

文章编号: 1001-0645(2005)11-1003-05

低碳钢扭转过程弱磁信号变化及金属磁记忆效应

张卫民¹, 刘红光¹, 袁俊杰¹, 孙海涛²

(1 北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2 北京理工大学 材料科学与工程学院, 北京 100081)

摘 要: 研究地磁场存在条件下扭转过程中低碳 A3 钢的弱磁信号变化和金属磁记忆效应。在扭转实验机上对 A3 钢弱磁信号变化和转矩变化之间的关系进行了实验研究, 通过记录试件表面磁场强度垂直分量和所施加的转矩值, 绘制出二者之间的关系曲线, 分析了弹塑性阶段弱磁信号变化特点。磁信号在弹塑性区域发生变化的主要原因是磁畴在应力作用下的定向分布和位错对磁畴转向的阻碍作用。根据实验结果提出了通过设立弱磁信号的梯度阈值进行构件应力状态及微损伤判别的新方法。

关键词: 金属磁记忆; 磁记忆效应; 低碳钢; 微损伤

中图分类号: TH 140.7 **文献标识码:** A

Change of Weak Magnetic Signals and Metal Magnetic Memory Effects During the Torsion of Low Carbon Steel

ZHANG Weimin¹, LIU Hong-guang¹, YUAN Jun-jie¹, SUN Hai-tao²

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

2 School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Changes in weak magnetic signal and metal magnetic memory effects in low carbon A3 steel during torsion are studied. Relationship between signal change and torsion change is studied on a torsion testing equipment. The relationship is presented by recording the vertical component of magnetic intensity on the sample surface and the loading moment of torsion, and the characteristics and reason of these changes are analyzed. The main reason of change in magnetic signal is the directional distribution of the magnetic domain on the stress and the impediment by the dislocation to the domain's turn. A new weak magnetic method of estimating the stress state and micro-damage of component is thus proposed.

Key words: metal magnetic memory; magnetic memory effect; low carbon steel; micro-damage

铁磁性金属构件的损坏原因之一, 是在应力-应变作用下金属损伤的积聚。一般情况下, 金属微损伤的积聚伴随着其结构的变化(如位错密度的提高及重新分布、金属相变等)及其内应力水平的变化。而结构和内应力水平的变化, 则有可能用磁检测方法

检测出来。因为金属微观结构的变化, 往往导致构件表面出现漏磁场; 而内应力水平的变化, 会导致磁畴的重新分布, 引起试件表面退磁场的变化。因此利用磁性检测方法, 特别是弱磁检测方法, 对于研究金属结构和内应力的变化, 进而发现材料的微损伤, 是比

收稿日期: 2004-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275012); 北京市重点学科资助项目(XK100070424)

作者简介: 张卫民(1964-), 男, 教授, E-mail: zhangwm@bit.edu.cn.

较有潜力的。

近年来,金属磁记忆检测技术受到广泛重视,因为它在检测微损伤方面是有效的。在典型受力情况下,对弱磁信号和磁记忆效应的表现形式却少有研究。作者试图研究扭转载荷下,磁信号的产生和磁记忆效应。

1 扭转实验

1.1 扭转试样

扭转实验对于研究某些承受扭转力的零件如传动轴的磁记忆效应具有重要意义。在本实验中选用碳素结构 A3 钢,实验前经退火处理,其组织为大量的铁素体和少量的珠光体^[1],试样尺寸如图 1 所示。

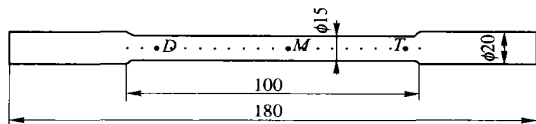


图 1 扭转试样尺寸图

Fig. 1 Sample for torsional testing

1.2 实验过程

将试样置于 K-50 型扭转实验机上进行扭转实验,经弹性—塑性—强化,直至断裂。在不同的变形阶段,在试样沿轴线方向上等距离取若干点(图 1 中小圆点处)进行检测并记录。观察在地磁场作用条件下,试样表面弱磁信号随转矩的变化情况。实验中地磁场的影响因素相对不变,试样的轴线和南北磁极方向呈 75° 。采用俄罗斯动力诊断公司的 NKH-1M 型金属磁记忆检测仪读取试样表面垂直方向磁场强度分量 H_{py} 。试样上具有代表性的三个点 D, M, T 的 H_{py} 值随转矩变化的关系如图 2、图 3、图 4 所示。从这些图中可以看出,一方面,随着转矩的增加,试样两端的磁场强度绝对值呈明显的变化(见图 2、图 3 中的 D, T 点检测结果),而中间处的磁场强

