

预熔氧化层对 AA-TIG 焊缝形貌的影响

樊 丁^{1,2}, 康再祥², 黄 勇^{1,2}, 晏丽琴², 王新鑫², 郝珍妮²

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

(2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: AA-TIG 焊(arc assisted activating TIG welding)是一种新型高效焊接方法,该方法通过焊前采用小电流辅助电弧以 Ar + O₂ 作为保护气体在待焊部位预熔一道氧化层,然后再进行常规 TIG 焊,可获得深而窄的焊缝. 试验通过改变辅助电弧工艺参数来改变预熔氧化层的厚度,分析预熔氧化层厚度对焊缝成形的影响. 结果表明,辅助电弧的电流、速度以及辅助电弧中氧气流量对预熔氧化层厚度有很大的影响,辅助电弧中氧气流量越大、辅助电弧热输入越大时,预熔氧化层越厚;AA-TIG 焊时预熔氧化层的厚度对焊缝深宽比影响较大,随着预熔氧化层的增厚,焊缝深宽比先增加后减小.

关键词: 不锈钢; AA-TIG 焊; 氧化层; 焊缝形貌

中图分类号: TG444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)11-0021-05



樊 丁

0 序 言

活性焊接方法由于能显著增加熔深,自问世以来在国内外引起了越来越多学者的关注. 目前的研究主要集中在活性剂的开发与应用和活性剂增加熔深机理研究两方面. 对活性剂增加熔深机理的研究一般认为^[1,2]是表面张力温度系数改变与电弧收缩的作用. 课题组经过多年的研究表明,根据不同的材料,焊接时活性剂所起的作用不同,对于铁合金及不锈钢^[3,4]而言,主要原因是加入活性剂时熔池金属的表面张力温度系数由负变正,在熔池中形成以内对流为主的流动形式,从而使熔深显著增加,而对于铝、镁等轻金属及其合金^[5],电弧收缩是其熔深增加的主要原因.

A-TIG(activating flux TIG)焊由于在焊前需要手工涂敷活性剂,焊接效率较低,且难以实现机器人自动化焊接. 为解决这一问题,课题组^[6,7]提出了电弧辅助活性 TIG 焊,即 AA-TIG 焊(arc assisted activating TIG welding). 该方法通过辅助电弧在待焊部位制造一道氧化层来替代表面活性剂,然后再进行普通 TIG 焊,也能达到与 A-TIG 焊同样的效果. AA-TIG 焊接方法相比于 A-TIG 焊接方法而言,首先省去了活性剂的研制开发以及涂敷工序,同时可实现

机器人自动化.

在通过活性气体引入活性元素来增加熔深方面,董文超等人^[8]研究认为焊缝中的 O 元素含量是影响熔深的主要原因,而 AA-TIG 焊时 O 元素是从预熔氧化层过渡到熔池中使熔池金属的表面张力温度系数由负变正,从而增加焊缝熔深,因而对于辅助电弧预熔形成的氧化层的厚度及氧化层的形成过程的研究显得很有必要.

1 试验方法

试验选用的材料是 SUS304 奥氏体不锈钢板材,规格为 150 mm × 80 mm × 8 mm,焊前先用砂纸打磨表面,去除材料表面的氧化膜,直到露出金属光泽为止,然后用酒精擦拭表面,去除表面油污再进行焊接试验.

为研究预熔氧化层对焊缝形貌的影响,试验时分别通过改变辅助电弧中氧气的流量、辅助电弧的电流以及辅助电弧预熔速度,在待焊部位预熔形成一道氧化层,然后再进行 TIG 焊,最后对焊缝形貌进行观察.

焊接时辅助电弧所用的基本参数如表 1 所示, TIG 焊接工艺参数如表 2 所示,除所研究变量外其它参数均保持不变. 焊后分别对预熔氧化层和焊缝进行金相试样制备,用王水进行腐蚀,在光学显微镜下观察焊缝形貌以及表面氧化层形貌并对熔深和熔宽进行测量.

