DOI: 10.3901/JME.2019.18.063

摇动电弧窄间隙 FCAW 立焊流体流动 数值分析模型*

胥国祥 朱 杰 王加友 李 林 郑志强
(江苏科技大学江苏省先进焊接技术重点实验室 镇江 212003)

摘要: 目前关于摇动电弧窄间隙药芯焊丝气体保护焊(Fluxed-cored arc welding, FCAW)的研究较少涉及熔池内部物理现象, 缺乏对其成形机理的深入认识, 从而影响了焊接质量的稳定性, 因此利用数值模拟方法对熔池动态行为进行研究, 利于焊接参数的优化及质量可靠性的提高。基于 FLUENT 软件, 建立了适用的摇动电弧窄间隙 FCAW 立焊熔池流体流动数值分析模型, 将电弧热输入视为双椭圆平面热源, 并同时考虑了电弧移动路径、移动方向和接头几何特征对电弧热流分布的影响, 将金属和熔渣填充过程视为液体金属和熔渣从熔池上部流入过程; 假定两者流速相同, 并通过流速施加时间脉冲函数表征过渡频率。此外, 模型还考虑了导电杆折弯角度对电弧力的影响。利用 FLUENT 软件对药芯焊丝摇动电弧窄间隙立焊熔池动态行为进行模拟计算。结果表明, 模型能够合理地描述药芯焊丝窄间隙立焊熔池液体金属和熔渣的流体动力学特征, 计算结果和试验结果吻合较好。熔池纵截面中部区域出现涡流, 熔渣向坡口中间部位聚集; 向上的电弧应力分量和熔渣有助于抑制熔池下淌。

关键词: 药芯焊丝; 窄间隙焊; 流体流动; 立焊; 数值模拟

中图分类号: TG456

Numerical Analysis Model for Fluid Flow in Swing Arc Narrow Gap Vertical FCAW

XU Guoxiang ZHU Jie WANG Jiayou LI Lin ZHENG Zhiqiang
(Key Laboratory of Advanced Welding Technology of Jiangsu Province,
Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003)

Abstract: There are few studies involving the interior physical phenomenon in swing arc narrow gap fluxed-cored arc welding (FCAW) currently, which leads to a lack of deep understanding of weld formation mechanism, thus affecting the stability of welding quality. Based on FLUENT software, an adaptive numerical analysis model for swing arc narrow gap FCAW in vertical position is developed. Arc heat input is modeled as a double elliptic plane heat source, which considered the effects of swing arc, arc moving direction and geometrical feature of welded joint. The filling of metal and slag is regarded as the process of liquid metal and melting slag flowing into the weld pool and it is assumed that they have the same flowing velocity. The time pulse function is applied to the flowing velocity of melting metal and slag to consider the transfer frequency. Besides, the influence of bent angle of conductive rod is also taken into account. Using FLUENT software, weld pool dynamic behavior in swing arc narrow gap vertical FCAW is simulated. The results show that the built model can describe the dynamic feature of melting metal and slag in swing arc narrow gap vertical FCAW and the calculated results agree well with experimental data. A vortex occurs in the middle part of weld pool longitudinal section and the slag tends to accumulate at the middle part of the groove. The upward component of arc force and slag can improve the fluid flow pattern and help to suppress the sagging of liquid metal in vertical welding.

Key words: flux-cored wire; narrow gap welding; fluid flow; vertical welding; numerical simulation

0 前言

摇动电弧窄间隙 GMA 焊具有设备成本低、接

头性能优异、焊接变形小、适用范围广等特点, 成为目前大厚板结构件的理想焊接技术^[1]。对于复杂焊接结构, 立向焊接工艺有利于简化制造工序, 大幅提高生产效率。而采用折弯导电杆的摇动电弧窄间隙焊接方法可有效抑制熔池下淌, 实现立向优质、高效焊接^[2]。此外, 相对于实芯焊丝, 药芯焊丝可

