

DOI: 10.3901/JME.2010.16.113

活性剂增加铝合金交流 FZ-TIG 焊熔深机理*

黄 勇 樊 丁 邵 锋

(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: 针对铝合金材料提出一种新型活性 TIG 焊, 即分区活性 TIG(FZ-TIG)焊, 可同时保证焊缝熔深显著增加和焊缝成形良好。利用氦气保护钨极电弧焊观察电弧行为变化, 通过分析电弧电压随弧长的变化规律研究活性剂影响电弧的方式, 采用焊缝偏移试验分析活性剂对导电通道电阻的影响, 进行焊缝表面焊渣 X 射线衍射分析和热力学计算, 分析活性剂与表面氧化膜或熔池金属之间可能的化学反应。通过以上试验研究铝合金交流 FZ-TIG 焊中活性剂增加熔深的机理, 得出活性剂强烈收缩电弧弧根和弧柱是 SiO_2 +FZ108 活性剂增加铝合金交流 FZ-TIG 焊熔深的主要机理。

关键词: 铝合金 分区活性 TIG 焊 活性剂 熔深 电弧 机理

中图分类号: TG444

Mechanism of Activating Fluxes Increasing Weld Penetration of AC FZ-TIG Welding for Aluminum Alloys

HUANG Yong FAN Ding SHAO Feng

(Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and Processing of Ministry of Education,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: For aluminum alloys, a new type activating TIG welding called flux zoned TIG(FZ-TIG)welding is proposed, it simultaneously increases weld penetration dramatically and improves weld surface forming. A series of experiments are carried out to study the mechanism of activating fluxes increasing weld penetration of AC FZ-TIG welding for aluminum alloys. TIG welding with helium shielding gas is used to observe the change of arc behavior. The change of welding voltage with arc length is studied to find the pattern of activating fluxes influencing arc. The weld deviation experiment is carried out to analyze the effects of activating fluxes on current channel resistance. The potential chemical reactions between the activating fluxes and the weld surface oxide film or the welding pool metal are studied by X-ray diffraction analysis of weld surface slag and thermodynamic calculation. It is believed that the fluxes including outer region flux SiO_2 , central region insulating flux FZ108 simultaneously constricting arc root and arc column dramatically are the main mechanism of fluxes increasing weld penetration of AC FZ-TIG welding for aluminum alloys.

Key words: Aluminum alloy FZ-TIG welding Activating flux Weld penetration Arc Mechanism

0 前言

活性焊接法是一种简单、高效、节能的焊接方法。它通过在焊接过程中引入活性元素, 使得焊接熔深显著增加。现已成功应用于 TIG 焊, 形成了活性剂 TIG(A-TIG) 焊, 并用于焊接不锈钢、钛合金、碳钢和镍基合金等多种金属, 引起了人们的广泛关注, 包括乌克兰巴顿焊接研究所、美国爱迪生焊接

研究所、英国焊接研究所、日本大阪大学连接与焊接研究所等知名焊接研究机构都开展了相关研究。在 A-TIG 焊中, 通过在传统 TIG 焊前在整个待焊焊道表面涂敷一层很薄的表面活性剂, 可使焊接电弧收缩或者熔池内液态金属流态改变, 熔深显著增加。但迄今为止还很少有人专门针对铝合金材料进行活性焊接法研究, 只有法国学者 SIRE 等^[1]针对一种他们称之为焊剂边界 TIG(FB-TIG)焊的工艺方法进行了研究。该方法将活性剂涂敷于待焊焊道两侧, 中间留出一定间隙, 然后进行常规 TIG 焊, 电弧在间隙中裸露的金属上燃烧, 使得电弧弧根收缩, 熔

* 教育部春晖计划(Z2005-1-62007)和国家知识产权局专利战略推进工程(ZX200701)资助项目。20090906 收到初稿, 20100412 收到修改稿

深增加。当采用 A-TIG 焊焊接铝合金时,很难同时保证熔深显著增加和焊缝表面成形良好^[2],而采用 FB-TIG 焊虽然能保证焊缝表面成形良好,但熔深增加程度尚不够理想^[3]。

