

试件残余塑性变形与金属磁记忆检测信号的关系

Relationship Between Residual Plastic Deformation and Metal Magnetic Memory Signals of Specimens

白 勇, 徐 帆, 乔霭潼

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

BAI Yong, XU Fan, QIAO Ai-tong

(College of Civil Engineering and Architecture,

Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

摘要: 对带缺口 Q235 试件进行静载拉伸实验, 在卸载后, 沿测量路径检测磁信号。结合有限元分析结果, 研究弹性变形阶段, 试件应力集中状态和磁信号之间的联系, 以及塑性变形阶段, 试件残余塑性应变状态和磁信号之间的联系。结果表明: 磁信号和应力集中状态及塑性变形状态有显著的关联。磁信号不仅可以用来判断缺陷的位置和尺寸, 也可用于研究塑性变形的分布。

关键词: 金属磁记忆; 静载拉伸; 磁记忆; 有限元

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.08.007

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)08-0042-08

Abstract: Tensile tests on notched specimens were operated to study the magnetic memory effect of Q235 steel, and magnetic signals along the scan lines were recorded after unloading. Combined with results of finite element analysis, the connection between stress concentration situation and magnetic signals in the elastic deformation state was studied; the connection between residual plastic strain and magnetic signals in the plastic deformation state was studied. The results showed that magnetic signal had strong relation with the stress concentration situation and elastic deformation state. Magnetic signals can be used to determine positions and dimensions of defects, and study the distribution of plastic deformation.

Key words: metal magnetic memory; static tension; magnetic signal; finite element

近年来, 一种新型磁检测方法, 金属磁记忆检测方法由 Doubov^[1,2] 首先提出。和传统的磁检测方法相比, 金属磁记忆检测方法具有两个优势^[3]: 不需要外加人工强磁场, 而用地磁场作为激励源; 可以有效地检测出构件早期损伤。

由于上述优势, 金属磁记忆检测方法得到了广泛关注, 并开始取得一定的进展。在双侧 U 形凹口试样的研究中, 发现磁场分布状况和应力集中的状况之间有良好的 consistency^[4]。J. W. Wilson 等^[5] 对加载应力和卸载后残余应力引起的磁记忆现象进行了研究, 结果表明, 相比较于法向分量, 磁记忆信号的切向分量(加载方向)和构件应力分布情况有更好的相关性。尹大伟等^[6] 发现离线检测时, 检测效果较好。文献[7,8]发现磁记忆信号的法向分量梯度和之前加载的最大应力呈线性关系。C. L. Shi 等^[9] 通过实验发现磁信号垂直分量斜率和之前加载的最大拉伸荷载之间有着一定的

关系, 并用理论对此进行分析。唐继红等^[10] 通过对带中心圆孔缺陷的 20# 钢平板试件做静载拉伸实验, 发现磁信号垂直分量过零点不完全表征应力集中位置, 且磁场梯度的变化与应力集中程度有关。M. Roskosz 等^[11] 提出了一种基于磁记忆信号分量梯度的残余应力评估方法, 由此方法计算得出的残余应力和由有限元方法计算得出的残余应力可以取得较好的一致性。Yao K. 等^[12] 研究了铁磁材料在拉伸和压缩荷载下的磁记忆信号特征, 结果表明, 在受拉情况下, 试样不同变形阶段, 即弹性阶段、塑性阶段和断裂阶段, 可以明显地区分; 而在受压情况下, 不同变形阶段没有明显的区别。

虽然关于金属磁记忆检测的研究已得到广泛开展, 但仍处于早期阶段。本工作通过对不同缺陷 Q235 试样在拉伸荷载作用下的磁记忆检测, 结合有限分析结果, 研究试样不同的应力-应变状态对磁信号的影响。

1 实验材料及方法

试件材料选用普通碳素结构钢 Q235,其基本力学性能如表 1 所示。图 1 为实验测得的 Q235 材料的真实应力-塑性应变曲线。本工作选用了两种尺寸的试样进行实验与分析,试样尺寸和磁信号测量路径如图 2 所示。其中试样 1 的方型缺陷处的应力集中系数为 4.76,圆形缺陷处的应力集中系数为 2.69;试样 2 的两侧 U 形槽处的应力集中系数为 2.21,矩形缺陷处的

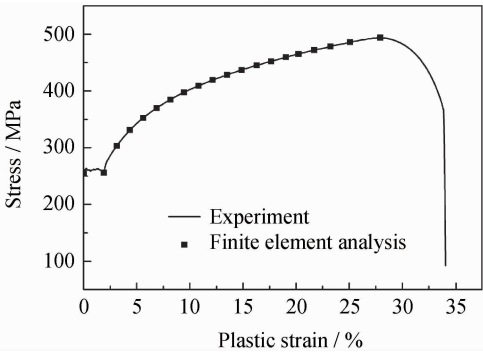


图 1 试样塑性应变和真实应力的关系
Fig.1 Relationship between plastic strain and stress

表 1 实验材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of experimental material			
Steel	Elastic modulus/GPa	Tensile stress at yield/MPa	Tensile stress at break/MPa
Q235	204.6	255.1	493.8

