

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5057

2B06/7B04 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺及接头断裂模式研究

曹翰墨^{1,2}, 祖韵迪^{1,2}, 熊江涛^{1,2}, 张 达^{1,2}, 郭 伟^{1,2}, 李京龙^{1,2}

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072 2. 西北工业大学 摩擦焊接技术陕西省重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要: 回填式搅拌摩擦点焊(refill friction stir spot welding, RFSSW)凭借其效率高、质量好的优势,在轻质高强铝合金连接领域已展现出广阔的应用前景。然而,目前针对异种材料的 RFSSW 研究尚不充分,缺乏完善的接头质量评价体系。本研究以 2B06/7B04 高强铝合金异种组配为研究对象,通过系统的 RFSSW 工艺试验,获得了工艺参数与接头形貌特征、显微硬度分布及拉剪性能之间的关系,实现了焊接工艺优化。通过拟合回归方程获得的最佳工艺参数为:转速 1 600 r/min、下压量 1.47 mm、下压速率 60 mm/min,在此参数下接头的拉剪失效载荷达到了 5.22 kN。通过对拉剪断口形貌分析,发现接头有两种断裂模式:塞型断裂与混合型断裂,其中塞型断裂的失效载荷低于混合型断裂。

关键词: 铝合金;异种材料;回填式搅拌摩擦点焊;焊接工艺;断裂模式

中图分类号: TG453

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)11-1107-12

Investigation of Process and Joint Fracture Modes in Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar 2B06/7B04 Aluminium Alloys

CAO Hanmo^{1,2}, ZU Yundi^{1,2}, XIONG Jiangtao^{1,2}, ZHANG Da^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, LI Jinglong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xian 710072, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Refill friction stir spot welding (RFSSW) has demonstrated broad application prospects in the field of lightweight, high-strength aluminium alloys because of its advantages of high efficiency and superior quality. However, studies on RFSSW for dissimilar materials have not been sufficiently conducted, and a comprehensive evaluation system for joint quality is still lacking. This study focused on the dissimilar combination of 2B06/7B04 high-strength aluminium alloys. Through systematic RFSSW process experiments, relationships between the welding parameters and joint morphology characteristics, microhardness distribution, and tensile-shear properties were established, ultimately achieving process optimization. The optimal process parameters obtained by fitting the regression equation are as follows: rotational speed, 1 600 r/min; press volume, 1.47 mm; press rate, 60 mm/min; and refill rate, 60 mm/min. The corresponding joint tensile-shear failure load is 5.22 kN. The analysis of tensile-shear fracture morphology reveals that the joints exhibit two fracture modes, plug-type fracture and mixed-mode fracture, whereby the failure load of plug-type fracture was lower than that of mixed-mode fracture.

Key words: aluminium alloy; dissimilar materials; refill friction stir spot welding; welding process; fracture mode

高强铝合金(7000 系、2000 系)由于其具有较高强度的同时满足轻量化需求,被大量应用于飞机蒙皮与桁条、隔框以及支架等结构的制造^[1-4]。然而传统的连接方式电阻点焊、铆接等存在熔焊缺陷或者

连接不牢固以及间隙腐蚀等问题。搅拌摩擦焊作为一种固相连接技术,最初是为了焊接各种型号的铝合金^[5],可以避免熔焊时出现的气孔、偏析、凝固裂纹等冶金缺陷。搅拌摩擦点焊(friction stir spot weld-

收稿日期: 2025-04-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52475404);陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台(2024ZG-GXPT-02)

作者简介: 曹翰墨,1999 年生,硕士生。研究方向为材料加工工程。Email: chm1211963663@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 熊江涛,1974 年生,博士,教授。研究方向为材料加工工程。Email: xiongjiangtao@nwpu.edu.cn

郭 伟,1985 年生,博士,教授。研究方向为材料加工工程。Email: nwpuweiguo@nwpu.edu.cn

引用格式: 曹翰墨,祖韵迪,熊江涛,张达,郭伟,李京龙. 2B06/7B04 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺及接头断裂模式研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(11): 1107-1118.

CAO H M, ZU Y D, XIONG J T, ZHANG D, GUO W, LI J L. Investigation of process and joint fracture modes in refill friction stir spot welding of dissimilar 2B06/7B04 aluminium alloys[J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1107-1118.

ing, FSSW)作为搅拌摩擦焊的一个分支,通过非消耗性旋转工具进行一系列的固态搅拌摩擦点焊以连接不同的搭接板^[6]。但 FSSW 会不可避免地产生匙孔缺陷,进而破坏接头连续性并产生严重的应力集中^[7]。

回填式搅拌摩擦点焊(refill friction stir spot welding, RFSSW)是 1999 年由德国 GKSS 公司发明的一项固相连接技术,该技术通过搅拌套与搅拌针相对运动,消除了传统搅拌摩擦点焊过程产生的匙孔缺陷,增大接头有效承载面积,从而提高接头的力学性能。许多学者改良回填式搅拌摩擦点焊过程来提高接头力学性能,通过回填阶段设定回填结束位置略低于被焊材料上表面来获得无孔洞点焊接头。Chen 等^[8]通过在下压阶段与回填阶段之间增加停留阶段,增加焊点的高温停留时间,但是会降低焊接效率。为了获得无孔洞的点焊接头,本研究结合 Chen 等^[8]的研究成果,采用非对称式搅拌摩擦点焊,并增加了 SRP 阶段。作为 RFSSW 接头经典形貌,许多学者采用 Hook 形貌的高度值来量化表征 Hook 形貌。张浩楠^[9]的研究结果表明 Hook 形貌的高度随着下压量的增加(2.7~3.6 mm)而增加。由于 2 系与 7 系铝合金耐腐蚀性不高,工业生产中经常在其表面包一层纯铝,在 RFSSW 过程中会被压入焊点中从而降低接头的力学性能。Li 等^[10]发现随着转速的增加,接头横截面的包铝长度降低。赵运强^[11]发现包铝呈“U”形分布,随转速和下压量的增加,包铝弯曲程度增加。RFSSW 缺陷包括表面与内部缺陷,其中内部缺陷包括孔洞与弱连接,Chai 等^[12]研究了不同转速对孔洞缺陷的影响,发现孔洞尺寸随着转速增加先增大后减小。Xiong 等^[13]运用有限元定性描述了孔洞尺寸随着转速的增加先减小后增加的关系,与 Chai 不同;RFSSW 接头力学性能是评价接头质量的重要指标之一,Chai 等^[12]发现随着转速增加,3.2 mm 厚 2060 铝合金失效载荷先增加后减少。陈丹等^[14]对 7050 和 2524 铝合金通过改变不同的参数进 RFSSW,发现失效载荷随着工艺参数(转速、下压量、搅拌套运动速率)的增加先增加后减少;目前高强铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头的断裂模式主要分为剪切-塞型断裂、剪切型断裂以及塞型断裂 3 种^[15]。Kubit 等^[16]对 0.8 mm 厚 7075-T6 铝合金

在不同下压量的接头断裂模式进行分析,发现随着下压量增加接头的断裂模式从剪切型断裂变为剪切-塞型断裂后转变为塞型断裂,其中剪切-塞型的失效载荷最高、剪切型断裂模式的失效载荷最低。Zhou 等^[17]对 2 mm 厚 6061-T6 铝合金在不同工艺参数下发现两种断裂模式:塞型断裂与拉剪型断裂。

目前,关于 RFSSW 的工作主要针对 1~2 mm 厚的镁合金以及铝、锂同种合金材料^[18],关于工艺参数对异种材料搭接焊接头的组织、形貌以及力学性能的研究还很缺乏^[19-21]。高强铝合金之间,以及铝合金/不锈钢、镁合金/钛合金等新兴组合的工艺优化研究仍处于理论阶段,缺乏工程化实验数据支持,行业标准(如工艺参数范围、质量评价体系)尚未统一,制约工程应用。因此本文根据 RFSSW 点焊工艺实验,对异种铝合金点焊接头进行宏、微观观察、力学性能测试,获得工艺参数对 2B06/7B04 接头组织、形貌的影响规律,不同工艺参数下显微硬度的分布情况,以及接头拉剪性能随工艺参数的演变规律,为 RFSSW 技术在异种材料规模化、标准化应用提供理论支撑。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用材料为 2B06-T42 铝合金板材(100 mm×25 mm×1 mm)和 7B04-T74 铝合金板材(100 mm×25 mm×1.5 mm),合金的化学成分见表 1。

