

分类号: TG406

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210110122



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目

6061 铝合金不同厚度系列搅拌摩擦连

接区微观组织和性能分析

论文作者

沈新意

指导教师

汪洪峰 教授

学科(专业)

机械工程

研究方向

先进制造技术

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号：TG406

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210110122

6061 铝合金不同厚度系列搅拌摩擦连接区微观组织和
性能分析

ANALYSIS OF MICROSTURE AND PROPERTIES OF 6061
ALUMINUM ALLOY FRICTION STIR ZONE WITH
DIFFERENT THICKNESS SERIES

学生姓名：_____沈新意_____

指导教师：_____汪洪峰 教授_____

专 业：_____机械工程_____

研究方向：_____先进制造技术_____

论文答辩日期：2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：沈新意

日期：2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：沈新意 指导教师签名：王书

日期：2024 年 5 月 29 日

日期：2024 年 5 月 29 日

6061 铝合金不同厚度系列搅拌摩擦连接区微观组织和性能分析

摘 要

6061 铝合金具有较低的密度、较高的强度、良好的耐腐蚀性等优点，从而广泛应用于轨道交通、航空航天、机械加工等各行业。传统铝合金焊接技术(如钨极氩弧焊、脉冲氩弧和电阻点焊等)极易出现气孔与杂质、热裂纹，接头软化严重等问题，难以保证连接区质量。搅拌摩擦连接(Friction Stir Joining, FSJ)作为一种绿色固相连接技术，解决了传统铝合金焊接出现的问题，有效地提高了连接区的性能。本论文对 2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚 6061 铝合金板材进行搅拌摩擦连接系统研究，确定了合适的连接工艺参数，获得了表面质量好、力学性能和腐蚀性能好的铝合金连接区，研究了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度对铝合金连接区微观组织、力学性能及腐蚀性能产生的影响。分析了连接区缺陷形成原因，并使用响应面法对搅拌摩擦连接工艺参数进行最优化设计获得最佳抗拉强度。具体研究内容及结果如下：

(1) 在搅拌摩擦连接后不同厚度铝合金连接区表面成形好，无明显裂纹沟槽等缺陷，搅拌摩擦连接工艺参数对连接区表面质量影响显著。随着搅拌头旋转速度提高，连接区中心晶粒尺寸呈现先减小后增大的趋势。随着搅拌头前进速度提高，连接区中心晶粒尺寸呈现减小的趋势。EBSD 图像分析显示，母材区晶粒取向性转动形成板织构，晶界取向角小，小角度晶界占比高。连接区中心由于位错积累和重组，晶界取向角增大，小角度晶界组分也增加。前进侧热影响区因动态再结晶不充分，部分晶粒未结晶，导致错位堆积，晶界取向角较小，小角度晶界占比从中心区的 27%上升至 39.5%。

(2) 搅拌摩擦连接工艺参数对铝合金连接区的力学性能影响显著，不同厚度的铝合金板材在经过搅拌摩擦连接后，其抗拉强度表现出了不同的提升，具体来说，2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚的铝合金板材在特定搅拌摩擦连接参数下的最高抗拉强度分别达到母材的 76.0%、75.7%、71.7%和 73.3%，其中拉伸断裂模

式呈现韧性断裂和脆性断裂的混合模式,断裂位置均发生在前进侧连接区中心与母材之间。此外,不同厚度连接区的显微硬度呈现“W”型分布,母材区域显微硬度最高,而连接区前进侧热影响区硬度最低,连接区中心显微硬度有所提高,连接区显微硬度变化与晶粒细化和晶粒尺寸变化密切相关。冲击韧性方面,搅拌摩擦连接区的冲击韧性普遍高于母材,连接区中心晶粒细化提高铝合金冲击性能。且冲击断裂主要为塑性断裂,伴随少量脆性断裂区域。

(3) 对不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区进行电化学腐蚀试验,发现连接区的腐蚀电流密度普遍低于母材区,表明经过 FSJ 的连接区的耐腐蚀性能优于母材。主要因为搅拌摩擦连接使得连接区晶粒充分细化,从而提高了耐腐蚀性能。在盐雾腐蚀试验中,尽管适宜的搅拌摩擦连接参数有助于降低腐蚀速率,但 FSJ 试样腐蚀速率高于母材,即盐雾实验中搅拌摩擦连接区耐腐蚀性能低于母材。且 48h 试样腐蚀速率普遍高于 24h 试样,主要是由于盐雾试样表面的钝化膜在 24 小时腐蚀后被破坏,导致腐蚀加剧。

(4) 研究了搅拌摩擦连接工艺参数对铝合金连接区的缺陷及热输入的影响,并利用响应面法对参数进行了优化设计。低热输入参数导致材料塑化不足,易产生犁沟和孔洞缺陷;高热输入参数则导致飞边和细小孔洞缺陷。为了预防缺陷产生薄板铝合金连接时需要高热输入工艺参数,厚板连接时需较长搅拌针或增加轴肩下压量。搅拌头旋转速度对连接区热影响显著,随着旋转速度提高,连接区最高温度呈现明显上升趋势,然而工艺参数中搅拌头前进速度对连接区影响较小,且板材前进侧温度高于后退侧。基于 BBD 响应面法建立的数学模型,确定最优参数在旋转速度 1350rpm、前进速度 312mm/min、轴肩下压量 0.214mm,得到最佳抗拉强度为 229.6MPa,通过实际试验抗拉强度为 233.0MPa,与模型评估结果相符。

关键词: 6061 铝合金, 搅拌摩擦连接, 板材厚度, 微观组织, 力学性能, 耐腐蚀性, 参数优化

ANALYSIS OF MICROSTURE AND PROPERTIES OF 6061 ALUMINUM ALLOY FRICTION STIR ZONE WITH DIFFERENT THICKNESS SERIES

ABSTRACT

6061 aluminum alloy has the advantages of low density, high strength and good corrosion resistance, so it is widely used in rail transit, aerospace, machining and other industries. The traditional aluminum alloy welding technology (such as tungsten argon arc welding, pulsed argon arc and resistance spot welding, etc.) is prone to pores and impurities, hot cracks, severe joint softening, etc., and it is difficult to ensure the quality of the connection zone. As a green solid-phase connection technology, friction stir welding (FSJ) solves the problems of traditional aluminum alloy welding and effectively improves the performance of the connection zone. In this paper, the friction stir connection system of 6061-T6 plates with thickness of 2mm, 4mm, 6mm and 8mm was studied. The appropriate connection process parameters were determined, and the aluminum alloy connection area with good surface quality, mechanical properties and corrosion properties was obtained. The effects of the rotation speed of the stirring head, the forward speed of the stirring head and the thickness of the plate on the microstructure, mechanical properties and corrosion properties of the aluminum alloy connection area were studied. The causes of defects in the joint area were analyzed, and the response surface method was used to optimize the design of friction stir joining process parameters to obtain the best tensile strength. The specific research contents are as follows :

(1) After friction stir joining, the surface of aluminum alloy joints with different thicknesses is well formed, and there are no obvious defects such as cracks and grooves. The friction stir joining process parameters have a significant effect on the surface quality of the joint area. With the increase of the rotation speed of the stirring

head, the grain size in the center of the joint zone decreases first and then increases. With the increase of the forward speed of the stirring head, the grain size in the center of the connection zone tends to decrease. EBSD image analysis shows that the grain orientation rotation in the base metal area forms plate texture, the grain boundary orientation angle is small, and the proportion of small angle grain boundary is high. Due to the accumulation and recombination of dislocations in the center of the connection zone, the grain boundary orientation angle increases, and the low-angle grain boundary composition also increases. Due to insufficient dynamic recrystallization in the thermo-mechanically affected zone on the advancing side, some grains are not crystallized, resulting in dislocation accumulation. The grain boundary orientation angle is small, and the proportion of small-angle grain boundaries increases from 27 % in the central region to 39.5 %.

(2) The friction stir bonding process parameters have a significant effect on the mechanical properties of the aluminum alloy connection zone. After FSJ, the tensile strength of aluminum alloy plates with different thicknesses shows different improvements. Specifically, the maximum tensile strength of aluminum alloy plates with thicknesses of 2mm, 4mm, 6mm and 8mm under specific FSJ parameters reaches 76.0 %, 75.7 %, 71.7 % and 73.3 % of the base metal, respectively. The tensile fracture mode presents a mixed mode of ductile fracture and brittle fracture, and the fracture position occurs between the center of the advancing side connection zone and the base metal. In addition, the microhardness of the joint zone with different thickness shows a 'W' type distribution. The microhardness of the base metal area is the highest, while the hardness of the heat affected zone on the advancing side of the joint zone is the lowest, and the microhardness of the center of the joint zone is improved. The microhardness change of the joint zone is closely related to grain refinement and grain size change. In terms of impact toughness, the impact toughness of the friction stir bonding zone is generally higher than that of the base metal, and the grain refinement in the center of the bonding zone improves the impact performance of the aluminum alloy. And the impact fracture is mainly plastic fracture, accompanied by a small amount of brittle fracture area.

(3) The electrochemical corrosion test was carried out on the FSJ connection zone of aluminum alloy with different thickness. It is found that the corrosion current density of the joint area is generally lower than that of the base metal area, indicating that the corrosion resistance of the joint area passing through the FSJ is better than that of the base metal. The main reason is that FSJ makes the grains in the connection zone fully refined, thus improving the corrosion resistance. In the salt spray corrosion test, although the appropriate FSJ parameters help to reduce the corrosion rate, the corrosion rate of the FSJ sample is higher than that of the base metal, that is, the corrosion resistance of the FSJ connection zone in the salt spray test is lower than that of the base metal. The corrosion rate of the 48h sample is generally higher than that of the 24h sample, mainly because the passivation film on the surface of the salt spray sample is destroyed after 24 hours of corrosion, resulting in increased corrosion.

(4) The effects of friction stir joining process parameters on the defects and heat input of aluminum alloy joint zone were studied, and the parameters were optimized by response surface method. Low heat input parameters lead to insufficient plasticization of materials, which is easy to produce furrows and hole defects. High heat input parameters lead to flash and small hole defects. In order to prevent defects, high heat input process parameters are needed for thin plate aluminum alloy connection, and longer stirring pins or increased shoulder pressing amount are needed for thick plate connection. The rotation speed of the stirring head has a significant effect on the heat of the connection zone. With the increase of the rotation speed, the maximum temperature of the connection zone shows a significant upward trend. However, the advancing speed of the stirring head has little effect on the connection zone in the process parameters, and the temperature of the advancing side of the plate is higher than that of the retreating side. Based on the mathematical model established by the BBD response surface method, the optimal parameters were determined at a rotation speed of 1350 rpm, a forward speed of 312 mm/min, and a shoulder pressing amount of 0.2 mm. The optimal tensile strength was 229.6 MPa, and the actual test tensile strength was 233.0 MPa, which was consistent with the model evaluation results.

KEY WORDS: 6061 aluminum alloy; friction stir connection; plate thickness; microstructure; mechanical properties; corrosion resistance; parameter optimization

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目录	VII
第 1 章绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 搅拌连接技术基本原理及应用	1
1.2.1 搅拌摩擦连接原理	1
1.2.2 搅拌摩擦连接特点	2
1.2.3 搅拌摩擦连接应用场景	2
1.3 国内外研究现状	4
1.4 本文主要研究内容	6
第 2 章 试验材料、设备及方法	7
2.1 引言	7
2.2 实验材料	7
2.3 实验设备及方法	7
2.3.1 连接实验设备	7
2.3.2 搅拌头的选择	8
2.4 工艺参数选择	8
2.5 连接区力学性能测试	9
2.5.1 拉伸性能测试	9
2.5.2 显微硬度测试	9
2.5.3 冲击韧性测试	10
2.6 连接区腐蚀性能测试	10
2.6.1 电化学腐蚀	10
2.6.2 盐雾腐蚀	10
2.7 连接区显微组织分析	11
2.7.1 金相组织分析	11

2.7.2 扫描电子显微镜(SEM)及能谱(EDS)分析	11
2.7.3 电子背散射衍射(EBSD)分析	12
第 3 章 不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区宏观形貌与微观组织分析	13
3.1 引言	13
3.2 连接区表面宏观形貌	13
3.2.1 不同搅拌头旋转速度下连接区宏观形貌	13
3.2.2 不同搅拌头前进速度下连接区宏观形貌	14
3.3 铝合金连接区微观组织分析	15
3.3.1 铝合金连接区微观组织	15
3.3.2 工艺参数对连接区微观组织影响	16
3.3.3 连接区微观组织 EBSD 分析	18
3.4 本章小结	20
第 4 章 不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区力学性能分析	21
4.1 引言	21
4.2 不同厚度铝合金连接区拉伸性能分析	21
4.2.1 不同厚度铝合金连接区拉伸性能	21
4.2.2 搅拌头旋转速度对连接区拉伸性能的影响	23
4.2.3 搅拌头前进速度对连接区拉伸性能的影响	24
4.2.4 板材厚度对连接区拉伸性能的影响	24
4.2.5 拉伸断口宏观形貌	25
4.2.6 连接区拉伸断口 SEM 图像	26
4.3 连接区显微硬度分析	28
4.3.1 搅拌头旋转速度对连接区显微硬度的影响	28
4.3.2 搅拌头前进速度对连接区显微硬度的影响	29
4.3.3 板材厚度对连接区连接区显微硬度的影响	31
4.4 不同厚度铝合金连接区冲击性能分析	32
4.4.1 搅拌头旋转速度对连接区冲击性能的影响	32
4.4.2 搅拌头前进速度对连接区冲击性能的影响	33
4.4.3 冲击试样断裂宏观形貌	34

4.4.4 冲击试样断口微观形貌	35
4.5 本章小结	36
第 5 章 不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区耐腐蚀性能分析	38
5.1 引言	38
5.2 连接区电化学腐蚀性能分析	38
5.2.1 搅拌头旋转速度对连接区电化学腐蚀的影响	38
5.2.2 搅拌头前进速度对连接区电化学腐蚀的影响	39
5.2.3 电化学腐蚀微观形貌分析	41
5.3 连接区盐雾腐蚀分析	43
5.3.1 搅拌头旋转速度对连接区盐雾腐蚀的影响	43
5.3.2 搅拌头前进速度对连接区盐雾腐蚀的影响	44
5.3.3 连接区盐雾腐蚀后 SEM 图	45
5.4 本章小结	47
第 6 章 工艺参数对连接区缺陷影响与最优参数设计	48
6.1 引言	48
6.2 工艺参数对连接区缺陷影响	48
6.2.1 低热输入连接缺陷	48
6.2.2 高热输入连接缺陷	49
6.3 工艺参数对连接区热影响	50
6.4 连接区工艺参数优化	53
6.4.1 响应面工艺优化	53
6.4.2 BBD 设计试验	53
6.4.3 模型精度分析	54
6.4.4 数学模型	56
6.4.5 试验结果分析	56
6.4.6 抗拉强度工艺参数优化	58
6.5 本章小结	58
第 7 章 结论与展望	59
7.1 总结	59

7.2 展望.....	60
参考文献.....	61
攻读硕士学位期间的论文目录.....	68
致谢.....	69

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景

6061 铝合金属于热处理强化合金，具有良好的耐腐蚀性、韧性高及加工后不变形、材料致密无缺陷、氧化效果极佳等优良特点，广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车制造等各行各业。然而，铝合金使用传统焊接方法时可焊性相对较差。大型铝合金结构件连接常需要使用铆接方法，从而增加它们的总重量、成本并降低性能。在这方面，摩擦搅拌连接(FSJ) 技术被广泛认为是连接铝合金非常有前景的技术，作为一种新型固态连接技术，它有潜力克服传统熔化焊接带来的问题，如大变形、凝固开裂、气体和收缩孔隙、高能耗、环境污染等^[1,2]问题。因此，对铝合金搅拌摩擦连接技术的深入研究，不仅可以解决传统焊接带来的问题，而且可以进一步提升铝合金连接区的性能，从而获得较高质量的连接接头^[3,4]。为实际工业制造中的铝合金连接提供理论指导。

1.2 搅拌连接技术基本原理及应用

1.2.1 搅拌摩擦连接原理

搅拌摩擦连接(FSJ)是一种新型的固相连接技术，其原理如图 1-1 所示。连接前需将两块待连板材刚性固定在背垫上，高速旋转的搅拌头伸入接缝中，直至搅拌头轴肩与待连接板材紧密接触，搅拌头沿着连接方向前进，连接过程中，搅拌头与被连接板材经过摩擦与搅拌作用产生热量使板材材料达到塑性状态。塑性状态的金属材料在搅拌头旋转作用，沿搅拌针前进侧(Advancing side,AS)流向搅拌针后退侧(Retreating side,RS)，并随着搅拌头前进移动，高度塑性变形的金属流向搅拌头的后部，冷却后形成紧密的固相接缝。

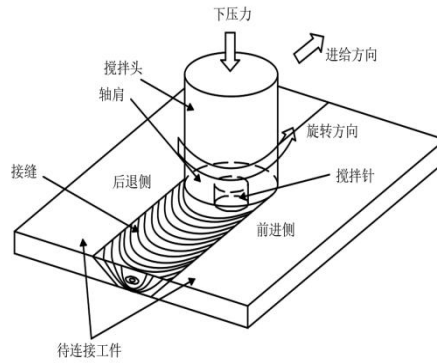


图 1-1 搅拌摩擦连接原理图

Fig. 1-1 The principle diagram of friction stir joining

1.2.2 搅拌摩擦连接特点

搅拌摩擦连接(FSJ)作为一种新型绿色固相连接技术，相比传统铝合金熔化焊接方法具有以下优点：

（1）连接材料达到塑化状态，热输入速度快，没有飞溅和烟尘，实现了绿色环保连接。

（2）不需要添加焊丝和保护气体，简化了连接工序，提高了铝合金连接效率。

（3）FSJ 后连接区残余应力低，连接板材不易变形且无裂纹和气孔等缺陷，连接区性能较好，接头质量可靠。

（4）操作过程方便实现机械化、自动化，设备简单，无需要高的操作技能和训练，避免了对操作工人技术熟练程度的依赖。

搅拌摩擦连接同时也存在一定的缺点，连接板材必须刚性固定在背垫上；固定式搅拌头摩擦消耗较快，且搅拌头成本较高；连接结束后搅拌头离出板材时，会在连接末端形成“钥匙孔”，并且难以对其进行修补。

1.2.3 搅拌摩擦连接应用场景

搅拌摩擦连接作为一种轻合金连接的优选连接技术，已从技术研究迈向高层次的工程化和工业应用阶段，以下为 FSJ 技术具体应用场景。

（1）航空航天领域：对于运载火箭、宇宙飞船和航天飞机来说，燃料箱是一个重要的结构，通过搅拌摩擦连接技术提高了燃油箱连接质量和几何精度^[5]。下图 1-2 为燃油箱 FSJ 连接设备。

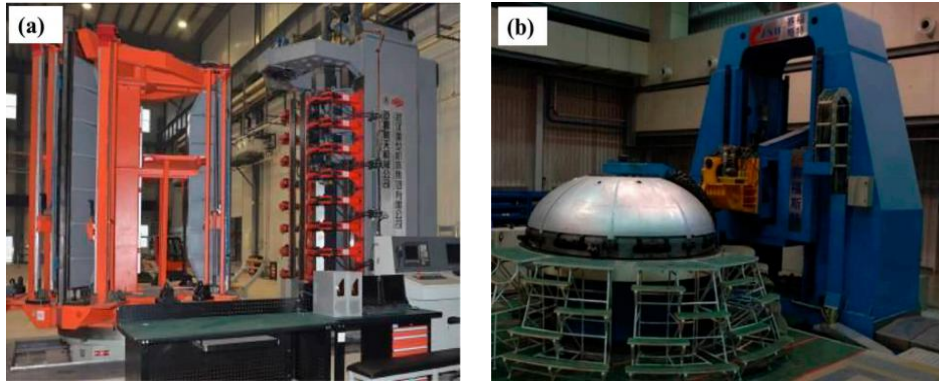


图 1-2 航空燃油箱 FSJ 连接设备

(a)罐段纵向 FSJ 设备(b)罐顶 FSJ 设备

Fig.1-2 Aviation fuel tank FSJ connection equipment

(a)longitudinal FSJ equipment of Tank section (b)FSJ equipment of Tank roof

(2) 汽车制造:随着新能源汽车的发展,轻合金材料获得了较多的应用以达到更高的轻量化水平,提升汽车的续航里程。搅拌摩擦连接技术在新能源汽车三电系统已有大规模地应用,如电池包下箱体、液冷板、电动机壳体及电控壳体等^[6,7]。下图 1-3 为 FSJ 应用在电池包下箱体中底板与边框的连接。

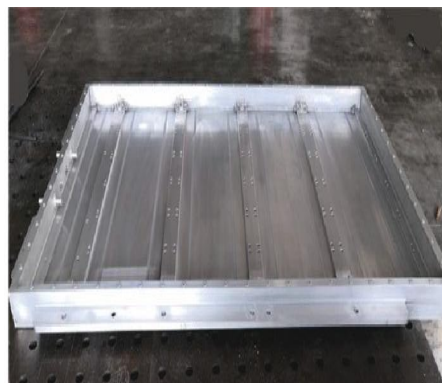


图 1-3 搅拌摩擦连接应用于电池包下箱体

Fig.1-3 friction stir joining is applied to the lower box of battery pack.

