

文章编号: 1000-6893(2009)11-2224-05

# 航空铁磁材料磁记忆检测新方法

任吉林<sup>1</sup>, 白鹭<sup>2</sup>, 范振中<sup>1</sup>, 刘昌奎<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

(2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

## New Magnetic Memory Testing Method of Aeronautical Ferromagnetic Material

Ren Jilin<sup>1</sup>, Bai Lu<sup>2</sup>, Fan Zhenzhong<sup>1</sup>, Liu Changkui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education,

Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

(2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**摘要:** 为提高现有磁记忆检测方法的可靠性,充分考虑各向磁记忆信号分量特征,提出法向和切向相结合的磁记忆检测新方法,对航空铁磁材料 18CrNi4A 试件在不同拉伸载荷下同时采集法向和切向两个方向上的磁记忆信号,并对信号进行小波包滤波处理后取李萨如图,用图中封闭区域出现的位置判断应力集中部位,用封闭区域面积的大小判断应力集中程度,研究磁记忆信号法向分量和切向分量联合检测材料的应力状态。结果表明:对该材料试件磁记忆信号法向分量和切向分量进行小波包降噪方法切实可行,处于应力集中试件的磁记忆信号反映在李萨如图上会出现封闭区域,并且随着应力集中程度的增大,李萨如图上封闭区域的面积有增大趋势,材料出现明显屈服后,面积增大得更加明显。该方法具有一定的工程实际应用价值。

**关键词:** 无损检测; 磁记忆检测; 小波包; 李萨如图; 应力集中

**中图分类号:** V252; TG115.28 **文献标识码:** A

**Abstract:** With the aim of improving the reliability of magnetic memory testing and by fully considering the characteristics of magnetic memory all-component signals, a novel magnetic memory testing method which combines the normal and tangential signals is proposed. First, we acquire magnetic memory signals of aeronautical ferromagnetic tensile 18CrNi4A specimens under different tensile loadings in both the normal and tangential directions. Then the signals are filtered using wavelet package method, and Lessajou figure is obtained. The location of the close area in the figure indicates the place of the stress concentration, and the size of the close area is used to judge the extent of the stress concentration. With this method, research is conducted concerning the relation of magnetic memory signals between the normal direction and tangential direction under stress concentration. It is proved that the wavelet package denoising is feasible. The signals in the stress concentration part present a close area in the Lessajou figure, and the size of the close area increases with the increasing extent of stress concentration. When the obvious submit of the material exists, the size of the close area increases more rapidly. The method is of practical value in engineering application.

**Key words:** nondestructive testing; magnetic memory testing; wavelet package; Lessajou figure; stress concentration

金属磁记忆检测技术<sup>[1-2]</sup>在建立准确可靠的应力-磁场方程之前,必须通过磁记忆信号的外部特征对铁磁性材料的应力状态进行判断,但现有的磁记忆检测方法<sup>[3-4]</sup>可靠性不高,容易出现漏检误判,原因主要归结为两点:一是由于磁记忆信号微弱,在相对较强的地磁场干扰下,对信号的处理方法提出很高的要求;二是现有的磁记忆检测方

法自身还达不到准确反映应力状态的目的,方法有待改进。和漏磁检测方法不同,磁记忆检测是靠自发磁化场反映材料的应力状态,磁记忆信号是矢量<sup>[5]</sup>,现有磁记忆检测方法主要以单一方向上的磁场信号(法向分量或切向分量)进行判断,这就人为割裂了磁场信号法向分量与切向分量的关系,造成了部分带有缺陷特征的信息的丢失,而这种缺陷信息的丢失对于相对微弱的磁记忆信号来说可能是致命的。本文提出一种新的磁记忆检测方法,通过改进信号处理方式提取信号,并提出磁记忆信号法向分量和切向分量相结合的检测

收稿日期:2008-10-28; 修订日期:2009-01-30

基金项目:航空科学基金(06ZF56009);无损检测技术教育部重点实验室开放基金(ZD200729012)

通讯作者:任吉林 E-mail: nhundt@sohu.com

方法。

### 1 试验系统及信号采集

采用航空铁磁材料 18CrNi4A 进行拉伸试验,18CrNi4A 是一种优良的渗碳钢,具有高的淬透性和较好的渗碳、焊接、切削及磨削<sup>[6]</sup>性能。该钢经淬火及低温回火后具有较高的抗拉强度及良好的综合力学性能,有高的疲劳强度及低的缺口敏感性。该钢的元素组成如表 1 所示。

