

DOI : 10.3901/JME.2015.22.054

# 包铝层对 7B04-O 铝合金薄板搅拌摩擦搭接性能影响\*

杨 超<sup>1</sup> 王继杰<sup>1</sup> 韩培培<sup>2</sup> 杜宝瑞<sup>2</sup> 刘晓寒<sup>2</sup>  
薛 鹏<sup>3</sup> 马宗义<sup>3</sup> 倪丁瑞<sup>3</sup>

- (1. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 沈阳 110036 ;
2. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 沈阳 110850 ;
3. 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室 沈阳 110016)

**摘要 :** 对 2 mm 厚的带有包铝层的退火态(O 态)7B04 铝合金薄板进行搅拌摩擦搭接焊接(Friction stir lap welding, FSLW)。分析包铝层、焊接参数、热处理对 FSLW 接头质量、微观组织及力学性能的影响。结果表明,焊核中的原始包铝层无法被完全打碎分散,其中前进侧的分散比较明显,而后退侧的包铝层则基本保持了原来状态。通过增加转速或轴肩尺寸,可以有效消除焊核中心的孔隙缺陷,但仍无法使界面处的包铝层充分破碎分散。随着转速增加或焊接工具轴肩尺寸增大,FSLW 接头强度提高。包铝层对焊态 FSLW 接头强度影响不明显,接头强度约为母材强度的 94%;淬火后,包铝层对接头强度的影响显著,接头强度仅为淬火态母材的 64%。

**关键词 :** 高强铝合金;包铝层;搅拌摩擦搭接焊;微观组织;力学性能  
**中图分类号 :** TG406

## Effect of Al Clad Layer on Friction Stir Lap Welded 7B04-O Al Sheet

YANG Chao<sup>1</sup> WANG Jijie<sup>1</sup> HAN Peipei<sup>2</sup> DU Baorui<sup>2</sup> LIU Xiaohan<sup>2</sup>  
XUE Peng<sup>3</sup> MA Zongyi<sup>3</sup> NI Dingrui<sup>3</sup>

- (1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036;
2. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850;
3. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

**Abstract :** Annealed Al-coating 7B04 Al sheets in thickness of 2 mm are subjected to friction stir lap welding (FSLW). The effect of alclad cladding, welding parameters and heat treatment on the quality, microstructure and mechanical properties of the FSLW joints are investigated. The results show that the original alclad layers can not be completely broken up and dispersed into the nugget zone. The dispersion of the alclad layers in the advancing side is quite obvious, however this is not the case in the retreating side, which is basically maintained as the original state. The pore defect in the nugget zone can be effectively eliminated by increasing the rotation rate and the shoulder size. The tensile strength of the FSLW joint increases with increasing the rotation rate or the shoulder size. The effect of the alclad layer does not show apparent effect on the tensile strength of the welded FSLW joints, and the strength of the joints is about 94% of that of the base material; however, this effect is obvious for quenched joints, the joint strength is only 64% of that of the quenched base material.

**Key words :** high-strength aluminum alloy ; alclad layer ; friction stir lap welding ; microstructure ; tensile properties

## 0 前言

自 1991 英国焊接研究所(The Welding Institute,

TWI)研发申请专利以来<sup>[1-3]</sup>,搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)经过十几年的发展,已成功地应用于航空航天、轻轨列车及汽车制造等工业领域<sup>[4-5]</sup>,其在铝合金、镁合金、铜合金等材料的连接方面均有突出表现。FSW 接头形式多样,其中对接焊是以往报道最为详尽的形式。近年来,随着航空

