

文章编号: 1673-5196(2015)04-0015-05

# 气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧传热 传质过程的数值分析

黄 勇, 陆肃中, 王新鑫, 李 慧

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧, 建立焊接电弧传热传质过程的数学模型。采用简化阴极边界层模型对阴极与电弧耦合求解, 计算得到气体熔池耦合活性 TIG 电弧等离子体的温度、氧气分布、等离子体流速、电势和电流密度等特征参数, 并与传统 TIG 电弧进行对比。结果表明: 氧气主要分布在电弧外围, 只有少量进入电弧内部; 与 TIG 电弧相比, 相同焊接参数下气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧温度上升, 等离子体流速增大, 电弧略有收缩, 阳极表面电流密度、热流密度与电弧压力峰值均增大。

**关键词:** 气体熔池耦合活性 TIG 焊; 双层气体; 电弧; 氧气; 数值模拟

**中图分类号:** TG403 **文献标识码:** A

## Numerical analysis of heat and mass transfer process of welding arc during gas pool coupled activating TIG welding

HUANG Yong, LU Su-zhong, WANG Xin-xin, LI Hui

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** A mathematical model is established to reveal heat and mass transfer process of gas pool coupled activating TIG welding arc. The coupling of welding arc with cathode is numerically simulated by using simplified cathode sheath model. By means of computation, the characteristic parameters of welding arc such as the plasma temperature, the distributions of oxygen, velocity of plasma, electric potential, and current density are obtained and compared with those of the arc of traditional TIG welding. The results show that oxygen is mainly distributed in the arc periphery, and only a small amount diffuses into the arc, compared with the arc of TIG welding, the arc temperature and velocity of plasma will increase, and the peak values of current density, heat flux, and arc pressure at anode surface increase under the same welding conditions.

**Key words:** gas pool coupled activating TIG welding TIG welding with gas-pool coupling and active gases; double-layer shielding gas; arc; oxygen; numerical simulation

钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)存在焊缝熔深浅, 焊接效率低等缺点, 在一定程度上限制了其在工业生产中的应用。研究发现, 在保护气体中添加  $O_2$  或  $CO_2$  可以增加 TIG 焊缝熔深, 提高焊接效率, 但是钨极与  $O_2$ 、 $CO_2$  直接接触易氧化烧损。为克服这一问题, Fujii 等<sup>[1]</sup> 提出 Advanced A-TIG 焊工艺, 将传统焊枪由单层结构改造为双层结构, 内层气体

为纯氩, 在外层通入的氩气中混入少量  $O_2$  或  $CO_2$  以便向熔池添加活性元素氧改变熔深。文献[2]在此基础上又提出气体熔池耦合活性 TIG 焊接法, 该方法改变了活性元素的引入方法和控制方式, 采用内外双层气体进行 TIG 焊接, 其中内层为惰性气体保护钨极和金属熔池, 外层气体引入活性元素氧以增加焊缝熔深或同时引入 N 元素以改善焊缝性能。通过调整焊枪内外喷嘴的相对位置, 可调节外层气体与熔池表面的耦合程度, 可实现深熔深、高质量的 TIG 焊。由于内外喷嘴通气, 气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧特性有别于 TIG 焊, 对焊接过程和焊接

收稿日期: 2014-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(51265029)

作者简介: 黄 勇(1972-), 男, 四川绵阳人, 博士, 副教授。

结果的影响更加复杂,因此有必要对其物理过程进行深入研究.

石珂等<sup>[3]</sup>运用 COMSOL 软件对 TIG 电弧进行了全耦合数值分析.雷玉成等<sup>[4]</sup>运用 ANSYS 有限元分析软件对氮氩混合气体保护的 TIG 电弧进行了数值模拟. Ding 等<sup>[5]</sup>建立二维双电极 GTAW 电弧模型,分析了电流、保护气体和气流量对电弧特性的影响.文献<sup>[6]</sup>研究了内外层均通氩气时 GP-CA-TIG 焊电弧压力随弧长的变化规律.这些研究多集中在普通 TIG 电弧或多电极 TIG 电弧,而对不同双层气体下的 TIG 焊接电弧研究甚少.

