

磁控焊缝跟踪传感器非对称纵向磁场下的焊缝识别

秦子濠¹, 李湘文¹, 郑学军¹, 洪波¹, 李继展², 周芙蓉³

(1. 湘潭大学, 机械工程学院, 湘潭, 411105; 2. 合肥通用机械研究院有限公司, 合肥, 230031;
3. 湘潭电机股份有限公司, 湘潭, 411105)

摘要: 针对纵向磁场作用下的电弧难提取焊缝信息的问题, 设计一种由 3 个纵向分布磁感线圈组成的‘山’形分布纵向磁场传感器. 利用 COMSOL 软件模拟非对称纵向磁场作用电弧形态. 取焊接过程电弧电压分布对应的磁感应强度作为焊缝识别试验的磁感应强度. 用高速摄影仪拍摄非对称纵向磁场作用下的电弧运动轨迹, 并与新型传感器设计的电弧运动轨迹进行比较, 验证纵向磁场传感器产生非对称纵向磁场的电弧形态变化. 结果表明, 非对称纵向磁场能控制电弧进行焊缝识别, 并能解决窄间隙焊接过程中的咬边和侧壁不融合. 该方法为磁控焊缝跟踪传感器在窄间隙焊接的应用开辟了新的方向.

创新点: (1) 设计一种由 3 个纵向分布磁感线圈组成的‘山’形分布纵向磁场传感器, 该传感器产生的非对称纵向磁场能控制电弧提取焊缝信息.

(2) 该传感器能改变电弧热分布, 从而解决窄间隙焊接过程中的咬边和侧壁不融合.

关键词: 纵向磁场传感器; 非对称纵向磁场; 电弧形态; 电弧电压; 焊缝识别

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220618001

0 序言

在焊接过程中, 焊缝的位置会实时变化. 机器人离线编程和示教存在编程效率低、教学工作量大的缺点, 严重影响了焊接效率和焊接质量. 开发出低成本、高效的自动化焊接技术是提高焊接效率和焊缝质量的有效途径. 磁控技术已被广泛运用到材料加工的过程中, 在溅射镀膜、钢材铸造、粉末冶金、焊接等领域受到广泛关注^[1-4]. 其中, 磁控焊接技术是在焊接过程中添加磁场控制电弧的运动轨迹, 获得优良性能的焊缝, 具有巨大的应用前景. 自 1962 年 Brown^[5] 将磁场引入焊接过程中, 发现磁场能搅拌熔池, 形成细化的晶粒, 显著提高了焊接接头的力学性能. 附加式传感器与电弧有一定距离, 不能实时跟踪焊缝. 电弧传感器依赖焊接工艺参数变化获取焊缝信息, 能实时跟踪焊缝^[6]. 总而言之,

相较于传统机械式电弧传感器, 磁控电弧传感器具有无机械震动、噪声低、稳定性好的特点, 但磁控电弧传感器不能适应所有坡口工件.

磁控焊接技术的磁控传感器产生的磁场主要分为横向磁场和纵向磁场两类. 横向磁场 (TMF) 也称为垂直磁场, 磁场方向与焊枪中心轴垂直. Wang 等人^[7] 施加交流的横向磁场使钨极惰性气体保护焊 (TIG) 电弧发生摆动, 增加了电弧的加热面积, 解决窄间隙焊缝侧壁不融合问题. Chen 等人^[8] 施加周期性横向的复合磁场, 以辅助高速熔化极气体保护焊 (GMAW) 在较高焊接速度下抑制咬边缺陷. Matsumoto 等人^[9] 研究了非均匀交流横向磁场中电弧的行为, 发现电弧摆动幅度随着磁场强度增大而增大, 但电弧热量密度随着磁场强度增大而减小, 并通过施加非均匀交流横向磁场防止了 TIG 电弧热量密度减小. 在交变的横向磁场作用下, TIG 电弧的长度变化引起焊接工艺参数变化, 焊接工艺参数变化反映出焊枪与工件之间距离变化, 洪波等人^[10] 将磁场控制电弧的技术用到焊接自动化领域, 设计一种磁控电弧传感器, 实现了焊缝偏差信息检测与实时的焊缝跟踪. 横向磁场能改善电弧的热分布, 使得熔池表面受热均匀、焊缝成

收稿日期: 2022 - 06 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11832016, 51775471); 湖南创新型省建设专项重大标志性创新示范项目 (2019XK2303); 长沙株洲湘潭标志性工程技术项目 (2020GK2014); 合肥通用机械研究院有限公司项目 (20213ZK).

形好, 但横向磁场传感器也存在励磁磁头体积大、灵活性差等缺点。

纵向磁场 (LMF), 也被称为同轴磁场, 磁场的方向与焊枪的中心轴线相同。在外加纵向磁场的作用下, 电弧发生旋转^[11-12]。殷咸青等人^[13]通过外加间歇交变纵向磁场, 影响 TIG 电弧在铝合金工件表面温度的分布, 并搅拌熔池, 达到均匀化学成分和细化晶粒的效果。Liu 等人^[14]通过施加纵向磁场导致了 TIG 电弧平均热量输入减少, 并改善了焊接金属在铜板上的润湿行为。纵向磁场能搅拌熔池, 具有细化组织晶粒, 提高接头力学性能的优点, 但对称的纵向磁场不能改变电弧的对称形态。Urusova 等人^[15]提出了一种圆柱螺旋形状的数值模拟方法, 这种方法是对电子温度波动的“网络”模拟的补充, 它增加了计算过程中随机发生的电子温度分布数值不对称性。这种不对称性可以被外磁场“拾取”, 并不断增大到一定值, 足以形成弧柱螺旋结构, 这种螺旋结构能记录电弧随时间变化的位置信息。然而, 这种改变电弧形态的方法还没有应用于焊缝跟踪领域。

针对上述问题, 设计了一种‘山’形分布的纵向磁场传感器。纵向磁场传感器产生的非对称的纵向磁场改变电弧对称的形态, 从而解决纵向磁场作用

下的电弧难提取焊缝信息的问题。通过 COMSOL 软件建立在非对称纵向磁场作用下的电弧模型, 选取合适的磁感应强度作为焊缝识别试验条件。通过控制纵向磁场强度的大小和分布, 研究纵向磁场作用下的电弧电压随电弧长度变化而变化的传感特性, 该传感特性实时反映焊缝坡口形貌从而实现焊缝的识别。该方法为磁控焊缝跟踪传感器在窄间隙焊接的应用开辟了新的方向。

1 纵向磁控传感器

1.1 纵向磁控传感器的设计

图 1a 为传感器的实物图, 在传感器上端面和下端分别有 4 个螺纹孔, 其中 2 对对称孔用来连接进气管和出气管对磁感线圈进行冷却, 另外 2 对对称孔用来安装导磁铁芯。传感器外侧有 3 个连接螺纹孔。图 1b 为传感器内部示意图, 传感器内部由焊枪、喷嘴、磁感线圈和保护气罩组成。图 1c 为传感器的尺寸图, 中间的激励线圈的直径为 3 cm, 左右两边的激励线圈直径为 1 cm, 左右两边的铜线圈中心距离中心轴线的距离为 3 cm。传感器参数尺寸见表 1。

