

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107554

周向磁巴克豪森噪声分布及平面应力测量*

郑阳¹, 张鑫^{1,2}, 周进节², 谭继东¹

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

摘要:磁巴克豪森噪声对应力非常敏感,是一种操作便捷、检测灵敏度高、重复性好的原位无损应力测量技术,在残余应力测定、零部件应力集中区评价、结构承载应力评估中有广阔的应用前景。工程中铁磁性材料表面平面应力测量时最大主应力及其方向测量是一项亟待解决的难题,提出了一种基于周向磁巴克豪森噪声分布的平面应力测量方法,建立了求解平面应力张量的模型,实现了测量点任意方向的正应力和剪应力解调。实验验证了该方法的有效性,测量结果表明,当主应力大于50 MPa时,实测的最大主应力方向偏差为10°,最大正应力偏差为5 MPa,最大剪应力偏差为6 MPa,具有较高的测量准确度。

关键词:周向磁巴克豪森噪声分布;应力测量;平面应力张量;主应力;无损检测

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 402.0

Circumferential magnetic Barkhausen noise distribution and plane stress measurement

Zheng Yang¹, Zhang Xin^{1,2}, Zhou Jinjie², Tan Jidong¹

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China; 2. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Magnetic Barkhausen noise is sensitive to stress, which is an in-situ non-destructive stress measurement technology with convenient operation, high detection sensitivity and good repeatability. It has broad application prospect in residual stress measurement, stress concentration zone evaluation of parts and bearing stress evaluation of structures. The measurement of the maximum principal stress and its direction during the measurement of the plane stress on the surface of ferromagnetic materials in engineering is an urgent problem to be solved. Proposes a plane stress measurement method based on the circumferential magnetic Barkhausen noise distribution, and establishes the solution of the plane stress tensor. The model realizes the demodulation of normal stress and shear stress in any direction of the measuring point. Experiments have verified the effectiveness of this method. Measurement results show that when the principal stress is greater than 50 MPa, the measured maximum principal stress direction deviation is 10°, the maximum normal stress deviation is 5 MPa and the maximum shear stress deviation is 6 MPa, which has high measurement accuracy

Keywords: circumferential magnetic Barkhausen noise distribution; stress measurement; plane stress tensor; principal stress; nondestructive testing

0 引 言

工程中关注的应力主要有制造导致的残余应力、服役过程中承受外载荷而产生的应力和缺陷导致的应力集中,其测量是工程检测的重要内容之一。制造过程中残余应力常因材料锻压、切削、焊接等加工而产生,其存在易使零部件发生变形而影响装配精度及整机性能,也会

导致其在服役过程中加速腐蚀及蠕变,严重时将使部件出现裂纹等,常需对其进行检测,以确定残余应力消除水平^[1]。在部件安装及使用过程中,还存在由装配应力、地基不均匀沉降、结构损失等原因而导致的局部过载,及早发现过载部位,可避免由结构失稳失效导致的安全事故。设备服役过程中承压部件受外载荷产生的应力也为工程关注的重点,如管道、压力容器等承压设备是按照特定的压力设计,在设备运转过程中需要对部件的实际应力情

收稿日期:2021-03-03 Received Date:2021-03-03

* 基金项目:科技部国家重点研发计划(2017YFF0209702)项目资助

况进行检测,判断其是否符合设计的许用应力值。此外,设备服役中也常产生因缺陷而导致的应力集中,如腐蚀、机械损伤、材料老化等缺陷产生时,即使是在缺陷产生早期,也会表现出明显的应力集中,检测并发现应力集中区可以有效地发现缺陷。因此应力的检测与评估,在工程实践中有巨大的应用需求。目前工程中常用应力检测与评估方法有应变片法、钻孔法、超声法、X射线衍射法。应变片法测量最为准确,但其只能对粘贴部位应力进行检测,不便进行大面积区域应力分布的扫查。钻孔法属于有损检测方法,所钻取小孔将是潜在的失效隐患。X射线衍射法是目前工程现场中应用最为广泛的应力检测方法,也是目前现场测量较为准确和可靠的方法,但X射线对人体有害且设备较为庞大,携带不便,检测效率较低。因此,工程中迫切需求便捷高效的应力检测与评估方法。

磁巴克豪森噪声(magnetic Barkhausen noise, MBN)是铁磁性材料动态磁化时磁畴壁的不连续运动过程中产生的一种信号,对铁磁性材料中的应力^[2-3]和微观结构^[4-6]比较敏感。磁巴克豪森噪声技术作为铁磁材料应力表征和测量的一种潜在的无损评价方法,在微观结构和机械参数的无损测量中已经有一定的应用,如焊接区域^[7-8]以及齿轮零件制造^[9]过程中的残余应力测定,硬化层深度表征与测定^[10-11],疲劳^[12-13]评估等。众多研究表明磁巴克豪森噪声用于应力检测具有快速、便捷、检测灵敏度和准确度高的突出优点,且易于对整个设备进行应力分布扫描检测。一般而言,由于传感器接收的磁巴克豪森噪声信号是动态磁化区中各磁畴共同作用的贡献,故它测量的是磁化区域中的平均应力水平,因此相较于X射线衍射仪晶格尺度的测量,MBN更能反映局部区域的应力状态,更具有统计代表意义。

以往的研究中,许多文献表明在单轴拉伸、压缩或弯曲加载时,磁巴克豪森噪声信号特征值与应力具有良好的线性对应关系。Ding等^[14]的研究中提到磁巴克豪森噪声信号的均方根值随外加拉伸应力的增大而增大,随外加压缩应力的减小而减小。这与我们所熟知的规律相吻合。他们提出了一种新的磁巴克豪森的特征值,并对Q235钢试样进行了实验,其在一定应力范围内,与压应力和拉应力具有较好的对应性。Kypris等^[15]的研究表明应力与磁巴克豪森噪声信号峰值振幅的倒数之间存在良好的线性关系。Samimi等^[16]在HY-80钢的单轴拉应力与磁巴克豪森噪声关系的研究中,发现不同应力状态(零应力、弹性阶段、塑性阶段)下,响应关系存在明显的差异,在弹性变形阶段,HY-80钢的MBN能量与拉伸应力呈线性关系。Grijalb等^[17]的研究表明试件表面不同的应力分布与MBN信号的不同分布呈现相同的规律。双轴应力对磁巴克豪森噪声的影响也得到了研究^[18-19]。Hausild等^[18]对奥氏体AISI 301不锈钢在双轴应力状态下的应变诱发马氏体相变动力学进行了表征。

Vengrinovich等^[19]的主要结论有MBN相对于各向同性应变/应力张量的任何变化都不变的条件,后者仅受材料微观结构的影响。

应力引起磁巴克豪森噪声各向异性现象的研究中,Krause等^[20]研究表明,施加的单轴应力会使材料的磁易轴向外加应力的方向偏移,各向异性随着拉应力的增大而增大,随压应力的增大而减小。BÜKKI-DEME等^[21]也研究了相关问题,结果表明,各向异性的微观结构是导致磁巴克豪森噪声分布取向依赖的主要原因。而应力的存在会造成微观结构的各向异性,进而造成磁巴克豪森噪声分布的各向异性。前人对周向MBN分布的研究多集中在磁易轴、角依赖性方面,尚未对周向MBN分布的平面应力进行分析。

