

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104984

基于金刚石氮-空位色心的裂纹无损检测*

赵 龙¹ 王 鑫¹ 罗大程² 赵博文² 张少春³(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院 合肥 230601; 2. 安徽省国盛量子科技有限公司 合肥 230088;
3. 中国科学技术大学 合肥 230026)

摘 要: 磁场测量在材料科学、电子工程、电力系统甚至工业领域中扮演着极其重要的作用,尤其是磁场测量为工业无损检测提供了安全又可靠的工具,而磁场测量的灵敏度决定了检测的最高水平。金刚石氮-空位(NV)色心是最近几年发展的一种新型的量子传感器,外界磁场存在会导致金刚石 NV 色心的基态能级发生塞曼劈裂,通过光学探测磁共振技术(ODMR),利用微波源和锁相放大器探测 NV 色心的共振频率,最后由共振频率的变化可以精准地计算出外界磁场的大小和外界磁场变化的灵敏度。实验中将含有高浓度 NV 色心的金刚石与光纤进行耦合实现磁场扫描式探针的制备,之后对磁化后的铁板焊缝表面裂纹进行扫描,并将扫描的结果绘制成二维磁力分布图,根据磁力分布图的磁场梯度变化可以非常准确地判断出裂纹的位置和大小,为工业安全提供了非常有效的诊断工具。

关键词: 金刚石氮-空位色心;铁板焊缝;磁化;光纤传感器;扫描

中图分类号: TN98;O441.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.1550; 140.5065

Non-destructive testing for weld seam based on nitrogen-vacancy color center in the diamond

Zhao Long¹ Wang Xin¹ Luo Dacheng² Zhao Bowen² Zhang Shaochun³

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China; 2. China Prosp & Quantumtech Co., Ltd., Hefei 230088, China; 3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Magnetic field measurement plays an extremely important role in material science, electronic engineering, power system and even industrial fields. In particular, magnetic field measurement provides a safe and reliable tool for industrial non-destructive testing. The sensitivity of magnetic field measurement determines the highest level of detection. The diamond nitrogen-vacancy (NV) color center is a new type of quantum sensor developed in recent years. The external magnetic field will cause Zeeman splitting of the ground state energy level of the diamond NV color center. Optical detection magnetic resonance (ODMR), using a microwave source and a lock-in amplifier to detect the resonant frequency of the NV color center, and finally the change of the resonant frequency can accurately calculate the size of the external magnetic field and the sensitivity of the external magnetic field change. In the experiment, a diamond containing a high concentration of NV color centers is coupled with an optical fiber to realize the preparation of a magnetic field scanning probe. Then, the surface cracks of the magnetized iron plate weld are scanned, and the scanning results are drawn into a two-dimensional magnetic force distribution map, according to the magnetic field gradient change of the magnetic force distribution map, the position and size of the crack can be judged accurately, which provides a very effective diagnostic tool for industrial safety.

Keywords: diamond nitrogen-vacancy color center; iron weld; magnetization; optical fiber sensor; scanning

0 引言

无损检测是在不损伤检测物的情况下检测其物理性能、状态和内部结构是否存在裂纹、交杂等缺陷的新兴学科。在工业生产中,焊接结构中出现的裂纹不仅会给生活带来各种不便,更为严重的会造成毁灭性的灾难。据统计世界上绝大多数工业事故是由机械构件的焊接裂纹引起的,其余极少的一部分是由设计不合理、材料问题造成的。因此在设备设计、实验、生产制造、检验验收、运行使用的各个阶段,无损检测对控制和改进其质量,保证材料、零件和产品的可靠性及提高生产率等方面起着关键性作用,是检验产品的质量、保证产品安全、延长产品寿命必要的可靠技术手段^[1-4]。

在工业制造领域,机械构件往往需要采用焊接的方式结合成完整的机械装置,焊接的密封性决定了机械装置的质量、使用寿命甚至安全性能,而焊缝裂纹无损检测技术能够为装置的出厂检验以及后期维护和安全预警提供强有力的手段。传统的焊缝检测手段有超声探伤、射线探伤、磁粉探伤或者渗透探伤等,在不损坏被检查焊缝性能和完整性的情况下,对焊缝质量是否符合规定要求和设计意图所进行的检验,这些技术广泛应用于压力管道、锅炉、船舶、航空航天甚至各种起重设备。以上技术具有其各自的优点,比如说超声探测手段,可以探测出微小的裂缝大小,灵敏度高并且速度快,但是探伤技术难度大,对缺陷的显示不太直观;再比如磁粉探伤,其最大的优点是成本低,技术简单,但是缺点也很明显,灵敏度不高,而且探测结果很容易受到主观因素影响。因此,一种灵敏度高并且技术简单的探伤方法对于工业检测领域是极其重要的,它不仅可以提升工业制造的效率,还能大大提升工业安全性,对于我国工业制造现代化具有重要意义。

