

塑性变形条件下拉伸构件的磁记忆效应

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, 150001 哈尔滨, lbyljc@163.com;
2. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 163318 黑龙江 大庆)

摘要:通过对经退磁处理的光滑和切口试件在不同程度拉伸变形下的在线磁信号的测量,研究了塑性变形对磁记忆效应的影响.光滑试件在弹性和均匀塑性流动阶段磁场分布近似为斜直线,仅到颈缩后才在应力集中部位产生明显的磁场畸变;切口试件在屈服以后即出现畸变特征,基于位错理论分析了异常波波高增加的原因,利用磁信号水平线图可定性判断应力集中区破损发展的趋势;并借助回归方程拟合了峰-峰值与应变之间的幂函数关系,可用于塑性变形程度的度量.经分析表明,虽然光滑和切口试件的断裂机理不同,但在局部损伤区均会出现波峰-波谷的畸变特征,可用于应力集中的早期识别.

关键词:磁记忆效应;塑性变形;磁场畸变;位错;应力集中

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)01-0021-05

Magnetic memory effect of tensile component under plastic deformation

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

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, lbyljc@163.com;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, 163318 Daqing, Heilongjiang, China)

Abstract: Influence of plastic deformation on magnetic memory effect was investigated by testing magnetic signal of demagnetized smooth and notched specimens under different tensile deformation levels. The magnetic field distribution curve of the smooth specimen is close to linear in elastic and uniform plastic flow stages, and exhibits pronounced abnormal wave in stress concentration zone only when necking occurs, while that of the notched specimen shows distortion characteristic after the specimen yields. The possible reasons underlying the wave height increment are discussed based on dislocation theory. The horizontal curves of the magnetic memory signals can be used to determine the damaging development trend in the stress concentration zone, and the power function relationship between peak-peak value and strain is fitted to evaluate the degree of plastic deformation. Although the fracture mechanisms of smooth and notched specimens are different, the abnormal waves with crest and trough both appear in the localized damage zone, which is useful for identifying stress concentration early.

Key words: magnetic memory effect; plastic deformation; magnetic field distortion; dislocation; stress concentration

在工程应用中,过量的变形和断裂是材料失效

的两种主要形式.为了保证结构件能够安全可靠地运行,及时检测和评价在役设备的安全隐患就显得非常重要.常规的无损检测方法主要以发现活动性的宏观裂纹或其它较大的缺陷为目的,而对构件的早期损伤如微裂纹或应力集中却无能为力.因此,对材料或结构进行早期诊断并给出实际的应力-变形状态,一直是无损检测人员关注的热点.

金属磁记忆检测技术自上世纪末提出以

收稿日期: 2009-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772061, 11072056);
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); 黑龙江省
教育厅普通高等学校青年学术骨干支持计划项目
(1155G02).

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.

来^[1],由于对构件失效和疲劳损伤具有早期诊断的潜力而引起了极大关注^[2].基于地磁场下的力-磁耦合作用,目前的诊断多局限于应力集中区产生的自有漏磁场的法向分量过零点、水平分量具有最大值等判据;但检测结果由于受诸多因素干扰而随机性较大,为此开展了各种基础性实验研究来探讨磁记忆现象的本质.董丽虹等^[3-4]测量了未经任何磁处理的试件在拉伸载荷作用下的磁记忆信号,分析了弹性和塑性变形阶段的不同特点;为了消除初始磁状态对力-磁效应的影响,并在此基础上,深入研究了经退磁处理后的光滑试件在静拉伸过程中的变化规律,建立了弹性范围内应力与磁信号之间的定量关系^[5-6].任吉林等^[7]研究了不同程度变形下应力状态对磁信号的影响,定性解释了磁信号变化的不同机理.在理论方面,基于磁机械效应的等效场理论模型可以很好解释应力导致畸变磁场反向的原因^[8],但仅限于弹性区域.在众多试验中,对弹性阶段磁信号与应力之间的关系研究较多,塑性阶段研究的较少,且目前尚缺乏相应的理论模型支持.

在材料基本力学性能测定和失效机理与准则研究中常用的是光滑试件,而在机械和工程结构零部件的加工过程中,试件上不可避免地含有沟槽、凸台、螺纹、铆钉孔等,这些几何不连续可看成是广义的切口.本文利用光滑和切口试件分别进行不同程度拉伸变形下的在线磁记忆信号测量,重点探讨塑性阶段的力-磁效应,为明确磁记忆方法早期诊断构件失效的机理提供实验依据.