* 国家自然科学基金(51475218)和江苏省“青蓝工程”资助项目。20190131 收到初稿, 20190605 收到修改稿

进一步稳定电弧、增强对熔池保护,改善接头组织性能。因此,摇动电弧窄间隙药芯焊丝气体保护焊(Fluxed-cored arc welding, FCAW)在合金钢厚板焊接领域具有巨大潜力。焊接过程中,熔池内流体流态对焊缝成形及接头性能具有重要影响。相较于实芯焊丝焊接工艺,药芯焊丝窄间隙熔池动力学行为更为复杂,故通过建立数值分析模型对其熔池流体流动进行研究,有利于深入了解其内部物理现象、优化工艺参数,具有重要学术和工程应用价值。

目前针对摇动电弧窄间隙立焊方法的研究主要集中于工艺方面,关于内部物理机制的研究较少,其中涉及熔池内部流体流动的研究更为甚少。WANG 等^[3]通过试验方法分析了不同工艺参数对焊缝成形的影响,并对比了实芯焊丝和药芯焊丝的焊缝几何特征。但目前试验方法仍无法全面揭示熔池内部物理现象。而随着计算机和数值分析技术的发展,数值模拟已成为研究物理过程的强有力工具^[4-5]。为了探究摇动电弧窄间隙焊的热物理机制,兰虎等^[6]建立了摇(摆)动电弧窄间隙熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)立焊温度场数值分析模型,并对摇动电弧窄间隙立焊温度场进行了模拟计算。该模型考虑热源中心移动轨迹及移动方向,但未考虑接头几何形状对电弧热流分布影响。张华军等^[7-8]则考虑接头几何特征对热源分布影响和热源移动路径,建立了摇动电弧窄间隙 GMAW 焊温度场三维计算模型,并对摇动电弧窄间隙平焊温度场分布特征进行了数值分析。TRAIDIA 等^[9]仅研究了窄间隙 TIG 横焊流场分布特征,而 XU 等^[10-11]则分别建立了摇动电弧窄间隙 GMAW 平焊和立焊熔池流体流动的三维模型,但模型仅适用于实芯焊丝工艺,无法合理反映 FCAW 焊的熔池动态行为。

本文综合考虑熔渣、接头几何形状特征及热源移动路径影响,建立了摇动电弧窄间隙 FCAW 立焊熔池流体流动三维数值分析模型,对其熔池动态行为进行模拟计算和分析,为深入了解摇动电弧窄间隙立焊方法的内部物理机制提供技术支持。

1 试验方法

图 1、2 给出了摇动电弧窄间隙 FCAW 立向上焊原理和电弧运动轨迹示意图。母材为 EQ690 高强度钢;焊丝为 ARS15 药芯焊丝;坡口间隙为 12 mm;焊接速度为 1.52 mm/s;焊接电流为 176.5 A;摇动频率为 0.8 Hz;侧壁停留时间为 400 ms;导电杆折弯角度为 6.57° ;摇动半径为 5.76 mm;摇动角度为 120° 。

图 1 摇动电弧窄间隙立焊示意图

焊接过程中,焊丝带动电弧沿焊接方向向前移动,同时绕焊炬中心做往复式圆弧摇动,因而电弧的瞬态移动方向与时间有关,如图 2a 所示。此外,由图 2b 可知,由于导电杆存在弯曲角度,电弧摇动时,在垂直焊接方向平面内电弧与坡口侧壁存在一定角度,即在电弧热源与坡口侧壁存在一定倾斜角度;在电弧侧壁停留时,该倾斜角度最大。焊接时,电弧热源的倾斜和移动都对热作用特征产生影响。因此,为了合理、全面地描述窄间隙焊接熔池的流体动力学行为,热源和力源模型都必须同时考虑这两方面影响。

