Î¬ÆÕ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

第 39 卷 第 6 期 2003 年 6 月 661—665 页
金属学报 ACTA METALLURGICA SINICA
Vol.39 No.6 June 2003 pp.661–665

活性化 TIG 焊熔深增加机理的研究 *

刘凤尧 杨春利 林三宝 吴 林 张清涛
(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室，哈尔滨 150001)

摘 要 以不锈钢 0Cr18Ni9 为实验对象，涂敷含有 Bi 的 SiO_2 和 TiO_2 活性剂，通过 1 mm 厚高熔点薄钨板挡住熔池流动的方法进行焊接实验．对钨板两侧 Bi 颗粒的分布进行了测试，分析涂敷 SiO_2 和 TiO_2 后熔池流动方向的变化，同时采集了电弧电压．结果表明：活性剂 SiO_2 和 TiO_2 改变了熔池的流动方向；SiO_2 使电压提高约 4.2 V，而 TiO_2 对电弧电压没有影响；活性剂并未使电弧整体发生收缩，而使电弧整体发生了膨胀；SiO_2 使等离子体发生了收缩；电弧等离子体收缩和电弧导电通道变长是 SiO_2 活性剂提高电弧电压的主要原因．分析认为，SiO_2 增加熔深是等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果；TiO_2 增加熔深只是表面张力温度梯度由负变正的作用．

关键词 活性化 TIG 焊，表面张力，电弧电压，等离子体
中图法分类号 TG444 **文献标识码** A **文章编号** 0412−1961(2003)06−0661−05

MECHANISM OF INCREASING A–TIG WELDING PENETRATION

LIU Fengyao, YANG Chunli, LIN Sanbao, WU Lin, ZHANG Qingtao
National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
Correspondent: YANG Chunli, professor, Tel: (0451)6418775, E-mail: liufengyao@163.com
Supported by the Scientific Research Foundation of Heilongjiang Province (No.LC01714)
Manuscript received 2002–07–26, in revised form 2002–11–20

ABSTRACT By using an 1 mm thick tungsten plate blocking the flow of molten metal, welding was performed on three specimens of 0Cr18Ni9 coated with active additions containing Bi, SiO_2 and TiO_2. The distributions of Bi after adding SiO_2 and TiO_2 at the both sides of the tungsten plate were measured, and the arc voltages are collected. The results show that additional SiO_2 and TiO_2 change the flow direction of the melting metal. Arc voltage increased 4.2 V due to adding SiO_2, whereas no change occurs when adding TiO_2. The active flux doesn't make the arc wholly constrict, but inflate. SiO_2 leads to the constriction of plasma. Thus, the main reason of SiO_2 increasing arc voltage is plasma constriction and the increase in length of electrical path. Improvement of penetration by SiO_2 is resulting from plasma constriction, anode spot constriction and the change of surface tension temperature coefficient instead of arc constriction. However, the mechanism improving penetration by TiO_2 is only the change of surface tension temperature coefficient.
KEY WORDS activating flux TIG (A–TIG) welding, surface tension, arc voltage, plasma

钨极电弧 (TIG) 焊在现代焊接方法中很普及，它的优点是焊缝质量好，一般用于精密焊接及高质量的焊接；其主要缺点是：单道焊接熔深浅，对材料成分的变化敏感，生产效率低．近年来，一种新型的焊接方法 ——A–TIG (activating flux TIG) 焊正引起世界范围内人们的高度重视． A–TIG 焊最早是由乌克兰的 Paton 焊接研究所 (Paton Electric Welding Institute) 在 60 年代研制出来的 [1]，但是直到 90 年代末期才在欧美国家的研究机构 (如 EWI 和 TWI 等) 开展广泛的研究 [2]，其中 EWI 开发的焊剂已经得到了广泛应用 [3]．这种技术是在焊前将母材表面涂敷上一层活性剂，在相同的焊接规范下，同常规 TIG 焊相比，可以大幅度地提高焊缝熔深 (最大可达 300%)．对于 8 mm 的厚板可以不开坡口一次焊透，对于薄板可以在不改变焊接速度的情况下减小焊接热输入 [4,5]．对于 6 mm 厚度不锈钢板，在焊接规范相同的条件下，常规 TIG 焊单道焊一般只能得到 3 mm 熔深，而 A–TIG 焊能够一次焊透，堆焊效率的提高非常明显．

