

MR

中华人民共和国市场监管行业标准

MR/T XXXXX—XXXX

特种设备 应力测评 第1部分：磁巴克豪森
法

Special equipment stress assessment—Part 1: Magnetic barkhausen method

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

征求意见稿

(2025年2月25)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

发布

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 原理	2
5 一般要求	2
5.1 通用检测工艺规程	2
5.2 作业指导书	2
6 仪器和设备	3
6.1 检测系统	3
6.2 检测仪器	3
6.3 分类	3
6.4 传感器	4
6.5 试件	5
7 检测	6
7.1 载荷应力测量	7
7.2 加工零部件表面残余应力测量	8
7.3 焊接残余应力	8
7.4 检测程序	9
7.5 被测表面及材质要求	12
7.6 温度要求	13
7.7 传感器安装要求	13
8 测量不确定度分析	13
8.1 测量不确定度来源	13
8.2 测试对象材质及试样引入不确定度	13
8.3 随机效应引入的不确定度	14
9 试验报告	14
附录 A (资料性) 磁巴克豪森噪声法平面应力张量解析方法	15
附录 B (资料性) 测试及标定过程数据记录表	16
附录 C (规范性) 磁巴克豪森应力测量标定方法及过程	17
附录 D (资料性) 仪器设备性能指标	19

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是MR/T XXXXX《特种设备 应力测评》的第一部分。MR/T XXXXX 已经立项以下部分：
——第1部分：磁巴克豪森法

本文件由中国特种设备检测研究院等单位提出。

本文件由国家市场监督管理总局归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、北京工业大学、中北大学、电子科技大学等。

本文件主要起草人：略。

引 言

磁巴克豪森法是一种能够用于测量铁磁性材料部件和设备表层应力的无损检测方法,可用于特种设备零部件制造过程中、在役或在线残余应力或载荷应力检测监测。将被测材料样品或工件进行磁化,测量到磁巴克豪森噪声信号,通过应力-磁信号特征参量的映射关系得到被测工件应力,具有现场操作便捷、高效、精准、无损测量的优点。本文件制定为石油化工、能源电力、轨道交通、船舶海工、兵器工业、航空航天等领域应力测量提供了新的方法依据。

特种设备 应力测评 第1部分 磁巴克豪森法

1 范围

本文件规定了采用磁巴克豪森法测量温度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内铁磁性材料零部件和设备表层平面应力的方法，包括载荷应力和残余应力。

本文件适用于磁晶各向同性材料测量，磁晶各向异性材料可参考本标准规定的方法，可对压力容器、电站锅炉、桥梁、轨道、钢丝绳等设备载荷应力进行定期检测或长期监测，还可用于制造过程中零部件表层产生的残余应力测量，例如切削、喷丸、铸造、锻造、冷拉、热处理、焊接等。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法

GB/T 7314 金属材料 室温压缩试验方法

GB/T 12604.5 无损检测术语 磁粉检测

GB/T 20737 无损检测通用术语和定义

3 术语和定义

GB/T 12604.5、GB/T 20737界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

载荷应力 Loading stress

设备零部件所承受外力对零部件内部产生的应力，有静态载荷应力、动态载荷应力等。

3.2

平面应力张量 Plane stress tensor

描述材料在某一平面内应力状态的数学表达，只包含该平面内的正应力和切应力分量，忽略垂直于该平面的应力。

3.3

主应力 Principal stress

剪应力等于零的平面上（主平面）对应的正应力，包括最大主应力和最小主应力，一般情况下主应力指最大主应力。

3.4

主方向 Principal direction

主应力所在的方向，包括最大主应力方向和最小主应力方向，一般情况下主方向指最大主应力方向。

3.5

标定曲线 Calibration curve

材料在不同应力值状态下的磁巴克豪森噪声信号特征值与应力对应关系曲线。

4 原理

对于铁磁性材料,在交流磁化过程中,材料受到应力将改变其微观磁畴运动,引起材料磁特性变化。如图1所示,在存在应力情况下,材料磁特性参数发生改变,进而影响磁化过程中磁巴克豪森噪声能量的释放。如图2,对于大多数铁磁性材料磁巴克豪森噪声信号特征值(RMS),随着拉应力的增加而增大,随着压应力的增加而减小,基于此规律建立如图3所示应力与磁巴克豪森噪声特征值(如RMS)的关系曲线,通过此关系曲线可实现应力的测量评估。

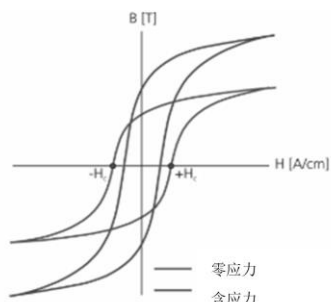


图1 应力对磁滞回线的影响

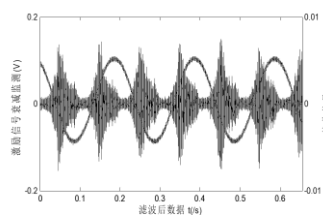


图2 磁巴克豪森噪声信号

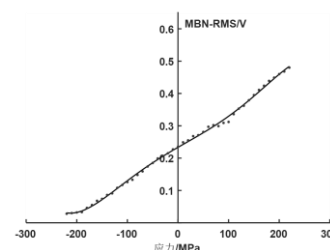


图3 磁巴克豪森噪声 (RMS-应力曲线)

5 一般要求

5.1 通用检测工艺流程

从事磁巴克豪森噪声应力测量的单位应按本标准的要求制定通用检测工艺流程,其内容至少应包括如下要素:

- a) 适用范围;
- b) 引用标准;
- c) 检测人员资格;
- d) 检测仪器设备,至少包含传感器、仪器主机、检测数据采集和分析软件等;
- e) 被检件的信息:几何形状与尺寸、材质、设计与运行参数;
- f) 检测覆盖范围的确定;
- g) 被检件表面状态;
- h) 检测时机;
- i) 检测过程和数据分析解释;
- j) 检测结果的评定;
- k) 检测记录、报告和资料存档;
- l) 编制、审核和批准人员;
- m) 编制日期。