应力集中系数为 2.76。此处的应力集中系数,是根据弹性阶段有限元计算的缺陷附近最大应力和缺陷处的平均应力(净截面)的比值。

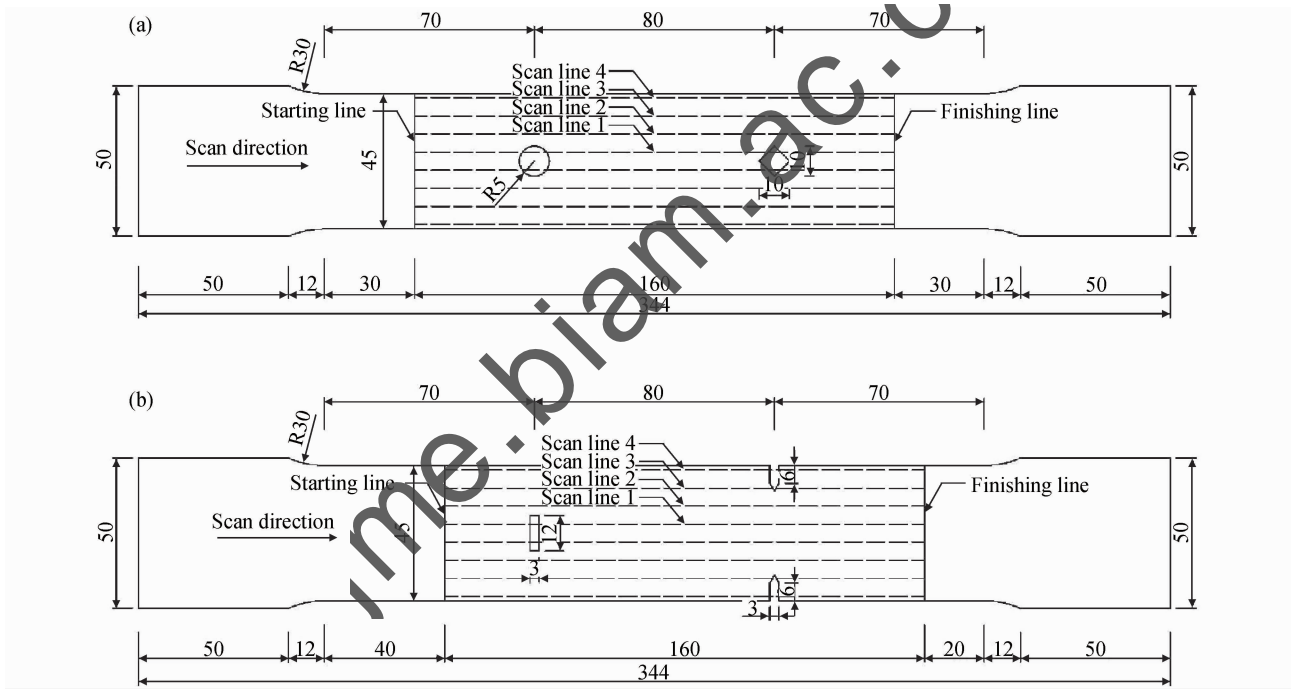


图 2 磁记忆试样尺寸及测量路径 (a)试样 1;(b)试样 2
Fig.2 Specimens dimensions and scan lines (a)specimen 1;(b)specimen 2

实验前,所有试样进行退磁处理。经退磁处理后,测得的磁信号呈线性分布。拉伸实验在岛津 AG1 万能材料试验机上进行,其最大拉伸荷载为 250kN。采用分级加载,从 0kN 开始,加载至 65kN,每隔 5kN 进行一次加载和卸载过程。试样拉伸到每级预定荷载后,将试样从试验机上取下,使用应力集中检测仪沿着测量路径检测磁场信号。

磁信号通过应力集中检测仪 TSC-1M-8 测得。应力集中检测仪配备 1-8M 型扫描装置,八个磁探测传感器放置为双分量,用来同时检测磁场的法向分量和

切向分量。 $H_p(x)$ 为沿着试件表面并平行于加载方向的切向分量; $H_p(y)$ 为垂直于试件表面的法向分量。仪器在地磁场环境下进行标定,地磁场法向分量假定为 40A/m。

2 有限元分析

通过通用有限元软件 Ansys 12.1 对试样进行静力分析(包括加载和卸载过程),可以得到各级荷载情况下加载和卸载后试样的应力和应变分布。

有限元分析中使用的钢材材料性质通过拉伸实验获得,并通过多线性随动强化模型来近似表达拉伸曲线(图 1)。在有限元分析中,采用和实验加载过程相一致的加载过程,将前一级荷载引起的应力-应变状态作为后一级荷载分析时的初始应力-应变状态,可以将每一级荷载加载卸载过程带来的塑性应变积累和材料性质的改变考虑进去。

假设材料为各向同性材料。试样采用三维实体模型建模。网格划分采用 8 节点三维实体单元 SOLID185。模型网格划分如图 3 所示。为提高计算效率,在模型的厚度方向和宽度方向,采用对称边界条件。模型在长度方向,一端约束长度方向位移,一端建立刚性区域并和一参考点耦合,在此参考点施加荷载。

从有限元分析的结果来看,由于试件上存在加工的缺口,缺口附近的应力明显地比缺口所在截面的平均应力大,也就是说缺口附近存在较为明显的应力集中情况。在试件的弹性阶段,虽然存在较为明显的应力集中情况,试件并不进入塑性变形阶段,也就不存在

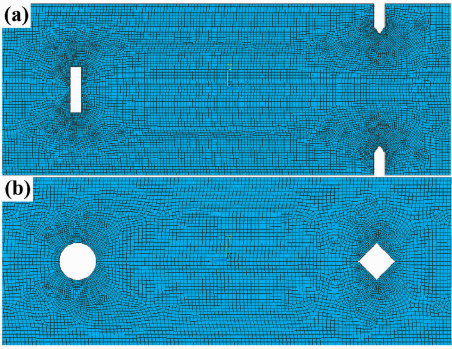


图 3 缺口处的网格划分 (a)试样 1;(b)试样 2
Fig. 3 Mesh of specimen 1(a) and specimen 2(b)