表 1 18CrNi4A 元素组成

Table 1 Constituent elements of 18CrNi4A

元素	C	Si	Mn	S
质量分数/%	0.15~0.20	≤0.35	0.30~0.60	≤0.01
元素	P	Cr	Ni	
质量分数/%	≤0.015	0.80~1.10	3.75~4.25	

18CrNi4A 拉伸试件尺寸形状如图 1 所示,试件中央加工直径 2 mm 的圆孔以利于拉伸过程中产生应力集中。

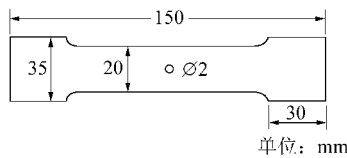


图 1 含中心小孔的平板试件

Fig. 1 Flat-plane type specimen with a regular elliptical hole in center

为实现法向和切向磁记忆信号数据采集,搭建了连续采集系统。该系统由磁阻探头、扫描架、电机磁场扫描控制器、数据采集设备和计算机组成。系统原理图如图 2 所示。

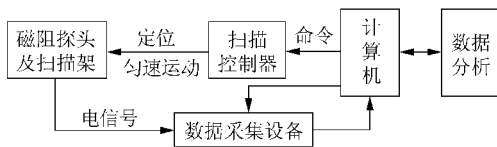


图 2 双向磁记忆信号连续采集系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of continuous acquisition system of bidirectional magnetic memory signal

磁阻探头选用 Honeywell 公司的 HMC1002 作为传感器芯片。HMC1002 是二维磁阻微电路,是小型集成电路封装(SOIC)的双磁场传感器。两个传感器的敏感方向互相垂直。HMC1002 对于 ±2 Gauss 范围内的磁场很敏感,具有灵敏度为 3.2 mV/V/Gauss 的线性输出,它的分辨率为 27 μGauss,非常适用于磁记忆信号的测量。

电机扫描系统由电机控制器,步进电机和自行设计的扫描架组成。扫描架的引入消除了探头抖动造成的提高干扰。扫描控制器由计算机后置并口控制,分别对两个步进电机输出控制量,带动扫描架进行横向和纵向位移定位,以及搭载磁阻探头进行指定的运动,达到精确定位的目的。

数据采集设备由美国 NI 公司 PCI6221 数据采集卡和 SCB68 电磁屏蔽板组成,PCI 6221 数据采集卡具有 16 位输入分辨率,采样率最高可达 250 k/s。

扫描架带动磁阻探头在图 3 所示考查线上进行匀速运动,由采集卡进行数据采集。

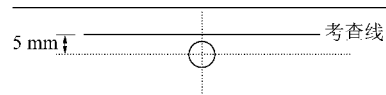
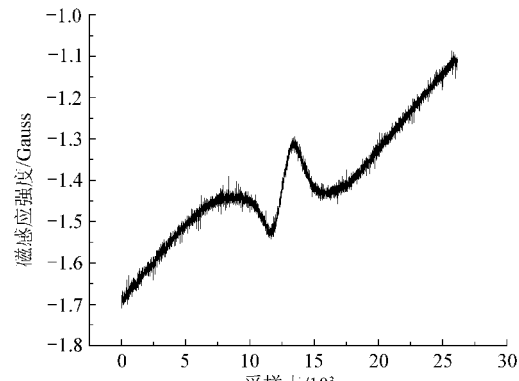


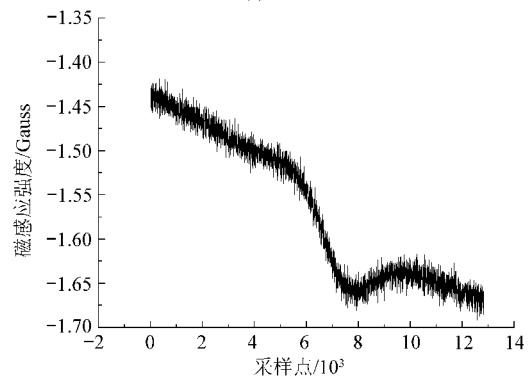
图 3 磁场考查线

Fig. 3 Reference line for magnetic measurement

采集到的磁记忆信号法向分量和切向分量典型形貌如图 4 所示。



(a) 法向分量



(b) 切向分量

图 4 未降噪磁记忆信号法向分量和切向分量

Fig. 4 Normal component and tangential component of magnetic memory signals before noise reduction

## 2 小波包降噪处理原始信号

由图4可以看出,原始信号存在噪声干扰,直接求取李萨如图效果不佳,采用小波包变换对信号进行降噪处理。

由小波变换的多分辨率分析可知,给定正交尺度函数 $\phi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ ,其二尺度关系为