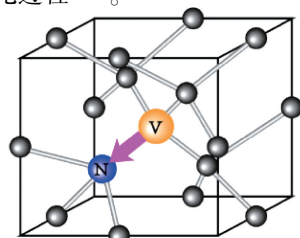
经过磁化后的钢板,有裂纹的焊缝位置将会出现漏磁,因此磁场成为了无损探伤技术中的重要检测对象。现阶段,随着量子信息技术的不断发展,科学家目前已经发现了包括超导干涉仪、中性冷原子、固态自旋等多种量子测量体系,这些量子体系可以实现极高的磁场测量灵敏度,而将量子精密测量应用于无损检测领域成了新的趋势。在众多量子体系中,氮-空位色心的量子测量体系因易操控、响应极快、高灵敏度(灵敏度可以达到 100 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$)和高空间分辨率(空间分辨率可以达到 10 μm)备受科研工作者青睐。本文主要将氮-空位色心(以下称 NV 色心)量子精密磁场测量技术应用于传统的无损检测领域,提供新的检测方法。

1 测量原理

1.1 基于氮-空位色心量子测量原理

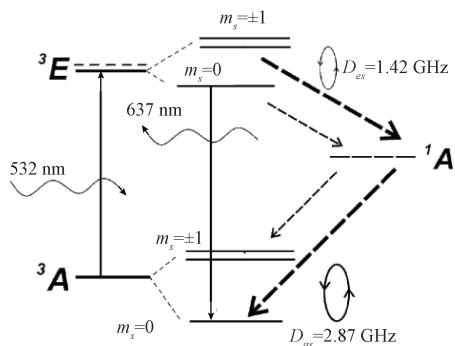
先对金刚石 NV 色心的物理性质以及基于此的量子精密测量原理作简单介绍。

如图 1(a)所示,NV 色心是金刚石晶体中的一个碳原子缺失形成的空穴导致周围的一个碳原子被氮原子取代,行成稳定的 N-V 结构。由于金刚石具有对称的正四面体晶体结构,因此 NV 色心具有 C_{3v} 对称性,NV 色心具有 4 个轴向^[5-6]。NV 色心根据携带电子数不同可以分为 NV^0 和 NV^- ,一般地,科研界选择 NV^- 作为研究对象,而且下文用 NV 色心代指 NV^- 。在外加磁场为 0 的情况下,其基态能级会发生零场劈裂分为 $m_s = 0$ 和 $m_s = \pm 1$,零场劈裂大小 $D = 2.87 \text{ GHz}$ 。当用波长 532 nm 的激光对 NV 色心进行照射时,如果 NV 色心处于 $m_s = 0$ 会跃迁激发至激发态 $m_s = 0$,一段时间后又会回到基态 $m_s = 0$,并且释放红色的光子;如果 NV 色心处于 $m_s = \pm 1$ 会跃迁激发至激发态 $m_s = \pm 1$,部分 NV 色心会先回到亚稳态 1A ,然后再跃迁回到基态 $m_s = 0$,这个过程会释放少量的红色光子,因此当 NV 色心处于不同的量子态时,用 532 nm 的激光对 NV 色心进行照射会收集到强弱变化鲜明的红色荧光。当用 532 nm 的激光对 NV 色心进行 30 min 照射,可以使 80%~90% NV 色心跃迁回基态 $m_s = 0$,这是 NV 色心的极化过程^[7-8]。



(a) 金刚石 NV 色心的晶格结构

(a) The lattice structure of the diamond NV color center



(b) 金刚石 NV 的能级结构

(b) Energy level structure of diamond NV

图 1 金刚石 NV 色心的介绍

Fig. 1 Introduction of NV centers in the diamond

金刚石 NV 色心在基态的哈密顿量可以由如下公式表示^[9-13]:

$$H_S = DS^2 + g_s \mu_B \vec{S} \cdot \vec{B} \quad (1)$$

其中, $D=2.87$ GHz, g_s 为电子自旋 g 因子, 一般约为 2.003, μ_B 为 Bohr 磁矩, 在外加磁场情况下, NV 色心电子自旋的哈密顿量可以表示为:

$$H =$$

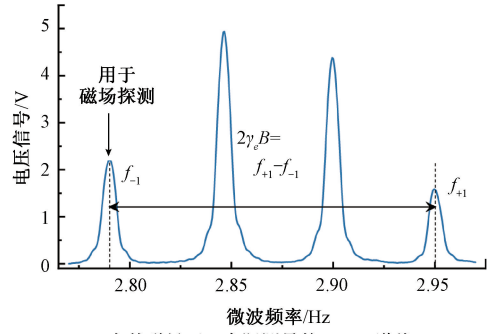
$$\begin{bmatrix} D + g_s \mu_B B_z & \frac{g_s \mu_B}{\sqrt{2}} (B_x - iB_y) & 0 \\ \frac{g_s \mu_B}{\sqrt{2}} (B_x + iB_y) & 0 & \frac{g_s \mu_B}{\sqrt{2}} (B_x - iB_y) \\ 0 & \frac{g_s \mu_B}{\sqrt{2}} (B_x + iB_y) & D - g_s \mu_B B_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, z 方向为图 1(a) 金刚石晶格中 N-V 方向, 求解以上方程能量的本征值, 可得:

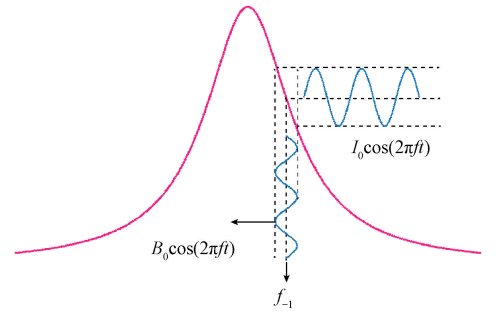
$$E = \begin{bmatrix} g_s \mu_B B_z + \frac{g_s \mu_B B_{\perp}^2}{2D} \\ -g_s \mu_B \frac{B_{\perp}^2}{D} \\ -g_s \mu_B B_z + \frac{g_s \mu_B B_{\perp}^2}{2D} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由上述结果可知, NV 色心基态的共振频率 ν_1 和 ν_2 分别为 $D + g_s \mu_B B_z + \frac{3g_s \mu_B B_{\perp}^2}{2D}$ 和 $D - g_s \mu_B B_z + \frac{g_s \mu_B B_{\perp}^2}{2D}$ 。当外部磁场为 0 时 $m_s = +1$ 和 $m_s = -1$ 简并, 当外加磁场时, 且忽略掉垂直于 NV 轴向上的磁场影响, 这两个能级会由于塞曼劈裂而分开, 并且在一定范围内, 塞曼劈裂的大小与磁场大小成正比 ($\Delta\nu = 2g_s \mu_B B_z$)。基于以上理论, 可以利用光学探测磁共振 (ODMR) 手段测出 NV 色心基态能级共振频率的大小^[7-9], 继而计算出磁场大小。

通过式(3)可知, 相同大小的磁场与 NV 色心轴向(z 方向)的夹角不一样, 会导致基态能级共振频率不一样。而对于系综 NV 色心金刚石样品而言(4 种轴向的 NV 色心均匀分布), 当磁场方向与其中一个轴向平行的时候, 得到的谱线中只会出现 4 个主峰, 因为磁场与 NV 轴向夹角只有两种。如图 2(a) 所示, 其中磁场的大小可以依据式(3), 通过两侧的峰对应的共振频率 f_{-1} 和 f_{+1} 计算得到。然而在实际的磁场测量的时候, 为了提高磁场的探测效率, 一般是将微波的频率锁定在 ODMR 谱线中斜率最大的位置, 如图 2(b) 所示, 此时系统才会对外界磁场变化做出最大的响应, 最后反映在荧光的变化上。采用这种方法可以实现磁场的实时性测量。



(a) 在外磁场下, 实际测量的 ODMR 谱线
(a) Measured ODMR spectrum under an external magnetic field



(b) 将微波频率固定在 ODMR 中斜率最大的位置, 此时外界磁场的变化直接引起荧光信号的变化
(b) Fix the microwave frequency at the position with the largest slope in the ODMR. At this time, the change of the external magnetic field directly causes the change of the fluorescence signal