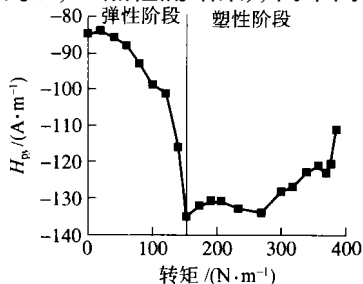


图 2 试样上 D 点 H_{py} 值随转矩变化的关系

Fig. 2 The relation between H_{py} value and torsion of point D

度变化较小或基本不变(见图 4 的 M 点检测结果);另一方面,试样上除中间部位(如 M 点)外其它各点的磁场强度随转矩增加而发生变化,并且在弹性、塑性和强化不同阶段呈现不同的变化规律。

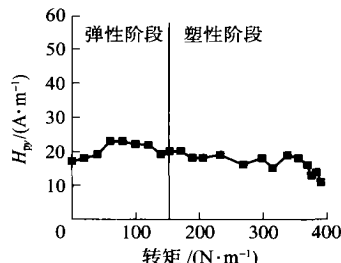


图 3 试样上 M 点 H_{py} 值随转矩变化的关系

Fig. 3 The relation between H_{py} value and torsion of point M

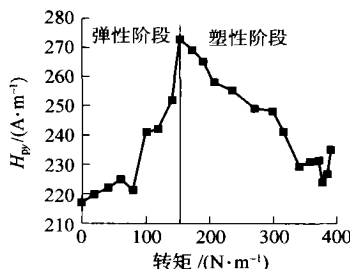


图 4 试样上 T 点 H_{py} 值随转矩变化的关系

Fig. 4 The relation between H_{py} value and torsion of point T

2 实验结果及分析

2.1 弱磁信号在不同阶段的变化

如图 2~ 图 4 所示,在整个弹性阶段, D, T 点磁场强度绝对值呈单调增加趋势, M 点的变化趋势不明显;其中 D 点加载曲线上 H_{py} 值从 -84 A/m 变化至 -135 A/m ; T 点曲线上 H_{py} 值从 217 A/m 变化到 273 A/m ;而在试样中部的 M 点,磁场强度值变化较小,最小值为 17 A/m ,最大值为 23 A/m ,且变化无明显规律性,呈随机波动状态。进入屈服阶段后, D, T 点的磁场强度值不再增加,反而有所降低;进入强化阶段后,磁场强度变化趋势未见明显改变,只是在断裂之前有小范围的波动。从图中还可以看出,整个弹性阶段, H_{py} 值最初上升较缓,后面上升较快。

2.2 弱磁信号变化机理

在扭转载荷的作用下,试样处于承受纯剪切应力状态,正应力和试样轴向夹角分别呈 $+45^\circ$ 和

-45°; 且一个方向的正应力为拉应力(张应力), 另一个方向为压应力^[1]。

在这种应力状态且存在外部磁场作用的情况下, 磁畴会从最初的杂乱无序状态向有序状态转化。根据铁磁学基本理论^[2], 对于磁致伸缩系数 $\lambda_s > 0$ 的铁磁性材料, 张应力使磁畴中的自发磁化强度 M_s 取平行或反平行于应力的方向; 当应力为压应力时, M_s 取垂直于应力的方向, 因为此时磁弹性能具有最小值。由于地磁场较弱, 在应力作用下难以达到饱和状态, 并非所有磁畴都有方向一致的分布, 但定向分布的趋势是较为明显的。