目前 A–TIG 焊方法已用于焊接不锈钢、碳钢、镍基

* 黑龙江省留学回国基金项目 LC01714 和哈尔滨工业大学校基金项目 HIT.2001.20 资助
收到初稿日期：2002–07–26，收到修改稿日期：2002–11–20
作者简介：刘凤尧，男，1972 年生，博士生

Î¬ÆÕ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.co

合金和钛合金等材料. 同常规 TIG 焊相比, A-TIG 焊能够大幅度提高生产率, 降低生产成本, 同时还可以减小焊接变形, 具有非常重要的应用前景 [6].

在 A-TIG 焊熔深增加机理方面, 有"电弧收缩"和"表面张力"两种观点 [7-12], 但是尚缺乏统一的认识. 本文以不锈钢 0Cr18Ni9 为实验对象, 通过 1 mm 厚高熔点薄钨板挡住熔池流动的方法, 研究涂敷 Bi, SiO_2, TiO_2 试件焊缝中钨板两侧 Bi 颗粒的分布以及 SiO_2 和 TiO_2 对电弧电压的影响. 同时对 SiO_2 和 TiO_2 增加熔深的机理进行了研究.

1 实验原理和方法

常规 TIG 焊熔池流动方向为从熔池中心流向熔池边缘, 如果在熔池中加入密度比较大的 Bi 组元 (Bi 的原子量为 209, Fe 的原子量为 56), 在高熔点 (3410 ℃) 钨板阻碍 Bi 元素扩散的情况下, 将导致焊缝边缘沉积的 Bi 元素浓度高于焊缝中心. 在 A-TIG 条件下, 如果改变了熔池流动方向, 必将导致焊缝中心沉积的 Bi 元素浓度高于焊缝边缘, 基于此假设构造实验如图 1 所示. 试件尺寸为 150 mm×50 mm×6 mm, 如图 2 所示.

采用直流 TIG 平板堆焊. 在距离不锈钢板中心线 1.5 mm 处铣 1 mm 宽的斜槽. 将直径 6 mm 钨棒通过线切割切成厚 1.2 mm 的钨板, 然后磨成 1 mm 厚, 钨板的其中一个侧面是斜面, 将钨板插到不锈钢槽中. 试件首先采用砂纸打磨, 然后使用酒精擦洗表面以去除油污等有机物, 并烘干以防止水分对实验结果产生影响, 将 Bi, Bi 和 SiO_2 (质量比为 1 : 1) 以及 Bi 和 TiO_2 (质量比为 1 : 1) 分别和丙酮溶剂混合均匀, 用毛刷将活性剂溶液均匀地涂敷在试件的整个表面上, 其厚度以看不到母材表面为准. 沿着中心线进行焊接. 电流 250 A, 焊速 100 mm/min, 弧长 3 mm. 焊后的试件每隔 25 mm 切一个试样, 每个试件切 4 个试样, 经过打磨、抛光、腐蚀, 照宏观照片, 观察成分分布 (每个焊缝钨板两侧各测 3 点). 焊缝宏观截面形状如图 3 所示.

