

# MIG 焊 6063/7075 铝合金接头的金相组织、耐蚀性和力学性能研究

鲁宽亮<sup>1</sup>,张春芝<sup>1</sup>,王宁<sup>1</sup>,单美琳<sup>1</sup>,赵书锋<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东裕航特种合金装备有限公司, 山东 滨州 256200)

**摘要:**异种铝合金焊接产生的材料优良特性的联合对于零部件服役性能的提升至关重要,但材料成分和物化性能的不同导致的冶金问题增加了异种材料连接的难度。研究了 6063/7075 铝合金熔化极惰性气体保护(MIG) 焊工艺与接头综合性能的关系。结果表明,与单面焊相比,双面焊接接头金相组织更加均匀,晶粒细化,力学性能基本相当。双面焊接工艺沿焊缝方向的平均峰值残余应力、纵向残余应力和横向残余应力较低。双面焊缝具有最低的腐蚀电流密度和最正的腐蚀电位,具有更好的耐蚀性。双面焊接工艺改善了焊缝的耐蚀性。

**关键词:**铝合金;焊接;金相组织;耐蚀性;力学性能

中图分类号: TG44

文献标志码: A

## Microstructure, corrosion resistance and mechanical properties of MIG welded 6063/7075 aluminum alloy joints

LU Kuanliang<sup>1</sup>, ZHANG Chunzhi<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, SHAN Meilin<sup>1</sup>, ZHAO Shufeng<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao

266590, China; 2. Shandong Yuhang Special Alloy Equipment Co. Ltd, Binzhou 256200, China)

**Abstract:** The combination of excellent properties of dissimilar aluminum alloy materials produced by welding is of vital importance for the improvement of the parts' service performance. However, the metallurgical problems due to the differences in material compositions and in physical & chemical properties increase the difficulty for successful welding. This paper studies the relationship between the metal inert-gas (MIG) process and the comprehensive performance of 6063/7075 aluminum alloy joint. The results show that the metallographic structure of the double-side welding joint is more uniform and refined compared with that of the single-side welding joint, but the mechanical properties are basically equal. The double-side process gives lower average peak residual stress, longitudinal residual stress, and lateral residual stress along the weld. Both processes yield the lowest hardness value at the 6063 side, which is a little higher than that of the base material. The weld and the 7075 side show lower hardness under the double-side welding process. The double-side weld shows the highest corrosion resistance with lowest corrosion current density and most positive corrosion potential. The result indicates that double-side welding process improves the corrosion resistance of the weld.

**Key words:** aluminum alloy; welding; microstructure; corrosion resistance; mechanical property

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51801114, 51971121); 山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019TSLH0110)

作者简介: 鲁宽亮(1996—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事高性能铝合金连接相关研究。

张春芝(1978—), 女, 山东青岛人, 副教授, 博士, 主要从事耐磨蚀涂层及高性能铝合金研究, 本文通信作者。

E-mail: czzhang@sdust.edu.cn

铝合金凭借其优异的物理、化学、力学和加工性能,在工程领域得到广泛应用。轻量化背景下,许多车型大量使用铝合金零部件<sup>[1-2]</sup>。然而,受成分和物化性能差异导致的各种焊接缺陷影响,异种铝合金的焊接仍然具有挑战性。对此,一些科研人员采用摩擦搅拌焊等固相连接技术成功实现了多种铝合金系之间的连接,例如 AA2019/AA5083 和 AA5083/AA6061 等<sup>[3-4]</sup>。近几年,具有受控热输入的冷金属过渡焊技术引起关注<sup>[5]</sup>。尽管如此,操作简单和成本低的熔化极惰性气体保护(metal inert-gas, MIG)焊接技术依然是工业生产中的主力。焊件的残余应力、晶粒尺寸和析出相等直接决定着构件的服役可靠性。异种铝合金的 MIG 焊接仍需要系统研究,以在低成本、简单通用性与其固有问题之间取得平衡。

在各类铝合金体系中,具有高强度的 6 系和 7 系铝合金在汽车结构件方面应用较多,但二者之间多以机械连接出现<sup>[6]</sup>。对这类异种铝合金 MIG 焊接头性能的系统性研究事关其在汽车轻量化方面的应用。本研究针对 6063/7075 铝合金的金相组织、力学性能、残余应力、耐腐蚀性等方面进行系统分析,确定工艺对接头宏观和微观性能的作用规律,以获得综合性能良好的接头,为异种铝合金 MIG 焊的广泛应用提供参考。

## 1 实验

实验材料为 7075-T6 和 6063-T6 铝合金,尺寸为 120 mm×100 mm×5 mm。焊接采用 Pulse MIG-500RP 逆变式脉冲 MIG 弧焊机,焊丝为直径 1.2 mm 的 ER5356 焊丝(GB/T 3190—96),高纯 Ar (99.99%) 作为保护气体。采用角度为 60°、钝边为 1 mm 的 V 形坡口。单面和双面焊接分别按表 1 所示的参数进行,单面焊接采用单面双层焊接方法。图 1 和图 2 分别给出了单、双面焊接系统原理图和焊接接头外观图。

表 1 单、双面焊接工艺参数

Table 1 Parameters for single- and double-side welding processes

试样编号	单/双面焊	电流/A	电压/V	速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	气体流量/(L·min <sup>-1</sup> )
S1	单面	110	20	400	20
S2	双面	130	21	400	20

