

铁磁材料磁记忆信号与切口宽度的相关性^{*}

王慧鹏¹, 董丽虹¹, 董世运¹, 徐滨士¹, 刘 辉²

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072; 2. 中联重科股份有限公司, 长沙 410007)

摘 要: 为探索裂纹宽度与磁记忆信号之间的关系, 以 45CrNiMoVA 钢为试验材料, 对具有不同预置切口宽度的试件进行静载拉伸试验, 并采用磁记忆检测仪检测试件表面的磁记忆信号, 研究了不同外加载荷下试件表面磁记忆信号的变化, 并对各预置切口位置处磁记忆信号梯度变化进行分析。结果表明: 随着外加载荷的增加, 试件表面磁记忆信号不断增强, 矩形槽位置处磁记忆信号梯度变化加剧, 磁记忆信号梯度值随外加载荷的增加而单调增大; 外加载荷值相同时, 磁记忆信号梯度随裂纹宽度先减小后增大, 而非简单的线性关系。

关键词: 静载拉伸; 磁记忆信号; 信号梯度; 裂纹宽度

中图分类号: TG115.284

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2014)05-0137-06

Correlation Between Magnetic Memory Signals and Width of Pre-cut Slots

WANG Hui-peng¹, DONG Li-hong¹, DONG Shi-yun¹, XU Bin-shi¹, LIU Hui²

(1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. Zoomlion Co., Ltd., Changsha 410007)

Abstract: To explore the relationship between magnetic memory signals and crack width of ferromagnetic materials, static tension tests of specimens made of 45CrNiMoVA steel with pre-cut slots of different width were performed, and magnetic memory signals of the specimens were measured by a magnetic memory apparatus. Both the variation of magnetic memory signals under different applied loads and the gradient value of magnetic signals of each slot were analyzed. The results of the study clearly showed that the magnetic memory signals of the specimen increased with increasing of applied load, and the gradients of magnetic memory signals of the pre-cut slots increased monotonically. A non-linear relationship was presented between the gradient of magnetic memory signals and the width of pre-cut slot under the identical condition of applied load. The gradients first decreased and then increased with the crack width increasing.

Key words: static tension; magnetic memory signal; signal gradient; crack width

0 引 言

再制造毛坯的质量评价及剩余寿命评估是再制造产品质量的重要保证^[1-2]。对于在服役过程中已经产生危险缺陷的零部件, 可以通过常规无损检测的方法进行剔除而不进入再制造行列; 对于那些没有发现缺陷的零部件, 仍然需要经过检测评估后方可进行再制造。

金属磁记忆检测技术无需外加磁场就能够检测出铁磁材料的应力集中部位, 是一种在早期损伤诊断极具潜力的无损检测方法^[3-4], 是再制造毛坯质量评价和剩余寿命评估的重要方法之一^[5]。目前, 国内外众多学者在进行磁记忆检测技术的检测机理和工程应用方面进行了大量研究^[6-14]。然而, 金属磁记忆检测技术的检测机理

收稿日期: 2014-07-25; **修回日期:** 2014-09-20; **基金项目:** * 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013401); 国家自然科学基金(50975283, 50975287)

作者简介: 王慧鹏(1983—), 男(汉), 江西赣州人, 博士生; **研究方向:** 磁记忆检测与寿命评估

网络出版日期: 2014-09-25 16:04; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140925.1604.003.html>

引文格式: 王慧鹏, 董丽虹, 董世运, 等. 铁磁材料磁记忆信号与切口宽度的相关性 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 137-142.