图 2 电弧摇动角度和移动轨迹示意图

2 数学模型

2.1 热源模型

本文采用双椭圆平面热源描述电弧热流的基本分布。对于摇动电弧窄间隙焊接,电弧热源中心

(x_c, y_c, z_c) 与摇动半径、摇动频率、焊接速度等因素有关, 可由下式描述

$$x_c = v_0 t + r_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha'}{2} + \omega t\right) \quad (1)$$

$$y_c = r_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha'}{2} + \omega t\right) \quad (2)$$

$$z_c = z_0 \quad (3)$$

式中, v_0 为焊接速度; r_0 为摇动半径; α' 为摇动角度; ω 为摇动角速度, 计算时取平均值。

为了简化计算, 通过坐标变化方式推导电弧热源移动方向变化和在垂直焊接方向平面内倾斜后的表达式, 即当坐标系随热源一同旋转时, 在旋转后的新坐标内, 热源仍成双椭圆分布模式。若确定旋转前后两坐标系之间坐标变换关系, 便可获得原始坐标系下倾斜或旋转后热源表达式。坐标变换方式的基本思想见文献[8,10,12-13], 本文不再详述。如图 2a 和图 3a 所示, 电弧热源移动方向的变化可通过将坐标系 $O-xyz$ 绕 z 轴旋转加以考虑。对于某一点 P , 原始坐标系 $O-xyz$ 和新坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$ 坐标之间关系可由下述矩阵表示^[12-13]

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, θ_1 为坐标系旋转角度(图 2a), 由下式计算

$$\theta_1 = \arcsin \left[\frac{v_s \sin(\pi/2 - \alpha'/2 + \omega t)}{v_c} \right] \quad (5)$$

$$v_c = \sqrt{v_0^2 + v_s^2 + 2v_0 v_s \cos(\pi/2 - \alpha'/2 + \omega t)} \quad (6)$$

式中, v_s 为电弧的摇动速度, v_c 为电弧的实际移动速度。侧壁停留期间, θ_1 取 0。

将原始坐标系绕 x 轴旋转一定角度考虑电弧热源在垂直焊接方面平面内的倾斜, 如图 3b 所示。同样, 原始坐标系和新坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$ 之间的关系由下述矩阵表示

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, θ_2 为倾斜角度, 如图 2a 所示; 该角度可由下式计算

$$\theta_2 = -\arctan \left[\tan \beta' \sin\left(\frac{\alpha'}{2} - \omega t\right) \right] \quad (8)$$

当同时考虑电弧热源移动方向变化和倾斜时, 上述两种坐标系变化也许同时进行, 则最终坐标系与原始坐标系存在如下关系

$$\begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \\ z - z_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

(a) 绕 z 轴旋转

(b) 绕 x 轴旋转

图 3 坐标转换示意图

将式(9)代入上述最终坐标系($O-x_f y_f z_f$)下双椭圆热源模型分布函数, 便可获得原始坐标系下具有上述热源中心运动轨迹、运动方向旋转角度和倾斜角度的电弧热源模型分布函数, 即

$$q_f = \frac{6\eta IU}{(a_f + a_r)b\pi} \exp\left(-\frac{3x_f^2}{a_f^2} - \frac{3y_f^2}{b^2}\right) \quad (10)$$

$$q_r = \frac{6\eta IU}{(a_f + a_r)b\pi} \exp\left(-\frac{3x_f^2}{a_f^2} - \frac{3y_f^2}{b^2}\right) \quad (11)$$

式中, η 为电弧热效率; I 为焊接电流; U 为电弧电压; a_f, a_r, b 为热源分布参数。为了简化表达式, 下文同样仅给出最终坐标下的热源或力源分布函数。

2.2 熔滴模型

对于药芯焊丝窄间隙焊接方法, 除液态金属熔滴高速冲击熔池外, 液态熔渣同样也进入熔池。为了简化计算, 本文假定金属熔滴和熔渣同步过渡, 视为从熔池上部圆形区域以一定速度流入熔池的液态金属和熔渣, 且该区域随电弧同步移动, 如图 4