\* 国家自然科学基金资助项目(51331008)。20150510 收到初稿,20150812 收到修改稿

工业的发展, 搭接焊已越来越多地应用于机舱结构件、飞机蒙皮等以替代传统铆接。搭接焊可以实现与铆接相当强度的连接<sup>[6]</sup>。

7B04是一种航空航天用高强铝合金, 被用作机身蒙皮、上下机翼梁壁、机舱壁等<sup>[7-8]</sup>, 在航空航天领域应用较广, 其中7B04铝合金薄板占较大比重。其在机身结构件中的连接除了对接之外, 搭接占很大比重, 以搭接代替传统的铆接, 其抗拉强度、剪切强度、疲劳强度等指标与铆接相当<sup>[9-11]</sup>。

铝合金在应用时通常会经过系列处理以满足特定的性能要求。为提高耐腐蚀性能, 铝合金表面通常会包覆一层纯铝或Al-Zn合金。包铝层的存在通常会对焊接接头的组织性能产生一定影响, 需要阐明其影响并通过调节焊接工艺参数予以控制<sup>[12-15]</sup>。然而目前鲜见有关这方面的研究报告。本文对带有包铝层的2 mm厚7B04-O铝合金薄板进行搅拌摩擦搭接焊接(Friction stir lap welding, FSLP), 分析焊接参数以及包铝层对焊缝质量、微观组织及力学性能的影响。

## 1 试验过程

试验所用材料为带有包铝层的退火态7B04铝合金薄板(7B04-O), 板材尺寸2 mm×90 mm×200 mm。

焊接设备采用FSW-5LM-020型数控搅拌摩擦焊机, 钢质工具均带有凹面轴肩, 搅拌针为锥形螺纹针。焊接倾角为2.75°, 压下量控制为0.05 mm。经过多组参数试验, 选定两组参数及两个不同尺寸的工具进行焊接, 焊接参数及焊接工具尺寸如表1所示。

表1 搭接焊FSW参数

序号	样品标记	转速/ (r/min)	焊速/ (mm·min <sup>-1</sup> )	轴肩直径/ mm	搅拌针尺寸/ mm
1	400-200-φ12	400	200	12	M4×2.85
2	400-200-φ20	400	200	20	M6×2.76
3	800-200-φ12	800	200	12	M4×2.85

用光学显微镜(Optical microscope, OM)、扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)和透射电镜(Transmission electron microscope, TEM)对焊缝微观组织进行分析。金相样品垂直于焊缝的横截面取样, 样品经打磨、机械抛光后, 用体积比为NH<sub>3</sub>HCl HF H<sub>2</sub>O=2.5 1.5 1 95的Keller试剂腐蚀进行金相观察。

拉伸性能测试样品垂直于焊缝切取, 宽度为10

mm, 样品分为以前进侧(Advancing side, AS)承力和后退侧(Retreating side, RS)承力样品, 其示意图如图1所示。拉伸试验在SANS-CMT5205电子万能试验机进行, 拉伸样品平行段长40 mm、宽6 mm, 初始应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 分别测试了母材(Base material, BM)纵向、横向的拉伸性能, 并与FSLW样品进行比较。

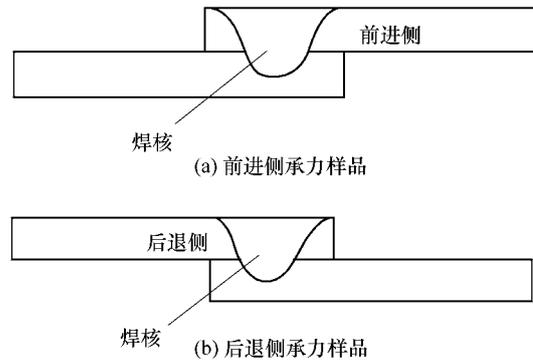


图1 FSLW拉伸样品设计示意图

搭接焊拉伸垂直焊缝方向切取, 每组焊接工艺参数切取8个样品, 其中前进侧承力样品4个, 后退侧承力样品4个, 其中淬火处理样品取前进侧承力与后退侧承力样品各2个。样品编号如表2所示。