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{0k} \phi(2t-k) \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{1k} \phi(2t-k) \quad (2)$$

式中: $h_{0k}, h_{1k}$ 为多分辨率分析中的滤波器系数; $t \in \mathbf{R}, k \in \mathbf{Z}$ 。为进一步推广二尺度方程,定义下列的递推关系:

$$w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_{0k} w_n(2t-k) \quad (3)$$

$$w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_{1k} w_n(2t-k) \quad (4)$$

以上定义的函数集 $\{w_n(t)\}_{n \in \mathbf{Z}}$ 为由 $w_0(t) = \phi(t)$ 所确定的小波包,小波包 $\{w_n(t)\}_{n \in \mathbf{Z}}$ 是包括尺度函数 $w_0(t)$ 和小波母函数 $w_1(t)$ 在内的一个具有一定联系的函数的集合。小波包系数递推公式为

$$\left. \begin{aligned} d_k^{j+1, 2n} &= \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j, n} \\ d_k^{j+1, 2n+1} &= \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j, n} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

小波包重构公式为

$$\begin{aligned} d_l^{j, n} &= \sum_k [h_{0(l-2k)} d_k^{j+1, 2n} + h_{1(l-2k)} d_k^{j+1, 2n+1}] = \\ &= \sum_k g_0(l-2k) d_k^{j+1, 2n} + \sum_k g_1(l-2k) d_k^{j+1, 2n+1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $g_0$ 和 $g_1$ 为综合滤波器。

小波包具有可以将信号按任意时频分辨率分解的特点,分解后可根据需要将所需频段内的信号重构,起到滤波作用。对信号进行小波包分解,可以采用多种小波包基,通过熵标准选择最优基。通过试验,采用sym6小波对信号进行5层小波包分解,熵标准采用香农熵,阈值采用软阈值处理,可以达到比较好的效果。图5是经小波包滤波后的法向和切向磁记忆信号,和图4相比降噪效果明显。

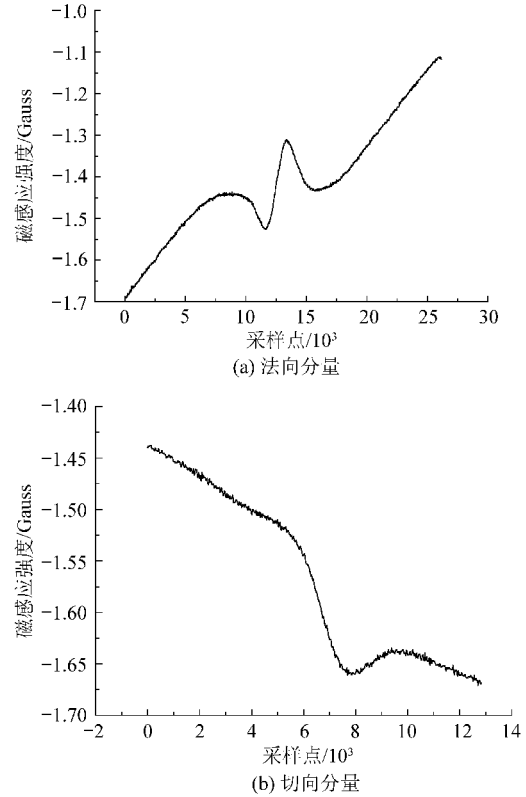


图5 小波包降噪磁记忆信号法向分量和切向分量  
Fig. 5 Normal component and tangential component of magnetic memory signals after wavelet package noise reduction

## 3 李萨如图判断应力状态

以磁记忆信号法向分量作为横坐标,切向分量作为纵坐标,绘制其法向与切向联合检测图,即李萨如图。

图6为ANSYS软件模拟应力状态下典型磁记忆信号法向分量和切向分量分布图,实际采集到的磁场信号有相似的型貌。由于磁记忆信号法向分量和切向分量在应力集中部位的这种局部极值状态,会使李萨如图中出现封闭区域,并且封闭区域的大小会随着应力集中程度的增加呈增大趋势,可以利用封闭区域检测应力集中位置,进而用封闭区域大小判断应力集中程度。

取板厚2 mm的试件4块,编号 $A_1 \sim A_4$ ,放置在拉伸试验机上进行加载试验,加载速度设定为0.5 mm/min。 $A_1 \sim A_4$ 载荷逐级增大,表2给出了试件的拉伸载荷大小。