图 2 基于金刚石 NV 色心的磁场测量原理

Fig. 2 Magnetic field measurement principle based on diamond NV color center

1.2 漏磁检测原理

如图 3 所示, 缺陷磁泄露产生的机理主要为: 缺陷磁折射、缺陷磁扩散、缺陷磁压缩。如果铁磁性物体表面出现缺陷(划痕、裂缝等), 铁磁体与空气相接触, 由于磁的边界条件, 磁感线会发生磁折射, 铁磁性物体内部的磁场会折射出物体的表面, 并且迅速形成磁扩散。但是由于在空间中存在错杂复杂的空间磁场, 扩散的磁感线在空间磁场的压力下, 向内挤压, 最终导致分散的磁场发生反向磁压缩。最终的缺陷漏磁场 B_{mfl} 可以表示为:

$$B_{mfl} = B_r + B_d - B_c \quad (4)$$

其中, B_r 为缺陷磁折射的磁感应线强度, B_d 为缺陷磁扩散的磁感应线强度, B_c 为缺陷磁压缩的磁感应线强度。

由于金刚石中的晶格缺陷可以做到纳米量级, 这样使得其磁场获得及其高的空间分辨率。工业界中的铁板焊缝往往是很难通过肉眼去判断, 这样难免会带来很多的安全隐患, 通过将铁板进行磁化, 焊缝处会发生很明显的漏磁现象, 利用 NV 色心磁测量的高灵敏度、高空间分辨率的特性, 可以准确定位出漏磁, 并及时进行安全

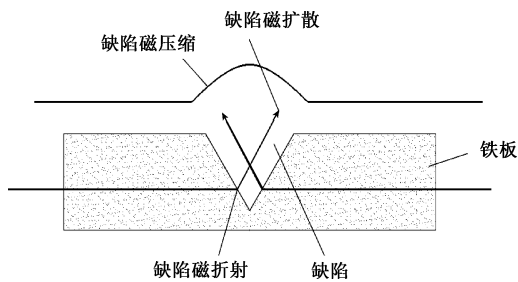


图3 缺陷漏磁过程

Fig. 3 Defect flux leakage process

预警。

2 仪器和方法

2.1 基于氮-空位色心量子测量系统

基于 NV 色心量子测量体系的光路系统包括 532 nm 激光器,一对共轭的凸透镜,光纤耦合器,双色片,金刚石 NV 色心,滤波片,光电探测器组成。

首先,NV 色心量子测量体系的光路系统如图 4 所示,实验中使用自制的光纤系统来激发和检测 NV 色心,而 NV 色心的激发和荧光的收集都是通过同一根多模光纤实现,其中多模光纤的数值孔径为 0.37,纤芯的直径为 200 μm 。金刚石作为核心的传感器,它是经过化学气相沉积(CVD)方法制备而成,并且在生长的过程之中,氮气作为气体掺杂源,这样会在金刚石中产生大量的 NV 色心。最后将金刚石进行切割打磨成 $200 \times 200 \times 100 \mu\text{m}^3$ 的尺寸。激光器产生波长 532 nm 的绿色激光,由光纤耦合器耦合进光纤中,然后通过双色片传输至金刚石 NV 色心探头处。收集光路包括滤波片和光电探测,金刚石 NV 色心在 532 nm 的激光作用下会激发出红色荧光。激发的红色荧光经过滤波片滤除其他波长的杂散光后被光电探测器收集。

基于 NV 色心量子测量体系的微波系统由微波源,微波开关,微波放大器和微波环形器构成。微波源的性能是自旋共振信号的检测基础,其稳定性直接决定了自旋信号的信噪比^[14]。微波开关的作用是控制微波信号的通断。微波环形器的作用是仅允许微波信号的单向传输,防止反向传输的微波信号烧坏微波放大器。系统中微波源产生的微波信号经过微波开关,微波放大器和微波环形器,由微波天线作用于金刚石 NV 色心,最终实现对 NV 色心电子自旋的操控。

计算机的主要作用是控制微波源和锁相放大器,并且收集、处理锁相放大器的输出信号。实验中,通过编写的软件来控制微波源和锁相放大器,主要设定微波源扫频信号的扫频点数、扫频范围等参数,以及设定锁相放大

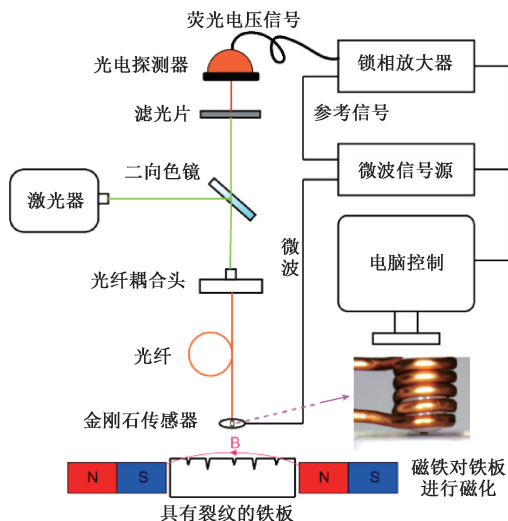


图4 基于光纤-金刚石耦合式传感器光路系统、电子学系统以及扫描探测系统

Fig. 4 Optical fiber-diamond coupling sensor optical system, electronics system and scanning detection system

