

GTAW 堆焊工艺参数对 2A12 铝合金板堆焊焊缝组织和力学性能的影响

晏杰, 胡水莲, 张维维, 白鹏飞, 李涛
(国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241000)

摘要:某型装备腹部铝合金盖板在使用一段时间后易出现裂纹、磨损现象,需采用钨极氩弧焊方法进行修复,研究焊接电流和氩气流量对 2A12 铝合金板堆焊焊缝组织和力学性能的影响。研究表明,1.2 mm 厚的 2A12 铝合金板材,当氩气流量不变时,随着电流的增大,堆焊焊缝抗拉强度先增大后减小,在焊接电流为 60 A 时抗拉强度最大,拉伸断裂位置为母材。当焊接电流不变时,随着氩气流量的增大,堆焊焊缝抗拉强度先增大后减小,在氩气流量为 8.5 L/min 时抗拉强度最大。当焊接电流 60 A,保护气体(氩气)流量 8.5 L/min 时堆焊焊缝平均抗拉强度达到最大,为 127.09 MPa。不同参数下的堆焊焊缝硬度分布趋势大致相同,都呈现 M 形。

关键词:2A12 铝合金;GTAW;铝合金修复;堆焊焊缝;显微硬度;抗拉强度

中图分类号:TC442 文献标志码:A 文章编号:1007-7235(2024)09-0046-07

Influence of GTAW welding process parameters on the microstructure and properties of 2A12 aluminum alloy plate weld seam

YAN Jie, HU Shuilian, ZHANG Weiwei, BAI Pengfei, LI Tao
(State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241000, China)

Abstract: In view of the fact that the aluminum alloy web of an equipment is prone to cracks and wear after certain period of use, the non-melting tungsten electrode argon arc welding method was used to repair it, and the effects of different welding currents and argon gas flow on the microstructure and mechanical properties of 2A12 aluminum alloy surfacing weld were studied. The results show that when the argon flow rate is constant, the tensile strength increases first and then decreases with the increase of current, the tensile strength is the largest when the welding current is 60 A, and the tensile fracture position is on the base metal. When the welding current is constant, the tensile strength increases first and then decreases with the increase of argon flow, and the tensile strength is the highest when the argon flow rate is 8.5 L/min. When the welding current is 60 A and the shielding gas (argon) flow rate is 8.5 L/min, the average tensile strength of the joint reaches a maximum of 127.09 MPa. The hardness distribution trend of welded joints under different parameters is almost the same, and all of them show an M-shape.

Key words: 2A12 aluminum alloy; GTAW; aluminum alloy repair; surfacing weld; microhardness; tensile strength

铝合金具有比强度高、塑性好、导电导热性好、耐蚀性好、价格低廉等优点,目前在航空航天产业中应用广泛^[1-2]。2A12 铝合金综合性能较好,经固溶处理后进行自然时效或人工时效,具有良好的室温、高温以及低温力学性能^[3],高温工作温度可达 250 °C,低温工作温度可达 -250 °C,是使用最广泛的硬铝合金^[4]。

2A12 铝合金抗疲劳性能好,具有优良的耐热性,是一种高强度铝合金,主要用于制造飞机蒙皮、梁、桁条和框架等结构^[5-7]。在航天运载火箭的箭体结构中,如长征 1 号至 4 号和风暴 1 号,第一级下部结构的箱间部分,燃料箱的过渡部分和尾部,第二级下部结构的仪表舱壳体和尾段壳体,第三级下部结构的支架和转接锥,整流罩下壳等半硬壳式结构都采用 2A12 铝合金^[8-9]。在民航领域,飞机仍以铝合金为结构材料主体,2 系铝合金在波音 777 和空客 A330/A340 飞机的一些主要结构件上被大量使用。此外,最新空客 A380 飞机使用的铝合金也占有所有结构材料的 61%^[10-11]。2A12 高强度铝合金在飞机上经过一段时间的使用后,会因振动、蠕变等原因造成微裂纹、损坏和磨损^[12],常采用堆焊方法修复。2A12 铝合金焊接性差,焊接时易氧化,产生氢气孔、热裂纹,焊接时接头强度差异大,因此研究 2A12 铝合金堆焊后组织性能变化十分必要。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验选用 2A12 铝合金板,尺寸为 300 mm × 100 mm × 1.2 mm,化学成分如表 1 所示。接头形式为平板堆焊。焊丝选用 4A11 铝合金,化学成分如表 2 所示。

表 1 2A12 铝合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of 2A12 aluminum alloy (mass fraction/%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0.50	0.50	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.25	0.10	0.15	余量

表 2 4A11 焊丝化学成分表(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of 4A11 welding wire (mass fraction/%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
4.5~6.0	0.6	0.2	-	-	0.1	0.15	余量

为防止污染在焊缝中产生气孔和夹杂,在焊接

前需要对基板进行打磨处理,使用砂纸或百洁布将 15~20 mm 宽的堆焊区域打磨清理干净,去除表面杂质、油污等污染物,使其表面呈银白色光泽为止。焊接时需要将堆焊区域和选用的焊丝提前用丙酮清洗干净。

1.2 试验方法

采用 GTAW(钨极惰性气体保护焊)进行堆焊,保护气体为氩气。试验使用的设备为美国林肯电气公司生产的 Square wave TIG355 交直流氩弧焊机。试验在纯度为 99.999% 的氩气保护氛围中进行(当瓶装氩气的气体压力低于 0.98 MPa 时,应停止使用。氩气从气瓶输出至焊枪的管路上,应装有气体减压器和气体流量计,或带有气体流量计的气体调节器)。图 1 为钨极氩弧焊设备。氩弧焊设备应具有自动引弧装置、电流衰减装置,具有保护气提前及滞后断气功能。焊接电源应具有良好的动特性,能方便地调节焊接规范并在所需的规范下稳定工作。



图 1 Square wave TIG355 交直流氩弧焊机

Fig. 1 Square wave TIG355 AC/DC TIG welding machine

由于钨极氩弧焊堆焊过程中热量不断积累,温度逐渐升高,铝合金在高温下的强度和塑性降低,若参数选择不当会导致熔池中的液态金属向焊缝底部塌陷,影响堆焊焊缝表面成形。较差的焊缝表面质量会降低焊缝的力学性能,使修复后的产品无法正常使用。而堆焊焊缝的表面质量主要受焊接电流和氩气保护流量影响,因此本试验研究焊接电流和保护气流量对堆焊焊缝表面质量及力学性能的影响。试验参数如表 3 所示。钨极直径 2.4 mm,喷嘴直径 9.6 mm。

表3 2A12 铝合金板堆焊试验 GTAW 焊接
工艺参数

Table 3 Test parameters of GTAW welding process
for 2A12 aluminum alloy flat overlay

焊接电流 I/A	氩气流量 $/(L \cdot \min^{-1})$
55	8.5
60	7.5
60	8.5
60	10
65	8.5

2A12 铝合金堆焊接头制作完成后,在垂直于焊缝处截取小块试样,通过 SiC 砂纸打磨、机械抛光后制成金相试样,将金相试样在 Keller 试剂中腐蚀,腐蚀时间为 6 ~ 8 s, Keller 试剂溶液的体积配比为 $V(HF):V(HCl):V(HNO_3):V(H_2O) = 1:1.5:2.5:95$ 。采用德国蔡司 AxioScope A1 金相显微镜观察组织形貌。使用 QnessQ10A 型显微硬度计测量堆焊焊缝硬度分布,加载载荷为 1.961 N,加载时间为 15 s,从焊缝中心及两侧依次取 8 个点共 17 个点。在每道焊缝上平均截取 3 个拉伸试样,试样如图 2 所示。使用 CSS - 44100 微机控制电子万能试验机测量抗拉强度和断后伸长率,拉伸速度为 10 mm/min^[13]。

