

同轴送粉TIG熔覆过程数值模拟与试验研究

王婉婉,高辉,周灿丰,李文龙

(北京石油化工学院 能源工程先进连接技术北京市高等学校工程研究中心,北京 102617)

摘要 为了研究同轴送粉TIG熔覆过程电弧的温度场、流场、电势分布及粉体颗粒运动轨迹,根据磁流体动力学理论建立了二维仿真模型,利用COMSOL软件对TIG熔覆电弧和粉体颗粒运动轨迹进行数值模拟。模拟结果表明:电弧形态呈钟罩形、气体流动稳定、粉体颗粒利用率高;为了验证仿真结果的准确性,开展了同轴送粉TIG熔覆试验。试验结果表明:焊缝平直无明显缺陷,实际电弧形态与模拟结果高度一致。通过金相显微镜对熔覆层进行观察,可以清晰地看出熔覆层内部组织均匀、致密。

关键词 TIG熔覆;同轴送粉;COMSOL软件;数值模拟;显微组织

中图分类号 TG434.5

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)05-0070-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20230908.001

Numerical simulation and experimental study on TIG cladding process with coaxial powder feeding

WANG Wanwan, GAO Hui, ZHOU Canfeng, LI Wenlong

(Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing Engineering Research Centre for Advanced Connection Technology in Energy Engineering, Beijing 102617, China)

Abstract In order to study the temperature field, flow field, potential distribution and powder particle trajectory of TIG cladding process with coaxial powder feeding, a two-dimensional simulation model was established according to the theory of magneto hydrodynamics. The TIG cladding arc and powder particle trajectory were numerically simulated by COMSOL software. The simulation results show that the arc shape is bell-shaped, the gas flow is stable, and the utilization rate of powder particles is high. In order to verify the accuracy of the simulation results, a coaxial powder feeding TIG cladding test was carried out. The test results show that the weld is straight without obvious defects, and the actual arc shape is highly consistent with the simulation results. The cladding layer was observed by a metallographic microscope. It can be clearly seen that the internal structure of the cladding layer is uniform and dense.

Keywords TIG cladding; coaxial powder feeding; COMSOL software; numerical simulation; microstructure

在现代工业生产中,金属件表面经常会出现磨蚀、磨损等现象,严重影响机械设备的性能和寿命^[1]。因此,提高金属件表面的耐磨性成为迫切需要解决的问题。焊接熔覆通过在受损部位表面熔覆一层硬度高、耐磨性好的涂层,重新形成新的表面,从而修复和改善机械设备的表面性能^[2-4]。

目前常见的焊接熔覆技术主要有:激光熔覆技术、等离子熔覆技术和TIG熔覆技术等。其中,激光熔覆技术所需的设备费用高昂且熔覆层的宽度小^[5-6];等离子熔覆的熔覆率低,对环境要求高^[7-8];TIG熔覆具有熔宽大、熔深浅等优点,特别适用于工件表面的焊接修复^[9-11]。传统的TIG熔覆通常采用送丝和送粉方式^[11-12],当进行各种金属材料焊接时,如不锈钢、镍基合金、铝合金等,送丝方式无法满足焊接要求;送粉方式包括传统的预置粉末法、旁轴送粉法和同轴送粉法,

TIG熔覆常用预置粉末法进行试验,旁轴送粉法在应用中存在气孔、结构不均匀、粉末利用率低等缺点,所以在TIG熔覆中未得到应用,而同轴送粉法常用于激光熔覆和等离子熔覆中,在涂层制备和涂层修复中可通过调整焊接材料的成分和合金粉末的比例来获得预期的焊缝,其热影响区小、粉末利用率高,但目前在TIG熔覆中的应用较少^[12-14]。

本文作者设计了一款同轴送粉TIG焊枪。通过COMSOL软件建立了二维仿真模型,用高斯分布热源模型,对TIG熔覆过程的温度场、流场、电势分布及粉体颗粒运动轨迹进行数值模拟,接着进行熔覆试验,结果表明,焊缝平直无凹坑,实际拍摄的电弧形态和模拟的电弧形态高度一致,呈典型的钟罩状,通过金相显微镜对熔覆层进行观察,发现基体与熔覆层连接处质量较好,无明显缺陷。

收稿日期:2023-06-14;修回日期:2023-07-06

基金项目:北京市属高校分类发展项目(11000023T000002199202)