表 1 辅助电弧工艺参数

Table 1 Specification of assisted arc

焊接电流	预熔速度	氩气流量	氧气流量	弧长
I_1/A	$v_1/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_1/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q_2/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	l_1/mm
70	90	13	2	3

表 2 TIG 焊接工艺参数

Table 2 Welding conditions of TIG welding

焊接电流	焊接速度	氩气流量	弧长
I_2/A	$v_2/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	l_2/mm
160	120	15	3

2 试验结果及分析

2.1 AA-TIG 焊缝表面及横截面形貌

用表 1 和表 2 中的参数进行焊接,所获得的焊缝表面及焊缝形貌如图 1 所示. 其中图 1a 为 AA-TIG 焊辅助电弧预熔时生成的氧化层表面形貌,由于辅助电弧选用的电流较小,虽然电弧气氛中有 O 元素存在,但钨极并没有明显烧损迹象,电弧比较稳定,预熔的氧化层比较均匀. 图 1b 为 AA-TIG 焊缝

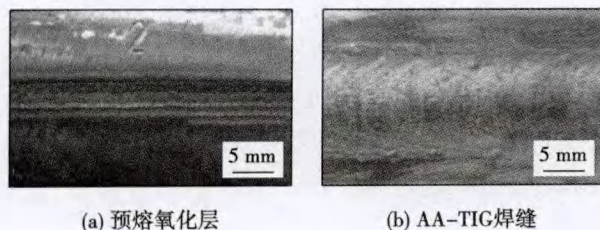


图 1 焊缝表面形貌

Fig. 1 Weld surface appearances

缝的表面形貌,从图 1 中可以看出焊缝表面成形良好,在焊缝的表面有氧化膜存在.

图 2a 为 AA-TIG 焊缝横截面形貌,图 2b 为同等工艺参数下常规 TIG 焊缝的横截面形貌,可见 AA-TIG 焊可显著的增加熔深,可达常规 TIG 焊缝熔深的 2 倍多,熔宽略有减小.

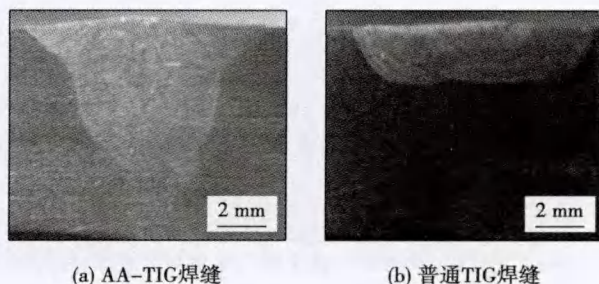


图 2 焊缝横截面

Fig. 2 Weld cross-section appearances

2.2 预熔氧化层形貌

AA-TIG 焊时,预熔氧化层可起到活性剂的作用,当辅助电弧工艺参数发生变化时,预熔氧化层的厚度随之改变,最终影响焊缝形貌. 图 3 为辅助电弧中氧气流量从 0.5 L/min 逐渐增加至 3 L/min 时,对应氧化层厚度的变化,分别从 10 μm 逐渐增加到 60 μm 左右,即辅助电弧中氧气流量越大,预熔氧化层的厚度也越厚. 同样的,改变辅助电弧电流时,预熔氧化层厚度的变化如图 4 所示,由图 4 可知,预熔氧化层厚度随着辅助电弧电流增加而增加;而当改变辅助电弧速度时预熔氧化层厚度的变化规律与此相反,即随着辅助电弧速度的增加,预熔氧化层厚度逐渐减小. 结果表明辅助电弧中氧气流量越

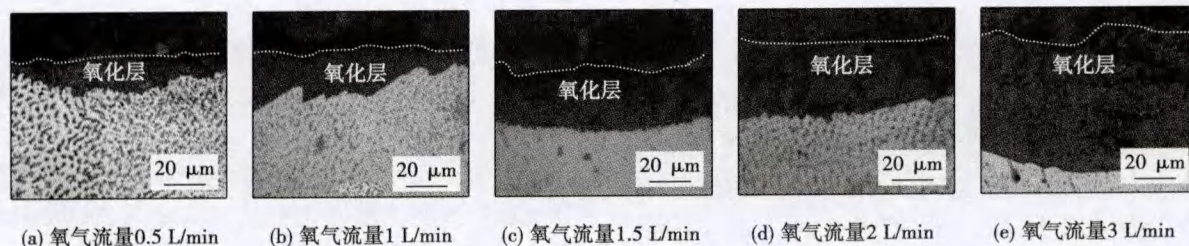


图 3 辅助电弧中氧气流量不同时预熔氧化层的形貌

Fig. 3 Oxide layer on pre-melting surface at different oxygen flow rates in assisting arc

大,辅助电弧热输入越大时,预熔氧化层越厚.