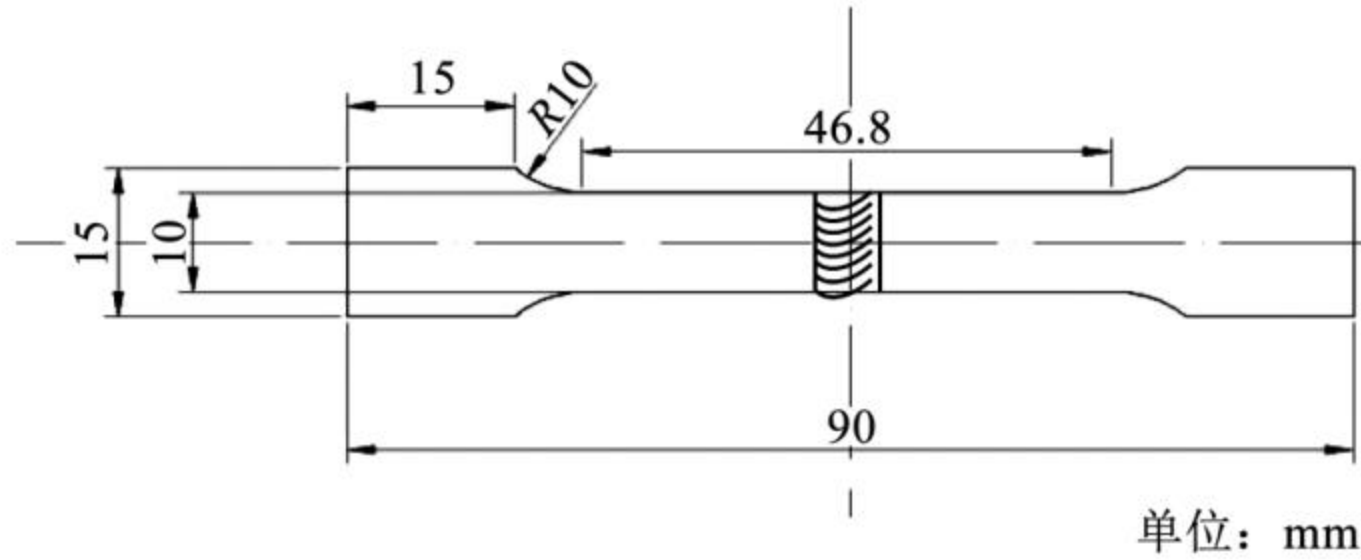


图2 堆焊焊缝拉伸试样

Fig.2 Schematic diagram of surfacing weld
tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 工艺参数对堆焊焊缝宏观外貌的影响

2A12 铝合金板堆焊焊缝形貌如表 4 所示。从表中可以看出,随着焊接电流的增大,焊丝熔化速度增加,焊丝熔化量增加,而熔宽增加相对较少,焊缝余高增大。当电流为 55 A 时,热输入较少,焊缝反面熔宽窄;当电流为 60 A 时,焊缝成型优良,无明显缺陷,焊缝整体熔宽保持一致;当焊接电流过大为 65 A 时,容易造成烧穿、咬边、夹钨、气孔及热裂纹等缺陷,且增加了金属飞溅,导致浪费^[14]。

表4 2A12 铝合金板堆焊宏观成形情况

Table 4 Macroscopic forming of surfacing welding of
2A12 aluminum alloy plate

焊接电 流 I/A	氩气流量 $/(L \cdot \min^{-1})$	平板堆焊正面/反面宏观形貌
55	8.5	正面
		反面
60	7.5	正面
		反面
60	8.5	正面
		反面
60	10	正面
		反面
65	8.5	正面
		反面

2.2 工艺参数对堆焊焊缝显微组织的影响

图 3 为 2A12 铝合金母材的显微组织,从图 3 可以看出,2A12 铝合金母材为 α (Al) 固溶体上分布着黑色、块状的 S (Al_2CuMg) 强化相和少量的灰白色相 θ ($CuAl_2$)^[15-17]。

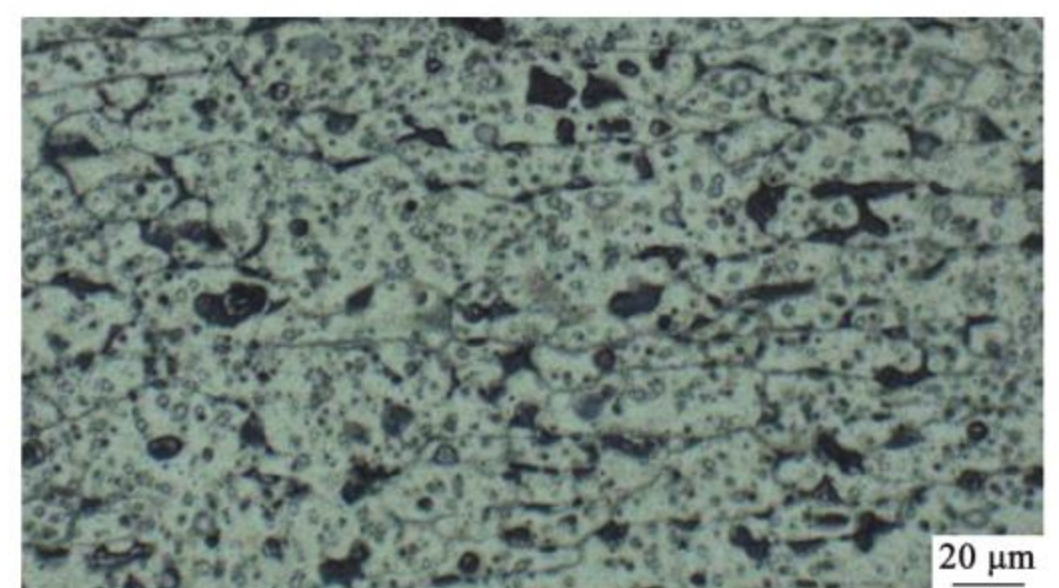
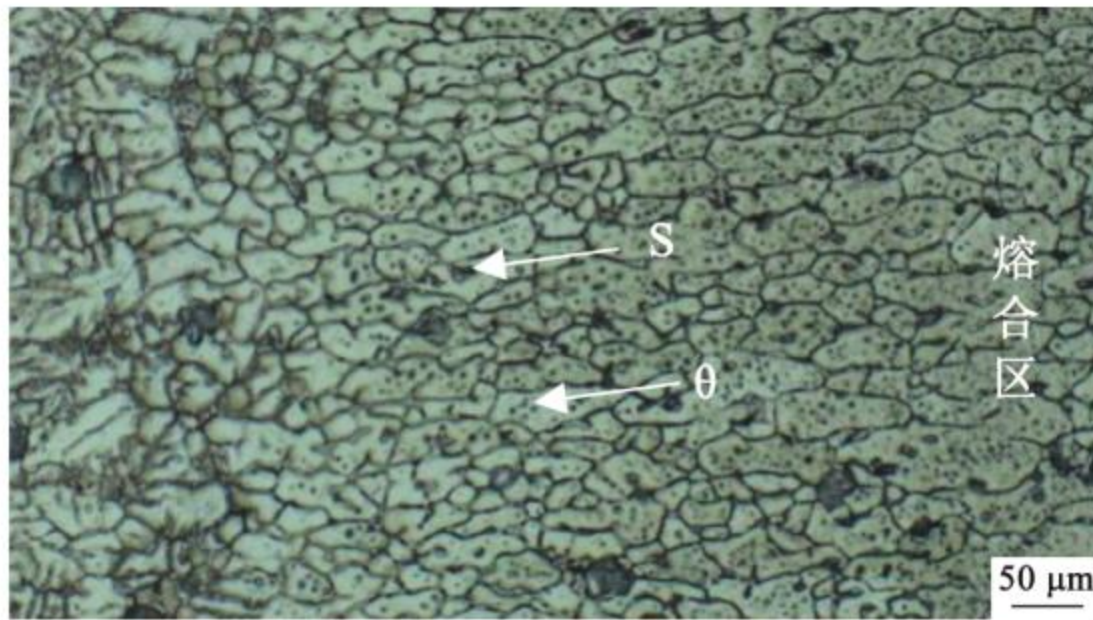


