

基于磁机械效应的列车轮对勒伤检测方法

邓远辉, 陈 钊, 李路明¹⁾, 杨德智
(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘 要: 轮对的勒伤缺陷对火车的运行安全危害严重。提出了基于微磁的检测方法, 分析了磁机械效应原理, 试验研究了列车轮对勒伤部位因应力集中导致的磁场分布变化, 研制了勒伤检测仪。实验研究表明, 该方法对勒伤缺陷十分敏感, 具有良好的检测效果。

关键词: 磁机械效应; 磁场分布; 应力集中; 勒伤; 列车轮对

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2007)06-0301-03

A Method Based on Magneto Mechanical Effect to Inspect Press Fit Defect of Railway Wheelset

DENG Yuan-hui, CHEN Xing, LI Lu-ming¹⁾, YANG De-zhi

(Department of Mechanical engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The press fit defect of railway wheelset would cause serious safety problem on the train. A testing method base on magneto mechanical effect was proposed, the magneto mechanical principle was analyzed, the magnetic field distribution caused by stress concentration located on press fit defect of railway wheelset was researched by trials, and an instrument was developed to detect as well. Testing results showed that it was very effective in detecting the defect on the press fit surface.

Keywords: Magneto mechanical effect; Magnetic field distribution; Stress concentration; Press fit defect; Railway wheelset

列车轮对的勒伤是指在向车轴压装车轮时, 由于轴或者轮孔有局部形状缺陷或者没有对中而强行压入导致车轴出现局部变形而产生的缺陷。勒伤缺陷不仅影响轮对的使用寿命, 还可能导致断轴, 从而引发火车出轨等严重事故, 因此对勒伤缺陷的有效检测和预防是火车运行安全中不可忽视的问题。由于勒伤属于内部缺陷, 在轴和轮的交界, 不仅肉眼无法观察, 用超声方法也很难检测。目前铁道部门在轮轴压装过程中, 主要采用监测压力曲线的方法防止勒伤的发生。该方法在防止勒伤形成方面存在局限, 为此笔者提出了利用微磁对勒伤缺陷进行检测,

并基于微磁检测的原理设计制造了一套适用于检测火车轮对勒伤的仪器。实验证明, 该仪器对勒伤缺陷十分敏感并能有效检测。

1 检测原理

1.1 理论分析

根据磁机械效应, 材料在拉伸或者压缩应力作用下, 其磁特性会发生改变。材料所受应力与其引起的磁场变化的关系很复杂, 不仅与应力的大小有关, 与材料本身的性质和外磁场也有关系。Craik 和 Wood 对一系列试件进行了磁机械效应的实验, 研究了在不同材料、不同外场中, 磁场随应力的变化^[1]。图 1 是其在在外磁场强度 H 为 26, 80 和 132 A/m 时对低碳钢的研究结果。他们指出, 压应力和拉应力对磁场的作用是不同的, 当应力卸载时, 磁场不会恢复原状, 而仍然保留了部分变化。

根据 Jiles 提出的磁机械效应理论, 对于各向同

收稿日期: 2006-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(50371045); 铁道部-清华大学科技研究基金(t200407)

1) 清华大学 航天航空学院, 北京 100084

作者简介: 邓远辉(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁无损检测技术。

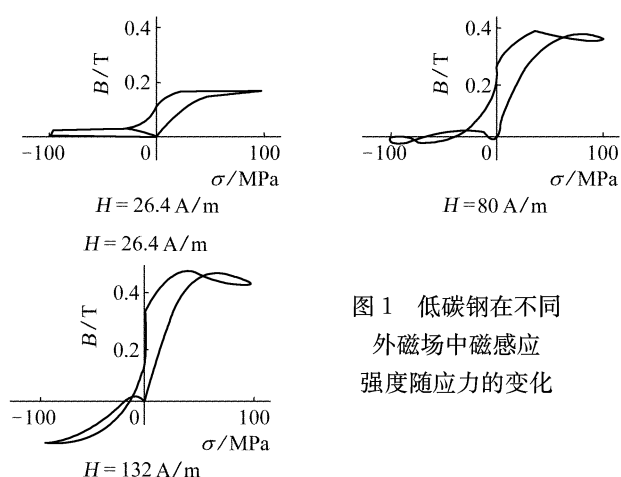


图1 低碳钢在不同外磁场中磁感应强度随应力的变化

性材料,在其弹性范围内,应力产生的等效场为^[2-5]:

$$H_{\sigma} = \frac{3}{2} \times \frac{\sigma_0}{\mu_0} \left(\frac{d\lambda}{dM} \right)_{\sigma} (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta)$$

