

门式刚架工字钢柱应力集中与磁记忆效应对应关系的试验研究

苏三庆, 葛 静, 王 威, 郭 欢, 李 成, 胡敬余

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:通过对 Q235 门式刚架进行拟静力试验, 检测其中钢柱表面的法向漏磁场, 得到了不同荷载作用下磁记忆信号的法向分量, 研究了磁信号在不同受力阶段的变化特征, 建立了磁信号及其梯度值与应力集中部位的对应关系。试验结果表明: 随着荷载的增加, 磁信号法向分量先增加后减小, 转折处可以较好的判断构件是否进入屈服阶段; $H_p(y)$ 值出现极值和反转现象, 可以较好的判断应力集中部位; 用梯度值出现极值判断应力集中位置, 会出现偏差很小的延后现象, 可以用来辅助判断应力集中。

关键词:金属磁记忆检测; 应力集中; 工字钢柱; 对应关系; 无损检测; 门式刚架

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0771-04

Experimental research on the corresponding relationship between stress concentration and magnetic memory effect of steel I-column of gabled framed

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

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

Abstract: Through the pseudo static test on gabled framed of Q235 low carbon steel, the normal leakage magnetic field on the surface of the steel column is detected, the normal component of metal magnetic memory signals under different loads are obtained, the variation characteristics of metal magnetic signals at different stress stages are studied, and the corresponding relationship between metal magnetic signals and their gradient value and stress concentration position is established. The test results show that the normal component of magnetic signal increases first and then decreases with the increase of loading, which can better determine whether the components enter the yield stage. The value of $H_p(y)$ presents extreme value and reverse phenomenon, which can be used to judge the stress concentration position well; When the extreme value of gradient value is used to judge the stress concentration position, there will be a delay phenomenon with small deviation, which can be used to assist the judgment of stress concentration.

Key words: metal magnetic memory testing; stress concentration; steel I-column; corresponding relationship; non-destructive testing; gabled framed

单层门式刚架由于具有重量轻、强度高、工业化程度高、施工周期短、结构布置灵活、综合经济效益高等优点, 因此成为近些年来发展、应用比较迅速的一种建筑结构形式。但门式刚架结构及其构件的构造和受力复杂, 在服役过程中遭受循环荷载、自然灾害、人为原因等各种因素的作用, 不可避免地产生应力集中等隐性损伤, 从而威胁整个结构的安全和正常使用^[1]。磁性无损检测技术是检测铁磁材料比较广泛的一种技术, 其中金属磁记忆检测技术是一种新兴的弱磁性无损检测技术, 可以根据铁磁材料在地磁场激励下产

生的磁信号检测评估铁磁材料的应力集中, 由于应力集中状态常常和隐性损伤相关联, 进而用于宏观缺陷发现之前阶段的早期损伤诊断。该方法的原理是铁磁性材料构件在工作载荷和地磁场的激励作用下, 在应力和变形集中区域磁畴组织会发生定向和不可逆的重新取向, 从而在该部位产生漏磁场, 其法向分量过零点且具有较大梯度值, 水平分量则具有最大值。根据通检测的铁磁构件表面的漏磁场信号分布情况, 可以准确判断应力集中或缺陷^[2-5]。

金属磁记忆检测技术是 1997 年在美国旧金山

收稿日期: 2018-10-03

修改稿日期: 2019-11-11

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

举行的第 50 届国际焊接学术会议上, 由俄罗斯学者 Doubov 正式提出. 由于金属磁记忆检测技术独具的优点, 它在损伤评估及寿命预测领域应用的可能性一直受到密切关注, 基于磁记忆现象的理论与应用研究非常活跃^[2]. 文献[6]对材性板件进行了拉伸应力状态下的研究. 文献[7]对试件进行了不同拉压荷载作用下的研究. 文献[8]对焊接试件进行了三点受弯状态下的研究. 文献[9]对不同焊缝的磁记忆特征进行了研究. 然而, 磁记忆检测对建筑结构中压弯构件的应用却少有研究. 本文通过对 Q235 钢材的单层门式刚架进行拟静力加载试验, 在无侧向支撑的情况下, 门式刚架中工字形钢柱受力状态复杂, 且受焊缝等初始缺陷的影响, 易提前进入屈服甚至破坏, 通过对规定路径上的漏磁场法向分量值的采集, 可以得到不同应力状态下的检测线磁信号的变化规律, 研究了工字钢柱的磁信号法向分量和特征参量 K 随应力的变化规律, 进而建立磁信号与建筑钢结构应力集中部位的表征关系. 利用磁记忆信号表征钢结构铁磁材料的应力状态, 为金属磁记忆检测技术提供定量评估和安全预警的理论和试验依据.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为常用的 Q235 钢, 其力学性能和化学组成如表 1 所示.

