

铁磁材料制造工艺对金属磁记忆信号的影响*

董丽虹¹, 徐滨士¹, 董世运¹, 曲美霞¹, 王丹²

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 2. 海军装备研究院, 北京 100073)

摘要: 在采用金属磁记忆信号对铁磁材料进行损伤评价时, 为排除制造工艺引入的冗余干扰信号, 本研究针对两种铁磁性特种钢, 采用 EMS2003 型金属磁记忆仪检测了锻造、铣削、磨削加工及热处理工艺后试件表面磁记忆信号的变化, 并比较了交流电退磁与热处理退磁不同的退磁效果。结果显示: 各机加工工序将引入不同形式的外载荷, 导致磁记忆信号呈无规律杂乱分布, 磨削工序引入外加激励磁场, 产生强烈的干扰信号。经过交流电退磁后, 试件表面依然存在残余磁场, 而采用超过铁磁材料居里点的高温热处理退磁可以获得纯净的磁记忆信号。这一结果可以为利用磁记忆信号对铁磁材料进行损伤评价提供基础实验依据。

关键词: 金属磁记忆; 锻造; 铣削; 磨削; 交流电退磁; 热处理退磁

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)04-0082-05

Influence of Manufacturing Process on Metal Magnetic Memory Signals in Ferromagnetic Materials

DONG Li-hong¹, XU Bin-shi¹, DONG Shi-yun¹, WANG Dan²

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. Navy Academy of Armament, Beijing 100073)

Abstract: In order to remove the redundant disturbing signals originating from manufacturing process for evaluating damage degree of ferromagnetic materials by metal magnetic memory signals, the variation of metal magnetic memory signals of 18CrNiWA steel, which measured by a EMS2003 metal magnetic memory apparatus, were investigated after the processes of forging, milling, grinding and heat treatment in this paper. Moreover, the demagnetizing effect of alternating current process was compared with that of heat treatment processes. The results showed that different types of external load were introduced during different machining process, leading to the generation of random initial magnetic signals. Especially during the process of grinding strong disturbing magnetic signals occurred due to the existence of excitation magnetic field. A residual magnetic field still existed on the surface of ferromagnetic specimen even after alternating current demagnetization, while a clean initial magnetic state could be obtained after heat treatment demagnetization which maximum temperature exceeded Curie point of ferromagnetic materials. This study can provide fundamental data for damage evaluation of ferromagnetic materials by using metal magnetic memory signals.

Key words: metal magnetic memory; forging; milling; grinding; alternating current demagnetization; heat treatment demagnetization

0 引言

铁磁材料作为一种强磁性材料, 由于具有良好的综合性能而广泛用于工程领域, 大量机械装

的关键零部件都由铁磁材料制成^[1-3]。在其制造及服役过程中, 铁磁材料表面产生自发的杂散磁场信号, 即金属磁记忆信号^[4,5], 利用该信号可以评价铁磁结构的损伤程度, 这一技术又称为金属磁记忆技术^[6-9]。

在以往的研究中, 应用金属磁记忆技术进行铁磁构件的损伤评价时, 只是针对服役过程进行^[10-15],

收稿日期: 2010-04-27; 修回日期: 2010-05-25

基金项目: *国家自然科学基金重点项目 (50735006); 国家自然科学基金面上项目 (50975283, 50975287)

作者简介: 董丽虹 (1972—), 女(汉), 河北新乐人, 讲师, 博士。

而从未关注铁磁构件在制造过程中,不同加工工艺对杂散磁场信号的影响。实质上,金属磁记忆信号是铁磁材料在地磁场中自发产生的杂散磁场信号,它会受到多种因素的干扰,尤其铁磁构件在制造过程中要经过多道工序,在各工序中将引入不同的力、热、磁等因素,使得加工成形后的铁磁构件在服役前即具有复杂的初始杂散磁场信号分布,这一初始杂散磁场信号会干扰甚至遮盖服役过程中损伤累积导致的杂散磁场信号变化。

为排除制造过程引入的冗余干扰信号,提高损伤评价的准确度,并探索金属磁记忆信号定量化的途径,文中研究分析了铁磁材料加工过程中承受锻造、铣削、磨削、交流电退磁工艺、热处理工艺后表面杂磁记忆信号的变化,为推动金属磁记忆技术的工程应用提供基础试验依据。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验材料选用 18CrNiWA 钢、45CrNiMoVA 钢两种铁磁材料,其化学成分见表 1。其原材料为棒钢,直径分别为 30 mm 和 45 mm。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical constitution of tested specimens (w/%)

