

DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210103

粉煤灰复合活性剂在 A-TIG 焊中增加熔深的机理研究

马 壮^{1,2}, 张佩佩¹, 董世知¹, 李岩帅¹

(1. 辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁科技学院 冶金学院, 辽宁 本溪 117300)

摘要: 为对工业废弃物粉煤灰的剩余价值利用, 尝试以粉煤灰作为主要原料制备焊接复合活性剂, 并在 AZ91 镁合金板上进行 A-TIG 焊。利用焊缝的电特性实时采集、焊接温度场采集、电弧力测试等手段研究活性剂对电弧影响, 通过熔池 Bi 粒子示踪实验探究活性剂对表面张力温度梯度影响。结果表明: 与常规 TIG 焊相比, 粉煤灰复合活性剂可以使焊缝熔深加深 1.4 倍, 熔宽减小, 深宽比是常规 TIG 焊的 1.43 倍。粉煤灰复合活性剂中氯化物的解离和电离吸热过程、带电粒子的电子扩散和复合过程可以促进电弧收缩, 使焊接电压升高, 热输入量提高。而活性剂中的氧化物可以通过对电弧的机械压缩作用强迫电弧收缩, 又可以通过电离产生的氧元素实现对熔池液态金属表面张力温度梯度系数的改变, 提高熔池中心热输入。A-TIG 焊 AZ91 镁合金熔深增加是电弧收缩理论和表面张力温度梯度改变理论共同作用的结果。

关键词: A-TIG 焊; 镁合金; 熔深; 粉煤灰; 机械收缩

中图分类号: TG444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-0299(2021)05-0084-07

Research on mechanism of fly ash composite active agent for penetration increasing of A-TIG welding

MA Zhuang^{1,2}, ZHANG Peipei¹, DONG Shizhi¹, LI Yanshuai¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Metallurgy Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117300, China)

Abstract: In order to realize the utilization of the residual value of industrial waste fly ash, an attempt was made to prepare a welded composite active agent using fly ash as main raw material, and A-TIG welding was performed on AZ91 magnesium alloy plate. The effects of active agents on arcs were studied by means of real-time welding of weld electrical properties, welding temperature field acquisition, and arc force testing. The influence of the active agent on the surface tension temperature gradient was investigated by molten pool Bi particle tracing experiment. Results show that compared with conventional TIG welding, the fly ash composite active agent could increase the welding penetration by 1.4 times, the melt width was reduced, and the depth to width ratio was 1.43 times that of conventional TIG welding. The dissociation and ionization endothermic process of fluoride in fly ash composite active agent, as well as the electron diffusion and compounding process of charged particles could promote arc shrinkage, increase welding voltage, and increase heat input. The oxide in the active agent could force the arc to shrink by mechanical compression, change the coefficient of the liquid metal surface tension temperature gradient via the oxygen element generated by ionization, and improve the heat input of the molten pool center. The increase in the penetration depth of A-TIG welding for AZ91 magnesium alloy was the result of the combination of arc shrinkage theory and surface tension temperature gradient change theory.

Keywords: A-TIG welding; magnesium alloy; welding penetration; fly ash; mechanical contraction

收稿日期: 2021-05-05.

网络出版日期: 2021-09-06.

作者简介: 马 壮(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 马 壮(1963—), E-mail: 874122383@qq.com

期刊网址: http://hit.alljournals.cn/mst_cn/ch/index.aspx

镁合金具有密度低、比强度高、减震性好、可塑性强和可回收利用率高等优点, 在交通运输、电子工业、医疗器械、军工等领域应用广泛。地壳中镁储量丰富, 在工业与科技迅猛发展导致金属资源日

益贫化的当下,提高镁合金的产业化应用已成为国家科技战略发展目标之一。TIG 焊作为镁合金最常用的连接手段,在镁合金薄板焊接上已具有良好适用性,但在焊接镁合金厚板时存在熔深浅、效率低、成本高的问题。A-TIG 焊(Activating Flux TIG Welding)即在待焊试样表面涂覆薄层活性剂,随后进行正常焊接的焊接方法,在相同焊接条件下,可大幅增加熔深,效率也会得到显著提高^[1]。