综上所述,磁巴克豪森噪声法在应力测量方面的研究多集中在MBN特征值的大小与单向拉压应力值的对应关系,如众所周知的磁巴克豪森噪声信号的均方根值随拉应力的增大而增大,随着压应力的增大而减少等。少数一些对于具体应力的测量的应用,多为二维角度或某方向上的测量,通常是先测定一条标定曲线,然后将测得的MBN值转换为相应的应力值进行测量。就作者所知,尚未有研究如何采用MBN实现平面应力张量测量的研究。事实上,对材料表面某一点处实际应力测量时,如果只是随意地在某一方向励磁,获得其MBN特征量大小后,就以此特征量的值和标定曲线反演出应力值,作为该测量点的应力,这种做法是盲目和错误的。因为实际上描述一点的应力状态,需要获得其应力张量,对于工程而言,更多的是需要测量出其主应力大小和主方向,才算是真正地实现了一点的应力状态的测量。而这正是目前工程界迫切需要解决的难题,同时也是本文要解决的关键问题。

本文主要研究采用磁巴克豪森噪声来测量平面应力张量的方法。文章思想的物理原理基础在于,一方面大量的研究已经证实在单轴拉伸时,MBN大小与应力有非常好的对应关系,且在弹性范围内近似为线性对应关系;另一方面,铁磁性材料受应力作用时会产生较强的磁各向异性,意味着主应力方向与磁各向异性有很强的关联关系,从而通过测量周向MBN的分布,能够实现平面应力状态的测量。

文章提出了一种基于周向磁巴克豪森噪声分布定量测量材料表层平面应力张量的新方法。其突出优点表现在,该方法可以获得测量点的主应力大小及主方向,也可获得测量点各个方向上的正应力大小。而且,相较于X射线衍射仪测量材料表面应力的方法,采用磁巴克豪森噪声法具有仪器设备和传感器小巧,操作便捷,检测快捷高效的优点,还可以与手动或扫查装置相结合,实现大型结构整体或其关键部位应力分布图的成像检测。本文建立的平面应力测量方法,可用于铁磁性材料制设备设施,如钢轨、钢架、管道、压力容器、船舶等,制造过程中的焊接和机

械加工残余应力检测,以及服役过程中关键部位应力集中检测,具有广泛的应用前景和巨大的工程应用价值。

1 MBN 平面应力张量测量

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而产生的一种信号。铁磁性材料内部相邻区域内,原子磁矩排列整齐、磁化方向一致的“小区域”称为磁畴,磁畴与磁畴之间的过渡区域称为磁畴壁,如图 1(a)所示。在对铁磁性材料进行动态磁化时,磁畴磁矩发生转动,磁畴壁发生移动,整个磁化过程可分为可逆磁化和不可逆磁化。如图 1(b)所示,在 I 区,磁场强度 H 较低,当外加场强退回到零时,磁感应强度 B 也为零,此过程主要为磁畴壁的可逆移动;当磁场强度继续增加到 II 区时,磁化强度随磁场强度增加而快速增加,此过程发生不可逆畴壁移动,释放出磁巴克豪森信号;当磁场强度继续增加到 III 区时,主要发生磁矩转动;当场强继续增加,磁化强度随磁场强度增加不大,趋于饱和水平。在使用连续交变磁场磁化过程中,如图 1(c)磁滞回线所示,放大后可发现曲线为非光滑,呈阶梯状,这是磁巴克豪森所引起的。应力的存在将影响磁畴转动及畴壁移动的难易程度,已有的研究表明,拉伸应力将使磁巴克豪森噪声信号能量增加,而压应力则相反,且在弹性范围内,应力与磁巴克豪森信号具有良好的线性关联关系。

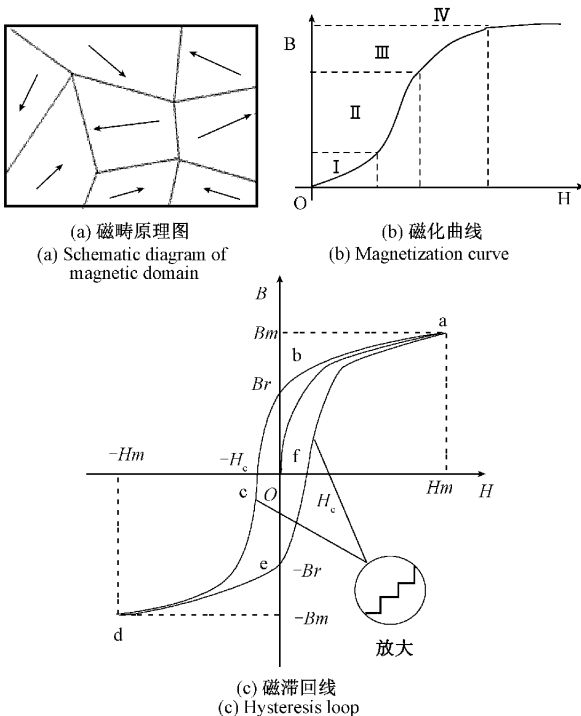


图 1 动态磁化过程中巴克豪森噪声的产生

Fig. 1 Generation of magnetic Barkhausen noise during dynamic magnetization

应力是一种体力,用 6 个独立的量描述,为二阶张量,但采用周向 MBN 分布测量的是平面应力状态下的张量。主要是因为:1) 动态磁化中磁化的是材料的表层。常见的铁磁性材料的 MBN 信号频带集中在 $1 \sim 500$ kHz 之间,使得其穿透深度很有限(1 mm),还受到材料的传导率和渗透性的影响,因此巴克豪森信号的测量只能用于表征近表面区域^[22]。2) 接收器接收的是表层的 MBN 信号,深层的信号被表层材料屏蔽。MBN 测量深度主要取决于材料的渗透性,表面硬化部件的测量深度一般可达 0.2 mm^[1]。因此,MBN 反映的是表层很薄厚度的应力状态,此厚度与磁化区域相比非常小,故可以按平面应力问题进行求解。

采用周向 MBN 分布测量平面应力张量的核心思想在于,首先利用应力导致的磁各向异性及应力与 MBN 特征量的单调对应关系,获得平面应力的最大和最小主应力值及其方向;然后在平面应力的条件下,利用已知的最大和最小主应力值及其方向,对各个方向上正应力和剪应力进行求解,从而获得平面应力张量。在求解之前,需要明确该方法的几个关键点:

其一,MBN 测量的应力值可视作磁化区域中心点或两磁极间磁化区域内各点的应力。就本研究而言,测量的是周向 MBN 分布,一次测量中的区域为以 MBN 传感器中两个磁极间距为直径的圆形区域。这是因为:

1) 就工程应用而言,更关注结构部位的应力分布水平,因此局部平均应力更具有代表性。

2) 材料中的应力具有连续性,当磁化区域较小,在其中的应力变化不大时,可以认为区域内各点的应力状态是均匀的。

其二,MBN 平面应力测量方法研究中不考虑剪应力对 MBN 信号影响。这是因为已有的研究表明,弹性范围内,单轴作用下的拉压正应力与 MBN 特征值 RMS 具有很好的单调对应关系,且近似为线性。但就作者所知,目前没有关于剪应力对 MBN 信号影响的研究。存在两种可能性,一是剪应力对 MBN 影响很小或无影响,可忽略;二是剪应力对 MBN 有影响且需要建立其关联关系。就本研究而言,在测量平面应力状态时,解决思路是通过周向 MBN 的测量,获得最大、最小主应力值及其方向,然后再利用平面应力的理论求解各个方向上的应力状态。由于主应力方向上,剪应力为零,因此在本文的求解方法中,无需用到剪应力对 MBN 的影响。值得指出的是,在第 4 部分的讨论中,从本文实验测量得到的周向 MBN 分布图及解调出的应力状态图的对应关系分析上,确实可以导出剪应力对 MBN 特征值 RMS 无影响或影响很小的结论。