针对铝合金材料,本文提出了一种新型活性 TIG 焊接方法,即分区活性 TIG(FZ-TIG)焊。该方法在传统 TIG 焊前,在待焊焊道表面中心区域涂敷低熔、沸点和低电阻率的活性剂,在两侧区域分别涂敷高熔、沸点和高电阻率的活性剂,然后进行正常焊接,可同时保证焊接熔深显著增加和焊缝表面成形良好。活性剂涂敷方式如图 1 所示。在中间区域涂敷自行开发的多组元活性剂 FZ108,两侧区域涂敷 SiO_2 ,铝合金交流 FZ-TIG 焊的焊缝成形如图 2 所示。针对该焊接方法进行焊缝熔深增加机理研究对于开发活性剂材料和推广该方法具有重要现实意义,对于增强人们对活性剂影响 TIG 焊电弧—熔池系统的认识也具有一定的理论意义。

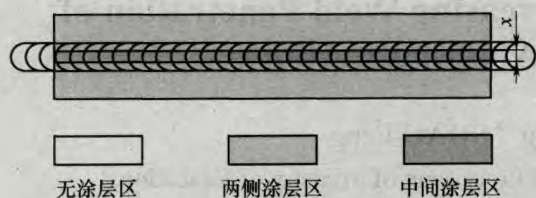
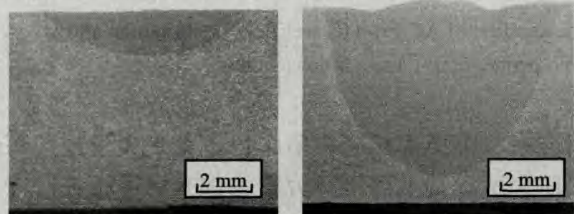


图1 FZ-TIG焊活性剂涂敷方式



(a) 焊缝表面



TIG 焊

FZ-TIG 焊

(b) 焊缝截面

图2 交流 FZ-TIG 焊和 TIG 焊的焊缝形貌

1 研究方法和试验条件

试验用铝合金材料为 3003,试板尺寸为 $200\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。采用 TIG 焊进行试板表面熔焊,基

础焊接规范参数如表 1 所示。钨极材料为 WCe-20,交流焊时钨极尖端为半球形,直流正接焊时钨极尖端角度为 45° 。试板表面分为两个区域,一半表面不涂敷活性剂,即为传统 TIG 焊区域;一半涂敷活性剂,即为活性 TIG 焊区域。焊接时,未涂敷活性剂区域与涂敷活性剂区域一次焊接完成。FZ-TIG 焊时,中间区域涂层活性剂为 FZ108,宽度 4 mm ,两侧区域绝缘层活性剂为 SiO_2 。

表1 焊接规范参数

参数	数值
焊接电流 I/A	150
焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	125
气流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	15
弧长 L/mm	3
钨极直径 d/mm	3.2
钨极伸出长度 d'/mm	3

首先进行氦气保护钨极电弧焊,通过与传统交流 TIG 焊对比观察交流 FZ-TIG 焊电弧行为变化。然后进行直流正接 FZ-TIG 焊,通过改变弧长,研究活性剂对电弧电压的影响,并与直流正接 TIG 焊、采用 SiO_2 的直流正接 FB-TIG 焊、采用 FZ108 的直流正接 A-TIG 焊对比,分析活性剂影响电弧的方式。再通过将活性剂涂敷在待焊焊道一侧,进行直流正接焊焊缝偏移试验,分析 FZ-TIG 焊中间区域涂层活性剂和两侧区域绝缘涂层活性剂分别对焊接导电通道电阻的影响。最后分别针对采用 SiO_2 的交流 FB-TIG 焊、采用 FZ108 的交流 A-TIG 焊和交流 FZ-TIG 焊,通过焊缝表面焊渣 XRD 分析和热力学计算,分析活性剂与表面氧化膜或熔池金属之间可能的化学反应。

2 氦弧焊电弧形貌

以纯度为 99.999% 的高纯氦气作为保护气体进行交流 FZ-TIG 焊,采用 CCD 数码相机对电弧形态进行拍摄。焊接电流为 100 A ,其余焊接工艺参数见表 1。图 3a 为拍摄方向与试板表面平行时 TIG 焊和 FZ-TIG 焊的电弧形态。TIG 焊电弧形状为钟罩形,颜色非常透明,只能隐约见到电弧轮廓,而 FZ-TIG 焊电弧弧柱区及极性区发生明显收缩,形状为倒钉子形,而且电弧轮廓较清晰,颜色不再透明,中心区域呈现为白色,从中心到边缘电弧颜色逐渐变淡。图 3b 为拍摄方向与试板表面倾斜时 TIG 焊和 FZ-TIG 焊的电弧和熔池表面形态。与 TIG 焊相

