

基于 Fluent 软件的 Keyhole-TIG 焊接电弧的数值模拟

张凌峰¹, 王 飞^{1,2}, 刘红兵^{1,2}, 杨 坡¹, 王基尧³, 张天理^{1,2}, 刘晓丽⁴,
于治水^{1,2}, 李 桓⁵, Cressault Yann⁶

(1.上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201620;

2.上海工程技术大学 上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620;

3.上海多木实业有限公司, 上海 201812; 4.河北特种设备监督检验研究院, 河北 石家庄 050200;

5.天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 6.图卢兹第三大学 LAPLACE 实验室, 法国图卢兹 F-31062)

摘 要: 以自由燃烧的 Keyhole-TIG 电弧为研究对象, 建立了统一电弧-钨极-阳极的二维轴对称模型。采用 Fluent 软件对焊接电流为 520 A 的稳态 Keyhole-TIG 电弧进行了模拟, 以获得电弧的温度、速度、压强和电流密度等物理量及其分布。结果表明: 钨极下方电弧的最高温度达 36 000 K; 电弧出现强烈的阴极喷射, 高速等离子体产生的动压力是形成小孔的主要原因; 由于小孔的泄压作用, 阳极表面附近未形成明显的高压区; 大部分电流从阳极工件上表面流入钨极, 仅 19% 的电流从小孔中进入; 电弧传入小孔的热量占总热量的 17%, 剩余热量通过阳极上表面进入。

关键词: Keyhole-TIG; 焊接; Fluent 软件; 电弧特性; 数值模拟

中图分类号: TG404; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1008-1690(2023)02-0035-07

Numerical Simulation of Keyhole-TIG Welding Arc Based on Fluent Software

ZHANG Lingfeng¹, WANG Fei^{1,2}, LIU Hongbing^{1,2}, YANG Po¹, WANG Jiyao³,
ZHANG Tianli^{1,2}, LIU Xiaoli⁴, YU Zhishui^{1,2}, LI Huan⁵, Cressault Yann⁶

(1.School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science,

Shanghai 201620, China; 2.Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced

Manufacturing Technology, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

3.Shanghai Duomu Industry Co., Ltd., Shanghai 201812, China;

4.Hebei Special Equipment Supervision and Inspection Institute, Shijiazhuang 050200, Hebei China;

5.School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

6.Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE), Université Toulouse III-Paul Sabatier,
Toulouse F-31062, France)

Abstract: Taking the free-burning Keyhole-TIG arc as a research object, a two-dimensional axisymmetric model unifying arc-tungsten-anode was established. The steady-state Keyhole-TIG arc with a welding current of 520 A was simulated by a Fluent software to obtain physical variables such as temperature, speed, pressure, and current density of the arc and their distribution. The results showed that (a) the maximum temperature of the arc under the tungsten electrode was up to 36 000 K; (b) the arc exhibited a strong cathode jet, and the formation of keyholes

收稿日期: 2022-09-08

作者简介: 张凌峰(1999—), 男, 江苏连云港人, 硕士, 主要研究方向: 焊接数值模拟。

E-mail: zlingfeng0318@163.com

通信作者: 王飞(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 焊接电弧物理、先进焊接工艺。

E-mail: wangfei@suces.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(52005320); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2020068); 浙江省重点研发计划资助项目(2021C01085); 宁波市北仑区重点技术研究项目(2021BLG005)

was traced largely to dynamic pressure generated by the high-speed plasma; (c) no obvious high-pressure area formed near the anode surface because the keyhole acted as pressure relief; (d) most of the current flowed from the upper surface of the anode workpiece to the tungsten electrode, and as little as 19% of the current entered through the keyholes; and (e) the heat the arc transferred into the keyhole accounted for 17% of the total heat, and the remainder entered through the upper surface of anode.

Key words: Keyhole-TIG; welding; Fluent software; arc characteristic; numerical simulation

0 引言

Keyhole-TIG(穿孔型 TIG)焊是一种在传统钨极惰性气体保护焊(tungsten-inert-gas arc welding, TIG)基础上增大焊接电流及提高钨极冷却强度而发展的焊接新工艺,大电流下的小孔效应使其能单面焊双面成形,在船舶制造^[1]和压力容器制造^[2]等领域具有广阔的应用前景。