1 试验方案

拉伸试验选用铁磁性材料 Q235 为研究对象,按照 GB/T 228—2002 标准利用线切割机加工成中心尺寸为 60 mm × 23.6 mm × 3 mm 的板状试件;为了模拟应力集中,另加工多个含直径为 8 mm 的圆孔试件,如图 1 所示.经机械加工后的试件表面会产生残余应力,从而表现出较大的不均匀剩磁分布;为了消除初始磁状态对磁记忆效应的影响,利用 TC-50 退磁器进行退磁处理,以达到净化初始磁信号的目的.

试验前分别在光滑试件中央检测区等间距画好 4 条平行线,在含圆孔试件上按图示虚线位置画好 5 条平行线,作为检测线.通过 Zwick/Roell Z050 电子万能试验机进行连续步进加载,每到一预定载荷时,在保载时间内利用俄罗斯动力诊断公司生产的 TSC-1M-4 型磁检测仪和 2 型扫描装置,沿着检测线方向以步长 1 mm 测量试件表

面磁场强度的法向分量,即磁记忆信号 H_y ,并确保提离值固定为 2 mm,直至试件被拉断.

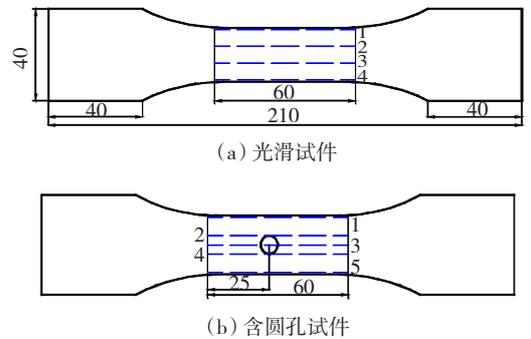


图 1 试件形状及检测线

2 试验结果与分析

2.1 塑性阶段时的磁记忆信号

光滑试件在屈服以后, H_y 曲线均近似为斜直线,直到出现明显颈缩时磁信号才大幅增长,并在颈缩部位产生磁场畸变.多组实验表明 4 条测量线上 H_y 的变化规律一致,这里取第 2 条测量线在不同应变 ε 下的磁信号分布,如图 2(a) 所示.同理,根据含圆孔试件切口根部的局部应力计算可知,当外加载荷达到 12 kN 时,切口件已发生局部屈服.塑性阶段不同载荷作用下,各曲线具有相似的形状,均在圆孔附近形成波峰-波谷畸变现象,并且磁场畸变幅度随载荷的增加而增加.这里取具有代表性的第 3 条测量线的磁记忆信号,如图 2(b) 所示.

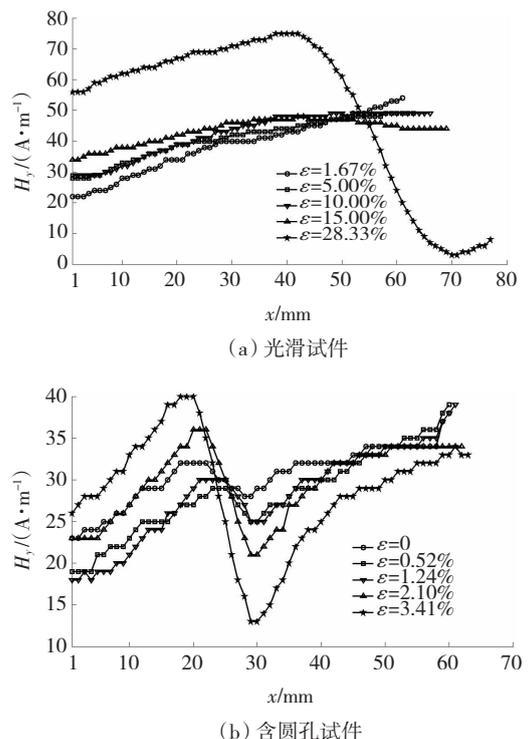


图 2 塑性阶段时试件表面 H_y 随应变的变化

由光滑试件的工程应力-应变曲线可知,塑性材料在屈服后要经过均匀塑性流动,到强度极限后会产生不均匀塑性变形,发生局部颈缩.对于切口试件由于存在应力集中,切口附近的应力状态实际上由单向应力状态变为三向应力状态.而光滑试件在发生颈缩后,颈部外表面与旋转双曲面相吻合,颈缩也相当于在拉伸试件中造成了切口,在颈缩区中部形成三向拉伸应力区,该区的夹杂物或第二相质点破裂或者与基体界面脱离结合而形成微孔.当继续加载时,微孔不断长大、聚集而形成大的中心空腔.磁记忆信号仅在颈缩时才迅速增强,可见漏磁场场强与局部变形量大小相对应,对应力集中区出现的大量微裂纹很敏感,而磁场畸变曲线的出现也预示着试件已经很危险.