5.2 作业指导书

从事磁巴克豪森噪声应力测量的作业指导书应至少包括如下内容:

- a) 被测工件规格、几何尺寸、盛装介质及使用年限、材料牌号、公称厚度、涂层厚度、表面状态;
- b) 测量时机及预处理情况;
- c) 测量时工件表面处理方法及处理后表面状态;
- d) 执行标准、参考标准;

- e) 检测仪器名称、型号、传感器型号；
- f) 标定试样尺寸、预处理方法、标定数据。

6 仪器和设备

6.1 检测系统

磁巴克豪森噪声检测系统应至少包括磁巴克豪森噪声传感器和仪器，必要时还应有扫查装置和位置记录装置，仪器设备性能指标达到附录D相关要求。

6.2 检测仪器

检测仪器硬件一般包括信号发生器、功率放大器、信号处理器、信号采集器、计算机等模块，如图4所示。

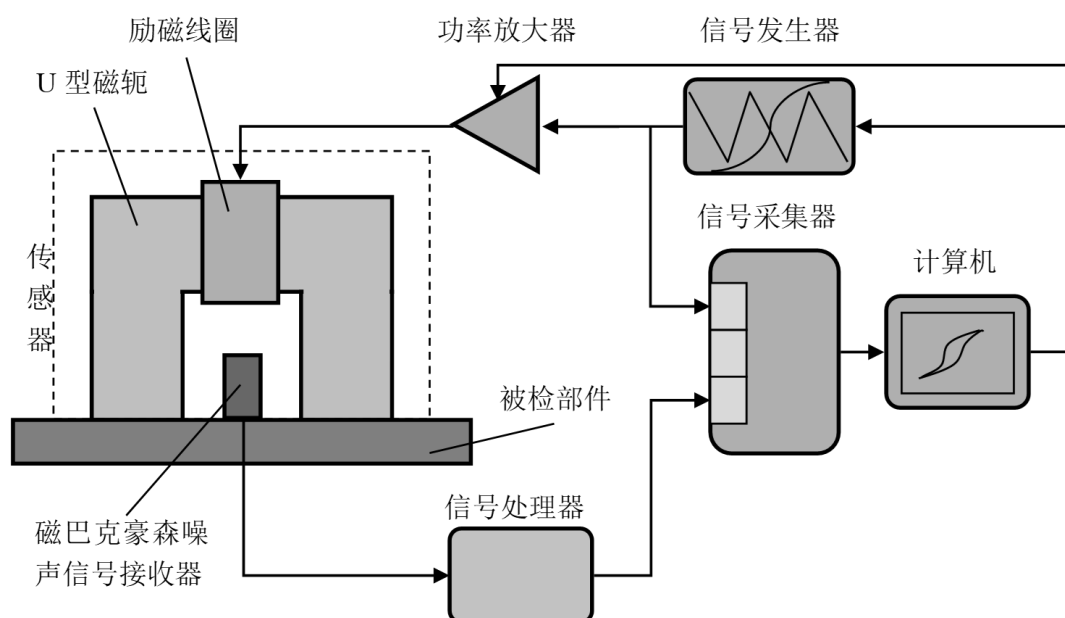


图4 检测系统示意图

6.3 分类

根据应用场合的不同，磁巴克豪森检测系统主要有便携式和固定式两类。便携式仪器主要用于现场在役设备的检测；固定式检测仪器主要用于构件的在线制造过程监测。

6.3.1 信号发生器

用于产生指定频率和幅值可调的交变信号，一般为正弦或三角波信号。

6.3.2 功率放大器

用于对信号发生器所产生的信号进行放大，以驱动磁巴克豪森噪声传感器对部件局部被测处进行磁化。

6.3.3 信号处理器

信号处理器包含信号放大器和滤波器两部分，信号放大器用于对磁巴克豪森噪声传感器接收信号进行放大。滤波器用于对信号放大器输出信号进行滤波，获得磁巴克豪森噪声信号。

6.3.4 信号采集器

用于对磁巴克豪森噪声信号进行模数转换，上传至主控制器。

6.3.5 计算机

用于控制整个仪器的各模块的工作，对磁巴克豪森噪声信号进行信号处理及特征值计算等。

6.4 传感器

6.4.1 概述

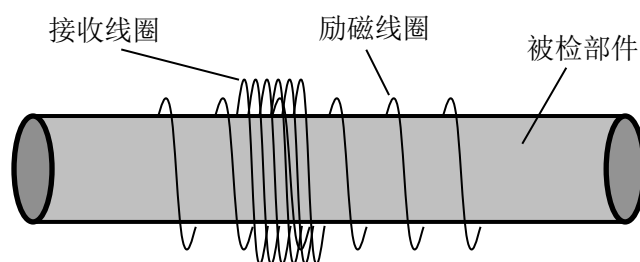
传感器包含励磁器件和接收器件。主要功能是可产生交变磁场激励被测部件表层产生并接收磁巴克豪森噪声信号。传感器可采用图5(c)所示结构，也可根据被检部件定制。

6.4.2 励磁器件

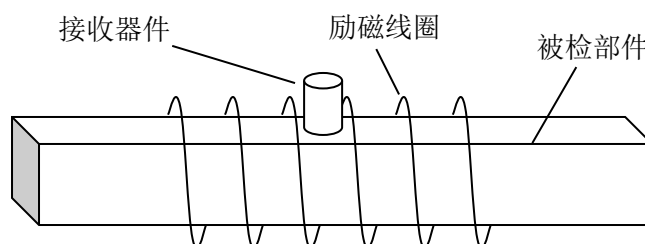
励磁器件主要由高磁导率磁轭上绕制线圈组成，或由线圈直接缠绕于被检部位组成，即电磁轭，用于产生交变磁场激励被测部件表层发生磁巴克豪森噪声效应。电磁轭形状可以有不同形状，常见的为U型磁轭。如图5(c)所示。

