

AZ31B 镁合金 A-TIG 单一活性剂的设计与研究

杜贤昌, 郭淑兰, 董文, 徐学东

(长春工程学院机电学院, 吉林 长春 130012)

摘要:目前国内外关于单一活性剂在试验前设计的研究报道缺乏, 为避免研究出现随机性和盲目性弊端, 文中详细阐述了 AZ31B 单一活性剂的设计过程, 研究了 A-TIG 电弧形态、焊缝熔深和焊缝表面成形质量。研究表明: 通过对比分析文献信息, 选定活性剂的基本元素和主要元素并对它们进行选配, 最终确定欲研究的活性剂。这一设计思路是可行的。活性剂通过影响电弧形态收缩可致焊缝熔深增加, 焊缝表面成形质量随活性剂与丙酮量的配比不同发生变化, 9 种活性剂在最大焊缝熔深时的丙酮量不同。综合分析认为, 单质 Zn 为 AZ31B 镁合金 A-TIG 的首选活性剂。

关键词: 镁合金; A-TIG; 单一活性剂; 设计与研究

中图分类号: TG421

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2014)09-0175-04

Design and Research on AZ31B Alloy Single Surfactant for A-TIG Welding

DU Xianchang, GUO Shulan, DONG Wen, XU Xuedong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: At present, the domestic and foreign research reports on the design of single active agent before test is lack. The design process of AZ31B single active agent was described in detail. In order to avoid the emergence of random and blindness defects, the A-TIG study on arc shape, weld penetration and weld surface quality was carried out. The research shows that: analyzing the literature information by comparison, selecting the basic elements and main elements of surfactants, and matching them, ultimately, the active agent was researched. This design method is feasible. The weld penetration increases by the contraction of the arc which is caused by the active agent. The weld appearance quality changes with the different proportion of the active agent and acetone. The amount of acetone for nine kinds of activity agent is different in the maximum weld depths. By comprehensive analysis, the elemental Zn is the first choice of surfactant for activating-flux TIG of AZ31B alloy.

Key words: magnesium alloy; activating-flux TIG(A-TIG); single surfactant; design and research

A-TIG 焊(Activating-flux TIG)技术发展的关键在于研制开发环保高效的活性剂。自乌克兰巴顿焊接研究所发明 A-TIG 焊技术以来, 迅速引起了国内外专家学者的高度重视, 并先后有美国科罗拉多州矿业学院焊接连接与涂料研究中心、日本大阪大学接合科学研究所、哈尔滨工业大学、兰州理工大学、大连理工大学和国立台湾科技大学等十几家单位, 针对镁合金用 A-TIG 焊活性剂开展了相关研究^[1-9]。虽然国内外对单一活性剂的研究有一定的报道, 但因缺乏关于单一活性剂设计的报道, 对试验前的活性剂选择缺乏系统性研究, 包括活性剂组成元素的确定、活性剂元素的选配等。镁合金 A-TIG 用活性剂研制还处于初级阶段, 选择活性剂具有随机性和盲目性, 极大地延滞了活性剂的研发进程。

基于上述原因, 以镁合金 AZ31B 单一活性剂作为研究对象, 着重阐述单一活性剂的设计过程, 继而研究单一活性剂对 A-TIG 的电弧形态、焊缝熔深以及焊缝表面成形质量的影响规律。

1 活性剂设计

1.1 活性剂基本元素的选定

根据目前国内外关于活性剂增加镁合金 A-TIG 焊缝熔深机理, 熔池中的氧含量可使熔池表面张力发生变化, 表面张力温度梯度由负变正, 即 $dR/dT > 0$, 熔池金属形成由周边向中心的表面张力流, 导致更多的电弧能量通过液体金属的流动传递给熔池底部, 使熔池底部的加热效率提高, 从而形成更大的熔深。

Cl 和 O 的第一电离能分别为 1251.2、1165.9 kJ/mol, 远远高于 Mg 的第一电离能(737.7 kJ/mol)。在电离相同数量电子的情况下, Cl 和 O 用于电离而吸收的电弧热量要明显高于 Mg 所吸收的热量, 这就导致了电弧在维持正常放电的情况下, 使得电弧的热

收稿日期: 2014-03-07

基金项目: 吉林省教育厅科技资助项目(2011248)

作者简介: 杜贤昌(1969-), 男, 山东莱州人, 副教授, 硕士, 主要从事焊接材料、工艺及新型弧焊电源方面的科研和教学工作, 发表论文 20 余篇; E-mail: duxianchang@sina.com

