

针对 RPV 钢磁巴克豪森噪声检测的传感器设计

边 闯¹, 王海涛¹, 刘向兵², 钱王洁², 丁同乐¹, 陈怀东³, 马官兵³, 郑 凯⁴

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 2. 苏州热工研究院, 江苏 苏州 215004;

3. 中广核检测技术有限公司, 广东 深圳 518031; 4. 江苏省特种设备安全监督检测研究院, 南京 210036)

摘要: 辐照损伤是影响 RPV 使用寿命的重要因素, 为了提升 MBN 信号检测仪器对 RPV 钢辐照损伤程度的评估性能, 设计一种小型化 MBN 信号检测传感器; 该传感器是由 H 型硅钢片磁轭、激励线圈、感应线圈和工型锰锌铁氧体构成, 可以使检测仪器获得更为稳定的 MBN 信号, 从而对 RPV 钢的辐照损伤进行有效评估; 此外, 利用电磁仿真软件 ANSYS Maxwell 对励磁模块进行了仿真与分析, 获得试件的有效磁化区域, 即长度 8 mm (磁轭两脚之间的距离)、宽度 8 mm (磁轭的厚度)、深度约为 1 mm (试件的厚度) 的立方体; 为了降低激励信号对 MBN 信号接收的影响, 分析了试件上方的磁感应强度分布, 获得了 MBN 信号接收器应该位于磁轭两脚的中间位置; 最后通过对 RPV 试样测量数据结果分析, 确定了最佳激励信号的幅值为 7 V, 频率为 6 Hz。

关键词: 巴克豪森噪声; 传感器; 反应堆压力容器; Maxwell 仿真; 特征值提取

Design of Magnetic Barkhausen Noise Detection Sensor for RPV Steel

BIAN Chuang¹, WANG Haitao¹, LIU Xiangbing², QIAN Wangjie², DING Tongle¹,
CHEN Huaidong³, MA Guanbing³, ZHENG Kai⁴

(1. School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute (SNPI), Suzhou 215004, China;

3. CGN Inspection Technology Co., Ltd., Shenzhen 518031, China;

4. Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: Irradiation damage is an important factor affecting the service life of reactor pressure vessel (RPV), in order to improve the performance of magnetic Barkhausen noise (MBN) signal detection instrument to evaluate the degree of irradiation damage of RPV steel, a miniaturized MBN signal detection sensor is designed. The sensor is composed of H-shaped silicon steel yoke, excitation coil, induction coil and work-type manganese zinc ferrite. It can make the detection instrument obtain a more stable MBN signal, which can effectively evaluate the irradiation damage of RPV steel. In addition, the electromagnetic simulation software ANSYS Maxwell was used to simulate and analyze the excitation module, to obtain the effective magnetization area of the specimen, namely a cube with the length of 8 mm (the distance between the two legs of the yoke), width of 8 mm (the thickness of the yoke) and depth of approximately 1 mm (the thickness of the specimen). The magnetic induction intensity distribution above the specimen was analyzed to reduce the influence of the excitation signal on the MBN signal reception, and obtain the MBN signal receiver, which locates in the middle of the two legs of the magnetic yoke. Finally, by analyzing the results of the RPV specimen measurement data, the optimal excitation signal was determined with the amplitude of 7 V and frequency of 6 Hz.

Keywords: Barkhausen noise; sensor; reactor pressure vessel; Maxwell simulation; eigenvalue extraction

0 引言

核安全是核电发展的前提和最高原则^[1]。反应堆压力容器 (RPV, reactor pressure vessel) 是压水堆核电厂中不可更换的关键核心部件, RPV 的安全服役寿命决定了核电厂的运行寿命^[2]。在核电厂运行期间, RPV 钢长期在强辐照、高温、高压、强流体冲刷的恶劣环境下工作, 导致 RPV 材料的内部产生一系列微结构缺陷, 其性能会逐渐退化, 表现为材料屈服强度增加、韧性降低、脆性增加等机

械性能变化^[3], 称为 RPV 钢的辐照脆化效应。当材料的力学性能下降到断裂临界时, RPV 钢会瞬间发生断裂, 引发严重的安全事故。因此, 为了确保核电厂的安全运行同时最大限度地发挥其经济性, 需要定期对 RPV 钢的中子辐照脆化程度进行评估, 目前国内外商用核电厂主要通过辐照监督样品的方法对 RPV 钢的辐照脆化程度进行监督和安全评价^[4], 但会受到监督样品的数量以及含放射性等条件的限制。因此需要开发新型的无损检测技术来对 RPV 钢进行

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-05-04。

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (2019B030302011)。

作者简介: 边 闯 (1999-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 王海涛 (1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

引用格式: 边 闯, 王海涛, 刘向兵, 等. 针对 RPV 钢磁巴克豪森噪声检测的传感器设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(2): 332-338.