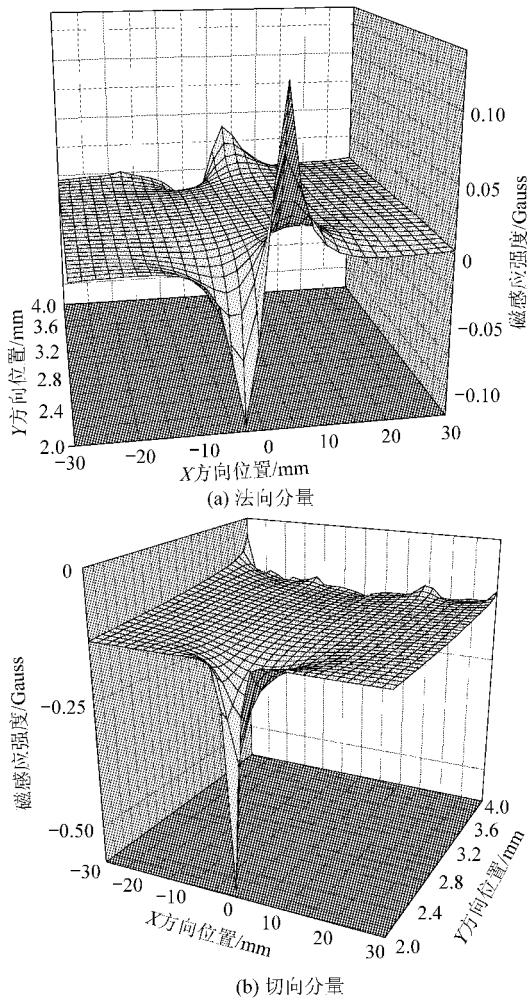


图 6 应力状态下磁记忆信号法向分量和切向分量分布图  
Fig. 6 Distribution of normal component and tangential component of magnetic memory signals in stress state

表 2 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub> 试件拉伸载荷

Table 2 Tensile loading of specimens A<sub>1</sub>-A<sub>4</sub>

试件	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
载荷/kN	50.200	51.011	51.230	51.300
试件状态	无明显屈服	屈服点	已屈服	明显屈服

图 7 为 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub> 试件在不同拉伸载荷下磁记忆信号的李萨如图,横轴为磁场法向分量,纵轴为

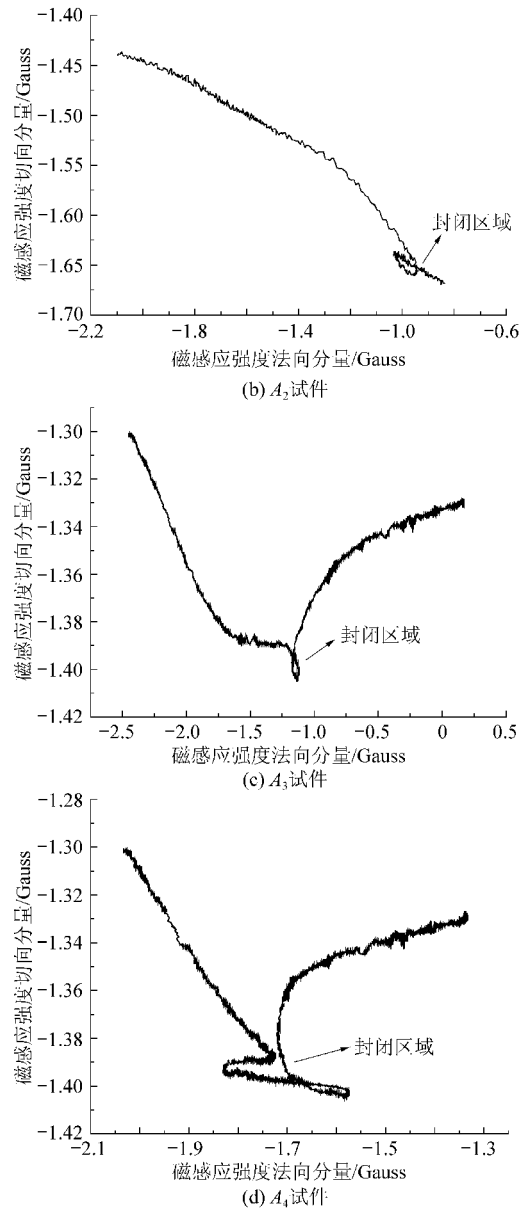
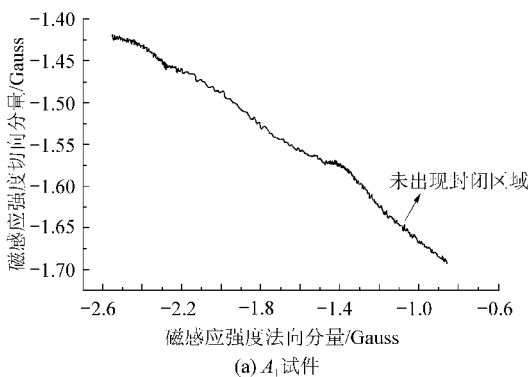