所示。流入区域(DE)尺寸与焊丝横断面相同,在 FLUENT 软件中处理为速度入口;其中,内部为熔渣流入区域,外部为液态金属流入区域,如图 4b 所示;假定两者流速为常量且相等;通过对液态金属和熔渣流速施加脉冲函数,模拟熔滴和熔渣的过渡频率,假定两者过渡频率相同。计算中,液态金属温度假定为 2 400 K^[7]。液体金属和熔渣流速由过渡频率和送丝速度确定。

图 4 计算区域示意图

2.3 电弧压力

由电弧等离子体高速冲击熔池表面引起的电弧总作用力由下式计算^[14]

$$p_t = -0.040\ 17 + 0.000\ 255\ 3I \quad (12)$$

与电弧热流分布相对应,采用双椭圆高斯分布模式描述电弧作用力分布

$$p_{a_f} = \frac{6p_a}{\pi a_{p1} b_p} \exp\left(-\frac{3x_f^2}{a_{p1}^2} - \frac{y_f^2}{b_p^2}\right) \quad (13)$$

$$p_{a_r} = \frac{6p_a}{\pi a_{p2} b_p} \exp\left(-\frac{3x_r^2}{a_{p2}^2} - \frac{y_r^2}{b_p^2}\right) \quad (14)$$

式中, a_{p1} , a_{p2} , b_p 为分布参数; p_{arc} 为电弧力。由于导电杆折弯角度的存在,摇动电弧窄间隙立焊时电弧力存在向上的分量,故计算过程中 p_{arc} 分别取电弧压力分量 p_h (垂直于试件表面)和向上电弧力分量 p_v (沿焊接方向),两者分别由式(15)、(16)计算

$$p_v = p_t \cos \beta \quad (15)$$

$$p_h = p_t \sin \beta \quad (16)$$

此外,需要指出,除电弧压力外,计算过程中还考虑电磁力、表面张力、浮力等,其具体表达式见文献[10]。在此需要指出,由于目前熔渣的热物理性能较少,且不同组分热物理性能也存在差别。作为初步研究,本文重点是建立能够合理描述摇动电弧窄间隙 FCAW 立焊熔池流态主要特征的数值分析模型;为了简化模型,计算中仅涉及熔渣熔点、密度及表面张力系数和黏度等对熔池流态影响较大的热物理参数。本文基于碱性熔渣特点^[15]将其熔点设定为 1 650 K,稍低母材熔点;表面张力为 0.35 N/s,黏度设定为 0.15 Pa·s;熔渣密度则依据药芯组分设定为 3 450 kg/m³。计算过程中,并以焊缝试验结果为参考依据,对熔渣热物理参数进行适当调节。在今后研究中将对模型及熔渣热物理参数作进一步优化和改进。

3 结果与讨论

利用上述所建模型,基于 FLUENT 软件对摇动窄间隙 FCAW 立焊温度场和流场进行模拟计算。图 5 给出了焊缝横断面计算结果与试验结果的比较。可以看出,焊缝形状、尺寸及熔渣分布的主要特征与试验结果吻合较好,从而证明了模型的准确性。但由于部分模型的简化及材料高温性能参数的缺失,熔渣形状尺寸与试验结果仍存在一定误差。图 6 给出了侧壁附近($y=-5$ mm)和坡口中心($y=0$ mm)处纵截面温度场和流场的计算结果(不包含熔渣)。可以看出,由于电弧的摇动,不同时刻熔池形态不同。此外,由于熔渣熔点较低、密度较小,熔渣主要分布于熔池表面且落后于液态金属凝固,故坡口中心处熔池尾部液态金属上部区域出现温度较低的熔渣,如图 6d、6e 所示;但对于侧壁附近区域,熔渣相对较少(图 6a~6c),两区域熔池特征存在一定差异。这与熔渣在坡口中间部位聚集有关,关于熔渣分布特征将在下文具体讨论。由图 6a 可以看出,在 $t=1.8$ s 时,电弧处于侧壁停留阶段,电弧移动速度较低,故侧壁附近区域熔池尺寸相对较大。在重力和电弧压力作用下,熔池前部液态金属高速向熔池后部(向下)流动;但在熔池中部区域,受向上的电弧力分量和凝固金属支撑力影响,部分金属沿熔池表面向熔池前部(即向上)流动,从而在熔池中部形成顺时针涡流,该流态有助于抑制熔池内液态金属的下淌。随着电弧的摇动,该区熔池尺寸逐渐变小,涡流变得不明显。而对于坡口中间区域,因为电弧在该位置的实际移动速度较大,故该区域熔池尺寸较侧壁附近区域小,液态金属高速向熔池后部流动。由图 6d 可见,当 $t=2.12$ s 时,电弧移至坡口