辐照监督, 这对于确保核电厂安全可靠地运行有重要的现实意义^[5]。

1999 年韩国原子能研究院 Park^[6]使用磁巴克豪森噪声 (MBN, magnetic Barkhausen noise) 的检测方法研究了 RPV 钢经中子辐照后的脆化情况; 2004 年欧洲研究中心的 Debarberis^[7] 等人在考虑了辐照导致的基体缺陷、富 Cu 团簇、P 元素偏析等因素后, 在初级辐照脆化的理论基础上建立了脆化动力学模型; 2018 年清华大学核能与新能源技术研究院的张天慈^[8-9] 等人对 RPV 钢分别进行了正电子湮没和纳米压痕硬度分析, 结果表明, 辐照使材料产生了空位型缺陷和溶质原子团簇缺陷, 相较于室温下的辐照, 高温辐照产生了更多的溶质原子团簇缺陷, 但空位型缺陷数量更少。2018 年 Masaki Shimodaira^[10] 等研究了辐照引起的位错环和溶质原子团簇对低铜 RPV 钢硬化的贡献, 得出在不同剂量下两者对 RPV 钢的硬化贡献不同; 2021 年石见见^[11] 等利用原子探针和纳米压痕技术对初始辐照、辐照后退火以及再辐照的 RPV 钢进行了研究, 结果表明辐照会产生大量的 Mn-Ni-Si 团簇, 退火后团簇会得到一定程度的回复, 而再辐照产生新的 Mn-Ni-Si 团簇; 2022 年丁兆楠^[12] 等研究了 Fe³⁺ 辐照下 RPV 钢的硬化行为, 结果表明当辐照损伤较低时, 试样的硬度随辐照损伤剂量的增加而迅速增加, 而在较高辐照损伤下硬度变化较为缓慢同时呈现饱和趋势。目前对 RPV 钢辐照脆化的研究主要集中在材料微观结构变化观测、硬度变化测试等, 这些方法都会破坏原本试件的结构完整性, 属于有损检测, 同时这些检测方法所需仪器价格昂贵, 还需要专业的人员进行操作。无损检测技术是在不破坏被测试件完整性的条件下对试件进行测量, 测量迅速且方便快捷, 因此亟需一种能够有效评估 RPV 辐照脆化程度的无损检测新方法。

MBN 检测技术对材料的微观结构变化敏感, 研究表明 RPV 钢辐照脆化效应产生的根本原因是辐照导致材料微观结构的变化, 使材料产生了诸如位错环、空位环、溶质原子团簇、杂质元素的偏析等缺陷^[13], MBN 信号对这类微观缺陷非常敏感, 同时相较于超声等常规无损检测技术, 该技术可以在宏观缺陷产生前对材料性能进行评估, 而且不需要耦合剂, 因此 MBN 信号检测技术用于 RPV 钢辐照脆化的评估与预测是切实可行的^[14]。

1 MBN 信号检测原理

MBN 是一种重要的电磁无损检测技术, 该检测方法已经广泛运用到了应力测量、硬度测试、晶粒度检测等场合。该效应是由德国科学家 Barkhausen^[15] 于 1919 年首次发现。研究表明, 在连续变化磁场的作用下, 铁磁性材料的磁化曲线并不连续^[16]。如图 1 所示。

对铁磁性材料施加交变磁场时, 其内部的磁畴向易磁化方向发生不可逆的翻转和磁畴壁位移, 并在铁磁性材料表面产生杂乱的感应电压脉冲信号, 这种现象称为 MBN 效应。此时将一个探测线圈放置在材料表面, 就可以采集到微弱的电压噪声信号, 即为 MBN 信号。如图 2 所示。

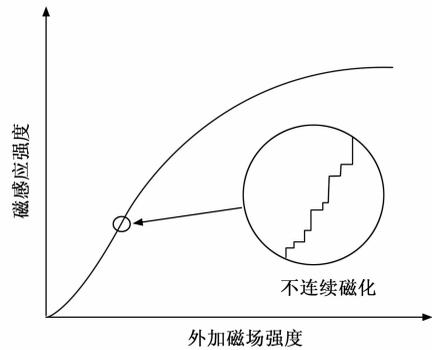


图 1 铁磁性材料不连续磁化现象

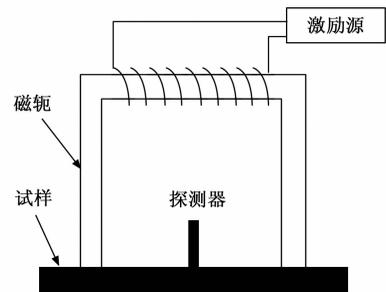


图 2 MBN 信号检测示意图

根据 Alessandro^[17] 等人的理论, 金属体中单个磁畴壁的动力学方程由式 (1) 确定:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\sigma G} (H_{\text{eff}} - h_c) \quad (1)$$

式中, σ 为材料的介电常数; $d\varphi/dt$ 为磁通率即为接收线圈中的感应电压; $G=0.1356$ 为一个无量纲常数, h_c 为磁畴壁的钉扎部位的局部强制场; 有效外加磁场 H_{eff} 定义为 $H_{\text{eff}} = H - H_m$, H 为外加磁场, H_m 为退磁场。

当外加激励磁场为正弦变化时可以描述为:

$$H(t) = H_s \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

式中, H_s 为外加磁场的最大值, f 为外加激励磁场的频率。

退磁场由退磁因子决定, 取决于样品的形状。退磁因子的计算一般只限于可被均匀磁化的磁性旋转椭球体, 而对于方形薄片退磁场可忽略^[18], 因此式 (1)、(2) 结合可得:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\sigma G} H_s \sin(2\pi ft) - \frac{h_c}{\sigma G} \quad (3)$$

式 (3) 表明感应电压是外加激励磁场产生的一个谐波分量和随机变化的强制场叠加后的结果。为了便于对式 (3) 进行说明, 画出了感应信号随时间变化如图 3 所示。

