

磁记忆信号与应力之间的关系

冷建成^{1,2}, 徐敏强¹, 李建伟¹, 樊久铭¹

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001, lbyljc@163.com;

2. 大庆石油学院 机械科学与工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为明确磁记忆信号与工作应力和残余应力之间的对应关系, 对 Q235 低碳钢板状试件进行了静载拉伸实验. 利用 TSC-1M-4 型磁检测仪, 研究了光滑试件和人工缺陷试件表面法向磁场强度在不同工作载荷下及卸载后的变化规律. 结果表明: 磁记忆信号与工作应力之间具有较好的相关性, 利用相邻两磁信号之间的相关系数可以判断试件是否处于某种临界或极限状态; 塑性变形前后的离线磁信号并无明显区别, 但断裂后的磁信号及梯度曲线可用于准确识别断裂位置.

关键词: 磁记忆; 工作应力; 残余应力; 法向分量; 相关系数

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)02-0232-04

Relationship between magnetic memory signal and stress

LENG Jian-cheng^{1,2}, XU Min-qiang¹, LI Jian-wei¹, FAN Jiu-ming¹

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, lbyljc@163.com; 2. School of Mechanical Science and Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

Abstract: To determine the relationship between magnetic memory signal and working stress as well as residual stress, static tensile tests on plate specimens made of Q235 low carbon steel were performed. The variation regularities of normal magnetic field intensities on the surfaces of specimens with and without artificial defects under different working loads and after unloading were investigated respectively, using the magnetometer TSC-1M-4. The test results show that there is a good correlation between the magnetic memory signal and working stress, and whether the specimen is in a certain critical or limit condition can be predicted via the correlation coefficient between two adjacent magnetic signals. The magnetic memory signals before and after plastic deformation after unloading can not be distinguished, but the fractured magnetic memory signal and the corresponding gradient curve have obvious characteristics to be used to identify fracture zones.

Key words: magnetic memory; working stress; residual stress; normal component; correlation coefficient

传统的无损检测方法仅能发现已有的宏观缺陷, 金属磁记忆技术由于对构件失效和疲劳损伤具有早期诊断的潜力^[1]而引起了极大关注^[2]. 该技术利用工作载荷和地磁场共同作用下形成的位错稳定滑移带区域中出现的自有漏磁场, 借助漏磁场信号法向分量改变符号过零点、磁场梯度最

大等参数来定性评估应力集中区.

由于磁记忆检测源自工程实践, 为此, 学术界开展了各种磁记忆效应的机理性实验研究^[3-5], 尤其是静拉伸实验, 为了进一步明确磁记忆信号和应力之间的关系, 本文以 Q235 低碳钢为实验对象, 利用光滑试件和人工缺陷试件通过静载拉伸实验, 分别测量在线加载和离线卸载下的磁信号变化, 并对实验现象进行了初步分析和理论探讨.

1 试验系统

1.1 试验设备

拉伸试验选用低碳钢 Q235 为材料, 按照

收稿日期: 2009-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772061); 黑龙江省自然科学基金资助项目(A200907); 博士点青年教师基金资助项目(20092322120001).

作者简介: 冷建成(1977—), 男, 博士研究生;

徐敏强(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

GB/T 228-2002 标准利用线切割机加工成如图 1 所示的光滑和人工缺陷两类板状试件,其中,V 型缺陷长 2 mm,深 1.5 mm,均未进行去应力退火处理.实验前在各试件中央检测区等间距画好两条直线,以备检测之用.

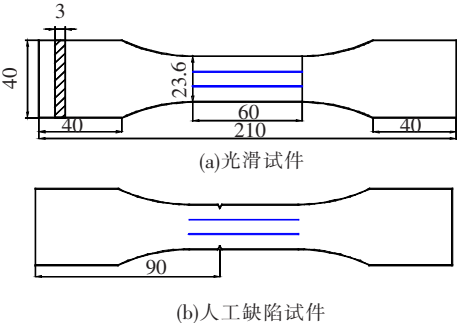


图1 试件形状及测量位置

试验在 Zwick/Roell Z050 电子万能试验机上进行,利用俄罗斯动力诊断公司生产的 TSC-1M-4 型磁检测仪和 2M 扫描装置沿着图示两条检测线方向测量,同时消除环境磁场的干扰.

1.2 试验方法

检测在室温环境下进行,试件在拉伸试验机上以 2 mm/min 的速度加载至预定载荷,利用磁检测仪在线测量试件表面的法向磁场强度,每间隔 5 mm 采集一个点,从左至右分别记为测点 1,测点 2,...,测点 13,并确保提离值固定为 2 mm;然后缓慢卸载并卸下试件,按装卡方向离线测量.依此重复,直至试件被拉断.