塑性变形。随着荷载的增大,应力集中区域首先产生塑性变形,而其他区域还是处于弹性阶段。随着荷载的进一步增大,试件的大部分区域进入塑性变形阶段。

为了和实验结果进行比较,沿实验测量路径提取塑性应变数据。图 4 和图 5 为计算得到的试样经各级荷载卸载之后的塑性应变(沿加载方向)。

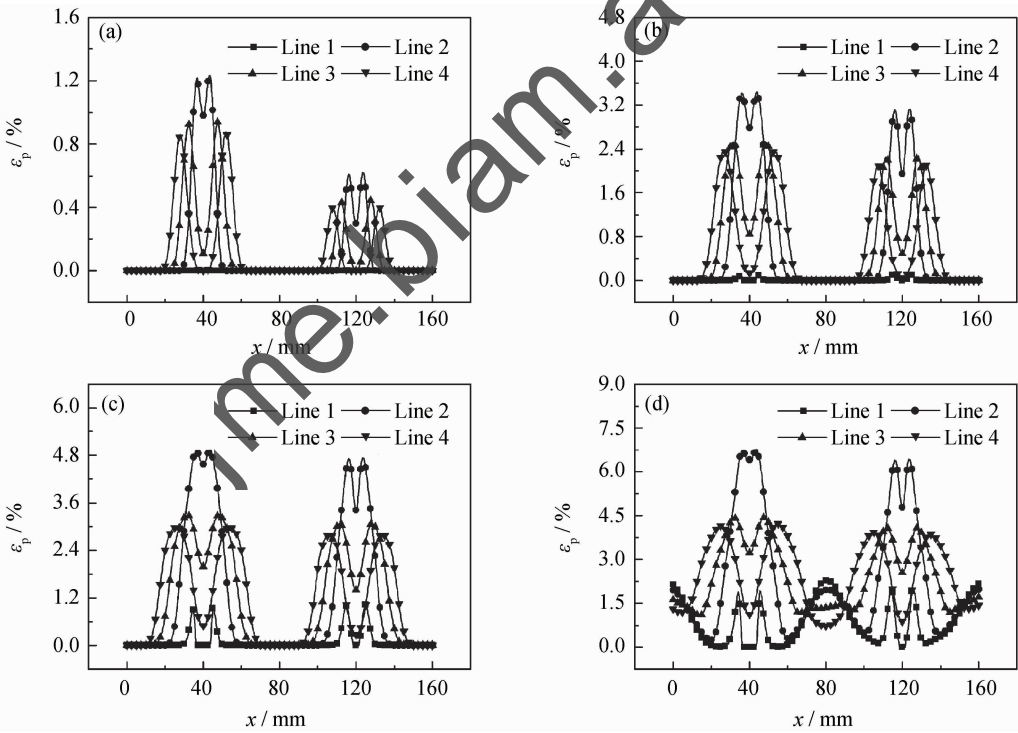


图 4 试样 1 的塑性应变分布(加载方向) (a)50kN;(b)55kN;(c)60kN;(d)65kN
Fig. 4 Distributions of plastic strain of specimen 1 (along the loading direction) (a)50kN;(b)55kN;(c)60kN;(d)65kN

3 结果与讨论

3.1 试件磁信号沿单条路径分析

弹性变形阶段,试样 1 的 4 条测量路径法向磁信号分量与位移的关系如图 6 所示。路径 1,3 和 4 基本上呈

线性,路径 2 在缺陷附近表现出一定的非线性。有限元分析表明,当荷载为 20kN 和 40kN 时,试样并没有区域进入塑性变形阶段,但路径 2 的应力集中现象最为明显。可以得出结论,试样在弹性变形阶段,应力集中较为严重时,法向磁信号分量会表现出一定的非线性现象。

