

引用格式:孙守羲,王进,曹高威,等. 2195 铝锂合金双面搅拌摩擦焊研究[J]. 材料工程, 2025, 53(2): 125-132.  
SUN Shouyi, WANG Jin, CAO Gaowei, et al. Double-sided friction stir welding of 2195 aluminum-lithium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(2): 125-132.

## 2195 铝锂合金双面搅拌摩擦焊研究

Double-sided friction stir welding  
of 2195 aluminum-lithium alloy

孙守羲,王进\*,曹高威,慕铠丞

(青岛理工大学机械与汽车工程学院,山东青岛 266400)

SUN Shouyi, WANG Jin\*, CAO Gaowei, MU Kaicheng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao

University of Technology, Qingdao 266400, Shandong, China)

**摘要:**基于响应面设计发现 2195 铝锂合金薄板单面搅拌摩擦焊接的最佳工艺参数,并发现当转速越高焊速越低时,焊接接头的抗拉强度越高。实验结果表明:单面搅拌摩擦焊接中,针长为板材厚度的 2/3 长度时,焊缝根部出现未焊接缺陷,焊接接头的断裂形式介于脆性与塑性断裂之间,接头抗拉强度较差。在单面焊接最佳工艺参数的基础上,双面搅拌摩擦焊接能克服单面焊接中存在于焊缝根部的未焊接缺陷。通过设置不同的刀具下压量,当搅拌头转速为 1600 r/min,进给速度为 150 mm/min,下压量为 0.1 mm 时,双面焊接能将焊接接头的抗拉强度提高约 10%,焊接接头的伸长率提高 10%。双面搅拌摩擦焊接中前进侧的材料流动明显,焊接接头的断裂形式为塑性断裂。在双面焊接中,由于坯料受到了二次搅拌和加热,焊接区的材料软化加剧。相较于单面焊接,双面焊接接头处的显微硬度进一步降低。

**关键词:**搅拌摩擦焊;铝锂合金;双面焊接;工艺优化;响应面

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000192

**中图分类号:** TG453.9;TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)02-0125-08

**Abstract:** Based on the response surface design, the optimal process parameters for single-side friction stir welding (FSW) of 2195 Al-Li alloy sheets are studied. It is found that the higher the rotation speed and the lower the welding speed, the higher the tensile strength of the welded joint. The results show that in the single-side FSW, when the pin length is 2/3 length of the thickness of the plate, the root of the weld appears unwelded defects, the fracture form of the welded joint is between brittle and plastic fracture, and the tensile strength of the joint is poor. Based on the optimum process parameters of single-sided welding, double-sided FSW can overcome the unwelded defects at the root of single-sided welding. Under different tool pressures, when the stirring head speed is 1600 r/min, the feed speed is 150 mm/min, and the pressure is 0.1 mm, the double-sided welding can improve the tensile strength of the welded joint by about 10% and the elongation of the welded joint by 10%. In two-sided FSW, the material flow on the forward side is obvious, and the fracture mode of the welded joint is a plastic fracture. In double-sided welding, the plate is subjected to secondary stirring and heating, resulting in increased softening of the material in the welding area. The microhardness of the double-sided welded joint is further reduced than that of the single-sided welding.

**Key words:** FSW; aluminum-lithium alloy; double-sided welding; process optimization; response surface

铝锂 (Al-Li) 合金具有高强度/密度比、高导热性能和优良的成形性能,是一种理想的航空航天结构材料。Li 元素的加入会降低合金的质量,在 Al 中每添加 1% (质量分数,下同) 的 Li 元素,材料密度将降低 3%,弹性模量则增加近 6%<sup>[1-2]</sup>。2××× 系列铝合金可使

航空航天零部件与结构质量减轻 10%~20%,刚度提高 15%~20%<sup>[3]</sup>。当铝锂合金采用传统的熔焊工艺焊接时,材料易发生熔化和凝固,出现气孔和热裂纹等焊接缺陷,并且 Li 元素也发生烧损,导致焊接接头的强度远低于母材 (BM)<sup>[4]</sup>。搅拌摩擦焊 (friction stir

