

磁晶各向异性材料磁巴克豪森噪声的 非均匀分布特性研究^{*}

吴卿^{1,2} 谭继东² 郑阳² 沈功田² 周进节¹

(1. 中北大学机械工程学院 太原 030051; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要: 磁巴克豪森噪声效应可反应铁磁性材料交变励磁时磁畴的动态转动与形变的统计意义特征,从而作为铁磁性材料应力状态、材质劣化及早期微损伤检测和评估的无损检测技术。目前针对磁晶各向同性材料的磁巴克豪森噪声检测已获得大量规律并建立了工程适用方法,但大部分规律和方法在用于磁晶各向异性材料检测时常会产生错误的检测结果或是产生较大误差。为了探明这种不适用性的原因,搭建了周向磁巴克豪森噪声测量系统,以X60钢为例测试磁各向异性分布情况,从易磁化轴方向、周向磁各向异性图幅值与形状、不同特征参量表征等3方面揭示同块材料表面磁晶各向异性分布情况。研究发现磁晶各向异性材料上不同位置的周向磁巴克豪森噪声分布是不均匀的,使得基于同种或同批材料试块产生的基准标定曲线用于实际试件检测时不再具备有效性,这是造成检测错误和误差的关键原因,而以往的研究多认为同块材料上磁晶各向异性分布是一致的,或忽略了其分布特性的影响。这种现象的发现对磁晶各向异性材料磁巴克豪森噪声检测提出了新的难题和挑战。

关键词: 磁各向异性材料; 磁巴克豪森噪声; 非均匀分布

中图分类号: TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

Research on non-uniform distribution characteristics of magnetic barkhausen noise in magnetocrystalline anisotropic material

Wu Qing^{1,2} Tan Jidong² Zheng Yang² Shen Gongtian² Zhou Jinjie¹

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: The magnetic Barkhausen noise effect can reflect the statistical significance of the dynamic rotation and deformation of the magnetic domains during the alternating excitation of ferromagnetic materials, which can be used as a non-destructive detection technology for ferromagnetic materials' stress state, material deterioration and early micro-damage detection and evaluation. At present, the magnetic Barkhausen noise detection for magnetocrystalline isotropic materials has obtained a large number of laws and established engineering applicable methods, but most of the laws and methods often produce erroneous detection results when used for the detection of magnetocrystalline anisotropic materials or produce larger errors. In order to find out the reason for this inapplicability, a circumferential magnetic Barkhausen noise measurement system was built, taking X60 steel as an example to test the distribution of magnetic anisotropy, the distribution of magnetocrystalline anisotropy on the surface of the same bulk material is revealed from three aspects: the direction of the easy magnetization axis, the amplitude and shape of the circumferential magnetic anisotropy map, and the characterization of different characteristic parameters. The study found that the circumferential magnetic Barkhausen noise distribution at different positions on the magnetocrystalline anisotropic material is not uniform, so that the reference calibration curve generated based on the test block of the same material or the same batch of material is no longer available for the actual test piece inspection Validity, which is the key cause of detection biases and errors, and previous studies mostly believed that the magnetocrystalline anisotropy distribution on the same piece of material was consistent, or the influence of its distribution characteristics was ignored. The discovery of this phenomenon poses new problems and challenges for the magnetic Barkhausen noise detection of magnetocrystalline anisotropic materials.

Keywords: magnetic anisotropy materials; magnetic Barkhausen noise; non-uniform distribution

0 引言

铁磁性材料早期损伤检测在工程应用中非常重要,近几年一些大型设备及工程设备运行过程中由于应力导致的安全事故时有发生,凸显出应力检测的重要性,在无损检测技术发展过程中,磁巴克豪森噪声应力检测技术得到各界研究学者的青睐,它是一种可以表征材料内部微观结构磁特性无损检测技术,磁巴克豪森噪声是由铁磁材料内部组织结构与磁畴的相互作用产生的一种微观电磁现象,是连接材料微观组织和宏观性能的重要桥梁,通过检测和分析磁巴克豪森噪声信号能够间接反映材料的组织结构状态^[1]。为解决目前铁磁性材料表面早期应力状态评估提供一种方法。

为了建立巴克豪森噪声技术评估铁磁性材料表面早期损伤及应力状态评估方法,国内外大量学者进行相关研究,有研究人员从对 MBN 信号影响因素入手,比如激励参数,外加磁场强度、温度等来研究对应力评估的影响。在巴克豪森应力检测研究方面,部分人员通过提取不同特征值或特殊参数与应力之间的对应关系进行应力评估^[2-9]。张鑫等^[10]通过研究表征铁磁性材料 MBN 最优特征值来优化应力检测的评估。这些研究都是基于磁各向同性进行,在实际工程应用中,存在大量的磁各向异性材料。也有少部分学者在磁各向异性方面进行研究,王丽婷等^[11]对几种典型的材料进行磁各向异性的评估,建立新的磁各向异性模型及对材料磁各向异性程度进行评估。张野等^[12]研究了塑性变形致磁各向异性研究。李立新等^[13]提出采用 3 种不同传感器探头进行磁各向异性检测。