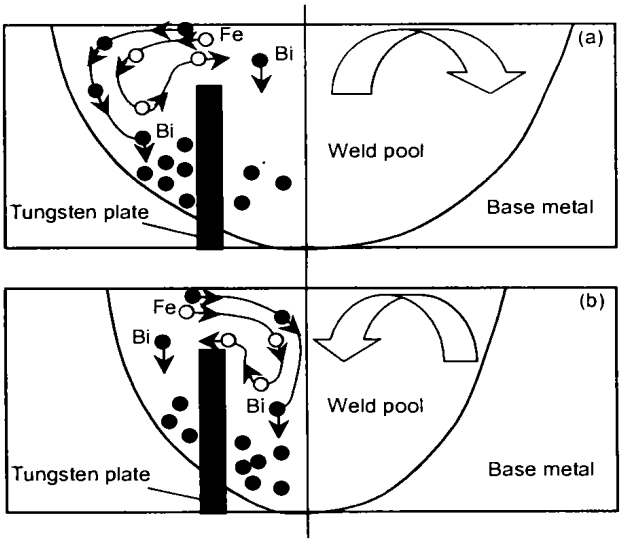

图 1 实验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental principle
(a) flow of conventional TIG welding
(b) flow of A-TIG welding

2 实验结果及分析

2.1 活性剂对熔池流动方向的影响

图 4—6 分别为常规 TIG 焊和 SiO_2 及 TiO_2 试件焊缝中 Bi 颗粒的分布.

从图中可以看出, 常规 TIG 焊的试件, Bi 颗粒在焊缝中心的浓度比较小 (图 4a), 而在焊缝边缘的浓度比较大 (图 4b), 说明常规 TIG 焊中熔池表面形成从熔池中心向熔池边缘的表面张力流; 熔池边缘液态金属的表面张力比较大, 而熔池边缘液态金属的温度比较低, 说明常规 TIG 焊中熔池表面具有负的表面张力温度系数 (即 $d\sigma/dT < 0$). 而涂敷 TiO_2 和 SiO_2 活性剂的活性化 TIG 焊中, 在焊缝中心的浓度比较大 (图 5a 和 6a), 而 Bi 元

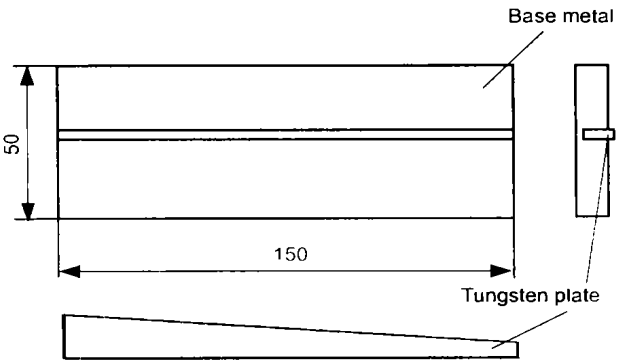

图 2 试件尺寸

Fig.2 Size of workpiece (unit: mm)

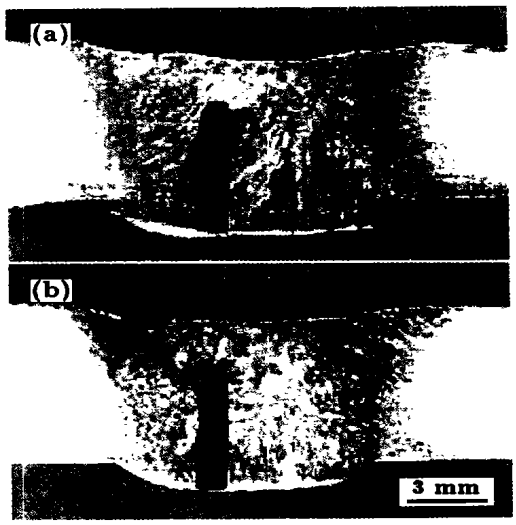

图 3 焊缝宏观截面形状

Fig.3 Cross-sectional profiles of weld bead under using active additions of TiO_2 (a) and SiO_2 (b)

Î¬ÆÕ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.co

素在焊缝边缘的浓度比较小 (图 5b 和 6b). 同理说明, 活性化 TIG 焊中熔池表面具有正的表面张力温度系数 (即 $d\sigma/dT>0$).

综上所述, 活性剂 SiO_2 和 TiO_2 的加入使熔池的表面张力温度系数由负变正, 从而间接证明了 "表面张力" 观点.