(3) 轨道交通制造:搅拌摩擦连接在轨道车辆车体生产中具有广泛的应用前景,在复兴号”高速列车车体中,例如车钩座板采用单轴肩搅拌摩擦焊工艺,平顶、设备舱底板等采用双轴肩搅拌摩擦焊工艺^[8],如下图 1-4 所示。



图 1-4 FSJ 连接平顶结构

Fig. 1-4 FSJ connection flat top structure

(4) 船舶制造:搅拌摩擦连接(FSJ)技术在船舶制造中的应用主要通过提供高质量、高强度的连接接头,为轻质和高强度船体结构的制造提供了理想解决方案^[9]。FSJ 技术同时能够实现大型船体板块和结构的高效连接,优化内部隔断和支撑结构的稳定性^[10],从而在提高生产效率、降低成本的同时,确保船舶在恶劣海洋环境下的安全性和耐久性。

1.3 国内外研究现状

铝合金搅拌摩擦连接(FSJ)作为一种高效的固态连接技术,已经成为材料科学和工程领域的热点研究方向。以下是铝合金 FSJ 的主要研究方向:

(1) 力学性能

铝合金搅拌摩擦连接研究中搅拌头设计、旋转速度、前进速度等工艺参数对连接区力学性能影响显著。H.J. Zhang 等^[11]研究了高搅拌头旋转速度对 6061 铝合金连接区中心演变特征及机理的影响。结果表明:高旋转速度增强了接缝后退侧的材料流动,改善了连接区中心晶粒尺寸和对称性,转速的增大导致晶粒的生长和强化相的溶解,连接区中心晶粒细化提高连接区显微硬度。Hao Zhang 等^[12]分析搅拌头旋转速度对超薄板 6061 铝合金连接区力学性能的影响。结果表明:在搅拌头旋转速度大于 8000rpm 时,接头无缺陷。显微硬度随着转速的增加而显著升高。在旋转速度 1200rpm 时,接头的抗拉强度最高,为 220MPa,约母材 77.5%。Alexander Kalinenko 等^[13]分析 6061 铝合金 FSJ 连接区微观组织和拉伸性能的关系。结果表明:6061 铝合金接缝强度受微观结构中强化相析出、粗化和颗粒溶解影响,晶粒沉淀粗化导致连接区软化,降低连接区抗拉强度。连接热循环对连接区强化相析出影响显著,分析出旋转速度是决定连接强度的关键因素。T.E. Abioye 等^[14]研究颗粒增强剂对 6061 铝合金搅拌摩擦微观组织、力学性能和耐磨

性能的影响。结果表明：通过添加 SiC、B₄C、Al₂O₃ 增强颗粒连接区的硬度和耐磨性都比未增强连接接头有所提高。在低载荷条件下，B₄C 增强接头硬度和耐磨性提高幅度最大。

（2）耐腐蚀性能

铝合金在高腐蚀环境下应用广泛，研究铝合金 FSJ 连接区腐蚀性能对提高结构的耐久性和可靠性具有重大的意义。Farhad Gharavi 等^[15]研究了搅拌摩擦连接 6061-T6 铝合金搭接接头的腐蚀行为。采用循环极化和电化学阻抗谱试验研究了搭接接头的腐蚀性能。结果表明：连接区中心的基体金属间化合物增加了电偶腐蚀的发生，且该区域晶粒尺寸减小，提高了对腐蚀的敏感性，并且在 HAZ 区域的腐蚀敏感性高于 WNZ 区域，发生腐蚀类型主要为点蚀和晶间腐蚀。Yuchen Peng 等^[16]研究了高转速下搅拌摩擦处理下的电化学腐蚀行为。结果表明：经 HRS-SFSP 试验后的连接区晶粒细化且晶粒再结晶降低了晶粒间能量储存，进一步缓解了腐蚀，连接后第二相粒子 Mg₂Si 发生细化且分布均匀，降低了电偶腐蚀倾向，随着旋转速度增加连接区晶粒和第二相粒子粗化，降低耐腐蚀性。Ming-an Chen 等^[17]研究了 6061 铝合金 FSJ 中 Al-Fe-Si 颗粒对 MAO 涂层组织和腐蚀性能的影响。结果表明：母材中粗大 Al-Fe-Si 颗粒聚集导致 MAO 涂层/基体界面上形成大而连通的微孔洞和不连续的内氧化膜，在 FSJ 后连接区中心形成细小、均匀分布的 Al-Fe-Si 颗粒，进而改善 MAO 涂层的组织和腐蚀性能。

（3）残余应力

铝合金搅拌摩擦连接区残余应力分析较少。Jalal Fathi 等^[18]分析了水冷条件下 6061 铝合搅拌摩擦连接的力学性能和残余应力分布。结果表明：水冷条件下提高了连接区的抗拉强度，试样表面残余拉应力降低约 40%，表面残余压应力提高了 50%。岑升波等^[19]分析了搅拌头前进速度对 2219 铝合金双面搅拌摩擦连接力学性能及残余应力的影响。结果表明：不同前进速度下连接区纵向残余应力分布趋势一致，接缝及热影响区为残余拉应力，残余应力值在两侧分布不均匀，呈现双峰特征。随着搅拌前进速度增加，连接区残余拉应力峰值增加。Omar S. Salih 等^[20]人通过有限元仿真铝合金搅拌摩擦连接中的热产生、塑性变形和残余应力。结果表明：搅拌头旋转速度决定了连接区温度变化，增加了连接区塑性变形。连接区残余应力分布呈 M 型分布。在纵向和横向上，在连接区中心边缘存在显著

的拉伸残余应力，在热机械影响区、热影响区和母材中存在压应力。

1.4 本文主要研究内容

铝合金作为工业上广泛使用的轻合金金属，其具有较大的比强度、高的塑性、良好的耐腐蚀性能以及优异的机械加工性能等特点。然而传统的铝合金焊接方法(如钨极氩弧焊、脉冲氩弧和电阻点焊等)极易出现气孔与杂质、热裂纹，接头软化严重等问题，难以保证连接区质量。FSJ 作为一种新型的固相连接技术，它有潜力克服传统焊接方法带来的问题，因此需要进行系统的研究。

目前，铝合金 FSJ 研究已逐渐增多，但大部分论文针对某个具体的厚度进行搅拌摩擦连接工艺参数对连接区性能的影响。本课题对 2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚 6061 铝合金连接区域进行性能分析，探讨了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度对连接区微观组织和性能影响的规律。通过本课题可以对不同厚度 6061 铝合金搅拌摩擦连接形成一套工艺参数选择体系，并选择较好的工艺参数获得表面质量、连接区性能好的铝合金连接区。通过本课题研究使得搅拌摩擦连接技术从实验室研究推向工业制造领域，对铝合金连接有着更加应用价值，有助于推动搅拌摩擦连接标准化的发展。本文主要研究内容如下：

(1) 研究不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区域微观组织的规律，并分析了 FSJ 工艺参数中的搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度对连接区的微观组织的影响，并通过 EBSD 技术来分析连接区微观组织演化规律。

(2) 研究了不同厚度铝合金 FSJ 连接区力学性能。具体分析了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度和板材厚度对连接区拉伸性能、显微硬度、冲击性能的影响，并探讨了拉伸试样与冲击试样的断裂机理。

(3) 研究了不同厚度铝合金 FSJ 连接区腐蚀性能，具体分析了搅拌头旋转速度、前进速度对连接区电化学腐蚀、盐雾腐蚀性能的影响，并研究了连接区腐蚀机理的形成。

(4) 研究了不同厚度 6061 铝合金在极限参数下的不同的缺陷，分析了缺陷产生的原因和形成机理。探讨了工艺参数对连接区热输入的影响，获得连接过程中温度变化。以连接区抗拉强度为响应目标，对 FSJ 工艺参数进行了 BBD 响应面优化设计，获得了最佳抗拉强度的工艺参数和工艺参数数学模型。

第 2 章 试验材料、设备及方法

2.1 引言

本章主要介绍试验课题所涉及的搅拌摩擦连接板材、试验设备和试验方法，确定 4 个厚度 6061 铝合金 FSJ 的工艺参数范围，并对 FSJ 连接区性能检测方法进行介绍，主要包括力学性能的拉伸性能、显微硬度、冲击性能，腐蚀性能的电化学腐蚀、盐雾腐蚀以及连接区微观组织。

2.2 实验材料

本文选用上海盛东金属有限公司生产的 2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚 200mm × 200mm 6061 铝合金板材(时态为 T6)进行搅拌摩擦连接，母材的化学成分和力学性能分别如表 2-1、2-2 所示

表 2-1 6061-T6 铝合金化学成分(质量百分数 %)

Table 2-1 6061-T6 aluminum alloy chemical composition (mass percentage %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	others
0.59	0.575	0.249	0.118	1.054	0.108	0.126	0.026	97.01	<<0.15

表 2-2 不同厚度 6061 铝合金力学性能

Table 2-2 Mechanical properties of 6061 aluminum alloy with different thickness

板材	抗拉强度	维氏硬度	冲击韧性	伸长率
mm	Mpa	HV	J/cm ²	%
2	300	95	13.1	13.2
4	305	90	16.6	13.5
6	308	95	21.1	13.6
8	311	93	20.1	13.8

2.3 实验设备及方法

2.3.1 连接实验设备

试验采用北京赛福斯特技术有限公司生产的 FSW-LM-A10 型搅拌摩擦连接设备，如图 2-1(a)所示，该设备可以对 2~16mm 厚度范围内的轻质金属材料板

材进行连接，本文采用的连接方式为无倾角连接。在连接前使用砂纸对连接表面进行打磨去除表面氧化层，再使用酒精擦拭去除表面杂质。试验前通过装夹设备使两块待连接铝合金板材固定，避免在连接过程中板材左右移动，装夹设备如图 2-1(b) 所示。

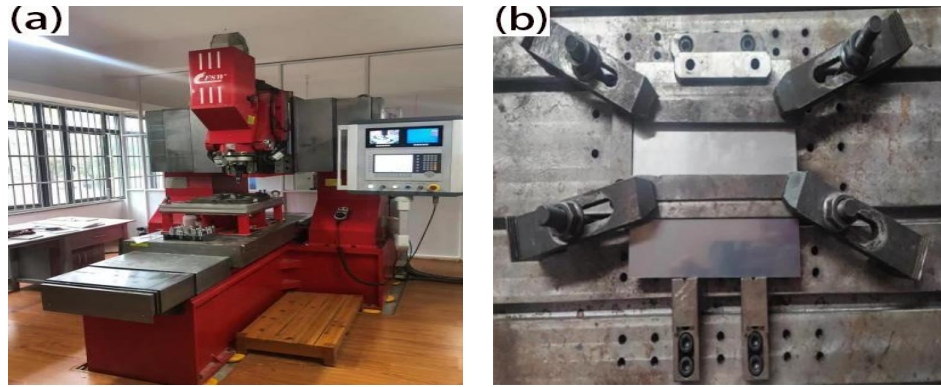


图 2-1 搅拌摩擦连接设备与装夹设备

Fig. 2-1 Friction stir joining equipment and clamping equipment

2.3.2 搅拌头的选择

试验所用搅拌头底部有凹槽，搅拌针呈圆锥形，搅拌摩擦连接时搅拌头与焊接板材剧烈摩擦，产生大量的热量，搅拌头需要有良好的耐磨性和耐热性，本次实验搅拌头选用材料为 40Cr 合金钢，并对其进行真空调质处理。搅拌摩擦连接不同厚度铝合金板材时，需要采用不同长度的搅拌头，所选用的搅拌头如图 2-2 所示。



图 2-2 试验采用的搅拌头

Fig. 2-2 Stirring head used in the test

2.4 工艺参数选择

前期通过对 2~8mm 板材进行极限工艺参数的试验，低搅拌头旋转速度和高搅拌头前进速度时产热低，板材对接接头成形较差^[20]。高搅拌头旋转速度和低搅

拌头前进速度时产热高，接缝变薄和接头软化现象较为严重^[21]。所以选择合适的工艺参数范围至关重要，本文选择的工艺参数如表所示。

表 2-3 工艺参数选择

Table 2-3 Selection of process parameters

板材厚度	旋转速度	前进速度	下压量
mm	rpm	mm/min	mm
2	600~1600	200~400	0.2
4	600~1600	200~400	0.2
6	600~1600	200~400	0.2
8	600~1600	200~400	0.2

2.5 连接区力学性能测试

2.5.1 拉伸性能测试

对不同厚度板材进行 FSJ 试验后，将板材静置一周来进行时效处理，并根据 GB/T 228.1-2021 进行制备 2mm、4mm、6mm、8mm 的拉伸样品，拉伸试样尺寸如下图 2-3 所示。根据试验标准在 UTM-1432 型万能试验机上进行 2mm 拉伸试验，并在 WAW-1000 型万能试验机上进行 4mm、6mm 和 8mm 拉伸试验。每组工艺参数设置 3 个平行样，避免测试过程中误差产生。

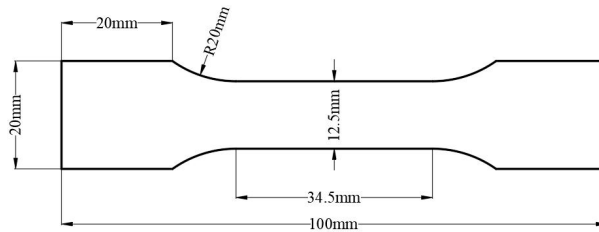


图 2-3 拉伸试样尺寸

Fig. 2-3 Size of tensile specimen

2.5.2 显微硬度测试

将接缝处沿垂直于连接方向切取 2mm、4mm、6mm 和 8mm 铝合金连接区硬度试样，采用 400#、1000#、1500#砂纸对连接区域依次打磨，并使用绒布对试样表面进行抛光。将制备好的试样使用 WHS-1000AT 型显微硬度测试仪进行试验，从而获得整个连接区的硬度变化，硬度测试点取点位置从连接区前进侧到后退侧，取 25 个点，点间距 1mm，且位置位于厚度中间，硬度测量时加载载荷

为 300g，保压时间为 10s。

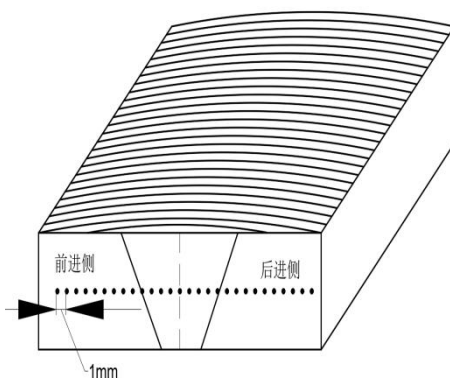


图 2-4 硬度取点图

Fig.2-4 Hardness point diagram

2.5.3 冲击韧性测试

根据 GB/T 19748-2019《金属材料夏比 V 型缺口摆锤冲击试验仪器化试验方法》，用线切割切取各厚度冲击试样。冲击试样开口位于连接区中心。冲击试样尺寸图如图 2-5 所示。冲击试验在室温下进行，冲击实验在济南川佰仪器有限公司生产的 JBW-300B 设备上进行，摆锤选择 150J 能量级。

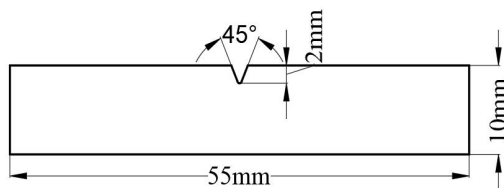


图 2-5 冲击试样图

Fig.2-5 Impact specimen diagram

2.6 连接区腐蚀性能测试

2.6.1 电化学腐蚀

在不同厚度铝合金连接区切割出半径为 5mm 的圆柱形试样，试样表面利用砂纸打磨和绒布抛光。电化学腐蚀试验采用上海辰华公司生产的 CHI660E 型三电极电化学工作站，腐蚀溶液采用 NaCl 溶液，溶液浓度为 wt.3.5%。采用铝合金、铂片和饱和甘汞电极分别为工作电极、辅助电极和参比电极。并采用 chi660e 软件数据拟合极化曲线。

2.6.2 盐雾腐蚀

采用 GY-60-SS 型盐雾试验机进行盐雾腐蚀试验，对不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区切割出 15mm×4mm 的试样，将试样表面打磨至光滑，使用装有

酒精溶液的超声波清洗机清洗干净，盐雾腐蚀溶液选择 wt.5%氯化钠溶液。试验时长为 24h 和 48h。相关各项详细试验条件见表 2-4。

表 2-4 盐雾腐蚀试验参数
Table 2-4 Salt spray corrosion test parameters

参数	试验配置	备注
氯化钠溶液浓度	wt.5%	试验前标定浓度一次
PH	6.5~7.2	试验溶液 PH 值
气压(kgf/cm ²)	1.0±0.1	试验过程连续不间断
喷雾量 (ml/80cm ² /h)	1.0~2.0	时间大于 30 小时取平均值
压力桶内温(°C)	47±1	
盐水桶内温(°C)	35±1	
室温(°C)	16±1	
相对湿度(RH)	85%	
试验时间	进行 24h 和 48h	

2.7 连接区显微组织分析

2.7.1 金相组织分析

搅拌摩擦连接完成后沿垂直于连接方向(JD)切取金相试样，依次采用 400#、1000#和 1500#的绿碳化硅砂纸对不同厚度连接区表面进行打磨，然后通过金刚石光膏在抛光布上进行机械抛光，完成后通过电解抛光去除表面小划痕，电解溶液为高氯酸乙醇溶液(HClO₄:酒精=1:9)。将金相试样用无水乙醇洗净吹干后用凯勒试剂腐蚀液(HF:HCL:HNO₃:去离子水=2mL:3mL:5mL:190mL)进行腐蚀，腐蚀时间约 10~25s。腐蚀后用无水乙醇清洗、吹干后用苏州越视精密仪器公司生产 Y P710 型显微镜观察试样金相组织。

2.7.2 扫描电子显微镜(SEM)及能谱(EDS)分析

为了分析连接区力学性能的断裂模式和腐蚀性能中腐蚀机理，实验中利用日立 S-3400 型扫描电子显微镜(SEM)来观测拉伸和冲击断裂表面并且对腐蚀试样表面的腐蚀产物进行观察，通过扫描电镜配备的 EDS 能谱仪对表面化学成分进行详细分析。

2.7.3 电子背散射衍射(EBSD)分析

采用装有电子背散射衍射(EBSD)探头的场发射日立 SU8600 型扫描电镜进行 EBSD 测试,使用牛津的 CMOS EBSD 和 Ultim Max EDS 探测器采集,在 30KV 加速电压下工作,根据微观结构的尺寸,扫描步长为 $1\mu\text{m}$ 。将 EBSD 样品用砂纸抛光再用金刚石抛光膏进行机械抛光,后使用高氯酸乙醇溶液(HClO_4 :酒精=1:9)对样品进行电解抛光。采用 AZterCrystal 软件对连接区区域采集的数据进行处理,对晶粒组织以及取向进行分析。图 2-6 为带有 EBSD 探头的日立 SU8600 扫描电子显微镜图。



图 2-6 日立 SU8600 扫描电子显微镜

Fig. 2-6 Hitachi SU8600 scanning electron microscope

第3章 不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区宏观形貌与微观组织分析

3.1 引言

6061 铝合金经过搅拌摩擦连接后，连接区的宏观形貌及微观组织对连接区性能影响至关重要^[22]。通过对连接区微观结构的分析，不仅可以揭示连接性能变化的规律，而且对优化连接工艺参数和提高结构性能具有重要意义。本章具体分析了工艺参数对 2mm、4mm、6mm 和 8mm 铝合金连接区宏观形貌与微观组织的影响。

3.2 连接区表面宏观形貌

通过对连接区宏观形貌的观察，不仅可以分析表面连接缺陷形成，而且对评估连接区质量具有重要指导作用。本节对连接区表面宏观形貌进行分析，具体探究了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度对连接区宏观形貌的影响。

3.2.1 不同搅拌头旋转速度下连接区宏观形貌

图 3-1 为搅拌头前进速度 300mm/min 下搅拌头旋转速度为 600~1600rpm 时不同厚度 6061 铝合金连接区表面宏观形貌。从图中可以观察到不同厚度铝合金在搅拌头旋转速度 600~1600rpm 下连接区表面成型良好、光滑连续，无明显裂纹沟槽等缺陷。当搅拌头旋转速度为 600rpm 时，2mm 和 4mm 厚铝合金连接区表面纹路不清，出现鼓起的金属。主要因为低搅拌头旋转速度连接区热输入低，金属塑化程度低，未能形成流动性均匀的连接接头^[23]。当搅拌头前进速度 1200rpm 时，不同厚度连接区表面形成均匀的鱼鳞纹纹路，光滑连续且无明显飞边。当搅拌头旋转速度增加到 1600rpm，4mm 和 8mm 厚铝合金连接区返回侧出现了飞边，主要因为高搅拌头旋转速度下连接区热量高，金属塑化过度，搅拌头将前进侧的塑性金属带到了返回侧，在搅拌头运动带来的顶端力锻压下，无法快速凝固而向外挤压形成飞边，降低了连接区表面质量^[24]。通过上述分析搅拌头旋转速度导致了连接区热输入变化，进而影响了连接区金属塑化程度。合适的搅拌头前进速度有利于提高连接区表面质量。



图 3-1 不同搅拌头旋转速度下连接区宏观形貌

Fig.3-1 The macroscopic morphology of the connection zone at different rotation speeds of the stirring head

3.2.2 不同搅拌头前进速度下连接区宏观形貌

图 3-2 为搅拌头旋转速度 1200rpm 下搅拌头前进速度 200~400mm/min 时不同厚度 6061 铝合金连接区宏观形貌。从图 3-2 中可以观察到不同厚度在搅拌头前进速度 200~400mm/min 下连接区表面形成均匀的鱼鳞纹纹路，光滑连续，无明显裂纹沟槽等缺陷。当搅拌头前进速度为 200mm/min 时，2mm、4mm 和 8mm 铝合金连接区表面在返回侧均出现了少量飞边。出现这现象主要原因搅拌头前进速度低，搅拌头在板材中停留时间长，高热输入使得材料在连接区变得更加软化和流动性更强，容易形成飞边。当搅拌头前进速度为 400mm/min 时，不同厚度铝合金连接区表面质量较好。主要因为搅拌头在高前进速度过程中破碎金属所形成空腔的速度加快，塑化金属可更快进行填充，减少了塑化金属与搅拌头粘附的机会^[25]。因此合适的搅拌头前进速度下连接区表面整洁平滑，提高了连接接头质量。

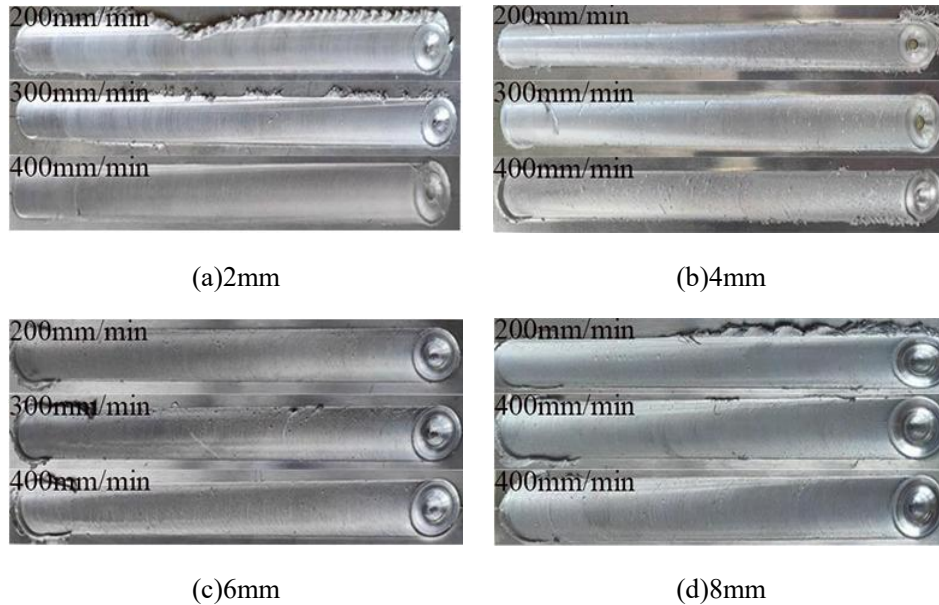


图 3-2 不同搅拌头前进速度下连接区宏观形貌

Fig.3-2 The macroscopic morphology of the connection zone at different forward speeds of the stirring head

3.3 铝合金连接区微观组织分析

3.3.1 铝合金连接区微观组织

对铝合金连接区进行金相分析，图 3-3 为 4mm 铝合金在搅拌头旋转速度 1200rpm、搅拌头前进速度 300mm/min 下连接区整体微观组织图，从图中观察到连接区按照晶粒状态分成四个区域。分别为母材(BM)、连接区中心(NZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)。返回侧(RS)的 NZ 和 TMAZ 之间的过渡区域并不明显，而在前进侧(AS)两者间存在明显的界线分割。这由于在搅拌摩擦连接区形成过程中材料由返回侧向前进侧流动堆积，因此前进侧塑性变形相对更为剧烈，致使界线比较清晰^[26]。

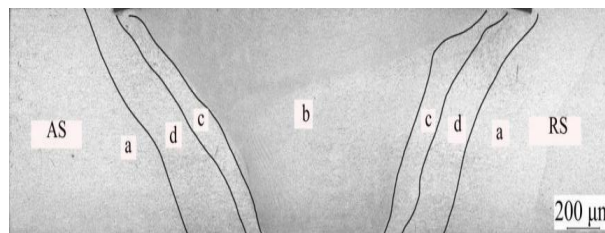


图 3-3 6061 铝合金搅拌摩擦连接区整体微观组织

(a)母材区；(b)连接区中心；(c)热机影响区；(d)热影响区

Fig. 3-3 6061 aluminum alloy friction stir connection zone overall microstructure
(a) Base material area ; (b) Connection zone centres ; (c) The heat engine affected zone ;
(d) Heat-affected zone

图 3-4 为连接区各区域微观组织放大图。图 3-4(a)母材区由沿着轧制方向拉长的粗大晶粒组成，晶粒呈板条状，晶粒尺寸平均约为 72.2 μm 。图 3-4(b)中连接区中心受到搅拌头搅拌作用，经历了剧烈的塑性变形和摩擦热过程，出现动态再

结晶，晶粒得到细化，呈现细小等轴晶状，晶粒尺寸平均约为 $18.4\mu\text{m}$ 。热机影响区受到机械力和摩擦热循环双作用，经历了更低的热输入和更弱的塑性变形过程，致使该区域的动态再结晶过程不完全。铝合金热机影响区与连接区中心具有相似的微观组织结构，晶粒出现细化和压扁带状型，晶粒尺寸平均为 $20.2\mu\text{m}$ 。热影响区受摩擦热作用和 FSJ 热循环作用，未发生动态再结晶。晶粒出现一定程度的长大，呈现粗大晶粒状，其微观组织与母材区相似，该区域易发生软化现象^[27]。晶粒尺寸平均约为 $50.3\mu\text{m}$ 。

