

金属磁记忆在齿轮早期微裂纹检测中的应用

崔玲丽, 康晨晖, 张建宇, 高立新, 胥永刚

(北京工业大学 机电学院 先进制造技术北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 依据金属磁记忆检测的基本原理, 提出关于齿轮早期局部微裂纹缺陷的漏磁信号模型, 指出在裂纹区域, 漏磁场的切向分量具有峰值, 而法向分量过零、其梯度具有峰值, 分析了裂纹深度对上述特征的影响, 并将上述理论应用于实际齿轮表面微裂纹检测, 显微分析的结果论证了磁记忆检测的有效性。

关键词: 金属磁记忆; 齿轮; 微裂纹检测

中图分类号: TH 7

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2012)10 - 1441 - 05

Application of Metal Magnetic Memory in Gear Early Micro Cracks Testing

CUI Ling-li, KANG Chen-hui, ZHANG Jian-yu, GAO Li-xin, XU Yong-gang

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on basic principle of metal magnetic memory (MMM), this paper proposes a model of magnetic flux leakage signal of gear early local micro cracks. The tangential component of magnetic flux leakage signal will peak at the crack area while the normal component will pass zero point and its gradient has the peak. The effect of the crack depth on the characteristics has also been considered. The theory is then applied to detection of micro cracks on the tooth surface of an actual gear. The microscopic analysis results demonstrate the effectiveness of the magnetic memory testing.

Key words: metal magnetic memory (MMM); gear; micro cracks detection

基于振动信号采集处理的机械设备状态监测及故障诊断技术是目前故障诊断领域发展最为成熟, 也是应用最广泛的方法。但在生产实际中, 振动信号往往含有大量的噪声, 造成特征频率无法识别而导致误/漏诊的情况多次发生。因此, 引入新的检测技术和特征提取方法, 弥补现有技术的不足, 已成为当务之急。

无损检测技术不破坏待测对象原来的形状并不改变其使用性能, 具有振动检测无法比拟的优点。传统的无损检测方法有涡流检测、液体渗透检测、磁粉检测、射线照相检测和超声检测等。但这些检测技术具有提供设备信息不可靠、检测范围局限、设备寿命评估不足、强度验算方法不合理、

缺陷早期发展不敏感等缺陷, 在工程实际应用中受一定局限。

金属磁记忆 (metal magnetic memory, MMM) 检测法是 20 世纪 90 年代由俄罗斯学者杜波夫提出的一种无损检测技术, 综合了常规无损检测、断裂力学和金相学等学科的特点, 已经在多个国家和地区得到广泛推广和应用^[1]。现代工业中, 大量的铁磁性金属构件随着服役时间的延长, 不可避免地存在着由于应力集中和缺陷扩展而引发事故的危险性。金属磁记忆方法是迄今为止对这些构件进行早期诊断的唯一可行的方法, 能解决传统无损检测方法无法解决的金属早期诊断问题, 为金属构件失效及寿命评估提供有力的科学依据^[2]。金属磁记忆检测在平

收稿日期: 2011-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175007); 北京市属高等学校人才强教计划项目(PHR20110803).

作者简介: 崔玲丽(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事故障诊断与信号处理方面的研究, E-mail: cuilingli@bjut.edu.cn.

板、管道、容器及焊缝检测中多有应用,并常用于实验室研究磁性金属的力学性能.如北京理工大学的张卫民等^[3]研究发现,低碳 A3 钢在扭转载荷作用下,在弹性和塑性区的弱磁信号呈现不同的变化特征;张军等^[4]将磁记忆与小波变换结合成功应用于井下套管的应力集中检测;很多学者对金属磁记忆信号特征与应力状态之间的关系进行研究并得到相关结论^[5-7];邱新杰等^[8]研究焊接裂纹缺陷中磁记忆信号特征.但是在故障诊断领域,磁记忆在齿轮表面裂纹应用的研究还鲜有报道,本文在磁记忆检测基本原理的基础上,提出一种应用于齿轮早期局部微裂纹的磁记忆检测机理模型,并应用于工程实例故障齿轮即一断齿齿轮检测,显微分析实验验证了磁记忆检测的有效性.

