

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.05

工艺参数对铝合金PPCA-TIG焊缝成形的影响

黄 勇^{1,2}, 刘永刚¹, 薛旭普¹, 黄健康^{1,2}, 樊 丁^{1,2}

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

摘 要: 以3003铝合金为母材, 利用自行设计制造的PPCA-TIG专用焊枪对其进行焊接, 研究了不同工艺参数对3003铝合金PPCA-TIG焊缝成形的影响, 并分析不同的工艺参数对焊缝深宽比的影响规律。结果表明, 使用活性剂SiO₂焊接时可一次焊透8 mm厚的3003铝合金板, 且当焊接电流为160 A时焊缝深宽比达到最大; 使用活性剂MnCl₂焊接时, 焊缝熔深可达到传统TIG焊的2.4倍, 且当焊接电流为170 A时焊缝深宽比达到最大。当焊接速度为100 mm/min、弧长为2 mm、外层气流流量为12 L/min时, SiO₂和MnCl₂两种活性剂下的焊缝深宽比均达到最大; 活性剂粒度增大, 有利于改善焊缝表面成形, 但焊缝熔深增加效果减弱。SiO₂比MnCl₂的深宽比要大。

关键词: 铝合金; 粉末熔池耦合活性TIG焊; 活性剂; 焊缝深宽比

中图分类号: TG47 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2023)11-0028-07

Effect of Parameters on PPCA-TIG Weld Forming of Aluminum Alloys

HUANG Yong^{1,2}, LIU Yonggang¹, XUE Xupu¹, HUANG Jiankang^{1,2}, FAN Ding^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, Lanzhou 730050, China

Abstract: Taking 3003 aluminum alloy as base material, the PPCA-TIG welding gun designed and manufactured by ourselves was used to weld it. The influence of different process parameters on the forming of the PPCA-TIG welding seam was studied, and the influence of different process parameters on the depth to width ratio of the weld was analyzed. The results show that 3003 aluminum alloy plate with thickness of 8 mm can be welded thoroughly by using active agent SiO₂, and the weld depth to width ratio reaches the maximum when the welding current is 160A. However, when MnCl₂ is used for welding, the weld penetration can reach 2.4 times of the traditional TIG welding, and the weld depth to width ratio reaches the maximum when the welding current is 170A. When the welding speed is 100 mm/min⁻¹ arc length is 2mm and flow rate of the outer air flow is 12 L/min, the weld depth to width ratio reaches the maximum under SiO₂ and MnCl₂. The increase of the particle size of active agent is beneficial to improve the weld surface forming, but the increase of weld penetration is weak. The depth to width ratio of SiO₂ is larger than that of MnCl₂.

Keywords: Al alloy; powder pool coupling active TIG welding; active agent; weld depth to width ratio; process parameter

引用格式: 黄勇, 刘永刚, 薛旭普, 等. 工艺参数对铝合金PPCA-TIG焊缝成形的影响[J]. 电焊机, 2023, 53(11): 28-34.

Citation: HUANG Yong, LIU Yonggang, XUE Xupu, et al. Effect of Parameters on PPCA-TIG Weld Forming of Aluminum Alloys[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 28-34.

0 引言

铝及铝合金作为工业中应用最广泛的有色金

属之一, 具有密度小、塑性好、易于加工、耐腐蚀性和导电性好等诸多优点^[1]。随着科学技术的快速发展, 人们对铝合金焊接接头提出了更高的质量要

收稿日期: 2023-02-21 修回日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51965036)

作者简介: 黄 勇(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事高效焊接方法及其理论、焊接物理与数值模拟、焊接EHS和功能材料连接方法及其理论等领域的研究。E-mail: hyorhot@lut.edu.cn。

