学者 Doubov 在第 50 届国际焊接学术会议上提出了一种新型的无损检测技术,即金属磁记忆检测技术。其基本原理是铁磁性材料在外加磁场和应力的作用下,其应力变形集中区的磁畴会重新取向,导致构件表面形成漏磁场,即使卸除外力,该漏磁场也会继续存在^[7-8]。相对于传统的无损检测方法,该技术不需要提前对被测构件进行清理,更重要的是,它借助天然的地磁场作用,可以对铁磁构件的早期微观缺陷和应力集中进行诊断^[9-10]。

自金属磁记忆检测技术提出以来,众多学者已进行了大量相关研究。Kashefi 等^[11]研究了不同拉应力下 3 种不同槽深下磁信号的变化规律。Bao 等^[12]通过 Q235 钢板的单轴拉伸试验,研究了加载速度对不同拉应力下铁磁性钢应力诱导磁行为的影响。苏三庆等^[13]提取了静力受弯试验下桥钢箱梁的磁信号,提出用磁信号梯度来表征损伤状态。Wang 等^[14]研究了在钢板整个拉伸试验过程中的加载和卸载测量过程中,轴向应力对磁信号法向分量和切向分量的影响。Huang 等^[15]对 Q235 结构钢在不同外加磁场下进行了静态拉伸试验,研究了磁信号 $H_p(y)$ 、斜率系数 K_s 和最大梯度 K_{max} 相对于外磁场和拉伸应力的变化。Zuo 等^[16]研究发现通过比较钢箱梁表面屈曲部分加载后和初始的磁信号和磁梯度曲线可准确确定其应力集中位置。综上可知,目前金属磁记忆检测技术在桥梁钢领域的研究与应用仍在探索阶段,已有的研究主要集中在钢板件的拉伸,但钢箱梁中的主要构件往往承受弯剪应力的作用。另外,当前针对钢箱梁的损伤评判准则是否可应用于其内部构件也尚未可知。故在

受弯作用下,研究正交异性钢桥面板的磁信号对其早期预警有很大的意义。

对单 U 肋正交异性钢桥面板进行三点受弯试验,结合 ANSYS 有限元软件建立模型,研究加载过程中 U 肋腹板的力磁关系,为金属磁记忆检测技术在桥梁钢领域中的应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验钢材选用 Q345qD 钢,该钢材具有较高的强度和良好的低温冲击韧性,被广泛应用于桥梁建设中。顶板钢板厚度为 12 mm,U 肋钢板厚度为 8 mm,其化学成分及力学性能分别如表 1 和 2 所示。

表 1 Q345qD 钢材化学成分表

Table 1 Q345qD steel chemical composition table (%)						
钢板厚度	C	Si	Mn	P	S	Al
8mm	0.092	0.38	1.47	0.013	0.030	0.002 5
12mm	0.110	0.22	1.44	0.014	0.001 9	0.002 9

表 2 Q345qD 钢材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Q345qD steel				
牌号	钢板厚度/	屈服强度/	伸长率/	抗拉强度/
	mm	MPa	%	MPa
Q345qD	8	491	34. 5	569
	12	407	34. 7	516

试验所用试件为从实际应用的钢桥面板中截取的部分试件,其平面尺寸如图 1 所示。该试验加载设备采用 ZB10/320-4/800 B 型油泵液压系统,对单 U 肋正交异性钢桥面板中部 310 mm×400 mm 施加竖向静力荷载。为便于加载,将试件顶板与两边钢结构支座通过螺栓连接固定,螺栓孔直径为 40 mm。试件呈南北方向放置。试验加载方式如图 2 所示。U 肋和顶板通过角焊缝焊接,肋角半径为 40 mm。在顶板下表面、U 肋腹板和底部布置检测通道,检测线之间的距离设置为 10 mm,检测方向为由东向西,U 肋右腹板检测线具体布置情况如图 3 所示,U 肋左腹板检测线布置情况与右腹板一致。试件表面的磁信号检测设备采用 TSC-9M-12 应力集中磁检测仪,扫描装置选用双分量 2 M 型扫描装置,如图 4 所示。为获得荷载-位移曲线方便后续验证有限元模型的可靠性,在 U 肋底部中心位置布置位移计用以获取每级荷载下试件 U 肋底部的竖向位移。

在试验加载之前制作标准板件进行材性试验得到精确的本构模型(应力-应变(σ - ε)曲线)。设置竖向加载等级为 0、15、30、45、60、75、90、105、120、135、155、175、

