

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108117

磁化方向对焊缝缺陷漏磁场的影响分析*

邱增集 王平 贾银亮

(南京航空航天大学自动化学院 南京 211100)

摘要:漏磁检测(MFL)技术适用于焊缝裂纹、气孔等缺陷的检测。由于焊缝结构的特殊性,不同磁化方向下的磁化路径及漏磁场强度均存在差异。采用合适的磁化方向能够激发更强的缺陷漏磁场信号,从而提高小尺寸缺陷的检出率。通过 Ansys 有限元仿真软件计算焊缝缺陷漏磁场,定量分析比较了磁化方向分别为垂直与平行于焊缝时,圆孔缺陷和纵向矩形槽缺陷的漏磁场及其分量强度。据此探讨任意磁化方向下的缺陷漏磁场及分量的特征规律,并搭建了焊缝漏磁检测平台进行试验验证。实验结果表明,圆孔型缺陷垂直磁化时漏磁信号幅值仅为平行磁化时的 18.6%,纵向裂纹型缺陷平行磁化时漏磁信号幅值仅为垂直磁化时的 9.2%~29.3%。

关键词:漏磁检测;焊缝;有限元仿真;磁化方向;磁场强度

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Analysis for MFL signal of weld defects affected by magnetization direction

Qiu Zengji Wang Ping Jia Yinliang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Magnetic flux leakage (MFL) technology is suitable for weld crack, porosity and other defects testing. Due to the particularity of weld, magnetization paths and MFL signals under different magnetization directions are different, and adopting appropriate magnetization direction can stimulate stronger MFL signals, thus improving the detection rate of small size defects. Ansys FEM simulation software was used to calculate the MFL signals of weld defects, and the strength and components of the MFL signals of circular holes and longitudinal rectangular slots defects when the magnetization direction was perpendicular or parallel to the weld seams were respectively analyzed and compared quantitatively. On this basis, the variation rules of the MFL signals in different magnetization directions were discussed. A MFL testing platform for welding seams was established for experimental verification. The experimental results show that the magnetic flux leakage signal amplitude of circular flaw is only 18.6% of that of parallel magnetization, and the magnetic flux leakage signal amplitude of longitudinal flaw is only 9.2% to 29.3% of that of vertical magnetization.

Keywords: magnetic flux leakage (MFL); steel plate weld; finite element method (FEM) simulation; magnetization direction; magnetic field intensity

0 引言

焊缝受焊接材料、工艺、人为损坏等因素影响会出现缺陷,对焊缝定期检验是保证设备材料安全的重要措施。焊缝检测中常用的检测方法有超声检测^[1]、射线检测^[2]等。漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)技术对焊接过程中常产生的裂纹、气孔等缺陷的检测能力强,因此可应用于焊缝检测。

漏磁检测技术是基于被磁化工件缺陷处的磁导率变

化,利用磁敏传感器检测缺陷位置漏磁场,适用于铁磁性材料的表面和近表面缺陷检测,具有检测准确性高、检测速度快、结构简单、无需耦合剂等优点^[3-4]。在管道环焊缝的漏磁检测中,检测器通常置于管道内部,检测方向与焊缝相垂直^[1]。而对于薄钢板焊缝的自动化在线检测,采用沿焊缝方向检测有利于提高检测效率,同时也解决了垂直焊缝方向检测时传感器脱离突变导致的漏磁信号畸变问题。

在传统的漏磁检测中,不论采用何种磁化方式(激励源为永磁、直流、交流或脉冲等),对材料的磁化方向通常与检

收稿日期:2021-10-18

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2100903)项目资助

测方向相同,如管道^[4-5]、钢管^[6-9]、钢轨检测^[10-11]。Shi 等^[4]在管道内检测中磁化模块采用轴向磁化方式,使管道缺陷位置达到饱和磁化。Singh 等^[6]在钢管检测中采用鞍形线圈对管壁进行局部磁化。杨理践等^[8]采用环绕式线圈对钢管进行穿过整体部分进行磁化,并探究饱和磁场的建立过程。Wang 等^[10]采用 U 型磁轭对钢轨轨头进行磁化,以提高钢轨表面横向裂纹的检测能力。采用该方向磁化的主要原因有:

1)管道、钢轨的裂纹等缺陷的延伸方向通常与检测方向夹角接近 90°,在该方向磁化下有利于在横向缺陷处激发更强的漏磁场^[12-13]。

2)为提高检测效率,检测装置通常为高速运行状态,采用该方式有利于对材料饱和磁化^[14,7,10]。

3)检测装置的机械结构设计及安装难度较低^[14]。

但是,采用该方向磁化时对纵向缺陷的检测识别能力较弱^[5],尤其对狭长状缺陷的检测困难。针对纵向缺陷检测,目前主要采用横向磁化的方法增强其漏磁检测信号。于超等^[11]在管道漏磁检测中内检测器以周向多磁极方式对管道均匀周向磁化,冯搏等^[15]在钢管漏磁检测中采用导磁板方式对钢管均匀周向磁化,从而提高纵向裂纹的检出能力。