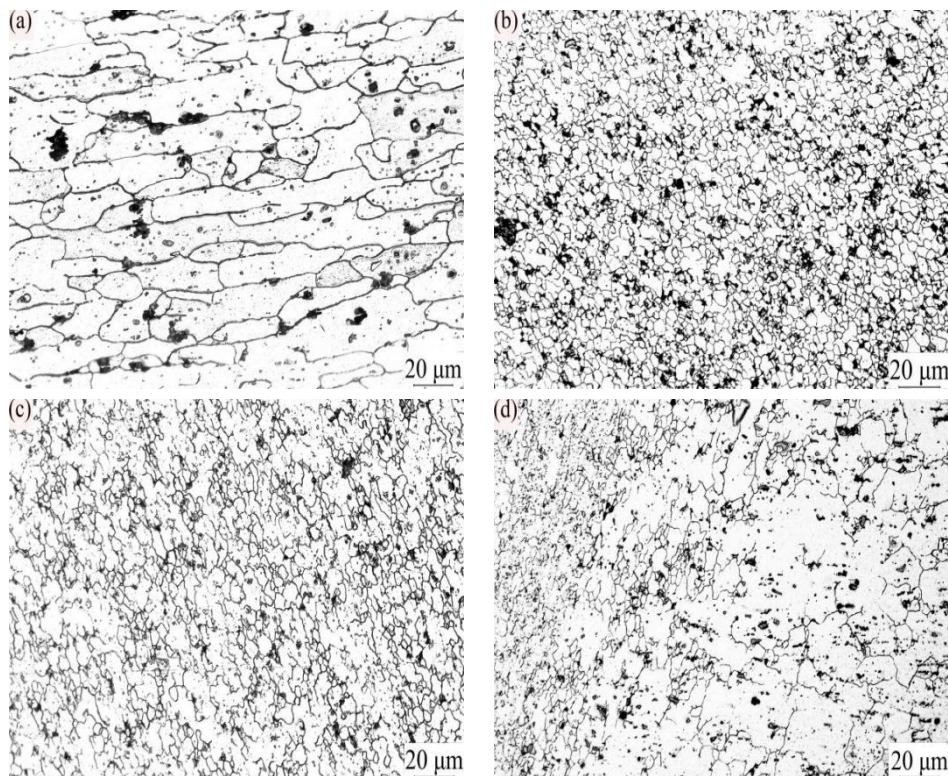


图 3-4 铝合金连接区各区域微观组织

(a)母材；(b)连接区中心；(c)热机影响区；(d)热影响区

Fig.3-4 Microstructure of each area of aluminum alloy connection zone

(a) Base material area ; (b) Connection zone centres ; (c) The heat engine affected zone ;
(d) Heat-affected zone

3.3.2 工艺参数对连接区微观组织影响

铝合金搅拌摩擦连接区微观组织、性能受到连接工艺参数的影响。搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、搅拌头结构等是主要的因素。本节重点分析了搅拌头旋转速度和搅拌头前进速度对铝合金连接区微观组织的影响。

搅拌头旋转速度直接影响了连接区中心热输入，间接影响了连接区微观结构，图 3-5 为 8mm 连接区中心在搅拌头前进速度 300mm/min 时搅拌头旋转速度为 600~1600rpm 时连接区中心微观组织照片。

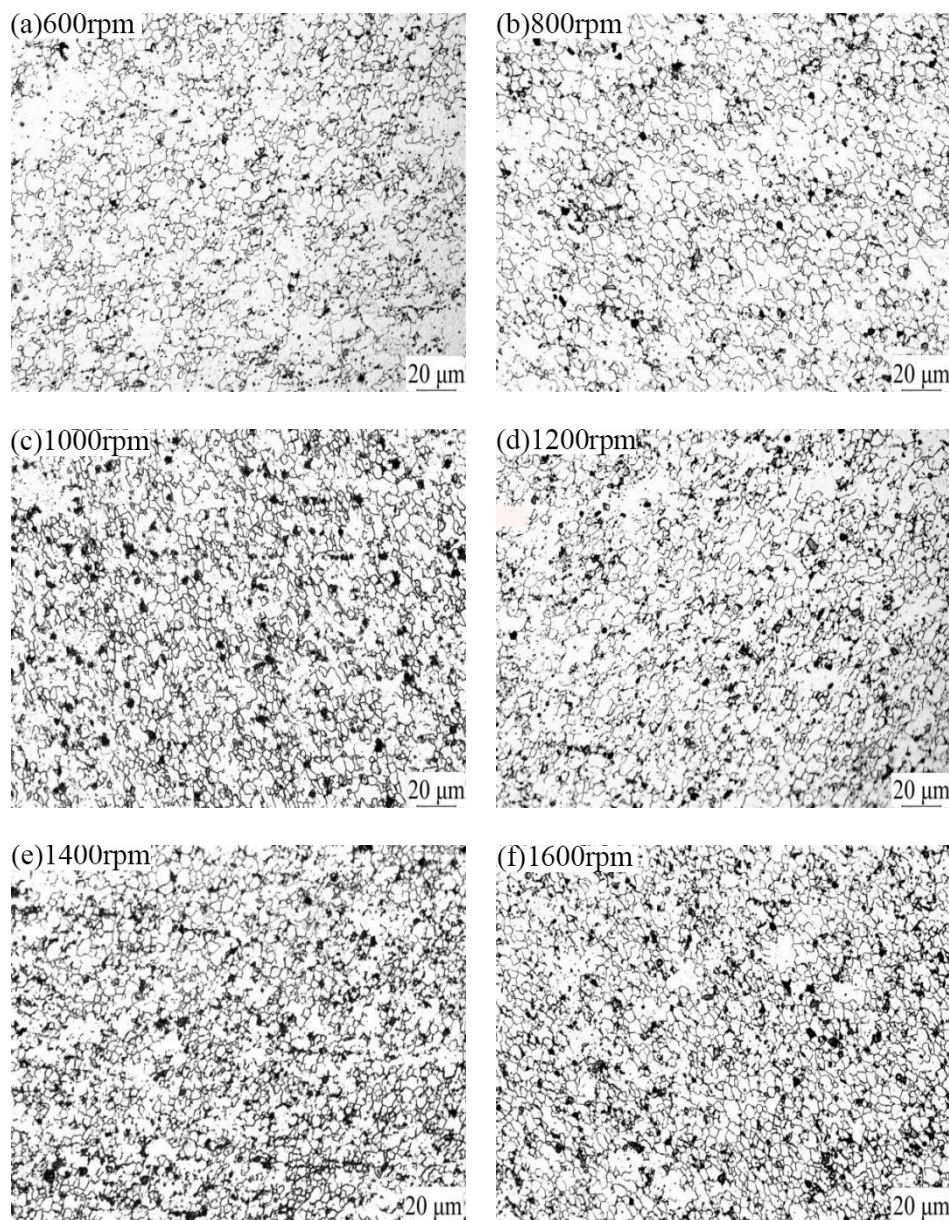


图 3-5 不同旋转速度下连接中心微观组织

Figs.3-5 Microstructure of the connection center at different rotation speeds

从图中可以观察到，在搅拌头前进速度固定 300mm/min 时，随着搅拌头旋转速度增加时，连接区中心的晶粒尺寸呈现先减小后增大的趋势。当搅拌头旋转速度为 600rpm 和 800rpm 时，连接区中心晶粒尺寸平均为 15.3 μm 。低旋转速度下连接区热输入低，金属材料塑化不充分，连接区中心晶粒再结晶不充分，晶粒尺寸较大。当搅拌头旋转速度增加到 1000rpm、1200rpm 和 1400rpm，金属材料塑化充分，连接区中心再结晶充分，晶粒细化明显，晶粒尺寸平均为 13.5 μm 。当搅拌头旋转速度增加到 1600rpm 时，连接区中心区中心尺寸增加，晶粒尺寸平均为 21.2 μm 。主要原因在于搅拌头肩部旋转产生的巨大摩擦热使 NZ 表面的

物料流动性急剧增加,表面的晶粒位移而不破碎,使 NZ 具有较大的晶粒^[27]。同时,由于塑性变形严重,材料应变率随之增加使形核率增加。此外,破碎的增强颗粒阻碍了晶粒的动态再结晶,晶粒细化降低^[28]。通过上述分析搅拌头旋转速度影响了连接区热输入和连接区晶粒再结晶过程,使得晶粒尺寸有先减小后增大的趋势。图 3-6 为 6mm 铝合金在搅拌头旋转速度 1200rpm 时搅拌头前进速度 200~400mm/min 下连接区中心微观组织照片。

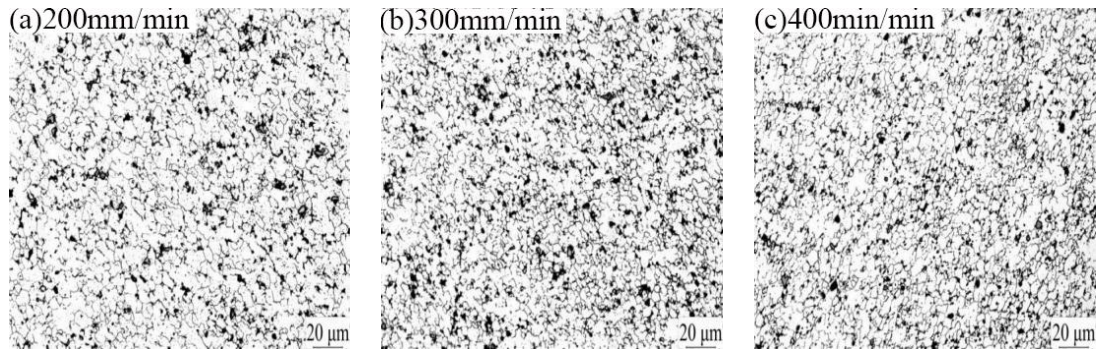


图 3-6 不同前进速度下连接中心微观组织

Fig. 3-6 Microstructure of the connecting center at different forward speeds

从图 3-6 中可以观察到,随着搅拌头前进速度提高,连接区中心尺寸呈现减小趋势。搅拌头前进速度为 200mm/min 时,连接区晶粒尺寸平均为 16.3μm。搅拌头前进速度低时,搅拌头在连接区停留时间长,连接区散热率降低,连接区中心再结晶后晶粒发生粗化。当搅拌头前进速度提高到 400mm/min 时,连接区晶粒尺寸平均为 14.5μm,连接区中心晶粒尺寸发生明显的细化。出现该现象主要原因在于前进速度提高,导致更快的冷却速率。快速冷却有助于抑制晶粒生长,从而形成更细小的晶粒^[29]。另一方面高前进速度减低了连接区应变率,应变率降低,导致细小晶粒的形成^[30]。

3.3.3 连接区微观组织 EBSD 分析

图 3-7(a)-(c)分别为 EBSD 图像中的母材、连接区中心、前进侧热机影响区的晶粒形貌与晶粒尺寸。且 EBSD 图像中大角度晶界晶粒(大于 10° 晶界)用黑色连接,图像中小晶界晶粒用白色连接^[31]。各区域的晶界分布如图 3-8 所示。母材晶粒呈现典型的轧制态结构,按照等效圆直径法得到晶粒尺寸平均为 72.9μm。图 3-8 中母材大角度晶界为 56.2%,小角度晶界为 43.8%。铝合金板材在轧制过程中,晶粒的取向性转动而形成板织构,使得母材区含有较高比例的小角度晶界^[32]。图 3-7(b)为连接区中心,晶粒尺寸平均为 21.8μm。该区域金属材料发生剧

烈塑性变形，同时大角度晶界由母材区的 56.2% 上升到 72%。出现主要原因连接区中心发生连续动态再结晶过程中，因位错的积累和重组引起晶界取向角增大。同时大量位错的积累导致小角度晶界组分增加^[33,34]。图 3-7(c) 为前进侧热机影响区，可以看出连接区中心与母材区有明显的分界线，该区域受到热循环作用，晶粒发生粗化，晶粒尺寸平均为 45.8 μm 。该区域发生动态再结晶过程不充分，部分晶粒未发生动态结晶，使得大量错位堆积，导致晶界取向角小，由连接区中心的 27% 上升到 39.5%。小角度晶界晶粒占比高，产生较大的残余应力，减低连接区力学性能^[35]。

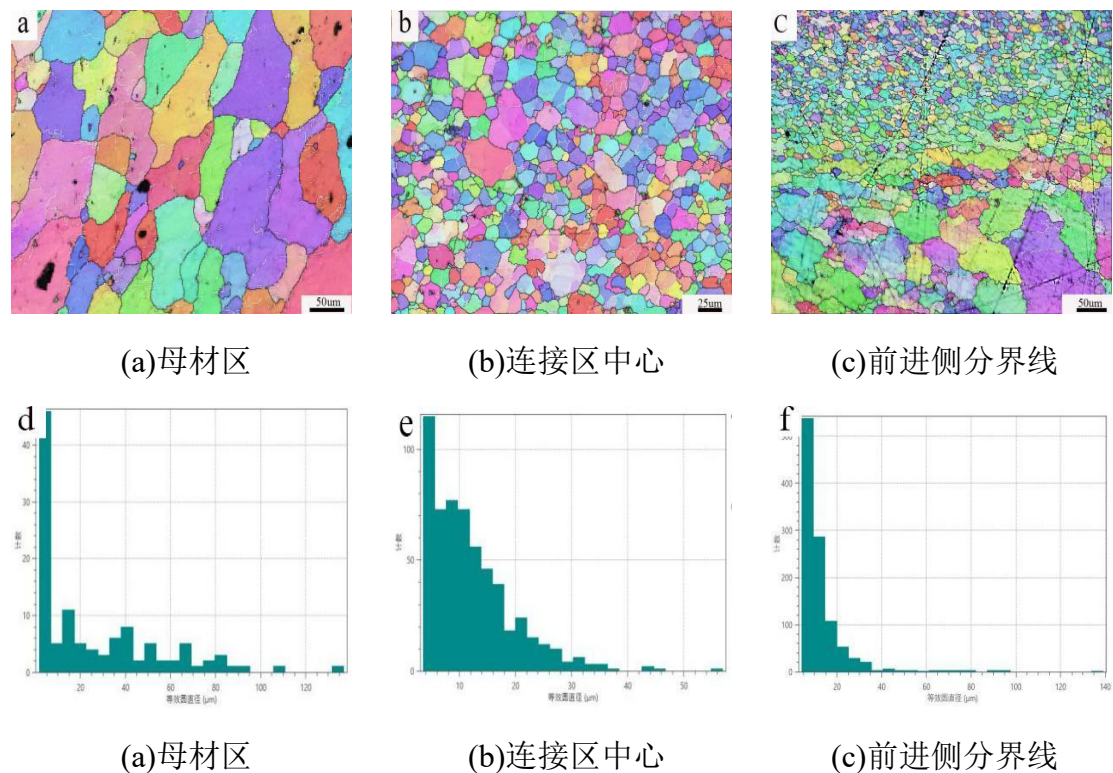


图 3-7 连接区晶粒取向图和晶粒尺寸图

Fig. 3-7 grain orientation diagram and grain size diagram of the connection zone

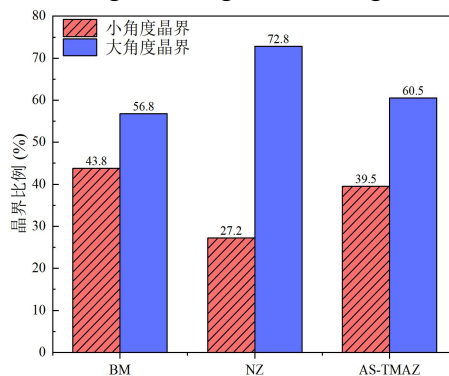


图 3-8 连接区各区域晶界分布

Fig. 3-8 The distribution of grain boundaries in each region of the connection zone

3.4 本章小结

本章主要分析了搅拌摩擦连接工艺参数对 2mm~8mm 铝合金连接区宏观形貌和微观组织的影响,具体研究了搅拌头旋转速度和搅拌头前进速度对连接区微观组织演化规律的影响,并使用 EBSD 对 FSJ 连接区各部分微观结构进行观察。得出以下结论:

(1) 搅拌摩擦连接工艺参数对连接区表面质量影响显著。在不同工艺参数下,不同厚度铝合金连接区表面成形好,无明显裂纹沟槽等缺陷。随着搅拌头旋转速度增加或搅拌头前进速度降低,连接区热输入过高,表面飞边严重且减低了表面质量。在低热输入下,金属塑化不充分,连接区流动性不均匀,表面质量降低。

(2) 连接区中心发生动态再结晶,晶粒细化。FSJ 工艺参数对连接区中心晶粒尺寸影响显著。随着搅拌头旋转速度的提高,连接区中心尺寸呈现先减小后增大趋势。随着搅拌头前进速度提高,连接区中心尺寸呈现减小趋势。

(3) EBSD 图像中对连接区母材、连接区中心、前进侧热机影响区进行晶粒取向分析,母材区的小角度晶界占比高,由于晶粒的取向性转动而形成板织构。连接区中心因位错的积累和重组引起晶界取向角增大。同时大量位错的积累导致小角度晶界组分增加。前进侧热影响区动态再结晶过程不充分,部分晶粒未发生动态结晶,使得大量错位堆积,导致晶界取向角小,由连接区中心的 27%上升到 39.5%。

第 4 章 不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区力学性能分析

4.1 引言

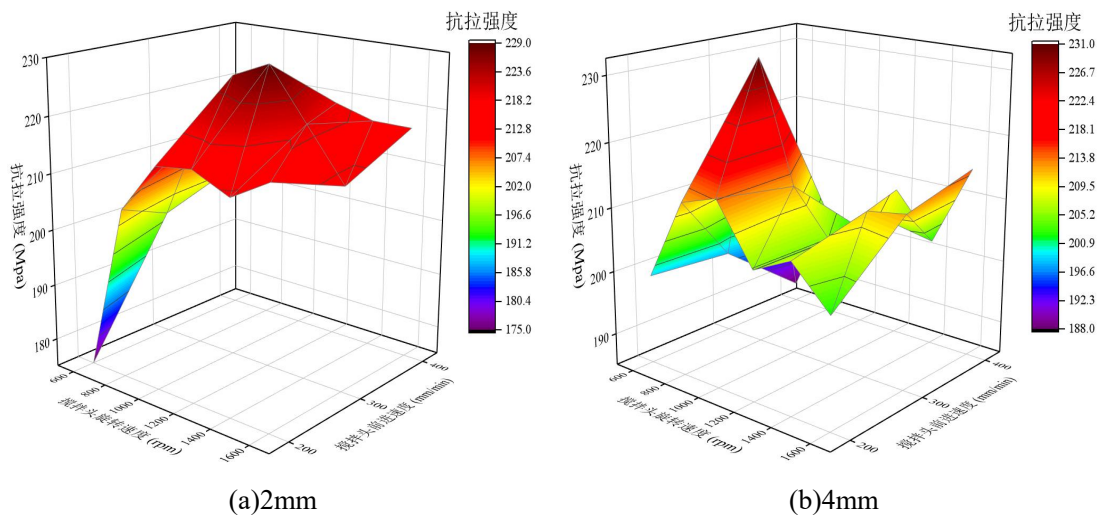
铝合金连接区的力学性能是衡量连接区质量的重要指标。连接区的力学性能的试验有抗拉强度测试、显微硬度测试、冲击强度测试。本章研究搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度和板材厚度对连接区力学性能的影响，

4.2 不同厚度铝合金连接区拉伸性能分析

拉伸性能是评估搅拌摩擦连接区质量和强度的关键信息。优良的拉伸性能直接影响连接结构的整体强度和稳定性。因此连接区的拉伸性能是确保结构和产品在实际应用中表现出高性能、安全性和可靠性的关键因素。本节分析了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度和板材厚度对连接区拉伸性能的影响。

4.2.1 不同厚度铝合金连接区拉伸性能

本文通过对 2mm、4mm、6mm 和 8mm 铝合金板材进行搅拌摩擦连接，图 4-1 为不同厚度铝合金在搅拌头旋转速度为 600~1600rpm 和搅拌头前进速度为 200~400mm/min 下整体拉伸性能变化图。通过拉伸性能图可以获得不同厚度最高、最低抗拉强度如表 4-1 所示。



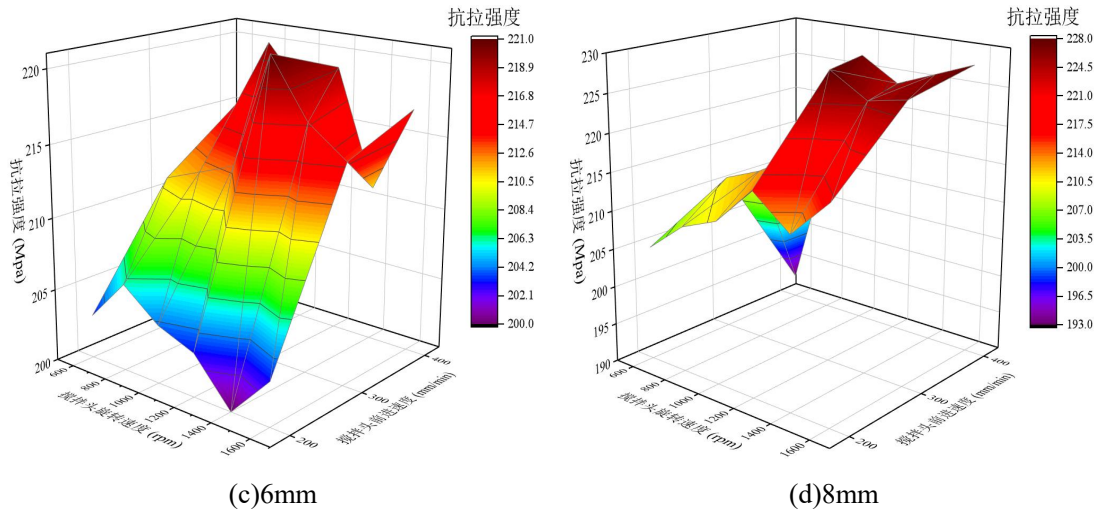


图 4-1 不同厚度连接区抗拉强度变化图

Fig. 4-1 Tensile strength variation diagram of different thickness connection zone

表 4-1 不同厚度连接区最高与最低抗拉强度

Table 4-1 The highest and lowest tensile strength of different thickness connection zone

板材厚度(mm)	具体参数	抗拉强度(MPa)	接头系数(%)
2	1200rpm, 300mm/min	229	76.0
	600rpm, 200mm/min	176	59.0
4	800rpm, 300mm/min	231	75.7
	600rpm, 400mm/min	188	61.6
6	1000rpm, 400mm/min	221	71.7
	1400rpm, 200mm/min	200	64.9
8	1200rpm, 400mm/min	228	73.3
	600rpm, 400mm/min	193	62.0

从图 4-1 可以观察出不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区在不同工艺参数(搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度)下的抗拉强度变化趋势。通过观察可以得到 4 个厚度铝合金呈现中间参数拉伸性能高、两边参数拉伸性能降低的趋势。其主要原因在于不同的工艺参数导致连接区的热输入不同, 合适的热输入使得连接区塑化状态充分, 连接区成形较好, 提高了连接区的拉伸性能。通过表 4-1 还可以看出 4 个厚度铝合金在工艺参数范围内最佳抗拉强度均达到了母材 71%。随着板材厚度增加, 连接区最佳抗拉强度呈现下降趋势。其主要原因在于板材厚度越厚, 连接区受热分布不均匀, 厚板根部塑化状态不完全, 连接区拉伸性能降低。通过表 4-1 可以发现最低抗拉强度均发生在极限工艺参数(高旋转速度或低旋转速度)下, 且不同厚度铝合金 FSJ 连接区最低接头系数达到母材 59%, 均比熔化焊接接头拉伸性能好^[37](约母材 55%)。

4.2.2 搅拌头旋转速度对连接区拉伸性能的影响

搅拌头旋转速度对连接区拉伸性能影响显著。搅拌头旋转速度直接影响连接过程中的热输入和材料流动，进而影响连接区的微观结构和最终的拉伸性能。本节分析了搅拌头前进速度恒定在 300mm/min 时，搅拌头旋转速度为 600~1600rpm 下连接区拉伸性能的影响的规律。图 4-2 为不同搅拌头旋转速度下连接区抗拉强度变化。

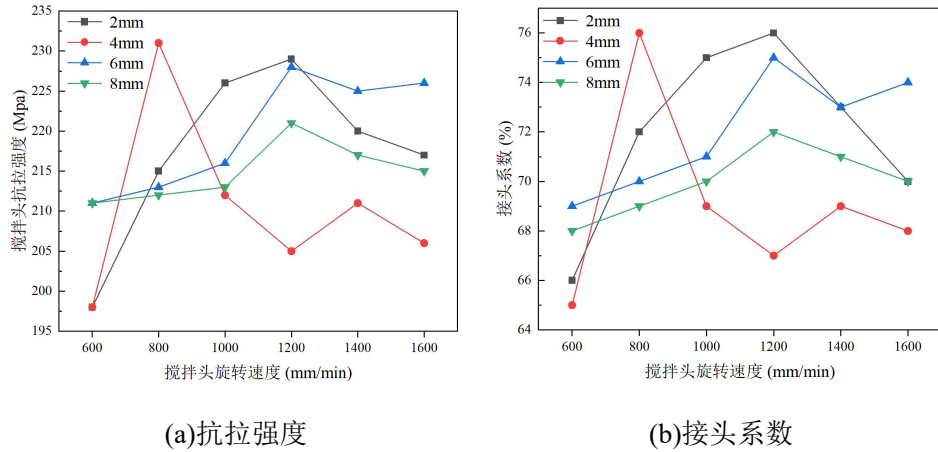


图 4-2 不同搅拌头旋转速度下抗拉强度的变化

Fig.4-2 The change of tensile strength under different rotation speed of stirring head