第一作者:王婉婉,女,硕士研究生。E-mail:2021520076@bipt.edu.cn。

通信作者:高辉,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:gaohui@bipt.edu.cn。

1 同轴送粉TIG焊枪设计

用于同轴送粉TIG熔覆的焊枪结构图如图1所示。该焊枪由保护气快速插头、压帽、导电块、送粉快速插头、钨极夹、焊枪主体、导电嘴、钨极、送粉铜管、隔热块、O型圈等组成。焊枪的保护气通道和送粉通道相互独立,减少焊接过程中焊枪内部两种物质的互相干扰。为了使整个焊接过程具有良好的保护气氛围,保护气从径向方向经过保护气嘴进入焊枪主体,保护气流量须在焊接前调节好,确保不影响焊接电弧的稳定性和熔覆层质量。为了确保粉体颗粒输送的稳定性和流畅性,将两个送粉快速插头与焊枪的送粉铜管直接相连,并采用同轴送粉的方式输送粉体颗粒。送粉内环中设置多个对称小孔,使氩气均匀喷出,以保证焊接电弧四周受到均匀的压力,从而提高焊接电弧的稳定性。

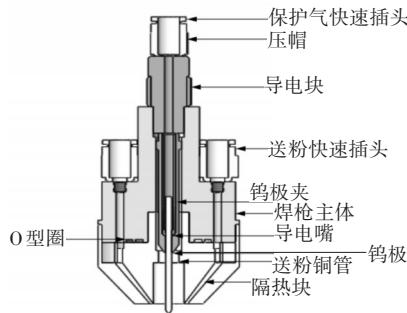


图1 焊枪结构示意图

Fig.1 Welding torch structure diagram

2 模型建立与模拟结果分析

2.1 几何模型和假设条件

同轴送粉TIG熔覆的焊枪几何模型如图2所示。包括钨极、氩气和316L不锈钢母材。其中VBXYW为直径2.4 mm的钨极,KMNJ为60 mm×10 mm的316L不锈钢母材,其余计算域为氩气环境,BC、VU为保护气

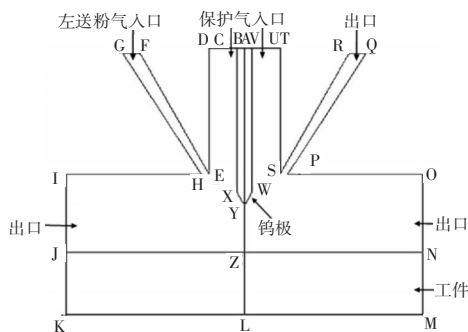


图2 焊枪几何模型

Fig.2 Welding torch geometry model

入口,流速为1 m/s,GF、RQ为送粉气入口,流速为7.5 m/s,钨极尖端距316L不锈钢母材表面8 mm,模拟焊接电流分别为100、130、160 A。为了提高计算效率,对焊接电弧做以下假设:1)电弧区域处于局部热平衡状态;2)电弧为不可压缩流体,且流动状态为层流;3)电弧等离子体为光学薄;4)标准大气压下氩气的物性参数仅与温度有关,不考虑重力作用对电弧的影响。

2.2 控制方程

焊接电弧的数值模拟满足以下控制方程:

质量守恒方程:

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

式中: ρ 为氩气密度; u 、 v 为电弧的轴向和径向速度。

径向动量守恒方程:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

轴向动量守恒方程:

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式中: P 为电弧所受压力; μ 为氩气的动力黏性系数; ρ 为电弧重力; F_r 、 F_z 分别为体积力在 r 、 z 方向上的分量。

能量守恒方程:

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \quad (4)$$

式中: C_p 为定压比热容; T 为温度; k 为热导率; Q 为能量方程的源项。

电磁场方程:

电流连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \quad (5)$$

欧姆定律:

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (6)$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (7)$$

安培环流定律:

$$B = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (8)$$

式中: σ 为电导率; φ 为电势; B 为磁场强度; μ_0 为真空磁导率。

热源模型:

选用高斯分布热源模型:

$$q_a(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right) \quad (9)$$

式中： q_a 为距电弧加热光斑中心 r 处的热源密度； q_m 为最大热流值； r 为距离电弧斑点中心距离； R 为电弧加热半径。

2.3 氩气的热物性参数

TIG 熔覆使用氩气作为保护气体，数值模拟过程中氩气的热物性参数会随温度发生较大变化，其相关物性参数随温度变化曲线如图3所示。

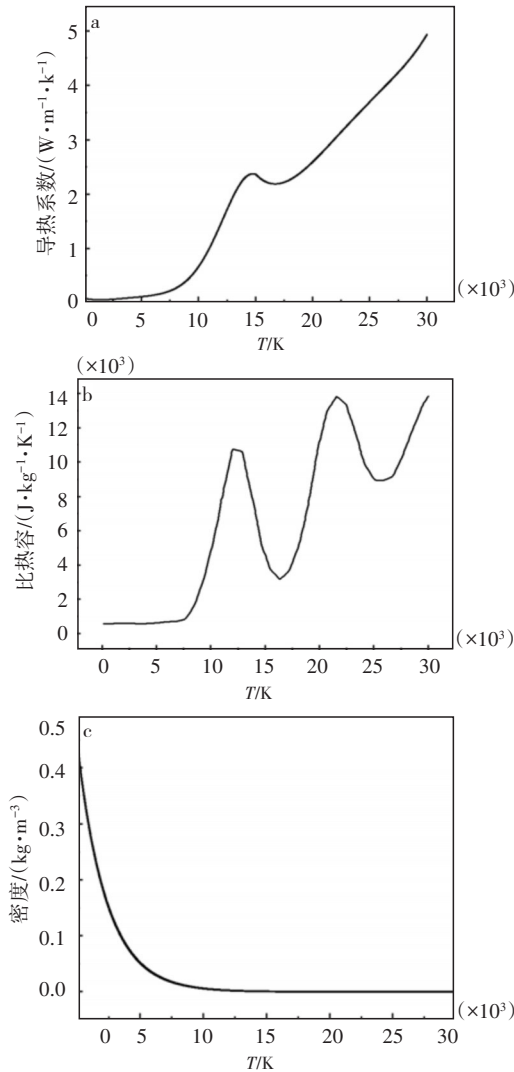


图3 氩气热物理参数随温度变化曲线

Fig.3 Curves of thermal physical parameters of argon with temperature

2.4 边界条件和源项

模型加载的边界条件如表1所示。

能量方程源项：

$$Q = \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \left(J_z \frac{\partial T}{\partial z} + J_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - S_R \quad (10)$$

式中： σ 为电导率； k_B 为 Boltzmann 常数； e 为电子电量； S_R 为辐射损失。

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

边界	边界类型	速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	温度/K	电势 ϕ/V	磁矢量 \vec{A}
AB、AV	钨极顶部	0.0	3 000	$-\sigma \partial \phi / \partial z = I / S_c$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
BC、VU	保护气入口	1.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
CD、UT	壁面	0.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
DE、TS	壁面	0.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
EF、SR	壁面	0.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
FG、RQ	送粉气入口	7.5	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
GH、QP	壁面	0.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
HI、PO	壁面	0.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
IJ、ON	压力出口	0.0	300	$\partial \phi / \partial z = \partial \phi / \partial r = 0$	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
XYW	钨极端部	0.0	耦合	耦合	耦合
JZ、NZ	氩气与工件交界	0.0	耦合	耦合	耦合
JKLMN	工件边界	0.0	300	0	$\partial A / \partial z = \partial A / \partial r = 0$
AYZL	轴	—	—	—	—

2.5 模拟结果与分析

2.5.1 传热过程模拟

同轴送粉 TIG 熔覆过程电弧的温度场分布如图4所示。图4a为130 A 电流下电弧的温度分布云图。可以看出，电弧形态呈钟罩状，其温度场近似于传统 TIG 焊电弧的温度场，钨极尖端和工件之间存在较大的温度梯度。图4b为电弧中心轴向温度分布曲线。在距钨极轴向距离 1.13 mm 处温度达到最高，这是因为此