He 等^[14-15]测量了无取向硅钢中不同方向 MBN 信号以及织构取向因子,观察到 MBN 信号的均方根与织构取向因子强相关。通过测量不同方向的 MBN 信号,评价了无取向硅钢的磁各向异性,且对织构取向因子进行分析。Capó-Sánchez 等^[16]通过提取 MBN 信号能量极图方法,测定了 ASTM 36 钢的易磁化轴方向,且对单轴应力对易磁化轴方向的影响规律进行研究。Krause 等^[17-18]实验观察到多个方向测得的 MBN 信号能量形成的极图形状随外加应力而改变。通过对有、无应力条件下的极图,可以确定应力方向。特定方向的 MBN 信号能量与应力大小呈现单调依赖性。Isono 等^[19]利用研制九足传感器在不用旋转的情况下一次性测量出某一点的主应力之差及主应力对应方向。

尽管不同研究者对应力的磁各向异性特性进行了很多研究与试验,由于材料的磁本质及材料表面磁各向异性分布特性目前还没有详细的研究报道,不能从微观角度为应力的磁性测试提供充分的理论依据,而且目前多数

的研究成果也仅仅表明磁测输出信号与应力或应变之间的定性关系,或依据实验数据从宏观角度给出磁测输出与应力应变之间的定量关系式。并没有考虑在同一材料表面不同位置磁特性分布状态对检测结果的影响。因此,为了更好地推动铁磁性材料磁晶各向异性应力测试技术的研究与改进,本文设计实验研究在各向异性材料 X60 试块上不同位置磁各向异性非均匀分布特性,为进一步研究在各向异性材料上建立有效的应力表征模型,解决目前工程上对各向异性材料表面无法准确评估应力状态的难题打下一定基础。

1 实验原理

1.1 磁巴克豪森噪声技术基本原理

铁磁性材料在自发磁化过程中会形成许多磁化方向不同的微小区域,称作“磁畴”,磁畴间被磁畴壁相互隔开。磁巴克豪森噪声是铁磁性材料动态磁化过程中,因磁畴的不连续跳转和磁畴壁的不可逆移动而产生的一种信号^[2]。铁磁性材料在外磁场作用下会发生磁化,每个磁畴沿着晶体的某个容易磁化的方向磁化,同时畴壁发生位移,磁畴内磁矩转向。当外磁场强度 H 连续不断地变化时,磁感应强度 B 呈现不连续的跳跃,即磁巴克豪森跳跃,如图 1 所示。

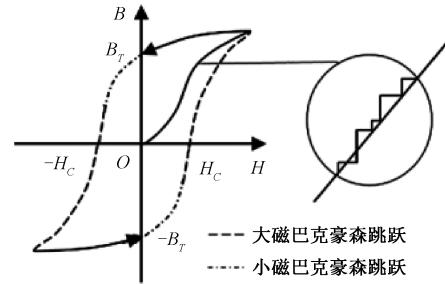


图 1 巴克豪森跳跃

Fig. 1 Barkhausen jumps

研究表明,MBN 信号变化与材料的微观结构以及磁晶的取向、残余应力有很大的关联,而且对材料的应力变化敏感,在工程应用中应力检测方面有广阔的应用前景。

1.2 材料磁各向异性

材料的磁各向异性主要由平均磁晶各向异性、加工(织构、位错塞积等)和应力致磁各向异性等 3 种机制的综合影响。轧制加工会引起晶粒发生变形并沿轧制方向伸长形成织构,导致材料的难、易磁化轴分别沿垂直和平行轧制方向。一般而言,加工致磁各向异性的权重高于另外两种机制^[11]。在单晶体铁磁性材料中,沿不同晶向磁化磁体的难易程度是不同的,该现象称为磁晶各向异性。在多晶体磁体中,大部分材料内晶粒取向是随机分

布的,因此材料宏观上表现为各项同性,但是当材料内部存在织构时,晶粒的某一晶面或晶向的取向接近,会引起材料组织和性能的各向异性^[1]。

2 实验装置及过程

2.1 实验材料及试件

实验选取材料为符合 API 标准的 X60 管线钢,在输油输气管道工程中广泛应用。其化学成分如表 1 所示。管线钢主要性能要求包括高强度、高韧性、良好的焊接性能、良好的抗氢致裂纹 (HIC) 和应力腐蚀断裂 (SCC) 性能。

表 1 X60 钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of X60 steels(mass)

	C	Si	Mn	P	S	V+Nb+Ti
X60	0.21	0.45	1.60	0.02	0.01	0.15
	Cu	Ni	Mo	Fe		
	0.25	0.30	0.10	余量		

图 2 为 X60 钢的显微组织。由图 2 可见,X60 钢由多边形铁素体和珠光体组成。多边形铁素体晶粒沿轧制方向拉长,晶粒大小不均匀,尺寸分布在 4~20 μm 范围内,珠光体分布在多边形铁素体晶界上。表现为典型的磁晶各向异性材料。