中心附近区域, 熔池尺寸相对较大, 其基本流态与图 6a 相似。同时, 由于熔渣粘度较大, 流动性差, 故熔池表面块状熔渣粘连后, 对熔池内液态金属流动存在一定阻碍, 在中后部区域产生液态金属凸起。对于熔池尾部液态金属, 由于温度相对较低且受熔渣约束, 流速较低。此外, 由图 6 可以看出, 药芯焊丝摇动电弧窄间隙焊接熔池表面后拖长度较小, 并没有表现出明显的熔池下淌。

图 5 焊缝横断面计算结果与试验结果比较

图 6 焊件纵截面温度场及流场

图 7 为试件横断面(热源中心处)温度场和流场的计算结果。由图 7a 可知, 当 $t=1.6 \text{ s}$, 电弧刚摇动至左侧壁; 此刻, 温度场高温区宽度相对较大, 且坡口中间区域温度相对较低, 这同样与电弧摇动速度较快及熔渣在该区域聚集有关。在电弧压力作用下, 液态金属向熔池右侧流动。如上文所述, 在侧壁停留阶段, 电弧移动速度较慢, 故随着时间的推移, 熔池尺寸逐渐增大, 但温度场高温区宽度变小。当 $t=2.1 \text{ s}$, 电弧向右摇动至坡口中间部位; 此时, 熔池尺寸明显减小, 并在电弧压力作用下, 液体金属高速向熔池左部流动。当 $t=2.21 \text{ s}$, 电弧移动至右侧壁, 此刻熔池形态与图 7a 相似, 但液态金属流向相反。

图7 焊件横截面温度场及流场

图8、9给出了熔渣分布的计算结果。在药芯焊丝窄间隙立焊过程中,受电弧压力和重力影响,液态熔渣主要分布于熔池尾部区域。此外,由于受热导率较大的母材影响,侧壁附近区域散热较快,故液体熔渣在重力作用下倾向于向坡口温度相对较高、表面张力较小的中间区域聚集,并最终在此区域凝固。而固态熔渣阻止了液体金属向坡口中心区

图8 熔池横截面熔渣分布

图9 熔池上表面熔渣分布

域的回填,从而导致熔池凝固后,焊缝表面轮廓下凹,这一现象与实芯焊丝焊缝横断面轮廓不同^[3]。

4 结论

(1) 综合考虑熔渣对熔池动态行为影响、摇动电弧移动路径及接头几何形状特征,建立了摇动电弧窄间隙 FCAW 立焊流体流动数值分析模型。该模型能够模拟计算药芯焊丝摇动电弧窄间隙立焊熔池流场及熔渣分布,且计算结果与试验结果吻合较好。

(2) 焊接过程中,熔池动态行为随时间周期性变化;在侧壁停留期间,熔池纵截面中部出现顺时针涡流。液态熔渣向坡口中间部位聚集,并在该区域凝固;向上的电弧力分量和熔渣有助于抑制熔池液体金属下淌。本文的研究结果可为深入了解窄间隙 FCAW 立焊内部物理价值提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 朱杰. 摇动电弧窄间隙焊接系统的单机控制研究[D]. 镇

