

# 活性剂对镁合金直流正接 A-TIG 焊熔深的影响

黄 勇, 樊 丁, 林 涛, 邵 锋

(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)

**摘 要:** 分别以单质 Te, Ti 和 Si, 氧化物  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  和  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 卤化物  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  和  $\text{ZnF}_2$  作为表面活性剂进行了镁合金直流正接 A-TIG 焊, 研究了活性剂对焊缝熔深的影响规律。Te 能显著增加熔深熔宽, 分别达到传统 TIG 焊的 2.5 倍和 1.4 倍, 而 Ti 和 Si 对熔深熔宽影响较小;  $\text{V}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  都使得熔深熔宽同时增加, 其中  $\text{SiO}_2$  增加熔深熔宽效果最明显, 分别达到传统 TIG 焊的 2.0 倍和 1.6 倍, 而  $\text{TiO}_2$  对熔深熔宽影响较小;  $\text{ZnF}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  和  $\text{MnCl}_2$  都使熔深熔宽显著增加, 其中  $\text{ZnF}_2$  的熔深熔宽增加最明显, 分别达到传统 TIG 焊的 4.0 倍和 1.6 倍。认为活性剂增加镁合金直流正接 A-TIG 焊熔深主要与活性剂收缩电弧所导致的热输入增加有关。

**关键词:** 镁合金; 直流正接 A-TIG 焊; 活性剂; 熔深

**中图分类号:** TG444 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2007)10-021-04



黄 勇

## 0 序 言

镁合金具有密度小、比强度和比刚度高、导电导热性好、阻尼特性好、电磁屏蔽能力强、机械加工性能好和可回收利用等一系列突出优点, 是理想的结构功能材料。而中国镁储量居世界第一, 年产量和出口量也都居世界第一, 镁合金材料的开发和加工成形受到了人们的高度重视, 焊接作为镁合金的主要连接技术, 成为镁合金研究领域的热点之一<sup>[1]</sup>。A-TIG 焊(activating flux TIG welding)作为一种简单、高效、节能的焊接方法, 通过传统 TIG 焊前将很薄的一层表面活性剂涂敷于待焊焊道表面然后进行正常焊接, 可使焊接熔深显著增加, 焊接效率大大提高。同时, A-TIG 焊还可以减小焊接热输入和焊接变形, 减少焊接气孔和母材中微量元素对焊缝熔深波动的影响, 从而提高焊接质量。鉴于 A-TIG 焊的突出优点, 国际上包括 PWI, TWI, EWI 和 JWRI 等在内的知名焊接机构都开展了相关研究。其研究热点主要集中在两个方面, 一是适用于各种金属材料的表面活性剂的研制与应用<sup>[2-4]</sup>; 二是表面活性剂增加熔深机理的研究<sup>[5-10]</sup>。

近年来, A-TIG 焊接技术也已经被引入到镁合

金的焊接中。Marya 等人<sup>[5]</sup>研究了氯化物对直流正接 A-TIG 焊的影响。张兆栋等人<sup>[6]</sup>研究了氧化物和卤化物对交流 A-TIG 焊的影响, 徐杰等人<sup>[7]</sup>研究了氧化物和氯化物对交流填丝 A-TIG 焊熔深和焊缝组织的影响。关于活性剂增加 A-TIG 焊熔深的机理, 虽然已经提出了很多理论, 但还没有形成统一的认识。其中影响最大的电弧收缩理论<sup>[8,9]</sup>和表面张力梯度改变理论<sup>[10]</sup>分别从活性剂影响 TIG 焊电弧行为和焊接熔池行为两方面进行了分析。而对于镁合金, 以往的研究都认为与电弧因素有关, 而与活性剂改变熔池表面张力梯度无关。Marya 等人<sup>[5]</sup>认为活性剂增加熔深是由于焊接热输入增加所导致的, 这与活性剂中金属元素的第一电离能有关。张兆栋等人<sup>[6]</sup>认为活性剂增加熔深与电弧收缩有关。

镁合金直流正接 TIG 焊时, 由于没有工件为阴极时的阴极雾化作用, 焊接过程中工件表面的致密氧化膜仍然存在于熔池表面, 将焊接电弧和焊接熔池隔离开来, 使得活性剂不能进入焊接熔池, 不能直接影响熔池表面张力, 所以活性剂只能通过影响焊接电弧来改变焊接熔深。文中试验正是利用了镁合金直流正接 TIG 焊的这个特性, 分别以单质、氧化物和卤化物作为表面活性剂进行了镁合金直流正接 A-TIG 焊, 研究了活性剂对焊接熔深的影响规律, 分析了活性剂影响熔深的主要因素, 这为镁合金 A-TIG 焊活性剂研制和熔深增加机理研究奠定了基础。