本文以外层气体为 O<sub>2</sub> 的气体熔池耦合活性 TIG 焊为研究对象,用数值模拟方法研究其电弧的传热传质过程,并与普通 TIG 电弧进行了比较分析.

1 数学模型

1.1 基本假设

为简化建立电弧模型,做如下假设:电弧等离子体处于局域热力学平衡(LTE)状态;电弧是稳态的,二维轴对称;电弧是光学薄的,且处于不可压缩层流状态;等离子体的物性参数仅为温度的函数;重力、粘性耗散和压力功忽略不计.

1.2 控制方程组

由于气体熔池耦合活性 TIG 焊采用内外双层气体,需考虑气体的扩散作用,因此,需要求解组分质量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho v Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{i,m} \nabla Y_i) + R_i \quad (1)$$

式中: $\rho$  为密度, $v$  为速度, $Y_i$  为第  $i$  组分的质量分数.等式左端表示由对流引起的第  $i$  组分的质量流量,等式右端第一项表示由扩散产生的第  $i$  组分的质量流量,第二项  $R_i$  为由化学反应引起的第  $i$  组分的净产生率.不考虑扩散过程中的反应,因此  $R_i = 0$ .  $D_{i,m}$  为第  $i$  组分在混合流体中的质量扩散系数.

模型采用的磁流体方程组和简化阴极边界层模型与文献<sup>[7]</sup>相同.

1.3 边界条件

气体熔池耦合活性 TIG 焊焊枪为中心轴对称结构,其电弧等离子体具有良好的轴对称特性,故可简化为二维计算.计算区域如图 1 所示. ABLKJ 为钨极, HIMN 为内喷嘴, FGOP 为外喷嘴. IJ 为氩气入口, GH 为氧气入口, DEF 为压力出口, CD 为电弧阳极表面. 边界条件如表 1 所示.

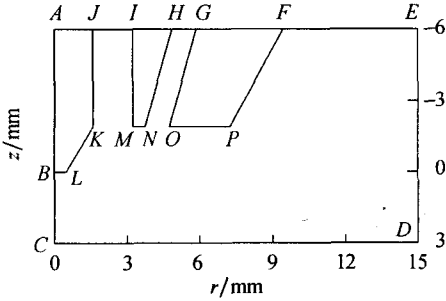


图 1 计算域  
Fig. 1 Computational domain

表 1 边界条件  
Tab. 1 Boundary conditions

| 边界   | 组分             | $p/\text{Pa}$ | $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$  | $T/\text{K}$                        | $\varphi/\text{V}$                                           | $A/(\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1})$ | $n_e/\text{m}^{-3}$                   |
|------|----------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ABC  | —              | —             | $\frac{\partial v}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$                    | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial n_e}{\partial n} = 0$ |
| CD   | —              | —             | 0                                   | 2 500                               | 0                                                            | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ | 0                                     |
| DEF  | —              | 101 325       | $\frac{\partial v}{\partial n} = 0$ | 800                                 | $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$                    | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial n_e}{\partial n} = 0$ |
| IJ   | Ar             | 101 325       | $v_{\text{giv1}}$                   | 800                                 | $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$                    | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial n_e}{\partial n} = 0$ |
| GH   | O <sub>2</sub> | 101 325       | $v_{\text{giv2}}$                   | 800                                 | $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$                    | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial n_e}{\partial n} = 0$ |
| AJ   | —              | —             | —                                   | 1 500                               | $\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = j_{\text{in}}$ | $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ | $\frac{\partial n_e}{\partial n} = 0$ |
| JKLB | —              | —             | 0                                   | F                                   | coupled                                                      | coupled                             | $\frac{jR}{ev_t}$                     |

1.4 模拟方法

由于耦合了阴极,阴极附近很小的一段区域内电子数密度不同于局域热力学平衡下的电子数密度,因此在距离阴极表面约 0.1 mm 区域内划分 10

层边界层.余下的计算区域采用结构网格与非结构网格相结合的网格划分.数值计算基于 SIMPLEC 算法,采用二阶迎风格式对方程离散化.