材 料	C	Si	Mn	P	S
18CrNiWA	0.13~0.19	0.17~0.37	0.25~0.55	≤0.03	≤0.04
45CrNiMoVA	0.42~0.49	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.03	≤0.03
材 料	Cr	Ni	Mo	V	W
18CrNiWA	1.35~1.65	4.0~4.5	0	0	0.8~1.2
45CrNiMoVA	0.8~1.1	1.3~1.8	0.2~0.3	0.1~0.2	0

1.2 试件加工过程及检测仪器

原材料首先经过锻压工序制成尺寸 280 mm × 65 mm × 15 mm 的板状坯料,再经过铣床加工,制成尺寸为 245 mm × 55 mm × 11 mm 的板料;最后经磨削加工成尺寸 225 mm × 30 mm × 5 mm 的标准静载拉伸试件。选取其中一组试件,采用 TC-1 型交流电退磁器进行交流电退磁,作为对比,选取另外一组试件,采用热处理炉分别进行两级温度的热处理,加热温度分别为 600 °C 和 800 °C,保温 0.5 h,随炉冷却。

在各道加工工序后,选取板料的同一表面,在

板料中心沿轴线方向设置一条水平线,其表面杂散磁场信号的测量使用 EMS-2003 型金属磁记忆诊断仪。为提高检测精度及检测结果的可重复性,检测时板料沿南北方向固定放置于非磁性三维扫描平台上,检测探头由三维扫描架控制移动,精确采集检测线的 $H_p(y)$ 磁信号值(铁磁材料表面杂散磁场信号的法向分量)。

2 试验结果及分析

2.1 锻造加工对 $H_p(y)$ 信号的影响

棒钢原材料经锻造加工制成板状坯料,坯料表面粗糙,有大量氧化皮,呈现少许波浪变形。随机选取两种板料各一件,检测表面水平测量线的 $H_p(y)$ 信号如图 1 所示。

由图可以看出,经锻造加工后板状坯料表面的 $H_p(y)$ 信号幅值范围 -130 A/m ~ +230 A/m,信号幅值较小,但分布杂乱无规律,并且不同板料的信号随机分布,差异很大。分析认为,锻造属于热加工工序,在较高的锻造温度范围内进行。锻造时锤头反复高速锤击铁磁材料表面,材料将承受巨大的冲击力。而金属磁记忆技术主要是基于力磁效应,冲击力会导致磁畴结构发生变化,进而影响铁磁材料的磁性能,引起表面杂散磁场信号的变化。由于锻造时作用在板料上的冲击力不均匀,导致该工序后板料表面产生杂乱的 $H_p(y)$ 信号。

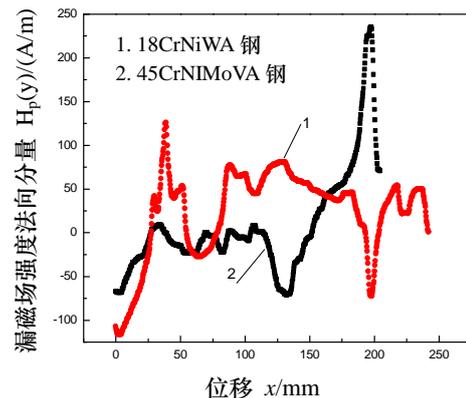


图 1 锻造后坯料的磁信号

Fig.1 Magnetic signals after forging

2.2 铣削加工对 $H_p(y)$ 信号的影响

锻造后的板状坯料经过铣床铣削加工后试件表面较粗糙,可见铣刀留下的条痕。再次检测两个试件表面中部的检测线,其 $H_p(y)$ 信号分布如图 2 所示。

经铣削加工后,两种坯料测量线的杂散磁场信号相比较锻造后的信号发生较大改变,各试件的磁信号数值在 $-217\text{ A/m}\sim+98\text{ A/m}$ 范围内。铣削时,铣刀对板料施加切削力,相对锻造冲击力而言,更为均匀,即使测量板料背面对应位置的检测线,其磁信号数值虽略有差异,但分布规律基本相同。表明铣刀施加的切削力在整个试件厚度上产生影响。铣削力引起的 $H_p(y)$ 信号相对锻造后的信号杂乱程度减弱,两种材料试件表面信号仍呈无规律分布。