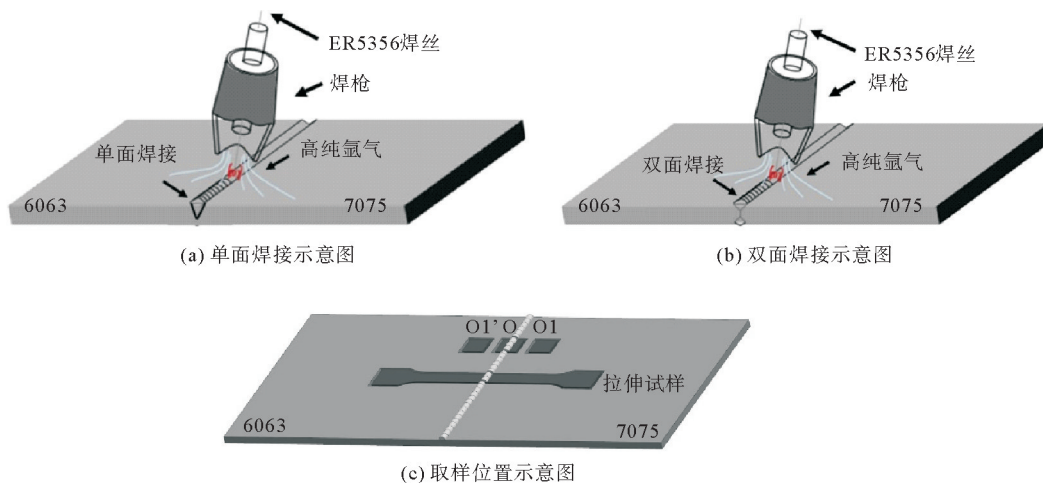


图 1 单、双面 MIG 焊接系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single- and double-side MIG welding systems

金相样品通过标准工艺制备,使用凯勒试剂腐蚀,并通过光学显微镜(Axio Lab A1)进行组织观察。通过盲孔法在焊接试样上进行残余应力测试,位置如图 3 所示。残余应力的测量采用钻孔应力测试装置,钻孔沿焊缝方向每 10 mm 间隔布置,在垂直焊缝方向每 15 mm 间隔布置,沿着焊缝方向两侧的 C 位置和垂直焊缝方向的 C1(C1')位置重合。采用万能材料试验机(AI-7000M)按 GB/T 228.1—2010 进行拉伸实验,

速度为 1 mm/min。根据国标 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验方法》，拉伸前在试样上标定原始标距  $L_0$ ，拉伸后测量断后标距  $L_u$ ，在室温下将断后的两部分试样紧密的对接在一起，保证两部分的轴线位于同一条直线上，测量试样断裂后的标距。断后伸长率为断后标距的残余伸长 ( $L_u - L_0$ ) 与原始标距 ( $L_0$ ) 之比，从而测出拉伸过程中的变形量。采用电子探针 (JXA8230) 进行显微分析，采用 D/MAX 2500PC X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 进行物相分析，测试角度范围为  $10 \sim 90^\circ$ ，扫描速度为  $8^\circ/\text{min}$ ，采用 Cu 靶  $K\alpha$  辐射。焊接接头不同位置处的显微硬度采用自动维氏硬度计 (FM-700/SVDM4R) 在 0.245 N 载荷下加载 10 s 获得。在焊缝中心 (标记为 O) 及距焊缝中心 10 mm 处的 7075 侧 (O1) 和 6063 侧 (O1') 处进行电化学测试。为了评估接头不同区域的耐蚀性，室温 ( $25^\circ\text{C}$ ) 下采用三电极电化学工作站 (CS310H)，包括铂电极和饱和甘汞参比电极。测试前的稳定时间为 0.5 h。电化学阻抗谱 (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 测试在  $100 \sim 10\text{ mHz}$  的正弦振幅下进行。采用的电解液为 3.5% 的 NaCl 溶液。

## 2 结果和讨论

### 2.1 金相组织和物相分析

6063/7075 铝合金单、双面焊接头的金相组织如图 4。图 4(a)~4(c) 给出了从一侧母材向另一侧母材组织变化情况，其中远离焊缝处呈现轧制带状组织。从图 4 (b) 可以看出，焊缝中心区域由大量等轴晶粒组成。随着晶粒向焊缝中心生长，温度梯度减小，过冷和结晶速率增大，有利于等轴晶粒的形成<sup>[7]</sup>。对比图 4(b) 和图 4(e) 可以看出，双面焊接工艺晶粒明显细化，析出相增加。XRD 结果表明，两个焊缝均由  $\alpha\text{-Al}$  固溶体和  $\text{Al}_{0.7}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.3}$  析出物组成，有助于晶粒细化。图 4 (h) 给出 S2 焊缝的扫描形貌，表格中给出了 S2 焊缝处的面扫描平均成分和 A 区的微区成分分析，A 区 Cu 含量略高，这与 Cu 较正的腐蚀电位有关。Cu 含量较高的不连续晶界析出相可降低晶界和基体之间的电位差，抑制阳极溶解<sup>[8-9]</sup>。此外，Cu 能促进形核，提高耐蚀性<sup>[10]</sup>。但 XRD 未测出 Cu，这可能是因为未浸蚀焊缝表面 Cu 含量低于 XRD 的分辨率。

双面焊在两次焊接条件下，熔池金属流动性升高，母材中的高温富 Fe 相、富 Si 相等未熔化粒子，向焊缝中心迁移，形核质点增加，在结晶时，形核率提高，在焊缝中心相当于添加晶粒细化剂，引起成分过冷，这些粒子在焊缝中形成钉扎作用，阻碍晶粒生长，使得晶粒细化。

根据金属平均晶粒度测定方法 (GB/T 6394—2002)，单面焊接焊缝处的平均晶粒尺寸为  $93.4\ \mu\text{m}$ ，双面焊接焊缝处平均晶粒尺寸为  $74.7\ \mu\text{m}$ ，晶粒细化。同时，由 S1 和 S2 试样的 XRD 图谱，主衍射峰值分别位于  $38.81^\circ$  和  $38.75^\circ$ ，S2 峰值左移，也在一定程度上佐证双面焊接焊缝处的晶粒尺寸更细。

### 2.2 残余应力分析

对 MIG 焊接的 6063/7075 接头的残余应力进行了测试。根据测得的应变释放，得到主残余应力  $\sigma_1$  (峰值)、最小残余应力  $\sigma_2$  及  $\sigma_1$  与  $0^\circ$  方向 (焊缝纵向) 的夹角  $\theta$ 。纵向和横向残余应力  $\sigma_0$  和  $\sigma_x$ 。根据式 (1)<sup>[11]</sup> 计算得到。图 5 为 6063/7075 接头沿焊缝和垂直焊缝方向的残余应力曲线。