求。早在 20 世纪 60 年代中期, 活性 TIG 焊的出现引起了国内外广大学者的关注。该方法基于传统 TIG 焊, 通过在待焊板材表面涂敷一层活性剂, 使得熔深显著增加, 在不开坡口且不使用填充材料的情况下可以一次焊透 12 mm 厚的碳钢板材^[2]。虽然熔深增加效果明显, 但是活性剂需要人工涂敷, 难以保证质量, 不易实现焊接的自动化, 降低了焊接效率^[3]。随着工业水平的发展, 焊接过程的自动化与机械化已经成为近年来的发展趋势与研究热点, 为了解决此类问题, 通过活性气体引入活性元素的方法被开发出来, 例如 AA-TIG 焊^[4] (Arc Assisted Activating TIG Welding, 电弧辅助活化 TIG 焊)、GPCA-TIG (Gas Pool Coupled Activating TIG Welding, 气体熔池耦合活性 TIG 焊) 等方法, 无需手工涂敷活性剂, 可在保证焊接质量的前提下实现自动化, 并提高焊接效率。但是由于铝在与空气接触时, 表面将生成致密难熔的 Al_2O_3 膜^[5], 所以通过活性气体来引入活性元素 O 的方法并不适用于铝与铝合金的焊接。

基于此背景, 提出一种新型活性焊接方法——粉末熔池耦合活性 TIG 焊 (Powder Pool Coupled Activating TIG welding, PPCA-TIG 焊)。该方法采用双层气体进行焊接, 内层利用惰性气体保护钨极和熔池, 外层通过自动送粉装置将活性剂粉末随保护气体送入电弧-熔池区域, 利用活性剂与电弧-熔池的相互作用可显著增加熔深, 大大提高焊接效率, 且易于实现焊接的机械化与自动化。同时这种方法避免了 GTFA-TIG 焊 (Gas Transfer Flux Activating Welding, 气体输送活性 TIG 焊) 可能出现的活性剂粉末对钨极的污染问题。通过选择合适的活性剂, 可实现铝与铝合金的焊接, 同时通过调节活性剂成分和活性剂与电弧-熔池区域的耦合程度可保证焊接过程的稳定性、焊缝成形的可控性和焊缝质量的优质性。刘瑞琳等^[6]利用自行设计制造的 GPCA-TIG 专用焊枪, 研究了焊接工艺参数对奥氏体不锈钢 GPCA-TIG 焊缝成形的影响。结果表明, O 元素能增加焊缝熔深, 而 N 元素则不能, 但却能促进 O 元素的吸收; 焊接电流和焊接速度决定焊接线能量的大小, 影响 O 元素对熔池 Marangoni 对流方式的改变; 弧长的变化会影响焊接热源总体的热输入和熔池的温度分布。黄勇^[7]等针对铝合金交流 PPCA-

TIG 焊, 研究了活性剂 SiO_2 在熔池表面的过渡行为, 发现 SiO_2 的过渡导致电弧收缩, 并且 PPCA-TIG 焊在 EN 时段阴极斑点数量增多是导致焊缝表面成形差的重要原因, 在 EP 时段, SiO_2 的较高高温焊态电阻强制电弧收缩, 导电面积减小, 是熔深增加的主要原因。赵文强^[8]采用 PPCA-TIG 焊进行了 SUS304 铝合金的相关研究, 研究发现当使用 SiO_2 活性剂时电弧形貌有所收缩, 焊缝熔深提升 3 倍以上。樊丁^[9]采用直流正接 TIG 焊进行 3A21 铝合金工件的表面堆焊, 认为对焊缝熔深影响较大的原因是焊接电弧、表面活性剂和焊缝熔池三者所构成的导电通道电阻的大小变化。雷小伟^[10]研究发现, 采用变极性冷金属过渡焊进行 8 mm 厚 5083 铝合金对接焊时, 当交流平衡值由正值向负值变化时, 负极性的比例增大, 熔深将逐步减小, 更趋于堆焊; 交流平衡为正值时, 焊接成形良好。焊接工艺参数的优化对焊接接头的表面成形和组织性能有着重要的影响。

本文针对 3003 铝合金采用交流 PPCA-TIG 焊进行工艺试验, 在焊缝良好成形的基础上分析不同的工艺参数对焊缝深宽比的影响。这对于推动这种新型活性焊接方法的开发与发展, 实现铝与铝合金的高质量自动化焊接, 具有一定的意义。

