

Research on Welding Properties of Al-Mg Alloy Welding Wire Containing In

Baoyu Hou¹, Yanjun Zhao^{2*}, Chengyun Zhou¹, Mingkuan Xie¹, Zhiliu Hu¹

¹School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

²Guangxi Key Laboratory of Processing for Nonferrous Metal and Featured Materials, Guangxi University, Nanning Guangxi

Email: gxuhby@163.com, *zhaoyanjun71@163.com

Received: Feb. 21st, 2019; accepted: Mar. 7th, 2019; published: Mar. 15th, 2019

Abstract

In this research, the weld ability of 5052 aluminum alloy sheet using MIG and an Al-Mg-In welding wire was studied. The results show that the welded joint strength of Al-5.4 Mg-0.13 In welding wire is almost the same as ER5356 welding wire. At the welding conditions of 90 A and 40 mm/min, tensile strength of welded joint of Al-5.4 Mg-0.13 In welding wire and ER5356 welding wire is 204.7 MPa and 202.9 MPa respectively. The above tensile strength reaches 86.9% and 86.1% of the base metal's tensile strength respectively. The spreading areas of Al-5.4 Mg-0.13 In welding wire are distinctly better than that of traditional ER5356 welding wire, which means the former has good wettability.

Keywords

Al-Mg Alloy, In, Metal Inert Gas Welding (MIG), 5052 Aluminum Alloy, ER5356 Welding Wire, Strength

含In的Al-Mg合金焊丝焊接性能研究

侯宝昱¹, 赵艳君^{2*}, 周成云¹, 谢明款¹, 胡治流¹

¹广西大学, 资源环境与材料学院, 广西 南宁

²广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西 南宁

Email: gxuhby@163.com, *zhaoyanjun71@163.com

收稿日期: 2019年2月21日; 录用日期: 2019年3月7日; 发布日期: 2019年3月15日

摘要

本文研究了Al-Mg-In焊丝, 用MIG方法焊接5052铝合金板时所得焊接接头的力学性能, 并与ER5356焊

*通讯作者。

丝进行了对比。结果表明在相同的MIG焊接工艺参数下,两种焊丝所得焊缝的强度相差不大。当焊接电流为90 A,焊接速度为40 mm/min时,用Al-5.4 Mg-0.13 In焊丝焊接时所得焊接接头的抗拉强度为204.7 MPa,达到母材的86.9%;而用ER5356焊丝时,则为202.9 MPa,达到母材的86.1%。在相同的MIG焊接工艺参数下,用Al-5.4 Mg-0.13 In焊丝的焊接所得焊缝的铺展面积明显大于ER5356焊丝,Al-5.4 Mg-0.13 In焊丝熔池具有好的流动性。

关键词

Al-Mg合金, 铟(In), MIG焊接法, 5052铝合金, ER5356焊条, 强度

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着节能减排和绿色出行的推行,铝合金作为一种环境友好型材料得到了高速的发展。在铝合金使用过程中,焊接技术是重要的连接技术,往往决定了铝合金产品的服役性能及使用寿命[1][2][3]。铝镁合金焊丝在焊接过程中容易产生化学元素的烧损、气孔和夹杂等缺陷而使得焊接强度不足,高强铝合金的发展也对焊接强度提出了更高的要求,如何增加焊接接头的强度,以及提高抗应力腐蚀性能和耐蚀性,是一个值得研究探索的问题[4][5][6][7]。

铝镁合金焊丝典型的牌号有 ER5356、ER4043 和 ER5083 等,其中 ER5356 焊丝是使用最为广泛的[8][9][10]。对于提高铝合金焊接接头性能的相关研究已有很多,主要集中于添加合金元素、热处理,焊接工艺等方面[11][12][13]。稀土金属能够显著提高铝合金的综合性能,在焊丝中添加稀土元素有望提高焊接接头性能和耐蚀性[14][15][16]。将金属 In 添加在 Al-Mg 合金焊丝中可以改善焊接熔池液滴的润湿性,具有焊缝成形性好和少飞溅的优点,该类研究国内外鲜有报道。本文研究了一种 Al-Mg-In 焊丝,采用 MIG 方法以 5052 铝合金作为母材进行焊接时所得到的焊接接头的性能,并与市面上常用的 ER5356 焊丝进行对比,探讨其焊接接头的组织及性能的差异。