对于切口试件来说,这种磁场畸变分布特征在未加载时就有,如图3中零载荷曲线所示.基于漏磁场原理^[9],未加载时的磁场畸变是由于宏观的几何形状引起的,而不是应力集中造成的;在弹性阶段,基于有效场理论和接近原理^[10],应力使畸变信号减弱,最终向非磁滞状态逼近,所以随着载荷的增加畸变幅度逐渐减小,直到趋近于斜直线分布,类似于光滑试件的弹性阶段.而在塑性阶段,切口根部的局部应力和应变由于应力集中而增大很多倍,位错在塑性变形过程中大量增殖,位错密度可成千上万倍增加.位错为晶体内应力的主要来源,位错产生的应力场通过磁弹性耦合与磁化相互作用;而畴壁能依赖于应力,位错处于畴壁的应力场中受到的作用力与畴壁在位错的应力场中受到的作用力恰为作用与反作用力,故位错对畴壁具有钉扎作用.随着载荷的进一步加大,局部塑性变形愈强烈,增殖的位错通过滑移在晶界集中、堆积,形成位错胞甚至亚晶,产生应力集中场.这样,滑移、应力集中、多滑移、晶体转动的过程,使每个晶粒几乎发生相同的变形,通过转动最后形成纤维织构组织^[11].因而,多晶体塑性变形的结果是缺陷增加、应力集中和产生织构,这些因素都不利于畴壁运动,从而导致畸变幅度也愈明显.

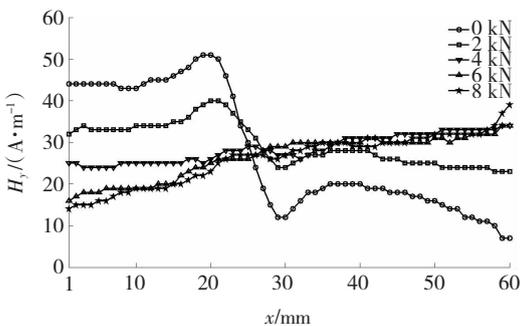
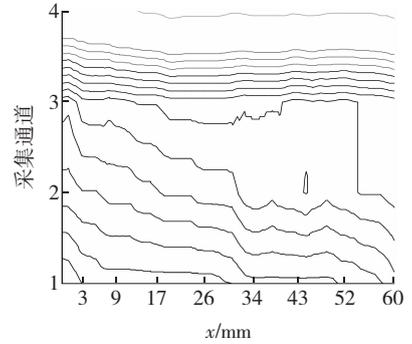


图3 弹性阶段时含圆孔试件表面 H_y 随载荷的变化

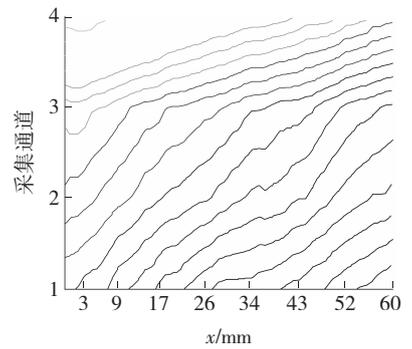
光滑试件和含圆孔试件在塑性阶段表现出的不同磁信号特征,其根本原因在于二者的断裂破坏机理不同.实质上,光滑试件拉伸时的断裂是由内向外发展的,而切口试件的裂纹则起始于切口根部,由表面向内部扩展引起断裂.因而,应力在局部损伤区产生的自有漏磁场畸变对光滑试件来说是在颈缩以后,而切口试件是在局部屈服以后.

