

DOI: 10.3901/JME.2020.02.069

超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极 电弧特性的数值模拟^{*}

李渊博¹ 杨 涛² 郑韶先¹ 赵锡龙¹

(1. 兰州交通大学材料科学与工程学院 兰州 730070;

2. 西安石油大学材料科学与工程学院 西安 710065)

摘要: 绝缘固壁和片状偏钨极联合调控的方式能够改变超窄间隙中 TIG 电弧物理场分布, 从而解决底角熔合不良的问题。为了明确超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧特性的调控机理, 采用满足求解域的偏微分方程组和合理边界条件, 建立三维数学模型, 求解获得不同约束作用下电弧温度场、流场及电场分布, 其分布特征与已有的试验结果符合良好。模拟结果表明: 超窄间隙中绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场、流场及电场在坡口宽度方向上呈对称分布; 绝缘固壁对片状偏钨极电弧产生阴极调控和阳极调控作用; 改变约束高度能够实现阴极阳极联合调控, 从而提升电弧电流密度, 温度及等离子流速, 并有效限制侧壁分流; 约束宽度的变化仅能提供阴极调控作用使电流密度, 温度和等离子流速增加, 但无法限制侧壁分流; 阴极调控和阳极调控作用越强, 超窄间隙中约束电弧高温区, 电流密度及阴极射流向钨极放电间隙小的位置偏移越明显。

关键词: 约束电弧; 三维模型; 数值模拟; 超窄间隙焊接

中图分类号: TG403

Numerical Simulation of Constricted Sheet Tungsten Electrode Arc Characteristic with Insulating Solid Wall in Ultra Narrow Gap Welding Process

LI Yuanbo¹ YANG Tao² ZHENG Shaoxian¹ ZHAO Xilong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070;

2. College of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065)

Abstract: The TIG arc characteristics in ultra narrow gap could be changed by the combined regulation of sheet tungsten electrode and insulating solid wall for avoiding lack of fusion on the corner of square groove. For understanding the regulation mechanism of constricted sheet tungsten electrode arc characteristic with insulating solid wall in ultra narrow gap welding, the three-dimensional quasi-steady state mathematical model of constricted sheet tungsten electrode arc characteristic with insulating solid wall in ultra narrow gap welding process is presented based on a set of partial differential equations and reasonable boundaries conditions. The distributions of temperature, velocity and current density of constricted arc in ultra narrow gap welding process are obtained with different constricted effect of insulating solid wall. The results show that the temperature field, flow field and electric field of constricted sheet tungsten electrode arc with insulating solid wall in ultra narrow gap welding process are symmetric at width direction of ultra narrow gap groove; the insulating solid wall would change the characteristics of constricted arc by cathode and anode control effect; the different constricted height could provide combined regulation of cathode and anode control effect, by which the maximum current density, temperature and plasma velocity of constricted arc enhanced; meanwhile this combined regulation would also restrict the flow of arc current on the side; the variation of constricted width would only bring about cathode control effect to take greater current density, temperature and plasma velocity of constricted arc, and the flow of arc current on the side could not be avoided; when the cathode and anode control effects are stronger, the higher temperature region, current density and cathode jet of

^{*} 国家自然科学基金(51605384)和兰州交通大学青年科学基金(2018010)资助项目。20190228 收到初稿, 20190730 收到修改稿

constricted arc in ultra narrow gap groove could shift further to the location of sheet tungsten electrode with smaller discharge gap.

Key words: constricted arc; three dimension model; numerical simulation; ultra narrow gap welding

0 前言

超窄间隙 TIG 焊接(UNGW-TIG)方法采用间隙宽度仅为几个毫米的 I 型坡口施焊,极大地提高了焊接效率,并能获得力学性能优良的焊缝^[1-2]。然而,超窄间隙侧壁对电弧电场的影响,将引起电流向侧壁大量分流,进一步导致与电场耦合的温度场、流场等分布发生变化,最终造成坡口底角熔合不良的缺陷^[3]。文献[4-5]针对这一问题,提出并采用了片状偏钨极和绝缘固壁联合调控的方式,改善超窄间隙中电弧物理场分布,增强电弧对坡口底角的加热作用,取得了较好的效果。同时,研究表明绝缘固壁约束作用是控制超窄间隙焊接过程片状偏钨极电弧行为的决定因素,因此有必要明确绝缘固壁约束作用对电弧特性的调控机理。这一工作有助于掌握绝缘固壁约束片状偏钨极电弧的物理本质,也是进一步研究约束电弧作用下超窄间隙焊接熔池行为的前提和基础。

由于超窄间隙 I 型坡口较小的空间尺寸给试验测量约束电弧特性带来了极大地困难,且现有试验手段均很难给出焊接电弧的实时信息,故难以理解其物理本质。数值模拟方法与少量试验数据对比分析则为该难题的解决提供了一种有效途径。目前,对于焊接电弧的数值模拟国内外均做了大量研究,为简化问题多采用轴对称模型,如 BINI 等^[6]采用数值模拟研究了转移弧流场,温度场,电磁场的分布特征,并计算了不同焊接电流,弧长下热流密度及电弧热效率;MOUGENOT 等^[7]建立三维电弧-熔池耦合模型,并研究了活性元素对熔池流场的影响机理;肖磊等^[8]研究了交变磁场作用下 TIG 电弧物理场变化规律,揭示了电弧温度、压力及电流密度分布与时间的关系。对于非轴对称焊接电弧,各国学者也做了一些初步研究,WANG 等^[9]对双钨极耦合电弧三维模型进行了数值分析,研究了弧长、钨极间距对耦合电弧温度场,流场等的影响规律;HÄBLER 等^[10]针对窄间隙中摆动 TIG 电弧,建立了三维模型,并研究了固定位置处坡口中保护气流场及电弧温度场分布特征。上述工作为超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧行为的数值模拟提供了坚实的研究基础。