表 1 Q235 低碳钢力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of Q235 low carbon steel

材料	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
Q235	2.00×10^5	0.28	260

在工厂利用线切割技术将工字钢柱尺寸加工为 1 080 mm, 截面尺寸为 300 mm × 120 mm × 10 mm × 12 mm. 考虑实际应用, 而且构件尺寸较大, 所以没有对构件进行退磁处理. 试验前将门式刚架的梁柱用螺栓拼接, 并按设计在各构件正面画好检测线和检测点, 检测线和检测点如图 1 所示.

1.2 试验设备及方法

本门式刚架的拟静力加载设备是 MTS 液压伺服试验机, 其主要的技术参数是: 最大试验力为 1 000 kN, 试验力试值相对误差 $\leq \pm 1\%$, 试验力测范围为最大试验力的 6%~100%, 如图 2 所示. 磁记忆信号检测设备是 EMS2003 磁记忆检测仪, 其主要技术参数: 测量通道数: 8 个, 最小测距: 1 mm, 检测数据存储: 100 组.

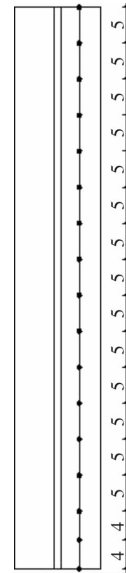


图 1 试件尺寸及检测线和检测点的位置(单位: cm)

Fig. 1 Size of specimen and the arrangement of measured lines and measured dots(Unit: cm)



图 2 MTS 液压伺服试验机

Fig. 2 MTS Hydraulic servo tester

本试验为了更好地观察不同受力阶段的磁记忆信号的变化规律, 采取分级加载的方式, 结构加载的等级为: 0 kN、60 kN、90 kN、120 kN、150 kN、180 kN、210 kN、240 kN、270 kN、300 kN、330 kN、360 kN、390 kN、420 kN、450 kN, 加载到 450 kN 时刚架位移 135 mm, 远离作动器一端钢柱开始进入屈服, 此时采取位移控制, 按一倍屈服位移 135 mm 循环加载三次, 下一级按 1.5 倍屈服位移循环加载, 但加载到 18.8 mm 时整个门式刚架失稳. 在试验过程中, 加载设备达到预先设定的加载等级后, 在保载的情况下检测磁记忆信号, 并观察结构的变化. 测量前, 将检测设备初始化, 把初始值校正到 0 A/m. 文献[2]指出探头提离值的大小会直接影响磁记忆信号的幅值, 为了使检测结构的结构更准确, 将笔式探头垂直并且紧贴试件的表面, 保证提离值恒为零. 检测时, 按照检测线从左到右的顺序, 检测点从

上到下的顺序,步距为 5 mm. 磁记忆检测技术是利用铁磁材料自身的弱磁信号,容易受到周围环境的影响而不稳定,所以每次检测都在相同的环境下进行,并且保证每个检测点至少检测 3 次,直至得到稳定的磁信号,以减小误差.

2 试验结果

工字钢柱翼缘受力较大,选取远离作动器一端柱子翼缘内侧的一条检测线研究.

2.1 翼缘部位的磁信号和应力的关系

结构加载之前,沿检测线测量工字钢柱表面的初始漏磁信号,测量结果如图 3 所示. 由图 3 可知,因为未进行去应力退火处理,且构件加工、拼装、焊接过程中产生了残余应力,钢柱内部磁畴的取向不具有一定的规律性,所以初始时构件表面的漏磁信号分布不均匀. 在 25 cm 处出现峰值,表明在此处产生较大的残余应力.