计算使用的等离子体的热物性参数由 Murphy

教授提供,具体推导过程参见文献[8,9].混合气体的密度通过体积权重平均得到,比热通过质量平均得到,黏性系数、热导率和电导率通过摩尔平均得到.质量扩散系数使用组合扩散系数(combined diffusion coefficients)<sup>[10-11]</sup>.钨极物性参数取自文献[12].

## 2 模拟结果与讨论

### 2.1 气体熔池耦合活性TIG电弧特性

计算采用的焊接参数如下:电流为200 A,内层氩气流量为10 L/min,外层氧气流量为5 L/min,弧长为3 mm.

计算结果如图2所示.图2a~e分别为气体熔池耦合活性TIG电弧的温度、电势、电流密度、流场和氧气摩尔分数分布.从图2a可以看到,气体熔池耦合活性TIG电弧呈现典型的钟罩型,最高温度超

过22 000 K.由于热电子发射从阴极带走能量,即对阴极有冷却作用,最高温度出现在阴极正下方,而不是阴极斑点处.如图2b所示,在钨极凸台处存在较大的电势梯度,在近阴极区,由于钨极电导率远高于电弧等离子体的电导率,且存在阴极鞘层区,致使该处电势梯度较大.根据欧姆定律,电流密度与电势梯度成正比,因此凸台位置电流密度也大,电流密度如图2c所示,在钨极内,由于钨极电导率高,可认为钨极内电势梯度为0.流场分布如图2d所示,保护气体从喷嘴流入,在阴极尖端附近由于Maecker效应被引射入电弧区,电弧等离子体向内、向下运动,最大流速位于阴极下方,最高速度达到262 m/s,阳极附近速度迅速减小.图2e为外层氧气摩尔分数分布.从图中可以看出,氧气主要分布在电弧的外围,这样在焊接时可避免钨极烧损.