本文针对超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧,采用 CFD 求解软件 FLUENT,计算得

到超窄间隙中绝缘固壁约束片状偏钨极电弧的温度场,流场,电场和电流密度分布情况,通过对比分析研究绝缘固壁约束作用对超窄间隙中片状偏钨极电弧特性的影响规律和调控机理。

1 数学模型

1.1 基本假设

为简化数学模型,本文对电弧采用如下基本假设:① 电弧为连续层流的 Newton 流体,且处于局部热平衡(local thermodynamic equilibrium)状态;② 电弧满足光学薄性质,辐射的重吸收与整个波长的辐射损失相比可忽略;③ 阴极区和阳极区的复杂物理状态可以忽略;④ 电弧可看成是大气压下的稳态氩弧。

1.2 控制方程

质量守恒方程

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

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p T \mathbf{v}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, t 为时间, \mathbf{v} 为速度矢量, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{F} 为 Lorentz 力源项, c_p 为等压热容, k 为热导率, S 为能量源项, P 为压力, $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量,直角坐标系下其表达式为

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \mu \left(2 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) & i = j \\ \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

式中, μ 为动力黏度, v_i 为 x_i 方向的速度分量, \mathbf{F} 和 S 分别由式(5)、(6)计算

$$\mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

$$S = \frac{j^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \mathbf{j} \cdot \nabla T - S_R \quad (6)$$

式中, \mathbf{j} 为电流密度, \mathbf{B} 磁通密度, σ 为电导率, k_B 为 Boltzmann 常数, e 为电子电量, S_R 为辐射热损失,式(6)等号右边三项依次表示焦耳热,电子输运和辐射热损失。

电流连续性方程

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = 0 \quad (7)$$

欧姆定律

$$\mathbf{j} = -\sigma (\nabla \Phi) \quad (8)$$

磁矢势泊松方程

$$\nabla^2 A = -\mu_0 \mathbf{j} \quad (9)$$

磁通密度

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (10)$$

式中, Φ 为电势, \mathbf{A} 为磁矢势, μ_0 为真空磁导率。

1.3 边界条件和网格

超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧求解域及边界如图 1 所示, 建立三维直角坐标系, 令坡口底部阳极表面的形心为坐标原点, 坡口宽度方向与 y 轴平行, 坡口长度方向则与 x 轴平行。具体边界条件由表 1 给出, \mathbf{n} 表示边界单位法矢量。A 为片状偏钨极横截面, 由于距离阴极前端较近, 可近似认为温度与阴极相差不大, 指定为 3 000 K。B 为钨极与电弧等离子体之间的接触界面, 采用耦合边界以保证钨极和电弧之间温度及电磁方程的连续

性。由于片状偏钨极尖端电流密度分布与 TIG 电弧不同, 且无法准确获得其分布, 因而上述处理方法能够避免人为设置阴极电流密度产生的误差。这里没有考虑阳极和阴极鞘层区^[11], 阳极温度设置为 5 000 K。另一方面, 参考 LAGO 等^[12]的处理方式, 指定速度入口 F 的流速来模拟电弧后拖效应, 其值与电弧运动速度相同。C 为绝缘固壁与电弧的接触界面, 考虑到绝缘固壁采用外侧贴敷陶瓷片的水冷铜加工, 温度不超过铜的熔点, 设置为 1 000 K。同时, 为定量分析绝缘固壁约束作用对电弧特性的影响, 如图 1b 所示, 定义绝缘固壁下边缘至坡口底部的距离为约束高度 H_c , 绝缘固壁在坡口内侧的表面间距则定义为约束宽度 W_c , 通过调节约束高度 H_c 和约束宽度 W_c 均可改变绝缘固壁对电弧约束作用的强度。计算涉及物性参数均为温度的函数^[13]。

表 1 边界条件

边界	速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	温度 $T / 10^3 \text{ K}$	电势 Φ / V	磁矢势 $A / (\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1})$
A	0	3	$j = \frac{I}{a \times b}$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
B	0	耦合	耦合	耦合
C	0	1	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
D	0	5	$\Phi = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
E	0	5	$\Phi = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
F	$v_x = v_{\text{arc}}$	1	$\Phi = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
G	$v_z = v_{\text{giv}}$	1	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
H	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial n} = 0$	1	$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$

