

不等厚铝合金板材搅拌摩擦铆焊 塑性连接机理研究

张鹏¹, 赵升吨¹, 陈政², 范淑琴¹, 董朋¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安;

2. 西安物华巨能爆破器材有限责任公司研发中心, 710061, 西安)

摘要: 为了克服传统铝合金点连接技术存在裂纹、气孔、成形力大和气密性差等不足,实现铝合金板材的高性能点连接,提出了搅拌摩擦铆焊塑性连接新工艺原理,通过理论分析和试验研究,针对不等厚铝合金板材论证了新工艺原理的可行性。首先研究了铝合金板材搅拌摩擦铆焊工艺过程中材料流动行为和温度场分布,重点讨论了转速和持续加热时间对温度变化的影响规律,然后通过控制铆焊热输入量进行了工艺参数优化,并开展了螺纹铆钉式搅拌摩擦铆焊试验研究,最后验证了连接样件横截面材料组织分区与温度场分布的一致性,确定了该工艺的塑性连接机理。结果表明:转速和持续加热时间是影响搅拌摩擦铆焊接头力学性能的关键因素;3 mm和4 mm厚6061-T6铝合金板材搅拌摩擦铆焊的最优转速范围为1 000~1 400 r·min⁻¹,持续加热时间为3~15 s;上下板材之间形成冶金结合,塑化材料与螺纹铆钉之间形成机械结合。因此,铝合金板材搅拌摩擦铆焊塑性连接机理符合预期,该新工艺原理有效可行。

关键词: 搅拌摩擦铆焊;温度场;材料流动;工艺参数优化;焊接热输入量

中图分类号: TG441.8 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202102010 **文章编号:** 0253-987X(2021)02-0084-09



OSID 码

Plastic Joining Mechanism of Friction Stir Rivet Welding Process for Aluminum Alloy Sheets with Non-Uniform Thickness

ZHANG Peng¹, ZHAO Shengdun¹, CHEN Zheng², FAN Shuqin¹, DONG Peng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Research and Development Center, Xi'an Wuhua Juneng Blasting Equipment Co. Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: A novel processing principle of friction stir rivet welding (FSRW) is proposed to solve the defects such as cracks, pores, high forming force requirement and poor air tightness, which are usually observed in the traditional aluminum alloy sheets spot joining technology, and to realize high-performance spot joining for aluminum alloy sheets as a consequence. The feasibility is demonstrated for aluminum alloy sheets spot joining with non-uniform thickness by theoretical analysis and experimental research. The material flow behavior and temperature distribution in FSRW process of aluminum alloy sheets are investigated and the effects of rotational speed and dwelling time on the temperature distribution are discussed emphatically. Then, FSRW experiments are carried out following process parameters optimization by controlling the welding heat input. The consistency between theoretical analysis and experimental research is verified and

plastic joining mechanism of this novel process is defined by macro/micro analysis of transverse section of the obtained joint. The results indicate that rotational speed and dwelling time are significant factors affecting mechanical properties of the FSRW joints; the reasonable process parameter ranges of rotational speed ($1\,000\text{--}1\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) and dwelling time ($3\text{--}15\text{ s}$) are beneficial for aluminum alloy 6061-T6 (AA6061-T6) sheets joining of 3 mm and 4 mm thickness. Metallurgical joining can be observed between upper and lower sheets while mechanical joining between plasticized material and threaded rivet. Therefore, the plastic joining mechanism of FSRW process for aluminum alloy sheets accords with the expectation, and this novel process is effective and feasible.