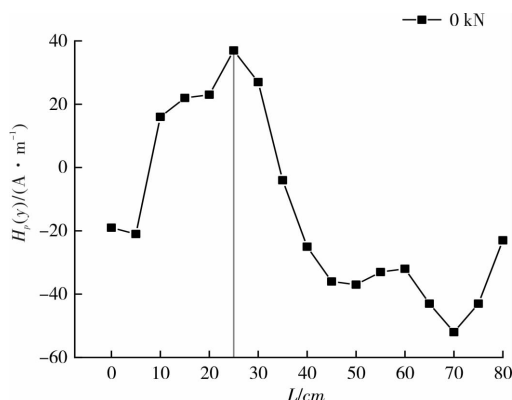


图 3 初始荷载下的 $H_p(y)$ 值(单位: $A \cdot m^{-1}$)

Fig. 3 $H_p(y)$ values under initial load(Unit: $A \cdot m^{-1}$)

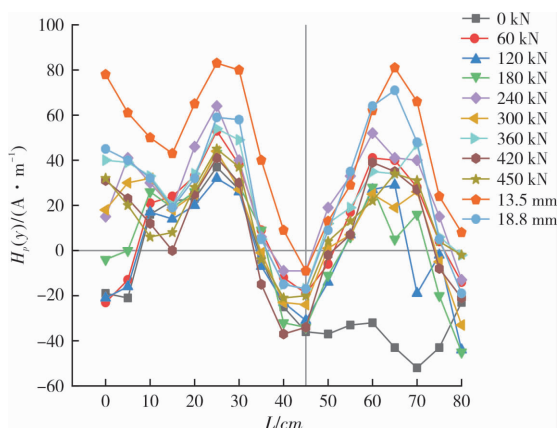


图 4 初始不同荷载下的 $H_p(y)$ 值(单位: $A \cdot m^{-1}$)

Fig. 4 $H_p(y)$ values under different loads(Unit: $A \cdot m^{-1}$)

图 4 为初始阶段、弹性阶段和塑性阶段钢柱翼缘表面法向分量的分布曲线. 弹性阶段,各曲线形状相似且数值接近,但与初始阶段相比,检测

线 0~45 cm 范围内的磁信号与初始磁信号走向基本一致,在 25 cm 处出现极值点,这表明这一部分整体受力较均匀,25 cm 位置处的初始缺陷造成应力集中;而从 45 cm 位置处开始,弹性阶段磁信号相比初始磁信号发生很大变化, $H_p(y)$ 沿检测线方向由负变为正,这是由于钢柱在此范围内受力相对较大,在应力和地磁场的共同作用下,钢柱的磁畴结构发生改变,产生了不均匀的漏磁场,磁信号发生变化.

屈服时,0~45 cm 范围内磁信号曲线与屈服前相似,在 25 cm 处极值达到最大,但 $H_p(y)$ 值增加了 1.6 倍,这是因为铁磁体在外力作用下,磁晶体内部产生了很高的应力能. 此时,根据“实际存在的状态必定是能量最小的状态”原则,为了使总的自由能最小,钢柱内部将发生磁畴组织的重新取向,磁化强度提高. 由此, $H_p(y)$ 值的 1.6 倍大幅增加可以判断构件进入屈服. 45~80 cm 范围内,曲线形状相似且值接近,却在 65 cm 位置处出现一个跟弹性阶段反向的波峰,这是由于连接钢柱翼缘与加劲肋的焊缝存在,残余应力大,提前进入屈服. 塑性阶段,0~45 cm 范围内磁信号曲线较屈服时形状相似,但值小很多,这是因为塑性变形使得钢柱内部产生位错,位错对磁畴有钉扎作用,磁畴的有序排列受到阻碍,从而磁化强度有所降低. 45~80 cm 处,曲线与屈服时一致,在 65 cm 处形成反向波峰,与试验中局部屈曲部位一致,因此,磁信号在 65 cm 处形成的反转现象可以判断钢柱的应力集中部位.

钢柱上半段较下半段出现捏拢现象,主要是因为上下两段受力不同,上半段受力均匀,因而磁畴组织排列有序均匀,所以磁信号较捏拢. 下半段较上半段离散,下半段受力不均,磁畴组织无规律的移动使得磁信号分离.

在地磁场和外力作用下,铁磁材料对外显示的是一种微弱磁性的磁信号,极易受到初始缺陷和外界干扰,但对铁磁材料自身的缺陷和损伤也更敏感,所以利用 $H_p(y)$ 值可以很准确的判断应力集中部位.

2.2 磁记忆信号梯度值和应力的关系

为了更好的对应力集中部位进行判断,对磁信号进行微分,可以有效的排除外界恒定磁场对试验结果的干扰. 本文用 $K = dH_p(y)/dx$ 表示磁信号法向分量的梯度值,得到梯度值与应力的关系曲线.