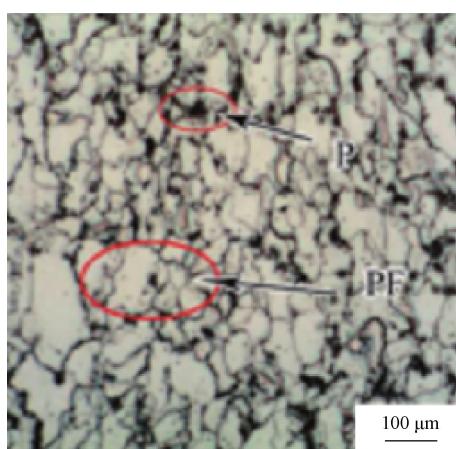


图 2 X60 管线钢显微组织

Fig. 2 Microstructure of X60 pipeline steel

实验试件规格(长×宽×高)为 400 mm×400 mm×8 mm,实验过程中为消除试件表面杂质及锈影响,实验前对试块用除锈剂进行除锈处理,并用盐酸处理测试表面以除去试件表面氧化层,确保试件表面无任何杂质。几何尺寸如图 3 所示。

2.2 实验系统

实验系统由信号发生器、功率放大器、传感器、信号采集器、计算机等 5 大部分组成,使用的传感器为实验室

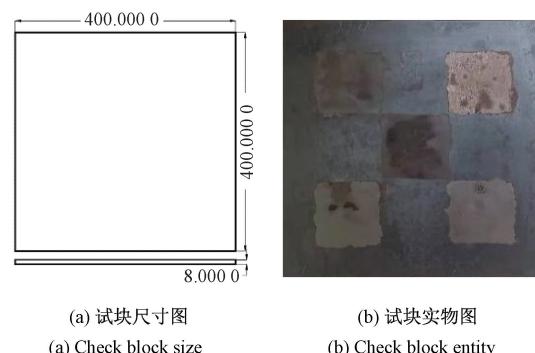
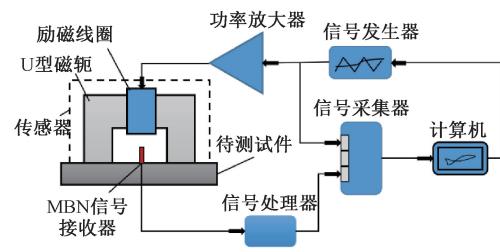
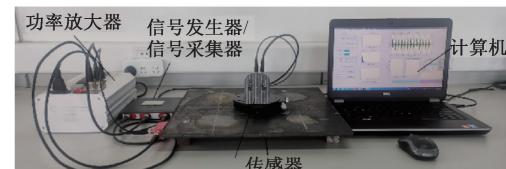


图 3 试块
Fig. 3 Check block

研制的 U 型磁轭 MBN 传感器,它是由一个 U 型磁轭和接收器组成,U 型磁轭采用硅钢片制作而成,此次接收器是由铁氧体缠绕漆包线制作而成,匝数 1 000 圈,绕线后直径 6 mm,它可以磁化铁磁性材料及拾取 MBN 信号。具体实验系统检测图如图 4 所示。



(a) 实验原理框图
(a) Experimental principle block diagram



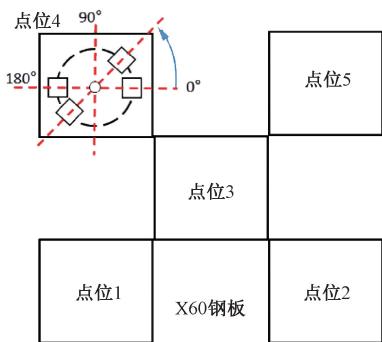
(b) 实验系统实物图
(b) Physical drawing of the experimental system

图 4 实验系统图

Fig. 4 Experimental system

实验过程中计算机 PC 端控制信号发生器发出激励正弦波信号,经功率放大器对激励信号进行功率放大,然后作用于传感器激励线圈,使线圈中产生变化的磁场,对待测试件进行磁化,材料在反复磁化的过程中产生 MBN 信号,MBN 原始信号被传感器接收器部分接收,然后通过信号处理器后被计算机采集。

具体测量过程是在 X60 钢板上均匀对称选取 5 个测试点位进行实验,如图 5 所示,实验室自研 MBN 传感器及旋转夹具在每一个测试点位按照图 5(a)所示逆时针方向进行周向 360° 旋转测量。



(a) 测试位置及周向测量示意图
(a) Schematic diagram of test position and circumferential measurement

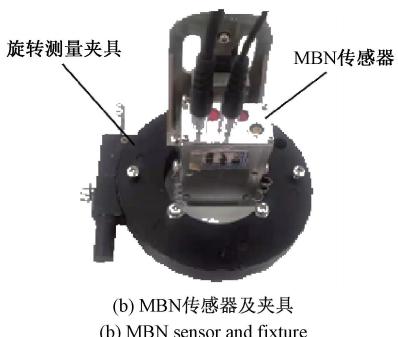


图 5 测试位置示意图及传感器
Fig. 5 Test location diagram and sensor

3 实验信号处理

本文通过 MBN 信号表征铁磁性材料磁各向异性采用了目前国内外学者经常使用的磁巴克豪森噪声信号的特征值均方根值 (RMS)、以及基于包络线的包络峰值 (Fz)、包络面积 (Ar)、峰值时间 (Pt) 等结果来进行实验研究分析。

3.1 特征值介绍及提取方法

1) 均方根

均方根 (root mean square, RMS) 是对所有 MBN 信号采样点数据平方, 求其均值, 再开方, 其计算公式为:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (1)$$