welding, FSW)是英国焊接学会(TWI)于1991年发明的,FSW作为一种固体焊接方法,可以避免Li元素烧损,避免产生气孔、裂纹等焊接缺陷<sup>[5]</sup>。Chen等<sup>[6]</sup>通过实验发现在铝锂合金搅拌摩擦焊接中,BM中存在大量 $T_1$ 和 $\theta'$ 相,有较高的硬度和强度,硬度、屈服强度和抗拉强度随焊核区(NZ)深度的增加而降低,但随转速的增加而增加。Lee等<sup>[7]</sup>研究发现铝锂合金搅拌摩擦焊的主要强化机制为晶粒细化强化,随着转速的提高,晶粒细化强化略有减弱。由于晶粒再结晶,焊缝区表现出比母材更高的显微硬度,且熔核内部的硬度分布与冷却速率有关。赵刚等<sup>[8]</sup>通过实验发现10 mm厚2219铝合金双轴肩搅拌摩擦焊对焊缝表面成形有显著影响,转速在200 r/min时焊缝表面良好,焊接接头截面硬度分布呈W形,最小值出现在后退侧热机影响区与焊核区交界处。秦丰等<sup>[9]</sup>通过改变搅拌针的针长与焊缝相对位置,探究搅拌针的针长不足以覆盖1/2板厚、超过1/2板厚0.5 mm、远超1/2板厚时,发现随着针长增加,焊缝中心缺陷消除,弯曲性能良好,但接头强度随针长继续增加而降低。Du等<sup>[10]</sup>通过双

面焊接6061铝合金得到,正面焊接可以改善背面轴肩影响区(SAZ)的位错密度和析出相,且在正面焊接的热力学影响下,沉积金属层之间结合不良,使剩余背面SAZ焊接方向的强度和伸长率受到较大破坏。Zhang等<sup>[11]</sup>研究转速和焊接速度对搅拌摩擦焊接2195-T8合金显微组织、显微硬度分布和拉伸性能的影响时发现,不同焊接参数下焊接接头的强度和延性均有明显的损失,强度只能达到母材的65%,延展性只能达到BM的54%。目前国内外针对2195搅拌摩擦焊的研究以单面焊接为主,而双面焊接可以有效地解决焊接较厚板材时搅拌针长度不足的问题,故本工作采用相应面设计的方法,针对2195铝锂合金开展双面焊接研究。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料与设备

实验材料为2195铝锂合金,尺寸为80 mm×80 mm×1.5 mm,其化学成分见表1。

表1 2195铝锂合金化学元素含量(质量分数/%)

Table 1 Chemical element content of 2195 Al-li alloy(mass fraction/%)

Element	Fe	Si	Mn	Cu	Ti	Zr	Zn	Mg	Ag	Li	Al
Min				3.7		0.08		0.25	0.25	0.8	Bal.
Max	0.15	0.12	0.25	4.3	0.1	0.16	0.25	0.8	0.6	1.2	Bal.

焊接设备为航天工程装备有限公司制造的HT-JC6×8/2型搅拌摩擦焊接设备,如图1(a)所示。搅拌头的轴肩直径为6 mm,搅拌针长为1.0 mm,搅拌针直径为3.6 mm,倾斜角度为2°,如图1(b)所示。使用螺

栓压板配合将两块待焊板材固定,采用对接焊接的形式,实验开始前对板材的焊接面处采用砂纸打磨,以去除其表面的金属氧化物。搅拌摩擦焊接时,搅拌头成顺时针旋转,焊接过程如图1(c)所示。

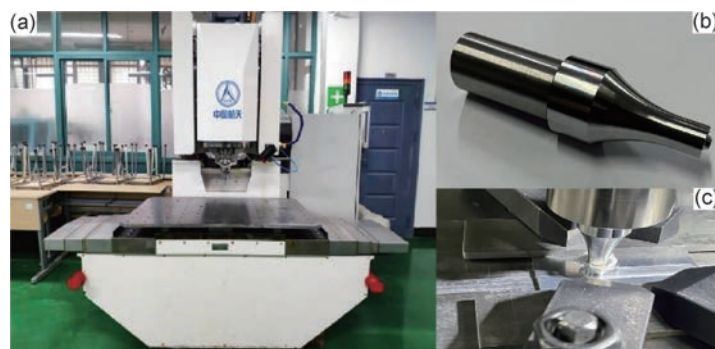


图1 搅拌摩擦焊机床(a)、搅拌头形貌(b)与焊接过程(c)

Fig. 1 Friction stir welding machine(a), stir head morphology(b) and welding process(c)

### 1.2 实验方法

基于响应面实验,采用Box-Behnken的设计方法,对A(焊接速度)、B(旋转速度)、C(下压量)三种影响搅拌摩擦焊接接头强度的因素设置合理的分布范围,

其中A的取值区间为150~250 mm/min,B的取值区间为800~1600 r/min,C的取值区间为0.1~0.3 mm。A、B、C因素大小梯度设置,不同参数间组成3因素3水平的实验设计见表2。

表 2 实验设计表

Table 2 Experimental design table

Level	A/(mm·min <sup>-1</sup> )	B/(r·min <sup>-1</sup> )	C/mm
-1	150	800	0.1
0	200	1200	0.2
1	250	1600	0.3