1 试 验

试验用镁合金为 AZ31B, 试件尺寸为 300 mm × 100 mm × 5 mm。试验采用的表面活性剂, 单质分别为 Te 粉, Ti 粉和 Si 粉, 氧化物分别为 SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 卤化物分别为 MnCl<sub>2</sub>, CdCl<sub>2</sub> 和 ZnF<sub>2</sub>。焊接方法为直流正接 TIG 焊进行工件的表面熔焊, 焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding parameters

| 焊接电流  | 焊接速度                    | 氩气流量                   | 弧长     | 钨极直径   | 钨极尖端角度              |
|-------|-------------------------|------------------------|--------|--------|---------------------|
| $I/A$ | $v/(mm \cdot min^{-1})$ | $Q/(L \cdot min^{-1})$ | $L/mm$ | $D/mm$ | $\theta/(^{\circ})$ |
| 100   | 300                     | 20                     | 2      | 3.2    | 45                  |

作用时的焊缝熔深和熔宽。

2 试验结果

2.1 传统 TIG 焊的典型焊缝形貌

图 1 为传统 TIG 焊, 即没有涂敷活性剂时的典型焊缝形貌。由于直流正接 TIG 焊时没有阴极雾化作用, 焊缝表面氧化膜没有打开, 并且在电弧的高温作用下焊缝表面颜色由边缘到中心呈从灰色到黑色逐渐变化。焊缝熔宽较大, 熔深较浅, 深宽比为 0.23。

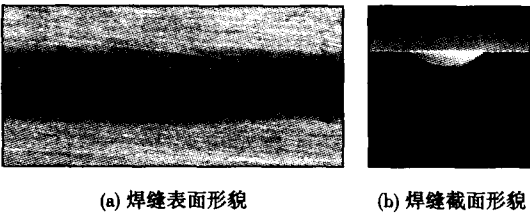


图 1 传统 TIG 焊的焊缝形貌

Fig.1 Weld appearance of conventional TIG welding

2.2 单质对焊缝熔深熔宽的影响

图 2 为采用单质作为活性剂进行焊接所得焊缝横截面。可以看出, 不同活性剂对焊缝熔深熔宽的影响不同。Te 粉能显著增加熔深和熔宽, 分别达到传统 TIG 焊的 2.5 倍和 1.4 倍, 焊缝深宽比达到 0.36; 而 Ti 粉和 Si 都对焊缝熔深熔宽影响较小, 只是 Si 粉使得焊缝表面形成了大约 0.5 mm 的凹陷。

2.3 氧化物对焊缝熔深熔宽的影响

图 3 为采用氧化物作为活性剂进行焊接所得焊

焊接前先用丙酮擦拭工件表面以除去表面油污, 然后用细钢丝刷刷净, 直到露出金属光泽为止。将活性剂用丙酮溶解, 搅拌成糊状后用毛刷均匀地涂敷在工件表面, 以遮盖原有的金属光泽为宜。为了保证试验数据的一致性与可比性, 必须保证焊接过程中所有焊接工艺参数精确设定, 并且无活性剂区和有活性剂区焊缝的焊接要一次完成。焊接过程中, 对电弧电压进行记录, 对电弧形貌进行数码拍照。焊接结束后, 分别测量出无活性剂和有活性剂

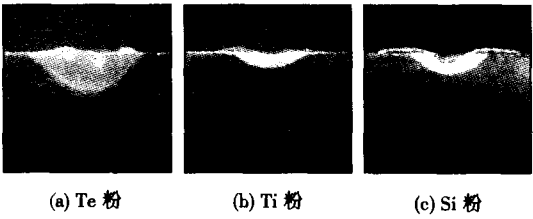


图 2 单质对焊缝熔深熔宽的影响  
Fig.2 Effects of elements on weld penetration and width

缝横截面。可以看出, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 都使得焊缝熔深熔宽同时增加, 其中 SiO<sub>2</sub> 的熔深熔宽增加最明显, 分别达到传统 TIG 焊的 2.0 倍和 1.6 倍, 焊缝深宽比为 0.31, TiO<sub>2</sub> 对焊缝熔深熔宽影响较小。

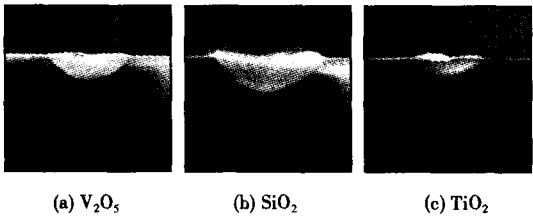


图 3 氧化物对焊缝熔深熔宽的影响  
Fig.3 Effects of oxides on weld penetration and width

2.4 卤化物对焊缝熔深熔宽的影响

图 4 为采用卤化物作为活性剂进行焊接所得焊缝横截面。可以看出, ZnF<sub>2</sub>, CdCl<sub>2</sub> 和 MnCl<sub>2</sub> 都使得熔深熔宽显著增加, 其中 ZnF<sub>2</sub> 的影响最明显, 分别达到传统 TIG 焊的 4.0 倍和 1.6 倍, 焊缝深宽比为 0.45。