2. 试验材料及方法

试验原料为 99.7%工业纯铝、99.9%工业纯镁、Al-10 Mn 中间合金、金属 Ce 和金属 In。使用中频感应熔炼炉进行熔炼,浇注成棒状铸锭,铸锭的化学成分如表 1 所示,下文用 Al-5.4 Mg-0.13 In 表示。

Table 1. Chemical composition of Al-Mg-In welding wire

表 1. 制备的 Al-Mg-In 焊丝的化学成分(wt.%)

元素	Mg	In	Ce	Mn	Si	Fe	Ti	Al
含量(wt.%)	5.4	0.13	0.10	0.599	0.05	0.15	0.10	余量

棒状铸锭经过均匀化热处理处理后,再进行挤压、拉拔减径,最后刮皮提高表面质量后得到直径为 1.2 mm 的焊丝。

焊接母材为 3 mm 厚的 5052 铝合金板材,采用自动化熔化极惰性气体保护焊(MIG)方法,单面焊双面成型。焊缝间隙为 1 mm。焊接电流选择 75 A~90 A,焊接速度为 40 mm/min。焊接过程通入纯度为 99.9%

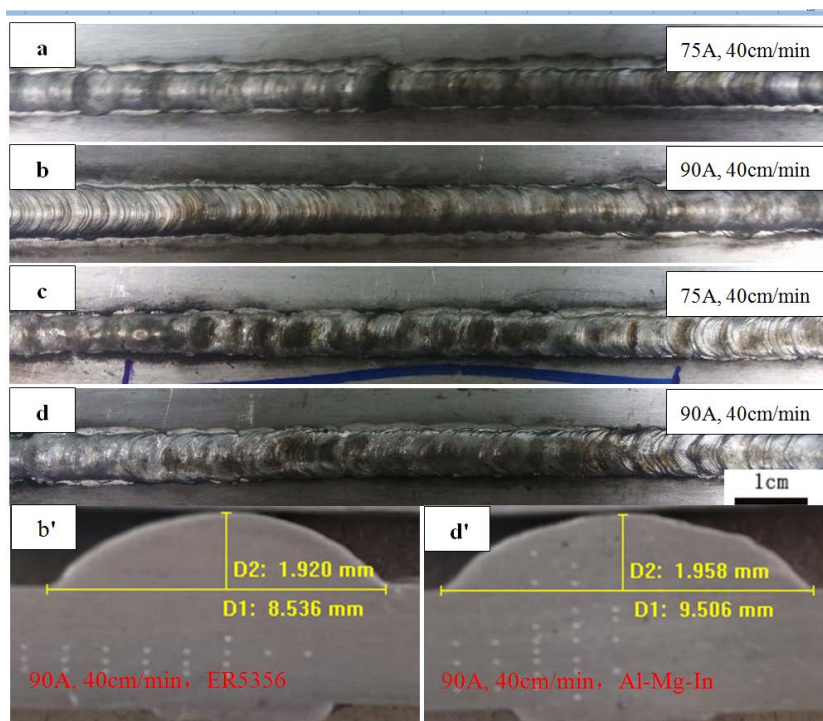
的氩气(Ar)作为保护气体, 气体流量为 15 L/min, 脉冲频率设置为 60 Hz。

对 Al-Mg-In 焊丝焊接接头横截面进行了显微硬度分布测试。载荷力为 1 Kgf, 加载时间为 15 s, 以焊缝中心为基点, 间距为 1 mm 进行打点测试显微硬度。按照国标 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验》进行 Al-Mg-In 焊丝焊接件和 ER5356 焊丝焊接件的抗拉强度测试, 拉伸试样标距为 38 mm, 宽度为 12.5 mm, 厚度为 3 mm。焊缝垂直于标距长度方向, 位于标距中心。