1 磁记忆检测原理

磁记忆检测的原理实际上是磁弹性和磁机械效应共同作用的结果.铁磁学研究表明,弹性应力对铁磁体不但产生弹性应变,而且还产生磁致伸缩性质的应变.在应力 σ 作用下,磁畴壁将改变其位置,同时自发磁化也将改变其方向.因此,铁制工件某一部位在周期性负载和外磁场(如地球磁场)作用下会出现残余磁感应和自磁化的增长,如图 1 所示, ΔB_r 为残余磁感应量的变化; $\Delta \sigma$ 为周期性负载的变化; H_e 为外磁场.

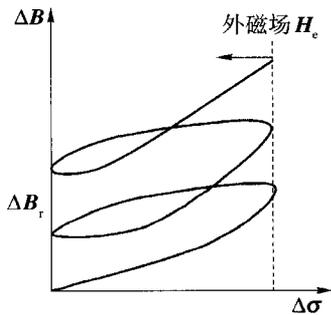


图 1 磁弹性效应原理图
Fig. 1 Magnetoelastic effect schematic diagram

磁性金属在拉伸、压缩、扭曲和周期性载荷作用下,应力集中区易产生稳定的滑移位错带.源于位错聚积变成和磁畴壁厚相等时磁畴边界的固锁效应,在位错聚积区易产生自有漏磁场.当外界存在微弱地球磁场时,在受检物体应力集中区的表面将形成漏磁场梯度.金属磁记忆方法的基本原理就是记录和分析产生在铁磁构件和设备应力集中区或缺陷区中的自有漏磁场的分布情况.

2 机理模型

图 2 所示的磁偶极子模型可很好地模拟漏磁信号.磁偶极子是由一对等量异号的点磁荷 $\pm q_m$ 组成的体系,它们之间的距离 l 远比到场点的距离 r 小.

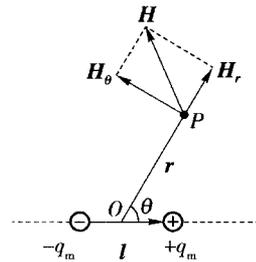


图 2 磁偶极子模型
Fig. 2 Magnetic dipole model

令 l 代表从 $-q_m$ 到 $+q_m$ 的位移矢量,则磁偶极距为

$$p_m = q_m l$$

则 P 点处的磁场分布为

$$H_r = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{2p_m \cos\theta}{r^3}, H_\theta = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{p_m \sin\theta}{r^3} \quad (1)$$

式中: θ 为 PO 与该对点磁荷连线夹角; O 为该对点磁荷的中点; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

将磁场强度 H 分解成切向分量 H_x 和法向分量 H_y , 则

$$H_x = \frac{p_m}{4\pi\mu_0 h^3} (2 \sin^3 \theta \cos^2 \theta - \sin^5 \theta),$$

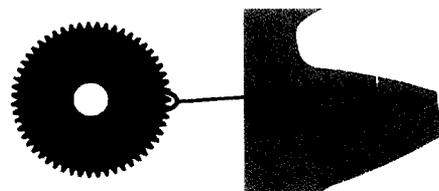
$$H_y = \frac{p_m}{4\pi\mu_0 h^3} \cdot 3 \sin^4 \theta \cos \theta \quad (2)$$

式中: $h = r \sin\theta$, 为 P 点到磁偶极子的垂直距离.

对于齿轮局部微裂纹缺陷(如图 3),可简化为无限长的矩形槽,将裂纹壁面上的磁荷等效为无数磁偶极子,假设磁偶极子均匀分布在两侧壁面上.如图 4 所示,裂纹深为 d ,宽度为 b ,壁面磁荷密度为 σ_s ,则单位长度裂纹形成的磁偶极距为

$$\Delta p_m = \sigma_s b \Delta d \quad (3)$$

由于 $d \ll h$,为了简化问题,认为对于不同的裂



(a) 齿轮整体视图 (b) 局部放大图

图 3 齿轮局部微裂纹示意图

Fig. 3 Gear local crack diagrammatic sketch

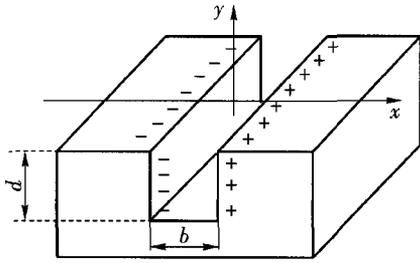


图 4 矩形槽模型

Fig. 4 Rectangle slot model

纹深度 d , 测点 P 到缺陷的垂直距离 h 是不变的, 将式(3)代入式(2), 得

$$\begin{cases} H_x = \frac{\sigma_s b d}{4\pi\mu_0 h^3} (2 \sin^3 \theta \cos^2 \theta - \sin^5 \theta) \\ H_y = \frac{\sigma_s b d}{4\pi\mu_0 h^3} \cdot 3 \sin^4 \theta \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

则缺陷造成的漏磁场强度的切向分量和法向分量如图 5 所示.