比, FZ-TIG 焊电弧颜色变深, 电弧形态发生了收缩。从熔池表面来看, 活性剂发生熔化的区域宽度略大于中间涂层活性剂的涂敷宽度 x , 且发现有未熔化的活性剂碎块漂浮于熔池表面。

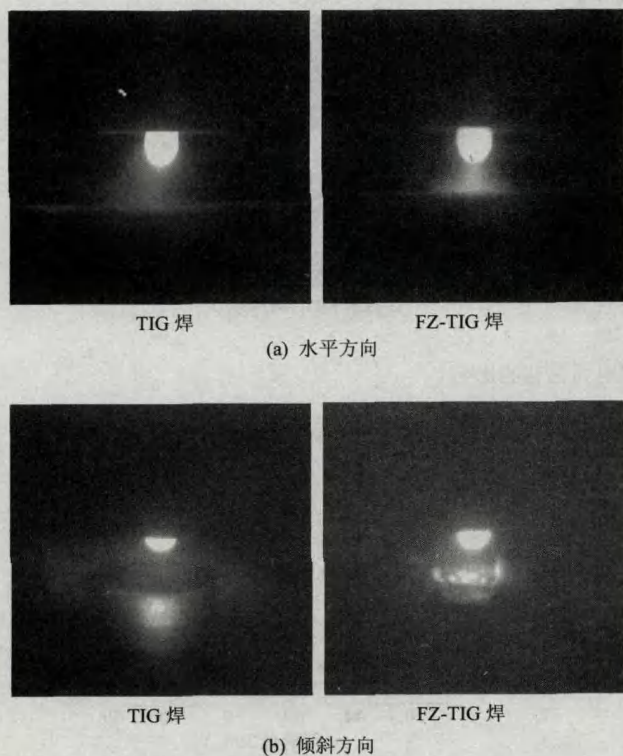


图 3 FZ-TIG 焊和 TIG 焊电弧和熔池形貌对比

3 活性剂影响电弧的方式

TIG 焊时, 在一定弧长范围内, 电弧电压与弧长成正比。弧长变化只改变弧柱区电压降, 而对极性区电压降几乎没有影响。将弧长—电压关系进行线性拟合, 拟合直线在纵轴上的截距近似为极性区电压降, 为阴极区电压降和阳极区电压降之和, 而直线斜率近似为弧柱区电位梯度。

图 4 为进行直流正接焊时, 传统 TIG 焊、A-TIG 焊、FB-TIG 焊和 FZ-TIG 焊电弧电压随弧长的变化规律。其中 FB-TIG 焊时活性剂涂层间隙为 4 mm。表 2 为根据图 4 所得直流正接 TIG 焊、A-TIG 焊、FB-TIG 焊和 FZ-TIG 焊电弧的极性区电压降和弧柱区电位梯度。在三种活性 TIG 焊中活性剂都能增加电弧极性区电压降, 由小到大的次序依次为: FB-TIG 焊 < A-TIG 焊 < FZ-TIG 焊。FZ-TIG 焊中活性剂增加极性区电压降的幅值大约为 A-TIG 焊和 FB-TIG 焊中活性剂增加极性区电压降幅值之和。而活性剂对弧柱区电位梯度的影响并不相同, A-TIG

焊时 FZ108 对弧柱区电位梯度没有影响, FB-TIG 焊和 FZ-TIG 焊时活性剂都能增加弧柱区电位梯度, FB-TIG 焊的要高于 FZ-TIG 焊的。