从图 4-2(a)~(b)可以看出。不同厚度铝合金连接区随着搅拌头旋转速度的增加，抗拉强度和接头系数(即试样的抗拉强度与母材抗拉强度百分比)先增大后减小。板材厚度为 2mm、6mm、8mm 在搅拌头头旋转速度为 1200rpm 时抗拉强度最高，均达到了母材 72%。板材厚度为 4mm 在搅拌头旋转速度为 800rpm 时抗拉强度最高，达到母材 76%。4 个厚度铝合金连接区抗拉强度在搅拌头旋转速度 600rpm 时，抗拉强度最低。因为低旋转速度意味着较低的热输入，导致了连接区域未能充分达到塑化状态^[38]。增加了连接缺陷如孔洞、未焊透的风险。这些缺陷将会降低连接区的拉伸强度。且低旋转速度降低了连接区的流动性，降低了连接区的拉伸性能。在搅拌头旋转 1600rpm 时，连接区抗拉强度降低。因为高旋转速度提高了连接区热输入，在较高热输入的影响下，连接区受热循环作用明显，热影响区的晶粒发生粗化，该区域更易发生软化作用，拉伸试样断裂位置常出现该区域^[39]。通过上述分析认为搅拌头旋转速度在一定范围增加时，热输入导致连接区材料达到合适的塑化状态，提高了连接接头质量，不易出现隧道、孔洞缺陷。当搅拌头旋转速度超过某一临界值后，连接区长期处于高温状态下，连接区受热

循环作用时间长，连接区接头软化作用明显，降低了连接试样的拉伸性能。

4.2.3 搅拌头前进速度对连接区拉伸性能的影响

搅拌头前进速度对 FSJ 连接区的拉伸性能影响显著。它通过影响热输入、材料流动和冷却速率，直接影响连接区的拉伸性能。本节为了探讨搅拌头前进速度对连接区拉伸性能的影响。分析搅拌头旋转速度恒定在 1200rpm 时，搅拌头前进速度为 200~300mm/min 下连接区拉伸性能的影响规律。如图 4-3 所示为不同搅拌头前进速度下连接区抗拉强度变化。

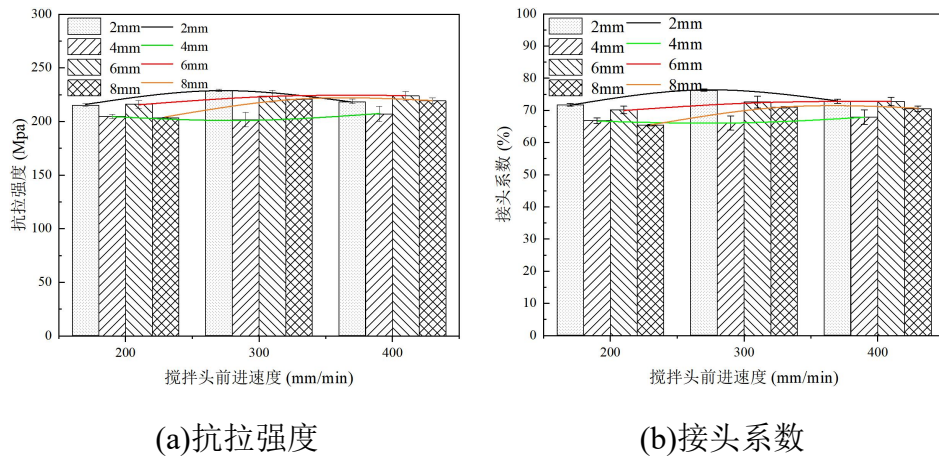


图 4-3 不同搅拌头前进速度下拉伸性能

Fig.4-3 Tensile properties under different forward speeds of stirring head

从图 4-3(a)~(b)可以看出，随着搅拌头前进速度从 200mm/min 增加到 400mm/min 时，厚度为 2mm、6mm 和 8mm 的 6061 铝合金连接区的抗拉强度和接头系数均有先增大后减小的趋势。在搅拌头前进速度为 300mm/min 时抗拉强度和接头系数达到最大值。当搅拌头前进速度为 200mm/min 时，导致了连接区热输入增加，且板材冷却速率较慢，热循环作用明显，导致连接区晶粒粗化，从而降低连接区的拉伸强度和延展性^[41]。在搅拌头前进速度为 400mm/min 时，连接区材料流动性较差，可能导致连接区出现孔洞、隧道等缺陷，进而降低了连接区拉伸性能^[42]。通过上述可以分析搅拌头前进速度会影响不同厚度 6061 搅拌摩擦连接的拉伸性能。搅拌头前进速度影响了连接区热输入和金属流动。搅拌头前进速度持续增大时，连接区的热输入持续减少，金属的流动性变差，无法形成性能良好的连接区。

4.2.4 板材厚度对连接区拉伸性能的影响

为了探讨在固定参数下板材厚度对连接区拉伸性能的影响规律。分析了高搅

拌头旋转速度(1600rpm)和低搅拌头旋转速度(600rpm)下板材厚度对连接区拉伸性能的影响。下图 4-4 为搅拌头旋转速度分别为 1600rpm 和 600rpm、搅拌头前进速度 200mm/min 下不同厚度铝合金板材连接区拉伸性能变化图。

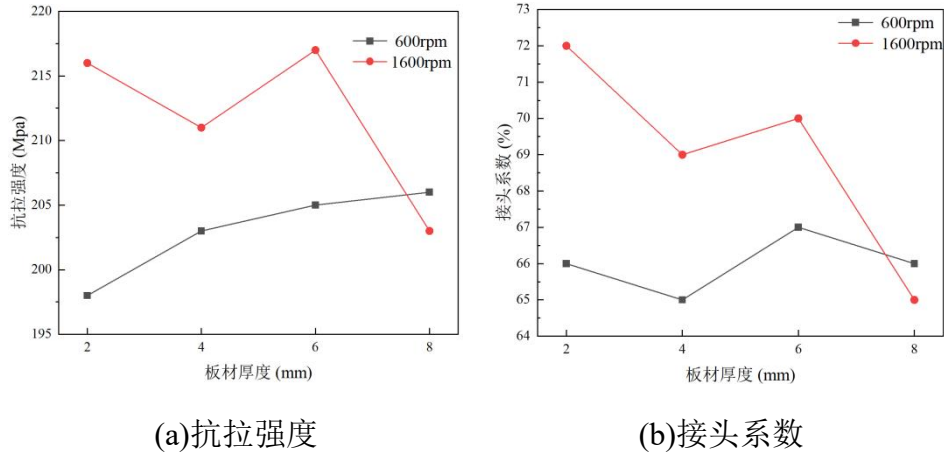


图 4-4 不同厚度下拉伸性能变化图

Fig.4-4 The change of tensile properties under different thickness

从图 4-4(a)~(b)可以看出在搅拌头旋转速度恒定在 600rpm 时,随着板厚的增加,抗拉强度和接头系数一直增加。由于低旋转速度(600rpm)热输入不足,板材越薄,散热性越好,金属吸收的热量未达到材料塑化状态,金属材料流动性差,降低了连接区拉伸性能。当搅拌头旋转速度恒定在 1600rpm 时,随着板厚的增加,抗拉强度和接头系数不断减小,接头系数从 72%下降到 65%。高旋转速度(1600rpm)热输入变多,当板材越薄时,板材底部热输入和机械搅拌头作用越充分,连接区晶粒细小,板材连接区拉伸性能好^[43]。反之,当板材越厚时,连接过程中板材底部热输入和搅拌头作用不充分,连接区晶粒发生生长粗化,搅拌头热循环明显,接头软化作用明显,降低了连接区拉伸性能^[44]。因此可以得出,在恒定的连接工艺参数下,6061 铝合金板材厚度越厚,搅拌摩擦连接工艺窗口越窄,板材厚度会影响连接区的拉伸性能。

4.2.5 拉伸断口宏观形貌

拉伸断裂断口宏观形貌不仅提供了搅拌摩擦连接区拉伸试样在拉伸过程中的直观信息,还是评估连接区拉伸性能、连接区缺陷的分析的重要依据。本节分析了 FSJ 连接区拉伸试样的断裂的宏观形貌。下图 4-2-4 为搅拌头旋转速度 1200rpm 时,搅拌头前进速度为 200~400mm/min 下不同厚度连接区拉伸断口宏观形貌。

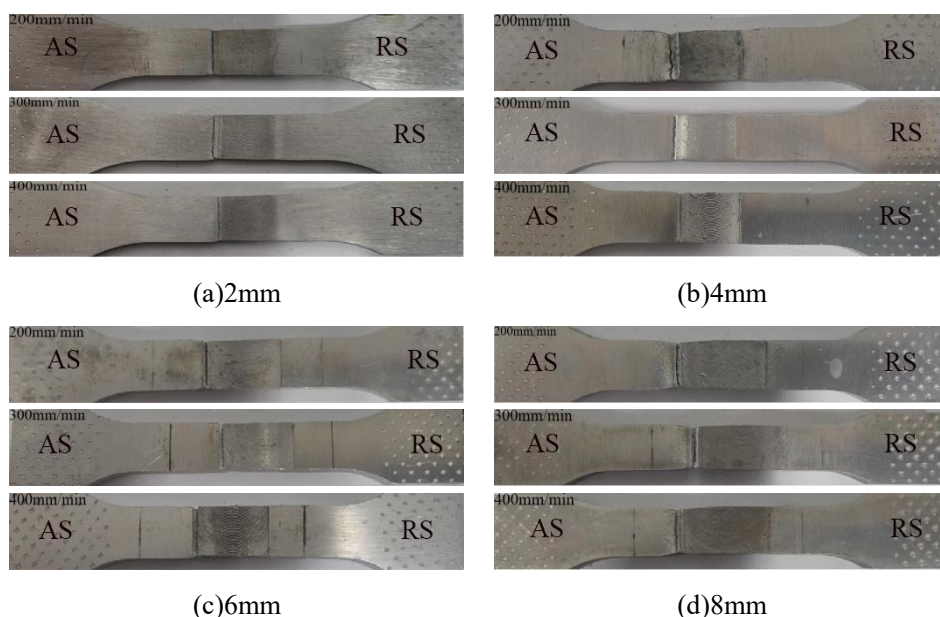


图 4-5 不同厚度拉伸断口宏观形貌

Fig.4-5 Macroscopic morphology of tensile fracture with different thickness

从图 4-5 中可以看出，不同厚度 6061 铝合金在搅拌头旋转速度恒定为 1200rpm、搅拌头前进速度为 200~400mm/min 下连接区拉伸断裂位置均发生在前进侧(AS)连接区中心与母材区之间。从图 3-7(c)EBSD 图像中可以发现连接区中心过渡到母材区，晶粒发生明显粗化，形成粗大晶粒状，从而降低该区域的强度和韧性。且该区域未发生完全动态再结晶，导致残余应力较高，增加材料断裂风险^[45]。试验发现搅拌摩擦连接过程中前进侧温度高于后退侧，即前进侧受到热循环作用明显，接头软化作用明显^[45,46]，因此拉伸试样断裂位置发生在前进侧。搅拌摩擦连接过程中前进侧的塑化金属随着搅拌头搅拌作用带到返回侧，前进侧易发生孔洞等缺陷^[47]，使得该区域的强度和韧性降低。从图中发现拉伸试样均出现一定程度紧缩现象，即拉伸过程中发生明显的塑性变形。

4.2.6 连接区拉伸断口 SEM 图像

为了进一步探讨拉伸试样断裂机理的规律，使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察拉伸试样断口的微观图像。通过对 SEM 图像的分析，可以深入了解连接区拉伸断口微观特性，这对连接区拉伸性能的改善具有重要意义。图 4-6 为不同厚度 6061 铝合金母材和搅拌头旋转速度为 1200rpm、搅拌头前进速度为 300mm/min 下连接区拉伸断口 SEM 图像。

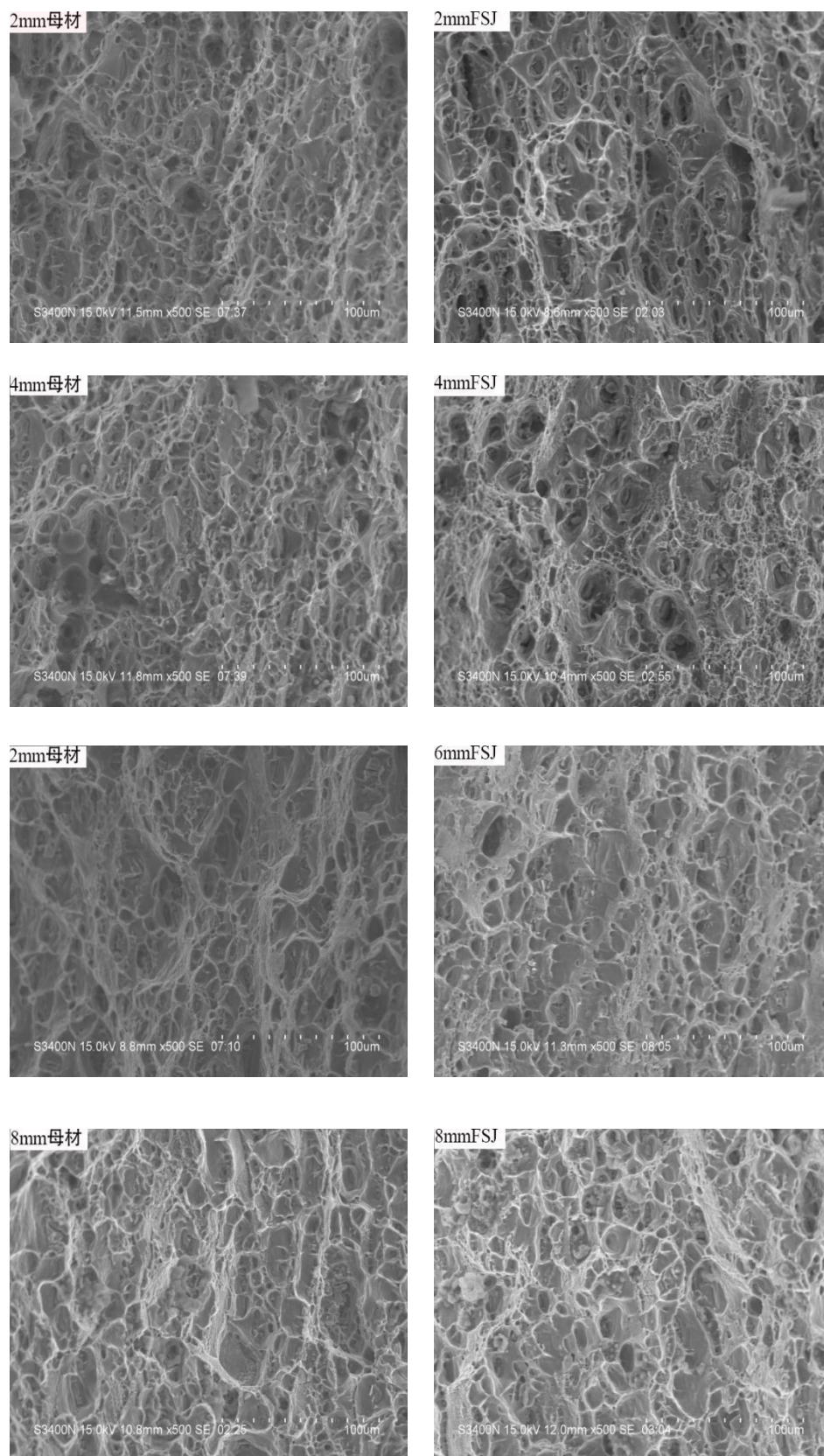


图 4-6 不同厚度拉伸断口 SEM 图像

Fig.4-6 SEM images of tensile fracture with different thickness

从图 4-6 中可以看出, 2mm~8mm 母材拉伸试样和连接区拉伸试样均出现了韧窝形状, 这意味着 6061 铝合金在拉伸过程中发生了塑性变化。不同厚度母材试样表面呈现细小的韧窝分布, 且韧窝尺寸均匀。同时观察到试样表面出现较为平滑的解理面, 周围分布白色的撕裂棱。即说明 6061 铝合金拉伸试样断裂模式为韧性断裂和脆性断裂混合模式^[48]。从不同厚度 FSJ 拉伸试样 SEM 图像中, 可以观察到表面存在大量韧窝, 韧窝尺寸不均匀且大韧窝四周存在大量小韧窝, 拉伸试样表面出现较大的解理台阶和解理面, 即 FSJ 试样在拉伸过程中出现脆性断裂。通过对搅拌摩擦连接试样断口进行能谱(EDS)分析如图 4-7 所示, 搅拌摩擦连接拉伸断口中第二相粒子 Mg_2Si 溶解析出和连接区脆性断裂减低连接区拉伸性能。

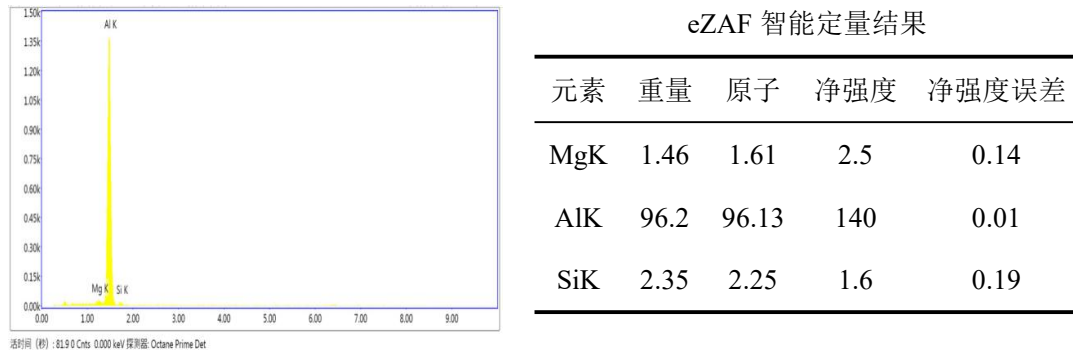


图 4-7 拉伸试样断口能谱分析

Fig.4-7 Energy spectrum analysis of tensile specimen fracture

4.3 连接区显微硬度分析

连接区显微硬度是评估连接区微观结构力学性能的重要方法。其也是评估材料抵抗局部形变能力的重要指标。铝合金连接区分成四个区域, 不同区域的显微硬度可以反映材料的微观结构。因此显微硬度测试可以深入理解材料的性能, 并有助于识别连接缺陷或优化连接参数。本节通过分析搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度对连接区显微硬度的影响。

4.3.1 搅拌头旋转速度对连接区显微硬度的影响

为了探讨搅拌头旋转速度对连接区显微硬度的影响。保持搅拌头前进速度 300mm/min 时, 分析搅拌头旋转速度在 600~1600rpm 范围内变化时对连接区显微硬度变化规律。图 4-8 是 6mm 厚 6061 铝合金在不同搅拌头旋转速度下的显微硬度分布曲线。

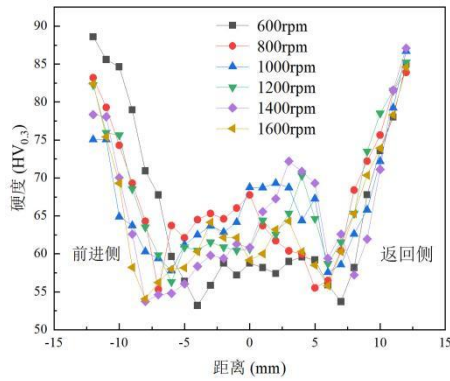


图 4-8 不同旋转速度下连接区显微硬度变化图

Fig.4-8 The change of microhardness in the joint zone at different rotation speeds

从图 4-8 可以看出,不同搅拌头旋转速度下连接区显微硬度分布呈“W”型。以连接区为中心线,两侧母材硬度值约 85HV,母材区到达前进侧热机影响区,硬度值达到整个连接区最低,约 55HV,该区域由于受到摩擦热作用,晶粒发生生长粗化,前进侧连接温度高于返回侧,受到热循环作用更明显,更容易出现软化现象,因此前进侧热影响区硬度值低于后退侧热影响区。连接区中心受到摩擦热作用和搅拌头搅拌作用,晶粒发生细化,生成细小等轴晶状,根据 Hall-Petch 公式,连接区中心晶粒尺寸 d 越小,细晶强化,硬度越高^[49]。当搅拌头旋转速度在 800~1200rpm 范围时,连接区中心硬度值整体较高。因为搅拌头旋转速度适当时,连接热输入充足,塑性金属流动充分,接缝成形良好,NZ 晶粒均匀细化,接头强度提高,硬度波动范围平缓。当拌头旋转速度为 600rpm 时,连接区中心硬度有所下降,因为搅拌头旋转速度低,热输入低导致接缝金属塑化程度不足,易产生孔洞、隧道等缺陷,这些缺陷会减低连接区的显微硬度。低旋转速度将减少材料流动性导致了连接区显微硬度的不均匀分布。当搅拌头旋转速度在 1600rpm 时,连接区中心硬度和热影响区硬度降低,因为高搅拌头旋转速度导致连接区热输入增加,热循环作用明显,材料过度软化,硬度下降。高热输入会导致连接区中心晶粒发生粗化,根据 Hall-Petch 关系,晶粒粗化通常会降低材料的硬度^[50]。高热输入可能导致连接区域和母材之间的温度梯度增大,增加了残余应力,从而降低材料的显微硬度。因此选择合适的搅拌头旋转速度将会提高连接区显微硬度。

4.3.2 搅拌头前进速度对连接区显微硬度的影响

搅拌头前进速度对连接区的显微硬度影响显著,主要是因为搅拌头前进速度

影响了连接过程中的热输入和材料的流动性，从而改善了连接区的微观结构。为了探讨搅拌头前进速度对连接区中心显微硬度的影响。保持搅拌头旋转速度 1200rpm，分析搅拌头前进速度在 200~400mm/min 范围内变化时对连接区显微硬度变化规律。图 4-9 是 6mm 厚 6061 铝合金在不同搅拌头前进速度下的显微硬度分布曲线。

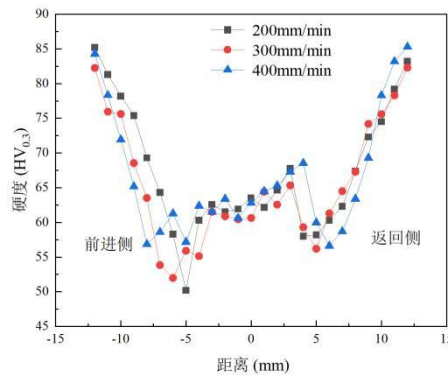


图 4-9 不同搅拌头旋转速度显微硬度变化图

Fig.4-9 Microhardness change diagram of different stirring head rotation speed

从图 4-9 可以看出，在搅拌头前进速度为 200mm/min~400mm/min 下连接区横截面显微硬度呈现“W”型。以连接区中心为对称线，两边的母材硬度大约为 88HV。从母材过渡到前进侧的热机械影响区时，硬度值下降到连接区的最低点，大约为 51HV。这一区域因摩擦产生的热量而导致晶粒增大和粗化，特别是在前进侧，由于温度相对较高并且受热循环影响更为显著，容易发生软化现象，因此其硬度值低于返回侧的热影响区。在连接区的中心，由于摩擦热和搅拌头的搅拌作用，晶粒被细化，形成了细小的等轴晶结构。根据 Hall-Petch 公式，连接区中心的晶粒尺寸 d 越小，材料会因细晶强化而显示出更高的硬度。在搅拌头前进速度为 200mm/min 时，前进侧热机械影响区硬度值达到最低，约 50HV，且连接区中心整体硬度较低。因为在低搅拌头前进速度下搅拌头停留时间更长，连接区受到的热输入更多。较高的热输入导致连接区晶粒发生粗化，根据 Hall-Petch 关系，晶粒粗化导致显微硬度降低。低进给速度下热影响区受到热循环作用明显，该区域发生软化作用明显，硬度值较低。当搅拌头前进速度为 400mm/min 时，连接区中心硬度最高，约 75HV。高搅拌头前进速度下连接区热输入降低，抑制连接区中心晶粒的生长，从而促使晶粒细化。根据 Hall-Petch 关系，晶粒细化导致材料硬度提高^[51]。高搅拌头前进速度意味着连接完成后板材能够更快冷却，快速冷

却通常有助于提高连接区的硬度^[52]。通过上述分析可以发现搅拌头前进速度对连接区的热输入存在很大影响，进而对连接区微观结构改变，同时业影响到连接区显微硬度。

4.3.3 板材厚度对连接区连接区显微硬度的影响

为了进一步分析在固定工艺参数下板材厚度对连接区显微硬度的影响，探讨了搅拌头旋转速度 1000rpm、前进速度 300mm/min 时不同厚度 6061 铝合金在连接区显微硬度变化。下图 4-10 为不同厚度 6061 铝合金在恒定工艺参数下显微硬度变化图。

