

基于矫顽力的 12Cr1MoVG 焊接接头应力检测

任 强¹, 孙文龙², 陶立翔¹, 张光学², 张华军¹, 盛水平¹, 汪 宏¹

(1. 杭州市特种设备检验科学研究院, 杭州 310003; 2. 中国计量大学能源工程研究所, 杭州 310018)

摘要: 矫顽力检测是一种应力无损检测技术, 利用矫顽力与应力的关系, 能够准确地评估材料内部的应力状态。基于力磁耦合理论, 研究了在不同磁化方向下, 12Cr1MoVG 母材、12Cr1MoVG 同种钢焊接接头和 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头不同区域矫顽力与应力的关系。试验结果表明, 磁化方向平行于应力方向的矫顽力随着应力的增大先减小后增大; 磁化方向垂直于应力方向的矫顽力随着应力的增大而增大; 在拉伸过程中, 12Cr1MoVG 同种钢焊接接头的应力集中在母材区及热影响区; 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头的应力集中在 12Cr1MoVG 母材区及其热影响区。该研究结果为铁磁性材料的矫顽力检测提供了一定理论基础。

关键词: 矫顽力; 磁化方向; 磁畴; 拉伸应力

中图分类号: TM936; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)06-0001-06

Stress detection of 12Cr1MoVG weld joints based on coercive force

REN Qiang¹, SUN Wenlong², TAO Lixiang¹, ZHANG Guangxue², ZHANG Huajun¹, SHENG Shuiping¹, WANG Hong¹

(1. Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310003, China;

2. The Institute for Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Coercive force testing is a nondestructive testing technique for detecting stress, which utilizes the relationship between coercive force and stress to accurately evaluate the stress state inside a material. Based on the theory of force magnetic coupling, the relationship between the coercive force and stress at different positions of 12Cr1MoVG specimens, 12Cr1MoVG welded specimens of the same type of steels, and 12Cr1MoVG/P91 welded specimens of different types of steels under different magnetization directions was studied. The results showed that the coercive force which direction of magnetization parallels to the direction of stress decreased first and then increased with the increase of stress. The coercive force which the direction of magnetization perpendicular to the direction of stress increased with the increase of stress. During the stretching process, the stress of the 12Cr1MoVG welded specimens of the same type of steels was concentrated in the base metal zone and heat affected zone. The stress of the 12Cr1MoVG/P91 welded specimens of different types of steels was concentrated in the 12Cr1MoVG base metal zone and its heat affected zone. The research results provided theoretical basis for the detection of coercive force in ferromagnetic materials.

Key words: coercive force; direction of magnetization; magnetic domain; tensile stress

在工业生产中, 材料内部总是存在着不均匀的应力分布, 其中应力集中的部位最容易出现损伤, 如果应力超过危险阈值, 则很可能引发严重事故^[1-3]。因此, 应力检测在工业领域具有至关重要的地位, 可

以满足安全性、质量控制、性能评估和故障诊断等多方面需求^[4-5]。

在外磁场的作用下, 应力会引起铁磁性材料内部的磁畴重新排列, 从而导致磁力效应的产生, 这种磁力效应会对材料的磁性特征产生显著影响, 如磁导率、磁阻和矫顽力等^[6]。而由于矫顽力对应力和位错密度的变化极为敏感, 且通常与材料的力学性能呈线性关系, 所以矫顽力通常被广泛用作主要的磁性参数, 以评价材料的应力状态^[7]。NOVIKOV 等^[8]

