

# 巴克豪森噪声无缝线路应力检测仪的研制及应用

王 骁<sup>1</sup> 刘 辉<sup>1</sup> 祁 欣<sup>1\*</sup> 董炳义<sup>2</sup> 邱锦玉<sup>2</sup>

(1. 北京化工大学 理学院, 北京 100029; 2. 北京铁路局丰台工务段, 北京 100071)

**摘 要:** 利用磁巴克豪森效应原理研制了巴克豪森噪声无缝线路应力检测仪, 该检测仪可用来检测铁轨的内部应力、表面硬度及疲劳损伤, 可以实现在线、瞬态以及便携式测量。通过在北京丰台区工务段选取一段无缝线路, 采用该仪器对此段无缝线路的缓冲区、伸缩区以及固定区进行定点检测, 研究整根铁轨内部残余应力的变化, 发现铁轨内的残余应力基本维持在一个固定的数值, 从实验过程和结果得出该检测技术是可行的。

**关键词:** 巴克豪森效应; 铁磁材料; 残余应力; 在线测量; 疲劳损伤

**中图分类号:** U216

## 引 言

随着铁路高速化与重载化的发展, 世界各国均广泛采用无缝线路技术。由于无缝线路钢轨不能自由伸缩, 当轨温发生变化时, 将产生很大的纵向温度力。过大的温度力会导致钢轨臌曲失稳或断裂, 导致车辆脱轨, 危及行车安全。因此对无缝线路铁轨内残余应力<sup>[1]</sup>的检测及评价至关重要。1919年, 德国科学家巴克豪森发现了磁巴克豪森噪声 (magnetic Barkhausen noise, MBN) 现象<sup>[2]</sup>。随后于上世纪八九十年代巴克豪森噪声应力检测技术发展起来, 该技术可以实现对铁磁材料应力在线、瞬态、便携、非定点的检测, 是一种非常有发展潜力的动态无损检测技术。

利用该技术研制的巴克豪森应力检测仪可以检测钢结构构件的应力<sup>[3]</sup>, 可以测量曲轴的残余应力并对其表面状态作出分析和评价<sup>[4]</sup>, 本论文在前人工作基础上, 完成了巴克豪森应力检测仪的研制, 并将其应用到无缝线路铁轨残余应力的测量上, 对北京市丰台区工务段选取的一段无缝线路进行内部应力的检测, 研究铁轨轨腰结构的焊接接头附近的应力大小和分布, 从而确保火车在铁路上运行安全, 具有十分重要的实际意义。

收稿日期: 2009-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(60971019)

第一作者: 男, 1986年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: Qixin@mail.buct.edu.cn

## 1 巴克豪森应力检测仪的研制

### 1.1 系统框图

利用巴克豪森效应原理研制的巴克豪森整个系统框图如图1所示, 整个系统由传感器、磁化电路、信号处理电路、A/D转换电路以及数据显示电路等组成。

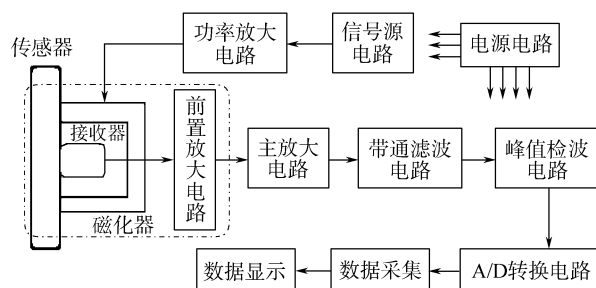


图1 巴克豪森应力检测系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the Barkhausen stress measurement system

### 1.2 传感器的制作

巴克豪森噪声应力检测系统<sup>[5]</sup>的传感器部分包括磁化器、接收器和前置放大器3部分组成, 如图2所示。磁化器用的是U型钢片磁芯, U型磁铁两壁铁心截面积为10 mm×6 mm, 用厚度为0.1 mm的硅钢片重叠压制而成。设计提升力9.8 N, 磁化工作电流0.5 A。接收器用的是圆柱体高频磁芯, 直径为4 mm, 高为6 mm, 外加屏蔽, 并采用0.2 mm胶片缠绕。线圈的两端, 一端接模拟地, 一端直接接至前置放大器的输入端。接收器用有机玻璃固定, 以硅橡胶为弹性衬垫。

