

焊接电流对 5052 铝合金 TIG 焊接 接头组织与性能的影响

刘敏¹, 赵艳君^{*1,2}, 刘亚红¹, 戴青松³, 吕游¹, 梁岸¹

- (1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004;
2. 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西柳州银海铝业股份有限公司广西, 广西 柳州 545006)

摘要:为研究焊接电流对 5052 铝合金非熔化极惰性气体保护焊(TIG)焊接质量的影响,对 100~120 A 电流下 TIG 焊接所得焊接接头的显微组织、力学性能和耐腐蚀性进行了探讨。结果表明,当焊接电流从 100 A 增加到 120 A 时,5052 铝合金 TIG 焊接接头的强度随电流的增大而增大,塑性随电流的增大而减小;当电流为 115 A 时所得接头的综合力学性能最好,此时抗拉强度为 212.1 MPa,达到母材抗拉强度的 90.8%,断面收缩率为 28.9%,比母材 50.3% 的断面收缩率降低约一半。随着焊接电流的增大,腐蚀的类型从点蚀为主转变到以晶间腐蚀为主,但腐蚀电流的变化规律不明显。

关键词:钨极氩弧焊;焊接电流;力学性能;盐雾腐蚀

中图分类号: TG444⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-7445(2019)03-0891-08

Effect of welding currents on microstructure and properties of TIG welded joint of 5052 aluminum alloy

LIU Min¹, ZHAO Yan-jun^{*1,2}, LIU Ya-hong¹, DAI Qing-song³,
LYU You¹, LIANG-An¹

- (1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Processing for Nonferrous Metal and Featured Materials, Nanning 530004, China;
3. Guangxi Liuzhou Yin Hai Aluminum Co., Ltd, Liuzhou 545006, China)

Abstract: To investigate the influence of welding current on the welding quality of the TIG welding of 5052 aluminum alloy, the mechanical properties, microstructure and corrosion resistance of the welded joints obtained by different currents which array from 100 A to 120 A were discussed. The results showed that when the welding current is 100~115 A, with the increases of welding current, the strength of the welded joint increases, and the corrosion tendency decreases, but the plasticity

收稿日期: 2018-03-27; 修订日期: 2018-06-12

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项目(GXYSSF1809); 广西科学研究与技术开发项目(桂科重 14122001-3)

通讯作者: 赵艳君(1971—), 女, 辽宁葫芦岛人, 广西大学副教授; E-mail: zhaoyan jun71@163.com。

引文格式: 刘敏, 赵艳君, 刘亚红, 等. 焊接电流对 5052 铝合金 TIG 焊接接头组织与性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3): 891-898.

decreases. When the current is 115 A, the joint possesses the best comprehensive mechanical performance, and the tensile strength is 212.1 MPa, reaching 90.8 % of the tensile strength of the base metal, and the reduction of area is 28.9 % , about half of which is lower than the 50.3 % of the base metal. With the increase of welding current, the corrosion type changed from pitting corrosion to intercrystalline corrosion, but the change rule of corrosion current was not obvious.

Key words: tungsten inert gas welding (TIG); welding current; mechanical property; salt spray corrosion

0 引言

5052 铝合金属于 Al-Mg 系铝合金,由于其疲劳性能及焊接性能好,又耐海洋大气腐蚀,因而作为焊接结构件广泛应用于船舶^[1-2]、航空^[3-4]和车辆^[5]等领域。在众多铝合金焊接方法中,属以焊接质量佳为突出优点的搅拌摩擦焊^[6-9]和激光焊接^[10-13]的研究最多。然而,搅拌摩擦焊仅限于回转件的焊接,而激光焊接对高反射和高导热材料(如铝、铜)存在较高的能量耦合壁垒^[14],焊接时对激光器的输出功率和光束质量要求极高。因此,基于实用性和成本的考量,人们仍然有必要研究上述两种焊接方法外的其余焊接方法。

非熔化极惰性气体钨极保护焊(tungsten inert gas welding, TIG)具有电弧稳定、易于控制、无飞溅、噪声小、焊接质量高、对焊接场合要求低以及成本低等优点^[15]。若能得出 5052 铝合金 TIG 焊接过程中的工艺参数对焊接质量的影响规律,找到适合的焊接工艺参数,就可将 TIG 焊接作为 5052 铝合金在不适合搅拌摩擦焊和激光焊接的场合使用。