焊缝中常见缺陷主要包括类裂纹缺陷(如裂纹、未焊透、未熔合)和体积型缺陷(如气孔、夹渣)。类裂纹缺陷通常为延伸方向与焊缝方向相同的面状缺陷,而体积型缺陷通常为近似于圆柱体的点状缺陷。因此在焊缝检测中,存在缺陷的类型多样,并且焊缝表面并非平整,与管道等构件有较大区别。同时,国内外关于磁化方向对缺陷漏磁场影响的相关文献均是针对表面平整的构件,而对于焊缝特殊构件的讨论较少。本文主要探究材料饱和磁化条件下,磁化方向对焊缝中不同类型缺陷漏磁场强度的影响。研究结果不但能够丰富缺陷漏磁场分布理论,并且对有效的漏磁检测装置设计有实际的指导意义。

1 不同磁化方向的磁场分布特征

对表面平整且无缺陷的材料磁化时,由于在任意磁化方向下的磁力线都均匀束缚在铁磁性材料中,磁化方向的改变不会影响磁场的分布特征。而在焊缝检测中,采用不同方向磁化时,在其磁化路径上不再是连续平滑的,经过焊缝表面时出现隆起。在焊缝材料与母材材料一致以及焊缝表面轮廓光滑的条件下,分别对平行焊缝和垂直焊缝两种特殊磁化方向下的磁场分布进行分析。

采用平行方向磁化的焊缝中心截面磁通分布如图 1(a)所示。区域 a 空气磁导率为 μ_a , 区域 b 铁磁性材料磁导率为 μ_b ($\mu_b \gg \mu_a$)。当磁化器施加总磁通量为 Φ 的磁场时,根据磁路理论有:

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_b \quad (1)$$

式中: Φ_a 为铁磁性材料内部磁通量, Φ_b 为磁化过程中泄漏到空气的磁通量。

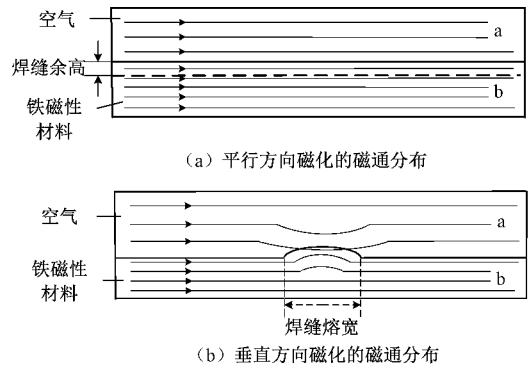


图 1 不同磁化方向下的磁通分布

由于铁磁性材料未出现不规则变化,材料内部以及上表面磁力线分布均匀,磁感应强度 B_a 和 B_b 在磁化路径基本不变,其磁力线分布特征近似于表面平整铁磁性材料。

采用垂直方向磁化的垂直焊缝截面磁通分布如图 1(b)所示。由于磁化路径上的焊缝位置材料厚度及面积增加,根据磁阻计算公式 $R = l/\mu S$, 在焊缝位置处的磁阻 R_b 减小。因此,铁磁性材料磁通量 Φ_b 及磁感应强度 B_b 增大,而空气中磁通量 Φ_a 及磁感应强度 B_a 减小。在磁力线分布中,空气和铁磁性材料中的磁力线表现为朝焊缝位置偏斜。

根据上述分析,材料被磁化后产生的漏磁场不仅含有铁磁性材料缺陷处“下凹”引起的漏磁分量,还含有材料“上凸”引起的漏磁分量,并且该分量对背景磁场有“抵消”作用,与缺陷漏磁分量的作用效果相反。在不考虑动态磁化时产生涡流效应^[7]和磁化滞后效应^[8]等因素影响的前提下,放置于焊缝表面上方的磁敏传感器检测的漏磁场 $B_{sensing}$ 如式(2)所示。

$$B_{sensing} = B_{background} - B_{bump} + B_{defect} \quad (2)$$

式中: $B_{background}$ 为磁化过程泄漏在空气中的磁场, B_{bump} 为材料凸起引起的漏磁场, B_{defect} 为材料缺陷引起的漏磁场。

在无缺陷的情况下,平行方向磁化的磁场 B_{para} 、垂直方向磁化的磁场 B_{perp} 可以分别如式(3)和(4)所示。

$$B_{para} = B_{background} \quad (3)$$

$$B_{perp} = B_{background} - B_{bump} \quad (4)$$

以上讨论两种磁化方向为水平磁化角度范围内的最小与最大两种特殊情况,当磁化方向介于两者之间时,施加的总磁场 B_0 可以分解为两个正交方向磁场分量 $B_{0,H}$ 和 $B_{0,V}$ 的矢量和,而缺陷上方的漏磁场 $B_{sensing}$ 可以表示为 B_0 磁场分量作用所激发漏磁场的叠加:

$$\begin{cases} \vec{B}_0 = \vec{B}_{0,H} + \vec{B}_{0,V} \\ B_{0,H} = B_0 \cdot \cos\alpha \\ B_{0,V} = B_0 \cdot \sin\alpha \end{cases} \quad (5)$$

$$B_{sensing} = B_H + B_V \quad (6)$$

式中: α 为磁化方向与焊缝方向的夹角; B_H 为磁场水平分量 $B_{0,H}$ 作用产生的漏磁场; B_V 为磁场垂直分量 $B_{0,V}$ 作用

产生的漏磁场。

因此对于焊缝检测,不同磁化方向下的磁场分布是存在差异的。相同损伤当量的焊缝缺陷将产生不同强度的漏磁场 B_{defect} ,其强度决定传感器信号幅值和信噪比,而信号幅值是漏磁检测工程应用中用来判断系统检测能力的标尺。本文拟采用有限元仿真方法对焊缝缺陷漏磁场 B_{defect} 幅值进行定量分析。