不明确,影响因素多,信号微弱,易受干扰,目前只能进行定性和半定量的检测,而要实现精确定量检测仍然非常困难。

为了更好地将金属磁记忆检测技术应用于再制造毛坯质量评价,必须明确磁记忆信号及其特征参量与再制造毛坯损伤程度的联系。文中通过对预置缺口试件进行静载拉伸试验,研究了拉伸过程中磁记忆信号与预置切口宽度之间的相互关系,对磁记忆检测技术定量化表征工件损伤程度进行了有益的探索,也为其应用于再制造质量评价打下基础。

1 方法方案

1.1 试件准备

试验材料选取 45CrNiMoVA 钢,它是一种高强度合金钢,具有较高的综合力学性能,其加工变形小,抗疲劳性能好,常用于制造轴类、活塞类等零

配件,其化学成分见表 1。其 σ_s 为 1 323 MPa, σ_b 为 1 470 MPa。试件的尺寸为 280 mm×50 mm×6 mm,各试件上等间距预置 5 个横向贯穿切口,各预置切口深度相同,均为 2.0 mm,但宽度不同,从左至右分别为 2.5、2、1.5、1 和 0.5 mm。检测起始位置距试件左端 25 mm,结束位置距右端 25 mm,检测距离为 230 mm。定义检测方向为 X 轴方向,试件宽度方向为 Y 轴方向,试件尺寸及检测方向定义见图 1。刘美全等^[15]通过仿真指出,裂纹间距大于 2 mm 时,漏磁信号随间距的变化不大,即相互之间几乎不存在影响,而文中切口间距为 50 mm,故不需考虑切口之间磁信号的相互影响。

试验之前,所有试件均采用 WZC-30 型真空热处理炉(真空度为 8×10^{-1} Pa)进行真空热处理退磁,其方法为:试件在真空热处理炉中加热至 850 ℃,保持 30 min,之后随炉冷却至室温。

表 1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental material

(w/%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
Content	0.42-0.49	0.17-0.37	0.50-0.80	≤0.03	≤0.03	0.80-1.10	1.30-1.80	0.20-0.30	0.10-0.20

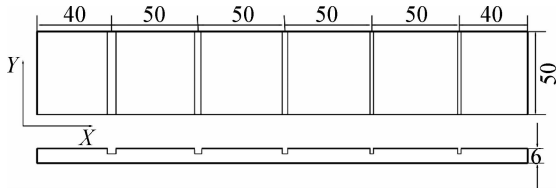


图 1 试件尺寸及检测方向示意简图

Fig. 1 Sketch map of specimens and measurement direction (Unit: mm)

1.2 试验仪器

试验在 JNT150471 型电液伺服动静万能试验机上进行,其最大静态试验力为±50 kN,示值精度±1%。磁记忆检测仪器为 EMS-2003 型智能磁记忆/涡流检测仪。检测时,将探头夹持于非磁性的三维电控平台上,由平台驱动探头运动,采集试件表面的磁记忆信号。

1.3 试验方法

进行静载拉伸之前,先检测试件表面初始磁信号,其方法为:将试件沿南北方向置于三维电控平台上,使用夹具将检测仪器探头固定于平

台,并由平台驱动使之以恒定的检测速度及提高高度采集试件表面各检测线的磁信号。

拉伸试验时,将试件竖直夹持于疲劳试验机上下夹头,以 0.5 kN/s 的速度加载,达到既定载荷时,保持 30 s 后卸载试件,再按照上述方法检测试件表面磁记忆信号。检测完毕后,继续进行静载拉伸试验。试验共加载 6 个载荷等级,分别为:6、12、18、24、30 和 36 kN。

试验在实验室中进行,检测时,试件远离铁磁性工件,环境磁场是相对恒定的地磁场。

2 结果及分析

2.1 静载拉伸过程中磁记忆信号的变化

共加工 7 个试件进行试验,从试验结果可以看出,试件信号变化规律相似,因此仅取其中一个试件进行分析。试件未加载、加载至 6、18 和 36 kN 时 4 级典型载荷值下表面漏磁场 $H_p(y)$ 信号见图 2。