图3 2A12 铝合金母材微观组织

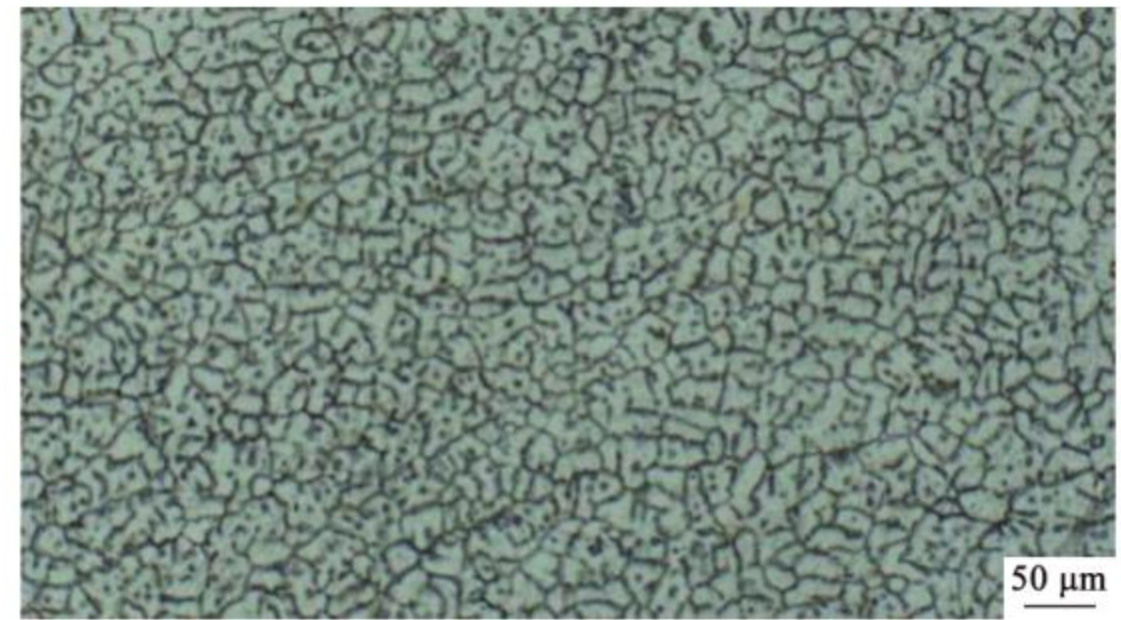
Fig.3 Microstructure of the base metal 2A12 aluminum alloy

图4为不同焊接电流和氩气流量焊接2A12铝合金板堆焊焊缝和热影响的显微组织。从图4a、4e、4i氩气流量同为8.5 L/min而焊接电流不同的热影

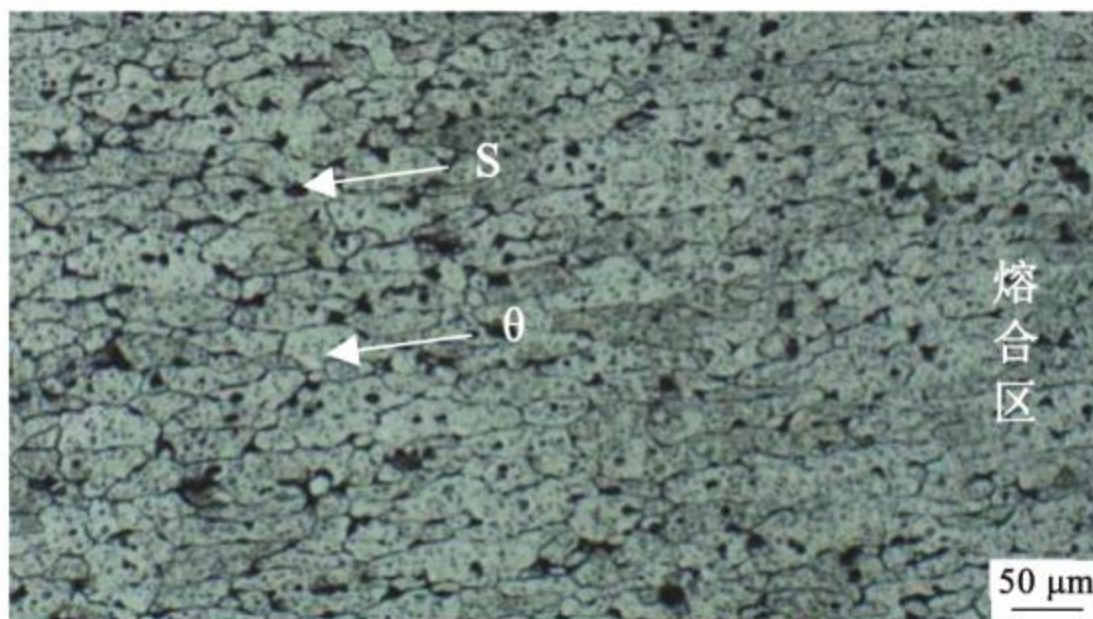
响区的显微组织可以看出,1)靠近熔合区晶粒长大,在晶界有强化相 θ (Al_2Cu)。加热条件下,该处易熔的低熔点共晶体偏聚,脆化了热影响区^[17]。2)过