TIG 焊接工艺中,坡口形式、夹具和垫板设计、焊接参数等直接影响焊缝成形、焊接质量和焊接接头的强度,其中,以调整焊接参数最为重要;在焊接参数中,焊接电流又起主导作用。Kumar 等^[16]研究了 AA 5456 铝合金板脉冲钨极氩弧焊焊接峰值电流、基值电流以及焊接速度对焊接质量的影响,发现焊接电流对熔深影响较大:电流过大,工件容易烧穿;电流过小,则可能产生未焊透现象。徐正^[17]使用 TIG 焊接方法在 160 A 和 200 A 的电流下对 7075 铝板进行了焊接,发现其抗拉强度仅有 219 MPa 和 188 MPa,并且他没有进行较低电流的焊接研究。王锡岭^[18]研究了焊接电流为 170 A 和 180 A 的 TIG 焊接工艺;廖传清等^[19]研究了焊接电流为 250 A 的 TIG 焊接工艺;王培吉等^[20]研究的 TIG 焊接电流更高,为 300 A。上述文献[18-20]只研究了 TIG 焊接单一的电流参数,没有进行不同电流下的 TIG 焊接研究;并且以 7 系铝合金板材为母体所得的焊接接头强度较低,只达到了母材的 40 % ~ 50 %^[18-20]。

本文研究了焊接电流在 100 ~ 120 A 变化时,3 mm 厚的 5052 铝合金板材采用 TIG 焊接时焊接电流对焊接接头力学性能和耐腐蚀性能的影响,得出该合金 TIG 焊接电流对组织性能的影响规律,是对小电流范围内 TIG 焊接铝合金薄板工艺的一个补充,为工程实践提供参考。

1 实验材料与方法

焊接母材为 5052 铝合金,所用焊丝为 ER 5356,成分见表 1。母材切割成 100 mm×80 mm×3 mm 的焊板,焊前用丙酮和酒精擦拭去除油污和水分,再用 Φ0.15 mm 的不锈钢丝刷子刷,直至露出金属光泽。清理后的焊板在 4 h 内用 YC-300 WX 交直流氩弧焊机,采用 TIG 工艺进行双面焊接。接头及坡口尺寸如图 1 所示。焊丝直径为 2.4 mm,焊接速度为 3 mm/s,氩气流量为 11 L/min,焊接电压为 17.5 V,焊接电流为 100 ~ 120 A。

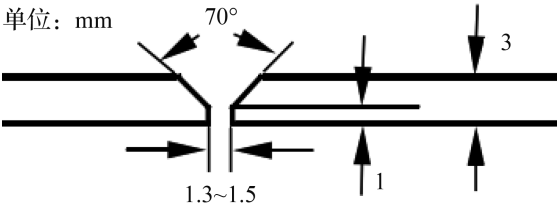


图 1 焊接接头形式

Fig. 1 Type of the welding joint

表 1 5052 铝合金和 ER 5356 焊丝成份

Tab. 1 Chemical compositions of 5052 aluminum alloy and ER 5356 welding wire wt %

材料	Mg	Mn	Cr	Ti	Fe	Si	Cu	Zn	Be	Al
5052	2.4	0.06	0.17	— ¹	0.2	0.12	0.08	0.08	—	余量
ER 5356	5.00	0.12	0.10	0.13	0.30	0.25	0.10	0.10	0.0003	余量

注 1:—表示无此元素。

焊后沿焊缝横截面取金相试样,经研磨、抛光和 Keller 试剂腐蚀后,用 DMC 4000/MC 170 光学显微镜观察组织,用 HXD-1000/LCD 维氏硬度计测显微硬度。