量损失加大。根据最小电压原理,电弧具有保持最小能量消耗的特性,因此,电弧会自动收缩其断面,提高电弧的电流密度和作用于熔池的电弧力,从而增加了焊缝熔深。因此,选定 Cl 和 O 作为基本元素。

1.2 活性剂主要元素的选定

主要元素选定应从化学元素的物理性能(密度、熔点、沸点、溶解性、导电性和 1~4 级电离能)、对焊缝性能(强度、高温强度、抗腐蚀性、抗磨损性、抗蠕变性和焊缝脆性)的影响、对焊缝的强化机理(固溶、弥散、沉淀、时效和细化晶粒)、对焊缝熔深的影响、在焊接中的冶金作用(变质、精炼),以及活性剂环保性等方面考虑。根据文献可知,CdCl₂ 增加熔深效果明显,这与 Cl、Cd 及其化合物的性能密不可分;在 A-TIG 中,Mg 为焊接母材主要元素,Ar 为保护气体,因此,选定 Mg、Cd 和 Ar 为参考元素,最终选定 Ti、Sr、Zr、Te、Zn、Si、Cr 和 Y 八种主要元素。主要元素和部分参考元素的性能分别列于表 1 中。

表 1 活性剂主要元素及参考元素的性能

Tab.1 Performance of active agents main elements and reference elements

元素的性能	Sr	Zr	Y	Te	Zn	Ti	Si	Cr	Mg	Cd
密度/(g·cm ⁻³)	2.54	6.49	4.47	6.24	7.14	4.54	2.32	7.19	1.74	8.65
熔点/℃	769	1852	1522	449.5	419	1668	1414	1857	650	320.9
沸点/℃	1384	4377	3338	989.8	907	3287	2900	2672	1090	765
溶解性	水	王水	-	-	-	浓酸	碱	强碱	-	酸
电离能 1	549	660	616	869	906	658.8	786	652.9	737	867.6
电离能 2	1064	1267	1181	1795	1733	1309.8	1577	1509	1450	1631
电离能 3	4138	2218	1980	2698	3832	2652.2	3231	2987	7732	3616
电离能 4	-	3313	5963	3610	5730	4174.6	4355	4743	10540	5300
导电性	-	-	提高	-	-	106	-	-	-	-
焊缝熔深	-	-	-	增加	增加	-	-	-	一般	增加
焊缝强度	-	-	提高	-	提高	提高	-	-	-	-
高温强度	-	-	提高	-	-	提高	-	-	-	-
抗腐蚀性	-	提高	提高	-	-	提高	-	-	-	-
抗磨损性	-	-	提高	-	-	-	-	-	-	-
抗蠕变性	-	-	提高	-	-	-	-	-	-	-
焊缝脆性	-	-	-	-	-	-	增大	增大	-	-
细化晶粒	是	是	是	-	是	-	-	-	-	-
固溶强化	-	是	-	-	是	-	-	-	-	-
弥散强化	-	是	-	-	-	-	-	-	-	-
沉淀强化	-	-	是	-	是	-	-	-	-	-
时效强化	-	-	-	-	是	-	-	-	-	-
变质剂	是	-	是	-	-	-	是	-	-	-
精炼剂	-	-	是	-	-	-	-	-	-	-
环保性	是	-	-	-	-	是	-	-	-	剧毒
铸造性	-	-	-	-	提高	-	提高	-	-	-

1.3 活性剂元素的选配

通过对 Ti、Sr、Zr、Si、Cr、Y、O 和 Cl 八种化学元素选配,以 CdCl₂ 和 MgO 为参考物寻找相应化合物,使化合物在物理性能(密度、熔点、沸点和溶解性)、对焊缝成形和焊缝熔深影响、增深机理(电弧形态、电弧电压和表面张力)、对焊缝性能影响(硬度、

强度、韧性、抗腐蚀性、抗磨损性、抗疲劳性等)、强化机理(细化晶粒)、环保性和工艺可行性等方面满足要求,最终选定活性剂为 TiO₂、SrCl₂、ZrO₂、Y₂O₃、SiO₂ 和 Cr₂O₃,单质活性剂为 Te 和 Zn。活性剂及参考化合物的性能见表 2。