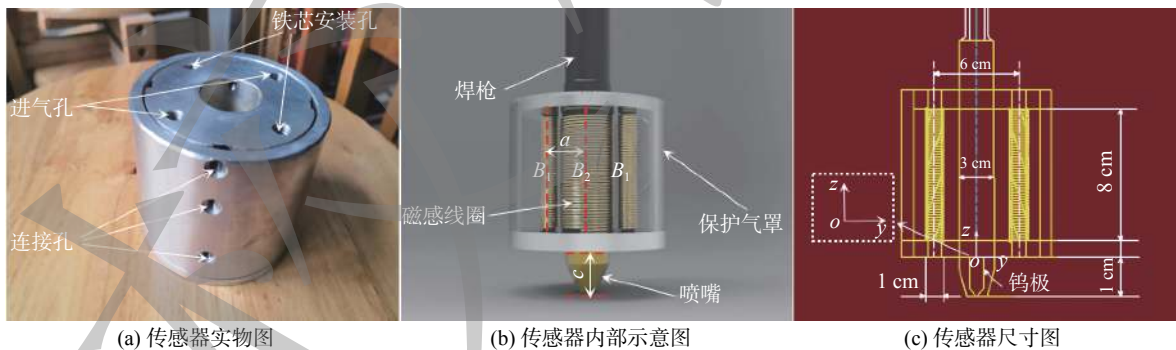


图 1 纵向磁控传感器

Fig. 1 Longitudinal magnetic control sensor. (a) physical image of sensor; (b) sensor interior diagram; (c) sensor size diagram

表 1 传感器参数尺寸

Table 1 Sensor parameter size

中间线圈直径 B_1/cm	左、右线圈直径 B_2/cm	左、右线圈中轴线距离 a/cm	钨极尖端到下端面距离 c/cm	线圈高度 h/cm	钨极直径 d/cm
3	1	6	1	8	0.32

1.2 纵向磁控传感器的非对称纵向磁场

利用商用有限元软件 COMSOL 对线圈进行了有限元模拟, 分析了纵向磁控传感器的磁场分布。

图 2 左侧为由铁芯、线圈、钨极组成的几何模型。图 2 右侧为中间线圈 300 匝激励电流 5 A 和右线圈 200 匝激励电流 3 A 条件下的磁力线。图 2 右侧

中, 钨极右边磁感线圈磁力线密度要大于钨极左边的磁力线密度. 为了直观了解钨极两边的磁感应强度大小, 选取距离钨极尖端 5 mm 的水平线上 z 方向的磁场强度, 如图 3 所示. 在图 3 中, 1 和 1', 2 和 2' 分别为钨极两边的对称点, 从图 3 中可知钨

极中轴线两侧磁感应强度分布不对称. 中心线圈 B_1 和右线圈 B_2 的磁感应强度耦合, 导致钨极右边磁感应强度下降趋势比钨极左边磁感应强度下降趋势要缓, 钨极对称轴两边的磁感应强度不对称分布.

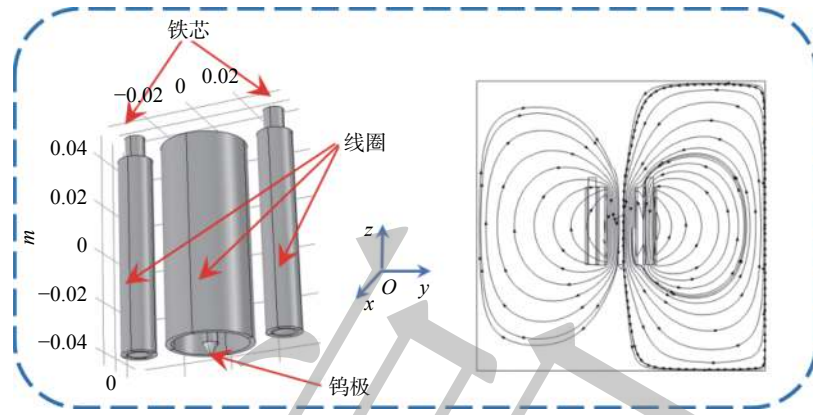


图 2 磁控传感器磁感线分布

Fig. 2 Magnetic field line distribution of magnetic control sensor

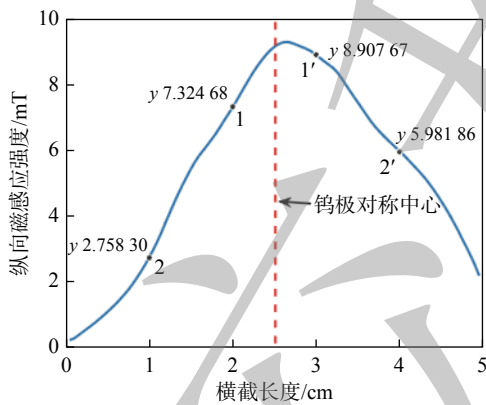


图 3 z 方向磁感应强度曲线分布

Fig. 3 Distribution of magnetic induction intensity curve in Z direction

1.3 纵向磁场作用下的电弧数值模拟

焊接电弧由带电粒子组成, 电弧的粒子运动轨迹会影响电弧温度的分布和电流路径, 也是影响电弧稳定的主要因素. 当电弧粒子受到外界磁场的影响时, 电弧带电粒子的运动轨迹将发生变化, 导致电弧的温度分布和电流路径发生变化^[16].

为了模拟电弧燃烧过程, 应用 COMSOL 软件以下模块: 层流、流体传热、电流、磁场, 将多个物理场进行耦合得到电弧形态和电弧电压. 该模型由 8 个方程描述, 包括动量守恒方程 (式 (2)), 其中考虑洛伦兹力并由气体连续性方程 (式 (1)) 和能量守恒方程 (式 (3)) 补充, 利用麦克斯韦方程组和欧姆定律 (式 (5)~式 (8)) 计算电磁场.

1.3.1 电弧数学模型

为了得到合理的计算结果采用磁流体力学方程组, 做出如下假设:

- (1) 电弧是连续的, 层流的等离子体导体, 并且满足局部热力学平衡状态.
- (2) 放电气体为纯氩气, 其电导率、热导率仅为温度的函数.
- (3) 外加恒定非对称纵向磁场, 没有考虑鞘层区的复杂物理过程.