表2 包铝7B04-O FSW搭接接头拉伸样品编号

样品状态	样品标记	承力侧	编号
O态	400-200-φ12	前进侧	400-200-AS
O态	400-200-φ20	前进侧	400-200-φ20-AS
O态	800-200-φ12	前进侧	800-200-AS
O态	400-200-φ12	后退侧	400-200-RS
O态	400-200-φ20	后退侧	400-200-φ20-RS
O态	800-200-φ12	后退侧	800-200-RS
淬火态	400-200-φ12	前进侧	Q-400-200-AS
淬火态	400-200-φ20	前进侧	Q-400-200-φ20-AS
淬火态	800-200-φ12	前进侧	Q-800-200-AS
淬火态	400-200-φ12	后退侧	Q-400-200-RS
淬火态	400-200-φ20	后退侧	Q-400-200-φ20-RS
淬火态	800-200-φ12	后退侧	Q-800-200-RS

## 2 试验结果及分析

### 2.1 FSLW焊缝宏观形貌与微观组织形貌

首先, 对母材金相组织进行观察, 对包铝层厚度进行表征。如图2所示, 母材晶粒沿轧制方向, 呈粗大的板条状, 平均晶粒宽度约为30 μm, 晶粒沿轧制方向长度约为200 μm。包铝层厚度约为100 μm, 如图中箭头标示。

图3所示为选定三组参数下FSLW焊缝宏观形

貌，可以看到，三组参数下，焊缝表面均无明显宏观缺陷。

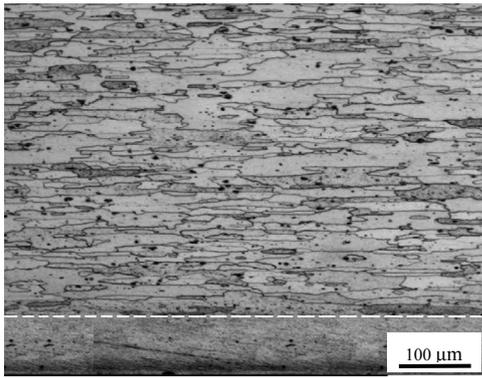
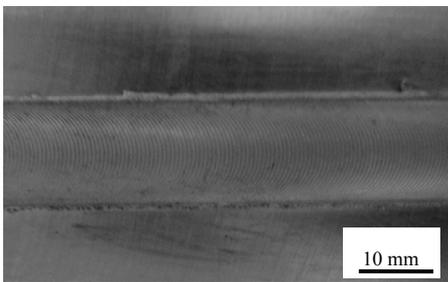
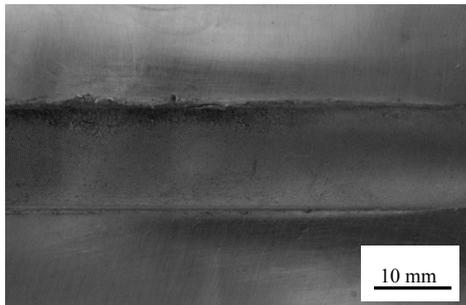