- 江: 江苏科技大学, 2009.
- ZHU Jie. Study of PIC control technology for weaving arc narrow gap welding system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2009.
- [2] WANG Jiayou, ZHU Jie, ZHANG Cai, et al. Development of swing arc narrow gap vertical welding process[J]. ISIJ, 2015, 55(5): 1076-1082.
- [3] WANG Jiayou, ZHU Jie, ZHANG Cai, et al. Effect of arc swing parameters on narrow gap vertical GMA weld formation[J]. ISIJ International, 2016, 56(5): 844-850.
- [4] 刘一搏, 张鸿名, 孙清洁, 等. 磁场作用下铝/钢 CMT 焊接温度场及熔池流动行为[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 48-54.
- LIU Yibo, ZHANG Hongming, SUN Qingjie, et al. Effect of magnetic field on the weld temperature field and flow behavior of molten pool in Al/Steel CMT welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 48-54.
- [5] 黄健康, 孙天亮, 樊丁, 等. TIG 焊熔池表面流动行为的研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 31-37.
- HUANG Jiankang, SUN Tianliang, FAN Ding, et al. Study on the surface flow behavior of TIG weld pool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 31-37.
- [6] 兰虎, 张华军, 陈阿静, 等. 窄间隙 GMAW 立焊动态过程模拟及热物理特性[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 77-82.
- LAN Hu, ZHANG Huajun, CHEN Ajing, et al. Numerical simulation of dynamic process and thermal physical properties of narrow gap MAG vertical welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 77-82.
- [7] 张华军, 张广军, 蔡春波, 等. 摆动焊接动态过程温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2008, 29(2): 65-68.
- ZHANG Huajun, ZHANG Guangjun, CAI Chunbo, et al. Numerical simulation of temperature field of dynamic welding process with weaving[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(2): 65-68.
- [8] 胥国祥, 潘海潮, 王加友, 等. 摇动电弧窄间隙 GMAW 焊温度场数值分析模型[J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 55-60.
- XU Guoxiang, PAN Haichao, WANG Jiayou, et al. Numerical analysis model of temperature field in swing arc narrow gap GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 55-60.
- [9] TRAIDIA A, ROGER F, SCHROEDER J, et al. On the effects of gravity and sulfur content on the weld shape in horizontal narrow gap GTAW of stainless steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213: 1128-1138.
- [10] XU Guoxiang, WANG Jiayou, LI Pengfei, et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in swing arc narrow gap GMA welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 260-269.
- [11] XU W H, DONG C L, ZHANG Y P, et al. Characteristics and mechanisms of weld formation during oscillating arc narrow gap vertical up GMA welding[J]. Welding in the World, 2017, 61: 241-248.
- [12] WU L G, CHEON J, KIRAN D V, et al. CFD simulations of GMA welding of horizontal fillet joints based on coordinate rotation of arc models[J]. J. Mater. Processing Technology, 2016, 231: 221-238.
- [13] GAO X S, WU C S, GOECKE S F, et al. Numerical simulation of temperature field, fluid flow and weld bead formation in oscillating single mode laser-GMA hybrid welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 147-159.
- [14] CHO M H, LIM Y C, FARSON D F. Simulation of weld pool dynamics in the stationary pulsed gas metal arc welding process and final weld shape[J]. Welding Journal, 2016, 85: 271-283.
- [15] 柳明. 新型耐磨堆焊烧结焊剂的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- LIU Ming. R&D for new type agglomerated flux for hardfacing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

作者简介: 胥国祥, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为激光焊、摇动电弧窄间隙焊及焊接过程数值模拟。
E-mail: xugxiang@163.com
王加友(通信作者), 男, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摇动电弧窄间隙焊工艺及机理。
E-mail: zj_jiayouw@126.com