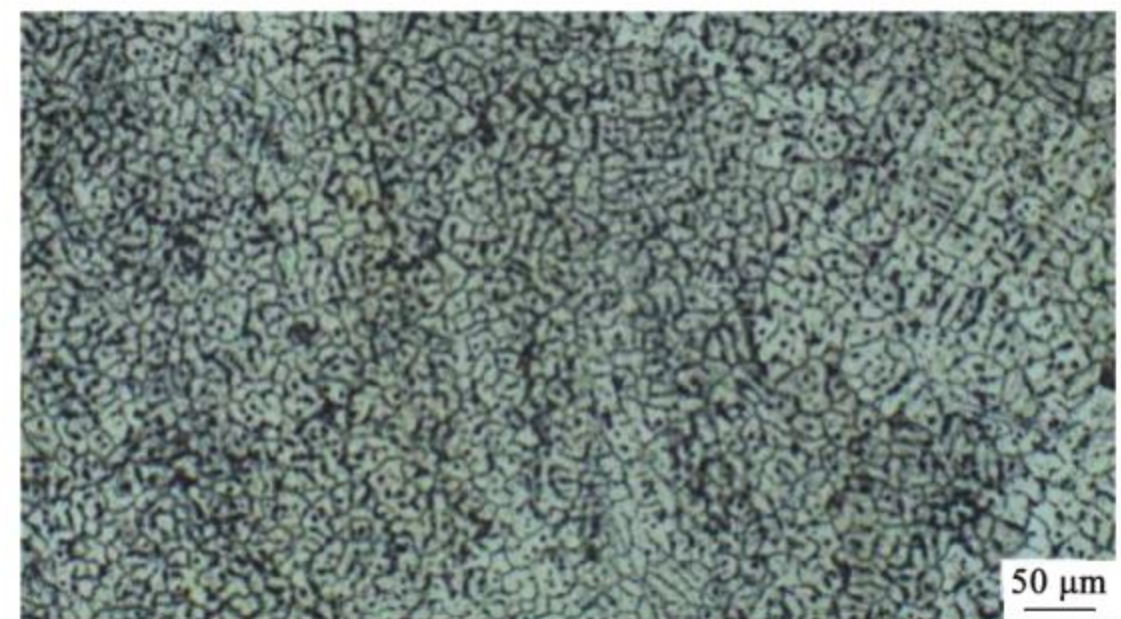
a-55A电流氩气流量为8.5L/min时的热影响区



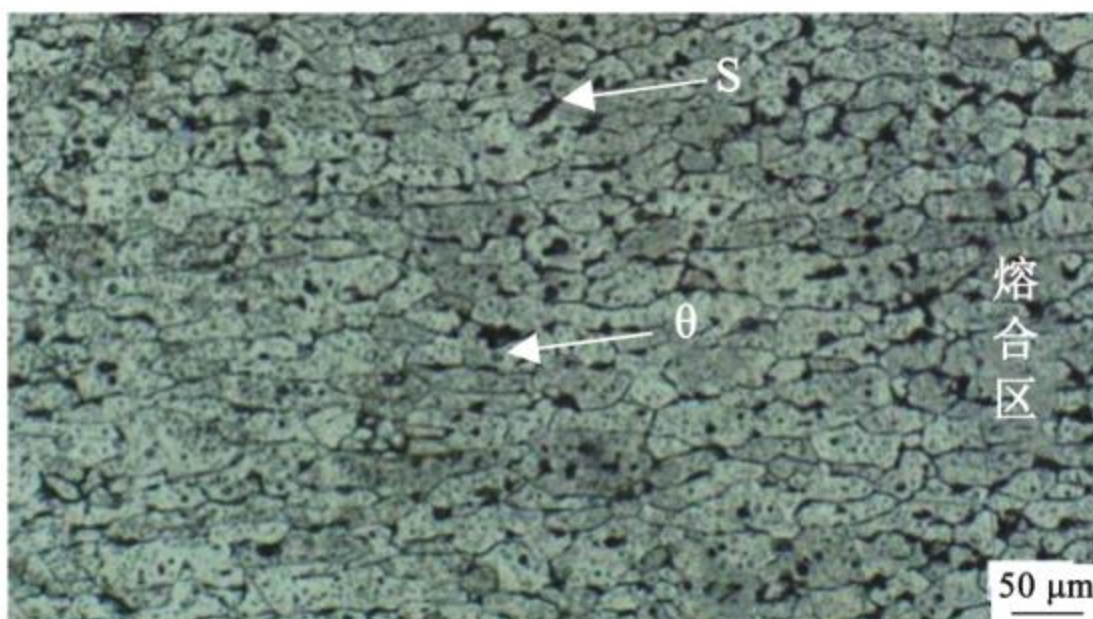
b-55A电流氩气流量为8.5L/min时的焊缝



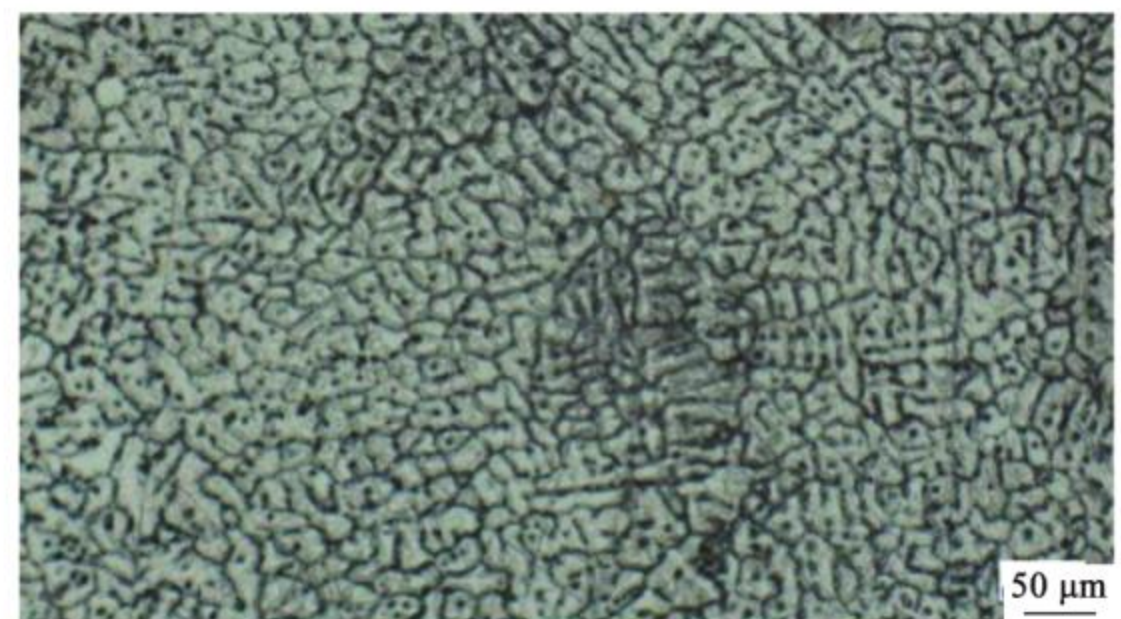
c-电流为60A氩气流量为7.5L/min时的热影响区



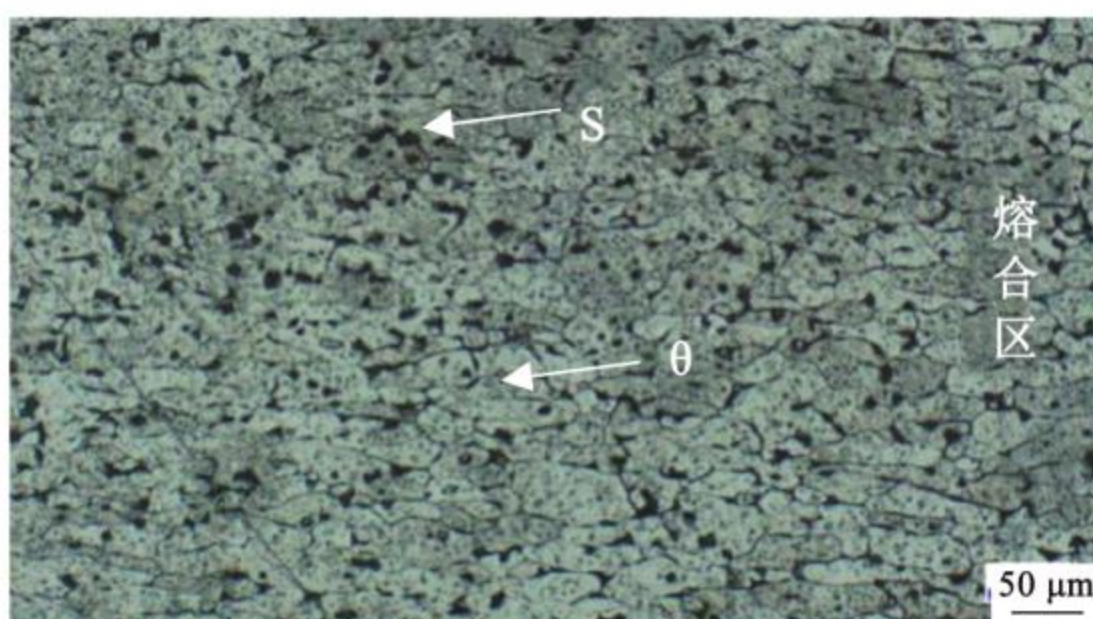
d-电流为60A7.5L/min氩气流量时的焊缝



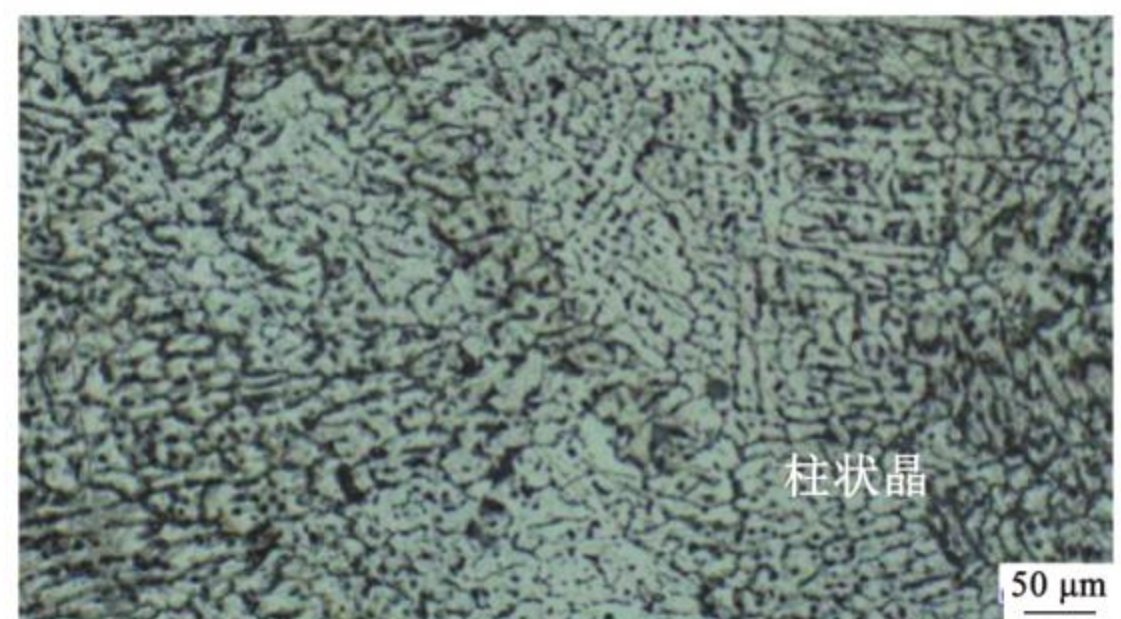
e-电流为60A氩气流量为8.5L/min时的热影响区



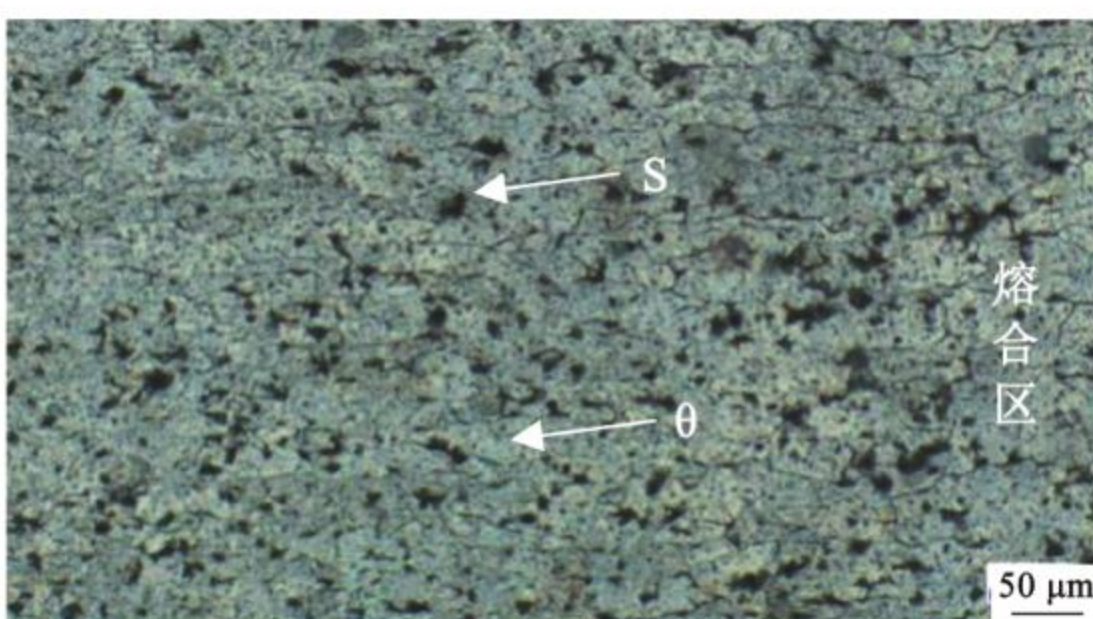
f-电流为60A氩气流量为8.5L/min时的焊缝



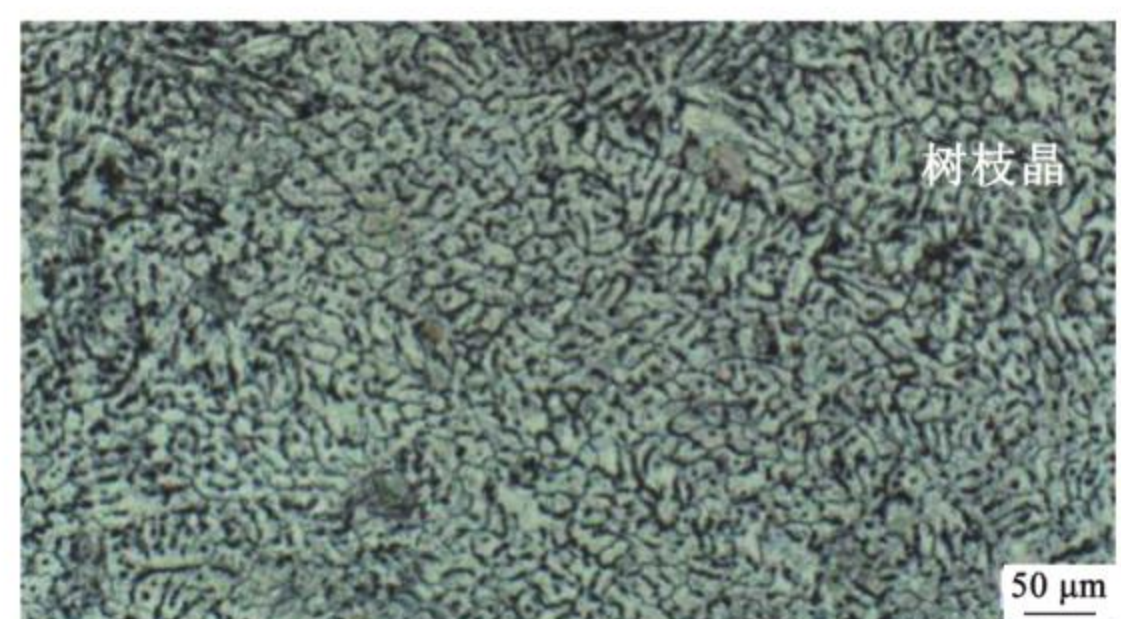
g-电流为60A氩气流量为10L/min时的热影响区



h-电流为60A氩气流量为10L/min时的)焊缝



i-电流为65A氩气流量为8.5L/min时的热影响区



j-电流为65A氩气流量为8.5L/min时的焊缝

图4 不同焊接电流和氩气流量下2A12铝合金板堆焊焊缝和热影响区的显微组织

Fig.4 Microstructures of 2A12 aluminum alloy surfacing weld under different welding currents and argon flow rates