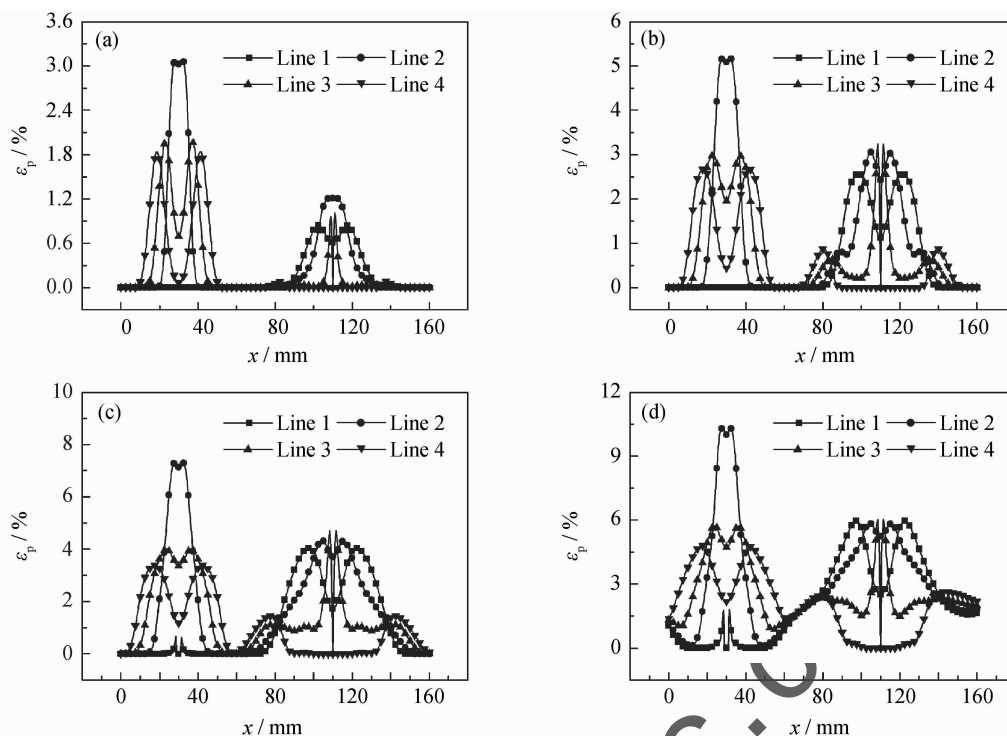


图 5 试样 2 的塑性应变分布(加载方向) (a)50kN; (b)55kN; (c)60kN; (d)65kN

Fig. 5 Distributions of plastic strain of specimen 2 (along the loading direction) (a)50kN; (b)55kN; (c)60kN; (d)65kN

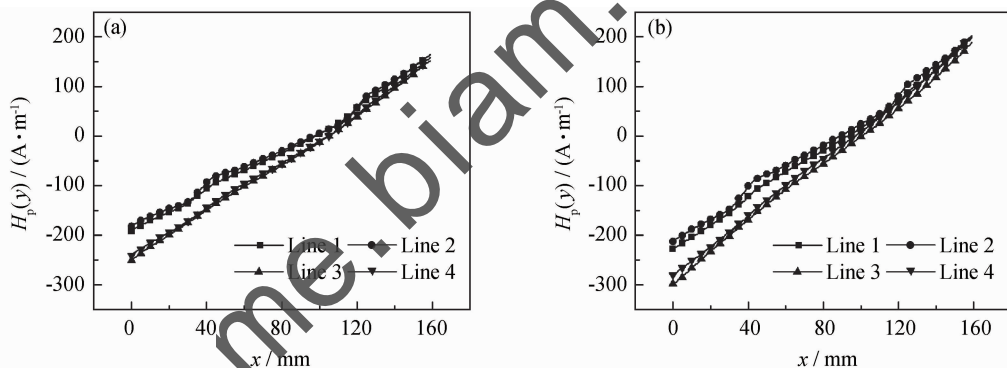


图 6 弹性变形阶段试样 1 的法向磁信号分量分布 (a)20kN; (b)40kN

Fig. 6 Distributions of normal magnetic signal of specimen 1 in the elastic deformation state (a)20kN; (b)40kN

弹性变形阶段, 试样 1 的 4 条测量路径切向磁信号分量和位移的关系如图 7 所示。由图 7 可知, 沿着 4 条测量路径的切向磁信号分量在缺陷处均表现出峰值现象。和法向磁信号分量相比, 在弹性变形阶段, 切向分量对试样的应力集中状态更为敏感。路径 2 的峰值现象最为明显, 这和有限元分析得到的结果相符, 即路径 2 在缺陷处的应力集中最为严重。路径 3 和 4 的应力集中相对较弱, 相应的峰值现象也不明显。可以得出结论, 切向磁信号分量的峰值现象和相应的应力集中程度有着很大的关联。

塑性变形阶段, 沿试样 1 表面 4 条测量路径的法向磁信号分量与位移的关系如图 8 所示。可以看出, 当加载至 50kN 时, 路径 1, 3 和 4 开始出现不明显的

非线性变化。这一现象可以用来区分试件是否进入塑性变形阶段。可以看出非线性变化的拐点在 X 轴方向和缺陷的中心相一致。当荷载加载至 55kN 时, 从图 4 可以看出, 试件的塑性变形有了显著的增长, 但主要存在于缺陷周围。此时, 法向磁信号分量的非线性现象非常显著。当试件继续加载至 60kN 时, 可以看出试件的法向磁信号分量的非线性现象有所减弱。这可以解释为, 随着试件的绝大部分开始进入塑性变形阶段, 沿着路径, 试件的磁学性质的差异减小。因此当试件继续加载至 65kN, 法向磁信号分量的非线性现象继续减弱。可以得出结论, 当试件进入塑性变形阶段后, 法向磁信号不仅和塑性变形的大小有关, 和其分布也有着很大的关联。

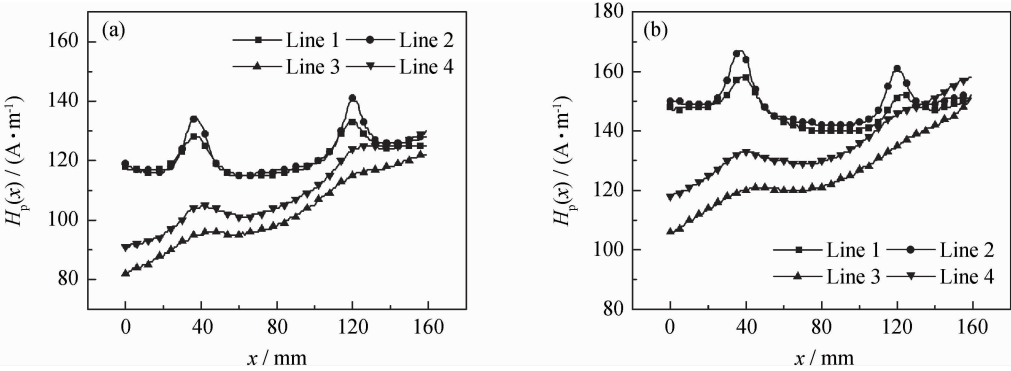


图 7 弹性变形阶段试样 1 的切向磁信号分量分布 (a)20kN;(b)40kN

Fig. 7 Distributions of tangential magnetic signal of specimen 1 in the elastic deformation state (a)20kN;(b)40kN