从图 2 可以看出,未加载时(图 2(a)),由于经过热处理退磁,试件表面磁记忆信号幅值较

小,整个试件表面信号幅值在 $-50\sim 20\text{ A/m}$,处于地磁场范围内,信号杂乱且存在一定波动,但仔细观察仍可以发现在预置切口位置处存在一定的梯度变化。其中宽度 0.5 mm 切口信号不明显,无法辨认,若非预先知道,将难以发现该处缺陷的存在;而其余4处变化较为明显,具有应力集中/缺陷位置的磁记忆信号变化特征,其信号幅值由小变大,梯度为正值。

施加外加载荷后(图 2(b)),信号具有明显的规律,信号幅值整体显著增加,在 $-200\sim 150\text{ A/m}$ 之间,沿着检测方向(X 方向),试件呈现条状磁体的宏观磁有序特征,左侧磁极性为正,右侧磁极性

为负。此时,在5个预置切口位置处信号均有明显梯度变化,可以清晰地反映出切口的存在。在切口处信号幅值呈现下降“台阶”,其磁场梯度为负值。随着载荷值的不断增加(图 2(c)(d)),信号幅值继续增大,切口位置处信号梯度变化亦随之加剧。信号整体变化特征与之前基本一致。此外,从图形上可以看出,检测长度(X 方向)相同时,在试件宽度方向(Y 方向)上,越靠近检测边缘时,信号幅值越大,信号幅值变化范围也越大,于是信号在检测起始位置呈现向下凹陷形状,在检测结束位置则呈现向上突起形状。这是由于试件的边缘效应引起的。