另外, 将焊缝中 Bi 颗粒的平均计数列于表 1 中, 从表中可以看出, 常规 TIG 焊焊缝边缘 Bi 颗粒的平均计数高于焊缝中心, 而 A-TIG 焊则相反. 对于同一种元素来说, 焊缝中 Bi 颗粒含量 (质量分数) 正比于焊缝中的计数. 由此也可以看出, 常规 TIG 焊中 Bi 元素在焊缝边缘的浓度高于焊缝中心, 而 A-TIG 焊则相反. 这也间接证明了活性剂的加入改变了熔池的流动方向.

表 1　焊缝中 Bi 颗粒的计数

Table 1　The count of bismuth particles in welding

Welding method	Count	
	Weld center	Weld edge
Conventional TIG	89	107
A-TIG with SiO_2	94	75
A-TIG with TiO_2	98	70

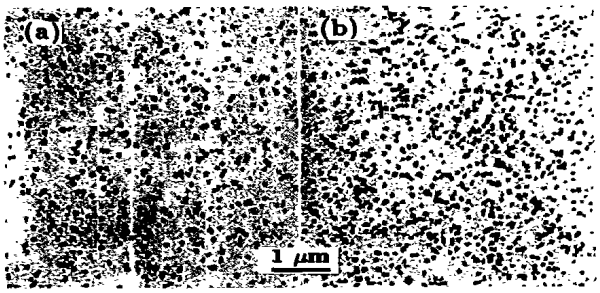

图 4　常规 TIG 焊中 Bi 颗粒分布

Fig.4　Distribution of bismuth particels in conventional TIG welding
(a) in the center of weld bead
(b) at the edge of weld bead

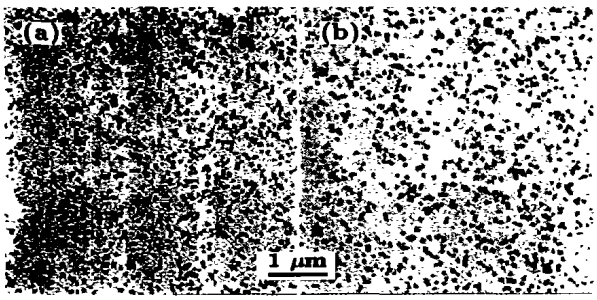

图 5　涂敷 SiO_2 试件焊缝中 Bi 颗粒分布

Fig.5　Distribution of bismuth particles in component coated with SiO_2 in A-TIG welding
(a) in the center of weld bead
(b) at the edge of weld bead

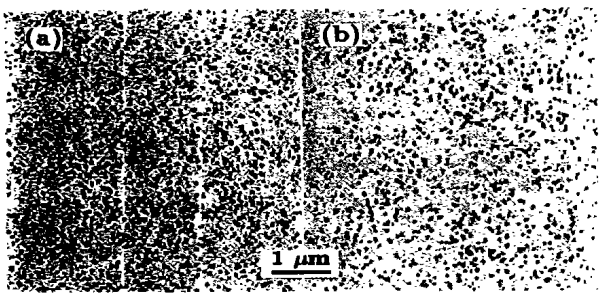

图 6　涂敷 TiO_2 试件焊缝中 Bi 颗粒分布

Fig.6　Distribution of bismuth particles in component coated with TiO_2 in A-TIG welding
(a) in the center of weld bead
(b) at the edge of weld bead

由于焊接熔池具有体积小、温度高、温度梯度大等特点, 测量熔池表面张力很难得到精确数值. 通过观察焊缝中活性剂成分分布是证明活性剂改变流动方向行之有效的方法.