使用垂直于焊缝的整体试样标准,拉伸试样取于拼焊板的中间位置,拉伸试样尺寸如图 2(a)所示。实验完成后,如图 2(b)所示,在 WDW-50kN 型拉伸机上

## 2 结果与分析

### 2.1 单面焊接实验结果与方差分析

采用 Box-Behnken 的设计方法,依据实验设计

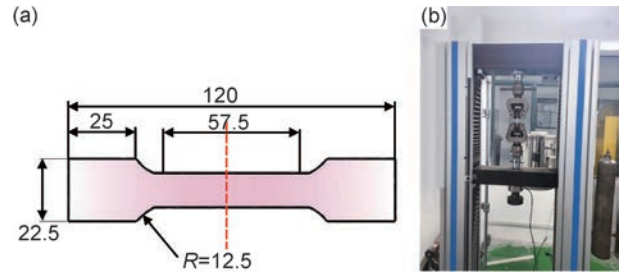


图 2 试样尺寸(a)和拉伸机(b)

Fig. 2 Pattern size (a) and stretcher (b)

表 2,设计了 17 组实验,对其分别进行实验探究,不同焊接参数下的抗拉强度和伸长率如表 3 所示。焊接参数取值对焊接接头的抗拉强度和伸长率有很大的影响,其中 12<sup>#</sup>试样 A 为 150 mm/min, B 为 1600 r/min, C 为 0.2 mm 时焊接接头的抗拉强度最大,其抗拉强度为 165 MPa。4<sup>#</sup>试样 A 为 200 mm/min, B 为 800 r/min, C 为 0.3 mm 时焊接接头的抗拉强度最小,其抗拉强度为 102 MPa。

表 3 实验结果

Table 3 Test results

Number	Factor			Result	
	A/(mm·min <sup>-1</sup> )	B/(r·min <sup>-1</sup> )	C/mm	Tensile strength/MPa	Elongation/%
1	200	800	0.1	108	6.40
2	150	1200	0.1	114	5.25
3	250	1600	0.2	124	7.58
4	200	800	0.3	102	5.80
5	200	1600	0.3	148	8.80
6	150	1200	0.3	140	9.40
7	250	800	0.2	103	6.44
8	200	1200	0.2	114	6.32
9	250	1200	0.3	119	6.40
10	150	800	0.2	127	6.90
11	200	1200	0.2	115	6.50
12	150	1600	0.2	165	10.45
13	200	1200	0.2	115	6.40
14	250	1200	0.1	106	4.50
15	200	1600	0.1	126	8.00
16	200	1200	0.2	110	6.52
17	200	1200	0.2	107	6.45

由于实验组数量较多,因此选取前 12 组实验数据的结果,绘制铝锂合金搅拌摩擦焊接头室温拉伸实验的应力-应变柱状图,如图 3 所示。根据图 3 可得出,12<sup>#</sup>试样焊接接头的抗拉强度和伸长率最佳。不同焊接参数下焊接接头的力学性能差别很大,4<sup>#</sup>试样的抗拉强度最低为 102 MPa,12<sup>#</sup>试样的伸长率最高为 10.45%,14<sup>#</sup>试样的伸长率最低为 4.5%。由此可见,

焊接工艺参数对焊接接头的力学性能具有非常重要的影响。

取 4<sup>#</sup>试样和 12<sup>#</sup>试样的焊缝表面如图 4 所示,分析产生抗拉强度差异的原因。图 4(a)为 4<sup>#</sup>试样的焊缝表面,焊缝表面纹路粗大表明旋转速度较慢而焊接速度较快。同时,焊缝区域的飞边呈现出不连续的毛刺状表明焊接过程中热输入量的不足,进而影响

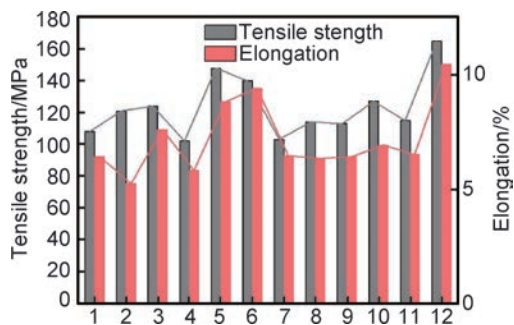


图3 应力-应变柱状图

Fig. 3 Stress-strain histogram

了金属的流动性和溢出效果。12<sup>#</sup>试样在适当的旋转速度和焊接速度的配合下,焊缝表面较为光滑,出现了大量连续且光滑的飞边。这些飞边的形成与搅拌头的下压量和焊接过程中的热输入量有着密切的关联,较大的下压量促使更多的金属发生流动,从而产生了丰富的飞边。虽然飞边的存在会影响焊缝外观的美观性,但通常不会对焊缝的力学性能造成显著影响。