时效区组织晶粒较均匀,在晶界有强化相 θ (Al_2Cu) 相,黑色 S 相 (Al_2CuMg) 析出,从而降低时效强化效果和增大晶间腐蚀。当氩气流量 ($8.5 L/min$) 不变时,焊接电流为 55、60 A 时,焊缝热影响区黑色的不熔化合物组织基本不变,当电流增大到 65 A 时第二相突然增多影响焊缝质量。这主要是因为热传导的作用下,热能由熔合区传导至热影响区,致使热影响区温度快速升高至再结晶温度,在形变储能的驱动下,部分晶粒通过位错移动致使晶界迁移合并而长大,造成晶粒粗化以及晶内析出相的长大^[8]。

从图 4b、f、j 为氩气流量同为 $8.5 L/min$ 而焊接电流不同时 (55、60、65 A) 焊缝中心区域的显微组织可知,组织主要由 α (Al) 固溶体, θ 相 (Al_2Cu) 及 S 相 (Al_2CuMg) 组成。焊缝中心枝晶网细小,且不连续,析出点状、杆状析出物。焊接电流为 55、60 A 时 (图 4b、4f), 焊缝中心为细小的树枝晶。焊接电流为 65 A 时 (图 4j), 焊缝中心为粗大的树枝晶,这是因为当焊接电流增大,热输入增大,焊缝中心枝晶增长异常。

图 4c、4e、4g 为焊接电流相同 60A 而氩气流量不同下 (7.5 、 8.5 、 $10 L/min$) 焊缝热影响区显微组织。从图中可以看出,相分布基本不变,母材为 α (Al) 固溶体上分布着 S (Al_2CuMg) 相^[7-9] 和 θ (Al_2Cu) 相。图 4d、4f、4h 为焊接电流相同 60A 而氩气流量不同时 (7.5 、 8.5 、 $10 L/min$) 焊缝中心区域组织。从图中可以看出,当氩气流量增大时,焊缝中心区域组织细小逐渐减少,拉长的枝晶增多,树枝晶明显增大,氩气流量对焊缝影响较为明显。

2.3 工艺参数对堆焊焊缝力学性能的影响

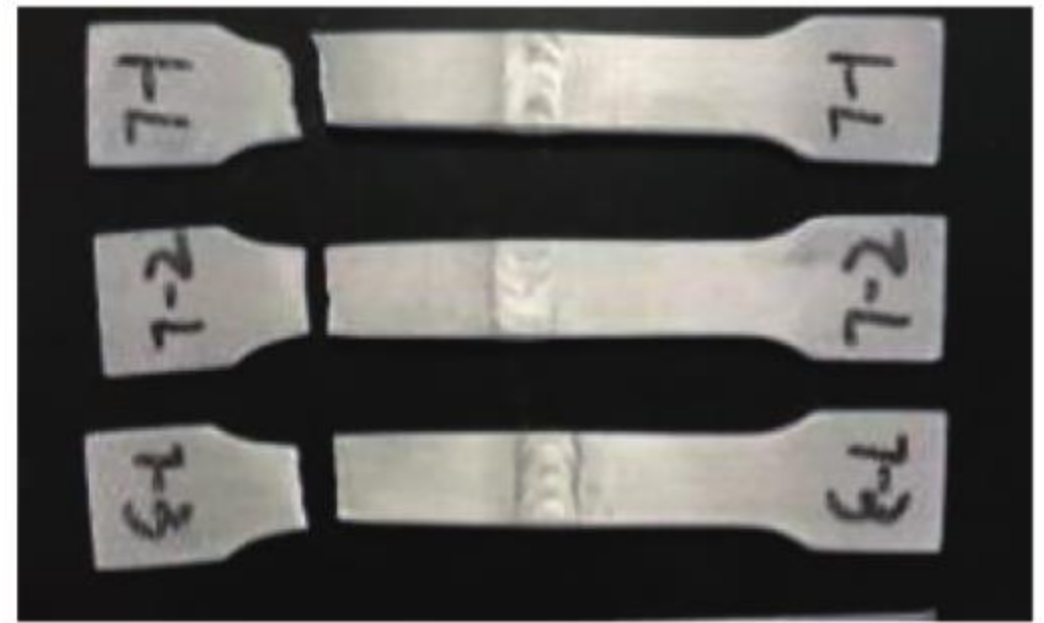
从图 5 可以看出平板堆焊断裂位置基本位于母材区,仅有一组电流为 60 A、氩气流量为 $10 L/min$ 的焊接试样中一个试样断裂位置位于热影响区。因焊缝中强化相增多,强化了焊缝,说明焊缝强度高于母材。

