

活性剂对镁合金 TIG 焊接熔深的影响*

刘黎明 张兆栋 沈勇 王来

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室, 大连 116024)

摘要 根据最大熔深时 TiO_2 , Cr_2O_3 , CdCl_2 和 ZnCl_2 活性剂中元素在焊缝中的分布分析了熔池的流动情况, 在此基础上对上述 4 种活性剂对镁合金交流 TIG 焊接熔深的影响进行了研究. 结果表明, 这 4 种活性剂均可增加焊缝熔深, 活性剂的涂敷量均有一个饱和值. 加大涂敷活性剂后不同程度的改变了熔池中 Mg, Al 元素的分布. 涂敷 CdCl_2 , ZnCl_2 后在焊缝中没有观察到活性剂元素, 而涂敷 TiO_2 , Cr_2O_3 后在焊缝中观察到了 Ti, Cr, O 元素, 氯化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂与电弧的相互作用, 氧化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂与熔池金属的相互作用.

关键词 活性 TIG 焊, 镁合金, 活性剂

中图分类号 TG401

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)04-0399-06

EFFECTS OF ACTIVATING FLUXES ON TIG WELDING PENETRATION OF MAGNESIUM ALLOY

LIU Liming, ZHANG Zhaodong, SHEN Yong, WANG Lai

State Key Laboratory of Materials Modification by Laser, Ion, and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024

Correspondent: LIU Liming, professor, Tel: (0411)84707817, E-mail: skyezzd@student.dlut.edu.cn

Supported by Excellent Young Teachers Programme of Education Ministry of China and New Century Excellent Talents in University Program of Education Ministry of China

Manuscript received 2005-06-09, in revised form 2005-09-12

ABSTRACT Four kinds of activating fluxes, TiO_2 , Cr_2O_3 , CdCl_2 and ZnCl_2 , were used to investigate the effects of the coating quantity of active flux on TIG welding penetration of magnesium alloy. The distribution of active flux element in the weld-pool was measured by EPMA analysis. The results showed that the above activating fluxes all increased the weld penetration and the coating quantity of each flux has a saturation point for penetration increment. The distributions of Mg and Al in the weld-pool are changed in different degrees after welding with flux. No active flux element was found in the weld-pool after welding with CdCl_2 and ZnCl_2 fluxes, however, the elements Ti, Cr and O were observed in the weld-pool after welding with TiO_2 and Cr_2O_3 fluxes. The increase of weld penetration induced by chlorides mainly is due to the effect of flux on the arc, and the increase of weld penetration induced by oxides mainly is due to the reaction of flux with the fusion zone metal.

KEY WORDS TIG welding, magnesium alloy, activating flux

TIG 焊能够实现高品质焊接, 并能得到美观、平滑的优质焊缝. 到目前为止, 几乎所有的金属焊接都在不同程度地使用着 TIG 焊方法. 在 TIG 焊过程中, 电弧在金属母材和钨极之间形成, 并与熔池一起得到保护气的可靠保护. TIG 焊的主要缺点是单道熔深较浅、焊接参数对材料成分的变化比较敏感、焊接效率低于其它方法. 增大焊

接电流会导致熔宽增大, 而熔深却增加很少. 保护气中加氢气或氩气虽可增加不锈钢焊接的熔深但效果有限^[1,2].

近年来, 一种可以提高焊接熔深并且改善焊缝质量的高效焊接方法——活性焊接法引起人们的高度重视. 活性焊接 (activating flux TIG, A-TIG) 的概念最早是由 Gurevich 与 Zamkov^[3,4] 在 20 世纪 60 年代提出的. A-TIG 焊接法是在焊前将母材表面涂覆上一层活性剂, 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.

活性焊接技术的应用以及活性剂作用机理是目前 A-TIG 焊重点研究问题之一^[5-10], 目前存在“电弧收缩”和“表面张力”两种观点, “电弧收缩”机理讨论的是活