2B06 铝合金是一种耐热结构材料,属于 Al-Cu-Mg 系。该合金在国产牌号 2A06 铝合金的基础上,通过去除其中的 Fe、Si 杂质,精炼提纯,使其具有良好的塑性和断裂韧性等综合性能。该合金在高温环境下表现出良好的抗蠕变特性,其软化温度阈值显著高于常规铝合金,同时保持优良的成型加工特性,适用于制造热环境工况下的机械部件。7B04 铝合金是在国产牌号 7A04 的基础上,通过去除杂质元素获得的一种超高强铝合金,属于 Al-Zn-Mg-Cu 系,具有硬度高、抗拉强度高、抗裂纹扩展性能优良等优点,多用于承力框架、接头等关键结构件。为了防腐,分别在母材表面包覆厚度约为 0.06 mm 和 0.12 mm 的工业纯铝,简称包铝。两种异种铝合金的搭接焊接可兼顾复杂成形与高强度需求,2B06 的优良成型加工特性可用于机身曲面蒙皮,7B04 的高

表1 铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the aluminium alloy

Base metal	(mass fraction/%)							
	Al	Zn	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Others
2B06-T42	Bal.	-	3.8~4.3	1.7~2.3	0.4~0.9	≤0.3	≤0.2	<0.1
7B04-T74	Bal.	5.0~6.5	1.4~2.0	5.0~6.5	1.8~2.8	0.2~0.6	0.05~0.25	<0.1

强性可作为承力框架,搭接焊接可减轻质量并提升整体刚度。

1.2 实验方法

实验采用单因素分析法,分别研究焊具转速(ω)、搅拌套下压量(p)、搅拌套下压速率(r_1)及回填速率(r_2)对点焊组织形貌、力学性能与断裂模式的影响,分为4组焊接实验,具体参数见表2。

焊接试样的结构与尺寸如图1所示,其中上板为2B06-T42铝合金,下板为1.5 mm厚的7B04-T74铝合金,点焊接头形式为搭接,接触面积为25 mm×25 mm。

实验是在龙门式数控回填搅拌摩擦点焊机上进行的,整体结构如图2a所示,其中焊接工作区的放大图如图2b所示,通过在机头上安装3个独立的伺服电机来驱动搅拌头做轴向与周向运动实现二者同步旋转、搅拌针下压与搅拌套回填等动作。搅拌头形状与尺寸如图2c所示,搅拌头由3个焊具共同组成,由内而外分别为搅拌针、搅拌套和压紧环,3个焊具保持高同轴度,其直径分别为6,9与18 mm。在清洗之后将被焊材料以搭接的形式放置在背板上,并用夹具加紧。然后,在焊前调整机头到待焊位置,并标定焊接位置为0点,然后在控制面板中输入焊接工艺参数。最后,运行设定好的程序实现自动焊接。

表2 RFSSW焊接工艺参数
Tab.2 Welding process parameters of RFSSW

Process parameters	Rotational speed /($r \cdot \min^{-1}$)	Plunge depth /mm	Pressing speed /($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	Refilling speed /($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
Experiment 1	1 000			
	1 300			
	1 600	1.6	60	60
	1 900			
	2 200			
Experiment 2		1.2		
		1.4		
	1 600	1.6	60	60
		1.8		
		2.0		
Experiment 3			20	
			40	
	1 600	1.6	60	60
			80	
			100	
Experiment 4				20
				40
	1 600	1.6	60	60
			80	
				100

焊接完成后制备金相试样和拉伸试样,试样的焊前处理包括打磨、清除油污、表面氧化膜工序。试

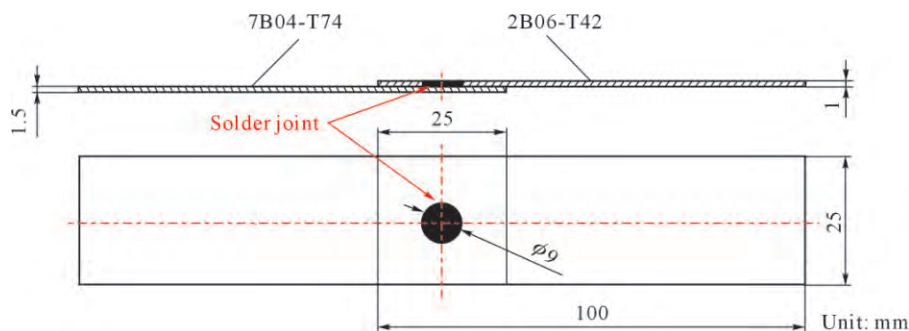


图1 回填式搅拌摩擦点焊试样结构、尺寸和接头形式
Fig.1 Structure, size and joint form of the RFSSW samples

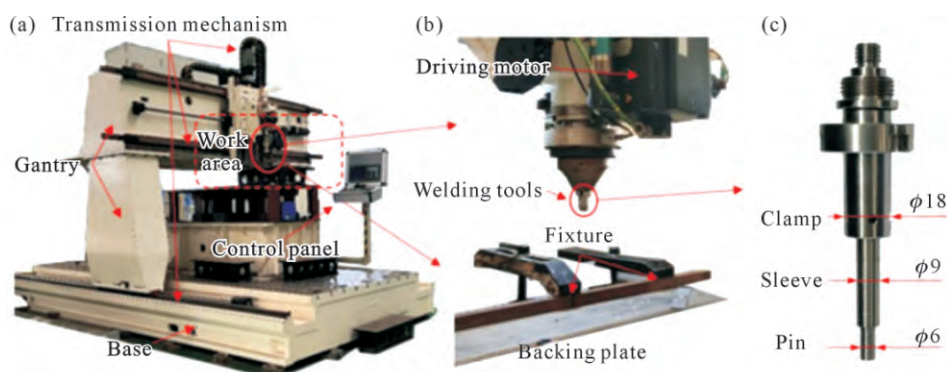


图2 龙门式数控回填搅拌摩擦点焊机:(a)设备整体结构;(b)工作区放大图;(c)点焊工具

Fig.2 Gantry CNC refill friction stir spot welding machine: (a) overall structure of the machine; (b) enlarged view of the work area; (c) welding tools

验前用砂纸按 400#, 600#, 800#, 1000# 和 1500# 的顺序对试样进行逐级打磨, 使用抛光机抛光至镜面后采用 Keller 试剂(1%HF+1.5%HCl+2.5% HNO_3 +95% H_2O , 本研究中所有试剂百分比浓度均指体积分数)对抛光面进行腐蚀。腐蚀后用 OLYMPUS 光学显微镜对各区域晶粒尺寸、焊点形貌与缺陷等进行观察分析; 之后将 Keller 试剂腐蚀后的金相试样在配有能谱仪的 ZEISS Gemini 500 场发射扫描电镜对接头显微组织进行进一步分析, 并利用 EDS 对母材与第二相粒子成分进行分析; 对进行电子背散射衍射分析的样品进行电化学腐蚀处理, 腐蚀剂为 5% HClO_4 +95% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 电解参数为电压 14 V, 电解时间 40 s, 电解温度 5 $^{\circ}\text{C}$, 电解腐蚀后同样使用 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 清洗并吹干, 使用 EBSD 对材料物相及结构进行快速高质量分析。

对制好的试样进行力学性能测试。如图 3 所示, 根据 ISO 14273-2016^[16]标准进行实验, 拉剪实验使用 INSTRON 3382 电子万能材料实验机, 拉伸速

率为 1 mm/min, 装卡时需要在试样两侧装配与被焊工件相同厚度的垫板。此外, 对拉剪实验的断口形貌进行观察与分析。使用 LECO LM248AT 显微硬度计进行接头横截面的显微硬度测试。

2 实验结果及讨论

2.1 接头典型宏观及微观组织

图 4a 为焊接参数(转速 1 600 r/min、下压量 1.6 mm、下压速率 60 mm/min、回填速率 60 mm/min)下的接头横截面宏观形貌。在此焊接参数下, 力学性能优越并具有代表性, 可以说明回填式搅拌摩擦点焊接头的宏观及微观形貌。通过金相分析可将接头分为 4 个区域: 搅拌区(stir zone, SZ)、热力影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(heat affect zone, HAZ)、母材区(base material, BM)。根据焊具的作用区域不同将搅拌区分为搅拌针作用区(pin affect zone, PAZ)与搅拌套作用区(sleeve affect zone, SAZ)。PAZ 边缘的长条状包铝层呈现良好的