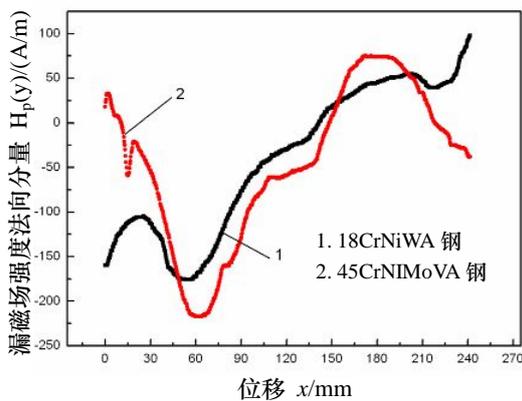


图2 初步铣削加工后板料表面的 $H_p(y)$ 信号

Fig.2 $H_p(y)$ signals measured after rough mill

2.3 磨削加工及交流电退磁工艺对 $H_p(y)$ 信号的影响

试件最后经磨削加工成形。试件在磨床上加工时,一方面承受磨削力,磨削力会导致磁性能的变化,另一方面由于加工时磨床底盘上的电磁铁吸牢试件,试件被电磁铁磁化,检测到试件的磁信号发生大幅度改变。磨床上自带有交流退磁器,磨削加工成形后,不经退磁器退磁与经过退磁器反复退磁的检测结果如图3所示。

图3(a)显示,试件经磨削加工后, $H_p(y)$ 值异常增大,远较铣削加工后的数值强烈, $H_p(y)$ 信号幅值范围达 $-1\ 800\text{ A/m}\sim+1\ 000\text{ A/m}$,磁信号曲线呈现规则的波浪形变化。分析产生的原因,可能是由于磨削工艺中引入外加激励磁场的缘故。在磨削加工时,磨床附带电磁铁吸附试件,对试件造成强烈磁化,导致试件表面产生大幅值的 $H_p(y)$ 信号,显著大于单纯外载荷引起的 $H_p(y)$ 信号变化,并且电磁铁磁化试件引起的磁曲线呈现规则的波峰波谷分布特征。这一检测结果表明,采用金属磁记忆技术检测的铁磁试件在加工或使用过程

中,一定要避免受到外加激励磁场的磁化,外磁场磁化产生 $H_p(y)$ 信号过于强烈,将完全遮盖载荷导致的自发磁化信息。

对磨削加工后的试件采用TC-1型交流电退磁器进行反复多次退磁后,检测结果如图3(b)所示。由图可见,交流电退磁后, $H_p(y)$ 信号显著减弱,其幅值范围 $-115\text{ A/m}\sim+65\text{ A/m}$,高于地磁场信号,磁曲线还是呈现波峰波谷的变化,不能完全净化磨削工序引入的干扰磁信号。

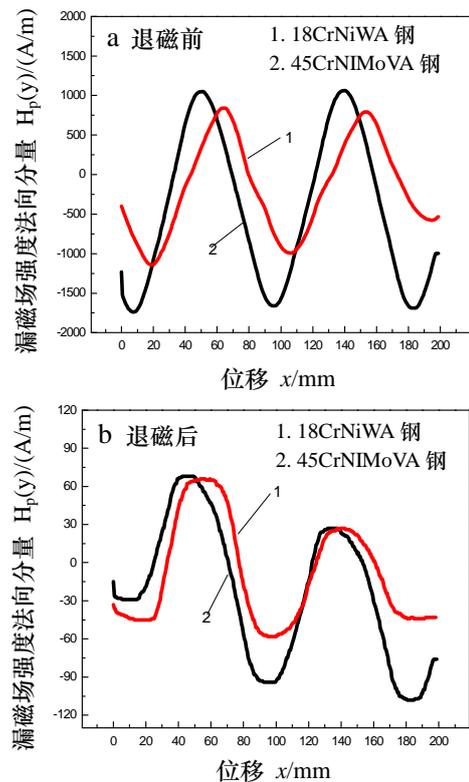


图3 磨削加工的试件退磁前后表面磁信号

Fig.3 Magnetic signals before and after demagnetization of grinded specimens

2.4 热处理工艺对 $H_p(y)$ 信号的影响

作为对比,选取另一组磨削加工后未经交流电退磁处理的板状试件,采用热处理炉分别对其进行热处理。两次热处理后按照相同的检测方式检测试件表面测量线的 $H_p(y)$ 信号。检测结果如图4所示。

由图可见,经 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后, $H_p(y)$ 信号幅值虽然显著降低,但并不纯净,磁曲线依然存在波峰波谷的蜷曲现象。18CrNiWA 钢磁信号幅值显著小于 45CrNiMoVA 钢,表明温度对 18CrNiWA