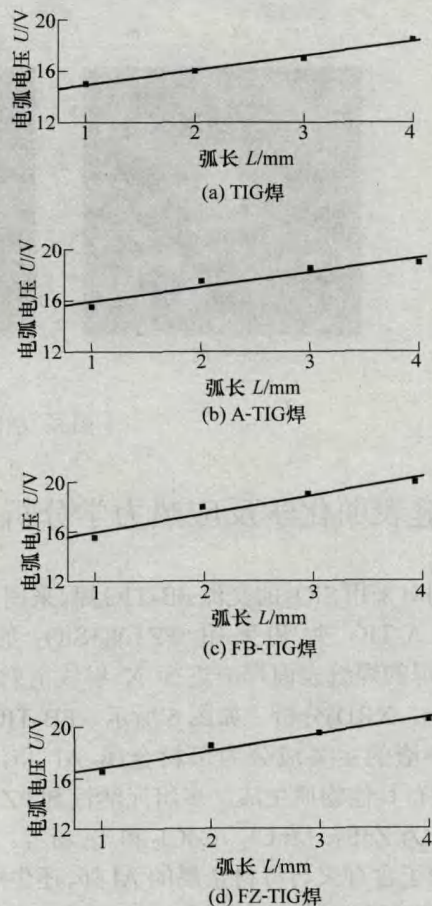


图 4 电弧电压随弧长的变化

表 2 极性区电压降和弧柱区电位梯度

参数	TIG 焊	A-TIG 焊	FB-TIG 焊	FZ-TIG 焊
极性区电压降 $U_A + U_K / V$	13.75	14.75	14.5	15.5
弧柱区电位梯度 $E_p / (V \cdot mm^{-1})$	1.15	1.15	1.45	1.3

4 焊缝偏移试验时的电弧和焊缝形貌

分别针对两侧绝缘层活性剂 SiO_2 和中间涂层活性剂 FZ108, 将活性剂只涂敷在待焊焊道的一侧, 进行直流正接焊缝偏移试验。电弧作为一种气体导体, 通过导电通道电阻最小的路径构成回路。如图 5 所示, SiO_2 使得焊接电弧和焊缝明显偏向无活性剂一侧, 焊缝偏移率达到 65%。而 FZ108 活性剂对焊接电弧和焊缝偏移的影响非常小, 焊缝偏移率只为 4%。这表明涂敷 SiO_2 在电弧—熔池系统中引入的导电通道电阻大于涂敷 FZ108 所引入的。

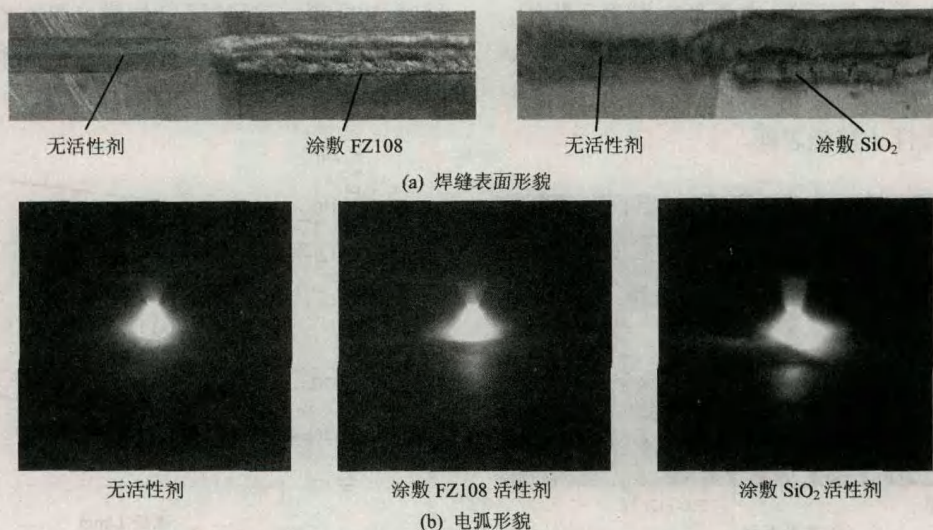
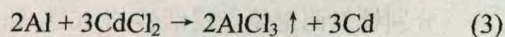
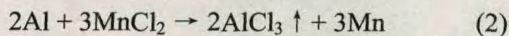
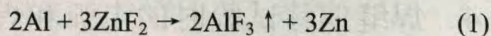