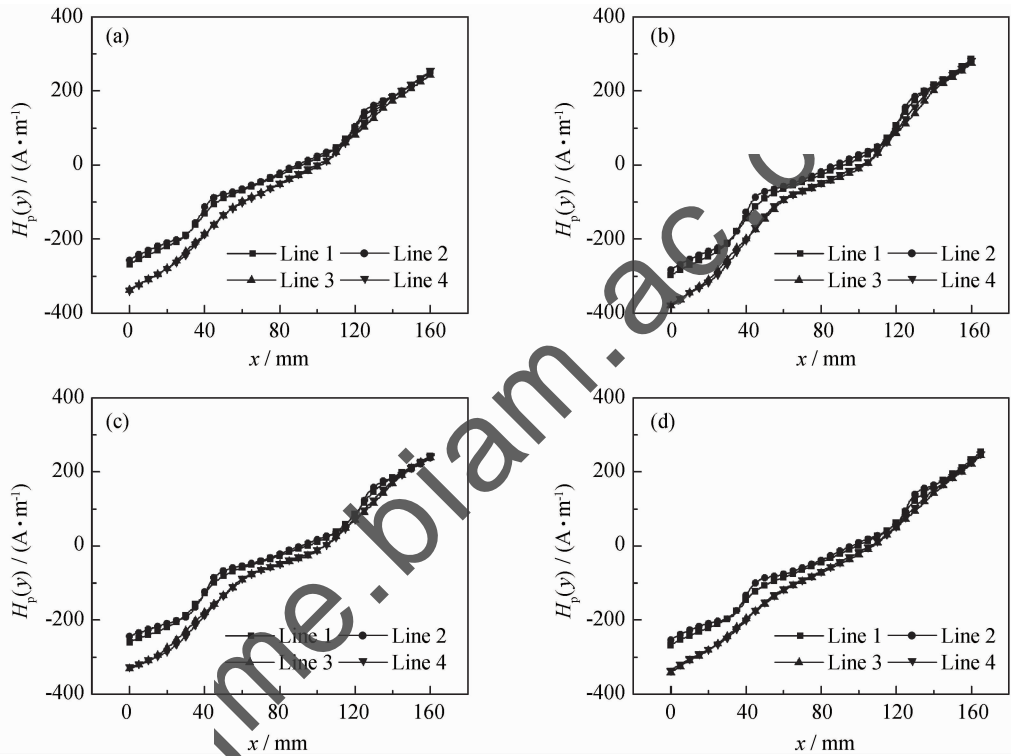


图 8 塑性变形阶段试样 1 的法向磁信号分量分布 (a)50kN;(b)55kN;(c)60kN;(d)65kN

Fig. 8 Distributions of normal magnetic signal of specimen 1 in the plastic deformation state (a)50kN;(b)55kN;(c)60kN;(d)65kN

塑性变形阶段,沿试样 1 的 4 条测量路径切向磁信号分量与位移的关系如图 9 所示。和图 7 相比,塑性阶段,切向磁信号分量的峰值现象显著增强。这可以说明,进入塑性变形阶段后,切向磁信号分量可以用来区分试件是否进入塑性变形阶段。同时也可看出峰值对应的 X 轴位置和两个缺陷的中心位置相一致。峰值对应的 X 轴位置,可以用来确定缺陷中心所在位置。和法向磁信号分量的现象相似的是,荷载加载至 55kN 时,可以观测到最显著的峰值现象;荷载继续增加时,峰值现象随之减弱。因此同样可以得出结论,切向磁信号不仅和塑性变形的大小有关,也和其分布存在着很大的关联。

3.2 试件磁信号梯度沿多条路径分析

以试样 2 为例,静载拉伸后,由 8 条测量路径测得的法向磁信号梯度云图如图 10 所示。荷载加载至 30kN 后(图 10(a)),试件缺陷附近开始出现法向梯度大于 $4 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 的区域。随着荷载的上升,此区域随之增多,缺陷逐渐处于法向梯度大于 $4 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 的区域之内。当荷载加载至 55kN 之后,两个 U 型缺陷之间区域和矩形缺陷附近出现法向梯度大于 $4 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 区域。结合有限元分析结果,55kN 时,两个 U 型缺陷之间区域和矩形缺陷附近出现了明显的塑性变形。通过比较图 10(d)~(f),可以看出试件缺陷附近的法向梯度值较大,通常超过 $5 \times 10^3 \text{ A/m}^2$;离缺陷

