

DOI: 10.19666/j.rlfid.202404085

20 钢板焊缝缺陷的磁记忆检测

谢云辰¹, 纳日苏¹, 王 啸²

(1. 国能锅炉压力容器检验有限公司, 北京 100070;

2. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226004)

[摘 要] 与磁粉检测和射线检测相比, 磁记忆检测灵敏度更高, 利用金属磁记忆技术对 20 钢板的焊缝缺陷进行无损检测评价。研究表明: 磁记忆检测法能够有效表征钢板的焊缝缺陷; 与磁场强度参数相比, 磁场梯度对焊缝缺陷更为敏感, 表现为在被测 4 块钢板的焊缝缺陷处, 其磁场梯度的法向分量均出现了明显增加、并呈凸峰状, 且在焊缝一些局部应力集中处, 也出现了异常磁记忆信号。在实际应用时, 可以利用磁记忆检测快速的特点, 先对被测构件焊缝的异常信号进行提取, 同时与其他无损检测进行比较, 有效实现提高缺陷检测准确性与可靠性的目的。

[关 键 词] 磁记忆检测; 焊缝缺陷; 裂纹; 无损检测

[引用本文格式] 谢云辰, 纳日苏, 王啸. 20 钢板焊缝缺陷的磁记忆检测[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 155-161. XIE Yunchen, NA Risu, WANG Xiao. Magnetic memory detection in welding joint of 20 steel plate[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 155-161.

Magnetic memory detection in welding joint of 20 steel plate

XIE Yunchen¹, NA Risu¹, WANG Xiao²

(1. CHN Energy Boiler and Pressure Vessel Inspection Co., Ltd., Beijing 100070, China;
2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226004, China)

Abstract: Compared with magnetic particle detection and ray detection, magnetic memory detection is more sensitive. The magnetic memory technology is employed to carry out nondestructive testing and evaluation for weld defects of 20 steel plate. The results show that, the magnetic memory detection method can effectively characterize the weld defects of steel plates. Compared with the magnetic field intensity parameter, the magnetic field gradient value is more sensitive to the weld defects of the four tested steel plates, which manifested as its normal component increases significantly and presents a convex peak, and the abnormal magnetic memory signals also appear in some places of the weld with local stress concentration. In practical application, the rapid characteristics of the magnetic memory detection technology can be used to extract the abnormal signals of the weld seam of the tested components at first, and then compare it with other non-destructive testing methods, to effectively improve the accuracy and reliability of defect detection.

Key words: metal magnetic memory detection; weld defects; crack; nondestructive testing

20 钢被广泛应用于汽车制造业、重中型机械制造业与锅炉制造业内^[1-4]。在上述工业领域中, 焊接技术作为一种普遍使用的基础工艺, 是大型金属构件制备、安装或改造的重要一环^[5-10]。由于焊接质量与焊缝缺陷往往是影响金属构件服役

安全的重要因素, 因此有必要对焊接构件采取有效的损伤评定和监督措施, 防范接头的泄漏或破裂, 确保大型焊接构件的服役安全。

金属磁记忆 (MMM) 是一种新型的弱磁检测技术^[11-16], 该技术适用于在役、安装或修复后

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 国家能源集团科学技术研究院资助项目 (GJ2022Y01); 国家自然科学基金青年基金项目 (52305156)

Supported by: Project of National Energy Group Science and Technology Research Institute (GJ2022Y01); Youth Fund of National Natural Science Foundation (52305156)

第一作者简介: 谢云辰 (1988), 男, 工程师, 主要研究方向为无损检测技术, 12074463@ceic.com。

通信作者简介: 王啸 (1989), 男, 博士, 校聘教授, 主要研究方向为无损检测技术, wxm1273@sina.com。

铁磁体、亚稳态奥氏体、合金钢以及铸铁材质任何尺寸与结构类型（对接、三通、圆角、搭接、边缘、间断等）的焊接接头的检测，可以检测出的微观和宏观缺陷包括气孔、夹渣、不连续、裂缝与断裂，且能够有效表征上述缺陷可能发生的位置区域。金属磁记忆法的优势包括：对被检工件的表面粗糙度要求低；不需要专门的磁化设备就能进行检测；设备轻便、检测快速、无需打磨、操作简单、灵敏度高。本研究首先对焊接接头进行磁记忆检测，再对存在异常信号的区域进行其他类别的无损检测，通过对比与分析试验结果，验证金属磁记忆技术的有效性，掌握利用该技术对钢板焊缝缺陷及其分布状况的检测与评价方法。