基于上述假设, 电弧等的控制方程如下^[17]:

气体连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \nabla P + J \times B + \rho g \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{cp} \nabla H \right) + \frac{J \cdot J}{\sigma} + \frac{5kb}{2} \left(\frac{J}{cp} \cdot \nabla H \right) - S_r \quad (3)$$

焓值的积分方程

$$H = \int_{T_{ref}}^T cpdT \quad (4)$$

电流方程

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = 0 \quad (5)$$

电流密度方程

$$J = -\sigma(\nabla \Phi) \quad (6)$$

磁矢势方程

$$\nabla^2 A = \mu J \quad (7)$$

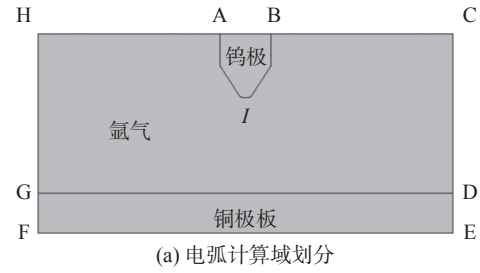
磁通量密度方程

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

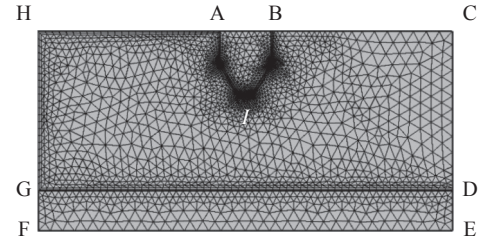
式中: ρ 为氩气的密度; μ 为氩气动力黏度; H 为焓值; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; λ 为氩气的热导率; c_p 为比热容; σ 为电离气体的电导率; Φ 为电势; k_b 为玻耳兹曼常数, $k_b = 1.3 \times 10^{-20}$ J/K; S_r 为辐射热; T 为温度; T_{ref} 为参考温度, $T_{ref} = 273$ K; t 为时间; v 为速度; B 为磁感应强度; A 为磁矢势; J 为电流密度; g 为重力加速度。

1.3.2 物理模型和边界条件

为了提高收敛程度和计算速率采用二维几何模型, 电弧的物理模型如图 4a 所示, 其中钨极到底板的高度为 6 mm, 铜基板厚度为 2 mm, 阴极直径为 2.8 mm, 钨极尖角为 60°, 求解域为氩气区域。网格划分方式选择用户自定义, 如图 4b 所示。



(a) 电弧计算域划分



(b) 电弧网格划分

图 4 电弧模型

Fig. 4 Arc model. (a) arc calculation domain division; (b) arc grid division

图 4a 中, 在钨极的顶部 AB 处施加焊接电流密度边界条件, 底部 FE 处施加接地边界条件, HA 和 BC 处为保护气体入口处, 施加保护气体速度边界条件, 在 BCDGHAI 区域施加非对称纵向磁场。电弧边界条件见表 2。

表 2 电弧的边界条件
Table 2 Boundary conditions of arc

边界	速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	压强 p/Pa	温度 T/K	电势 Φ/V	磁矢势 $A/(Wb \cdot m^{-1})$
AB	—	—	293	$I/(\pi R^2)$	$\partial A/\partial n = 0$
ABI	—	—	1 000	$\partial \Phi/\partial n = 0$	$\partial A/\partial n = 0$
BCDGHAI	—	101 325	3 000	$\partial \Phi/\partial n = 0$	$\partial A/\partial n = 0$
HA和BC	0.86	—	293	$\partial \Phi/\partial n = 0$	$\partial A/\partial n = 0$
EF	—	—	293	$\partial \Phi/\partial n = 0$	$\partial A/\partial n = 0$

1.3.3 计算结果与讨论

1.3.3.1 电弧形态变化

图 5a 为无外加磁场时, 150 A 电弧为锥形电弧。图 5b 为无外加磁场时, 距离工件高度 0.5 mm 的温度分布, 从图 5b 中可知, 温度集中在中心, 呈现对称分布。图 5c 为施加 20 mT 的对称纵向磁场后 150 A 电弧形状发生的变化, 电弧底部扩展, 电弧顶部收缩, 电弧形状由原来无外加纵向磁场的圆锥形电弧变为钟罩形电弧。在外加纵向磁场作用下发生电弧旋转, 旋转产生的洛伦兹力和离心力的合力使电弧中的带电粒子不断向外漂移, 带电粒子在边缘处汇聚, 最终内外电弧压力平衡, 从宏观上表

现出中空的钟罩形电弧。图 5d 为施加 20 mT 的对称纵向磁场, 距离工件高度 0.5 mm 的温度分布, 从图 5d 中可知, 最高温度分布在电弧中心两侧, 呈现双峰对称分布。图 5e 为施加 20 mT 非对称纵向磁场后 150 A 电弧形状发生的变化, 电弧中心部分电子向外漂移, 形成了钟罩形电弧。图 5f 为施加 20 mT 非对称纵向磁场, 距离工件高度 0.5 mm 的温度分布, 从图 5f 可知, 左边最高温度 5 903 K 出现在 -4.11 mm 处, 右边最高温度 5 733 K 出现在 4.46 mm 处, 呈现双峰不对称分布。将图 5e 中左右两边电弧进行对比发现, 右侧电弧扩张半径比左侧电弧扩张半径要大, 说明非对称纵向磁场改变