目前已成功实现了碳钢^[3]、不锈钢^[4]、钛合金^[5]和 Invar36 合金^[6]等材料的焊接。研究表明,小孔的稳定性决定了 Keyhole-TIG 焊接过程的稳定性和焊接接头的质量^[7-8]。小孔焊接的主要问题是电弧压力和热流密度^[9],这些数据很难通过试验而需通过数值模拟获得。已有的数值模拟研究大多采用自上而下的组合高斯热源来简化 Keyhole-TIG 电弧加热过程^[10-11],缺少对电弧特性的分析,不能准确反映电弧加热电极的特性。少数研究者基于磁流体动力学理论对电弧进行模拟。张瑞华等^[12]分析了大电流条件下 Keyhole-TIG 电弧的特性,但没有考虑阳极的状况。段士华^[13]对比了未穿孔与穿孔的电弧特性,但未考虑电弧与电极之间的能量传递。当前,对电弧特性尤其是电弧-阳极间的热、电、力的传递特性没有完整的认识,缺少准确反映 Keyhole-TIG 焊电弧传热传质特性的数学模型,而这对穿孔型 TIG 焊接工艺的优化和推广应用很有意义。

本文建立了电弧-钨极-阳极统一的 Keyhole-TIG 焊二维轴对称模型,并考虑了温度、速度、压强和电流密度等多种物理量的作用,以最大限度反应真实的穿孔型 TIG 电弧的特性。采用 Fluent 软件模拟焊接电流为 520 A、板厚为 10 mm 条件下的 Keyhole-TIG 稳态电弧,确定了上述物理量的分布,可为加深对穿孔型 TIG 电弧特性的认识和进一步优化焊接设备和工艺提供参考。

1 计算模型

1.1 基本假设

为使模拟计算准确和简便,根据 Keyhole-TIG 焊

的实际过程作如下假设:

- (1) 电弧的流动性质为层流流动的牛顿流体。
- (2) 电弧的热力学状态为 LTE(局部热力学平衡)状态。
- (3) 采用带小孔的水冷铜作阳极。
- (4) 电弧与工件不发生相对移动。

以水冷铜作阳极。水冷铜在电弧长时间加热下不会熔化,其与电弧间保持相对静止,且不考虑熔池的传热和流动,从而可减小计算难度,有利于分析电弧的热力特性及其与阳极间的能量传递。因此,在模拟电弧时,常用水冷铜作阳极^[14]。

1.2 控制方程组

在上述假设条件下,对电弧、钨极和水冷铜阳极采用不同的控制方程计算:电弧等离子体是一种磁流体,其计算模型可用磁流体动力学方程组表征,该方程组描述了质量、动量、能量、电流及磁势守恒^[14]。由于钨极和水冷铜阳极不熔化,不涉及动量守恒方程。上述控制方程如下。

1) 质量守恒方程

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

式中: ρ 为密度; $\vec{v}$ 为速度。

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \tau + \vec{j} \times \vec{B} + \rho \vec{g} \tag{2}$$

式中: P 为压强; $\vec{g}$ 为重力加速度($9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$); $\vec{j}$ 为电流密度; $\vec{B}$ 为磁感应强度; τ 为剪切应力。 τ 可以表示为:

$$\tau = 2\eta \left[\frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] - \frac{2}{3} \text{Tr} \left[\frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) Id \right] \tag{3}$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} h) = -\vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\kappa}{c_p} \nabla h \right) + \underbrace{\vec{j} \cdot \vec{j}}_{\text{源项}} + TS \tag{4}$$

式中:源项中 $(\vec{j} \cdot \vec{j})/\sigma$ 为欧姆热; TS 为表辐射损失。电弧和电极等不同部位的能量守恒方程的源项不同。电弧的 $TS = -4\pi \varepsilon_N$ 。其中: ε_N 为净辐射系

数;钨极和铜阳极的 TS 为零。

4) 电流连续性方程

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0 \tag{5}$$

利用欧姆定律推导电势 V , 得出电场强度和电流密度:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = -\sigma \vec{\nabla} V \tag{6}$$

5) 磁矢量势守恒方程

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma_0 \vec{\nabla} A) = -\mu_0 \vec{j} \tag{7}$$

式中: μ_0 为真空电导率; A 为磁矢量势。磁感应强度与磁矢量势的关系为 $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 。

此外, 电弧-电极间还存在能量传递, 需对电弧-电极的界面进行特殊处理。对于钨极, 进入其表面的热量不仅包括传导热, 还需考虑由于热发射造成的冷却效应以及离子流产生的加热效应。因此钨极表面的热流密度如式(8)所示。等式右第1项表示从电弧向钨极传递的传导热, 第2项表示电子发射带走的热流, 第3项表示离子热。

$$q_c = |j_i| V_i - |j_e| \varphi_c - \kappa \frac{\partial T}{\partial n} \tag{8}$$

