

金属磁记忆技术的机理与试验研究

吴大波, 徐敏强

(哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨)

摘要: 在外应力作用下铁磁晶体应力能会增加, 其相应的总自由能也会增加, 而改变铁磁晶体的磁化状态会消耗能量, 并趋向于自由能最低. 通过对45号调质钢和非调质钢试件分组进行三点弯曲疲劳裂纹扩展试验和金相显微镜在位显微观测, 并利用TSC-1M-4检测磁场信号, 发现调质钢试件的磁记忆信号明显低于非调质钢试件的磁记忆信号, 在对试件调质消除内应力后, 不同的应力状态对试件的磁场特征信号具有显著的影响.

关键词: 金属磁记忆; 磁各向异性; 应力集中; 三点弯曲; 热处理

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0036-04

Theoretical and experimental study on metal magnetic memory technique

WU Da-bo, XU Min-qiang

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: To decrease the free energy, ferromagnetic crystal would reduce the stress energy by changing its magnetic state. Under the influence of stress-induced magnetic anisotropy in the interactions of stress and geomagnetic field, the physical mechanism of magnetic memory effect is studied. Crack propagation tests are performed on plate specimens of 45 quenched and tempered steel and non-quenched and tempered steel specimen. By three-point bending fatigue experiment and measurement in situ of metallurgical microscope, the magnetic signals were scanned by TSC-1M-4. The magnetic memory signals of quenched and tempered steel specimen are significantly lower than that of the non-quenched and tempered steel specimen. After eliminating stress by quenching the specimen, the results show that different stress states have significant effect on the magnetic field characteristics of the specimen.

Key words: metal magnetic memory; magnetic anisotropy; stress concentration, three-point bending, heat treatment

现代工业大量使用铁磁性金属材料制造各种设备和构件, 如锅炉压力容器、管道、桥梁、铁轨、汽轮机叶片、转子等. 随着服役时间的延长, 这些设备和构件不可避免的因应力集中和缺陷扩展发生破坏而引发工业事故的风险越来越高. 因此, 无损检测技术广泛应用于工业设备维护. 然而, 常规无损检测技术(超声、射线、涡流、磁粉、渗透等)只能检测已经成形的裂纹或缺陷, 不能对造成疲

劳破坏的重要因素应力集中进行早期检测, 无法避免因应力集中引起的金属疲劳导致的意外断裂的发生. 正常大修周期之外, 由金属疲劳引起的意外断裂导致的工业事故造成了大量的经济和社会损失. 因此, 急需发展新的无损检测方法实现对工业设备应力集中进行早期诊断. 1999年, 在汕头召开的第七届中国无损检测国际研讨会上, 俄罗斯杜波夫教授^[1]介绍一种新的无损检测方法——金属磁记忆技术, 提出了应力集中-金属微结构变化-磁记忆效应的相关性, 引起了国内无损检测领域的广泛关注. 众多学者对金属磁记忆技术进行了研究, 国家自然科学基金先后资助了十

收稿日期: 2011-12-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772061).

作者简介: 吴大波(1979—), 男, 博士研究生;

徐敏强(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 徐敏强, xumq@hit.edu.cn.

多个相关专题研究.

金属磁记忆检测技术是依据对构件表面自有漏磁场(SMLF)分布的分析来定位应力集中区、缺陷、金属和焊缝组织的不均匀性的无损检测方法. 学术界对金属磁记忆效应的机理有着不同的观点. 以俄罗斯杜波夫教授为代表的基于磁机械效应的“自有漏磁场”理论^[2]; 国内, 以南昌航空大学任吉林教授为代表的铁磁学磁弹性效应理论^[3], 南京燃气轮机研究所仲维畅代表的非对称应力作用下铁磁材料的电磁感应理论^[4]等, 从不同角度来解释磁记忆效应的形成机制.

1 金属磁记忆检测原理

金属磁记忆检测的原理是基于铁磁性构件在运行时, 受工作载荷和地球磁场的共同作用, 在应力和变形集中区域发生磁化强度不可逆变化^[5-7]. 在应力集中区域, 构件表面磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值, 而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零值点^[8]. 通过对构件表面磁场法向分量的检测, 可方便地确定应力集中部位.