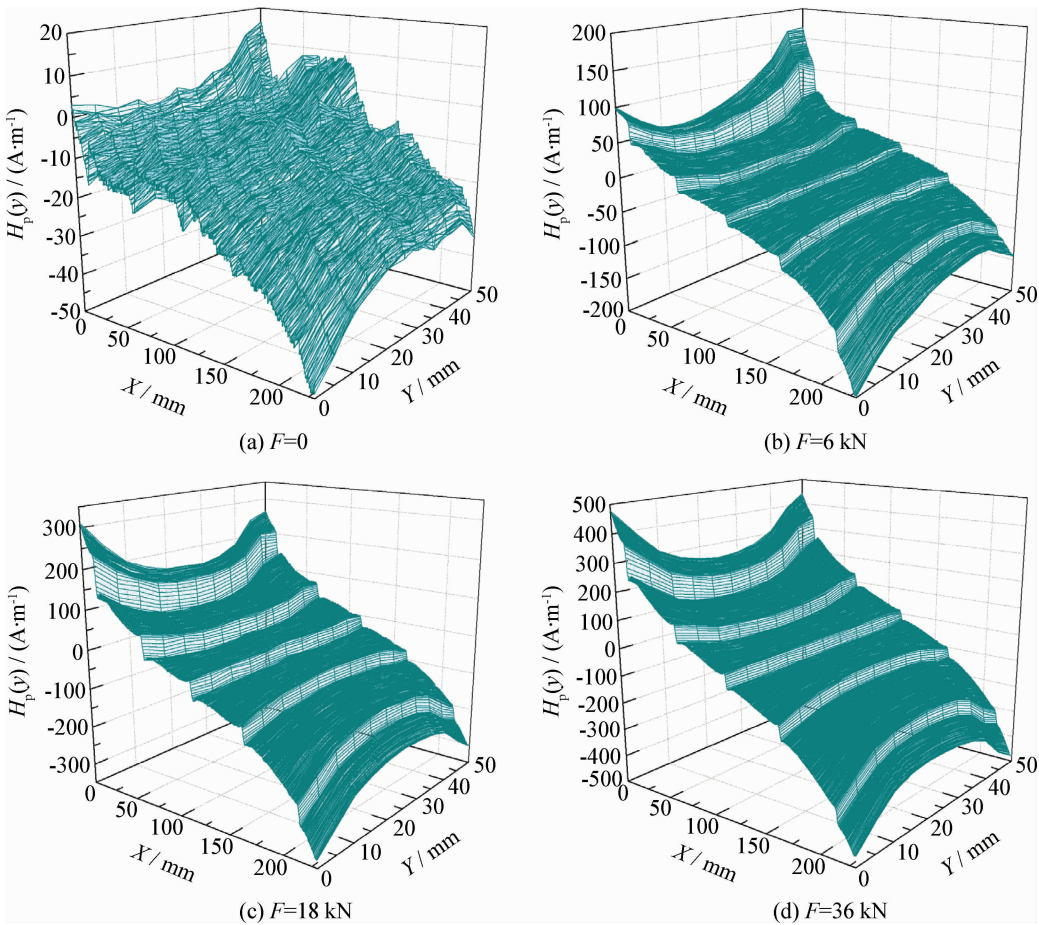


图 2 试件表面 $H_p(y)$ 信号随外加载荷的变化

Fig. 2 $H_p(y)$ signals of specimen under different applied loads

初始状态下,试件经真空热处理退磁,其内部磁畴结构的磁矩取向随机分布,对外作用相互抵消,此后仅被极微弱的地磁场磁化,因而试件宏观上显示极微弱的磁性。由于试件在各预置切口位置处不连续,切口被空气“填充”,因此试件内磁力线通路在切口位置处被截断,部分磁通

从切口逸出至空气中,越过切口上方后再进入工件,形成漏磁场。由于空气的磁导率远小于试件材料的磁导率,因此切口位置处的磁场强度增大,表现为试件表面的磁记忆信号在切口位置附近出现异变峰。由于地磁场是弱磁场,因此试件仅被地磁场磁化时,试件磁性很弱,其表面的漏

磁场亦很小,而各切口宽度不一样而使得泄露至表面的漏磁场强度不一样,导致各位置处的梯度变化情况也不一样。

施加载荷以后在磁致伸缩逆效应和压磁效应的作用下,试件的弹性能发生变化,磁畴结构按照“畴壁运动(可逆)→畴壁兼并(不可逆)→磁畴转动(部分可逆)”的顺序变化^[16],试件初始磁畴结构杂散分布的状态被打破,逐步向有序状态转变。由于应力作用于工件时,远离切口处的均匀区域中,磁化方向与应力致磁场方向一致的磁畴变大,而磁化方向与其方向相反的磁畴则变小,使畴壁移向磁畴变小的磁畴区域,磁畴结构发生兼并;而在切口附近区域内,由于切口的存在,对畴壁造成钉扎作用,导致畴壁无法运动,但磁畴结构的磁矩要转向应力致磁场的方向,因此,在磁畴结构磁矩与应力致磁场的相互作用下,切口位置处的能量平衡被打破,在该处形成磁畴固定节点。试验中试件一直处于弹性变化阶段,因此试验中,畴壁兼并过程一直在进行,而磁畴向拉应力方向转动的不可逆部分也越来越大。故随着轴向拉应力的增大,磁畴结构的磁矩不断转向拉伸应力的方向,试件的自磁化程度不断提高,磁极性不断增强。内部轴向磁场强度不断增大,各切口位置处漏磁也不断增强,表现为在试验过程中,试件表面磁记忆信号幅值不断增大,切口位置处磁记忆信号梯度变化越来越大,信号特征变化更加明显。

2.2 磁记忆信号与预置切口宽度之间关系

从图2可以看出,虽然各检测线上信号除数值不同之外,但其变化规律相似。为了能够进一步对裂纹宽度与磁记忆信号之间的对应关系进行分析,以试件中心检测线为对象进行分析,不同外加载荷时的磁记忆信号如图3所示。试件初始状态下的磁信号远小于加载后的磁信号,故可以认为初始磁信号不会对加载后的信号产生影响。

