

后,测量出无活性剂和活性剂作用时的焊缝熔深和熔宽,比较不同活性剂对焊缝成形的影响,并针对熔深明显增加的焊缝进行光学显微组织观察。

2 试验结果

2.1 活性剂对焊缝熔深熔宽的影响

图 1 为镁合金交流 A-TIG 焊的焊缝横截面形貌。可以看出,不同活性剂对焊缝熔深熔宽的影响不同。在三种单质活性剂中,Te 粉能显著增加熔深,达

到传统 TIG 焊的 1.6 倍,但对熔宽几乎没有影响,焊缝深宽比达到 0.43;Ti 粉对焊缝成形几乎没有影响;Si 粉使得焊缝熔深熔宽都明显减小,焊缝深宽比为 0.22。而对于三种氧化物活性剂, V_2O_5 , SiO_2 和 TiO_2 都使得焊缝熔深熔宽减小。在三种卤化物活性剂中, ZnF_2 使得熔深明显增加,达到传统 TIG 焊的 1.3 倍,熔宽几乎不变,焊缝深宽比为 0.36; $CdCl_2$ 也使得熔深达到传统 TIG 焊的 1.3 倍,熔宽明显减小,达到传统 TIG 焊的 0.8 倍,焊缝深宽比达到 0.48; $MnCl_2$ 使得焊缝熔深熔宽都略有减小,焊缝深宽比为 0.35。

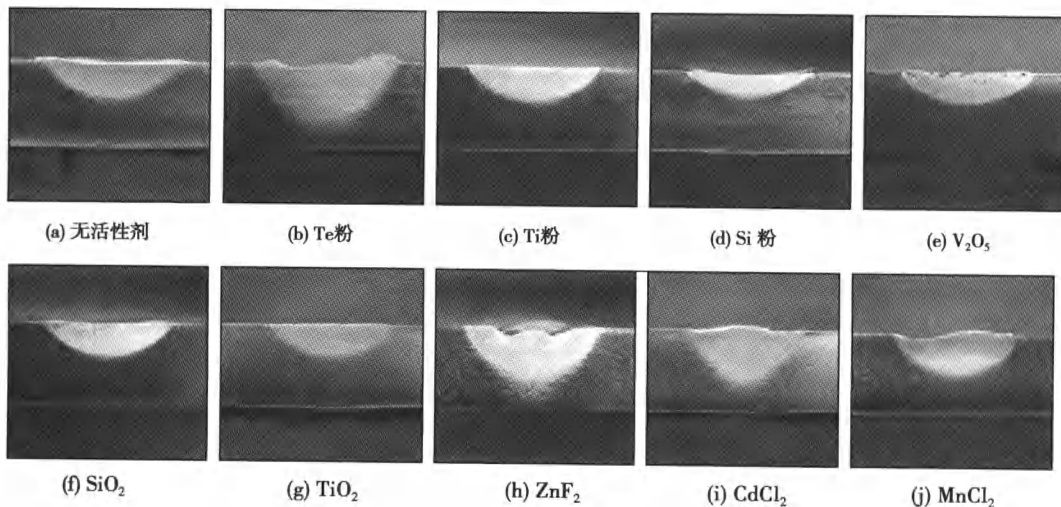


图 1 镁合金交流 A-TIG 焊的焊缝横截面形貌

Fig. 1 Weld cross-sections of AC A-TIG welding of magnesium alloy

2.2 活性剂对焊缝组织的影响

图 2 为采用光学显微镜观察到的镁合金交流 A-TIG 焊焊缝组织。可以看出,在进行镁合金 A-TIG 焊时焊缝组织都和传统 TIG 焊时的一样,为等轴晶组织。这是由于镁合金具有高导热率的物理特性和试验采用高速焊接工艺参数所导致的。在增加熔深最明显的三种活性剂中,Te 粉和 ZnF_2 都使得焊缝组织细化,而 $CdCl_2$ 使得焊缝组织略有粗化。

3 讨 论

表面活性剂对 A-TIG 焊熔深的影响因素很多,既有力的因素,也有热的因素。以往所提出的电弧收缩理论^[10,12]和表面张力梯度改变理论^[13,14]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,但还没有形成统一的认识。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^[7]研究了氯化物对直流正接 A-TIG 焊和小功率激光焊的