1 金属磁记忆检测基本原理

金属磁记忆检测是指对工件的磁化状态进行测量，判断其应力集中区域的一种无损检测方法^[17-22]。

在微观层面上，金属材料内部可视为由许多磁畴与磁畴壁组成。当无外部应力场作用时，材料中的磁畴与磁畴壁呈随机自由状态，在宏观上表现为无磁性；当存在外部应力场时，金属材料在地磁场和应力场的共同作用下，其磁畴与磁畴壁在磁-机械耦合效应下发生旋转与定向移动，且在宏观上显示出磁性。同时，材料的磁化状态也会发生改变，表现为材料磁场强度 H 的切向分量 H_x 会在应力集中区域达到最大值，且其法向分量 H_y 通过原点，符号发生反方向变化，具体如图 1 所示。这种能够保留构件应力集中区域与磁变化不可逆的物理特征便称为磁记忆^[23-26]。

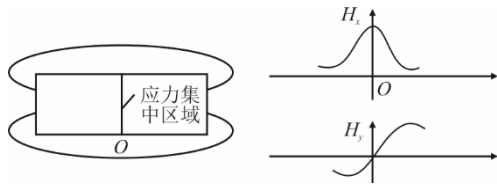


图 1 金属磁记忆检测原理

Fig.1 Principle of the metal magnetic memory detection

基于上述原理，可以利用试样在应力状态变化时出现的磁记忆效应，对其进行无损检测。通过测量材料表面磁场法向分量和切向分量的磁信号，可以实现构件的应力状态和损伤程度评价，这是由于磁信号的分布与铁磁性金属的应力状态

和损伤程度密切相关。

2 焊接钢板与检测试验

试验材料为 20 钢，将钢板加工为 300 mm×150 mm×15 mm（长×宽×厚）的试板，通过手工电弧焊方法进行焊接，坡口型式为 V 型，焊缝宽度为 20~22 mm，焊缝余高为 0~2 mm。

共设计了 4 块焊接模拟试板（分别为 1 号钢板、2 号钢板、3 号钢板、4 号钢板），并在试板上预制典型纵向裂纹缺陷。遵循《无损检测 磁记忆检测 总体要求》（GB/T 26641—2021）、《焊缝无损检测 金属材料应用通则》（GB/T 34628—2017）、与《无损检测仪器 金属磁记忆检测仪技术条件》（JB/T 11605—2013），利用爱德森 TSC-5M-32 型智能化磁记忆金属诊断仪开展检测试验，该仪器具有检测参数显示、数据数字采集、探头位置编码运动、多测量通道等功能，能够用于被检对象的磁场测量与外部磁场影响补偿。采用具有较高灵敏度的 EMS-PL4 型探头，该探头能够检测工件近表面区域的磁场。探头磁场测量值的相对误差为 2.5%，灵敏度范围为 1nT-90uT √(HZ)。探头的测量范围为 >1 000 A/m，实测值为 3 000 A/m，分辨率为 1 A/m。

3 试验结果

3.1 钢板焊缝的磁记忆检测过程

试验过程如图 2a)所示，将磁性探头垂直放置在检测表面，由操作人员进行手动检测。检测时朝着焊缝长度方向，即沿焊缝材料和两侧热影响区进行扫查，并记录表面磁场指示的表面磁场（SF）正负振幅（ $H_{SF,i}$ ($i=x, y, z$), A/m)，探头提高为 1 mm。

扫描探头的结构如图 2b)所示，将传感器和位置编码器安装在小车外壳内，用于测量磁性分量的大小与检测区长度。图中 1、2、3、4 为 4 个磁通门传感器，5 为具有位置编码器的车轮，其可随着磁场强度 H_x 的变化完成被检测区段长度的测量。在检测过程中，传感器 1 和传感器 3 从焊缝两侧对热影响区进行检测，传感器 2 位于其中心，传感器 4 则用于外部磁场补偿。