2 焊缝漏磁场分布仿真分析

2.1 有限元模型构建

通过 Ansys Maxwell 有限元仿真软件计算焊缝磁场分布,采用三维静态磁场建立如图 2 所示的焊缝检测结构模型。

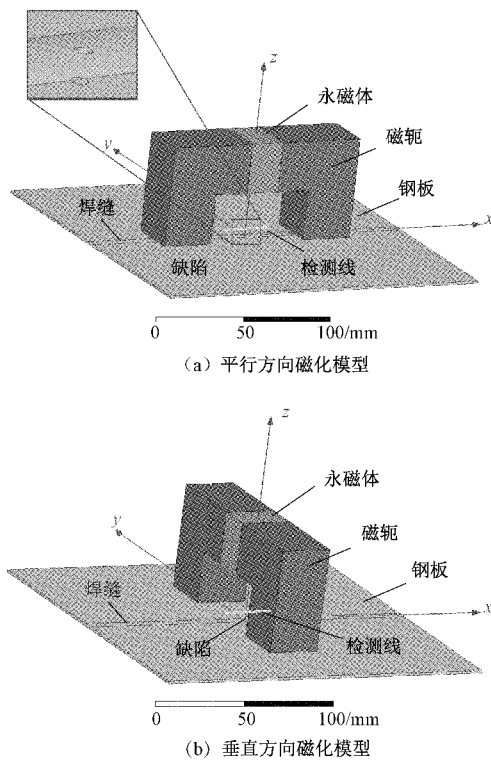


图2 三维有限元仿真模型

在此模型中,焊缝延伸方向为坐标 x 方向,钢板平面焊缝垂直方向为坐标 y 方向,钢板平面外法向为坐标 z 方向,两个模型分别沿 x 方向磁化和沿 y 方向磁化。磁感应强度的 x 、 y 、 z 分量分别表示为 B_x 、 B_y 、 B_z 。在仿真计算中,于距离钢板表面 1 mm、焊缝中心位置处作一条长度为 20 mm 的检测线,得出 x 坐标位置为 $-10 \sim 10$ mm (即 $y = 0$ mm, $z = 1$ mm, $x = -10 \sim 10$ mm) 的磁场 B_{sensing} 。

根据薄板和焊缝实际尺寸,模型参数设置如表 1 所示。对接焊缝截面设置为圆弧形,焊缝上表面宽度为 6 mm,余高 0.3 mm,并且材料属性设置与母材一致,均为 Q235 钢。磁场激励方式为永磁激励,永磁体置于磁轭臂中心,并通过磁轭对钢板进行磁化,磁轭提高值为 1 mm。永磁体材料为

NdFe30,矫顽力为 838 kA/m,其产生的磁场通过铁氧体磁轭对钢板和焊缝进行饱和磁化。仿真计算不同尺寸的圆孔缺陷和矩形槽缺陷,分析提高值为 1 mm 的磁场 B_{sensing} 。

表1 模型部件材料及尺寸参数

仿真部件	材料	尺寸参数/mm
磁轭	ferrite	120×60×60(磁极间距 60)
永磁体	NdFe30	20×30×30
钢板	Q235	200×200×1.5
焊缝	Q235	200×6×0.3(圆弧形)
缺陷	vacuum	不同尺寸圆孔和矩形槽

2.2 仿真结果分析

1) 无缺陷的漏磁场分布特征

对上述两种模型分别进行仿真计算,得到在无缺陷情况下提高值为 1 mm 的焊缝上方漏磁场 B_{para} 与 B_{perp} 。图 3 为 12 mm×12 mm 区域的磁感应强度云图,黑色虚线框出的 12 mm×6 mm 区域为焊缝表面位置。

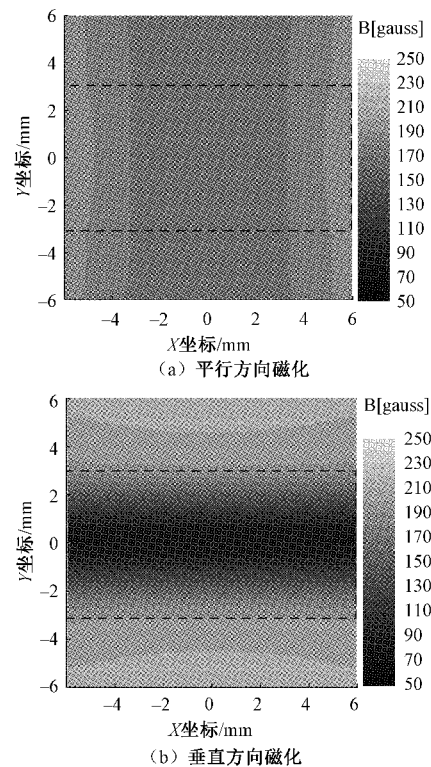


图3 焊缝处磁感应强度云图

根据图 3(a)可知,由于采用 U 型磁轭结构磁化,在 x 方向上的漏磁场变化量仅为 16%,并且磁轭中心位置处的磁场最小;而在 y 方向上,焊缝表面内外的漏磁场基本不变。总体而言,采用平行方向磁化的焊缝漏磁场分布均匀,仅包含背景磁场,磁感应强度约为 150 Gs。根据图 3(b)可知,采用垂直方向磁化时, y 方向朝焊缝中心位置的漏磁场迅速减小,边缘位置至焊缝中心线位置的漏磁场从 220 Gs