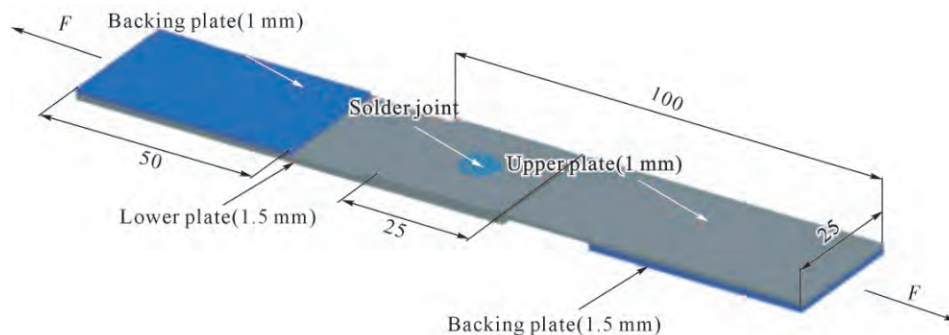


图 3 拉剪实验中 RFSSW 试样垫板结构

Fig.3 Structures and sizes of the RFSSW and backing plates in the tensile-shear tests

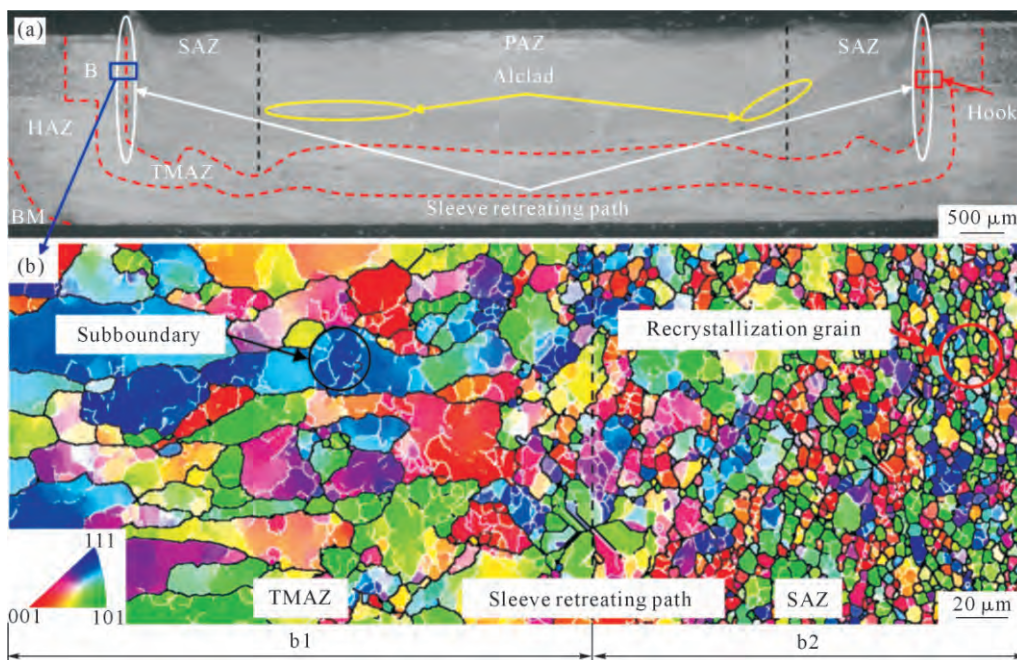


图 4 点焊接头宏观组织与形貌:(a) 横截面宏观组织与形貌;(b) B 处 EBSD 形貌

Fig.4 Macrostructure and morphology of the joint: (a) cross-sectional morphology; (b) EBSD morphology at position B

破碎分散特征,而套筒退出线附近存在显著的组织不均匀现象,具体表现为SZ区域邻近退出线的晶粒呈现向上弯曲取向。值得关注的是,在上下板搭接界面与套筒退出线邻近区域均观察到典型的 Hook 缺陷形貌,其尖端呈现明显上翘特征(最大翘曲角约 15°)。表面形貌分析表明,焊点表面存在约 0.2 mm 的凹陷,并伴随微量飞边产生(飞边宽度 <0.1 mm)。需要指出的是,套筒退出线区域因动态再结晶不完全导致的组织梯度变化(晶粒尺寸差异约 $5\sim 8\ \mu\text{m}$),使其成为潜在的裂纹扩展敏感区域,因此选取图 4a 中 B 标记的套筒退出线特征区域处进行微观组织表征及裂纹扩展行为研究。

该处 EBSD 形貌如图 4b 所示,根据套筒退出线的位置将整个区域分为 b1 与 b2 两个区域:其中 b1 位于 TMAZ,大多数晶粒呈长条状,表明 TMAZ 组织受焊具的摩擦和挤压作用少,晶粒呈现焊前的轧制态;b1 区靠近套筒退出线处的组织在焊具的热力作用下发生动态再结晶与晶粒长大,晶粒尺寸变小,内部存在大量的亚晶界;b2 位于 SAZ,由细小等轴晶和少量粗大等轴晶组成,说明该处焊具对被焊材料的搅拌摩擦和挤压作用较强。提取 b1 和 b2 两区域的晶粒取向和晶粒尺寸作为特征值,如图 5a 所示,b1 区的大角晶界百分比(23.9%)显著低于 b2 区(41.3%)。图 5b 为 b1 和 b2 区域的晶粒尺寸分布图,

根据统计得到 b1 区的平均晶粒尺寸($19.0\ \mu\text{m}$) 大于 b2 区的平均晶粒尺寸($13.6\ \mu\text{m}$)。综上所述,由于套筒退出线两侧的 b1 区和 b2 区组织存在差异,可能引起力学性能上的差异,裂纹容易沿着套筒退出线扩展,为优化搅拌摩擦焊工艺参数提供了重要的组织调控依据。

2.2 焊接参数对接头形貌的影响

由上述可知包铝、Hook 形貌、表面压深为回填料式搅拌摩擦点焊的典型形貌特征,为了量化上述特征,定义包铝长度为 L 、Hook 高度为 H_1 、表面压深为 H_2 ,研究不同工艺参数对上述特征值的影响规律。图 6a~e 为不同焊具转速下的接头形貌横截面,随着转速由 $1\ 000\ \text{r/min}$ 增加至 $2\ 200\ \text{r/min}$,接头形貌发生了明显的变化。

将不同转速下的接头特征值 L 、 H_1 、 H_2 测量并绘制出来,如图 6f 所示。随着转速的增加, L 值逐渐降低,这是由于焊具对搅拌区材料的搅拌加剧,包铝被打散,搅拌区的组织更均匀。 H_1 的值随转速的增加先减小后增加,这是由于在低转速时靠近套筒退出线处的热力影响区受焊具热力作用较小,流动性差,搅拌套回抽时受到较大的厚度方向剪切力,导致 Hook 高度增加,而转速过高时,由于搅拌套外壁对上下板搭接界面处的热输入增加,导致回填料时更多的热塑金属被焊具沿厚度方向带离焊点,造成 Hook

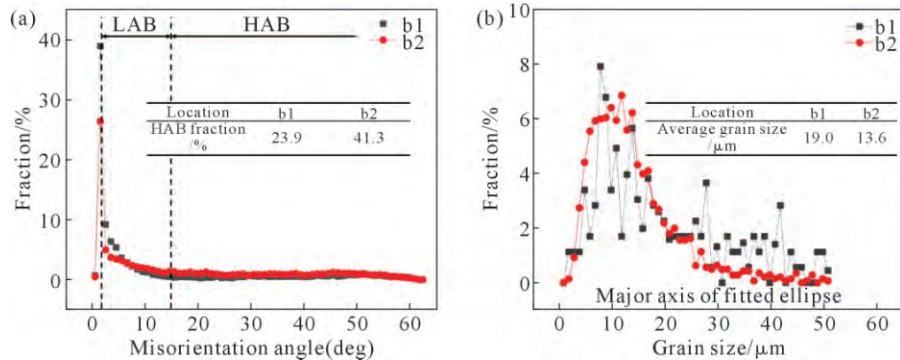


图 5 b1、b2 区域 EBSD 数据:(a) 晶粒取向;(b) 晶粒尺寸

Fig.5 EBSD data derived from areas b1 and b2: (a) grain orientation; (b) grain size