拉伸实验结果显示,所有实验组的抗拉强度普遍

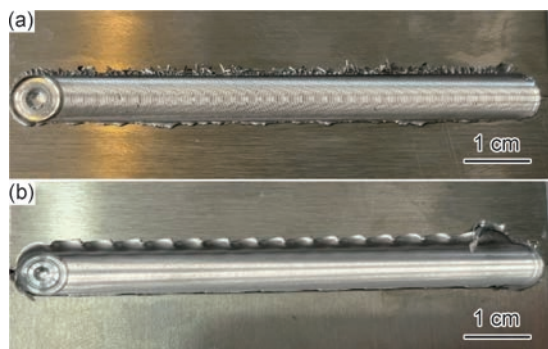


图4 4<sup>#</sup>(a)与12<sup>#</sup>(b)试样的焊缝表面图

Fig. 4 Weld surface of samples 4<sup>#</sup>(a) and 12<sup>#</sup>(b)

偏低。共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)对单面焊接的焊缝切面进行扫描,探究抗拉强度偏低的原因。在焊缝中心区域的底部,发现长约300 μm的裂痕如图5所示,该裂痕恰好位于两板拼接的焊缝位置。基于搅拌针长为1 mm,而板材厚度为1.5 mm,且在下压量设定为0.2 mm的条件下,裂痕的长度与搅拌针未能触及区域的长度相符,推断该裂痕属于未焊透缺陷。



图5 未焊透缺陷

Fig. 5 Defects of lack of penetration

通过扫描电子显微镜(SEM)对单面焊接接口中心进行微观分析,如图6所示。焊缝断口分为两个截然不同的区域,左侧区域布满了大小各异的韧窝,韧窝状结构清晰可见,表明该区域经历了典型的塑性断裂,表现出较好的塑性。而右侧区域并未发现明显的韧窝结构,断裂面相对光滑,呈现出明显的脆性断裂特征。该区域表明焊缝底部的连接并不牢固,并进一步证实了焊缝区域存在未焊透缺陷。未焊透缺陷显著降低焊接结构的整体可靠性,导致焊接接头抗拉强度不足。

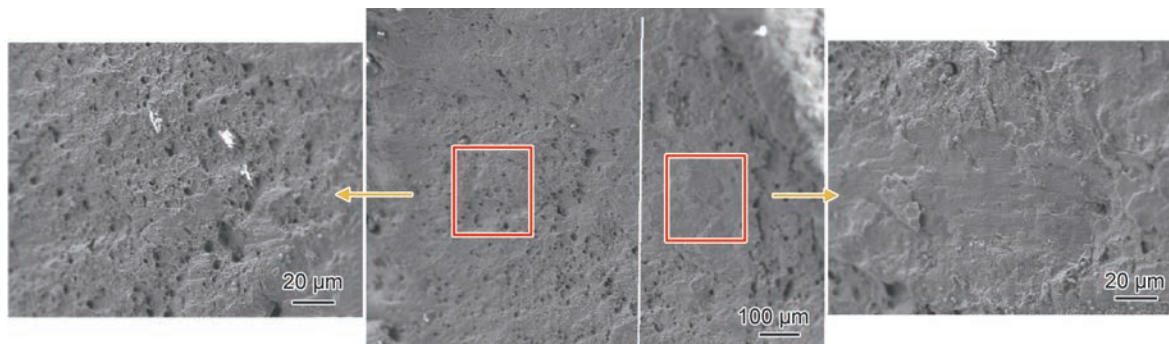


图6 焊缝拉伸断口的微观形貌

Fig. 6 Microstructure of welding tensile fracture

实验数据分析见表4。基于实验建立响应面模型的P值为0.0017,结果小于0.01,这说明该回归模型具有十分显著的意义。分析所得相关系数

$R^2=0.9394, R^2_{adj}=0.8615$ ,说明该模型与实际情况拟合较吻合;参数A的P值为0.0012,参数B的P值小于0.0002,参数C的P值为0.0182,说明旋转速度、焊接

速度、下压量均影响抗拉强度。 $A^2$ 项的  $P$  值为  $0.01 < P < 0.05$ , 说明二者达到了显著的水平, 交互项  $0.0337$ ,  $B^2$ 项的  $P$  值为  $0.0189$ , 二者的显著性概率  $AB$ 、 $AC$ 、 $BC$ 项均不显著。