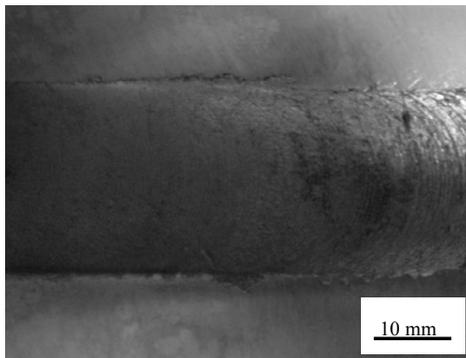
图 2 包铝 7B04-O 母材金相显微组织



(a) 样品 400-200-φ12



(b) 样品 800-200-φ12

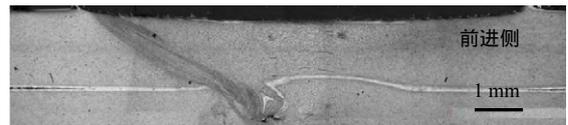


(c) 样品 400-200-φ20

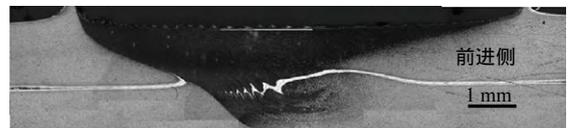
图 3 包铝 7B04-O 的 FSLW 焊缝宏观形貌

图 4 所示为 FSLW 接头横截面金相宏观组织，由图中可以看到，上下板结合面处的包铝层并没有被完全打碎分散到焊核中，其中前进侧的分散比较明显，而后退侧的包铝层则仅有轻微的向上弯曲的

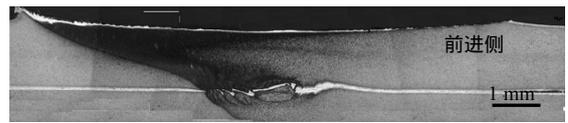
变形，基本保持了原来状态。有研究指出<sup>[6]</sup>，这是因为搭接焊焊接时界面材料流动不充分，导致原始界面结合处形成缺陷，通常认为前进侧发生“界面畸变”，后退侧因界面迁移而形成冷搭缺陷<sup>[13-14]</sup>，本研究中的情况与之前的报道类似。在高倍数下，可以看到三个参数下的焊核的微观组织，如图 5 所示，对于样品 400-200-φ12，其中心底部区域存在一定孔隙缺陷。通过增加转速或轴肩尺寸，可以有效消除焊核中的孔隙缺陷，但仍然没有使界面处的包铝层充分破碎分散，包铝层之间存在明显的原始界面线。