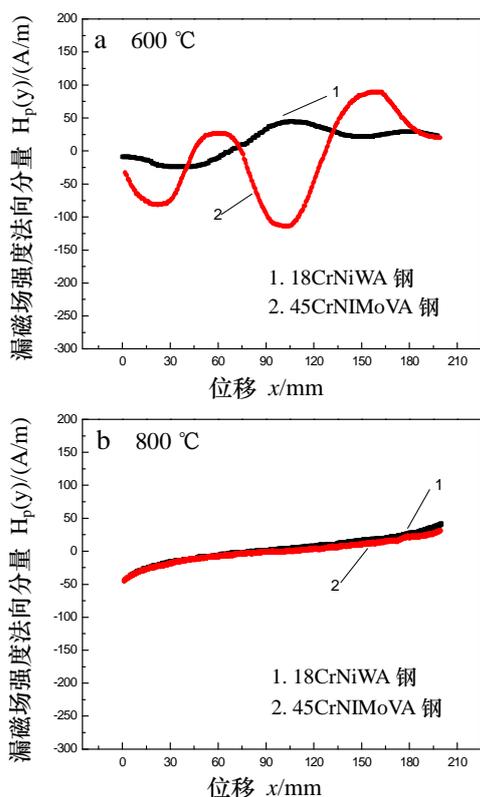


图4 两级温度真空热处理后板料表面磁记忆信号变化
Fig.4 Variations of magnetic signals on the surface of specimens after two levels heat treatment

钢的磁信号影响更显著; 而经 800°C 热处理的试件, 两种材料试件的测量线中段呈现良好的线性, 信号纯净, $H_p(y)$ 值在 $\pm 40\text{A/m}$ 范围内, 与地磁场信号同量级, 消除了锻造、铣削、磨削加工导致的冗杂信号。

加热温度 600°C 的热处理相当于工程实际中应用的去应力退火工艺, 用来消除工件内的残余应力。这一检测结果表明, 对铁磁构件进行去应力退火可以显著降低磨削加工引入的强烈干扰磁信号, 但铁磁材料表面依然有剩磁存在, 并且保留了磨削加工导致的磁曲线具有波峰波谷的分布特征; 而 800°C 的退火热处理工艺, 其最高的加热温度超过了铁磁材料的居里点, 加热升温过程中, 铁磁材料将由铁磁性转变为顺磁性, 在随后的冷却过程中将仅受地磁场磁化, 能够获得良好的退磁效果, 试件表面的初始磁信号非常纯净。

这一试验结果表明, 如果铁磁试件经受的最终热处理温度高于其居里点温度, 试件就会获得纯净的初始磁状态, 在服役过程中, 由于损伤而导致的

杂散磁场信号的变化就易于显现和分析。在工程实际中承受重要载荷的铁磁构件, 为保证其优良的综合性能, 常要经受调质热处理, 该热处理工艺的最高温度超过铁磁材料的居里点温度, 冷却到室温后, 试件表面的磁信号将被净化, 非常适宜采用金属磁记忆技术监测其服役过程中损伤程度的累积。这一研究结论对于金属磁记忆技术在工程领域的推广应用具有重要的指导意义。

研究结果还显示: 铁磁材料的化学成分不同, 在制造加工过程中对外加载荷及温度会呈现不同的反映。在下一步的工作中还需深入研究材料成分与金属磁记忆信号的相关性。

3 结论

(1) 铁磁试件在加工制造过程中, 经历的每一道加工工序都会引入不同形式、大小的外载荷施加到试件上, 将导致试件表面产生杂乱的初始信号。

(2) 制造加工工序中引入外加激励磁场时, 将会产生强烈的初始磁信号, 干扰变形、破坏等过程自发生成的磁信号, 导致识别磁记忆信号变化规律困难。

(3) 交流电退磁工艺和去应力退火热处理工艺不能完全消除铁磁试件制造过程产生的初始磁信号, 而超过材料居里点温度的高温热处理后可以获得纯净的初始磁状态。

(4) 研究不同的制造工艺对铁磁材料表面杂散磁场信号的影响可以为加快金属磁记忆技术的工程应用提供理论指导。

参考文献:

- [1] Tadeusz Kulik, 梁秀兵, Jaro aw Ferenc, 等. 纳米晶铁钴基软磁材料的研究 [J]. 中国表面工程. 2004, (5): 1-4.
- [2] Gilanyi A, Morishita K, Sukegawa T, et al. Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems [J]. Fusion Engineering and Design. 1998, 42: 485-491.
- [3] Pierluigi Colombi, Carlo Poggi. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates [J]. Construction and Building