收稿日期: 2023-11-20

作者简介: 任 强(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事特种设备的安全研究工作

通信作者: 张光学, zhangguangxue@cjlu.edu.cn

推导了沿应力方向和垂直于应力方向的矫顽力与应力的解析式，并进行了试验验证。任尚坤等^[9]研究表明铁磁性材料在拉应力作用下，若拉应力小于屈服强度，其内部应力对矫顽力的影响较小；若拉应力接近或大于屈服强度，矫顽力会急剧增大。宋永生等^[10]同样发现相对于弹性应变，矫顽力对塑性应变更加敏感。IVANOV 等^[11]指出在塑性变形阶段，塑性变形产生的位错密度是矫顽力增大的主要原因。任旭虎等^[12]对塑性变形的材料进行拉伸试验，发现矫顽力值会随着拉应力的增大而增大。杨理践等^[13-14]发现钢板的磁化强度平行于拉应力方向或垂直于压应力方向时，磁滞回线的面积会减小，从而使矫顽力减小；而圆环在受到外力时，矫顽力会随着应力的增大而增大。李玉坤等^[15]采用盲孔法与矫顽力法测量管道环焊缝区域的残余应力发现，两种方法测量得到的应力分布一致，验证了矫顽力法测量管道环焊缝区域残余应力的可行性。程凡菊等^[16]基于单向应力状态下的矫顽力与应力的关系表达式，推导了双向应力状态下的矫顽力与应力的关系表达式，并通过试验验证了其模型的准确性。综上，国内外开展了很多基于矫顽力的应力检测研究，但研究对象主要是单一均料的母材，在应力作用下，焊接接头各区域的应力-矫顽力关系尚不明确。

由于焊接接头各区域材料属性不同，在外力作用下，焊接接头各区域的应力变化规律会与母材大不相同，那么其矫顽力的变化也会有很大区别，故通过矫顽力能够表征各区域应力的变化。笔者通过测量平行以及垂直于应力方向的矫顽力，结合力磁耦合理论，对比分析了 12Cr1MoVG 母材、12Cr1MoVG 同种钢焊接接头和 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头在拉应力作用下不同区域矫顽力值的变化规律。

1 矫顽力检测原理

磁畴是固体材料中磁性行为的微观基础，在没有外部磁场的情况下，不同磁畴的磁矩方向是随机分布的。当外部磁场作用在材料上时，磁畴会重新排列，使大多数磁矩朝向与外部磁场方向一致，即磁化过程。磁化曲线与磁滞回线如图 1 所示，可见随着外部磁场强度的增加，材料的磁感应强度也随之增大，当材料中所有可磁化的原子和磁矩都被完全排列在与外部磁场相同的方向时，材料就会达到磁化饱和状态，进一步增加外部磁场的强度不会再增加总磁感应强度，将饱和磁感应强度记作 H_m ，饱和磁感应强度记作 B_m ；此时，若减小外部磁场强度，材料

的磁感应强度不沿原路径减小，且当外部磁场强度为 0 时，材料的磁感应强度也不为 0，此时，可将剩磁记作 B_r ；若继续施加反向磁场使得材料的磁感应强度为 0，那么施加的反向磁场强度即为矫顽力 H_c ，可用来表示着铁磁性材料磁化难易程度；随着反向磁场强度的增加，材料达到磁饱和状态；减小反向磁场强度，施加正向磁场，材料再次达到磁饱和状态，从而形成磁滞回线。

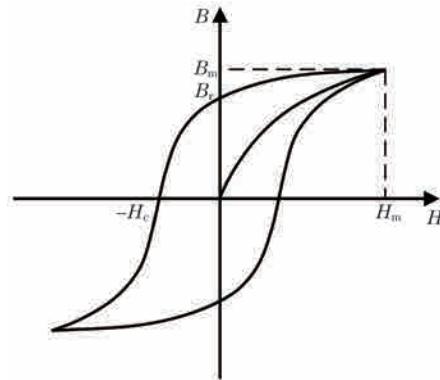


图 1 磁化曲线与磁滞回线

应力能够对铁磁性材料的磁性参数产生影响。在微观上，应力改变了磁畴壁的位置和性质，以及诱导磁畴的重新排列。磁畴在无应力情况下呈现杂乱的磁矩取向，在宏观上不显示磁性；当施加拉应力时，磁矩的方向会发生转变，与拉应力方向一致；当施加压应力时，磁矩的方向就会与压应力方向垂直。