影响,从热的因素进行了分析,认为活性剂增加了焊接热输入,而这与活性剂中金属元素的第一电离能有关。张兆栋等人^[8]研究了氧化物和卤化物对交流 A-TIG 焊和变极性等离子弧焊的影响,从力的因素进行了分析,认为与电弧收缩有关。

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。Si 粉, V_2O_5 , SiO_2 , TiO_2 和 $MnCl_2$ 使得焊缝熔深熔宽同时减小,有效热输入减少起主要作用; $CdCl_2$ 使得焊缝熔深增加的同时熔宽减小,Te 粉和 ZnF_2 使得焊缝熔深增加的同时熔宽几乎没有变化,Te 粉, ZnF_2 和 $CdCl_2$ 增加熔深主要与电弧收缩有关。

活性剂在电弧作用下所经历的完整物理过程应该包括:熔化→蒸发→分解→电离和复合。其中对于熔化和蒸发过程,一般认为是活性剂限制金属蒸发而使得电弧弧根收缩,这主要与活性剂熔沸点和电阻率有关;对于分解过程,一般认为是活性剂分解

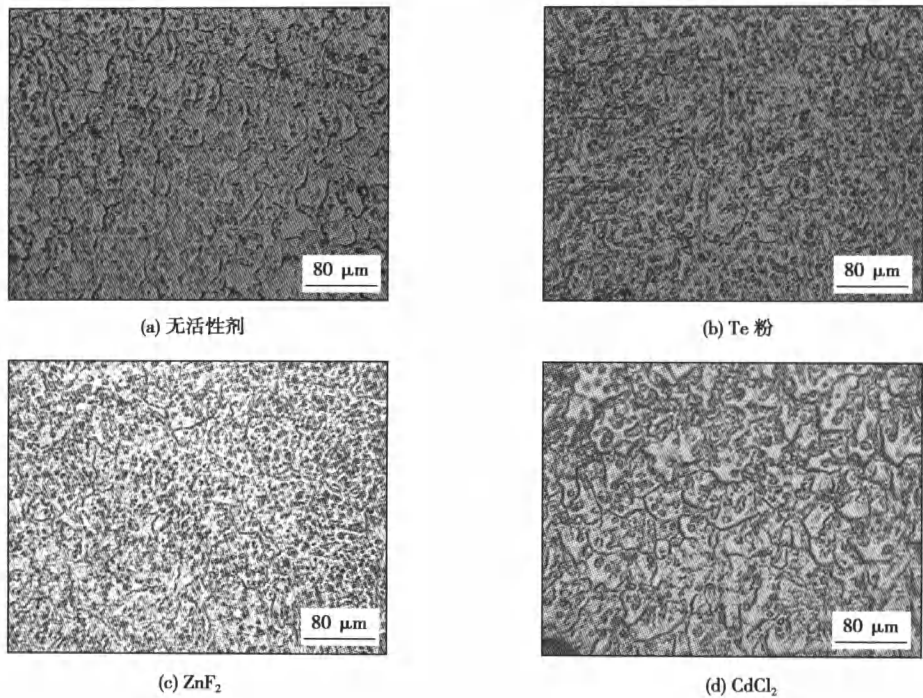


图 2 镁合金交流 A-TIG 焊的焊缝组织

Fig.2 Weld microstructure of AC A-TIG welding of magnesium alloy

吸热使得电弧受冷收缩,这主要与活性剂分子的解离能有关;而电离和复合过程,一般认为是由于活性剂粒子的存在减少了电子数量,从而使得电弧收缩,其中电离过程与活性剂元素原子的电离能有关,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 所示为活性剂的熔点、沸点和标准摩尔生成热,表 3 所示为有关元素原子的电离能和电子亲和能。

表 2 活性剂的热物理性能参数

Table 2 Thermal properties of activating fluxes

	熔点 T_M/K	沸点 T_B/K	标准摩尔生成热 $\Delta H_{f,298}^0/(kJ \cdot mol^{-1})$
Te	723	1 282.4	0
ZnF ₂	1 148	1 778	- 764 417
CdCl ₂	841	1 234	- 391 622