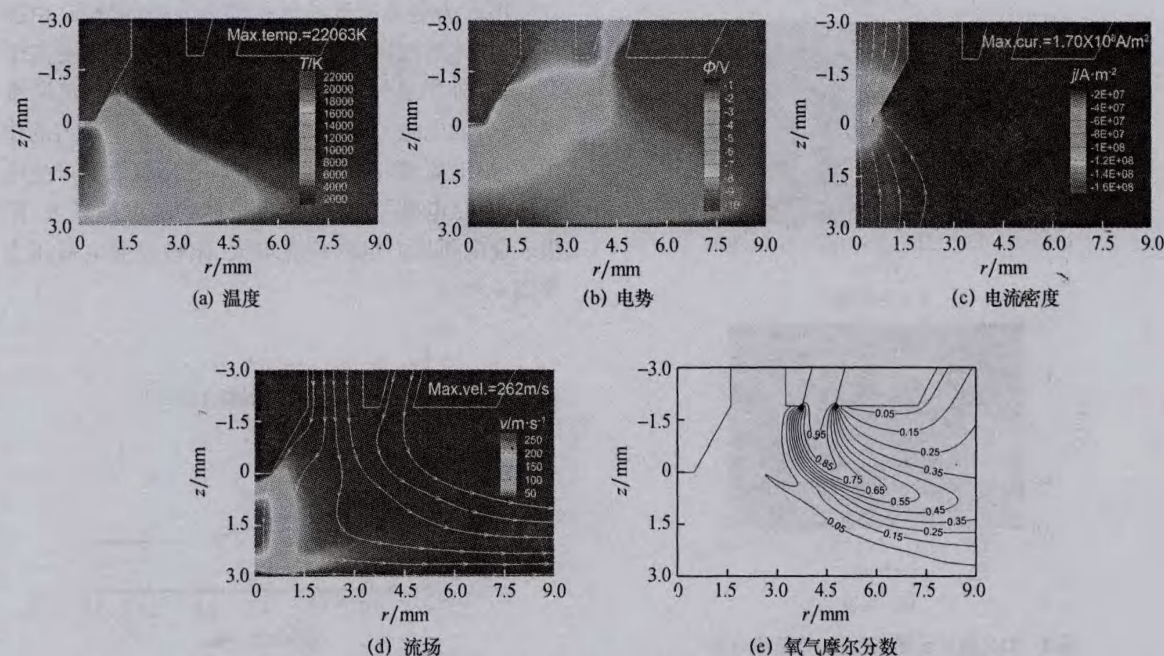


图2 气体熔池耦合活性TIG电弧云图、流线和等值线分布

Fig. 2 Nephogram of arc and distribution of streamlines and isotimics of welding arc of gas pool coupled activating TIG welding

### 2.2 TIG电弧特性

当外喷嘴不通气体时,就相当于TIG焊.图3a~d分别为外喷嘴不通气,其余参数不变时TIG电弧的温度、电势、电流密度和流场.从图中可以看出,TIG电弧最高温度超过21 000 K,等离子体最高速度为242 m/s.但与气体熔池耦合活性TIG电弧相比,TIG电弧的最高温度和等离子体流速均有所下降,电势与电流密度也相应减小.

### 2.3 TIG电弧与气体熔池耦合活性TIG电弧对比

外层氧气的引入必然会导致气体熔池耦合活性

TIG电弧与普通TIG电弧特性有所不同.图4为TIG与气体熔池耦合活性TIG电弧温度场比较.这里只给出10 000 K以上的温度场形貌比较,这是由于电弧外围温度较低,已严重偏离本模型关于电弧处于局域热力学平衡的假设.由图可知,电弧高温区扩大,电弧形貌略有收缩.产生这种现象的主要原因在于:一是外层通入的氧气对电弧有冷却作用.二是根据文献[13],等离子体流向阳极表面的总焓可用焊接电流 $I$ 和电压 $U$ 的乘积来表示:

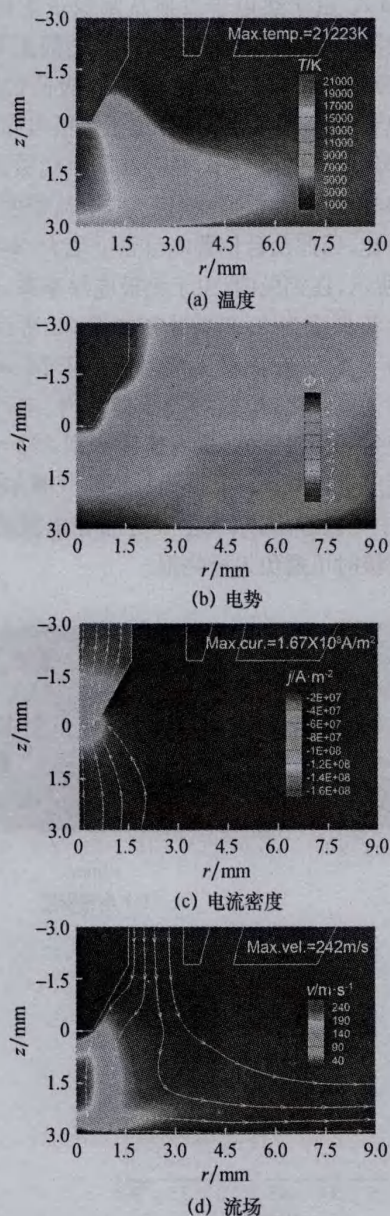


图3 TIG电弧云图、流线和等值线分布  
Fig. 3 Nephogram of welding arc and distribution of streamlines and isotherms of TIG welding

$$\bar{\rho} \bar{h} \bar{v} A \sim IU \quad (2)$$

式中:  $\bar{\rho}$  是等离子体的平均密度,  $\bar{h}$  是等离子体的平均焓,  $\bar{v}$  是等离子体的平均速度,  $A$  是电弧横截面积。