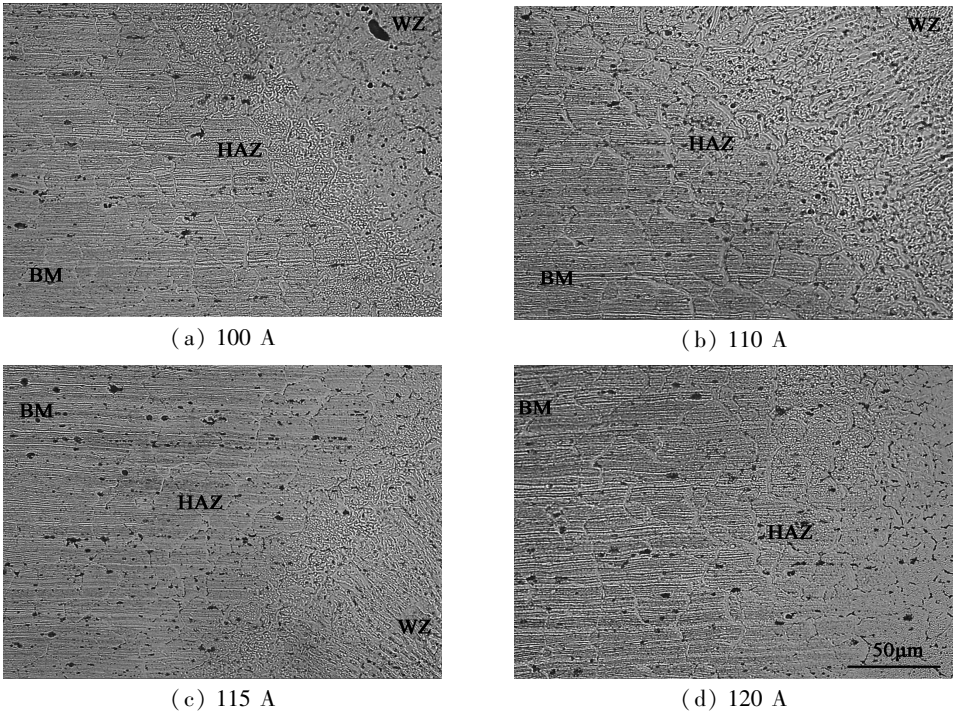
电化学腐蚀试样为 Φ14 mm×3 mm 的圆片,用水砂纸磨至 5 000 目。实验用 PS-286 C 电化学工作站,辅助电极为 Pt 片,参比电极为饱和甘汞电极,电解液为 3.5 % NaCl 水溶液,电位测量范围为-1 200 ~ 400 mV,电位扫描速度为 60 mV/min。盐雾腐蚀按照《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》(GB/T 10125—2012)进行,用 YFX-150 型盐雾腐蚀机,样品尺寸为 20 mm×10 mm×3 mm 的长方体,用水砂纸磨至 2 000 目,称重时精确到 0.000 1 mg。腐蚀时,压力桶温度为 47 ℃,实验温度为 35 ℃,喷雾压力为 0.6 MPa,腐蚀时长 168 h,期间每隔 24 h 取样,冲洗吹干后称重。

拉伸试验按照《焊接接头拉伸试验方法》(GB/T 2651—2008),在 WDW-1000 电子万能试验机上进行,横梁移动速率为3 mm/min。用日立 SU 8020 扫描电镜观察断口形貌。

2 结果与分析

2.1 焊接接头的显微组织

100 ~ 120 A 电流下 TIG 焊接时焊接接头的显微组织见图 2,当焊接电流在 100 ~ 120 A 变化时,5052 焊接接头的显微组织主要由焊缝区、熔合区和热影响区组成,但各区域之间的界限并不明显。当焊接电流分别为 100 A、110 A 和 115 A 时,基体为等轴晶,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。随着焊接电流从100A增大到115A时,熔合区和热影响区域变大,该区域的形貌



WZ 表示焊缝区;HAZ 表示热影响区;BM 表示母材区

图 2 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的显微组织

Fig. 2 Microstructure of TIG joints with welding currents of 100 ~ 120 A

处于等轴晶和树枝晶之间,偏向于较细的树枝晶;当焊接电流为 120 A 时,热影响区更大并且组织也较粗大,这是由于焊接电流较大,焊接热输入也增大,导致热影响区增大和组织粗大。

2.2 焊接接头的力学性能

表 2 为 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的力学性能。接头的断面收缩率随着焊接电流增大而减小,表明接头塑性随焊接电流增大而下降。随着焊接电流从 100 A 升高至 115 A,接头的抗拉强度由 160.4 MPa 逐渐升高至 212.1 MPa,达到母材抗拉强度的 90.8 %。其中,100 ~ 110 A 时接头抗拉强度对焊接电流变化最敏感,抗拉强度从 160.4 MPa 增至 201.9 MPa。当焊接电流提高到 120 A 后,接头抗拉强度为 210.2 MPa,与焊接电流为 115 A 的接头相比几乎无变化。