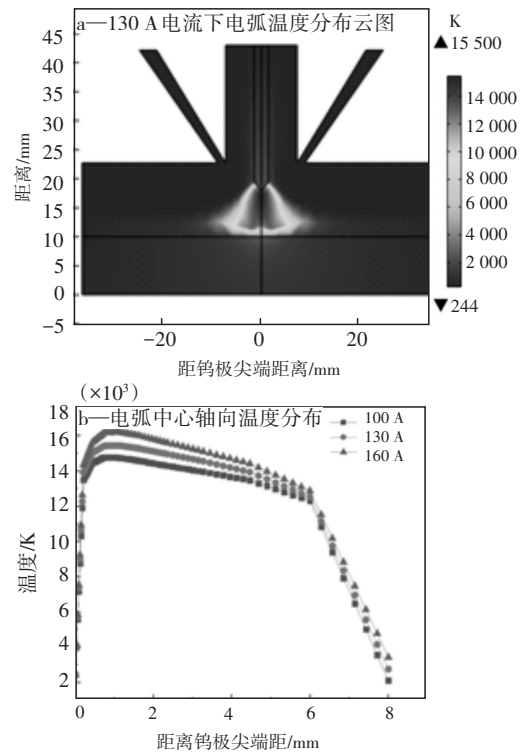


图4 电弧的温度场分布

Fig.4 Temperature field distribution of arc

处的电流密度较大,电流流过导致等离子体中的电阻增加,从而产生较大的焦耳热,且随电流的增大,电弧的最高温度也随之升高,电弧温度从钨极尖端的最高值逐渐向工件表面递减,工件表面的温度约为3 000 K,而316 L不锈钢的熔点约为1 400 K,所以可以熔化母材形成熔池。

2.5.2 气流过程模拟

同轴送粉TIG熔覆过程电弧的流场数值模拟结果如图5所示。图5a为130 A电流下电弧等离子体速度分布云图。图5b为电弧中心轴向等离子体速度分布曲线。等离子气以较小的速度从焊枪的送粉通道和送气通道流入,在钨极下端因受到电弧的影响开始电离,随着电离的发生,等离子体速度迅速增大,靠近工件表面时等离子体的速度逐渐收敛,至工件表面时降至0,由图5a可以看出,气流主要集中在钨极下方,从而提高了焊接质量和稳定性。图5c为电弧中心轴向压力分布曲线。可见,电弧中心轴向压力先升后降,且峰值随电流的增加而增大。

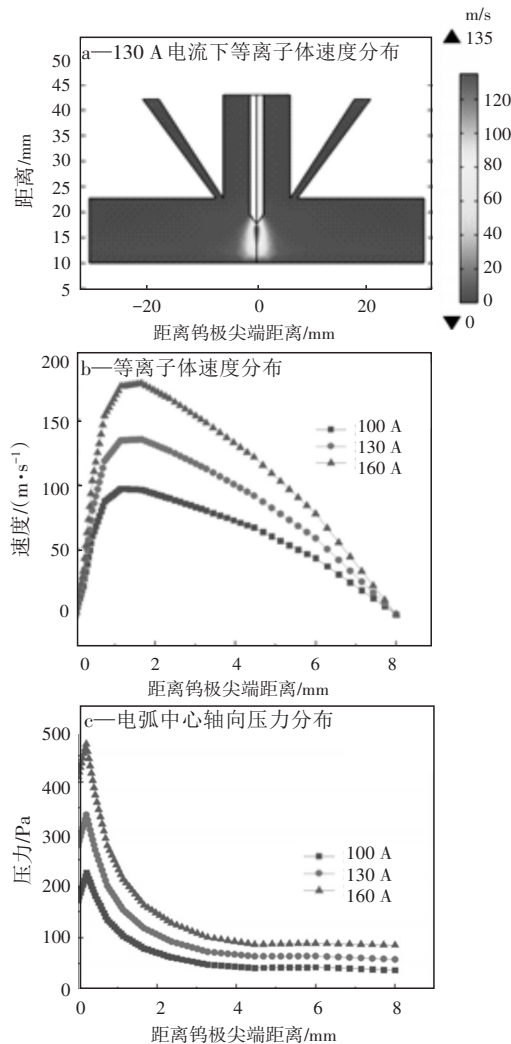


图5 电弧的流场数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulation results of arc flow field

2.5.3 电势分布

同轴送粉TIG熔覆过程电弧的电势分布如图6所示。本研究采用直流正接方式,即钨极为阴极,工件为阳极,工件接地,电势为0。图6a为130 A电流下电弧电势分布云图。可以看出,钨极尖端电势变化较大,靠近工件变化较小,当电流分别为100、130、160 A时对应的最高电势差分别为12.75、13.27、13.80 V,电压变化较小,对熔覆过程影响小。

