

# 同轴送粉 TIG 熔覆焊枪研制与熔覆过程分析

周灿丰, 赵宇航, 李文龙, 高辉

(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:** 【目的】旨在解决传统钨极惰性气体(Tungsten inert gas, TIG)熔覆工艺存在的预置粉末适应性差、试验数据匮乏的问题。【方法】文中设计并制造了管状同轴和环状同轴送粉 TIG 焊枪, 建立三维数值模型对比电弧形态、流场及粉末利用率, 随后开展工艺试验, 以焊接热输入、送粉量和 SiC 浓度为变量进行熔覆层制备与评价。【结果】研究表明, 数值模拟中环状同轴送粉可保持电弧“钟罩”完整, 无环状涡流, 粉末利用率显著高于管状结构; 工艺试验表明, 管状送粉熔覆层在熄弧处出现凹坑, 且焊缝不平直、熔宽不均匀, 而环状送粉熔覆层表面平整、几何均匀, 且熔覆效率提高。【结论】环状同轴送粉 TIG 熔覆在电弧稳定性、粉末利用率和成形质量方面均优于管状结构, 更适合高效表面修复工程应用。

**关键词:** 钨极惰性气体熔覆; 管状同轴送粉; 环状同轴送粉; 数值模拟; 粉末利用率

中图分类号: TG455 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20250416003

## Welding gun manufacturing and cladding process analysis of coaxial powder-feeding TIG cladding

ZHOU Canfeng, ZHAO Yuhang, LI Wenlong, GAO Hui

(Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Energy Engineering Advanced Joining Technology, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** [Objective] The aim is to solve problem of poor adaptability of pre-placed powder and lack of experimental data in conventional tungsten inert gas (TIG) cladding. [Methods] This paper designed and fabricated tubular and annular coaxial powder-feeding TIG guns. A three-dimensional numerical model was established to compare arc morphology, flow field and powder utilization rate, followed by process experiments in which welding heat input, powder-feeding rate and SiC concentration were varied to produce and evaluate cladding layers. [Results] The results showed that annular coaxial powder-feeding maintained a complete “bell-shaped” arc, eliminated annular vortices and achieved significantly higher powder utilization rate than tubular structure. Process trials revealed that tubular powder-feeding cladding layers had pits at arc extinguishing position, non-straight welds and uneven weld width, whereas the annular powder-feeding cladding layers presented a smooth surface, uniform geometry and higher cladding efficiency. [Conclusion] Annular coaxial powder-feeding TIG cladding is better than tubular configuration in arc stability, powder utilization rate and forming quality, making it more suitable for high-efficiency surface-repair applications.

**Key words:** tungsten inert gas cladding, tubular coaxial powder-feeding, annular coaxial powder-feeding, numerical simulation, powder utilization rate

### 0 前言

《“十四五”循环经济发展规划》强调遵循“减量化、

再利用、资源化”原则, 建立健全绿色低碳循环发展经济体系, 为经济社会可持续发展提供资源保障<sup>[1]</sup>。表面修复技术概念于 20 世纪 80 年代提出以后, 对工业

生产和日常生活产生了巨大的影响。目前常见的表面修复技术有激光熔覆、等离子熔覆与 TIG 熔覆<sup>[2-3]</sup>, 激光熔覆设备昂贵且熔深较深, 等离子熔覆熔宽较大、操作环境要求较高, TIG 熔覆具备的熔宽大、熔深浅、电弧燃烧稳定的优点非常适用于表面修复。激光熔覆、等离子熔覆、焊条熔覆与 TIG 熔覆的对比研究表明, TIG 熔覆仍然是具有发展前景的经济高效熔覆修复技术<sup>[4-7]</sup>。目前, TIG 熔覆常见的填料方式主要为送粉与送丝, 而送粉又分为传统的预置粉末法, 以及旁轴送粉法与同轴送粉法。PRASAD 等学者<sup>[8]</sup>在预先放置的 NiTi 粉末层上使用 TIG 电弧在 Ti-6Al-4V 合金上制备了大面积的 NiTi 涂层。旁轴送粉扰乱电弧周围气体流场, 因此在 TIG 熔覆中基本上没有得到应用。同轴送粉工艺被广泛应用于激光熔覆和等离子熔覆, 但是在 TIG 熔覆中的深入研究相对较少。徐国健等学者<sup>[9]</sup>研究了 TIG 焊接装置, 该装置将送丝与送粉技术相结合, 焊丝从焊枪顶部通过半裂式空心钨极送至电弧-熔池区域, 粉末从四路送粉喷嘴同轴送往待焊接区域。HUANG 等学者<sup>[10]</sup>提出了一种新型活性焊接方法, 粉末熔池耦合活性 TIG, 使用双层气体焊接, 内层气体为保护气, 外层气体为载粉气, 该方法结构类似于同轴送粉 TIG。