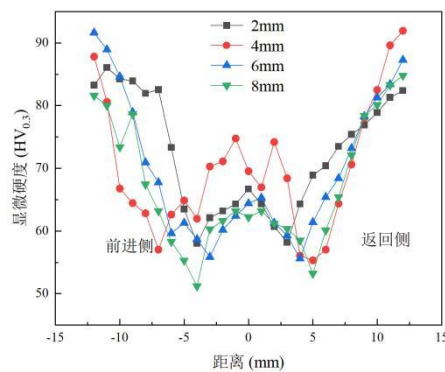


图 4-10 不同厚度显微硬度变化图

Fig.4-10 The change of microhardness with different thickness

从图 4-10 中可以看出在，不同厚度 6061 铝合金 FSJ 后连接区显微硬度依然呈现“W”型。在不同厚度中两侧母材区硬度值相同，从前进测到返回侧，不同厚度在连接区前进侧热影响区均达到最低值。且在 8mm 时前进侧热影响区的硬度最低，约 51HV。从热机影响区过渡到连接区中心，不同厚度连接区中心显微硬度值均得到了提高。在 8mm 时连接区中心整体硬度值较低。因为在固定的工艺参数下板材的厚度会影响的连接过程中的热分布。8mm 厚板材因其较大的体积和质量，热量吸收大且具有较慢的冷却速率，导致连接区晶粒发生粗化，从而降低硬度^[52]。8mm 板材连接区热循环作用明显，热影响区软化现象明显。在 4mm 时连接区中心整体硬度值最高且较为均匀。因为 4mm 板材在固定参数下在连接区有较快的热传递和冷却速率，热输入较少，抑制了连接区晶粒生长。FSJ 连接过程中，材料流动更加均匀，这有助于形成更加均匀和致密的连接区域，进而提高硬度。因此板材的厚度通过影响热分布、晶粒结构等因素来间接影响了 FSJ 连接区的显微硬度。

4.4 不同厚度铝合金连接区冲击性能分析

冲击韧性是材料在受到突然冲击负荷时抵抗断裂能力的度量,它是衡量材料在快速加载条件下性能的一个重要参数,有利于评估材料在高速撞击或突然负荷条件下的可靠性和安全性。因此本节对 FSJ 连接区进行冲击试验,冲击试样切口取在连接区中心。分别分析了搅拌头旋转速度和搅拌头前进速度对连接区冲击性能的影响。

4.4.1 搅拌头旋转速度对连接区冲击性能的影响

为了探讨搅拌头旋转速度对连接区冲击性能影响规律。下图 4-11 为 6mm 铝合金在搅拌头前进速度恒定在 300mm/min 时搅拌头旋转速度为 600~1600rpm 下连接区冲击性能图。(实验测试进行三次取平均值)

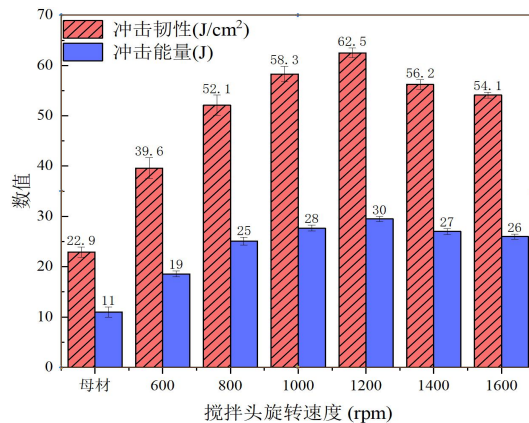


图 4-11 不同搅拌头旋转速度下冲击性能

Fig.4-11 Impact performance under different rotation speed of stirring head

从图 4-11 可以看出,经过搅拌摩擦连接后连接区冲击韧性均高于母材。因为连接区中心受到搅拌头搅拌作用,晶粒再结晶,生成细小等轴晶粒状。根据断裂理论,晶粒细小则裂纹不易拓展,裂纹扩展要多次改变方向,则消耗更多冲击能量^[53]。根据 Hall-Petch 关系,细晶细化通常能提高连接区的强度和韧性。随着搅拌头旋转速度的增加,FSJ 连接区冲击韧性有先增大后减小的趋势。在搅拌头旋转速度 600rpm 时,连接区冲击韧性最低,为 39.6J/cm²,达到母材的 172%。低旋转速度导致热输入不足,使得材料未能充分塑性变形和混合,导致连接区出现缺陷,如孔洞或未焊透,将降低连接区冲击性能。在搅拌头旋转速度 1200rpm 时,连接区冲击韧性值最高,为 62.5J/cm²,达到了 272%。合适的的搅拌头旋转速度热输入适宜,连接区流动性好,晶粒细化且均匀,有助于提高连接区冲击性能。在搅拌头旋转速度 1600rpm 时,连接区热输入增加,连接区中心晶粒发生粗化,

从而降低了连接区的冲击韧性值^[54]。因此搅拌头旋转速度将会直接影响连接区热输入和流动性，进而间接影响连接区微观结构，选择合适的搅拌头旋转速度有利于提高连接区冲击性能。

4.4.2 搅拌头前进速度对连接区冲击性能的影响

搅拌头前进速度对连接区冲击性能影响显著，搅拌头前进速度的快慢直接影响连接过程中的热输入和冷却速率，进而改善了连接区的冲击性能。下图 4-10 为不同厚度铝合金在搅拌头旋转速度为 1200rpm 下，搅拌头前进速度 200~400mm/min 时连接区冲击性能图。(实验测试进行三次取平均值)。

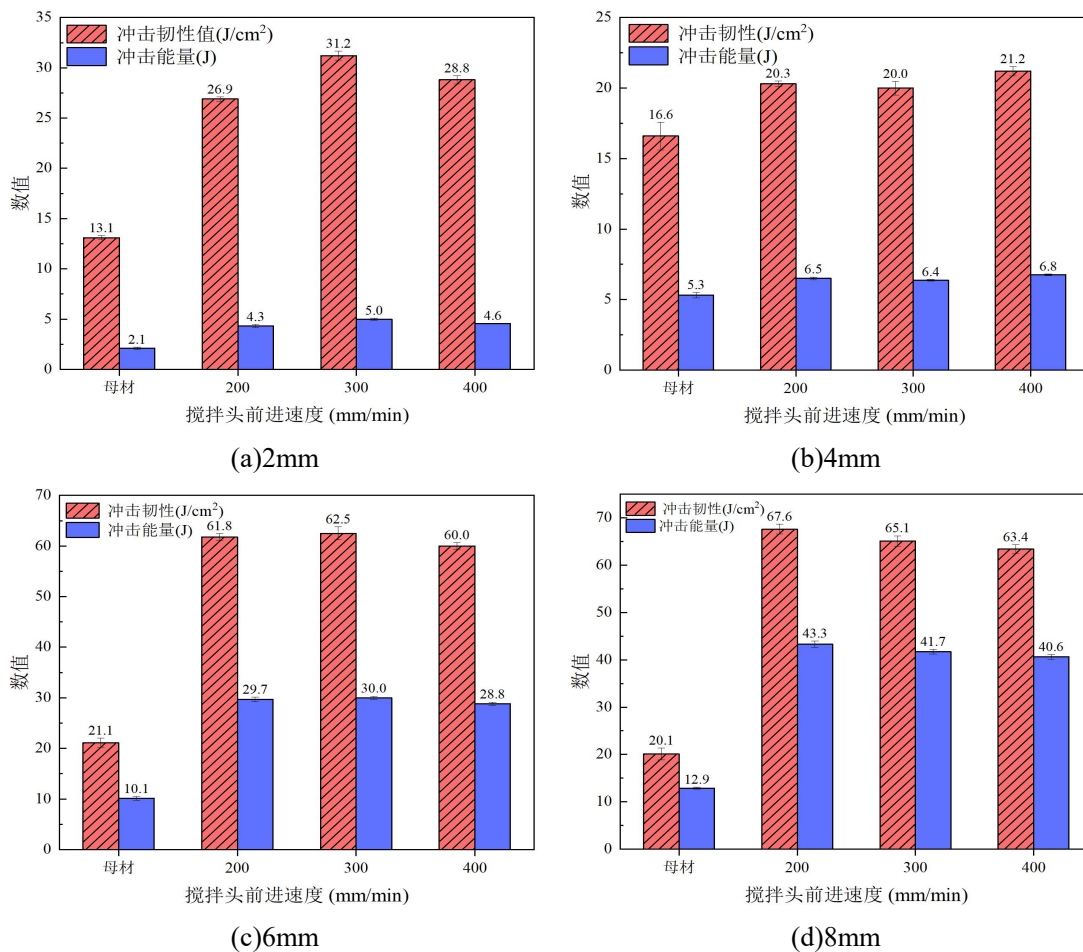


图 4-12 不同厚度铝合金在不同前进速度下冲击性能

Fig. 4-12 Impact properties of aluminum alloys with different thicknesses at different speeds

从图 4-12 可以看出，2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚铝合金板材搅拌头前进速度在 200mm/min~400mm/min 下连接区冲击韧性均高于母材。主要原因在于连接区中心晶粒发生再结晶，呈现细小等轴晶粒状，且根据断裂理论，晶粒细小则裂纹不易拓展，裂纹扩展要多次改变方向，则消耗更多冲击能量。在 2mm 和 6mm 厚铝合金冲击性能中，随着搅拌头前进速度增加，连接区冲击韧性有先增大后减

少的趋势。因为在低搅拌头前进速度下，连接区热输入增加且散热速率降低，连接区中心晶粒生长粗化，降低了连接区的冲击性能^[55]。在高搅拌头前进速度下，连接区流动性能差，连接区域易出现孔洞等内部缺陷，缺陷将会降低连接区冲击性能。随着板材厚度的增加，连接区冲击韧性和冲击能量逐渐提高，8mm 厚铝合金连接区在前进速度 200mm/min 时冲击韧性值最高，为 67.6J/cm²，达到母材 336.3%。原因在于冲击吸收能量与试样的横截面积呈正相关，试样厚度越小，导致试样产生的裂纹拓展能量越小，使得冲击吸收能量减小^[55]。

4.4.3 冲击试样断裂宏观形貌

为了进一步分析冲击试样断裂机理，通过对冲击断口的宏观形貌进行探究，表面宏观形貌可以反映冲击材料的性质以及对断裂过程中的理解。下图 4-13 为 8mm 厚铝合金母材和搅拌头旋转速度为 1200rpm、前进速度为 300mm/min 下搅拌摩擦连接区冲击试样断口宏观型貌图。

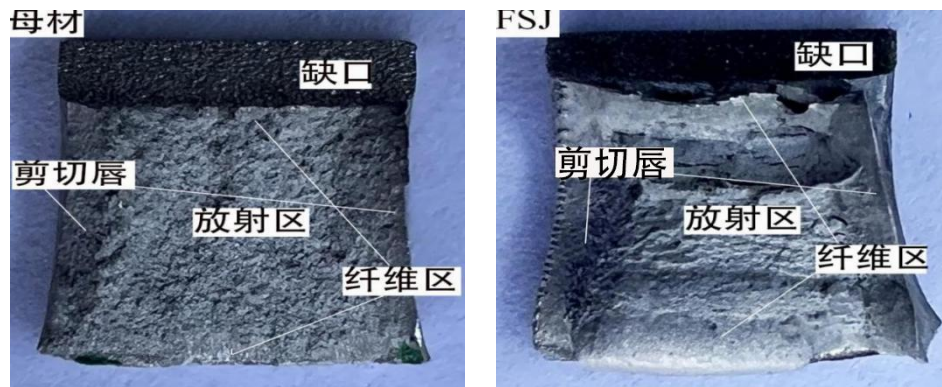


图 4-13 冲击断口宏观形貌

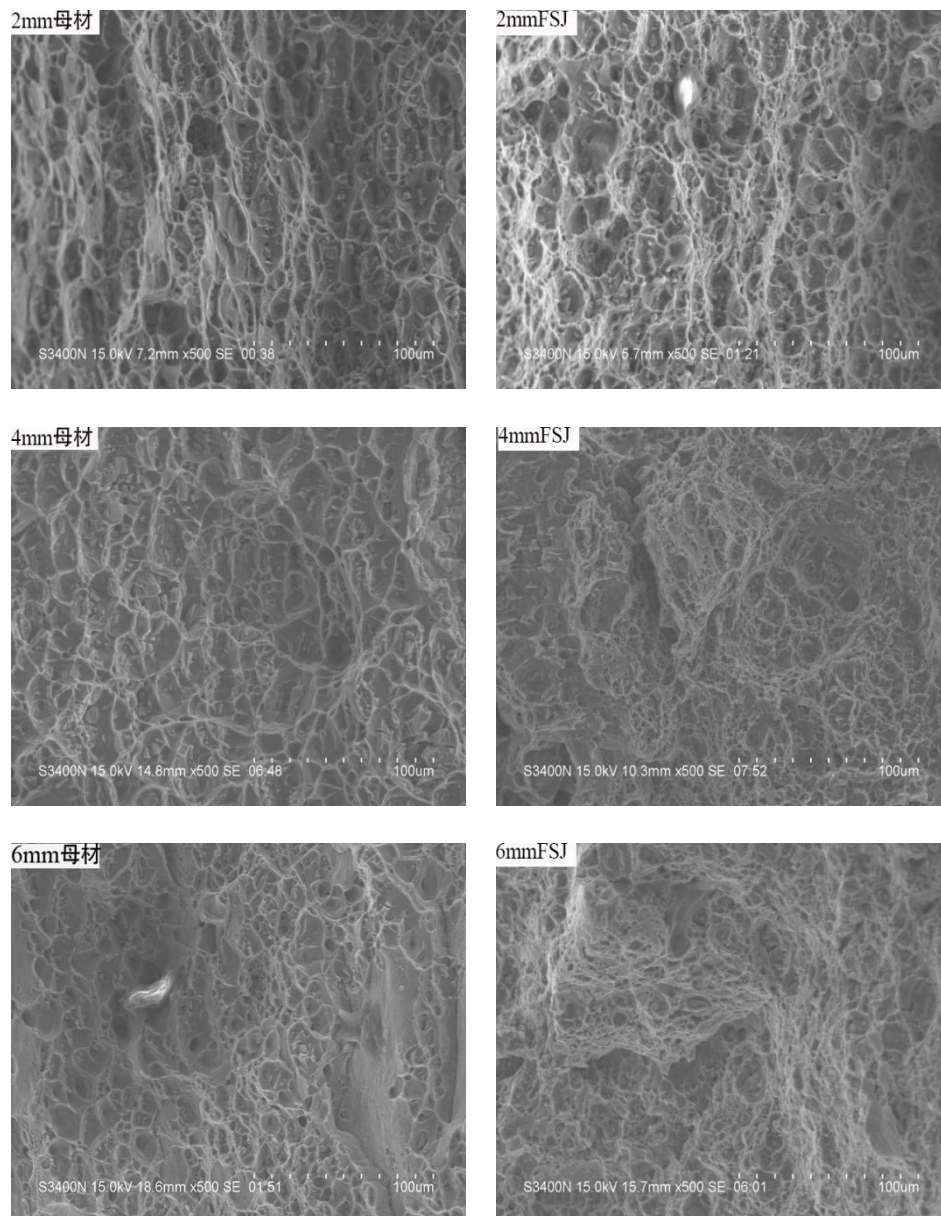
Fig. 4-13 Macro-morphology of impact fracture

从图 4-13 可以观察到，冲击断口呈现典型的三个区域为剪切唇、放射区、纤维区^[56]。剪切唇位于断口的边缘呈现明显的剪切变形特征。经过搅拌摩擦连接后冲击试样断裂前经历了显著的塑性变形，即该区域特征表现较为明显。放射区位于断口的中心区域，通常呈现出放射状的图案。这些图案是由于裂纹在材料内部传播产生的，放射区通常表现了脆性断裂的特征，其中裂纹沿着最大正应力方向迅速扩展。纤维区位于接近中心的位置，纤维区表明了材料在断裂过程中经历了较多的塑性变形，这个区域通常包含许多小的、拉伸型的凹坑（韧窝），表明材料在断裂前的延展性。通过对比母材和 FSJ 冲击试样 3 个区域，可以观察到母材在纤维区断口光滑且平坦，FSJ 冲击试样在断裂前经历剧烈的塑性变形，表

面产生较大的拉伸型凹坑，说明 FSJ 试样具有较强的延展性。通过上述分析母材和 FSJ 冲击试样断口表面形貌有较大的差异，从宏观表面现象解释了 FSJ 后连接区冲击性能高于母材的原因。

4.4.4 冲击试样断口微观形貌

为了进一步分析冲击试样断裂机理的规律，使用扫描电子显微镜（SEM）观察冲击断口的微观图像。通过对 SEM 图像的分析，可以深入了解连接区冲击断口的微观特性，这对改善连接区冲击性能具有重要意义。图 4-14 为不同厚度 6061 铝合金母材和搅拌头旋转速度为 1200rpm、前进速度为 300mm/min 下连接区冲击断口 SEM 图像。



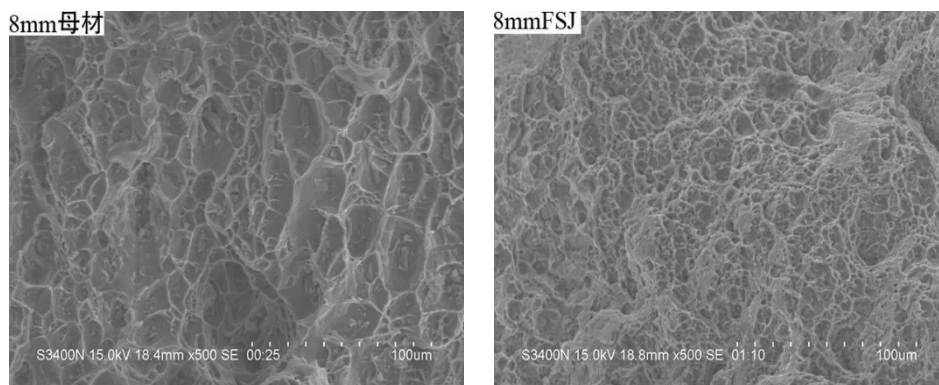


图 4-14 不同厚度铝合金母材与 FSJ 冲击断口 SEM 图像

Fig.4-14 different thickness of aluminum alloy base metal and FSJ impact fracture SEM image

从图 4-14 可以观察到不同厚度铝合金母材试样表面出现大量的韧窝且韧窝尺寸较大，大韧窝四周分布小韧窝，即冲击试样断裂模式为塑性断裂。在 6mm 和 8mm 母材试样表面可以观察到较为平滑的台阶面，即冲击断裂时发生了脆性断裂，脆性断裂将会减低连接区强度和韧性。不同厚度 FSJ 冲击试样可以观察到连接区韧窝尺寸比母材小，且韧窝更加聚集和均匀，使得 FSJ 冲击试样塑性与韧性较好。4mm 厚 FSJ 冲击试样表面出现了不同深度的台阶断面的，并且出现了较深的凹坑。6mm 厚 FSJ 冲击试样表面出现了白色的撕裂棱，表面呈现明显的凸起，即试样塑性变形明显。通过上述分析 FSJ 冲击试样韧窝尺寸比母材小且更加均匀，因此 FSJ 冲击试样性能高于母材。冲击试样的断裂模式以塑性断裂为主，伴随较少区域出现了脆性断裂^[57]。

4.5 本章小结

本章分析了 2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚铝合金搅拌摩擦连接后连接区的力学性能，具体分析了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度对连接区拉伸性能、显微硬度、冲击性能的影响规律。

(1) 不同厚度铝合金 FSJ 连接区呈现中间参数拉伸性能高、两边参数拉伸性能降低的趋势。不同厚度铝合金连接区最佳抗拉强度均达到了母材 71%，最低抗拉强度均达到母材 59%。随着搅拌头旋转速度和前进速度的增大，连接区抗拉强度呈现先增大后减小的趋势，薄板在低热输入参数下和厚板在高热输入参数下拉伸性能降低。FSJ 连接区拉伸试样断裂位置均发生在前进侧连接区中心与母材区之间，且拉伸试样断裂模式为韧性断裂和脆性断裂混合模式。

(2) 搅拌摩擦连接区显微硬度呈现“w”型分布。母材区显微硬度值最高，

在前进侧热影响区显微硬度最低，从热机影响区过渡到连接区中心，显微硬度值得到提高。搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度和板材厚度影响了连接区中心晶粒细化，提高了连接区中心的显微硬度。

（3）搅拌摩擦连接区冲击韧性均高于母材。FSJ 后连接区晶粒细化，晶粒细化提高连接区韧性和强度，改善了连接区冲击性能。冲击断裂的模式以塑性断裂为主，伴随较少区域出现了脆性断裂。

第5章 不同厚度铝合金搅拌摩擦连接区耐腐蚀性能分析

5.1 引言

6061 铝合金因其优异的耐腐蚀性能在汽车制造和海洋工程等得到了广泛的应用，了解其腐蚀性能对于这些应用领域至关重要。在腐蚀环境中使用的结构，其完整性和安全性很大程度上依赖于材料的耐腐蚀性能，研究搅拌摩擦连接区的耐腐蚀性能有助于预测和延长这些结构的寿命。本章通过电化学腐蚀和盐雾腐蚀试验对不同厚度 6061 铝合金 FSJ 连接区腐蚀性能进行研究。并研究了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度和板材厚度对连接区耐腐蚀性的影响规律，进而对连接区腐蚀机理进行分析。

5.2 连接区电化学腐蚀性能分析

5.2.1 搅拌头旋转速度对连接区电化学腐蚀的影响

为了研究 FSJ 连接区的腐蚀性能，通过电化学中极化曲线来反映金属电化学腐蚀的趋势及耐腐蚀性能。下图 5-1 为 6mm 铝合金在搅拌头前进速度 300mm/min 下搅拌头旋转速度 600~1600rpm 时连接区试样 Tafel 极化曲线。通过连接区极化曲线可以拟合出试样的腐蚀电位和腐蚀电流密度。通过数值变化来分析不同搅拌头旋转速度对连接区腐蚀性能的影响。表 5-1 为极化曲线的数值参数。

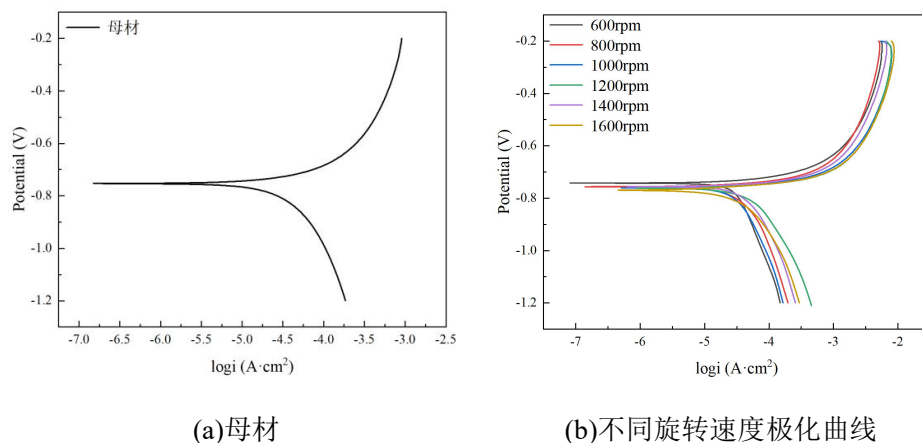


图 5-1 6mm 铝合金在不同旋转速度下的极化曲线

Figure 5-1 Polarization curves of 6mm aluminum alloy at different rotation speeds

表 5-1 极化曲线的数值参数
Table 5-1 Numerical parameters of polarization curves

搅拌头旋转速度	腐蚀电位	腐蚀电流密度
n / rpm	E_{corr} / V	$I_{corr} / \mu A \cdot cm^{-2}$
6061 母材	-0.754	61.6
600	-0.742	49.6
800	-0.756	34.7
1000	-0.760	41.2
1200	-0.762	49.5
1400	-0.756	53
1600	-0.769	52

腐蚀电流密度作为金属腐蚀速率的评估标准，腐蚀电流密度越小，金属的耐腐蚀性能越好。从表 5-1 中可以看出，不同搅拌头旋转速度下连接区腐蚀电流密度均小于母材，即搅拌摩擦连接区耐腐蚀性能优于母材。出现这种现象的原因是在不同搅拌头旋转速度下连接区中心经历动态再结晶，晶粒充分细化，形成细小的等轴晶体，从而降低了晶体中的位错密度，减少了连接区的晶粒储能，进一步缓解了腐蚀过程^[58]。随着搅拌头旋转速度增加，试样的腐蚀电流密度先减小后增大。当搅拌头旋转速度为 800rpm 时，试样的腐蚀电流密度最低，为 $34.7\mu A \cdot cm^{-2}$ ，即连接区耐腐蚀性能最好。搅拌头旋转速度越高，热输入增加，第二相粒子 Mg_2Si 发生溶解析出单质 Si 颗粒，降低连接区耐腐蚀性能，同时第二相粒子发生粗化，进一步降低连接区耐腐蚀性能^[59]。通过上述分析 6061 铝合金经过搅拌摩擦连接后可以提高连接区腐蚀性能。