图5 活性剂对焊缝和电弧偏移的影响

5 焊缝表面化学反应热力学分析

分别对采用 SiO_2 的交流 FB-TIG 焊、采用 FZ108 的交流 A-TIG 焊和采用 FZ108+ SiO_2 的交流 FZ-TIG 焊的焊缝表面焊渣进行 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析,如图6所示。FB-TIG 焊焊缝表面焊渣的主要成分为母材金属 Al 和活性剂 SiO_2 , 没有其他物质生成。多组元活性剂 FZ108 的主要成分为 ZnF_2 、 MnCl_2 、 CdCl_2 和 Te 粉等。A-TIG 焊焊渣除了含有来自母材金属的 Al 外,还生成了来源于 FZ108 活性剂中组元 ZnF_2 、 MnCl_2 、 CdCl_2 的单质 Zn、Mn 和 Cd。FZ-TIG 焊焊渣除了含有来自母材金属的 Al 和来自绝缘层活性剂的 SiO_2 外,也生成了来源于 FZ108 活性剂中的单质 Zn 和 Mn,但没有 Cd 元素存在。在 A-TIG 焊和 FZ-TIG 焊焊渣中都没有发现 FZ108 中所含的 Te 存在。

假设多组元 FZ108 中的主要组元 ZnF_2 、 MnCl_2 、 CdCl_2 和 Te 粉与熔池金属之间的化学反应为



采用物质吉布斯自由能函数法^[4]通过计算以上反应的标准反应吉布斯自由能 $\Delta G_T^\ominus$ 和标准反应热效应 $\Delta H_T^\ominus$ 进行了热力学分析,发现式(1)、(3)不论是低温还是高温都可以进行,在有些温度范围内为吸热反应,有些温度范围内为放热反应。式(2)只有在高温下才可以进行,全为吸热反应。而式(4)则不论低温还是高温都不能进行。对于 A-TIG 焊,活性剂 FZ108 涂敷在整个待焊焊道表面。由于活性剂熔

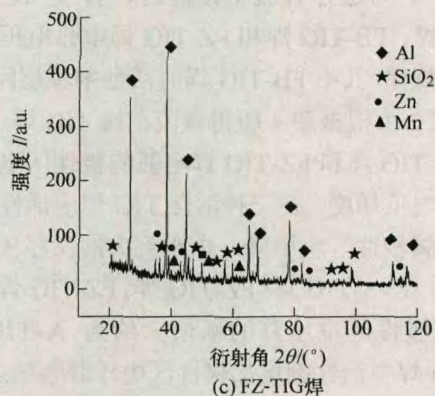
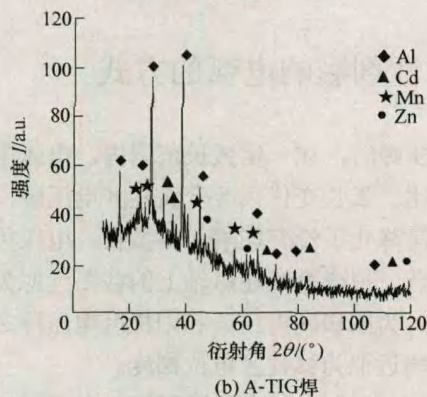
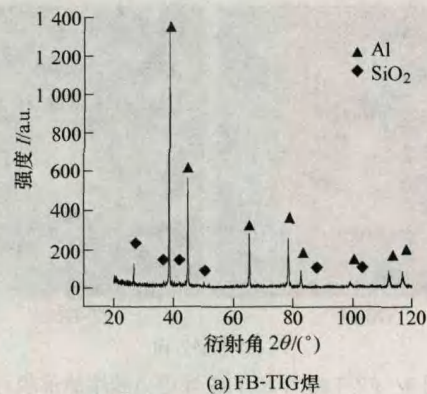


图6 焊缝表面焊渣 XRD 分析

点较低, 反应发生区域为整个熔池表面, 即温度高于母材金属熔点(927 K)的区域。以上可发生的反应既可能是放热反应也可能为吸热反应, 或者说整个反应过程放出或者吸收的热量都较小。而对于 FZ-TIG 焊, 由于 FZ108 存在区域为高温区域, 以上所能发生的反应过程都为吸热过程。

6 活性剂增加熔深机理的分析和讨论

以往研究表明活性剂增加铝合金活性 TIG 焊熔深只与活性剂收缩电弧有关, 而与活性剂改变熔池表面张力温度梯度关系不大^[2, 5], FZ-TIG 焊正是基于此提出的一种新型活性 TIG 焊接方法。氩弧焊结果也证明 FZ-TIG 焊中活性剂强烈收缩电弧弧柱和弧根, 焊接熔深显著增加。