目前,国内外针对 A-TIG 焊的研究工作主要围绕两方面进行:一是各种类型活性剂增加熔深机理的研究;二是适用于各种金属材料的焊接活性剂的研发。关于活性剂增加熔深的机理学术界尚未有统一定论,比较有代表性的几种理论为:电弧收缩理论^[2-4]、热输入增加理论^[5]和表面张力温度梯度改变理论^[6-7]。目前,已开发并得到应用的焊接活性剂有氧化物、氯化物、氟化物等^[8-10],但由于老式活性剂大部分成本都比较高或是效果不理想,一些新型活性剂又受到专利保护,使得 A-TIG 焊成本仍居高不下,这也很大程度限制了 A-TIG 焊的发展。

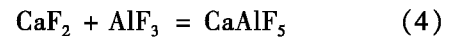
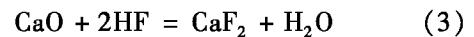
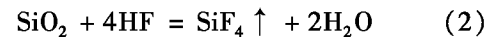
粉煤灰是燃煤电厂排出的主要工业固体废弃物,虽已在建材、农业、环保等方面实现了废物利用^[10],但其综合利用率仍旧较低,尤以内蒙古、山西等粉煤灰产量大、经济条件落后地区为最。粉煤灰中含有大量 SiO₂、Al₂O₃ 等氧化物,而这些氧化物的存在恰恰为粉煤灰作为焊接活性剂提供了可能^[11-12]。本研究以内蒙古准格尔发电厂提供的高铝粉煤灰为主要原料制备粉煤灰复合活性

剂,并对其作用于镁合金 A-TIG 焊过程中的熔深增加机理进行探究,这对降低镁合金焊接成本、促进镁合金产业化应用以及实现粉煤灰高附加值利用都具有积极意义。

1 实验

1.1 实验材料及试样制备

选用 AZ91 镁合金作为焊接母材,实验前需对镁合金进行除锈除油处理。粉煤灰由内蒙古准格尔发电厂提供,具体成分见表 1。将 50 g 粉煤灰与 30 mL 质量浓度 40% 的 HF 均匀混合。风干后在真空气氛炉(SQFL-1700 型)内升温至 800 °C 进行脱碳处理保温 2 h,随炉冷却,随后在玛瑙研钵中研磨 20 min 以保证粉煤灰粒度均匀,最后 200 目过筛备用。其中高铝粉煤灰与氢氟酸发生如下反应:



将粉煤灰复合活性剂与丙酮混合成糊状,用毛刷均匀涂覆在焊接母材表面,涂覆量控制为 0.2 mg/mm²。采用交流单道焊的方式,焊接参数为:焊接电流 80 A、焊接速度 250 mm/min,氩气流量 6.0 L/min,钨极直径 3.2 mm。为保证数据的一致性和可比性,实验中活性剂只涂覆在母材右侧,与左侧无活性剂区形成对比,且焊接过程一次完成。

表 1 高铝粉煤灰成分(质量分数/%)

Table 1 High aluminum fly ash composition (wt. %)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂
48.500	35.400	0.640	0.220	5.040	1.910	0.450	0.100	1.760

1.2 测试方法与原理

采用 DM200 型数码显微镜记录试样有活性剂区和无活性剂区截面熔池形貌并测量熔深、熔宽数据。利用电弧电特性采集系统进行焊接电流、电压的实时采集,采集方向由无活性剂区至活性剂区,采集频率 15 Hz。由焊接温度场采集系统完成对焊接温度场温度数据采集,热电偶 1~5 号在垂直于焊缝的一条直线上依次分布,3 号位于焊缝中心,1、2、4、5 位置距第 3 点距离依次为 3、1、2 和 4 mm。

利用杠杆原理测量焊接电弧力变化,自制测量装置原理如图 1。焊接前将试样置于测量装置右侧,调整平衡位置使装置水平。打开位于支点

位置的激光照射器并记录下十字激光照射在直尺上的值,读为 A₁;同时测量出图示中 L、L₁、L₂ 数值。焊接开始后,在电弧力作用下读数发生变化,此时读数记为 A₂。最后计算电弧力,计算方法如下:

$$\Delta_2 = A_2 - A_1 \quad (5)$$

$$\tan\alpha = \Delta_2/L \quad (6)$$

$$\tan\alpha = \Delta_1/L_1 \quad (7)$$

由式(5)~(7)得出弹簧变化量 Δ₁,根据胡克定律:

$$F_1 = \Delta_1 \cdot k \quad (8)$$

得出弹簧力 F₁,再由杠杆原理:

$$F_1 \cos\alpha \cdot L_1 = F \cos\alpha \cdot L_2 \quad (9)$$

最后计算出添加活性剂和未加活性剂时焊接电弧

力 F 。

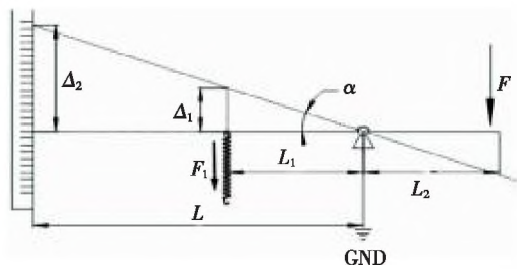


图 1 电弧力测量装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electric arc force measuring device