被检区域与扫描方向如图 2c)所示，其中 6、7、8 为检测区，9 为母材，10 为接头热影响区，11 为焊缝。在开始检测前，应根据 GB/T 26641

—2021 设置采样间距, 注意沿测量线的采样间距应小于焊缝厚度与图 2b) 中相邻传感器 1、传感器 2 和传感器 3 的间距 (Δy)。

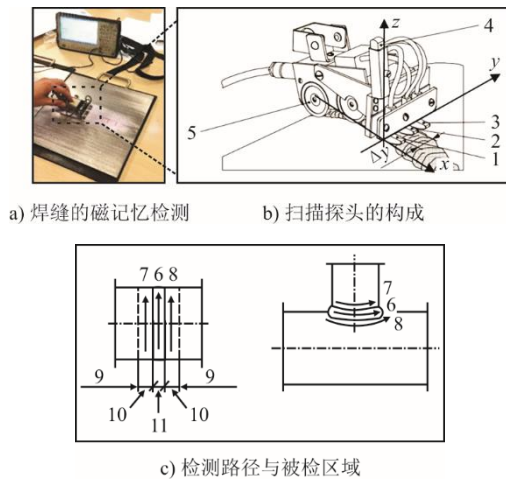


图 2 钢板焊缝磁记忆检测过程
Fig.2 Magnetic memory testing process of steel plate weld

根据磁记忆检测结果确定下列参数:

$$K_{SF,i}^x = \frac{|\Delta H_{SF,i}|}{\Delta x}, K_{SF,i}^y = \frac{|\Delta H_{SF,i}|}{\Delta y} \quad (1)$$

式中: 下标 SF 为表面磁场, 下标 i 为磁场相对于检测对象的笛卡尔分量 ($i=x, y, z, z$ 是表面法线); $K_{SF,i}^x$ 为每一测量通道沿 x 方向上的磁场梯度; $K_{SF,i}^y$ 为每一测量通道沿 y 方向上的磁场梯度; $|\Delta H_{SF,i}|$ 为相邻 2 个扫描点的 $H_{SF,i}$ 之差; Δx 为测量线相邻点的采样距离, 本研究中 Δx 为 1 mm; Δy 为测量线间距。

根据式(2)计算测量线中值:

$$K_{med,i}^j = \text{median}(K_{SF,i}^j) \quad (2)$$

式中: j 为在同一笛卡尔空间中梯度计算方向 ($j=x,y,z$); median 为平均值。

根据式(3)计算磁指数 m_i^j , 该参数取决于焊接接头的质量, 能够描述钢板表面磁场分布的不均匀程度:

$$m_i^j = \frac{K_{SF,i}^j}{K_{med,i}^j} \quad (3)$$

如果 m_i^j 大于预先定义的阈值 $m_{lim,i}^j$ (如 2.0), 则表示存在由高机械应力或应变梯度引起的表面磁场偏离, 其可能是由于裂纹、点蚀等缺陷集中所引起的。

3.2 钢板焊缝的磁记忆检测结果

3.2.1 1 号钢板磁记忆检测结果

图 3 示出了 1 号钢板的磁记忆与其他无损检

测结果。其中横坐标为检测位置与距离; 左侧纵坐标对应图中上部分曲线, 为表面磁场强度; 右侧纵坐标对应图中下部分曲线, 为磁场梯度。图中, H_{x1}, H_{x2}, H_{x3} 分别为磁场强度在通道 1、通道 2、通道 3 上的切向分量; H_{y1}, H_{y2}, H_{y3} 分别为磁场强度在通道 1、通道 2、通道 3 上的法向分量; $K_{SF,x1}, K_{SF,x2}, K_{SF,x3}$ 分别为磁场梯度在通道 1、通道 2、通道 3 上的切向分量; $K_{SF,y1}, K_{SF,y2}, K_{SF,y3}$ 分别为磁场梯度在通道 1、通道 2、通道 3 上的法向分量。

由图 3 可以看出, 1 号钢板的磁记忆检测发现焊缝有 2 处位置存在信号异常, 表面磁场指示 (SFI) 的位置约在 70~110 mm 与 180~220 mm 处。与其他位置相比, 异常信号表现为 SFI 位置处的磁场强度 H 发生明显起伏、总体变化较大。进一步观察发现, 在 70~110 mm 处, 与通道 1 和通道 3 相比, 只有通道 2 上存在磁场法向分量“过零点”现象, 这可能是由于通道 2 正对焊缝中心部位, 因此该通道上的磁信号变化最为敏感。此外, 在 70~110 mm 与 180~220 mm 区域内, 通道 2 法向分量上的磁场梯度变化存在明显凸峰, 远高于其他位置处的磁场梯度变化水平。