从图中可以看出, 当材料中不存在钉扎点即 $h_c=0$ 时, $d\varphi/dt$ 为一条正弦线, 等于施加的激励磁场。当存在钉扎点 (图中米形点) 即 $h_c \neq 0$ 时, $d\varphi/dt$ 在 $H=h_c$ 时减小到 0, 此时小范围改变外加磁场, 磁畴壁也不发生移动。当外加磁场增加到一定程度时, 磁畴壁会“跳跃式”地移动到另一个位置, 产生一个高频的跳变磁场。因此, 总的感应信号是外加激励磁场和一系列跳变磁场的叠加。在 MBN 信号提

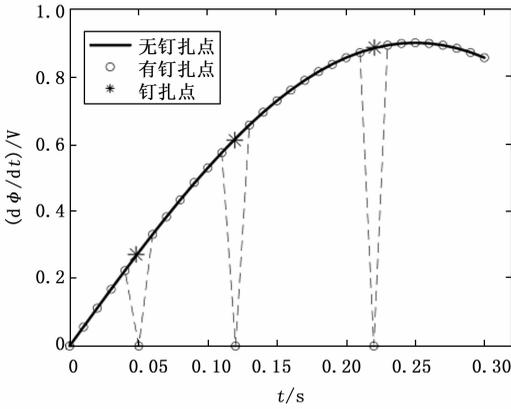


图 3 感应信号

取的过程中，利用高通或者带通滤波器对探测器采集到的信号进行处理，滤除掉低频信号，保留的就是由于磁畴壁的跳跃产生的高频信号。滤波后的信号如图 4 所示。

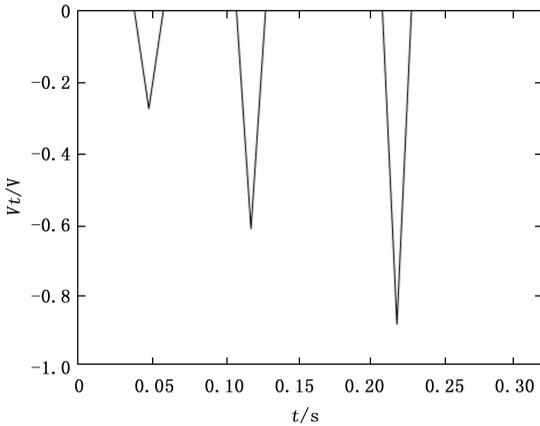


图 4 感应信号中高频分量

图中的符号代表的是探测器中产生的电流的方向。根据以上叙述，当磁畴壁遇到一个钉扎点时，受到钉扎点的作用会产生一个跳跃信号，当在某一时刻存在 m 个钉扎点时，得到的信号强度即为：

$$V_i = \frac{1}{\sigma G} m(h_c) h_c \quad (4)$$

式中， V_i 为磁畴壁克服钉扎点的阻碍作用产生的 MBN 信号； $m(h_c)$ 为钉扎点的数量。该表达式和 $\text{kim}^{[19-20]}$ 得到的表达式相似。表明当忽略磁畴壁的相互作用时，MBN 信号在磁畴壁克服钉扎点的阻碍作用时产生^[21]。

MBN 信号的产生是非常复杂的，受很多因素的影响，尽管如此，依旧可以证明在微观结构下，MBN 信号的产生主要有两个原因：晶界处 90° 磁畴的形成和湮灭以及 180° 磁畴的翻转，所以一切影响磁畴壁的因素都会影响 MBN 信号的强度。

$$V_i = \frac{1}{\sigma G} [m_R(h_R) h_R + m_P(h_P) h_P] \quad (5)$$

式中， $m_R(h_R) h_R$ 为钉扎点在 90° 磁畴处的贡献， $m_P(h_P)$

为钉扎点在 180° 磁畴处的贡献， m_R 为 90° 磁畴处钉扎点的数量， m_P 为 180° 磁畴处钉扎点的数量。

2 传感器设计

在 MBN 信号检测系统中，传感器是整个测量系统的关键所在，想要获取稳定的 MBN 信号，传感器的合理设计至关重要，因此基于 MBN 信号检测仪器自主设计了适用于 RPV 钢辐照脆化程度检测的传感器。该传感器具体由磁轭、激励线圈、MBN 信号接收器组成。

2.1 磁轭结构设计

磁轭形状可以为 H 型和 U 型，两种形状的磁轭都可以对试件进行有效地贴合。李包青^[22]等对两种形状的磁轭分别进行了仿真，结果表明两种结构对材料的磁化效果相当；王嘉星^[23]等利用锰锌铁氧体设计了 U 型磁轭，但传感器不能满足小型化 RPV 钢试样的检测需求；王文涛^[24]利用 H 型磁轭测量了不同残余应力下的 MBN 信号，取得了很好的实验效果。考虑到 H 型线圈容易缠绕激励线圈且线圈分布较为均匀，所以本实验采用 H 型磁轭作为传感器的励磁模块。

常用的磁轭材料有硅钢片和锰锌铁氧体。硅钢片适用于低频、大功率的情况下，高频下损耗急剧增加，通常情况下要低于 400 Hz；锰锌铁氧体具有高磁导率、高频低损耗特点，但在低频下容易饱和^[25]。本实验中使用的激励信号频率低于 10 Hz，所以选取硅钢片作为磁轭材料。为了保证传感器具有较高的灵敏度，这就要求整体尺寸尽可能小，但过小的尺寸不利于 MBN 信号的接收，同时结合检测试样的尺寸，综合考虑下设计的 H 型磁轭尺寸如图 5 所示。其中磁轭厚度为 8 mm。