器的参考模式和性能参数。本方案中,采用外部参考模式。微波源会产生调幅和调频信号,将微波源输出的调制信号作为锁相放大器的参考信号;光路系统中,光电探测器的信号作为锁相放大器的输入信号。锁相放大器的输出信号被计算机中的信号采集卡收集处理,最终计算出所测磁场大小。

2.2 基于氮-空位色心漏磁检测方法

系综金刚石 NV 色心具有四轴对称性,因此在外加磁场下,ODMR 荧光光谱最多会呈现 8 个峰。但是一些情况下,其中的若干个峰会交叉在一起,这就需要外加角度合适的偏置磁场,将其中某个轴向的 NV 色心荧光光谱分离出来^[15-16]。理论上来说,当外加偏置磁场的方向与 NV 色心某个轴向平行时,NV 色心 ODMR 荧光光谱会出现 4 个峰,并且中间的两个峰对比度较大,如图 2(a)所示。采用三维调整架和亥姆霍兹线圈(或者永磁铁),确保 NV 色心在亥姆霍兹线圈的中心,每改变亥姆霍兹线圈的方向扫描一次 ODMR 荧光光谱,直到光谱中出现如图 2(a)所示的 4 个峰,此时完成 NV 色心偏置磁场的施加。如果要想测量铁板焊缝的裂纹,首先要对铁板进行磁化。实验中,采用两块钕铁硼永磁铁对平板焊缝进行磁化。分别在铁板两侧吸附上磁性相吸的磁铁,使得磁场形成完整的磁回路,如图 4 所示,此时完成平板的磁化。

实验中,可以采用光纤-金刚石探头实现对一块区域的铁板进行扫描,而光纤-金刚石探头的研制主要是将 NV 色心用紫外固化胶粘在光纤末梢,陶瓷插芯外部缠绕铜丝作为微波的辐射天线;紧接着调节偏置磁场,使其平

行于某个 NV 色心的轴向;最后将微波频率设定在 ODMR 峰中斜率最大的位置^[17-19],如图 2(b)所示,待测平板放在二维可编程步进电机上,使用软件编程控制步进电机从而移动磁化的铁板,记录每一个点的锁相放大器输出值,将所有的输出值绘制成一张二维图,实现平面磁场可视化表示。

3 结果和讨论

3.1 NV 色心测量体系的测量结果

图 5(a)为实验中选取的含有焊缝的铁板,对此分别做了两组实验,首先寻找铁板中没有任何焊缝的平整区域进行扫描探测,如图 5(b)所示,可以看出来,几乎不呈现出任何裂纹探测结果,不过它整体上还是出现了磁场变化梯度,其主要原因是铁板表面会由于两边施加的永

磁体,会产生特定方向的磁场,但是在范围较小的区域内,可以假定这个磁场是恒定的,不会对裂纹探测结果造成影响。

然后为了区分铁板表面的划痕和裂纹的区别,在平板表面划一个“x 型”口子,和以上方法一样对该区域进行磁场扫描,扫描结果如图 5(c)所示,由前面的漏磁检测原理可知,当在光滑的平板表面划一个“x 型”口子,平板表面会出现 x 形状的漏磁。但是由于划的口子比较浅,所以,磁场变化的幅度较小,对应的测试反应是测试结果的信号变化范围较小。最后在铁板上寻找有焊接缝隙的位置,如图 5(d)~(e)所示,然后利用之前的方法,同样地探测其表面的磁场分布,实验中选取了不同区域,分别是焊缝有一条(图 5(e))和焊缝有多条(图 5(d))的区域,然后利用光纤-金刚石磁力传感器实现对其表面地磁场探测。