2.2 应力集中区损伤状态的识别

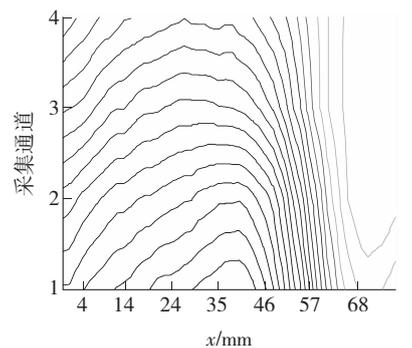
利用与磁检测仪配套的图形分析软件 MM-System (Version 2.53e) 可以方便地绘出某载荷下试件表面的 H_y 水平线图.水平线图其实是多次扫描以覆盖整个检测区域所得到的多通道3D显示的俯视图.当试件加载至极限状态时, H_y 水平线图与未加载时相比具有明显的不同.图4、5分别给出了光滑试件和含圆孔试件在与图2相对应载荷下的 H_y 水平线图.



(a) 未加载时



(b) $\varepsilon=1.67\%$



(c) $\varepsilon=28.33\%$

图4 光滑试件在不同载荷作用下的 H_y 水平线图

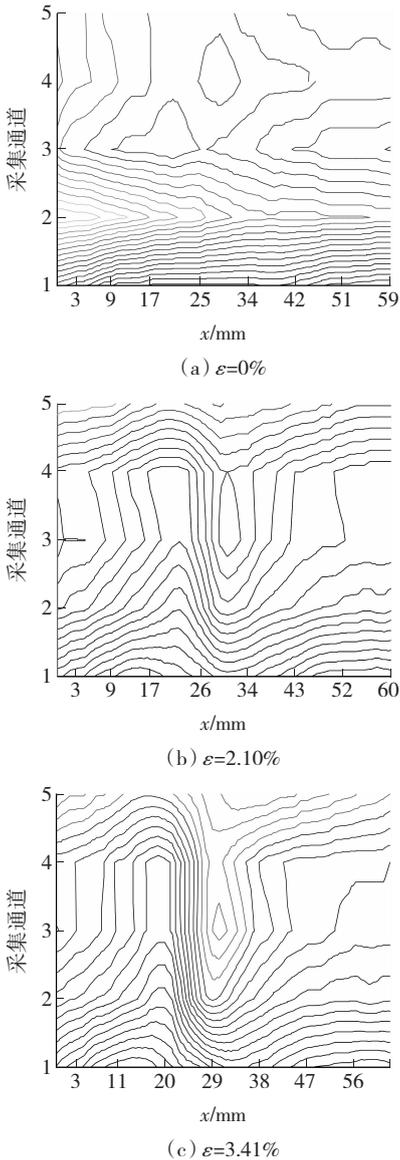


图5 含圆孔试件在不同载荷作用下的 H_y 水平线图

由图4、5可以看出, H_y 水平线分布随试件承受的应力水平呈现不同的变化趋势: 在低应力水平时, H_y 水平线近似沿载荷方向; 当试件处于极限状态时, 在危险截面上的 H_y 水平线与载荷方向垂直. 对于光滑试件, 危险截面在颈缩区; 对于含圆孔试件, 危险截面在圆孔边缘. H_y 水平线分布可用于准确识别应力集中区, 当远离应力集中区时, H_y 水平线逐渐与载荷方向平行.

在塑性变形条件下, 随着载荷的逐步增加, 试件的损伤程度也逐渐加剧, 相应的在应力集中区的 H_y 水平线也越来越密集, 如图5(b)和(c)所示. 这样, 借助 H_y 水平线分布可定性判断构件破损发展的趋势: 与载荷方向垂直的水平线越密集, 则应力集中区的损伤程度越严重.

2.3 切口试件塑性变形程度的度量

光滑试件在出现畸变特征时表明构件承载能

力已大大降低. 切口试件在塑性变形时均会产生程度不同的畸变信号, 如果记塑性阶段产生的磁记忆信号畸变波峰与波谷之差为峰-峰值 H_{yp-p} , 则 H_{yp-p} 可用来反映构件产生塑性变形的程度.

正如前所述, 不同应变下的磁记忆效应与试件材料的微观组织变化有关. 对于畴壁来说, 钉扎点的强度可以用钉扎系数 k_{eff} 来表示^[12], 即

$$k_{eff} = a\varepsilon^n - 3b\lambda_s\sigma/2. \quad (1)$$

式中: a, b 为常数; n 为指数; λ_s 为饱和磁致伸缩系数; ε, σ 分别为塑性变形量和作用应力; 等式右边第1项表示位错等缺陷引起的畴壁钉扎, 而位错亚结构与宏观的塑性变形水平有关; 第2项表示应力对畴壁钉扎强度的影响. 当变形较小如弹性阶段时, 第2项起主要作用, 应力对磁化的作用可等效为一有效外磁场^[10], 对Q235钢来说 λ_s 为正, 故 k_{eff} 随拉应力的增加而减小; 当变形较大时, 位错亚结构由单个位错线向位错缠结及位错胞转化, 第1项起主要作用, k_{eff} 随变形量的增加而增大, 尤其在试件出现颈缩时更为明显.