(a) 样品 400-200-φ12

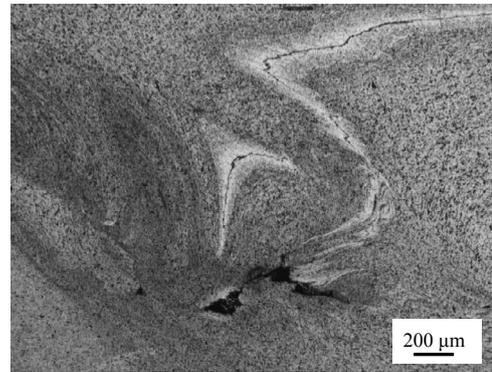


(b) 样品 800-200-φ12

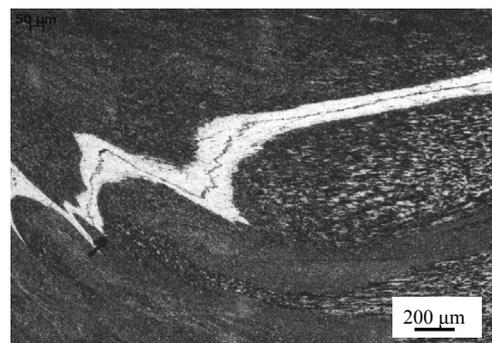


(c) 样品 400-200-φ20

图 4 包铝 7B04-O 的 FSLW 焊缝横截面宏观金相组织



(a) 样品 400-200-φ12



(b) 样品 800-200-φ12

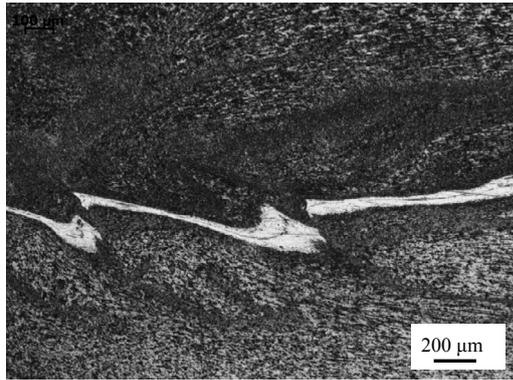
(c) 样品 400-200- $\phi$ 20

图5 包铝7B04-O的FSLW焊核区高倍金相组织

在铝合金FSLW焊缝中,焊核边缘未焊合的搭接界面会发生垂直方向上的界面迁移,形成钩状缺陷,这一现象的产生同时受到焊接工艺参数与焊接工具的影响<sup>[15]</sup>。本研究这种前进侧比后退侧材料流动更充分的界面迁移现象同样出现在无包铝层的7B04-T74板材的FSLW接头中<sup>[16]</sup>,在2024/7075异种铝合金的FSLW中也出现了同样的现象<sup>[17]</sup>。这可能是由于都采用了锥形搅拌针材料流动不充分的原因。有研究表明,对5182/6022异种铝合金的FSLW,当采用特殊设计的头部比根部具有更大直径的针上开三道斜槽形搅拌针时,由于这种工具使焊核区材料偏转并向上运动,材料流动混合更充分,因此焊核中心区域观察不到界面迁移现象,边缘接合面处的钩状缺陷也不明显<sup>[17-18]</sup>。

## 2.2 FSLW焊缝力学性能分析

表3为O态7B04 FSLW接头的拉伸试验测试结果。表4为淬火态7B04 FSLW接头的拉伸试验测试结果。测试结果表明,O态FSLW接头中400-200- $\phi$ 20参数的强度最高,在200 MPa左右,约为母材的94%,这与3 mm厚的FSW 7B04-O对接接头的抗拉强度相当<sup>[17]</sup>。注意到后退侧承力样品强度稍高于前进侧承力样品,这是由于在前进侧焊核结合部位有一定程度的减薄。淬火态FSLW接头拉伸样品中同样是400-200- $\phi$ 20参数下的强度最高,且淬火后较O态样品强度升高,约为250 MPa,然而仅约为淬火态母材的64%,也明显低于FSW对接接头的抗拉强度(约310 MPa)。这表明,O态下由于母材强度低,与之相比包铝层间的结合强度相差不大,因此对搭接接头强度的影响不明显。经焊后热处理后,母材强度大幅提升,而焊核中包铝层之间没有完全结合的界面成为薄弱环节,在拉伸受力时过早开裂,从而严重降低了接头强度。

图6所示为不同参数下7B04 FSLW接头拉伸断后样品。可以看到,除400-200- $\phi$ 20拉伸样品断

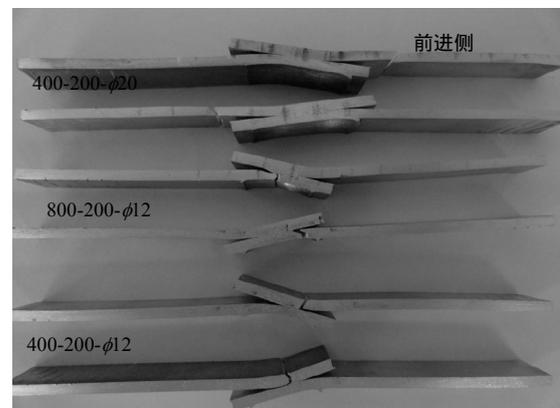
于母材处之外,其他参数的样品均断于焊核处,这说明当轴肩尺寸增大时,其接头有效连接面积增大,抗拉强度提高。