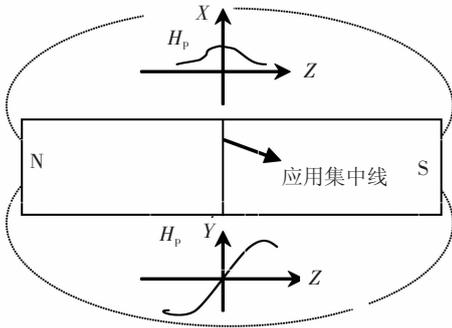


图 1 磁记忆检测原理

2 金属磁记忆效应的机理

铁磁材料被磁化时, 沿磁体的某些方向容易磁化, 而另一些方向较难磁化. 铁磁单晶体在磁性上是各向异性的. 沿铁磁体的难、易磁化轴分别进行磁化时所需要的磁化能的大小是不同的. 易磁化方向所需要的磁化能最小, 而难磁化方向所需要的磁化能最大. 这种同磁化方向有关的能量称为磁各向异性. 磁各向异性定义为饱和磁化强度矢量在铁磁体中取不同方向而改变的能量^[9].

没有外力和磁场作用于铁磁晶体, 其稳定状态的自由能为

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el}. \quad (1)$$

式中: E_k 为磁晶各向异性; E_{ms} 为磁弹性能; E_{el} 为弹性能.

铁磁晶体受外应力的作用, 晶体将发生相应的形变. 这时, 晶体的自由能除由于自发形变而引起的磁弹性能外, 还存在着由外应力作用而产生的非自发形变的磁弹性应力能, 简称为磁应力能. 铁磁晶体总的自由能为

$$E = E_k + E_{ms} + E_{el} + E_{\sigma}. \quad (2)$$

式中 E_{σ} 为应力能.

铁磁单晶体在磁场作用下被磁化, 磁化所做的功即自由能. 铁磁晶体没有形变, 磁各向异性即磁化矢量 M_s 离开易磁化轴方向而增加的自由能. 由于铁磁单晶体是磁各向异性, 如上所述铁磁晶体的磁化功与磁化方向有关. 立方晶体的总各向异性能为

$$E_k = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2. \quad (3)$$

式中: K_1 、 K_2 为各向异性常数; α_1 、 α_2 、 α_3 为磁化方向与 3 个晶轴之间的夹角余弦.

磁化矢量离开易磁化轴方向时, 晶体发生微小的形变. 形变使得晶体形成新的能量平衡, 总自由能达到的极小值的稳定状态. 晶体发生形变, 自发形变产生磁弹性能. 如立方晶体的磁弹性能为

$$E_{ms} = B_1 \sum_i e_{ii} \left(\alpha_i^2 - \frac{1}{3} \right) + 2B_2 \sum_{i \neq j} e_{ij} \alpha_i \alpha_j. \quad (4)$$

式中: B_1 、 B_2 为磁化与形变相互作用的磁弹性耦合系数; α_i 、 α_j 为磁化方向与各晶轴间的夹角余弦; e_{ii} 、 e_{ij} 为形变分量.

晶体发生形变的弹性能为

$$E_{el} = 0.5C_{11}(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2) + 2C_{44}(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2) + C_{12}(e_{xx}e_{yy} + e_{yy}e_{zz} + e_{zz}e_{xx}). \quad (5)$$

式中: e_{xx} 、 e_{yy} 、 e_{zz} 、 e_{xy} 、 e_{yz} 、 e_{zx} 为形变分量; C_{11} 、 C_{44} 、 C_{12} 为弹性模量.

外应力作用于铁磁体, 铁磁晶体产生弹性应变的同时, 产生应力磁各向异性. 铁磁体内的磁化强度矢量取向与应力有关, 改变其自发磁化方向. 根据铁磁学理论, 其应力能为

$$E_{\sigma} = -1.5\lambda_s \sigma \cos^2 \theta. \quad (6)$$

式中: σ 为应力; λ_s 为磁致伸缩系数; θ 为应力方向与磁化方向之间的夹角.

