

焊接参数对6082-T6挤压铝合金搅拌摩擦焊接头性能的影响

蒋洋¹, 陈学良², 冯存义³, 朱素³

1. 株洲春华实业有限责任公司 湖南株洲 412003
2. 中车长江集团科技开发分公司 湖北武汉 430200
3. 中车株洲车辆有限公司 湖南株洲 412003

摘要: 以工业应用中使用较为广泛的6082-T6挤压铝型材为对象, 采用搅拌摩擦焊并选取不同焊接参数, 对7mm板厚6082-T6挤压型材进行接头性能研究。研究结果表明: 焊缝接头性能对焊接参数较为敏感。当搅拌头转速为1500r/min、焊接速度为 (550 ± 50) mm/min时, 焊接接头表面成形良好, 接头的抗拉强度、屈服强度 $\geq$ 标准值70%, 弯曲试样无裂纹。当搅拌头转速提高或焊接速度降低时, 焊接过程中飞边量增多, 接头表面质量差, 甚至产生沟槽缺陷; 当搅拌头转速降低或焊接速度提高时, 表面成形较好, 但焊接接头性能下降。

关键词: 搅拌摩擦焊; 6082-T6挤压铝型材; 焊接参数; 接头性能

Impact of welding parameters on properties of friction stir welded joint of 6082-T6 extruded aluminum alloy

JIANG Yang¹, CHEN Xueliang², FENG Cunyi³, ZHU Su³

1. Zhuzhou Chunhua Industrial Co., Ltd., Zhuzhou 412003, Hunan, China
2. Science & Technology Branch, CRRC Yangtze Group, Wuhan 430200, Hubei, China
3. CRRC Zhuzhou Rolling Stock Co., Ltd., Zhuzhou 412003, Hunan, China

Abstract: The 6082-T6 extruded profiles widely used in industrial applications are selected for this study. The FSW (friction stir welding) is adopted, and the properties of weld joints between the profiles with specification of 7mm are studied by selecting different process parameters. The results shown that the properties of weld joints are sensitive to welding parameters. When the rotating speed of the stirring head is 1500r/min and the welding speed is (550 ± 50) mm/min, good welding formation can be achieved on the joint surface, the tensile strength and yield strength of the joint are $\geq 70\%$ of the standard value, and no crack is identified on the bending specimen. When the rotating speed is increased or the welding speed is decreased, fins during the welding process are increased, and poor welding quality is identified on the joint surface, even groove defects are identified. When the rotating speed is reduced or the welding speed is increased, good surface formation can be achieved, however, the joint properties were decreased.

Keywords: friction stir welding; 6082-T6 extruded aluminum alloy; welding parameters; joint properties

1 序言

随着铁路货车轻量化制造、工程化应用的推

广, 使用铝合金制品代替碳素钢结构件已成为制造趋势。由于铝合金熔化焊接对环境温度、相对湿

第一作者: 蒋洋, 本科, 主要从事轨道交通搅拌摩擦焊工艺研究, E-mail: 576641792@qq.com。

度、通风等因素极度敏感，因此生产单位需要建立恒温车间才能满足工艺需求；焊前坡口清理工序繁杂；焊接过程中需要添加焊丝；中厚板需要采用堆焊工艺，在焊接过程中容易因操作原因而产生裂纹、气孔等内部缺陷^[1, 2]；焊后外观不良，打磨量过大等，因此铝合金熔化焊适用于中小型、结构复杂的铝合金结构件焊接。

对于大型的长直平面结构和对焊缝有外观要求的铝合金结构件焊接，采用搅拌摩擦焊较为适合。搅拌摩擦焊属于固相焊接技术^[3]，在室温条件即可施焊，对环境要求不高；焊前清理较为简单；焊接过程中不需要添加焊丝，绿色环保；若焊前装配得当，则焊后不易产生缺陷，产品质量稳定可控。与铝合金熔化焊相比，搅拌摩擦焊接头性能要提高10%~20%^[4]。

影响搅拌摩擦焊焊接质量主要有两大因素：一是设备精度及其附加工装的稳定性；二是采用的搅拌头形式及其对应的合理焊接参数。

本文以7mm板厚6082-T6挤压铝型材为研究对象，接头的抗拉强度、屈服强度值 $\geq$ 标准值70%，弯曲试样无裂纹为目标，采用搅拌摩擦焊工艺从初始焊接参数开展焊接试验（转速1400r/min、焊接速度1000mm/min），整个试验过程通过调整转速与焊接速度比值，反复论证后得到相对稳定的焊接参数及典型接头性能，为推进搅拌摩擦焊工艺在挤压铝合金长直焊缝工程化应用提供了技术支持，具有较大的工程意义。