2 试验结果

2.1 在线加载

由载荷随位移的变化关系曲线可知,光滑试件加载到 26.6 kN 时产生屈服,加载到 32.6 kN 时出现明显的颈缩现象;人工缺陷试件加载到 20 kN 时开始屈服,加载到 28 kN 时缺口处有肉眼可见的裂纹出现.图 2(a)和图 2(b)分别给出了不同载荷作用下光滑试件、人工缺陷试件表面磁场强度的法向分量分布曲线, H_y 在前两次加载后变化较明显,随后曲线逐渐趋于一致;为了更清楚地显示各点磁信号随载荷变化的关系,每间隔一个采样点来分析其 H_y 随外载荷的变化情况,如图 3 所示.

由图 3 可以发现,静载拉伸过程中 Q235 钢在不同载荷作用下具有不同的磁信号特征,而光滑试件和人工缺陷试件具有相似的特点:

1) 未加载时试件表面各点的磁信号呈随机分布,由于未进行退火处理残余应力较大,故表现

出较强的磁场强度;但即使对人工缺陷试件,仅根据磁记忆信号特征如 H_y 过零点也不能指示出人工缺陷位置.

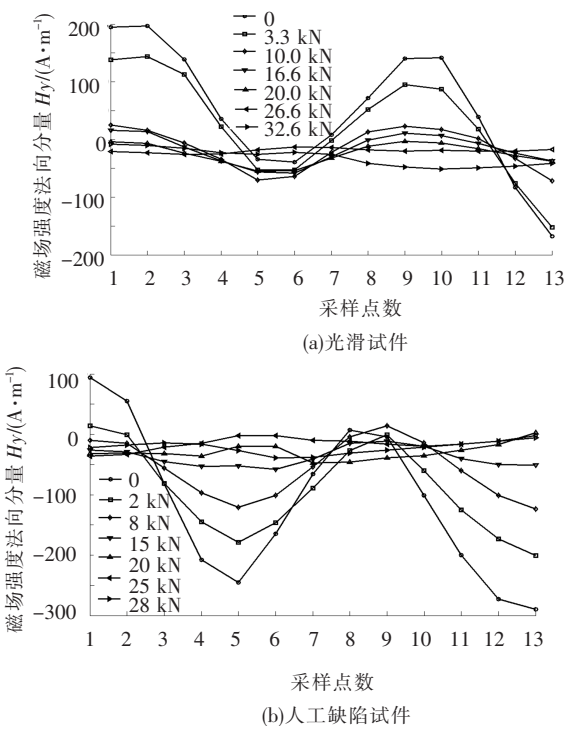


图2 不同载荷作用下的各点磁信号

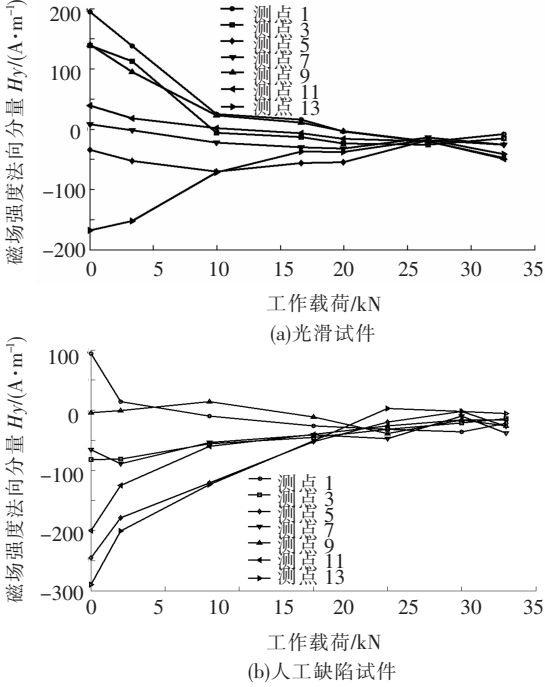


图3 各点在不同载荷下的磁信号

2) 在初始加载阶段, H_y 的绝对值随载荷的增加而迅速降低;随着载荷的增加, H_y 值逐渐趋于平坦.当试件出现明显屈服时,试件表面的磁场分布均匀化,各测点趋于同一磁场值,在零点附近波动,尤其是光滑试件更为明显.