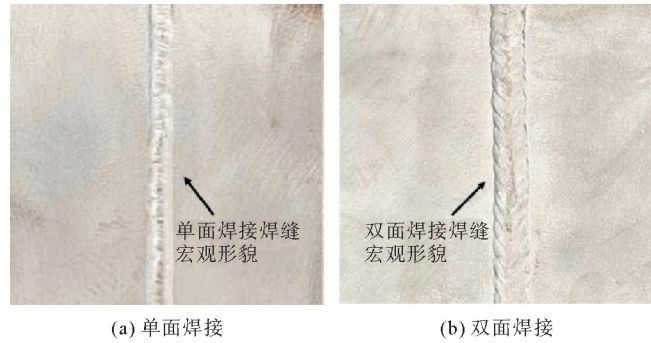


图 2 焊接接头宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic appearance of single- and double-side joints

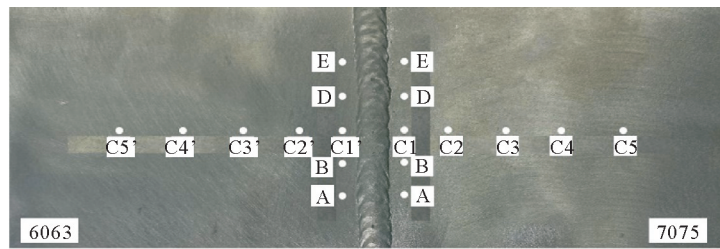


图 3 残余应力试验位置示意图

Fig. 3 Schematic of the locations for residual stress test

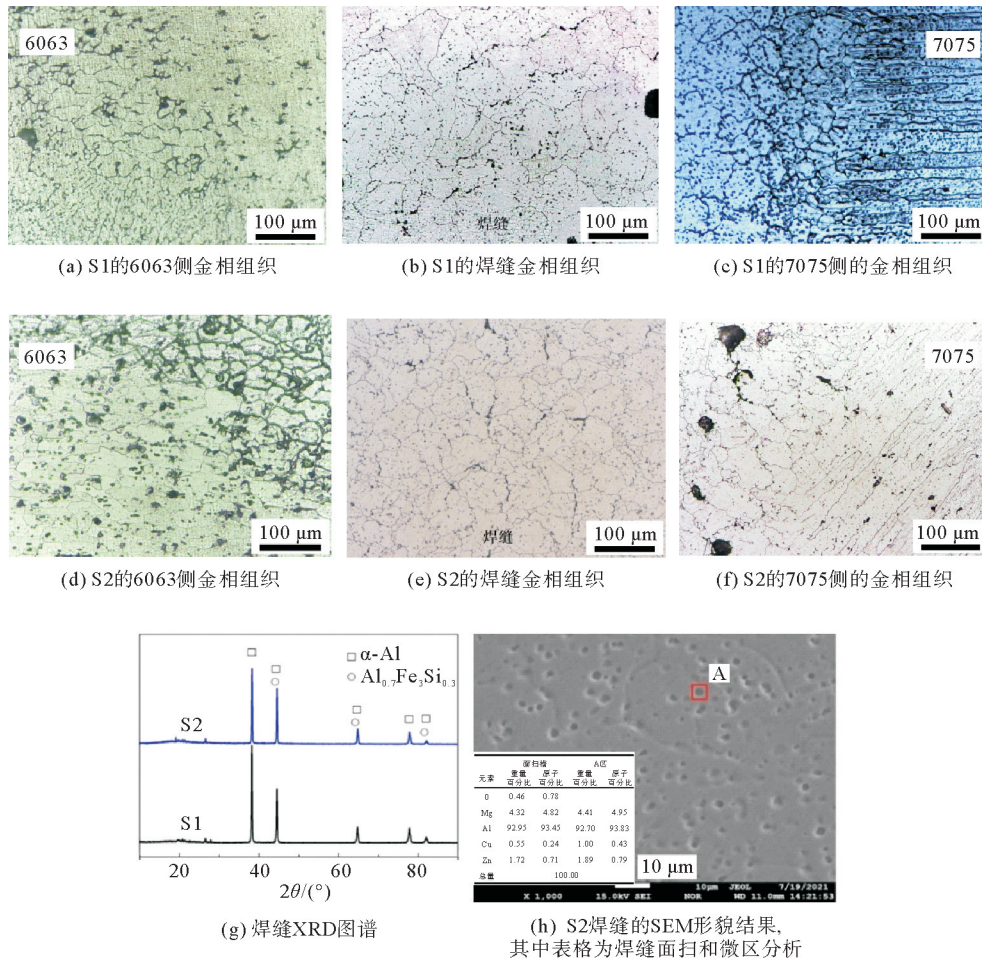


图4 金相组织、XRD、扫描图谱和微区分析结果

Fig. 4 Microstructure, XRD, scanning pattern and microanalysis results

$$\sigma_{0.2\alpha} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos(2\theta) \quad (1)$$

焊接后熔池材料冷却收缩是产生拉伸残余应力的主要原因之一<sup>[12]</sup>。单、双面焊接中不同的热输入形式引起残余应力的重新分布。双面焊反向热输入减小了双面焊的温度梯度,有利于抵消变形、降低残余应力。

从图5(a)中可以看出,试样S1沿焊缝方向的平均峰值残余应力 $\sigma_1$ 高于S2,且S2的残余应力比S1稍稳定,S1-7075侧的残余应力最大。图5(b)显示垂直于焊缝分布的峰值残余应力 $\sigma_1$ ,高应力区位于焊缝附近,其应力梯度较大。残余应力低于屈服强度。由于7075、6063铝合金和ER5356焊丝的成分和性能不同,两侧的残余应力情况并不完全对称,7075铝合金侧的残余应力偏大。靠近焊缝区的位置表现出较大的拉应力,远离焊缝处的位置表现为压应力。这是由于在焊接过程中,焊缝附近产生的塑性变形的高温金属收缩过程中受到的约束较少,作用于母材产生应力且无法释放,形成局部高应力区。焊接时焊缝及周边区域温度场变化迅速,由于铝合金热导率较高,垂直焊缝方向存在较大的温度梯度,内应力自平衡过程缩短,导致接头附近残余应力高。S1大部分位置在垂直于焊缝方向的峰值残余应力均高于S2。沿焊缝的纵向残余应力 $\sigma_0$ 和横向残余应力 $\sigma_{2\alpha}$ 如图5(c)和图5(d)所示,垂直于焊缝的纵向残余应力 $\sigma_0$ 和横向残余应力 $\sigma_{2\alpha}$ 如图5(e)和图5(f)所示,图5(e)和图5(f)与图5(b)具有相似的趋势。S2沿焊缝的纵向和横向残余应力整体更低。纵向应力主要集中在焊缝的中间部位及近缝区,表现为较大的拉应力。而横向应力主要作用在焊缝两端部,表现为压应力。垂直焊缝方向的应力分布为:焊缝中心处应力幅值大,两侧应力幅值小,边缘处应力值趋于0。