2 试验方法

试验所用材料为符合GB/T 14846—2014《铝及铝合金挤压型材尺寸偏差》“高精级”要求的7mm厚6082-T6挤压铝型材，母材抗拉强度 $\geq$ 310MPa、屈服强度 $\geq$ 260MPa。焊缝接头为BW（II）对接接头，单件试板尺寸为300mm $\times$ 150mm $\times$ 7mm，选配板厚差 $\leq$ 0.2mm。6082-T6挤压铝型材属于Al-Mg-Si系，其化学成分见表1。

表1 6082-T6挤压铝型材化学成分（质量分数）（%）

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0.1	0.7~1.3	0.5	0.4~1.0	0.6~1.2	0.2	0.25	0.1	余量

在北京赛福斯特有限公司生产的型号为FSW-4LH-4012水平立焊式搅拌摩擦焊接设备上进行试

验，选用具有代表性的9组焊接参数，分别是搅拌头转速为1200r/min、1500r/min、1800r/min，焊接速度为300mm/min、550mm/min、800mm/min，两两搭配。试验用搅拌头如图1所示，其材质为工具钢H13，搅拌头为外凸螺旋线制有三切面结构，轴肩直径20mm，搅拌针长6.8mm，搅拌头旋转方向为逆时针。设备主轴倾角1.6°、恒压力30kN，程序下压量0.1mm。焊前采用不锈钢丝轮刷对焊缝表面和对接面进行机械打磨，再用抹布擦拭干净。



图1 试验用搅拌头

试验完成后，按ISO 25239：2020《搅拌摩擦焊》试验规则进行取样。首先去除试板首尾两端焊接不稳定区约50mm，再依次切取弯曲试样、拉伸试样、金相试样。金相试样经打磨（依次采用80目、280目、800目、1200目砂纸）、抛光（呢绒），采用20%NaOH溶液侵蚀60s后用清水冲洗并吹干，观察试样宏观金相形貌并拍照记录。再将同一试样经抛光（呢绒）、腐蚀（Keller's试剂：2mL的HF+3mL的HCl+5mL的HNO₃+190mL的H₂O）、清水冲洗、滴酒精吹干，使用徕卡DMI5000M型光学显微镜放大100倍观察试样接头形貌，分析试样微观组织。拉伸和弯曲试验在Wintime WDW型万能材料试验机上进行，分别测定接头的抗拉强度、屈服强度、180°背弯性能，试验时机头行走速度为5mm/min，因搅拌摩擦焊焊缝正面性能高于背面，所以本文弯曲试验主要针对焊缝背部。

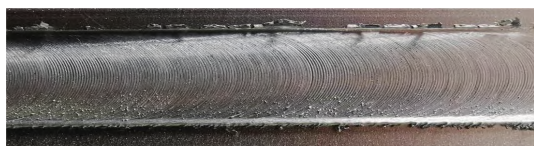
3 试验结果及讨论

3.1 表面成形

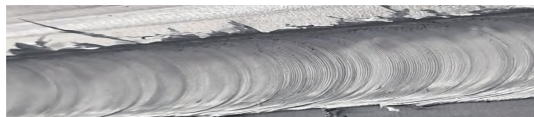
搅拌摩擦焊原理是通过高速旋转的搅拌头扎入焊缝正中位置，利用轴肩及搅拌针与材料剧烈摩擦产生热量，使焊缝两侧材料局部热塑化，同时在搅拌针和轴肩螺旋结构的机械力作用下，促使搅拌头前进侧（AS）和后退侧（RS）热塑化材料相互挤

压熔合实现连接。搅拌摩擦焊相较于其他焊接方式的典型特征，是焊后在整个焊缝形成规则致密半圆形弧纹^[5]，以及搅拌头外径切线方向产生飞边，飞边是热塑化材料被搅拌头挤出焊缝所产生的^[6]。当转速为1500r/min、焊接速度为550mm/min时（见图2a），焊缝的飞边较小且焊缝表面弧纹规则，焊缝外观整体良好。与转速1500r/min、焊接速度550mm/min相比，当转速不变、焊接速度降低到300mm/min（见图2b），或焊接速度不变、转速提高至1800r/min时（见图2d），焊缝单位体积热输入量增加，材料被软化程度过高，恒压力30kN设定会促使轴肩扎入量增大，形成较大飞边，焊缝外观成形较差；当转速降低至1200r/min、焊接速度增加至800mm/min时（见图2e），焊缝半圆弧纹规则，焊缝表面成形相较于转速1500r/min、焊接速度550mm/min更优。