其中, X_i 为不同时刻采集的磁巴克豪森信号数据的电压值。

2) 包络线

包络线是对一个 MBN 信号求包络得到的轮廓线, 如图 6 所示。MBN 信号的包络线可以提取包括包络峰值、包络面积、峰值时间在内的特征值。包络峰值是包络线上的峰值电压, 包络面积是对包络线进行积分得到的积分值, 峰值时间是 MBN 包络线达到最大值的时间。

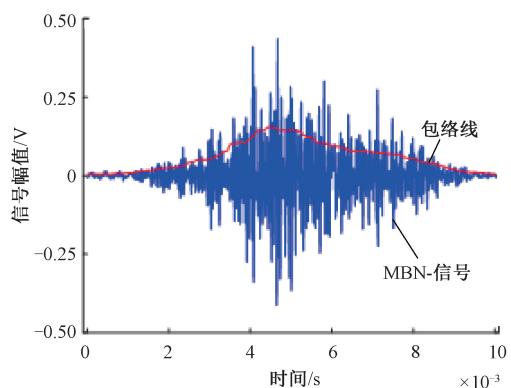


图 6 MBN 包络线
Fig. 6 MBN envelope

3) 特征值提取

以 X60 试块任一测试点位实验数据结果说明此处特征参量提取方法, 图 7 为 MBN 传感器检测线圈检测到的原始波形, 经过频谱分析后用带通滤波器滤波, 得到如图 8 所示 MBN 信号, 图中只显示 5 个波包, 考虑到 MBN 信号具有随机性, 在采集过程中不可避免会存在一定误差, 本文为准确得到各特征值, 采用了 1 000 个 MBN 信号波包取平均值方法对各特征值进行提取。

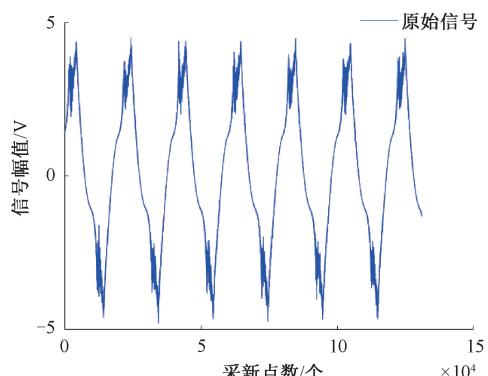


图 7 原始信号
Fig. 7 Original signal

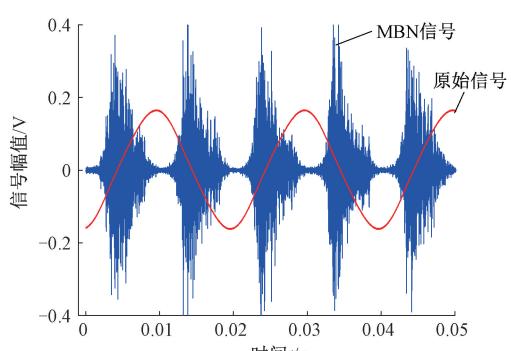


图 8 磁巴克豪森噪声信号

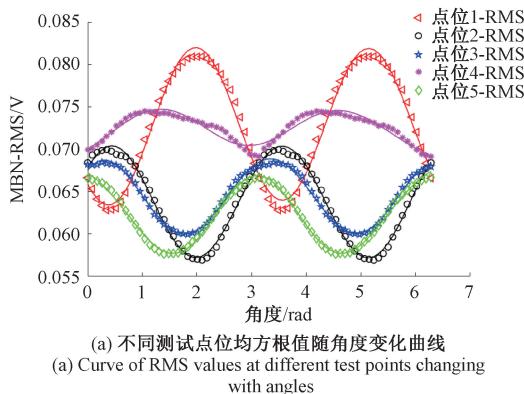
Fig. 8 Magnetic Barkhausen noise signal

将水平方向 0° 设为参考方向, 以步进 $\theta=5^\circ$ 从 0° 开始旋转测量, 考虑系统测量的稳定性, 在每个测试点位进行 10 次旋转测量。通过变异系数分析方法对每个角度 10 次测量结果分析确定提取的特征参数稳定性, 特征值均方根、包络峰值、包络面积、峰值时间的最大变异系数分别为 0.98% 、 1.76% 、 1.47% 、 3.44% 。表明采用的实验系统装置重复性高, 且能够高精度对试件进行 MBN 信号测量。以测量得到的各特征值随角度 θ 变化规律来具体分析材料表面磁各向异性分布情况。

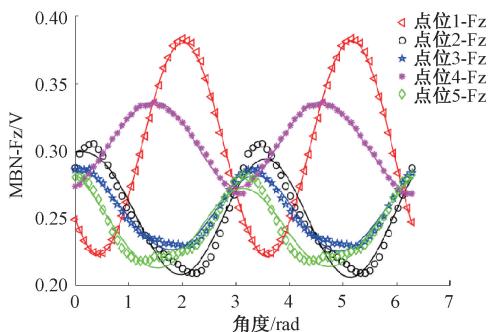
3.2 磁晶各向异性现象表征

图 9 给出不同位置周向测量得到各特征值随角度变化且用三阶傅里叶级数进行拟合, 图中看出在不同测试点位各特征值随角度变化均呈现出磁各向异性现象, 且从单个特征值结果看, 同一块材料上不同位置磁各向异性也不相同, 表现出分布不均匀现象。为更直观显示材料各向异性分布, 将图 9 结果绘制极图, 同时对于单一参量而言, 将所有方向测得的数据均减去参量测试结果中的最小值, 以去除各向同性分量, 凸显各向异性特征。如图 10 所示。