6.4.3 接收器件

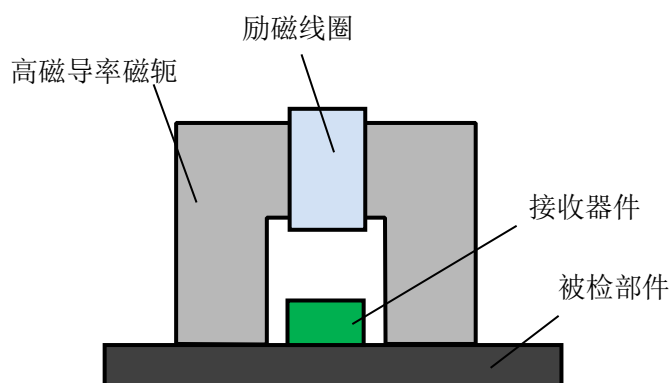
接收器件常采用巨磁阻元件、空心线圈或绕置于铁氧体等高磁导率上的线圈，即接收传感器，用于接收磁巴克豪森噪声效应或动态磁巴克豪森噪声效应磁巴克豪森噪声释放出的信号。接收传感器可以有不同的结构形式，如图5所示。



(a) 励磁线圈和接收线圈直接缠绕于被测部件检测示意图



(b) 励磁线圈直接缠绕于被测部件，接收器件置于被测部位检测示意图



(c) 采用高磁导率与励磁线圈励磁，接收器件置于被测部位检测示意图

图 5 检测示意图

6.5 试件

6.5.1 校准试件

6.5.1.1 校准试件用于对检测系统进行校准和复核。

6.5.1.2 磁巴克豪森噪声校准试件采用 20#钢材制成的圆柱或方形试件，试件高 10mm。圆柱试件直径为 100mm 或大于磁巴克豪森噪声传感器接触端尺寸且试件边缘距传感器 U 型磁轭触头边缘大于 20mm。方形试件 100mm×100mm，或长边尺寸大于磁巴克豪森噪声传感器接触端磁极外缘尺寸且试件边缘距传感器 U 型磁轭触头边缘大于 20mm，试件短边边缘距传感器 U 型磁轭触头边缘大于 20mm。

6.5.1.3 校准试件机加工后热处理前上下平面粗糙度 Ra 不大于 0.1 μm。

6.5.1.4 校准试件应材质均匀，无内应力。一般需经过完全退火为处理，满足表 1 退火要求。

表 1 标准试件完全退火要求

条件	要求
加热速度	≦ 100℃/小时
退火温度	820~840℃
保温时间	2 小时
冷却方法	随炉冷却
出炉后处理	稀盐酸/除锈剂中浸泡去除氧化皮后覆油膜防止表面氧化

6.5.1.5 校准试件周向不同角度的磁巴克豪森噪声信号应一致，即磁巴克豪森噪声特征沿测量点周向一致。

6.5.2 标定试件

6.5.2.1 拉伸应力标定试件

如图6所示, 拉伸应力标定试件尺寸应满足GB/T 228.1-2021中对拉伸试件尺寸的要求, 且:

— $b_0 \geq 1.5 \times b$;

— $l_0 \geq b_0$;

— 标定试件材料、热处理状态、表面质量应与被测部件相同;

— 标定前应消除标定试件残余应力。

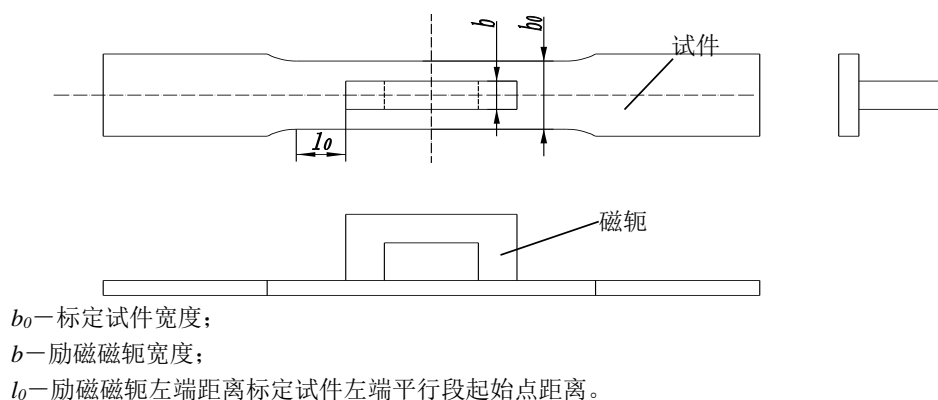


图6 拉伸标定试件

6.5.2.2 压缩应力标定试件

如图7所示, 压缩应力标定试件尺寸应满足GB/T 7314-2017中对压缩试件尺寸的要求, 且:

- $b_0 \geq 1.5 \times b$;
- $l_0 \geq b_0$;
- 标定试件材料、热处理状态、表面质量应与被测部件相同;
- 标定前应消除标定试件残余应力。