抗拉强度检测均带余高检测,余高高度打磨后保持一致。氩气流量为 $8.5 L/min$ 时,电流强度对 2A12 铝合金堆焊焊缝抗拉强度及伸长率的影响见图 6。从图 6 可以看出,当氩气流量不变为 $8.5 L/min$ 时,随着电流的增大,铝合金平板堆焊抗拉强度先增大后减小,当电流为 60 A 时,抗拉强度最大,为 127.09 MPa。而断后伸长率则随着电流的增大呈现

先减小后增大的趋势。



a-电流为55A氩气流量为8.5L/min



b-电流为60A氩气流量为7.5L/min



c-电流为60A氩气流量为8.5L/min



d-电流为60A氩气流量为10L/min



e-电流为65A氩气流量为8.5L/min

图 5 2A12 铝合金板堆焊拉伸断裂位置
Fig. 5 Tensile fracture position of 2A12 aluminum alloy plate by surfacing welding

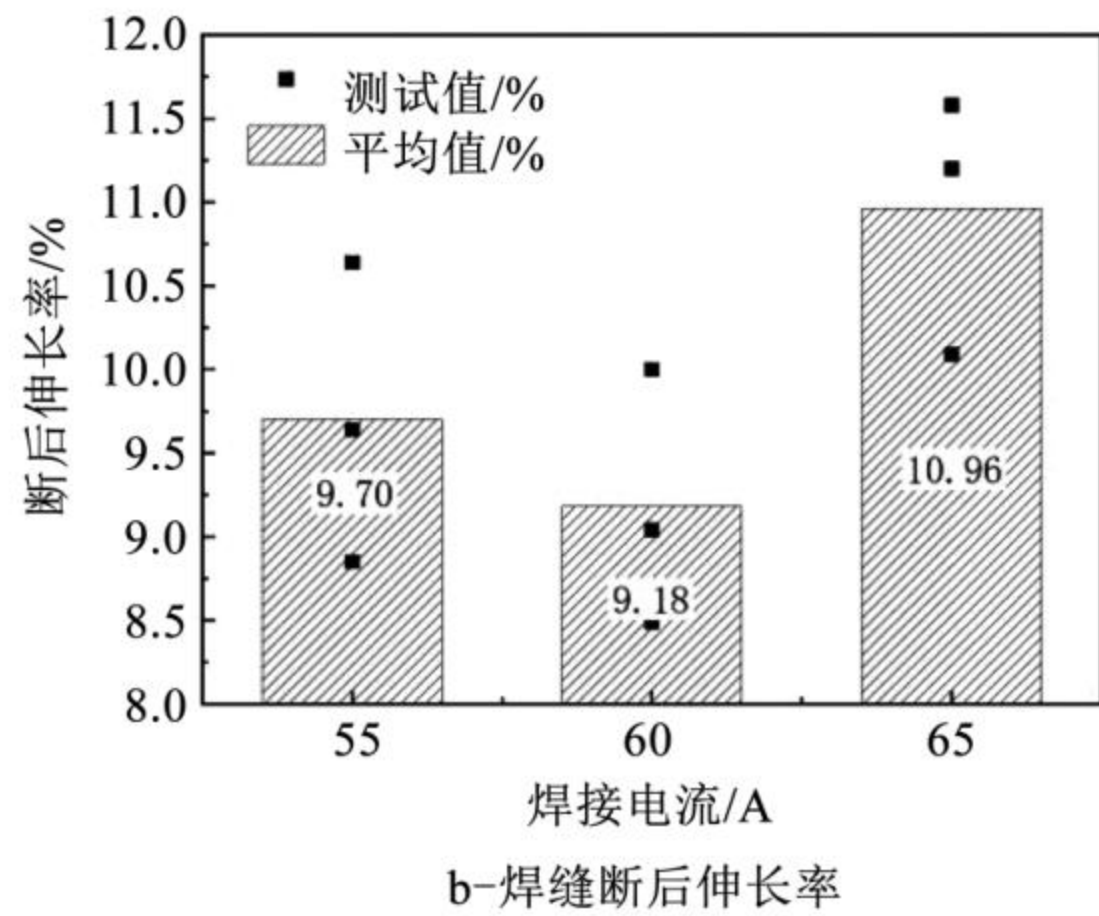
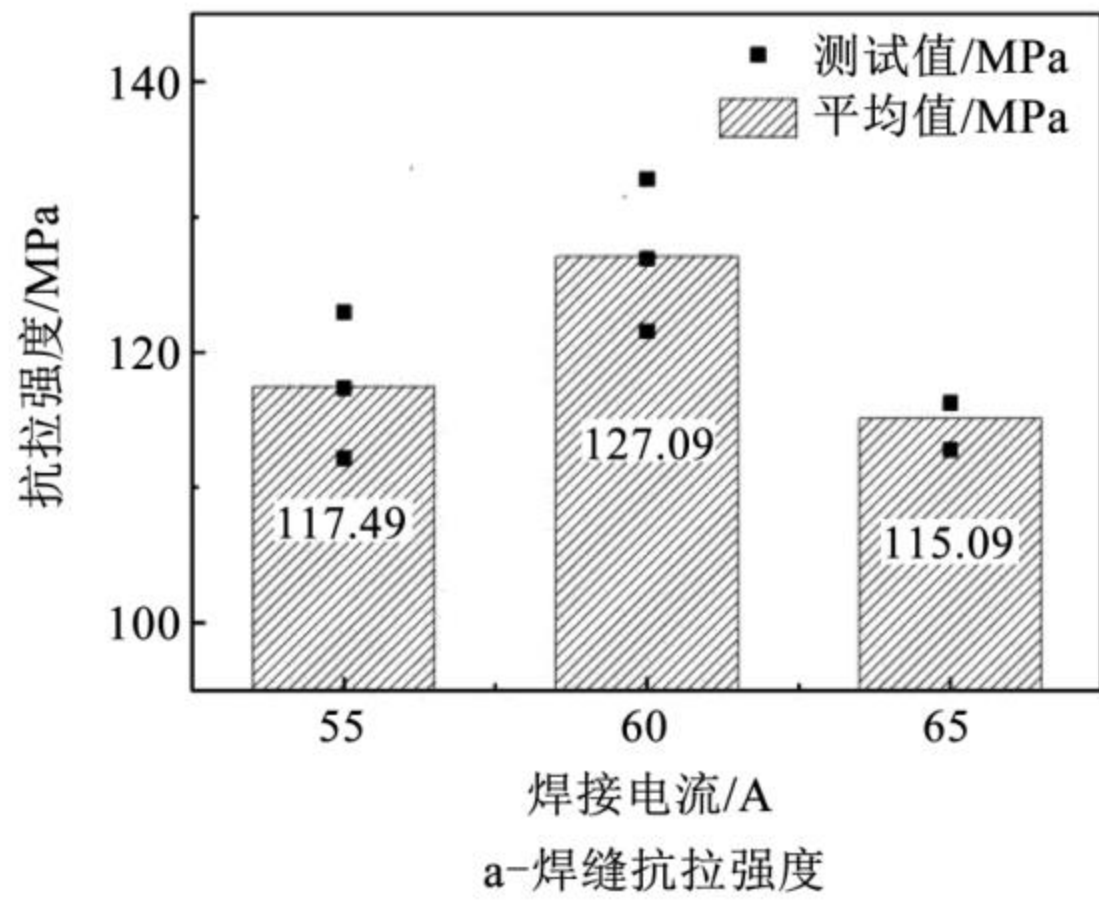


图6 电流对2A12铝合金平板堆焊焊缝抗拉强度及断后伸长率的影响(氩气流量8.5 L/min)

Fig.6 Effect of different currents on tensile strength and elongation after break of 2A12 aluminum alloy plate surfacing weld (argon flow rate 8.5 L/min)

抗拉强度检测均带余高检测,余高高度打磨后保持一致。焊接电流为60 A时,氩气流量对2A12铝合金堆焊焊缝抗拉强度及伸长率的影响见图7。从图7可以看出,当电流不变为60 A时,随着氩气流量的增大,铝合金平板堆焊焊缝抗拉强度先增大后减小,当氩气流量为8.5 L/min时,抗拉强度最大,为127.09 MPa。而断后伸长率则随着电流的增大呈现先增大后减小的趋势。当氩气流量达到10 L/min