其三,本文采用周向 MBN 分布实现的应力测量方法适用于磁晶各向同性材料,但不能直接用于磁晶各向异

性材料的应力测量。

采用周向 MBN 分布测量平面应力张量的具体方法如下:

1) 基于周向 MBN 的测量求解测量点最大、最小主应力及其方向。

MBN 信号能够与应力一一对应。基于此,在实际测量前,我们可以通过对其进行标定来确定 MBN 和应力的对应关系。如图 2 所示,由图 2(a)可知试件在无应力状态时,MBN 特征值 RMS 在周向分布上几乎处于同一半径的圆上(即 RMS 值相同)。由图 2(b)可知试件在某个方向上存在应力时,MBN 特征值 RMS 在周向分布上呈现出椭圆状,且椭圆长轴(即 RMS 最大值)在有应力方向附近,最大 RMS 值出现的角度即为最大主应力方向。当我们获得 MBN 特征值 RMS 最大值后,通过 2.2 节中的应力标定曲线可以得到此状态时的最大主应力。最小主应力及其方向可通过同样方法获得。

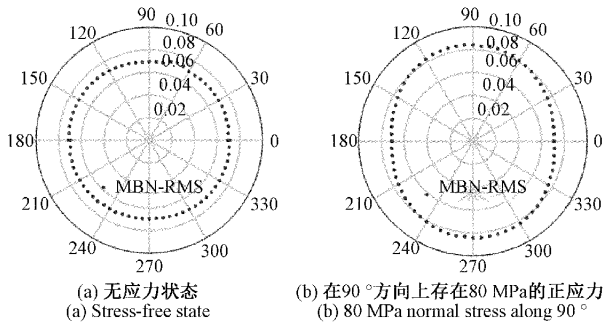


图 2 无应力状态及有应力状态时,测量点 MBN 特征值 RMS 的周向分布

Fig. 2 Circumferential distribution of MBN feature values RMS at the measurement points in stress-free state and stress state

2) 已知最大、最小主应力及其方向,求解测量点的平面应力状态或应力张量。

在弹性力学平面问题中,对一点应力状态进行这样的描述:在受力物体中取一个微小三角形单元,如图 3 所示,其中 AB, AC 与坐标 y, x 重合,而 BC 的外法线与 x 轴成 θ 角。取 x', y' 坐标,使 BC 的外法线方向与 x' 方向重合。在这种情况下,如果 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 已给定,则 BC 面上的正应力 $\sigma_{x'}$ 与切应力 $\tau_{x'y'}$ 可用已知量表示,由于 θ 角的任意性,则当 BC 面趋于点 A 时,便可以说求得了点 A 处的应力状态的表达式。

实际上,此处所讨论的问题,是一点处不同方向的面上的应力的转换,即 BC 面无限趋于点 A 时,该面上的应力如何用与原坐标相平行的面上的应力来表示。在这种问题的分析中,可不必引入应力增量和体力,因为它们与应力相比属于小量。

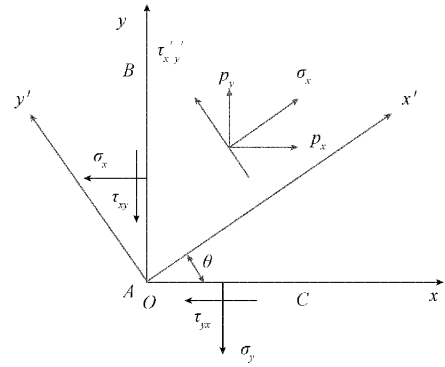


图 3 一点的应力状态的描述

Fig. 3 Description of the stress state at single point

假定 BC 的面积为 1,则 AB 和 AC 的面积分别为 $\cos \theta$ 与 $\sin \theta$ 。于是,由平衡条件 $\sum F_x = 0$ 和 $\sum F_y = 0$,可得:

$$p_x = \sigma_x \cdot \cos \theta + \tau_{xy} \cdot \sin \theta \quad (1)$$

$$p_y = \tau_{xy} \cdot \cos \theta + \sigma_y \cdot \sin \theta \quad (2)$$

其中, p_x, p_y 为 BC 面上单位面积的力 p 在 x, y 方向的投影。把 p_x, p_y 投影到 x', y' 坐标方向,得:

$$\sigma_{x'} = p_x \cdot \cos \theta + p_y \cdot \sin \theta \quad (3)$$

$$\tau_{x'y'} = p_y \cdot \cos \theta - p_x \cdot \sin \theta \quad (4)$$

将式(1)、(2)代入式(3)、(4)得

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cdot \cos^2 \theta + \sigma_y \cdot \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} \cdot (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (6)$$

或改写为:

$$\sigma_{x'} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (7)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \cdot \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (8)$$

若某一斜面上切应力 $\tau_{x'y'} = 0$,则该斜面上的正应力 $\sigma_{x'}$ 称为该点的一个主应力 σ ;

当 $\tau_{x'y'} = 0$ 时,有 $\sigma_{x'} = \sigma$,

$$\begin{cases} p_x = \sigma \cdot \cos \theta \\ p_y = \sigma \cdot \sin \theta \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \sigma_x \cdot \cos \theta + \tau_{xy} \cdot \sin \theta = \sigma \cdot \cos \theta \\ \tau_{xy} \cdot \cos \theta + \sigma_y \cdot \sin \theta = \sigma \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (9)$$

求解得:

$$\frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\sigma - \sigma_x}{\tau_{xy}} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\tau_{xy}}{\sigma - \sigma_x}$$

进而得到:

$$\sigma^2 - (\sigma_x + \sigma_y) \cdot \sigma + (\sigma_x \cdot \sigma_y - \tau_{xy}^2) = 0 \quad (10)$$

求解得:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

可得,对于平面应力存在两个主应力,称之为最大、最小主应力,二者成 90°角。

若已知最大、最小主应力 σ_1, σ_2 ; 以 σ_1 代入 σ_x, σ_2 代入 σ_y , 则式(7)、(8)可变形为:

$$\sigma_{x'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos^2 \theta + \sigma_2 \tag{11}$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot \sin 2\theta \tag{12}$$

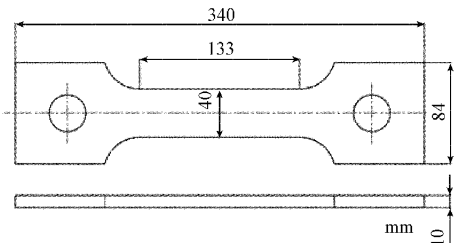
在平面上,若已知某测试点的最大、最小应力,则可通过式(11)计算得到该测试点的应力分布状态。

2 实验研究

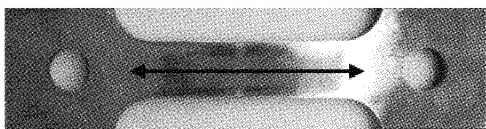
2.1 实验系统及设备

基于上述分析,选取合适的材料对研究问题进行了实验验证。首先,通过拉伸实验对 MBN 信号与应力的关系进行标定。其次,测量了不同应力状态下的 MBN 信号的周向分布。最后,利用前文的分析进行了对比研究。