因此，当搅拌摩擦焊焊接过程中出现焊缝弧纹紊乱时，应酌情减少焊缝单位体积热输入量，有利于焊缝更快速冷却，形成规则致密纹路，提高焊缝表面成形质量。



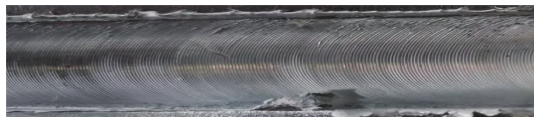
a) 转速1500r/min、焊接速度550mm/min



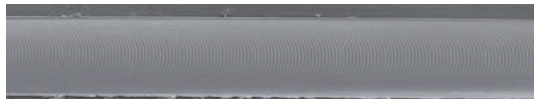
b) 转速1500r/min、焊接速度300mm/min



c) 转速1800r/min、焊接速度300mm/min



d) 转速1800r/min、焊接速度550mm/min



e) 转速1200r/min、焊接速度800mm/min

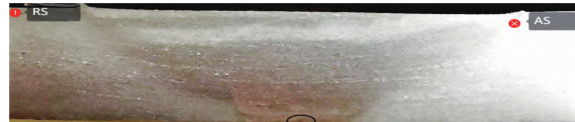
图2 搅拌摩擦焊不同参数接头表面成形

3.2 宏观金相

搅拌摩擦焊工艺中，当转速较低、焊接速度较高时，焊缝单位体积内热输入量较小，特别是搅拌针针尖部位与该区域材料摩擦产生的热量，不足以让焊缝两侧材料足够热塑化并充分熔合，容易在焊缝根部形成一道类似裂纹的细线，通常称为弱连接。当转速为1200r/min、焊接速度为800mm/min时，焊缝根部弱连接较为明显（见图3a）；当转速提高至1500r/min时，焊接速度保持800mm/min不变，根部弱连接深度有所降低（见图3b）；当转速提高至1500r/min、焊接速度降低至550mm/min时，根部弱连接减小甚至消失（见图3c）。随着焊缝单位体积热输入量继续增加，焊接过程中材料被氧化程度加剧，特别是焊缝对接面氧化物在搅拌针机械作用下，呈螺旋状均匀分布在焊缝中部位置，宏观金相变为“S”形状，简称“S”线（见图3d、图3e）。当转速与焊接速度比值由低到高转变时，“S”线宽度呈现由粗到细再到粗的变化规律。



a) 转速1200r/min、焊接速度800mm/min



b) 转速1500r/min、焊接速度800mm/min



c) 转速1500r/min、焊接速度550mm/min



d) 转速1800r/min、焊接速度550mm/min



e) 转速1200r/min、焊接速度300mm/min

图3 搅拌摩擦焊不同焊接参数下的接头宏观金相

3.3 微观金相

在搅拌摩擦焊焊接过程中，“S”线理论上一直存在。铝合金氧化物熔点高达2000℃以上，焊接

过程中产生的摩擦热量不能将其熔化，同时材料暴露在空气中，即便是焊前过量打磨，也不能将材料表面氧化物完全去除。为了减少由氧化物混入造成焊缝性能降低的现象，应适当减少焊前打磨工序与焊接工序的间隔时间，达到降低焊缝中氧化物总量的目的。

随着搅拌头高速旋转，在轴肩螺旋线和搅拌针螺旋线旋转机械作用力下，氧化物沿搅拌针锥形螺旋切线方向，呈现一定规律的上下运动，贯穿于整个焊缝中。试验表明，选择不同参数进行搅拌摩擦焊焊接，焊缝截面微观金相显示不同：当转速与焊接速度比值 <2.5 或 >4 时，“S”线较粗大（见图4a~c、图4f）；当转速与焊接速度比值介于 $2.5\sim4$ 时，“S”线较细小（见图4d、图4e），试验结果与上述宏观金相基本吻合。