2.3 辅助电弧工艺参数对焊缝形貌的影响

2.3.1 辅助电弧中氧气流量对焊缝形貌的影响

保持辅助电弧总气流量为 15 L/min 不变,改变氧气的流量,所获得 AA-TIG 焊缝的横截面形貌如

图 5 所示. 可见当辅助电弧中氧气流量不同,即预熔氧化层的厚度不同时,焊缝形貌发生明显变化. 由图 5 可知,随着氧气流量的增加,熔深先增加后减小. 结果表明当氧气流量为 2 L/min 时,焊缝熔深达到最大,氧气流量过高或过低,都会使熔深减小.

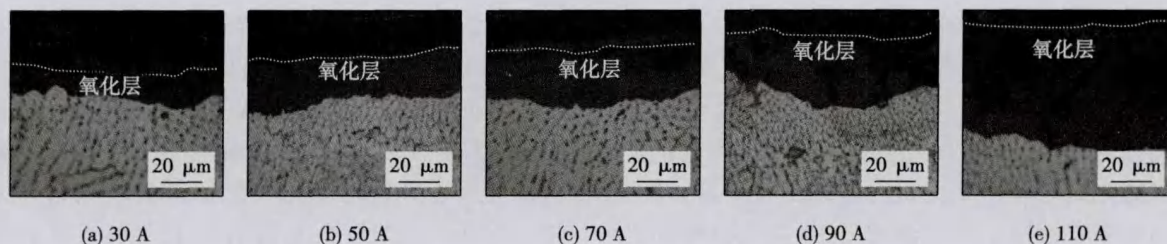


图 4 辅助电弧电流不同时预熔氧化层的形貌

Fig. 4 Oxide layer on pre-melting surface at different current of assisting arc

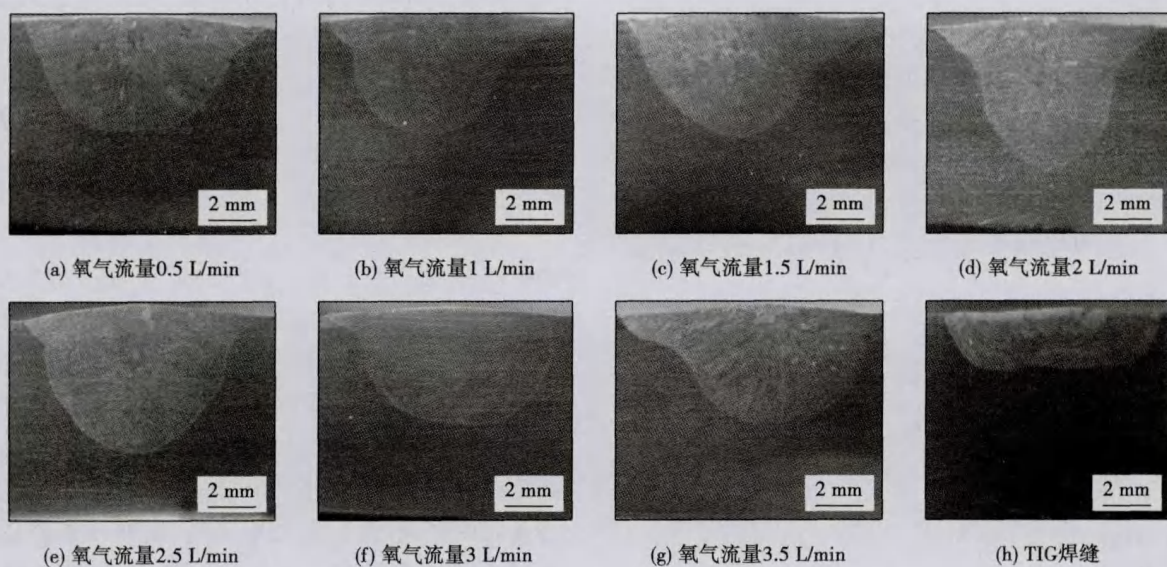


图 5 辅助电弧中氧气流量不同时 AA-TIG 焊缝的横截面宏观形貌

Fig. 5 AA-TIG weld cross-sections at different oxygen flow rates in assisting arc