磁记忆检测技术通过信号梯度变化来实现工件危险部位的评判,其梯度变化值 K 是由如下公式实现的:

$$K = \frac{|\Delta H_p(y)|}{\Delta l} \quad (1)$$

其中, $\Delta H_p(y)$ 是损伤区域 $H_p(y)$ 信号的峰谷值差, Δl 是峰谷值之间的距离。因此,研究 K 之变化之前,先分别对 $\Delta H_p(y)$ 和 Δl 进行分析。

图4是不同外加载荷下各切口位置处信号极值差 $\Delta H_p(y)$ 的变化。可以看出,各切口位置处 $\Delta H_p(y)$ 的变化规律是一致的,随着外加载荷的增加,各切口位置处 $\Delta H_p(y)$ 均线性增加;但是载荷相同时, $\Delta H_p(y)$ 与切口宽度之间的关系则较为复杂,两者之间并不存在线性关系,其中宽度0.5 mm和1.0 mm的 $\Delta H_p(y)$ 值大小基本相同,且0.5 mm的略大一些;宽度为1.5 mm切口位置处的 $\Delta H_p(y)$ 值是所有切口中最小的,整个检测过程中始终小于其它宽度处的值;宽度为2.0 mm切口处的 $\Delta H_p(y)$ 与宽度为0.5 mm和1.0 mm处的存在“交叉”,在6 kN和12 kN时略小于后者,而18 kN时则大小基本相当,此后的几个载荷值时则是大于后者,且随着外加载荷的增大,两者之间的差值也增加;宽度为2.5 mm切口处的 $\Delta H_p(y)$ 是所有中最大的,且其值明显大于其它切口处的值。

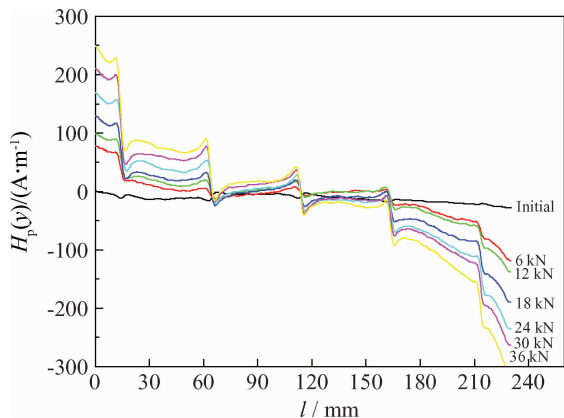


图3 试件表面中心线 $H_p(y)$ 信号随载荷的变化

Fig. 3 $H_p(y)$ signals on the centre line of specimen under different applied loads

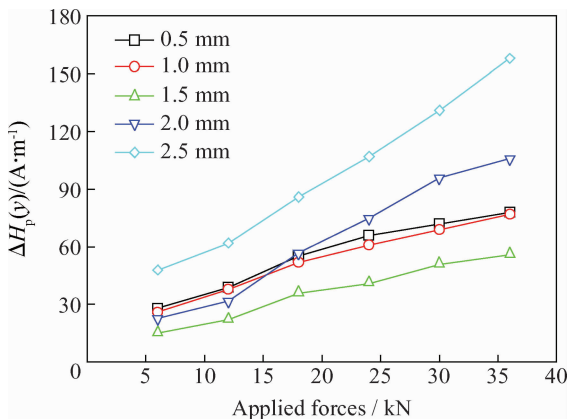


图4 不同载荷下各切口位置处的 $\Delta H_p(y)$

Fig. 4 $\Delta H_p(y)$ of each slot under different applied loads

图 5 所示是 $\Delta H_p(y)$ 与切口宽度之间的关系。从图中可以清晰地看出, $\Delta H_p(y)$ 并非随着切口宽度的增加单调增加, 而是先减小再增大。此外, 在宽度为 1.5 mm 以后, 随着宽度的增加, $\Delta H_p(y)$ 是线性增大的。