对图2(b)中磁信号畸变峰-峰值与应变之间的关系进行幂函数拟合, 得到的回归方程为

$$H_{yp-p} = 3.094 \times \varepsilon^{1.696} + 2.568. \quad (2)$$

相应的拟合曲线如图6所示.

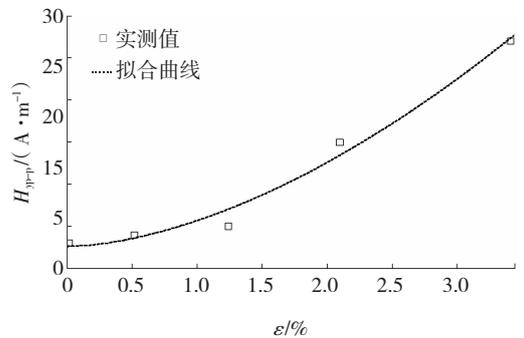


图6 塑性变形时峰-峰值与应变之间的拟合曲线

可见, 畸变峰-峰值随应变的增加而增加, 但并非是简单的线性关系, 在塑性变形早期阶段变化较缓慢, 而后随应变近似呈幂函数而较快增长, 尤其是在颈缩或出现裂纹时会明显增大.

为了更进一步确定构件发生失效的损伤程度, 以出现明显颈缩或裂纹时的磁信号峰-峰值作为临界载荷的检验阈值, 将不同载荷下的应变值与断裂瞬间时的极限应变值之比进行归一化处理, 通过大量实验, 有望建立某种材料磁场畸变与塑性变形之间的定量关系, 对于判断累积变形损伤具有重要的指导意义.

3 结 论

1) 应力集中会产生磁场畸变,对于光滑试件集中在产生不均匀塑性流动的颈缩区,切口试件发生在切口根部的局部塑性区.但构件的形状,如切口部位也会由于漏磁场原理在未承载时产生类似的曲线特征,二者的机理是根本不同的.

2) 应力在损伤区引起的磁场畸变与材料的微观组织有关.当局部塑性应变较小时,会产生单个位错;随着应变的增加,逐渐生成位错缠结,在大变形时形成位错胞.正是位错等产生的弹性应变场与畴壁的相互作用,从而引起自有漏磁场的增长.

3) 借助磁信号水平线分布,可准确识别应力集中区并判断其损伤发展的趋势.

4) 切口试件在塑性阶段产生的磁场畸变峰-峰值随应变的增加而增加,近似呈幂函数变化,与钉扎系数的解释相一致.

5) 通过大量试验来确定磁场畸变与归一化应变之间的定量关系,可有望用于构件累积变形损伤的评估,尤其是确定临界极限状态.

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] DONG Lihong, XU Binshi, DONG Shiyun, *et al.* Variation of stress-induced magnetic signals during tensile testing of ferromagnetic steels [J]. *NDT & E International*, 2008, 41(3): 184 - 189.

[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] 王 丹,董世运,徐滨士,等. 静载拉伸 45 钢材料的金属磁记忆信号分析 [J]. *材料工程*, 2008, (8): 77 - 80.

[6] DONG Lihong, XU Binshi, DONG Shiyun, *et al.* Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel [J]. *NDT & E International*, 2009, 42(4): 323 - 327.

[7] 任吉林,王东升,宋 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.

[8] YANG En, LI Luming, CHEN Xing. Magnetic field aberration induced by cycle stress [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 312(1): 72 - 77.

[9] 徐章遂,徐英,王建斌,等. 裂纹漏磁定量原理与应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 2005: 21 - 30.

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

[11] 田民波. 磁性材料 [M]. 北京:清华大学出版社, 2001: 152 - 159.

[12] LO C C H, KINSER E, JILES D C. Modeling the interrelating effects of plastic deformation and stress on magnetic properties of materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(10): 6626 - 6628.

(编辑 张 宏)