为研究粉煤灰复合活性剂对熔池表面张力温度梯度影响,利用高熔点、不与母材反应的 Bi 粒子进行 A-TIG 熔池流动行为示踪实验。开槽示意图见图 2,在镁合金试样距离中心线 1.7 mm 处的两侧切出宽 0.2 mm,深 7 mm 的凹槽,焊前对槽内 0.2 mm 厚的钨板进行清理,将钨板镶嵌到槽中,对熔池具有阻流作用。将复合活性剂与 Bi 粒子按质量分数 1:1 混合均匀并研磨,用丙酮溶解后均匀涂覆在母材表面,之后进行正常焊接。同时,常规 TIG 试样也需在表面均匀涂覆 Bi 粉末用以作为对照组。利用 S-3400 型电子扫描显微镜测量熔池内部 1~5 位置的 Bi 粒子含量,分析熔池表面张力温度梯度变化。

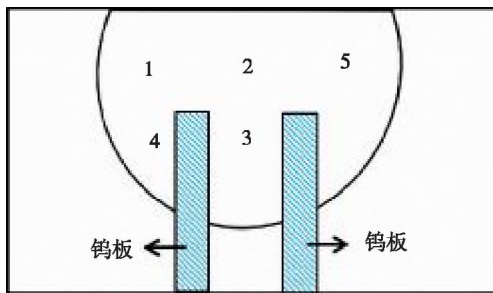


图 2 开槽试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of open slot test specimen

2 结果与分析

2.1 复合活性剂对熔深影响

首先探讨了粉煤灰活性剂涂覆量对于熔深的影响作用,具体结果如表 2 所示。可以看出,随着涂覆量的增加,基体焊缝的熔宽增大,涂覆量到达 0.25 mg/mm² 时有着最大熔宽,熔深是不加活性剂的 1.9 倍。但是此时在试验中观察到了跳弧现象,样品表面出现凹坑、咬边及喷涂不均匀现象。其原因是由于 Al₂O₃ 及 SiO₂ 等高熔点、高电阻率材料增多导致电弧阻抗增大,无法稳定、定向燃烧所导致。在粉煤灰活性剂的涂覆量为 0.2 mg/mm²

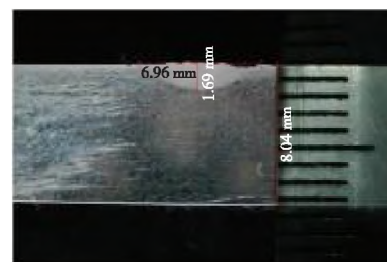
时,焊接时工作条件稳定,熔深及深宽比也是未加活性剂的 1.4 倍和 1.43 倍,有着良好的熔深增加作用,因此后续试验均采用涂覆量为 0.2 mg/mm² 进行研究。

图 3 为无活性剂和活性剂为 0.2 mg/mm² 时两种试样焊接截面熔池形貌。未涂覆活性剂试样熔深为 1.69 mm,熔宽为 6.96 mm,深宽比为 0.24。而涂覆粉煤灰复合活性剂后,熔深可以达到 2.36 mm,熔宽为 6.75 mm,深宽比为 0.349。粉煤灰复合活性剂的添加使得试样熔深是常规 TIG 焊的 1.4 倍,熔宽略微减小,深宽比是常规 TIG 焊的 1.43 倍。显然,粉煤灰复合活性对镁合金增加熔深作用显著。