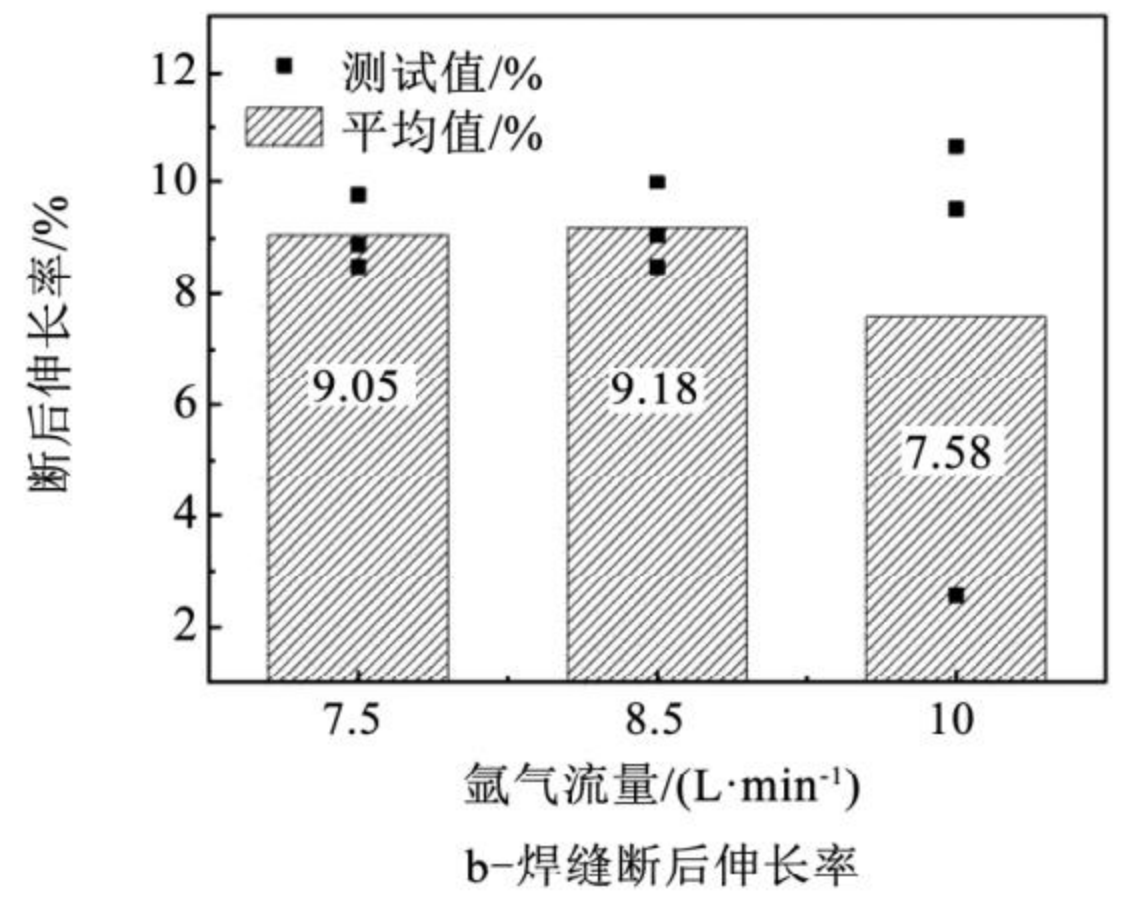
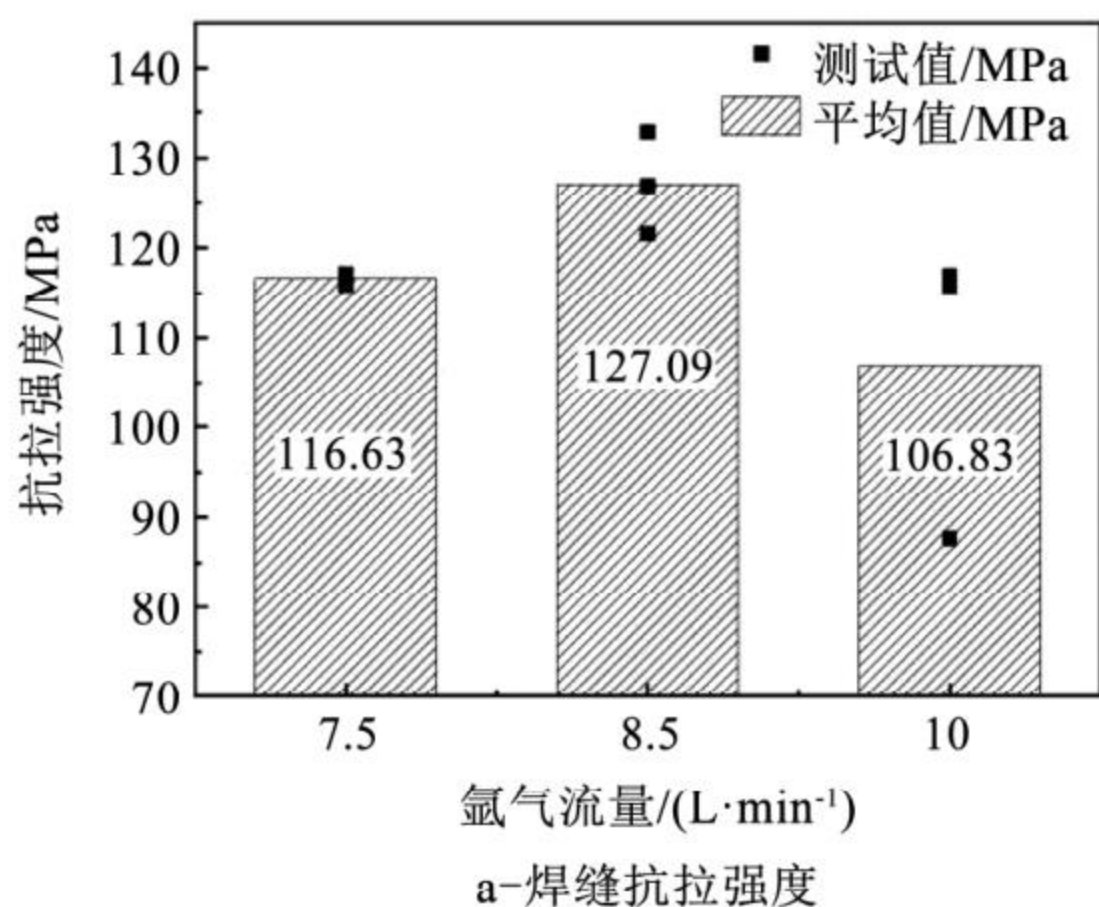
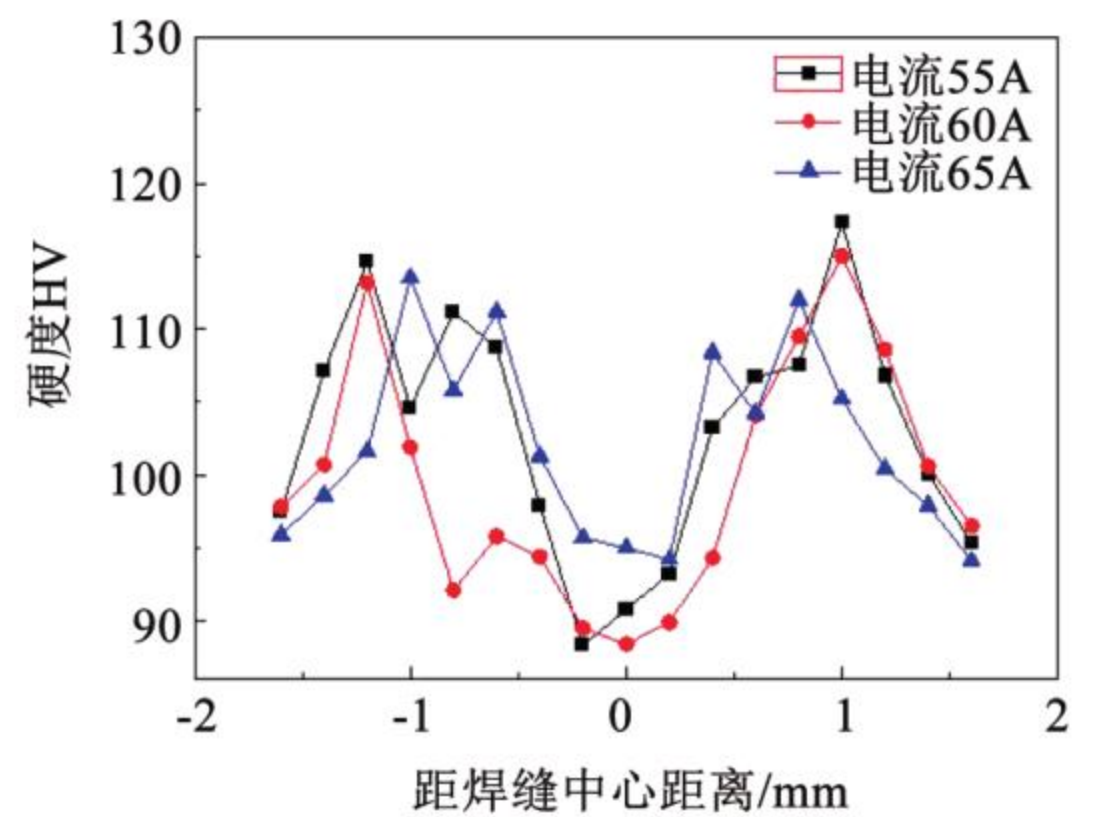