在理论方面，NOVIKOV 等^[8]推导了单轴应力下矫顽力与应力的解析式，即

$$\begin{cases} H_{cp} = B_1 + A_1 e^{-\beta_1 \sigma} + B_1 k_1 \sigma \\ H_{cv} = B_2 - A_2 e^{-\beta_2 \sigma} + B_2 k_2 \sigma \\ B_1 = H_{co} - A_1 \\ B_2 = H_{co} + A_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： H_{cp} 为平行于应力方向所测得的矫顽力； H_{cv} 为垂直于应力方向所测得的矫顽力； σ 为单轴拉伸所受应力； H_{co} 为无应力状态下的矫顽力； A_1, A_2, B_1, B_2 为晶体表征常数； $\beta_1, \beta_2, k_1, k_2$ 为多晶体中与磁致伸缩常数 λ_{100} 均值成比例的参数。

因此，可通过测量矫顽力有效地评估材料内部的应力状态。

2 试验设备及方法

试验对象为 12Cr1MoVG 母材、12Cr1MoVG 同种钢焊接接头和 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头，试样类型为板材，其厚度为 5 mm，拉伸试样尺寸及

检测位置如图2所示。12Cr1MoVG同种钢焊接接头的热处理工艺为700℃固溶处理2 h, 随炉冷却; 12Cr1MoVG/P91异种钢焊接接头的热处理工艺为350℃消氢处理+760℃固溶处理6 h, 随炉冷却。

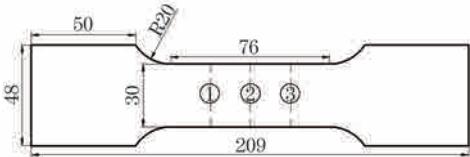


图2 拉伸试样尺寸及检测位置示意

在进行应力检测试验之前, 采用显微硬度计来测量焊接接头各区域的硬度值, 通过硬度反映焊接接头各区域的力学性能。测量方案依据标准GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》, 在热影响区, 每间隔0.5 mm测量一次; 在母材区和焊缝区, 每间隔1 mm测量一次。

在应力检测试验中, 采用拉伸试验机进行拉伸试验, 拉伸速率为 $1.14 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 应力间隔为40 MPa, 每次加载结束后停留3 min进行矫顽力检测, 检测位置如图2所示, 在试样的平行段处设有3条检测线, 其间隔为15 mm。矫顽力检测采用MC-WF-04型磁滞无损检测设备, 其测量范围为 $1\sim 50 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1}$, 测量误差小于5%, 设备实物如图3所示, 检测探头的磁化回路如图4所示, 探头厚度为6 mm, 探头左内臂与右内臂的间距为12 mm。



图3 磁滞无损检测设备实物

3 试验结果与分析

3.1 不同应力下 12Cr1MoVG 母材的矫顽力

受材料加工工艺影响, 材料各区域的应力分布不均匀, 故采用矫顽力相对值分析各区域的应力变化规律, 矫顽力相对值为应力状态下矫顽力与无应力状态下矫顽力的比值。12Cr1MoVG母材各位置

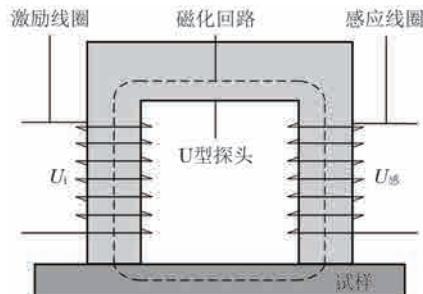
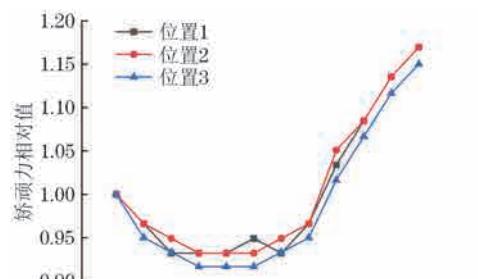
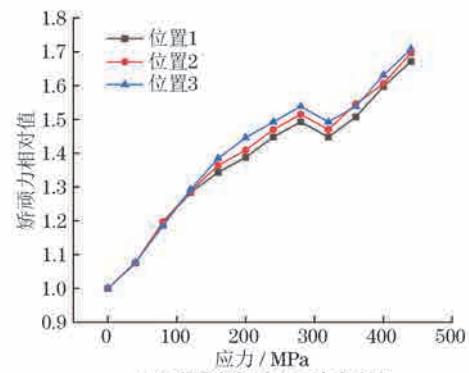