2.2　活性剂对电弧电压的影响

图 7 为测量常规 TIG 焊和 A-TIG 焊电弧电压的试件, 试件尺寸为 160 mm×50 mm×6 mm. 焊接参数为: 焊接电流 I=120 A, 焊接速度 v_w=200 mm/min, 弧长 l=3 mm, 钨极直径 d=3.2 mm, Ar 气流量 q_v=10 L/min, 钨极角度 θ=60°. 图 8 为电弧电压测量结果. 测量结果表明, 试件上涂敷 SiO_2 活性剂后电弧电压有较大程度的增加, 对应的焊接参数下电弧电压增加约为 4.2 V, 即增加 53%, 而涂敷 TiO_2 活性剂后电弧电压没有变化. 从焊接熔池情况看 (测量收弧弧坑), 涂敷 TiO_2 活性剂时, 熔池下凹量基本与无活性剂的情况相同; 而在涂敷 SiO_2 活性剂时, 熔池下凹量较大, 约为 1.5 mm. 通过变弧长下的电弧电压测试表明, 涂敷 SiO_2 活性剂时单位弧长对应的电弧电压值为 0.8 V/mm(焊接电流相同), 如表 2 所示. 因此可以确定, 在上述的焊接参数下, 涂敷 SiO_2 活性剂由于等离子收缩导致的电弧电压增加为 3 V (其中弧柱压降占 0.9 V, 阳极压降占 2.1 V). 此外, 当 SiO_2 活性剂涂敷量较少时, 电弧电压增加程度相应减小. 而在 TiO_2 情况下, 电弧电压不因涂敷量而改变, 基本保持无活性剂涂敷时的水平.

上述实验证明, A-TIG 焊接中 SiO_2 活性剂提高了

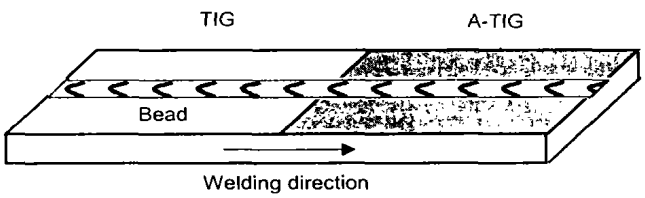

图 7　测量电弧电压的试件

Fig.7　Workpiece used in measuring arc voltage

Î¬ÆÕ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

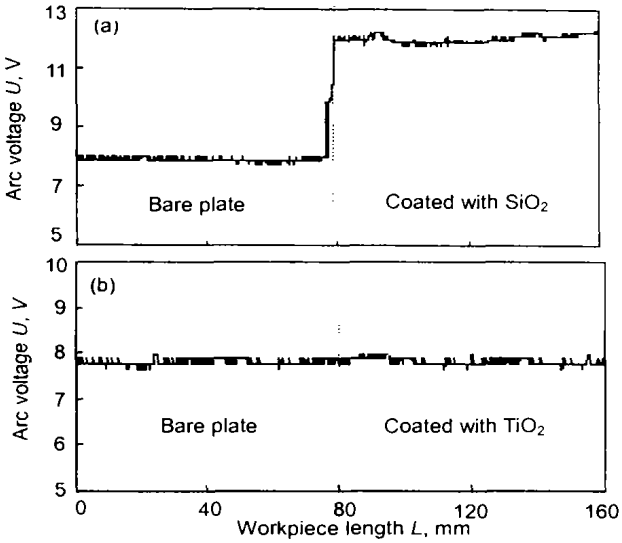

图 8 电弧电压测量结果

Fig.8 Measured results of arc voltage

(a) coated with SiO_2 (b) coated with TiO_2

表 2 弧长对电弧电压的影响

Table 2 Effect of arc length on arc voltage

(V)

Welding method	Arc voltage	
	l=3 mm	l=4 mm
Conventional TIG	8.0	8.5
A-TIG	10.7	11.5

单位弧长的压降，也就是提高了弧柱电场强度，从而，可以明确 SiO_2 活性剂对电弧具有压缩作用，而 TiO_2 活性剂对电弧没有压缩作用.