图7 氩气流量对2A12铝合金平板堆焊焊缝抗拉强度及断后伸长率的影响(电流60 A)

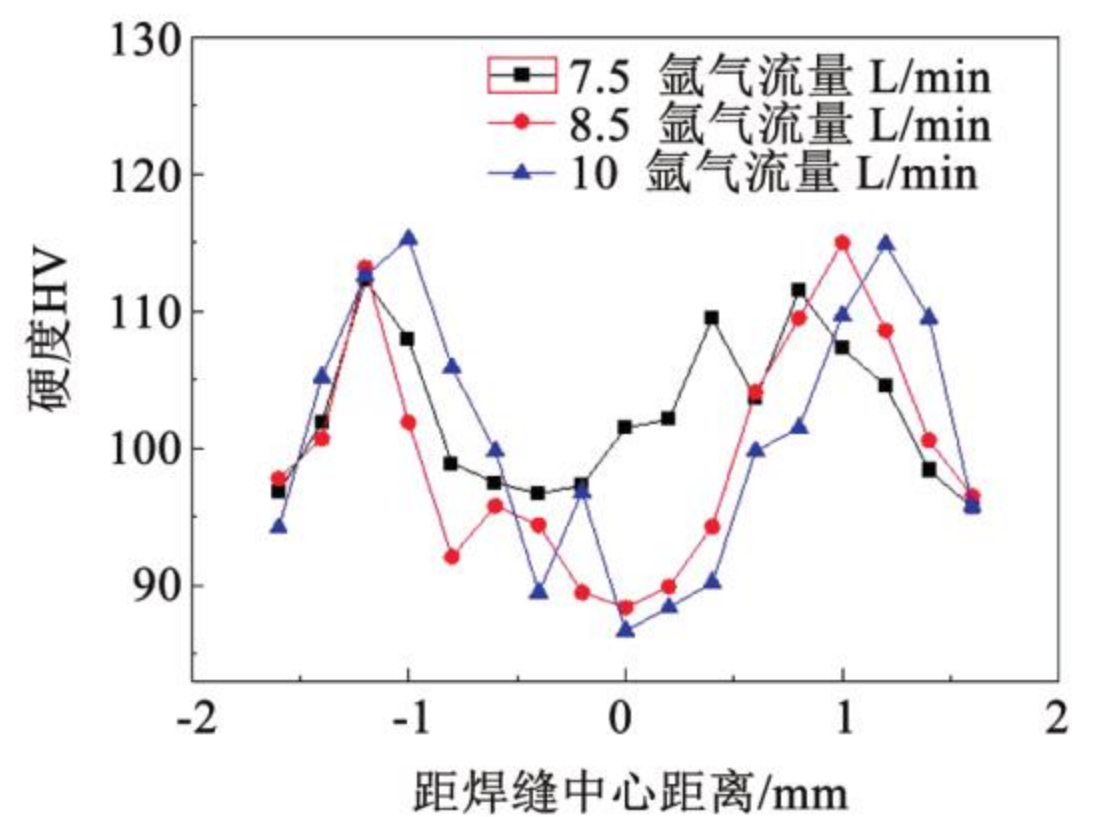
Fig.7 Effect of different argon flow rates on tensile strength and elongation after break of 2A12 aluminum alloy plate surfacing weld (current 60 A)

时,焊枪氩气流量较大,保护气体在焊缝周围与基体发生碰撞,气体流动发生紊乱,将大气卷入保护气氛中,导致焊缝发生轻微的氧化现象,造成抗拉强度降低。

从图8可以看出,不同堆焊参数的焊缝硬度分布趋势大致相同,都呈现为M形,在焊缝中心附近0.5 mm区域硬度较小为90 HV左右,远离焊缝中心



a-不同焊接电流对焊缝硬度分布影响(氩气流量8.5L·min⁻¹)



b-不同氩气流量对焊缝硬度分布影响(电流60A)

图8 工艺参数对焊缝硬度分布影响

Fig.8 Effect of different process parameters on weld hardness distribution

到两边热影响区逐渐增大,在热影响区熔合线附近硬度达到最高为 115 HV,然后随着到母材距离减少硬度再逐渐降低。

3 结 论

1)当氩气流量不变为 8.5 L/min 时,焊接电流为 55、60 A 时,焊缝中心为细小的树枝晶,焊接电流为 65 A 时,焊缝中心为粗大的树枝晶。2A12 铝合金平板堆焊焊缝抗拉强度随着电流的增大先增大后减小,断后伸长率随着电流的增大呈现先减小后增大的趋势。

2)当焊接电流为 60 A 不变时,氩气流量对焊缝热影响区显微组织影响不大,母材组织为 α (Al) 固溶体上分布有块状 S 相 (Al_2CuMg) 和灰色 θ 相 Al_2Cu 。随氩气流量增大,焊缝中心区域组织细小树枝晶逐渐减少,树枝晶明显增大,氩气流量对焊缝影响较为明显。2A12 铝合金板堆焊焊缝抗拉强度和断后伸长率均随着氩气流量的增大呈现先增大后减小趋势。

3)电流为 60 A、氩气流量为 8.5 L/min 的焊缝中第二相最多,抗拉强度最高,为 127.09 MPa,断后伸长率为 9.18%。

参考文献:

- [1] 孙乎浩,薛松柏,冯晓梅,等.舰船用 6082 铝合金 TIG 焊组织与力学性能分析[J].焊接学报,2014,35(2):91-94,117-118.
- [2] 张健,雷振,王旭友.高速列车 6005A 铝合金型材焊接热裂纹分析[J].焊接学报,2012,33(8):60-64.
- [3] 张彦兵.航天器用 2A12 合金疲劳行为研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [4] 李成功,傅恒志,于翹,等.航空航天材料[M].北京:国防工业出版社,2002:30-32.
- [5] 刘世民,艾素华,王中光.LY12 铝合金的拉扭复合加载疲劳[J].航空材料学报,2006,26(5):96-100.
- [6] BOAG A, HUGHES A E, WILSON N C, et al. How complex is the microstructure of AA2024-T3 [J]. Corrosion Science, 2009, 51(8):1565-1568.
- [7] WANG W, LI T Q, WANG K S, et al. Effect of travel speed on the stress corrosion behavior of friction stir welded 2024-T4 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5):1820-1828.
- [8] 刘浩东,胡芳友,雷国强,等.基于光纤激光的 LY12 铝合金焊接试验分析[J].焊接学报,2017,38(7):25-30,130.
- [9] 严军,高明,曾晓雁.激光-MIG 复合焊接 2A12 铝合金工艺和接头性能[J].中国有色金属学报,2009,19(12):2112-2118.
- [10] 刘兵,彭超群,王日初,等.大飞机用铝合金的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2010,20(9):1705-1715.
- [11] FILATOV Y A, YELAGIN V I, ZAKHAROV V V. New Al-Mg-Sc alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1):97-101.
- [12] 张健,花蓉.焊接工艺参数对焊接过程稳定性和焊缝质量的影响[J].工程机械,2022,53(1):82-87.
- [13] 余辉,胡水莲,张维维,等.飞机后整流罩用 3A21F 铝合金的 GTAW 工艺研究[J].轻合金加工技术,2023,51(11):51-56.
- [14] 韩丽娟,李小欣,李继承.焊丝对 2A12 铝合金焊接接头组织和力学性能的影响[J].机械工程材料,2015,39(3):32-35,40.
- [15] KIM W J, CHUNG C S, MA D S, et al. Optimization of strength and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging[J], Scripta Materialia. 2003, 49(4):333-338.
- [16] CHENG S, ZHAO Y H, ZHU Y T, et al. Optimizing the strength and ductility of fine structured 2024 Al alloy by nano-precipitation[J]. Acta Mater. 2007, 55(17):5822-5832.
- [17] 付景山,樊静波.硬铝合金焊接性能的研究[J].宁夏工程技术,2004,3(4):339-342.