式中: j_e 为电子电流密度; j_i 为离子电流密度; φ_c 为钨的功函数; κ 为导热系数。理论上, 电子电流密度不能超过电子热发射的极限值 j_R 。根据 Richardson

方程, j_R 可以表示为:

$$j_R = AT_c^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_c}{k_B T}\right) \tag{9}$$

式中: A 为表面发生系数; T_c 为钨极表面温度; φ_c 为钨的功函数(eV)。

电子电流密度和离子电流密度分别为:

$$|j_e| = \begin{cases} j_R & \text{if } (|j \cdot n| - j_R) > 0 \\ |j \cdot n| & \text{if } (|j \cdot n| - j_R) \leq 0 \end{cases}; |j_i| = |j \cdot n| - |j_e| \tag{10}$$

对于阳极, 进入其表面的热量不仅要考虑热传导, 还需考虑由于电子被工件吸收造成的热效应, 因此阳极表面的热流密度可以表示为:

$$q_a = |j \cdot n| \varphi_a - \kappa \frac{\partial T}{\partial n} \tag{11}$$

式中: φ_a 为铜的功函数, $\varphi_a = 4.5$ eV。

1.3 计算模型

对 10 mm 厚 304 不锈钢板进行穿孔 TIG 焊接, 经不同条件试焊后, 确定焊接电流为 520 A, 氩气保护, 其流量为 20 L/min, 焊接效果如图 1 所示。图 1(a) 为在 800 帧/s、透光率为 1%、光圈为 4、曝光时间为 30 μ s 的条件下拍摄的焊接电弧, 图 1(b, c) 为焊接后钢板的表面形貌。可见, 在上述条件下焊缝成形良好, 可作为数值模拟的条件。

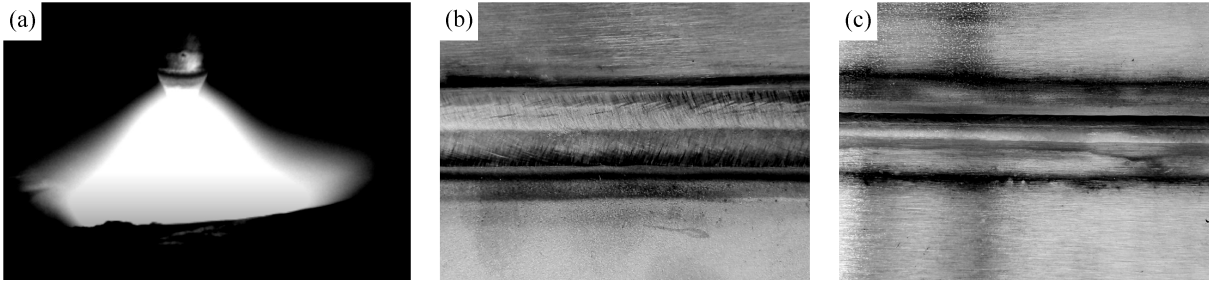


图 1 Keyhole-TIG 焊接的电弧 (a) 及焊缝的正面 (b) 和背面 (c) 宏观形貌

由于稳态电弧与电弧中心线旋转对称, 将 Keyhole-TIG 电弧模型简化为二维轴对称结构, 如图 2 所示。图 2 中各点坐标单位为 mm, I 为原点, $AFILN$ 为对称轴, BEF 、 GHK 和 JK 为流固耦合边界, BC 为气体速度入口, CDG 、 JMN 为气体压力出口, 其余均为壁面。钨极半径 AB 为 3.2 mm, 钨极尖角为 50° , 钨极与工件的间距 FI 为 2.5 mm, 水冷铜阳极厚度 GJ 为 10 mm。小孔入口半径 HI 为 1.5 mm, 小孔出口半径 KL 为 0.5 mm, 以模拟实际的焊接小孔尺寸。模型设定的边界条件如表 1 所示。