从中可以看出, 对于相同焊接电流  $I$  和电压  $U$ , 随着等离子体平均焓  $\bar{h}$  的增大, 电弧的横截面积  $A$  将减小, 因此电弧收缩。又由于焓与比热成线性关系  $c_p = dh/dT$ , 所以等离子体的比热高可以获得收缩电弧。比较氩气与氧气的热物性参数<sup>[9]</sup>, 在 20 000 K 以下, 氧等离子体比热要高于氩等离子体比热。氧气进入电弧区域会影响电弧收缩趋势。故与 TIG 电弧

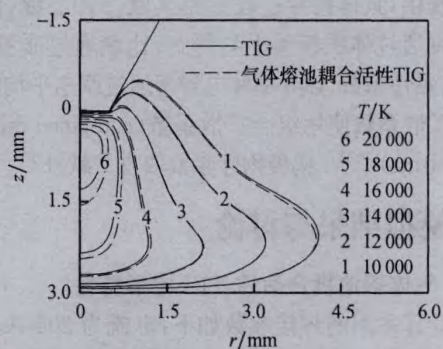


图4 TIG电弧与气体熔池耦合活性TIG电弧的温度场比较  
Fig. 4 Comparison of temperature field between TIG arc and gas pool coupled activating TIG arc

相比气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧收缩, 电弧中心区域温度升高。其温度场变化规律与文献[14]实验结果相一致。

图5为电流密度沿电弧轴线方向的分布。由图可知, 气体熔池耦合活性 TIG 轴线电流密度要高于 TIG 的。外层氧气的引入导致电弧收缩, 电流密度增大, 进而电磁力变大, 电弧等离子体在电磁力的作用下, 沿电弧轴向高速冲向阳极, 在阳极表面产生电弧压力, 且电磁力越大, 等离子体的速度就越大, 阳极表面电弧压力也就相应增大。阳极表面电弧压力如图6所示。

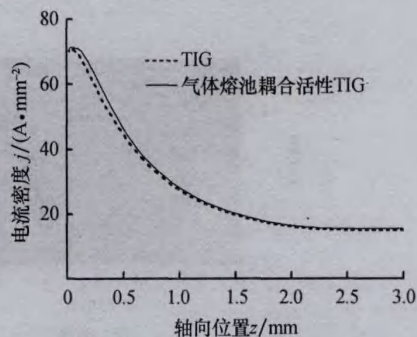


图5 电流密度沿电弧轴向方向分布对比  
Fig. 5 Comparison of axial distribution of current density

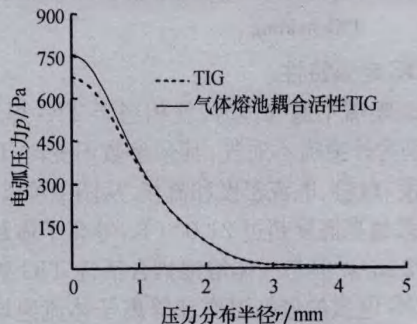


图6 电弧压力沿阳极表面径向分布对比  
Fig. 6 Comparison of radial distribution of arc pressure on anode surface

图 7 为电流密度沿阳极表面的径向分布. 图 8 为热流密度沿阳极表面的径向分布. 由图可知,外层通气后,电弧收缩,导致传递到阳极表面的电流密度和热流密度均有所上升,使熔池中的电磁力增大. 在相同焊接参数下,会获得更深的熔深. 为了解释活性 TIG 焊中熔深显著增加的原因,人们先后提出了很多理论,其中影响最大的是“电弧收缩”和“熔池表面张力温度系数改变”理论,从以上模拟结果与实验测量<sup>[14]</sup>来看,气体熔池耦合活性 TIG 电弧收缩不明显,焊接熔深显著增加的主要机理是熔池表面张力系数改变导致的 Marangoni 对流反向.