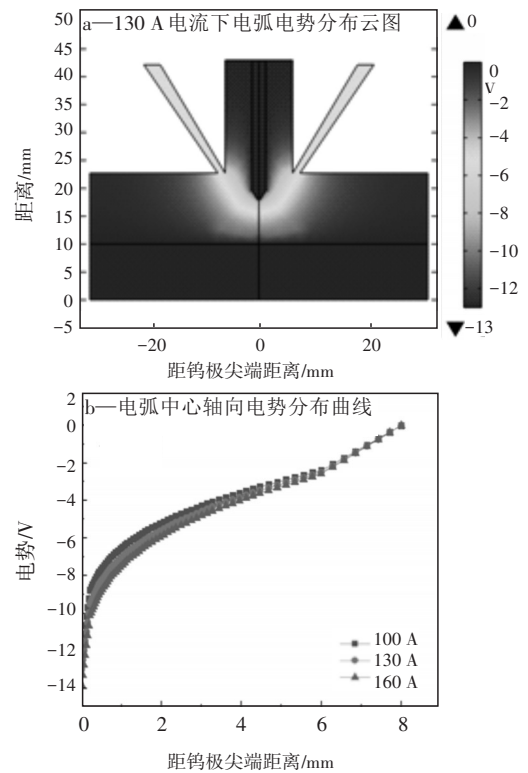


图6 电弧的电势分布

Fig.6 Potential distribution of arc

2.5.4 粉体颗粒运动轨迹模拟

图7为不同时间下同轴送粉TIG熔覆的粉体颗粒运动轨迹数值模拟结果。可知,大部分粉体颗粒成功进入熔池区域,通过COMSOL软件对粉体颗粒的分布进行统计,可知,共释放了270颗粉体颗粒,其中192颗粉体颗粒到达熔池参与熔覆过程,只有少部分粉体

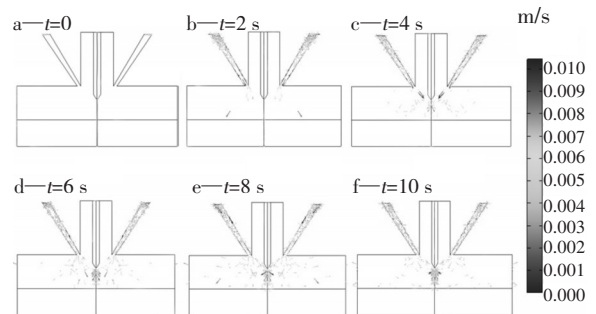


图7 粉体颗粒运动轨迹数值模拟结果

Fig.7 Numerical simulation results of particle trajectories

颗粒飞出熔池区或残留在工件表面,粉体颗粒的利用率为71%,提高了熔覆质量和性能。

3 试验验证

3.1 试验条件

同轴送粉TIG熔覆试验用时代逆变WSM-400型焊机,北京隆源生产的AFS系列送粉器,送粉气和保护气均为质量分数为99.99%的高纯氩气,母材为316L不锈钢,尺寸为250 mm×150 mm×10 mm,可在宽度方向进行多次熔覆,熔覆材料由比例为98:2的316L粉末和SiC粉末均匀混合而成,其粒径分别约为20、8 μm。为保证送粉效果,钨极伸出长度为7 mm,钨极尖端距母材316 L不锈钢板表面距离为8 mm,对应的电弧电压约为15 V,使用CCD相机对电弧进行拍摄。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 宏观形貌

为了保证焊接质量,提前打开保护气,待气体稳定输出时启动焊接按钮,电弧稳定燃烧后再送粉,调节气流使粉体颗粒输送流畅稳定,在焊接时,焊枪按照指定的焊接方向运动。TIG熔覆的工艺参数有焊接电流、送粉量和SiC浓度。其中送粉量是单位长度熔覆层接受的粉体颗粒质量,在数值上等于单位时间送粉量与焊接速度的比值。SiC浓度是复合粉体颗粒中SiC的质量分数。用焊接电流分别为100、130、160 A,送粉量为6 g/mm, SiC浓度为1.5%的工艺参数进行熔覆试验,获得的单层单道熔覆层如图8所示。可见,焊缝平直,熄弧位置无凹坑且焊缝熔宽一致。