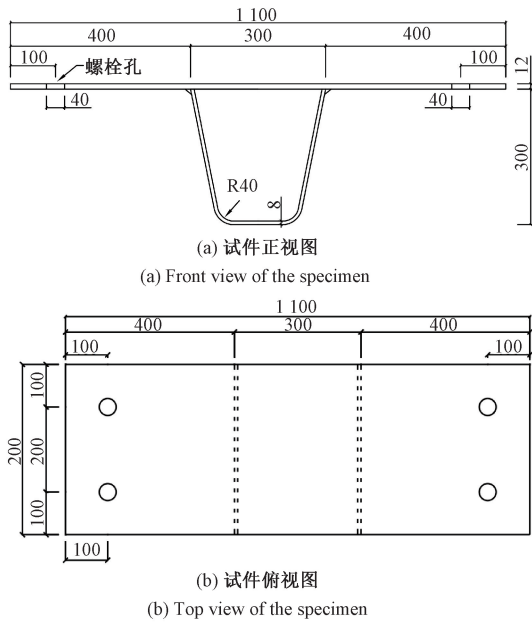


图 1 试件平面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of the specimen plane (unit: mm)

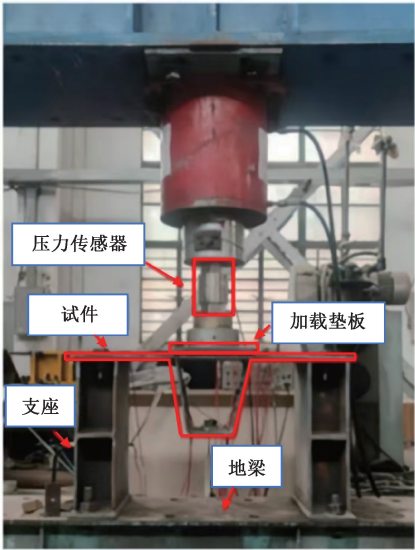


图 2 试件加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimen loading

185 和 210 kN。在 0 kN 时采集初始磁信号值,每加载一级后停机保载沿检测线重复采集 3 组磁信号值,取其平均值。测量前对磁信号检测仪器进行归一化处理,将仪器的探头与大地磁场做校准,避免环境磁场的干扰。测量时将传感器垂直并紧贴试件表面,保证测量过程中提离值不变,以消除提离值变动对磁信号造成的影响。

1.2 试验结果及分析

当试件加载完成后,最终形态如图 5 所示。可以发

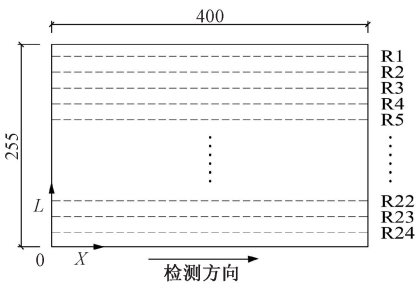


图 3 U 肋右腹板检测线布置及命名(单位:mm)

Fig. 3 Layout and naming of the detection line of the right web plate of the U rib(unit: mm)



图 4 应力集中磁检测仪及扫描装置

Fig. 4 Stress concentration magnetic detector and scanning device

现整个试件发生明显变形,顶板弯曲严重,与 U 肋焊接处夹角变大,而 U 肋中间的顶板变形相对较小,U 肋整体没有明显变化。试件加载过程中获取其荷载-位移曲线如图 6 所示,可知其屈服荷载为 120 kN。



图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure mode of the specimen

1) U 肋腹板初始磁信号分析

在实验完成后对加载全过程中 U 肋腹板的磁信号进行分析,发现各检测线磁信号随荷载的变化规律相似,故本节选取 U 肋右腹板 R1 检测线进行磁信号分析。其切向磁信号 $H_p(x)$ 和法向磁信号 $H_p(y)$ 分布曲线如图 7 所示。其中,横坐标 X 如图 3 所示,为沿检测方向检测到检测起点(钢板边缘)的距离。由于试件边缘处容易出现检测误差,因此舍弃边缘处数据,仅列出 $X = 50 \text{ mm} \sim$