试样材料选取工程中常用的 Q235, 该材料在无应力状态具有良好的磁各向同性性质。按图 4 所示形状及尺寸制备成拉伸试件,长×宽×厚为 340 mm×40 mm×10 mm,作为标定和平面应力测量用试件。试件在进行拉伸前,对其进行随炉升温至 550 °C 并恒温 5 小时后随炉冷却,进行了消除残余应力的热处理,随后对试件进行了除锈剂除锈及酸蚀处理以去除试件表面氧化层,以使试件在初始时处于无应力状态。值得指出的是,机加工完的试件表面一般会有朝向性的塑性变形残余,表面为在显微镜下有明显的线条状纹,它会严重影响测量结果,需要对试块进行打磨处理,以消除其影响。图 5 显示了打磨前后,机加工残余的塑性变形对周向 MBN 测量的影响。因此,本文采用砂纸旋转打磨的方法,对试件表面进行了打磨处理,以消除机加工塑性变形残余对实验的影响。



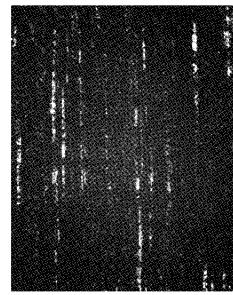
(a) 拉伸试样的形状和尺寸
(a) Shape and dimensions of tensile sample



(b) 拉伸试样
(b) Photograph of tensile sample

图 4 试件尺寸图

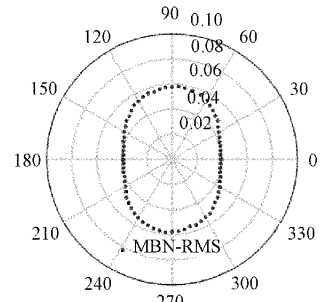
Fig. 4 Sample size drawing



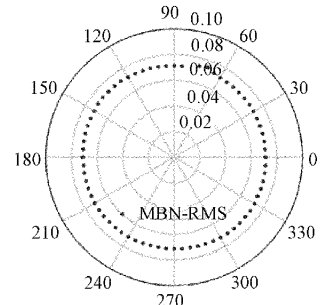
(a) 未打磨试块表面的显微结构
(a) Microstructure of unpolished sample surface



(c) 打磨试块表面的显微结构
(c) Microstructure of polished sample surface



(b) 未打磨试块表面自由状态测量的周向 MBN 分布
(b) Circumferential MBN distribution of surface free state measurement of unpolished sample



(d) 打磨试块表面自由状态测量的周向 MBN 分布
(d) Circumferential MBN distribution of surface free state measurement of polished sample

图 5 试块表面加工残余变形对检测结果的影响

Fig. 5 Influence of residual deformation caused by surface machining of sample on circumferential MBN measurement

实验仪器主要由信号发生器、功率放大器、前置放大器、数据采集器、PC 端等模块组成。传感器为自行开发的 U 型磁轭式 MBN 传感器,主要由 U 型磁轭和接收器组成,U 型磁轭由硅钢片缠绕漆包线制成,U 型磁轭磁极端面为 10 mm×10 mm 的方形平面,两磁极中心点间距为 20 mm,因此实验中测量的应力可以认为是以 20 mm 为直径的圆形区域内的平均应力。接收器由铁氧体磁芯缠绕漆包线制成。实验系统原理框图如图 6 所示。实验过程中用 PC 端控制信号发生器发出励磁信号,经功率放大器通入缠绕在 U 型磁轭上的激励线圈中对试件进行交流磁化,产生的 MBN 信号由缠绕在铁氧体上的接收线圈拾取得到,经前置放大器放大后由数据采集器进行采集,最终传回 PC 端。实验中采用频率为 50 Hz 的正弦波信号作为励磁信号,信号发生器输出的原始信号峰值为 0.097 V,功率放大器的增益为 20 dB,前置放大器的增益为 40 dB,采样频率为 0.5 MHz。测量中保持传感器 U 型磁轭与试件表面稳定良好接触。

本文采用 RMS 值作为 MBN 的信号特征值进行应力检测。信号处理方法如下所述,如图 7 所示,图 7(b)为测量的无应力状态时的原始接收原始信号,经带通滤波

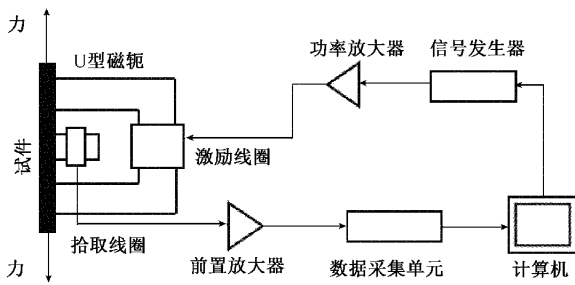


图6 实验仪器系统原理

Fig. 6 Schematic of experimental instrument system

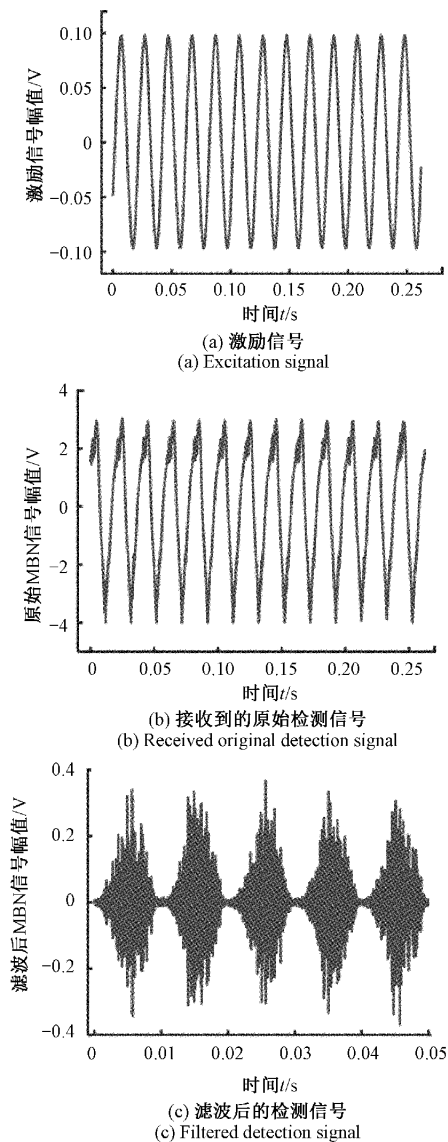


图7 MBN检测中的信号处理

Fig. 7 Signal processing in MBN detection

后得到图7(c)所示的MBN信号,这里只显示了5个波包,实际在计算RMS时采用1000个MBN波包信号。RMS值是对所有MBN信号采样点数据平方,求其均值,

再开方,其计算公式为:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (13)$$

其中, X_i 为不同时刻的磁巴克豪森信号数据点。值得指出的是,确定RMS计算中MBN波包的个数需要充分考虑能够获得稳定的RMS值,同时保持较小的波包数以获得较高的检测效率。

图8中给出了本实验系统在文中测量条件下,RMS值与采用的MBN波包数的关系,可以看出,大于400个波包后,RMS值在0.06933~0.06940V范围内波动,波动很小,趋于稳定,因此本文实验中,采用1000个MBN信号波包计算RMS值。