文中设计制造了管状、环状 2 种同轴送粉 TIG 熔覆焊枪, 选用高斯分布热源模型进行了 TIG 熔覆数值模拟, 并进行了熔覆试验。以期解决熔覆工艺中预置粉末适性差、试验数据匮乏等问题。

## 1 同轴送粉 TIG 熔覆焊枪研制

### 1.1 管状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪

图 1 为管状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪三维模型, 该焊枪由焊枪主体、导电铜块、供粉接口、保护气体接口、保护气体喷嘴、隔热罩、钨极、出粉铜管等组成。焊接电源负极通过螺栓与导电铜块连接, 2 个供粉接口与钨极轴线平行布置, 2 个保护气体接口与钨极轴线垂直布置, 隔热罩用于保护出粉铜管内的粉末免受钨极尖端高温熔化的影响。

### 1.2 环状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪

图 2 为环状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪关键结构。送粉结构示意图如图 2(a) 所示, 其中送粉内环上部螺柱用于与 TIG 焊枪本体连接、下部螺纹与图 2(b) 中的外环内螺纹连接, 形成送粉结构, 如图 2(c) 所示。内环、外环口径不同, 二者之间形成一条如图 2(d) 所示

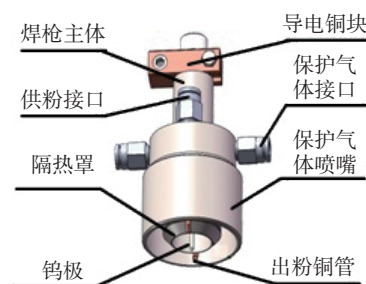


图 1 管状同轴送粉 TIG 熔覆焊枪三维模型

Fig. 1 Welding torch 3D model of tubular coaxial powder-feeding TIG cladding

的环形窄缝, 构成粉末输送通道。送粉内环设置多个对称小孔, 氩气均匀喷出, 为熔覆过程提供稳定的粉末供应与熔池保护气体供应。

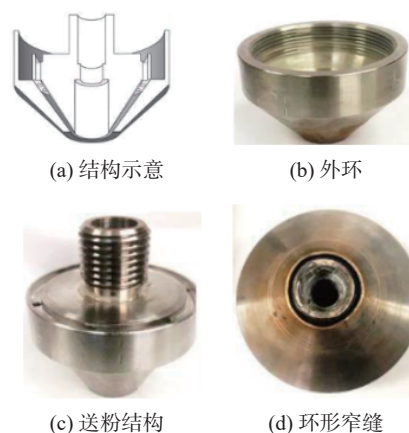


图 2 环状同轴送粉结构

Fig. 2 Annular coaxial powder-feeding structure. (a) schematic of structure; (b) external annulus; (c) powder-feeding part; (d) annular narrow slit

## 2 同轴送粉 TIG 熔覆过程数值模拟

### 2.1 管状同轴送粉 TIG 熔覆数值模拟

#### 2.1.1 热源模型

焊接电弧本质上是带电粒子流, 其数值模拟涉及的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、Maxwell 方程组。选用高斯分布热源模型进行管状同轴送粉 TIG 熔覆数值模拟, 该模型将热源看作半径为  $r$  的圆, 热流密度公式为

$$q_a(r) = q_m \exp(-\xi r^2) \quad (1)$$

式中:  $\xi$  为热能集中系数, 该系数的取值取决于焊接方法;  $q_m$  为最大热流值。

### 2.1.2 氩气的热物性参数

TIG 熔覆采用氩气作为保护气体,而氩气的热物性参数会发生较大变化<sup>[11]</sup>。使用 Origin 软件对氩气的热物性参数进行数据拟合,得到相关函数,进而进行插值分析,得到插值表用于数值模拟。拟合的氩气热物性参数包括密度、导电率、比热容、导热系数和动力粘度,其中比热容、导热系数拟合曲线分别如图 3、图 4 所示,其余参数拟合曲线参见参考文献 [12]。