1.4 模拟方法

采用 Gambit 2.4.6 软件对 Keyhole-TIG 电弧数值模拟进行前处理, 采用网格划分法^[15]处理电弧-

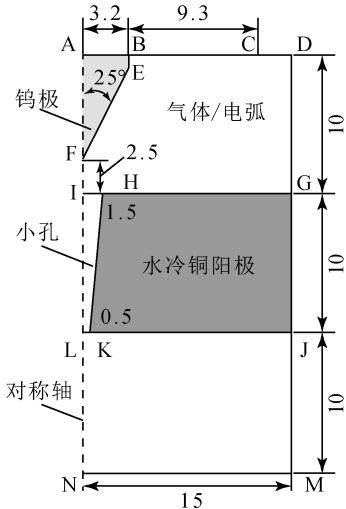


图 2 Keyhole-TIG 电弧模型的示意图

表 1 模拟的边界条件

项目	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	温度/K	电势/V	磁矢量势/($\text{T} \cdot \text{m}$)
AFILN	$\partial v / \partial r = 0$	$\partial T / \partial r = 0$	$\partial V / \partial r = 0$	$\partial A / \partial r = 0$
AB	$v = 0$	$T = 2\ 200$	$I = 520\ \text{A}$	$\nabla A \cdot e_n = 0$
BC	$\rho v = 20\ \text{L/min}$	$\nabla T \cdot e_n = 0$	$\nabla V \cdot e_n = 0$	$\nabla A \cdot e_n = 0$
CDG、JMN	压力出口	$T = 300$	$\nabla V \cdot e_n = 0$	$A = 0$
JK	$v = 0$	$T = 1\ 000$	$V = 0$	$\nabla A \cdot e_n = 0$
GJ	$v = 0$	$T = 300$	$\nabla V \cdot e_n = 0$	$A = 0$
GHK	$v = 0$	Eq. 11	$\nabla V \cdot e_n = 0$	-
BEF	$v = 0$	Eq. 8	$\nabla V \cdot e_n = 0$	-

电极间电流传递,阴极端部和电弧中心附近的网格尺寸约为 0.1 mm,电极临近电弧区域的网格尺寸约为 0.2 mm,其余区域的网格尺寸沿对称轴径向向逐步增大,最大尺寸为 0.3 mm。

取上述模型调整材料参数,以实际焊接参数为模拟条件,即焊接电流为 520 A,保护气体为氩气,氩气流量为 20 L/min。氩气在 300~42 000 K 的热物理参数通过计算获得,具体计算方法参考有关文献^[16-17]。

采用 Fluent 2020 -R2 软件对上述方程求解。由于钨极惰性气体保护焊电弧的压强变化小于 1%,因此选择基于压强的求解器 (pressure-based solver) 采用 Simple 算法和 Inter(R) I7 7500 U 处理器进行计算,约 10 min 后达到收敛。此外,需设定钨极与工件之间电弧区域的初始温度为 40 000 K,以保证 Keyhole-TIG 焊起弧。

2 模拟结果与分析

2.1 温度场

Keyhole-TIG 焊接电弧的温度场呈钟罩形分布,如图 3 所示。电弧温度场与图 1(a) 所示的 Keyhole-TIG 电弧辐射形态一致,而温度与辐射是正相关的,说明该模型合理,模拟结果具有实际意义。Keyhole-TIG 电弧最高温度位于钨极下方近钨极处,达 36 000 K。这些特征与 TIG 电弧相似^[18-19],其差异

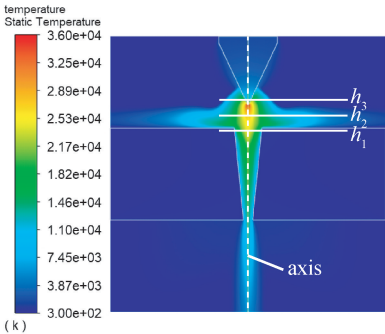


图 3 Keyhole-TIG 电弧的温度场

主要为电弧温度。为进一步说明 Keyhole-TIG 电弧的温度分布,分析了电弧在水冷铜阳极上方 3 个不同高度 h 上的温度分布,即 $h_1 = 0\ \text{mm}$, $h_2 = 1\ \text{mm}$, $h_3 = 2.0\ \text{mm}$,如图 3 所示。

电弧在轴线上的温度分布如图 4(a) 所示,其特点:近钨极处有一个温度陡峰;轴向温度逐渐下降;小孔入口处温度约为 25 000 K,出口处约为 12 000 K。上述特点由电弧的发热和散热条件决定。电弧的发热主要为欧姆热,其值与电流密度的平方成正比,而电弧形态为钟罩形,因此越靠近钨极处的电流密度越大,发热量也越大。电弧的散热则与周围物体和自身状况有关,钨极温度远低于电弧,在紧邻钨极处电弧的部分热量进入钨极,因此此处电弧温度较低,曲线上出现温度陡峰。远离钨极处电弧散热主要通过对流、传导和辐射,因此具有上述的温度分布特点。