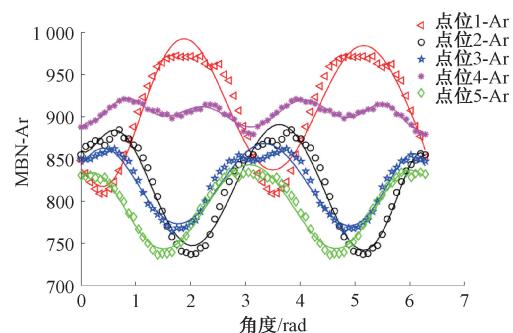
表 2 是前述数据拟合时得到的相关系数 Adjusted R-square, 系数 Adjusted R-square 为自由度调整 R 平方, 数值越接近 1 表示数据的匹配性越好。可以看到, 特征值均方根值 (RMS)、包络峰值 (Fz) 相关系数均大于 0.99, 说明对应特征值随角度变化匹配性良好, 能够稳定表征



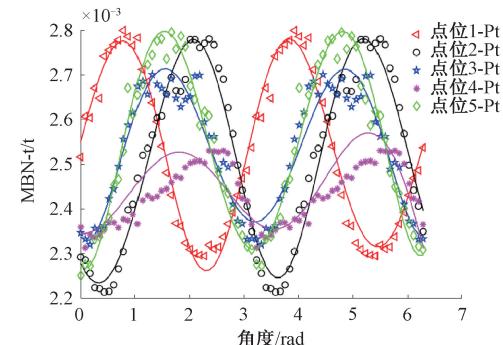
(a) 不同测试点位均方根值随角度变化曲线
(a) Curve of RMS values at different test points changing with angles



(b) 不同测试点位包络峰值随角度变化曲线
(b) Variation curve of envelope peak value with angle at different test points



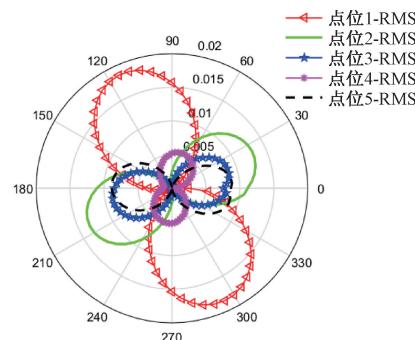
(c) 不同测试点位包络面积随角度变化曲线
(c) Envelope area curve as a function of angle at different test point



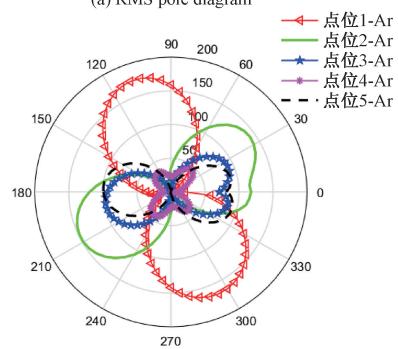
(d) 不同测试点位峰值时间随角度变化曲线
(d) Curve of peak time at different test points changing with angle

图 9 X60 试块上不同特征值随角度变化曲线

Fig. 9 Variation curve of different eigenvalues on X60 test block with angle



(a) 均方根值极图
(a) RMS pole diagram



(b) 包络面积极图
(b) Envelope area pole diagram

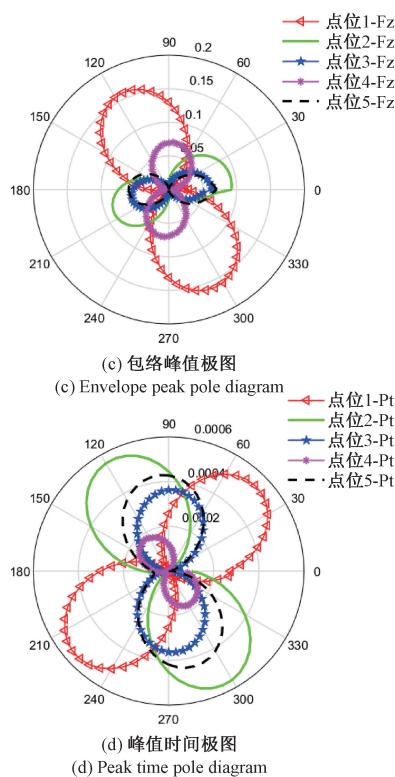


图 10 X60 试块上不同位置不同特征值随角度变化极图

Fig. 10 Polar diagram of different eigenvalues at different positions on X60 test block changing with angles

材料不同位置磁各向异性特性分布状态。而特征值包络峰时间(Pt)相关系数小于 0.9, 匹配性较差, 不能稳定表征材料的磁晶各向异性特性, 同时从图 9、10 不同特征值对测试点位磁各向异性特性表征结果中, 特征值包络面积(Ar)表征材料易磁化轴方向不唯一, 例如在测试点位 4 测试结果表现多个易磁化轴方向, 极图表现为蝶形。基于以上分析均方根值和包络峰值两个特征值能够更好的用来材料表面磁各向异性非均匀分布现象表征。

表 2 各特征值在不同位置随角度

拟合系数 Adjusted R-square

Table 2 Each feature value in different positions with angle fit coefficient adjusted R-Square