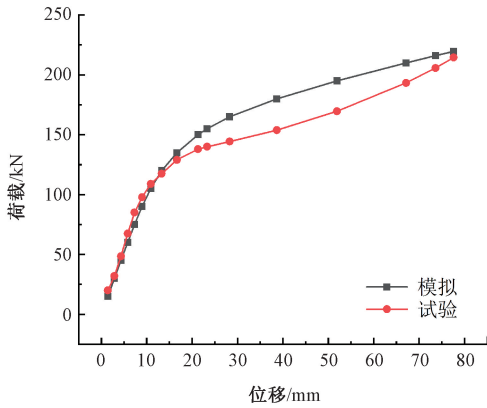
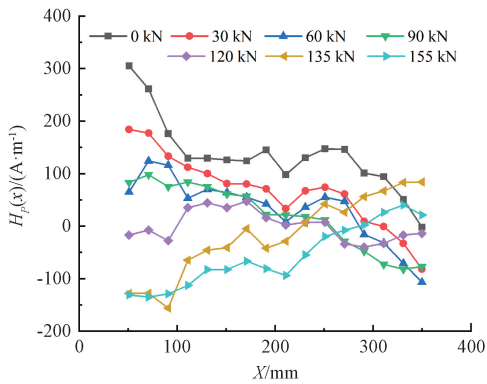


图6 荷载-位移(S - F)曲线

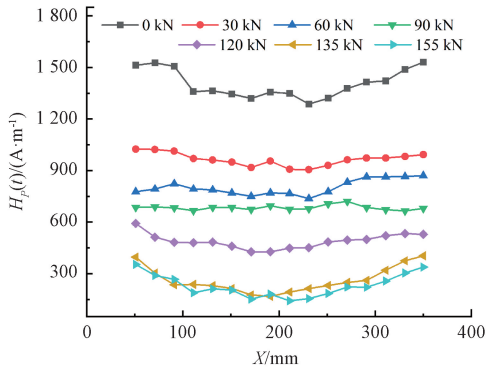
Fig. 6 Load-displacement curve

350 mm 范围内的磁信号。



(a) 切向磁信号曲线

(a) Tangential magnetic signal curves



(b) 法向磁信号曲线

(b) Normal magnetic signal curve

图7 R1 磁信号曲线

Fig. 7 R1 magnetic signal curve

由图7可知,切向磁信号值和法向磁信号值整体来说均是随着荷载增大慢慢减小。在同一荷载下检测线的 $H_p(x)$ 曲线随 X 增大呈下降或上升趋势,且波动较大,而 $H_p(y)$ 曲线分布比较平缓,数值相差不多。

不同荷载下该检测线的 $H_p(x)$ 曲线在弹性阶段和弹

塑性阶段趋势不同,随着外加荷载的增大,磁信号曲线产生了逆时针旋转。观察该检测线的 $H_p(y)$ 曲线,以0 kN时法向磁信号曲线作为参照线,各级荷载作用下法向磁信号的数值幅度相差较大,但分布规律几乎与零载时相同,所以外荷载只改变了法向磁信号的大小而没有改变其分布规律。因此相较于切向磁信号,法向磁信号分布情况整体更统一,故选取试件检测线的法向磁信号数据进行下一步研究。

2) 分析与讨论

Jiles 和 Sablik 基于有效场理论建立了一种与应力相关的磁力学模型——Jiles-Atherton 模型(即 J-A 模型)。根据 J-A 模型得,铁磁构件在外加应力和磁场作用下的有效场 H_{eff} 如式(1)所示^[17]。

$$H_{\text{eff}} = H + \alpha M + H_{\sigma} \quad (1)$$

式中: H 为外加磁场; α 为磁畴耦合系数; M 为磁化强度; H_{σ} 为附加应力场。

附加应力场 H_{σ} 可表示如式(2)所示。

$$H_{\sigma} = \frac{3\sigma}{2\mu_0} \frac{d\lambda}{dM} (\cos^2\theta - \nu \sin^2\theta) \quad (2)$$

式中: λ 为磁致伸缩系数; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$ 为真空磁导率; M 为磁化强度; θ 为应力与磁场强度之间的夹角; ν 为泊松比。

磁致伸缩系数 λ 为磁化强度 M 和应力 σ 的函数,用泰勒级数展开,且略去高阶项,则表示如式(3)所示^[18]。

$$\lambda = [\gamma_1(0) + \gamma'_1(0)\sigma]M^2 + [\gamma_2(0) + \gamma'_2(0)\sigma]M^4 \quad (3)$$

式中: $\gamma_1(0) = 7 \times 10^{-18} (\text{m}^2 \cdot \text{A}^{-2})$, $\gamma'_1(0) = -1 \times 10^{-25} (\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{A}^{-2})$, $\gamma_2(0) = -3.3 \times 10^{-30} (\text{m}^2 \cdot \text{A}^{-4})$, $\gamma'_2(0) = 2.1 \times 10^{-38} (\text{m}^4 \cdot \text{Pa} \cdot \text{A}^{-4})$ 。