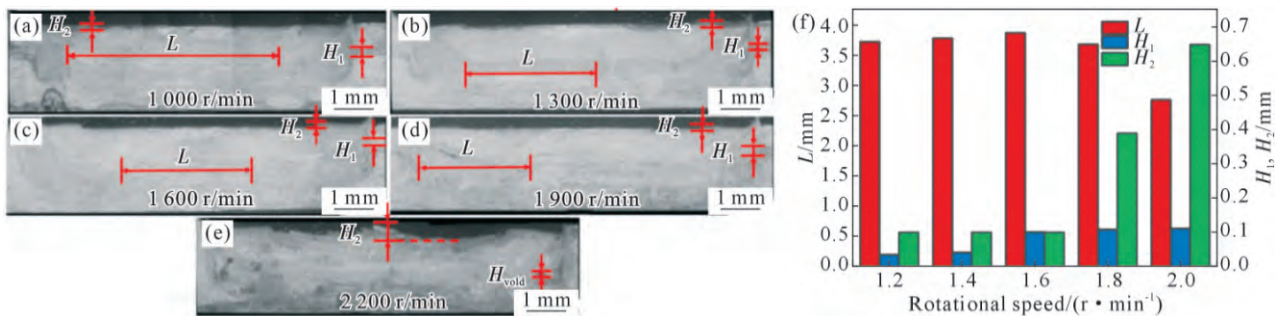


图 6 不同转速下的回填料式搅拌摩擦点焊接头横截面形貌及对应 L 、 H_1 、 H_2 数据图:(a~e) 接头横截面形貌;(f) L 、 H_1 、 H_2 随转速的变化

Fig.6 Cross-sectional morphology of RFSSW joints under different rotational speeds and corresponding L , H_1 , and H_2 data: (a~e) cross-sectional morphology of joints; (f) variation in L , H_1 , and H_2 with rotational speed

高度增加,进而导致上板的承载面积下降,更容易产生应力集中。转速在 1 000~1 900 r/min 表面压深与预设回填几乎高度相同,而当转速提高至 2 200 r/min 时,由于焊具对搅拌区材料的热作用剧烈,焊具发生粘料的情况,使表面压深达到 0.35 mm,这会导致材料表面质量下降,为了保证点焊接头质量,应避免采用过大的转速进行点焊。

图 7a~e 为不同下压量下的接头形貌横截面,随着下压量的增加,焊具对下板的作用范围增大,搅拌区厚度增加。由于下压阶段更多的热塑材料进入到搅拌套空腔中,搅拌套作用区与搅拌针作用区边缘处包铝被完全打散,靠近搭接界面处的下板区域出现细小的等轴晶粒,这说明发生了剧烈的动态再结晶。

随着下压量的增加,更多的材料进入焊具间隙中,该部分材料从压紧环排料口排出造成材料损失,所以下压量越大,搅拌区损失的材料就越多,这造成了表面压深 H_2 随着下压量的增加而增加。不同下压量的接头形貌数据如图 7f 所示,随着下压量增加,包铝长度 L 降低,Hook 高度 H_1 增加,表面压深 H_2 增加,无孔洞缺陷。图 8a~e 为不同下压速率的接头形貌横截面,获得的接头均为无孔洞接头。下压速率

对包铝长度 L 的影响规律不显著。随着下压速率的增加,Hook 形貌高度 H_1 先减少后增加,如图 8f 所示。这是由于在较低的下压速率下,由于焊接时间的增加造成搅拌套外侧的 TMAZ 材料显著软化,而回填阶段的回填速率高于下压速率,较快的搅拌套回抽速率使该处材料向上流动程度加剧,最终导致 Hook 形貌高度的增加。

随着下压速率的增加,表面压深 H_2 先减少后增加,这是由于在较低的下压速率下更多搅拌区材料进入焊具间隙中,造成的材料体积损失导致 H_2 增加。而高的下压速率会加剧焊具对搅拌区材料的搅拌与挤压,实验时发现大量碎屑从压紧环排料孔排出,最终回填无法填平焊点表面,同样造成 H_2 增加。值得注意的是,虽然通过增加下压速率可以减少焊接时间,从而增加焊接效率,但在实验过程中发现过大下压速率会增加机头扭矩,严重时会导致设备报错,使焊接无法进行。研究发现回填速率对包铝长度 L 影响不显著。而 Hook 形貌高度 H_1 和表面压深 H_2 随回填速率的变化规律与在不同下压速率下的变化规律相同: H_1 和 H_2 先减少后增加,回填速率对焊接接头组织、形貌、力学性能的影响及原因与下压速率

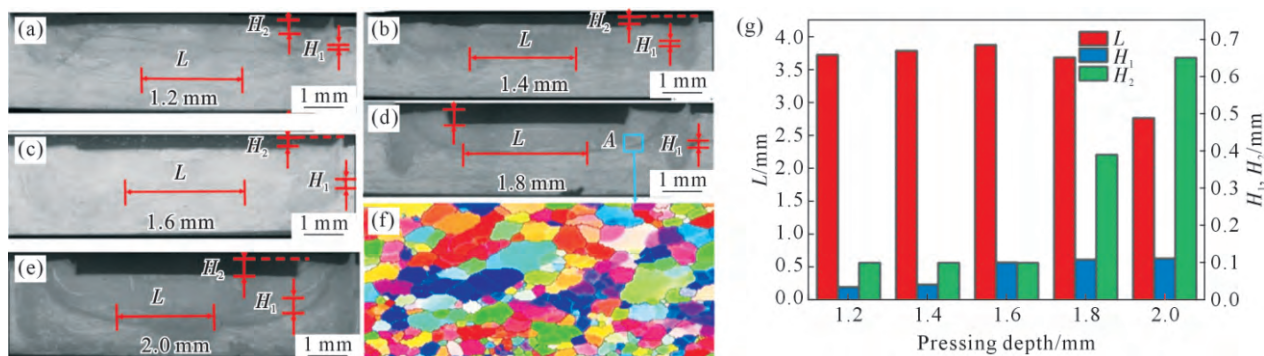


图 7 不同下压量的回填式搅拌摩擦点焊接头横截面形貌及对应 L 、 H_1 、 H_2 数据图:(a~e) 接头横截面形貌;(f) 搭接界面 A 处 EBSD 形貌;(g) L 、 H_1 、 H_2 随下压量的变化

Fig.7 Cross-sectional morphology of RFSSW joints at different plunge depths and corresponding L , H_1 , and H_2 data: (a~e) cross-sectional morphology of joints; (f) EBSD morphology at lap interface A; (g) variation in L , H_1 , and H_2 with plunge depth

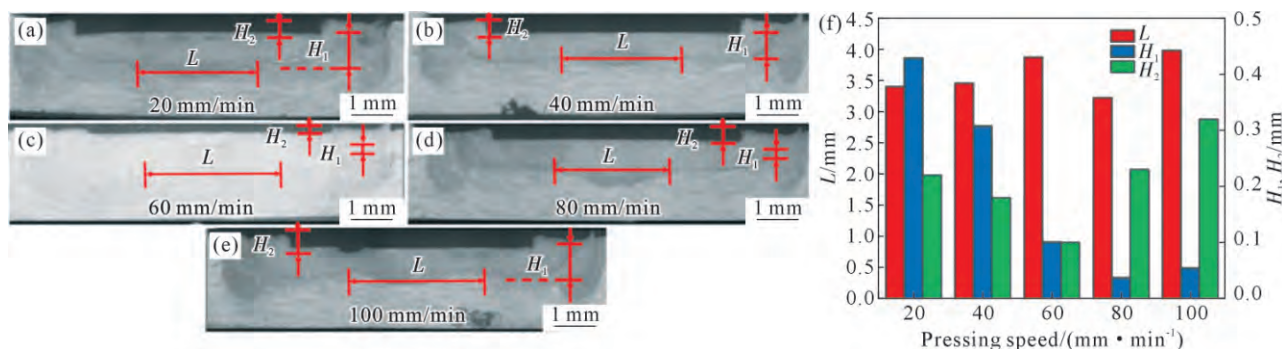


图 8 不同下压速率的回填式搅拌摩擦点焊接头横截面形貌及对应 L 、 H_1 、 H_2 数据图:(a~e) 接头横截面形貌;(f) L 、 H_1 、 H_2 随下压速率的变化

Fig.8 Cross-sectional morphology of RFSSW joints under different plunge rates and corresponding L , H_1 , and H_2 data: (a~e) cross-sectional morphology of joints; (f) variation in L , H_1 , and H_2 with pressing speed