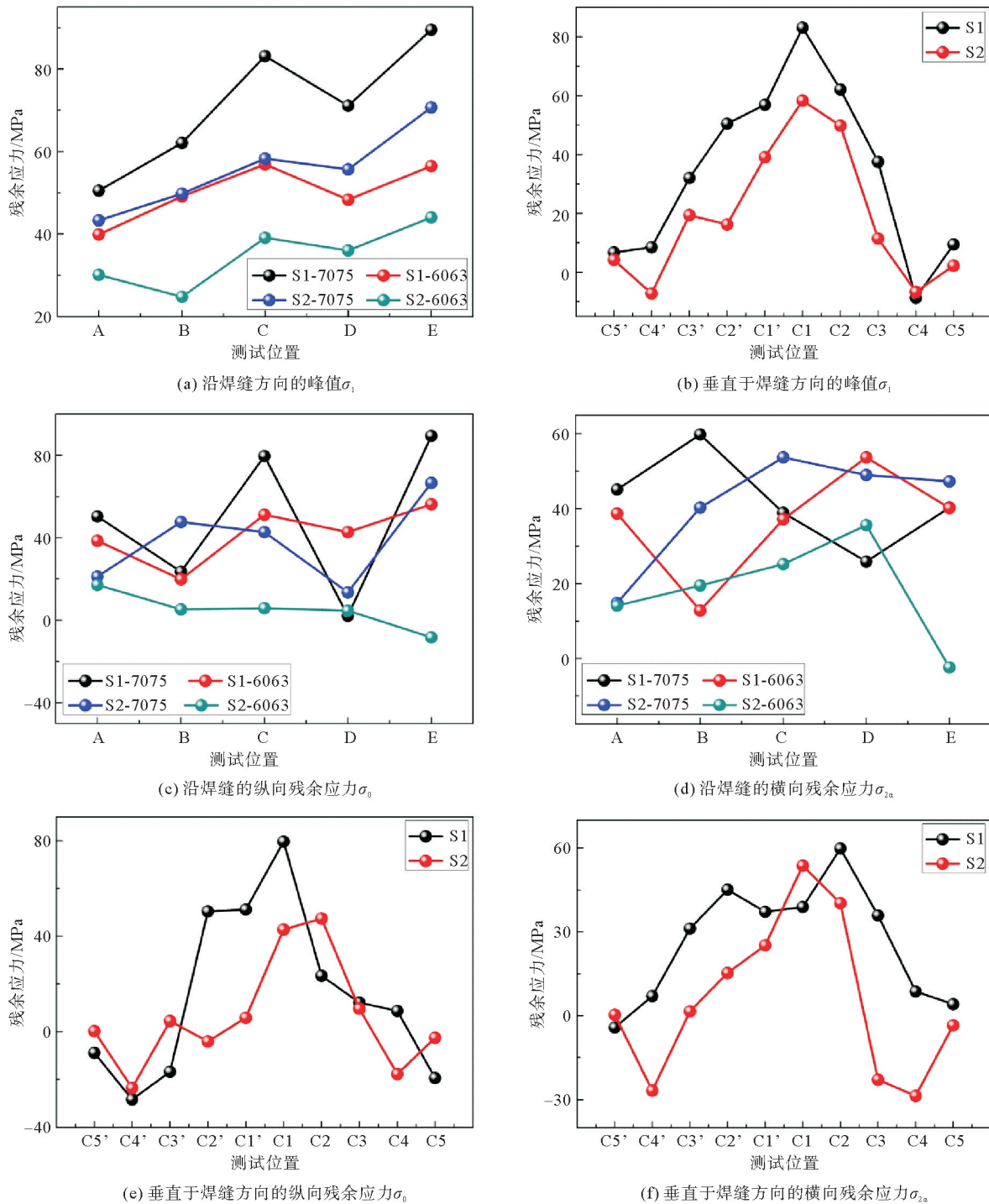


图5 纵向和横向残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distribution in the longitudinal and horizontal directions

垂直焊缝方向的横向残余应力产生自焊缝冷却时的横向收缩,间接原因是来自焊缝的纵向收缩。另外,表面和内部不同的冷却过程以及可能叠加的相变过程也会影响横向应力的分布。焊接的方向和顺序对横向应力必然产生影响。对于本研究的单面焊接和双面焊接,焊缝尾部最后冷却,因而其横向收缩受到已经冷却的先焊部分的阻碍,从而表现出很高的拉应力,单面焊接施加的两道热源在尾部更集中,双面焊接正反两面的热源相对更均匀,因此单面焊接焊缝处的拉应力相对双面焊接更高。

焊接顺序对最大残余应力的影响较大,单面双层焊接中,两次焊接产生的挠度一致,因此残余应力发生

叠加效应,产生的残余应力较大;双面焊接中,正反两次的焊接顺序,使得上下挠度部分相互抵消,挠曲变形明显比单面焊接情况要小,残余应力也相对更低。

### 2.3 电化学分析

为了获得接头的耐腐蚀性能分布情况,对 O、O1、O1'进行动电位极化和阻抗谱测试,电流密度  $i$  和电位  $E$  的关系如图 6(a)和图 6(b)所示,实部阻抗  $Z'$ 和虚部阻抗  $Z''$ 的关系如图 6(c)和图 6(d)所示。图 6(a)中单面焊接接头的三个曲线呈现与钝化区相似的趋势。腐蚀电位从 7075 侧的 O1 到焊缝的 O 和 6063 侧的 O1'变得更正。此外,O1'曲线包括一个明显的钝化区,表明其耐蚀性最高。图 6(b)中腐蚀电位从 7075 侧的 O1 到焊缝 O 和 6063 侧的 O1'变得更正。从图 6(c)和图 6(d)可以看出,单、双面焊缝容抗电弧的大小表明耐蚀性顺序为  $O1' > O > O1$ 。