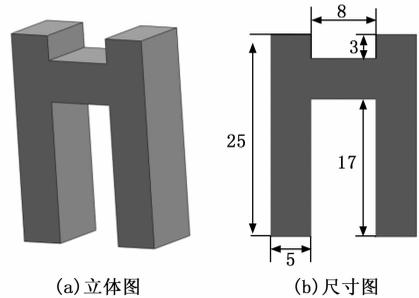


图 5 磁轭几何模型图 (mm)

铁磁性材料在被磁化的过程中，随着磁化深度的增加，磁化强度会发生衰减，根据电磁学理论，磁场在垂直材料表面的衰减规律为：

$$H(x) = H_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

式中， $H(x)$ 为材料内部与表面垂直距离为 x 处的磁场强度； H_0 为试件表面的磁场强度； α 为衰减系数， $1/\alpha$ 通常被定义为穿透深度，是指衰减为 H_0 的 $1/e$ 时到材料表面的距离^[26]。激励线圈接收到的信号为正弦信号，根据以下趋肤深度式 (7)^[27] 可以确定材料的磁化深度。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (7)$$

式中, f 为激励信号的频率; $\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_r 为材料的相对磁导率; σ_0 为材料的电导率。结合式 (6) 和 (7) 可得衰减系数的表达式为:

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma_0} \quad (8)$$

从式 (7) 和 (8) 可以看出: 随着激励信号频率的增加, 趋肤深度变小, 材料的磁化范围变小, 引起磁畴转动和磁畴壁位移的数量减小, 最终导致 MBN 信号减弱。常见铁磁性材料的相对磁导率介于 50~5 000 之间, 电导率介于 (5~10) × 10⁶ Ω⁻¹ m⁻¹ 之间, 计算出不同频率下的铁磁性材料的趋肤深度如表 1 所示。

表 1 不同激励频率的趋肤深度

激励频率/Hz	趋肤深度/mm
1	2.25~31.84
5	1.07~14.24
10	0.71~10.00

所用 RPV 钢试件的厚度为 1 mm, 考虑到趋肤深度和磁化效果, 激励线圈的频率应在 5 Hz 左右 (由于试件厚度限制, 在仿真过程中改变激励信号频率, 试件磁感应强度变化不明显, 具体仿真见 2.2 节)。

2.2 励磁结构仿真与分析

ANSYS Maxwell 是一种电磁仿真软件, 可对诸如传感器、调节器、电动机等电磁元件进行仿真。根据磁场是否随时间变化, 将磁场分析分为静态磁场分析和涡流磁场分析。在检测 MBN 信号时, 激励信号选择的是低频的交流信号, 按照正弦规律变化, 可通过 Maxwell 2D 涡流求解器进行分析计算。

根据设计的磁轭尺寸, 在 Maxwell 软件中建立模型, 激励线圈设置为 300 匝, 对激励线圈施加 4 V、5 Hz 的正弦信号, 检测试件的尺寸为实际尺寸大小, 为 15 mm × 15 mm × 1 mm (长度 × 宽度 × 厚度)。得到的磁感应强度分布和磁力线分布如图 6、图 7 所示。

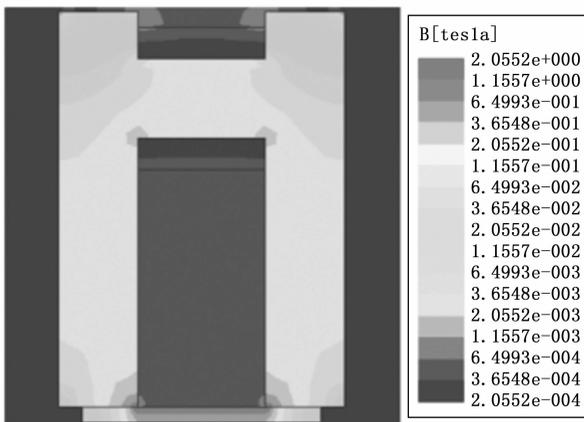


图 6 励磁结构磁感应强度分布

通过图 6、图 7 中可以看出: 试件一定深度被完全磁化, 根据颜色信息初步判断平均磁感应强度为 1.70 T, 在

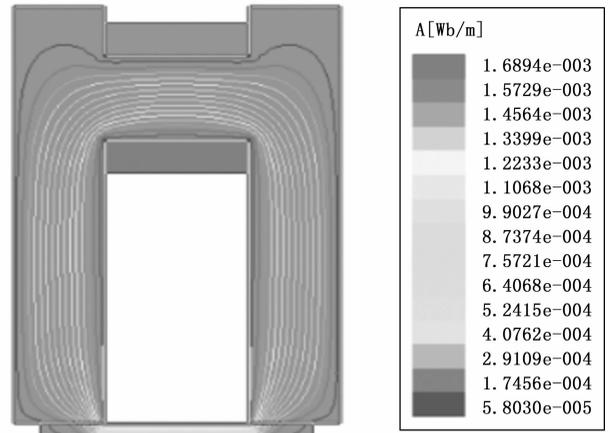


图 7 励磁结构磁力线分布

磁轭和试件紧密贴合的情况下, 磁力线在磁轭和被测试件内部形成闭合回路, 分布符合设计预期。

为了精确得出磁化区域, 在距试件上表面深度分别为 0.02、0.50、0.98、1.00 mm 处设置一条路径, 长度为 15 mm (试件长度), 得出在不同深度路径下的磁感应强度变化如图 8~11 所示。