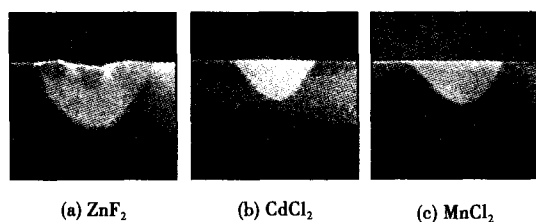


图 4 卤化物对焊缝熔深熔宽的影响

Fig.4 Effects of halides on weld penetration and width

### 3 讨 论

在镁合金直流正接 A-TIG 焊时,表面活性剂既可以通过热的因素,即热输入增加,也可以通过力的因素,即电弧收缩来增加熔深。当热输入增加时,焊缝熔深熔宽同向变化,即熔深增加的同时熔宽增大。当电弧收缩时,熔深熔宽变化方向相反,但由于电弧

收缩同时会导致电压升高,热输入增加,所以熔深增加的同时熔宽有可能减小也有可能增大。

活性剂在电弧作用下所经历的物理过程包括:熔化→蒸发→分解→电离和复合。其中熔化和蒸发过程,主要与活性剂熔沸点和电阻率有关;分解过程主要与活性剂分子的解离能有关;电离过程与活性剂元素原子的电离能有关;活性剂粒子与电子的复合过程主要与活性剂元素原子的电离能和电子亲和能有关。表 2 所示为相关材料的熔沸点,表 3 所示为相关原子的电离能与电子亲和能及电负性值。

表 2 相关材料的熔沸点(K)

Table 2 Melting temperatures and boiling temperatures of relative materials

|      | Mg    | Te      | SiO <sub>2</sub> | ZnF <sub>2</sub> |
|------|-------|---------|------------------|------------------|
| 熔点温度 | 923   | 723     | 1 646 ~ 1 746    | 1 148            |
| 沸点温度 | 1 363 | 1 282.4 | —                | 1 778            |

表 3 相关原子的电离能与电子亲和能及电负性值

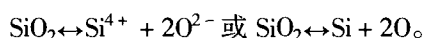
Table 3 Ionization potentials, electron affinities and electro-negativities of relative atoms

|                                             | Mg      | Te      | Ti      | Si      | O        | F       | Zn      |
|---------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| 第一电离能 $E_1/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$ | 737.7   | 869.3   | 658.8   | 786.5   | 1 313.95 | 1 681.0 | 906.4   |
| 第二电离能 $E_2/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$ | 1 450.7 | 1 790.0 | 1 309.8 | 1 577.1 | 3 388.3  | 3 374.2 | 1 733.3 |
| 第三电离能 $E_3/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$ | 7 732.7 | 2 698.0 | 2 652.5 | 3 231.6 | 5 300.5  | 6 050.4 | 3 833.0 |
| 第四电离能 $E_4/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$ | —       | 3 610.0 | 4 174.6 | 4 355.5 | 7 469.2  | 8 407.7 | 5 731.0 |
| 电子亲和能 $A/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$   | 0       | 190.4   | 0       | 133.6   | 141.0    | 327.9   | 0       |
| 电负性值 <sup>*</sup> $x$                       | 1.31    | 2.10    | 1.54    | 1.90    | 3.44     | 3.98    | 1.65    |

\* 鲍林标度

对于单质活性剂,Te 增加熔深最明显。与 Mg 相比,Te 的熔沸点都较低,而第一电离能、第二电离能与电子亲和能都较高。可以认为 Te 由于具有较高电离能,必须在较高温度或较强电场下才能电离;另外,Te 具有较高电子亲和能,其原子容易在电弧周边温度较低区域捕捉电子,使得电弧中心等离子区收缩,电压升高,热输入增加,熔深熔宽增加。

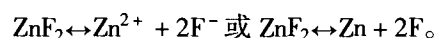
对于氧化物活性剂,SiO<sub>2</sub> 增加熔深最明显。这与 SiO<sub>2</sub> 熔沸点和电阻率较高,可以减少活性剂的熔化与蒸发,在阳极表面形成绝缘层使得电弧弧根收缩有关。另外,SiO<sub>2</sub> 在电弧高温作用下,将发生以下反应,即



所得的 Si 和 O 的离子和原子分别具有较高的电离能和电子亲和能,可以在电弧周边温度较低区域捕捉电子变成低价正离子和负离子,使得电弧中心等离子区收缩。电弧中心等离子区和弧根收缩都将导