相似,故省去其对接头组织及后续关于力学性能的影响。

2.3 焊接参数对接头力学性能的影响

使用 LECO LM248AT 显微硬度计进行接头横截面的显微硬度测试,测量点位置如图 9 所示,2 条硬度测试线的位置平行于搭接界面,分别位于上板和下板偏移 0.2 mm 处。2 条硬度测试线中心对称于焊点中轴线,长度均为 16 mm,硬度测试线覆盖了 SZ、TMAZ 和 HAZ 3 个区域。每条硬度测试线中的测量点间距为 0.5 mm,加载载荷为 200 g,载荷持续时间为 10 s。

不同焊具转速的回填式搅拌摩擦点焊接头横截面沿搭接界面向上偏移 0.2 mm 的显微硬度分布如图 10a 所示,该处的显微硬度分布曲线呈“W”形,其中 SZ 边缘硬度较高,是由于焊具对该处材料的搅

拌摩擦作用较为剧烈,在位错强化与细晶强化共同作用下导致显微硬度升高。在 SZ 中心容易聚集包铝,包铝的存在会导致 SZ 中心处的显微硬度值下降。套筒退出线处向着 TMAZ 方向的显微硬度值出现陡降,并在 TMAZ 处出现硬度最低值,根据图 4b EBSD 分析可知,该处组织差异大,晶粒多数呈粗大板条状。当转速为 1 000 r/min 时 SZ 内的硬度值相对较高,随着转速增加至 1 600 r/min, SZ 峰值温度达到了过热温度,产生的共晶组织会造成硬度下降,同时由于材料晶粒尺寸的增加对材料软化的作用更为明显,因此显微硬度有所降低。继续增加转速至 2 200 r/min,由于 SZ 内的位错密度显著增加,位错强化与产生的细小动态再结晶的细晶强化共同作用下,显微硬度值较转速为 1 600 r/min 时有所增加。不同焊具转速回填式搅拌摩擦点焊接头横截

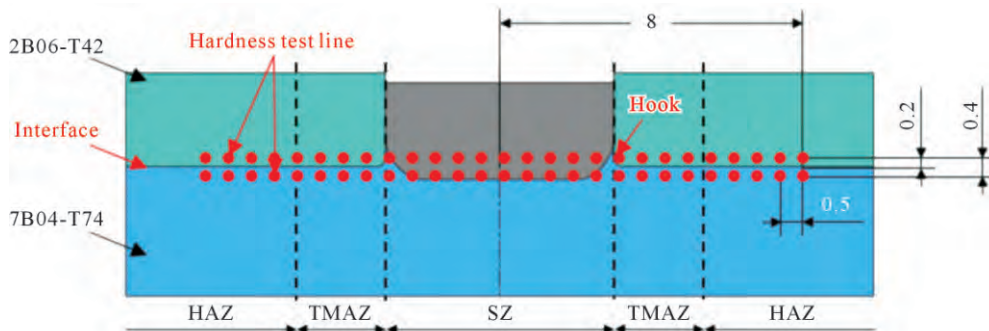


图 9 RFSSW 接头显微硬度测试位置示意图

Fig.9 Schematic of microhardness test locations in RFSSW joints

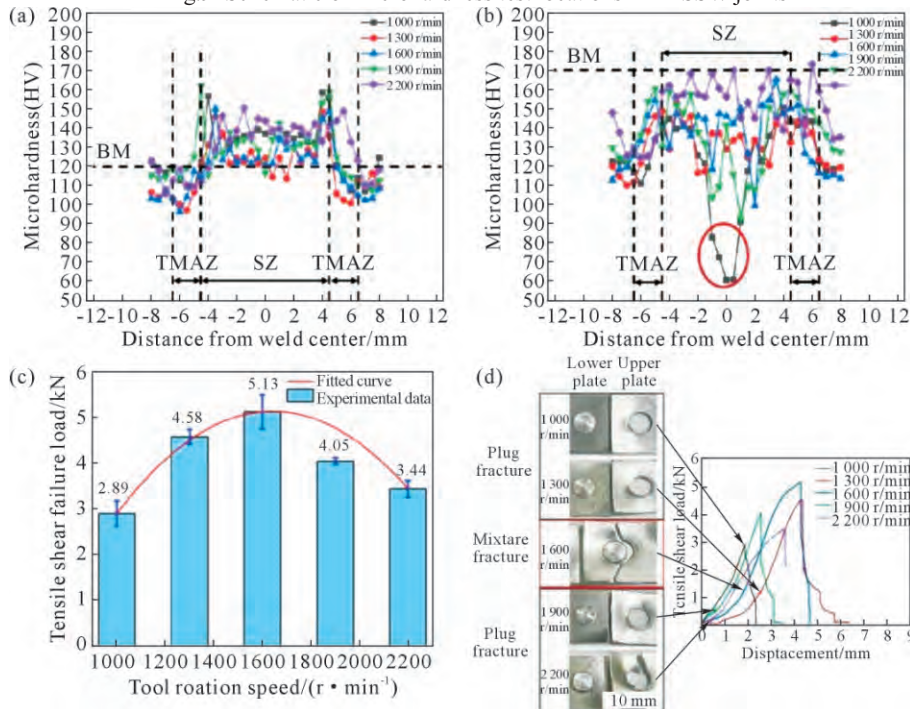


图 10 不同转速下接头力学性能:(a) 搭接界面上偏移 0.2 mm 接头显微硬度;(b) 界面下偏移 0.2 mm 接头显微硬度;(c) 接头拉伸失效载荷;(d) 断口形貌及位移-载荷曲线

Fig.10 Mechanical properties of joints under different rotational speeds: (a) microhardness of joints with a 0.2 mm upwards offset at the lap interface; (b) microhardness of joints with a 0.2 mm downwards offset at the lap interface; (c) tensile-shear failure load of joints; (d) fracture morphology and displacement-load curve

面沿搭接界面向下偏移 0.2 mm 显微硬度分布如图 10b 所示,硬度分布与 10a 类似,图中红圈标记为转速 1 000 r/min 时 SZ 中心处,由上一节的形貌分析可知,产生这一现象的原因是转速过低,包铝未被打散而聚集在 SZ 中心处。

为研究焊具转速对点焊接头拉剪性能的影响,固定搅拌套下压量、搅拌套下压速率以及搅拌针回填速率分别为 1.6 mm,60 mm/min 和 60 mm/min。点焊接头的拉剪失效载荷随焊具转速变化的演变规律如图 10c 所示,图中蓝色柱状图代表拉剪实验获得的数据,而红色曲线图为基于实验结果拟合得到的回归曲线。结果表明,接头的拉剪失效载荷随着焊具转速的增加先增加后降低。为了进一步探索实验选取的工艺参数以外的最佳焊接工艺参数,采用 Design Expert 软件对实验结果进行基于二次多项式的拟合,拟合结果如式(1)所示:

$$TSFL(\omega) = -9.571\ 37 + 1.793 \times 10^{-2} \omega - 5.46 \times 10^{-6} \omega^2 \quad (1)$$

式中, ω 为转速,TSFL(ω)为不同焊具转速下的接头拉剪失效载荷。 $\omega=1\ 641.44$ 时,接头拉剪失效载荷 TSFL(ω)=5.14 kN,高于 5.13 kN,达到最大值。

在拉剪实验完成后,对其断裂过程进行分析发现不同焊具转速下的接头宏观断口形貌存在两种断裂模式,根据断裂路径的不同将二者分别定义为塞型断裂模式与拉伸-塞型混合断裂模式(简称为混合断裂模式)。其中塞型断裂的裂纹沿着焊点边缘周向扩展,厚度方向上沿着套筒退出线扩展。塞型断裂断后上板边缘发生上翘,靠近翘曲端的环形断面与水

平面呈约 75° 夹角,焊点连接着下板,形状类似塞子,故称为塞型断裂;而混合型断裂的裂纹扩展路径分为两段:首先和塞型断裂类似,裂纹沿着焊点边缘周向扩展、沿着套筒退出线厚度方向扩展,大约 1/2 的焊点脱离上板时,裂纹的扩展路径发生改变,裂纹沿着上板向上板两侧边缘做横向扩展。混合型断裂断后部分上板材料与焊点和下板连接在一起,留在下板这部分上板材料发生翘曲,断面与水平面夹角约 45°;转速为 1 000 r/min 时接头断裂模式为塞型断裂,其断口的微观形貌如图 15 所示。使用扫描电子显微镜在断口的厚度方向自上而下取 A、B、C 3 处进行分析:A 点位于焊点上部,其微观形貌如图 11b 所示,该处断口形貌较为平整,说明该处在断裂前所发生的塑性变形较小,表现出脆性断裂的特征;B 点的形貌如图 11c 所示,该处由大小不一的韧窝和平直的解理面组成,说明该处组织不均匀,表现出了混合断裂的特征;C 点位于焊点根部并接近 Hook 末端,根据接头横截面形貌分析可知 Hook 末端聚集包铝,其塑性较好,该处呈现大而深的韧窝,表现出韧性断裂的特征。