表3 包铝7B04-O的FSLW接头拉伸结果

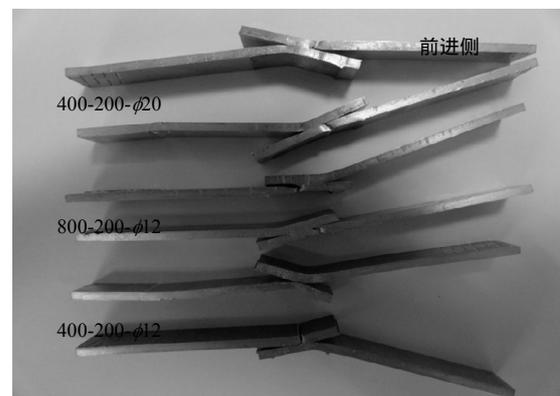
样品	长/mm × 宽/mm	最大力/N	抗拉强度/MPa
BM	5.80×1.95	—	212.5
400-200-AS(O态)	9.53×1.96	3 073.8	164.6
400-200-RS(O态)	9.54×1.97	2 687.3	142.9
800-200-AS(O态)	9.52×1.97	3 399.4	181.3
800-200-RS(O态)	9.51×1.97	3 311.8	176.8
400-200- $\phi$ 20-AS(O态)	9.49×1.95	3 662.2	197.9
400-200- $\phi$ 20-RS(O态)	9.88×1.96	3 850.6	198.8

表4 包铝7B04-O的FSLW淬火态接头拉伸结果

淬火样品	长/mm × 宽/mm	最大力/N	抗拉强度/MPa
BM	5.82×1.96	—	420.0
Q-400-200-AS	9.54×1.91	3 087.9	169.5
Q-400-200-RS	9.54×1.93	3 839.3	208.5
Q-800-200-AS	9.51×1.97	5 450.1	290.9
Q-800-200-RS	9.91×1.96	3 942.7	202.9
Q-400-200- $\phi$ 20-AS	9.54×1.95	4 484.2	241.0
Q-400-200- $\phi$ 20-RS	9.49×1.96	5 016.6	269.7



(a) O态样品



(b) 淬火态样品

图6 包铝7B04-O的FSLW接头拉伸断后样品

### 3 结论

本文在不同工具与焊接参数下对 2 mm 厚的带有包铝层的 7B04-O 铝合金板材进行 FSLW 研究,分析了包铝层对于热处理前后搭接接头拉伸性能的影响,主要结果如下。

(1) 三组参数下,焊核中的原始包铝层并没有被完全打碎分散,其中前进侧的分散比较明显,而后退侧的包铝层则仅有轻微的向上弯曲的变形,基本保持了原始状态。通过增加转速或轴肩尺寸,可以有效消除焊核中的孔洞缺陷,但仍无法使界面处的包铝层充分破碎分散。

(2) 随着焊接转速的增大,焊缝抗拉强度提高;相同转速下,当焊接工具轴肩尺寸增大时,其抗拉强度提高。

(3) 包铝层对焊态 FSLW 接头强度影响不明显,接头强度约为母材的 94%,与对接接头强度相当;淬火后,包铝层对 FSLW 接头强度的影响显著,接头强度仅为淬火态母材的 64%,也明显低于对接接头的强度。