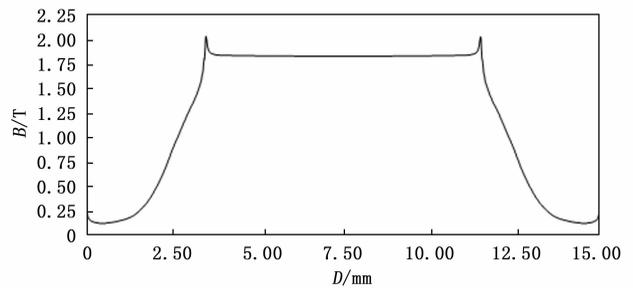


图 8 0.02 mm 深度路径下磁感应强度变化

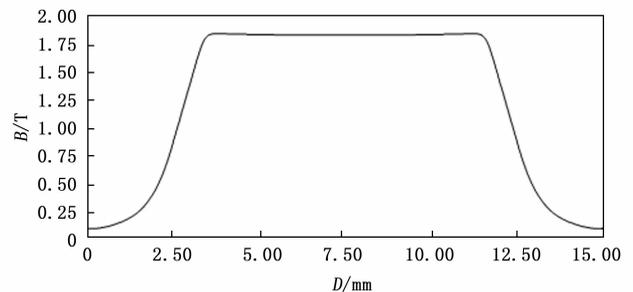


图 9 0.50 mm 深度路径下磁感应强度变化

通过仿真结果可以看出, 在试件内部不同深度下, 三条路径中 3.5~11.5 mm 处的磁感应强度基本相同, 磁化效果相当, 大约为 1.8 T, 该长度正好为磁轭两脚之间的距离, 表明在磁轭两脚之间的区域, 试件可以被完全磁化; 而下表面的磁感应强度仅为 mT 级, 可以解释为试件的下表面设置的是空气介质, 因此磁感应强度迅速减小。

在试件的中心位置设置一条垂直向下的路径, 长度为 1 mm (试件厚度), 得出在深度路径下的磁感应强度变化

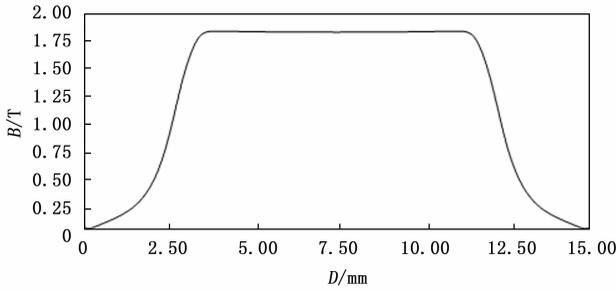


图 10 0.98 mm 深度路径下磁感应强度变化

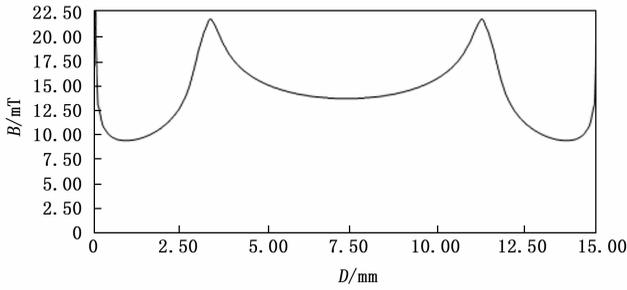


图 11 1.00 mm 深度路径下磁感应强度变化

如图 12 所示。

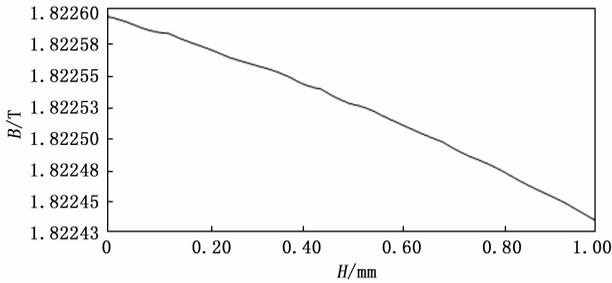


图 12 磁化区域内不同深度磁感应强度变化

从图 12 中可以看出在不同深度下磁感应强度呈现下降趋势，但数值相差不大，可以认为在深度范围内磁感应强度相同，为 1.82 T。

因此，通过仿真结果可以得出：待测试件的有效磁化区域为长度 8 mm（磁轭两脚之间的距离）、宽度 8 mm（磁轭的厚度）、深度约为 1 mm（试件的厚度）的立方体。在该磁化区域内磁感应强度为 1.82 T，在仿真过程中，小范围地改变激励信号的幅值和频率，试件被磁化的效果变化不明显，因此只能通过仿真确定激励信号的大致范围，而最优的激励信号的幅值和频率要通过试验来进行确定。