电弧在阳极上方不同高度处的温度分布如图 4(b) 所示。电弧高度不同,其径向的温度降低量不同。高度越接近钨极的电弧,其中心温度越高,但由于电弧半径也越小,温度降低幅度也越大。需说明,在 $h_1 = 0.0\ \text{mm}$ 高度上,径向上依次经过小孔入口和水冷铜阳极。模拟中,设定的小孔入口半径为 1.5 mm,由于水冷铜温度较低 (低于 1 400 K),而小孔入口处电弧温度较高 (18 000~25 000 K),因此径向 1.5 mm 处温度陡降。

2.2 速度及压强场分布

Keyhole-TIG 电弧速度场分布云图及其局部矢量图如图 5 所示。Keyhole-TIG 电弧的最大速度出现在钨极下方的电弧轴线,为 2 130 m/s。电弧进入小孔时速度仍高达 2 000 m/s,电弧速度沿小孔方向略有降低,小孔出口处约为 830 m/s。电弧离开小孔后,随着电弧温度的降低,速度也下降。

在 Keyhole-TIG 焊接中,小孔的形成主要是电弧压力所致,包括动压力和静压力,且动压力和静压力能相互转换,动压力可用 $\rho v^2/2$ 表示。模拟发现,

Keyhole-TIG 在小孔附近具有较高的速度,导致电弧具有很高的动压力,是形成小孔的主要原因。

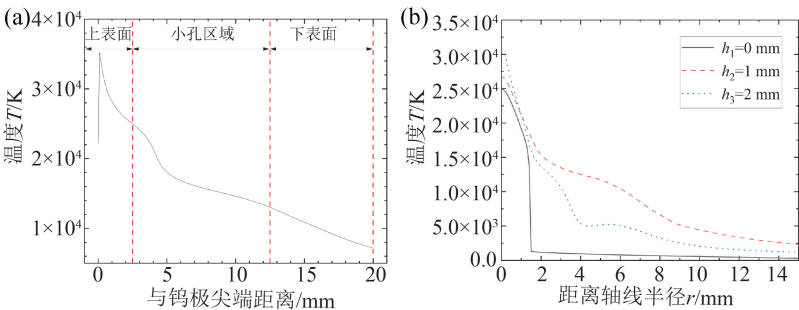


图 4 电弧轴线 (a) 和不同高度 (b) 的温度分布

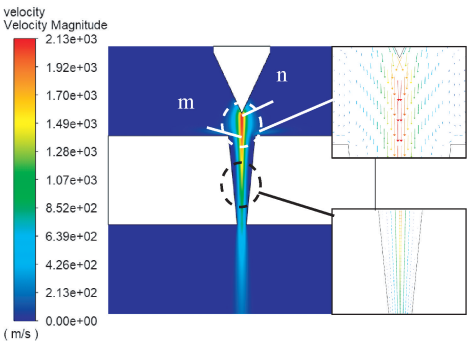


图 5 Keyhole-TIG 电弧的速度场

此外,Keyhole-TIG 电弧显示出强烈的阴极喷射,即出现从阴极向阳极的高速运动,这是电弧自磁收缩效应和电弧形态变化所致。假定电弧在阴极喷射段呈轴对称分布, m 、 n 均在电弧轴线上, m 为弧根某点, n 为弧柱充分扩展区某点,如图 5 所示。

电流密度一定时,由于自磁收缩效应产生的电弧径向压强近似为:

$$P(r)=\mu_0j_z^2\frac{a^2-r^2}{4}\tag{12}$$

式中: μ_0 为真空磁导率; j_z 为轴向电流密度; a 为电弧半径。关系式 $j_z=I/(\pi a^2)$ 表明:弧根 m 处电弧半径 $a=r_m$,压强 P_m 为 $\mu_0I^2/(4r_m^2)$;弧柱 n 处 $a=r_n$,压强 P_n 为 $\mu_0I^2/(4r_n^2)$ 。由于 P_m 、 P_n 有差异,导致电弧产生阴极喷射。阴极喷射压力 P_e 为:

$$P_e=P_m-P_n=\frac{\mu_0I_2}{4}\left(\frac{1}{r_m^2}-\frac{1}{r_n^2}\right)\tag{13}$$

由式(13)可知,钨极阴极喷射压强 P_e 决定于电弧形状和电流,电弧形状 r_m 、 r_n 一定时,阴极喷射的压强与电流平方成正比。TIG 电流一般小于 200 A,而 Keyhole-TIG 电流一般大于 400 A,理论上 Keyhole-TIG 电弧喷射压强 P_e 至少是传统 TIG 电弧喷射压强的 4 倍。当 TIG 电流小于 300 A 时,其喷射压强不超过 1 800 Pa^[19-21]。Keyhole-TIG 电弧压强场如图 6 所示,电弧在钨极端部形成一个高压区,