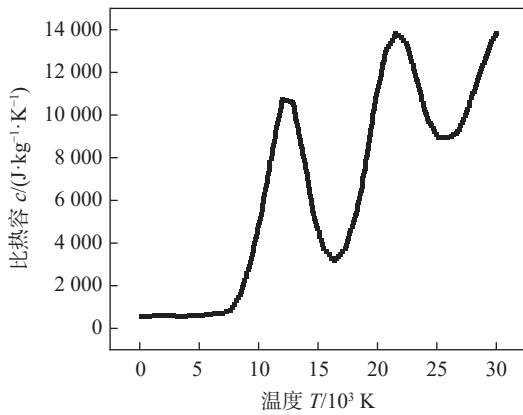


图 3 氩气比热容随温度变化曲线

Fig. 3 Curve of specific heat capacity of argon with temperature

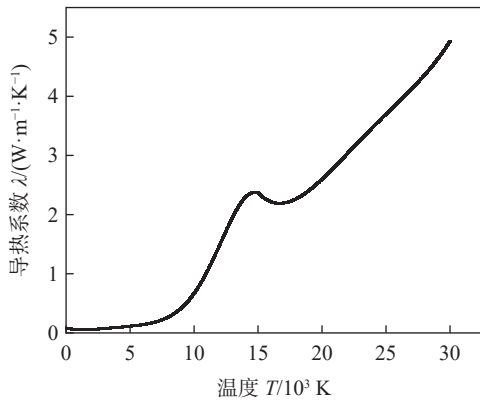


图 4 氩气导热系数随温度变化曲线

Fig. 4 Curve of thermal conductivity of argon with temperature

### 2.1.3 模型建立、网格划分与边界条件设置

TIG 焊接电弧模拟采用的软件是 COMSOL, 该软件把质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、Maxwell 方程组做成了可拖拽、可耦合、可改系数、可一键求解的图形化接口,边界条件是在管状同轴送粉 TIG 熔覆仿真中设置的。

图 5 为管状同轴送粉仿真模型和网格划分。TIG

熔覆电弧具有对称性,建立二维仿真模型如图 5(a) 所示,数值模拟计算域分为母材、氩气、钨极 3 个部分。LMNO 为 55 mm×30 mm 的 316L 不锈钢母材, IJ 为保护气体入口, FG 为粉末入口, 钨极直径  $\phi$  为 2.4 mm、与母材的间距为 10 mm。使用 Comsol 软件对模型进行网格划分,如图 5(b) 所示,域单元数为 3 480、钨极尖端温度为 2 382 K,采用该网格进行数值模拟。

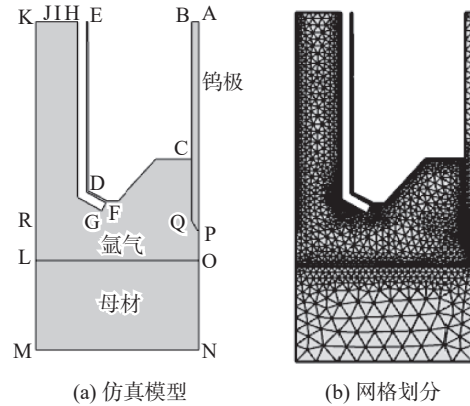


图 5 管状同轴送粉仿真模型与网格划分

Fig. 5 Simulation model and mesh generation of tubular coaxial powder-feeding. (a) simulation model; (b) meshing

TIG 熔覆时母材为阳极,钨极为阴极,电场边界条件的设置为母材电势 0 V,钨极 AB 端电流密度  $J_n$  的公式为

$$J_n = \frac{I}{\pi R^2} \quad (2)$$

式中:  $I$  为焊接电流;  $R$  为钨极半径。

磁场边界条件的设置为:焊接过程中,磁场覆盖整个求解域,对整个求解域进行磁矢势限界修复。流场边界条件的设置为:根据初步熔敷试验,确定保护气体入口 IJ 处流速为 35 m/s、送粉气体入口 FG 处流速为 7 m/s,气出口压力设置为 0 Pa。温度场边界条件的设置为:温度传导涉及到整个求解域,将求解域与外界接触边界设置为 300 K,将钨极与工件上表面设置为边界热源,同时将工件作为热通量边界。粒子轨迹边界条件的设置为:粒子轨迹入口与出口即为送粉气体入口与出口,将粒子轨迹求解与速度场耦合,并在氩气求解域添加曳力求解条件,在 10 s 内每隔 0.1 s 释放 10 颗粒子。