位置	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
RMS	0.999 7	0.998 8	0.995 4	0.993 8	0.999 7
Fz	0.997 8	0.949 1	0.998 7	0.997 0	0.999 3
Ar	0.939 4	0.948 8	0.915 2	0.952 1	0.956 8
Pt	0.883 8	0.849 9	0.819 2	0.846 0	0.870 7

4 分析与讨论

通过上述测量表征方法, 以 X60 试块不同测试位置结果为例, 从表征材料磁各向异性参量难易磁化轴方向、磁化方向幅值大小及表征磁各向异性特性形状因子等 3

个方面揭示同种材料不同位置磁各向异性分布不均匀现象。

4.1 磁化轴方向分布不均匀

在同一块 X60 钢板材料上不同测试位置难易磁化方向分布将决定了磁巴克豪森噪声应力检测的可靠性。图 10(a)、(c) 为在 X60 试块上不同位置测量得到 RMS 极图和 Fz 极图, 通过图中磁参量极图中的长轴和短轴来确定被测点位的易磁化轴方向 θ_y 和难磁化方向 θ_n 。在图 10(a)、(c) 参量极图中提取各向异性表征参数 θ_y 、 θ_n 结果如表 3 所示。对比表中结果看到, RMS 与 Fz 在难易磁化方向基本一致, 但是在不同测试位置测量确定难易磁化轴方向波动很大, 易磁化方向最大变化量为 91.7%; 难磁化方向最大变化量为 88.9%。表 3 结果说明: 同一块测量上不同测试位置难易磁化轴方向差异很大, 表现出磁各向异性磁化方向分布不均匀现象。

表 3 不同位置测量得到的难易磁化轴方向参数

Table 3 Axis direction parameters of difficult and easy magnetization measured at different positions

RMS	测试位置	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	$\theta_y/(^\circ)$	120	20	15	60	180
Fz	$\theta_y/(^\circ)$	20	120	105	180	80
	$\theta_n/(^\circ)$	0.0004	0.0002	0.0001	0.0006	0.0003

4.2 磁各向异性程度分布不均匀

利用 MBN 应力测量技术进行应力评估时, 材料磁化方向幅值大小与检测结果密切相关。以不同测试位置测试结果为例, 分析不同测试位置在难易磁化方向幅值大小, 为了更直观地表征被测材料的磁各向异性, 定义表征材料磁各向异性程度的系数参量 K 的表达式为:

$$K = (W_{\max} - W_{\min}) / W_{\min} \quad (2)$$

式中: W_{\max} 和 W_{\min} 分别表示磁参量极图中的最大值和最小值。系数 K 表征了难、易磁化轴上 MBN 特征参量的比例关系。K 取值越大, 表明磁各向异性程度越高。结果如表 4 所示。

表 4 不同测试位置各向异性系数结果

Table 4 Results of anisotropy coefficient at different test position

RMS	位置	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	K	0.288	0.229	0.142	0.078	0.156
Fz	位置	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5
	K	0.713	0.458	0.345	0.252	0.293

从表 4 给出结果看到, 不同测试位置表征材料磁各向异性程度分布不均匀, RMS 统计结果中, K 值最小值 0.077, 最大 0.288, 变化率 72.9%; Fz 统计结果中, K 值

最小值 0.252, 最大值 0.713, 变化率 64.7%。以上数据说明: 即使在同一块材料上, 其磁各向异性程度存在差异, 因此利用磁测方法评估材料应力状态必须考虑磁各向异性分布状态。并且包络峰值各向异性程度普系数 K 遍大于均方根值的各向异性系数, 这是由于 MBN 包络线峰值 F_z 反映的 180°畴壁运动引起的 MBN 跳变剧烈程度, 与位错、晶界等微观结构对磁畴的钉扎效应直接相关。 F_z 极图主要用于分析加工致磁各向异性, 而均方根值则主要用于分析材料的平均磁晶各向异性^[11]。

4.3 磁各向异性极图形状分布不均匀

以不同位置测试结果进一步分析说明磁各向异性材料 MBN 噪声分布不均匀特性, 图 10(a)、(c)给出 X60 试块不同位置旋转测试提取特征值均方根值和包络峰值极图结果, 从图中明显看到不同位置极图形状也存在很大差异, 为了更直观比较不同位置极图形状将图 10(a)、(c)极图全部旋转到同一个方向且进行最大值归一化处理, 如图 11 所示。

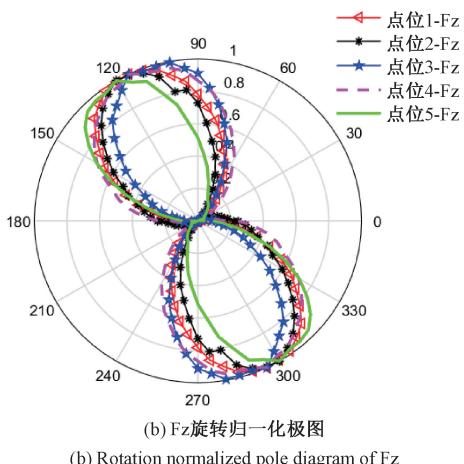
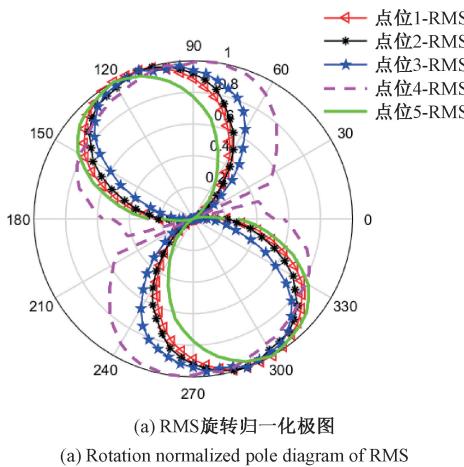