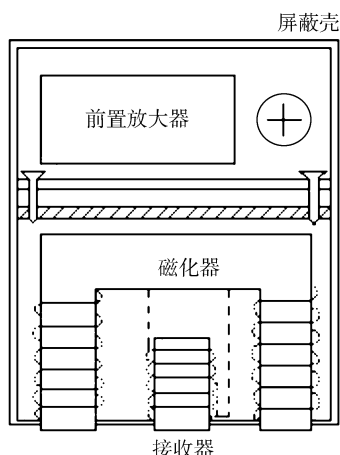


图2 自制传感器探头示意图

Fig.2 Schematic diagram of the homemade sensing head

磁化器和接收器的具体参数如表1所示。

表1 磁化器和接收器参数

Table 1 Parameters of the magnetizer and receiver

线圈	导线直径/mm	匝数	形状	材料
磁化	0.5	280	U形	钢
接收	0.1	60	圆柱形	铁氧体

实验发现,巴克豪森噪讯的接收效果与接收线圈的匝数、直径有关。前置放大器采用的是 LF 系列芯片,设计由电容、电阻构成的高通滤波电压放大器。考虑实施检测所处的复杂电磁环境,将这三个部分一起封装在金属屏蔽盒中以减小外界的电磁干扰。

### 1.3 系统电路设计

整个系统的电路部分<sup>[6]</sup>主要有三部分组成,由 36V 蓄电池通过电源电路提供不同的工作电压。第一部分是磁化电路部分,由信号源电路产生正弦波信号,经过功放电路将磁化器磁化,接收器再将接收到微弱的  $\mu\text{V}$  量级的 MBN 信号经过前置放大电路放大到 mV 量级;第二部分是信号处理电路部分,信号经过主放大电路和带通滤波电路,将 MBN 信号从 mV 量级放大到 V 量级,再由检波电路进行峰值检波;第三部分是 A/D 转换电路以及数据显示部分,将检波出来的 MBN 信号进行 A/D 转换,再经单片机进行数据采集,最终将 MBN 信号的电压值以及对应的应力值在液晶屏上显示出来。不同电路用到的芯片以及工作电压是不一样的。观察到的磁巴克豪森信号和电压跟随信号如图3所示,主电路用到的芯片和工作电压如表2所示。

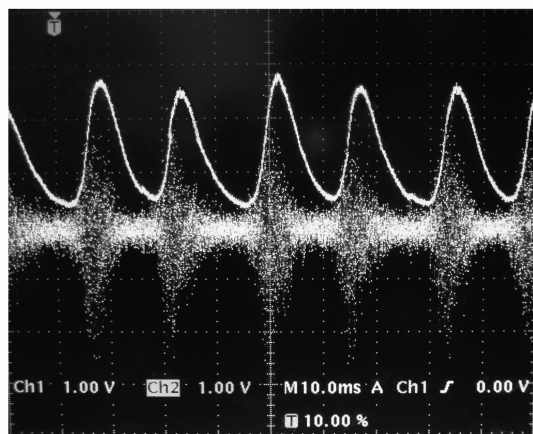


图3 磁巴克豪森信号和检波跟随电压信号

Fig.3 Magnetic Barkhausen signal and detector following the voltage signal

表2 主要电路的工作电压

Table 2 Working voltages in the main circuit

电路	芯片型号	工作电压/V	实际工作电压/V
信号源	ICL8038	$\pm 5 \sim \pm 15$	12
功率放大	TDA2030a	$\pm 6 \sim \pm 22$	12
前置放大	OP37	$\pm 4 \sim \pm 18$	$\pm 15$
主放大	LF356	$\pm 15 \sim \pm 20$	$\pm 15$
A/D 转换	ADC0809	0 ~ 5	5

## 2 载荷试验

实验器材有巴克豪森噪讯应力检测仪、HYW-1000KN 电液伺服万能材料试验机、U74 钢轨轨腰上截取的  $30\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 250\text{ mm}$  的拉伸试块和  $30\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 60\text{ mm}$  的压缩试块。

首先进行拉伸试验,将自制巴克豪森噪声应力检测仪的传感器靠在拉件检测试块表面,用橡皮筋固定,通过试验机的液压夹紧试块,从 0 kN 开始提供给拉件检测试块拉力,每隔 10 kN 从仪器面板上记录 1 次数据,直到 200 kN 时停止计数。接着进行压缩试验,将传感器靠在压件检测试块表面,同样用橡皮筋固定,通过试验机的压盘压紧试块,从 0 kN 开始提供给压件检测试块压力,每隔 10 kN 从仪器面板上记录 1 次数据,直到 200 kN 时停止计数。