5.2.2 搅拌头前进速度对连接区电化学腐蚀的影响

为了进一步分析搅拌头前进速度和板材厚度对连接区腐蚀性能的影响，图 5-2 为不同厚度铝合金在搅拌头旋转速度为 1200rpm 下，搅拌头前进速度 200~400mm/min 下连接区极化曲线。通过极化曲线拟合出相应的腐蚀电位和腐蚀电流密度，具体数值如表 5-2 所示。

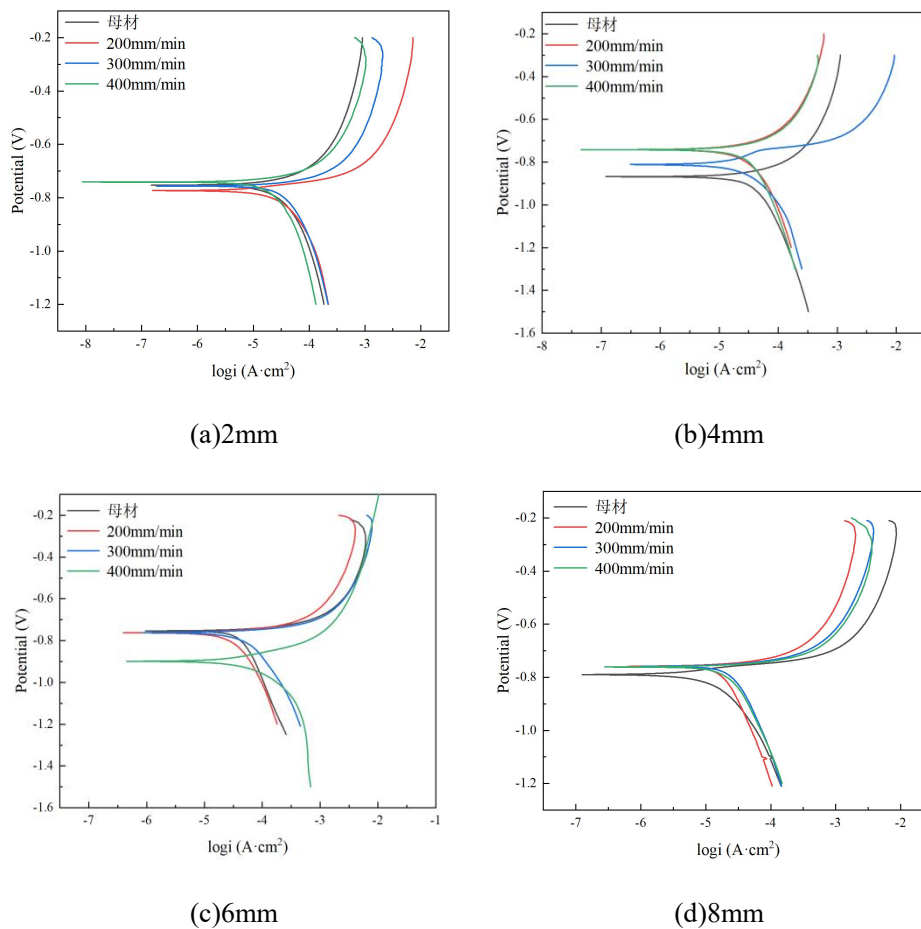


图 5-2 不同厚度铝合金在不同前进速度下极化曲线

Fig. 5-2 Polarization curves of aluminum alloys with different thicknesses at different forward speeds

表 5-2 不同厚度连接区极化曲线的数值参数

Table 5-2 Numerical parameters of polarization curves for different thickness junctions

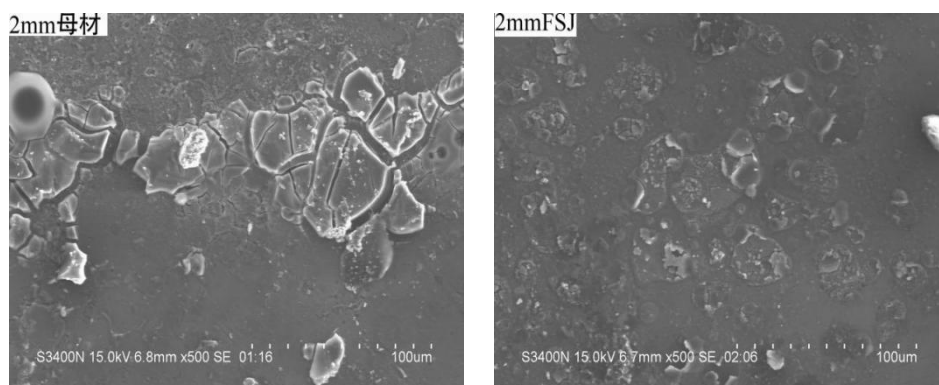
试样厚度	搅拌头前进速度	腐蚀电位	腐蚀电流密度
	$v/(mm/min)$	E_{corr}/V	$I_{corr}/\mu A \cdot cm^{-2}$
2mm	母材	-0.753	35.1
	200	-0.773	20.2
	300	-0.756	25.4
	400	-0.741	27.2
4mm	母材	-0.868	72.7
	200	-0.742	34.2
	300	-0.811	21.6
	400	-0.742	48.9

试样厚度	搅拌头前进速度	腐蚀电位	腐蚀电流密度
	$v/(mm/min)$	E_{corr}/V	$I_{corr}/\mu A \cdot cm^{-2}$
6mm	母材	-0.754	61.6
	200	-0.762	37.5
	300	-0.762	49.4
	400	-0.899	65.6
8mm	母材	-0.79	76.9
	200	-0.759	33
	300	-0.759	39.8
	400	-0.770	15.7

从表 5-2 中可以看出不同厚度铝合金母材和 FSJ 连接区试样的腐蚀电位数值相似,说明材料的腐蚀倾向是相近的,评价连接区腐蚀性能着重于腐蚀电流密度。通过表 5-2 可以观察到不同厚度铝合金经过 FSJ 后连接区腐蚀电流密度均小于母材,即说明 6061 铝合金经过 FSJ 后连接区耐腐蚀性能优于母材。从表中可以看出 2mm 和 6mm 连接区的腐蚀电流密度随着搅拌头前进速度的提高呈现增大的趋势,即连接区耐腐蚀性能下降。主要原因在于搅拌头在连接区停留时间越短,连接区中心晶粒动态再结晶不完全,晶粒未完全细化,促进腐蚀过程发生^[61]。高前进速度下材料流动不充分,易发生缺陷,降低了连接区耐腐蚀性能。不同厚度 FSJ 连接区腐蚀电流密度数值相近无明显变化趋势。

5.2.4 电化学腐蚀微观形貌分析

为了探究连接区电化学腐蚀机理,进一步分析试样的 SEM 图像。图 5-3 为不同厚度铝合金在搅拌头旋转速度为 1200rpm、搅拌头前进速度为 300mm/min 下获得连接区和母材电化学腐蚀后表面 SEM 照片。



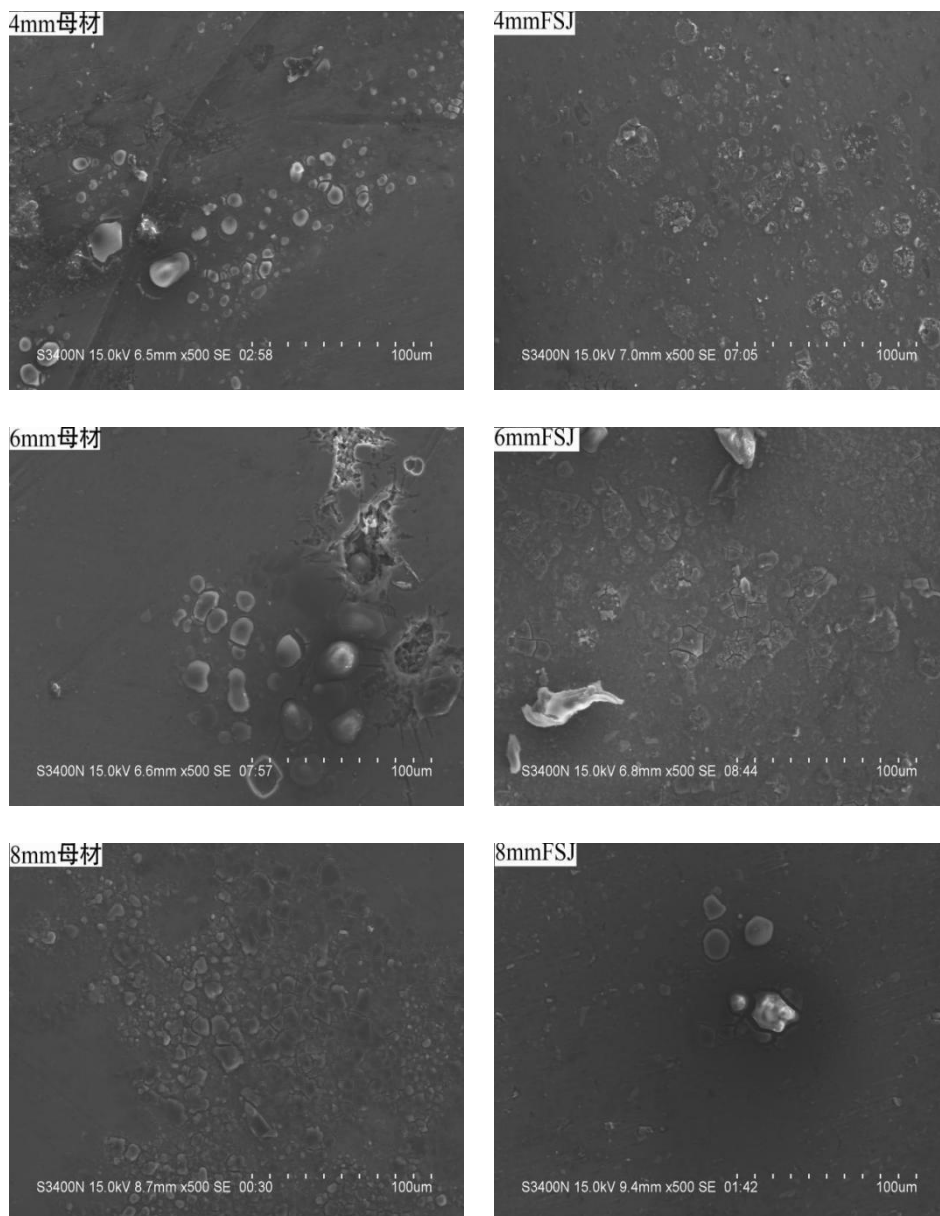


图 5-3 不同厚度试样腐蚀区域 SEM 图

Fig.5-3 SEM images of corrosion area of samples with different thickness

从图 5-3 中可以看出，母材与 FSJ 连接区试样均出现了腐蚀产物。电化学腐蚀主要以点蚀坑及剥落状腐蚀为主，母材 SEM 照片出现大面积的点蚀坑。其出现的原因在于晶界附近有高低电位差异，在氯离子存在条件下，加剧了电化学腐蚀过程，晶粒逐渐脱离原来位置，逐渐隆起形成裂纹导致剥落状腐蚀，剥落状腐蚀产物脱落形成点蚀坑^[62]。FSJ 连接区试样腐蚀电流密度小，耐腐蚀性能好，虽然腐蚀表面已经出现隆起的腐蚀产物，但腐蚀产物尚未形成积聚，腐蚀电流小不足完全击穿铝合金表面钝化膜，阻止腐蚀进一步加剧^[63]。因此在不同厚度 FSJ 试样表面腐蚀程度均比母材低。

5.3 连接区盐雾腐蚀分析

为了进一步评估母材和不同工艺参数条件下连接区的耐腐蚀性,从而进行盐雾腐蚀试验。在试验前和完成后,所有试样均经过超声波清洗和烘干处理,并且进行了重量测量,目的是为了通过计算重量变化来评估腐蚀程度。所使用的试验溶液是 5%的氯化钠 (NaCl) 溶液。在相同的环境条件下,试验分别持续了 24 小时和 48 小时。按照增重法对试样进行腐蚀速率的计算,即腐蚀速率为

$$\eta = (m_1 - m_0) \times (ST)^{-1} \quad (5-1)$$

式中: η 为腐蚀速率 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$; m_0 为试样实验前质量 mg ; m_1 为试样试验后质量 mg ; S 为试样腐蚀表面面积 m^2 ; T 为试样腐蚀时间 h 。

本节分别分析了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度对盐雾腐蚀试验中连接区腐蚀速率的影响。

5.3.1 搅拌头旋转速度对连接区盐雾腐蚀的影响

搅拌头旋转速度对 FSJ 连接区的腐蚀速率影响显著。表 5-3 为 6mm 铝合金在搅拌头前进速度 300mm/min 下旋转速度 600~1600rpm 时腐蚀速率。

表 5-3 母材与不同旋转速度下试样盐雾腐蚀数据

Table 5-3 Base metal and salt spray corrosion data of samples at different rotation speeds

旋转速度(rpm)	24h 增重	24h 速率	48h 增重	48h 速率
	mg	$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	mg	$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
母材	0.11	76	0.75	260
600	0.13	90	1.3	451
800	0.2	139	1.29	448
1000	1.0	694	1.77	615
1200	0.27	188	0.94	326
1400	0.36	250	1.78	618
1600	0.92	639	2.52	875

通过公式(5-1)可以计算出 24h、48h 的盐雾腐蚀速率,结果表明 48h 盐雾腐蚀速率均高于 24h 盐雾腐蚀速率且 FSJ 试样腐蚀速率均高于母材,即 FSJ 连接区耐腐蚀性能低于母材。主要由于连接区发生了动态再结晶,动态再结晶形成更多的晶界出现,使得铝合金质密度下降,导致腐蚀更易发生^[64]。并且 FSJ 过程破坏

了试样表面氧化膜，降低了耐腐蚀性能。在搅拌头旋转速度为 1200rpm 时连接区 48h 腐蚀速率最低，为 $326\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ ，即该参数下连接区耐腐蚀性能最高。主要由于合适的搅拌头旋转速度下热量输入适宜，连接区中心晶粒充分细化，合适的热量导致连接区域残余应力低，从而提高连接区耐腐蚀性。在搅拌头旋转速度 1600rpm 时连接区 8h 腐蚀速率最高，为 $892\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$ 。即该区域腐蚀性能较差。主要因为在高搅拌头旋转速度下将导致连接区热输入增加，连接区中心晶粒粗化，较大的晶粒更易于在晶界处形成腐蚀裂缝，从而加快腐蚀速率^[65]。高热输入在连接区产生较高的残余应力，应力在一定条件下可加速应力腐蚀开裂的发生。通过上述分析 FSJ 连接区的盐雾腐蚀速率均高于母材。即搅拌摩擦连接区的耐腐蚀性低于母材。合适的搅拌头旋转速度可以降低连接区腐蚀速率，提高连接区耐腐蚀性能。

5.3.2 搅拌头前进速度对连接区盐雾腐蚀的影响

表 5-4 为不同厚度铝合金在搅拌头旋转速度为 1200rpm，搅拌头前进速度为 200~400mm/min 时连接区腐蚀速率。

表 5-4 母材与不同旋转速度下试样盐雾腐蚀数据

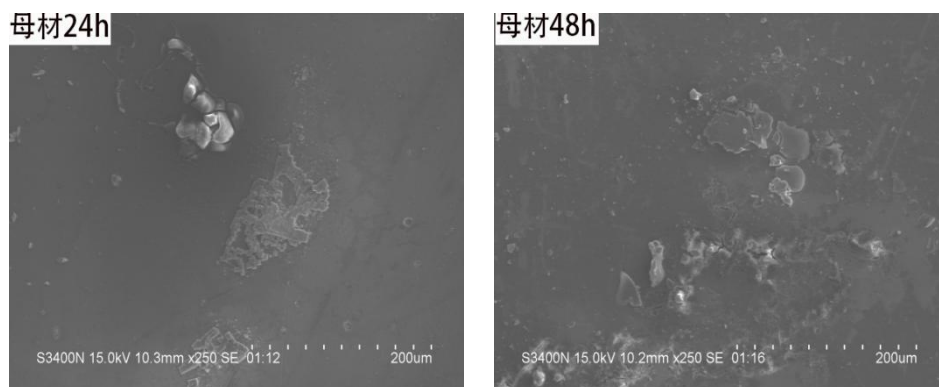
Table 5-4 base metal and salt spray corrosion data of samples at different rotation speeds

板材厚度	搅拌头前进速度	24h 增重	24h 速率	48h 增重	48h 速率
	mm/min	mg	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$	mg	$\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}$
2mm	200	0.1	69	1.13	392
	300	0.43	299	0.99	344
	400	0.06	42	2.11	733
4mm	200	0.08	56	1.9	660
	300	0.072	50	1.63	566
	400	0.19	132	1.91	663
6mm	200	1.54	1069	2.93	1017
	300	0.27	188	0.94	326
	400	0.08	56	1.63	566
8mm	200	0.69	479	2.33	809
	300	1.08	750	2.55	885
	400	0.2	139	3.16	1097

从表 5-4 中可以看出, 不同厚度连接区 48h 腐蚀速率对比 24h 腐蚀速率存在一定的增速现象, 这是由于盐雾试样在经过 24h 腐蚀后, 试样表面出现许多腐蚀坑以及部分腐蚀产物脱落形成的薄弱表面。表面的钝化膜被腐蚀消失, 使得接下来腐蚀更加剧烈, 因此 48h 腐蚀速率更能体现连接区腐蚀速率。2mm、4mm 和 6mm 厚铝合金在搅拌头前进速度 300mm/min 时 48h 腐蚀速率最低。合适的搅拌头前进速度有助于平衡热输入和冷却速率, 可以促进晶粒细化, 提高连接区的均匀性和腐蚀抵抗力^[66]。在 2mm 和 8mm 厚铝合金拌头前进速度 400mm/min 时 48h 连接区腐蚀速率最高。在高搅拌头前进速度下, 连接区流动性较差, 连接区易出现孔洞、裂纹缺陷。这些缺陷通常是腐蚀的起始点, 减少它们可以显著降低腐蚀速率^[67]。在 4mm 和 8mm 厚铝合金搅拌头前进速度 200mm/min 时 48h 连接区腐蚀速率最高。在低搅拌头前进速度时连接区热输入增加, 晶粒粗化, 降低了连接区腐蚀抵抗性。通过上述分析搅拌头前进速度对连接区腐蚀速率影响显著, 选择合适的搅拌头前进速度有助于提高连接区耐腐蚀性能。

5.3.3 连接区盐雾腐蚀后 SEM 图

为深入探究盐雾腐蚀机理, 采用扫描电子显微镜 (SEM) 对试样表面进行了微观结构观察。SEM 图像分析使我们能够详细了解腐蚀过程, 这对于提高连接区的防腐性能至关重要。通过这种分析, 我们可以更准确地识别和解释连接区在腐蚀环境中的表现, 为优化连接工艺参数和改善材料性能提供了关键信息。下图 4-5 为 2mm 厚母材和 2mm、4mm 和 6mm 铝合金在搅拌头旋转速度为 1200rpm、前进速度 300mm/min 下获得连接区在 24h 和 48h 盐雾腐蚀后其表面 SEM 图像。



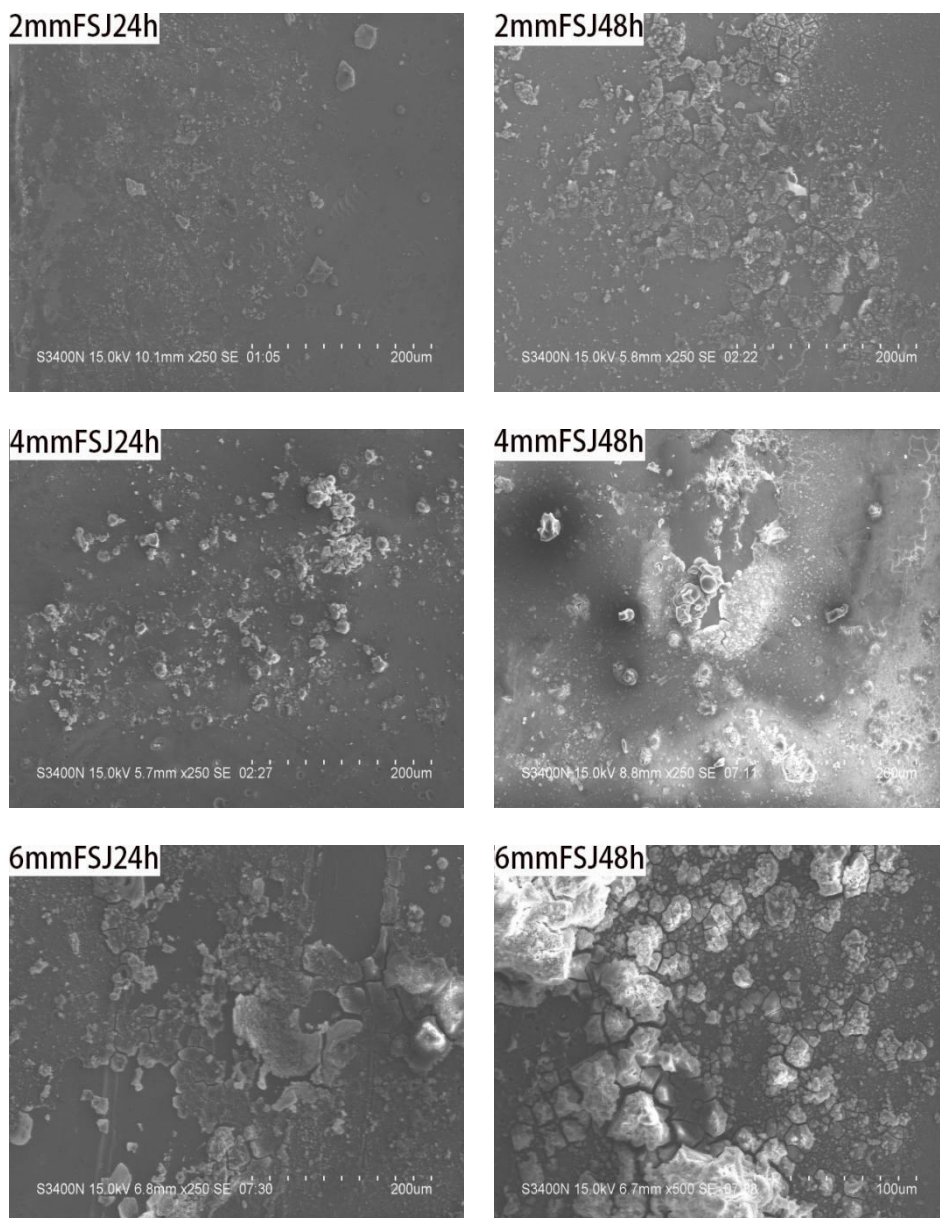


图 5-4 24h 和 48h 盐雾腐蚀表面 SEM 图像

Fig.5-4 SEM images of salt spray corrosion surface at 24h and 48h

通过图 5-4 可以观察到母材 24h 盐雾腐蚀后，试样表面腐蚀痕迹较轻，局部出现较小的腐蚀坑。48h 连接区腐蚀加剧，试样表面腐蚀裂纹扩大并附着腐蚀产物呈凹凸状。2mm 厚搅拌摩擦连接试样在 24h 盐雾腐蚀后，试样表面附着较少的腐蚀产物，腐蚀程度较轻，但 48h 盐雾实验后连接区腐蚀程度严重，细小的腐蚀裂纹开始变的密集，并相互连接。表面附着大面积腐蚀产物^[68]。4mm 厚搅拌摩擦连接试样在 24h 腐蚀后，表面出现亮白色腐蚀产物，且腐蚀产物较为聚集。在 48h 连接区白色腐蚀产物覆盖试样表面。6mm 厚搅拌摩擦连接试样在 24h 后连接区出现了大面积腐蚀产物以及腐蚀产物脱落后留下的腐蚀坑。48h 腐蚀时间

延长，腐蚀产物密度上升，相互开始交织形成蜂窝状结构。随着盐雾腐蚀时间加长，连接区腐蚀速率提高^[69]。

5.4 本章小结

本章分析了不同工艺参数下 2~8mm 铝合金连接区的腐蚀性能，具体分析了搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度对连接区电化学腐蚀性能、盐雾腐蚀性能的影响。

(1) 通过对 2mm~8mm 厚铝合金在不同工艺参数下连接区的电化学腐蚀的腐蚀电位及腐蚀电流进行分析，FSJ 连接区的腐蚀电流密度均小于母材区，即经过 FSJ 连接区耐腐蚀性能均高于母材。合适的搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、板材厚度使得连接区晶粒细化提高了连接区的耐腐蚀性能。