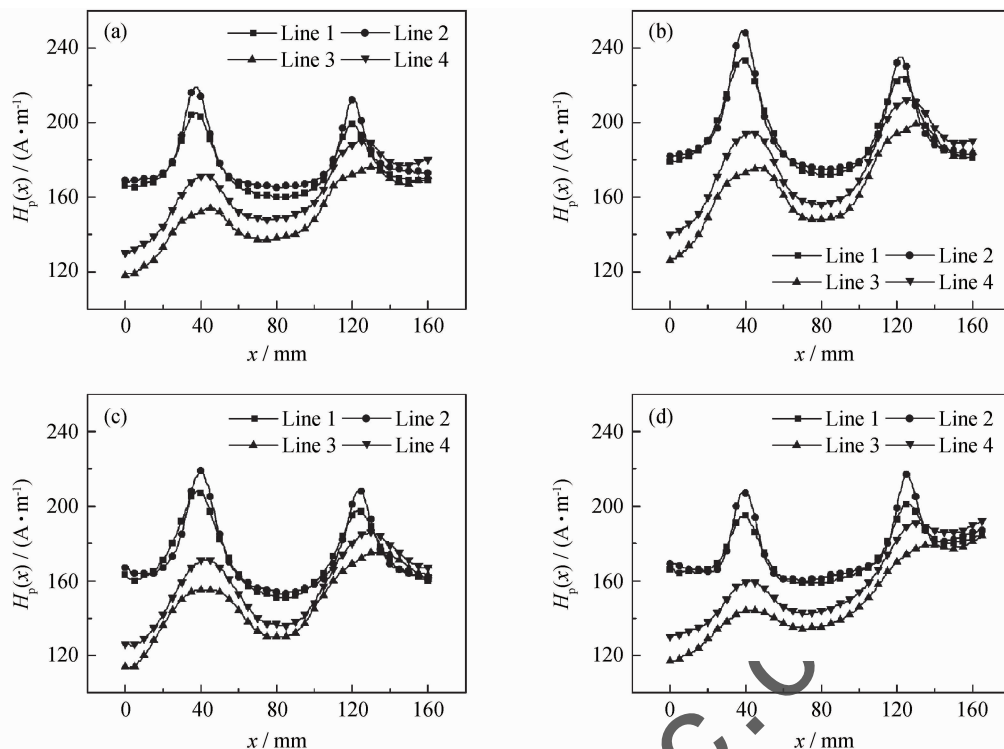


图9 塑性变形阶段试样1的切向磁信号分量分布 (a)50kN;(b)55kN;(c)60kN;(d)65kN

Fig. 9 Distributions of tangential magnetic signal of specimen 1 in the plastic deformation state (a)50kN;(b)55kN;(c)60kN;(d)65kN

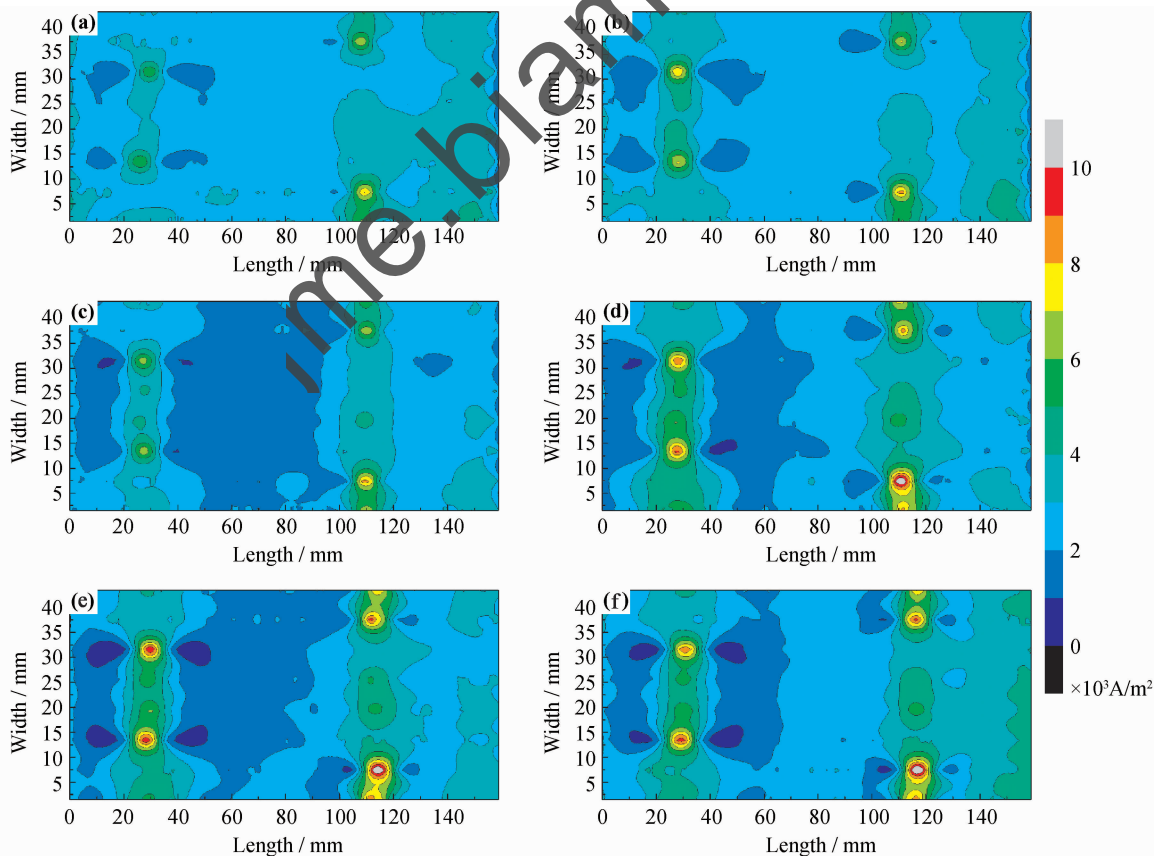


图10 试样2法向磁信号分量梯度云图 (a)30kN;(b)45kN;(c)50kN;(d)55kN;(e)60kN;(f)65kN

Fig. 10 Contours of normal magnetic signal of specimen 2 (a)30kN;(b)45kN;(c)50kN;(d)55kN;(e)60kN;(f)65kN