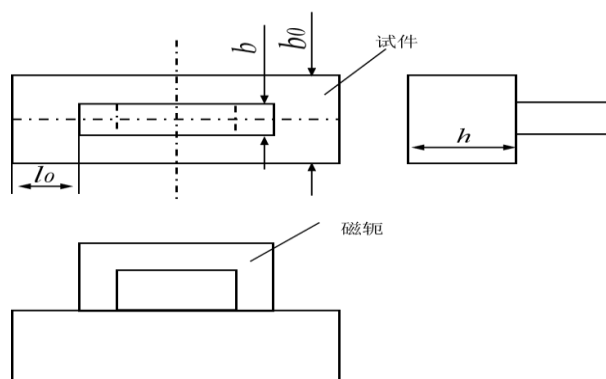


图7 压缩标定试件

6.5.2.3 消除标定试件残余应力

应力标定试件与被测部位具有相同的热处理工艺, 对于相同材料的不同检测部位, 若热处理工艺不同, 应做相对应的标定数据, 以避免材料微观结构对应力检测的影响。

7 检测

7.1 载荷应力测量

7.1.1 指定方向正应力测量

测量某一个位置指定方向的正应力。如图8所示，将传感器磁轭中心连线与指定方向重合放置，采集指定方向磁巴克豪森噪声信号，经标定曲线计算，得到指定方向正应力值大小。

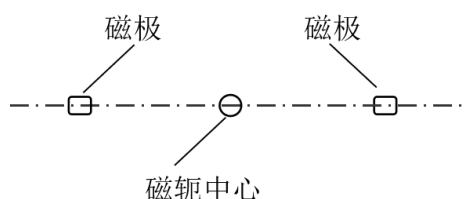


图8 指定方向正应力测量标记示意图

7.1.2 平面应力测量

7.1.2.1 磁晶各向同性材料平面应力测量

对于磁晶各向同性材料，采用三角度法测量某一位置的平面应力状态。在选定测试点位置进行三个方向磁巴克豪森噪声信号采集，如图9所示，传感器磁轭中心与测试点中心重合放置，保持中心位置不变旋转传感器测试三个方向磁巴克豪森噪声信号，通过标定曲线得到每一个分方向应力值，通过解调计算得到被测位置的平面应力状态，见附录A。

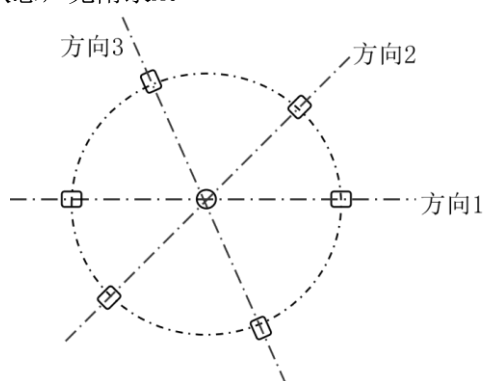


图9 平面应力测量标记示意图

7.1.2.2 磁晶各向异性材料的平面应力测量

对于磁晶各向异性材料，采用周向磁巴克豪森噪声分布法测量某一位置的平面应力状态。如图10所示，传感器磁轭中心与测试点中心重合放置，保持中心位置不变，旋转传感器使磁轭两磁极中心连线周向旋转，获取周向360°不同方向磁巴克豪森噪声信号，由标定曲线计算得到每个方向的正应力值大小，得到磁晶各向异性材料测试点的平面应力状态。

周向旋转步进分辨率应根据具体测试评价要求执行，一般旋转步进 $\leq 30^\circ$ ，可不等间距。

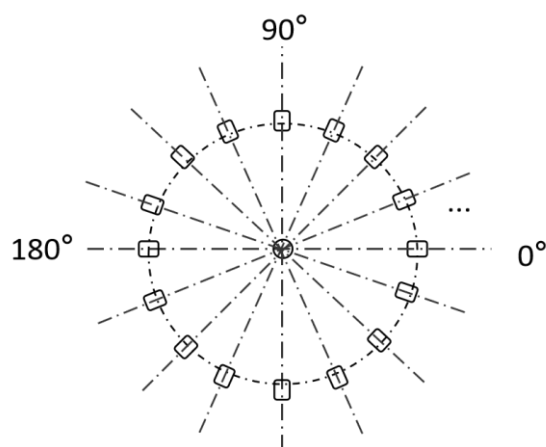


图10 磁晶各向异性材料平面应力测量示意图

7.2 加工零部件表面残余应力测量

7.2.1 指定位置测量

若零部件只需测量评估特殊位置残余应力,应根据被测对象材质或评价要求进行测试位置指定方向的正应力测量或平面应力测量,具体按7.1相关规定执行。

7.2.2 区域应力分布测量

7.2.2.1 测量位置的划定原则是根据应力分布特点和应力分析要求进行,还需考虑被测构件表面附近的实际空间状态。

7.2.2.2 为了获取零部件某区域残余应力分布情况及有效评估应力分布状态,往往是先用规则分布点的稀疏阵列获得大致轮廓,然后根据需要在特殊位置附近增加点的密度。当在某个测量方向或者区域内应力变化梯度或其变化很大时,为了得到足够的空间分辨率,需要在该方向或者区域增加应力分布测量密度。

7.2.2.3 应力分布测量指标可以是测量点指定方向的正应力大小,也可以是测量点平面应力状态,测量计算方法按7.1.2执行。

7.3 焊接残余应力

为了有效评估焊缝的焊接残余应力,测试位置划定原则上覆盖焊缝区域、焊缝熔合线、热影响区及母材区,如图11所示为垂直于焊缝在焊缝上及两侧测量位置分布示意图,同时需要考虑被测焊缝及附近实际空间状态;