2.3 MBN 信号接收器设计

MBN 信号接收器由磁感应元件和磁芯组成。常用的磁感应元件有磁阻传感器、霍尔元件、感应线圈等。3 种磁感应元件的参数如表 2 所示。根据已有结果^[28]表明，RPV 钢的 MBN 信号的中心频率一般在 10 kHz 左右，结合传感器的灵敏度、线性范围及频率范围等参数，最终选用灵敏度高、线性度好、频率范围广的感应线圈作为检测元件。考虑到 MBN 信号的频率，磁芯选用锰锌铁氧体，内径为

3 mm，外径为 6 mm，长 8 mm。检测线圈使用直径为 0.07 mm 的铜漆包线，匝数为 400 匝。

表 2 各磁敏传感器输出特性比较

磁感应元件类型	灵敏度/(mV/Gs)	线性范围/Gs	频率范围
感应线圈	165	20	1 kHz~10 MHz
磁阻传感器	3~4.2	1.5~10.5	0~1 MHz
霍尔元件	2.5	840	0~10 kHz

接收器放置的不同位置也会影响 MBN 信号的有效接收。在试件上方 0.2 mm 处设置一条路径，长度为磁轭两脚柱内距 8 mm，此路径下激励信号产生的磁感应强度分布如图 13 所示。

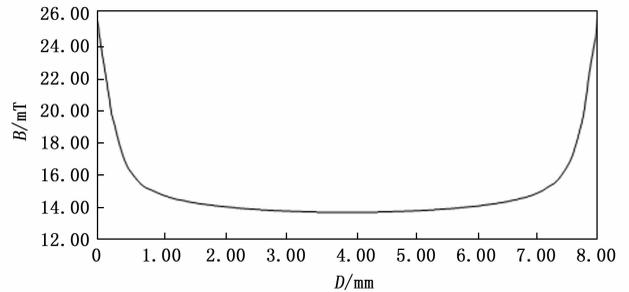


图 13 材料表面磁感应强度变化

从图 13 可以看出，距离磁轭两脚的距离越近，磁感应强度越大，接收器所受到的干扰越大。为了削弱激励磁场对 MBN 信号接收产生的影响，接收器的位置应该放置在磁轭两脚的正中间位置。同时接收器磁芯也存在材料分布不均匀的现象，可以使用磁芯接地来消除对信号接收的影响。

2.4 传感器实物

磁轭由 40 层 0.2 mm 的定向硅钢片压制而成，激励线圈选取 0.21 mm 耐高温耐高压的聚酯漆包圆铜线，其具有良好的电气性能，适合作为激励线圈使用。将漆包线紧密且方向一致地缠绕在 H 型磁轭上，匝数为 300 匝，在硅钢片表面贴一层铜箔，可以使激励线圈产生的感应磁场集中在磁轭内部，对试件有更好的磁化效果。

3 MBN 信号检测仪器

为了对 RPV 钢辐照老化程度进行检测，自主开发了 MBN 信号检测仪器，该检测仪器体积小、重量轻、测量简单快捷。检测仪器组成如图 14 所示，具体由 DSP、功率放大模块、传感器、信号调理电路和 LCD 屏幕组成。

DSP 作为处理器包括核心芯片 TMS320F28335、产生激励信号的 DA 模块、采集 MBN 信号的 AD 模块、USB 存储模块和多种通信接口；由于 DSP 产生的激励信号驱动能力较弱，针对该问题设计了功率放大模块，将激励信号进行电压电流的综合放大，来达到传感器对试件的磁化要求；测量中试件产生的 MBN 信号较弱，仅为毫伏级，同时还混杂着激励信号产生的干扰，因此设计了信号调理电路，具体由第一级放大电路，高通滤波电路，主放大电路组成，

在放大 MBN 信号的同时滤除低频的干扰信号; 随后 DSP 的 AD 模块对信号进行采样、软件滤波、特征值计算等处理, 最后通过串行通信接口 (SCI) 将信号的特征信息传输到 LCD 屏幕, 进行 MBN 信号和特征值的显示, 同时 LCD 屏幕具有触摸屏功能, 可手动设置激励信号的幅值和频率, 便于对不同的测量对象进行 MBN 信号测量。

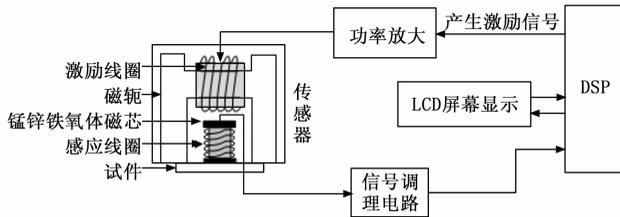


图 14 MBN 信号检测仪器组成

4 实验结果与分析

4.1 特征参数值提取

在研究 RPV 钢辐照脆化程度与 MBN 信号之间的关系时, 常常用 MBN 信号的特征参数值来进行表征。例如: 峰峰值 (V_{PP})、均方根值 (R_{MS})、半高宽 (W_C)、包络面积等。本实验以 V_{PP} 和 R_{MS} 为例来进行研究。