式中 σ_0 ——加载的主应力,MPa;

μ_0 ——初始磁导率,H/m;

λ ——磁致伸缩系数;

M ——磁化强度,A/m;

θ ——应力加载方向与外磁场之间的夹角;

ν ——泊松比。

磁致伸缩系数和磁化强度之间的关系为:

$$\lambda = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma_i M^{2i}$$

式中 γ_i 是该多项式的系数,无量纲。通过泰勒展开式描述磁致伸缩多项式中的系数和应力之间的关系式为:

$$\gamma_i(\sigma) = \gamma_i(0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma^n}{n!} \gamma_i^n(0)$$

即得到有效场的表达式为:

$$H_{\sigma} = 3 \times \frac{\sigma}{\mu_0} \sum_{i=0}^{\infty} \left[i M^{2i-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma^n}{n!} \gamma_i^n(0) \right] (\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta)$$

对于铁磁性材料,根据实验经验数据,计算项

$\sum_{i=0}^{\infty} \left[i M^{2i-1} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma^n}{n!} \gamma_i^n(0) \right]$ 中可只用到 $n=1$ 的一项,并取 i 为 1,2 两项,带入 Kuruzar 和 Cullity 的磁致伸缩经验数据得^[6]:

$$\gamma_1(0) = 7 \times 10^{-18} / \text{A}^2 \text{m}^2$$

$$\gamma_1'(0) = -1 \times 10^{-25} / \text{A}^2 \text{m}^2 \text{Pa}$$

$$\gamma_2(0) = -3.3 \times 10^{-30} / \text{A}^4 \text{m}^4$$

$$\gamma_2'(0) = 2.1 \times 10^{-38} / \text{A}^4 \text{m}^4 \text{Pa}$$

得到可计算的有效场的表达式为:

$$H_{\sigma} = 2 \times \frac{\sigma}{\mu_0} [(14 \times 10^{-18} M - 13.2 \times 10^{-30} M^3) +$$

$$(8.4 \times 10^{-38} M^3 - 2 \times 10^{-25} M) \sigma] \cdot$$

$$(\cos^2 \theta - \nu \sin^2 \theta)$$

由上式可见,当应力超过一定值时,应力越大其等效场也越大,因此在应力集中区,应力产生的等效场不同于周围区域。一系列的研究也表明,在地磁场为外场的环境中,铁磁构件应力集中部位的表面磁场分布与其他部位有很大区别^[7-10]。

1.2 勒伤检测

当火车轮对有勒伤存在时,嵌合部位结合面的压力大小分布不均,在勒伤部位表面会形成应力集中;根据等效场的计算式,在轮对应力集中的部位其磁场强度相应较高。因此勒伤部位的磁场将明显不同于其他位置的磁场,通过检测磁场畸变的位置和幅度就可以对轮对的应力状态进行评价,判断出应力集中的部位,并检测出缺陷。

勒伤的检测方法如图2和3所示。检测时主要测量轮对嵌合部位轮面的磁场分布,将小车紧贴车轮内侧,同时小车上的滚轮与车轴接触,小车环绕轮对转动一周即完成一次检测。

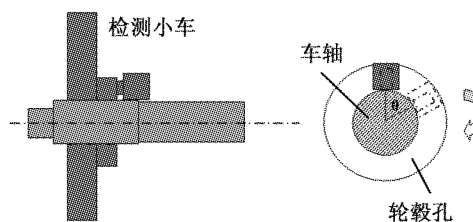


图2 勒伤检测示意图



图3 勒伤现场检测

2 勒伤检测仪

勒伤检测仪是根据上述原理研制的检测仪器,由探测小车和采集控制系统组成(图4)。小车上封装了微磁传感器和光电编码盘,同时检测磁场和小车的位移;控制系统对磁场信号进行处理与显示,通过峰值以及变化率等参数对应力变化剧烈程度进行评价,并判断是否存在勒伤。

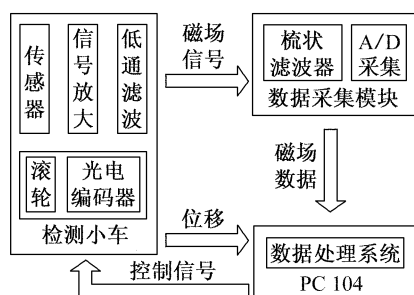


图4 勒伤检测系统框图

探测小车中的传感模块由微磁传感器、信号放大器和滤波器组成,其测量范围为 $\pm 600 \mu\text{T}$,分辨率为 10^{-10} T 。采集控制系统由信号采集模块和工业PC平台PC104组成。磁场信号经过信号采集模块滤波处理后,转换成数字信号送入PC104中,再通过运行在PC104上的信号处理系统对数据进行处理与显示。