表 2 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of TIG joints with welding currents of 100 ~ 120 A

焊接电流 /A	抗拉强度 /MPa	占母材强度的百分比/%	断面收缩率/%
母材	233.5		50.5
100	160.4	68.7	46.8
110	201.9	86.5	31.9
115	212.1	90.8	28.9
120	210.2	90.0	16.3

焊接电流过小,熔池温度过低凝固速度加快,熔池中的溶质来不及扩散容易发生偏析,降低了焊接接头的强度;当焊接电流增大,偏析程度减小,力学性能也会得到改善。但焊接电流增大,会使焊缝区晶粒粗大,热影响区受热高于再结晶温度发生“软化”,也会影响接头的强度^[21-22]。这也是焊接电流从 115 A 增大到 120 A 时,接头抗拉强度不再增加的原因。

100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的显微硬度如图 3 所示,熔合区的 HV 最高,为 63 ~ 68;基体的 HV 为 60 ~ 63;焊缝区的 HV 为 50 ~ 55;在接近基体的区域出现了一个“软化”区,HV 最低为 51,称为热影响区。这四个区域与图 2 的显微组织相一致:基体为等轴晶,焊缝区为树枝晶,以及等轴晶和树枝晶之间的混合区域。硬度在焊缝区最低,在熔合区上升至最高,在热影响区出现“软化”后随着离焊缝中心距离的增加逐渐上升趋于母材硬度(63 HV)。在焊缝区显微硬度大小的顺序为 115 A>110 A>100 A>120 A;熔合区显微硬度大小的顺序为 115 A>100 A>120 A>110 A;热影响区显微硬度大小的顺序为 115 A>120 A>110 A>100 A。当焊接电流为 115 A 时 TIG 焊接接头的焊缝区、熔合区和热影响区的硬度均最高。

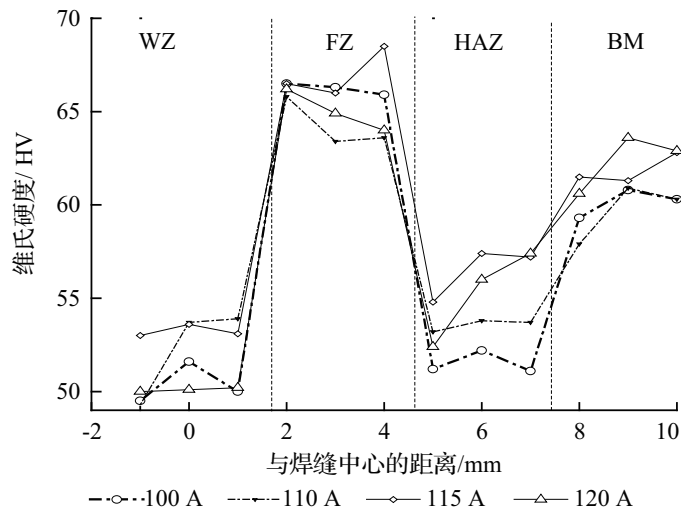


图 3 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的显微硬度(垂直于焊接方向)
Fig. 3 Microhardness of welding TIG joints with welding currents of 100 ~ 120 A
(perpendicular to the weld direction)

图 4 为 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头拉伸断口形貌,当焊接电流为 100 A 和 110 A 时,为韧性断口,但是韧窝较小较浅;当焊接电流为 115 A 和 120 A 时,主要是脆性断口,有少量的韧窝。