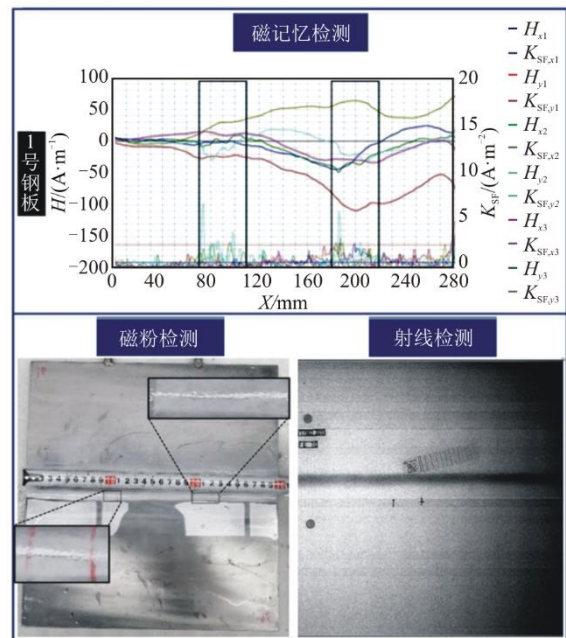


图 3 1 号钢板焊缝磁记忆检测与其他无损检测结果
Fig.3 The magnetic memory test and other non-destructive testing results of weld on No.1 steel plate

图 3 还示出了 1 号钢板的其他无损检测验证结果。在 2 个 SFI 位置处, 射线检测并没有观测到缺陷痕迹, 而磁粉检测也没有发现明显的黑线。

这表明 1 号钢板磁记忆检测中在 70~110 mm 与 180~220 mm 处的曲线变化并不是由体积型缺陷引起的,可能是焊缝在这 2 个位置存在局部应力集中,从而致使磁记忆检测信号异常。

3.2.2 2 号钢板的磁记忆检测结果

图 4 示出了 2 号钢板的磁记忆与其他无损检测结果。由图 4 可以看出,3 个通道上的磁场强度曲线在 85~130 mm 与 220~280 mm 位置上变化最为明显。与通道 1 和通道 3 相比,通道 2 显示的磁场强度曲线虽然没有反复“过零点”的现象,但是其突变次数更多、反复振荡的频率更大。同时,通道 2 法向分量上的磁场梯度变化在上述区域内存在几处凸峰,其位置约在 90~100 mm、115~125 mm、180~220 mm、220~255 mm 与 255~280 mm 处。相反,与通道 2 相比,其他通道上显示出的磁场梯度变化则明显较小。

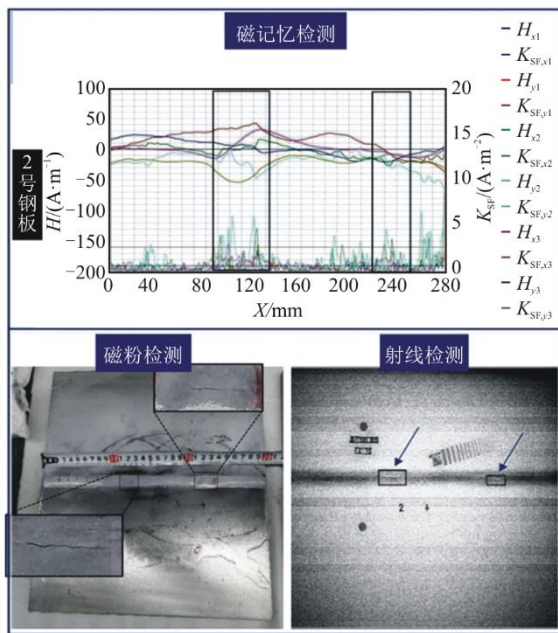


图 4 2 号钢板焊缝磁记忆检测与其他无损检测结果
Fig.4 The magnetic memory test and other non-destructive testing results of weld on No.2 steel plate

图 4 还示出了 2 号钢板的磁粉检测与射线检测验证结果。可以看出,磁粉检测在 110~125 mm 处呈现出了清晰可辨的磁痕,且在 215~230 mm 处也显示出了不连续的黑线。射线检测验证了上述结果,表现为在以上 2 处焊缝出现了亮白色的影像细节。结合磁记忆检测结果能够说明,这 2 处缺陷是引起磁场强度与磁场梯度变化的主要原因。但值得指出的是,在 220~280 mm 位置上,

通道 2 上的磁场强度与磁场梯度在 220~255 mm 区域(前)内变化明显小于 255~280 mm 区域(后),而射线检测却显示只在 220~255 mm 区域(前)内才存在缺陷影像,这表明磁记忆检测对缺陷的定位可能存在一定偏差,同时无缺陷部位由于应力集中等原因,也可能会引起异常磁记忆信号的出现。