将式(2)和(3)代入式(1)得地磁场作用下有效场 H_{eff} 的计算公式,如式(4)所示。

$$H_{\text{eff}} = H + \alpha M + \frac{3\sigma}{\mu_0} \{ [\gamma_1(0) + \gamma'_1(0)\sigma]M + 2[\gamma_2(0) + \gamma'_2(0)\sigma]M^3 \} (\cos^2\theta - \nu \sin^2\theta) \quad (4)$$

试验在试验室内进行,外加磁场为地磁场,取 $H = 40 (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$,磁化率 $\chi_h = 210$, $\alpha = 0.001$,则磁化强度 $M = \chi_h H = 8400 (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ 。另外,在外力加载作用下磁场的变化主要沿应力方向,取 $\theta = 0$ 。

由式(4)可知,当应力大于42.6 MPa时, $H_{\text{eff}} - \sigma$ 曲线呈下降趋势,这与图7中磁信号随荷载增大而减小一致。

2 单U肋正交异性钢桥面板的应力分布的有限元计算

根据金属磁记忆检测技术的原理可知,磁信号与应力直接相关。为获得试件在整个加载过程中各级荷载下

的应力以便建立试件的力-磁关系来表征其损伤情况,本节采用 ANSYS 有限元软件建立模型。

为了和试验保持一致,有限元分析中所建模型的截面尺寸、约束条件和材料参数均采用试验数据。在 ANSYS 参数化设计语言中建立模型,如图 8 所示。本构关系采用多线性等向强化 MISO 模型,该模型可用于比例加载和金属塑性的大应变情况,如图 9 所示,其应力应变为通过材性试验得到的工程应力-应变经式(5)转换得到的材料真实应力-应变。

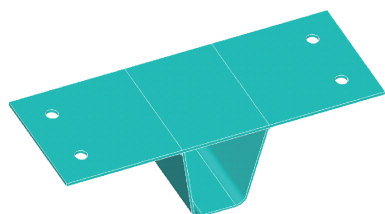


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

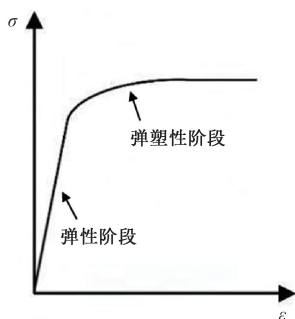


图 9 本构模型

Fig. 9 Constitutive model

单元选用 SOLID185 八节点六面体单元,网格划分选用四面体自由划分,划分网格大小为 4 mm。在螺栓孔部位设置固定约束,并在距离顶板端部 179 mm 范围内设置 U_z 方向位移约束,以模拟两侧支座对该区域的竖向约束。模型加载工况利用荷载步采用分级加载的方式,与实际加载方式对应。

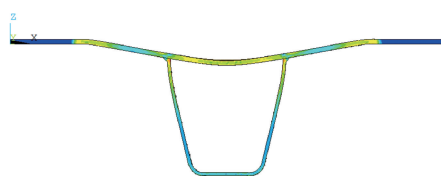
$$\sigma_m = \frac{Fl}{A_0 l_0} = \sigma_n (1 + \varepsilon_n) \quad (5)$$

$$\varepsilon_m = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(1 + \varepsilon_n)$$

其中, σ_m 、 ε_m 分别为构件截面处材料所发生的真实应力、应变; σ_n 、 ε_n 为进行材性单轴拉伸破坏试验所得的应力、应变; A_0 、 l_0 为进行材伸前的初始截面面积和初始长度; l 为构件拉伸过程中的当前长度值。

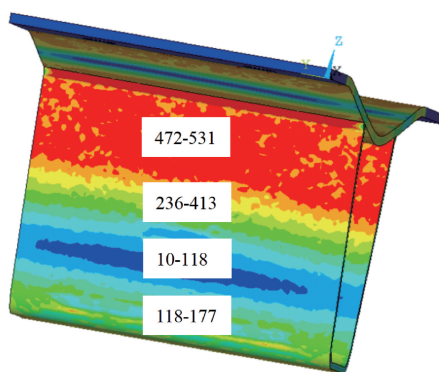
对模型进行静力求解计算,提取其荷载-位移曲线,如图 6 所示,与试验对比趋势一致,说明该模型的可靠性

较高。另外,各位移下的模拟荷载比试验荷载略高,这是因为试件受制作工艺的影响造成承载力下降。获取试件的 Von-Mises 应力计算结果,钢桥面板极限状态的应力云图如图 10 所示。从模拟结果图 10(a)可以看出,有限元模拟破坏形态与试件的试验最终形态较吻合,这也从另一方面证明了该有限元模拟的可靠性,可以在有限元的基础上进行 U 肋的力-磁关系分析。观察图 10(b)发现, U 肋腹板的应力沿高度方向自上而下呈减小趋势,应力最大区域主要分布在 U 肋腹板与顶板焊接处。