FZ-TIG 焊中所涂敷的活性剂分为两种: ① 涂敷在待焊焊道两侧的绝缘层活性剂 SiO_2 ; ② 涂敷在待焊焊道中间区域的活性剂 FZ108。从活性剂涂敷方式来看, FZ-TIG 焊可被认为是采用 SiO_2 的 FB-TIG 焊和采用 FZ108 活性剂的 A-TIG 焊的一种结合。所以可从这三种活性 TIG 焊接方法的比较中分析活性剂增加 FZ-TIG 焊熔深的机理。

直流正接变弧长焊接试验结果表明, 采用 FZ108 的 A-TIG 焊只增加电弧极性区电压降, 而对弧柱区电位梯度几乎没有影响。但对于采用其他氧化物和卤化物的 A-TIG 焊, 活性剂都只使电弧极性区收缩, 而弧柱区是明显发散的^[6]。由此可认为 FZ108 能在一定程度上收缩弧柱区。

FZ-TIG 焊中活性剂即可增加极性区电压降, 又可增加弧柱区电位梯度。其增加极性区电压降的幅值大约为 A-TIG 焊和 FB-TIG 焊中活性剂增加极性区电压降幅值之和, 可认为活性剂对 FZ-TIG 焊电弧的影响是 FB-TIG 焊和 A-TIG 焊中作用的综合。而活性剂增加 FZ-TIG 焊弧柱区电位梯度的程度略小于 FB-TIG 焊, 从氩弧焊结果来看, 与两侧绝缘层间隙 x 略微增加有关。

活性剂收缩电弧极性区来源于两种作用: ① 活性剂所形成的绝缘层对电弧弧根的机械压缩和电压压缩作用。这使阳极区面积减小, 阳极压降升高。焊缝偏移试验结果表明, 由于自身物化特性不同, 焊接时 SiO_2 和 FZ108 对导电通道电阻的影响不同。 SiO_2 使电弧明显偏向没有涂敷活性剂一侧, 说明它具有高熔、沸点和高电阻率特性, 焊接时可在熔池表面形成绝缘层, 对电弧弧根形成强的机械压缩和电压压缩, 使电弧极性区强烈收缩。而 FZ108 中所含组元的熔、沸点都较低, 并且 ZnF_2 、 MnCl_2 和 CdCl_2

都为离子化合物, Te 为一种半导体材料, 高温熔融状态下电阻率都较低, 焊接时 FZ108 除一部分与母材金属发生反应外, 其余部分都熔化蒸发到电弧中, 不能在熔池表面形成绝缘层; ② 活性剂熔化蒸发过程以及与熔池金属反应的吸热过程所导致的热压缩作用。这可从 A-TIG 焊中活性剂都能使得电弧极性区电压降升高得到验证。

活性剂收缩电弧弧柱区也主要来源于两种作用: 第 1 种是活性剂所形成的绝缘层对弧柱区的机械压缩和电压压缩作用。一般认为电弧极性区的厚度小于电子平均自由程, 约为 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ^[7-8], 而绝缘层厚度约为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ m}$ ^[9], 比电弧极性区厚度大 1~3 个数量级, 所以绝缘层的存在不但能收缩电弧极性区, 使得极性区电压降升高, 而且在一定程度上能控制熔池金属蒸发的方向, 收缩电弧弧柱区, 使得电弧弧柱区电位梯度增加。这可从 SiO_2 能增加 FB-TIG 焊和 FZ-TIG 焊弧柱区电位梯度得到验证; 第 2 种是电弧中活性剂粒子对作为载流子的电子的消减作用。在电弧外围, 温度较低, 粒子运动速度较慢, 活性剂蒸发到电弧所产生的中性原子和分子有可能捕捉电子形成负离子, 正离子有可能捕捉电子形成低价正离子或者中性原子, 从而使得作为载流子的电子数目减少, 使弧柱区收缩, 弧柱区的电位梯度增加。如表 3 所示, FZ108 中所含卤族元素和 Te 具有很大电子亲和能, 其中性原子能在电弧温度较低的外围区域捕捉电子变成负离子; FZ108 中所含的 ZnF_2 、 MnCl_2 、 CdCl_2 在电弧高温作用下所得 Zn、Mn 和 Cd 由于具有较高第一、第二电离能, 在电弧中心等离子区不容易电离, 在电弧周边容易捕捉电子变成低价正离子或中性原子, 使弧柱区收缩。