转速为 1 600 r/min 时接头断裂模式为混合型断裂,其断口的微观形貌如图 12 所示。使用扫描电子显微镜在断口的水平方向从左向右依次取 A、B、C 3 处进行分析:A 点位于焊点边缘靠近上板断裂处,其微观形貌如图 12b 所示,断口表面存在较多的撕裂棱与小韧窝,表现为韧脆混合断裂;B 点位于焊点中部,其微观形貌如图 12c 所示,该处由大小不一的

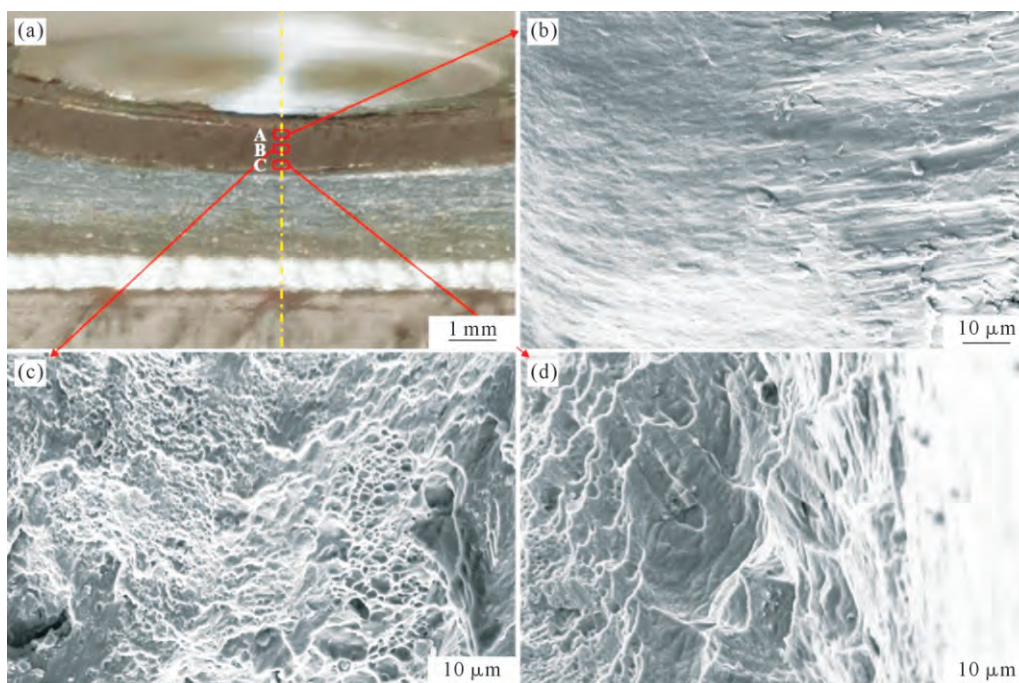


图 11 塞型断裂的微观断口形貌:(a) A~C 点位置;(b) A 点;(c) B 点;(d) C 点

Fig.11 Microscopic fracture morphology of plug-type fractures: (a) positions of points A~C; (b) point A; (c) point B; (d) point C

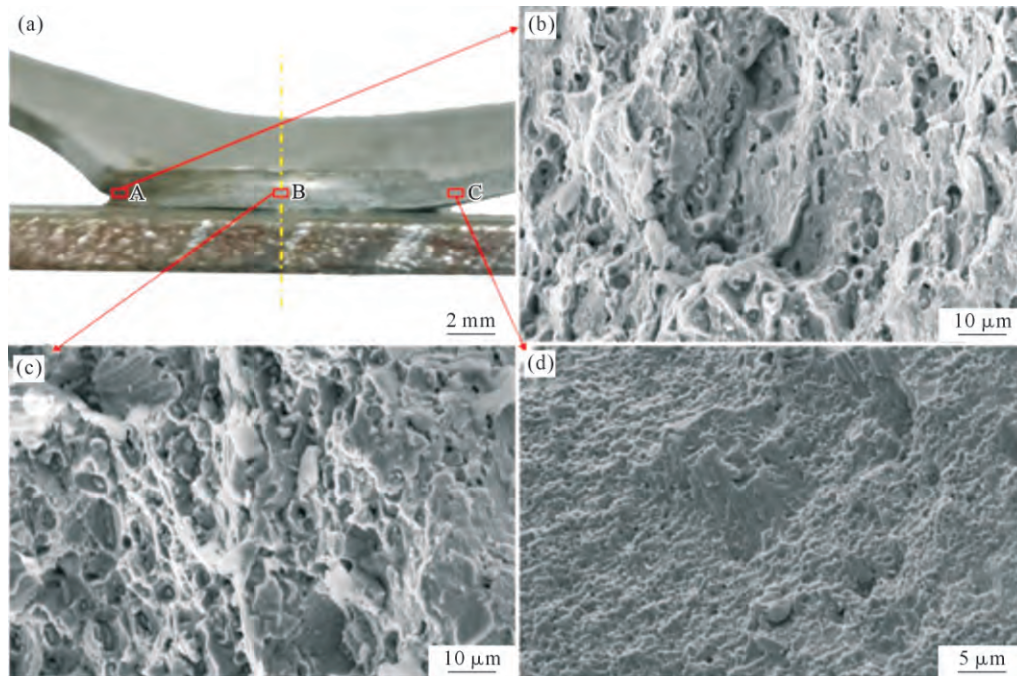


图 12 混合型断裂的微观断口形貌:(a) A~C 点位置;(b) A 点;(c) B 点;(d) C 点

Fig.12 Microscopic fracture morphology of mixed-mode fractures: (a) positions of points A~C; (b) point A; (c) point B; (d) point C

韧窝、层片结构和台阶状解理面组成,呈现出混合断裂的特征,说明套筒退出线处的连接较差;C 点位于上板断裂面,断口表面由大量韧窝组成,说明该处塑形较好,表现出韧性断裂的特征。

不同搅拌套下压量回填式搅拌摩擦点焊接头横截面沿搭接界面向上偏移 0.2 mm 显微硬度分布如图 13a 所示,显微硬度分布曲线同样呈“W”形。随着下压量从 1.2 mm 增加到 2.0 mm,接头 SZ 显微硬度先降低后增加。不同搅拌套下压量回填式搅拌摩擦点焊接头横截面沿搭接界面向下偏移 0.2 mm 显微硬度分布如图 13b 所示,该处显微硬度值随下压量的变化规律不明显。当搅拌套下压量为 1.2 mm 时,发现 SZ 中心处硬度值较低(见图中红色标记处),这是由于 SZ 内包铝向下迁移距离较小不利于焊具对包铝的打散,该处包铝呈连续的形态聚集在搅拌针作用中心,从而导致该处显微硬度值发生陡降。

研究搅拌套下压量对点焊接头剪切性能的影响时,固定焊具转速、搅拌套下压速率以及搅拌针回填速率分别为 1 600 r/min,60 mm/min 和 60 mm/min。接头拉伸剪切失效载荷随搅拌套下压量变化的演变规律如图 13c 所示。采用 Design Expert 软件对实验结果进行基于二次多项式的拟合,拟合结果如式(2)所示:

$$\text{TSFL}(p) = -6.1622 + 15.44767p - 5.24208p^2 \quad (2)$$

式中, p 代表下压量,TSFL(p)为不同下压量下的接头拉剪失效载荷。当 $p=1.47$ mm 时,接头拉剪失效载荷 TSFL(p)=5.22 kN,高于 5.13 kN,达到最大值;

不同搅拌套下压量下的接头宏观断口形貌与位移载荷曲线如图 13d 所示。随着搅拌套下压量从 1.2 mm 增加至 1.6 mm,点焊接头断裂模式由塞型断裂变为混合型断裂,由位移-载荷曲线可知,混合型断裂的失效载荷较高,断裂前接头变形量较大。随着搅拌套下压量从 1.6 mm 增加至 2.0 mm,点焊接头的断裂模式由混合型断裂模式变为塞型断裂模式,断裂前接头变形量减小,接头质量与可靠性降低。