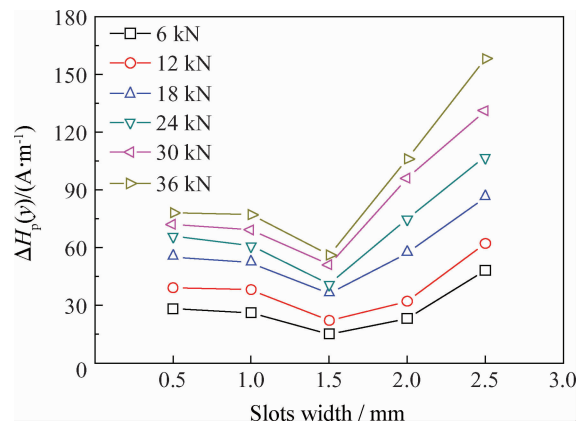


图 5 切口宽度与 $\Delta H_p(y)$ 之间关系

Fig. 5 Relationship between $\Delta H_p(y)$ and width of slots

表 2 所示是不同载荷时各切口处信号峰谷值之间距离 Δl 的变化。从表 2 中可以看出, 各切口位置处, 随着外加载荷的增大, Δl 呈现出相同的变化规律, 即先减小, 而后保持稳定, 尤其是从第 4 次加载 24 kN 后, 各次加载时的 Δl 是稳定的, 其值按照切口宽度排列依次为 4.4、3.9、3.2、4.6 和 3.9 mm。从数值上可以看出, 随着切口宽度的增加, Δl 并非单调变化的, 而是先减小后增大, 而后再减小的关系。

表 2 不同载荷时各切口位置处的 Δl					
Table 2 Δl of each slot under different applied loads					
Load/kN	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm
6	4.6	4.3	3.8	4.6	4.6
12	4.4	4.2	3.7	4.2	4.2
18	4.4	4.2	3.5	4.6	3.9
24	4.4	3.9	3.2	4.6	3.9
30	4.4	3.9	3.2	4.6	3.9
36	4.4	3.9	3.2	4.6	3.9

图 6 所示是按照公式(1)求解的各切口位置处不同载荷下的 K 值。

从图 6 可以看出, 各切口处磁记忆信号的梯度值 K 与外加载荷具有较好的线性关系, 即随着

载荷的增加, K 值线性增大。但对比相同载荷时各切口位置处的 K 值, 可以发现 K 值与切口宽度之间并不存在明显的对应关系。

可以看出, $H_p(y)$ 与裂纹宽度有复杂的关系, 且其梯度变化与裂纹宽度亦非简单的线性关系, 而是随着裂纹宽度的增大而先减小后增加。因此, 若要定量评估工件应力损伤程度, 必须通过更多特征参量, 并借助其它方法来实现。

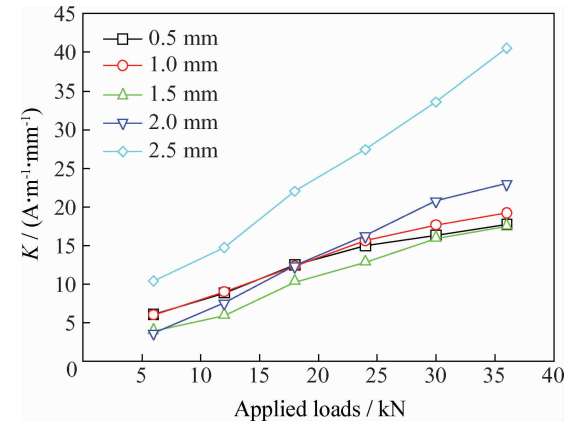


图 6 不同载荷时各切口位置处的信号梯度

Fig. 6 Gradients of each slot under different applied loads

3 结 论

(1) 随着外加载荷的增大, 试件表面的磁记忆信号不断增大, 切口位置处的梯度变化不断增强。

(2) 各切口位置处的 $\Delta H_p(y)$ 随着外加载荷的增加而线性增大, Δl 则逐渐趋于稳定, 梯度变化值 K 亦随外加载荷的增加而单调增大。

(3) 裂纹深度相同时, 各切口处的 $\Delta H_p(y)$ 、 Δl 和梯度变化值 K 与裂纹宽度并非简单的线性关系, 而是随着裂纹宽度的增加, 呈现先减小后增大的变化规律。

参考文献

[1] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 136-137.