### 参 考 文 献

- [1] THOMAS W M , NICHOLAS E D , NEEDHAM J C , et al. Friction stir butt welding[P]. GB Patent Application , 9125978.8 , 1991.
- [2] THOMAS W M , NICHOLAS E D , NEEDHAM J C , et al. Improvements relating to friction welding[P]. US Patent , 5460317 , EPS 0616490 , 1991.
- [3] MISHRA R S , MA Z Y. Friction stir welding and process[J]. Materials Science and Engineering , 2005 , 50 : 1-78.
- [4] THOMAS W M , NICHOLAS E D. Friction stir welding for the transportation industries[J]. Materials & Design , 1997 , 18(4-6) : 269-273.
- [5] ARBEGASST W J. Friction stir welding after a decade of development[J]. Welding Journal , 2006(3) : 28-36.
- [6] LI T , RITTER G , KAPUSTKAN , et al. Friction stir lap joining with sealant[R]. EWI Report , MR0608 , 2006.
- [7] 蹇海根 , 姜锋 , 徐忠艳 , 等. 航空用高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺 , 2006 , 35(12) : 66-71.  
JIAN Haigen , JIANG Feng , XU Zhongyan , et al. Study progress of high strength and tenacity Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy for aviation[J]. Hot Working Technology , 2006 , 35(12) : 66-71.
- [8] 刘晓涛 , 崔建忠. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究进展[J]. 材料导报 , 2005 , 19(3) : 47-50.  
LIU Xiaotao , CUI Jianzhong. Progress in research on ultra high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Review , 2005 , 19(3) : 47-50.
- [9] 赵衍华 , 林三宝 , 贺紫秋 , 等. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接过程数值模拟[J]. 机械工程学报 , 2006 , 48(7) : 28-34.  
ZHAO Yanhua , LIN Sanbao , HE Ziqiu , et al. Numerical simulation of friction stir welding process of 2014 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2006 , 48(7) : 28-34.
- [10] 张津 , 李峰 , 郑林 , 等. 2024-T351 铝合金搅拌摩擦焊焊件内部残余应力测试[J]. 机械工程学报 , 2013 , 49(2) : 92-97.  
ZHANG Jin , LI Feng , ZHENG Lin , et al. Testing of interior residual stress in friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2013 , 49(2) : 92-97.
- [11] 郭晓娟 , 董春林 , 康举 , 等. 搅拌摩擦焊搭接界面缺陷初步研究[C]//第二届搅拌摩擦焊国际会议论文集 , 北京 , 2013 , 10 : 144-148.  
GUO Xiaojuan , DONG Chunlin , KANG Ju , et al. A preliminary study on defects of friction stir lap welding interface[C]//The Second Session of FSW International Conference , Beijing , 2013 , 10 : 144-148.
- [12] TALWAR R , BOLSER D , LEDERICH R , et al. Property characterization of 2024Al/7075Al bi-alloy friction stir welded joints[C]//4th Int. Symposium on Friction Stir Welding and Processing , Park City , UT , 2003 , 3 : 765-770.
- [13] CEDERQVIST L , REYNOLDS A P. Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints[J]. Welding Journal , 2001(12) : 281-288.
- [14] CEDERQVIST L , REYNOLDS A P. Properties of friction stir welded aluminum lap joints[C]//2nd International Friction Stir Welding Symposium (2IFSWS) , 2000 : 17-25.
- [15] 罗凯 , 邢丽 , 杨成刚. 搅拌摩擦焊搭接接头的研究现状与展望[J]. 电焊机 , 2010 , 40(6) : 5-9.  
LUO Kai , XING Li , YANG Chenggang. Present and perspective on friction stir lap welding[J]. Electric Welding Machine , 2010 , 40(6) : 5-9.

- [16] 国旭明, 孟令伟, 王敏, 等. 7B04 高强铝合金搅拌摩擦焊接接头界面成形与力学性能[J]. 热加工工艺, 2014(43): 47-51.  
GUO Xuming, MENG Lingwei, WANG Min, et al. Friction stir lap welding interface forming and tensile properties of ultra-high strength 7B04 Al alloy[J]. Hot Working Technology, 2014(43): 47-51.
- [17] 宋友宝, 杨新岐, 崔雷, 等. 异种高强铝合金搅拌摩擦焊接接头的缺陷和拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2014(24): 1167-1174.  
SONG Youbao, YANG Xinqi, CUI Lei, et al. Defects and tensile properties of friction stir welded lap joints for dissimilar high-strength aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metal, 2014(24): 1167-1174.
- [18] SOUNDARARAJAN V, YARRAPAREDDY E, KOVACEVIC R. Investigation of the friction stir lap welding of aluminum alloys AA5182 and AA6022[J]. JMEPEG, 2007(6): 477-484.

作者简介：杨超，男，1987 年出生。主要研究方向为铝合金的焊接。

E-mail: yangchao\_sy@163.com

王继杰(通信作者)：男，1968 年出生，博士，教授，硕士研究生导师。

主要研究方向为纳米材料，铝基复合材料，形状记忆合金及相变。

E-mail: wangjjie@sau.edu.cn