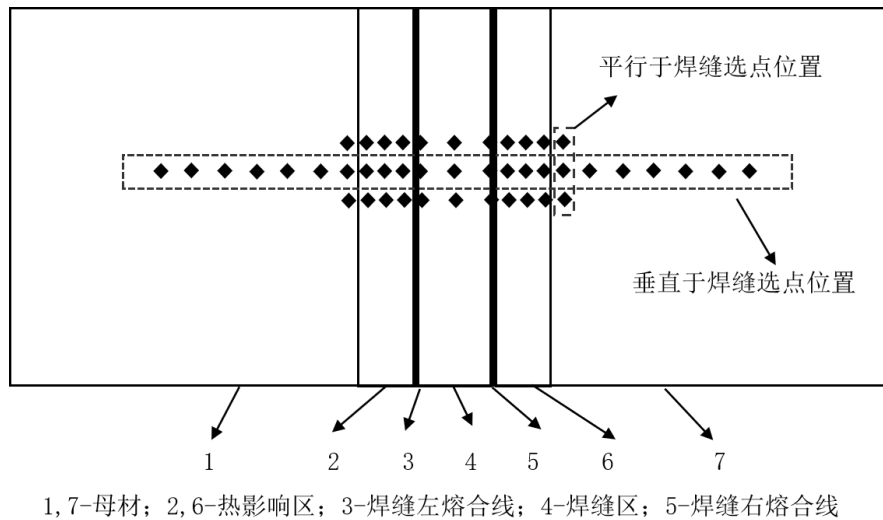


图11 焊接残余应力测量位置分布示意图

- 7.3.1 一般规定在焊缝中心和焊缝左右熔合线位置选取测试点 ≥ 1 ,在热影响区和母材区选取测试点 ≥ 3 。
- 7.3.2 如有必要,可在焊缝熔合线和热影响区增加平行于焊缝熔合线方向测试点,如图11所示,用于评价环焊缝残余应力分布情况。
- 7.3.3 由于焊接会导致焊缝、熔合区及热影响区组织结构发生变化,因此规定在焊接残余应力测量过程中,焊缝、熔合区及热影响区的各测试位置使用周向磁巴克豪森噪声分布方法进行测试评估,按7.1.2.2相关要求执行。
- 7.3.4 一般规定母材区测试位置测量方法如果被测对象材质是磁晶各项同性,使用三角度测量方法,详见附录A,如被测材料是明显磁晶各向异性材料,则应按7.3.3规定的方法执行。
- 7.3.5 焊缝残余应力测评一个显著应用是可以用于评估热处理消除残余应力效果的评价。

7.4 检测程序

本方法常规检测程序如图12流程图所示,具体如下:

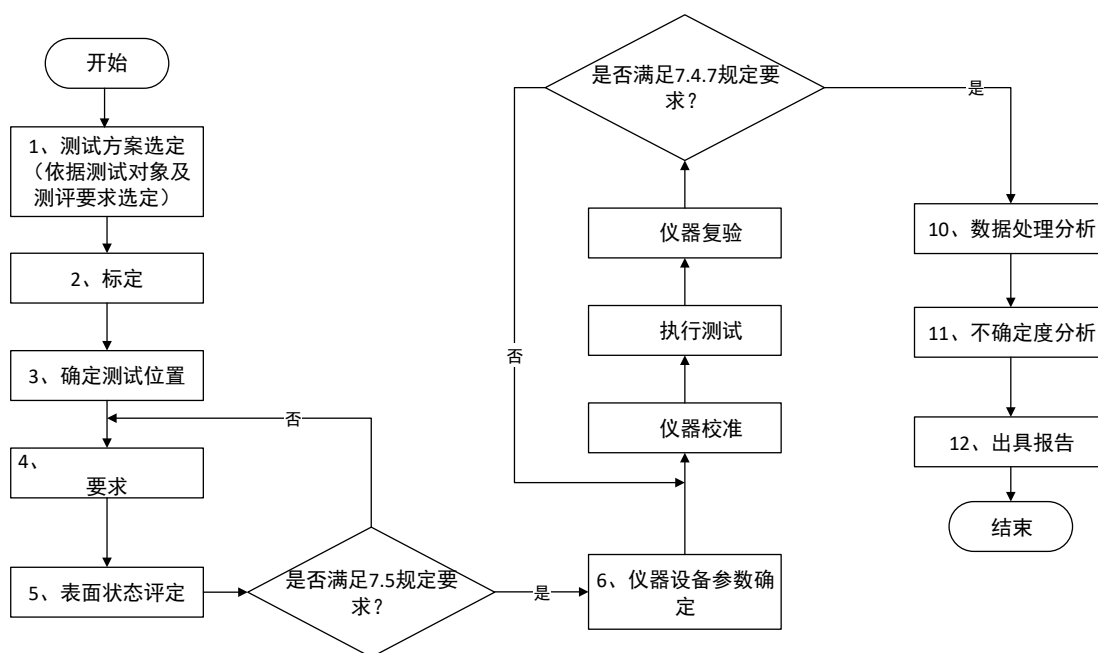


图12 检测程序流程图

7.4.1 测试方案选定

7.4.1.1 根据被测对象及评测要求选择合适类型传感器及配套检测仪器以及是否自动检测。

7.4.1.2 检测方式一般包括：

- a) 磁化方向为单向磁化或多角度磁化；
- b) 采用接触或者固定提高的非接触检测的方式；
- c) 手动检测或自动检测。

7.4.1.3 传感器选择：

- a) 平整表面一般选择平头式磁极传感器；
- b) 弧形表面、不规则表面可根据磁化方向与角度需求选择线接触式磁极传感器或点接触式磁极传感器；
- c) 齿轮等规则边缘表面宜采用与表面形状相贴合的磁极式传感器。

7.4.2 标定

根据6.2要求制备测试对象对应材质的标定试件，建立标定曲线，具体标定方法过程详见附录C《磁巴克豪森应力测量标定方法及过程》。

7.4.3 确定测试位置

具体测量位置的划定原则是根据测试对象类型及应力分布特点和应力分析要求进行确定，还需考虑被测构件表面附近的实际空间状态；

7.4.4 测试表面处理

7.4.4.1 试样及测试点的表面状态一般应满足如下要求：

- 对于实验目的而言应具有代表性；
- 处理表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu m$ ；
- 应避免无关的磕碰划伤痕迹。

7.4.4.2 表面处理的基本原则应尽量避免施加任何作用,以维持试样表面原有的应力状态,针对不同情况表面处理具体如下:

- a) 在被测点有氧化层、脱碳层或油污、油漆等物质的情况下,可采用某种有机溶剂、化学试剂加以清除。在此应注意防止因某种化学反应腐蚀晶界或者优先腐蚀材料中的某一相而导致的局部应力松弛;
- b) 在所选择的测试部位表面粗糙度过大或者存在无关的损伤及异物,采用机械磨削有可能引入新的应力,打磨时要用力均匀、适当、轻柔,避免磨削量过大致使温度过高而产生新的应力;
- c) 经过粗磨的或原始平整的表面,采用抛光砂布轮进行抛光处理,或直接采用 ≥ 2000 目砂纸,在平整的表面作手工打磨处理,应按照圈式打磨法打磨,禁止只按一个方向重复打磨;此时须知测得的应力可能与原始表面有所不同。

7.4.5 测试表面状态评定

7.4.5.1 测试表面处理后应对表面状态进行测试,评判其是否满足测试要求(按7.5被测表面及材质要求执行);