(a) 顶板应力云图

(a) Roof stress contour diagram



(b) U肋腹板应力云图(单位: MPa)

(b) U-rib web stress contour (unit: MPa)

图 10 单 U 肋钢桥面板应力云图

Fig. 10 Stress contour of single-U ribbed steel bridge deck

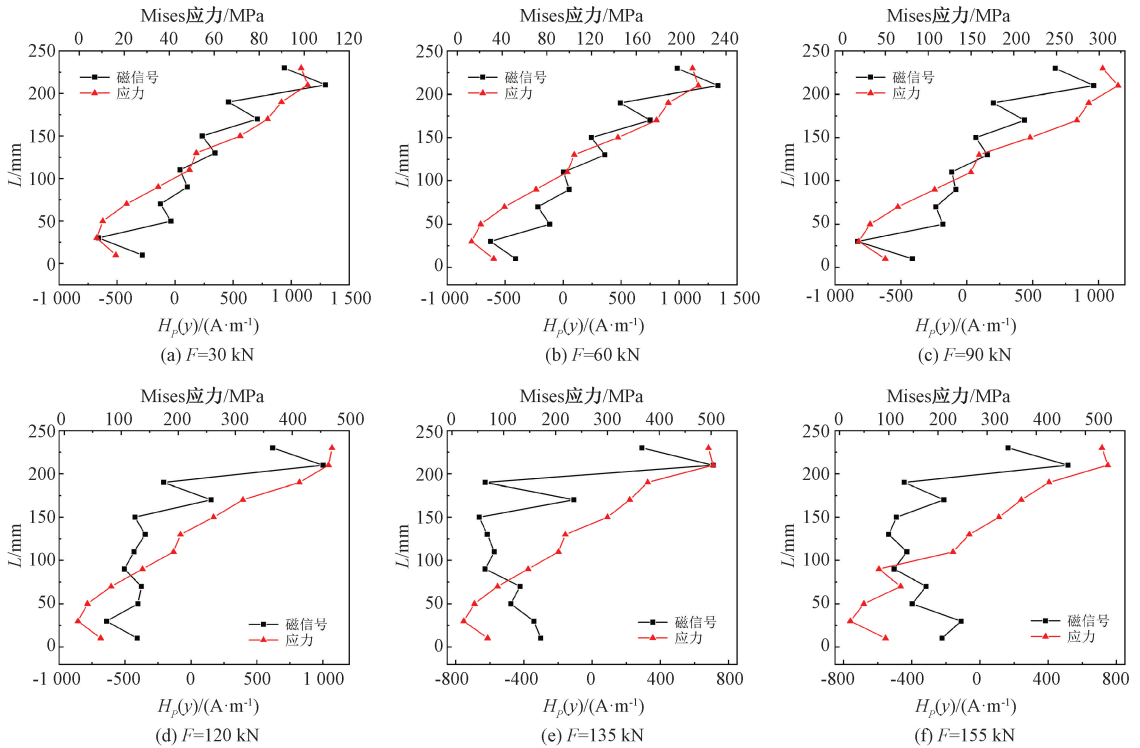
3 力磁关系对比研究

由图 10(b)可以看出, U 肋腹板的应力沿检测线方向数值相差不大,与图 7(b)中法向磁信号随 X 增加的变化趋势一致,而其值沿着高度方向自上而下减小。因此,选择 U 肋腹板沿高度方向的应力和磁信号进行对比分析。

3.1 U 肋腹板沿高度方向的力磁对比

结合 U 肋结构受力的对称性,提取 U 肋右腹板中部沿高度方向的法向磁信号和各级荷载下的 Von-Mises 应力进行力-磁关系对比分析,如图 11 所示。纵坐标 L 如图 3 所示,为 U 肋右腹板检测点到 U 肋右腹板最低检测线 R24 的垂直距离。

观察图 11(a)可以发现:在 $L=0 \sim 50$ mm 之间,由于受地梁的影响,磁信号值出现波动;在 $L=50 \sim 150$ mm 范围内,应力沿高度上升而缓慢变大,各级荷载下对应的磁

图 11 U 肋腹板 $X=200$ mm 处沿高度的力-磁曲线Fig. 11 Force-magnetic curves along the height of the U-rib web $X=200$ mm