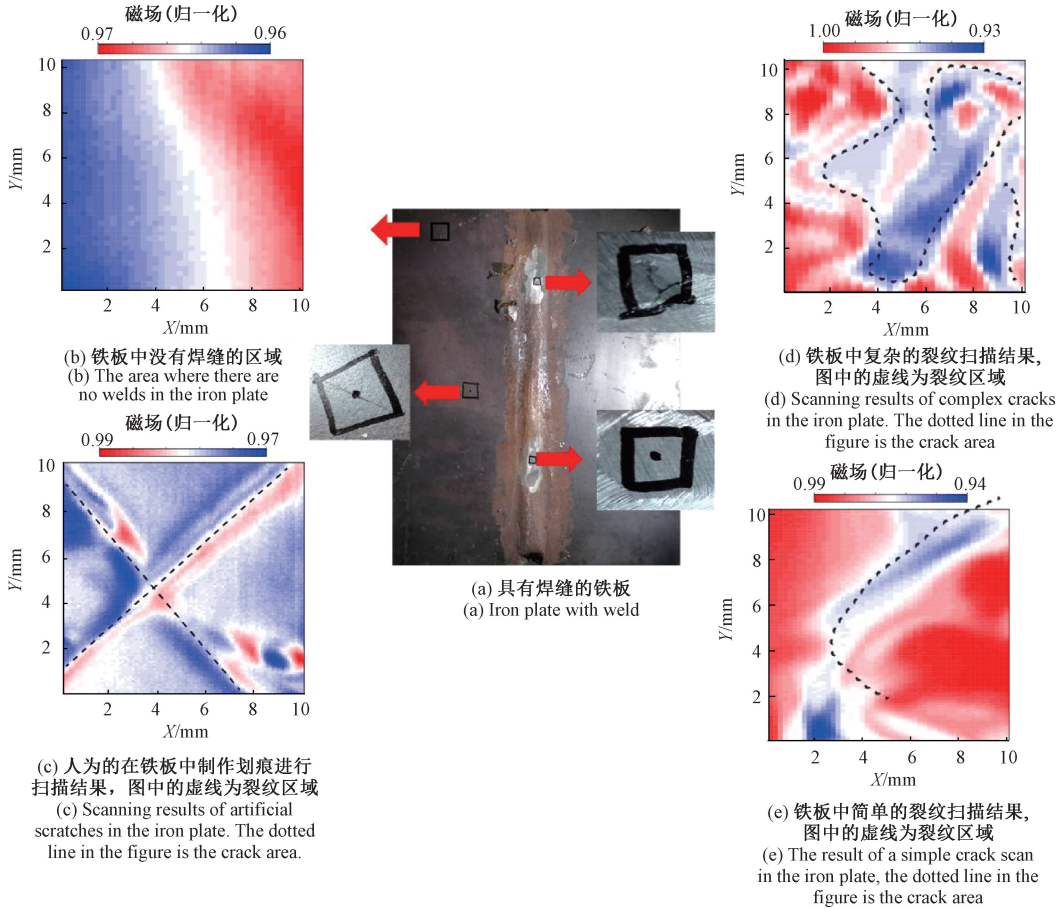


图 5 铁板焊缝漏磁测量结果

Fig. 5 Magnetic flux leakage measurement results of iron plate welds

以上的所有测量过程中,将 NV 色心的磁力探测器紧贴铁板表面(两者距离为 200~400 μm),期间探头和铁板不接触,实现这表面的磁场分布进行扫描。结果表明,当焊缝存在裂缝时,周围的磁场分布较复杂,测

试的结果数值变化较大,此时算是工业检测中的缺陷;当平板表面平整时或者存在划痕时,平板表面的磁场变化较小,测试结果数值变化范围较小,此时不是工业检测的缺陷。

3.2 传统磁粉试片的测量结果

为了验证光纤-金刚石磁力计进行漏磁检测的高灵敏性,将磁粉检测的标准试片至于平整的铁板中,然后在铁板的两端施加两块永磁体用于将铁板磁化,而紧贴与铁板上的标准试片也会达到被磁化的效果。实验中选择凹槽最小的试片,同样地,将光纤-金刚石探头移至试片上方 $50\text{ }\mu\text{m}$ 处,通过移动试片扫描出其表面的磁场,结果显示如图 6 所示。图 6 是用于磁粉检测的标准试片照片,其中凹槽的参数为:深 $7\text{ }\mu\text{m}$,宽 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。可以很明显地看出来磁场的分布与试片中的凹槽形状几乎完全一致,说明探头不仅可以测量出缺陷产生的漏磁,也能够判断缺陷的位置,更加证明了基于金刚石 NV 色心光纤磁力传感器在漏磁检测应用上的适用性和高灵敏性。

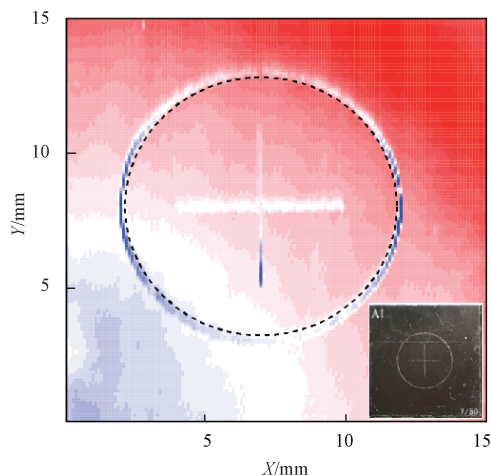


图 6 利用光纤-金刚石探头对试片表面进行磁场扫描结果

Fig. 6 The result of magnetic field scanning on the surface of the test piece using an optical fiber-diamond probe