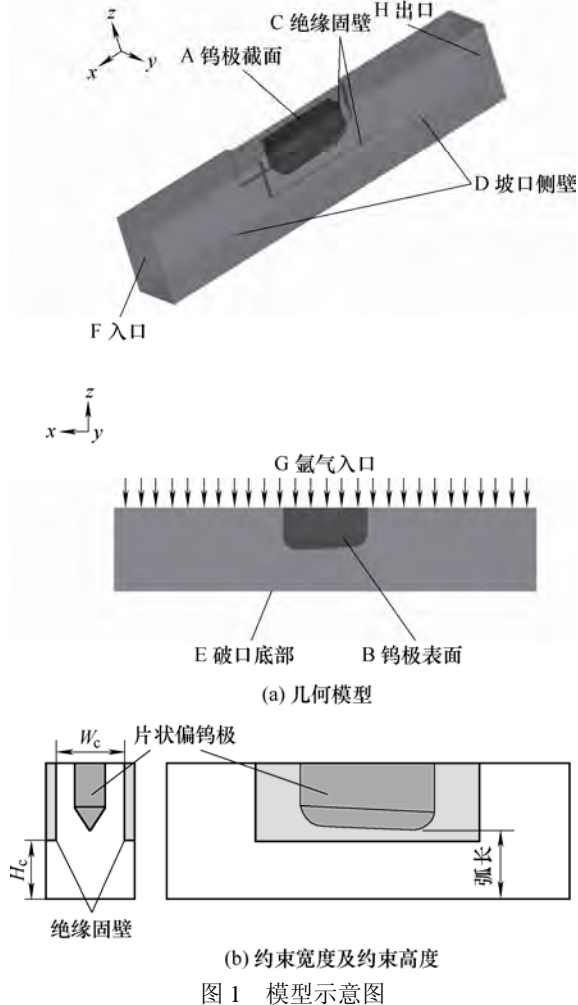


图 1 模型示意图

片状偏钨极几何尺寸由图 2 给出, 钨极横截面为 $6 \text{ mm} \times 1.34 \text{ mm}$ 的矩形, 电极尖端夹角 45° , 钨极前端斜边倾角 θ 为 3° 。针对 4 mm 宽 I 型坡口中的绝缘固壁约束片状偏钨极电弧, 采用 ICEM 前处理软件进行几何建模和网格划分, 求解域近似为长方体, 长度 40 mm , 宽度与 I 型坡口宽度相当, 高

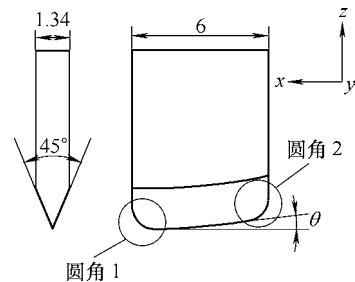


图 2 片状偏钨极几何尺寸(mm)

度由弧长决定。考虑到片状偏钨极几何形状的不规则性,利用分区划分网格的方法,且变量梯度较大的区域需要局部加密。通过 Fluent 求解器对电弧进行稳态计算,选择 SIMPLE 算法求解方程组,计算结果依靠 Tecplot 进行提取。

2 模拟结果及分析

针对间隙宽度为 4 mm 的超窄间隙 I 型坡口,建立绝缘固壁约束片状偏钨极电弧数学模型,弧长为 2 mm,焊接电流 200 A,保护气流量 4 L/min,电弧移动速度 $v_{\text{arc}}=20$ mm/s。对不同约束高度和约

束宽度下电弧温度场、流场、电场及电流密度进行求解。为便于分析,截取计算域中坡口宽度方向 yoz 面和坡口长度方向 xoz 面的模拟结果。

2.1 约束高度对超窄间隙中电弧特性的影响

约束高度 $H_C=1.5$ mm,约束宽度 $W_C=3$ mm 的模拟结果由图 3 给出。可以看到,对于超窄间隙中绝缘固壁约束片状偏钨极电弧而言,坡口宽度方向(yoz 面)电弧温度场,流场,电场及电流密度均呈对称分布,坡口底角处温度最低,高温区则出现在钨极下方;坡口长度方向(xoz 面)电弧高温区向 x 轴正方向偏置,钨极下方的阴极射流也发生同向偏移,且阴极附近存在较大的电势梯度和电流密度。