其最大压强为 7 320 Pa,可见焊接电流是影响阴极喷射程度的主要因素。

高速运动的等离子体冲击阳极表面会产生较大的电弧压力,从而在阳极表面形成高压区。但实际上,高速等离子流一部分受阳极壁面阻碍导致沿阳极表面向两侧流出量较少,其转化的静压较低,如 A 区所示;另一部分则保持较高速度流入小孔,其静压值也较小,如 B 区所示。因此,阳极表面未形成高压区主要是由于小孔的泄压作用所致。此外,由于小孔间隙变窄,流入小孔的大量高速等离子体而难以及时流出,从而在小孔内积累形成较大的压强,最终在小孔出口泄压。

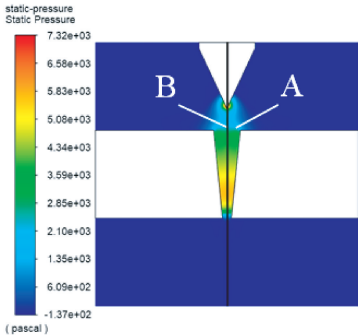


图 6 Keyhole-TIG 电弧压强场

2.3 电流密度与热流密度分布

Keyhole-TIG 电弧电流密度分布云图如图 7 (a) 所示,近钨极尖端处电流密度最大,说明此处发生了强烈的气体放电。图 7 (b) 为电流密度矢量图,电流从阳极流向钨极,这与实际焊接时的直流正极接法一致。相应地,电子从钨极流向阳极,并主要流向阳极上表面而非小孔内部。进入阳极的热流密度主要决定于电流密度分布,因此 Keyhole-TIG 的主要加热区为阳极上表面而非小孔。

图 8 (a) 为 $h_1=0$ mm 高度上的轴向电流密度 J_z ,阳极上表面小孔入口边缘的电流密度 J_z 最大。图 8 (b,c) 为电流密度进入小孔后深度增加及孔径

减小时也逐步减小,即仅少量电子进入小孔。进一步计算电子热,对小孔内壁及阳极上表面的电流密度进行积分,阳极上表面的焊接电流可通过 J_z 在 h_1 面上的积分 $\int j_z ds$ (或 $2\pi \int j_z r dr$) 得到。前者的积分值

为 97.5 A,后者为 422.5 A,两者之和即为总焊接电流 520 A,因此进入小孔的电子热和进入工件上方的电子热占总电子热的 19% 和 81%。

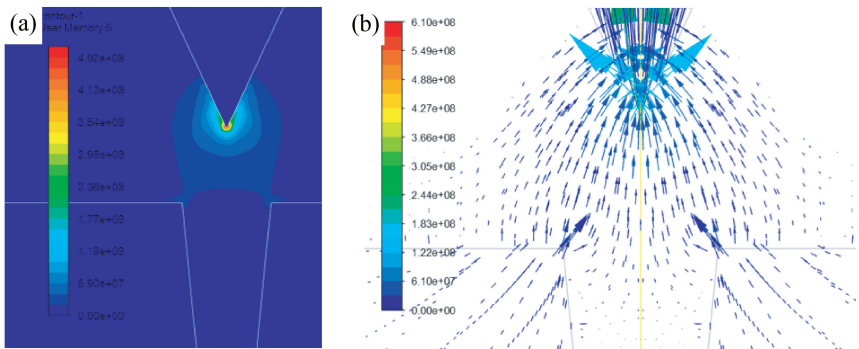


图 7 Keyhole-TIG 电弧电流密度分布云图 (a) 和矢量图 (b)