图 11 X60 试块测试各向异性极图旋转归一化结果

Fig. 11 X60 test block test anisotropic rotation normalized results

性极图形状同样存在差异, 预示在磁化方向、磁各向异性程度以及极图形状 3 个方面都表现出材料磁各向异性分布不均匀现象。

造成这种现象主要原因: 由图 2 所示的 X60 钢显微组织, X60 钢是由多边形铁素体和珠光体成。并且多边形铁素体晶粒沿轧制方向拉长, 晶粒大小不均匀, 珠光体分布在多边形铁素体晶界上, 而磁巴克豪森噪声主要是与晶粒内部的磁畴运动以及材料的微观结构、位错、晶界等多种微观结构相关。X60 管线钢材料的晶粒结构大小不均匀分布, 是导致了材料表面磁巴克豪森噪声分布不均匀的主要原因, 另外还有加工导致磁各向异性以及残余应力等因素的影响会造成磁晶各向异性分布不均匀现象。

针对上述问题, 提出后续研究思路:

1) 寻求一种新的磁巴克豪森噪声特征值, 新的特征值能够与应力建立良好的对应关系, 并且可以规避在材料表面不同位置的磁晶各向异性现象。

2) 通过增加其他微磁测量方法, 比如增量磁导率、多频涡流、切向磁场谐波分析等方法, 同时提取多种磁特性参量的特征值, 利用多参数融合方法与材料表面应力建立对应关系模型来提高工程上各向异性材料应力检测评估的有效性。

5 结 论

本文研究了磁晶各向异性材料磁巴克豪森噪声的非均匀分布问题, 结果表明, 特征值 RMS、 F_z 可以良好的表征材料磁晶各向异性特性及分布状态; 同时包络峰值 (F_z) 主要用于分析加工致磁各向异性。而均方根值 (RMS) 则主要用于分析材料的平均磁晶各向异性。

在同一块各向异性材料上, 不同测试位置的难易磁化轴、磁各向异性程度以及表征磁各向异性特性极图形状都存在较大的差异, 说明在同一块或同一批磁晶各向异性材料磁巴克豪森噪声分布不均匀, 致使在今后基于同种或同批材料试块产生的基准标定曲线用于实际试件检测时不再具备有效性, 必须考虑材料本身磁各向异性特性分布状态。

参考文献

- [1] 康学良, 董世运, 汪宏斌, 等. 基于磁巴克豪森原理的铁磁材料各向异性检测技术综述 [J]. 材料导报, 2019, 33(1): 183-190.
KANG X L, DONG SH Y, WANG H B, et al. Applying magnetic Barkhausen noise to the detection of material anisotropy: A technological review [J]. Materials Reports, 2019, 33(1): 183-190.
- [2] 郑阳, 沈功田, 谭继东, 等. U 型磁轭励磁时磁巴克豪森噪声信号分布规律研究 [J]. 机械工程学报, 2018,