降至 70 Gs。总体上,漏磁场在焊缝位置边缘处开始减小,与上节理论分析结论一致。

因此,平行方向磁化焊缝时,其磁场分布与表面平整材料相似;而垂直方向磁化焊缝时,由于磁化路径上的材料发生“凸起”,磁路在该位置处磁阻减小,导致焊缝上方漏磁场减小。为得出缺陷所引起的漏磁场 B_{defect} , 将所得的漏磁场 B_{sensing} 各分量减去无缺陷情况的磁场 B_{para} 或 B_{perp} 各分量, 对其进行定量分析。

2) 圆孔缺陷漏磁场对比

焊缝常见缺陷主要有类裂纹缺陷、体积型缺陷,类裂纹缺陷可以近似于矩形槽,而体积型缺陷可以近似于圆孔。因此,本文主要针对这两类缺陷进行仿真分析,从而对比两种磁化方向的漏磁场。对于圆孔缺陷,固定其深度为 1.8 mm(贯穿焊缝),分别对不同直径 d (分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm)的缺陷进行仿真,根据式(2)计算检测线位置的缺陷漏磁场 B_{defect} 。其中,平行方向磁化的漏磁场 B_y 分量和垂直方向磁化的漏磁场 B_x 、 B_z 分量幅值非常小,不进行分析。

平行方向磁化的缺陷漏磁场 B_x 、 B_z 分量如图 4 所示,漏磁场 B_x 分量呈带有负旁瓣的单峰信号, B_z 分量呈正负双峰信号。垂直方向磁化的缺陷漏磁场 B_y 分量如图 5 所示,漏磁场 B_y 分量呈无旁瓣的单峰信号。

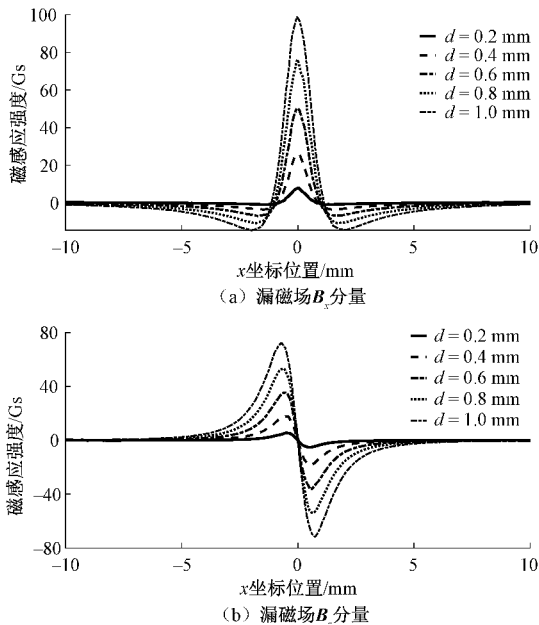


图 4 平行方向磁化圆孔缺陷漏磁场

提取图 4 与 5 不同直径大小缺陷的漏磁场分量峰值,对两种磁化方向的漏磁场进行比较,如图 6 所示。随着圆孔缺陷直径 d 的增加, B_{defect} 分量幅值逐渐增加,并且平行方向磁化磁场 B_x 、 B_z 分量大于垂直方向磁化磁场 B_y 分量。因此,对于相同尺寸的圆孔缺陷,平行方向磁化激发的缺陷漏磁场相较于垂直方向磁化强。

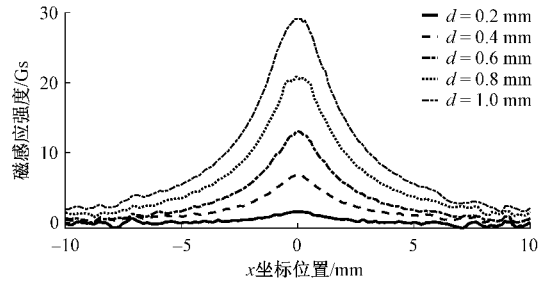


图 5 垂直方向磁化圆孔缺陷漏磁场 B_y 分量

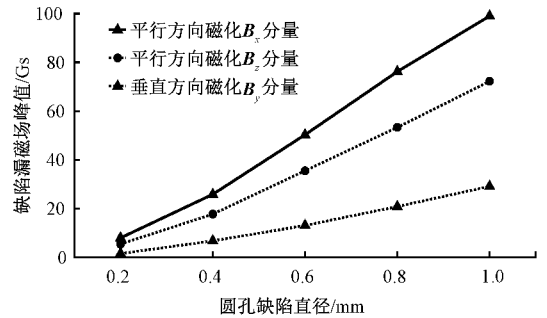


图 6 缺陷漏磁场峰值对比

3) 矩形槽缺陷漏磁场对比

对于矩形槽缺陷,固定其长度为 5 mm、宽度为 0.5 mm,分别对不同深度大小的缺陷进行仿真,计算检测线位置的磁感应强度 B 。根据焊缝厚度(薄板厚度+焊缝余高) $t=1.8$ mm,设置深度 D 分别为 0.36、0.72、1.08、1.44、1.80 mm(20% t 、40% t 、60% t 、80% t 、100% t)。根据式(2)计算检测线位置的缺陷漏磁场 B_{defect} 。