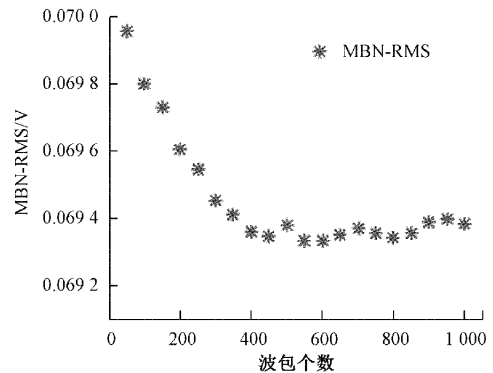


图8 RMS值与计算中采用的MBN波包数的关系

Fig. 8 Relationship between RMS value and numbers of MBN wave-packet used in calculation

2.2 应力标定曲线测量

通过拉伸实验对本研究中Q235材料的MBN特征量与正应力的对应关系进行标定。在小型拉伸机上,对试件进行拉伸,加载拉力,在不同拉力下测量沿拉伸方向上的MBN信号。拉伸过程控制在弹性形变范围内,本研究中试件中的应力范围为0~200MPa,间隔10MPa测量。一次拉伸测量过程中,为保证标定数据的准确性,这里在同一拉力下,进行5次测量并取其平均值作为某个应力下的MBN信号。同时重复拉伸5次,执行同样的测量,以5次拉伸过程的平均结果作为最终标定数据。

实验测得如图9所示的标定曲线。图9中点为实际测得的MBN-RMS值,圆圈为25个MBN-RMS值的平均值,线为对不同应力状态下的MBN-RMS值的平均值按3次多项式进行拟合的曲线,拟合曲线表达式为:

$$Y = 2.071362.71 \cdot x^3 - 546362.69 \cdot x^2 + 52411.77 \cdot x - 1694.24 \quad (14)$$

从图中可得到以下信息:1)MBN特征值RMS与正应力大小有单调对应关系;2)非严格的线性,但因其单调性,拟合后可获得RMS值与应力的——对应映射关系,从而可以从RMS值得到正应力的大小;3)应力测量的标定误

差方面,在正应力从 0~200 MPa 的变化中,MBN 特征值 RMS 从 0.068 9 V 变化到了 0.107 8 V。在测量的应力范围内,RMS 值最大变动为 0.001 9 V,最小变动为 0.000 8 V,最大变动出现在 0 MPa 应力值时,最小变动出现在 110 MPa 应力值时,对应的应力标定最大误差为 13 MPa,最小误差为 3.6 MPa。

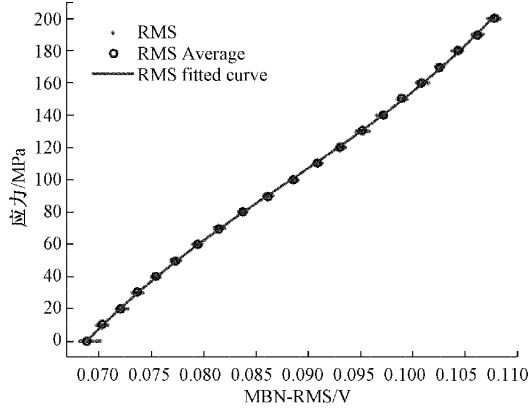


图 9 应力与 MBN-RMS 标定曲线

Fig. 9 Calibration curve of stress and MBN-RMS

2.3 周向 MBN 测量平面应力方法验证实验

以拉伸试件单轴拉伸时中心点处的平面应力张量测量来验证 2 中基于 MBN 特征量 RMS 周向分布测量平面应力张量的方法和理论模型。主要是因为此种状态下试件只受单个方向的拉应力作用,试件上测量区的平面应力张量是确定的,即有明确的测量目标值,无需采用其它测量手段建立应力的参照值。

在小型拉伸机上,对试件进行拉伸,加载拉力,在不同拉力下测量沿拉伸方向上的 MBN 信号。拉伸过程控制在弹性形变范围内,以 10 MPa 的间隔从 0 MPa 开始不断拉伸到 200 MPa,在每个应力值下采用 2.1 中所述测量系统测量试件正中心点的周向磁巴克豪森噪声信号的分布。

周向磁巴克豪森噪声信号的分布测量时,实验设置示意图如图 10 所示,在某一应力下,从 0° 位置开始测量,按图示旋转方向间隔 5° 旋转测量,得到 0°~180° 的磁巴克豪森噪声信号分布。由于 U 型磁轭励磁的对称性,180°~360° 的磁巴克豪森噪声分布由 0°~180° 的测量结果对称得到。

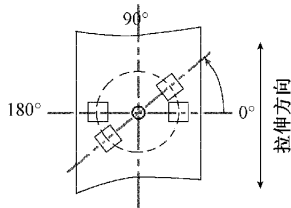


图 10 周向 MBN 测量图

Fig. 10 Diagram of circumferential MBN measurement

为了验证这种对称操作的正确性,在 50 MPa 和 100 MPa 拉应力下测量了试件表面 360° 的磁巴克豪森噪声信号,同只测量 180° 的结果进行了对比,结果如图 11 所示。结果表明,测 180° 后利用对称性得到的周向分布图与测 360° 得到的图完全重合。因此可以通过只测量 180° 的磁巴克豪森噪声信号的方式来进行平面 360° 的磁巴克豪森噪声信号的分布研究。

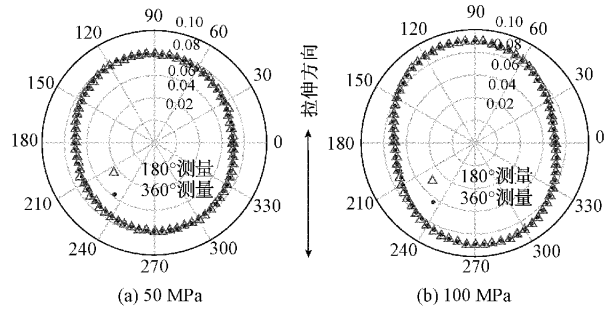


图 11 测量 180° 和 360° 的 MBN-RMS 对比图

Fig. 11 MBN-RMS comparison diagram when measuring 180° and 360°

3 结果和讨论

3.1 不同应力作用下周向 MBN 分布特征

不同应力下的 MBN-RMS 值周向分布如图 12 所示。其中图 12(a) 给出了 0、50、100、150 和 200 MPa 时 MBN 特征值 RMS 的周向分布,拉伸的方向为 90° 和 270°。由图 12(a) 可以看出,在无应力状态下,周向 MBN 分布几乎为一正圆,表明本文中所测材料在无应力状态下有良好的磁各向同性。应力逐渐增大的过程中,周向 MBN-RMS 分布表现出明显的方向性,在最大正应力方向,即拉伸方向,MBN-RMS 值增量最大;在垂直拉伸方向上,即最大剪应力方向,同时也是正应力为零的方向上,MBN-RMS 值几乎没有发生变化。由于在 90° 和 270° 方向上的正应力增大过程中,0° 和 180° 方向上的剪应力也随之增大,但 0° 和 180° 方向上的 MBN-RMS 值却几乎没有变化,这得到了一个重要的结论剪应力对 MBN 几乎没有影响。

图 12(b) 展示了 45°、90°、135° 励磁角度上 MBN-RMS 值随该方向上正应力大小的变化曲线。由图中可知,在各个角度上,MBN-RMS 值与正应力关系曲线几乎重合,他们具有同样的变化规律,其变化规律也同标定曲线上 MBN-RMS 值与正应力完全一致。这充分表明,在各个角度上,MBN-RMS 的值完全由正应力的大小决定,且它们都按同样的关系进行变化,同时也能进一步明确而 MBN-RMS 的值与剪应力大小无关。甚至,我们还能得出 MBN-RMS 与正应力的关系是各种材料本身的特性的结论。