对于熔化和蒸发过程,Te 粉,ZnF₂ 和 CdCl₂ 三者的熔沸点都远远小于 SiO₂ 的,Te 粉作为半导体材料,ZnF₂ 和 CdCl₂ 为离子化合物,其电阻率也远小于 SiO₂ 的,而 SiO₂ 并不能增加熔深,活性剂熔化蒸发过程对电弧的影响并不是活性剂增加熔深的主要原因。关于分解过程对电弧的影响,SiO₂ 的标准摩尔生成热为 - 910 857 kJ/mol,而 Te 粉是单质,ZnF₂ 和 CdCl₂ 的标准摩尔生成热都低于 SiO₂ 的,其稳定性

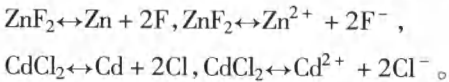
表 3 原子的电离能和电子亲和能

Table 3 Ionization potentials and electron affinities of atoms

	第一电离能 $I_1/(kJ \cdot mol^{-1})$	第二电离能 $I_2/(kJ \cdot mol^{-1})$	电子亲和能 $A/(kJ \cdot mol^{-1})$
Mg	737.7	1 450.7	0
Cl	1 251.2	2 298	348.8
F	1 681.0	3 374.2	327.9
Te	869.3	1 790	190.4
Zn	906.4	1 733.3	0
Cd	867.8	1 631.4	0

不如 SiO₂,分解时需要吸收的热量较少,所以活性剂分解过程对电弧的影响也不是三种活性剂增加熔深的主要原因。由此推断,活性剂如果影响电弧可能跟活性剂粒子在电弧中的电离和复合过程有关。

在电弧气氛中,粒子发生着电离和复合的动态平衡过程。而 ZnF₂ 和 CdCl₂ 可能发生以下反应



对于电离过程,Cl, F, Te, Zn 和 Cd 元素的第一电离能和第二电离能都高于 Mg 元素的相应各级电离能,所以这些元素原子在电弧中发生电离的几率较小,从而对焊接电弧的影响也较小。对于复合过程,Zn 元素和 Cd 元素都不会与电子复合,而 F, Cl, Te 元素三者的电子亲和能都很大,容易在电弧外围

的低温区域与电子复合。另外, Zn 元素和 Cd 元素的第一和第二电离能都很大, 从而使得 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 更容易在电弧外围温度较低区域捕捉电子变成低价正离子或者原子, 从而减小作为载流子的电子数量, 使得电弧导电通道变窄, 电弧收缩。

4 结 论

(1) Te 粉、 ZnF_2 和 CdCl_2 都能明显增加熔深, Te 粉使熔深达到传统 TIG 焊的 1.6 倍, 焊缝深宽比达到 0.43; Ti 粉对焊缝熔深熔宽几乎没有影响; V_2O_5 , SiO_2 , TiO_2 , MnCl_2 和 Si 粉都使得焊缝熔深熔宽减小。

(2) 在镁合金交流 A-TIG 焊中, Te 粉和 ZnF_2 都使得焊缝组织细化, 而 CdCl_2 使得焊缝组织略有粗化。

(3) 活性剂增加镁合金 A-TIG 焊熔深主要与活性剂粒子和电子复合导致电弧收缩有关。

参考文献:

- [1] 黄伯云. 我国有色金属材料现状及发展战略[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 122-127.
- [2] 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.
- [3] Gurevich S M, Zamokov V N, Kushirenko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by tungsten arc process [J]. Automatic Welding, 1965, 18(9): 1-5.
- [4] Troy Paskell, Carl Lundin, Harvey Castner. GTAW flux increases weld joint penetration[J]. Welding Journal, 1997, 76(4): 57-62.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Marya M, Edwards G R. Chloride contributions in flux-assisted GTA welding of magnesium alloys[J]. Welding Journal, 2002, 81(12): 291-298.
- [8] 张兆栋, 刘黎明, 沈 勇, 等. 镁合金的活性电弧焊接[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 912-916.
- [9] 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, 2005, 26(10): 54-58.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. 活性 TIG 电弧光谱分布的特征[J]. 金属学报, 2003, 39(8): 875-878.
- [13] 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.
- [14] Heiple C R, Roper J R. Mechanism for minor element effects on GTA fusion zone geometry[J]. Welding Journal, 1982, 61(4): 97-102.

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

Email: hyorhot@lut.cn