较远区域的塑性变形区域的法向梯度值较小,通常在 $3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 的范围内。通过多条测量路径的法向磁信号云图,不仅可以用来评估缺陷的尺寸和方位,也可评估试件的塑性变形区域和缺陷的关系。

试样 2 在各级荷载静载拉伸情况下,由 8 条测量路径测得的切向磁信号梯度云图如图 11 所示。通过图 11 可见,荷载大于 45kN 后,试件缺陷基本处于梯度大于 $2 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 的区域内。当荷载加载至 50kN 之后,两个 U 型缺陷之间和矩形缺陷附近出现切向梯

度在 $1 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 的区域;结合有限元分析结果,此时两个 U 型缺陷之间区域和矩形缺陷附近出现了明显的塑性变形。当荷载加载至 60kN 及 65kN 后,两个 U 型缺陷之间区域和矩形缺陷附近的切向梯度的 $1 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ A/m}^2$ 区域逐渐减小;结合有限元分析结果,此时试件大部分区域进入了塑性变形阶段。同样可以得出结论,多条测量路径的切向磁信号云图,不仅可以用来评估缺陷的尺寸和方位,也可评估试件的塑性变形状态,以及塑性变形区域和缺陷的关系。

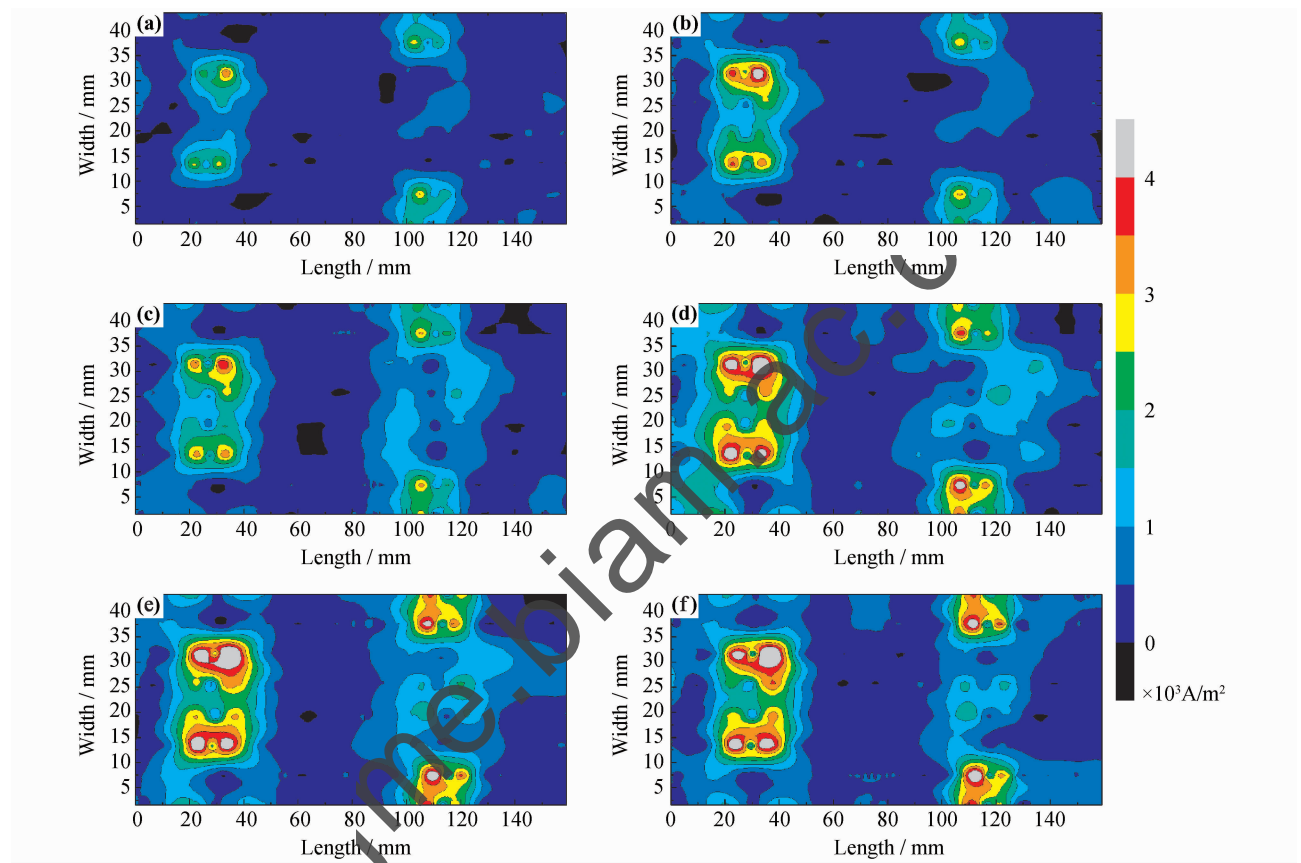


图 11 试样 2 切向磁信号分量梯度云图 (a)30kN;(b)45kN;(c)50kN;(d)55kN;(e)60kN;(f)65kN
Fig. 11 Contours of tangential magnetic signal of specimen 2 (a)30kN;(b)45kN;(c)50kN;(d)55kN;(e)60kN;(f)65kN