3.2.3 3 号钢板的磁记忆检测结果

图 5 示出了 3 号钢板的磁记忆与其他无损检测结果。研究发现在 60~95 mm、110~155 mm、165~220 mm 3 个区域中出现异常磁记忆信号。可以看出,虽然通道 1 和通道 3 上所测磁场强度法向分量的变化幅度最大,但是通道 2 上测得的磁场强度曲线振荡次数更多,包括磁场强度切向分量与法向分量,且有明显的“过零点”现象。与此同时,通道 2 法向分量上的磁场梯度变化在上述三个区域内明显较大,表现为出现凸峰,远高于其他各类曲线的磁场梯度变化水平。

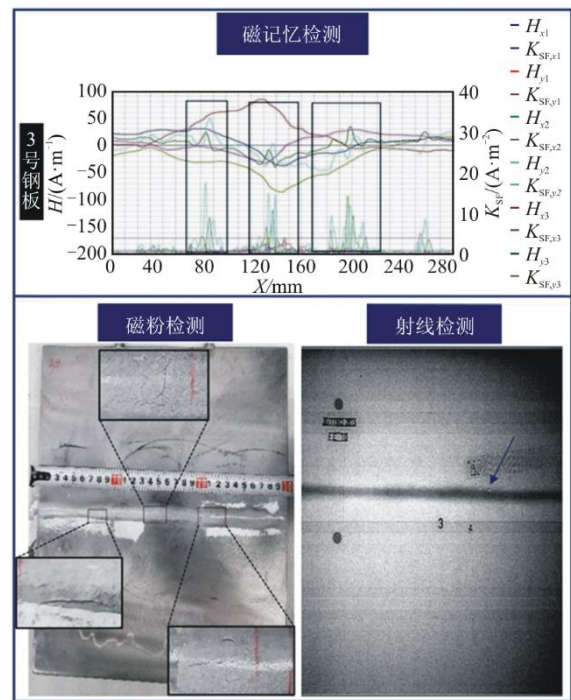


图 5 3 号钢板焊缝磁记忆与其他无损检测结果
Fig.5 The magnetic memory test and other non-destructive testing results of weld on No.3 steel plate

3 号钢板的磁粉检测结果显示,约在焊缝 70~90 mm、130~160 mm、200~220 mm 3 处出现了可见的黑线,其中第 1 处和第 3 处的磁痕方向平行于焊缝纵向(前者较为连续、后者相对分散),而第 2 处的磁痕方向则垂直于焊接方向,对应为

焊缝横向缺陷。另一方面，3 号钢板的射线检测结果，在上述区域中只有第 3 处检测到微弱的影像细节，其他位置则没有检测出缺陷信息。从以上结果可以看出，与射线检测相比，磁记忆检测与磁粉检测灵敏度更高。

3.2.4 4 号钢板的磁记忆检测结果

图 6 示出了 4 号钢板的磁记忆与其他无损检测结果。

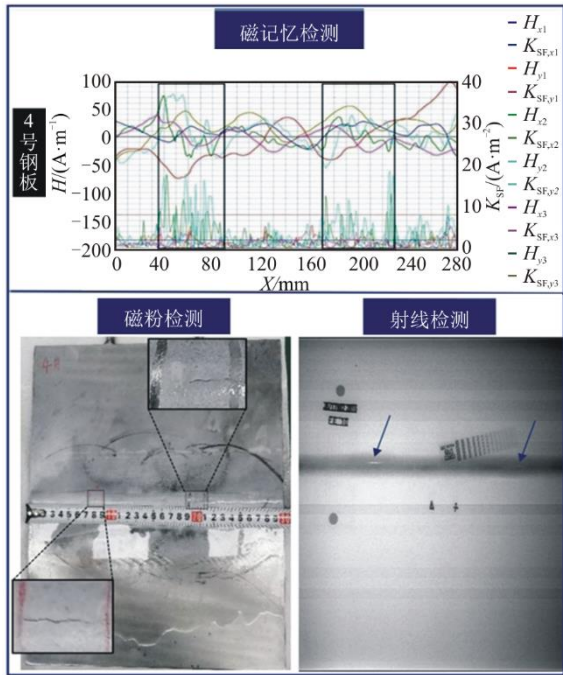


图 6 4 号钢板焊缝磁记忆与其他无损检测结果
Fig.6 The magnetic memory test and other non-destructive testing results of weld on No.4 steel plate

与前 3 块钢板相比，4 号钢板 3 个通道上的磁记忆信号在焊缝全区域振荡明显。其中通道 1 所测磁场强度切向分量的变化幅度最大，而通道 2 测得的磁场强度法向分量与切向分量曲线的突变次数则更多，且存在反复“过零点”的现象。