不同下压速率回填式搅拌摩擦点焊接头横截面沿搭接界面向上偏移 0.2 mm 显微硬度分布如图 14a 所示,显微硬度分布曲线为“W”形。SZ 硬度无明显变化规律。不同下压速率下回填式搅拌摩擦点焊接头横截面沿搭接界面向下偏移 0.2 mm 显微硬度分布如图 14b 所示,硬度变化规律不明显,当下压速率为 100 mm/min 时,套筒退出线处的硬度值发生陡降,产生该现象的原因可能是该处 Hook 翘曲、Hook 尖端处的包铝未被打散。

研究下压速率对点焊接头剪切性能的影响时,固定焊具转速、搅拌套下压量以及搅拌针回填速率分别为 1 600 r/min,1.6 mm 和 60 mm/min,接头拉伸剪切失效载荷随下压速率变化的演变规律如图 14c 所示。同样采用 Design Expert 软件对实验结果进行基于二次多项式的拟合,拟合结果如式(3)所示:

$$\text{TSFL}(r_2) = 2.38772 + 8.569 \times 10^{-2} r_2 - 6.65302 \times 10^{-4} r_2^2 \quad (3)$$

式中, r_1 代表下压速率,TSFL(r_1)为不同下压速率下的接头拉剪失效载荷。当 $r_1=52.59$ mm/min 时,接头拉剪失效载荷 TSFL(r_1)=5.15 kN,高于 5.13 kN,达到最

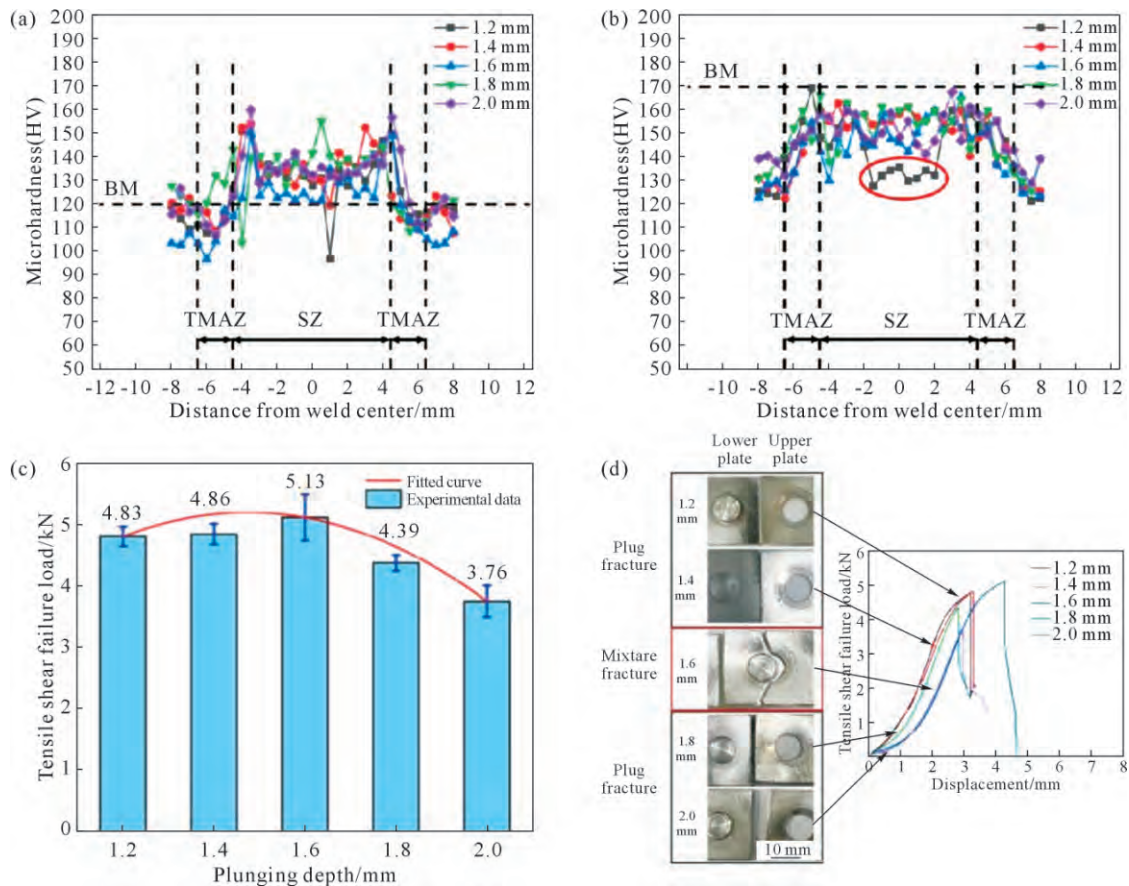


图 13 不同下压量接头力学性能:(a) 搭接界面上偏移 0.2 mm 接头显微硬度;(b) 界面下偏移 0.2 mm 接头显微硬度;(c) 接头拉剪失效载荷;(d) 断口形貌及位移-载荷曲线

Fig.13 Mechanical properties of joints under different plunge depths: (a) microhardness of joints with 0.2 mm upwards offset at the lap interface; (b) microhardness of joints with 0.2 mm downwards offset at the lap interface; (c) tensile-shear failure load of joints; (d) fracture morphology and displacement-load curve

大值;不同下压速率下的接头宏观断口形貌与位移载荷曲线如图 14d 所示。发现断裂模式同样存在两种:塞型断裂与混合型断裂。随着下压速率从 20 mm/min 增加至 60 mm/min,点焊接头断裂模式由塞型断裂变为混合型断裂,由图 14d 的位移-载荷曲线可知,混合型断裂的失效载荷较高,断裂前接头变形量较大。随着下压速率从 60 mm/min 增加至 100 mm/min,点焊接头的断裂模式由混合型断裂模式变为塞型断裂模式,其接头失效载荷降低,断裂前接头变形量减小,接头抗拉伸剪切性能变差。

3 结论

(1)揭示了 RFSSW 工艺参数对接头主要形貌特征值的影响规律:提高转速可以有效打散包铝,但转速过高会导致 Hook 严重翘曲、焊点根部出现孔洞缺陷;增加下压量可以有效增加 SZ 厚度,但是也会使得 Hook 高度和表面压深增加,造成接头力学性能下降;增加下压速率可以减少焊接时间,进而增加焊接效率,但是过高的速率会造成表面压深的增加,对接头力学性能造成不利影响。

(2)获得了回填式搅拌摩擦点焊接头显微硬度分布规律:接头显微硬度分布曲线呈“W”形,SZ 边缘硬度较高,中心硬度较低,套筒退出线处由于两侧组织差异大,靠近 TMAZ 侧出现显微硬度陡降,因此认为该处是接头的薄弱区域。低转速下 SZ 中心处未被打散的包铝会造成显微硬度下降,随着转速的增加,在细晶强化与位错强化共同作用下接头硬度呈上升趋势;下压量决定热作用面积,其过大会造成包铝向下迁移,硬度降低;下压速率对硬度的影响规律不明显。

(3)通过回填式搅拌摩擦点焊工艺实验获得了最佳焊接工艺参数:转速 1 600 r/min、下压量 1.6 mm、下压速率 60 mm/min,对应的最大接头拉剪失效载荷为 5.13 kN。通过拟合回归方程获得了最佳焊接工艺参数:当下压量达到 1.47 mm 时(其他参数固定为:转速 1 600 r/min、下压速率 60 mm/min、回填速率 60 mm/min),获得最大拉剪失效载荷 5.22 kN。