3) 光滑试件和人工缺陷件在达到屈服时,磁

信号曲线均会发生磁场极性的不可逆翻转;从屈服到颈缩, H_y 的绝对值会稍微增加;光滑试件在发生明显屈服、人工缺陷试件在出现可见裂纹时, H_y 曲线反向波动更为明显。

2.2 离线卸载

光滑试件和人工缺陷试件断裂时对应的载荷分别为 32.6、28 kN, 各试件断口对接后测量的磁信号曲线如图 4 所示。

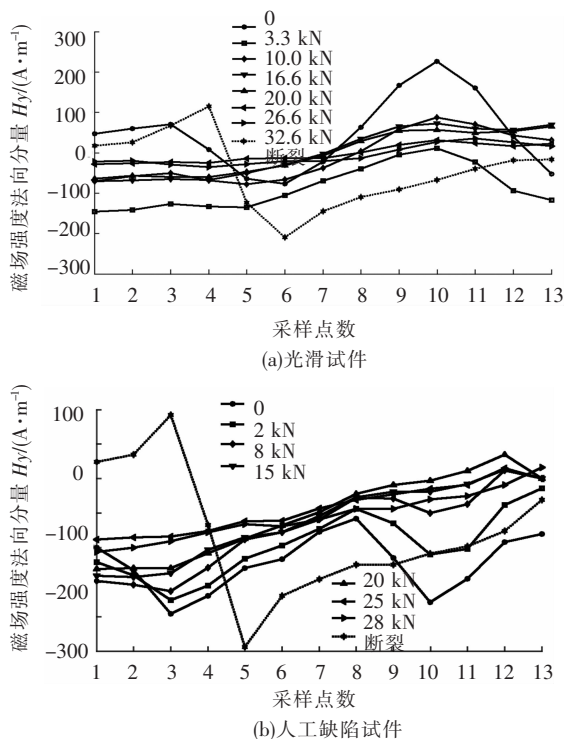


图4 离线卸载时的各点磁信号

由图4可见:1) 第一次加载和未加载之间磁信号变化最剧烈,之后随载荷的增加再卸载后的磁信号变化波动均不大;即使有明显的颈缩或裂纹出现,卸载后的磁信号并无较大变化.2) 相比于在线加载,离线卸载后的磁信号仅在断裂时才发生突变,出现以 H_y 符号变换线为特征的曲线形式,且过零点与断裂位置一致,并具有很大的梯度值.3) 当加载到屈服后,试件会产生不同程度的塑性变形.相对于弹性阶段,塑性变形卸载后的残余应力势必增加,但磁信号曲线并不能区分。

3 分析与讨论

试件离线未装卡时,由于内部及表面组织的微观不均匀性而产生不同的残余应力,所以试件表面各点的初始磁场强度不均,其大小及分布与加工历史、运输过程等有关^[6];当装卡后,由于试验机夹头由铁磁性材料制成,咬合部位形成的磁

场会对试件产生影响,发现光滑试件和人工缺陷试件两端磁信号均有不同程度的增加

当有外加载荷作用于试件上时,根据铁磁学理论^[7],晶体除了由于自发形变而引起的磁弹性能外,还存在由外应力作用而产生的磁应力能.对各向同性磁致伸缩的材料来说,其应力能为

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\theta. \quad (1)$$

式中: λ_s 为磁致伸缩系数, σ 为应力, θ 为自发磁化矢量与外应力之间的夹角。

根据能量最小原则,由式(1)可知,应力对磁化的进程可以起到促进或阻碍的作用.对于本试验中受拉的 Q235 钢来说, $\lambda_s\sigma > 0$, 所以试件中的自磁化方向取平行于应力的方向。

在弹性加载阶段,基于有效场理论和趋近饱和定律^[8],恒定磁场环境中试件的磁化强度 M 随应力 σ 的变化规律为

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{\sigma}{\varepsilon^2}(M_{an} - M_{irr}) + c \cdot \frac{d(M_{an} - M_{irr})}{d\sigma}. \quad (2)$$

式中: ε 和 c 分别为常数, M_{irr} 和 M_{an} 分别为不可逆和非滞后磁化强度。

由磁化强度 M 、可逆磁化强度 M_{rev} 、不可逆磁化强度 M_{irr} 及非滞后磁化强度 M_{an} 之间的关系为

$$M = M_{rev} + M_{irr}. \quad (3)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}). \quad (4)$$

由式(3)和式(4),得

$$M_{irr} = \frac{M - c \cdot M_{an}}{1 - c}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)中,得

$$\frac{dM}{d\sigma} = \left(\frac{1}{1-c}\right) \left[\frac{\sigma}{\varepsilon^2}(M_{an} - M) + c \cdot \frac{d(M_{an} - M)}{d\sigma} \right]. \quad (6)$$

可见,磁化强度的变化不仅与 σ 有关,而且与 $(M_{an} - M)$ 有关,即与试件的初始磁状态有关.在本试验中,由于试件均未进行退火处理,表面剩磁较强,高于 Q235 钢的非滞后磁化强度,故随载荷的增加而快速降低,直至达到无磁滞理想状态。