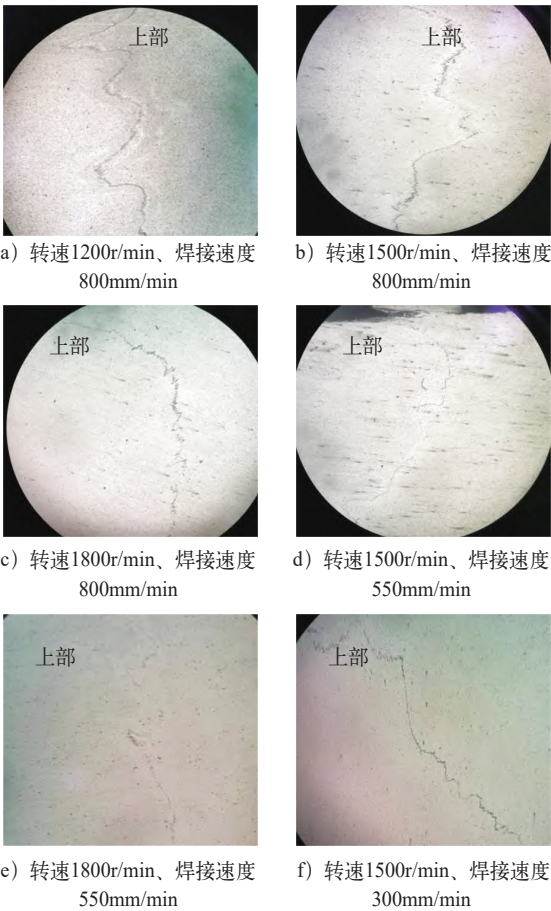


图4 搅拌摩擦焊不同焊接参数下的接头微观金相

3.4 接头性能

搅拌摩擦焊在不同焊接参数下的接头性能见表2。背弯试验典型结果如图5所示。

表2 不同焊接参数下的接头性能

编号	转速 / (r/min)	焊接速度 / (mm/min)	转速/焊接速度	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	180° 背弯结果
1	1200	300	4	242	180	无裂纹
2	1200	550	2.18	229	172	裂纹
3	1200	800	1.5	217	165	脆断
4	1500	300	5	241	179	无裂纹
5	1500	550	2.73	257	195	无裂纹
6	1500	800	1.88	234	173	裂纹
7	1800	300	6	177	57	脆断
8	1800	550	3.27	238	185	无裂纹
9	1800	800	2.25	231	177	裂纹

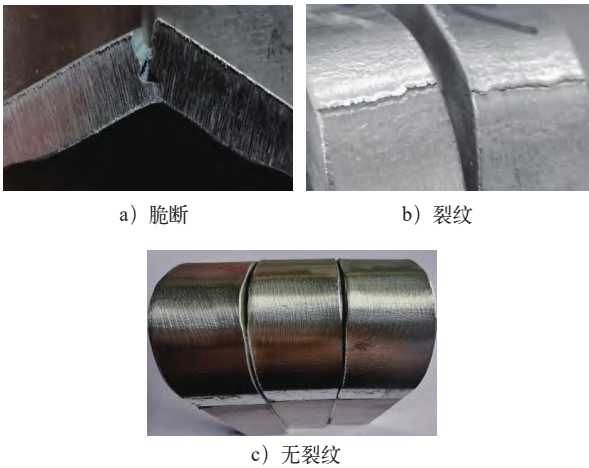


图5 搅拌摩擦焊背弯试验典型结果

由表2可知，当转速不变，焊接速度由高到低改变时，接头性能整体呈现由低到高的趋势。接头的抗拉强度、屈服强度值符合工艺要求的3组参数分别是：转速1200r/min、焊接速度300mm/min；转速1500r/min、焊接速度550mm/min和转速1800r/min、焊接速度550mm/min。

表2中编号7的接头，因焊接过程中热输入量过大，焊缝材料在搅拌头旋转机械作用力下，沿着轴肩切线方向被挤出，焊缝熔池缺料严重产生表面沟槽缺陷，焊缝结构被破坏，接头抗拉强度、屈服强度值不合格。其余数据中，接头抗拉强度值最高257MPa、最低217MPa；屈服强度值最高195MPa，最低165MPa。结合180° 背弯试验结果可得出以下规律。

1) 当转速与焊接速度比值 >4 时，焊缝单位体积热输入较大，材料热塑化程度高。第一，受主轴恒压设置影响，焊接时搅拌头扎入深度逐渐增加，材料以大飞边的形式被挤出焊缝，焊缝减薄量增加。第二，材料容易黏结在搅拌头轴肩表面（类似

于铝合金铣削时黏刀现象)，焊缝表面刮伤严重。第三，高温条件下材料氧化程度增加，氧化物随着搅拌针机械运动至焊缝中部，堆积产生粗化型“S”线。然而由于热输入足够，背弯试验一般无裂纹（见图5c），但是接头的抗拉强度和屈服强度值较低。