由图 11 表明, 在同一块材料上不同位置磁晶各向异

- 54(24): 1-6.
- ZHENG Y, SHEN G T, TAN J D, et al. Characteristics of magnetic barkhausen noise with u-shaped electromagnet magnetizer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 1-6.
- [3] O'SULLIVAN D, COTTERELL M, TANNER D A, et al. Characterisation of ferritic stainless steel by barkhausen techniques[J]. NDT & E International, 2004, 37 (6): 489-496.
- [4] SAMIMI A A, KRAUSE T W, CLAPHAM L. Stress response of magnetic barkhausen noise in submarine hull steel: A comparative study[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2016, 35(2): 1-6.
- [5] MIERCZAK L, JILES D C, FANTONI G. A new method for evaluation of mechanical stress using the reciprocal amplitude of magnetic barkhausen noise [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(2): 459-465.
- [6] KYPRIS O, NLEBEDIĆ I C, JILES D C. A new method for obtaining stress-depth calibration profiles for non-destructive evaluation using a frequency-dependent model of barkhausen emissions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(7): 3893-3896.
- [7] DING S, TIAN G Y, MOORTHY V, et al. New feature extraction for applied stress detection on ferromagnetic material using magnetic Barkhausen noise [J]. Measurement, 2015, 73: 515-519.
- [8] DING S, TIAN G Y, DOBBMANN G, et al. Analysis of domain wall dynamics based on skewness of magnetic Barkhausen noise for applied stress determination [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 421: 225-229.
- [9] HANG C, LIU W, CHEN W. New magnetic barkhausen noise feature extraction for stress detection with slow feature analysis[J]. Insight, 2019, 61(7): 395-397, 403.
- [10] 张鑫, 谭继东, 朱雨虹, 等. 磁巴克豪森噪声表征铁磁性材料应力的最优特征值研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(9): 1240-1245.
- ZHANG X, TAN J D, ZHU Y H, et al. Study on the optimal feature of magnetic barkhausen noise to characterize stress in ferromagnetic materials[J]. Journal of Sensing Technology, 2020, 33(9): 1240-1245.
- [11] 王丽婷, 何存富, 刘秀成. 典型材料磁各向异性的磁巴克豪森噪声评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 173-180.
- WANG L T, HE C F, LIU X CH. et al. Magnetic anisotropy evaluation method using magnetic Barkhausen noise for typical materials [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 173-180.
- [12] 张野, 李红梅, 王羽. 铁磁材料塑性变形致磁各向异性的检测特性研究[C]. 2016 远东无损检测新技术论坛—现代无损检测要素—先进技术+高素质人员论文集, 2016: 322-328.
- ZHANG Y, LI H M, WANG Y. et al. Detection characteristic of plastic deformation-induced magnetic anisotropy for ferromagnetic materials[C]. FAR EAST NDT, 2016: 322-328.
- [13] 李立新, 邱忠超, 高强, 等. 基于磁各向异性方法的铁磁材料应力检测研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(9): 118-121.
- LI L X, QIU ZH CH, GAO Q, et al. Research on stress detection of ferromagnetic materials based on magnetic anisotropy method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(9): 118-121.
- [14] HE Y, MEHDİ M, HILINSKI E J, et al. Evaluation of local anisotropy of magnetic response from non-oriented electrical steel by magnetic Barkhausen noise[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-5.
- [15] HE Y, MEHDİ M, HILINSKI E J, et al. Through-process characterization of local anisotropy of non-oriented electrical steel using magnetic Barkhausen noise [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 453 (MAY): 149-162.
- [16] CAPO-SANCHEZ J, PEREZ-BENITEZ J, PADOVESE LR. Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise[J]. NDT & E International, 2007, 40(2): 168-172.
- [17] KRAUSE T W, CLAPHAM L, PATTANTYUS A, et al. Investigation of the stress-dependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen noise [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(8): 4242-4252.
- [18] KRAUSE T W, PULFER N, WEYMAN P, et al. Magnetic barkhausen noise: Stress-dependent mechanisms in steel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(5): 4764-4766.
- [19] ISONO T, ABUKU S. Residual stress measurement by means of magnetic probe with nine leges[J]. NDI, 1989, 38(3): 2553-256.

作者简介



吴卿, 2019 年于中北大学信息商务学院机械设计制造及自动化专业获得学士学位, 现为中北大学与中国特种设备检测研究院联合培养硕士, 主要研究方向为磁巴克豪森噪声检测技术。

E-mail: wuqingshulina@163.com

Wu Qing received his B. Sc. degree in mechanical design, manufacturing and automation from the College of Mechanical

Engineering, North University Information Business of China in 2019. At present, he is a joint master at North University of China and China Special Equipment Inspection and Research Institute. The main research field is magnetic barkhausen noise detection.



谭继东(通信作者),2012 年于中北大学机械工程学院获得学士学位,2015 年于中北大学机械工程学院获得硕士学位,现工作于中国特种设备检测研究院,主要研究方向为磁巴克豪森噪声、磁特性、磁多参数等检测方法、传感器与仪器开发等。

E-mail: tanjidongchina@163.com

Tan Jidong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North University of China in 2012, and received his M. Sc. degree from North University of China in 2015. He currently works as an engineer at China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include magnetic barkhausen, magnetic properties, magnetic multi-parameter detection method and other detection methods, sensors and detection equipment development, etc.



郑阳,2007 年于北京航空航天大学机械工程及自动化专业获得学士学位,2012 年于北京工业大学机械工程专业获得博士学位。现工作于中国特种设备检测研究院,无损检测领域首席研究员,从事无损检测与评价技术相关的方法、传感器、仪器研发及标准研制。

E-mail: zhengyangchina@126.com

Zheng Yang received his B. Sc. degree in Mechanical Engineering and Automation from Beihang University in 2007, and received his Ph. D. degree in Mechanical Engineering from

Beijing University of Technology in 2012. He currently works as a research fellow at China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include non-destructive testing and evaluation techniques, sensors, instruments and standards development.



沈功田,分别在 1983 年和 1986 年于武汉大学获得学士学位和硕士学位,1998 年于清华大学获得博士学位,现为中国特种设备检测研究院研究员,主要研究为特种设备无损检测与评价。
E-mail: shengongtian@csei.org.cn

Shen Gongtian, received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Wuhan University in 1983 and 1986, and Ph. D. degree in 1998 from Tsinghua University. Now he is a researcher in China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include special equipment nondestructive testing and evaluation.



周进节,2004 年于景德镇陶瓷学院获得学士学位,2007 年于北京机械工业学院获得硕士学位,2012 年于北京工业大学获得博士学位,现为中北大学副教授,主要研究方向为超声检测方法、传感器与检测仪器、声场可视化技术等。

E-mail: zhoujinjiechina@126.com

Zhou Jinjie received his B. Sc. degree from Jingdezhen Ceramic Institute in 2004, received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Machinery Industry in 2007, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2012. He is now an associate professor at North University of China. His main research interests include ultrasonic testing method, sensors and detection equipment, sound field visualization technology, etc.