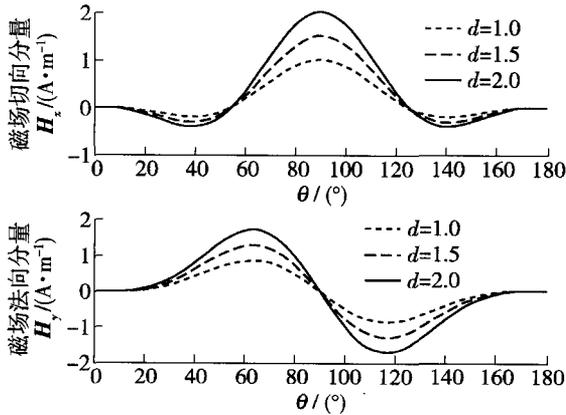


图 5 矩形槽漏磁场切向和法向分量分布曲线

Fig. 5 Rectangle slot leak field tangent and normal components distribution curve

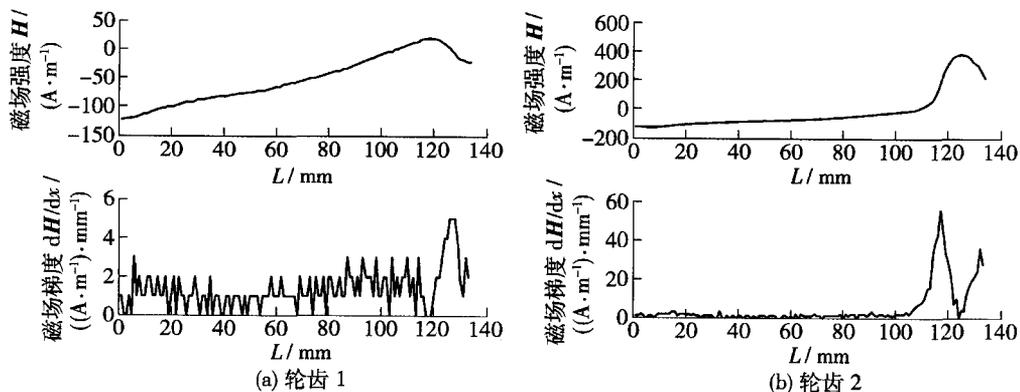


图 7 齿 1 和齿 2 磁场强度和磁场梯度分布

Fig. 7 Gear tooth1 and tooth2 magnetic intensity and field gradient distribution

漏磁场的切向分量 H_x 以 $\theta = 90^\circ$ 轴对称, 并在 $\theta = 90^\circ$ 时, 即裂纹所在处具有峰值; 而漏磁场的法向分量 H_y 以 $\theta = 90^\circ$ 中心对称, 并在 $\theta = 90^\circ$ 时, 即裂纹所在处改变符号且具有零值点. 而随着裂纹深度 d 的增加, 磁场切向分量 H_x 具有更大的峰值, 法向分量 H_y 过零处也具有更大的梯度. 从而可以此为依据对齿轮局部微裂纹缺陷的发展情况进行检测.

3 应用研究

待检测试件为某炼钢厂转炉倾动机构减速箱发生断齿失效的一斜齿齿轮, 如图 6 所示, 共 31 个齿, 其中齿 2 和齿 4 发生断齿失效.