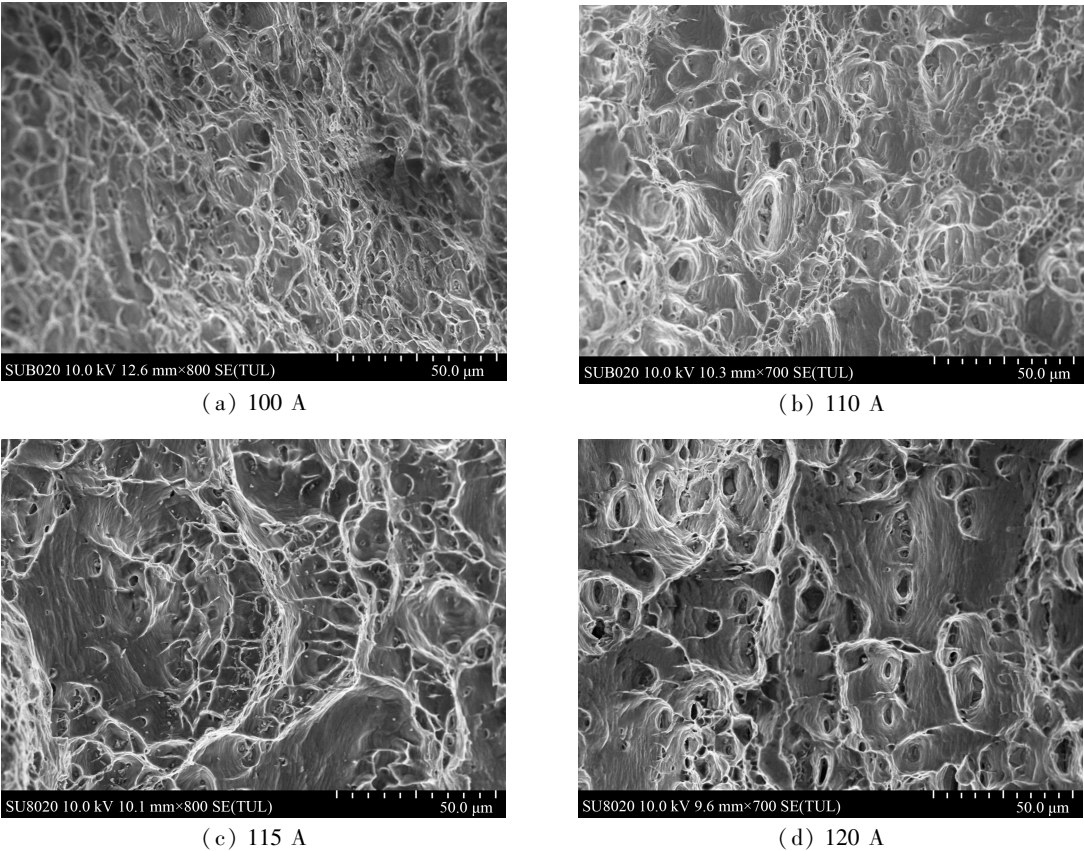


图 4 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的拉伸断口形貌
Fig. 4 Fractography of TIG joints with welding currents of 100 ~ 120 A

2.3 焊接接头的耐腐蚀性能

如图 5 所示,为 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头在盐雾箱中失重速率与时间的关系。样品腐蚀速率随腐蚀时间的增加而减小,在腐蚀的前 24 h,样品的失重率最大。因为初放入盐雾腐蚀箱的样品没有致密氧化膜保护而腐蚀速率很快;特别是当焊接电流为 120 A 时腐蚀速率最大为 0.86 g/(m² · h)。样品的腐蚀速率在 24 ~ 96 h 均有明显减小,因为在被 35℃ 盐雾氛围侵蚀的同时,样品中的铝会与箱中氧气反应生成一层致密的氧化膜,富镁区的镁单质也会与箱体中的氧气作用形成一层耐蚀的镁羟基碳酸盐薄膜^[23],加之焊丝中含有微量的铜、铁元素,将使 5052 铝合金表面自腐蚀电位右移^[24],提高了 5052 铝合金的耐蚀性,腐蚀速率降低。

图 6 为 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头经盐雾腐蚀 168 h 后的形貌。焊接电流为 100 A 和 110 A 的焊接接头的焊缝区主要为点蚀,焊接电流为 115 A 和 120 A 的焊接接头的焊缝区主要为点蚀和晶间腐蚀。在中性盐雾腐蚀的环境中随着 5052 铝合金