图9为相机拍摄的130 A电流下的实际电弧图像。

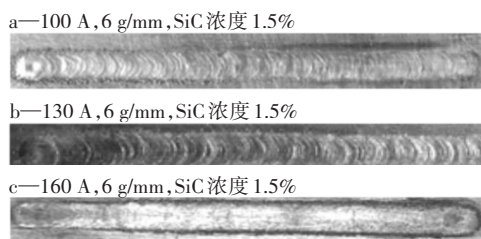


图8 同轴送粉TIG熔覆表面单层单道熔覆层

Fig.8 Coaxial powder feeding TIG cladding surface single-layer single-pass cladding layer

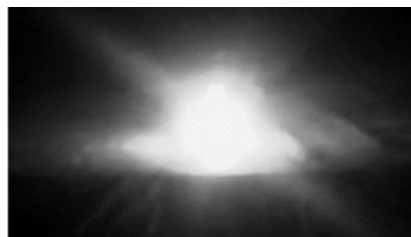


图9 实际电弧图像

Fig.9 Actual arc image

呈典型的钟罩形状,表明电弧在焊接过程中稳定性好,能够提供稳定的热源熔化和熔覆材料。图10为对应的电弧温度场数值模拟结果。可见模拟结果与试验结果一致。

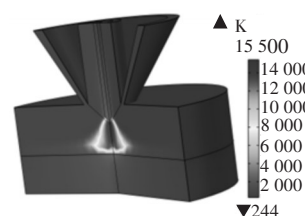


图10 对应的电弧温度场数值模拟结果

Fig.10 Numerical simulation results of corresponding arc temperature field

3.2.2 显微组织

焊接电流为130 A、送粉量为6 g/mm、SiC浓度为1.5%的工艺参数下熔覆层横截面不同区域显微组织如图11所示。由图11a可以看出,熔覆层内部组织均匀,无明显缺陷,熔覆层与基体连接处结合良好,可以清晰地看到熔凝线。由图11b可知,熔覆层与基体热影响区结合处存在一条以界面为核心的平面晶,组织以粗大且分布不均的树枝晶和柱状晶为主,晶体沿散热方向由熔池底部向熔覆层顶部生长。由图11c可知,树枝晶和柱状晶的数量和尺寸明显减少,熔覆层产生更多细小的等轴晶粒,呈典型的迅速熔凝组织特征。

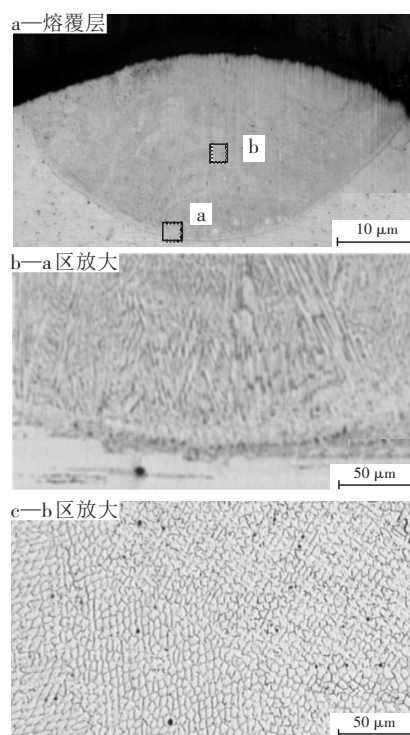


图11 熔覆层不同区域显微组织

Fig.11 Microstructure in different regions of cladding layer

4 结论

1) 采用同轴送粉技术理念开发了一种新型的TIG焊枪,用于表面熔覆。

2) 建立了焊枪二维数学模型,通过COMSOL软件对熔覆过程的温度场、流场、电势分布和粉体颗粒运动轨迹进行了数值模拟,结果表明,焊接电弧温度分布均匀,呈典型的钟罩状,气流稳定,粉体颗粒利用率高。

3) 将焊枪在316 L不锈钢表面进行熔覆试验,获得的堆焊焊缝成型美观,在焊接电流为130 A、送粉量为6 g/mm、SiC浓度为1.5%的工艺参数下拍摄的实际电弧图像与模拟结果一致,获得的熔覆层内部组织均匀致密无明显缺陷。