图 7 A<sub>1</sub>~A<sub>4</sub> 试件李萨如图

Fig. 7 Lessajou figures of specimens A<sub>1</sub>-A<sub>4</sub>

磁感应强度切向分量。由图可见,在应力状态小时,李萨如图不存在明显的封闭区域;随着载荷的增大,李萨如图开始出现封闭区域,并且封闭区域的面积随着载荷的增大有逐渐增大的趋势,封闭区域反映的即是试件上圆孔附近的应力集中区。

#### 4 试验结果分析

为得到边缘清晰的李萨如图,对采得的磁记忆信号法向分量和切向分量进行小波包降噪处理,采用 sym6 小波对信号进行 5 层小波包分解,图 5 结果表明用小波包降噪方法处理磁记忆信号切实可行。实际检测到的磁记忆信号法向分量和切向分量在应力集中区会产生突变,出现局部极

大值<sup>[7]</sup>,形貌如图6所示,处于应力集中试件的磁记忆信号反映在李萨如图上便会出现封闭区域,通过李萨如图封闭区域的位置即可判断材料应力集中的部位。另外,由试验结果可以看出,在拉伸载荷较小时,李萨如图中未出现封闭区域;随着拉伸载荷的增大,李萨如图上封闭区域的面积有增大趋势;材料出现明显屈服后,面积增大得更加明显。封闭区域面积的大小反映的是磁场的突变的大小,进而反映了其应力集中程度。值得指出的是,不同的材料,在相同的应力状态下,李萨如图封闭区域的面积是不一样的,这和法向分量的梯度特征值相同。

## 5 结 论

18CrNi4A材料被广泛应用于直升机中,应用磁记忆检测方法进行早期诊断,检测出应力集中程度,对保护人民财产安全意义重大。本课题探索了新的磁记忆检测方法,研究磁记忆信号法向和切向联合检测应力集中部位,对磁场信号的法向分量和切向分量进行小波包消噪处理后绘制李萨如图,用封闭区域的位置判断应力集中部位,用封闭区域的大小判断应力集中程度,试验效果明显,可望取得一定的工程实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 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,2000:76-78.  
Ren Jilin, Lin Junming. Metal magnetic memory testing technology[M]. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2000: 76-78. (in Chinese)
- [2] 任吉林,王东升,宋凯,等.应力状态对磁记忆信号的影响[J].航空学报,2007,28(3):724-728.  
Ren Jilin, Wang Dongsheng, Song Kai, et al. The influence of stress state on magnetic memory signal[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 724-728. (in Chinese)
- [3] Doubov A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory[J]. Welding in the World, 1998, 41(6): 196-199.
- [4] Doubov A A. Diagnostics of equipment and constructions strength with usage of magnetic memory[J]. Inspection Diagnostics, 2001, 35(6): 19-29
- [5] 钟文定.铁磁学(中册)[M].北京:科学出版社,1987:37-44.  
Zhong Wending. Ferromagnetism (Book 2)[M]. Beijing: Science Press, 1987: 37-44. (in Chinese)
- [6] 黄克琴,杨节,杨觉先,等.塑性变形的物理基础[M].北京:冶金工业出版社,1989:401-403.  
Huang Keqing, Yang Jie, Yang Juexian, et al. The physical foundation of plastic deformation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989: 401-403. (in Chinese)
- [7] 林俊明,萨辉,林春景,等.基于磁记忆效应的一种无损检测新技术[J].无损检测,2000,22(7):297-299.  
Lin Junming, Sa Hui, Lin Chunjing, et al. A new nondestructive testing technique based on magnetic memory effect [J]. Nondestructive Testing, 2000, 22(7): 297-299. (in Chinese)

### 作者简介:

任吉林(1949—)男,教授,中国无损检测学会副理事长、江西省无损检测学会理事长。主要研究方向:电磁无损检测技术。

Tel: 0791-3953491

E-mail: jlren@tom.com

白鹭(1983—)女,硕士研究生。主要研究方向:电磁及光电无损检测技术。

(编辑:蔡斐)