(4)揭示了两种断裂模式:塞型断裂与混合型断裂,塞型断裂的断裂载荷低于混合型断裂。随着转速、下压量、下压速率和回填速率的增加,断裂模式

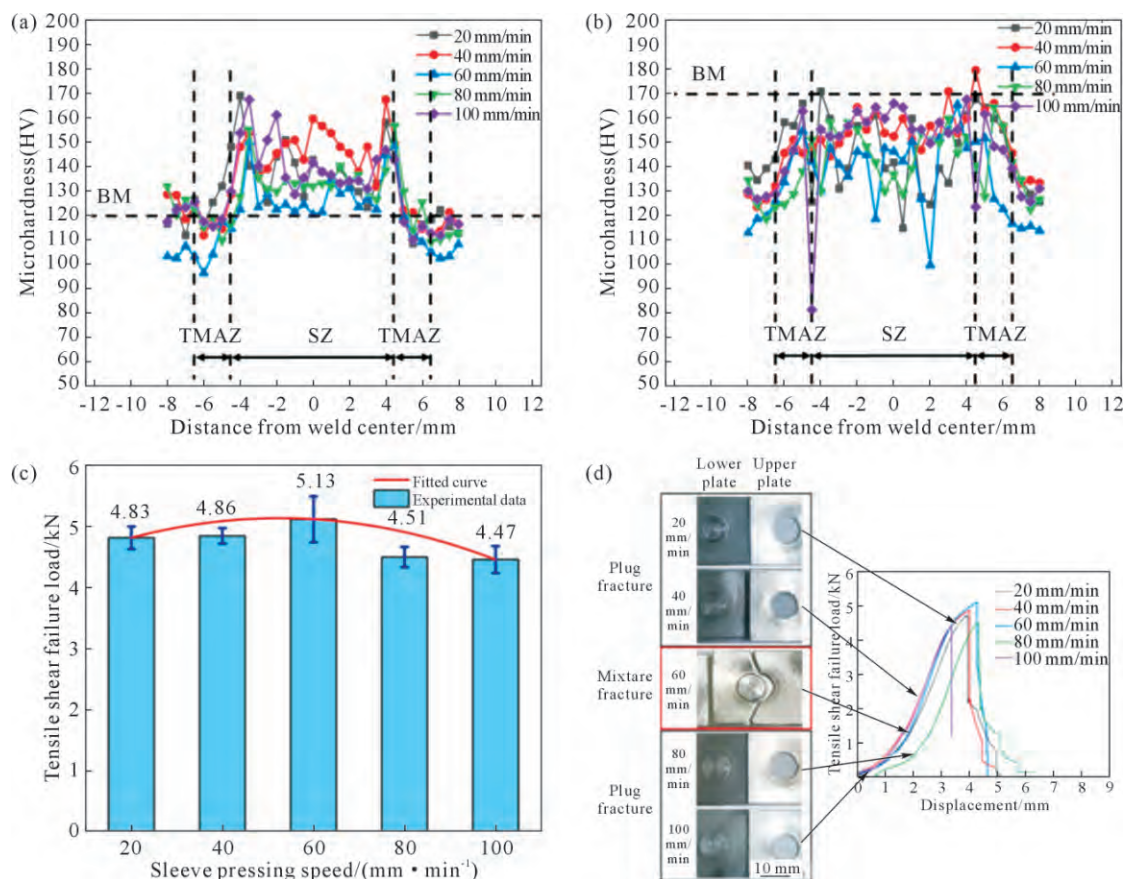


图 14 不同下压速率接头力学性能:(a) 搭接界面上偏移 0.2 mm 接头显微硬度;(b) 界面下偏移 0.2 mm 显微硬度;(c) 接头拉剪失效载荷;(d) 断口形貌及位移-载荷曲线

Fig.14 Mechanical properties of joints under different plunge rates: (a) microhardness of joints with 0.2 mm upwards offset at the lap interface; (b) microhardness of joints with 0.2 mm downwards offset at the lap interface; (c) tensile-shear failure load of joints; (d) fracture morphology and displacement-load curve

变化均为由塞型断裂转变为混合型断裂, 而后再转变为塞型断裂。

参考文献:

- [1] 李承波, 肖博, 邓运来, 张新明. 四种航空用高强铝合金厚板的淬透性[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(5): 1425-1433.
LI C B, XIAO B, DENG Y L, ZHANG X M. Hardenability of four aerospace high strength aluminum alloy thick plates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(5): 1425-1433.
- [2] LI S S, YUE X, LI Q Y, PENG H L, DONG B X, LIU T S, YANG H Y, FAN J, SHU S L, QIU F, JIANG Q C. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 944-983.
- [3] FU L, PENG Y Y, HUANG J W, DENG Y, YIN Z M. Microstructures and mechanical properties of gas tungsten arc welded joints of new Al-Mg-Sc and Al-Mg-Er alloy plates[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 620: 149-154.
- [4] ZOU Y F, LI W Y, CHU Q, SHEN Z K, WANG F F, TANG H W, VAIRIS A, LIU L Y. The impact of macro/microstructure features on the mechanical properties of refill friction stir spot-welded joints of AA2219 alloy with a large thickness ratio[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112: 3093-3103.

- [5] DARJI R, JOSHI G, BADHEKA V, PATEL D. Applications of friction-based processes in manufacturing[A]. Advances in Manufacturing Technology and Management[C]. Singapore: Springer, 2023. 236-243.
- [6] PRADHAN D K, SAHU B, BAGAL D K, BARUA A, JEET S, PRADHAN S. Application of progressive hybrid RSM-WASPAS-grey wolf method for parametric optimization of dissimilar metal welded joints in FSSW process[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50(5): 766-772.
- [7] AHMED M M Z, EL-SAYED SELEMAN M M, AHMED E, REYAD H A, ALSALEH N A, ALBAJIAN I. A novel friction stir deposition technique to refill keyhole of friction stir spot welded AA6082-T6 dissimilar joints of different sheet thicknesses[J]. Materials, 2022, 15(19): 6799.
- [8] CHEN D, LI J L, XIONG J T, SHI J M, DOU J X, ZHAO H X. Enhance mechanical properties of refill friction stir spot welding joint of alclad 7050/2524 aluminum via suspension rotating process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 1243-1251.
- [9] 张浩楠. 高强铝合金回填搅拌摩擦点焊断裂模式研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
ZHANG H N. Investigation of fracture modes in refill friction stir spot welding of high-strength aluminum alloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021.

- [10] LI G H, ZHOU L, LUO L Y, WU X M, GUO N. Microstructural evolution and mechanical properties of refill friction stir spot welded alclad 2A12-T4 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 4115-4129.
- [11] 赵运强. 超高强铝合金非对称回填式 FSSW 成形特征与接头组织性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHAO Y Q. Ultra-high-strength aluminum alloy asymmetrical backfill FSSW forming characteristics and joint microstructure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [12] CHAI P, WANG Y. Effect of rotational speed on microstructure and mechanical properties of 2060 aluminum alloy RFSSW joint[J]. *Metals and Materials International*, 2019, 25(6): 1574-1585.
- [13] XIONG J T, PENG X, SHI J M, WANG Y, SHU J R, LIU X Z, LI J L. Numerical simulation of thermal cycle and void closing during friction stir spot welding of AA-2524 at different rotational speeds[J]. *Materials Characterization*, 2021, 174: 110984.
- [14] 陈丹, 豆建新, 张浩楠, 李京龙. 7050/2524 铝合金回填式搅拌摩擦点焊的工艺优化[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(9): 111-114.
CHEN D, DOU J X, ZHANG H N, LI J L. Process optimization of refill friction stir spot welding for 7050/2524 aluminum alloys[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(9): 111-114.
- [15] LI Z W, JI S D, MA Y N, CHAI P, YUE Y M, GAO S S. Fracture mechanism of refill friction stir spot-welded 2024-T4 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5): 1925-1932.
- [16] KUBIT A, KLUZ R, TRZEPICINSKI T, WYDRZYŃSKI D, BOC-HNOWSKI W. Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, 18 (1): 235-244.
- [17] ZHOU L, LUO L Y, WANG R, ZHANG J B, HUANG Y X, SONG X G. Process parameter optimization in refill friction spot welding of 6061 aluminum alloys using response surface methodology[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(8): 4050-4058.
- [18] RIOJA R J, LIU J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space application[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43: 3325-3337.
- [19] SIOUITIS L, TSERPES K, TSIANGOU E, BOUTIN H, ALLÈGRE F, BLAGA L. Experimental evaluation of refill friction stir spot welds (RFSSW) as crack arrest features in co-consolidated thermoplastic laminates[J]. *Composite Structures*, 2023, 309: 116754.
- [20] ZOU Y F, LI W Y, YANG X W, PATEL V, SHEN Z K, CHU Q, WANG F F, TANG H W, CUI F, CHI M L. Characterizations of dissimilar refill friction stir spot welding 2219 aluminum alloy joints of unequal thickness[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 79: 91-101.
- [21] VACCHI G S, SILVA R, PLAINE A H, SUHUDDIN U F H, ALCÂNTARA N G, SORDI V L, ROVERE C A D. Refill friction stir spot welded AA5754-H22/Ti-6Al-4V joints: Microstructural characterization and electrochemical corrosion behavior of aluminum surfaces[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 22: 100759.

(责任编辑: 宫文婧)