相应的标准试件的巴氏噪讯随应力变化<sup>[7]</sup>的标定曲线( $U_{\text{MBN}} - \sigma$ )如图4和图5所示,由图中可观察到铁磁材料产生的巴克豪森噪讯信号和载荷成近似的线性关系。巴克豪森噪讯信号随拉力的增加而增大,随压力的增加而减少。

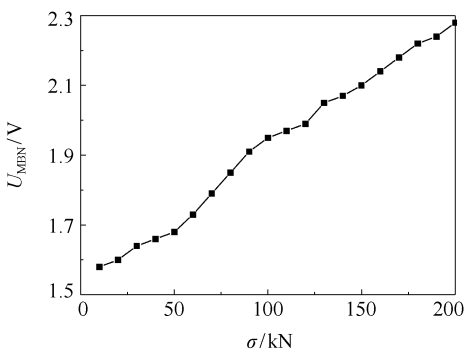


图 4 拉件检测试块的  $U_{\text{MBN}}-\sigma$  曲线

Fig.4  $U_{\text{MBN}}-\sigma$  plot of the drawing component

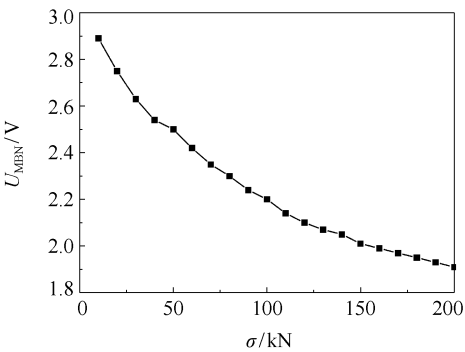


图 5 压件检测试块的  $U_{\text{MBN}}-\sigma$  曲线

Fig.5  $U_{\text{MBN}}-\sigma$  plot of the compression component

3 检测铁轨应力及数据处理

本次试验选取的是北京铁路局丰台工务段从丰台区到双桥下行 9400 m 处一段温度应力式无缝线路,全长 510 m,两边各有一段 20 m 的缓冲区和一段 100 m 的伸缩区,中间是一段 270 m 的固定区,如图 6 所示。中午 12:30 开始测量。

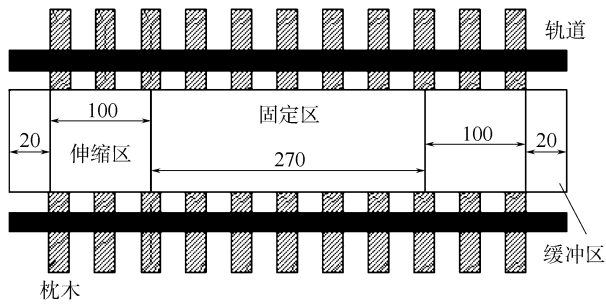


图 6 被测轨道示意图

Fig.6 Schematic diagram of the railway detector

检测铁轨残余应力<sup>[8]</sup>的器材包括巴克豪森噪声应力检测仪、钢轨测温计、蓄电池、示波器。在线检测首先用示波器对巴克豪森仪器的信号稳定性进

行效验。对缓冲区采用 5 m 间隔的测试点,对伸缩区和固定区选取 10 m 间隔的测试点,共 54 个测试点,分别对轨腰的两侧进行测量。用钢轨测温计测量轨温是 44 ~ 40 ℃,确定一切正常后,开始进行测量,由于铁轨轨腰表面有锈迹,先用钢毛刷对轨腰表面进行处理,然后将自制巴克豪森噪声应力检测仪的传感器靠在轨腰表面,从仪器面板上读取巴克豪森对应的应力值。铁轨内轨腰和外轨腰的巴氏噪声对应的内部应力  $\sigma$  随距离  $L$  变化的测试曲线分别如图 7 和图 8 所示。