研究表明, 不同材料硬度、晶粒度等力学性能指标的不同会导致 MBN 信号包络的幅值和频带不同, 用峰峰值反映信号包络的幅值信息。峰峰值是指信号最大正值与最大负值的差值, 即信号包络波峰与波谷的绝对值, 表征信号包络高度的变化, 计算公式如下:

$$V_{PP} = |V_{max} - V_{min}| \quad (9)$$

均方根值是研究交变信号通用的结果表征值, 可以表示铁磁性材料在交变磁场下的能量信息, 同时均方根值对 MBN 信号分析具有很好的数值稳定性。计算公式如下:

$$R_{MS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (10)$$

式中, v_i 为每个采样点对应的采样值; i 为单个采样点点数; n 为采样总数。

4.2 试验测量

以未服役的 RPV 钢试样为试验对象进行 MBN 信号测量试验, 激励信号初始频率设置为 5 Hz, 激励信号幅值为 2~11 V。对 MBN 信号的峰峰值和均方根值进行提取, 两个特征参数随激励信号幅值的变化曲线如图 15 所示。

4.3 结果分析

从图中可以看出: 随着激励信号幅值的增大, MBN 信

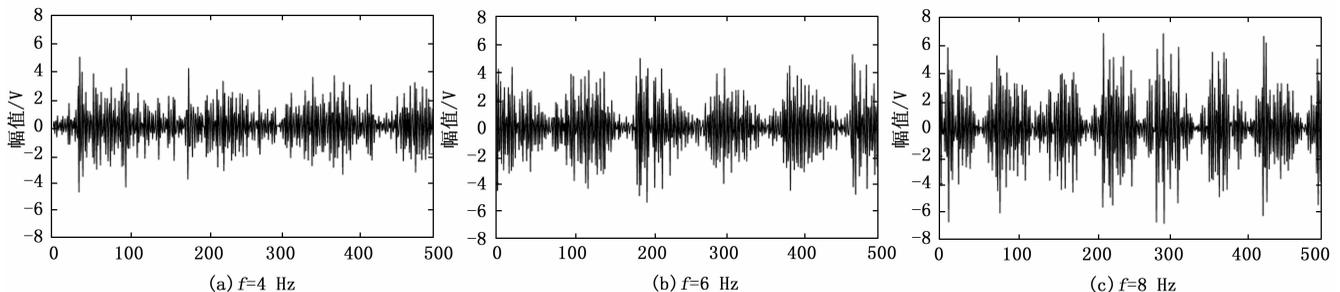


图 16 不同激励信号频率下的 MBN 信号

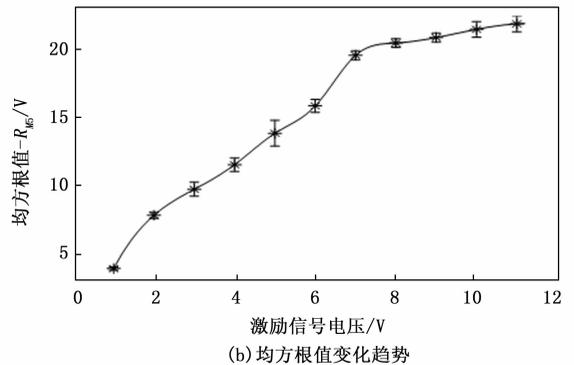
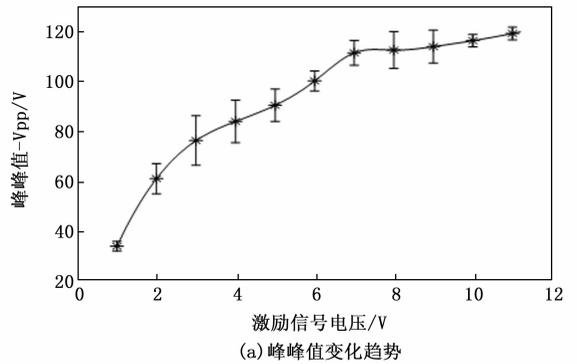


图 15 MBN 信号特征参数值随激励电压变化趋势

号的峰峰值和均方根值均变化明显; 幅值增大到 7 V 后, 两特征参数值随激励信号幅值增大的趋势减缓。结合磁化过程进行分析, 保持频率不变, 增大幅值, 在单位时间内导致更多的 180° 的磁畴壁移动, 巴克豪森跳跃发生的密度增大, MBN 信号的强度也逐渐增加, 当外加励磁磁场增大到一定程度后, 单位时间内 180° 畴壁移动达到极限值, MBN 信号强度基本不变^[29]。

激励信号电压幅值太低, 磁化效果微弱, 产生的 MBN 信号较弱, 不宜观察; 幅值太大, 两个特征参数不能等比例地增大, 同时还会导致线圈发热严重, 对测试结果造成影响; 所以结合试验结果, 激励信号的幅值应设置在 7 V。

将激励信号的幅值设置为 7 V 不变, 依次改变频率为 2~9 Hz, 经过滤波处理后对比发现频率为 6 Hz 时 MBN 信号的波形重复性和稳定性特征最好, 如果激励信号的频率过高, 容易导致试样震荡引进误差; 如果频率过小, 会导致试件产生的 MBN 信号比较微弱。所以最终确定激励信号的频率为 6 Hz。图 16 为激励信号频率分别为 4、6、8 Hz

时的 MBN 信号波形。

5 结束语

为了对 RPV 钢的辐照损伤程度进行检测同时提高 MBN 信号检测仪器的稳定性, 根据 MBN 信号的产生原理, 设计了 MBN 信号检测传感器, 并结合有限元仿真和试验进行了分析, 得出以下结论:

1) 通过对 H 型励磁模块进行理论计算和有限元仿真, 分析了磁感应强度和磁力线在试件内部的分布, 得出了试件的有效磁化区域, 可以满足试件的磁化需求。

2) 通过对试件上方 0.2 mm 处的磁感应强度分布进行分析, 得出 MBN 信号接收器应该放置在磁轭两脚的中间位置, 此时受到激励信号的影响最小。

3) 通过对未服役的 RPV 钢试件进行测量, 得出最佳测量激励信号的幅值为 7 V, 频率为 6 Hz, 此时仪器具有较好的稳定性和重复性, 为 RPV 钢辐照脆化程度检测奠定了基础。

参考文献:

[1] 张国宝. 我国能源结构调整要下大决心 [J]. 中国核工业, 2013 (11): 10-13.