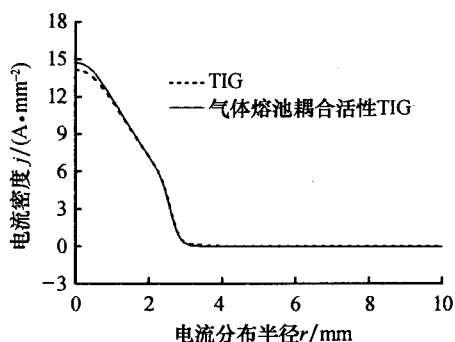


图 7 电流密度沿阳极表面径向分布对比

Fig. 7 Comparison of radial distribution of current density on anode surface

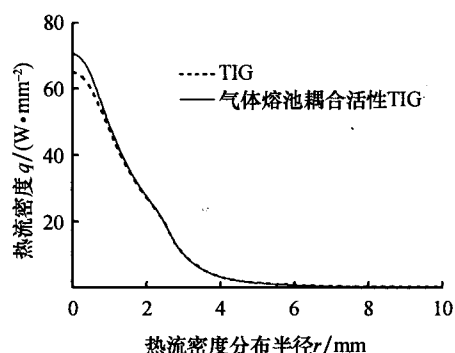


图 8 热流密度沿阳极表面径向分布对比

Fig. 8 Comparison of radial distribution of heat flux on anode surface

### 3 结论

1) 与 TIG 电弧相比,气体熔池耦合活性 TIG 电弧温度升高,电弧略有收缩,等离子体流速增大.

2) 外层氧气主要分布在电弧外围,只有少量进入电弧内层区域.

3) 通入外层气体会导致阳极表面电弧压力、电流密度和热流密度峰值增大.

致谢:感谢澳大利亚联邦科学与工业研究组织 A. B. Murphy 教授提供的等离子体热物性参数与中国科学技术大学陈瑭博士给予的帮助.

#### 参考文献:

- [1] FUJII H, SATO T, SP LU, *et al.* Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 495 (1/2): 296-303.
- [2] 黄 勇, 刘瑞琳, 樊 丁, 等. 气体熔池耦合活性 TIG 焊方法 [J]. *焊接学报*, 2012, 33(9): 13-16.
- [3] 石 玟, 杜文玉, 黄健康, 等. TIG 电弧的全耦合数值分析 [J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(1): 19-23.
- [4] 雷玉成, 李彩辉, 郁雯霞, 等. 氮氧气体保护 TIG 焊接电弧数值分析 [J]. *焊接学报*, 2006, 27(11): 25-28.
- [5] DING X P, LI H, YANG L J, *et al.* Numerical analysis of arc characteristics in two-electrode GTAW [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(9): 1867-1874.
- [6] 黄 勇, 张丹丹, 王新鑫, 等. 气体熔池耦合活性 TIG 焊弧长影响电弧压力机理的数值分析 [J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40 (4): 28-31.
- [7] LOWKE J J, MORROW R, HAIDAR J. A simplified unified theory of arcs and their electrodes [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30(14): 2033-2042.
- [8] MURPHY A B. Transport coefficients of plasmas in mixtures of nitrogen and hydrogen [J]. *Chemical Physics*, 2011, 39(1): 64-72.
- [9] MURPHY A B, ARUNDELL C J. Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasma [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1994, 14 (4): 451-490.
- [10] MURPHY A B. A comparison of treatments of diffusion in thermal plasmas [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1996, 29(7): 1922-1932.
- [11] MURPHY A B. Diffusion in equilibrium mixtures of ionized gases [J]. *Physical Review E*, 1993, 48(5): 3594-3603.
- [12] CRAM L E. A model of the cathode of a thermionic arc [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1983, 16 (9): 1643-1650.
- [13] 董文超. 高效率 TIG 焊数值模拟与熔池形貌演变研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2009.
- [14] 黄 勇, 王艳磊, 张治国. 氧引入对气体熔池耦合活性 TIG 焊电弧的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34 (5): 1168-1171.