### 2.1.4 管状同轴送粉 TIG 熔覆数值模拟结果

图 6 为管状同轴送粉 TIG 熔覆温度场与流场数值模拟结果。在图 6(a) 中电弧形态大致呈现“钟罩”外

形,随着粉末的加入,温度场梯度变化较大。钨极尖端最高温度约为 4 000 K,远远低于传统 TIG 的 20 000 K,这是因为一方面粉末吸收大量热量,另一方面送粉气体的流动造成钨极尖端热量散失。316L 不锈钢母材表面温度为 3 000 ~ 3 500 K,低于传统 TIG,但是仍然足够熔化母材、形成熔池。管状同轴送粉 TIG 熔覆流场数值模拟结果如图 6(b) 所示,出粉铜管出口处在保护气体作用下形成环状涡流,严重影响电弧

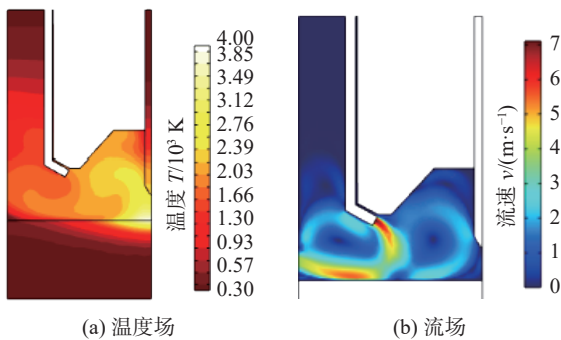


图 6 温度场与流场数值模拟结果

Fig. 6 Simulation result of temperature field and flow field; (a) temperature field; (b) flow filed

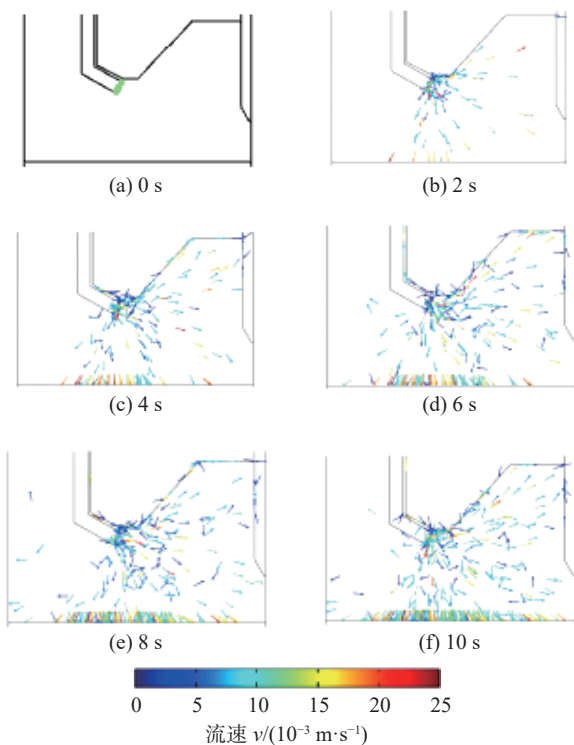


图 7 粒子轨迹数值模拟结果

Fig. 7 Simulation result of particle trajectory. (a) 0 s; (b) 2 s; (c) 4 s; (d) 6 s; (e) 8 s; (f) 10 s

的稳定性和挺度。粒子轨迹数值模拟结果如图 7 所示,只有少量粒子能够熔化于熔池中,软件对粒子分布信息进行统计的结果接近 30%,这是因为一方面出粉铜管出口与母材表面之间夹角不合适,另一方面送粉气体流速选择不合适。

## 2.2 环状同轴送粉 TIG 熔覆数值模拟

### 2.2.1 仿真模型建立、网格划分与边界条件设置

图 8 为环状同轴送粉 TIG 熔覆二维仿真模型及其网格划分。在图 8(a) 中, JKLM 为 316L 不锈钢母材, BC 为保护气体入口, FG 为粉末入口, 钨极直径为 2.4 mm、与母材的间距为 10 mm。在图 8(b) 中, 域单元数为 2 279、钨极尖端温度值为 2 517 K, 采用该网格进行数值模拟。