3. 试验结果与分析

3.1. 不同焊接电流下焊缝的宏观形貌

外购 ER5356 焊丝和自制 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝在不同焊接电流下焊缝的宏观形貌如图 1 所示。用 ER5356 焊丝焊接所得的焊缝外观平整致密, 呈鱼鳞状; 当焊接速度为 40 cm/min, 随着焊接电流从 75 A 增大到 90 A, 焊接热输入增大, 焊缝区域的熔宽变大。在相同热输入条件下, Al-Mg-In 焊丝所得焊缝的铺展面积明显大于 ER5356 焊丝, 见图 1(b')和图 1(d'), 但前者表面光泽度较差, 有较多黑色物质, 这可能是由于 Al-Mg-In 焊丝是在实验室条件下制备的, 其熔体除杂、除气等铸造工艺不到位而使得夹杂较多, 在电弧加热时生成较多的氧化物所致。



(a) (b) ER5356 焊丝, 图 b' 为图 (b) 所示焊缝的典型横截面; (c) (d) Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝, 图 d' 为图 (d) 所示焊缝的典型横截面

Figure 1. Macroscopic morphology of welding zone at different welding currents

图 1. 不同焊接电流下焊缝的宏观形貌及焊缝的横截面

3.2. 焊接接头的显微组织

图 2 为用制备的 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接 5052 铝合金板材所得焊接接头的显微组织。母材(BM)的组织比较均匀, 为等轴晶。焊接区域分为三个部分: 焊缝区(WZ)、熔合区(FZ)和热影响区(HAZ), 当焊接电流为 75 A 和 90 A, 焊缝区为树枝晶, 在等轴晶与树枝晶之间为熔合区和热影响区, 但各区域之间

的界限并不明显。焊缝区的树枝晶是由于焊丝熔化后迅速冷却，造成了非平衡的凝固；熔合区和热影响区的形貌处于等轴晶和树枝晶之间，是由于母材和熔池金属的共同影响。由图 2 可知，焊接电流从 75 A 增大到 90 A 而其它的焊接工艺不变时，焊接热输入增大，母材受到热影响的区域扩大。