3 讨论

根据稳定状态能量最小原则, 外应力作用使得铁磁晶体增加了磁应力能, 铁磁晶体总自由能增加处于不稳定状态. 铁磁晶体内部磁化方向不再任意取向, 通过改变磁化强度方向, 磁场强度方

向将趋向于与应力平行或垂直的方向,以此来抵消磁应力能增加的影响,重新达到自由能最小的稳定状态.

当 $\theta = 0^\circ$ 或 180° 时,其应力能 E_σ 取最小值. 材料的 $\lambda_s > 0$, 受到拉应力 ($g > 0$) 作用时,即拉应力将使铁磁性材料内部磁畴中的自发磁化强度矢量 M_s 的方向取平行或反平行于应力方向. 材料的 $\lambda_s < 0$, 受到压应力 ($g < 0$) 作用时,自发磁化强度矢量 M_s 的方向取平行或反平行于应力方向. 材料的 $\lambda_s > 0$, 受压应力 ($g < 0$) 作用,应力使 M_s 取垂直于应力的方向 (即 $\theta = 90^\circ$ 或 270°). 材料的 $\lambda_s < 0$, 受拉应力 ($g > 0$) 作用,应力使 M_s 取垂直于应力的方向 (即 $\theta = 90^\circ$ 或 270°). 由此可以看出,由应力引起的应力能对自发磁化强度 M_s 的取向产生了影响.

在外应力作用下,磁弹性应力能增加,总的自由能增加,铁磁晶体产生应力致磁各向异性,铁磁晶体改变磁化强度的方向,以磁各向异性能来抵消应力能增加对总自由能的影响. 由于磁滞效应的作用,从而铁磁构件内部产生大大高于地球磁场强度的磁场强度. 图 2 为磁弹性效应示意图. 图中 ΔBr 为残余磁感应强度, $\Delta\sigma$ 为周期应力变化量, H_e 为外磁场. 表明当铁制构件的某一部位在周期性负载和外部磁场 (如地球磁场) 共同作用下,出现残余磁感应强度和自磁化的增长. 由于金属内部存在多种内耗效应 (如粘弹性内耗、位错内耗等),工作载荷卸载后,加载时在金属内部形成的应力集中区得以保留. 应力能引发的磁畴组织重新取向排列也保留下来,并在应力集中区形成漏磁场分布.

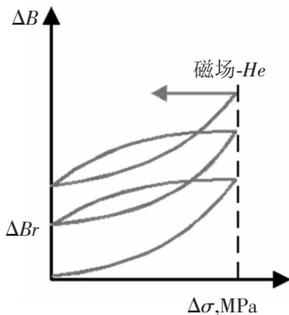


图 2 磁弹性效应原理

磁各向异性是铁磁晶体的 1 个基本属性,存在磁晶各向异性,形状各向异性,应力磁各向异性,感生磁各向异性,交换磁各向异性等多种类型. 磁晶各向异性是磁性单晶体所固有的,其他类型广义上说都是感生的磁各向异性. 应力、热处理

等都能对铁磁单晶性的特性产生影响,产生应力致磁各向异性、磁场热处理感生各向异性等等.

以不同热处理材料制成的试件进行三点弯曲裂纹扩展疲劳试验,研究热处理工艺对金属磁记忆信号的影响.

4 试验研究

如图 3 所示,在 HYG 高频疲劳试验机上进行 3 点弯曲疲劳裂纹扩展速率试验.

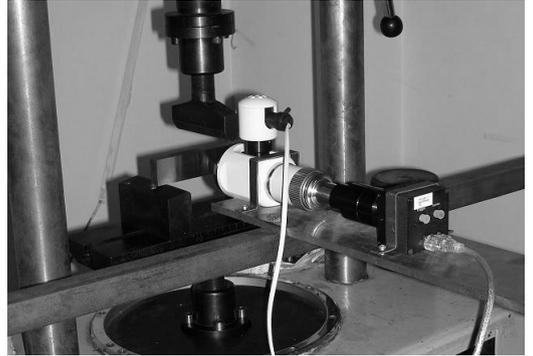


图 3 高频疲劳试验台

试件为 3 点弯曲试验标准试件,长 140 mm,高 30 mm,宽 15 mm;在试件中部的人工预制裂纹 8 mm 深,1.8 mm 宽. 试件材料为 45 号调质钢. 磁记忆信号由俄罗斯动力诊断公司生产的应力集中磁检测仪 TSC-1M-4 采集. 裂纹长度由 USFEN500 金相显微镜在位显微观测. 试验环境为室温.