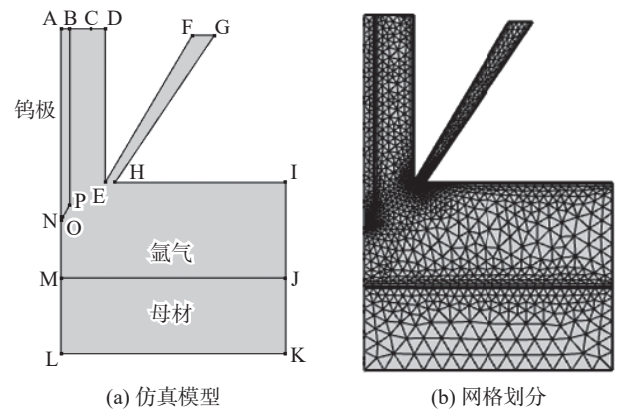


图 8 环状同轴送粉仿真模型与网格划分

Fig. 8 Simulation model and meshing of annular coaxial powder-feeding. (a) simulation model; (b) meshing

环状同轴送粉 TIG 熔覆与管状同轴送粉相比,数值模拟边界条件设置的主要不同之处,一是流场边界条件设置为: 氩气入口 BC 直径为 3 mm、流速为 0.5 m/s, 保护气体与复合材料粉末入口 FG 直径为 3 mm、流速为 7.5 m/s, IJ 为开放边界; 二是粒子轨迹边界条件设置为: 粒子入口为 FG, 在 10 s 内每隔 0.1 s 释放一次, 出口为 IJ。

### 2.2.2 环状同轴送粉 TIG 熔覆数值模拟结果

环状同轴送粉 TIG 熔覆温度场数值模拟结果如图 9 所示。电弧形态呈现相当完整的“钟罩”外形, 氩气电离之后的最高温度达到 15 300 K, 母材的最高温度与从钨极尖端附近的最高值向工件表面递减, 钨极尖端附近的最高气体速度为 148 m/s, 最高气体压力为 360 Pa, 如图 10 所示。

电磁场数值模拟结果如图 11 所示, 无论电弧电势还是磁感应强度, 均从钨极尖端最高值沿径向方向往周围递减。

粒子轨迹数值模拟结果如图 12 所示, 大部分粒子能够到达熔池区域, 软件对粒子分布信息进行统计的结果为: 共释放的 135 颗粒子中, 到达熔池区域的粒子有 96 颗, 粉末利用率达到 71%。数值模拟结果表明, 与管状同轴送粉 TIG 熔覆相比, 环状同轴送粉 TIG 熔覆的电弧形态相当稳定, 而且到达熔池区域的粉末数量显著增加, 因而有利于改善熔覆质量。

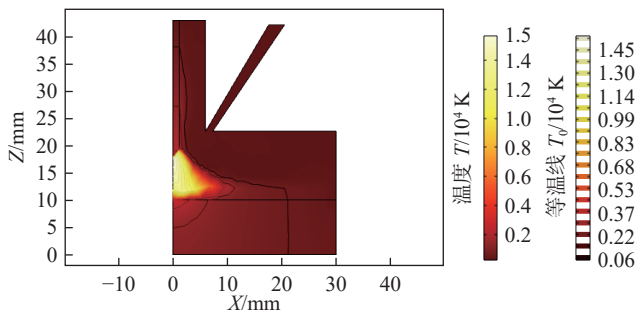
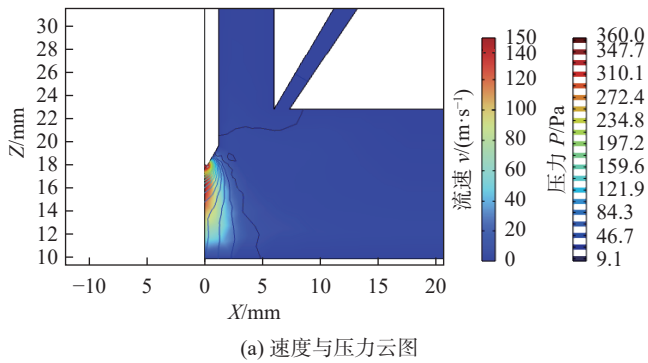
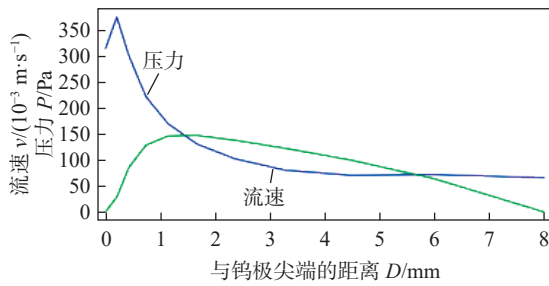