磁畴的这种微观变化和宏观上铁磁材料的磁导率变化是一致的。研究表明^[3], 铁磁性材料的磁导率 μ 在弹、塑性范围内都是变化的。在弱磁场和单向拉伸载荷作用的情况下, 磁导率 μ 可表示为

$$\mu = \mu_T (1 + bH/\mu_T) [a_0 + a_1 |\sigma|^m \exp(n|\sigma|)]$$

式中: μ_T 为初始磁导率, 和温度 T 有关; b 为常数, 和材料结构性质有关; a_0, a_1, m, n 是系数, 取决于载荷方向(拉、压)和应力值。

由上述关系式可以看出, 磁导率 μ 和应力之间呈现幂函数和指数函数共同作用的复杂非线性关系。随着应力的增加, 磁导率 μ 的变化越来越急剧, 即在磁场不变的情况下, 随着载荷的增加, 铁磁性材料越来越“易于磁化”。由于扭转载荷可以转化为拉力和压力同时作用的情况, 因此上式同样适合于扭转载荷情况。

从图 2 和图 3 中可以看出, 在整个弹性范围内, 忽略一些偶然因素的影响, 弱磁信号的总趋势是随着载荷的增加, 变化越来越急剧。

试件表面的弱磁信号实际上是外界作用磁场(地磁场)、试件本身退磁场和缺陷处漏磁场综合作用的结果。已进行的研究表明^[4], 在初始状态下, A3 钢具有尺寸为 30 μm 的铁素体颗粒和尺寸略小的珠光体圆柱, 即使在较大的弹性变形范围内, 位错结构也没有显著改善, 观察到的只是晶格尺寸的略微减小。因此在弹性范围内, 弱磁信号只是外界作用磁场和试件本身退磁场综合作用的结果。由于地磁场可近似为稳恒量, 因此弱磁信号只是取决于试件本身退磁场的变化情况。在载荷作用下, 磁导率变化会引起弱磁信号变化, 因此弱磁信号的变化和磁导率变化有着相似的规律, 即幂函数和指数函数共同作用的非线性关系。

2.3 塑性范围内弱磁信号变化及退磁场的影响

磁性物理理论和实验很少涉及铁磁性材料在应力作用下的非弹性变形与破坏, 各种微观缺陷(包括位错)对磁畴的影响、外磁场对材料变形和微结构的影响^[5]。弱磁信号在塑性区的变化情况, 目前还仅限于定性解释。

从图 2 和图 3 中可以看出, 在塑性区内, 磁信号呈缓慢下降趋势。产生这种现象的原因比较复杂, 主要是应力增加到一定程度后, 原来沿应力方向定向分布的磁畴结构不断崩溃, 可动磁畴壁减少, 位错的萌生、运动、滑移带的形成, 严重阻碍畴壁运动, 使得磁化强度增加的趋势被抑制, 原有退磁场强度不断减弱。铁素体是碳原子在 $\alpha\text{-Fe}$ 中形成的间隙固溶体, 其塑性较好, 所以 A3 钢的塑性变形几乎全部由铁素体提供; 但是由于存在珠光体(渗碳体 Fe_3C 和铁素体的混合物), 所以在塑性变形屈服阶段, 位错容易在珠光体内部及铁素体和珠光体交界处堆积, 同时在晶界处位错大量塞积, 使得位错密度上升, 因微观缺陷而产生的漏磁场强度削弱了因应力作用而产生的磁弹性能的增加。卸载后构件中还会存在残余应力, 弱磁信号还会保留, 即磁记忆信号。

3 构件应力状态及微损伤的弱磁检测方法讨论

利用磁记忆检测方法判别试件是否产生微观缺陷的标准是弱磁信号的磁场强度法向分量过零点^[6]。该判别标准的有效性已经被大量的实验所证实^[7~9], 但该判别标准也存在不完善之处, 在某些情况下容易产生误判。其原因是: 第一, 不同的试件在热处理过程中, 温度从居里点以上降至居里点以下时, 磁畴结构在地磁场作用下会出现不同程度的定向分布, 结构完好的试件也往往会出现磁场强度法向分量的过零点。第二, 构件表面的弱磁信号是退磁场和缺陷漏磁场叠加的结果。在构件端部退磁场往往较大, 叠加的结果使缺陷处的弱磁场强度法向分量不一定是零。