(2) 搅拌摩擦连接区盐雾腐蚀速率 48h 腐蚀速率时长均高于 24h。主要因为盐雾试样在经过 24h 腐蚀后，试样表面出现许多腐蚀坑以及部分腐蚀产物脱落形成的薄弱表面，表面的钝化膜被腐蚀消失，加剧了盐雾腐蚀过程。合适的搅拌摩擦连接区工艺参数降低了连接区腐蚀速率。但 FSJ 连接区盐雾腐蚀速率高于母材区腐蚀速率。即 FSJ 连接区盐雾耐腐蚀性能低于母材。

第 6 章 工艺参数对连接区缺陷影响与最优参数设计

6.1 引言

本章分析了工艺参数对连接缺陷影响和最优参数设计,通过分析连接区的缺陷,获知缺陷成因,进而采取措施减少缺陷,提高连接区质量。分析确定铝合金最优的连接参数(搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、轴肩下压量)对于控制连接过程至关重要。连接区的缺陷是潜在的弱点,可能影响铝合金结构的整体强度和耐久性,通过缺陷分析和参数优化,可以提高结构的完整性和可靠性。

6.2 工艺参数对连接区缺陷影响

FSJ 连接过程是一个非常复杂的过程,受连接前装配情况、连接工艺参数、搅拌头结构等多种因素的影响,在某种情况下会产生连接缺陷。通过对 FSJ 连接缺陷进行深入的了解,总结其特征,分析其产生原因,提出对应的预防措施,将具有重要的理论研究意义和实际应用价值。

6.2.1 低热输入连接缺陷

工艺参数直接影响了连接热输入,低旋转速度和高前进速度下连接区下搅拌头摩擦热量低,金属未达到塑化状态。图 6-1 为 2mm 厚铝合金在搅拌头旋转速度为 600rpm、搅拌头前进速度 400mm/min、轴肩下压量为 0.2mm 时连接区表面。



图 6-1 连接区表面犁沟缺陷

Fig.6-1 Plough defects on the surface of the connection area

从图 6-1 中可以看出,连接区前部分出现犁沟缺陷。发生该缺陷主要原因是薄板在低搅拌头旋转速度和高搅拌头前进速度下连接区摩擦热输入不足且板材散热速率高,使得连接过程中塑化金属不足及材料流动不充分,随着搅拌头移动时,塑化金属未能有效地补充连接区产生的空腔。同时搅拌头轴肩下压量较浅导致连接时顶锻压力不足,连接区塑化金属未能挤压成形^[70]。为了避免连接区出现犁沟缺陷,可以适当增加搅拌头旋转速度和轴肩下压量,或者降低搅拌头前进速度。

厚板材在高搅拌头旋转速度和低搅拌头前进速度下连接的热输入相对较高。

由于厚板具有更大的质量和体积,因此能够吸收和存储更多的热量。且在厚板材中热量更慢地通过材料扩散和散失。但在低热输入工艺参数下,厚板底部热输量吸收不足,连接时热量分布步不均,导致搅拌头搅拌不充分,底部金属流动性差,易在底部出现孔洞缺陷^[71]。图 6-2 为 8mm 厚铝合金在搅拌头旋转速度为 600rpm、搅拌头前进速度 400mm/min、轴肩下压量为 0.2mm 时连接区整体微观组织。从图 6-2 中可以观察到连接区中心底部出现较大的孔洞,同时可以观察到连接区中心出现一条黑线,即为连接区杂质沉积带。出现孔洞缺陷主要因为厚板在底部受热不均匀,金属塑化性差且在较快的搅拌头前进速度下连接区流动性不足。出现杂质沉积带主要原因在于连接过程中,对接板材表面氧化物、杂质等清除得不彻底或对接面氧化物和接缝附近的杂质等物质没有被搅拌针充分搅碎导致^[72]。为了避免孔洞和氧化物残留缺陷需要在连接前对连接表面进行细致打磨、酸洗等工序,薄板在连接时需要较高的连接区热输入,即选择较高的搅拌头旋转速度或低的搅拌头前进速度。厚板在连接时底部热输入不足需要选择较长的搅拌针和增加轴肩下压量。



图 6-2 8mm 铝合金连接区微观组织

Fig. 6-2 8mm aluminum alloy joint zone microstructure

6.2.2 高热输入连接缺陷

搅拌头在高旋转速度和低前进速度下,连接区热输入高,连接区表面易发生大量飞边,连接区发生减薄现象,降低了连接区性能。图 6-3 为 4mm 厚铝合金在搅拌头旋转速度为 1600rpm 和前进速度为 200mm/min、轴肩下压量为 0.2mm 下连接区表面形貌。

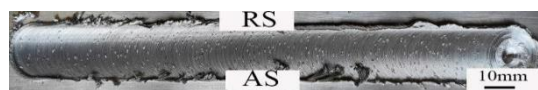


图 6-3 4mm 铝合金连接区表面形貌

Fig. 6-3 4 mm surface morphology of aluminum alloy joint zone

从图 6-3 中可以观察到 4mm 厚铝合金在高搅拌头旋转速度和低搅拌头前进

速度参数下连接区表面两侧出现了大量的飞边,即连接区出现了减薄现象,导致连接区性能下降。出现该现象主要原因连接区热输入增加,金属材料塑化过度,连接区流动性强。高温下软化材料在搅拌头旋转作用下更容易被挤压到接缝的边缘,形成飞边。底部带有螺纹的搅拌头更容易将软化的材料推向表面,形成飞边^[73]。在高热输入条件下,搅拌头顶锻压力分布不均,导致材料不均匀地流动并挤压到接缝边缘。高热输入条件下连接区软化过度导致连接区出现细小孔洞。图 6-3 为 6mm 厚铝合金在搅拌头旋转速度为 1600rpm、搅拌头前进速度为 200mm/min、轴肩下压量 0.2mm 时连接区微观组织图。从图中可以观察到连接区中心底部出现了细小的孔洞,孔洞位置靠近前进侧(AS)。出现孔洞缺陷的主要原因厚板在高热输入参数下材料流动性增强,但板材底部热量不均匀导致材料流动不均,且塑化金属被搅拌头挤压到接缝边缘形成飞边,使得塑化金属未能完全填充前进侧形成的空腔,导致该区域出现了细小的孔洞^[74]。在实际工程应用中,出现这类缺陷会存在很大的风险隐患,故应该尽量避免。

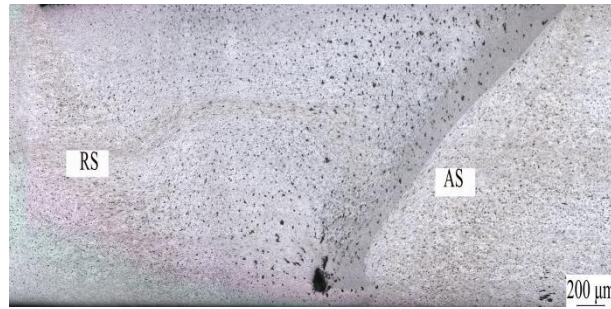


图 6-3 6mm 铝合金连接区整体微观组织

Fig. 6-3 6mm aluminum alloy joint zone overall microstructure

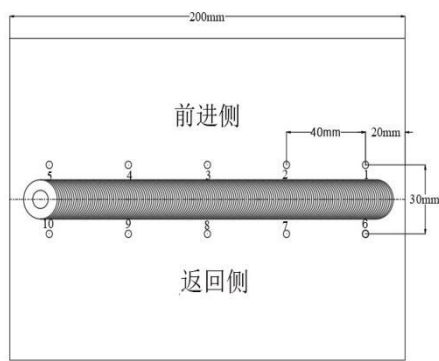
6.3 工艺参数对连接区热影响

FSJ 是一个连续的剪切和挤压过程,连接质量主要取决于 FSJ 过程中旋转工具产生的热量输入控制的塑性流动。Qian^[75]等提出单位热量输入可以用描述 FSW 过程的下式来计算:

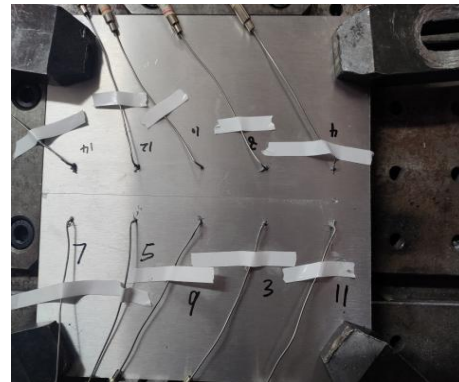
$$Q = \frac{\alpha q}{v} = \frac{4}{3} \pi^2 \alpha \mu p R^3 \frac{n}{v} \quad (6-1)$$

式中, Q 为单位长度的热量输入, α 为热量输入效率, q 是输入的热量, v 为搅拌头前进速度, μ 为摩擦系数, p 为压力, R 为肩部半径, n 为搅拌头旋转速度。由于连接工艺和条件是固定的,所以假设 α 、 μ 、 p 、 R 为常数,只有 n 和 v 是变量。由式(6-1)可知,在 FSJ 过程中,热量输入主要取决于 n/v 的比值。一方面,

在较低的搅拌头旋转速度或较高的搅拌头前进速度下，热量输入低且不足，搅拌头搅拌作用差阻碍了塑化材料在连接区的流动性，从而导致连接区表面未成形。另一方面，随着搅拌头旋转速度的增加或搅拌头前进速度的降低，热输入增加导致金属塑化过度，连接区减薄且力学性能降低。因此连接区温度对连接区质量影响密切相关。本节通过 k 型电偶对连接区进行温度采集，来探讨 FSJ 连接工艺参数对连接区温度的影响，图 6-4 为连接区测温分布点。将搅拌头前进速度固定为 300mm/min 时测量不同搅拌头旋转速度对连接区温度的影响。图 6-5 为 6mm 厚铝合金在搅拌头旋转速度为 600~1600rpm 下连接区温度变化图。(前进侧区测温点 3、返回侧取测温点 8)



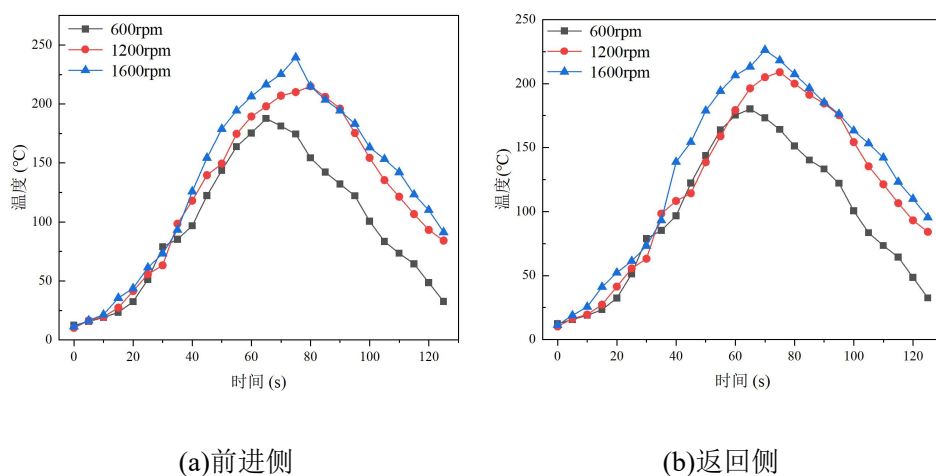
(a)测温点分布图



(b)实验测温点

图 6-4 测温点分布和实验测温分布

Fig.6-4 Temperature measurement point distribution and experimental temperature measurement distribution



(a)前进侧

(b)返回侧

图 6-5 不同旋转速度下温度变化图

Figure 6-5 Temperature variation diagram at different rotation speeds

从图 6-5 中可以看出,随着搅拌头旋转速度提高连接区最高温度呈现上升趋势,即搅拌头旋转速度对连接区热影响显著。当搅拌头旋转速度为 600rpm 时,连接区最高温度为 187℃,连接区热输入较低。当搅拌头旋转速度增加到 1600rpm 时,连接区温度增加到 239℃。通过前进侧与返回侧温度对比可以发现不同旋转速度下连接区返回侧最高温度均比前进侧温度低(相差 7℃)。主要原因在于 FSJ 过程中连接区不对称热分布,由于搅拌头前进方向的物理运动,前进侧的材料受到更强的摩擦和塑性变形作用,导致该区域的热量积累更多。同时搅拌头的旋转促使材料从前进侧流向返回侧^[76]。在前进侧,材料流动遇到较大的阻力,增加了摩擦热。相比之下,返回侧的材料流动较为顺畅,热量积累较少。通过上述分析工艺参数中搅拌头旋转速度对连接区摩擦热输入至关重要。为了进一步探讨搅拌头前进速度对连接区热输入的影响,图 6-6 为 6mm 厚铝合金在搅拌头旋转速度为 1000rpm 下,搅拌头前进速度为 200~400mm/min 时连接区温度变化图。

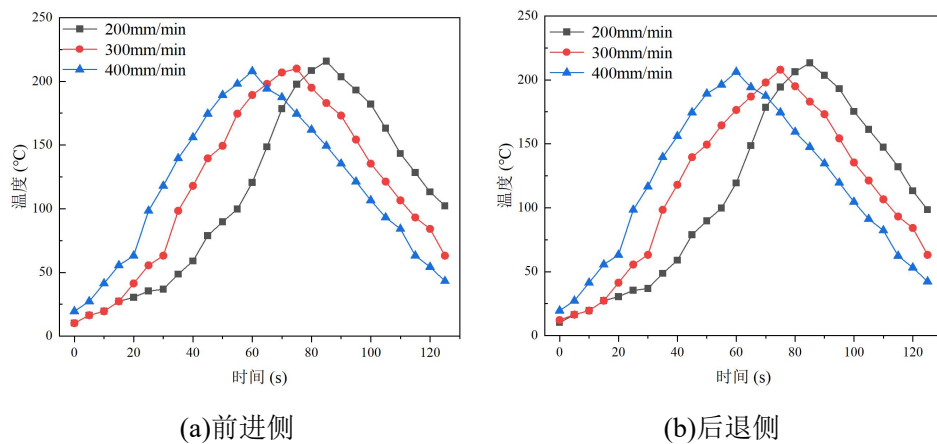


图 6-6 不同前进速度下温度变化图

Figure 6-6 Temperature change diagram at different forward speeds

从图 6-6 中可以观察到搅拌头前进速度对连接区最高温度变化影响较小。随着搅拌头前进速度提高,连接区最高温度呈下降趋势,但最高温度变化较小。主要原因在于搅拌头前进速度改变了搅拌头在连接区域的停留时间,但连接区摩擦热的产生主要取决于搅拌头的旋转速度和下压力。较高的前进速度减少搅拌头在连接区停留时间,导致连接区热量减少,同时由于摩擦和塑性变形的持续作用,导致最高温度变化不大^[77]。且不同搅拌头前进速度下连接区前进侧温度略高于返回侧。

6.4 连接区工艺参数优化

6.4.1 响应面工艺优化

响应面法（RSM）是一种综合试验设计和数学建模的优化方法，可有效减少试验次数，并且可以考察影响因素之间的交互作用。通过对回归方程的分析来寻求最优工艺参数，解决多变量问题的一种统计方法^[78]。铝合金搅拌摩擦连接接头拉伸强度是衡量接头质量的重要标志，本章对搅拌摩擦连接接头抗拉强度进行优化，从而获得最优化抗拉强度的工艺参数。图 6-7 为响应面法工艺优化流程图

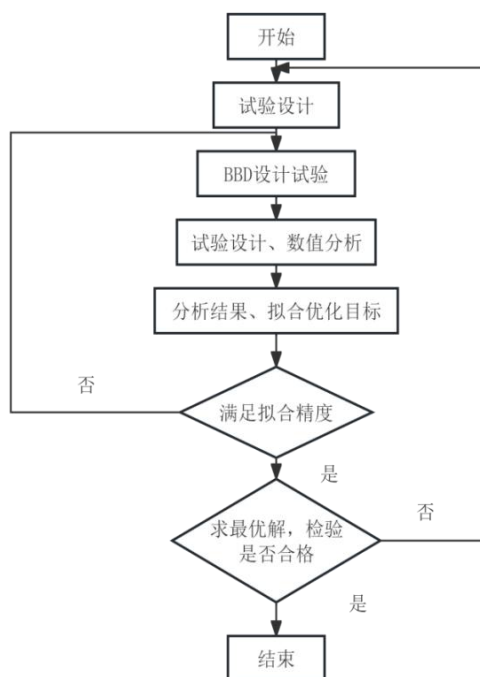


图 6-7 响应面法流程图

Fig.6-7 Flow chart of response surface method

6.4.2 BBD 设计试验

本章采用 BBD 试验设计对 2mm 厚铝合金搅拌摩擦连接工艺参数进行优化，选定搅拌头旋转速度、搅拌头前进速度、轴肩下压量三因素工艺参数对连接接头的拉伸性能进行优化。图 6-8 为三因子 BBD 试验设计取点分布示意图。本节采用 Design-Expert13 软件进行响应面工艺优化，以连接区抗拉强度作为响应值，在最优工艺参数范围下利用二次方差模型回归分析最佳抗拉强度。本节采用的 BBD 三因素试验设计工艺参数范围如表 6-1 所示。

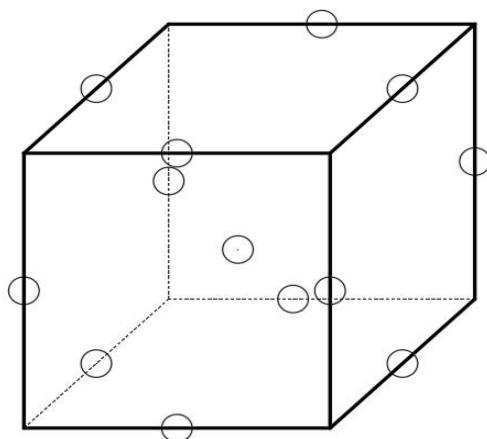


图 6-8 三因子 BBD 试验设计点分布示意图

Fig.6-8 Three-factor BBD experimental design point distribution diagram

表 6-1 BBD 设计参数选择

Table 6-1 Selection of BBD design parameters

因素	符号	单位	水平		
			-1	0	1
搅拌头旋转速度	A	rpm	1000	1200	1400
搅拌头前进速度	B	mm/min	200	300	400
轴肩下压量	C	mm	0.1	0.2	0.3

6.4.3 模型精度分析

在 BBD 试验设计下进行搅拌摩擦连接，板材连接好制备拉伸试样并在 WAW-1000 万能试验机上进行拉伸试验。BBD 试验拉伸参数结果如表 6-2 所示，拟合精度分析如表 6-3 所示。

表 6-2 BBD 试验拉伸性能结果

Table 6-2 Tensile properties of BBD test results

试验号	搅拌头旋转速度 A	搅拌头前进速度 B	轴肩下压量 C	抗拉强度
	rpm	mm/min	mm	Mpa
1	1000	200	0.2	214
2	1400	200	0.2	212
3	1000	400	0.2	221
4	1400	400	0.2	217
5	1000	300	0.1	223
6	1400	300	0.1	218
7	1000	300	0.3	224

试验号	搅拌头旋转速度 A	搅拌头前进速度 B	轴肩下压量 C	抗拉强度
8	1400	300	0.3	220
9	1200	200	0.1	214
10	1200	400	0.1	217
11	1200	200	0.3	215
12	1200	400	0.3	219
13	1200	300	0.2	228.3
14	1200	300	0.2	229
15	1200	300	0.2	230
16	1200	300	0.2	228.5
17	1200	300	0.2	227

表 6-3 拟合精度分析

Table 6-3 fitting accuracy analysis

来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	555.52	9	61.72	47.89	<0.0001	显著
A	28.12	1	28.12	21.82	0.0023	
B	45.13	1	45.13	35.01	0.0006	
C	4.50	1	4.50	3.49	0.1039	
AB	1.00	1	1.00	0.7759	0.4076	
AC	0.2500	1	0.2500	0.1940	0.6729	
BC	0.2500	1	0.2500	0.1940	0.6729	
A ²	60.16	1	60.16	46.68	0.0002	
B ²	324.58	1	324.58	251.84	<0.0001	
C ²	52.47	1	52.47	40.71	0.0004	
残差	9.02	7	1.29			
失拟	4.25	3	1.42	1.19	0.4202	不显著
纯误差	4.77	4	1.19			
合计	564.54	16				
R ²		0.9840				
R _{adj} ²		0.9635				

通过表 6-3 中拟合精度分析可以检验模型方程拟合的显著性，当 $P < 0.05$ 时，即表示数学模型超过 95% 的概率是显著的。本节对应的回归模型 $p < 0.0001$ ，故该模型具有显著意义^[79]。确定系数 R^2 为 0.984，其值越接近 1 则说明模型与实际拟合程度越高。调整后的 R_{adj}^2 为 0.9635 与 R^2 值相差较小，意味着试验结果与预测结果之间存在高度的相关性。

6.4.4 数学模型

本节通过连接区抗拉强度作为响应值，将搅拌摩擦连接工艺参数搅拌头旋转速度(A)、搅拌头前进速度(B)、轴肩下压量(C)建立交互效应的二阶多形式所组成的数学模型。数学模型表示为：

$$y = f(A, B, C) \quad (6-1)$$

响应面二阶函数表达式如式(6-2)所示。

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (6-2)$$

式中： a_0 为常数项； a_i 为单因素项影响系数； a_{ij} 为双因素项交互作用系数；

a_{ii} 为单因素项二次方作用系数。

采用连接工艺参数(A,B,C)建立的多项式表示为：

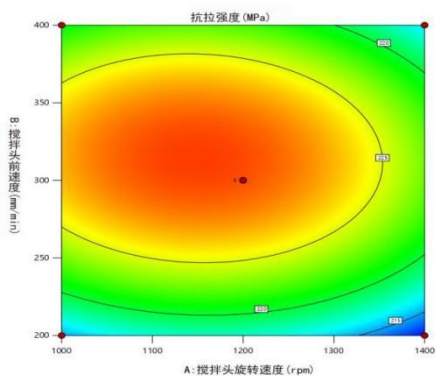
$$y = a_0 + a_1 A + a_2 B + a_3 C + a_{12} AB + a_{23} BC + a_{13} AC + a_{11} A^2 + a_{22} B^2 + a_{33} C^2 \quad (6-3)$$

上述分析中该数学模型方程具有显著性，即连接区抗拉强度的具体公式如下：

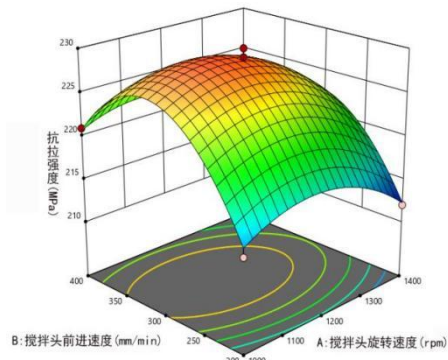
$$y = 228.56 - 1.87A + 2.38B + 0.75C - 0.5AB + 0.25AC + 0.25BC - 3.78A^2 - 8.78B^2 - 3.53C^2 \quad (6-4)$$

6.4.5 试验结果分析

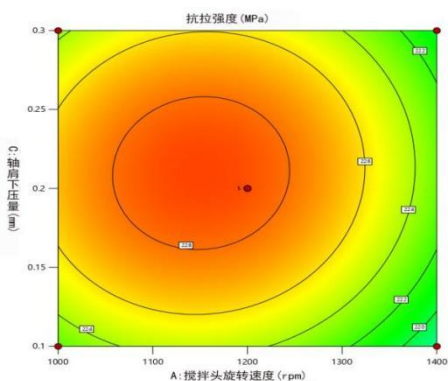
搅拌摩擦连接工艺参数对连接区抗拉强度影响显著。搅拌头旋转速度(A)、搅拌头前进速度(B)决定了连接区热输入，轴肩下压量(C)影响了连接区材料的流动性。对工艺参数 3 因素进行优化，考虑双因素对抗拉强度的交互作用，下图 6-9 三因素交互作用等高线图即响应面图。