致电压升高,热输入增加,熔深熔宽增加。

对于卤化物活性剂,ZnF<sub>2</sub> 增加熔深的作用最明显。作为离子化合物,其熔沸点和电阻率都较低,不可能在阳极表面形成绝缘层而使得电弧弧根收缩。在电弧高温作用下,ZnF<sub>2</sub> 可能发生以下反应



Zn 由于具有较高电离能,Zn<sup>2+</sup> 可能在电弧周边较低温度区域捕捉电子形成 Zn<sup>+</sup> 和 Zn,F 原子由于具有较大电子亲和能,也可能在电弧周边较低温度区域捕捉电子分别变成 F<sup>-</sup>。这些过程都可以减少作为载流子的电子的数目,使得电弧中心等离子区收缩。另外,由于 F 和 Zn 的电负性值都分别大于 O 和 Mg 的,在高温下 ZnF<sub>2</sub> 可能与 MgO 氧化膜发生反应,从而将熔池表面中央的氧化膜去除,图 5 所示为经过水洗的焊缝表面。而熔池边缘仍存在的氧化膜则形成绝缘层,使得电弧弧根收缩。电弧中心等离子区

和弧根收缩都将导致电压升高,热输入增加,熔深熔宽增加。这与  $\text{ZnF}_2$  使得焊缝表面中央明显凹陷,电弧电压升高 7.2 V,以及如图 6 显示的焊接电弧明显扩展等现象基本吻合。

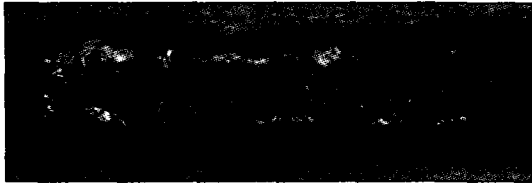


图 5  $\text{ZnF}_2$  对焊接表面成形的影响  
Fig.5 Effect of  $\text{ZnF}_2$  on weld appearance



(a) 无活性剂 (b)  $\text{ZnF}_2$   
图 6 无活性剂时和涂敷  $\text{ZnF}_2$  时的电弧形貌  
Fig.6 Arc appearances without flux and with  $\text{ZnF}_2$

## 4 结 论

(1) Te 粉能显著增加镁合金 A-TIG 焊熔深和熔宽,分别达到传统 TIG 焊的 2.5 倍和 1.4 倍,焊缝深宽比达到 0.36,而 Ti 粉和 Si 粉对熔深熔宽影响较小。

(2)  $\text{V}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  都使得镁合金 A-TIG 焊熔深熔宽同时增加,其中  $\text{SiO}_2$  增加熔深熔宽效果最明显,分别达到传统 TIG 焊的 2.0 倍和 1.6 倍,焊缝深宽比为 0.31,而  $\text{TiO}_2$  对焊缝熔深熔宽影响较小。

(3)  $\text{ZnF}_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  和  $\text{MnCl}_2$  都使得镁合金 A-TIG 焊熔深熔宽显著增加,其中  $\text{ZnF}_2$  增加熔深熔宽最明显,分别达到传统 TIG 焊的 4.0 倍和 1.6 倍,焊缝深宽比达到 0.45。

(4) 活性剂增加镁合金直流正接 A-TIG 焊熔深主要与活性剂收缩电弧所导致的热输入增加有关。

## 参考文献:

- [1] 冯吉才,王亚荣,张典忠. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(2): 165-177.
- [2] Troy Paskell, Carl Lundin, Harvey Castner. GTAW flux increases weld joint penetration[J]. Welding Journal, 1997, 76(4): 57-62.
- [3] 樊 丁, 黄 勇, 张瑞华, 等. 均匀设计法在铝合金 A-TIG 活性剂配方研制中的应用[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(2): 1-3.
- [4] 张瑞华, 樊 丁. 低碳钢 A-TIG 活性剂的焊接性[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 85-87, 90.
- [5] Marya M, Edwards G R. Chloride contributions in flux assisted GTA welding of magnesium alloys[J]. Welding Journal, 2002, 81 (12): 291-298.
- [6] 张兆栋, 刘黎明, 沈 勇, 等. 镁合金的活性电弧焊接. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 912-916.
- [7] 徐 杰, 刘子利, 沈以赴, 等. AZ31 镁合金活性 TIG 焊接头分析[J]. 焊接学报, 26(10): 54-58.
- [8] Howse D S, Lucas W. Investigation into arc constriction by active fluxes for tungsten inert gas welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(3): 189-193.
- [9] 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.
- [10] Tanaka M, Shimizu T, Terasaki H, et al. Effects of activating flux on arc phenomena in gas tungsten arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(6): 397-402.

作者简介: 黄 勇, 男, 1972 出生, 讲师, 博士研究生。主要从事焊接电弧物理的研究。发表论文 20 篇。

Email: hyorhot@lut.cn