机械构件在实际服役过程中大都处于弹性变形状态, 不允许产生微量塑性变形, 出现屈服现象就标志着产生了过量塑性变形失效, 即屈服失效。通过上述实验及分析可以看出, 当退磁场效应较强时, 在弹性区和塑性区, 弱磁信号的变化特点是不同的。在弹性阶段, 弱磁信号呈单调增长, 且越临近塑性区, 增长幅度越快; 一旦出现增长幅度明显减缓甚至信号

幅度减小,则表示此构件部位已经进入塑性区.为了表征信号幅度的增长快慢,引入磁场强度相对于转矩的变化梯度

$$K = \frac{\Delta H_{py}}{\Delta T}$$

其中: ΔH_{py} 为图 2、图 3、图 4 中相邻 2 点的 H_{py} 值之差; ΔT 为相邻 2 点的转矩变化之差. D, T, M 点的 K 计算值如表 1 所示.

从表 1 中可以看出,在弹性区和塑性区的交界处, D, T 点的 K 值均达到最大值,分别为 1.46 和 1.62,远远大于弹性区的其它点的 K 值;在塑性区,试件将要断裂前, D, T 和 M 点的 K 值也达到较大,分别为 1.43, 1.50 和 0.50. 据此,在退磁场效应较大情况下,可以利用以下步骤判断铁磁性试件失效及微损伤,如图 5 所示.

表 1 测试点的 K 值

Tab 1 Gradient value of testing points

阶段	转矩变化值/ (N · m)	K 值/(A · N ⁻¹ · m ⁻²)		
		D 点	M 点	T 点
弹	20	0.05	0.05	0.15
	20	0.05	0.05	0.10
	20	0.05	0.20	0.15
	20	0.25	0	0.20
	20	0.30	0.05	1.00
	20	0.05	0	0.05
	20	0.75	0.15	0.50
塑	13	1.46	0.08	1.62
	20	0.15	0	0.20
	17	0.06	0.12	0.24
	16	0	0	0.44
	26	0.08	0.04	0.12
	36	0.03	0.08	0.17
	30	0.20	0.06	0.03
	16	0.06	0.19	0.44
	24	0.17	0.17	0.50
	16	0.13	0.06	0.13
	14	0.14	0.14	0
	7	0.29	0.43	1.00
	7	1.43	0.14	0.29
	6	0	0.50	1.50

具体分法为在构件使用前,利用磁记忆传感器检测并记录数据,在使用时定期检测各关键点并结

合上一次检测数据计算 K 值,当 K 值异常增大时,则表明局部出现弹性失效,可结合其它无损检测方法进行详细诊断.

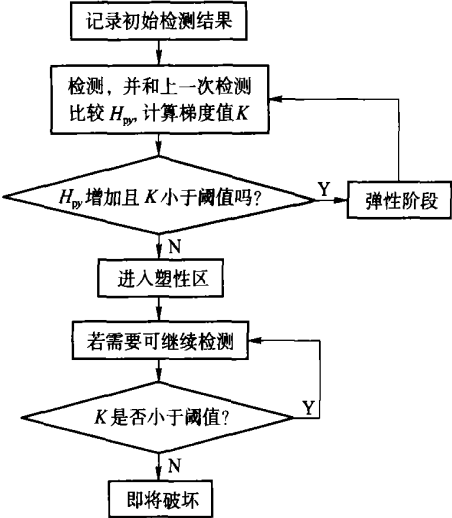


图 5 判别应力状态及微损伤的算法框图

Fig 5 A algorithm for estimating stress state and micro-damage

4 结 论

通过上述研究发现,低碳 A 3 钢在扭转载荷作用下,在弹性和塑性区,弱磁信号呈现不同变化特征.在弹性区呈单调增加趋势,结合扭转过程的应力作用特点,认为是磁畴转向使磁弹性能达到最小所致.在塑性区弱磁信号呈缓慢下降趋势,其原因较为复杂.一方面是在不断增加的应力作用下,原有磁畴结构不断崩溃,位错滑移带的形成阻碍了磁畴壁的定向移动,磁信号增加的趋势被抑制;另一方面位错密度的增加使漏磁场作用增强,削弱了因磁弹性能增加而产生的退磁场.分析了目前存在的磁记忆检测判别方法的不足,根据实验结果,提出了新的判别机械构件及微损伤的方法.