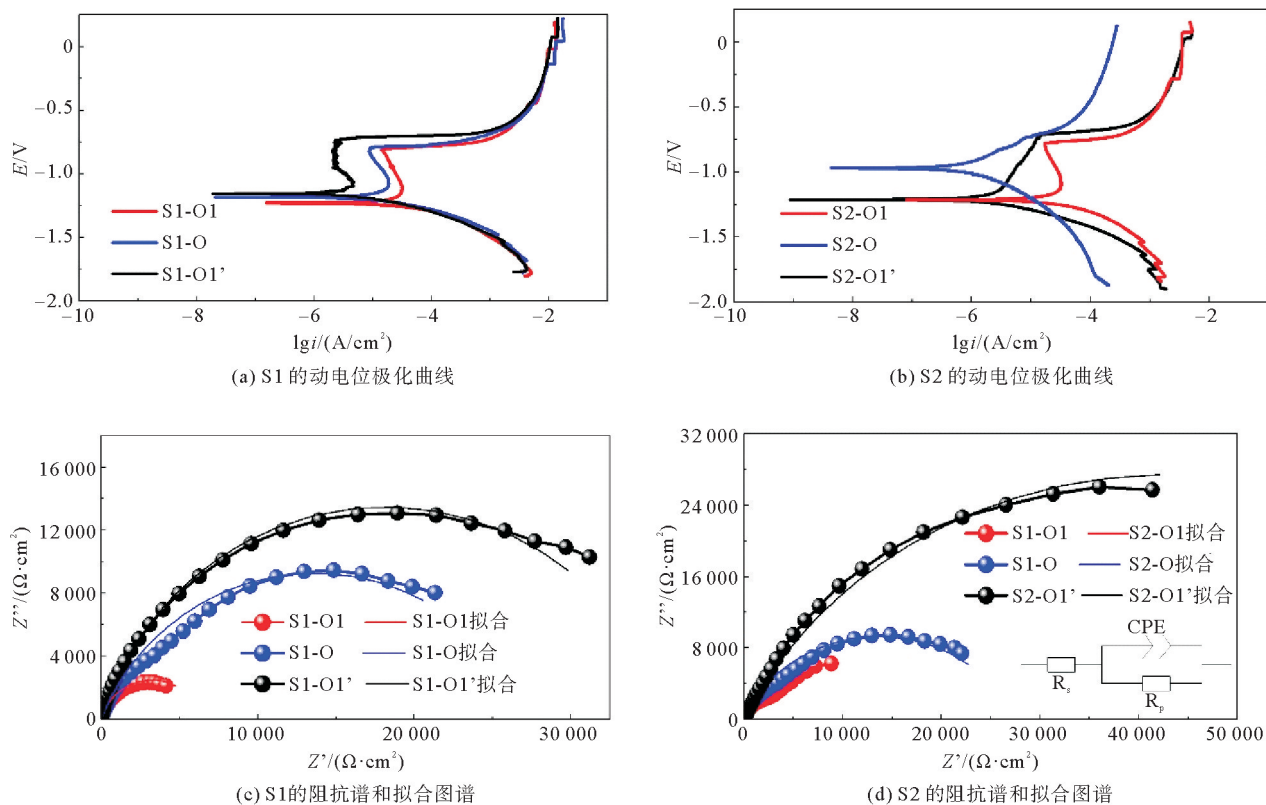


图 6 动电位极化曲线和阻抗图谱

Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves and EIS spectrum

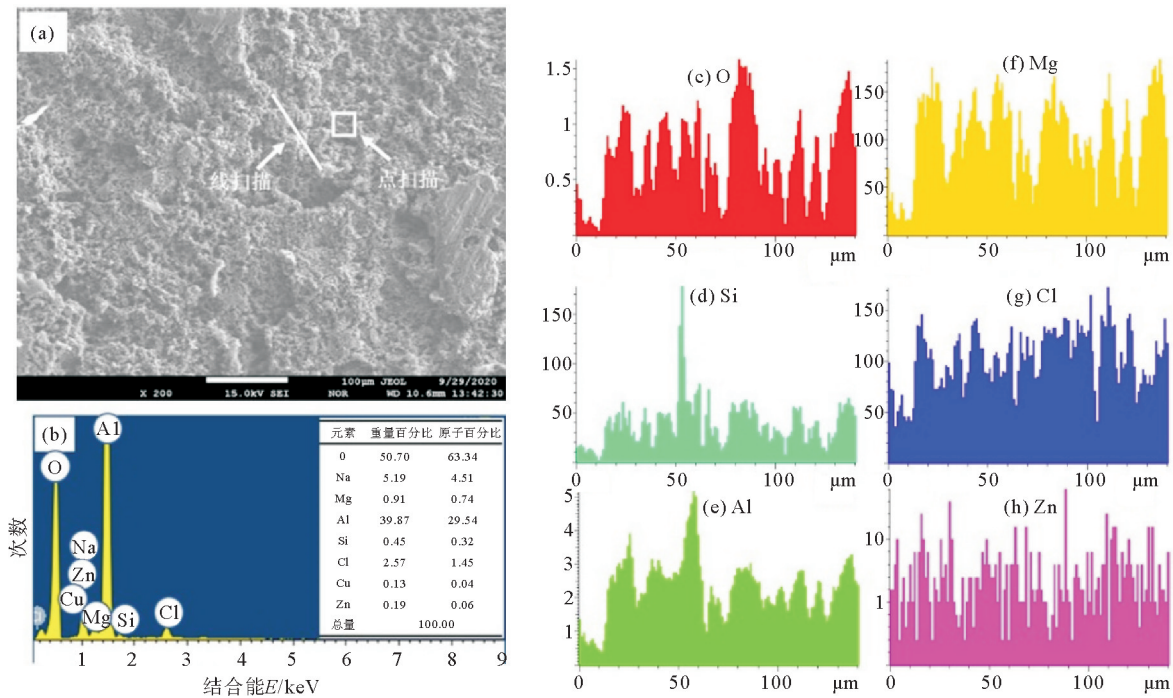
动电位极化曲线和阻抗谱主要参数拟合,包括腐蚀电位  $E_{corr}$  和腐蚀电流密度  $i_{corr}$  等,如表 2 所示。S2 的焊缝具有较低的腐蚀电流密度和最正的腐蚀电位,表明具有更好的耐蚀性。双面焊接提高了焊缝的耐蚀性。Wang 等<sup>[13]</sup>发现 ER5356 焊丝中 Ti 的存在有利于  $Al_3Ti$  金属间化合物相的形成,从而在一定程度上提高焊缝的耐蚀性。焊缝的耐蚀性略高于母材。然而,单面焊接会导致焊缝有更高的稀释度,使得焊缝受母材影响很大。双面焊接焊缝的耐蚀性与 7075 侧和 6063 侧区别较大。