平行方向磁化的缺陷漏磁场 B_x 、 B_z 分量如图 7 所示,

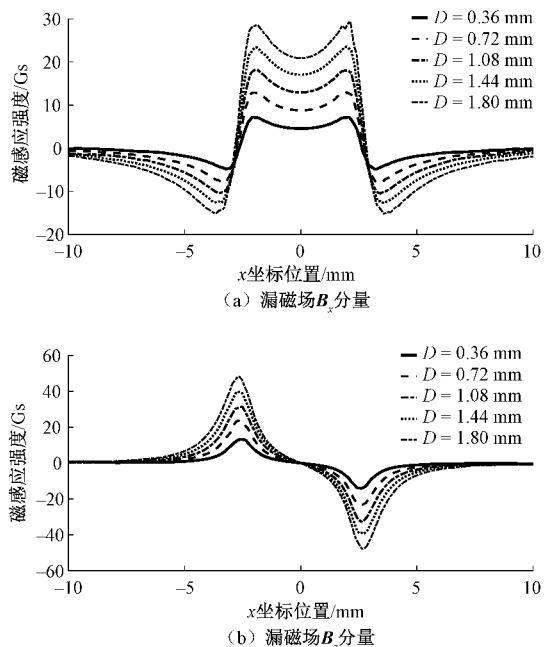


图 7 平行方向磁化矩形槽缺陷漏磁场

漏磁场 B_x 分量呈带有负旁瓣的双峰信号,且双峰间距接近于裂纹长度(5 mm); B_z 分量呈正负双峰信号,且双峰间距接近于裂纹长度。垂直方向磁化的缺陷漏磁场 B_y 分量如图8所示,漏磁场 B_y 分量呈无旁瓣的单峰信号,且峰值的宽度接近于裂纹长度。

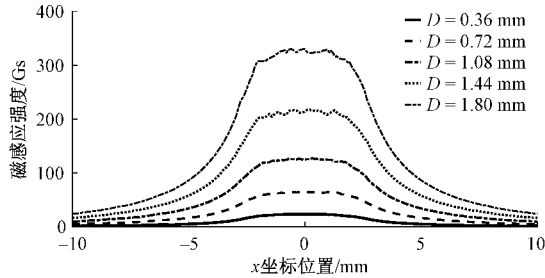


图8 垂直方向磁化矩形槽缺陷漏磁场 B_y 分量

提取图7与8不同深度缺陷的漏磁场分量峰值,对两种磁化方向的漏磁场进行比较,如图9所示。随着矩形槽缺陷深度 D 的增加, B_{defect} 分量幅值逐渐增加,并且垂直方向磁化检测的 B_y 分量明显大于平行方向磁化的 B_x 、 B_z 分量。因此,当矩形槽缺陷长宽比达到一定大小时(该仿真矩形槽缺陷长宽比为10),垂直方向磁化的激发的缺陷漏磁场会强于平行方向磁化。

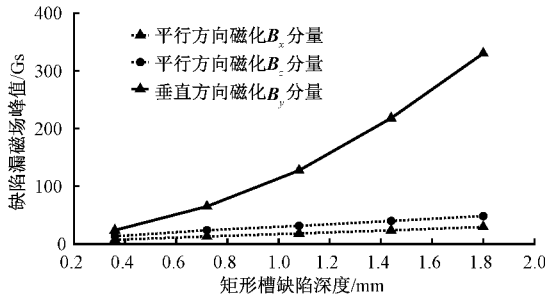


图9 缺陷漏磁场峰值对比

2.3 磁化方向对漏磁场影响分析

根据以上理论分析和仿真结果,焊缝缺陷检测中磁化方向对漏磁场的影响具有如下几个特征。

1)由于圆孔缺陷具有中心对称性,采用任意磁化方向时,其磁化路径上的缺陷截面特征都是相同的。根据不同尺寸的圆孔缺陷漏磁场仿真结果可知,焊缝使漏磁场分布发生变化,垂直方向磁化激发的缺陷漏磁场总是弱于平行方向磁化。由式(5)、(6)可知,任意方向的漏磁场是总磁场水平分量和垂直分量分别磁化作用产生的漏磁场的矢量和。根据以上分析可以得出,随着磁化角度 α 的增加,缺陷漏磁场 B_{defect} 逐渐减小。

为证实上述结论,通过仿真计算磁化方向角度 α 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ (间隔为 10°)、直径为 1 mm、深度为 1.8 mm 的圆孔缺陷漏磁场,图10所示为 B_{defect} 及其分量的峰值变化。

