

应力对漏磁信号的影响

郭欣, 张卫民

(北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要:根据最新力磁理论,使用微型霍尔探头对 R3 碳钢进行漏磁检测。分析了在弱磁场和强磁场下施加应力后材料的漏磁信号变化。指出残余应力作用下中碳钢的漏磁信号会发生剧烈变化以及应力和漏磁信号之间的联系。预言了对应力集中进行漏磁检测的可行性。

关键词:漏磁检测;残余应力;磁化率;霍尔元件

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)08-0479-03

The Effect of Stress for Magnetic Flux Leakage Signal

GUO Xin, ZHANG Wei-min

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the lately force magnetic theory, tiny Holl probe was used to practice magnetic flux leakage(MFL) testing on R3 middle-carbon steel. Experiments were proceeded under low and high MFL signal's change after stress being applied. The significant effect of residual stress on MFL signals was pointd out, the relationship between residual stress and MFL signal was pointed out also. Experiments showed that it is possible to test the stress concentration with the above mentioned method.

Keywords: Magnetic flux leakage testing; Residential stress; Magnetic permeability; Holl element

铁磁性材料的漏磁检测相对于其他无损检测方法有很多优点,如设备简单经济、检测速度快、检测深度较大、对内部缺陷有较高检测灵敏度、操作简单以及受人为操作影响小等。但是漏磁检测过程受各种因素的影响较大,如应力情况、励磁强度和探头提离值等。铁磁工件因在加工成型或使用过程中受力,将在其内部产生应力集中。根据现有理论,应力会改变材料内部闭合磁畴转向,向外部空间泄漏磁力线,若泄漏磁力线的强度很大,可能会产生明显的叠加并影响漏磁信号的检出,应该对其进行分析并补偿。

1 应力-漏磁理论

应力对磁场活动的影响如下。

(1) 在低外加磁场情况下,晶胞有磁场各向异

性,磁导率 μ 随晶胞几何上的磁敏感方向不同,磁化率沿晶体易导磁轴为最大。对于铁晶系来说,如果晶体按照优势方向堆积,将生成可观的导磁轴,产生宏观多晶磁各向异性,或者宏观导磁轴^[1]。多数的钢材都是磁各向异性的,以管道为例,管道堆积磁导轴沿轴向,堆积磁导轴的产生是应力和晶体导磁方向综合作用的结果^[2]。

根据磁偶极子模型,磁荷密度和磁化率成正比, $\chi m = \mu - 1$;另外根据磁偶极子理论, H 正比于 σ ,于是可知 H 和 μ 成正比;如果应力改变磁化率,则有可能改变空间漏磁场。笔者研究的是拉应力下漏磁场增加的情况。

(2) 施加强磁场时(>20 kA/M),磁化强度随应力增大呈变小的趋势。这是由于在强磁场情况下,磁场的改变将仅仅是磁向量旋转作用的结果^[3]。

2 检测系统设计

2.1 硬件系统设计

设计的漏磁检测系统硬件框图见图1。

收稿日期: 2006-02-17

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3052014)

作者简介: 郭欣(1981—),男,硕士,从事无损检测工作研究。

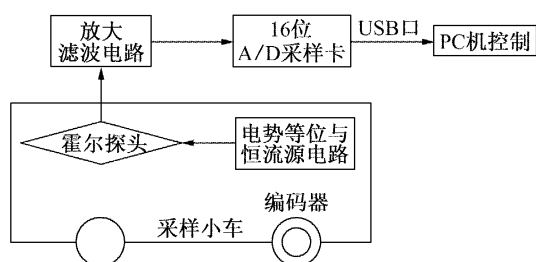


图1 检测系统硬件

因为芯片感应区域过大会造成灵敏度和分辨力降低,所以实验采用点状霍尔探头 HSJ-E,其有效感应区域为 $0.1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$,可实现磁场空间连续点强度采集,从而提高灵敏度和分辨力。励磁装置为钕铁硼稀土永磁铁,磁路及励磁方向如图2。通过设计合理的磁路尺寸以及增减永磁铁个数,保证工件磁化强度在非饱和磁化状态到深度饱和磁化状态之间,励磁强度控制在 $0.05 \sim 2.0\text{ T}$ 。