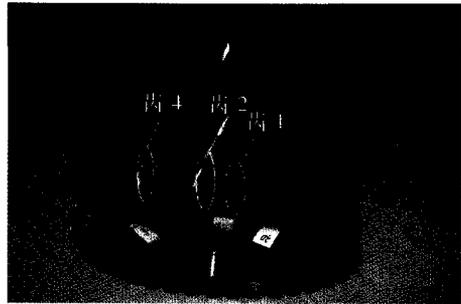


图 6 断齿齿轮

Fig. 6 Broken gear

为了对比研究断齿和正常齿工作面(即与配合齿轮发生啮合的齿面, 齿轮旋转方向为顺时针)表面微裂纹缺陷, 选用齿 1(正常齿)和齿 2(断齿)分别作为试件 1 和试件 2, 用俄罗斯动力诊断公司产品 TSC-1M-4 型应力集中检测仪沿两试件工作面齿向采集磁场分布的法向分量, 如图 7 所示.

从图中可看出, 齿 1 和齿 2 在齿的末端(发生断齿的一端, 下同)都处于磁场强度 H 的过零区域, 并且磁场梯度 dH 具有峰值, 但齿 1 的磁场梯度峰值

4 结论

1) 金属磁记忆是一种新兴无损检测方法,常应用于平板、管道、容器及焊缝质量检测中,也用于在实验室中研究磁性金属的力学性能,但在齿轮等旋转机械的状态监测和故障诊断中应用尚且不多,且不够成熟。

2) 在磁记忆检测基本原理的基础上,提出关于齿轮早期局部微裂纹缺陷的漏磁信号模型;分析得出,裂纹所在区域漏磁场分布的切向分量具有峰值,而法向分量过零且梯度具有峰值;并且随着裂纹深度的增大,切向分量的峰值和法向分量梯度的峰值也增大。

3) 将上述理论应用于工程实际案例,即一断齿故障齿轮的表面微裂纹检测,得到了裂纹发展趋势推断,显微分析结果验证了推断的正确性。同时研究结果表明,磁记忆检测为齿轮运行状态监测和故障诊断提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 张卫民,董韶平,张之敬. 金属磁记忆检测技术的现状与发展[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10): 892-896.
ZHANG Wei-min, DONG Shao-ping, ZHANG Zhi-jing. State-of-the-art of metal magnetic memory testing technique [J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(10): 892-896. (in Chinese)
- [2] DOUBOV A A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory [C] // Proc of ChsNDT 7th Conference on NDT and International Research Symposium, Shantou, October 26-30, 1999.
- [3] 张卫民,刘红光,袁俊杰,等. 低碳钢扭转过程弱磁信号变化及金属磁记忆效应[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(11): 1003-1007.
ZHANG Wei-min, LIU Hong-guang, YUAN Jun-jie, et al. Change of weak magnetic signals and metal magnetic memory effects during the torsion of low carbon steel [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(11): 1003-1007. (in Chinese)
- [4] 张军,王彪,肖余之. 磁记忆与小波变换相结合的井下套管应力集中早期诊断方法[J]. 吉林大学学报, 2007, 37(2): 469-473.
ZHANG Jun, WANG Biao, XIAO Yu-zhi. Early diagnosis for the stress concentration zone of borehole casing pipe by metal magnetic memory and wavelet transform [J]. Journal of Jilin University, 2007, 37(2): 469-473. (in Chinese)
- [5] 邢海燕,樊久铭,王日新,等. 早期损伤临界应力状态磁记忆检测技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(5): 36-39.
XING Hai-yan, FAN Jiu-ming, WANG Ri-xin, et al. Critical stress state evaluation for early damage with metal magnetic memory method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(5): 36-39. (in Chinese)
- [6] 冷建成,徐敏强,李建伟,等. 磁记忆信号与应力之间的关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(2): 232-235.
LENG Jian-cheng, XU Min-qiang, LI Jian-wei, et al. Relationship between magnetic memory signal and stress [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(2): 232-235. (in Chinese)
- [7] 张静,周克印. 不同应力状态下金属磁记忆检测信号特征[J]. 合肥工业大学学报, 2007, 30(3): 381-383.
ZHANG Jing, ZHOU Ke-yin. Analysis of the characteristics of the metal magnetic memory signal under different stress states [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2007, 30(3): 381-383. (in Chinese)
- [8] 邸新杰,李午申,严春妍,等. 焊接裂纹金属磁记忆信号的特征提取与应用[J]. 焊接学报, 2006, 27(2): 19-22.
DI Xin-jie, LI Wu-shen, YAN Chun-yan, et al. Feature extraction of metal magnetic memory signal and its application for weld crack [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(2): 19-22. (in Chinese)

(责任编辑 杨开英)