4 结 论

NV 色心量子测磁体系可以实现区域内磁场梯度的扫描,同时,铁板焊缝表面若存在缺陷会存在会使得磁场发生变化,因此基于 NV 色心量子测磁体系可以实现工业上铁板焊缝的无损检测。采用 NV 色心进行漏磁检测具有诸多优点。首先是基于 NV 色心的量子传感体系灵敏度极高(实验中的灵敏度可以达到 $100\text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$),即对微弱的磁场变化有较高的响应,基于此,可以对一定区域的磁场进行检测。其次采用二维步进电机技术可以实现二维磁场的可视化表示。同理,未来采用三维步进电机可以实现对空间磁场的扫描。最后金刚石 NV 色心探头的尺寸为微米级别,因此理论上来说传感探头的空间

分辨率可以达到 $10\text{ }\mu\text{m}$,可以实现高空间分辨率的探测^[20-21]。

然而,目前阶段基于 NV 色心的量子传感体系对扫描区域的大小和平整度要求相对苛刻,当平板焊缝表面不平行时,其他诸多因素也会导致 NV 色心探头附近的磁场变化,因此测量的结果不准确。未来可以根据铁板焊缝表面高度的变化来设定 NV 色心探头的移动轨迹来解决这一问题。相信随着工业技术的发展,基于 NV 色心量子测磁体系可以研制许多智能化无损检测仪器和设备,并应用于多种工业测量环境。

参考文献

- [1] 吴胤,王汉武. 对建设工程钢结构焊缝第三方超声检测比例的理解[J]. 中国建筑金属结构, 2021(7): 56-57, 73.
WU Y, WANG H W. Understanding of the proportion of third-party ultrasonic testing of steel structure welds in construction projects [J]. China Building Metal Structure, 2021(7): 56-57, 73.
- [2] 张明,田涛. 无损检测技术在钢结构厂房检测中的应用[J]. 机电工程技术, 2021, 50(7): 256-258.
ZHANG M, TIAN T. Application of non-destructive testing technology in steel structure workshop testing [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2021, 50(7): 256-258.
- [3] 叶光,霍晓彤,朱杨可. 漏磁内检测信号中环焊缝异常分析[J]. 化学工程与装备, 2021(7): 184-186.
YE G, HUO X T, ZHU Y K. Anomaly analysis of girth weld in magnetic flux leakage internal detection signal[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2021(7): 184-186.
- [4] 常嘉玮. 建筑钢结构工程及焊缝无损检测技术应用[J]. 智能城市, 2021, 7(10): 37-38.
CHANG J W. Application of building steel structure engineering and welding seam nondestructive testing technology [J]. Smart City, 2021, 7(10): 37-38.
- [5] 赵博文. 金刚石 NV 色心的制备以及在量子测量领域的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
ZHAO B W. Preparation of diamond NV color center and its application in the field of quantum measurement[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [6] 董杨,杜博,张少春,等. 基于金刚石体系中氮-空位色心的固态量子传感[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 8-26.
DONG Y, DU B, ZHANG SH CH, et al. Solid-state quantum sensing based on nitrogen-vacancy color centers in diamond system [J]. Acta Physica Sinica, 2018,