2) 当转速与焊接速度比值 <2.5 时，焊缝单位体积热输入过小，材料热塑化程度低、流动性差，当转速与焊接速度比值特别低时，焊缝内部还容易形成隧道形缺陷，同时焊缝根部形成明显弱连接形貌，背弯试验过程中，弱连接区域受拉应力容易转变为裂纹源并扩大，导致焊缝脆断（见图5a）；部分试样在试验结束时焊缝背部出现表面裂纹（见图5b）。同组焊缝出现背弯脆断现象，对应的拉伸试样抗拉强度与屈服强度值较低，试验结束时从焊缝中间位置断开，断口呈现类似“S”形（见图6a）。



a) “S”形非正常拉伸试验断口



b) “45°”型正常拉伸试验断口

图6 搅拌摩擦焊拉伸试验两种常见断口截面形貌

当转速与焊接速度比值介于 $2.5\sim4$ 之间时，焊缝单位长度热输入足够，焊缝表面成形良好，接头抗拉强度与屈服强度较高，拉伸试验断口以近 45° 倾角从焊缝前进侧热影响区处断开（见图6b）。背弯试验符合技术要求。

采集各接头在拉伸试验过程中的力-变形数据，绘制如图7所示曲线。从图7中可看出，焊接参数为

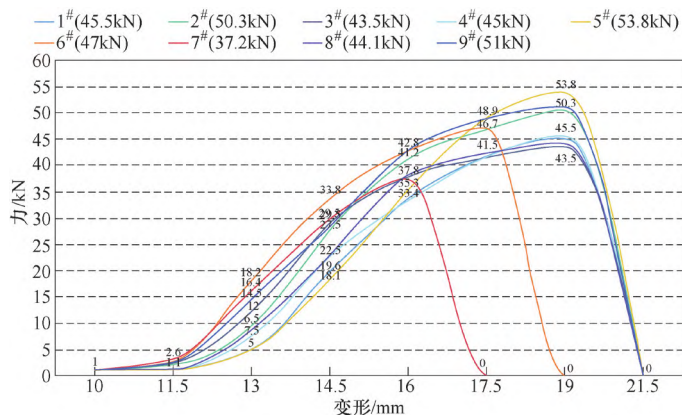


图7 不同参数搅拌摩擦焊接头拉伸试验力-变形曲线

转速 1500r/min 、焊接速度 550mm/min 的接头抗变形能力最优，其出现明显屈服点，被拉断时承载的力值均高于其他接头。

4 结束语

1) 搅拌摩擦焊施焊的重要前提是搅拌头必须与焊缝两侧材料充分接触并产生足够热量。搅拌针长度的选用一般以焊缝薄板侧为基准，厚板侧多余材料则以飞边形式被挤出焊缝，板厚差越大则飞边越大。铝合金挤压成形时，焊缝两侧不同型材的板厚很难做到一致，因此对焊缝表面成形质量和接头性能要求较高时，焊前板厚差应控制在较小范围内。

2) 当产品对焊缝屈服强度要求较高，或焊缝背部会承受较大拉应力等应用场景时，应适当提升设备主轴转速，增加焊缝单位体积的热输入量，使焊接过程中材料热塑化更充分，提升背弯性能。但同时应综合考虑高转速带来的如表面成形较差、焊缝内部“S”线粗化等不利影响。

3) 对于板厚为 7mm 的6082-T6挤压铝型材，采用搅拌摩擦焊焊接工艺批量化生产，焊接参数选用转速 1500r/min 、焊接速度 $(550\pm50)\text{mm/min}$ 比较合适，焊缝综合性能较好。当板厚差为 $0.2\sim0.3\text{mm}$ 时，焊接速度选用 500mm/min ；当板厚差 $<0.1\text{mm}$ 时，焊接速度可选用 600mm/min 。

参考文献：

- [1] 吴圣川，唐涛，李正. 高强铝合金焊接的研究进展[J]. 现代焊接，2011（2）：5-8.
- [2] 栾国红. 飞机制造中的搅拌摩擦焊技术及其发展[J]. 航空制造技术，2009（20）：26-31.
- [3] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50（1）：1-78.
- [4] 张华，林三宝，吴林，等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报，2003，24（3）：91-96.
- [5] 王大勇，冯吉才. 搅拌摩擦焊缝表面弧形纹形成模型[J]. 焊接学报，2003，24（5）：42-44.
- [6] 刘震磊，催祐涛，徐敏强，等. 工艺参数影响2060铝铝合金搅拌摩擦焊接头的成型规律[J]. 焊接学报，2016，37（7）：79-82.

MW 20240507