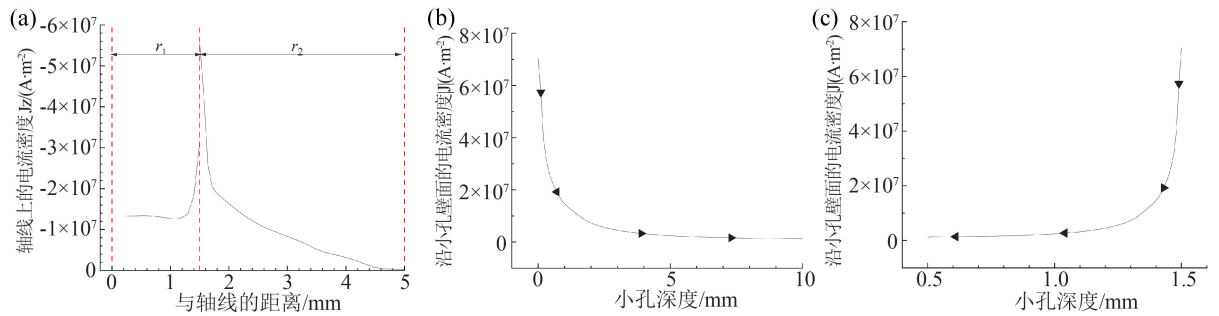


图 8 阳极上表面 ($h_1=0$ mm) (a)、小孔深度方向 (b) 和小孔半径方向 (c) 的电流分布

除了电子热以外,进一步估算进入阳极上方和小孔的传热。由图 3 的电弧温度场可知,阳极上方的温度和小孔内壁的电弧温度相近,且阳极表面温度与小孔内壁温度也相近,因此电弧对这两个部位的对流传热主要取决于受热面积。小孔进口内径为 1.5 mm,出口内径为 0.5 mm,深度为 10 mm,假定阳极表面加热半径为 8 mm,据此可计算出电弧对小孔内壁的传热和对阳极上方的传热分别占总传热的 15% 和 85%。

关于电弧传热,传热与电子热在总热量中的占比近似相等的假设在普通 TIG 焊传热中是成立的。上述分析说明,电弧向小孔内壁传递的热量占总热量的 17% 左右,而剩余的热量则通过工件上方进入。

3 结论

(1) Keyhole-TIG 电弧温度场云图呈钟罩形,钨极正下方温度最高,达 36 000 K,远高于一般 TIG 电弧温度 (约 22 000 K);阳极小孔入口处温度约为 25 000 K,出口处约为 12 000 K。

(2) Keyhole-TIG 电弧会产生强烈的阴极喷射,

电弧出现在钨极下方、电弧轴线处,最高速度为 3 210 m/s;电弧进入小孔的速度较大,为 2 000 m/s,小孔出口处降低至 830 m/s。

(3) Keyhole-TIG 电弧在钨极附近产生高压区,最高压强为 7 320 Pa,但阳极表面未形成明显的强高压区,这与小孔的泄压作用有关。

(4) Keyhole-TIG 中大部分电流从阳极工件上表面流入,仅 19% 从小孔进入;电弧向小孔内壁传递的热量占总热量的 17% 左右,剩余部分通过工件上方进入。

参考文献

[1] 雷小伟,张毅,余巍,等.高效 GTAW 焊接技术发展[J].材料开发与应,2018,33(6):130-134.
[2] 石永华,宁强,崔延鑫.Q345R 钢纵向磁场辅助 K-TIG 焊接接头组织和性能研究[J].电焊机,2020,50(9):87-91.
[3] 王泰,敖三三,魏祺,等.K-TIG 焊接中厚板的工艺窗口改进[J].工程科学学报,2020,42(6):763-768.
[4] CUI S L, LIU Z M, FANG Y X, et al. Keyhole process in K-TIG welding on 4mm thick 304 stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243:217-228.

(下转第 49 页)

挤压 WE43 镁合金的断裂模式为准解理断裂,以 $\leq 0.1\text{ s}^{-1}$ 的应变速率拉伸试验时,断裂模式为韧性断裂,是由于第二相粒子周围的微孔洞扩大形成韧窝,大量韧窝连接在一起,最终导致试样断裂。

参考文献

[1] LUO Q, GUO Y L, LIU B, et al. Thermodynamics and kinetics of phase transformation in rare earth-magnesium alloys: A critical review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 44 (9) :171-190.

[2] 万轶,汤文成,陈林.热处理对挤压变形 AZ61M 镁合金的组织与力学性能影响 [J]. 塑性工程学报,2019,26 (5) : 153 - 158.

[3] HUSEYIN Z, YUNUS T. Effect of Y addition on microstructure and corrosion behavior of extruded Mg-Zn-Nd-Zr alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys,2020,8(3) :640-653.

[4] ZHU G M, WANG L Y, Zhou H, et al. Improving ductility of a Mg alloy via non-basal <a> slip induced by Ca addition [J]. International Journal of Plasticity, 2019, 120: 164-179.

[5] 吕刚,何建丽,赵卫东,等. 挤压态 WE43 镁合金夹杂致裂的研究[J].锻压技术,2022,47(2) :192-198.

[6] ZHANG T, ZHAO X, LIU J, et al. The microstructure, fracture

mechanism and their correlation with the mechanical properties of as-cast Mg-Nd-Zn-Zr alloy under the effect of cooling rate [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 801(1) :140-151.