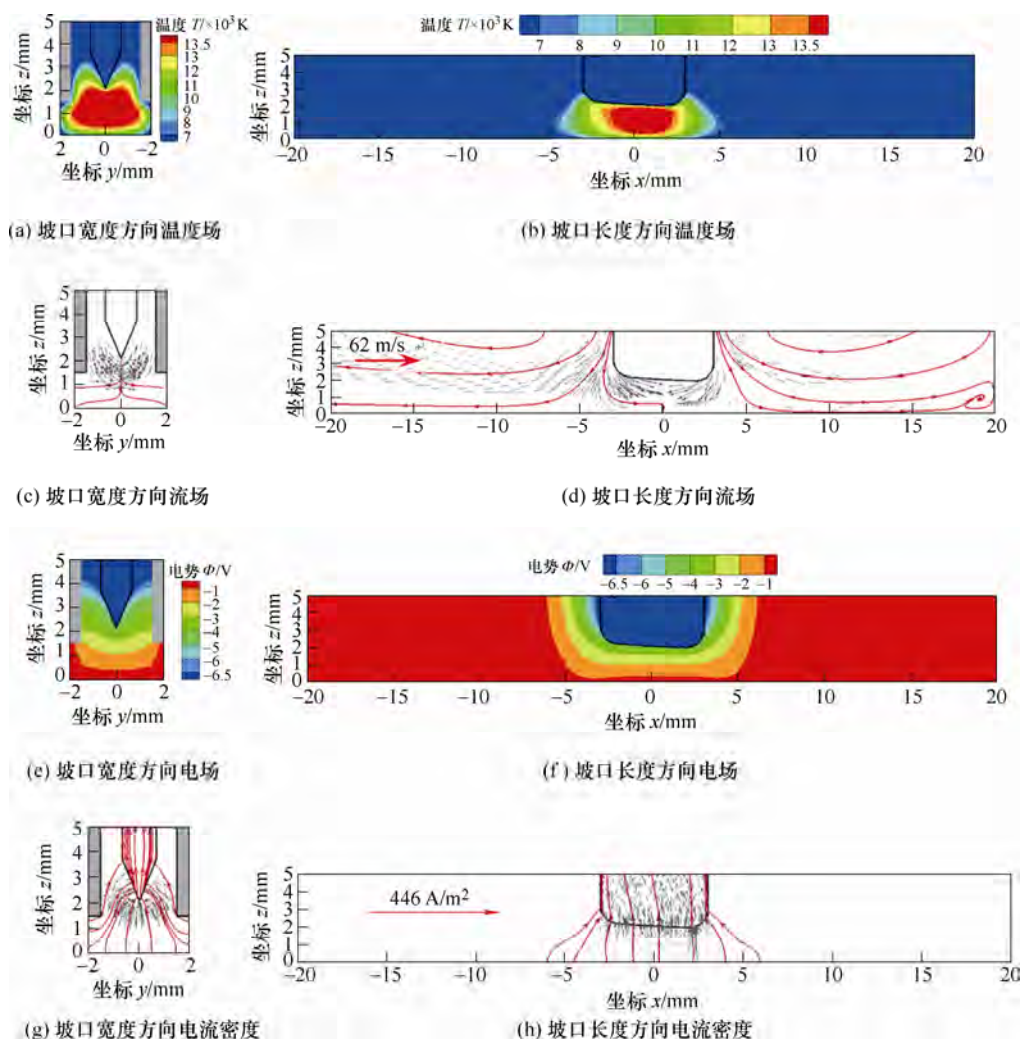


图3 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场,流场,电场及电流密度分布($H_C=1.5$ mm, $W_C=3$ mm)

数值模拟的结果可进一步通过试验测量数据进行验证。图 4 给出了 $H_C=2$ mm, $W_C=3$ mm, 坡口宽度及长度方向约束电弧温度、离子电流密度及阳极表面电弧压力分布曲线。其中,由于超窄间隙坡口过小的空间尺寸给辐射光谱测量电弧温度带来较大困难,故采用静电探针差动分析方法测定约

束电弧温度,同时计算得到弧柱空间离子电流密度;电弧压力则依靠小孔静态法获取,且因为坡口底角附近难以采用小孔测定电弧压力,因此仅截取远离底角的电弧压力结果进行分析。对比观察可以发现,试验测量的约束电弧温度、弧柱空间离子电流密度及阳极表面电弧压力分布与数值模拟分布

特征基本吻合, 均表现为坡口宽度方向对称分布, 坡口长度方向温度, 离子电流密度及电弧压力峰值向 x 轴正方向偏移的特点。与此同时, 距离阳极表面 0.8 mm 处测定的约束电弧温度峰值为 10 719 K, 根据 FANARA 和 SCHWANDER 等^[14-15]的研究,

静电探针测定的电弧温度一般为电弧实际温度的 65%~75%, 表明该位置处约束电弧实际温度在 14 292~16 490 K, 与数值模拟结果基本一致; 电弧压力峰值则为 300 Pa, 与数值模拟结果差别不大。