图4 检测探头的磁化回路示意

的矫顽力检测结果如图5所示, 可见磁场方向平行于应力方向时, 矫顽力相对值随应力大的呈现先减小后增大的趋势。当应力小于200 MPa时, 拉应力使磁畴的磁矩取向偏向于拉应力方向, 那么材料在外部磁场的作用下更容易达到磁饱和状态, 故矫顽力相对值减小; 当应力大于200 MPa时, 材料内部的位错密度不断增大, 位错阻碍了磁畴组织的运动, 那么材料在外部磁场作用下就难以达到磁饱和状态, 导致矫顽力相对值增大。磁场方向垂直于应力方向时, 矫顽力相对值随应力的增大而增大, 这是因为拉应力使磁畴的磁矩取向偏向于拉应力方向, 应力越大, 越偏向于拉应力方向, 而磁化方向与应力方向垂直, 那么就需要施加强度更大的磁场使磁畴的磁矩取向偏向于磁化方向, 故应力越大, 矫顽力相对值越大。



(a) 磁场方向平行于应力方向



(b) 磁场方向垂直于应力方向

图5 12Cr1MoVG 母材各位置的矫顽力检测结果

此外, 图 5(a)的矫顽力相对值变化较小, 不利于判断应力集中区域; 图 5(b)的矫顽力相对值与应力的关系呈现明显的线性关系且矫顽力相对值变化较大, 易于描述应力集中区域。在图 5(b)中, 位置 3 的矫顽力相对值大于位置 1 和位置 2 的, 故在拉伸过程中, 应力会逐渐集中在拉伸试样平行段的位置 3 处。

3.2 不同应力下 12Cr1MoVG 同种钢焊接接头的矫顽力

12Cr1MoVG 同种钢焊接接头各区域的硬度分布如图 6 所示, 可以看到, 热影响区的宽度为 3 mm, 焊缝区的宽度为 13.5 mm。12Cr1MoVG 母材的硬度约为 170 HV, 热影响区的硬度呈上升趋势, 从 170 HV 过渡到 260 HV, 焊缝区的硬度约为 240 HV。

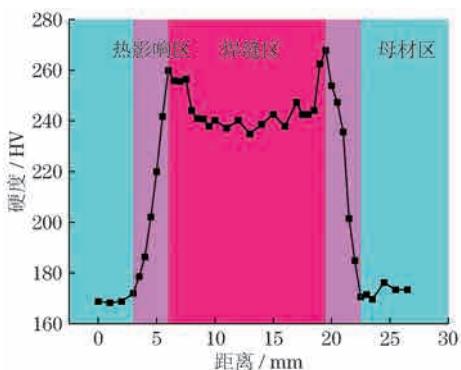
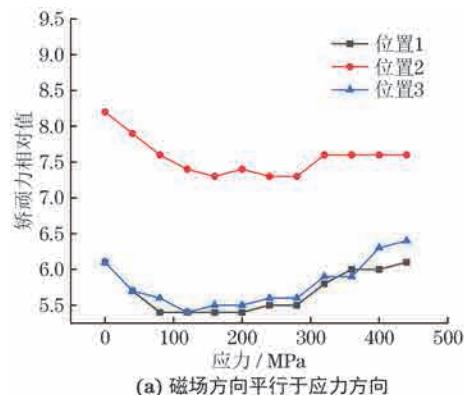