* 教育部优秀青年教师资助计划和教育部新世纪优秀人才支持计划资助

收到初稿日期: 2005-06-09, 收到修改稿日期: 2005-09-12

作者简介: 刘黎明, 男, 1967 年生, 教授

性剂与电弧之间的作用,“表面张力”理论讨论的是活性剂与熔池金属之间的作用,但是这两种理论均没有与活性剂本身的物理化学性质相结合,尚缺乏统一的认识.目前活性焊接法在材料方面的应用研究主要是针对不锈钢、碳钢、镍基合金和钛合金等.由于近年来被誉为“21世纪绿色工程材料”的镁合金的研究越来越被人们所重视,镁合金的 A-TIG 研究也开展起来^[11-14],研究中发现氧化物 TiO_2 , Cr_2O_3 和氯化物 CdCl_2 , ZnCl_2 可以增加镁合金 TIG 焊的熔深.本文针对常用镁合金 AZ31B,研究这 4 种单一成分的活性剂及其涂敷量对焊缝熔深的影响,并选取增加熔深最大时的试样观察其焊缝中的各元素的分布情况,结合不同活性剂(氧化物、氯化物)的物理化学性质对活性剂增加熔深的机理进行了初步的探讨,为镁合金 A-TIG 焊技术的广泛应用奠定基础.

1 实验方法及步骤

实验采用尺寸为 $100\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 AZ31B 变形镁合金板材,进行交流氩弧焊平板堆焊,其化学成分(质量分数,%)为: Al 2.5—3.5, Zn 0.5—1.5, Mn 0.2—0.5, Si 0.05—0.10. 在进行焊接之前,对试件要进行严格的表面清理.为了保证实验结果的准确性以及 TIG 和 A-TIG 的可比性,在每条焊缝焊接之前,均重新研磨电极成标准形状,调整电弧至标准长度,保证每条焊缝均在统一规范条件下焊接.

实验中选用 TiO_2 , Cr_2O_3 , CdCl_2 和 ZnCl_2 4 种活性剂.为了使活性剂涂敷均匀,在使用活性剂之前对活性剂粉末进行充分的研磨,使其颗粒度不超过 $100\text{ }\mu\text{m}$,然后混合成悬浊液,均匀涂敷在试件表面,为了便于与未涂敷活性剂时相比较,焊道只涂刷一半,焊接时涂敷区和未涂敷区一次焊接完成,如图 1 所示.用电子分析天平称量涂敷前后板材的质量,计算出每块试板上单位面积活性剂的涂敷量.

实验中采用的焊接参数为:焊接电流 100 A ,弧长 2 mm ,保护气流量 15 L/min ,焊接速度 600 mm/min .焊后在涂覆区和未涂覆区分别截取试样焊道的横截面,制成试样后观察焊缝熔深并测量,并取出每种活性剂中增加熔深最大的试样,采用电子探针分析仪观察活性剂元素在焊缝中的分布.

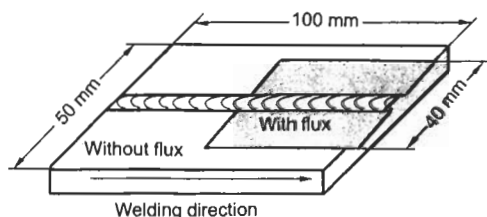


图 1 镁合金 AZ31B 试样 TIG/A-TIG 焊接示意图

Fig.1 Schematic of the specimen of Mg alloy AZ31B used in the TIG/A-TIG welding test

2 实验结果

2.1 活性剂增加熔深的效果

图 2 为未涂敷活性剂以及涂敷 4 种活性剂后焊缝熔深最大的试样的焊缝横截面照片,从图中可以看出,在所采用的焊接条件下,涂敷活性剂后所得到的最大熔深均比未涂敷时有所增加,其中 CdCl_2 和 ZnCl_2 效果最明显,其次为 TiO_2 和 Cr_2O_3 .

图 3 为活性剂涂敷量 ρ_A 对焊缝熔深 h 的影响,可以看出:(1)涂敷 CdCl_2 活性剂增加熔深的效果最显著,最大熔深可增加到 205%;其次是涂敷 ZnCl_2 活性剂,可使熔深增加到 194%.涂敷 TiO_2 后可使熔深增加到 142%,涂敷 Cr_2O_3 活性剂后可使熔深增加到 136%,均小于涂敷 CdCl_2 , ZnCl_2 时增加熔深的效果.(2)涂敷量较小时,焊缝熔深均随活性剂涂敷量的增加而明显增大,焊缝熔深随涂敷量的增加而增大的变化都有一个转折点,超