1 试验方法

试验母材为 3003 铝合金板, 尺寸为 200 mm×100 mm×8 mm, 采用交流 PPCA-TIG 焊接方法进行表面熔焊, 如图 1 所示。送粉装置为自制的微量可控送粉器, 通过电机转动向电弧-熔池区域中送入定量的活性剂粉末, 采用 SiO_2 和 MnCl_2 两种典型的活性剂, 粒度为 100~300 目。PPCA-TIG 焊前, 用丙酮擦拭铝合金表面, 去除表面油污, 后用砂轮机处理其表面, 去掉表面氧化膜后, 再用丙酮擦拭, 吹干试板。同时, 使用烘干箱对所用活性剂进行烘干加热, 脱去活性剂本身的结晶水和吸附的水分。PPCA-TIG 焊接时, 首先打开内层气路和冷却水路, 引弧的同时开启外层气路与送粉器, 开始输送粉末, 并启动滑轨, 随滑轨运动结束后, 熄弧, 并停止送粉。以此得到基本的焊接参数, 在此参数基础上分别以焊接电流、焊接速度、弧长、外层气体流量、

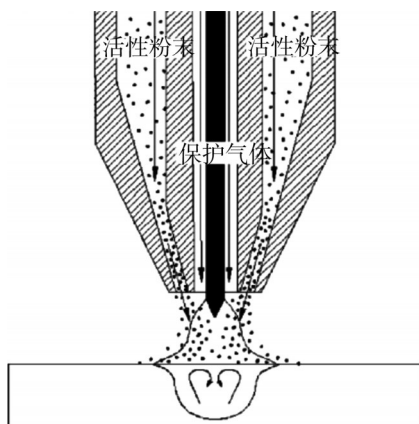


图1 PPCA-TIG焊方法示意

Fig. 1 PPCA-TIG welding method

粉末粒度为变量,基于控制变量法,再次进行焊接,分析PPCA-TIG焊的焊缝深宽比随工艺参数变化规律。待焊件冷却至室温后,采用线切割方法截取焊缝的横截面试样,然后对试样打磨、抛光和腐蚀。

2 试验结果与分析

2.1 基本焊接参数确定

活性剂进入电弧-熔池区域的速度和数量受外层气体流量的直接影响,这也是PPCA-TIG焊区别于其他焊接方法的核心参数。其次由于铝合金传热速度快,导致其对热输入变化较敏感,合适的热输入也是保证焊接质量的重要参数之一。

2.1.1 外层气体流量对焊缝成形的影响

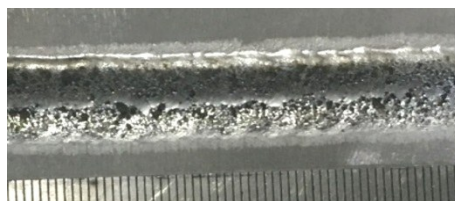
图2为使用 SiO_2 活性剂在不同气体流量下的焊缝表面成形。随着气体流量的增加,焊缝表面变暗,无气孔咬边等明显缺陷。分析认为,随着外层气体流量的增加,活性剂粉末进入电弧-熔池区域的数量也增加。但由于热输入不变,焊缝表面的渣壳随气体流量的增加而增多,焊缝表面成形变差。

2.1.2 焊接热输入对焊缝成形的影响

焊接热输入一般通过焊接电流、焊接速度等参数联合调控。对活性焊而言,低热输入深熔深是其最大优点,但是较高的热输入会导致焊缝热影响区塌陷,影响焊缝质量。试验结果如图3所示。

2.2 工艺参数对焊缝深宽比的影响

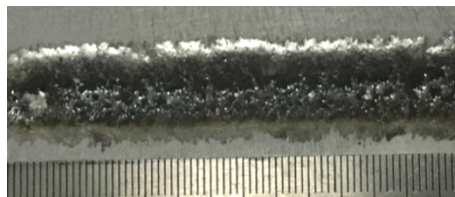
焊缝深宽比是衡量焊缝质量的重要参数之一,焊缝的全熔透也是保证接头质量的关键。通过控