随着磁化方向角度 α 的增加,缺陷漏磁场 B_{defect} 及 B_x 、 B_z 分量峰值均逐渐减小;而漏磁场 B_y 分量峰值在 $\alpha < 60^\circ$

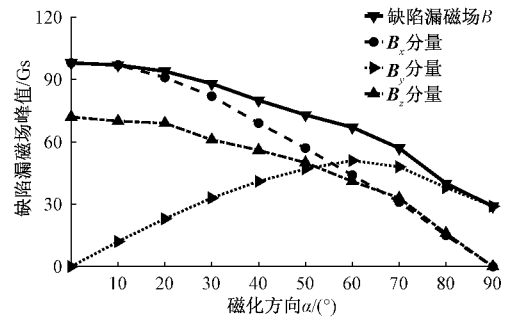


图10 不同磁化方向的圆孔缺陷漏磁场峰值

时逐渐增大,在 $\alpha > 60^\circ$ 时逐渐减小, $\alpha = 90^\circ$ 时 $B_y \approx B_{defect}$ 。因此,在磁化角度 $\alpha = 0^\circ$ 时,缺陷漏磁场 B_{defect} 及 B_x 、 B_z 分量为最大值,此时对圆孔缺陷的检测能力最强。

2)根据三维磁偶极子模型^[18],对于沿 x 方向延伸的矩形槽缺陷,在被测材料表面平整的条件下(无焊缝),当磁化方向与缺陷延伸方向的角度 α 增大时($0^\circ \sim 90^\circ$),缺陷漏磁场 B_x 分量逐渐减小、 B_y 分量逐渐增大,并且在矩形槽长宽比达到一定值时,垂直方向磁化($\alpha = 90^\circ$)的缺陷漏磁场 B_y 分量的峰值大于任意磁化方向的漏磁场 B_x 和 B_z 分量。因此对于矩形槽缺陷,主要关注的是与矩形槽长度方向相垂直的漏磁场 B_y 分量。通过不同尺寸的焊缝矩形槽缺陷漏磁场仿真结果可知,采用垂直方向磁化激发的缺陷漏磁场 B_y 大于平行方向磁化缺陷漏磁场任意分量,与无焊缝情况的结论一致。根据以上分析可以得出:当磁化方向角度 α 达到一定值时,矩形槽缺陷漏磁场 B_y 分量峰值大于任意磁化方向的漏磁场 B_x 和 B_z 分量。

为证实上述结论,通过仿真计算磁化方向为 $0^\circ \sim 90^\circ$ (间隔为 10°)、深度为 1.8 mm、宽度为 0.5 mm 的矩形槽缺陷漏磁场,图11所示为 B_{defect} 及其分量的峰值变化。

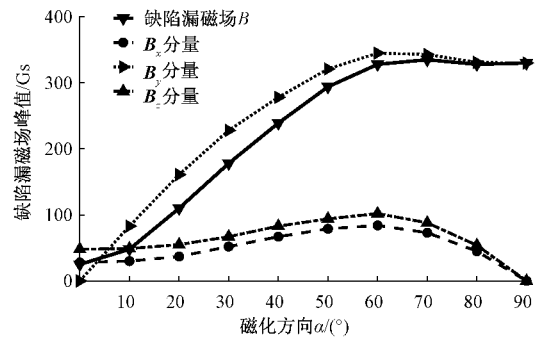


图11 不同磁化方向的矩形槽缺陷漏磁场峰值

随着磁化方向角度 α 的增加,缺陷漏磁场 B_{defect} 及 B_y 分量峰值大体上呈增大趋势。并且当 $\alpha \geq 20^\circ$ 时, B_y 分量大于任意磁化方向的 B_x 和 B_z 分量;当 $\alpha = 60^\circ$ 时, B_{defect} 及 B_y 分量均达到最大值;当 $\alpha > 60^\circ$ 时, $B_y \approx B_{defect}$, B_x 与 B_z 分量逐渐减小至 0。因此,在磁化角度 $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时,缺陷漏磁场 B_{defect} 及 B_y 分量均接近于最大值,此时对矩形槽缺陷的检测能力最强。

3 试验验证

3.1 焊缝漏磁检测系统

焊缝漏磁检测系统主要由检测探头、信号调理电路、数据采集卡、计算机组成。检测探头包括磁化器和三维霍尔传感器阵列,磁化器选用钕铁硼永磁体,传感器选用霍尔传感器 UGN3503,其灵敏度典型值为 1.3 mV/Gs。信号调理电路实现对漏磁信号的滤波和放大,滤除低频背景磁场信号从而得到缺陷漏磁场信号。数据采集卡对漏磁信号进行 A/D 转换,采样频率为 10 kHz,计算机实现对漏磁检测数据的保存和处理。检测系统示意图如图 12 所示。