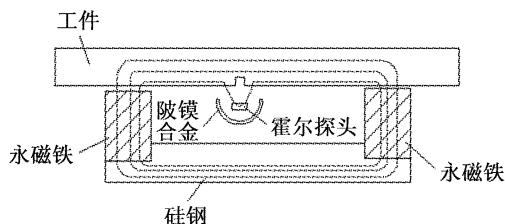


图2 检测示意图

2.2 软件系统设计

软件系统使用C语言和G语言,主要分为硬件采集驱动程序和数据分析处理面板两部分。从信号流向来看,为提高数据采集速度,满足采集信号的滤波平滑等需求,使用C语言编写A/D控制程序,嵌入Labview中的CIN节点;然后将数据导入Matlab Script中进行数据分析,最后使用Labview搭建虚拟仪器平台,对数据进行实时监控和显示。

2.3 数据采集处理

信号采集使用旋转编码器等距离触发采样。根据磁偶极子理论得到的理想漏磁信号是一个空域信号。当传感器相对于被测对象作匀速扫描运动时,空间域离散检测信号 $X_s = X_s(i \cdot \Delta s)$ 可以通过等时间间隔采样后的离散时间域信号 $X_t = X_t(i \cdot \Delta t)$ 求得^[4]:

$$X_s(i \cdot \Delta s) = X_t(i \cdot \Delta t)$$

式中 i ——采样点数;

Δs ——采样空间间隔;

Δt ——采样时间间隔。

使用时间频谱分析法对其进行分析。根据需要,对其进行带通滤波和干扰剔除,即对于工件工作于强磁状态可能出现的直流缓变信号或者粗糙表面产生的高频干扰以及其他一些随机干扰,可用带通滤波器将其滤除。对于系统短时间内出现的异常信号,在A/D采样过程中使用阈值判别和中值近似的方法剔除异常尖峰值。

3 实验过程与结果

3.1 实验条件

拉伸试件材料为中碳钢,缺陷为试件一侧的通槽(图3)。在拉伸试验前先沿 x 轴采集有缺陷和无缺陷部位的漏磁信号。施加 x 方向的拉力,最大拉应力为 290 MPa ,超过材料屈服极限。将应力施加后采集的信号与原始信号进行对比,在试件的1,2,3点上测量残余应力。按照力磁理论,拉伸后 x 方向上磁化率 χ 将改变,泄漏到空气中的漏磁信号也将改变。

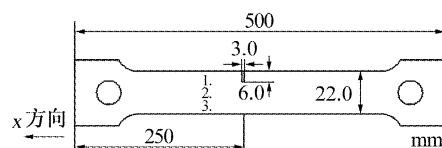


图3 拉伸试件

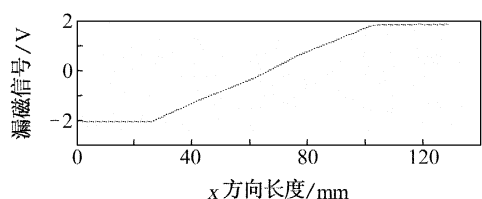
实验采用非在线检测,实际上起作用的是残余应力,故以残余应力作为评定参数。

3.2 实验结果

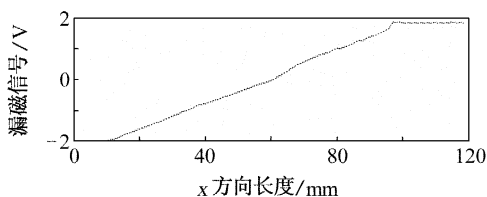
3.2.1 弱磁场情况

$B=0.08\text{ T}$ 时,对于没有缺陷的试件,霍尔探头检测到的是两个磁极泄漏到空气中的磁信号,磁化率增大则两极泄漏的磁信号减小,信号斜率减小,电压值的斜率变化仅反映了应力的变化。图4a是施加应力前的漏磁信号,对应 $-2 \sim +2\text{ V}$, x 方向上长度为 $\Delta x_1 = 70\text{ mm}$;图4b是施加应力后的漏磁信号,对应 $-2 \sim +2\text{ V}$, x 方向上长度为 $\Delta x_2 = 91\text{ mm}$, $\Delta x_2 > \Delta x_1$ 。信号斜率发生变化,说明随应力方向磁化率增大。

对于有缺陷的试件,探头检测到的是两个磁极泄漏到空气中的磁信号以及缺陷附近的漏磁信号。图5可见,不仅如图4所示信号斜率发生变化, $\Delta x_2 > \Delta x_1$;而且信号峰-峰值急剧增大, $V_{pp1} = 2.1\text{ V}$, 而 $V_{pp2} = 5.3\text{ V}$; $V_{pp1} < V_{pp2}$;增加了接近1.5倍。根据磁偶极子理论,空气中磁场强度正比于磁化率,说明应力确实改变了磁化率的大小,从而增大了漏