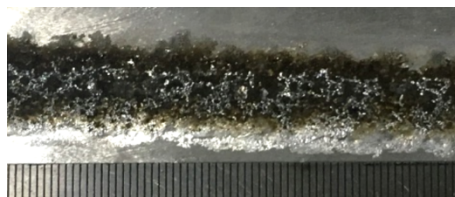
(a) 6 L/min



(b) 8 L/min



(c) 10 L/min



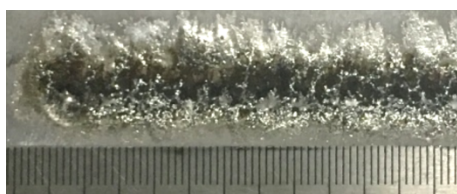
(d) 12 L/min

图2 外层气体流量对焊缝成形的影响(SiO_2 活性剂)Fig. 2 Effect of outer gas flow on weld formation (SiO_2 active agent)

制变量法,分别改变焊接电流、焊接速度、弧长、外层气体流量、粉末粒度等变量,分析PPCA-TIG焊在使用 SiO_2 和 MnCl_2 两种活性剂的情况下焊缝深宽比随工艺参数变化规律。

2.2.1 焊接电流对焊缝深宽比的影响

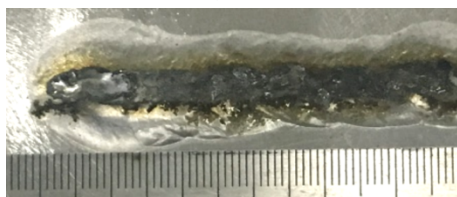
对于 SiO_2 活性剂,焊接电流为140~170 A时,焊缝深宽比随焊接电流先增加后减小,在160 A时达到最大,160 A前熔深的增加幅度始终大于熔宽,160 A时焊透,焊接电流继续增大,使得在同样焊透的情况下,熔宽增加,导致焊缝深宽比下降。对于 MnCl_2 活性剂,焊接电流为140~170 A时,焊缝深宽比随焊接电流的增加而增加,在170 A时达到最大。 SiO_2 深宽比整体大于 MnCl_2 ,试验结果与具体数值如图4和表1所示。分析认为,产生这种现象的主要原因是两种物质的标准摩尔生成焓不同。在相同大小的电流下, SiO_2 比 MnCl_2 更容易发生分解,从



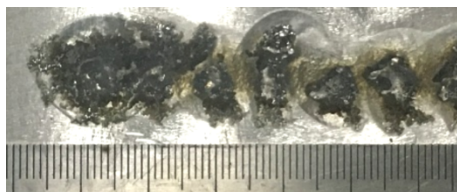
(a) 130 A, 120 mm/min



(b) 140 A, 110 mm/min



(c) 170 A, 90 mm/min



(d) 180 A, 80 mm/min

图 3 热输入对焊缝形成的影响(SiO_2 活性剂)Fig. 3 Effect of heat input on weld formation (SiO_2 active agent)

而导致 SiO_2 电弧热量高于 MnCl_2 电弧, 从而更容易使熔宽增加, 造成深宽比下降的结果。

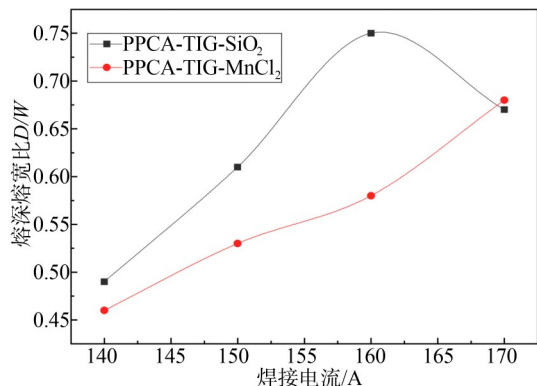


图 4 焊接电流对焊缝深宽比的影响

Fig. 4 Effect of welding current on weld penetration width ratio

2.2.2 焊接速度对焊缝深宽比的影响

当焊接速度为 90~120 mm/min 时, 随着焊接速度的增加, 焊缝深宽比都呈现出先增加后减少的趋

表 1 不同焊接电流下的焊缝深宽比

Table 1 Ratio of weld depth to width under different welding current

焊接电流/A	SiO_2	MnCl_2
140	0.480	0.460
150	0.615	0.525
160	0.750	0.575
170	0.670	0.680