信号值在该区域波动较小。在 $L=150\sim 230$ mm 范围内,磁信号曲线出现明显的波峰-波谷现象,且磁信号曲线在应力最大处达到曲线峰值。此外,当磁信号曲线的波动幅度较大时,对应位置的应力往往也较大。观察图 11 中的其余图均有类似的规律。由此可见,同一荷载下,U 肋腹板的应力分布情况和磁信号值的变化趋势有着良好的对应关系,应力和磁信号值均随高度上升呈变大趋势。在应力较大的区域,磁信号曲线随应力变化的波动幅度较大,在应力较小的区域,磁信号曲线随应力变化的波动较小。

因此,磁信号曲线可以用来反映应力集中位置,U 肋腹板沿高度方向的应力集中可以通过磁信号曲线的波峰-波谷现象初步判别,曲线的峰值点往往对应应力最大处。这可能是因为:外部荷载作用下,试件内部会产生具有高应力能的应力集中区,为了抵消该区域的应力能,其磁畴组织重新取向排列并产生了定向移动,形成了磁极并在试件表面形成漏磁场。当出现应力集中现象时,该现象将导致磁畴更大幅度的定向移动,加大了对应位置的漏磁场变化,因此应力集中部位附近的法向磁信号曲线会出现波动^[19]。

3.2 应力集中区应力与磁信号关系

1) 应力集中区应力与初始磁信号关系

由上一节内容可知,通过 $H_p(y)$ 曲线可初步判断应

力集中区域所处位置,但无法对应力集中区域的点在整个加载过程中的受力状态进行表征,进而对 $H_p(y)$ 曲线做进一步的处理。

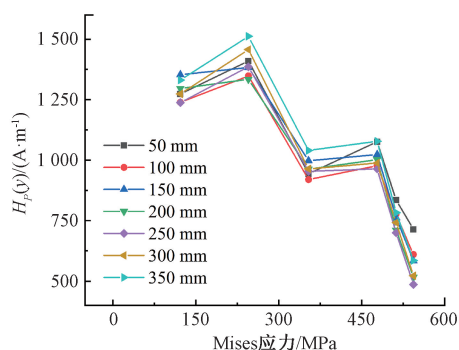
观察图 11 发现 $L=210$ mm(即检测线 R3)处应力最大,提取 U 肋右腹板 L 为 210 mm、不同 X 值的检测点在各级荷载下的法向磁信号值以及各级荷载下检测线 R3 的应力平均值,建立磁信号随应力变化的关系曲线,如图 12 所示。可以发现:磁信号曲线随着荷载增大整体呈现为“M”型,可以明显观察到,磁信号在屈服荷载后发生陡降,根据该现象可判断出该点已进入塑性阶段。但对于实际工程的安全问题,结构进入塑性阶段时产生的较大变形,很有可能造成局部破坏,仅依靠初始法向磁信号不满足及时发现危险区域以便实施修护的要求。

2) 应力集中区应力与磁场梯度关系

为了更好地表征变形阶段,引入磁信号梯度 K ,其表达式如式(6)所示。

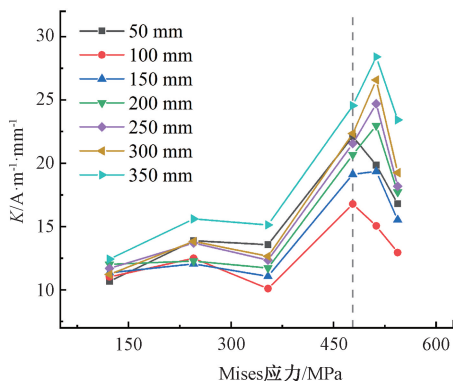
$$K_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{H_p(y)_{i+1,j} - H_p(y)_{i,j}}{H_{i+1} - H_i} + \frac{H_p(y)_{i,j} - H_p(y)_{i-1,j}}{H_i - H_{i-1}} \right) \quad (6)$$

式中: $K_{i,j}$ 为第 i 个检测点在第 j 级荷载下的梯度值; $H_p(y)_{i,j}$ 为第 i 个检测点在第 j 级荷载下的法向磁信号; H_i 为第 i 个检测的高度坐标。

图 12 应力集中区 $H_p(y)$ 随应力的变化曲线Fig. 12 Variation curve of $H_p(y)$ in the stress concentration area with load

计算得到图 13 中 7 个应力集中位置的磁特征参数 K 随应力的变化曲线。屈服荷载前,在加载初期, K 值随着应力变大先增加后减小,但变化值不大,呈平缓状态。这是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^[20];随着荷载增加,临近屈服荷载时, K 值陡增,呈急速上升状态。此处的曲线突变可能是因为随着荷载增加,应力的作用足以使磁畴壁产生定向转动,其所产生的等效场不断增大,在该过程中磁信号变化剧烈,导致屈服荷载附近的 K 曲线产生明显的突变。屈服荷载后, K 曲线下降或先上升再下降。