另一方面，通道 2 中的磁场梯度法向分量在 2 个区域内相对较高，分别为 35~90 mm 和 170~230 mm。此外，通道 3 中磁场梯度法向分量也出现了一些凸峰，相比其他各类曲线的磁场梯度，其变化水平明显较大。

图 6 还示出了 4 号钢板的磁粉检测与射线检测结果。能够发现，磁粉检测在 70~90 mm 处显示出了连续的黑线，且在 190~210 mm 处也呈现出了间断可辨的黑色磁痕。射线检测证实了上述结果，特别是在第 1 处位置，表现出了较为明显的亮白色细节。结合磁记忆结果可以认识到，3 个通道所测的磁场强度曲线虽然在 70~90 mm 与 190~210 mm 处变化较大，然而在焊缝其他位置也同样变化明显，因此对于 4 号钢板而言，只通过磁场强度曲线无法准确辨识缺陷位置。与磁场强度不同的是，所测磁场梯度值只在 35~90 mm 和 170~230 mm 处变化较大，因此更能够有效定位焊缝的潜在缺陷位置。

3.3 4 块钢板焊缝的磁记忆检测参数对比

表 1 示出了上述 4 块钢板不同 SFI 位置的磁记忆检测数据，包括磁场强度极值、区域内的磁场梯度极值与中值以及磁指数。由表 1 可以看出，所有磁场指示 SFI 处计算出的磁指数 m_i 均大于 2.0，表示存在表面磁场偏离。然而研究发现，该磁指数与钢板焊缝缺陷的大小并不呈单一线性对应关系。例如，磁粉与射线检测发现裂纹较为明显的 2 号与 4 号钢板第 1 处缺陷的磁指数分别为 2.502 和 2.765。而无明显缺陷的 1 号钢板，其 2 个 SFI 位置的磁指数分别高达为 4.078 和 5.007。此外，缺陷较小的 3 号钢板的第 2 处 SFI 位置，其磁指数为 2.134。综合以上结果可以发现，磁指数大于 2.0 的 SFI 位置处虽然值得注意，但是该数值并不能简单用于缺陷尺寸的定量评价。

表 1 4 块钢板的焊缝磁记忆检测结果

Tab.1 Magnetic memory test results of weld seams of the above 4 steel plates

钢板序号	焊接接头中 SFI 的位置/mm	H_{SFj} 的极值 (最小/最大值) / (A·m ⁻¹)	检测参数				备注
			SFI 的 K_{SFj} / (A·m ⁻²)	磁场梯度极值 $K_{max,j}$ / (A·m ⁻²)	$K_{mid,j}$ / (A·m ⁻²)	m_i	
1	70~110	-28.0/35.4	6 834	6 834	1 676	4.078	j=x/i=z
	180~220	-109.0/63.9	5 987	5 987	1 196	5.007	
2	90~125	-53.9/42.5	6 129	6 129	2 449	2.502	
	225~240	-0.8/3.5	4 662	4 662	1 834	2.520	
3	70~82	-30.8/60.0	17 738	17 738	6 789	2.613	
	121~131	-83.8/82.9	15 117	15 117	7 084	2.134	
4	172~201	-51.6/16.8	11 957	11 957	4 369	2.737	
	35~90	-74.3/76.9	17 839	17 839	6 452	2.765	
	170~230	-56.3/55	3 685	3 685	1 443	2.554	

4 结 论

本文研究了 20 钢板焊缝缺陷的磁记忆检测方法,并同时开展了磁粉检测与射线检测进行印证,得出了以下结论。

1) 钢板焊缝缺陷部位普遍存在磁记忆异常信号,例如在裂纹较为明显的 2 号与 4 号钢板上,测得的磁场强度切向分量与法向分量曲线都存在明显的突变现象,表明可以通过磁场强度曲线变化对焊缝缺陷进行初步表征。然而,上述曲线在缺陷部位处并不都呈现出反复“过零点”的现象。例如对于 2 号钢板第 2 处缺陷,其磁场强度法向分量曲线都在零点以下。

2) 在钢板焊缝没有明显缺陷的部位,磁记忆检测也会呈现出异常信号。例如 1 号钢板的磁记忆检测发现焊缝有 2 处位置存在信号异常,表现为磁场强度发生明显起伏与变化较大。然而,在这 2 个信号异常位置,射线检测并没有观测到缺陷痕迹,而磁粉检测也没有发现明显的磁痕。这表明局部应力集中等其他原因也会致使磁记忆检测信号异常。

3) 磁场梯度曲线是表征钢板焊缝缺陷的有效参数。在 4 块钢板焊缝的所有缺陷位置处,其法向分量上的磁场梯度均出现了明显的增加,表现为凸峰的出现。该结果表明能够通过磁场梯度值的变化判定钢板焊缝缺陷情况。