势, 在 100 mm/min 时深宽比达到最大, SiO_2 深宽比整体大于 MnCl_2 。由于铝合金对热输入较敏感, 焊接速度较小时, 焊缝熔宽显著增大, 使得焊缝深宽比较低; 焊接速度较高时, 熔深的减小程度大于熔宽的减小程度, 焊缝深宽比又有下降。试验结果如图 5 和表 2 所示。

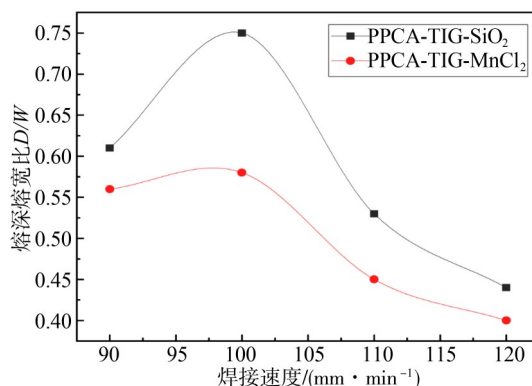


图 5 焊接速度对焊缝深宽比的影响

Fig. 5 Effect of welding speed on weld penetration and width ratio

表 2 不同焊接速度下的焊缝深宽比

Table 2 Weld depth to width ratio at different welding speeds

焊接速度/(mm·min ⁻¹)	SiO_2	MnCl_2
90	0.602	0.560
100	0.750	0.575
110	0.525	0.450
120	0.438	0.400

2.2.3 弧长对焊缝深宽比的影响

弧长(2~5 mm 区间)对焊缝深宽比的影响的焊缝深宽比如图 6 所示。对于 SiO_2 和 MnCl_2 活性剂而言, 焊缝的深宽比随着弧长的增加而减小, 深宽比在弧长为 2 mm 时达到最大。分析认为, 随着弧长的增大, 电弧在母材上熔化金属的面积也变大, 这样就造成了熔宽变大。另一方面, 阴极与阳极之间距离变大, 暴露在空气中的电弧表面积变大, 使得阳极表面热量不够集中, 造成了熔深减小。试验结果与具体数值如图 6 和表 3 所示。总体而言, 由于 SiO_2 的熔深远大于 MnCl_2 , 因此 SiO_2 的深宽均在

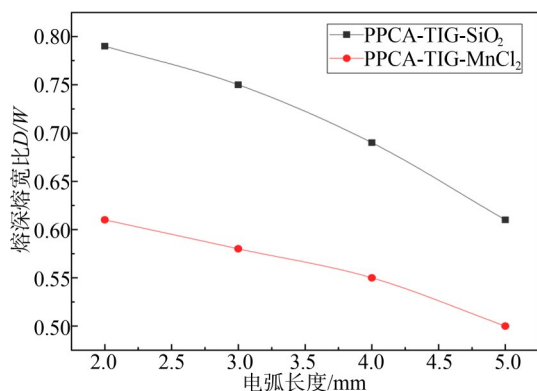


图6 弧长对焊缝深宽比的影响

Fig. 6 Effect of arc length on weld penetration and width ratio

表3 不同弧长下的焊缝深宽比

Table 3 Ratio of weld depth to width under different arc lengths

弧长/mm	SiO ₂	MnCl ₂
2	0.787	0.602
3	0.750	0.575
4	0.690	0.550
5	0.605	0.505

MnCl₂之上。

2.2.4 外层气体流量对焊缝深宽比的影响

对于两种活性剂,当外层气体流量在6~12 L/min 区间内时,随着外层气体流量增加,深宽比均呈现出增加的趋势,当气体流量为12 L/min 时深宽比达到最大。从整体角度来看, SiO₂活性剂效果更好。这归因于外层气体流量的增加直接导致活性剂的流速增加,活性剂可以更多地进入电弧。同时由于活性剂的解离以及外层气体的耗热,电弧发生了进一步的收缩,导致熔深增大,熔宽减小,即出现深宽比增加的趋势。试验结果与具体数值如图7、表4 所示。