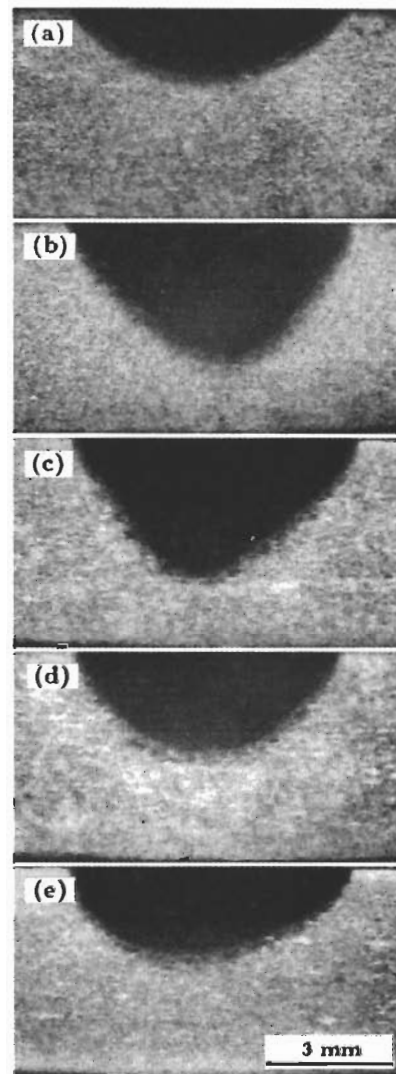


图 2 无活性剂及涂敷 4 种活性剂的焊缝横截面照片

Fig.2 Weld pool shapes without flux (a) and with fluxes of CdCl_2 (b), ZnCl_2 (c), TiO_2 (d), Cr_2O_3 (e)

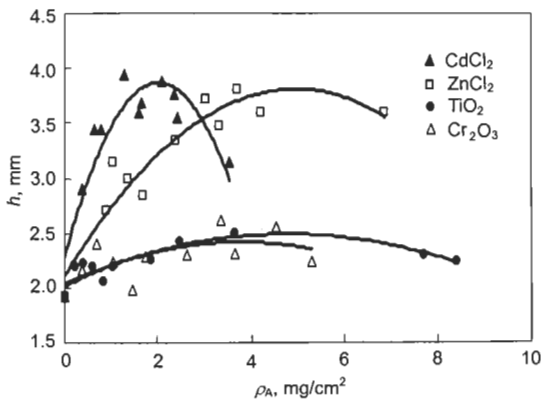


图 3 活性剂涂敷量对焊缝熔深的影响

Fig.3 Effects of flux coating quantity on weld penetration

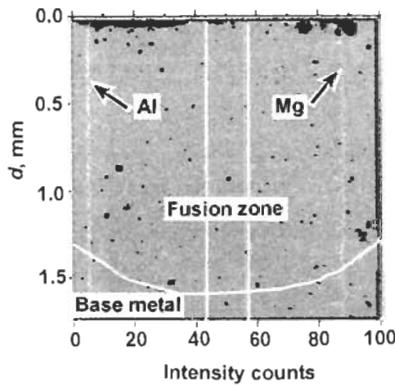


图 4 未涂敷活性剂焊缝中 Mg, Al 元素的线分布

Fig.4 Scanning lines of Mg and Al elements in the pool welded without flux

过这一点后, 焊缝熔深有的缓慢增大, 有的缓慢减小, 有的上下波动, 但从总的趋势看涂敷 4 种活性剂增加熔深的效果均有一个饱和值. (3) 从曲线的趋势线来看, 在所采用的焊接条件下, 涂敷 CdCl₂ 活性剂时, 熔深随 CdCl₂ 涂敷量的增加较快, 涂敷 CdCl₂ 活性剂时在涂敷

量为 1.3 mg/cm² 时达到最大值; 涂敷 ZnCl₂ 活性剂时, 熔深随 ZnCl₂ 涂敷量的增加一直呈上升趋势, 直到涂敷量为 3.7 mg/cm² 时达到最大值; 涂敷 TiO₂, Cr₂O₃ 时熔深随涂敷量的增加变化不明显, 分别在涂敷量为 2.5, 3.4 和 1.1 mg/cm² 时达到最大值.