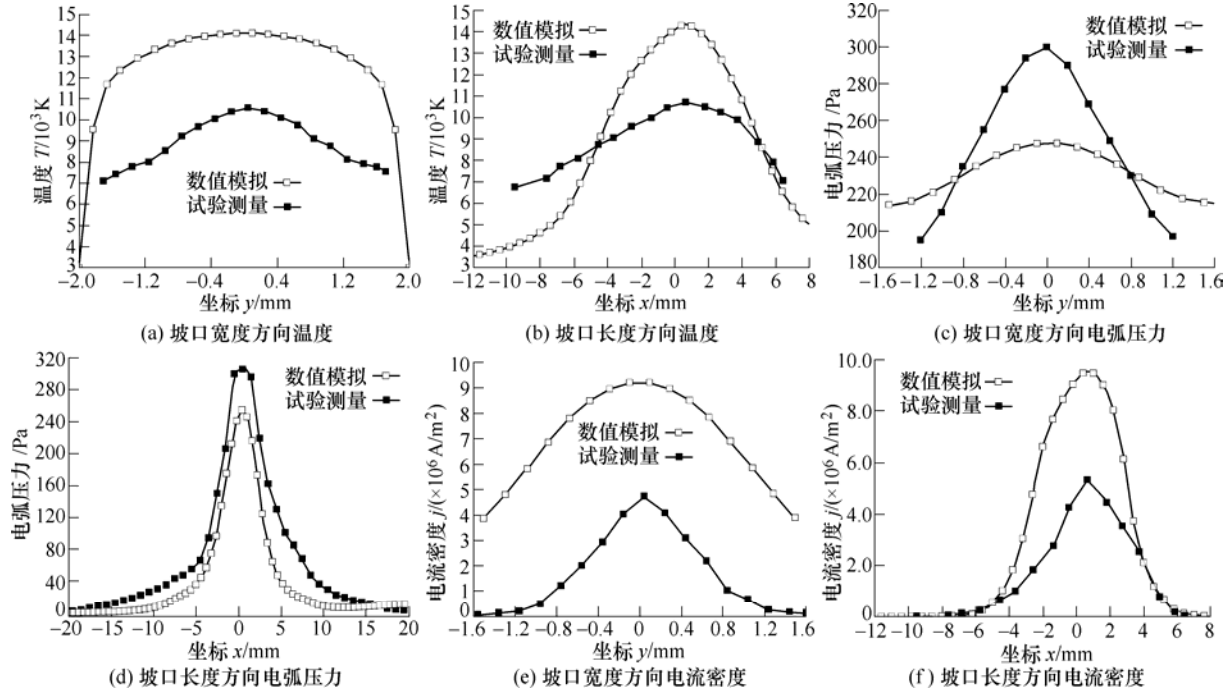
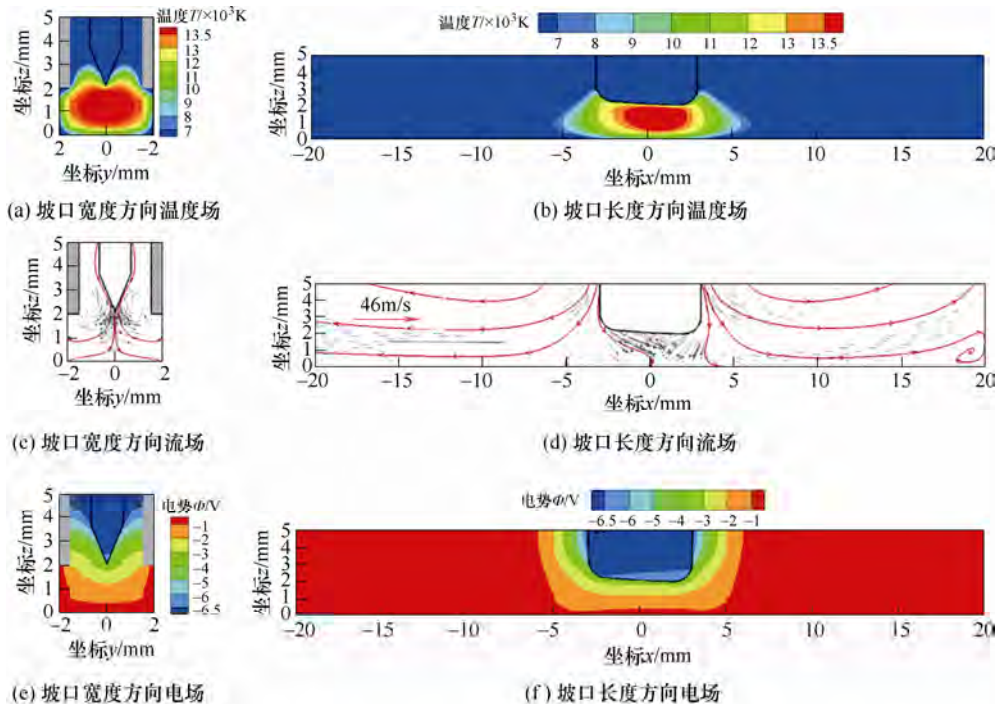
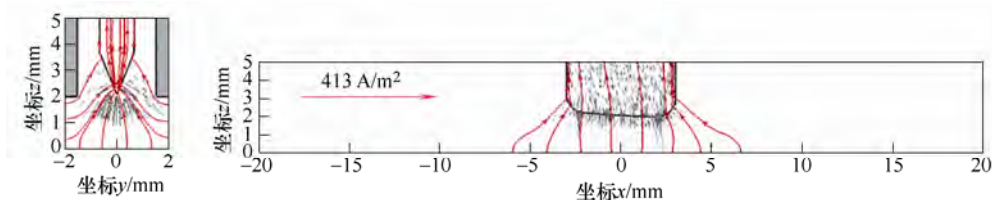


图4 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度、电弧压力及电流密度分布

进一步改变约束高度, 对比分析图3、图5、图6的结果可以看出, 随着约束高度的减小, 电弧温度、流速及电流密度峰值均随之增大; 坡口侧壁高温区范围显

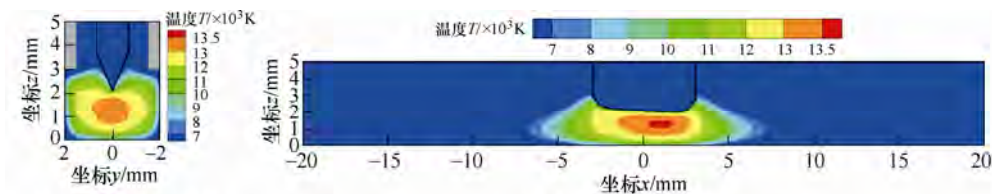
著收缩, 流入侧壁的电弧温度分布区域明显减少。同时, 电弧高温区显著扩展, 且沿 x 轴正方向进一步偏移, 该方向上阴极射流及电流密度的偏移也明显加剧。





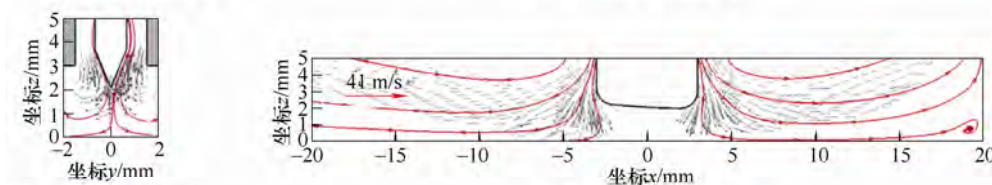
(g) 坡口宽度方向电流密度

(h) 坡口长度方向电流密度

图5 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场、流场、电场及电流密度分布($H_C=2$ mm, $W_C=3$ mm)