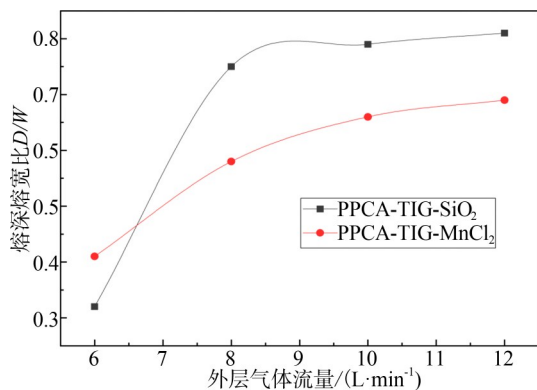


图7 外层气体流量对焊缝深宽比的影响

Fig. 7 Effect of outer gas flow rate on weld penetration width ratio

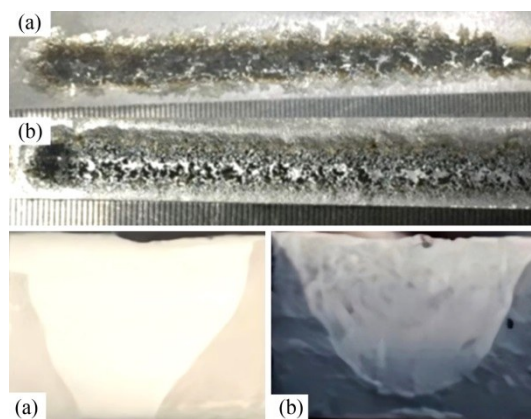
表4 不同外层气体流量下的焊缝深宽比

Table 4 Ratio of weld depth to width under different outer gas flows

外层气体流量/(L·min ⁻¹)	SiO ₂	MnCl ₂
6	0.32	0.41
8	0.75	0.58
10	0.79	0.65
12	0.81	0.69

2.2.5 粉末粒度对焊缝表面成形及焊缝深宽比的影响

对于PPCA-TIG 焊来说,粉末粒度的大小也是一项重要的参数,这对焊缝的表面成形和熔深有一定程度的影响。为了研究活性剂粉末粒度对焊缝成形的影响,本次试验中使用了两种粒度的活性剂。结果表明,活性剂粒度越小,焊缝表面越平整,且无气孔、咬边等明显缺陷,有利于改善焊缝表面成形。但是熔深增加的效果有所减弱。分析认为,随着粉末粒度增大,活性剂粉末的体积变得更小,单位质量也变得更小。在通过送粉器进入电弧后,更多的被外层气体吹至熔池外,无法很好地进入熔池,导致熔深增加效果变差。试验结果如图8、图9 所示。

图8 PPCA-TIG-SiO₂正面及横截面:(a)100~200 目;(b) 200~300 目Fig. 8 Front and cross section of PPCA-TIG-SiO₂

经过上述试验的探索,得到了表5 中的工艺参数,使用 SiO₂作为活性剂时,PPCA-TIG 焊的焊缝表面与背面成形如图10 所示。传统 TIG 焊工艺参数如表6 所示,同时在表5 和表6 的参数下,将传统 TIG 焊、使用 SiO₂为活性剂的 PPCA-TIG 焊、使用 MnCl₂为活性剂的 PPCA-TIG 焊的焊缝成形与熔深进行对比,如图11 所示。可以看出,两种活性剂均

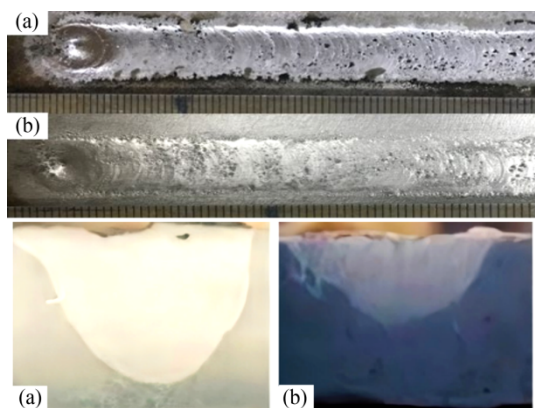


图 9 PPCA-TIG-MnCl₂ 正面及横截面: (a)100~200 目; (b) 200~300 目

Fig. 9 Front and cross section of PPCA-TIG- MnCl₂

能显著增加熔深,其中使用 SiO₂ 为活性剂的 PPCA-TIG 焊可以一次性焊透 8 mm 厚的 3003 铝合金,使用 MnCl₂ 为活性剂的 PPCA-TIG 焊焊缝熔深可达到传统 TIG 焊的 2.4 倍,活性剂 MnCl₂ 的熔深增加能力弱于活性剂 SiO₂,活性剂 MnCl₂ 焊缝表面成形较活性剂 SiO₂ 略好,活性剂 SiO₂ 焊缝表面焊渣较多,而活性剂 MnCl₂ 焊缝表面几乎无焊渣。