为了进一步探究焊缝耐蚀性能提升的原因,采用电子探针进行单、双面焊接焊缝电化学腐蚀后的表面形貌观察,图 7 和图 8 为电子探针观察电化学腐蚀后的试样,附加的能量色散谱(energy dispersive spectroscopy, EDS) 用于确定所选区域的成分分布。

表2 6063/7075 铝合金接头动电位极化曲线和阻抗谱拟合结果

Table 2 Fitted parameters of the potentiodynamic polarization and EIS results for 6063/7075 joints

参数	O1		O		O1'	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2
阳极极化曲线斜率 $b_a/V$	0.812	0.708	0.184	0.262	0.146	0.594
阴极极化曲线斜率 $b_c/V$	0.120	0.180	0.080	0.256	0.055	0.128
腐蚀电流密度 $i_{corr}/(10^{-6} A/cm^2)$	40.048	46.016	8.856	1.164	2.044	2.302
腐蚀电位 $E_{corr}/V$	-1.232	-1.216	-1.186	-0.972	-1.158	-1.214
溶液电阻 $R_s/(\Omega \cdot cm^2)$	33.41	15.53	38.51	8.01	38.15	7.59
膜层电容 CPE-T $(10^{-5} \mu F)$	2.138	5.309	2.588	6.267	3.027	2.415
偏离常数 CPE-P $(10^{-5} \mu F)$	0.782	0.723	0.834	0.742	0.804	0.858
极化电阻 $R_p/(\Omega \cdot cm^2)$	6 592	85 921	4 003	18 435	16 043	4 366



(a) 焊缝表面腐蚀形貌; (b) 点扫描 EDS 结果; (c-h) 线扫描结果

图7 单面焊接 S1 焊缝腐蚀形貌和 EDS 结果

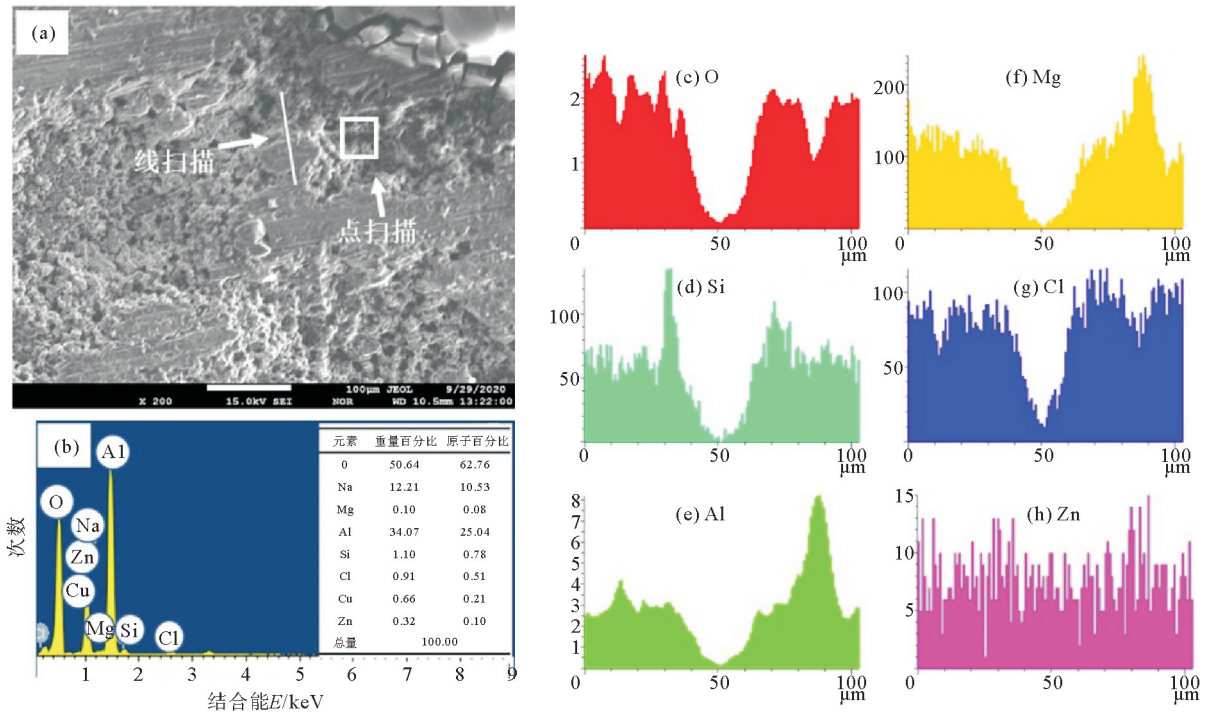
Fig. 7 Corrosion morphology and EDS results of single-sided welding S1 weld S1

单面和双面焊接焊缝腐蚀后的选区 EDS 结果可见较高的 O 含量,这表明氧化物是由吸氧腐蚀过程产生的。同时,S2 中 Si、Cu 和 Zn 的含量高于 S1,有助于提高耐蚀性。双面焊接焊缝的 Zn、Cu 含量更高,Mg 元素较少,在晶界处阳极  $\beta$  析出相 ( $Mg_2Al_3$ ) 显著减少,从而减少了局部原电池反应<sup>[14]</sup>。双面焊接中 Si 的含量相对较高, $Mg_2Si$  在腐蚀环境中使基体表面钝化,形成的  $Mg(OH)_2$  氧化膜抑制基体腐蚀,但随着腐蚀时间的增长, $Mg_2Si$  作为阳极的活性明显降低,出现局部腐蚀现象<sup>[15]</sup>。双面焊获得更加均匀的晶粒、致密的组织和较低的残余应力,以及晶粒细化后的合金元素 Si、Cu 和 Zn 的均匀分布均有利于耐蚀性的提升。