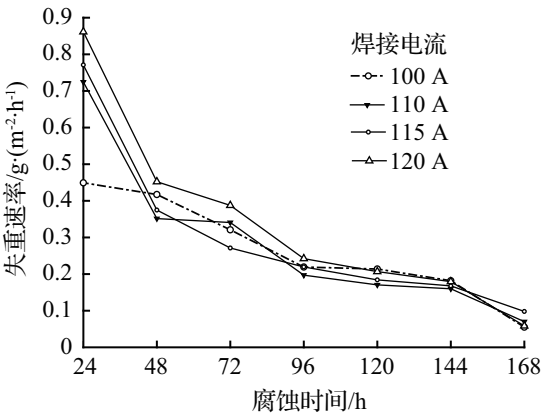


图 5 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头盐雾腐蚀的动力学曲线
Fig. 5 Corrosion kinetics curves of TIG joints with welding current of 100 ~ 120 A

TIG 焊接电流增大,焊缝区晶间腐蚀倾向逐渐增大。晶间腐蚀会使晶粒间的结合力大大削弱,降低材料强度。

NaCl 小液滴中的 Cl^- 对 5052 试样表面的钝化膜有破坏作用,盐雾腐蚀箱中的氧气通过反应式(1)、(2)在氯化钠小液滴中形成 OH^- 和 O^{2-} 。此外,由于 NaCl 溶液中的 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 与 5052 铝合金的化学位不相等,5052 铝合金中的 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 会向溶液中转移,通过反应式(3)、(4)在氯化钠溶液中形成 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 。最终,形成了 Al_2O_3 、 MgO 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 等腐蚀产物。结合 A 点能谱分析见表 3,可知腐蚀产物主要为 Al_2O_3 。因为 5052 铝合金中镁作为合金元素含量少且喷雾为中性,所以产生的 Mg^{2+} 和 OH^- 较少,生成的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 未能超过其在盐水中的溶解度而析出^[24],因此观察到的腐蚀产物主要为 Al_2O_3 。

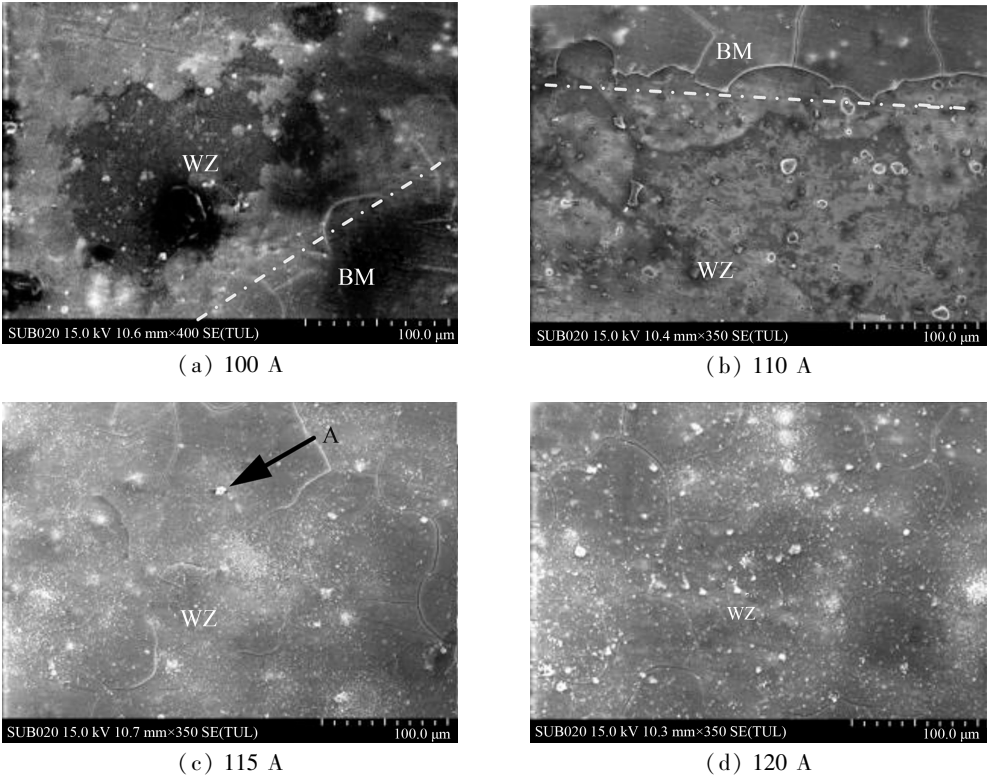
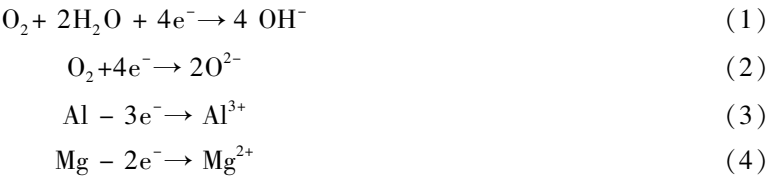