表 2 活性剂及参考化合物的性能

Tab.2 Properties of active agents and reference compounds

化合物的性能	SrCl ₂	ZrO ₂	Y ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MgO	CdCl ₂
密度/(g·cm ⁻³)	3	4.65	5.01	4.2	2.5	5.21	3.58	4.05
熔点/℃	874	2700	2410	1830	1670	2435	2852	568
沸点/℃	1250	4300	-	-	2230	4000	3600	960
溶解性	丙酮、水	硫酸	矿物酸	盐酸	碱类	碱溴酸	水	有机溶剂
焊缝成形	-	-	-	良好	-	提高	良好	一般
焊缝熔深	-	-	-	增加	增加	增加	一般	显著
增深机理	电弧形态	-	-	收缩	-	-	-	-
电弧电压	-	-	-	下降	增大	增大	-	-
表面张力	-	-	-	下降	负	负	-	-
焊缝硬度	-	提高	-	下降	-	下降	-	-
焊缝强度	-	提高	-	下降	-	-	-	-
抗腐蚀性	-	提高	-	-	-	-	-	-
抗磨损性	-	提高	-	-	-	-	-	-
抗疲劳性	-	提高	提高	-	-	-	-	-
断口形貌	-	-	-	切窝	-	切窝	-	-
焊缝韧性	-	提高	-	提高	-	提高	提高	提高
细晶强化	是	-	-	是	-	是	是	-
其它	环保性	-	-	是	是	是	是	剧毒
铸造性	-	-	-	提高	提高	提高	是	-
耐火绝缘	-	-	-	-	-	是	是	-

2 活性剂试验

2.1 活性剂的试验配方

活性剂与丙酮的配比方案如表 3 所示。每种活性剂对应一组试验共 9 组(包括 MgO),每组试验由 6 个试验组成,每个试验的丙酮量从 2.5 到 15 mL 按 2.5 mL 递增,由活性剂 1 g 与不同量的丙酮进行配比,研究 9 种活性剂对电弧形态、焊缝熔深和焊缝表面成形质量的影响。

表 3 活性剂试验方案

Tab.3 Active agents test scheme

丙酮量/mL	SrCl ₂ /g	ZrO ₂ /g	Y ₂ O ₃ /g	Te/g	Zn/g	TiO ₂ /g	SiO ₂ /g	Cr ₂ O ₃ /g	MgO/g
2.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1
试验组	1	2	3	4	5	6	7	8	9

2.2 A-TIG 的试验方案

将活性剂与丙酮混合均匀后涂敷在试样尺寸为 200 mm×50 mm×6.5 mm 的 AZ31B 试板表面,待丙

酮挥发后实施 A-TIG。

试验采用 YC-300WP 型钨极氩弧焊机, 送丝装置 YJ-105。为了保证试验数据的一致性与可比性, 焊枪固定在小车的行走机构上。对涂敷不同活性剂的试板采用相同焊接工艺参数一次完成。焊接电流(交流)、焊接速度、电弧长度、氩气流量和钨极电极直径等焊接工艺参数分别选择 120 A、240 mm/min、1 mm、15 L/min 和 2.4 mm。

在焊接过程中, 通过高速摄像机和计算机采集电弧图像, 采用双层滤光片保证提取图像的实际质量。焊后观察焊缝表面成形质量, 采用数码相机拍照焊缝, 制备焊缝熔深试样。

3 试验结果及分析

3.1 焊接电弧形态及其对熔深的影响

每种活性剂的典型电弧形态如图 1 所示。为了便于研究焊接电弧形态与焊缝熔深的关系, 采用弧柱直径、显性弧柱长度、电弧亮度、弧底宽度、电弧颜色和电弧拖尾等 7 项电弧考核指标。上述 7 项指标按由强到弱排序, 并且将电弧形态按弧柱直径的细与粗、显性弧柱长度的短与长、电弧的亮与暗、弧底宽度的窄与宽、电弧颜色的蓝与黄和电弧拖尾的无与长做进一步细分, 每项指标由强到弱分为 3 级。

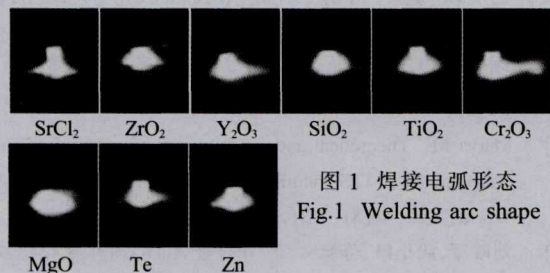


图 1 焊接电弧形态
Fig.1 Welding arc shape

电弧形态对熔深的强弱影响判定标准: 首先以 7 大项指标的值大小确定先后顺序, 指标值越小表示对熔深的影响越强; 如果同级指标值相等, 则由下 1 项指标值确定, 依次排出由强到弱的顺序。从表 4 中分析可得: 9 种活性剂对应的电弧形态对焊缝熔深(D)的影响排序: $D_{\text{SrCl}_2} > D_{\text{Y}_2\text{O}_3} > D_{\text{Cr}_2\text{O}_3} > D_{\text{ZrO}_2} > D_{\text{Te}} > D_{\text{Zn}} > D_{\text{SiO}_2} > D_{\text{TiO}_2} > D_{\text{MgO}}$ 。