图 6 12Cr1MoVG 同种钢焊接接头各区域的硬度分布

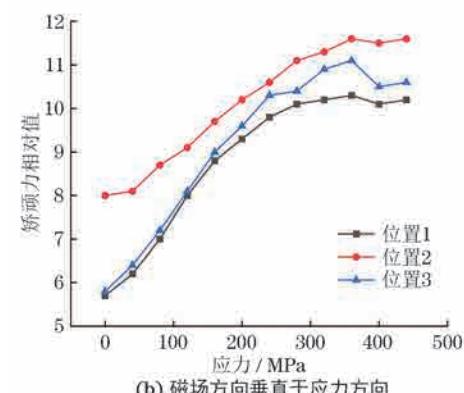
12Cr1MoVG 同种钢焊接接头各位置的矫顽力检测结果如图 7 所示, 位置 1 和 3 主要包含母材区和热影响区, 位置 2 主要包含焊缝区。由图 7 可以看到, 在拉伸过程中, 位置 2 的矫顽力值最大, 这是因为焊缝区的硬度最大, 不易达到磁饱和状态。12Cr1MoVG 同种钢焊接接头各位置的矫顽力相对值如图 8 所示, 图 8(a)和(b)中位置 1 和 3 的矫顽力相对变化值比位置 2 的大, 表明随着拉应力的增大, 热影响区和母材区的应力增长速率大于焊缝区的。这是因为焊缝区的硬度大于热影响区和母材区的, 热影响区和母材区最先发生塑性变形并出现颈缩现象, 故应力会逐渐集中在热影响区和母材区。

3.3 不同应力下 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头的矫顽力

12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头各区域硬度分布如图 9 所示, 可以看到, 热影响区 1 的宽度为 3 mm, 焊缝区的宽度为 6.5 mm, 热影响区 2 的宽度为 1 mm。12Cr1MoVG 母材区硬度约为 190 HV, 随着向焊缝区靠近热影响区 1 的硬度呈上升趋势, 焊缝区的硬度约为 240 HV, 随着向 P91 母材区靠近热