3 点弯曲疲劳裂纹扩展速率试验执行 GB/T6398-2000 标准. 应力比 R 为 0.1,最大应力 160 MPa. 每 10 000 次疲劳循环,应力集中磁检测仪 TSC-1M-4 探头沿着试件顶部的测量线从左到右进行水平扫描. 试件裂纹扩展长度由金相显微镜在位拍摄,由图像分析软件分析测量后获得裂纹扩展速率.

45 号钢试件按不同的热处理工艺分为两组进行对比试验:一组 850 °C 淬火,一组 850 °C 淬火 560 °C 回火调质.

如图 4 所示,热处理试件的裂纹扩展速率低于非调质试件. 调质热处理试件疲劳裂纹扩展门槛值相对应的磁记忆信号 $H_p(y)$ 的绝对值高于非调质试件. 这说明调质热处理使得试件不易形成裂纹并扩展. 45 号非调质钢是马氏体结构,调质 45 号钢是回火索氏体结构. 马氏体钢硬度高,脆性也大. 回火索氏体钢具有更好的屈服极限和冲击韧性. 回火索氏体钢的机械性能优于马氏体钢. 因此,回火索氏体钢比马氏体钢更不易于裂纹开裂并扩展.

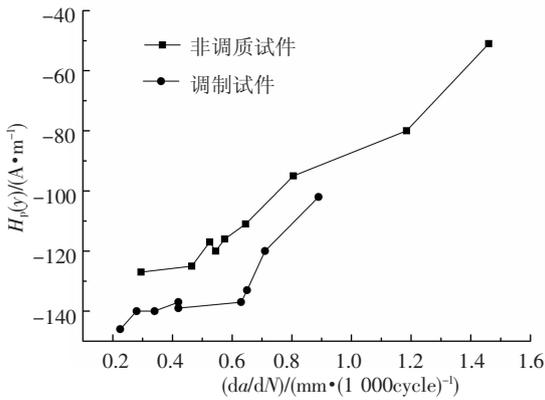


图 4 热处理对磁记忆信号的影响

5 结 论

金属磁记忆现象形成机制是 1 个广泛关注的难点, 涉及到铁磁学、金相学、弹塑性力学等多学科, 是 1 个复杂的问题. 本文从应力作用下铁磁晶体产生磁各向异性, 进而改变磁晶体磁化方向, 以磁弹性能来消除应力能增加产生的变化来解释磁记忆现象产生的机制, 即应力作用下, 铁磁材料产生应力磁各向异性, 在外磁场作用下改变铁磁材料磁化强度.

磁各向异性的形成有多种原因, 金属热处理能够影响铁磁单晶体磁各向异性. 金属热处理磁各向异性对金属磁记忆信号和裂纹扩展速率有显著影响. 调质热处理试件的裂纹扩展速率低于非调质试件. 调质热处理试件的裂纹扩展门槛值对应的磁记忆信号比非调质试件强.

调质试件和非调质试件的金属磁记忆信号的变化趋势与两者力学性能有着显著的相关性. 金属磁记忆检测能够作为热处理工艺评价的有效手段.

参考文献:

- [1] DUBOV A A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory [C]//CHS NDT 7th conference on NDT and international research symposium. Shantou: [s. n.]; 1999: 181-187.
- [2] DUBOV A. Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic ndt methods [J]. CINDE Journal, 2006, 27 (3): 16-20.
- [3] 任吉林, 邬冠华, 宋凯, 等. 金属磁记忆检测机理的探讨[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 29-31.
- [4] 仲维畅. 金属磁记忆法诊断的理论基础——铁磁性材料的弹-塑性应变磁化[J]. 无损检测, 2001, 23(10): 424-426.
- [5] JILES D C. Theory of the magneto-mechanical effect [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537-1546.
- [6] 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.
- [7] BULTE D P, LANGMAN R A. Origins of the magneto-mechanical effect [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 251(2): 229-243.
- [8] 任吉林, 林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 74.
- [9] 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1994: 152.

(编辑 张 宏)