3.2 活性剂与丙酮量不同配比对接焊缝熔深的影响

根据表 3 方案实施 A-TIG 焊后, 获得试验结果如图 2 所示。可见, 随着丙酮量的增加, 焊缝熔深 D 先增大, 出现最大值后逐渐减小, 但是 9 种活性剂的

表 4 焊接电弧形态分析

Tab.4 Morphological analysis of welding arc

活性剂	弧柱直径	显性弧柱长度	电弧亮度	弧底宽度	电弧颜色	电弧拖尾	影响熔深强弱分 1~9 级
SrCl ₂	细	长	暗	窄	黄	无	1
ZrO ₂	中	长	亮	窄	中	无	4
Y ₂ O ₃	细	短	中	中	中	中	2
Te	中	长	亮	窄	中	中	5
Zn	中	中	亮	中	蓝	无	6
TiO ₂	中	短	亮	宽	蓝	无	8
SiO ₂	中	中	中	宽	蓝	无	7
Cr ₂ O ₃	细	短	中	宽	黄	长	3
MgO	粗	短	中	宽	黄	中	9

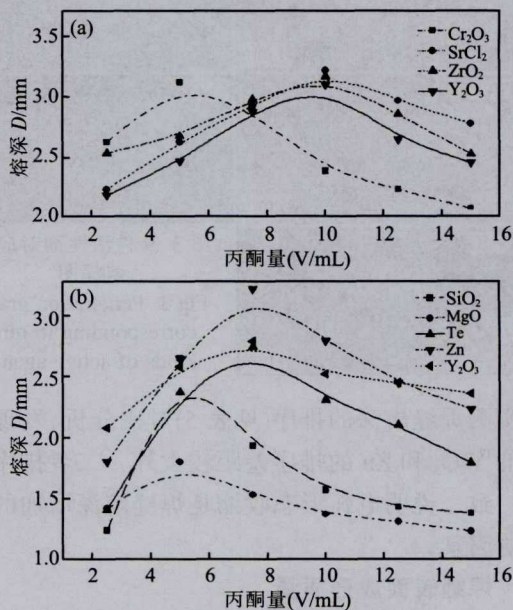


图 2 熔深变化曲线

Fig.2 Penetration change curve

焊缝熔深拐点对应的丙酮量是不同的。SrCl₂、Y₂O₃ 和 ZrO₂ 在 10 mL 处, TiO₂、Te 和 Zn 在 7.5 mL 处, Cr₂O₃、SiO₂ 和 MgO 在 5 mL 处。9 种活性剂 A-TIG 焊缝最大熔深值及其排序见表 5。可见, 采用活性剂 SrCl₂ 时可获得最大熔深。图 3 为 9 种活性剂 A-TIG 的最大熔深图。

将电弧形态对焊缝熔深(D)的影响排序(见表 4)

表 5 最大焊缝熔深及其排序

Tab.5 Maximum penetration depth and their sequences

活性剂	最大熔深 D_{max}/mm	丙酮量 $/(V \cdot \text{mL}^{-1})$	熔深排序
无	2.35	0	9
SrCl ₂	3.23	10	1
ZrO ₂	3.17	10	3
Y ₂ O ₃	3.10	10	5
Te	2.74	7.5	7
Zn	3.22	7.5	2
TiO ₂	2.79	7.5	6
SiO ₂	2.65	5	8
Cr ₂ O ₃	3.12	5	4
MgO	1.80	5	10