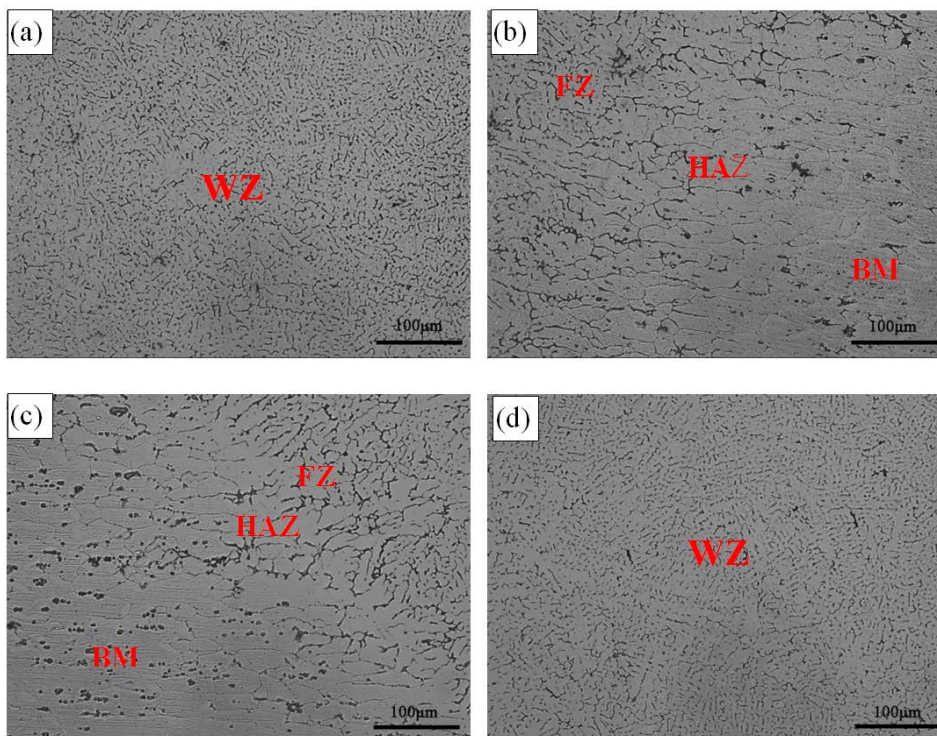


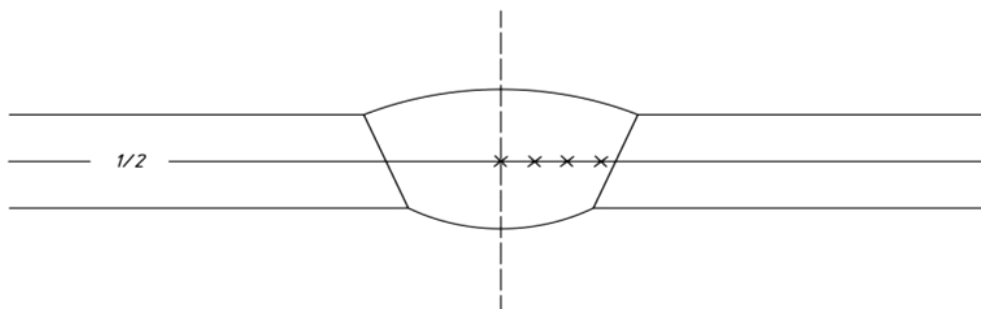
Figure 2. Microstructure of welded joints of Al-5.4 Mg-0.13 In welding wire at different welding currents; (a) WZ, 75 A; (b) FZ and HAZ, 75 A; (c) FZ and HAZ, 90 A; (d) WZ, 90 A

图 2. Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝在不同焊接电流时所得焊接接头的显微组织；(a)焊接电流为 75 A 的焊缝区；(b) 焊接电流为 75 A 的熔合区与热影响区；(c)焊接电流为 90 A 的熔合区与热影响区；(d)焊接电流为 90 A 的焊缝区

3.3. 焊接接头的力学性能

3.3.1. 焊接接头的显微硬度

图 3 是不同焊接电流下焊接接头截面的维氏硬度分布，从焊缝中心到热影响区再到母材，显微硬度首先下降，在熔合区达到了最低的显微硬度，再沿远离焊缝中心方向显微硬度逐渐上升，最后趋于稳定，达到母材 5052 的硬度(约为 70 HV)。显微硬度分布的总体趋势为母材区 > 焊缝区 > 热影响区 > 熔合区。



(a) 显微硬度在焊缝区域取点位置示意图

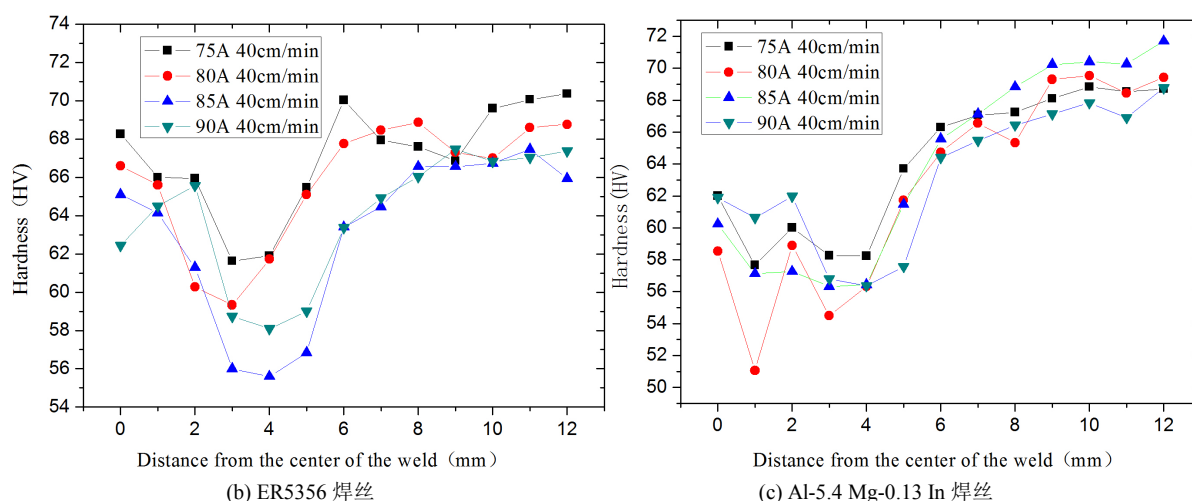


Figure 3. Microhardness of welded joints at different welding currents
图 3. 两种焊丝在不同焊接电流下所得焊接接头的显微硬度