### 2.4 力学性能

6063/7075 的单、双面焊接头的力学性能通过应变-应力曲线和断口形貌进行分析,如图 9 和图 10 所示。S1 和 S2 的抗拉强度分别为 138 和 140 MPa;强度系数分别为 6063 铝合金的 67.6%和 68.6%;延伸率分别

为 13.3% 和 13.5%，二者力学性能相当。同时，单面和双面焊接工艺的断裂都发生在 6063 侧。



(a) 焊缝表面腐蚀形貌；(b) 点扫描 EDS 结果；(c-h) 线扫描结果

图 8 双面焊接 S2 焊缝腐蚀形貌和 EDS 结果

Fig. 8 Corrosion morphology and EDS results of double-sided welding S2 weld

单面和双面 MIG 焊 6063/7075 铝合金接头的力学性能良好。由图 10 可以看出，S1 和 S2 的断口表现为均匀的杯形和锥形凹坑，表明韧性断裂。ER5356 焊丝中的主要元素 Si 在焊缝中形成低熔点的共晶起到防止裂纹的作用<sup>[16]</sup>，有利于力学性能提升。然而，由于 MIG 的高热输入，增强相在基材中的溶解降低了材料的强度，限制了力学性能的提高。凹坑的大小和深度略有不同，取决于第二相粒子的分布和基体的塑性<sup>[17]</sup>。

接头和两种基体合金的显微维氏硬度如图 11 所示。两种工艺都在 6063 侧 O1' 处产生最低的平均硬度值。S2 的焊缝硬度为 155 ± 6 HV<sub>0.25</sub>，略低于 S1。单、双面焊接工艺使 S1 和 S2 焊缝成分分布均匀性不同，影响焊缝平均硬度。7075 侧的 O1 位置也有类似的趋势，即 S2 的硬度低于 S1 的硬度。6063 侧的接头由于受热输入的影响硬度略高于 6063 铝合金。焊接过程中 7075 铝合金侧析出强化相的溶解，使其硬度降低。双面焊增强相的溶解对于 7075 侧硬度的影响更大，正反面两次热输入使增强相溶解程度更大，降低了 7075 侧的硬度。Fu 等<sup>[18]</sup>的研究也指出，硬度的损失是由于析出相的溶解和生长造成的，双面焊接的热输入更均匀，形核更多，形成的超大析出相较少，因此硬度相对更低。

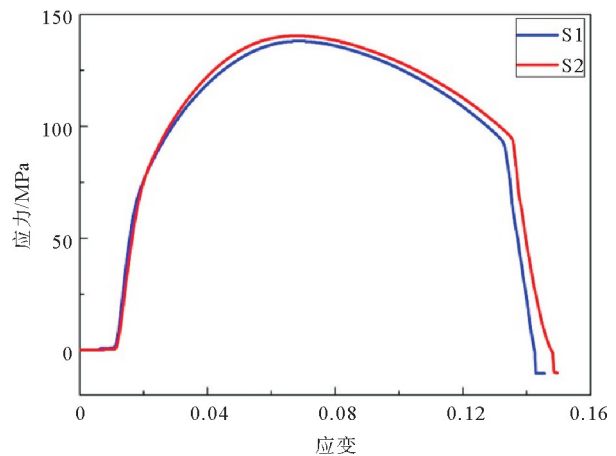
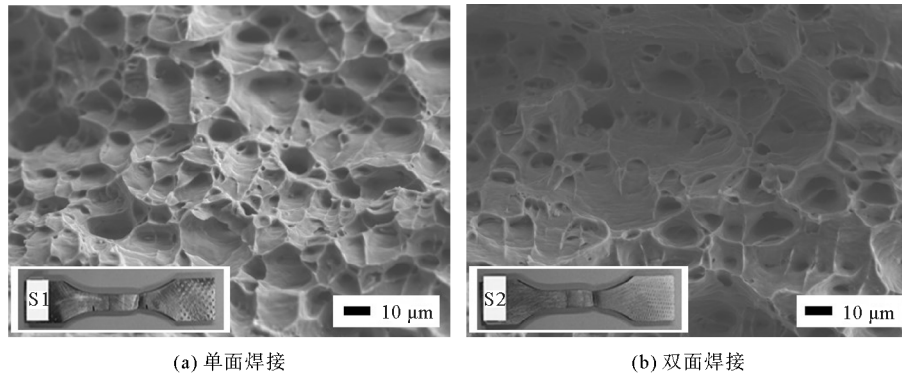


图 9 S1 和 S2 的应变-应力曲线

Fig. 9 Strain-stress curve of S1 and S2

7075 侧的 O1 位置也有类似的趋势，即 S2 的硬度低于 S1 的硬度。6063 侧的接头由于受热输入的影响硬度略高于 6063 铝合金。焊接过程中 7075 铝合金侧析出强化相的溶解，使其硬度降低。双面焊增强相的溶解对于 7075 侧硬度的影响更大，正反面两次热输入使增强相溶解程度更大，降低了 7075 侧的硬度。Fu 等<sup>[18]</sup>的研究也指出，硬度的损失是由于析出相的溶解和生长造成的，双面焊接的热输入更均匀，形核更多，形成的超大析出相较少，因此硬度相对更低。





(a) 单面焊接 (b) 双面焊接

图 10 拉伸断口形貌

Fig. 10 Tensile fracture morphology

### 3 结论

通过单面和双面 MIG 焊接工艺,获得了 6063/7075 铝合金接头,对其金相组织、耐腐蚀性和力学性能的影响:

1) 与单面焊工艺相比,双面焊晶粒更细,组织更均匀,力学性能基本相当。两种工艺在 6063 侧产生最低硬度值,但比 6063 基体高。焊缝和 7075 侧在双面焊接过程中显示出较低的硬度。