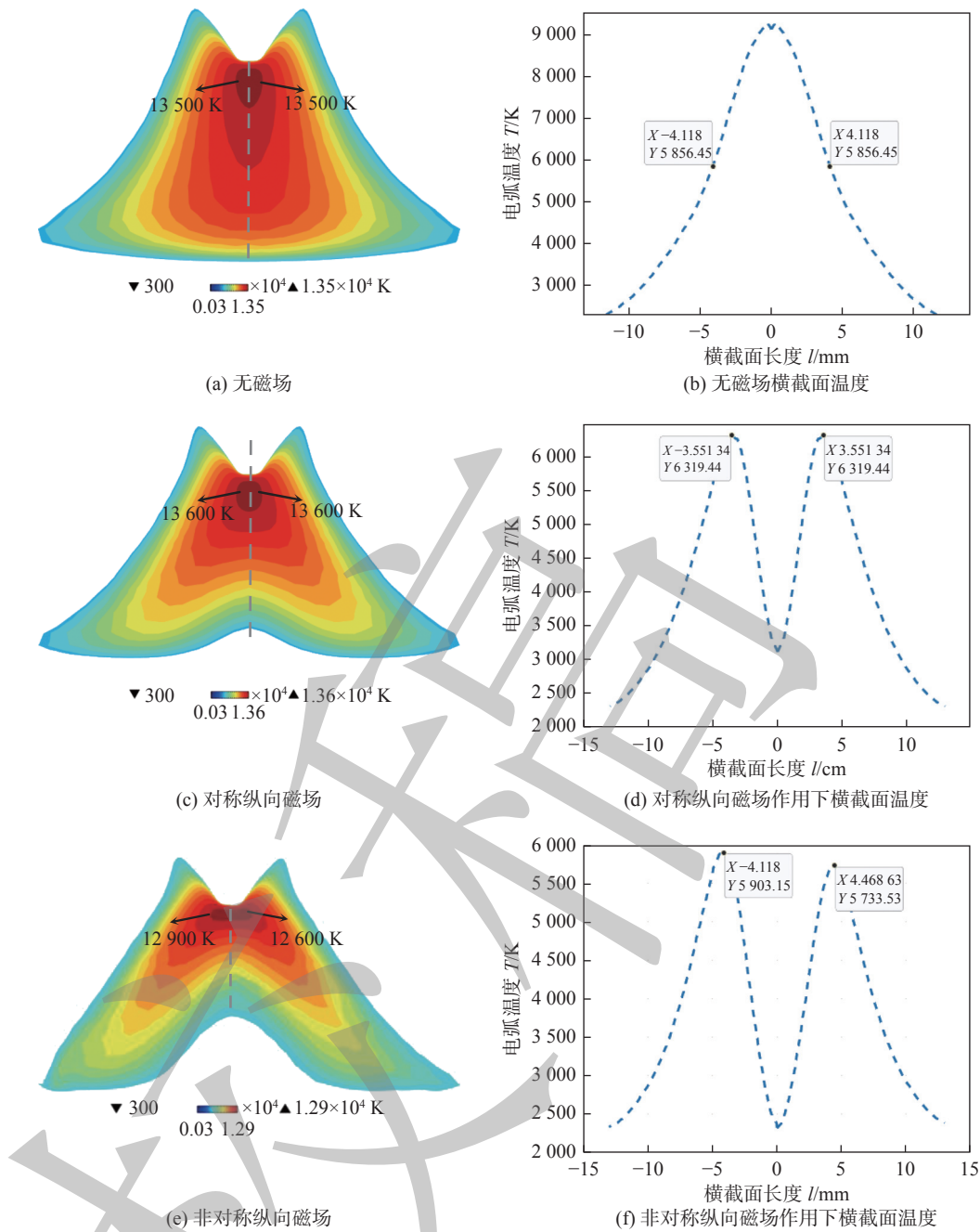


图 5 不同磁场强度下电弧温度分布

Fig. 5 Arc temperature distribution under different magnetic field strength. (a) no magnetic field; (b) cross section temperature without magnetic field; (c) symmetrical longitudinal magnetic field; (d) cross section temperature under symmetrical longitudinal magnetic field; (e) asymmetric longitudinal magnetic field; (f) cross section temperature under asymmetric longitudinal magnetic field

了电弧的对称形态。

1.3.3.2 电弧电压变化

图 6 为非对称纵向磁场作用下的电弧电压。图 7 为非对称纵向磁场作用下的电弧电压差值。图 6 中,在电极高度保持一定的情况下,增大电流,电压也增大。通过对不同电流大小施加不同磁感应强度的纵向磁场,电弧电压随着磁场强度增大而增大。低电流电弧由于自身电弧的稳定性较差,容易

受到外界干扰而产生电弧失稳,因此选择 150 A 的电弧作为试验对象。从图 7 可知,电流为 150 A 的电弧在磁场强度为 5 ~ 15 mT 电压差值依次上升。磁场强度越大,电弧越容易失稳,因此纵向磁场的强度选择 5 mT。

1.4 纵向磁场作用下电弧形态试验验证

图 8 为纵向磁控传感器电弧实验平台示意图。将非对称纵向磁场传感器和焊枪垂直安装在十字

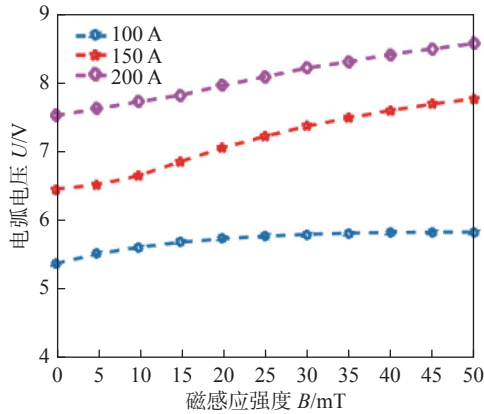


图 6 纵向磁场下电弧电压

Fig. 6 Arc voltage under longitudinal magnetic field

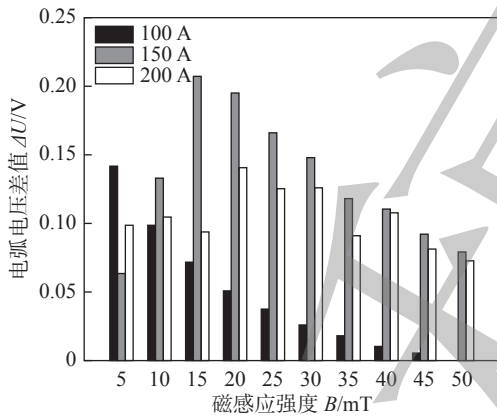


图 7 纵向磁场下电弧电压差值

Fig. 7 Arc voltage difference under longitudinal magnetic field

滑架上,使磁场平行于焊接电流.焊接过程中,非对称纵向磁场传感器和焊枪由十字滑架移动,并保持与工件表面垂直以提供静止电弧.采用 Acuteye 焊接电流电压同步高速摄影仪装置捕捉不同磁场下电

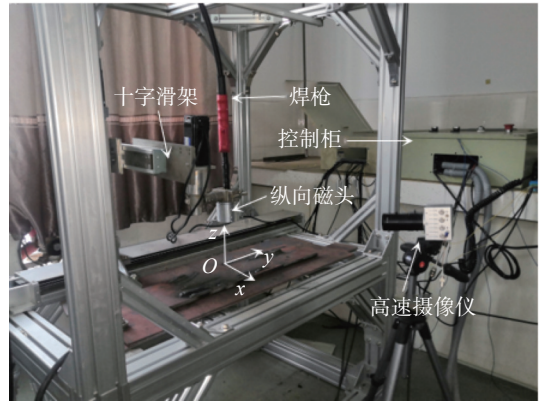


图 8 纵向磁控传感器电弧实验平台

Fig. 8 Arc experimental platform of longitudinal magnetic control sensor

弧等离子体的变化过程.实验设置焊接电流为 150 A,钨极的直径为 2.8 mm,工件选用铜板,钨极尖端与铜板之间的间隙为 12 mm.采用纯氩气作为保护气体,气体流量为 15 L/min,以保证焊缝的最佳保护程度.

图 9a 为无外加磁场作用下电弧形态,此时 150 A 电弧为圆锥形状,电弧左右两边呈对称形态.

图 9b 为在施加 5 mT 对称纵向磁场,150 A 的电弧形态呈现中心对称,对比图 9a 和图 9b 可知,纵向磁场的引入使电弧形态扩张.图 9c 为施加 5 mT 非对称纵向磁场作用下的电弧形态,由图 9c 可知,此时电弧的形态呈现为不对称形态.在图 9c 中,电弧右侧的磁感应强度大于左侧磁感应强度,右侧电弧扩张程度大于左侧电弧扩张程度,使得电弧整体上呈现向右偏移.上述图 9 电弧形态与图 5 仿真结果一致.