对 ER5356 焊丝而言(见图 3(b)), 焊接接头的焊缝区随着焊接电流从 75 A 增加到 90 A, 其接头软化程度增加, 焊缝中心区显微维氏硬度从 68.27 HV 降低到 62.43 HV, 接近母材区域的硬度趋近于 67~70 HV, 焊接接头区域的显微硬度相比母材显微硬度降低了大约 8.0 HV, 硬度最低值出现在熔合区和热影响区的临界处。随着焊接电流的增大, 热输入量增大, 焊缝区宽度增大; 同时硬度最低值出现的位置也不一致, 大概在距离焊缝中心 3~5 mm 处。焊缝熔池区凝固以后的硬度低、塑性较差, 主要是因为热输入量大造成镁元素的烧损, 冷却后焊缝中不能析出足够多的 Al_3Mg_2 等弥散强化相。对自制 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝而言(见图 3(c)), 焊接接头的硬度分布区域与图 3(b)相对应, 焊缝区硬度最小值为 51 HV, 低于 ER5356 焊丝。这是因为 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝是在实验室制备的, 焊丝本身的气孔、氧化皮夹杂、组织不均匀等缺陷较多导致焊接缺陷较多, 也使得热输入量对硬度的影响规律与 ER5356 焊丝焊接接头相比不明显。

3.3.2. 焊接接头的拉伸性能

5052 铝合金用不同的焊丝焊接时所得接头的拉伸性能如表 2 所示。对 ER5356 焊丝而言, 焊接速度为 40 cm/min 时, 焊接电流从 75 A 增大到 90 A, 随着热输入量逐渐增大, 抗拉强度先增大后减小。这是因为热输入量过大, 表面会有大量的黑色沉积物, 焊缝区晶粒粗大, 以及热影响区受热过多, 使得焊接接头局部发生过热, 温度远高于再结晶温度, 形成一个过时效区, 晶粒组织粗大, 强化相也会被溶解, 从而降低力学性能。ER5356 焊丝的焊接接头抗拉强度都达到了母材的 83% 以上。ER5356 焊丝最佳焊接工艺是焊接电流为 80 A, 焊接速度为 40 cm/min 时, 焊接接头最大抗拉强度为 214.2 MPa, 延伸率为 13.9%, 强度达到母材的 90.86%。自制 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝当焊接电流为 90 A, 焊接速度为 40 cm/min 时, 焊接接头的抗拉强度为约 204.7 MPa, 达到母材的 87%, 与 ER5356 焊丝焊接接头的最大抗拉强度相差不大。ER5356 焊丝的断裂位置多在热影响区, 而 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝的断裂位置多在焊缝区。

3.4. Al-Mg-In 系焊丝焊接接头断口形貌

图 4 为用 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接 5052 母材时所得接头断口的形貌。当焊接电流为 75 A 时, 为韧性断口, 韧窝较深较大, 但在韧窝的窝底有较多的颗粒状的裂纹源; 当焊接电流为 85 A 时, 也为韧性断口, 韧窝较深较小, 塑性较好; 焊接电流为 90 A 时, 韧窝变得较浅, 塑性较差。上述断口的分布规律与表 2 中用 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接 5052 母材时所得到的抗拉强度相一致。

Table 2. Tensile properties of welded joints of 5052 aluminum alloy using different welding wires
表 2. 5052 铝合金用两种不同焊丝焊接时所得焊接接头的拉伸性能

焊丝	焊接电流/A	焊接速度/cm/min	抗拉强度/MPa	达到母材强度百分比/%	断裂位置
ER5356 焊丝	75	40	197.5	83.8	热影响区
	80	40	214.2	90.9	热影响区
	85	40	204.3	86.7	热影响区
	90	40	202.9	86.1	热影响区
Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝	75	40	203.5	86.4	焊缝区
	80	40	193.7	82.2	焊缝区
	85	40	162.4	68.9	焊缝区
	90	40	204.7	86.9	热影响区