表 3 相关元素的电离能和电子亲和能 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

元素	第一电离能 E_1	第二电离能 E_2	第三电离能 E_3	电子亲和能 A
Ar	1 520.6	2 665.8	3 931.0	0
Al	577.5	1 816.7	2 744.8	0
O	1 314.0	3 388.3	5 300.5	141.0
Cl	1 251.2	2 298.0	3 822.0	348.8
F	1 681.0	3 374.2	6 050.4	327.9
Zn	906.4	1 733.3	3 833.0	0
Mn	717.6	1 509.5	3 249.4	0
Cd	867.8	1 631.4	3 616.0	0
Te	869.3	1 790.0	2 698.0	190.4
Ca	589.8	1 145.4	4 941.0	0

7 结论

(1) 采用 SiO_2 +FZ108 活性剂进行铝合金交流 FZ-TIG 焊时, 两侧的 SiO_2 涂层由于具有高的熔、

沸点和高温电阻率,可起到绝缘层的作用使电弧弧根、弧柱区收缩,中间 FZ108 涂层中的组元粒子具有高的电子亲和能和电离能,可以收缩电弧弧柱区,而且活性剂的熔化蒸发以及与熔池金属的吸热反应过程均可收缩电弧弧根。

(2) 活性剂强烈收缩电弧弧根和弧柱是 $\text{SiO}_2 + \text{FZ108}$ 活性剂增加铝合金交流 FZ-TIG 焊熔深的主要机理。

参 考 文 献

- [1] SIRE S, MARYA S. New perspectives in TIG welding of aluminium through flux application FBTIG process[C] // The 7th International Welding Symposium, 2001, 11, Kobe, Japan. Tokyo: The Japan Welding Society Press, 2001: 113-118.
- [2] 黄勇, 樊丁, 樊清华. 活性剂增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深机理研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 45-49.
HUANG Yong, FAN Ding, FAN Qinghua. Study of mechanism of activating flux increasing weld penetration of AC A-TIG welding for aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 45-49.
- [3] 黄勇, 樊丁, 樊清华. 铝合金 FBTIG 焊的试验研究[J]. 焊接, 2004(3): 10-12.
HUANG Yong, FAN Ding, FAN Qinghua. Experimental study of FBTIG welding for aluminium alloy[J]. Welding and Joining, 2004(3): 10-12.
- [4] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
YE Dalun, HU Jianhua. Thermodynamic properties of inorganic substances[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [5] 樊丁, 樊清华, 黄勇. 活性剂对铝合金电子束焊的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(6): 5-8.
FAN Ding, FAN Qinghua, HUANG Yong. Effect of activating fluxes on electron beam welding of aluminum alloy[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(6): 5-8.
- [6] 黄勇, 樊丁, 樊清华. 表面活性剂对铝合金直流正接 A-TIG 焊焊接电压的影响[C] // 2004 年航空航天焊接国际论坛, 2004, 11, 北京. 北京: 机械工业出版社, 2004: 324-327.
HUANG Yong, FAN Ding, FAN Qinghua. Effect of surface activating flux on welding arc voltage of A-TIG welding with DCSP mode of aluminum alloy[C] // International Forum on Welding Technology in Aviation and Space Industries, November, 2004, Beijing. Beijing: China Machine Press, 2004: 324-327.
- [7] TANAKA M, USHIO M. Observations of the anode boundary layer in free-burning argon arcs[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(8): 906-912.
- [8] USHIO M, FAN Ding, TANAKA M. Method of estimating the space-charge voltage drop for thermionic arc cathodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(3): 561-566.
- [9] 黄勇, 樊丁. SiO_2 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深机理研究[J]. 焊接学报, 2008, 29(1): 45-49.
HUANG Yong, FAN Ding. Study of mechanism of SiO_2 increasing weld penetration of AC A-TIG welding for aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(1): 45-49.

作者简介: 黄勇(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士。主要研究方向为活性焊接技术。

E-mail: hyorhot@lut.cn

樊丁, 男, 1961 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接物理、焊接智能控制以及激光加工等。

E-mail: fand@lut.cn