4) 在钢板磁记忆信号异常的位置,磁指数 m 均大于 2.0。然而磁指数与钢板焊缝缺陷的大小并不存在单一线性对应关系。这表明磁指数大于 2.0 的磁场指示 SFI 位置虽然值得注意,但该数值并不能简单用于缺陷尺寸的定量评价。

[参 考 文 献]

- [1] 赵龙志,杜广,胡勇,等. 20 钢材料表面 W-Cu 激光合金化性能研究[J]. 铸造技术, 2012(33): 1168-1170.
ZHAO Longzhi, DU Guang, HU Yong, et al. Study on performance of W-Cu laser alloying on surface of 20 steel[J]. Foundry Technology, 2012(33): 1168-1170.
- [2] 郑欢欢,刘鑫禹,陈亚楠,等. 20 钢强流脉冲电子束表面合金化的微观组织和性能[J]. 材料工程, 2018, 46(7): 127-135.
ZHENG Huanhuan, LIU Xinyu, CHEN Yanan, et al. Microstructure and properties of high current pulsed electron beam surface alloying on 20 steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(7): 127-135.
- [3] 周永丹,于艳涛. 高速冲击作用下 20 钢加工硬化行为[J]. 矿山机械, 2021, 49(9): 55-60.
ZHOU Yongdan, YU Yantao. Work hardening behavior of steel 20 under high-speed impact[J]. Mining & Processing Equipment, 2021, 49(9): 55-60.
- [4] 罗瑞强,贾世进,姜佳成,等. 20 钢熔化衬垫自动焊工艺研究及力学性能分析[J]. 金属加工(热加工), 2024(2): 66-69.
LUO Ruiqiang, JIA Shijin, JIANG Jiacheng, et al. Research and mechanical performance analysis of automated welding process for 20 steel melting pad[J]. Welding & Cutting, 2024(2): 66-69.
- [5] 陈海东,马铁军,张勇,张笑宇. 外加磁场闪光对焊 20 钢焊接接头组织分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 109-112.
CHEN Haidong, MA Tiejun, ZHANG Yong, et al. Microstructure analysis of welded joint of 20 steel by flash butt welding with external magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(2): 109-112.
- [6] 郝相帅. 20 钢管与 35CrMo 钢管接头的焊接工艺[J]. 焊接技术, 2015, 44(7): 88-90.
HAO Xiangshuai. Welding process of 20 steel pipe and 35CrMo steel pipe joint[J]. Welding Technology, 2015, 44(7): 88-90.
- [7] 陈坚,唐照国,黄煜. 20 钢换热管与 Q345R 钢管板的焊接工艺[J]. 化工管理, 2015(17): 184-186.
CHEN Jian, TANG Zhaoguo, HUANG Yu. Welding process of 20 steel heat exchange tube and Q345R steel tube plate[J]. Chemical Enterprise Management, 2015(17): 184-186.
- [8] 羊东明,朱原原,蔡锐,等. 825 合金/20 钢双金属复合管焊接工艺[J]. 焊接技术, 2015, 44(11): 33-36.
YANG Dongming, ZHU Yuanyuan, CAI Rui, et al. Welding process of 825 alloy /20 steel bimetal composite pipe[J]. Welding Technology, 2015, 44(11): 33-36.
- [9] 许骥,王鹏,焦德义. 船用 20 钢与 316L 不锈钢的异种钢管焊接工艺[J]. 船海工程, 2016, 45(1): 23-31.
XU Ji, WANG Peng, JIAO Deyi. Research on welding process of marine 20 steel and 316L stainless steel dissimilar materials pipe[J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(1): 23-31.
- [10] 薛根奇,胡延伟,袁吉增. Q345R 与 20 钢焊接工艺研究及生产应用[J]. 电焊机, 2021, 51(12): 67-70.
XUE Genqi, HU Yanwei, YUAN Jizeng. Research and application of welding technology of Q345R and 20 steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(12): 67-70.
- [11] 李军,张昕,王斌. 焊缝磁记忆检测[J]. 甘肃科技, 2010(23): 64-56.
LI Jun, ZHANG Xin, WANG Bin. Magnetic memory detection of welds[J]. Gansu Science and Technology, 2010(23): 64-56.
- [12] 杨伟东,李岩,徐贤,等. 基于金属磁记忆的汽轮机叶片早期诊断[J]. 宁夏电力, 2014(3): 63-67.
YANG Weidong, LI Yan, XU Xian, et al. Early diagnosis on turbine blades based on metal magnetic memory[J]. Ning Electric Power, 2014(3): 63-67.
- [13] 苏三庆,刘馨为,王威,等. 金属磁记忆检测技术研究新进展与关键问题[J]. 工程科学学报, 2020, 42(12): 1557-1572.
SU Sanqing, LIU Xinwei, WANG Wei, et al. Progress and key problems in the research on metal magnetic memory testing technology[J]. Chinese Journal of