4 结论

- (1)弹性变形阶段,应力集中严重的路径上法向磁信号会表现出一定的非线性变化;相比法向磁信号的非线性变化,切向磁信号的峰值特征更为显著。
- (2)进入塑性变形阶段后,试件的法向磁信号的非线性变化和切向磁信号的峰值特征有显著变化。
- (3)塑性变形阶段,试件法向磁信号非线性变化的拐点和缺陷位置相一致;切向磁信号峰值出现的位置和缺陷位置相一致。
- (4)塑性变形阶段,法向和切向磁信号的特征和塑性变形的大小及分布相关。

(5)随着荷载增加,试件的缺口逐渐处于梯度值较大的区域内,缺口附近塑性变形区域的梯度值比其他塑性变形区域的梯度值大。

参考文献

[1] DOUBOV A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory[J]. Welding in the World,1998,41(3):196—199.
[2] DOUBOV A A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory[A]. Proc of 7th Conference on NDT and International Research Symposium[C]. Shantou;Shantou University Press,1999. 181—187.
[3] DOUBOV A A. Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT

- methods[J]. Canadian Institute for NDE Journal, 2006, 27(3): 16—20.
- [4] 陈玉玲, 葛森, 吴森. 应力集中引起的金属磁记忆现象的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 592—595.
CHEN Y L, GE S, WU M. Study of metal magnetic memory induced by stress concentration[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 592—595.
- [5] WILSON J W, GUI Y T, BARRANS S. Residual magnetic field sensing for stress measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(2): 381—387.
- [6] 尹大伟, 徐滨士, 董世运, 等. 不同检测环境下磁记忆信号变化研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(3): 319—323.
YIN D W, XU B S, DONG S Y, et al. Change of magnetic memory signals under different testing environments[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(3): 319—323.
- [7] JIAN X L, JIAN X C, DENG G Y. Experiment on relationship between the magnetic gradient of low-carbon steel and its stress[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321(21): 3600—3606.
- [8] 蹇兴亮, 周克印. 基于磁场梯度测量的磁记忆试验[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 15—21.
JIAN X L, ZHOU K Y. Magnetic memory experiment based on magnetic gradient measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 15—21.
- *****
- (上接第 41 页)
- [11] 田世昌. 奥氏体耐蚀合金的应用[J]. 石油化工设备技术, 1994, 15(5): 43—45.
TIAN S C. The application of austenitic corrosion resistance alloy[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 1994, 15(5): 43—45.
- [12] 徐金章. 合金元素和组织对马氏体不锈钢的耐腐蚀性和硬度的影响[J]. 上海钢研, 2001, (2): 40—44.
XU J Z. Effects of alloying elements and microstructures on the corrosion resistance and hardness of martensitic stainless steel[J]. Shanghai Steel & Iron Research, 2001, (2): 40—44.
- [13] PARK J Y, PARK Y S. The effects of heat-treatment parameters on corrosion resistance and phase transformations of 14Cr-3Mo martensitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering, 2007, 449—451: 1131—1134.
- [14] 刘亚娟, 吕祥鸿, 赵国仙, 等. 超级 13Cr 马氏体不锈钢在入井流体与产出流体环境中的腐蚀行为研究[J]. 材料工程, 2012, (10): 17—21, 47.
LIU Y J, LV X H, ZHAO G X, et al. Corrosion behaviors of super 13Cr martensitic stainless steel under drilling and completion fluids environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (10): 17—21, 47.
- [9] SHI C L, DONG S Y, XU B S, et al. Metal magnetic memory effect caused by static tension load in a case-hardened steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322(4): 413—416.
- [10] 唐继红, 潘强华, 任吉林, 等. 静载拉伸下磁记忆信号变化特征分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 336—341.
TANG J H, PAN Q H, REN J L, et al. Characteristic analysis of magnetic memory signals of 20 # steel under static loading tensile[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 336—341.
- [11] ROSKOSZ M, BIENIEK M. Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements[J]. NDT & E International, 2012, 45(1): 55—62.
- [12] YAO K, WANG Z D, DENG B, et al. Experimental research on metal magnetic memory method[J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(3): 305—314.
- 收稿日期: 2012-08-15; 修订日期: 2013-02-12
- 作者简介: 白勇(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事海底管线/立管方向研究, 联系地址: 浙江省杭州市浙江大学紫金港校区安中大楼 A620 (310058), E-mail: bai@pr-inc.com
- *****
- [15] 吕祥鸿, 赵国仙, 王宇, 等. 超级 13Cr 马氏体不锈钢抗 SSC 性能研究[J]. 材料工程, 2011, (2): 17—21, 25.
LV X H, ZHAO G X, WANG Y, et al. SSC resistance of super 13Cr martensitic stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (2): 17—21, 25.
- [16] BERES L. Proposed modification to schaeffler diagram for chrome equivalents and carbon for more accurate prediction of martensite content[J]. Welding Journal, 1998, 77(7): 273—276.
- 基金项目: 国家科技重大专项十二五规划课题资助项目(2011ZX05016-003); 国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAH28F03); 黑龙江省普通高等学校化工过程机械重点实验室开放课题资助项目(HJ201303)
- 收稿日期: 2012-12-05; 修订日期: 2013-04-03
- 作者简介: 张旭昀(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 油气田腐蚀与防护, 联系地址: 黑龙江省大庆市发展路 199 号东北石油大学机械学院材料系(163318), E-mail: zxydqpi@sina.com
- 通讯作者: 毕凤琴(1967—), 女, 博士, 教授, 从事材料腐蚀与防护方面的教学和研究工作, 联系地址: 黑龙江省大庆市发展路 199 号东北石油大学材料科学与工程系金属材料工程教研室(163318), E-mail: bfq698@sina.com