[2] 徐滨士. 绿色再制造工程的发展现状和未来展望 [J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 4-9.

[3] Dubov A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory [J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39 (9/10): 401-402.

[4] Dubov A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory [J]. Welding in the World, 2002, 46(SPEC): 317-320.

[5] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.

[6] 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.

[7] Dong L H, Xu B S, Dong S Y, et al. Stress dependence of the spontaneous stray field signals of ferromagnetic steel [J]. NDT&E International, 2009, 42: 323-327.

[8] Wang Z D, Yao K, Den B, et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration [J]. NDT&E International, 2010, 43: 513-518.

[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: 413-416.

[10] 颜廷俊, 张杰东, 冯国栋, 等. 基于金属磁记忆的热采湿蒸汽发生器炉管缺陷早期检测 [J]. 材料工程, 2011, 9: 68-71.

[11] 董丽虹, 徐滨士, 王慧鹏, 等. 应力诱发铁磁材料预制切口产生的二维弱磁场信号特征研究 [J]. 材料工程, 2011, 12: 16-19.

[12] 郭鹏举, 关卫和, 陈学东, 等. 低合金钢弹塑性变形状态的磁记忆检测 [J]. 无损检测, 2012, 34(5): 25-27.

[13] Leng J C, Xu M Q, Zhou G Q, et al. Effect of initial remanent states on the variation of magnetic memory signals [J]. NDT&E International, 2012, 52: 23-27.

[14] Xu M X, Xu M Q, Li J W, et al. Discuss on using Jiles-Atherton theory for charactering magnetic memory effect [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112: 093902.

[15] 刘美全, 徐章遂. 基于漏磁的表面裂纹识别及评估 [J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(6): 575-579.

[16] 钟文定. 铁磁学(中册)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 180-187.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号
装甲兵工程学院再制造技术重点实验室
Tel: (010) 6671 8540
E-mail: wanghuipeng1983@126.com

100072

(责任编辑: 陈茜)

• 学术动态 •

《工程陶瓷先进加工与质量控制技术》正式出版

工程陶瓷材料由于其优异的耐磨损、耐腐蚀、抗高温、低密度等性能,在工业领域得到了广泛的应用,并被公认为 21 世纪最有活力的新型材料之一。但由于陶瓷的硬脆特性,使其成为典型的难加工材料,从而成为阻碍其发展的“瓶颈”。

《工程陶瓷先进加工与质量控制技术》为国内外第一部系统阐述近 20 年来结构陶瓷及陶瓷涂层加工与质量控制先进技术的专著。2012 年获得国家科学技术学术出版基金的资助,于 2014 年 5 月正式出版。该书共分 8 章,包括:工程陶瓷材料概述、工程陶瓷材料的传统加工技术概述、工程陶瓷的金刚石刀具高效加工新技术、工程陶瓷的光整加工与超精密加工技术、工程陶瓷的辅助能量法加工、工程陶瓷的高能束流加工、工程陶瓷的电加工和工程陶瓷加工的质量检测与控制等。该书不仅可为陶瓷零件的制造提供理论和技术基础,还可为表面工程与再制造工作者开展陶瓷涂层加工的研究提供参考。

该书主编为装甲兵工程学院田欣利教授、华侨大学徐西鹏教授、浙江工业大学袁巨龙教授、湖南大学邓朝晖教授、天津大学林彬教授等,主审为山东大学艾兴院士和天津大学于思远教授。编著者均多年从事陶瓷加工的研究工作,为国内该领域具有较大影响的中青年专家。书中的很多内容都是作者多年的研究成果,包括数十项已授权国家发明专利,其中有相当一部分成果已应用于生产。

(本刊编辑部 供稿)