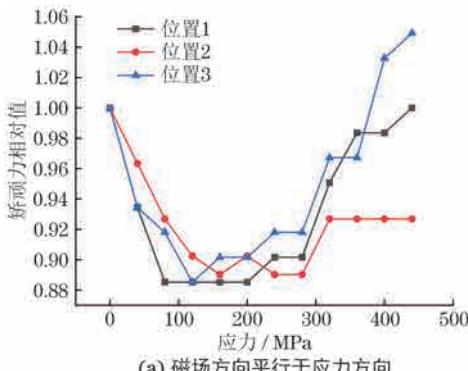


(a) 磁场方向平行于应力方向

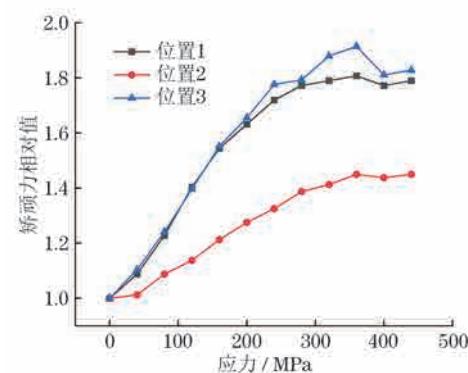


(b) 磁场方向垂直于应力方向

图 7 12Cr1MoVG 同种钢焊接接头各位置的矫顽力检测结果



(a) 磁场方向平行于应力方向



(b) 磁场方向垂直于应力方向

图 8 12Cr1MoVG 异种钢焊接接头各位置的矫顽力相对值影响

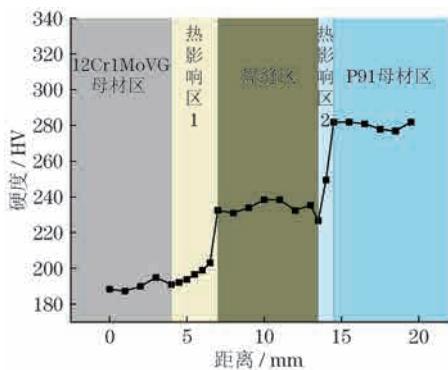
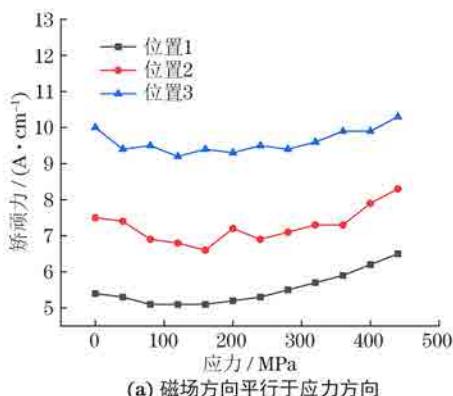


图 9 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头硬度分布

12Cr1MoVG/P91异种钢焊接接头各位置的矫顽力检测结果如图10所示,位置1主要包含12Cr1MoVG母材区和热影响区1,位置2主要包含热影响区1、焊缝区和热影响区2,位置3主要包含P91母材区和热影响区2。可以看到,在拉伸过程中,位置3的矫顽力最大,位置1的矫顽力最小,这是因为12Cr1MoVG母材的硬度相对较小,更容易达到磁饱和状态。12Cr1MoVG/P91异种钢焊接接头各位置的矫顽力相对值如图11所示,图11(a)和(b)中位置1的矫顽力相对值最大,说明随着拉应力的增大,12Cr1MoVG母材区和热影响



(a) 磁场方向平行于应力方向

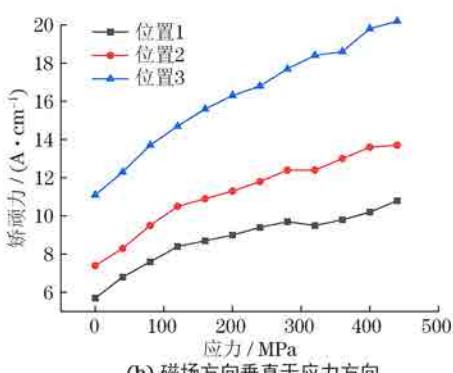
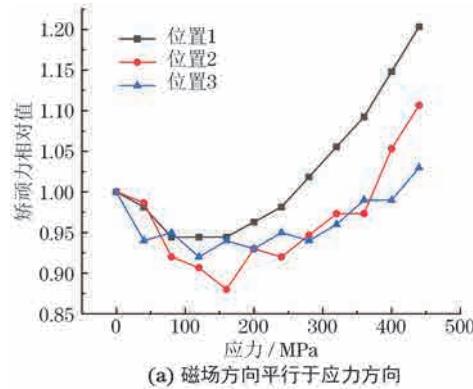


图 10 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头各位置的矫顽力
检测结果



(a) 磁场方向平行于应力方向

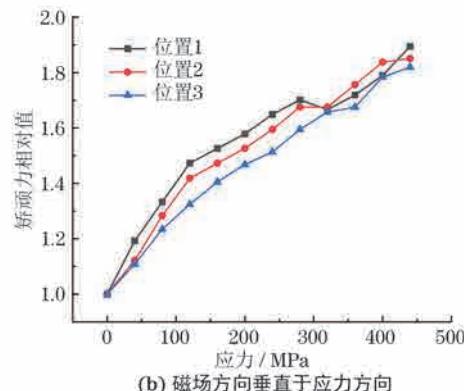


图 11 12Cr1MoVG/P91 异种钢焊接接头各位置的
矫顽力相对值

区1的应力增长速率大于其他区域的。这是因为12Cr1MoVG母材区和热影响区1的硬度小于其他区域的,从而应力逐渐集中在12Cr1MoVG母材区和热影响区1。

4 结论

为探究母材及其焊接接头在外力作用下各区域应力的变化规律,采用拉伸试验,在线测量了12Cr1MoVG母材、12Cr1MoVG同种钢焊接接头和12Cr1MoVG/P91异种钢焊接接头各区域的矫顽力值,得到了各区域应力与矫顽力的变化规律,并利用矫顽力相对值表征了应力集中区域,主要结论如下。