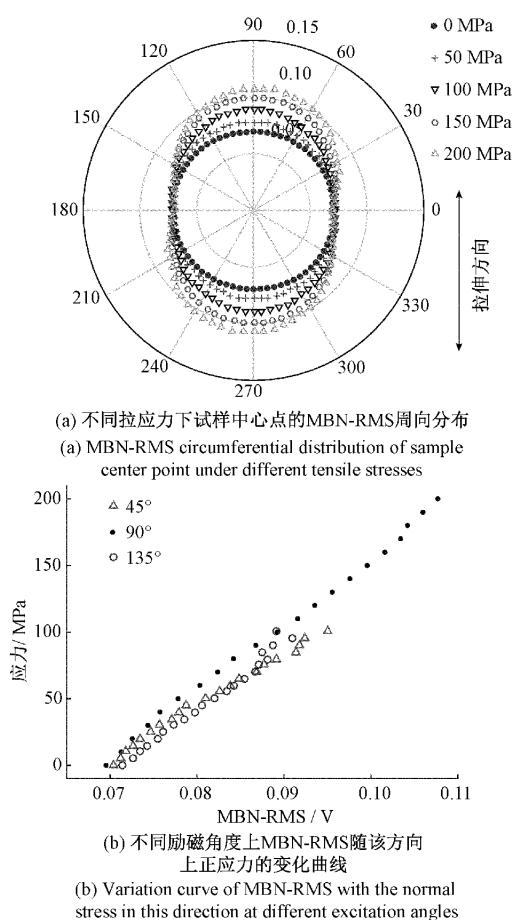


图12 各应力状态下 MBN-RMS 值平面分布图

Fig. 12 Plane distribution of MBN-RMS values under various stress states

3.2 解调主应力求解平面应力的方法

利用第1节中所述的方法求解平面应力的一般步骤如下:1)测量并绘制 MBN 特征值周向分布图,在本文中即为 MBN-RMS 周向分布图。2)确定主应力方向和最大、最小正应力值。基本方法为在 MBN 特征值周向分布图上,主应力方向即为 MBN 特征值最大的点所在角度,具有强烈的指向性,可以很容易地确定出。从材料 MBN 特征值与正应力关系的标定曲线上,可以确定出主应力方向上的正应力值,它也是最大正应力值。与主应力方向垂直的方向为最小正应力方向,同理可从材料 MBN 特征值与正应力关系的标定曲线确定最小正应力值。3)利用主应力方向和最大、最小正应力值和式(11)和(12)可以确定任意方向上的正应力和剪应力值,从而完全确定测量区的平面应力状态。

如图13中示例地给出了10、50、100、150、200 MPa 拉应力下利用 MBN-RMS 求解平面应力的方法和步骤,并比较了测量值与理论值之间的误差。如图13(a)中在测量获得 MBN-RMS 周向分布图后,可以很容易地确定最

大正应力和最小正应力方向,并确定这两个方向上的 MBN-RMS 值,再进一步通过标定曲线即可确定正应力的大小。如图13中10、50、100、150、200 MPa 下,确定的主应力方向分别为135°、80°、90°、90°、100°,最大主应力分别为24、55、104、153、203 MPa,最小主应力分别为9、10、15、6、2 MPa。将主应力方向、最大正应力和最小正应力3个量代入式(11)和(12),即可求出任意方向上的正应力和剪应力大小。图中分别采用点线和点线展示了解调值和理论值。

分析图13中不同应力下测量值与理论值的误差,可以发现,当应力水平较小时,如10 MPa 时,测量得到的主应力方向与理论值偏转了45°,正应力和剪应力值与理论值的最大偏差分别为14 MPa 和2 MPa,这是由于应力较小时,它引起的磁各向异性小,同时受制于 MBN 检测仪器的系统误差,标定曲线的误差已为±10 MPa,因此微小应力时,测量误差大。在50、100、150、200 MPa 时,测量得到的主应力方向与理论值偏转分别为10°、0°、0°、10°,测量的正应力与理论值最大偏差分别为5、4、3、3 MPa,测量的剪应力与理论值最大偏差分别为3、6、2、1 MPa。可以发现,当应力值较大时,主应力方向的测量误差大大减小,特别是大于50 MPa 时,测量误差明显变小,主应力方向最大偏差10°,正应力和剪应力值与理论值的最大偏差分别为5 MPa 和6 MPa,且随着应力的增大正应力值和剪应力值的测量误差几乎不变,主要由系统误差决定。图13(a),(d),(g),(j),(m)中四方形表示 MBN-RMS (单位:mm);图13(b),(c),(e),(f),(h),(i),(j),(k),(l),(m),(n),(o)中三角形为解调值,圆点为理论值(单位:MPa);图13(a),(b),(c)为10 MPa。图13(d),(e),(f)为50 MPa。图13(g),(h),(i)为100 MPa。图13(j),(k),(l)为150 MPa。图13(m),(n),(o)为200 MPa。

3.3 MBN-RMS 直接求解平面应力

由3.1节的结论 MBN-RMS 只与正应力相关,与剪应力不相关,且在平面应力状态下,各方向上正应力的大小与 MBN-RMS 的对应关系一样。因此,可以导出采用 MBN-RMS 周向分布图求解平面应力的另外一种方法,即在得到 MBN-RMS 周向分布图后,直接利用材料标定曲线上 MBN-RMS 与正应力的对应关系,将 MBN-RMS 值换算成正应力值,从而获得平面应力状态下测量点处各方向上的正应力分布,实现平面应力的测量。

如图14所示为90°方向拉伸时,拉应力从10 MPa 增加到200 MPa,步进10 MPa 测量得到的 MBN-RMS 直接求解平面应力时理论值与实测值对比组图。表1中给出了各拉应力下,实验测量到的主应力方向与最大主应力值,可以发现,当应力水平较小时,如10 MPa 时,测量得到的主应力方向偏转了45°,20 MPa、30 MPa 测量得到的