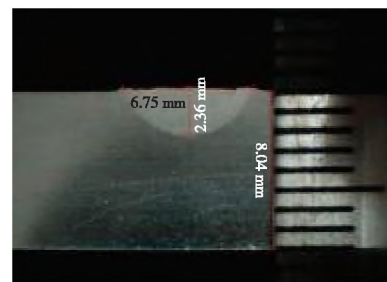
表 2 不同涂覆量粉煤灰复合活性剂的焊缝尺寸

Table 2 Weld sizes of different fly ash composite active agents

活性剂涂覆量/ (mg · mm ⁻²)	熔深/mm	熔宽/mm	深宽比
0	1.69	6.96	0.243
0.10	1.69	5.61	0.301
0.15	2.03	6.41	0.317
0.20	2.36	6.75	0.349
0.25	3.26	8.10	0.402



(a) 无活性剂



(b) 有活性剂

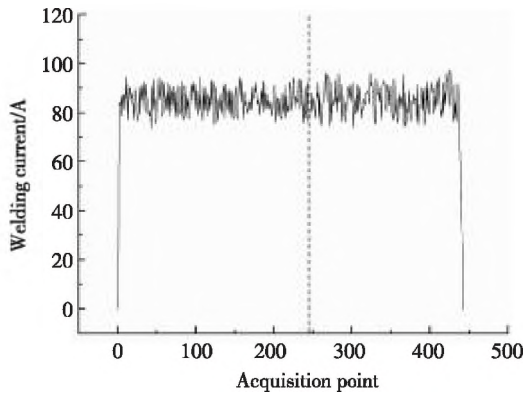
图 3 焊缝截面形貌

Fig. 3 Section morphology of weld joint: (a) without active agent; (b) with active agent

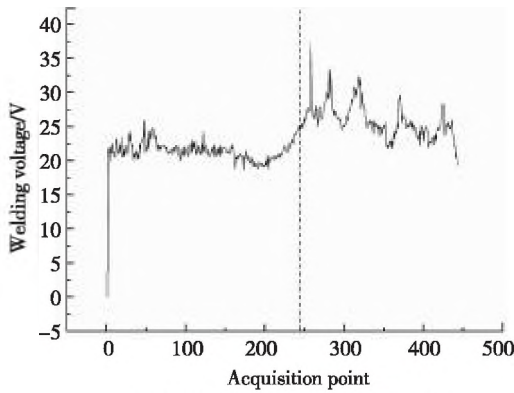
2.2 复合活性剂对电弧电流电压特性影响

焊接电弧的电压特性直接反应焊接热输入情况,是研究焊接电弧时的一个重要参照量。图 4 中采集点 240 个,左侧为无活性剂区,右侧为涂覆活性剂区。由图 4(a)可知,焊接过程中从无活性剂侧过渡到有活性剂区域时,焊接电流在 80 A 左

右呈稳定平稳状态,无明显的波动,说明活性剂的涂覆,对焊接过程中的焊接电流无影响。但是有无粉煤灰活性剂对于焊接电压的影响较大,具体结果如图 4(b)。在左侧(无活性剂一侧)的电压平稳在 22 V 左右,而在右侧电压有着较大的波动范围,平均提高 5 V 以上,最高电压达到 34 V。其原因可能是镁合金表面涂覆的粉煤灰复合活性剂中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 AlF_3 、 CaAlF_5 等物质会发生热解离、热电离,使电弧形成导电通道较为困难,电阻率较高,因此会引起电压不平稳上升,且波动较大,使电弧收缩。



(a) 焊接活性剂对焊接电流的影响曲线



(b) 活性剂对焊接电压的影响曲线

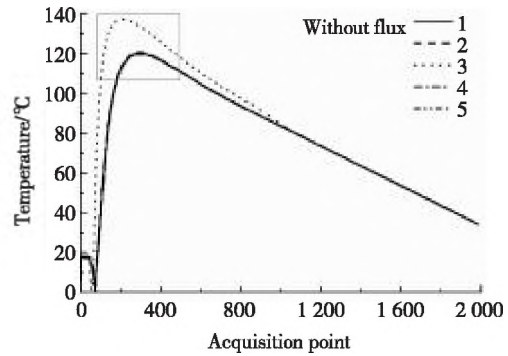
图 4 焊接电流电压实时变化图

Fig.4 Real-time change diagram of welding current and voltage: (a) influence of active agent on welding current; (b) influence of active agent on welding voltage