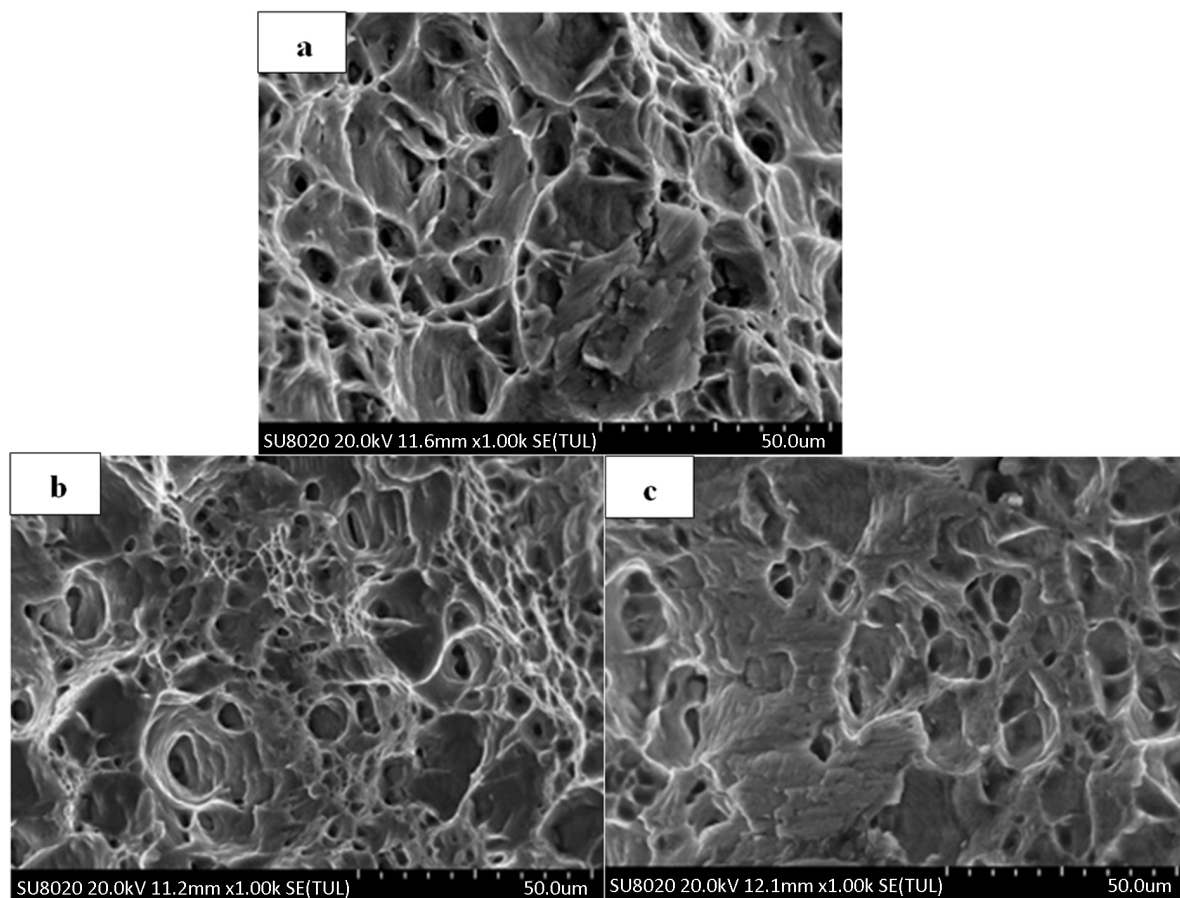


Figure 4. SEM of tensile fracture of welded joints using Al-5.4 Mg-0.13 In welding wire; (a) 75 A, 40 cm/min; (b) 85 A, 40 cm/min; (c) 90 A, 40 cm/min