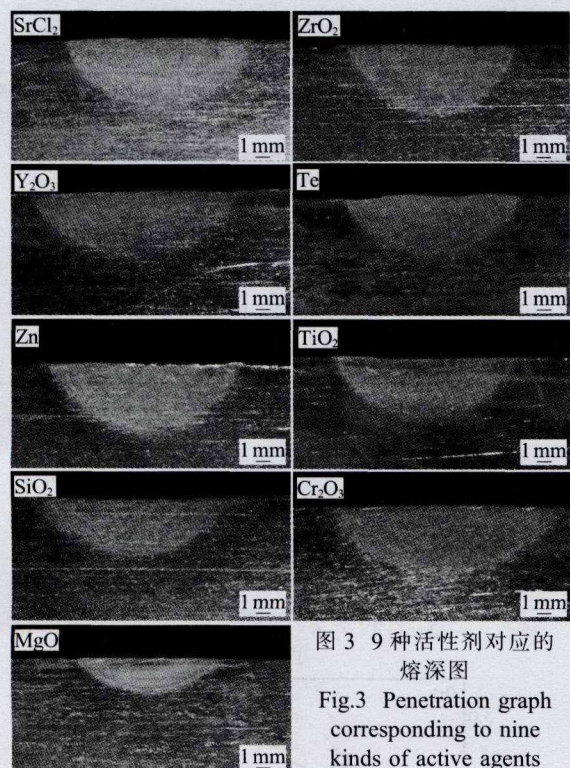


图3 9种活性剂对应的熔深图
Fig.3 Penetration graph corresponding to nine kinds of active agents

与实测焊缝熔深的排序(见表5)对比分析,发现除活性剂 Y_2O_3 和 Zn 的排序差距较大外,二者排序基本相一致,说明电弧形态收缩是焊缝熔深增加的重要因素。

3.3 焊缝表面成形质量

随着丙酮量的增加,焊缝表面成形质量发生变化,具体情况见表6。不同活性剂在最大熔深时的丙酮量是不同的,按照表5列出的丙酮量获得的焊缝图见表7。

表6 焊缝表面成形质量变化
Tab.6 Change of weld surface forming quality

活性剂	表面质量
无	表面形状变化小,成形良好,波纹细腻
$SrCl_2$	表面由平滑变粗糙波纹,再变为平滑并略带局部凹陷
ZrO_2	波纹细腻,成形良好,表面整体变平滑带凹陷
Y_2O_3	表面由无波纹变为大波纹,再变为细波纹
Te	表面粗糙且焊缝窄,渐变宽且光滑,成形变好
Zn	表面光滑,成形美观,渐变细波纹,且表面变平
TiO_2	波纹细腻,局部凹陷逐渐消失,成形美观
SiO_2	焊缝由窄变宽,表面平滑变细波纹,面中略带凹型
Cr_2O_3	表面粗糙波纹较大成形差,焊缝渐变宽,波纹变小
MgO	细波纹由连续渐变断续,出现光滑表面、成形较好

4 结论

(1) 文中所阐述的 AZ31B 单一活性剂设计过程,可为研制开发活性剂提供重要的设计思路。

(2) 9种活性剂对电弧形态的收缩影响不同,

表7 不同活性剂的焊缝图

Tab.7 Weld seam maps of different surfactants

活性剂	焊缝表面成形
$SrCl_2$	
ZrO_2	
Y_2O_3	
Te	
Zn	
TiO_2	
SiO_2	
Cr_2O_3	
MgO	

电弧形态收缩是焊缝熔深增加的重要因素。

(3) 活性剂与丙酮量配比不同,焊缝表面成形质量会发生变化,9种活性剂在最大熔深时的丙酮量不同,采用活性剂 $SrCl_2$ 的焊缝熔深最大且焊缝宽度最窄,而活性剂 Zn 的焊缝表面成形质量最好。综合考虑焊缝的熔深、熔宽和表面成形质量,活性剂 Zn 效果最佳。

参考文献:

- [1] Marya M. Theoretical and experimental assessment of chloride effects in the A-TIG welding of magnesium [J]. Welding in the World, 2002, 46(8): 7-21.
- [2] 刘政军,武小娟,蒋焕文,等. 镁合金 A-TIG 焊中氧化物基活性剂的研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(1): 182-184.
- [3] Liu Liming, Zhang Zhaodong, Song Gang, et al. Mechanism and microstructure of oxide fluxes for gas tungsten arc welding of magnesium alloy [J]. metallurgical and materials transactions A, 2007, 38(3): 649-658.
- [4] 张兆栋,曹全金. 金属单质活性剂对镁合金 A-TIG 焊的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 37-40.
- [5] Lin Chunming, Liu Jujen, Tsai Hsienlung, et al. Evolution of micro-structures and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy weldment with active oxide fluxes and GTAW process [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 34 (8): 1013-1023.
- [6] 张兆栋,凡福群. 金属氯化物 A-TIG 焊熔深作用机理[J]. 焊接学报, 2013, 34(5): 29-32.