图 9 温度场数值模拟结果

Fig. 9 Simulation result of temperature field



(a) 速度与压力云图



(b) 速度与压力变化趋势

图 10 流场数值模拟结果

Fig. 10 Simulation result of flow field. (a) cloud map of velocity and pressure; (b) variation trends of velocity and pressure

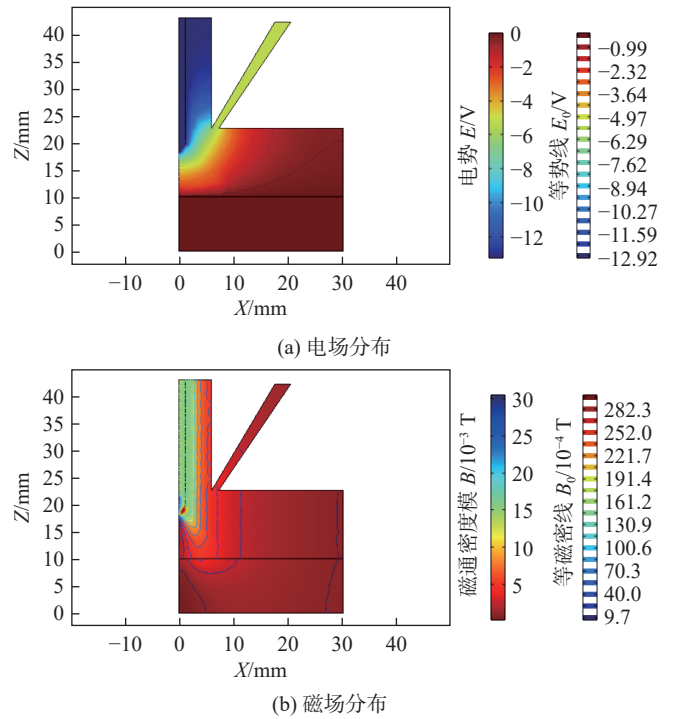


图 11 电磁场数值模拟结果

Fig. 11 Simulation result of electromagnetic field. (a) distribution of electric field; (b) distribution of magnetic field

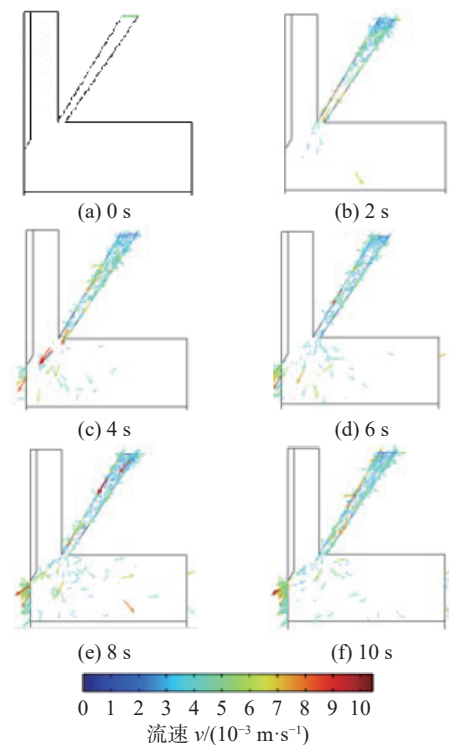


图 12 粒子轨迹数值模拟结果

Fig. 12 Simulation result of particle trajectory. (a) 0 s; (b) 2 s; (c) 4 s; (d) 6 s; (e) 8 s; (f) 10 s

### 3 同轴送粉 TIG 熔覆试验结果与分析

#### 3.1 试验条件

图 13 为 TIG 熔覆试验装置示意图, 主要由焊接电源、送粉器、焊接保护气瓶、送粉气瓶、母材、焊接机床, 以及安装在焊接机床上的同轴送粉 TIG 熔覆焊枪组成。用于 TIG 熔覆的时代逆变 WSM-400 焊接电源采用直流正接方式, 正极与母材 316L 钢板连接, 负极与焊枪导电铜块连接。保护气体、送粉气体均使用纯度 99.99% 的高纯氩气, 其中粉末速度通过送粉气体流量以及送粉器转盘旋转速度进行控制。焊接机床采用可编程 PLC 控制, 对母材 316L 钢板进行熔覆。