表 5 PPCA-TIG 焊基本工艺参数

Table 5 Process Parameters of PPCA-TIG Welding

焊接电流 /A	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	弧长 /mm	内层流量 /(L·min ⁻¹)	外层流量 /(L·min ⁻¹)	电机转速 /(r·min ⁻¹)
160	100	4	12	8	30

表 6 TIG 焊工艺参数

Table 6 Parameters of TIG Welding

焊接电流/A	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	弧长/mm	氩气流量/(L·min ⁻¹)
160	100	4	12

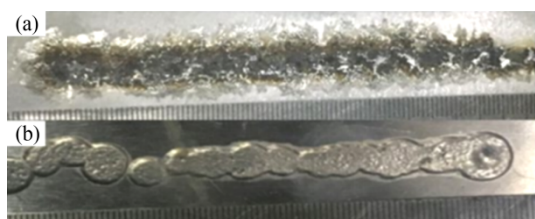


图 10 PPCA-TIG-SiO₂: (a)焊缝正面; (b)焊缝背面
Fig. 10 PPCA-TIG-SiO₂

3 结论

基于 PPCA-TIG 焊对 3003 铝合金进行了工艺试验,在基本的工艺参数下,针对不同工艺参数对

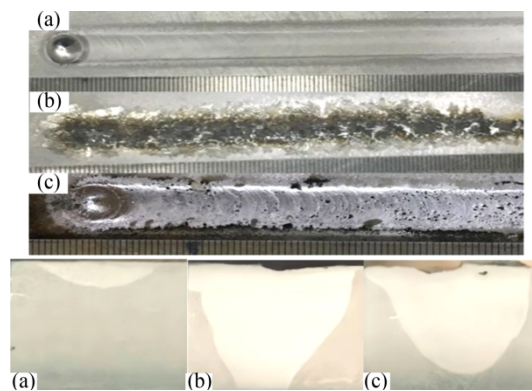


图 11 焊缝正面及焊缝横截面: (a)TIG 焊; (b)PPCA-TIG-SiO₂ 焊; (c)PPCA-TIG-MnCl₂ 焊

Fig. 11 Front and cross section of weld

焊缝成形的影响进行分析,并得出以下结论:

(1)当焊接电流 160 A,焊接速度 100 mm/min,弧长 3 mm,内层气流流量 12 L/min,外层气体流量 8 L/min,电机转速为 30 r/min 时,粉末粒度为 100~200 目时,PPCA-TIG-SiO₂ 焊可一次性焊透 8 mm 厚的 3003 铝合金,PPCA-TIG-MnCl₂ 焊熔深增加为单一 TIG 焊的 2.4 倍,且焊缝表面成形良好。

(2)基于控制变量法研究了焊接电流、焊接速度、弧长、外层气体流量对焊缝深宽比的影响规律,活性剂为 SiO₂ 时,PPCA-TIG 焊在 160 A 下将获得最大深宽比。活性剂为 MnCl₂ 时,PPCA-TIG 焊则在 170 A 下获得最大深宽比。两种活性剂均在焊接速度为 100 mm/min,弧长为 2 mm,外层气流流量为 12 L/min 下得到了最大深宽比, SiO₂ 整体效果优于 MnCl₂。此外发现,采用粉末粒度更大的活性剂可改善焊缝表面成形,但熔深增加将减小。

参考文献:

- [1] 牛志伟,黄继华,许方钊,等.铝及铝合金钎焊用硬钎料的研究现状与展望[J].中国有色金属学报,2016,26(01):77-87.
NIU Z W, HUANG J H, XU F Z, et al. Research status and Prospect of Brazing filler Metal for Aluminum and Aluminum Alloys[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2016, 26(01): 77-87.
- [2] Gurevich S M, Zamkov V N, Kushnirenko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by argon tungsten arc process[J]. Automat Weld, 1965, 18(9): 1-5.
- [3] Vidyarthi R S, Dwivedi D K. Activating flux tungste-