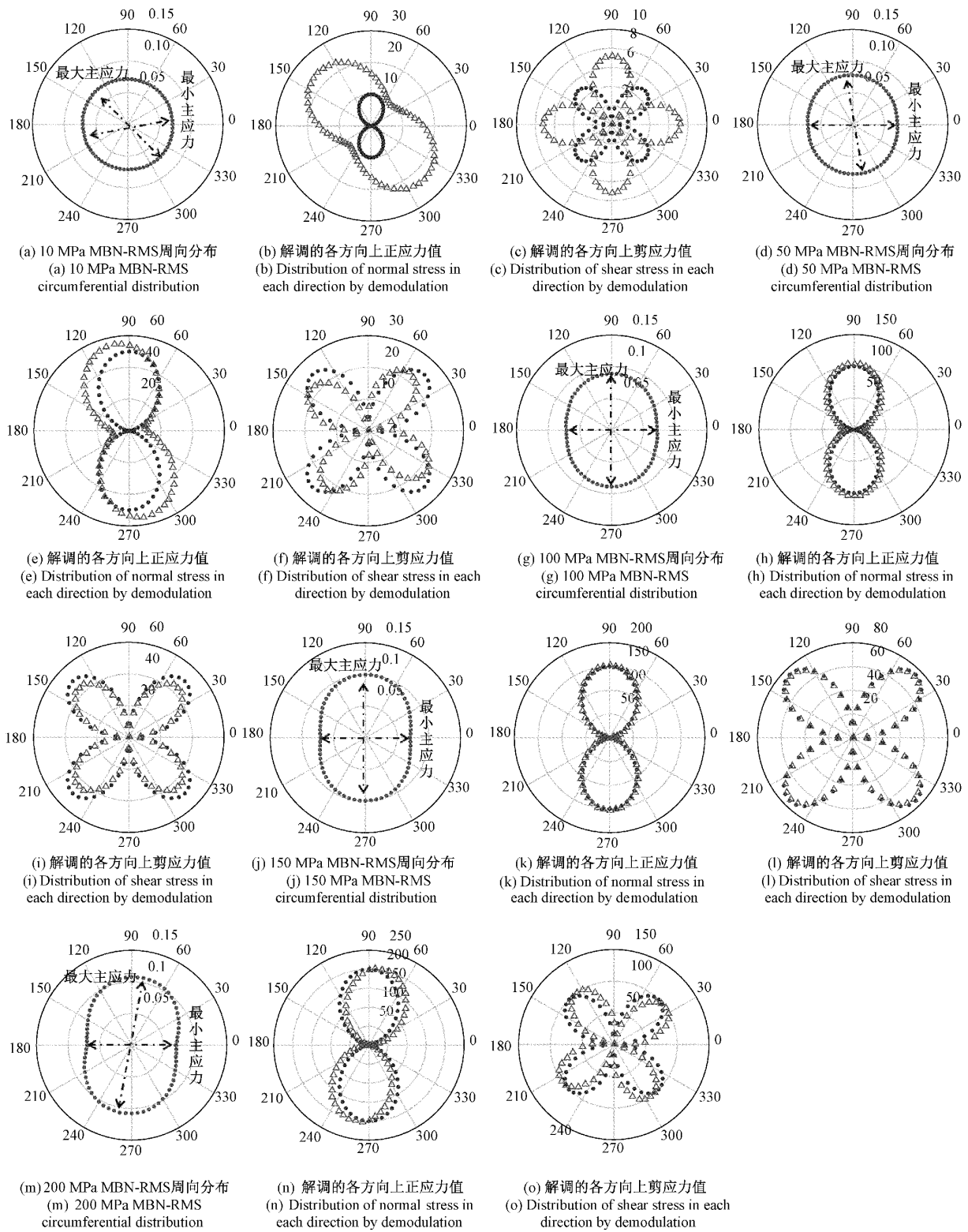


图 13 在不同应力状态下拉伸试验试样中心点的 MBN-RMS 分布和平面应力状态测量结果

Fig. 13 MBN-RMS and stress distribution at the center point of tensile test sample under different stress states

主应力方向偏转了 15°,当拉伸应力大于 30 MPa 时,测量得到的主应力方向最多偏转 10°。从各个方向平面应力

测量值与理论值的对比中可以发现,0~200 MPa 整个应力区内,MBN 理论值与实测值在拉伸方向上具有较高

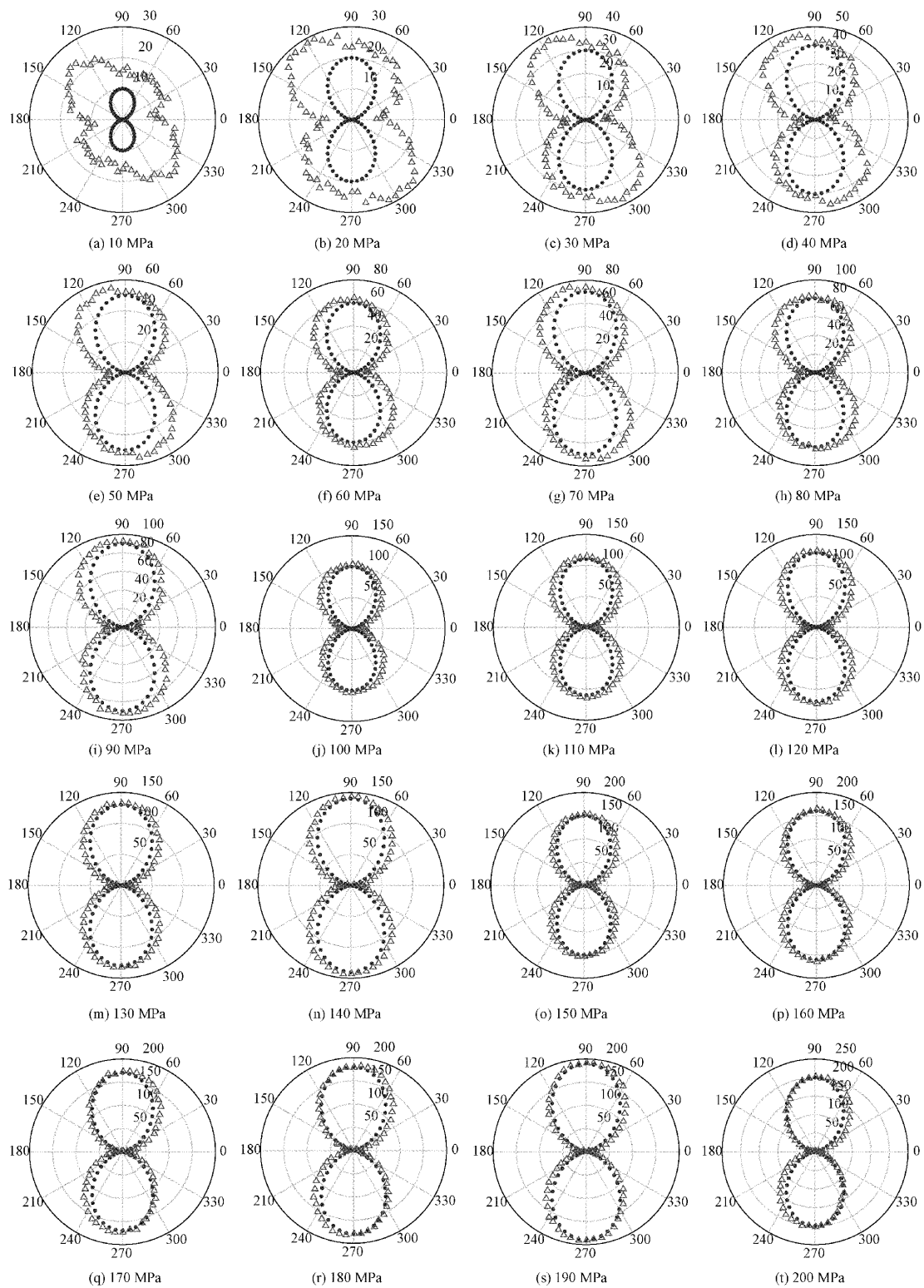


图 14 MBN-RMS 直接求解平面应力时理论值与实测值的比较 (三角形为实测值, 圆点为理论值, 单位: MPa)

Fig. 14 Comparison of theoretical and measured values when MBN-RMS directly solves plane stress. The triangles represent measured value and points represent theoretical value (unit: MPa)

的吻合性, 误差很小, 且相对稳定; 在与拉伸方向呈 60° 角 ($55^\circ \sim 65^\circ$ 区间) 吻合性相对较低, 误差相对较大。即在