辅助电弧氧气流量对 AA-TIG 焊缝深宽比的影响如图 6 所示,当氧气流量从 0.5 L/min 逐渐增加到 3.5 L/min 时,分别对所得焊缝熔深和熔宽进行测量分析. 结果表明,随着氧气流量的增加,焊缝深宽比先增加后减小,当氧气流量为 2 L/min 时,焊缝

深宽比最大.

2.3.2 辅助电弧电流对熔深熔宽的影响

当辅助电弧电流从 30 A 逐渐增加到 110 A 时, AA-TIG 焊缝深宽比的变化如图 7 所示. 由图 7 可

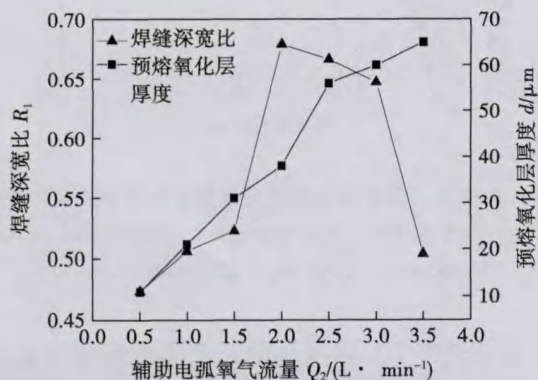


图 6 辅助电弧氧气流量对 AA-TIG 焊缝深宽比的影响

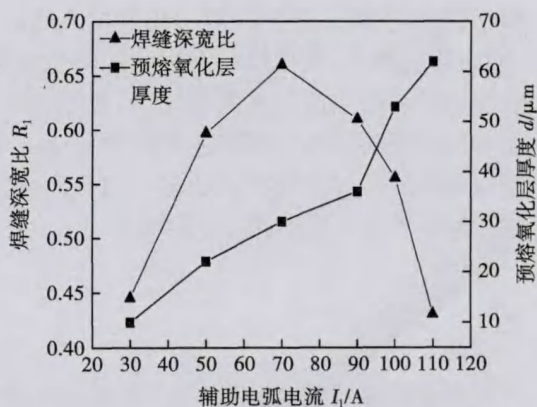
Fig. 6 Effect of oxygen flow rates in assisting arc on weld R_1 ratio of AA-TIG welding

图 7 辅助电弧电流对 AA-TIG 焊缝深宽比的影响

Fig. 7 Effect of assisting arc current on weld R_1 ratio of AA-TIG welding

知,随着辅助电弧电流的增大,AA-TIG 焊缝深宽比先增大后减小. 当辅助电弧电流为 70 A 时,焊缝深宽比最大.

辅助电弧电流对焊缝熔深熔宽的影响与辅助电弧中氧气流量对焊缝深宽比的影响趋势一致,这主要是由于随着辅助电弧电流的增加,电弧温度随之升高,氧气电离成活性氧原子的程度增加,同时电弧温度升高使熔化的金属增多,使进入熔池中的氧含量增加,最终导致在预熔层表面形成的氧化层厚度逐渐增加.

2.3.3 辅助电弧预熔速度对熔深熔宽的影响

图 8 为辅助电弧预熔速度对 AA-TIG 焊缝深宽比的影响,其中辅助电弧的预熔速度是从 50 mm/min 逐渐增加到 130 mm/min. 由图 8 可知,随着辅助电弧预熔速度的增加,焊缝深宽比先增大后减小. 当辅助电弧预熔速度为 70 mm/min 时,深宽比最大.