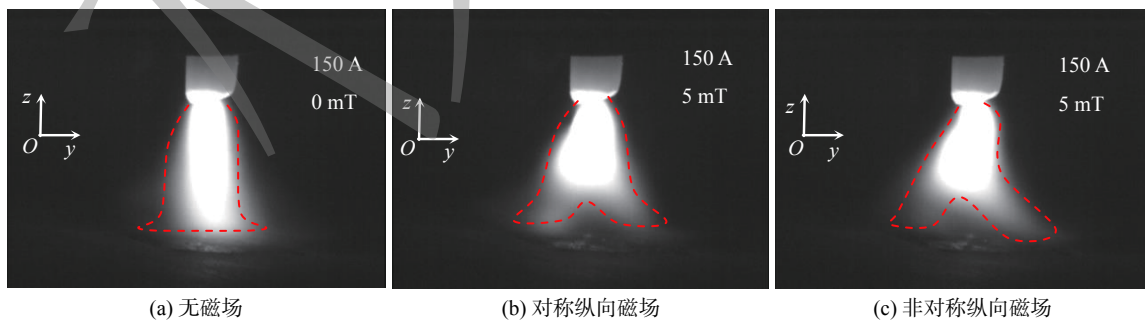


图 9 纵向磁场作用下的电弧形态

Fig. 9 Arc shape under longitudinal magnetic field. (a) no magnetic field; (b) symmetrical longitudinal magnetic field; (c) asymmetrical longitudinal magnetic field

图 10a ~ 10c 为施加 2 mT 周期性横向磁场,150 A 的电弧在周期性的横向磁场作用下发生偏移.

从图 10 可知,横向磁场能够使电弧发生整体偏移,但是无法使电弧发生旋转.

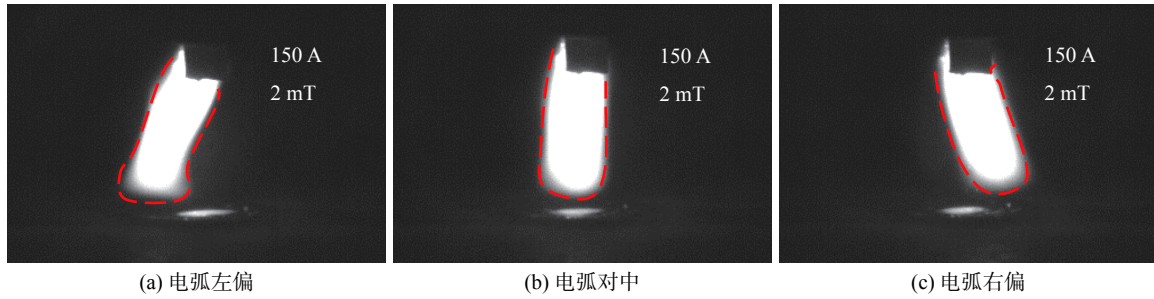


图 10 横向磁场作用下的电弧形态

Fig. 10 Arc shape under the action of transverse magnetic field. (a) arc left deviation; (b) arc alignment; (c) arc right deviation

2 纵向磁控传感器的焊缝识别

2.1 纵向磁场作用下焊缝识别实验步骤

图 11 为 V 形坡口焊缝识别试验流程图. 中间的磁感线圈保持通电, 励磁电流为 3 A. 左右两边

的磁感线圈交替通入 1 A、频率为 5 Hz 的矩形波电流, 在钨极两侧产生不均匀的纵向磁场. 磁通计检测到磁感应强度约为 5 mT. 用高速摄影仪拍摄并对纵向磁场下的电弧图像进行处理. 用霍尔传感器采集电弧电压的信号, 然后对信号进行均值滤波.

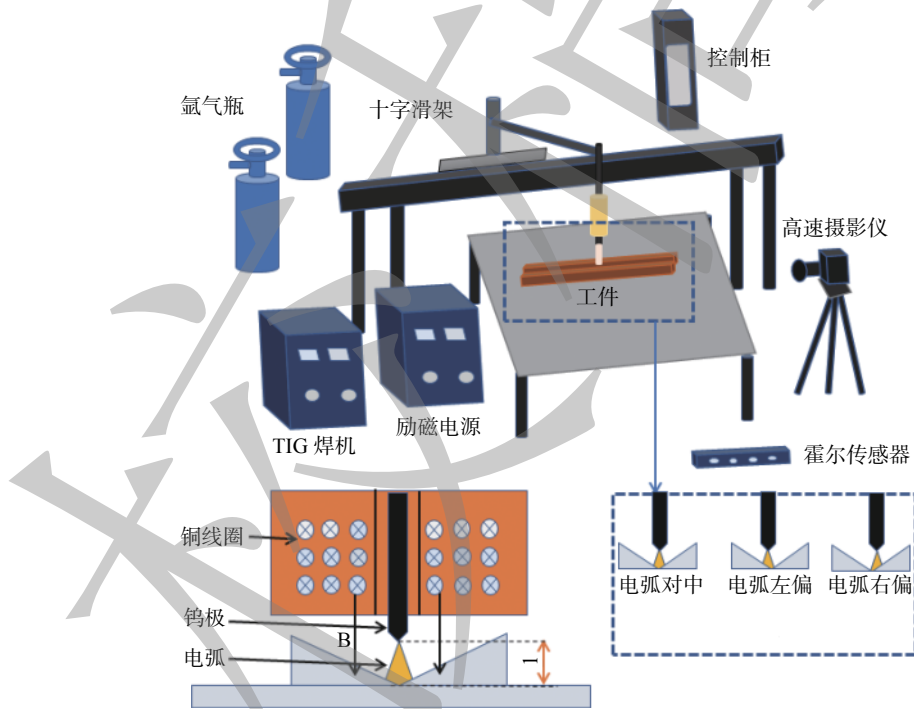


图 11 V 形坡口焊缝识别实验流程图

Fig. 11 Flow chart of V-groove weld identification experiment

图 12 为 V 形坡口焊缝的三道焊缝路径. V 形坡板与水平面的夹角为 30°, 第一道焊缝位于 V 形坡口的左边, 第二道焊缝位于 V 形坡口的中间, 第三道焊缝位于 V 形坡口的右边. 第一道焊缝轨迹以焊缝中心为水平线, 然后以水平夹角为 10°方向远离焊缝中心; 第二道焊缝轨迹为焊缝中心水平线的方向前进; 第三道焊缝轨迹以焊缝中心为水平线,

然后以水平夹角为 10°方向靠拢焊缝中心.