- 67(16):8-26.
- [7] 张智超,沈常宇,朱周洪,等.漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究[J].仪器仪表学报,2021,42(4):150-159.
ZHANG ZH CH, SHEN CH Y, ZHU ZH H, et al. Flaw detection of non-ferromagnetic metal materials based on flux leakage combined with eddy current[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 150-159.
- [8] 唐莺,潘孟春,罗飞路,等.基于三维场测量的脉冲漏磁检测技术[J].仪器仪表学报,2011,32(10):2297-2302.
TANG Y, PAN M CH, LUO F L, et al. Pulse magnetic flux leakage detection technology based on three-dimensional field measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2297-2302.
- [9] 汪友生,徐小平,沈兰荪.铁磁材料的漏磁检测[J].电子测量与仪器学报,2000(3):45-48,59.
WANG Y SH, XU X P, SHEN L S. Magnetic flux leakage detection of ferromagnetic materials[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2000(3): 45-48,59.
- [10] 钱正春,黄海鸿,姜石林,等.铁磁性材料拉/压疲劳磁记忆信号研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):506-517.
QIAN ZH CH, HUANG H H, JIANG SH L, et al. Research on magnetic memory signal of ferromagnetic material tensile/compression fatigue[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 506-517.
- [11] 黄志洵.量子噪声理论若干问题[J].电子测量与仪器学报,1987(3):1-10.
HUANG ZH X. Some problems of quantum noise theory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1987(3): 1-10.
- [12] JENSEN K, ACOSTA V M, JARMOLA A, et al. Light narrowing of magnetic resonances in ensembles of nitrogen-vacancy centers in diamond[J]. Physical Review B, 2013, 87(1):014115.
- [13] DREAU A, LESIK M, RONDIN L, et al. Avoiding power broadening in optically detected magnetic resonance of single NV defects for enhanced dc magnetic field sensitivity[J]. Physical Review B, 2011, 84(19):195204.
- [14] WOLF T, NEUMANN P, NAKAMURA K, et al. Subpicotesla diamond magnetometry[J]. Physical Review X, 2015, 5(4):041001.
- [15] BARRY J F, TURNER M J, SCHLOSS J M, et al. Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(49):14133-14138.
- [16] BARRY J F, SCHLOSS J M, BAUCH E, et al. Sensitivity optimization for NV-diamond magnetometry[J]. Reviews of Modern Physics, 2020, 92(1):015004.
- [17] AHMADI S, EL-ELLA H A R, HANSEN J O B, et al. Pump-enhanced continuous-wave magnetometry using nitrogen-vacancy ensembles[J]. Physical Review Applied, 2017, 8(3):034001.
- [18] DEGAN C L, REINHARD F, CAPPELLARO P. Quantum sensing[J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89(3):035002.
- [19] FESCEKOV I, JARMOLA A, SAVUKOV I, et al. Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators[J]. Physical Review Research, 2020, 2(2):023394.
- [20] ZHANG SH CH, LI S, DU B, et al. Thermal-demagnetization-enhanced hybrid fiber-based thermometer coupled with nitrogen-vacancy centers[J]. Optical Materials Express, 2019, 9(12):4634-4643.
- [21] ZHANG SH CH, DONG Y, DU B, et al. A robust fiber-based quantum thermometer coupled with nitrogen-vacancy centers[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(4):044904.

作者简介



赵龙,博士,毕业于中国科学技术大学,现担任国网安徽省电力有限公司电力科学研究院组织部副主任,高级工程师,主要研究方向为电力通信与传感技术。

E-mail: longzhao@ustc.edu.cn

Zhao Long, Ph. D., graduated from the University of Science and Technology of China. He is currently the deputy director and senior engineer of the Organization Department of the Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. His main research interests include power communication and sensing technology.



王鑫,分别在2013年和2016年于天津大学和中国科学技术大学获得学士学位、硕士学位,现为国网安徽省电力有限公司电力科学研究院工程师,主要研究方向为电力信息、量子精密测量等。

E-mail: ustcw@ustc.edu.cn

Wang Xin, received B. Sc. and M. Sc. degrees from Tianjin University and University of Science and Technology of

China in 2013 and 2016, respectively. He is currently an engineer at the Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. His main research interests include power information, quantum precision measurement, etc.



赵博文, 2020 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为安徽省国盛量子科技有限公司执行董事, 主要研究方向为量子测量。读博期间参与国家重点研发计划, 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目, 安徽省量子通信与量子计算机重大项目引导性

项目等; 发表 SCI 量子测量相关论文 2 篇、参与 8 篇; 申请发明专利 2 项。

E-mail: 263781200@qq.com

Zhao Bowen, 2020 in Science and Technology of China University received a Ph. D., now he is the CEO of China Prosp & Quantumtech Co., Ltd. During his Ph. D., he participated in the national key research and development program, the key support project of the National Natural Science Foundation of China, and the leading project of the quantum communication and quantum computer major projects in Anhui Province, etc.; published 2 SCI quantum measurement related papers and participated in 8; applied for invention patents 2 items.



罗大程, 2018 年于合肥工业大学获得学士学位, 现于安徽国盛量子科技有限公司担任光学工程师, 主要研究方向为量子精密测量。

E-mail: 2042664836@qq.com

Luo Dacheng, received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology (HFUT) in 2018. Now he is an optical engineer in China Prosp & Quantumtech Co., Ltd. His main research interests include quantum measurement and optical fiber sensing.



张少春(通信作者), 分别在 2016 年和 2021 年于华中科技大学和中国科学技术大学获得学士学位和博士学位, 现为中国科学技术大学博士后, 主要研究方向为光纤传感、量子精密测量与量子光学等。

E-mail: zscyw@ustc.edu.cn

Zhang Shaochun (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees from Huazhong University of Science and Technology and University of Science and Technology of China in 2016 and 2021 respectively. He is now a postdoctoral fellow at University of Science and Technology of China. His main research interests include optical fiber sensing, quantum precision measurement and quantum optics.