拉伸方向, MBN 理论值与实测值吻合性最好, 随着与拉伸方向的夹角的增大, 误差也在逐渐增大, 在与拉伸方向

呈60°角方向误差达到最大,后随着与拉伸方向的夹角的进一步增大,误差又呈现一定减小趋势,最大误差在37 MPa左右。MBN理论值在拉伸方向左右两侧呈对称分布,而实际测得的应力值的分布呈现出一定规律性,在0~100 MPa,在拉伸方向的左侧相对误差较大,在110~140 MPa,相对误差的分布呈一定对称分布,在150~200 MPa,在拉伸方向的右侧相对误差较大。随着拉伸应力的不断增加,拉伸方向测得的MBN理论值与实测值的误差无太大变化,在与拉伸方向呈60°角方向上测得的MBN理论值与实测值的误差逐渐增大。

上述分析表明,采用MBN-RMS直接求解平面应力在众多角度上,测量值和理论值会有较大的偏差。但在主方向判断和主应力大小确定上,当应力大于30 MPa时,偏差很小。因此采用3.2中所述的基于解调主应力求解方法更易获得较为准确的平面应力值。另外,就工程应用而言,考虑到实际检测中各种操作条件的影响,更容易获得主方向和主应力,3.2所述方法更容易实施。

表1 不同拉应力下实测值平面应力主方向和主应力大小
Table 1 The principal direction of stress and the magnitude of principal stress in the measured plane under different tensile stresses

拉应力/MPa	10	20	30	40	50	60	70
主方向/(°)	135	115	115	100	100	90	100
最大主应力/MPa	24	29	38	46	55	64	75
拉应力/MPa	80	90	100	110	120	130	140
主方向/(°)	95	90	90	90	90	90	85
最大主应力/MPa	83	93	104	115	123	133	144
拉应力/MPa	150	160	170	180	190	200	
主方向/(°)	90	90	90	80	85	80	
最大主应力/MPa	153	164	174	182	191	203	

4 结 论

本文研究了基于周向磁巴克豪森噪声测量材料表面平面应力张量的问题。主要结论有:建立了周向MBN测量平面应力张量的理论与测量方法。实验表明通过MBN测量得到的平面应力与通过经典弹性力学知识计算得到的结果能够很好地对应起来,误差在可接受的范围内,证明了该方法的有效性。该方法能够实现铁磁性材料平面应力的定量测量,但同时需注意,标定曲线对测试结果有着很大的影响,本文实验系统

MBN-应力标定曲线最大误差为13 MPa,标定曲线依赖于被检材料,实际检测中需首先准确测得检测对象材料的标定曲线后才能获得良好的检测结果。在平面应力张量测量中,测量点各个方向上的正应力大小均与MBN特征值RMS呈现同样的对应关系。应力测量中,当主应力为10 MPa时,测量得到的主应力方向与理论值偏转了45°,正应力和剪应力值与理论值的最大偏差分别为14 MPa和2 MPa,误差较大。但当主应力值增大时,特别是大于50 MPa时,测量误差明显变小,主应力方向最大偏差10°,正应力和剪应力值与理论值的最大偏差分别为5 MPa和6 MPa。此外,该研究还表明MBN信号特征值RMS与正应力相关,与剪应力不相关。本文建立的方法有效解决了铁磁性材料表面平面应力张量测量问题,在制造中残余应力检测与评估、工程结构实际应力分布检测、应力集中检测与损伤早期预警等方面有巨大的应用前景。

参考文献

- [1] ROSSINI N S, DASSISTI M, BENYOUNIS K Y, et al. Methods of measuring residual stresses in components[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 572-588.
- [2] SORSA A, ISOKANGAS A, SANTA-AHO S, et al. Prediction of residual stresses using partial least squares regression on barkhausen noise signals[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2014, 33(1): 43-50.
- [3] 蒋政培, 凌张伟, 王敏. 磁巴克豪森噪声技术在应力评估中的研究进展[J]. *无损检测*, 2018, 40(8): 67-74.
JIANG ZH P, LING ZH W, WANG M. Progress of magnetic barkhausen noise technique in stress evaluation[J]. *Nondestructive Testing*, 2018, 40(8): 67-74.
- [4] JOZEF P, JAN B. Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel[J]. *Measurement*, 2013, 46(2): 866-870.
- [5] K TENA A, HRISTOFOROU E, GERHARDT G J L, et al. Barkhausen noise as a microstructure characterization tool[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2014, 435: 109-112.
- [6] PEREZ-BENITEZ J A, PADOVESE L R. Study of the influence of simultaneous variation of magnetic material microstructural features on domain wall dynamics[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(20): 3101-3105.
- [7] QI X, DI S, LIU H, et al. Magnetic Barkhausen noise,

- metal magnetic memory testing and estimation of the ship plate welded structure stress [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012, 31(1):80-89.
- [8] YELBAY H I, CAM I, GÜR C H. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by magnetic Barkhausen noise technique [J]. *NDT&E International*, 2010, 43(1):29-33.
- [9] SORSA A, SANTA-AHO S, WARTIAINEN J, et al. Effect of shot peening parameters to residual stress profiles and barkhausen noise [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 37(1):10.
- [10] 程志远, 宋凯, 门平, 等. 磁巴克豪森噪声重构磁滞参数的硬度测定方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10):117-125.
- CHENG ZH Y, SONG K, MEN P, et al. Hardness determination method based on reconstructed magnetic hysteresis parameters with magnetic Barkhausen noise [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10):117-125.
- [11] 何存富, 蔡燕超, 刘秀成, 等. 基于磁巴克豪森噪声的 S136 钢表面硬度定量预测模型对比 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(18):15-21.
- HE C F, CAI Y CH, LIU X CH, et al. Comparative of models for quantitative prediction of surface hardness in S136 steel based on magnetic barkhausen noise [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(18):15-21.
- [12] SOULTAN M, KLEBER X, CHICOIS J. Mechanical Barkhausen noise during fatigue of iron [J]. *Ndt & E International*, 2006, 39(6):493-498.
- [13] VINCENT A, PASCO L, MORIN M, et al. Magnetic Barkhausen noise from strain-induced martensite during low cycle fatigue of 304L austenitic stainless steel [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(17):4579-4591.
- [14] DING S, TIAN G Y, DOBMANN 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(jan.):225-229.
- [15] KYPRIS O, NLEBEDIM 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 Magnetism*, 2013, 49(7):3893-3896.
- [16] 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):32.
- [17] GRUJALBA F A F, PADOVESE L R. Non-destructive scanning for applied stress by the continuous magnetic Barkhausen noise method [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 466:231-238.
- [18] HAUSILD P, KOLARÍK K, KARLÍK M. Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement [J]. *Materials & Design*, 2013, 44:548-554.
- [19] VENGRINOVICH V, VINTOV D, PRUDNIKOV A, et al. Magnetic Barkhausen effect in steel under biaxial strain/stress: Influence on stress measurement [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2019, 38(2), DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7.
- [20] 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.
- [21] BÜKKI-DEME A, SZABÓ I A, CSERHÁTI C. Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(13):1748-1751.
- [22] JILES D C. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect [J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2000, 50(8):893-924.

作者简介



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研究、检测装备开发及标准研制。

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 research interests include non-destructive testing and evaluation techniques, instruments and standards development.



张鑫, 硕士研究生。2018年于中北大学机械工程学院机械设计制造及其自动化专业获得学士学位, 现为中北大学和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: zhangxinchina7@126.com

Zhang Xin received his B. Sc. degree in mechanical design, manufacturing and automation from the College of Mechanical Engineering, North University of China in 2018. Now, 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.



周进节 (通信作者), 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 (Corresponding author) 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 currently 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.



谭继东, 2012年于中北大学获得学士学位, 2015年于中北大学获得硕士学位, 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、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 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.