5 参考文献

- [1] 段宏瑜,李如琰,袁兆静. 金属磨损自修复技术的发展及应用[J]. 机械与电子,2016,34(9):27-30.
DUAN Hongyu, LI Ruyan, YUAN Zhaojing. Development and application of the auto-restoration technology of wear of metals [J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(9): 27-30. (in Chinese)
- [2] 韩彬,马光兴,刘振洪,等. 端部激光熔覆复合管焊接接头组织与性能分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(4):139-145.
HAN Bin, MA Guangxing, LIU Zhenhong, et al. Microstructures and properties of welded joints of bimetal composite pipe with laser cladding at the end [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(4): 139-145. (in Chinese)
- [3] ISRAR R, BUHL J, HÄRTEL S, et al. Reinforcement of tooling using residual stresses generated by cladding by arc welding [J]. Metals, 2022, 12(6): 984.
- [4] 任智强,王之千,王小明,等. 镁合金激光-氩弧复合焊再制造熔覆成形工艺优化[J]. 表面技术,2016,45(9):220-227.
REN Zhiqiang, WANG Zhiqian, WANG Xiaoming, et al. Process optimization of depositing formation remanufacturing of laser-tig hybrid welding on magnesium alloy [J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 220-227. (in Chinese)
- [5] MA H, LIANG Y, FU H. Effect of B4C addition on microstructure and wear resistance of laser cladding niCrBSi coatings [J]. JOM, 2023, 75(2): 515-525.
- [6] 翁益青,薛瑞雷,满蛟,等. 热处理对高速激光熔覆不锈钢熔覆层组织性能的影响[J]. 金属热处理,2023,48(2):276-283.
WENG Yiqing, XUE Ruilei, MAN Jiao, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of stainless steel coating by high-speed laser cladding [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(2): 276-283. (in Chinese)
- [7] 时运,杜晓东,庄鹏程,等. 等离子熔覆技术的研究现状及展望[J]. 表面技术,2019,48(12):23-33.
LUCK, DU Xiaodong, ZHUANG Pengcheng, et al. Research and development trend of plasma cladding technology [J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 23-33. (in Chinese)
- [8] 柴廷玺,徐宏彤,晏丽琴,等. 等离子熔覆制备高熵合金涂层耐腐蚀性能的研究进展[J]. 材料热处理学报,2022,43(3):11-20.
CHAI Tingxi, XU Hongtong, YAN Liqin, et al. Advances in corrosion resistance of high-entropy alloys coatings prepared by plasma cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(3): 11-20. (in Chinese)
- [9] 禹业晓,李玉龙,徐健宁,等. Q235钢板表面TIG法熔覆铜接头的组织和力学性能[J]. 航空材料学报,2014,34(1):62-68.
YU Yexiao, LI Yulong, XU Jianning, et al. Microstructure and mechanical properties of welding joint of cladding CuSi₃ on Q235 steel substrate using TIG method [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(1): 62-68. (in Chinese)
- [10] 张云龙,李若琳,朱彬,等. 7075铝合金熔覆层的搅拌摩擦加工研究[J]. 中国材料进展,2023,42(2):174-180.
ZHANG Yunlong, LI Ruolin, ZHU Bin, et al. Friction stir processing on fusion welding area of 7075 aluminum alloy [J]. Materials China, 2023, 42(2): 174-180. (in Chinese)
- [11] 李爱农,胡建华,王华君,等. TIG弧堆焊铁基高温合金覆层微观组织及抗高温性能研究[J]. 热加工工艺,2016,45(8):1-6.
LI Ainong, HU Jianhua, WANG Huajun, et al. Research on microstructure and high temperature resistance of iron-based superalloy coatings by TIG overlaying [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(8): 1-6. (in Chinese)
- [12] 汪彬,王阔,程晋宜,等. 大壁厚复合管自动氩弧焊工艺研究[J]. 焊接技术,2020,49(12):54-56.
WANG Bin, WANG Kuo, CHENG Jinyi, et al. Research on automatic argon arc welding process for large wall thickness composite pipes [J]. Welding Technology, 2020, 49(12): 54-56. (in Chinese)
- [13] KAVITHA K R, KUMAR G S, SRINIVAS G L, et al. Evaluation study of mechanical properties of dissimilar materials through TIG welding process [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 3894-3897.
- [14] 柳绪静,刘黎明,王恒,等. 镁铝异种金属激光-TIG复合热源焊接性分析[J]. 焊接学报,2005(8):40-43.
LIU Xujing, LIU Liming, WANG Heng, et al. Weldability analysis of magnesium aluminum dissimilar metal laser TIG composite heat source welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005(8): 40-43. (in Chinese)