表 4 响应面结果分析

Table 4 Response surface result analysis

Element	Quadratic sum	Degree of freedom	Mean square error	F	P	Significance
Model	4372.42	9	485.82	12.06	0.0017	Outstanding
A	1104.50	1	1104.50	27.41	0.0012	Outstanding
B	1891.13	1	1891.13	46.93	0.0002	Outstanding
C	378.13	1	378.13	9.38	0.0182	Outstanding
AB	72.25	1	72.25	1.79	0.2224	
AC	42.25	1	42.25	1.05	0.3399	
BC	196.00	1	196.00	4.86	0.0632	
$A^2$	279.67	1	279.67	6.94	0.0337	Outstanding
$B^2$	372.04	1	372.04	9.23	0.0189	Outstanding
$C^2$	1.52	1	1.52	0.038	0.8517	
Residual	282.05	7	40.29			
Disfitting term	231.25	3	77.08	0.67	0.0570	
Absolute error	50.80	4	12.07			
Total	4654.47	16				

根据参数项与交互项的显著值, 除去不显著的  $AB$ 与  $AC$ 、 $BC$ 、 $C^2$ 项,  $\sigma$ 为抗拉强度, 式(1)为抗拉强度的回归预测模型:

$$\sigma = 112.2 - 11.75A + 15.38B + 6.88C + 8.15 \times A^2 + 9.40B^2 \quad (1)$$

抗拉强度与各因素间形成一个三维空间图, 可以直观地反映出各自变量对抗拉强度的影响。依据图 7 交互因素  $AB$ 、 $AC$ 、 $BC$ 响应面图, 得到不同影响参数

间因素交互对搅拌摩擦焊接中焊接接头抗拉强度的影响。图 7(a)表明进给速度越慢、旋转速度越快时, 搅拌摩擦焊接时的热输入量越大, 焊接接头的抗拉强度越高; 图 7(b)表明焊接速度越小、下压量越大时, 焊接时的热输入量增加, 焊接接头内部塑性连接区域增加, 焊接接头的抗拉强度越高; 图 7(c)表明旋转速度越高、下压量越大时, 焊接时热输入量越高, 焊接接头内部塑性连接区域增加, 焊接接头的抗拉强度越高。

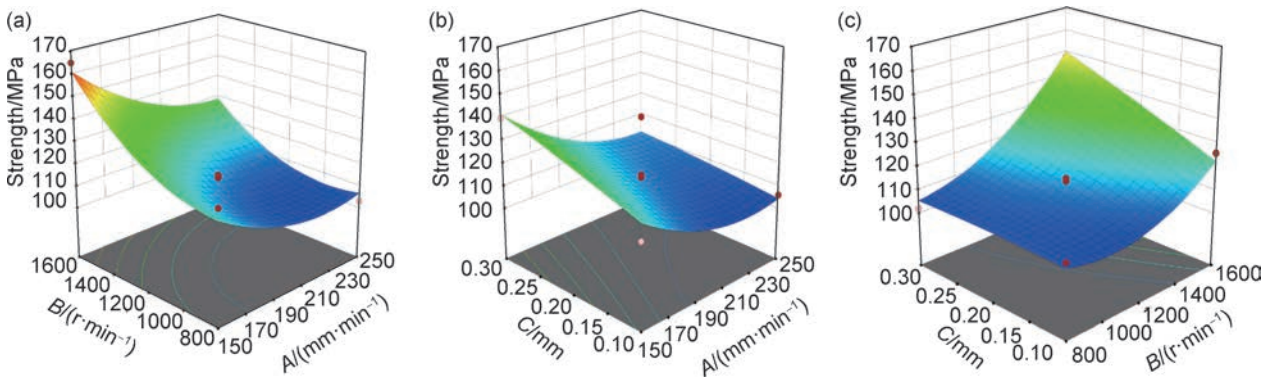


图 7 交互因素  $AB$  (a)、 $AC$  (b)及  $BC$  (c)的响应曲面图  
Fig. 7 Response surface diagram of interaction factors  $AB$  (a),  $AC$  (b) and  $BC$  (c)

### 2.2 双面搅拌摩擦焊

当焊接的板材较厚或搅拌针的长度与焊接板材厚度差异较大的情况下, 易引起焊接缺陷, 如未焊透、隧道和弱连接等<sup>[12]</sup>, 双面焊接的工艺能解决单面焊接焊缝根部出现的缺陷问题。此外, 当材料厚度相同

时, 采用双面搅拌摩擦焊接对焊接设备轴向力的需求更低, 降低设备负荷和成本。

沿用单面焊接的最佳工艺参数, 双面搅拌摩擦焊接分两次焊接完成, 在完成首次焊接后, 焊接件自然冷却大约 5 min, 随后将其从焊接装置中取出。对板料

进行重新装夹并精确定位,这一过程大约耗时 15 min,确保第二次焊接时板料已经完全冷却至室温。为了确保焊接质量,在正反两面的焊接过程中选择相同的焊接方向,这样可以有效地避免在第二次焊接时产生多余的焊接匙孔。