2) 双面焊接 6063/7075 接头沿焊缝方向的平均峰值残余应力  $\sigma_1$ 、纵向残余应力  $\sigma_0$  和横向残余应力  $\sigma_{2a}$  均较低且较稳定。异种材料焊接受母材和焊材成分影响,残余应力分布并不完全对称。

3) 双面焊焊缝和 6063 侧均具有较正的腐蚀电位和较小的腐蚀电流密度,表明具有更好的耐蚀性,腐蚀形貌特征也表明双面焊焊缝的腐蚀较轻。与单面焊相比,双面焊接提高了焊缝和 6063 侧的耐蚀性。

### 参考文献:

[1] 王鸿波,何昌协. 铝合金车身板材在汽车轻量化中的应用[J]. 世界有色金属,2018(7):186-187.  
WANG Hongbo,HE Changxie. Applications of aluminum alloy body plates for autolight weight[J]. World Nonferrous Metals,2018(7):186-187.

[2] 韩善灵,刘娟,肖宇,等. 三层钢铝异种板料无铆冲压接头质量及强度的仿真分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018,37(2):107-114.  
HAN Shanling,LIU Juan,XIAO Yu,et al. Simulation analysis of the clinching joint quality and strength of three-layer aluminum and steel dissimilar materials[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018,37(2):107-114.

[3] DILIP J J S,KOILRAJ M,SUNDARESWARAN V,et al. Microstructural characterization of dissimilar friction stir welds between AA2219 and AA5083[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2010,63:757-764.

[4] KUMAR P S,CHANDER M S. Effect of tool pin geometry on FSW dissimilar aluminum alloys-(AA5083 & AA6061)[J]. Materials Today:Proceedings,2021,39(1):472-477.

[5] FENG J C,ZHANG H T,HE P. The CMT short-circuiting metal transfer process and its use in thin aluminium sheets

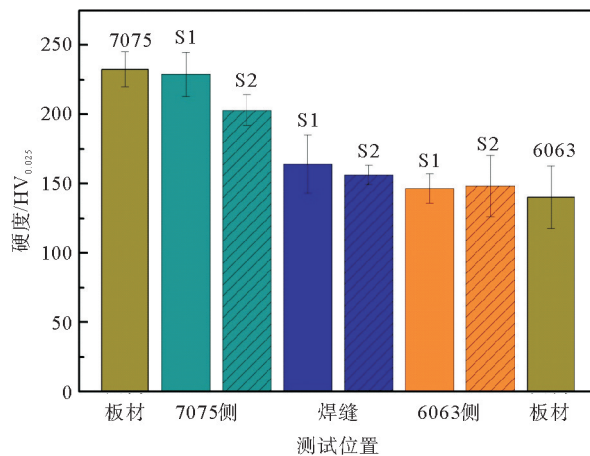


图 11 S1 和 S2、7075 铝合金和 6063 铝合金 选定区域的显微维氏硬度

Fig. 11 Microvickers hardness of selected areas of S1 and S2, 7075 aluminum alloy and 6063 aluminum alloy

- welding[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 1850-1852.
- [6] 袁艺宁. 车身铝合金板连接的静动态力学性能研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019: 1-2.  
YUAN Yining. Static and dynamic mechanical properties of aluminum alloy plate connections[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019: 1-2.
- [7] ZHAN X H, ZHAO Y Q, LIU Z M, et al. Microstructure and porosity characteristics of 5A06 aluminum alloy joints using laser-MIG hybrid welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35: 437-445.
- [8] ZHOU L, CHEN K H, CHEN S Y, et al. Correlation between stress corrosion cracking resistance and grain-boundary precipitates of a new generation high Zn-containing 7056 aluminum alloy by non-isothermal aging and re-aging heat treatment [J/OL]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 850. DOI: 10. 1016/j. jallcom. 2020. 156717.
- [9] HUANG L P, CHEN K H, LI S, et al. Influence of high-temperature pre-precipitation on local corrosion behaviors of Al-Zn-Mg alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56: 305-308.
- [10] MUKHOPADHYAY P. Alloy designation, processing, and use of AA6XXX series aluminium alloys[J/OL]. *International Scholarly Research Network*, 2012. DOI: 10. 5402/2012/165082.
- [11] LI S, REN S D, ZHANG Y B, et al. Numerical investigation of formation mechanism of welding residual stress in P92 steel multi-pass joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 244: 240-252.
- [12] COULES H E, COLEGROVE P, COZZOLINO L D. Experimental measurement of biaxial thermal stress fields caused by arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(4): 962-968.
- [13] WANG B, XUE S B, MA C L, et al. Study in wire feedability-related properties of Al-5mg solid wire electrodes bearing Zn for high-speed train[J/OL]. *Metals*, 2017, 7(12). DOI: 10. 3390/met7120520.
- [14] PAN Y Z, WANG Y, GUO F Q, et al. Stress corrosion behavior of friction stir welding joint of 7N01 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 1130-1144.
- [15] 李琳琳. 6×××系铝合金中第二相 Mg<sub>2</sub>Si 的局部腐蚀机理研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017: 25-27.  
LI Linlin. Study on the localized corrosion mechanism of the second phase Mg<sub>2</sub>Si in 6xxx series aluminum alloys[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017: 25-27.
- [16] SU Y C, HUA X M, WU Y X. Influence of alloy elements on microstructure and mechanical property of aluminum-steel lap joint made by gas metal arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 750-755.
- [17] 熊斯, 唐鑫, 王春霞, 等. 焊后热处理对 Al-Mg-Zn(-Sc-Zr) 合金焊丝焊接 7075 铝合金焊接接头组织和性能的影响[J]. *材料导报*, 2019, 33(16): 2720-2724.  
XIONG Si, TANG Xin, WANG Chunxia, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of 7075 alloy welded by Al-Mg-Zn(-Sc-Zr) alloy welding wire[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(16): 2720-2724.
- [18] FU G F, TIAN F Q, WANG H. Studies on softening of heat-affected zone of pulsed-current GMA welded Al-Zn-Mg alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 180(1/2/3): 216-220.

(责任编辑: 吕海亮)