2.2 活性剂对焊缝中各元素的影响

采用电子探针从未涂敷 (图 4) 及涂敷活性剂后 (图 5—8) 焊缝中的元素分布进行了分析, 分析了焊缝中 Mg, Al 元素在焊缝纵向线分布以及活性剂元素在焊缝中的分布情况. 在元素线分析的图中, 两条平行白色直线中间的区域为电子探针线分析区域, 图中的白色曲线为熔合线, 熔合线上方为熔化区, 下方为母材. 横坐标表示的是所分析元素的浓度, 纵坐标表示的是电子探针分析区域的大小.

图 4 为未涂敷活性剂时焊缝中 Mg, Al 元素的线分布, 图中可看出, 未涂敷活性剂时, 焊缝上表面的 Mg 元素浓度稍小于焊缝底部, 但差别不大; Al 元素的浓度没有明显差别, 焊缝到母材的过渡比较均匀. 这是由于镁合金 TIG 焊时 Mg 沸点 (1363 K) 较低产生蒸发所致 [15].

图 5—8 分别为涂敷不同活性剂后焊缝中活性剂元素的面分布和焊缝纵向的 Mg, Al 元素的线分布. 从图 5a, b 中 Cd, Cl 元素的面分布可以看出, 焊缝中没有观察到明显的 Cd, Cl 元素的存在. 从图 5c 中可以看出, 涂敷 CdCl₂ 活性剂后, 焊缝上表面的 Mg 元素浓度远高于焊缝底部, 并且 Al 元素的浓度比焊缝底部有所降低, 与未涂敷活性剂时的 Mg, Al 元素分布不同. 从图 6a, b 中 Zn, Cl 的面分布可以看出, 焊缝中没有观察到明显的 Zn 元素的偏聚以及 Cl 元素的存在. 从图 6c 中可以看出, 涂敷 ZnCl₂ 活性剂后, 焊缝中 Mg, Al 元素的分布与涂敷 CdCl₂ 活性剂时相反, 焊缝上表面的 Mg 元素浓度远低于焊缝底部, 并且 Al 元素的浓度比焊缝底部高. 从图 7a, b 中 Ti, O 的面分布可以看出, 在焊缝中存在较多的 Ti 元素和少量的 O 元素. 从图 7c 中可以看出, 涂敷 TiO₂ 活性剂后, 焊缝中 Mg, Al 元素的分布与未涂敷活性剂时