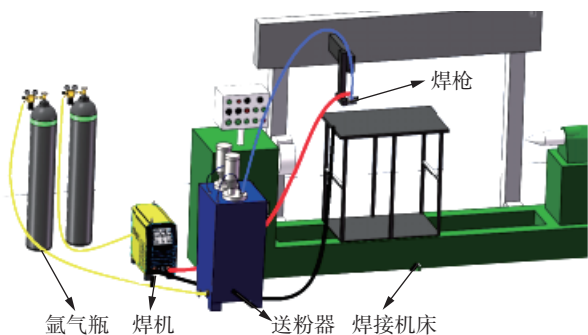


图 13 同轴送粉 TIG 熔覆试验装置示意图

Fig. 13 Schematic diagram of coaxial powder-feeding TIG cladding experimental setup

母材 316L 不锈钢板厚度为 10 mm, 长度和宽度分别为 250 mm, 150 mm, 可以在宽度方向进行多次熔敷。采用以 316L 粉末为主体、掺杂少量 SiC 粉末的复合粉末作为焊材, 316L 粉末为球形, 粒径为 5 ~ 10  $\mu\text{m}$ , SiC 粉末为不规则形状, 粒径为 13 ~ 25  $\mu\text{m}$ 。焊接保护气体流量为 15 L/min, 送粉气体流量为 2 L/min。为保证良好的送粉效果, 钨极伸出长度调整为 7 mm, 钨极尖端距母材 316L 不锈钢板表面距离为 8 ~ 9 mm, 对应的电弧电压约为 15 V。

#### 3.2 试验结果与分析

TIG 熔覆采用 3 个参数, 即焊接热输入、送粉量和 SiC 浓度。焊接热输入是单位长度熔覆层接受的电弧能量, 在数值上等于电弧电压与焊接电流的乘积与焊接速度的比值。送粉量是单位长度熔覆层接受的粉末质量, 在数值上等于单位时间送粉量与焊接速度的比值。SiC 浓度是复合粉末中 SiC 的质量百

分比。

进行管状同轴送粉 TIG 熔覆, 采用的参数为焊接热输入 9.9 kJ/cm、送粉量 0.41 g/mm 和 SiC 浓度 1.5%, 获得的熔覆层如图 14 所示。

进行环状同轴送粉 TIG 熔覆, 采用的参数为焊接热输入 10.8 kJ/cm、送粉量 6 g/mm 和 SiC 浓度 1.5%, 获得的熔覆层如图 15 所示。

在图 14 中, 管状同轴送粉 TIG 熔覆层存在 3 种明显的缺陷, 分别为熄弧位置产生凹坑, 焊缝不够平直, 以及焊缝熔宽不一致。熄弧位置产生凹坑, 主要是因为出粉铜管内径小, 粉末冲击速度高, 熄弧电流较小, 未能充分熔化的粉末进入熔池、形成凹坑。在熄弧之前, 停止送粉, 能够有效地消除凹坑。焊缝不够平直, 以及焊缝熔宽不一致, 表象上是因为电弧的稳定性和挺度不够、造成电弧漂移, 而本质上则是管状同轴送粉 TIG 熔覆流场数值模拟结果揭示的环状涡流的存在。比较图 15 与图 14, 环状同轴送粉 TIG 熔覆层显然在很大程度上改善了管状同轴送粉 TIG 熔覆层所存在的缺陷。此外, 环状同轴送粉 TIG 熔覆的送粉量远远高于管状同轴送粉, 因为管状同轴送粉只有对称分布的 2 根送粉管, 过大的送粉气流速度会造成电弧熄灭, 因此, 环状同轴送粉 TIG 熔覆效率更高。



图 14 管状同轴送粉的熔覆层

Fig. 14 Surface cladding layer of tubular coaxial powder-feeding



图 15 环状同轴送粉的熔覆层

Fig. 15 Surface cladding layer of annular coaxial powder-feeding

需要说明的, 虽然是同一个焊枪, 但是用于管状同轴送粉、环状同轴送粉的端部结构不同, 分别如图 1、图 2 所示, 前者通过出粉铜管送粉, 后者通过环形窄缝送粉, 前者的送粉量远远小于后者的送粉量。此外, 在参数研究试验中, 焊接热输入、送粉量和 SiC 浓度 3 个参量都不是固定值, 这里给出的是代表性的数值, 实际研究中采用的 SiC 浓度包括 1.5%、2%、3% 3 个数值。