7.4.5.2 具体可以使用粗糙度测试仪进行测试,如不满足要求应重新对测试表面进行处理,直到满足要求为止。

7.4.6 仪器设备检测参数确定

7.4.6.1 测试前应对仪器设备检测参数调试确认并记录;

7.4.6.2 仪器设置调校主要参数有:激励波形、激励频率、激励电压等;

7.4.6.3 仪器参数调试方法:

- a) 将仪器设置恢复为默认设置;
- b) 根据趋肤效应公式确定激励频率,所选激励频率应使趋肤深度小于0.8倍被测部位厚度;磁巴克豪森噪声信号检测深度由以下几个影响因素:检测材料的相对磁导率、检测材料的相对电导率、信号的检测频率,趋肤深度计算公式:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

式中:

F —激励频率, Hz;

σ —材料电导率, S/m;

μ_0 —材料真空磁导率, H/m;

μ_r —材料相对磁导率, H/m。

一般常见金属材料建议使用激励频率1Hz-200Hz,磁化深度大约0.3mm-2mm,特殊不常见金属材料需要具体测定其磁导率和电导率后由趋肤深度公式计算确定磁化深度及激励频率。

- a) 调整激励电压,尽量使激励磁化达到饱和状态,确保磁巴克豪森噪声信号处于稳定状态;
- b) 调节接收信号参数,磁巴克豪森噪声信号接收信号频带范围一般在1kHz-500kHz,具体范围根据中心频率确定;
- c) 观察接收信号频谱,观察是否存在强干扰频段信号。若干扰信号频段处于传感器频段范围内,更换其他工作频段的传感器;反之,设置滤波器截止频率,滤掉干扰信号;
- d) 保存仪器参数,在实验室标定和实际现场检测时须使用此设置及传感器和仪器。

7.4.7 仪器校准

7.4.7.1 检测系统（探头、导线、仪器及辅助装置）每次实施检测前都要进行校准，以保证检测结果的准确性，每次校准均应记录。

7.4.7.2 按 6.5.1 规定的校准试件进行校准执行。

7.4.7.3 如有必要，检测校准需在与被检材料温度相同的试件上进行。

7.4.8 执行测试

7.4.8.1 对选定每个检测点分别按所画检测方向进行检测，并重复检测 5 次，剔除其中与其他检测值偏差大于 10% 的值，将剩余值的平均值作为检测结果，并做好记录；

7.4.8.2 手动点检测时一般采用接触式检测，测量中将传感器贴合被检测部位并压紧，励磁过程中传感器不应出现振动。

7.4.8.3 自动扫查检测一般采用固定脱离非接触式检测，测量过程中应保证励磁的一致性。

7.4.8.4 获取检测信号并保存记录原始检测信号或磁巴克豪森噪声特征值。

7.4.9 仪器复验

7.4.9.1 在下列情况下，应对磁巴克豪森噪声检测设备进行复核：

- a) 每次检测开始前和结束后；
- b) 检测应每隔 4 小时或一个班次在标准零应力试件上对整个仪器系统精度进行复验；
- c) 探头或导线更换时；
- d) 检测材料类型改变时；
- e) 怀疑检测设备工作不正常时；
- f) 合同各方有争议或认为有必要时。

7.4.9.2 若复核读数偏差超过仪器允许误差，则对检测开始或上次复核以来的全部测量数据予以复测。

7.4.10 数据处理分析

根据 7.4.8 测试得到磁巴克豪森噪声信号特征值与附录 A 平面应力计算和附录 C 要求获得标定数据解调得到测量点应力值。

7.4.11 不确定度分析

测试人员应对产生测量不确定度的潜在因素进行评价，如果认为它们会产生明显的影响，则应进行说明并给出不确定度评价，一般可能影响磁巴克豪森噪声应力测量结果的不确定性因素按 10 部分规定执行。

7.4.12 出具报告

按 9 部分要求执行出具测试报告。

7.5 被测表面及材质要求

7.5.1 材质成分一致性要求

规定在测量过程中应明确材料组织成分，可以使用便携式 XRF 合金成分分析仪（或者其他可以测定分析金属材料成分的设备）测量被测对象与标定试样材料成分，判定其是否是同种材料，如果材料成分有明显差异应重新获取与测试对象金属成分一致的标定试样，确保测试结果的可靠性。

7.5.2 粗糙度要求

被测部位表面粗糙度要求 $Ra \leq 3.2 \mu m$ ，确保励磁与信号接收状态良好。如未满足粗糙度要求，应使用 ≥ 2000 目砂纸手工打磨直到达到粗糙度要求，禁止使用角磨机等电动设备打磨。打磨时应按照圈式打磨法打磨，禁止只按一个方向重复打磨，打磨方法如图13所示，如有必要可使用粗糙度测试仪测量评估被测表面粗糙度状态，如不符合要求，应重新处理表面直到达到相关要求。

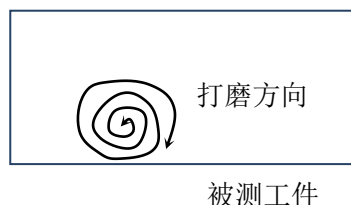


图 13 圈式打磨方法示意图

7.5.3 表面附着物要求

被测部位表面应无任何其他附着层，如表面含氧化皮，应使用稀盐酸清洗，完全露出金属本体。

7.6 温度要求

标定时标定试样表面温度与测试对象表面温度偏差应 $\leq \pm 20^\circ C$ ，若超出规定温度范围，应对标定数据做温度补偿。

7.7 传感器安装要求

7.7.1 检测时应保证接收器中心置于被测点位置，且磁轭两接触点之间连线方向应与被测正应力方向重合，传感器磁轭中心应与被测点所在表面法线重合。

7.7.2 传感器类型选择

—平整表面一般选择平头式磁极传感器；

—弧形表面或者不规则表面可根据磁化方向与角度需求选择线接触式磁极传感器或者点接触式磁极传感器；

—齿轮等不规则边缘表面宜采用与表面状态相贴合的磁极式传感器。

8 测量不确定度分析

8.1 测量不确定度来源

测试结果的测量不确定度主要来源于磁巴克豪森噪声信号特征值相对与标定拟合曲线的残差，实际上这里面包含有测试对象试样材质问题引入不确定度和由随机效应引入的不确定度，根据具体情况应当具体分析。