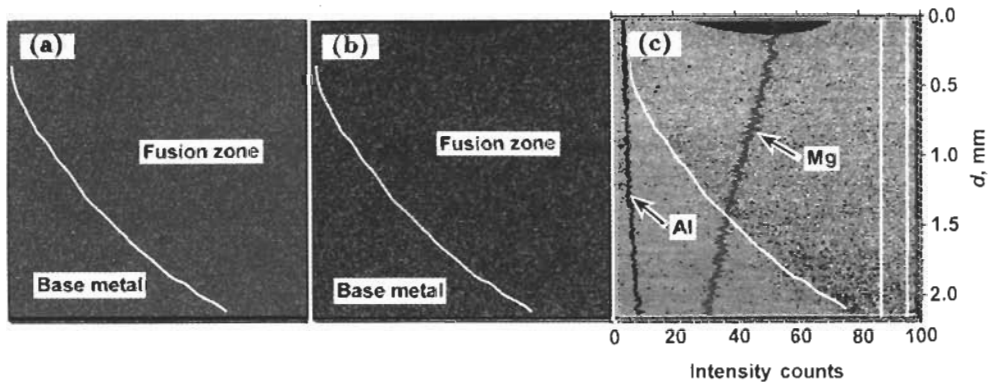


图 5 涂敷活性剂 CdCl₂ 后焊缝中的元素分布

Fig.5 Element analysis in the pool welded with CdCl₂ flux

(a) scanning map of Cd (b) scanning map of Cl (c) scanning lines of Mg and Al

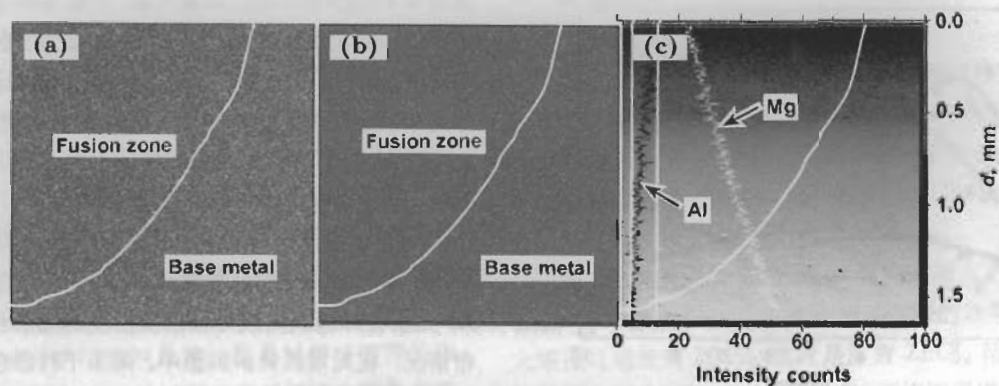


图6 涂敷活性剂 $ZnCl_2$ 后焊缝中的元素分布

Fig.6 Element analysis in the pool welded with $ZnCl_2$ flux

(a) scanning map of Zn (b) scanning map of Cl (c) scanning lines of Mg and Al

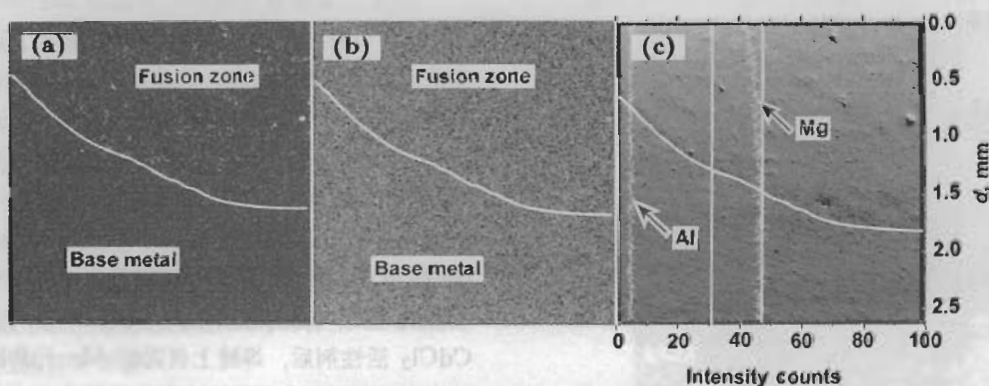


图7 涂敷活性剂 TiO_2 后焊缝中的元素分布

Fig.7 Element analysis in the pool welded with TiO_2 flux

(a) scanning map of Ti (b) scanning map of O (c) scanning lines of Mg and Al

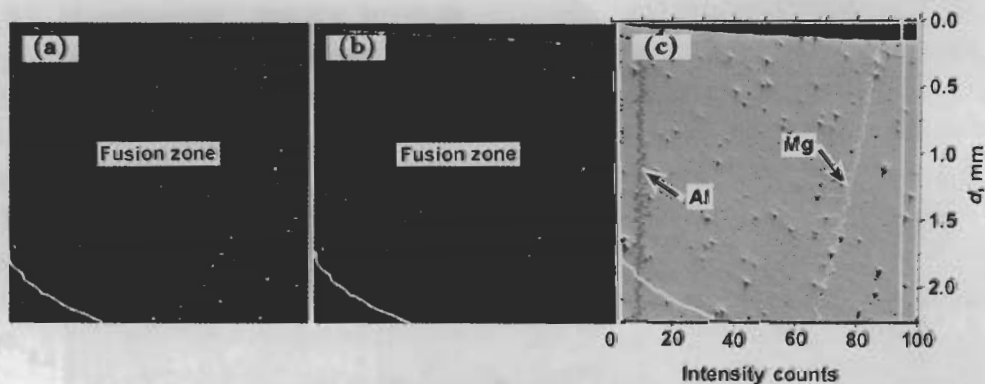


图8 涂敷活性剂 Cr_2O_3 后焊缝中的元素分布

Fig.8 Element analysis in the pool welded with Cr_2O_3 flux

(a) scanning map of Cr (b) scanning map of O (c) scanning lines of Mg and Al

相近, 焊缝上表面的 Mg 元素浓度略低于焊缝底部; Al 元素的浓度没有明显差别。从图 8a, b 中 Cr, O 的面分布可以看出, 在焊缝中的 Cr, O 元素均比较多。从图 8c 中可以看出, 涂敷 Cr_2O_3 活性剂后, 焊缝中 Mg 元素的分布与涂敷 TiO_2 活性剂时不同, 焊缝上表面的 Mg 元素浓度高于焊缝底部; Al 元素的浓度没有明显差别。