## 4 结论

(1)设计制造了管状同轴送粉、环状同轴送粉2种TIG焊枪用于表面熔覆。

(2)进行了同轴送粉TIG熔覆过程数值模拟,环状同轴送粉比管状同轴送粉的电弧“钟罩”外形更完整,而且不存在环状涡流,此外,到达熔池区域的粉末利用率要高很多。

(3)进行了同轴送粉TIG熔覆试验,采用焊接热输入、送粉量和SiC浓度3个参数控制熔覆过程,试验结果表明,管状同轴送粉TIG熔覆层存在熄弧位置凹坑,焊缝不够平直以及焊缝熔宽不一致的问题,而环状同轴送粉TIG熔覆层不存在这些问题,且环状同轴送粉TIG熔覆效率更高。

## 参考文献

- [1] 宋华.“十四五”循环经济发展规划[J].上海建材,2021,(4):1-6.  
SONG Hua. The 14th five circular economy development plan[J]. Shanghai Building Materials, 2021(4): 1-6.
- [2] MENG J, JIN G, SHI X. Structure and tribological properties of argon arc cladding Ni-based nanocrystalline coatings[J]. Applied Surface Science, 2018, 431(2): 135-142.
- [3] LU J, WANG B, QIU X, et al. Microstructure evolution and properties of CrCuFe<sub>3</sub>NiTi high-entropy alloy coating by plasma cladding on Q235[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 328: 313-318.
- [4] 黎红,肖茂春,张斌,等.钛的氩弧焊、激光焊和等离子弧焊的实验研究[J].华西口腔医学杂志,1998,16(3):219-221.  
LI Hong, XIAO Maochun, ZHANG Bing, et al. Study on titanium joined with tungsten inert gas welding, laser welding and plasma welding [J]. West China Journal of Stomatology, 1998, 16(3): 219-221.
- [5] 李胜,韩立发,张小萍,等.激光熔覆与氩弧焊熔覆、焊条电弧焊熔覆的比较[J].热加工工艺,2011,40(15):125-126.  
LI Sheng, HAN Lifa, ZHANG Xiaoping, et al. Compare on laser cladding and argon arc cladding, covered electrode arc cladding[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(15): 125-126.
- [6] 王金凤,井子润,杨伟,等.激光熔覆与等离子熔覆的镍基合金熔覆层组织和性能对比[J].材料保护,2020,53(1):80-83.  
WANG Jinfeng, JING Zirun, YANG We, et al. Effect of laser cladding and plasma cladding on microstructure and properties of nickel-based alloy cladding layer[J]. Materials Protection, 2020, 53(1): 80-83.
- [7] 王子龙,秦建,路全彬,等.焊接方法对S22053双相钢焊接接头组织和性能的影响[J].焊接,2018(8):21-27.  
WANG Zilong, QIN Jian, LU Quanbin, et al. Effect of welding methods on microstructure and properties of S22053 welding joints[J]. Welding & Joining, 2018(8): 21-27.
- [8] PRASAD R, WAGHMARE D, KUMAR K, et al. Effect of overlapping condition on large area NiTi layer deposited on Ti-6Al-4V alloy by TIG cladding technique-science direct [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 385: 125417.
- [9] 徐国建,柳晋,刘占起,等.一种同轴弧内送丝与弧外送粉TIG电弧增材制造装置:中国,CN111266702A[P].2020-06-12  
XU Guojian, LIU Jin, LIU Zhanqi, et al. A TIG arc-based additive manufacturing device featuring coaxial in-arc wire feeding and out-of-arc powder feeding: China, CN111266702A[P]. 2020-06-12
- [10] HUANG Y, LIU R, HAO Y. Gas pool coupled activating tig welding method with coupling arc electrode [J], Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(6): 169-176.
- [11] MURPHY A, TANAKA M, YAMAMOTO K, et al. Modelling of thermal plasmas for arc welding: The role of the shielding gas properties and of metal vapour[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(19): 194006.
- [12] 李文龙.基于同轴送粉的TIG表面熔覆修复技术研究[D].北京:北京石油化工学院,2022.  
LI Wenlong. Research on surface cladding repair technology of TIG welding based on coaxial powder feeding[D]. Beijing, China: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2022.

第一作者:周灿丰,博士,教授;主要从事水下焊接与焊接自动化等方面的研究;canfeng@bipt.edu.cn。

(编辑:王盈盈)

## 本文引用格式:

周灿丰,赵宇航,李文龙,等.同轴送粉TIG熔覆焊枪研制与熔覆过程分析[J].焊接,2026(1):25-31.

ZHOU Canfeng, ZHAO Yuhang, LI Wenlong, et al. Welding gun manufacturing and cladding process analysis of coaxial powder-feeding TIG cladding[J]. Welding & Joining, 2026(1): 25-31.