2.2 试验分析

2.2.1 纵向磁场 V 形坡口左侧电弧电压

图 13a 中深色线为非对称纵向磁场滤波后的电弧电压, 浅色线为自由电弧时电弧电压, 粗线为自由电弧滤波后电弧电压. 在 V 形坡口左边焊缝运动过程中, 由于运动轨迹逐渐远离焊缝中心, 钨

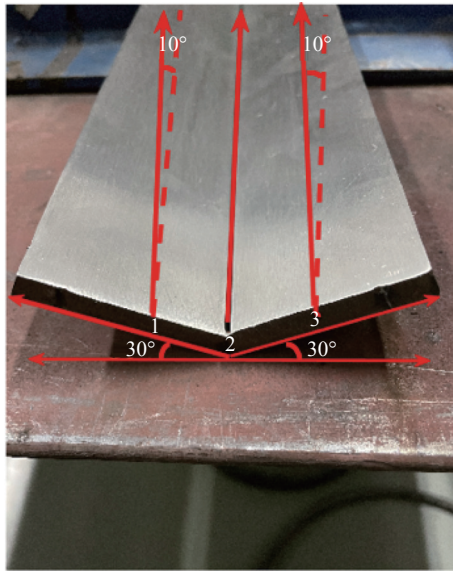


图 12 V 形坡口上焊缝路径
Fig. 12 Weld path on V-groove

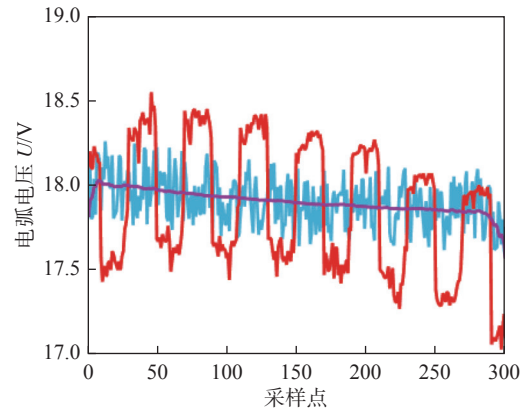
极尖端距离 V 形坡口的垂直距离不断变小, 电弧的弧柱长度不断降低, 电弧的电压值不断变小, 自由电弧电压和非对称纵向磁场滤波后的电弧电压变小的趋势一致。如深色曲线所示, 经过滤波处理后电压信号, 当非对称纵向磁场作用下, 根据 V 形坡口的特征, 电弧往左边偏转时电弧长度小于往右边偏转时电弧长度, 即在一个采样周期内会出现波峰和波谷, 在采样周期内波峰值为电弧右偏, 波谷值为电弧左偏, 且电弧电压随着磁场激励电流的变化上呈现出正弦变化的特征^[18]。

2.2.2 纵向磁场 V 形坡口中心电弧电压

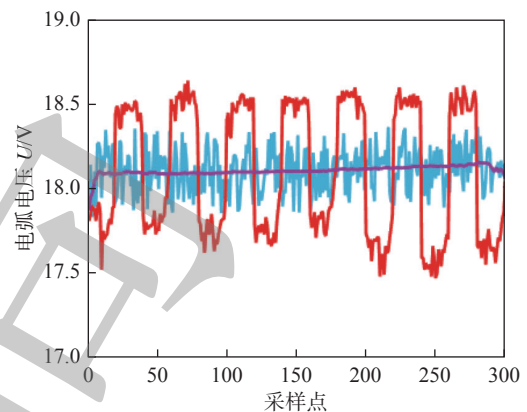
图 13b 中深色线为非对称纵向磁场滤波后的电弧电压, 浅色线为自由电弧时的电弧电压, 粗线为自由电弧滤波后的电弧电压。在 V 形坡口中心焊缝运动的过程中, 钨极尖端始终保持在焊缝中心的垂直上方, 钨极尖端距离焊缝的高度没有发生变化, 从粗线中可知当电弧长度不发生变化时, 电弧电压波动幅度非常小, 电压变化趋势趋近于水平线。如深色曲线所示, 当非对称纵向磁场作用下, 电弧向左或者向右的偏移达到最大距离, 即电弧电压呈现出周期性的正弦波形, 每个周期电弧电压的波峰与波谷的差值明显, 表明电弧轮廓形状变化大, 并且不同周期的波峰值都没有明显波动。该特点与电弧经过焊缝中心轨迹的电弧电压变化趋势一致, 说明钨极尖端一直对准焊缝中心没有发生偏移。

2.2.3 纵向磁场 V 形坡口右侧电弧电压

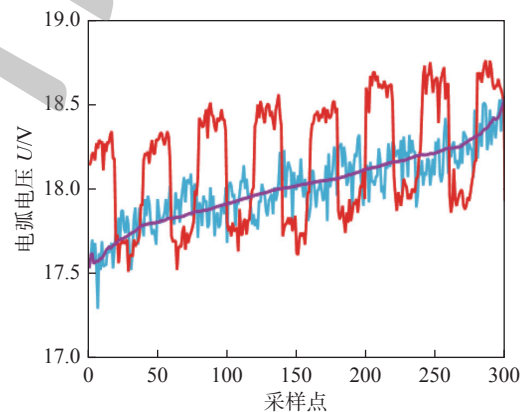
图 13c 为 V 形坡口右侧电弧电压, 其中深色线



(a) 左侧焊缝



(b) 中心焊缝



(c) 右侧焊缝

图 13 纵向磁场下 V 形坡口焊缝电弧电压

Fig. 13 Arc voltage of V-groove weld under longitudinal magnetic field. (a) left weld; (b) center weld; (c) right weld

为添加非对称纵向磁场滤波后的电弧电压, 浅色线为自由电弧时的电弧电压, 粗线为自由电弧滤波后的电弧电压。在 V 形坡口右侧焊缝的运动过程中, 由于运动轨迹逐渐靠近焊缝中心, 钨极尖端距离 V 形坡口的轴向距离不断变大, 电弧的弧长不断伸长, 电弧的电压值不断变大, 自由电弧电压和添加非对称纵向磁场滤波后的电弧电压变大的趋势一致。如深红色曲线所示, 当非对称纵向磁场作用下,

根据 V 形坡口的特征, 电弧往左边偏转时的电弧长度大于向右边偏转时的电弧长度, 在采样周期内波峰值为电弧左偏, 波谷值为电弧右偏, 且电弧电压随着磁场激励电流的变化上呈现出正弦变化的特征.

2.2.4 横向磁场 V 形坡口电弧电压

图 14 中深色线为横向磁场滤波后的电弧电压, 浅色线为横向磁场未滤波的电弧电压. 从图 14 中可知电弧在交变的横向磁场作用下, 电弧电压随着电弧摆动呈现出正弦波形. 将图 13 和图 14 的电弧电压波动进行对比发现, 横向磁场电弧电压波动幅度大于纵向磁场电弧电压波动幅度, 说明横向磁场使电弧摆动距离更远, 采集更多的焊缝信息.