3 分析与讨论

从实验结果来看, 氯化物 $CdCl_2$, $ZnCl_2$ 可以显著增加镁合金 TIG 焊熔深, 但氧化物 TiO_2 , Cr_2O_3 的效果不如氯化物。这说明活性剂的种类对镁合金 TIG 焊熔深的增加作用影响很大, 活性剂与被焊金属之间物理、化学性质的差异将决定其作用机理。活性剂涂敷在金属表面,

提高 TIG 焊接时的熔深, 其作用的机理与活性剂、熔池金属和电弧本身的特性、活性剂与电弧之间的作用、活性剂与熔池金属之间的作用均有关系。

3.1 活性剂与电弧之间的相互作用

电弧的温度受材料熔点(承受温度能力)的影响呈下降特点, 对于镁合金这样的低熔点材料, 其表面温度不能高于材料的沸点。涂敷在焊接材料表面的沸点低于被焊材料的沸点时将蒸发到弧柱区成为分子气体, 这些分子气体由于热的作用分解为原子, 发生热解离, 吸收大量的解离能; 同时由大量原子和少量分子组成的气体将会继续受热作用而产生电离。在所选择的活性剂中, CdCl_2 (沸点 1233 K), ZnCl_2 (沸点 1005 K) 的沸点低于 Mg 的沸点(1363 K), 首先蒸发为气体, 进而分解、电离。这二种氯化物在电弧作用下成为蒸汽, 热解离成为原子。金属原子的电离能低于惰性气体的电离能, 可能在较小的电离电压下发生电离, 形成蒸汽电弧^[16]。根据文献[17], 热电离时的电离度在其它条件不变时随着电离电压的减小而增加。电离度的增加, 在电流不变的情况下, 电流密度将增大, 导致电弧中心区温度升高, 从而使得熔池峰值温度上升, 在镁合金的高导热率条件下, 使得熔深增加。而氯原子由于具有较高的电子亲和能, 以吸附电子形成负离子, 虽然负离子所带电荷量与电子相同, 但因它的质量比电子大得多, 不能有效地担负转送电荷的任务, 不能存在于电弧中心区。并且负离子的形成是放热过程, 在高温下不易稳定存在, 形成负离子向电弧周边的扩展。其结果是: 一方面氯化物活性剂中金属元素的电离使得电离度增加, 电流密度增大, 电弧中心区温度升高; 另一方面氯化物活性剂中氯元素形成负离子, 向电弧周边扩展, 引起电弧的膨胀。在 Marya 等^[12]的工作中也发现了这种现象。从图 5a, b 和图 6a, b 也可以证实氯化物的蒸发, 在焊缝中没有发现氯化物元素的存在。氯化物活性剂的作用随着涂敷量的增加有较大的变化, 也证明了氯化物对电弧的作用。当活性剂较厚时, 在焊接过程中分解的活性剂增多, 则活性剂与电弧之间的反应也会增加, 提高了电弧中心区的温度, 使熔深增加。而对于氧化物 TiO_2 (沸点 3195 K) 和 Cr_2O_3 (沸点 4273 K), 从图 7a, b 和图 8a, b 可以看出焊缝中存在 Ti, Cr 元素。二元素的沸点远远高于 Mg 的沸点, 并且在电弧不易蒸发、电离。Lu 等人^[18]在研究不锈钢活性焊时也认为 TiO_2 , Cr_2O_3 由于具有较高熔点并且在高温下比较稳定, 在电弧的作用下不会分解。所以氧化物增加熔深的机理必然与氯化物有所不同。

3.2 活性剂与熔池金属之间的相互作用

通过比较图 4 和图 5c, 6c, 7c, 8c 可以看出不同活性剂的加入对焊缝中 Mg, Al 元素的面分布产生了不同的影响。在镁合金的焊接过程中, 由于 Mg 的熔点较低, 焊接时在电弧高温的作用下, 会发生严重的蒸发, 影响焊接接头的性能。从电子探针分析结果来看, 不同活性剂的加入