值得注意的是,光滑试件和人工缺陷试件表面上各点的磁信号曲线对应应力大小的敏感反映可借助于相邻两信号之间的相关系数来识别,不同载荷下的磁信号依次记为信号 1, 信号 2, ..., 信号 7, 如表 1 所示. 光滑试件在出现明显的塑性变形时,与前面加载时的磁信号相关性为负,表现为曲线反向;人工缺陷试件在刚开始屈服时即表

现为很强的负相关性,而颈缩和明显塑性变形时的磁信号之间仍为负相关。

表1 在线加载时相邻两磁信号之间的相关系数

试件	信号之间的相关系数					
	1 和 2	2 和 3	3 和 4	4 和 5	5 和 6	6 和 7
光滑试件	0.995	0.881	0.955	0.993	-0.385	-0.268
人工缺陷试件	0.973	0.961	0.944	-0.595	0.400	-0.215

由离线卸载时相邻两磁信号之间的相关系数值,如表2所示,可知无论光滑试件还是人工缺陷试件,屈服前后的磁信号相关系数均>0.9,虽然塑性变形会导致残余应力的增加,磁信号却不能

有效区别。但断裂后信号均发生突变,出现明显的负相关性,且磁信号在上、下断口一正一负极性相反,磁场最强;利用梯度曲线可以很容易识别断裂位置,如图5所示。

表2 离线卸载时相邻两磁信号之间的相关系数

试件	信号之间的相关系数						
	1 和 2	2 和 3	3 和 4	4 和 5	5 和 6	6 和 7	7 和 8
光滑试件	0.502	0.885	0.943	0.951	0.918	0.932	-0.108
人工缺陷试件	0.873	0.893	0.979	0.992	0.987	0.958	-0.308

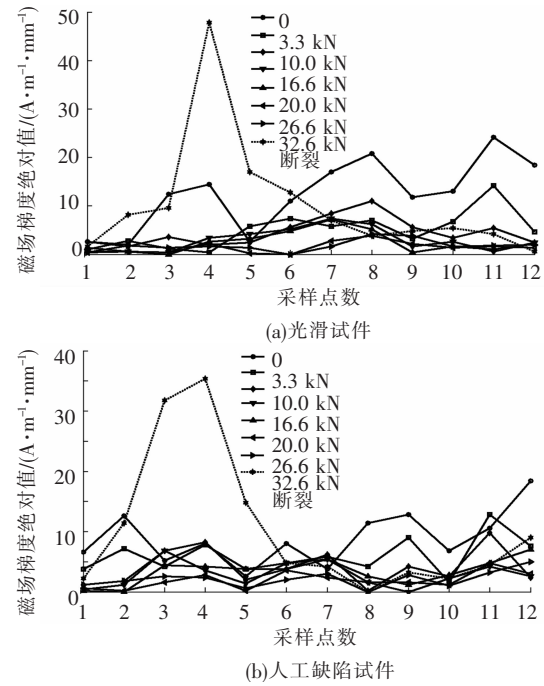


图5 离线卸载时磁信号的梯度曲线

实质上,在线加载检测对应工作应力下的磁信号变化,而离线卸载检测对应残余应力下的磁信号变化。与卸载测量相比,加载方式下测量的磁信号变化规律更为明显。

4 结 论

1) 磁记忆信号与工作应力之间具有较好的相关性。基于磁机械效应,利用有效场理论解释了加载时磁信号增减与试件的初始磁状态有关,并最终趋于饱和。

2) 利用相邻两磁信号的相关系数可以判断试件是否处于某种临界或极限状态,研究发现试

件对临界工作载荷很敏感,可望利用磁记忆信号建立铁磁性构件失效的早期诊断准则。

3) 试件离线卸载断裂后的磁信号曲线在断口附近形成正负磁极,并具有较强的梯度值,该特征可用于准确识别断裂位置。

参考文献:

[1] DUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9/10): 401-405.

[2] 张卫民,董韶平,张之敬.金属磁记忆检测技术的现状与发展[J].中国机械工程,2003,14(10): 892-895.

[3] 任吉林,王东升,宁凯,等.应力状态对磁记忆信号的影响[J].航空学报,2007,28(3): 724-728.

[4] 董丽虹,徐滨士,董世运,等.拉伸载荷作用下中碳钢磁记忆信号的机理[J].材料研究学报,2006,20(4): 440-444.

[5] WILSON J W, TIAN Guiyun, BARRANS S. Residual magnetic field sensing for stress measurement[J]. Sensors and Actuators A, 2007,135(2): 381-387.

[6] YAMASAKI T, YAMAMOTO S, HIRAO M. Effect of applied stresses on magnetostriction of low carbon steel[J]. NDT & E International, 1996, 29(5): 263-268.

[7] 宛德福,马兴隆.磁性物理学[M].北京:电子工业出版社,1999:205-211.

[8] JILES D C. Theory of the magnetomechanical effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537-1546.

(编辑 张 红)