2.3 纵向磁控传感器解决窄间隙焊接疑难问题的潜在应用

厚板窄间隙侧壁未融合是由于两侧金属壁未受到足够的热量而熔化. 通过施加交流的横向磁场使 TIG 电弧发生摆动, 增加了两侧金属壁热量的输入, 解决窄间隙焊缝侧壁不融合问题. 但是在窄间隙焊缝跟踪过程, 横向磁场导致电弧在侧壁停留时间长, 侧壁热输入量大从而产生咬边^[19]. 纵向磁场使得 TIG 电弧热源由高斯分布转变为双峰分布, 侧壁的热输入量能熔化侧壁但不会产生咬边.

图 15 为窄间隙焊缝不同磁场作用下的电弧温度分布. 在图 15a 中, 无外加磁场时电弧的温度集中在电弧中心. 在图 15b 中, 施加 5 mT 纵向磁场时, 电弧的温度从电弧中心两边扩散, 工件侧壁的加热温度上升. 在图 15c 中, 施加 2 mT 横向磁场时, 电弧的温度向右边发生扩散, 工件右侧壁加热温度进一步上升. 从图 16 中可知, 施加横向磁场时, 工件侧壁的热输入量远远大于纵向磁场和无外加磁场条件下的工件热输入量, 工件侧壁充分熔化. 焊缝识别需要采集足够多的特征点导致电弧在

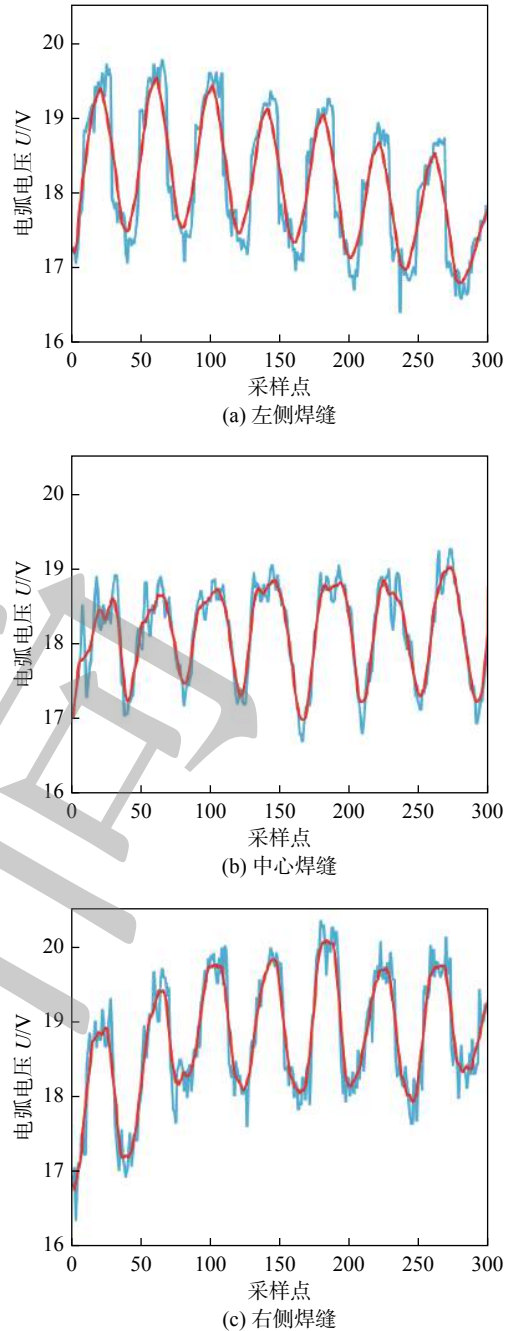


图 14 横向磁场下 V 形坡口焊缝电弧电压

Fig. 14 Arc voltage of V-groove weld under transverse magnetic field. (a) left weld; (b) center weld; (c) right weld

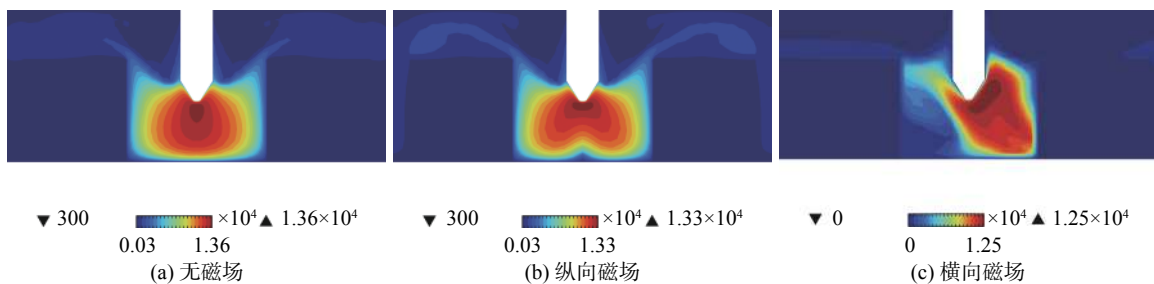


图 15 窄间隙焊缝不同磁场作用下的电弧温度分布

Fig. 15 Arc temperature distribution of narrow gap weld under different magnetic fields. (a) no magnetic field; (b) longitudinal magnetic field; (c) transverse magnetic field

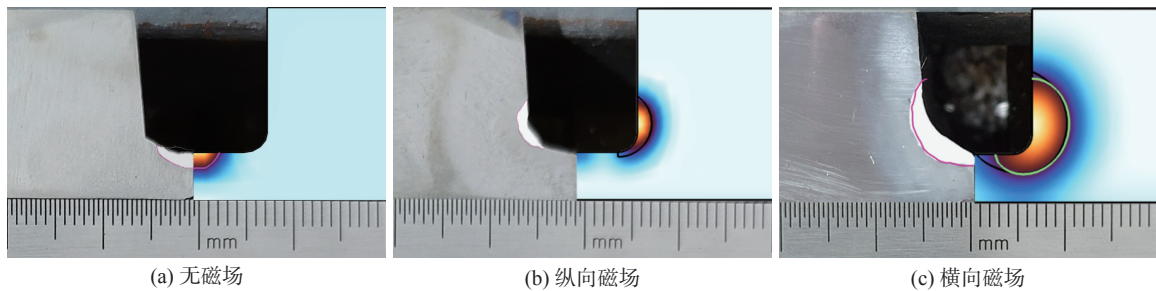


图 16 为窄间隙焊缝不同磁场作用下的焊缝轮廓线

Fig. 16 Shows the weld profile of narrow gap weld under different magnetic fields. (a) no magnetic field; (b) longitudinal magnetic field; (c) transverse magnetic field

侧壁停留时间过长,从而侧壁热输入量过大容易引起咬边.施加纵向磁场时侧壁的热输入量远远小于横向磁场作用下的热输入量,降低了咬边出现的概率.同时施加纵向磁场时侧壁的热输入量大于无外加磁场时侧壁的热输入量,侧壁得到充分熔合.

3 结论

(1) 设计了一种山形分布的纵向磁场传感器,该传感器体积小,无机械震动.通过仿真分析得到‘山’形分布的纵向磁场传感器能产生非对称的纵向磁场,并获得了 150 A 的电弧在磁感应强度为 0 ~ 20 mT 时电弧电压波动幅度递增.