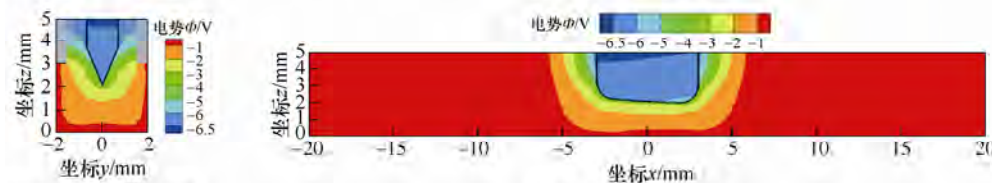
(a) 坡口宽度方向温度场

(b) 坡口长度方向温度场



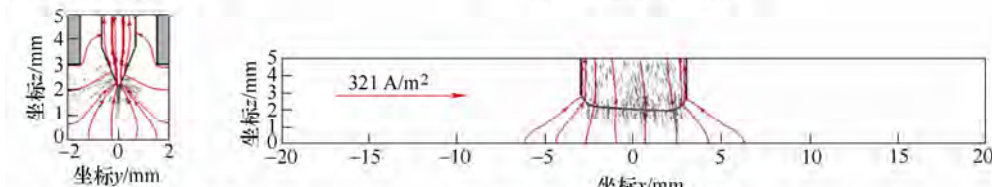
(c) 坡口宽度方向流场

(d) 坡口长度方向流场



(e) 坡口宽度方向电场

(f) 坡口长度方向电场



(g) 坡口宽度方向电流密度

(h) 坡口长度方向电流密度

图6 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场、流场、电场及电流密度分布($H_C=3$ mm, $W_C=3$ mm)

超窄间隙焊接过程中, 绝缘固壁主要通过阴极调控和阳极调控两种方式对片状偏钨极电弧施加影响。当绝缘固壁仅对片状偏钨极电弧弧根产生约束作用时, 电弧弧根发生收缩, 引起电弧电流密度提升, 这种调控方式即为阴极调控。阳极调控则是指通过改变阳极表面导电通道面积来使电荷载流区电流密度分布发生变化。减小绝缘固壁约束高度 H_C , 一方面会使坡口侧壁阳极表面导电通道面积减少, 从而有效削弱电弧电流向侧壁的分流, 而侧壁分流恰恰是超窄间隙焊接过程底角熔合不良缺陷的主要成因; 另一方面会增强对电弧弧根的约束作用, 提升电弧电流密度, 此时电弧自生磁场得到强化, 电弧等离子流速必然增加, 而且电弧焦耳热也将随电流密度增加而增大, 并导致电弧温度提升。可以看出, 改变绝缘固壁约束高度可同时获得阴极调控和

阳极调控的效果。

另外, 随着阴极和阳极调控作用的增强, 电弧电流密度进一步增加, 必然使电弧挺度增大, 从而削弱电弧运动时沿 x 轴负方向的惯性后拖效应。此时, 电弧电流势必沿 x 轴正方向向片状偏钨极放电间隙小的圆角 1 处流动, 并带动电弧高温区和阴极射流产生同向偏移。

但是, 过小的约束高度会导致绝缘固壁被电弧加热熔化, 从而丧失阴极和阳极调控作用。同时, 电弧电流将在圆角 1 处过度集中, 造成钨极局部过热烧损, 电弧无法稳定燃烧。