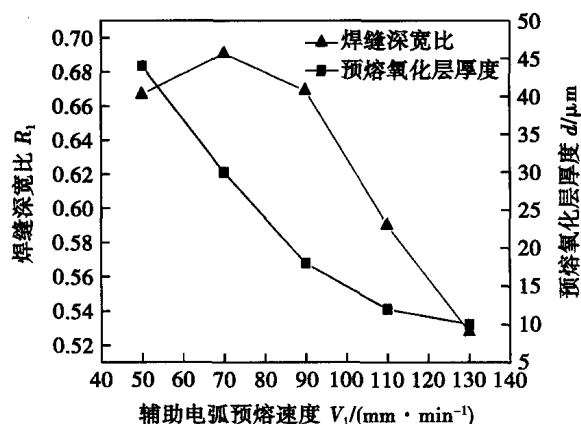


图 8 辅助电弧预熔速度对 AA-TIG 焊缝深宽比的影响

Fig. 8 Effect of assisting arc moving speed on weld R_r ratio of AA-TIG welding

由于辅助电弧预熔速度越小,辅助电弧热输入越大,同时速度越小,氧化反应发生的时间也越长,从而在预熔层表面生成更多的氧化物,最终使表面氧化层的厚度随辅助电弧预熔速度的增大而减小. 与辅助电弧电流对焊缝深宽比的影响相似,主要是由于在预熔层表面生成不同厚度的氧化层.

3 讨 论

目前对于活性元素增加铁合金熔深机理的研究表明:活性元素的引入使熔池金属表面张力温度系数发生变化,从而改变了熔池中液态金属的流动模式,使焊缝形貌发生变化.

Zhang 等人^[4]通过数值模拟的方法研究了焊接

304 不锈钢时熔池中 O 元素含量分别为 0.003 2% 和 0.016 8% 时熔池的流动模式,认为活性 O 元素改变表面张力温度系数是 A-TIG 焊熔深增加的主要机理;Zhao 等人^[1]通过数值模拟的方法研究了熔池中 S 元素含量不同时熔池的流动模式,认为 S 元素增加熔深的机理与 O 元素相同,即活性元素 S 改变了熔池金属的表面张力温度系数,使熔池发生以内对流为主的流动模式,从而使热量更多的传输至熔池底部,使熔深增加.

根据 Sahoo^[9]等人的研究结果,表面张力温度系数是温度 T 与活性组元活度 a_i 的函数,其表达式为

$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -A - R\Gamma_s \ln(1 + K_{\text{seg}} a_i) - \frac{K_{\text{seg}} a_i}{1 + K_{\text{seg}} a_i} \frac{\Gamma_s \Delta H^0}{T}$$

$$K_{\text{seg}} = k_1 \exp\left(\frac{-\Delta H^0}{RT}\right)$$

式中: A 是表面张力温度系数的常数项; R 是气体常数; Γ_s 为活性元素的表面饱和过剩; a_i 是活性元素的活度; K_{seg} 是活性元素平衡吸附系数; k_1 为与偏聚熵有关的常数, ΔH^0 是标准吸附热. 由上式可知,温度与活性元素活度对 $\partial \gamma / \partial T$ 均有影响,由上式的计算结果可知,当活性元素含量一定时, $\partial \gamma / \partial T$ 随温度的升高而降低,而当温度不变时,活性元素含量与 $\partial \gamma / \partial T$ 的关系较为复杂. 由表面张力温度系数公式可知,表面张力温度系数随 O 元素含量和温度的变化如图 9 所示.

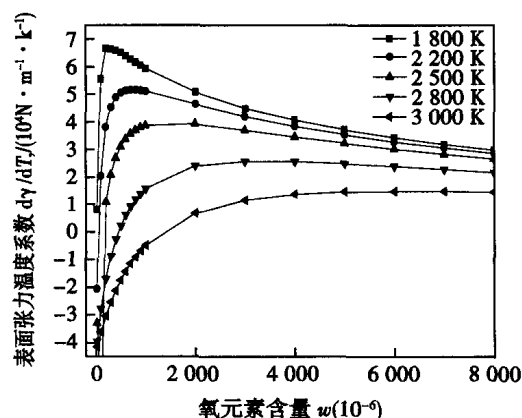


图 9 表面张力温度系数随氧元素含量与温度的变化关系

Fig. 9 Variations of temperature coefficient of surface tension with oxygen content and temperature