两种不同焊接参数下的焊缝表面外观形貌如图 8 所示。二次焊接后所产生的焊缝重叠区由于受到了二次搅动的作用,发生两次动态再结晶过程,双面焊接焊缝的飞边主要为已经发生过塑性变形的材料,焊缝飞边较软不连续呈碎屑状。焊缝表面鱼鳞状纹路明显,焊缝前端都存在热输入量不足导致的焊缝起皮缺陷,双面搅拌摩擦焊不同下压量对焊缝表面的影响不大。

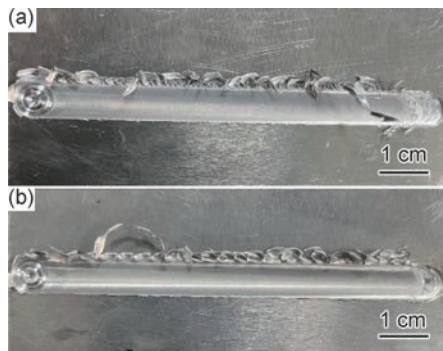


图8 双面焊接接头形貌

(a)1600-15-0.1D;(b)1600-15-0.2D

Fig. 8 Morphology of double-sided welded joint

(a)1600-15-0.1D;(b)1600-15-0.2D

图 9 为 CLSM 扫描不同下压量焊接接头的截面图。由图观察得到,当正反面的焊接方向一致时,两次搅拌前进侧在异边。搅拌头旋转,针头附近发生金属塑化,发生非均匀的热传递导致出现组织分层,产生区别于母材的微观组织结构,受双面焊接的影响,焊缝两边存在“V”形组织分层,在前进侧能看到明显的“洋葱环”<sup>[13]</sup>。二次搅拌与加热使二次焊接重合区



图9 不同下压量焊接接头截面

(a)1600-15-0.1;(b)1600-15-0.2

Fig. 9 Section of welded joint with different pressure

(a)1600-15-0.1;(b)1600-15-0.2

材料发生动态再结晶后生成细小的等轴晶组织,呈现明显的材料塑性流动痕迹。将双面焊接的板材加工成标准拉伸件,其拉伸结果如表 5 所示。

表5 试验结果

Table 5 Test results

Number	A/ (mm·min <sup>-1</sup> )	B/ (r·min <sup>-1</sup> )	C/mm	Welding direction	Strength/ MPa
1	1600	150	0.1	Identical	195
2	1600	150	0.2	Identical	190

图 10 为单面焊接与双面焊接应力-应变曲线对比图。图中蓝、红曲线分别为下压量为 0.1 mm 与 0.2 mm 时双面焊接的焊接接头应力-应变曲线,黑色曲线为单面焊接时最佳工艺参数的应力-应变曲线。所有曲线均未显示出明显的屈服阶段,表明试样经历了均匀的塑性变形,并在形成显著颈缩后断裂<sup>[14]</sup>。双面焊接有效地解决单面焊接过程中出现的未焊透缺陷,焊接接头的抗拉强度相较于单面焊接提高约 30 MPa,双面焊接接头的抗拉强度达到母材强度的 62%,伸长率提高约 10%。此外,下压量的调整对接头抗拉强度的影响是有限的。

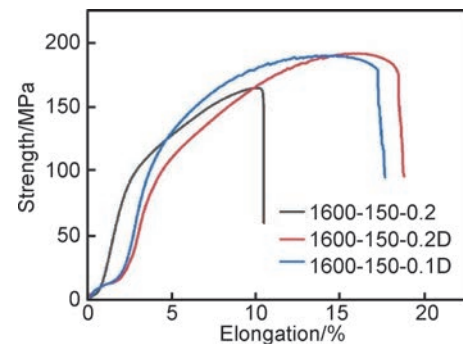


图10 不同下压量单双面焊接应力-应变曲线对比

Fig. 10 Single and double-sided weld stress-strain curves with different pressure

选取双面焊接工艺中抗拉强度与伸长率表现优异的 2<sup>#</sup>试样进行 SEM 的断口微观形貌分析如图 11 所示,韧窝结构遍布断口表面,这些韧窝大小各异,在部分较大的韧窝内部存在嵌套的小韧窝结构,大韧窝结构的平均直径约为 5 μm,而小韧窝结构的平均直径约为 2 μm。这种韧性断裂特征表明,焊接接头在断裂过程中经历了微孔的形成、增长和相互连接的连续过程<sup>[15]</sup>。与单面焊接相比,双面焊接的拉伸断口显示出更为明显的塑性断裂特征,表明双面焊接接头具有较好的伸长率和更高的抗拉强度<sup>[16]</sup>。