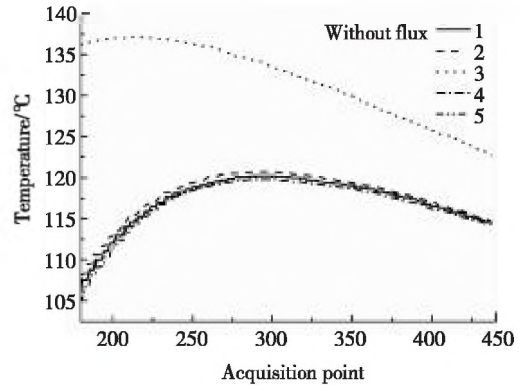
2.3 复合活性剂对焊接温度场影响

图 5 为焊缝温度的热循环曲线。可以看出,在无活性剂和涂覆活性剂试样焊缝中心点 3 处的峰值温度分别为 137 和 226 $^{\circ}\text{C}$,在距离焊缝中心点最远的 5 处(距焊缝中心 4 mm),两试样温度峰值分别为 120 和 206 $^{\circ}\text{C}$ 。可以说明活性剂对熔池温度的提升作用,同时也印证了上一节电压的升高增大熔池热输入量的说法。由图 5 中无活性剂和有活性剂温度场变化局部放大图可以看出,涂覆活性剂试样峰值附近图像明显表现的更加尖

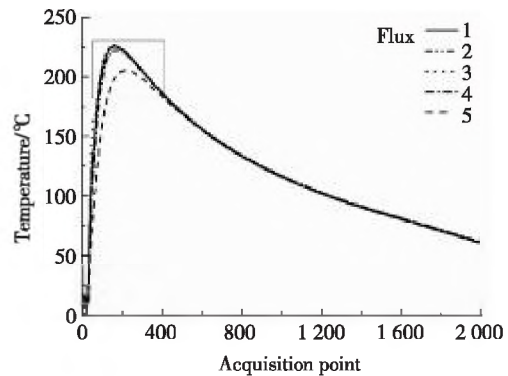
锐,峰值温度区间较窄,说明活性剂使得热量输入更加集中。



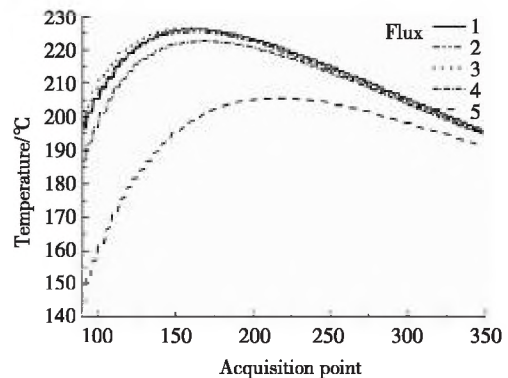
(a) 无活性剂



(b) 图(a)的局部放大图



(c) 添加粉煤灰活性剂



(d) 图(c)的局部放大图

图 5 焊缝温度热循环曲线

Fig.5 Weld temperature thermal circulation curves: (a) without active agent; (b) local amplification diagram of Fig. (a); (c) addition of fly ash active agent; (d) local amplification diagram of Fig. (c)

2.4 复合活性剂对焊接电弧力影响

焊接电弧力是一个非常复杂的综合作用力,利用图 1 所示装置,分别测量无活性剂和涂覆粉煤灰复合活性剂时的电弧综合作用力,依据公式(5)~(9)可以计算焊接电弧力值,具体参数及计算结果如表 3 所示。可见,无活性剂焊接电弧力为 9.7 mN,有活性剂时电弧力为 21.8 mN,电弧力相对提高 2.25 倍。其原因是由于粉煤灰中含有第一电离能较低的元素(如 Si、Al、Ca),在电弧作用下可以提供更多的电子及阳离子。大量的带电粒子诱发焊接电弧力提升,电场强度增大,加速了阳离子对阴极熔池的冲击效应,导致了熔池液面的降低,增加了焊接熔深。

表 3 焊接电弧综合作用力测试结果

Table 3 Test results of comprehensive action force of welding arc

参数	A_1/mm	A_2/mm	Δ_2/mm	Δ_1/mm	F/mN
未涂覆	10.00	26.00	16.00	1.17	9.70
涂覆	10.00	46.00	36.00	2.64	21.80