在试验中 TIG 焊采用的工艺参数保持不变,可近似认为焊接时熔池表面的温度及温度梯度没有发生变化. 熔池形貌发生变化取决于 O 元素在熔池中的含量. AA-TIG 焊时 O 元素是通过预熔氧化层向熔池中过渡的,所以预熔氧化层的厚度影响过渡到

熔池中的活性 O 元素的含量. TIG 焊电弧在预熔层上焊接时,预熔氧化层中氧化物在高温电弧中发生熔化、分解,同时向熔池金属内部扩散溶解,随着预熔氧化层的增厚,过渡到熔池中的 O 元素含量不断增加,从而使熔池表面张力温度系数发生改变,最终导致熔池流态发生改变.

由图 9 可知,随着 O 元素含量的增加,表面张力温度系数在低温时先增加后减小,高温时随着 O 元素含量的增加而增加;当 O 元素含量不变时,表面张力温度系数随温度的增加而减小,即当活性 O 元素含量增加时,表面张力温度系数由负变正,使熔池中 Marangoni 流的流向发生了转变,从而使熔深增加,随着 O 元素含量的进一步增加,在熔池的低温区域表面张力温度系数反而减小,虽然表面张力温度系数仍为正值,熔池中的 Marangoni 流仍向中心流动,但由于其驱动力减小,从而导致了向内的对流强度减弱,最终使焊缝熔深减小.

文中试验结果也验证了这一点,随着预熔氧化层厚度的增加,过渡到熔池中的 O 元素不断增加,由图 9 可知,表面张力温度系数先增加后减小,即熔池流动的驱动力先增加后减小,最终导致焊缝熔深先增加后减小.

4 结 论

(1) AA-TIG 焊是通过预熔氧化层向熔池中过渡活性 O 元素,从而改变熔池中 Marangoni 流的流向,使熔池形貌发生变化.

(2) 预熔氧化层的厚度对焊缝形貌有很大的影响,随着预熔氧化层厚度的增加,AA-TIG 焊缝熔深逐渐增加;而当预熔氧化层过厚时,焊缝熔深反而减小.

(3) 预熔层的厚度可以通过辅助电弧电流、速度以及辅助电弧中氧气的流量来控制.

参考文献:

- [1] Zhao Y, Lei Y, Shi Y. Effects of surface active elements sulfur on flow patterns of welding pool[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2005, 21(3): 408–414.
- [2] Tanaka M, Shimizu L, Terasaki H, *et al.* Effect of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, 5(6): 397–402.
- [3] 张瑞华. 活性焊接法及熔深增加机理的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- [4] Zhang R H, Fan D. Numerical simulation of effects of activating flux on flow patterns and weld penetration in ATIG welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2007, 12(1): 15–23.
- [5] 黄 勇. 铝合金活性 TIG 焊接法及其熔深增加机理的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.
- [6] 樊 丁, 林 涛, 黄 勇, 等. 电弧辅助活性 TIG 焊接法[J]. *焊接学报*, 2008, 29(12): 1–4.
Fan Ding, Lin Tao, Huang Yong, *et al.* Arc assisted activating TIG welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(12): 1–4.
- [7] 黄 勇, 樊 丁, 林 涛, 等. 不锈钢电弧辅助活性 TIG 焊[J]. *焊接学报*, 2009, 30(10): 1–4.
Huang Yong, Fan Ding, Lin Tao, *et al.* Arc assisted activation TIG welding process for stainless steels[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(10): 1–4.
- [8] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 焊接电弧与活性组元对 TIG 焊熔池形貌影响的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2009, 30(11): 49–52.
Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, *et al.* Numerical simulation of welding arc and surface-activating element on weld shape in TIG welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(11): 49–52.
- [9] Sahoo P, DebRoy T. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. *Metallurgical Transactions*, 1987, 19(6): 483–491.

作者简介: 樊 丁,男,1961 年出生,教授,博士研究生导师. 主要从事焊接物理、焊接智能控制以及激光加工等方面的研究. 发表论文 180 余篇. Email: fand@lut.cn