- Engineering, 2020, 42(12): 1557-1572.
- [14] 张慧, 索忠卫. 磁记忆检测在压力容器检验中的应用[J]. 冶金丛刊, 2022(7): 111-113.
ZHANG Hui, SUO Zhongwei. Application of magnetic memory testing in pressure vessel inspection[J]. Engineering and Technology Research, 2022(7): 111-113.
- [15] 马斌, 徐海亮, 程康. 金属磁记忆方法在压力容器检验中的应用[J]. 新型工业化, 2022, 12(7): 58-62.
MA Bin, XU Hailiang, CHENG Kang. Application of metal magnetic memory method in pressure vessel inspection[J]. The Journal of New Industrialization, 2022, 12(7): 58-62.
- [16] 潘学豪, 陈悦, 邓淋方. 基于金属磁记忆技术的焊接缺陷检测研究综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(3): 147-156.
PAN Xuehao, CHEN Yue, DENG Linfang. Review of welding defect detection based on metal magnetic memory technology[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(3): 147-156.
- [17] 王文科, 何林发. Q345E 钢板应力集中的金属磁记忆检测[J]. 科技展望, 2016, 26(28): 134-135.
WANG Wenke, HE Linfa. Metal magnetic memory detection of Q345E steel plate stress concentration[J]. Science and Technology, 2016, 26(28): 134-135.
- [18] 徐坤山, 仇性启, 刘靖涛, 等. 热处理与应力集中对 Q345R 钢磁记忆检测结果的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 210-215.
XU Kunshan, QIU Xingqi, LIU Jingtao, et al. Effect of heat treatment and stress concentration on magnetic memory signal in Q345R steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(5): 210-215.
- [19] 兰清生, 张路根, 刘伟成, 等. 基于金属磁记忆效应 30CrMo 钢应力集中试验研究[J]. 压力容器, 2017, 34(12): 8-14.
LAN Qingsheng, ZHANG Lugen, LIU Weicheng, et al. Experimental study on stress concentration of 30CrMo steel based on metal magnetic memory[J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(12): 8-14.
- [20] 刘万超. 应力集中的磁记忆检测技术探讨[J]. 化学工程与装备, 2018(12): 258-260.
LIU Wanchao. Study on magnetic memory detection technique of stress concentration[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2018(12): 258-260.
- [21] 张路根, 兰清生, 张琦, 等. 基于磁记忆检测方法的 45 钢应力集中评价[J]. 无损检测, 2018, 40(2): 38-41.
ZHANG Lugen, LAN Qingsheng, ZHANG Qi, et al. Stress concentration evaluation of 45 steel based on magnetic memory detection method[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(2): 38-41.
- [22] 胡斌, 闫梁, 张砚耕, 等. 筒状构件应力集中磁记忆检测补偿方法研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 49-57.
HU Bin, YAN Liang, ZHANG Yangeng, et al. Research on magnetic memory detection and compensation method for early damage of tubular components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 49-57.
- [23] 戈浩. 焊接接头的磁记忆检测[J]. 无损检测, 2020, 42(9): 6-11.
GE Hao. Metal magnetic memory testing of welding joint[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(9): 6-11.
- [24] 鹿秀萍. 基于金属磁记忆的管道应力检测系统设计与试验研究[J]. 山东化工, 2022, 51(9): 177-181.
LU Xiuping. Design and experimental study of pipeline stress detection system based on metal magnetic memory[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(9): 177-181.
- [25] 曾繁宇, 张保平, 苗琴, 等. 基于磁记忆管道应力检测信号仿真和实验研究[J]. 管道技术与设备, 2023(4): 27-48.
ZENG Fanyu, ZHANG Baoping, MIAO Shen, et al. Simulation and experimental study of pipeline stress detection signals based on magnetic memory[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2023(4): 27-48.
- [26] 周兆明, 周文超, 喻建胜, 等. 金属磁记忆检测技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(8): 6-10.
ZHOU Zhaoming, ZHOU Wenchao, YU Jiansheng, et al. Research progress of metal magnetic memory testing technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(8): 6-10.

(责任编辑 邓玲惠)