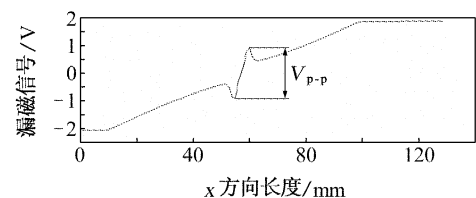


(a) 施加应力前

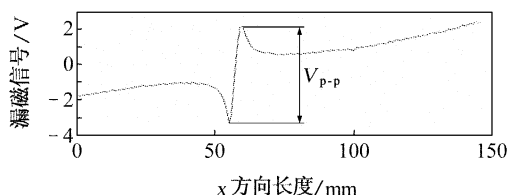


(b) 施加应力后

图4 无缺陷部位测试信号



(a) 拉伸前



(b) 拉伸后

图5 弱磁场下缺陷部位测试信号

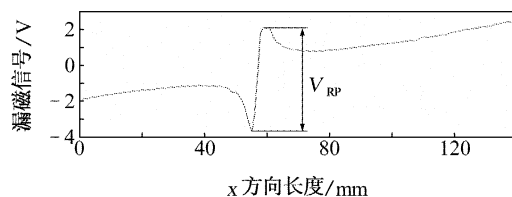
磁信号的强度。

3.2.2 强磁场情况

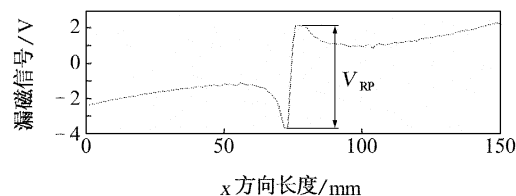
励磁强度为 1.8 T 时,材料处于深度饱和磁化状态。图 6 中 $V_{p-p1}=5.7\text{ V}$, $V_{p-p2}=5.6\text{ V}$,可见信号峰值和斜率变化不很明显,说明饱和磁化状态下应力对信号影响较小,应力对磁化改变极小,所以提高励磁强度是解决应力效应的有效方法。

4 实验分析

实验结果与文献[3]一致,即较低应力改变材料内部 90° 闭合磁畴的数量;高应力下 90° 闭合磁畴将消失,应力的增加将增加材料内部钉扎结构(pinning sites)数量;在弱磁场情况下,磁信号由 90° 闭合磁畴决定;高磁场情况下, 90° 闭合磁畴将消失,磁场主要



(a) 拉伸前



(b) 拉伸后

图6 强磁场情况下缺陷部位信号

由晶体磁向量旋转而改变;所以在高磁场 ($H=20\text{ kA/m}$) 下,应力对磁信号只有一种影响,即钉扎结构的增加,不过这也将降低材料在拉伸方向的磁化强度。

图 7 是拉伸过程中产生的信号,加载应力分别为 0, 1 000 和 1 800 kg。工件加载后的残余应力见表 1,测量点见图 3,可见漏磁信号峰峰值分别为, 6.36 V, 5.61 V, 5.43 V, 随着应力增加而减小,与理论相对应。

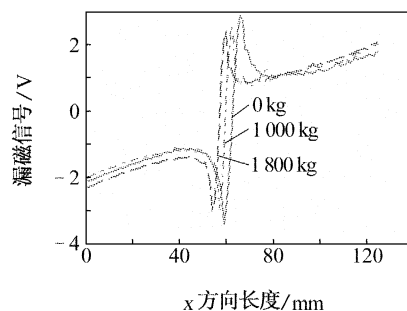


图7 强磁场下不同拉伸应力-漏磁曲线

表1 工件加载后的残余应力 kg/mm^2

测量点	加载应力/kg		
	0	1 000	1 800
1	23.5	17.1	-8.6
2	22.4	14.4	-10.6
3	24.8	17.1	-9.7

5 结论

根据以上分析,在零件的加工和使用过程中均
(下转第 485 页)