通过上述实验亦可以明确 SiO_2 和 TiO_2 活性剂对焊接电弧有着不同的影响，就增加焊接熔深而言，其作用机理不同. 就物理性质而言， SiO_2 和 TiO_2 的熔点和沸点相近，只是 SiO_2 的电阻率大于 TiO_2 的电阻率. 因此在 SiO_2 上形成导电通道即阳极区的难度较大. 当 SiO_2 覆盖在母材表面、电极正下方形成熔池后，电极阳极区即电弧弧根扩散需要较大的阻尼，而电弧阳极斑点容易在纯金属处形成，能量平衡的结果造成电弧的自动收缩. TiO_2 由于是金属氧化物，电阻率低，对电弧导电通道的阻尼小，因此电弧未表现出收缩. 上述实验现象用负离子形成理论是无法解释的，在负离子理论下，两种活性剂都会被电弧蒸发、分解，形成负离子，对电弧产生冷却，造成电弧收缩. 因此可以认为活性剂对电弧的作用主要是使阳极区行为发生变化.

另外，涂敷 SiO_2 活性剂的电弧产生向后拖动，有弧尾产生，如图 9 所示. 从图中可以看出，涂敷 SiO_2 活性剂的导电通道变长 ($l_2 > l_1$)，这也是电弧电压提高的原因之一.

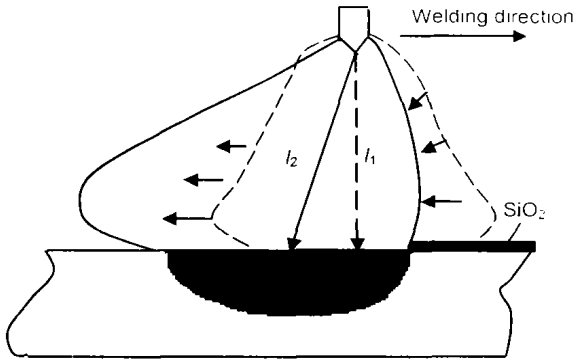

图 9 弧尾及其对弧长影响的示意图

Fig.9 Schematic presentation of arc trailing and its influence on arc length

涂敷 SiO_2 活性剂后电弧电压提高的主要原因有：

(1) 由于等离子体收缩和阳极斑点收缩导致的电弧电压的提高；

(2) 由于熔池表面凹陷加深 (从收弧坑可以看出) 导致的电弧电压的增加；

(3) 由于弧尾的产生导致的导电通道变长，此原因导致的电弧电压提高很小 (可以忽略不计).

2.3 活性剂对电弧形态的影响

图 10 为有无活性剂的电弧形态，从图中可以看出，无论 SiO_2 还是 TiO_2 活性剂电弧都有不同程度的膨胀 (主要是因为活性剂在电弧热的作用下蒸发并形成气流，此气流和等离子气流相遇导致的结果)，通过滤光片观察，有 SiO_2 活性剂的电弧中心烁亮区直径 (等离子体) 有所缩小而且变得更亮. 从 A-TIG 焊局部光谱分析的结果可知，有 SiO_2 活性剂的电弧中心 Ar 谱线强度高于无活性剂时电弧中心 Ar 谱线强度，说明电弧中心温度有所提高；在离电弧中心较远区域 (3 mm)，有 SiO_2 活性剂时 Ar 谱线的强度比无活性剂时 Ar 谱线的强度低，并且在电弧周围活性剂元素的谱线强度相当高，说明电弧周围分布着很多活性剂颗粒.

因此，有 SiO_2 活性剂时弧柱电场强度和温度有所提高，电弧周围分布着许多活性剂解离的颗粒，说明 SiO_2 活性剂是多原子分子，在电弧热的作用下发生热解离，热

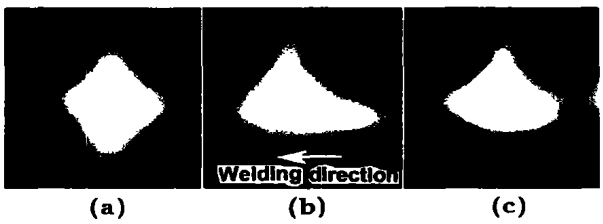

图 10 有无活性剂的电弧形态

Fig.10 Arc shapes coated with fluxes and without flux

(a) without flux (b) SiO_2 (c) TiO_2

Î¬ÆÕ×ÊÑ¶ http://www.cqvip.com

解离是个吸热过程，根据最小电压原理，使等离子体发生了收缩，如图 11 所示． TiO_2 却没有这种现象，说明 TiO_2 未使等离子体发生收缩．

引入 SiO_2 活性剂后焊缝熔深发生了变化，同时，阳极斑点发生了收缩，如图 12 所示，其原因是：添加 SiO_2 活性剂后，熔池表面产生金属蒸汽的数量受到抑制，在金属蒸汽较少的情况下，只有阳极斑点附近较小范围的金属被升腾气化电离，使电弧导电通道紧缩，电弧压力增大，