对 Mg 的蒸发产生了完全不同的影响。一般氯化物活性剂的熔化温度低于镁合金的熔点(AZ31 的熔点 903 K), 氧化物的熔化温度高于镁合金的熔点。当活性剂的熔化温度稍低于焊接金属时, 会先于金属熔化, 最后铺展在金属表面, 阻碍了 Mg 蒸汽的蒸发, 使得 Mg 元素在焊缝上表面形成富集; 当活性剂的熔化温度比焊接金属低得多, 很快发生蒸发, 对 Mg 的蒸发起不到阻碍作用; 而当活性剂的熔化温度很高时, 其熔化要滞后于镁合金, 覆盖于熔池金属表面, 活性剂在熔融状态的密度一般都高于镁合金的密度(AZ31 的密度 1.77 g/cm^3), 在镁合金熔化后将进入熔池金属中, 存在于焊缝熔合区。但熔融的活性剂还有可能与 Mg 这种活泼的金属发生反应, 此时活性剂与熔化金属之间的界面张力会发生作用, 当活性剂与熔化金属之间的界面张力较大时, 这种反应不易进行, 当活性剂与熔化金属之间的界面张力较小时, 反应容易进行。活性剂与熔池金属相互作用, 将会改变焊缝中各元素的分布状况, 通过观察涂敷活性剂后焊缝中各元素的分布状况, 可以推测活性剂与熔池金属的作用方式, 以及反映活性剂对 TIG 熔深影响的作用机理。

活性剂 CdCl_2 的熔点(841 K) 稍低于镁合金的熔点, 在焊接过程中形成了一层保护膜, 覆盖在熔池表面, 虽然在焊接温度下 Mg 原子很容易蒸发, 但由于保护膜的阻挡, Mg 蒸汽不能从熔池中逸出, 聚集在焊缝的上表面, 出现焊缝上表面 Mg 多 Al 少, 焊缝底部 Al 多 Mg 少的情况(图 5c); ZnCl_2 活性剂的熔点较低(熔点 556 K), 不能形成保护膜, 并可能与 Mg 发生化学反应($\text{Mg} + \text{ZnCl}_2 \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{Zn} \downarrow$) 加速 Mg 的损失, 导致焊缝上表面 Mg 元素浓度急剧下降(图 6c); TiO_2 , Cr_2O_3 氧化物的熔点比较高, TiO_2 的熔点为 2103 K, Cr_2O_3 的熔点为 2603 K, 均远高于镁合金的熔点。一般认为由于在电弧的作用下不会分解, 不能向熔池中过渡 O 元素。但是在镁合金的焊接中, 一方面 Mg 的密度远低于 TiO_2 和 Cr_2O_3 的密度(分别为 4 g/cm^3 和 5.22 g/cm^3); 另一方面由于 Mg 是活泼的还原剂, 将与 TiO_2 , Cr_2O_3 发生反应。由于用活泼金属 Al, Mg 做还原剂还原其他氧化物反应的倾向是由反应焓 ΔH_m 决定的, 属于焓驱动的反应。对于这类反应的倾向, 可直接根据 298 K 时的生成焓 ΔH_f 作出判断。根据文献[19]提供的反应物的 ΔH_f 值^[19] 可得反应 $2\text{Mg}(\text{s}) + \text{TiO}_2(\text{s}) = 2\text{MgO}(\text{s}) + \text{Ti}(\text{s})$ 的 $\Delta H_m = -291.5 \text{ kJ/mol}$, 反应 $3\text{Mg}(\text{s}) + \text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s}) = 3\text{MgO}(\text{s}) + 2\text{Cr}(\text{s})$ 的 $\Delta H_m = -677 \text{ kJ/mol}$, 在这些反应中借用固态金属数据可以判断液态下的反应倾向。所以 Mg 能与二种氧化物反应使得熔池凝固后熔化区存在大量的 Ti, Cr 元素, 电子探针分析也证实了这一点。此外, 熔池金属和活性剂之间的交互反应强度决定于它们之间的界面张力

$$\sigma_{\text{M-A}} = \sigma_{\text{M}} - \sigma_{\text{A}} \cos \theta$$

式中, σ_{M-A} 为金属-活性剂间的界面张力, σ_M 和 σ_A 分别为金属、活性剂的表面张力, θ 为接触角.

加入表面活性氧化物会使得金属-活性剂间的界面张力下降, 金属与活性剂的交互反应强度提高, 阻碍了 Mg 的蒸发, 使得涂敷 Cr_2O_3 (表面活性物质) 活性剂后焊缝上表面的 Mg 元素浓度高于焊缝底部, 而涂敷 TiO_2 (非表面活性物质) 活性剂后 Mg 有少量损失, 见图 6c, 7c.