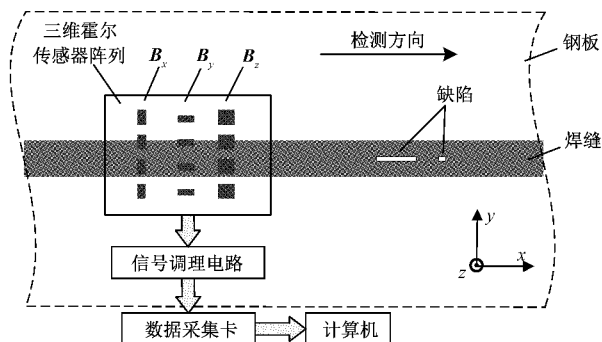


图 12 检测系统示意图

传感器结构为 4×3 霍尔传感器阵列 (x, y, z 方向传感器均为 4 个),同一方向传感器间距为 4 mm,因此线扫查的宽度为 12 mm,可对焊缝进行全覆盖扫查。在检测过程中,传感器阵列放置于焊缝中央,提离值为 1 mm,检测速度约为 0.3 m/s,并沿焊缝方向 (x 方向)扫查。在相同的检测条件下,分别进行磁化方向平行焊缝方向 (x 方向)和垂直焊缝方向 (y 方向)的试验。选取的薄板尺寸为 $600 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 、材质为 Q235、焊缝熔宽为 6 mm,并在焊缝中心线位置加工有人工缺陷 5 个。薄板焊缝缺陷样例如图 13 所示,缺陷尺寸参数如表 2 所示,缺陷编号与图中标注序号一致。

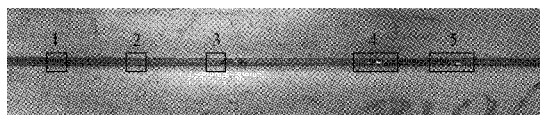


图 13 薄板焊缝缺陷

表 2 人工缺陷尺寸参数(薄板厚度 $t=1.0 \text{ mm}$)

类型	序号	直径/mm	深度	
圆孔	1	0.3	$100\%t(1.0 \text{ mm})$	
	2	0.5	$100\%t(1.0 \text{ mm})$	
	3	1.0	$100\%t(1.0 \text{ mm})$	
类型	序号	长度/mm	宽度/mm	深度
裂纹	4	4.0	1.0	$100\%t(1.0 \text{ mm})$
	5	5.0	1.0	$100\%t(1.0 \text{ mm})$

3.2 试验结果分析

为更直观清晰地显示检测结果,将漏磁信号幅值线性转换为灰度值,分别绘制同一方向传感器的 4 个通道的灰度图,并在相邻通道之间进行线性插值,从而得到平滑后的焊缝表面漏磁场分量灰度图。

平行磁化方向的漏磁信号 B_y 较小,不对其进行分析,漏磁信号 B_x, B_z 检测结果如图 14 所示。观察漏磁信号灰度图可知, B_x 分量漏磁信号可以明显辨识出 5 个缺陷,缺陷信号为带有负旁瓣的单峰信号,其最大峰值为 0.89 V; B_z 分量漏磁信号也可以明显辨识出 5 个缺陷,并且缺陷信号为双峰信号,其最大峰值为 1.51 V,缺陷信号特征与仿真结果一致。对于圆孔缺陷,随着圆孔直径的增大,缺陷信号峰值逐渐增大,并且漏磁场范围也逐渐增大;对于裂纹缺陷,随着裂纹长度的增大,漏磁场在焊缝方向上的范围也逐渐增大。

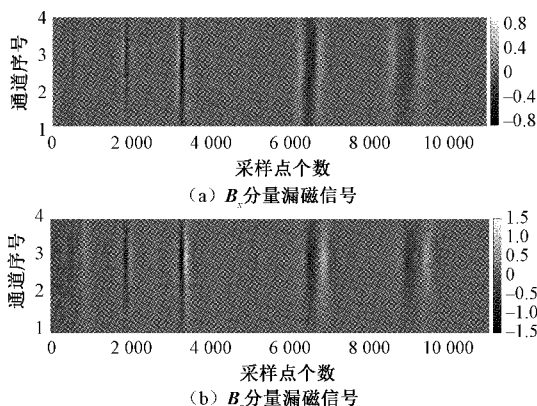


图 14 平行方向磁化漏磁信号灰度图

垂直磁化方向的漏磁信号 B_x, B_z 较小,不对其进行分析,漏磁信号 B_y 检测结果如图 15 所示。观察漏磁信号灰度图可知,圆孔缺陷处的 B_y 分量漏磁信号几乎淹没在噪声中,难以确定其幅值大小。而 4、5 号裂纹缺陷均能检测出,在缺陷位置处为单峰信号,信号特征与仿真结果一致。随着裂纹长度的增大,漏磁场在焊缝方向上的范围也逐渐增大,并且其峰值大小为 3.26 V。