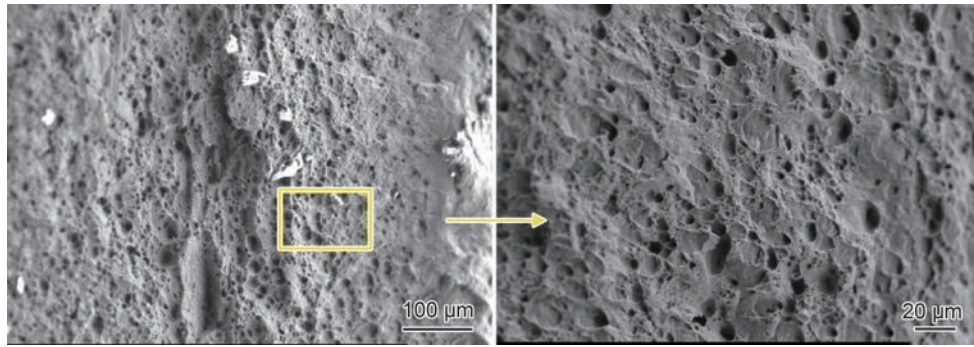


图 11 1600-150-0.1 双面焊接断口微观形貌

Fig. 11 Microstructure of double-sided welding fracture of 1600-150-0.1

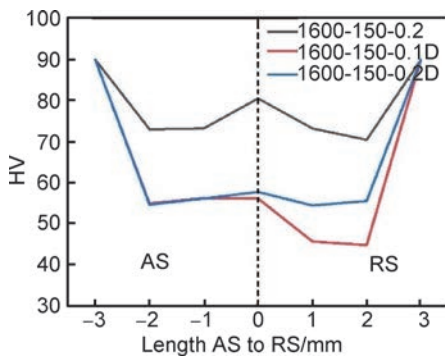


图 12 单、双面焊接接头的硬度

Fig. 12 Hardness of single and double-sided welded joints

图 12 为单面焊接与双面焊接接头的显微硬度分布情况,其中黑色实线旋转速度为 1600 r/min、焊接速度为 150 mm/min、下压量为 0.2 mm 条件下单面焊接的显微硬度分布,而蓝、红色实线分别代表相同旋转速度和焊接速度下,双面焊接时下压量分别为 0.1 mm 和 0.2 mm 的焊缝区域硬度分布情况。单面焊接时焊缝区域的显微硬度分布呈现“W”形,焊缝区域的硬度低于母材区域。由于晶粒细化,焊核区(NZ)的硬度相对较高,热机影响区(TMAZ)和热影响区(HAZ)的晶粒生长导致整体硬度显著下降。单面焊接接头的显微硬度普遍高于双面焊接接头,双面焊接下压量分别为 0.1 mm 和 0.2 mm 时,前进侧区域的显微硬度值相近。双面焊接时焊缝区域硬度较母材出现显著的降低,这可能是由于搅拌针头在第一次焊接区域再次进行搅拌和加热,导致整个第二次焊接区域的强化相发生粗化,进而使得焊接区域的硬度整体进一步降低<sup>[17-18]</sup>。

### 3 结论

(1) 基于响应面法,当针长为 1 mm,板厚为 1.5 mm 时,单面焊接的最佳工艺参数为旋转速度 1600 r/min,

焊接速度 150 mm/min,下压量 0.2 mm,且旋转速度越快、焊接速度越小、下压量越大时,焊接接头的抗拉强度越好。

(2) 焊接接头的最大抗拉强度为 165 MPa,焊接接头的拉伸断裂形式为塑性+脆性混合断裂形式,实验发现焊缝底部存在未焊透缺陷。

(3) 双面焊接能克服单面焊接焊缝根部的未焊透缺陷,双面焊接接头断口存在大小不一的撕裂状韧窝,断裂形式为塑性断裂,接头最大抗拉强度为 195 MPa,焊接接头的抗拉强度提高约 30 MPa,伸长率提高约 10%。

(4) 双面搅拌摩擦焊接中前进侧材料流动明显,焊接接头的断裂形式为塑性断裂。双面焊接时,搅拌针头经过二次搅拌,焊接区域二次升温,焊缝区域材料进一步软化,相较于单面焊接,显微硬度进一步降低。

### 参考文献

- [1] TOLGA D, COSTAS S. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys [J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 862-871.
- [2] ROJA R J, LIU J. Evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications [J]. *Metall Mater Trans A*, 2012, 43: 3325-3337.
- [3] QIN H L, ZHANG H, WU H Q. The evolution of precipitation and microstructure in friction stir welded 2195-T8 Al-Li alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 626: 322-329.
- [4] 周利, 李高辉, 刘朝磊, 等. 铝锂合金焊接技术的研究现状 [J]. *焊接*, 2017 (1): 7-12.
- [5] ZHOU L, LI G H, LIU C L, et al. Research progress in welding technology of Al-Li alloy [J]. *Welding & Joining*, 2017(1): 7-12.
- [6] DENG C M, WANG K M, WANG F F, et al. Effect of microstructure evolution on corrosion behavior of 2195 Al-Li alloy friction stir welding joint [J]. *Materials Characterization*, 2022, 184: 111652.
- [7] CHEN P, ZHOU S Q, CHEN J, et al. Effect of rotation speed on microstructure evolution and mechanical properties of nuggetzone in 2195-T8 Al-Li alloy friction stir welding joints [J]. *Materials Characterization*, 2021, 176: 111079.