8.2 测试对象材质及试样引入不确定度

测试对象材质及试样引入不确定度主要包括以下几个方面：

—测试对象材质与标定试样材质是否有明显差异；

—测试对象材质组织微观结构分布是否均匀；

—测试对象材质磁特性分布是否一致，包括单一位置磁晶各向异性和不同位置磁晶各向异性分布是否有明显差异；

8.3 随机效应引入的不确定度

随机效应引入的不确定度主要包括以下几个方面：

- 操作者的技能和熟练程度可能是影响测试结果精度的最重要因素之一；
- 操作环境是否具有强磁干扰；
- 传感器耦合状态；
- 测试表面状态，例如在测试区域具有明显划痕、氧化层、铁锈等。

9 试验报告

试验报告应当包括下列内容：

- a) 委托单位、报告编号；
- b) 检测单位；
- c) 被检工件（设备）规格、几何尺寸、盛装介质及使用年限、材料牌号、公称厚度、涂层厚度、表面状态；
- d) 检测时工件表面处理方法及处理后表面状态；
- e) 执行标准、参考标准；
- f) 检测仪器名称、型号、扫描模式；
- g) 标准和对比试件的校准结果；
- h) 仪器检测状态参数的设置值；
- i) 用图示标明检测部位；
- j) 检测设置文件名称及数据文件名称；
- k) 用草图、标记或照相描述并定位超出验收标准的结果位置示意图；
- l) 验收准则及检测结论；
- m) 检测日期、检测人员和审核人签字。

附录 A
(资料性附录)

磁巴克豪森噪声法平面应力张量解析方法

A.1 平面应力张量是指在某一平面内由外力作用而产生的应力状态，其只包含该平面内的正应力和剪应力分量，忽略垂直于该平面的应力。

A.2 根据经典理论，平面上某一点的应力状态可以描述为

$$\sigma_{x'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos^2\theta + \sigma_2 \quad \text{式 1}$$

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

式中：

$\sigma_{x'}$ —正应力 MPa；

$\tau_{x'y'}$ —切应力 MPa；

σ_1 —最大主应力 MPa；

σ_2 —最小主应力 MPa；

θ — $\sigma_{x'}$ 与最大主应力 σ_1 之间的夹角 rad。

通过测量 3 个方向的 MBN 得到 3 个已知方向的应力值，利用数值方法和式 1 与式 2 求解平面内的最大主应力。假设 U' 为最大主应力方向， V' 为最小主应力方向。图 A.1 为 3 个求解角度相对关系示意图。如果测量 $\sigma_{x1'}$ ，作为某一个方向，则其与方向 σ_1 的夹角为 θ_1 ，继续测量另外一个方向 $\sigma_{x2'}$ ，其与方向 σ_1 的夹角为 $\theta_1 + \varphi_1$ ，同时 $\sigma_{x3'}$ 与方向 σ_1 的夹角为 $\theta_1 + \varphi_2$ 。此时式 1 可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_{x1'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos^2\theta_1 + \sigma_2 \\ \sigma_{x2'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos^2(\theta_1 + \varphi_1) + \sigma_2 \\ \sigma_{x3'} = (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \cos^2(\theta_1 + \varphi_2) + \sigma_2 \end{cases} \quad \text{式 3}$$

式 3 包含 3 个未知数 σ_1 ， σ_2 和 θ_1 ，均可通过求解式 1 和式 2 得到。由于 $\sigma_{x1'}$ 的方向已知，所以可以依次求出最大主应力的方向。

A.3 平面应力张量求解过程具体为：

A.3.1 对待测试样进行标定，得到材料弹性范围内应力与 MBN 之间的标定曲线；

A.3.2 测量 3 个方向的 MBN 信号，通过校准曲线得到 3 个方向的应力值；

A.3.3 将 3 个方向的应力值及其夹角关系代入式 (2)，得到平面内最大主应力的大小和方向。

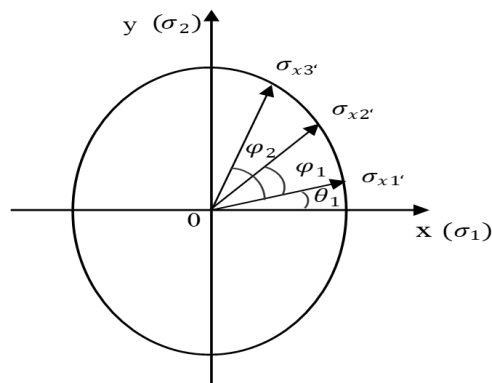


图 A.1 三角度法平面应力测量方法示意图

附录 B
(资料性附录)
测试及标定过程数据记录表

B1 应力-磁巴克豪森信号均方根值记录表见表 B. 1

表B. 1应力-磁巴克豪森信号均方根值记录表

应力 (MPa)	均方根 (V)
...	...
-20	...
-10	...
0	...
10	...
20	...
...	...