可通过观察磁特征参数 K 随应力的变化曲线,初步判定试件的变形阶段。当 K 值出现陡增,表示试件该区域即将屈服进入塑性阶段。为满足工程的需求,可将 K 曲线陡增这一现象作为早期预警信号。

图 13 应力集中区 K 随应力的变化曲线Fig. 13 Variation curve of stress concentration zone K with load

3.3 应力集中程度表征

为表征应力集中区的应力集中程度,提出相对应应力集中参数 μ_σ 和磁特征参数 λ_k ,其表达式分别如式(7)和(8)所示。

$$\mu_{\sigma,i} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{\min}} \quad (7)$$

$$\lambda_{k,i} = \left| \frac{K_i}{K_{\text{avg}}} \right| \quad (8)$$

式中: σ_i 和 K_i 分别为第 i 个检测点在各级荷载下的等效应力值和磁信号梯度值; $\sigma_{\min}$ 和 K_{avg} 分别为一竖向检测线上所有点的应力最小值和磁信号梯度平均值。

选取图 12 中应力集中区的 7 个点,拟合其 μ_σ - λ_k 曲线,如图 14 所示。由此可知,随着相对应应力集中参数 μ_σ 的增加,磁特征参数 λ_k 也越来越大,二者满足线性关系,且拟合曲线拟合度 $R^2=0.91$,说明具有较好的拟合效果。此外,还可以发现屈服荷载前,一般 $\mu_\sigma < 20$ 、 $\lambda_k < 2.0$;屈服荷载后,一般 $\mu_\sigma > 20$ 、 $\lambda_k > 2.0$,可根据此现象初步判断试件该区域是否进入屈服阶段。

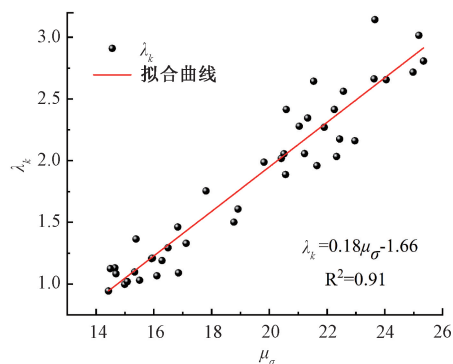


图 14 应力-磁信号的量化曲线

Fig. 14 Quantification curve of the stress-magnetic signal

4 结 论

基于金属磁记忆检测技术,对单 U 肋正交异性钢桥面板进行了三点弯曲试验,并结合有限元仿真,分析了加载过程中 U 肋腹板的力-磁耦合关系。研究表明,通过法向磁信号曲线的波峰-波谷特征可以有效识别 U 肋腹板的应力集中区域;当磁信号梯度曲线 K 出现陡增时,表明试件该区域接近屈服状态。此外,提出的磁信号特征参量 λ_k 与应力集中参量 μ_σ 之间表现出良好的线性拟合关系,依据该关系曲线可以对 U 肋腹板应力集中区域的应力集中程度进行初步评估。研究成果对桥梁钢结构的损伤检测具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 唐亮,黄李骥,刘高,等. 正交异性钢桥面板足尺模型疲劳试验[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 112-122.
- TANG L, HUANG L J, LIU G, et al. Fatigue test of full-scale model of orthotropic steel bridge deck [J].