- [7] LEE H S, YOON J H, YOO J T, et al. Friction stir welding process of aluminum-lithium alloy 2195 [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 149:62-66.
- [8] 赵刚, 颜旭, 王立梅, 等. 焊接工艺参数对10 mm厚2219铝合金双轴肩搅拌摩擦焊缝质量和性能的影响[J]. *焊接*, 2022(12):13-19.  
ZHAO G, YAN X, WANG L M, et al. Effect of welding parameters on the quality and properties of self-reacting friction stir welding of 10 mm thick 2219 aluminum alloy [J]. *Welding & Joining*, 2022(12):13-19.
- [9] 秦丰, 周军, 侯振国, 等. 6082铝合金双面搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. *焊接学报*, 2021, 42(2):75-80.  
QIN F, ZHOU J, HOU Z G, et al. Research on microstructure and properties of double-sided friction stir welding joint of 6082 aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(2):75-80.
- [10] DU C C, WANG X, PAN Q H, et al. Correlation between microstructure and mechanical properties of 6061-T6 double-side FSW joint [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38:122-134.
- [11] ZHANG J, FENGXS, GAO J S, et al. Effects of welding parameters and post-heat treatment on mechanical properties of friction stir welded AA2195-T8 Al-Li alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(1):219-227.
- [12] 李博, 沈以赴, 胡伟叶. 伸缩式搅拌头厚铝板搅拌摩擦焊缺陷及其补焊工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(1):62-71.  
LI B, SHEN Y F, HU W Y. Friction-stir welded defects and repairing weld process of thick aluminum plates with telescopic stir pin [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(1):62-71.
- [13] 石磊, 戴翔, 武传松, 等. 2195铝锂合金超声振动辅助搅拌摩擦焊接工艺研究[J]. *材料工程*, 2021, 49(5):122-129.  
SHI L, DAI X, WU C S, et al. Process investigation on ultrasonic vibration enhanced friction stir welding of 2195 aluminum-lithium alloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(5):122-129.
- [14] 赵金侠, 张亚梓, 吕晓静. 金属材料应力-应变曲线分析[J]. *科技风*, 2019(9):171-182.  
ZHAO J X, ZHANG Y Z, LV X J. Stress-strain curve analysis of metallic materials [J]. *Technology Trend*, 2019(9):171-182.
- [15] 王勇强, 王进, 王梦婷, 等. 5052/6061异种铝合金薄板搅拌摩擦焊接工艺研究[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(4):122-128.  
WANG Y Q, WANG J, WANG M T, et al. Friction stir welding process of 5052/6061 dissimilar aluminum alloy sheet [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(4):122-128.
- [16] 刘亮. 5052/6061异材等厚铝合金板搅拌摩擦焊接头组织及性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学, 2016.  
LIU L. Study on microstructure and properties of friction stir welded joint of 5052/6061 dissimilar aluminum alloy plate [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016.
- [17] 赵强, 祝文卉, 邵天巍, 等. Ti-22Al-25Nb合金惯性摩擦焊接头显微组织与力学性能[J]. *材料工程*, 2020, 48(6):140-147.  
ZHAO Q, ZHU W H, SHAO T W, et al. Microstructure and mechanical properties of inertiafriction welded joint of Ti-22Al-25Nb alloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(6):140-147.
- [18] 杨新岐, 元惠新, 孙转平, 等. 铝合金厚板静止轴肩搅拌摩擦焊接头组织及性能[J]. *材料工程*, 2022, 50(7):128-138.  
YANG X Q, YUAN H X, SUN Z P, et al. Microstructure and properties of stationary shoulder friction stir welded joints for aluminum alloy thick-plate [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(7):128-138.

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019GGX102023)

收稿日期:2023-03-21;修订日期:2024-08-01

通讯作者:王进(1978—),男,教授,博士,研究方向为先进材料成形理论与工艺、材料表面工程、新型金属材料开发,联系地址:山东省青岛市黄岛区嘉陵江路777号青岛理工大学(266400),E-mail:wangjin@qut.edu.cn

(本文责编:张宝玲)