图 6 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头经盐雾腐蚀 168 h 后的形貌

Fig. 6 Microstructure of TIG joints with welding current of 100 ~ 120 A corroded in Salt spray medium for 168 h

表 3 A 点能谱分析

Tab. 3 EDS analysis of point A in Fig. 6

元素	质量百分比/ <i>wt</i> %	原子百分比/%
O	53.13	65.77
Mg	0.62	0.50
Al	44.94	32.99
Cl	1.32	0.74

图 7 为 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的 Tafel 曲线。表 4 为 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的腐蚀电流密度与腐蚀电位。100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的腐蚀电位在 -720 ~ -680 mV，腐蚀电流密度在 -5.22 ~ -4.78 mA/cm²。所有样品腐蚀电位和腐蚀电流密度相较母材均有轻微右移，所有接头电化学腐蚀倾向和腐蚀后腐蚀速率均比母材小。当焊接电流为 115 A 时，接头腐蚀倾向最小；焊接电流为 100 A 时，腐蚀后腐蚀速率最小。焊接电流为 110 A 时，腐蚀电流密度和腐蚀电位均较负，与其余焊接电流下的接头相比腐蚀倾向和腐蚀速率均处于较高水平，耐腐蚀性能最差。

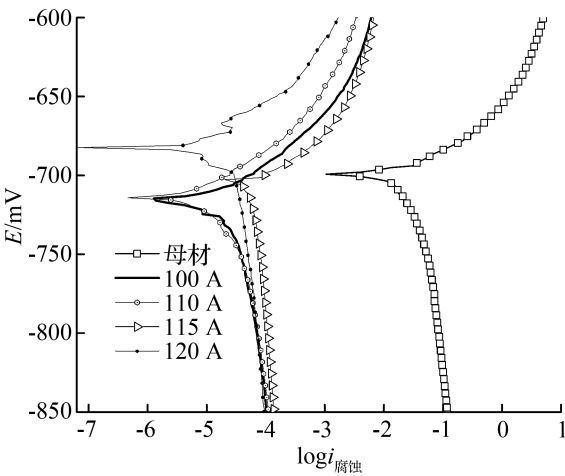


图 7 100 ~ 120 A 焊接电流下
TIG 焊接接头的 Tafel 曲线
Fig.7 Tafel curves of the joints at
different welding currents using TIG

表 4 100 ~ 120 A 焊接电流下 TIG 焊接接头的腐蚀电流密度与腐蚀电位

Tab.4 Corrosion current densities and the corrosion potentials at different welding currents using TIG		
焊接电流/A	腐蚀电流密度/(mA · cm ⁻²)	腐蚀电压/mV
0(母材)	-5.72	-725
100	-4.78	-720
110	-5.12	-716
115	-5.22	-680
120	-5.07	-700

3 结论

- ① 100 ~ 120 A 焊接电流的 5052 铝合金 TIG 焊接时,焊接电流为 115 A 所得焊接接头综合力学性能较好。其接头抗拉强度为 212.1 MPa,达到母材抗拉强度的 90.8 % ,断面收缩率为 28.9 % ,比母材 50.3 % 的断面收缩率损失近一半。
- ② 168 h 后的盐雾腐蚀表明,当焊接电流在 100 A 和 110 A 时,5052 铝合金 TIG 焊接接头以点蚀为主,腐蚀较均匀;当电流为 115 A 和 120 A 时,晶间腐蚀加剧,转变为点蚀和晶间腐蚀为主。当焊接电流在 100 ~ 120 A 时,腐蚀电流密度变化规律不明显,这与焊缝组织不均匀有关。

参考文献:

[1] PEREIRA A, TREVELYAN P M J, THIELE U, et al. Mechanical and electrochemical characteristics in sea water of 5052 -O aluminum alloy for ship[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2013,23(3):636-641.