(2) 施加 5 mT 对称纵向磁场,150 A 的电弧底端直径将扩张,增大了电弧扫描焊缝的截面积.施加非对称纵向磁场,在 5 mT 磁感应强度范围内,电弧的对称形态变为不对称形态.施加 2 mT 横向磁场,电弧整体向一边偏移.

(3) 针对 V 形坡口焊缝,在频率为 5 Hz,磁场强度为 5 mT 非对称纵向磁场作用下,有效提取了 V 形坡口焊缝信息,并能解决窄间隙焊接过程中的咬边和侧壁不融合.该方法为磁控焊缝跟踪传感器在窄间隙焊接的应用开辟了新的方向.

参考文献

[1] Kiryukhantsev-Korneev P V. Pulsed magnetron sputtering of ceramic SHS targets as a promising technique for deposition of multifunctional coatings[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2020, 56(2): 343 - 357.
 [2] Sun Z, Guo M, Vleugels J, *et al.* Strong static magnetic field processing of metallic materials: A review[J]. Current Opinion in Solid State & Materials Science, 2012, 16(5): 254 - 267.
 [3] Yu J, Du D, Ren Z, *et al.* Influence of an axial magnetic field on

microstructures and alignment in directionally solidified Ni-based superalloy[J]. ISIJ International, 2017, 57(2): 337 - 342.

- [4] Muyskens S M, Eddir T I, Goldstein R C. Improving induction tube welding system performance using soft magnetic composites[J]. Compe-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2020, 39(1): 185 - 191.
 [5] Brown D C. The effect of electromagnetic stirring and mechanical vibration[J]. Welding Journal, 1962, 41(2): 241 - 250.
 [6] 曾松盛,石永华,王国荣.基于电弧传感器的焊缝跟踪技术现状与展望[J].焊接技术,2008,37(2): 1-5.
 Zeng Songsheng, Shi Yonghua, Wang Guorong. Current situation and prospect of weld tracking technology based on arc sensor [J] Welding Technique, 2008, 37(2): 1-5.
 [7] Wang J, Sun Q, Feng J, *et al.* Characteristics of welding and arc pressure in TIG narrow gap welding using novel magnetic arc oscillation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(90): 413 - 420.
 [8] Chen J, Zhang Y, Wu C, *et al.* Suppression of undercut defects in high-speed GMAW through a compound magnetic field[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 274: 116288.
 [9] Matsumoto N, Kuno I, Yamamoto T, *et al.* Arc behavior in non-uniform AC magnetic field[J]. ISIJ International, 2012, 52(3): 488 - 492.
 [10] 洪波,魏复理,来鑫,等.一种用于焊缝跟踪的磁控电弧传感器[J].焊接学报,2008,29(5): 4-7.
 Hong Bo, Wei Fuli, Lai Xin, *et al.* A magnetic-control arc sensor for seam-tracking[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(5): 4 - 7.
 [11] Wienecke R, Naturforsch Z. The characters of arc in a longitudinal magnetic field[J]. Applied Physics, 1963, 57(3): 1151 - 1154.
 [12] Yin X, Gou J, Zhang J, *et al.* Numerical study of arc plasmas and weld pools for GTAW with applied axial magnetic fields[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2012, 45(28): 285203 - 285215.
 [13] 殷咸青,罗键,李海刚.纵向磁场参数对 LD10CS 铝合金 TIG 焊焊缝组织的影响[J].西安交通大学学报,1999(7): 73 - 76.

- Yin Xianqing, Luo Jian, Li Haigang. Effect of magnetic parameters and mechanical properties on grain refining in LD10CS aluminum alloy weld with magnetic stirring[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999(7): 73 – 76.
- [14] Liu Y, Sun Q, Wang H, *et al.* Effect of the axial external magnetic field on copper/aluminium arc weld joining[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2016, 21(6): 460 – 465.
- [15] Urusova R M, Urusova I R. Numerical simulation of the screw shape of an electric arc in an external axial magnetic field[J]. High Temperature, 2017, 55(5): 643 – 649.
- [16] Zou X, Gong Y, Liu J, *et al.* The effect of external magnetic field, current and arc column radius on the arc helical instability[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(3): 824 – 828.
- [17] 刘一搏, 张鸿名, 孙清洁, 等. 磁场作用下铝/钢 CMT 焊接温度场及熔池流动行为 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 62 – 68.
Liu Yibo, Zhang Hongming, Sun Qingjie, *et al.* Temperature field and molten pool flow behavior of aluminum / steel CMT welding under magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 62 – 68.
- [18] 高延峰, 吴东. 侧向风场作用下横向焊接旋转电弧传感及焊缝跟踪 [J]. 焊接学报, 2018, 39(4): 36 – 40.
Gao Yanfeng, Wu Dong. Transverse welding rotating arc sensing and weld tracking under lateral wind field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(4): 36 – 40.
- [19] 王猛, 吕晓春, 梁晓梅, 等. 窄间隙 TIG 横焊侧壁熔合行为 [J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 118 – 123.
Wang Meng, Lyu Xiaochun, Liang Xiaomei, *et al.* Sidewall fusion behavior of narrow gap TIG transverse welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 118 – 123.

第一作者: 秦子濠, 硕士研究生; 主要研究焊接自动化;
Email: 408590165@qq.com.

通信作者: 郑学军, 教授, 博士研究生导师; Email:
zhengxuejun@xtu.edu.cn.

(编辑: 王娇)

[上接第 83 页]

- [8] Bonny G, Konstantinovic M J, Bakaeva A, *et al.* Trends in vacancy distribution and hardness of high temperature neutron irradiated single crystal tungsten[J]. Acta Materialia, 2020, 198: 1 – 9.
- [9] 李军兆, 孙清洁, 于航, 等. 薄板 TC4 钛合金 TIG 电弧和激光焊接接头晶粒尺寸与微观组织 [J]. 焊接学报, 2022, 43(10): 56 – 62,70.
Li Junzhao, Sun Qingjie, Yu Hang, *et al.* Study on grain size and microstructure of TC4 titanium alloy TIG and laser welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(10): 56 – 62,70.
- [10] Gan S, Liu H, Zhai Z, *et al.* A review of welding residual stress test methods[J]. China Welding, 2022, 31(2): 45 – 55.
- [11] Linga M K. Role and significance of source hardening in radiation embrittlement of iron and ferritic steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 1999, 270(1): 115 – 128.
- [12] Tanigawa H, Klueh R L, Hashimoto N, *et al.* Hardening mechanisms of reduced activation ferritic/martensitic steels irradiated at 300 °C[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 386-388: 231 – 235.

第一作者: 乔永丰, 博士研究生; 主要研究方向为材料辐照效应; Email: 2111905003@stmail.ujs.edu.cn.

通信作者: 雷玉成, 教授, 博士研究生导师; Email:
yclei@ujs.edu.cn.

(编辑: 王娇)