2.2 约束宽度对超窄间隙中电弧特性的影响

绝缘固壁约束宽度对电弧特性影响的模拟结果如图 5、7 及图 8 所示, 对比分析可知, 随着绝缘固壁约束宽度的减小, 坡口宽度方向电弧温度

场, 流场, 电场及电流密度仍然保持对称分布; 温度峰值, 流速峰值及电流密度峰值均增大, 但坡口侧壁温度及电流密度分布区域没有变化。同

时, 较小的约束宽度造成钨极下方高温区显著扩张, 且沿 x 轴正方向偏移加剧, 阴极射流也随之进一步偏移。

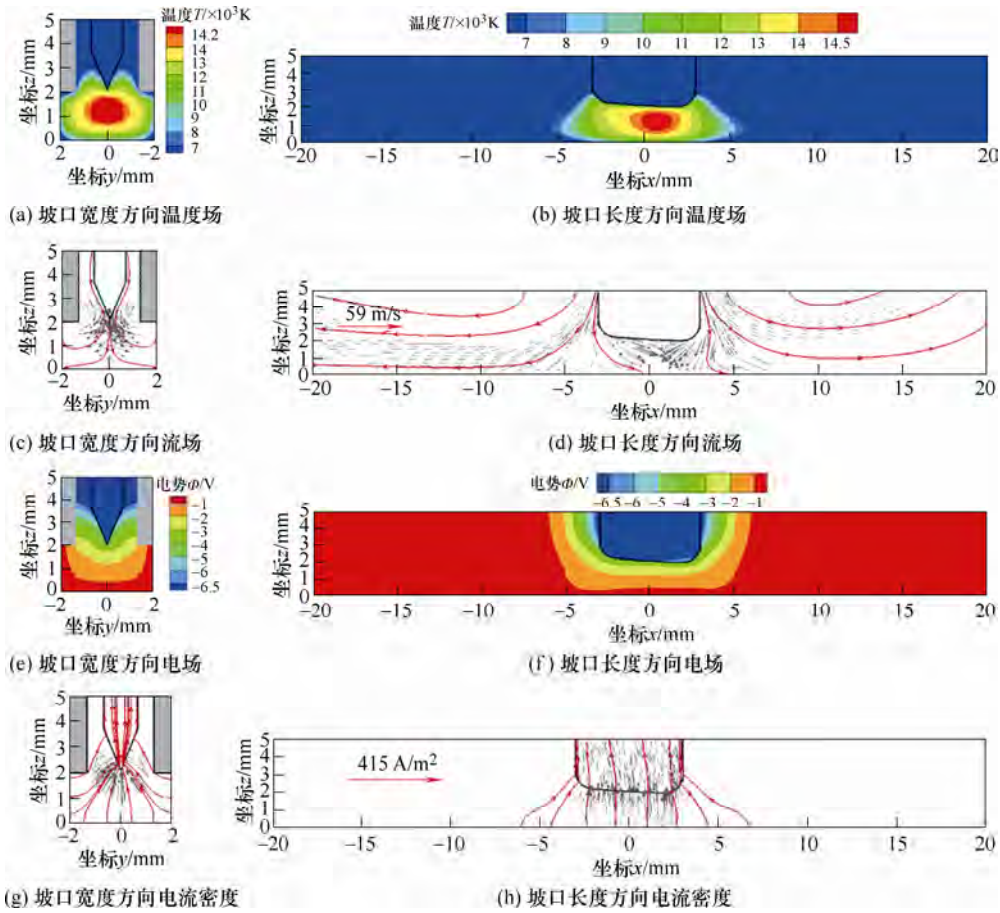
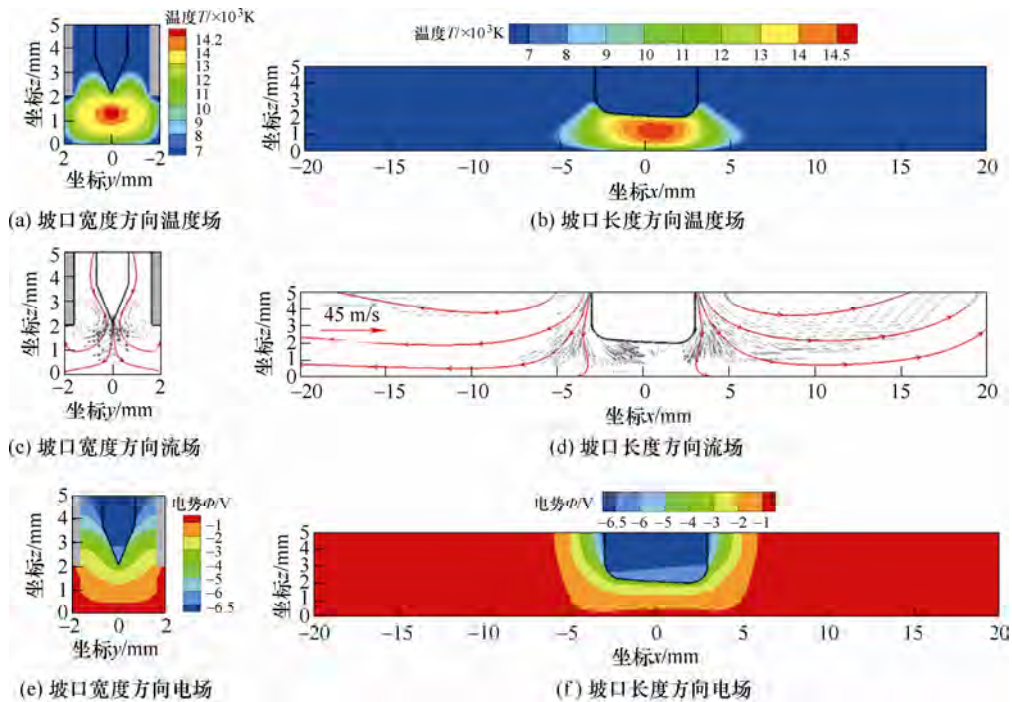


图7 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场、流场、电场及电流密度分布($W_C=2.6$ mm, $H_C=2$ mm)



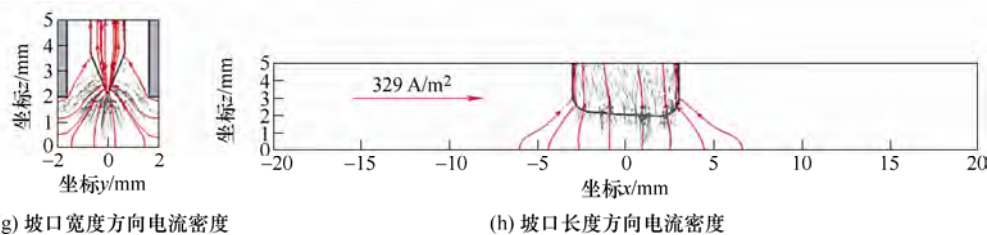


图 8 超窄间隙焊接过程绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场、流场、电场及电流密度分布($W_C=3.2$ mm, $H_C=2$ mm)

约束宽度减小使阴极调控作用增强, 超窄间隙中片状偏钨极电弧弧根收缩加剧, 载流区电流密度势必提升, 从而造成温度峰值, 流速峰值及电流密度峰值增加。然而, 约束宽度的变化并未改变坡口侧壁阳极表面导电通道面积, 故无法通过阳极调控作用限制电弧电流向侧壁分流。此外, 随着约束宽度的减小, 电流密度增大依然会增强电弧挺度, 并弱化惯性后拖作用, 最终电弧高温区及电流密度沿 x 轴正方向向放电间隙小的位置进一步偏移。然而, 过小的约束宽度同样会造成绝缘固壁熔化, 以及圆角 1 处电流过度集中产生的钨极烧损; 另一方面, 还会大幅减小氩气进入坡口底部的气流通道, 削弱保护气体对电弧和钨极的保护效果。