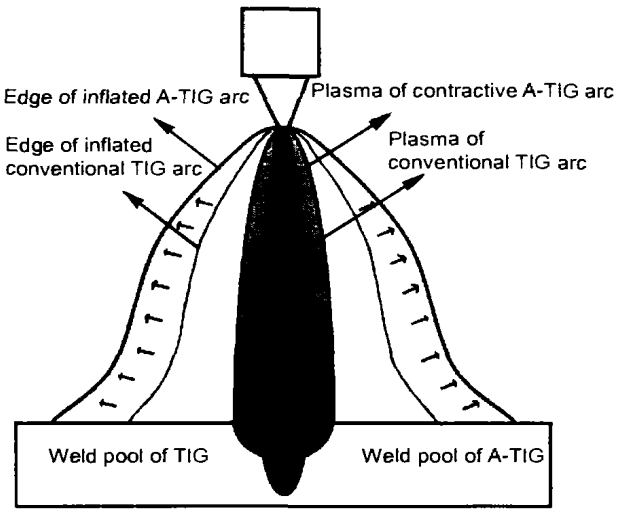

图 11　A–TIG 焊等离子体收缩模型

Fig.11　Constriction model of plasma in A–TIG welding

图 12　活性元素存在时的电弧阳极斑点区域收缩

Fig.12　Arc constriction of anode spots coated without flux (a) and with SiO_2 (b)

熔池内部金属液体流动加快、加大、加深，因而焊缝熔深增大．

由此可见， SiO_2 熔深增加是由于等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果，而 TiO_2 熔深增加只是表面张力温度梯度由负变正的作用．

3　结论

(1) 活性剂 SiO_2 和 TiO_2 改变了熔池的流动方向．

(2) 涂敷 SiO_2 活性剂的电弧电压提高约为 4.2 V．电弧等离子体收缩、阳极斑点收缩和电弧导电通道变长是 SiO_2 活性剂提高电弧电压的主要原因，而 TiO_2 对电弧电压没有影响．

(3) 通过电弧形态的观察可以看出，活性剂的加入并未使电弧整体发生收缩，而使电弧整体发生了膨胀，通过对电弧的光谱分析和电弧电压的测量可知，收缩的是等离子体．

(4) SiO_2 活性剂增加熔深是电弧等离子体收缩、阳极斑点收缩和表面张力温度梯度由负变正共同作用的结果； TiO_2 活性剂增加熔深只是表面张力温度梯度由负变正的作用．

参考文献

[1] Gurevich S M, Zamakov V N. *Avt Svarka*, 1966; (12): 13
[2] Lucas W, Howse D. *Weld Met Fabr*, 1996; 64(1): 11
[3] Paskell T, Lundin C. *Weld J*, 1997; 76(4): 57
[4] Paulo J. *J Mater Proc Technol*, 2000; 99: 260
[5] Paton B E. *Automat Weld*, 1974; 27(6): 1
[6] Kou S, Wang Y H. *Weld J*, 1986; 65(3): 63
[7] Takeuchi Y, Takagi R, Shinoda T. *Weld J*, 1992; 71(8): 283
[8] Simonik A G. *Weld Prod*, 1976; (3): 9
[9] Simonik A G. *Svar Proiz*, 1974; (3): 53
[10] Paton B E. *Weld J*, 2000; 79(1): 5
[11] Burghardt P, Heiple C R. *Weld J*, 1986; 65(6): 150
[12] Kazakov Yu V, Koryagin K B, Potekhin V P. *Weld Int*, 1991; 5: 202