2.5 复合活性剂对表面张力温度梯度影响

图 6 为焊缝局部位置的能谱图,(a)~(d)为添加活性剂时 1~4 不同位置的面扫描图;(e)~(h)为未添加活性剂时 1~4 不同位置的面扫描图。表 4 为 Bi 粒子在面扫下的具体成分百分比。结合图 2、图 6 及表 4 可知,当无活性剂时,熔池中心部位 Bi 粒子含量较熔池边缘 Bi 粒子含量高;有活性剂时,熔池中心与熔池边缘 Bi 粒子含量基本相同。随着工作温度的升高,液态金属的表面张力就会越小。此种情况下,Marangoni 对流表现为:由熔池中心流向熔池边缘。无活性剂时,1、4 位置 Bi 粒子含量大于位置 2、3,这正是 Marangoni 对流为熔池中心向边缘的体现,与以上分析相吻合。但涂覆粉煤灰复合活性剂后,测得 2、3 位置 Bi 粒子含量反而略微高于 1、4 位置,这说明涂覆活性剂后 Marangoni 对流形式发生了改变,变为由熔池边缘流向熔池中心。也可以说,粉煤灰复合活性剂可以改变熔池金属表面张力温度系数,使之由负温度系数转变为正温度系数,从而改变 Marangoni 对流形式。

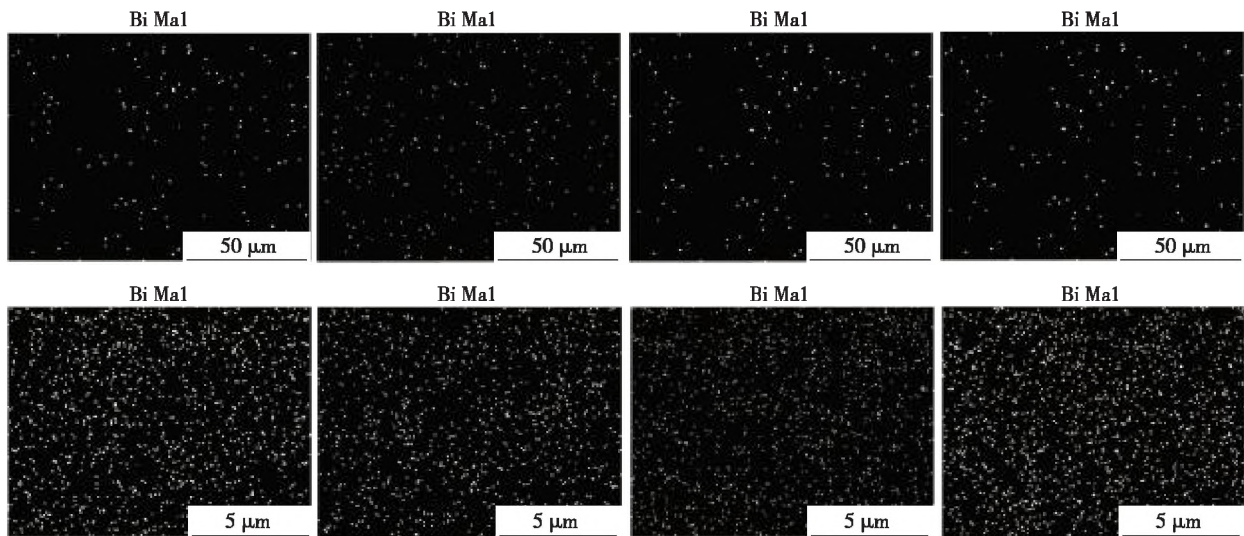


图 6 无活性剂及涂覆活性剂试样表面扫描结果:(a)~(d)添加活性剂时 1~4 不同位置的面扫描图;(e)~(h)未添加活性剂时 1~4 不同位置的面扫描图

Fig. 6 Surface scanning results of specimens with or without active agent: (a)~(d) surface scanning images of positions 1~4 with active agent addition; (e)~(h) surface scanning images of positions 1~4 with no active agent

表 4 涂覆与未涂覆试样中熔池 Bi 粒子在不同位置的面扫描数据

Table 4 Face scanning data for Bi particles in molten pool with or without active agent

样品	1	2	3	4
未涂覆	3.97%	2.42%	2.85%	4.64%
涂覆	0.53%	0.62%	0.54%	0.54%

3 讨论与分析

高铝粉煤灰复合活性剂主要由 Al_2O_3 、 AlF_3 、 SiO_2 、 $CaAlF_5$ 组成,这其中既有氧化物,又有卤化物。而不同成分活性剂对母材熔深增加作用机理不同。因此,改性的粉煤灰复合活性剂对 AZ91 镁合金熔深增加的原因是多方面的。