参考文献:

[1] 桂立丰. 机械工程材料测试手册(力学卷)[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001.
Gui L ifeng. Materials for mechanical engineering testing manual (mechanics roll) [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2001. (in Chinese)
[2] 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
Wan Defu, Ma Xinglong. Magnetic physics [M].

- Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999 (in Chinese)
- [3] Дубов А А Повышение надёжности энергетических котлов ТЭС путем совершенствования методов технической диагностики поверхностей нагрева [М] Москва Автореферат дисертации к т н 1989
- [4] Ничипурук А П Микроструктура механические и магнитные свойства стали св и стали у8 после циклического деформирования растяжением [J] Дефектоскопия 1999, 5: 33- 37.
- [5] 薛 松, 孙学伟, 何宗彦 铁磁材料不同应变状态下的磁特性实验研究 [J] 力学与实践, 1999, 21 (5): 25- 27.
- Xue Song, Sun Xuwei, He Zongyan The experimental investigation on magnetic property of ferromagnetic material under different residual strain [J] Mechanics and Practice, 1999, 21 (5): 25- 27. (in Chinese)
- [6] Doubrov A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory [J] Welding in the World, 1998 (41): 196- 199
- [7] Дубов А А Исследование свойств металла с использованием метода магнитной памяти [J] Металловедение и Термическая Обработка Металлов 1997, 9: 35- 39
- [8] Дубов А А Экспресс метод контроля сварочных напряжений [J] Сварочное Производство 1996, 11: 25- 28
- [9] 戴 光, 王文江, 李 伟 不同构件的磁记忆检测及分析方法研究 [J] 无损检测, 2002, 24 (6): 262- 266
- Dai Guang, Wang Wenjiang, Li Wei Magnetic memory testing and analysis of different structures [J] Nondestructive Testing, 2002, 24 (6): 262 - 266 (in Chinese)

简讯

2004 年度我校国家自然科学基金资助经费突破 1 000 万元

2004 年度我校在学校领导和广大教师的努力下, 共上报国家自然科学基金项目 209 项, 经过同行专家评审, 专家评审组的评审, 获得资助 45 项, 其中重点项目 2 项, 重大研究计划 1 项, 其余 42 项为自由申请项目。获得资助总经费 1 023 万元, 若计算与外单位联合申报批准的项目, 总经费达 1 100 万元, 首次突破千万元大关。与往年相比, 今年的申请有以下特点:

一、申报项目数与获资助项目数大幅度增加

2004 年我校申报国家自然科学基金项目 209 项, 与 2003 年申报的 144 项相比, 增长幅度为 45%, 批准数 45 项, 与 2003 年的 34 项相比, 增长幅度为 32%。2004 年我校申报项目与获资助项目是历年来最多的一年。

二、校基础研究基金发挥了积极作用

2003 年我校启动了基础研究基金, 基础研究基金的指导思想就是鼓励和支持一批年轻科研骨干, 发挥他们的科研创新能力, 为培育国家自然科学基金、国家“八六三”、“九七三”等国家科技计划项目打下良好的基础。学校基础基金的育苗作用得到了体现。据统计, 在 2003 年启动的 105 个基础研究基金中, 申请了 2004 年国家自然科学基金的占 90% 以上, 两年获得国家基金资助的项目占基础研究基金项目的 36%。

三、管理科学实现了零的突破

据统计, 申报管理科学部的项目自 1994 年我校获得一项资助以后, 十年来均未获得资助。但是 2004 年申报 14 项, 获得资助 5 项, 资助率为 35%, 实现了近十年来零的突破。