[2] KIM S J, PARK J C, CHONG S O. Investigation on Corrosion Protection Potential by Electrochemical Experiment in Sea Water of 5052-O Al Alloy for Leisure Ship[M]. Mokpo city, South Korea: Mokpo City Pivision of Morinc System Engineering, 2010.

[3] SINGH D, DASH P K. Role of damage parameters in remaining life assessment of composites in aircraft structures[J]. ProcediaEngineering, 2012,38:2702-2712.

[4] MIN H E, FUGUO L I, WANG Z. Forming limit stress diagram prediction of aluminum alloy 5052 based on GTN model parameters determined by in situ tensile test[J]. 中国航空学报(英文版), 2011,24(3):378-386.

- [5] KIM J S, KIM I J, KIM Y G. Optimization of welding current waveform for dissimilar material with DP590 and Al5052 by Delta-spot welding process[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2016,30(6):2713-2721.
- [6] KWON Y J, SHIM S B, PARK D H. Friction stir welding of 5052 aluminum alloy plates[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009,19(s1):23-27.
- [7] ZHANG Z, YANG X, ZHANG J, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2011,32(8-9):4461-4470.
- [8] ZHANG H J, WANG M, ZHU Z, et al. Impact of shoulder concavity on non-tool-tilt friction stir welding of 5052 aluminum alloy[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018,96(1-4):1497-1506.
- [9] REDDY P J, KAILAS S V, SRIVATSAN T S. Effect of Tool Angle on Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 5052: Role of Sheet Thickness[J]. *Advanced Materials Research*, 2012,410(1):196-205.
- [10] SONG C Y, PARK Y W, KIM H R, et al. The use of Taguchi and approximation methods to optimize the laser hybrid welding of a 5052-H32 aluminium alloy plate[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2008,222(4):507-518.
- [11] LI Y Q, ZHAO X H, ZHAO H, et al. Study on the effect of welding current during laser beam-resistance seam welding of aluminum alloy 5052[J]. *China Welding*, 2008,17(2):42-46.
- [12] ZHANG H G, JIN X Z, CHEN G Y, et al. Study on the burning loss of magnesium element in fiber laser welding aluminum alloy 5052[J]. *Laser Technology*, 2012,36(6):713-718.
- [13] ZHANG J, ZHANG W, LIU W. Research on the welding process of aluminum alloy based on high power fiber laser[C]// *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Shanghai, China; Los Angeles SPIE, 2017:10339.
- [14] 肖荣诗,陈铠,左铁钊. 高强铝合金激光焊接新进展[J]. *应用激光*, 2002,22(2):206-208.
- [15] 黄旺福,黄金刚. 铝及铝合金焊接指南[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 2004:125-126.
- [16] KUMAR A, SUNDARRAJAN S. Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments[J]. *Materials & Design*, 2009,30(4):1288-1297.
- [17] 徐正. 7005/7075 中高强度铝合金的应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.
- [18] 王锡岭. 喷射成 7xxx 系铝合金 TIG 焊工艺及性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学, 2011.
- [19] 廖传清,宿国友,高艳芳,等. 7075/5A06 异种铝合金 TIG 焊接头的显微组织和力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2015,25(1):43-48.
- [20] 王培吉,陈康华,姜慧丽,等. 7003 铝合金 TIG 焊焊接接头的组织与性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2016, 21(6):832-839.
- [21] 廖慧敏,何鸿雁,杨阳,等. 不同焊接热输入下 AZ31 镁合金 TIG 焊接接头的显微组织与力学性能[J]. *机械工程材料*, 2017,41(3):24-28.
- [22] 田志杰,宋泓宇,王忠义,等. 热输入对 2219 铝合金 TIG 焊缝热影响区组织演变的影响[J]. *焊接技术*, 2016,45(2):28-30.
- [23] ZHAO M C, SCHMUTZ P, BRUNNER S, et al. An exploratory study of the corrosion of Mg alloys during interrupted salt spray testing[J]. *Corrosion Science*, 2009,51(6):1277-1292.
- [24] 云凤玲,徐克. 重金属离子对 5052 铝合金耐蚀性能的影响[J]. *化学工业与工程*, 2010,27(2):173-176.

(责任编辑 张晓云 梁碧芬)