研究表明^[13-14],卤化物主要通过影响电弧导

电能力来达到增加熔深的目的。金属卤化物作为离子化合物,其熔沸点较低,在电弧高温作用下易熔化蒸发吸热,从高温电弧处带走大量热量。另外,由表 5 可以看出 Al、Si、Ca 等元素第一电离能均低于 Ar 第一电离能,卤化物蒸汽在电弧高温作用下先于 Ar 发生热电离,形成金属阳离子、氟离子。电离粒子带有较强电子亲和能,具有捕获电弧周边低温区自由电子形成负离子能力。这一过程的发生使电弧中担负传输电荷任务的自由电子大量损失,致使电弧导电能力减弱。加之电弧附近高速运动的电子本身带有部分能量,电子被捕获过程加剧了电弧热量损失。为维持电弧稳定燃烧,根据最小电压原理,电弧收缩。

表 5 常温常压下不同元素的各级电离能

Table 5 Ionization energy of different elements at normal temperature and pressure (kJ · mol⁻¹)

元素	第一电离能 E_1	第二电离能 E_2
Mg	737.70	1 450.70
Al	577.50	1 816.70
Si	786.50	1 577.10
Ar	1 520.60	2 665.80
F	1 681.00	3 374.20
Ca	589.80	1 145.40
O	1 313.95	3 388.30

活性剂中的氧化物 SiO₂ 和 Al₂O₃ 熔点高、电阻率较大,能有效阻止粉煤灰活性剂的熔化与蒸发。在镁合金表面形成覆盖层,使电弧形成导电通道较为困难,迫使电弧收缩。此外,氧化物高温下热解离和热电离形成 Si、Al、O 或 Si⁴⁺、Al³⁺、O²⁻ 等粒子,部分粒子具有较低的电离能和较强的电子亲和能,会发生上述的带电粒子的扩散与复合过程,该过程也有助于电弧收缩。当焊接熔池中存在氧化物解离所产生的氧元素时,氧与熔池中部分元素发生反应释放较高热量,改变熔池表面张力温度系数^[15],使 Marangoni 对流形式变为由熔池边缘流向熔池中心。

无论是由于活性剂解离或电离对电弧的冷却作用,还是带电粒子的扩散和复合过程,亦或是高阻抗层对电弧的机械压缩作用,其共同引起电弧收缩,使电压升高,热输入量增大。电弧等离子体与理想气体具有相似性质^[16]

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (10)$$

式中: P 为压力; V 为等离子体体积; T 为焊接温度。

由上式可知,与常规 TIG 焊相比,由于 A-TIG 焊电弧收缩,电弧等离子体体积减小,焊接温度升高,使 A-TIG 焊焊接压力即电弧力提高。

电弧收缩导致焊接热输入提高,Marangoni 对流形式的改变也有助于把熔池边缘热量传递并更加集中的直接作用于熔池中心底部,配合电弧力对焊接熔池的挖掘作用,使热量对熔池底部的熔化作用增强,具体表现为 A-TIG 焊获得窄而深的熔池形貌。

4 结 论

1) 粉煤灰复合活性剂主要成分为 Al₂O₃、AlF₃、SiO₂、CaAlF₅。与常规 TIG 相比,可以使 AZ91 镁合金熔深加深 1.4 倍,深宽比扩大 1.43 倍。

2) 复合活性剂中氟化物解离过程、带电粒子的扩散复合作用,氧化物的机械收缩作用都有助于电弧收缩,使电弧电压升高,热输入量增大。同时活性剂引发试样焊缝峰值温度区间较窄,使得熔池中心输入热量由 137 °C 提升至 226 °C,说明活性剂使得热量输入更加集中。

3) 粉煤灰复合活性剂能够实现对 AZ91 镁合金熔深增加效果是电弧收缩机理和表面张力温度梯度改变机理共同作用的结果。

参考文献:

- [1] YOON J S, KIM S K, CHUN Y B, et al. Mechanical properties of dissimilar TIG-welded ARAA and SS316L joint [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 99:1-4. DOI:10.1109/TPS.2020.2978813
- [2] SIMONIK A G. The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electro-negative elements[J]. Svar Proiz, 1976, 3: 49-51.
- [3] PARAYE N K, NEOG S P, GHOSH P K, et al. Surface modification of AISI 8620 steel by in-situ grown TiC particle using TIG arcing[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126533. DOI:10.1016/j.surfcoat.2020.126533
- [4] 黄勇,樊丁,樊清华. 活性剂增加铝合金交流 A-TIG 熔深机理研究[J]. 机械工程学报, 2006(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]. Journal of Mechanical Engineering, 2006(5): 45-49. DOI:10.1007/s1146500700769
- [5] REN D, JIANG Y, HU X, et al. Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG