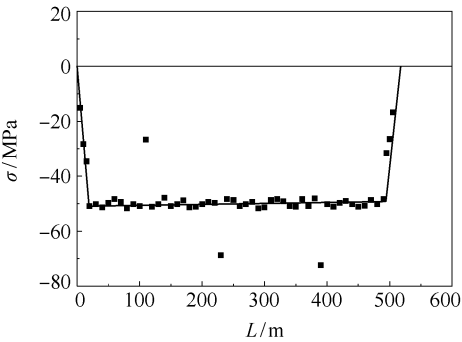


图 7 内轨腰的  $L-\sigma$  图像

Fig.7  $L-\sigma$  image of the internal rail waist

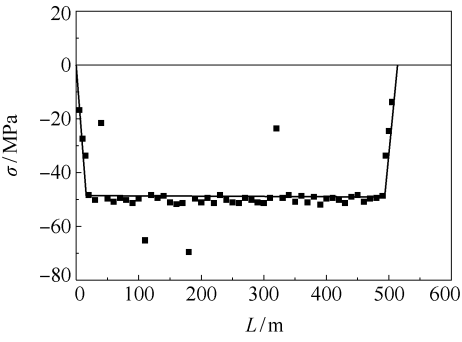


图 8 外轨腰的  $L-\sigma$  图像

Fig.8  $L-\sigma$  image of the external rail waist

从图中可以看出所测得应力值在 50 MPa 平均值浮动,而温度每升高 1 ℃,对应钢轨内产生的温度力增加 2.5 MPa,据现场情况可知锁定轨温为 27 ℃,用钢轨测温计测量轨温是 44 ~ 40 ℃,则产生温度力约为 37.5 MPa。考虑到钢轨内的残余应力<sup>[9]</sup>,与 50 MPa 的数值基本相符。

4 结论

铁磁材料产生的巴克豪森噪声信号随拉力的增加而增大,随压力的增加而减少,而且与载荷成近似的线性关系;铁轨内部材料产生的温度应力是压应

力,测量的点大部分围绕在 50 MPa 左右浮动,较大的应力值点可以作为判断胀轨跑道的依据。

#### 参考文献:

- [1] 祁欣,陈娟. 局部磁化法对焊接结构件残余应力的磁弹噪讯测试[J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 1-4.  
Qi X, Chen J. Assembly by means of local magnetization method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 1-4. (in Chinese)
- [2] Franco F A, Padovese L R. NDT flaw mapping of steel surfaces by continuous magnetic Barkhausen noise; Volumetric flaw detection case [J]. NDT&E International, 2009, 42(8): 721-728.
- [3] 王威,苏三庆. 用磁声法 MAE 检测钢结构构件应力的机理和应用[J]. 西安建筑科技大学学报, 2005, 37(3): 322-325.  
Wang W, Su S Q. The mechanism and application of magnetoacoustic method testing stress for steel structure [J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech, 2005, 37(3): 322-325. (in Chinese)
- [4] 王文军,侯瑞生. 曲轴残余应力巴克豪森测试仪的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2006(4): 19-20.  
Wang W J, Hou R S. Development of residual stress instrument using Barkhausen noise technique [J]. Instrument technique and sensor, 2006(4): 19-20. (in Chi-

nese)

- [5] Blaow M, Evans J T, Shaw B A. Effect of hardness and composition gradients on Barkhausen emission in case hardened steel [J]. Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 303: 153-159.
- [6] 祁欣,刘竟业,田建龙. 磁弹噪讯技术检测铁磁材料疲劳损伤[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 54-57.  
Qi X, Liu J Y, Tian J L. Nondestructive testing of ferromagnetic material by magneto-elasticity noise technique for fatigue damage [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(1): 54-57. (in Chinese)
- [7] Gauthier J, Krause T W, Atherton D L. Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique [J]. NDT&E International, 1998, 31(1): 23-31.
- [8] 祁欣,于石生. 无损检测残余应力的新方法:BN 效应[J]. 材料科学与工艺, 1993, 1(3): 54-59.  
Qi X, Yu S S. A new method of nondestructive testing residual stress: Barkhausen Effect [J]. Material Science and Technology, 1993, 1(3): 54-59. (in Chinese)
- [9] Yelbay H I, Cam I, Gur C H. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique [J]. NDT&E International, 2009, 43(1): 29-33.

## Development and application of a Barkhausen noise continuous welded rail stress detector

WANG Xiao<sup>1</sup> LIU Hui<sup>1</sup> QI Xin<sup>1</sup> DONG BingYi<sup>2</sup> DI JinYu<sup>2</sup>

(1. School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Fengtai Railway Public Works Section of the Beijing Railway Bureau, Beijing 100071, China)

**Abstract:** A Barkhausen noise continuous welded rail stress detector has been developed based on the magnetic Barkhausen effect. This detector can be used to detect the internal stress, skin hardness and fatigue damage of ferromagnetic materials, and results can be obtained instantaneously by using this portable equipment on site. Using a public works section of the continuous welded rail in the Fengtai district of Beijing as an example, the Barkhausen noise stress detector was used to detect the buffer zone, the stretch zone and the fixed zone of the continuous welded rail at fixed points. By studying the changes in internal residual stress of the whole rail, it was shown that the residual stress of the rail has a fixed value. The new detector is practical and provides reliable results.

**Key words:** magnetic Barkhausen effect; ferromagnetic material; residual stress; testing on line; fatigue damage