爬行和计程装置以及一些专用功能,采用喷水(水浸式)耦合或干耦合技术。该检测技术快捷、数据多、结果更有代表性、节省费用。自动爬壁超声检测设备的基本型号为线性多点自动测厚仪器,也有可检测一定宽度的扫描设备(如 B 或 C 扫描)。英国 Scorpion DCP 罐壁腐蚀超声波爬行器就是其中的一种基本型仪器。该设备采用干摩擦式耦合,无需破坏防腐层、无需耦合剂、检测速度快、效率高、可实现在线检测。国内已逐渐有了一些应用。

2 立式储罐的综合检测与评价技术

作为一种整体性快速普查方法,声发射在线检测技术可以对储罐底板的失效进行及时发现和预报,在保证安全的情况下最大程度地减少开罐检查的储罐数量,从而大大降低总体的检修费用。对于需要开罐详查的储罐可采用漏磁检测技术或低频涡流技术对罐底板进行扫描探测,以作全面定量评价,为检修决策提供依据。爬壁自动超声检测技术可在线进行、实施方便、可靠性高且检测费用低。将多种无损检测新技术有机结合,是储罐检测的必然发展趋势,具有非常广阔的应用前景。图 1 为立式储罐综合检测与评价技术框图。

3 储罐综合检测与评价技术的应用前景

(1) 经济效益显著 声发射在线监测技术由于不开罐检测,因此可直接节省常规检验和检修综合成本的 50%~80%。

(2) 节省检修时间 声发射在线检测一般可

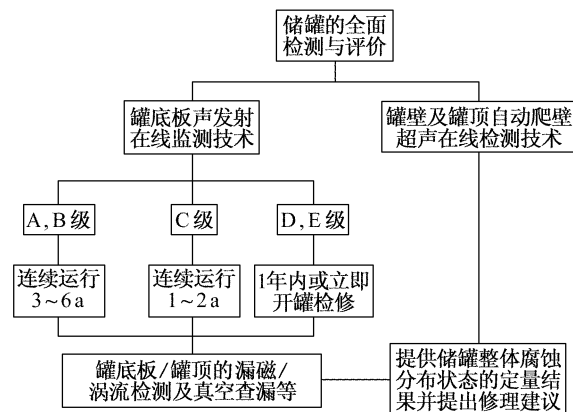


图 1 立式储罐综合检测与评价技术流程图

在 1~2 天内完成,对正常生产的影响很小;若需开罐检查,漏磁检测只需简单清理,无需破坏防腐层,检测工作可在几天内完成(如 5 000 m³ 的罐可在 1~2 天内完成);低频涡流检测由于速度相对较慢,检测时间也会较长;自动爬壁超声检测可在数小时内完成,不影响生产。

(3) 检测结果的可靠性高 声发射在线检测技术可避免不必要的开罐检修。漏磁/低频涡流检测及自动爬壁超声检测技术可对罐底板及罐壁板的腐蚀状态等作出全面的定量检测评价,为检修工作提供较准确的位置,为以后长周期安全运行提供依据。虽然对于定点或局部检测来说,漏磁或涡流检测尚达不到一些常规方法的精度,但还是能够满足实际的需要,而且在检测速度、全面性或在线性等方面的优点已经远远弥补了其不足。综合考虑,新技术的应用将使检测结果的可靠性大大提高。

(上接第 481 页)

存在应力。弱磁场对正磁弹材料(如钢),堆积磁导轴是向外加应力方向弯曲的。应力越大,磁化率越大,漏磁信号增加了两倍多,影响信号的准确检出;深度饱和磁化场下应力对漏磁信号影响较小,磁畴方向在应力作用之前已经基本沿磁化方向,所以提高励磁强度是降低应力对漏磁信号影响的有效方法。

应力会改变材料内部磁化强度和磁化方向,从而改变漏磁信号。信号电压值反映了应力的变化,为漏磁检测应力开辟了另一条道路,在以后的工作中还应该继续寻找应力和漏磁信号间的量化关系。

参考文献:

- [1] Mandal K, Dufour D, Krause T W, et al. Investigations of magnetic flux leakage and magnetic Barkhausen noise signals from pipeline steel[J]. J Phys Appl Phys, 1997, 30: 962—973.
- [2] Chikazumi S. Physics of magnetism[M]. New York: Wiley, 1964.
- [3] Makar J M, Tanner B K. The effect of stresses approaching and exceeding the yield point on the magnetic properties of high strength pearlitic steels [J]. NDT&E International, 1998, 31(2): 117—127.
- [4] 康宜华, 杨叔子, 卢文祥, 等. 空间域信号的采样方法[J]. 华中理工大学学报, 1992(增刊): 183—188.