3 实验研究

采用以上检测方法和仪器对40多个轮对进行了检测。实验中发现勒伤轮对与正常轮对之间的磁场分布有很大差异。

实验所测轮对为整体辗钢车轮,车轴是实心轴,车轴与轮毂配合面的直径是208 mm,轴毂有效接触长度是160 mm,车轮和车轴材料的弹性模量为207 000 MPa,泊松比为0.3,轮对使用的材料牌号为CL 45 MnSiV,其化学成分为: C0.44%~0.52%, Si0.40%~0.60%, Mn0.80%~1.20%, V0.08%~0.15%, P $\leq$ 0.035%, S $\leq$ 0.04%。

正常轮对在压装时,车轮与车轴结合的嵌入部位受力是均匀的,没有大的应力集中存在。因此正常轮对嵌入部位的磁场分布均匀(图5)。

图6为轮对嵌入部位磁场的极值差(即最大值与最小值之差),所有正常轮对的极值差均在 $50 \mu\text{T}$

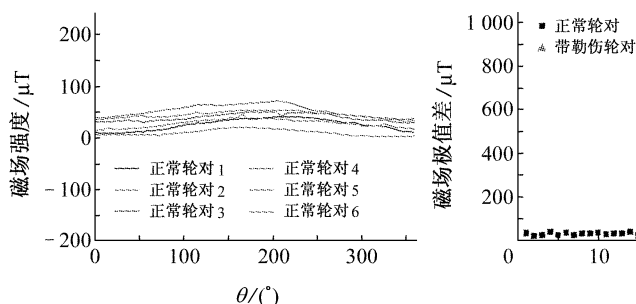


图5 正常轮对嵌合部位磁场分布

图6 轮对磁场分布极值差

以内,这说明正常轮对磁场分布的波动幅度很小。

勒伤轮对的磁场分布与正常轮对有很大区别(图7),磁场分布波动明显,且其磁场强度超出 $\pm 100 \mu\text{T}$,甚至高达 $500 \mu\text{T}$ 。这些差异是由于应力集中造成的。图6中勒伤轮对的极值差 $>100 \mu\text{T}$,比正常轮对高出许多,说明勒伤轮对磁场分布的波动剧烈。

实验结果可见,带勒伤的轮对较正常轮对在嵌入部位的磁场分布区别明显。正常轮对嵌入部位的磁场分布平稳,没有峰值;而带勒伤轮对的嵌入部位的磁场分布波动很大,在勒伤部位有明显的峰值。另外两者磁场分布的极值差也不一样,正常轮对的极值差约 $50 \mu\text{T}$,而带勒伤轮对的极值差一般 $>100 \mu\text{T}$ 。

带勒伤轮对和正常轮对之间的这种区别可用磁机械效应来解释。根据磁机械效应理论,材料在应力作用下会发生磁化,应力导致的磁场强度和应力的有关,应力越大,磁场强度越高。轮对在正常压装时,轮轴之间的相互作用力不大,且分布均匀,此时轮对中的应力较小,应力导致的磁场强度也较低。正常轮对的磁场强度量级和地磁场相当,考虑到地磁场的磁化作用,应力的影响几乎可以忽略。当轮对产生勒伤时,应力集中在勒伤部位,此处应力导致的磁场强度也比其他位置高。因此在带勒伤轮对的磁场分布图中,通常有波峰存在,且峰值较高。从图7可见,带勒伤轮对的磁场强度是地磁场的2~10倍,此时地磁场的影响几乎可以忽略。通过轮对嵌入部位的磁场分布,可以很容易地判断出轮对中是否存在勒伤,以及勒伤所在的部位。

4 结论

针对火车轮对勒伤提出了基于磁机械效应的检测方法,并开发出了勒伤检测仪。实验表明,该检测

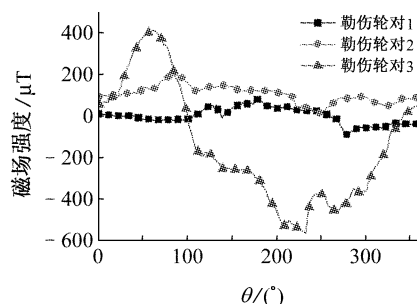


图7 勒伤轮对嵌合部位磁场分布

(下转第364页)