图 4. Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接 5052 铝合金所得拉伸断口的 SEM; (a) 75 A、40 cm/min; (b) 85 A、40 cm/min; (c) 90 A、40 cm/min

4. 结论

1) Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接接头抗拉强度与传统 ER5356 焊丝焊接接头强度相差不大。当焊接电流

为 90 A, 焊接速度为 40 cm/min 时, 用自制 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接所得接头的抗拉强度约为 204.7 MPa, 达到母材的 86.9%。而用 ER5356 焊丝时, 则为 202.9 MPa, 达到母材的 86.1%。

2) 在相同的 MIG 焊接工艺参数下, 用 Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝焊接所得焊缝的铺展面积明显大于 ER5356 焊丝, Al-5.4 Mg-0.13 In 焊丝具有好的润湿性。

基金项目

广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA17202011-1); 广西有色金属及特色材料加工重点实验室资助项目(GXYSSF1809)。

参考文献

- [1] Peng, L., Nie, F., Dong, H., *et al.* (2018) Pulse MIG Welding of 6061-T6/A356-T6 Aluminum Alloy Dissimilar T-Joint. *Journal of Materials Engineering & Performance*, **27**, 4760-4769. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3528-y>
- [2] Cai, D.T., Han, S.G., Zheng, S.D., *et al.* (2016) Plasma-MIG Hybrid Welding Process of 5083 Marine Aluminum Alloy. *Materials Science Forum*, **850**, 519-525. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.850.519>
- [3] Wang, B., Xue, S.B., Chao-Li, M.A., *et al.* (2017) Effect of Combinative Addition of Ti and Sr on Modification of AA4043 Welding Wire and Mechanical Properties of AA6082 Welded by TIG Welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **27**, 272-281. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60031-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60031-1)
- [4] 宋友宝, 李龙, 吕金明, 等. 7xxx 系铝合金焊接研究现状与展望[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 492-501.
- [5] 黄敏, 刘铭, 张坤, 等. 铝及铝合金焊丝的研究与发展现状[J]. 有色金属加工, 2008, 37(2): 9-12.
- [6] Vargas, J.A., Torres, J.E., Pacheco, J.A., *et al.* (2013) Analysis of Heat Input Effect on the Mechanical Properties of Al-6061-T6 Alloy Weld Joints. *Materials & Design* (1980-2015), **52**, 556-564. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.081>
- [7] 赵耀邦, 雷正龙, 苗玉刚, 等. 铝合金激光电弧双面焊接特性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603007.
- [8] 张志勇, 田志凌, 彭云. 铝合金先进焊接工艺[J]. 焊接, 2003(7): 5-9.
- [9] 徐振, 贾品峰, 侯忠霖, 等. Mg 质量分数对 ER5356 焊丝焊后接头组织性能的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2017, 40(2): 112-115.
- [10] NurAzida, C.L., Jalar, A., Othman, N.K., *et al.* (2011) Oxidation Effect of Welded AA6061 Al Alloy Using ER5356 Filler Metal. *Applied Mechanics and Materials*, **66-68**, 42-45. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.66-68.42>
- [11] Pathak, N., Bandyopadhyay, K., Sarangi, M., *et al.* (2013) Microstructure and Mechanical Performance of Friction Stir Spot-Welded Aluminum-5754 Sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **22**, 131-144. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0244-x>
- [12] 王博, 薛松柏, 马超力, 等. 复合添加 Ti 和 Sr 对 AA4043 铝合金焊丝变质和 AA6082TIG 焊接接头力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2017, 27(27): 281-290.
- [13] Zhang, Z. (2011) Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded 5052 Aluminum Alloy. *Materials & Design*, **32**, 4461-4470. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.058>
- [14] 陈亮, 钟广军, 茅寅敏. 铝合金焊接焊缝气孔产生的原因分析及预防措施[J]. 造船技术, 2015(3): 79-84.
- [15] 张文毓. 铝合金焊接技术研究进展[J]. 轻金属, 2010(4): 55-58.
- [16] 胡国强, 刘静安. 交通运输工业用铝材的开发与应用[J]. 铝加工, 2002, 25(2): 1-5.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ms@hanspub.org