3 结论

(1) 超窄间隙焊接过程中绝缘固壁约束片状偏钨极电弧温度场、流场及电场仅相对于坡口宽度方向对称分布。

(2) 在绝缘固壁对电弧的阴极调控作用, 阳极调控作用, 片状偏钨极的引导作用以及电弧惯性后拖效应的共同影响下, 约束电弧温度场, 电流密度及阴极射流向放电间隙小的位置偏移。

(3) 通过调节绝缘固壁约束高度, 可同时对超窄间隙中片状偏钨极电弧进行阴极调控和阳极调控; 约束高度越小, 阴极和阳极调控作用越显著, 电弧电流密度、温度及流速随之提升, 侧壁分流受到明显抑制。

(4) 改变绝缘固壁约束宽度仅能对超窄间隙中片状偏钨极电弧进行阴极调控, 无法限制侧壁分流; 较小的约束宽度能够获得更强的阴极调控作用, 从而使电弧电流密度, 温度及等离子流速增大。

参 考 文 献

- [1] KORHONEN M, LUUKAS M, HANNINEN H. Narrow gap GTA welding of stainless steels[J]. Svetsaren, 2000, 55(1): 3-8.
- [2] ENGELHARD G, PELLKOFER D. Erfahrungen beim

orbitalschweißen in kraftwerks –anlagen[C]//Conference on Orbital GTAW Methods, Erding, Germany, 1995: 88-100.

- [3] 吴启东. 钨极焊接电弧在窄间隙中的电场分布[J]. 焊接学报, 1983, 1(4): 39-54.
- WU Qidong. The electric field intensity of TIG arc in narrow gap[J]. Transaction of the China Welding Institution, 1983, 4(1): 39-54.
- [4] 李渊博. 绝缘片约束 TIG 电弧的静电探针分析及其在超窄间隙中的加热特性[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- LI Yuanbo. The analysis of constricted TIG arc by insulating plate with electrostatic probe and arc heating characteristic in ultra-narrow gap[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [5] 李渊博, 朱亮. 绝缘片约束 TIG 电荷载流区的静电探针分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 55-58.
- LI Yuanbo, ZHU Liang. The electrostatic probe analysis of current-carrying region of constricting TIG arc with insulating sheet[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 55-58.
- [6] BINI R, MONNO M, BOULOS M I. Numerical and experimental study of transferred arcs in argon[J]. Journal of Physics. D: Applied Physics, 2006, 39(15): 3253-3266.
- [7] MOUGENOT J, GONZALEZ J J, FRETON P, et al. Plasma-weld interaction in tungsten insert-gas configuration[J]. Journal of Physics. D: Applied Physics, 2013, 46(4): 1-14.
- [8] 肖磊, 樊丁, 黄健康. 交变磁场作用下的 GTAW 非稳态电弧数值模拟[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 79-85.
- XIAO Lei, FAN Ding, HUANG Jiankang. Numerical simulation of unsteady arc in GTAW with alternate axial magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 79-85.
- [9] WANG Xinxin, FAN Ding, HUANG Jiankang, et al. A unified model of coupled arc plasma and weld pool for double electrodes TIG welding[J]. Journal of Physics. D: Applied Physics, 2014, 47(6): 1-14.

(下转第 85 页)

- [18] GAO Haibo, LÜ Fengtian, YUAN Baofeng, et al. Sinkage definition and visual detection for planetary rovers wheels on rough terrain based on wheel-soil interaction boundary[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, 98: 222-240.
- [19] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8: 679-698.

作者简介: 吕凤天, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为星球车轮地作用和机器视觉。

E-mail: hitlft@163.com

高海波, 男, 1970 年出生, 博士生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为移动机器人和深空探测。

E-mail: gaohaibo@hit.edu.cn

李楠(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士生。主要研究方向为星球车轮地作用和机器视觉。

E-mail: llnlanln@126.com



(上接第 76 页)

- [10] HÄBLER M, ROSE S, FÜSSEL U, et al. TIG narrow gap welding-new approaches to evaluate and improve the shielding gas coverage and the energy input[J]. *Welding in the World*, 2015, 59(1): 71-76.
- [11] MURPHY A B, TANAKA M, TASHIRO S, et al. A computational investigation of the effectiveness of different shielding gas mixtures for arc welding[J]. *Journal of Physics. D: Applied Physics*, 2009, 42(11): 1-14.
- [12] LAGO F, GONZALEZ J J, FRETON P, et al. A numerical modeling of an electric arc and its interaction with the anode: Part III. Application to the interaction of a lightning strike and an aircraft in flight[J]. *Journal of Physics. D: Applied Physics*, 2006, 39(5): 2294-2310.
- [13] CHOO R T C, SZEKELY J, WESTHOFF R C. On the calculation of the free surface temperature of

gas-tungsten-arc weld pools from first principles: Part I. modeling the welding arc[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1992, 23(3): 357-369.

- [14] FANARA C. Sweeping electrostatic probes in atmospheric pressure arc plasmas part-II: Temperature determination[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(3): 1082-1092.
- [15] SCHWANDER M, KWIATKOWSKI P, PRIESKE M. Comparison of analytical methods to determine the electron density and temperature for a laser-based atmospheric plasma jet[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2016, 123: 68-75.

作者简介: 李渊博, 男, 1984 年出生, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为高效焊接方法及焊接数值模拟。

E-mail: liyuanbo1027@163.com