- China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 112-122.
- [2] 苏三庆, 刘馨为, 王威, 等. 金属磁记忆检测技术研究新进展与关键问题[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1557-1572.
- SU S Q, LIU X W, WANG W, et al. New progress and key issues of metal magnetic memory testing technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(12): 1557-1572.
- [3] 周兆明, 刘睿, 李亮亮, 等. 钢材微观组织在线无损检测研究进展与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1): 1-11.
- ZHOU ZH M, LIU R, LI L L, et al. Research progress and prospect of online nondestructive testing of steel microstructure[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 1-11.
- [4] 罗仁泽, 唐祥, 余泓, 等. 基于改进 Faster RCNN 的射线图像焊缝缺陷检测方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(22): 160-168.
- LUO R Z, TANG X, YU H, et al. Radiographic image weld defect detection method based on improved Faster RCNN[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(22): 160-168.
- [5] 邢智翔, 何存富, 刘秀成, 等. 钢板硬斑的增量涡流扫查成像方法与仪器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 184-191.
- XING ZH X, HE C F, LIU X CH, et al. Incremental eddy current scanning imaging method and instrument for hard spots on steel plates[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 184-191.
- [6] YANG L J, LIU B, CHEN L J, et al. The quantitative interpretation by measurement using the magnetic memory method (MMM) -based on density functional theory[J]. NDT and E International, 2013, 55: 15-20.
- [7] 邢海燕, 段成凯, 刘长皓, 等. 金属磁记忆检测的关键技术研究现状与展望[J]. 压力容器, 2024, 41(1): 70-82.
- XING H Y, DUAN CH K, LIU CH H, et al. Current status and prospect of key technologies for metal magnetic memory detection[J]. Pressure vessel, 2024, 41(1): 70-82.
- [8] 李博阳, 廖柯熹, 何国玺, 等. 弱磁检测技术研究进展与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 1-14.
- LI B Y, LIAO K X, HE G X, et al. Research progress and prospect of weak magnetic detection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 1-14.
- [9] 苏三庆, 杨超颖, 王威, 等. 建筑钢板件三点弯曲试验及磁记忆信号研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 136-144.
- SU S Q, YANG CH Y, WANG W, et al. Three-point bending test and magnetic memory signal study of building steel plates[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 136-144.
- [10] 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 W, YI SH CH, SU S Q, et al. Study on the correspondence between tensile stress and magnetic memory effect leakage magnetic field gradient of construction steel specimens[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 341-346.
- [11] KASHEFI M, CLAPHAM L, KRAUSE T W, et al. Stress-induced self-magnetic flux leakage at stress concentration zone[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(10). DOI:10.1109/TMAG.2021.3102822.
- [12] BAO S, GU Y B, FU M L, et al. Effect of loading speed on the stress-induced magnetic behavior of ferromagnetic steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 423:191-196.
- [13] 苏三庆, 秦彦龙, 王威, 等. 基于磁记忆检测的桥钢箱梁翼缘损伤状态力磁关系[J]. 工程科学学报, 2022, 44(5): 900-910.
- SU S Q, QIN Y L, WANG W, et al. Mechanical-magnetic relationship between flange damage state of bridge steel box girder based on magnetic memory detection[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(5): 900-910.
- [14] WANG H P, DONG L H, WANG H D, et al. Effect of tensile stress on metal magnetic memory signals during on-line measurement in ferromagnetic steel[J]. NDT&E Int. 2021, 117: 102378.
- [15] HUANG H H, YANG CH, QIAN ZH CH, et al. Magnetic memory signals variation induced by applied magnetic field and static tensile stress in ferromagnetic steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 416:213-219.
- [16] ZUO F L, SU S Q, WANG W, et al. Relationship between stress and magnetic signal of steel box girder based on magnetic memory method[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2023, 71(4): 341-361.
- [17] HUSSAIN S, LOWTHER D A. Prediction of iron losses using

- Jiles-Atherton model with interpolated parameters under the conditions of frequency and compressive stress[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 52(3): 1-4.
- [18] 苏三庆, 刘馨为, 王威, 等. 磁记忆效应的 Jiles-Atherton 理论模型全过程推导[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(1): 1-6.
- SU S Q, LIU X W, WANG W, et al. Derivation of Jiles-Atherton theoretical model of magnetic memory effect[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2024, 56(1): 1-6.
- [19] 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, 2014.
- YAO K. Experimental study on early damage detection and evaluation of ferromagnetic materials based on metal magnetic memory method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [20] 苏三庆, 路秀琪, 王威, 等. 基于金属磁记忆检测技术的波纹斜腹板钢箱梁试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(4): 463-470.
- SU S Q, LU X Q, WANG W, et al. Experimental study on corrugated diagonal web steel box girder based on metal magnetic memory detection technology[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 463-470.

作者简介



监测。

E-mail: Sussqx@xauat.edu.cn

Su Sanqing (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1981 from Xi'an Metallurgical Architecture College (now Xi'an University of Architecture and Technology), received his M. D. in 1986 Xi'an Metallurgical Architecture College (now Xi'an University of Architecture and Technology). Now he is the professor and doctoral supervisor of The School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology. His main research interests include seismic design and health monitoring.



梁嘉欣, 2022 年于河南大学获得学士学位, 现为西安建筑科技大学硕士研究生, 主要研究方向为结构抗震设计、健康监测。

E-mail: liangjiaxin@163.com

Liang Jiaxin received her B. Sc. from Henan University in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Xi'an University of Architecture and Technology. Her main research interests include structural seismic design and health monitoring.