- Materials, 2007, 20 (1-2): 22-33.
- [4] Dong Li-hong, Xu Bin-shi, Dong Shi-yun, et al. Variation of stress-induced magnetic signals during tensile testing of ferromagnetic steels [J]. NDT&E International. 2008, 41: 184-189.
- [5] 尹大伟, 徐滨士, 董世运, 等. 中碳钢疲劳试验的磁记忆检测 [J]. 机械工程学报. 2007, 43(3): 60-65.
- [6] 董世运, 徐滨士, 董丽虹, 等. 金属磁记忆检测技术用于再制造毛坯寿命预测的试验研究 [J]. 中国表面工程. 2006, 19(5): 71-75.
- [7] Doubov 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: 317-320.
- [8] Li Lu-ming, Huang Song-ling, Wang Xiao-feng, et al. Stress induced magnetic field abnormality [J]. Trans. Nonferrous. Met. Soc. 2003, 13(1): 6-9.
- [9] Doubov A A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect [J]. Welding in the world. 1998, 41: 196-198.
- [10] 任吉林, 郭冠华, 宋凯. 磁记忆检测技术在飞机起落架检测中的应用 [J]. 无损检测. 2002, 24(8): 346-348.
- [11] 任吉林, 宋凯, 朱辉. 磁记忆检测技术在汽轮机构件检测中的应用 [J]. 华北电力技术. 2003, (6): 38-41.
- [12] 万升云, 熊腊森. 磁记忆技术在铸钢件检测中的应用研究 [J]. 铸造技术, 2006, 27(12): 1289-1292.
- [13] 盛民, 林俊明. 金属磁记忆诊断技术及其对电站高温高压螺栓的检测 [J]. 山东电力技术, 2002(6): 49-51.
- [14] 池永滨, 刘宇哲, 胡先龙, 等. 汽轮机叶片金属磁记忆诊断技术 [J]. 无损检测. 2002, 24(10): 440-442.
- [15] 戴光, 吴磊, 王文江. 抽油机井油管螺纹的磁记忆检测技术 [J]. 大庆石油学院学报. 2005, 29(1): 61-63.

作者地址: 北京市丰台区长辛店杜家坎 21 号 100072
 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室
 Tel: (010) 6671 8540
 E-mail: lihong.dong@126.com

(上接第 81 页)

长时间浸泡 (2 h) 在清洗剂中, 渗铝层会变薄; 当渗铝层表面有硅酸盐涂层包覆时, 在浸泡时间 2 h 内, 清洗剂对渗铝层无影响。硅酸盐涂层在实验时间内能有效阻挡酸液对里层的腐蚀。

5 结论

(1) 研制的除油、除锈二合一清洗剂, 添加了一定量的磷酸、络合剂和缓蚀剂, 除锈效果好, 对基体渗铝层的影响小。

(2) 清洗剂中添加了酒精和表面活性剂 LD, 增加了清洗剂的除油效果, 在常温 (5~25 °C) 条件下, 清洗时浸泡时间不超过 60 min。试件取出后, 用自来水洗去表面上的清洗液, 即可达到清洗要求。

参考文献:

- [1] 杨小林, 徐谨. 不锈钢氧化皮常温快速清洗液的研制 [J]. 化学工程师, 2004, (10): 61-62.
- [2] 杜风云. 新型多功能除锈剂的研制 [J]. 河北化工, 2004, (3): 32-33.
- [3] 郭良生, 黄霓裳. 钢铁室温除油除锈二合一处理剂 [J]. 材料保护, 1992, 25(2): 35-37.
- [4] 木冠南, 赵天培. 盐酸介质中各类表面活性剂对铝的缓蚀作用 [J]. 材料保护, 1992, 25(2): 37-38.
- [5] 吴双成. 钢铁常温除油除锈液 [J]. 表面技术, 1997, 26(6): 48.
- [6] 金炯福. 多功能水溶性除锈防锈剂的研制与应用 [J]. 化工之友, 1996, (3): 32.
- [7] 李金桂, 郑家焱. 表面工程技术和缓蚀剂 [M]. 北京. 中国石化出版社, 2007.
- [8] 黄魁元. 磷酸的腐蚀特性及缓蚀剂 [J]. 化学清洗, 1998, 14(1): 28-29.
- [9] 孙小红. 多功能酸洗缓蚀剂 Lan-926 与 Lan-826 缓蚀性能的对比研究 [J]. 清洗世界, 2006, 22(11): 1-4.
- [10] 王业飞, 李继勇. 高矿化度条件下应用的表面活性剂驱油体系 [J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(1): 67-69.
- [11] 肖楚民, 张永祺. 铝在水-乙醇混合体系中被氨基磺酸腐蚀的腐蚀速率的研究 [J]. 广东有色金属报, 1994, 4(1): 60-64.

作者地址: 四川彭州 35 信箱技术中心 611936
 Tel: 134 3833 5592
 E-mail: voter.huang@tom.com (黄选民)