[2] 上官斌, 李承亮. 反应堆压力容器辐照监督无损评估技术研究 [J]. 核动力工程, 2019, 40 (6): 59-63.

[3] 李承亮, 李远飞, 莫华均, 等. 辐照损伤对反应堆压力容器钢微观组织结构的影响 [J]. 核动力工程, 2017, 38 (s1): 54-57.

[4] 饶德林, 莫家豪, 高建波, 等. 反应堆压力容器钢韧性评价及韧脆转变机理的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2021, 45 (7): 7-11.

[5] 王荣山, 徐超亮, 刘向兵, 等. 反应堆压力容器钢辐照脆化的影响因素分析 [J]. 中国冶金, 2014, 24 (7): 1-5, 26.

[6] PARK D G, OK C I, JEONG H T, et al. Nondestructive evaluation of irradiation effects in RPV steel using Barkhausen noise and magnetoacoustic emission signals [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001, 196 (45): 382-384.

[7] DEBARBERIS L, KRYUKOV A, ERAK D, et al. Advanced method for WWER RPV embrittlement assessment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2004, 81 (28): 695-701.

[8] 张天慈, 王海涛, 李正操, 等. 国产 RPV 钢铁离子辐照脆化行为的正电子湮灭研究 [J]. 金属学报, 2018, 54 (4): 512-518.

[9] 张天慈. 高温气冷堆压力容器材料辐照与热处理特性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2018.

[10] MASAKI S, TAKESHI T, KENTA Y, et al. Contribution of irradiation-induced defects to hardening of a low-copper reactor pressure vessel steel [J]. Acta Materialia, 2018, 155: 402-409.

[11] 石见见, 邹群, 金旻, 等. 高注量辐照 RPV 钢的热处理微观结构及其对再辐照损伤行为的影响研究 [J]. 核科学与工程, 2021, 41 (5): 1060-1066.

[12] 丁兆楠, 张宪龙, 陈宇光, 等. 高能重离子辐照下国产 RPV 钢 A508-3 的硬化行为 [J]. 装备环境工程, 2022, 19 (1): 39-44.

[13] 王荣山, 徐超亮, 黄平, 等. 反应堆压力容器钢辐照脆化脆化的中子注量率效应 [J]. 科技导报, 2014, 32 (31): 80-84.

[14] 王荣耀, 王海涛, 刘向兵, 等. 基于 MBN 的便携式 RPV 钢辐照脆化检测系统设计 [J]. 无损检测, 2019, 41 (12): 12-16.

[15] KARJALAINEN L P, MOILANEN M. Detection of plastic deformation during fatigue of mild steel by the measurement of Barkhausen noise [J]. Ndt International, 1979, 12 (2): 51-55.

[16] 王荣山, 任爱, 钱王洁, 等. 巴克豪森噪声在电站用铁磁材料疲劳寿命评估领域的研究现状 [J]. 压力容器, 2012, 29 (12): 52-56, 31.

[17] ALESSANDRO B, BEATRICE C, BERTOTTI G, et al. Domain-wall dynamics and Barkhausen effect in metallic ferromagnetic materials. I. Theory [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68 (6): 2901-2907.

[18] PEREZ-BENITEZ J A, CAPO-SANCHEZ J, ANGLADA-RIVERA J, et al. A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 288: 433-442.

[19] KIM H C, HWANG D G, CHOI B K. Barkhausen noise in 5% Mo-78.5% Ni permalloy with rolling texture [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21 (1): 168.

[20] KIM H C, HWANG D G, KIM C G. Evaluation of residual stress and texture in ferromagnetic crystalline material by Barkhausen noise measurements [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 1992, 8 (1-6): 575-590.

[21] HUNT F Y, MCMICHAEL R D. Analytical expressions for Barkhausen jump size distributions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30 (6): 4356-4358.

[22] 李包青, 郑宾, 郭华玲. 磁巴克豪森噪声信号检测传感器的设计 [J]. 科技和产业, 2021, 21 (4): 278-283.

[23] 王嘉星, 王海涛, 刘向兵, 等. 基于数字信号处理的核反应堆压力容器钢辐照脆化的巴克豪森噪声检测仪 [J]. 无损检测, 2020, 42 (7): 72-76.

[24] 王文涛. 基于巴克豪森效应的无损检测关键技术研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.

[25] 朱寿高. 基于巴克豪森噪声应力检测系统的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[26] 华斌, 李平, 文玉梅, 等. 基于巴克豪森效应的钢板内部缺陷检测方法 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (1): 50-53.

[27] 郭贻斌. 铁磁学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.

[28] 王嘉星. 基于巴克豪森噪声技术的 RPV 钢辐照脆化检测仪器设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.

[29] 李包青. 基于磁巴克豪森噪声的应力检测系统关键技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021.