(1) 在拉伸前期,应力使磁畴的磁矩方向偏向于应力方向,导致磁化方向平行于应力方向的矫顽力随着应力的增大而减小,磁化方向垂直于应力方向的矫顽力随着应力的增大而增大。

(2) 在拉伸过程中,同种钢焊接接头的应力会集中在母材区及热影响区;异种钢焊接接头的应力会集中在12Cr1MoVG母材区及其热影响区。

(3) 在拉伸中后期,无论磁化方向平行于应力方向还是垂直于应力方向,位错阻碍了磁畴组织的

运动, 导致矫顽力随着应力的增大而增大。

参考文献:

- [1] WANG Z D, YAO K, DENG B, et al. Quantitative study of metal magnetic memory signal versus local stress concentration[J]. NDT & E International, 2010, 43(6): 513-518.
- [2] ZHOU D, PAN M, HE Y, et al. Stress detection and measurement in ferromagnetic metals using pulse electromagnetic method with U-shaped sensor[J]. Measurement, 2017, 105: 136-145.
- [3] REN S, REN X. Studies on laws of stress-magnetization based on magnetic memory testing technique[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 449: 165-171.
- [4] 田野, 罗宁, 陈翠翠, 等. 基于双励磁场的管道应力内检测工程应用研究[J]. 石油机械, 2023, 51(5): 117-125.
- [5] WILSON J W, TIAN G Y, Barrans S. Residual magnetic field sensing for stress measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(2): 381-387.
- [6] 任旭虎, 葛安凤, 冯阳, 等. 基于矫顽力的应力无损检测装置设计与开发[J]. 仪表技术与传感器, 2022, (12): 45-50.
- [7] 沈正祥, 吴彩保, 李靖琳, 等. 热处理对 35CrMo 钢磁性影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(5): 221-225.
- [8] NOVIKOV V F, YATSENKO T A, BASHAREV M S. Coercive force of low-carbon steels as a function of uniaxial stress. Part I[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2001, 37(11): 799-804.
- [9] 任尚坤, 王彦民. 45#冷轧钢在拉应力作用下的磁性特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, (3): 138-140.
- [10] 宋永生, 丁幼亮, 曹一山, 等. 金属磁记忆检测方法在钢结构静载与疲劳试验中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(12): 125-128.
- [11] IVANOV A M, VASHENKO S, S. Changes of coercive force of steel samples with various ductility reached by thermomechanical processing at stretching[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2009, 25(3): 269-272.
- [12] 任旭虎, 孙晓, 李德文, 等. 基于矫顽力与剩磁的铁磁性材料应力测量[J]. 中国测试, 2018, 44(3): 16-22.
- [13] 杨理践, 张良, 高松巍. 基于矫顽力的铁磁性材料应力检测技术[J]. 无损检测, 2014, 36(12): 65-68.
- [14] 杨理践, 吕铮, 高松巍. 基于矫顽力特性的钢板应力检测技术[J]. 仪表技术与传感器, 2016, (11): 31-34.
- [15] 李玉坤, 杨进川, 焦守田, 等. 基于矫顽力的X80管道焊接残余应力测量方法研究[J]. 压力容器, 2022, 39(9): 9-18.
- [16] 程凡菊, 李坤, 丁融, 等. X80管线钢矫顽力与应力关系[J]. 油气储运, 2022, 41(11): 1332-1340.