- n inert gas welding for enhanced weld penetration[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 4(22): 211-228.
- [4] Fujii H S, Toyoyuki L, Shanping N, et al. Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 495:296-303.
- [5] 胡明华, 张德. 铝合金支架焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(11):31-33.
- HU M H, ZHANG D. Research on Welding Technology of Aluminum Alloy Support[J]. Welding Technology, 2018, 47(11):31-33.
- [6] 刘瑞琳, 黄勇, 邓有忠, 等. 工艺参数对GPCA-TIG焊缝成形的影响[J]. 电焊机, 2014, 44(07):38-41.
- LIU R L, HUANG Y, DENG Y Z, et al. Influence of Process Parameters on GPCA-TIG Weld Formation[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(07):38-41.
- [7] 黄勇, 许杭. SiO₂在粉末熔池耦合活性TIG焊熔池表面的过渡行为[J]. 电焊机, 2022, 52(12):17-27.
- HUANG Y, XU H. Transfer Behavior of SiO₂ on the Surface of Powder Pool Coupled Activating TIG Welding Pool[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(12): 17-27.
- [8] 赵文强. 不锈钢粉末熔池耦合活性TIG焊方法研究[D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2017: 17-19.
- ZHAO W Q. Research on coupling active TIG welding method of stainless steel powder melt pool[D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2017:17-19.
- [9] 樊丁, 邵锋, 黄勇. 活性剂对铝合金直流正接A-TIG焊熔深的影响[J]. 焊接技术, 2007, 36(2):20-22.
- FAN D, SHAO F, HAUNG Y. Effects of activating fluxes on DC A-TIG welding penetration of aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2007, 36(2):20-22.
- [10] 雷小伟, 马照伟, 陈利阳, 等. 不同CMT焊接工艺对5083铝合金焊缝成形及性能的影响[J]. 电焊机, 2022, 52(9):39-44.
- LEI X W, MA Z W, CHEN L Y, et al. Effect of Different Cold Metal Transfer Welding Technology on Weld Forming and Properties of 5083 Aluminum Alloy[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(9): 39-44.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接 27 页

- 74-77.
- LIANG J Z, HUANG F X, JIN H C, et al. Research on pipeline girth welding joint with copper infiltration and copper back-up shoes root welding[J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(5):74-77.
- [3] Hannerz N.E. Review on the influence of copper content on weld metal properties. Welding in the World, 1988, 26(11-12):326-339.
- [4] 李少兵, 张俊旭. 铜在高强度合金钢及焊缝金属中的作用[J]. 材料开发与应用, 2001, 16(6):39-42.
- LI S B, ZHANG J X. Effect of copper in high-strength alloy steels and weld metals[J]. Material development and application, 2001, 16(6): 39-42.
- [5] Wada H, Houbaert Y. Strengthening effects of copper in steels. Copper in Steel, 1983, 25-27.
- [6] Renn R, Roberts S.B. The effect of copper pick-up in low strength ferritic MIG welding deposits. Welding Journal, 1985, 64(7):42-48.
- [7] Wolstenholme D A. Effect of copper in the ferritic steel weld metals. DOC, XII-984-86 of the IIW.
- [8] 曹茂盛. 材料科学基础[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [9] 王叶, 熊征. 铜含量对焊缝组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011(17):165-166.
- WANG Y, XIONG Z. Effect of Copper Content on Microstructure and Properties of Welds[J]. Hot Working Technology, 2011(17):165-166.
- [10] 毛卫民, 任慧平, 余永宁. 结构钢中含铜析出相的时效强化作用[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(2):1-4.
- MAO W M, REN H P, YU Y N. Ageing strengthening effect of precipitates containing copper in structural steels [J]. Transactions of Materials and Heat Treat, 2004, 25(2):1-4.
- [11] DNV-OS-F101 Submarine pipeline systems[S]. Norway, 2013.
- [12] NACE, TM 0177 Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments[S], USA, 2005.
- [13] ASTM A370, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product[S]. USA. 2015.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>