- welded titanium alloy[J]. *Intermetallics*, 2021, 132(1):107115.
DOI:10.1016/j.intermet.2021.107115
- [6] 刘凤尧,林三宝,杨春利,等. 活性剂涂敷量对A-TIG焊熔深影响的研究[J]. *材料科学与工艺*, 2002,10(3):310-313.
LIU Fengyao, LIN Sanbao, YANG Chunli, et al. Study on the effect of activant application on the melting depth of A-TIG welding [J]. *Material Science and Technology*, 2002,10(3):310-313.
DOI:10.3969/j.issn.1005-0299.2002.03.020
- [7] TANAKA M, SHIMIZU T, TERASAKI T, 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.
DOI:10.1179/136217100101538461
- [8] MURALI N, SOKOLUK M, LI X. Study on aluminum alloy joints welded with nano-treated Al-Mg-Mn filler wire[J]. *Materials Letters*, 2021, 283:128739.
DOI:10.1016/j.matlet.2020.128739
- [9] ZHANG Z, LIU L, SUN H, et al. AC TIG welding with single-component oxide activating flux for AZ31B magnesium alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(4):1382-1388.
DOI:10.1007/s108530072299x
- [10] 顾玉芬,边春红,李春凯,等. 不同组元活性剂对不锈钢脉冲TIG焊熔池表面张力的影响[J]. *焊接学报*, 2020,41(6):48-53,99-100.
GU Yufen, BIAN Chunhong, LI Chunkai, et al. Effect of different component active agents on the surface tension of stainless steel pulse TIG welding tank [J]. *Welding Journal*, 2020,41(6):48-53,99-100.
DOI:10.12073/j.hjxb.20190911001
- [11] 马壮,于秀秀,时海芳,等. 粉煤灰A-TIG熔池流动行为及焊缝性能分析[J]. *焊接学报*, 2017,38(9):65-69,132.
MA Zhuang, YU Xiuxiu, SHI Haifang, et al. Flow behavior of molten pool and properties of welded seam in A-TIG welding with fly ash[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017,38(9):65-69,132.
DOI:10.12073/j.hjxb.20151103003
- [12] TRINH M M, CHANG M B. Catalytic pyrolysis; new approach for destruction of POPs in MWIs fly ash[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405:126718.
DOI:10.1016/j.cej.2020.126718
- [13] MARGARITA P, SILVIYA B, HRISTINA L, et al. VOC oxidation and CO₂ adsorption on dual adsorption/catalytic system based on fly ash zeolites[J]. *Catalysis Today*, 2020, 357:518-525.
DOI:10.1016/j.cattod.2019.06.070
- [14] 高晓刚,董俊慧,韩旭,等. 氟化物ATIG焊接Ti6Al4V的焊缝成形和组织[J]. *焊接学报*, 2017, 38(7):31-34,39.
GAO Xiaogang, DONG Junhui, HAN Xu, et al. Weled forming and tissue of fluoride ATIG welded Ti6Al4V [J]. *Welding Journal*, 2017,38(7):31-34,39.
DOI:10.12073/j.hjxb.20161026006
- [15] 杨春利,牛尾诚夫,田中学. TIG焊熔池表面张力的测定及表面活性剂的影响[J]. *机械工程学报*, 2000(10):59-63.
YANG Chunli, USHIO M, TIAN Zhongxue. Detection of surface tension and effect of surface active flux in TIG welding [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2000(10):59-63.
DOI:10.3901/jme.2000.10.059
- [16] 朱士尧. 等离子体物理基础[M]. 北京:科学出版社,1983:147-151.
ZHU Shiyao. *Fundamentals of plasma physics* [M]. Beijing: Science Press,1983:147-151.

(编辑 任明星)

本文引用格式:

- 马壮,张佩佩,董世知,等. 粉煤灰复合活性剂在A-TIG焊中增加熔深的机理研究[J]. *材料科学与工艺*, 2021,29(5):84-90. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210103
- MA Zhuang, ZHANG Peipei, DONG Shizhi, et al. Research on mechanism of fly ash composite active agent for penetration increasing of A-TIG welding [J]. *Materials Science and Technology*, 2021, 29(5):84-90. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20210103