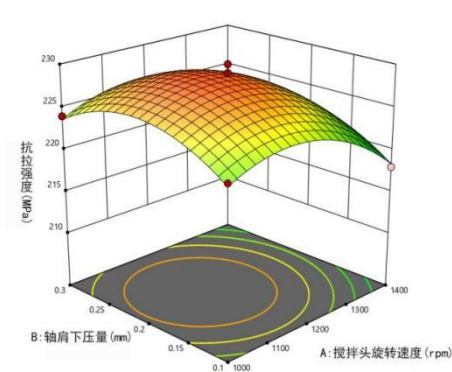
(a)AB 与抗拉强度等高线图



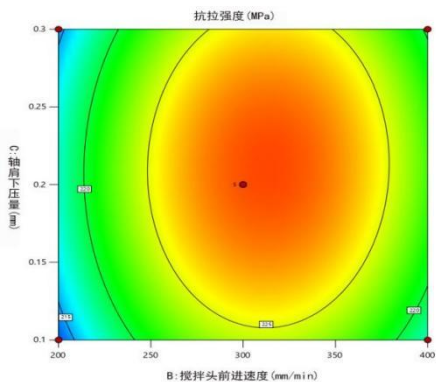
(b)AB 与抗拉强度响应面图



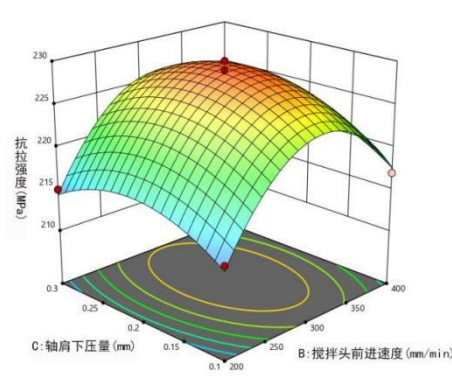
(c)AC 与抗拉强度等高线图



(d)AC 与抗拉强度响应面图



(e)BC 与抗拉强度等高线图



(f)BC 与抗拉强度响应面图

图 6-9 三因素交互作用等高线图即响应面图

Fig.6-9 Three-factor interaction contour map is the response surface map

从图中 6-9(a)中可以观察到等高线图呈现椭圆性且在搅拌头旋转速度方向上曲率更大,即说明搅拌头旋转速度与前进速度交互性显著,搅拌头旋转速度对连接区抗拉强度影响更大。图 6-9(b)中等高线图呈现圆形,响应面图较为平缓。即搅拌头前进速度和轴肩下压量对抗强度影响程度相似且对抗拉强度影响小。三对工艺参数的等高线和曲面图都呈现先上升后下降趋势,其中搅拌头旋转速度与

前进速度响应面曲率更为明显。说明工艺参数中搅拌头旋转速度和前进速度对抗拉强度交互作用更大^[80]。搅拌头旋转速度和前进速度直接影响了连接区热输入。合适的参数下连接区热输入均匀，连接区抗拉强度提高，提高连接接头质量。

6.4.6 抗拉强度工艺参数优化

通过响应面法建立抗拉强度与 3 个工艺参数之间的数学模型，通过 Design-Expert13 软件求解出数学模型的最佳抗拉强度。模型最佳工艺参数：搅拌头旋转速度为 1350rpm、前进速度为 312mm/min、轴肩下压量为 0.214mm 时获得最佳抗拉强度为 229.6MPa。对最佳工艺参数进行实际搅拌摩擦连接试验验证，试验所测的抗拉强度为 232MPa，与数学模型拟合结果基本吻合。

6.5 本章小结

本章主要研究了工艺参数对连接区缺陷和热输入的影响并且通过响应面法对工艺参数进行了优化设计。得出以下结论：

(1) 在低热输入的工艺参数下铝合金连接区材料塑化不充分，产生犁沟表面缺陷，厚板铝合金连接区底部热量分布不均匀，在底部中间易出现较大孔洞缺陷。在高热输入工艺参数下，表面产生飞边缺陷，厚板底部前进侧易出现细小孔洞。防止连接区出现缺陷薄板铝合金需要高热输入工艺参数，厚板铝合金选择较长的搅拌针和增加轴肩下压量。

(2) 工艺参数对连接区热输入影响显著，本章通过 k 型电偶对连接区进行温度采集，随着搅拌头旋转速度提高连接区最高温度呈现上升趋势，即搅拌头旋转速度对连接区热影响显著。不同旋转速度下连接区前进侧最高温度均比返回侧温度高。搅拌头前进速度对连接区最高温度变化影响较小。

(3) 基于 BBD 响应面法建立抗拉强度与 3 个因素工艺参数之间的数学模型，通过方差检验数学模型精度。并对该数学模型进行最优化求解。获得搅拌头旋转速度 1350rpm、前进速度为 312mm/min、轴肩下压量为 0.214mm 时获得最佳抗拉强度为 229.6MPa，实际结果与模型预测结果基本符合。

第 7 章 结论与展望

7.1 总结

本论文对 2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚 6061-T6 铝合金进行搅拌摩擦连接区性能进行试验,分析了工艺参数(搅拌头旋转速度、前进速度)和板材厚度对连接区的微观组织、力学性能、腐蚀性能的影响。同时分析了工艺参数对连接区缺陷和热量输入的影响,并使用 BBD 响应面法对 6061 铝合金 FSJ 工艺参数进行优化,从而获得最佳抗拉强度的数学模型。本文主要结论如下:

(1) 在搅拌摩擦连接后不同厚度铝合金连接区表面成形好,无明显裂纹沟槽等缺陷,FSJ 工艺参数对连接区表面质量影响显著。随着搅拌头旋转速度提高,连接区中心晶粒尺寸呈现先减小后增大的趋势。随着搅拌头前进速度提高,连接区中心晶粒尺寸呈现减小的趋势。EBSD 图像分析显示,母材区晶粒取向性转动形成板织构,晶界取向角小,小角度晶界占比高。连接区中心由于位错积累和重组,晶界取向角增大,小角度晶界组分也增加。前进侧热影响区因动态再结晶不充分,部分晶粒未结晶,导致错位堆积,晶界取向角较小,小角度晶界占比从中心区的 27%上升至 39.5%。

(2) 搅拌摩擦连接工艺参数对铝合金连接区的力学性能影响显著,不同厚度的铝合金板材在经过 FSJ 后,其抗拉强度表现出了不同的提升,具体来说,2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚的铝合金板材在特定 FSJ 参数下的最高抗拉强度分别达到母材的 76.0%、75.7%、71.7%和 73.3%,其中拉伸断裂模式呈现韧性断裂和脆性断裂的混合模式,断裂位置均发生在前进侧连接区中心与母材之间。此外,不同厚度连接区的显微硬度呈现“W”型分布,母材区域显微硬度最高,而连接区前进侧热影响区硬度最低,连接区中心显微硬度有所提高,连接区显微硬度变化与晶粒细化和晶粒尺寸变化密切相关。冲击韧性方面,搅拌摩擦连接区的冲击韧性普遍高于母材,连接区中心晶粒细化提高铝合金冲击性能。且冲击断裂主要为塑性断裂,伴随少量脆性断裂区域。

(3) 对不同厚度铝合金 FSJ 连接区进行电化学腐蚀试验,发现连接区的腐蚀电流密度普遍低于母材区,表明经过 FSJ 的连接区的耐腐蚀性能优于母材。主

要因为 FSJ 使得连接区晶粒充分细化,从而提高了耐腐蚀性能。在盐雾腐蚀试验中,尽管适宜的 FSJ 参数有助于降低腐蚀速率,但 FSJ 试样腐蚀速率高于母材,即盐雾实验中 FSJ 连接区耐腐蚀性能低于母材。且 48h 试样腐蚀速率普遍高于 24h 试样,主要是由于盐雾试样表面的钝化膜在 24 小时腐蚀后被破坏,导致腐蚀加剧。

(4) 研究了 FSJ 工艺参数对铝合金连接区的缺陷及热输入的影响,并利用响应面法对参数进行了优化设计。低热输入参数导致材料塑化不足,易产生犁沟和孔洞缺陷;高热输入参数则导致飞边和细小孔洞缺陷。为了预防缺陷产生薄板铝合金连接时需要高热输入工艺参数,厚板连接时需较长搅拌针或增加轴肩下压量。搅拌头旋转速度对连接区热影响显著,随着旋转速度提高,连接区最高温度呈现明显上升趋势,然而工艺参数中搅拌头前进速度对连接区影响较小,且板材前进侧温度高于后退侧。基于 BBD 响应面法建立的数学模型,确定最优参数在旋转速度 1350rpm、前进速度 312mm/min、轴肩下压量 0.214mm,得到最佳抗拉强度为 229.6MPa,通过实际试验抗拉强度为 233.0MPa,与模型评估结果相符。

7.2 展望

本课题对 2mm、4mm、6mm 和 8mm 6061 铝合金进行体系化搅拌摩擦连接实验,探讨了工艺参数和板材厚度对连接区性能的影响。由于时间有限,本课题存在一些不足之处,在以下几个方面需要改进:

(1) 6061 铝合金连接工艺参数范围较为广泛,搅拌头旋转速度和搅拌头前进速度参数选择范围较宽,后续可以选择更细的工艺参数,从而建立 2mm、4mm、6mm 和 8mm 厚 6061 铝合金搅拌摩擦连接标准化工艺参数库。

(2) 对连接区力学性能、腐蚀性能分析中,连接区断裂机理分析和腐蚀机理分析不够透彻,未分析连接区应变率对连接区性能的影响,未对连接区腐蚀产物进行具体分析。

参考文献

- [1] Chen G, Yin Q, Zhang G, et al. Fusion-diffusion electron beam welding of aluminum-lithium alloy with Cu nano-coating[J]. *Materials & Design*, 2020, 188: 108439.
- [2] Christy J V, Mourad A H I, Sherif M M, et al. Review of recent trends in friction stir welding process of aluminum alloys and aluminum metal matrix composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(11): 3281-3309.
- [3] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. *Materials science and engineering: R: reports*, 2005, 50(1-2): 1-78.
- [4] Meng X, Huang Y, Cao J, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding[J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 115: 100706.
- [5] Ahmed M M Z, El-Sayed Seleman M M, Fydrych D, et al. Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: The current progress and state-of-the-art review[J]. *Materials*, 2023, 16(8): 2971.
- [6] Gera D, Fu B, Suhuddin U F H R, et al. Microstructure, mechanical and functional properties of refill friction stir spot welds on multilayered aluminum foils for battery application[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13: 2272-2286.
- [7] Sabry N, Stroh J, Sediako D, et al. Stress characterization for friction-stir-welded electric vehicle battery trays with application of neutron diffraction[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 101: 1109-1123.
- [8] 徐祥来. 搅拌摩擦焊 H13 钢工具强韧性梯度调控与接头缺陷研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [9] 于凡淇. 船用铝合金搅拌摩擦焊接头组织性能研究与数据挖掘优化[D]. 黑龙江哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [10] da Cunha P H C P, Lemos G V B, Bergmann L, et al. Effect of welding speed on friction stir welds of GL E36 shipbuilding steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(1): 1041-1051.
- [11] Zhang H J, Sun S L, Liu H J, et al. Characteristic and mechanism of nugget performance evolution with rotation speed for high-rotation-speed friction stir welded 6061 aluminum alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 544-552.
- [12] Zhang H, Chen S, Zhang Y, et al. Effect of high rotational-speed friction-stir welding on microstructure and properties of welded joints of 6061-t6 al alloy ultrathin plate[J]. *Materials*, 2021, 14(20): 6012.
- [13] Kalinenko A, Kim K, Vysotskiy I, et al. Microstructure-strength relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 793:

139858.

- [14] Abioye T E, Zuhailawati H, Anasyida A S, et al. Investigation of the microstructure, mechanical and wear properties of AA6061-T6 friction stir weldments with different particulate reinforcements addition[J]. Journal of materials research and technology, 2019, 8(5): 3917-3928.
- [15] Gharavi F, Matori K A, Yunus R, et al. Corrosion behavior of Al6061 alloy weldment produced by friction stir welding process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2015, 4(3): 314-322.
- [16] Peng Y, Huang B, Zhong Y, et al. Electrochemical corrosion behavior of 6061 Al alloy under high rotating speed submerged friction stir processing[J]. Corrosion Science, 2023, 215: 111029.
- [17] Chen M, Ou Y, Fu Y, et al. Effect of friction stirred Al-Fe-Si particles in 6061 aluminum alloy on structure and corrosion performance of MAO coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 304: 85-97.
- [18] Fathi J, Ebrahimzadeh P, Farasati R, et al. Friction stir welding of aluminum 6061-T6 in presence of watercooling: Analyzing mechanical properties and residual stress distribution[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2019, 2(2): 107-115.
- [19] 岑升波, 邵长春, 赵忠伟. 焊接速度对 2219 铝合金双面搅拌摩擦焊接头力学性能及残余应力的影响[J]. 装备制造技术, 2023(09), : 27-29+44.
- [20] Ogunsemi B T, Abioye T E, Ogedengbe T I, et al. A review of various improvement strategies for joint quality of AA 6061-T6 friction stir weldments[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 1061-1089.
- [21] Ahmed S, Saha P. Selection of optimal process parameters and assessment of its effect in micro-friction stir welding of AA6061-T6 sheets[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(7-8): 3045-3061.
- [22] 曹伟. AZ61 镁合金搅拌摩擦连接工艺研究[D]. 安徽芜湖: 安徽工程大学, 2023.
- [23] Dawood H I, Mohammed K S, Rahmat A, et al. The influence of the surface roughness on the microstructures and mechanical properties of 6061 aluminium alloy using friction stir welding[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 270: 272-283.
- [24] Hassanifard S, Ghiasvand A, Hashemi S M, et al. The effect of the friction stir welding tool shape on tensile properties of welded Al 6061-T6 joints[J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103457.
- [25] Li Y Z, Zan Y N, Wang Q Z, et al. Effect of welding speed and post-weld aging on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded B4Cp/6061Al-T6

- composites[J]. Journal of materials processing technology, 2019, 273: 116242.
- [26] Liu B, Chen W, Kong D, et al. Study on Microstructure and Properties of Friction Stir Welding Aluminum-Lithium Alloy in Lapped Joints[J]. Journal of Aerospace Science and Technology, 2017, 5(4): 189-193.
- [27] Abioye T E, Zuhailawati H, Anasyida A S, et al. Investigation of the microstructure, mechanical and wear properties of AA6061-T6 friction stir weldments with different particulate reinforcements addition[J]. Journal of materials research and technology, 2019, 8(5): 3917-3928.
- [28] 刘刚, 王礼凡, 朱磊等. 6061 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2022(04): 36-40.
- [29] Naumov A, Morozova I, Rylkov E, et al. Metallurgical and mechanical characterization of high-speed friction stir welded AA 6082-T6 aluminum alloy[J]. Materials, 2019, 12(24): 4211.
- [30] Xu W, Li Z, Sun X. Effect of welding speed on mechanical properties and the strain-hardening behavior of friction stir welded 7075 aluminum alloy joints[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26: 1938-1946.
- [31] 李轩柏. 6082-T6 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊工艺及性能优化[D]. 甘肃兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [32] 袁鸽成, 梁春朗, 刘洪等. 搅拌摩擦焊焊接 5083 铝合金板材焊核区的晶体取向[J]. 焊接学报, 2014, 35(08): 79-82+117.
- [33] Song K H, Fujii H, Nakata K. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of friction stir welded Inconel 600[J]. Materials & Design, 2009, 30(10): 3972-3978
- [34] Gourdet S, Montheillet F. A model of continuous dynamic recrystallization[J]. Acta Materialia, 2003, 51(9): 2685-2699.
- [35] 黄达. 2A12/6061 异种铝合金搅拌摩擦连接工艺研究[D]. 安徽芜湖: 安徽工程大学, 2023.
- [36] Abbass M K, Abd H H. A comparison study of mechanical properties between friction stir welding and TIG welded joints of aluminum alloy (Al 6061-T6)[J]. Engineering and Technology Journal, 2013, 31(14): 2701-2715.
- [37] Jannet S, Mathews P K, Raja R. Comparative investigation of friction stir welding and fusion welding of 6061-T6 and 5083-O aluminum alloy based on mechanical properties and microstructure[J]. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, 2013, 61(2): 181-186.

-
- [38] 康铭, 孙巍, 李鹏伟等. 转速、焊速对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊性能的影响[J]. 铝加工, 2020, (02): 8-11+24.
 - [39] Nagu K, Kumar A. Effect of tool rotational speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6061-T6 alloy using brass interlayer[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33: 5486-5491.
 - [40] Naumov A, Morozova I, Rylkov E, et al. Metallurgical and mechanical characterization of high-speed friction stir welded AA 6082-T6 aluminum alloy[J]. Materials, 2019, 12(24): 4211.
 - [41] Liu H J, Hou J C, Guo H. Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2013, 50: 872-878.
 - [42] Zhang L, Zhong H, Li S, et al. Microstructure, mechanical properties and fatigue crack growth behavior of friction stir welded joint of 6061-T6 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 135: 105556.
 - [43] 徐安莲. 镁合金搅拌摩擦焊接头的显微组织及力学性能[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
 - [44] Xu Y, Ke L, Ouyang S, et al. Precipitation behavior of intermetallic compounds and their effect on mechanical properties of thick plate friction stir welded Al/Mg joint[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1059-1069.
 - [45] Kalinenko A, Vysotskiy I, Malopheyev S, et al. Influence of the weld thermal cycle on the grain structure of friction-stir joined 6061 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2021, 178: 111202.
 - [46] Mabuwa S, Msomi V. Comparative analysis between normal and submerged friction stir processed friction stir welded dissimilar aluminium alloy joints[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 9632-9644.
 - [47] Choudhary S, Choudhary S, Vaish S, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al 6061aluminum alloy joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 25: 563-569.
 - [48] 桑宁. 6061 铝合金同步双面搅拌摩擦焊接工艺和焊缝性能研究[D]. 山东济南: 山东大学, 2024.
 - [49] Vysotskiy I V, Malopheyev S S, Mironov S Y, et al. Optimization of friction-stir welding of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Physical Mesomechanics, 2020, 23: 402-429.
 - [50] 李于朋. 6082-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头的组织与性能研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2021.7.
 - [51] Dong P, Li H, Sun D, et al. Effects of welding speed on the microstructure and hardness in

- friction stir welding joints of 6005A-T6 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 524-531.
- [52] Liang Z, Wang X, Cai C, et al. Microstructure and mechanical properties of thick plate friction stir welds for 6082-T6 aluminum alloy[J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2019, 38(2019): 525-532.
- [53] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [54] Morozova I, Obrosova A, Naumov A, et al. Impact of impulses on microstructural evolution and mechanical performance of Al-Mg-Si alloy joined by impulse friction stir welding[J]. *Materials*, 2021, 14(2): 347.
- [55] Shinde G, Arakerimath R. Experimental investigation on impact energy of friction stir welded aluminum and copper dissimilar joint using full factorial method[J]. *Metallurgical and Materials Engineering*, 2022, 28(2): 335-349.
- [56] 姜迪. 铝合金 S 型轨迹搅拌摩擦连接区域完整性分析[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2021.
- [57] 张忠科, 张剑飞, 于洋等. 厚板铝合金搅拌摩擦焊接头的冲击性能[J]. *材料导报*, 2018, 2(22): 3936-3940.
- [58] Zainelabdeen I H, Al-Badour F A, Adesina A Y, et al. Friction stir surface processing of 6061 aluminum alloy for superior corrosion resistance and enhanced microhardness[J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2023, 6(1): 129-139.
- [59] 许莉. 高强铝合金 6061 搅拌摩擦焊接头耐腐蚀性能研究[D]. 四川成都: 西华大学, 2017.
- [60] Gharavi F, Matori K A, Yunus R, et al. Corrosion evaluation of friction stir welded lap joints of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(3): 684-696.
- [61] Alfattani R, Yunus M, Mohamed A F, et al. Assessment of the corrosion behavior of friction-stir-welded dissimilar aluminum alloys[J]. *Materials*, 2021, 15(1): 260.
- [62] Tahmasbi K, Mahmoodi M, Tavakoli H. Corrosion resistance of aluminum alloy AA7022 wire fabricated by friction stir extrusion[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(8): 1601-1609.
- [63] Qian S, Zhang T, Chen Y, et al. Effect of ultrasonic impact treatment on microstructure and corrosion behavior of friction stir welding joints of 2219 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 1631-1642.
- [64] Liu Q, Chen G, Zeng S, et al. The corrosion behavior of Mg-9Al-xRE magnesium alloys modified by friction stir processing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 851:

156835.

- [65] Li X, Li C, Liang Z, et al. Research on the corrosion behavior of double-side friction stir welded 6082Al alloy thick plate[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35(9): 993-1005.
- [66] Wang W, Chen S Y, Qiao K, et al. Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of Mg - Al - Ca alloy prepared by friction stir processing[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2021, 35: 703 - 713.
- [67] Cabrini M, Bocchi S, D'Urso G, et al. Effect of load on the corrosion behavior of friction stir welded AA 7075-T6 aluminum alloy[J]. *Materials*, 2020, 13(11): 2600.
- [68] Kumar K K, Kumar A, Satyanarayana M. Effect of friction stir welding parameters on the material flow, mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar AA5083-AA6061 joints[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(6): 2901-2917.
- [69] Ma Y L, Xu H B, Liang Z Y, et al. Corrosion resistance of friction stir welded Al - Cu - Li alloy AA2099-T8[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33: 127-134.
- [70] Kumar R, Chatterjee S, Hloch S, et al. Wear characteristics and defects analysis of friction stir welded joint of aluminium alloy 6061-T6[J]. *Eksploracja i niezawodność*, 2016, 18(1): 128-135.
- [71] Franke D, Rudraraju S, Zinn M, et al. Understanding process force transients with application towards defect detection during friction stir welding of aluminum alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 54: 251-261.
- [72] Liu H, Hu Y, Peng Y, et al. The effect of interface defect on mechanical properties and its formation mechanism in friction stir lap welded joints of aluminum alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 244-254.
- [73] Zeng X H, Xue P, Wang D, et al. Material flow and void defect formation in friction stir welding of aluminium alloys[J]. *Science and Technology of Welding and joining*, 2018, 23(8): 677-686.
- [74] 刘敬萱. 6005A 铝合金搅拌摩擦焊接头组织、力学性能及耐蚀性能研究[D].北京: 北京有色金属研究总院, 2022.
- [75] Qian J, Li J, Sun F, et al. An analytical model to optimize rotation speed and travel speed of friction stir welding for defect-free joints[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(3-4): 175-178.
- [76] Sujith S V, Mulik R S. Thermal history analysis and structure-property validation of friction stir welded Al-7079-TiC in-situ metal matrix composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 812: 131-152.

- [77] Silva-Magalhães A, De Backer J, Martin J, et al. In-situ temperature measurement in friction stir welding of thick section aluminium alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 12-17.
- [78] 慕铠丞, 王进, 王勇强等. 基于响应面法的 5052 铝合金搅拌摩擦焊接工艺参数研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(02): 37-43.
- [79] 范文学, 陈芙蓉. 基于响应面法 7A52 高强铝合金 FSW 接头抗拉强度预测及优化[J]. 焊接学报, 2021, 42(09): 55-60+100.
- [80] 高祎晗, 国旭明, 莫春立. 铝合金无减薄搅拌摩擦焊工艺优化及特征分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(04): 141-147+167.

攻读硕士学位期间的论文目录

[1]沈新意,汪洪峰,王建彬,宋妮妮 6061 铝合金搅拌摩擦连接区性能分析[J]. 热加工工艺(已录用)

参与的科研项目

[1]安徽省重点研发项目(批准号:202004a05020025, 批准号:202104b11020011)

[2]安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2021A1042)

[3]安徽省优秀青年人才支持一般项目(gxyq2019086)。

致谢

在完成这篇硕士论文的过程中，我深切感受到了来自多方面的支持和帮助，对此，我怀着无比感激的心情，向所有给予我帮助和支持的人致以诚挚的谢意。

首先，我要特别感谢我的导师汪洪峰教授以及宋娓娓老师，汪老师和宋老师不仅在学术上给予了我宝贵的指导，而且在生活中也给予我许多关怀和支持。在论文的选题、研究以及撰写过程中，导师的严谨学风和深厚的学术造诣给我留下了深刻的印象，每一次讨论都让我受益匪浅。

感谢安徽工程大学机械工程学院的领导和老师对我的帮助，感谢黄山学院学科办的领导，感谢黄山学院机电工程学院的领导和老师，您们为我的联合培养提供了强有力的平台，还要感谢课题组的姜迪、曹守臻、葛小乐、蒲家飞、董旗老师以及同窗韩俣和嵇道远两位同学，是他们的帮助和支持让我的研究工作得以顺利进行。在实验室的日常生活中，大家相互帮助，共同进步，创造了一个既严谨又温馨的学习环境。

此外，我还要感谢我的家人，他们对我的理解和支持是我最坚强的后盾。在我遇到困难和挑战时，家人总是给予我无限的鼓励和安慰，让我能够坚持下去，并在学业上取得进步。

感谢所有直接或间接对我的学业和论文完成给予帮助的人。每一份支持和鼓励都是我宝贵的财富，也是我继续前进的动力。

最后感谢评审专家和答辩专家对我的论文指导，您的指导将会影响我一生学术生涯，谢谢！

尚德敏学 唯实惟新