图 5 为钢柱初始阶段、弹性阶段、屈服阶段和

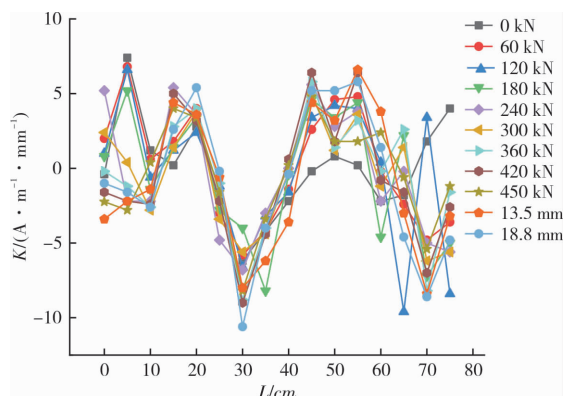


图5 不同荷载下K值的变化

Fig. 5 Variations of K values under different loads

塑性阶段的磁信号梯度曲线。从图中可以看出各阶段磁信号梯度值曲线基本一致,在30 cm和70 cm处出现峰-峰值,与试件的应力集中部位存在一定偏差,这是因为 $H_p(y)$ 在25~30 cm之间比较稳定,此区间内应力集中范围较广,梯度值的极值可能会延后。因此,磁信号法向分量梯度极值点不能准确判断应力集中部位,但是偏差不大。与实际应力集中部位比较,用磁信号法向分量 $H_p(y)$ 的极值判断更准确,对应的磁信号梯度值偏离不大,可以辅助判断应力集中部位。在无侧向支撑的情况下,门式刚架中工字形钢柱受力状态复杂,且受焊缝等初始缺陷的影响,易提前进入屈服甚至破坏,磁记忆检测技术通过提供一种简便的无损检测手段,可以很好地通过磁信号及磁信号特征参量对铁磁构件进行预警监测。

3 结论

(1) $H_p(y)$ 是一种微弱磁信号,对铁磁材料自身的应力集中和缺陷很敏感,用 $H_p(y)$ 的极值和反转现象可以准确判断应力集中部位和缺陷;而且 $H_p(y)$ 值增加1.6倍时可以很好的判断构件进入屈服。

(2)磁信号梯度值K的极值与应力集中和缺陷部位存在小偏差,可以辅助 $H_p(y)$ 对应力集中和缺陷部位进行判断。

(3)门式刚架中柱的受力状态复杂,上下两段的磁信号规律不完全相同,上段捏拢下段离散,表明钢柱上下两段受力不同,上段受力均匀,下段受力不均。

参考文献 References

[1] 陈绍番. 钢结构: 钢结构基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

CHEN Shaofan, Steel structure: Steel structure foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[2] 徐滨士, 董丽红. 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 Bingshi, DONG Lihong. Metal magnetic memory testing method in remanufacturing quality control[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2015.

[3] 任吉林, 邹冠华, 宋凯, 等. 金属磁记忆检测机理的探讨[J]. 无损检测, 2002(1): 29-31.

REN Jilin, WU Guanhua, SONG Kai, et al. Study on the mechanism of metal magnetic memory testing[J]. Nondestructive Testing, 2002(1): 29-31.

[4] 王丹, 董世运, 徐滨士, 等. 应力集中部位的金属磁记忆检测研究[J]. 失效分析与预防, 2007(2): 12-15.

WANG Dan, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Study on metal magnetic memory testing of stress concentrated part [J]. Failure Analysis and Prevention, 2007(2): 12-15.

[5] DOUBOV A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory[J]. Welding in the World, 2012, 46: 317-320.

[6] AGNIESZKA Machowska-Majchrzak. The usefulness of accelerometric registration with assessment of tremor parameters and their symmetry in differential diagnosis of parkinsonian, essential and cerebellar tremor [J]. Neurologia i Neurochirurgia Polska, 2012, 145-156.

[7] 易术春, 王威, 苏三庆, 等. 利用磁记忆信号特征参数表征拉伸应力状态[J]. 震动. 测试与诊断, 2017, 37(4): 667-672.

YI Shuchun, WANG Wei, SU Sanqing, et al. Using the characteristic parameters of magnetic memory signal to evaluate the tensile stress state[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 667-672.

[8] 冷建成, 田洪旭, 郭亚光, 等. 拉压不同应力对磁记忆信号的影响及机理[J]. 工程科学学报, 2018, 40(5): 565-570.

LENG Jiancheng, TIAN Hongxu, GUO Yaguang, et al. Effect of tensile and compressive stresses on magnetic memory signal and its mechanism [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 565-570.

[9] 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.