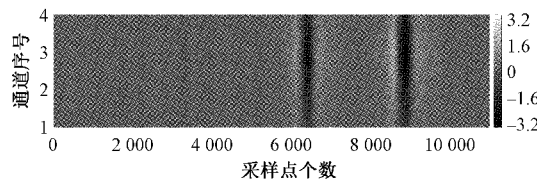


图 15 垂直方向磁化 B_y 分量漏磁信号灰度图

为比较缺陷信号峰值,选取平行方向磁化缺陷信号 B_x, B_z 和垂直方向磁化缺陷信号 B_y 中峰值最大的通道,计算其幅值相对大小,如图 16 所示。

对于圆孔缺陷,平行方向磁化的 B_x, B_z 分量信号幅值均大于垂直方向磁化 B_y 分量,并且垂直方向磁化时仅检测

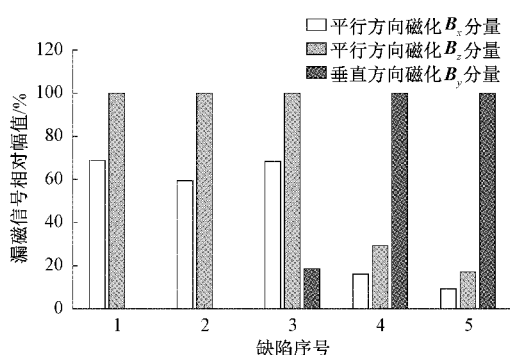


图 16 漏磁信号相对幅值

到3号圆孔缺陷,其信号幅值为前者的18.6%。对于裂纹缺陷,两种方向磁化时均能检测出,但采用平行方向磁化时,其漏磁信号 B_x 幅值仅为后者 B_y 幅值的16.1%、9.2%, B_x 幅值仅为后者 B_y 幅值的29.3%、17.1%。两种磁化方向的信号峰值相对大小关系与仿真结果分析结论一致。

根据以上实验结果,平行方向磁化有利于提高圆孔缺陷的检测能力,而垂直方向磁化有利于提高纵向裂纹缺陷的检测能力。由于焊缝自然缺陷实际尺寸通常较小,为提高不同类型缺陷的检测能力,可以考虑采用平行和垂直焊缝方向磁化相结合的方式,并且通过漏磁信号幅值对比可以得到缺陷的基本特征。

4 结 论

本文研究了薄钢板焊缝漏磁检测中,磁化方向对缺陷漏磁场的影响。比较了垂直与平行焊缝两个正交方向磁化下圆孔和矩形槽缺陷的漏磁场 B_{defect} ,以及磁化方向在介于两者之间时, B_{defect} 及其分量的幅值特征规律。通过理论分析、模型仿真以及试验验证,得出如下结论。

1)在无缺陷的情况下,焊缝在平行方向磁场激励下的漏磁场与表面平整材料的磁场分布相似;而在垂直方向磁场激励下的漏磁场向焊缝中心位置逐渐减小。

2)对于圆孔型缺陷,随着磁化角度 α 增大,其激发的漏磁场 B_{defect} 逐渐减小,在垂直焊缝方向磁化时($\alpha=0^\circ$) B_{defect} 为最大值,并且集中在 B_x 、 B_z 分量,在垂直焊缝方向磁化时($\alpha=90^\circ$) B_{defect} 为最小值,并且集中在 B_y 分量。

3)对于纵向裂纹型缺陷,随着磁化角度 α 增大,其激发的漏磁场 B_{defect} 呈增大趋势,在 α 达到一定大小时, B_{defect} 及 B_y 分量达到最大值并趋于稳定。

在本文的基础上,还将深入研究焊缝材料和尺寸等因素对焊缝缺陷漏磁场的影响,选择合适的磁化方向,提高焊缝检测能力。

参考文献

[1] 谢航,张益成,周礼峰,等.奥氏体不锈钢管道环焊缝的

超声相控阵检测[J].无损检测,2017,39(3):23-25,29.

- [2] 放波,王乃波,何深远,等.小管路焊缝内部缺陷的三维X射线成像[J].焊接学报,2016,37(5):11-14,129.
- [3] SUN Y, K Y. Magnetic mechanisms of magnetic flux leakage nondestructive testing [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(18): 184104.
- [4] SHI Y, ZHANG C, LI R, et al. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection[J]. Sensors, 2015, 15(12): 31036-31055.
- [5] WU J, SUN Y, KANG Y, et al. Theoretical analyses of MFL signal affected by discontinuity orientation and sensor-scanning direction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 51(1): 1-7.
- [6] SINGH W S, RAO B P, MUKHOPADHYAY C K, et al. Detection of localized damage in water wall tubes of thermal power plants using GMR sensor array based magnetic flux leakage technique [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(3): 1-7.
- [7] 伍剑波,康宜华,孙燕华,等.涡流效应影响高速运动钢管磁化的仿真研究[J].机械工程学报,2013,49(22):41-45.
- [8] 杨理践,耿浩,高松巍,等.高速漏磁检测饱和场建立过程及影响因素研究[J].仪器仪表学报,2019,40(10):1-9.
- [9] 伍剑波,王杰,康宜华,等.感生磁场对高速运动钢管磁化的影响机理[J].机械工程学报,2015,51(18):7-12.
- [10] WANG P, GAO Y L, TIAN G Y, et al. Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection [J]. NDT and E International, 2014, 64: 7-12.
- [11] ANTIPOV A G, MARKOV A A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection [J]. NDT & E International, NDT & E International, 2018, 98: 177-185.
- [12] 田贵云,高斌,高运来,等.铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述 [J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1763-1780.
- [13] 吴德会,刘志天,王晓红,等.表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响[J].物理学报,2017,66(4):266-276.
- [14] 于超,张永江,李彦春,等.管道横向励磁漏磁内探测器研制[J].油气储运,2020,39(9):1037-1041.
- [15] 冯搏,伍剑波,杨芸,等.钢管纵向伤高速高精漏磁探伤磁化方法[J].中国机械工程,2014,25(6):736-740.

作者简介

邱增集,工学硕士,主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail:2545959004@qq.com