[7] VAISHAKH K V, NARASIMHAN R, YAZAR K U, et al. Mixed-mode (I and II) fracture behavior of a basal-textured magnesium alloy[J]. Acta Materialia, 2020, 193: 99-144.

[8] WANG Z, YAO S, CAO G, et al. Effect of yttrium addition on dynamic mechanical properties, microstructure, and fracture behavior of extrusion-shear ZC61+xY (x = 0, 1, 2, 3) alloys [J]. Materials Characterization, 2020, 169:110-121.

[9] 吴凡,邓文君,陈晓,等. 热轧及退火对 Mg-Y-Nd 镁合金力学性能及断裂行为的影响 [J]. 中国科技论文在线精品论文,2021, 14(3) :417-424.

[10] XIAO L, YANG G, MA J, et al. Microstructure evolution and fracture behavior of Mg- 9.5Gd- 0.9Zn- 0.5Zr alloy subjected to different heat treatments [J]. Materials Characterization, 2020, 168:516-529.

[11] 何进. Mg-RE 镁合金塑性变形机理与断裂机制的研究 [D].上海:上海工程技术大学,2020.

[12] AI W J, FANG G, Zhou J, et al. Effect of twinning on the deformation behavior of an extruded Mg-Zn-Zr alloy during hot compression testing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 373-381.

=====

(上接第 40 页)

[5] CUI S, SHI Y, ZHU T, et al. Microstructure, texture, and mechanical properties of Ti-6Al-4V joints by K-TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37:418-424.

[6] 徐磊,刘红兵,杨瑾,等.真空退火对 Invar36 合金 K-TIG 焊接接头组织和性能的影响[J].热处理,2021,36(6) :6-10,15.

[7] 黄逸飞,罗震,敖三三,等.基于非对称热源的异种钢深熔 TIG 焊接数值模拟[J].机械工程学报,2018,54(2) :41-47.

[8] 黄逸飞,罗震,王证茗,等.低合金钢深熔 TIG 水冷焊温度场数值模拟[J].焊接学报,2017,38(11) :103-107,133.

[9] YAN Z, JIANG F, HUANG N, et al. Heat and pressure characteristics in hollow cathode centered negative pressure arc column[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 156:668-677.

[10] CHEN S Y, LIU Z M, ZHAO X C, et al. Cathode-focused high-current arc: Heat source development with stable keyhole in stationary welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 143:118475.1-118475.13.

[11] CUI S W, PANG S W, PANG D Q, et al. Numerical simulation and experimental investigation on 2205 duplex stainless steel K-TIG welded joint [J]. Metals,2021,11(8) :1323.

[12] 张瑞华,栗海霞,李明,等.K-TIG 焊接电弧特性的数值分析[J].电焊机,2012,42(12) :7-11.

[13] 段士华. 3 mm 厚高强度 K-TIG 焊接工艺及电弧特性研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

[14] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow;

computational methods in mechanics and thermal science [M]. BocaRaton: CRC Press, 1980.

[15] LOWKE J J, HAIDAR J, MORROW R. A simplified unified theory of arcs and their electrodes [J]. Journal of Physics, D. Applied Physics: A Europhysics Journal, 1997, 30 (14) : 2033-2042.

[16] CRESSAULT Y, GLEIZES A. Thermal plasma properties for Ar-Al, Ar-Fe and Ar-Cu mixtures used in welding plasmas processes: I. Net emission coefficients at atmospheric pressure [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2013, 46(41) :5206.

[17] CRESSAULT Y, MURPHY A B, TEULET Ph, et al. Thermal plasma properties for Ar-Cu, Ar-Fe and Ar-Al mixtures used in welding plasmas processes: II. Transport coefficients at atmospheric pressure [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2013, 46 (41) :5207.

[18] 杨晓锋,周灿丰.基于 FLUENT 的 TIG 焊接电弧数值模拟 [J]. 新技术新工艺,2015(1) :40-42.

[19] 郭朝博,崔露露,陶凯,等.基于多物理场耦合的 TIG 焊电弧数值模拟研究 [J].河南工学院学报,2020,28(1) :60-64.

[20] FAN D, USHIO M, MATSUDA F. Numerical Computation of Arc Pressure Distribution (Welding Physics, Process & Instrument) [J]. Transactions of Jwri, 1986, 15(1) :1-5.

[21] 李桓,王飞,CRESSAULT Y,等.双钨极 TIG 电弧压强分布及其与等离子体喷射的关系 [J].电焊机,2017,47(7) :1-5.