B2 应力检测结果记录表见表 B. 2

表B. 2应力检测结果记录表

标记位置	检测角度/ θ	应力值/MPa
...	...	应力值 \pm 偏差(置信度)
...	...	应力值 \pm 偏差(置信度)

B3 平面应力张量解析结果记录表见表 B. 3

表B. 3平面应力张量解析结果记录表

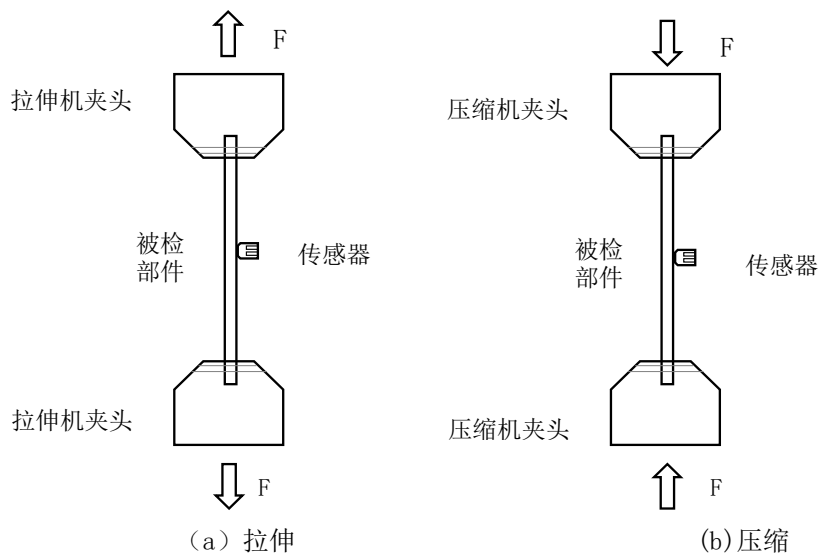
标记位置	最大主应力(正应力) σ_x	最大主应力方向	最大剪应力(必要时可选择性给出)	置信度(置信度)	安全度
...	应力值/MPa	角度/ θ	应力值/MPa...
...

附录C
(规范性附录)

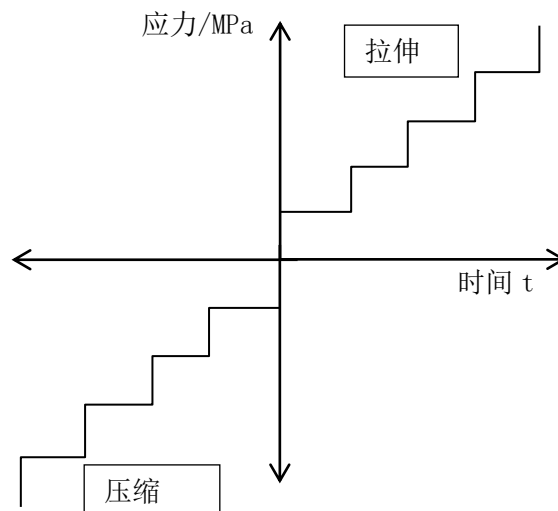
磁巴克豪森应力测量标定方法及过程

C.1 在磁巴克豪森应力测量过程中,标定是测量结果准确性关键一环,标定过程使用的标定试件应满足6.5.2相关要求;将磁巴克豪森噪声传感器固定于标定试件后,如图C.1所示,在拉伸试验机上进行拉伸和压缩实验(要求拉伸机荷重精度达到或低于0.5%),将材料弹性范围分为若干点,采用阶梯加载和压缩的方式,在每次保载时检测记录磁巴克豪森噪声均方根值,记录建立起磁巴克豪森噪声信号均方根-应力曲线,记录表格见附录B表B.1,加载示意图如图C.2所示。

C.2 标定时所记录的应力值应保证将材料弹性范围至少均等分数量 ≥ 10 。



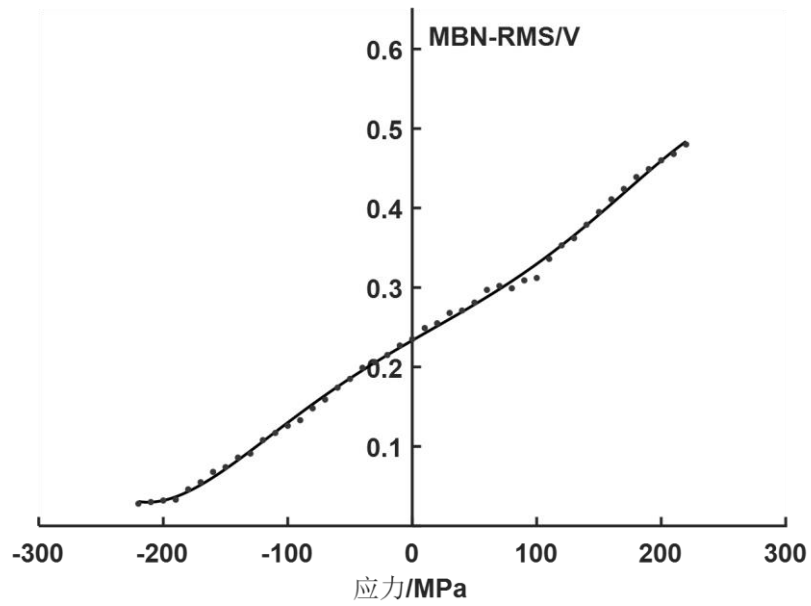
图C.1 拉伸和压缩应力标定实验传感器安装位置图



图C.2 拉伸和压缩阶梯加载示意

C.3 以下以Q235材料进行说明,由于Q235材料屈服强度为235MPa,故在-220MPa~220MPa范围内,在拉伸机应力每增加10MPa时进行保载,检测此时磁巴克豪森噪声信号,再继续加载,传感器安装如图C.1所示。

得到整个弹性范围内磁巴克豪森噪声均方根值与应力的对应关系曲线,最后将此对应关系曲线进行多项式拟合,并记录拟合置信度与拟合应力误差,得到如图C.3所示磁巴克豪森噪声均方根值-应力曲线。



图C.3磁巴克豪森噪声均方根值-应力标定曲线

附录D
(资料性附录)
仪器设备性能指标

D1 仪器设备性能最低指标见表 D.1

表 D.1 仪器设备性能最低指标

名称	参数	
仪器指标	磁化波形	正弦波、三角波
	磁化电压	$\geq 10V$
	最大功率	50W
	磁化频率	1~300Hz
	接收信号参数	放大倍数>20dB 带宽 5~500kHz
测试指标	带通滤波器范围	1~100kHz 可调, 衰减>35dB
	温度漂移系数	0.01%/°C
	稳定性	RSD \leq 3%
	单点测量重复性	\leq 3%
	应力测量精度	典型 Q235 钢、20#钢材料应力测量精度: $\pm 5\sim 20MPa$