在镁合金的 A-TIG 焊中, 氯化物活性剂熔沸点较低, 最后电弧高温下分解, 焊缝中均没有观察到活性剂元素的存在, 但是对焊接熔深增加有显著的效果, 其作用机理是活性剂与电弧的作用引起电弧中心区温度的升高, 增加了熔深. 涂敷氧化物活性剂后, 焊缝中观察到了活性剂元素的存在, 活性剂 TiO_2 , Cr_2O_3 增加焊接熔深的机理与活性剂与熔池金属之间的相互作用有关.

4 结论

(1) 活性剂 TiO_2 , Cr_2O_3 , CdCl_2 和 ZnCl_2 均可以增加镁合金交流 TIG 焊焊缝熔深. 其中 CdCl_2 增加熔深的效果最好.

(2) 涂敷活性剂 CdCl_2 , ZnCl_2 后在焊缝中没有观察到活性剂元素的存在; 而涂敷活性剂 TiO_2 , Cr_2O_3 后在焊缝中观察到了 Ti, Cr, O 元素的存在.

(3) 氯化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂与电弧的相互作用, 氧化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂与熔池金属的相互作用.

(4) 活性剂的加入影响了焊缝中 Mg 的蒸发. 活性剂 ZnCl_2 , TiO_2 加剧了 Mg 的蒸发; 活性剂 CdCl_2 , Cr_2O_3 抑制了 Mg 的蒸发.

参考文献

[1] Leinonen J I, Karjalainen L P. In: David S A, Vitek J M eds, *Proc 2nd Int Conf on Trends in Welding Research*. Materials Park, USA: ASM International, 1989: 387

- [2] Lucas W, Howse D. *Weld Met Fabrica*, 1996; 64: 11
- [3] Gurevich S M, Zamkov V N, Kushirenko N A. *Autom Weld*, 1965; 18: 1
- [4] Gurevich S M, Zamkov V N. *Autom Weld*, 1966; 19: 14
- [5] Liu F Y, Yang C L, Lin S B, Wu L, Zhang Q T. *Acta Metall Sin*, 2003; 39: 661
(刘凤尧, 杨春利, 林三宝, 吴林, 张清涛. 金属学报, 2003; 39: 661)
- [6] Niagaj J. *Weld Int*, 2003; 17: 257
- [7] Pascal P, Jacques S. *Mater Sci Forum*, 2003; 426-432: 4087
- [8] Bonnefois B, Coudreuse L, Charles J. *Weld Int*, 2004; 18: 208
- [9] Perry N, Marya S, Soutif E. In: Vitek J M, David S A, Johnson J A, Smartt H B, DebRoy T eds, *Proc 5th Int Conf on Trends in Welding Research (ASM/AWS)*. Pine Mountain, Ga: ASM International, 1998: 520
- [10] Middel W, Den Ouden G. In: Vitek J M, David S A, Johnson J A, Smartt H B, DebRoy T eds, *Proc 5th Int Conf on Trends in Welding Research (ASM/AWS)*. Pine Mountain, Ga: ASM International, 1998: 394
- [11] Marya M, Edwards G R. *Weld J*, 2002; 81: 291-9
- [12] Marya M. *Weld World*, 2002; 46: 7
- [13] Zhang Z D, Liu L M, Shen Y, Wang L. *Chin J Nonferr Met*, 2005; 15: 912
(张兆栋, 刘黎明, 沈勇, 王来. 中国有色金属学报, 2005; 15: 912)
- [14] Zhang Z D, Liu L M, Wang L. *Trans Chin Weld Inst*, 2004; 25: 55
(张兆栋, 刘黎明, 王来. 焊接学报, 2004; 25: 55)
- [15] Toshikatsu A, Tokisue H. *J Jpn Inst Light Met*, 1995; 45: 70
(朝比奈敏胜, 时末光. 轻金属, 1995; 45: 70)
- [16] Boddy P J, Utsumi T. *J Appl Phys*, 1971; 42: 3369
- [17] Saha M N. *Philos Mag*, 1920; 40: 272
- [18] Lu S P, Fujii H, Sugiyama H, Tanaka M, Nogi K. *Mater Trans*, 2002; 43: 2926
- [19] Wark K. *Thermodynamics*. 3rd ed, New York: McGraw-Hill, 1977: 833