Keywords: friction stir rivet welding; temperature distribution; material flow behavior; process parameters optimization; welding heat input

随着航空航天、汽车工业及轨道交通等领域机械装备综合性能的不断 提高,装备轻量化的不断实施,铝合金等轻量化板材得到了广泛应用,然而铝合金的高性能点连接日益成为一项亟待解决的问题。目前,常用的轻量化板材点连接技术主要有无铆塑性连接、电阻点焊和搅拌摩擦点焊等^[1-3],无铆塑性连接工艺依靠板材自身的塑性变形能力,使板材之间内嵌形成机械锁实现连接。韩晓兰等建立了抗拉强度预测模型,通过试验验证和接头强度检测优化了工艺参数^[4]。陈超等通过在平底无铆连接点中添加铆钉,显著提高了连接点的抗拉强度和抗剪强度,但该工艺需要较大的成形力,且铆接接头连接强度不高、气密性差、外观质量一般^[5]。

文献[6]提出了一种搅拌摩擦挤压连接技术,开展了 12.7 mm 厚 RHA 钢板与 AA6061 板材的焊接试验,获得了铆焊接头的损伤机理和失效形式。文献[7]运用该技术搭接了 AA2024-T6 板材,获得了带有机机械锁的冶金结合接头。王希靖等利用无针搅拌头获得了 6061 铝合金与带孔 DP600 镀锌钢板的搭节点焊接头,但该工艺均需在下层板材预先开槽或者钻孔,造成材料浪费,影响加工效率^[8]。李永兵等提出了自冲摩擦铆焊工艺,依靠摩擦热和挤压变形实现板材连接,但是该工艺对设备和铆钉要求较高^[9]。文献[10-12]分别提出了原理相似的搅拌摩擦塞铆焊用于铝合金与钢的点连接,将异种材料连接转变为同种材料的摩擦焊接,但是过高的焊接热量往往会导致铝合金软化严重,且上下板材之间容易形成较大间隙。

结合现有金属板材点连接技术优势,为了实现铝合金板材的高性能点连接,本文提出了一种螺纹铆钉式搅拌摩擦铆焊(FSRW)工艺,兼顾了固相焊接和铆接技术优势,可以获得依靠螺纹机械铆合增

强的固相焊接接头。本文通过理论分析和试验研究,针对不等厚铝合金板材论证了所提出新工艺原理的可行性,研究了 3 mm 和 4 mm 厚 6061-T6 铝合金板材搅拌摩擦铆焊工艺过程中材料流动行为和温度场分布,重点讨论了转速和持续加热时间对温度场变化的影响规律,通过控制铆焊热输入量进行了 6061-T6 铝合金板材 FSRW 工艺参数优化。通过物理试验研究了优化所得工艺参数对 3 mm 和 4 mm 厚 6061-T6 铝合金板材搅拌摩擦铆焊接头力学性能的影响规律,为螺纹铆钉式搅拌摩擦铆焊技术在轻合金连接领域的推广与应用提供有益参考。

1 搅拌摩擦铆焊塑性连接新工艺原理

FSRW 工艺是依靠工具头和螺纹铆钉对轻合金板材待连接点的搅拌摩擦和挤压作用,利用焊接热和压力,实现两板材之间的固相焊接与机械铆合,主要包括定位、铆焊、成型和工具头回撤 4 个步骤,具体工艺原理如图 1 所示。

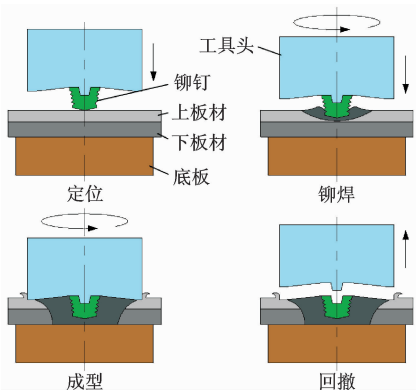


图 1 搅拌摩擦铆焊工艺原理

首先,通过工具头将放置在待连接点上的铆钉进行定位并施加一定的预紧力。然后,高速旋转的工具头将铆钉扎入工件的待连接点中,在工具头轴

肩和铆钉的搅拌摩擦和挤压作用下,上下板材间的材料发生塑化并形成冶金结合,直到轴肩到达预设下压量;保持工具头下压力并继续旋转,对连接点持续摩擦加热一定时间(持续加热时间),塑化的金属材料将铆钉紧密包裹镶嵌。最后,工具头停止转动并退回坐标原点,连接点处塑化的材料与铆钉自然冷却后形成铆焊接头。工具头和铆钉之间依靠带有锥度的内外六方间隙配合,便于工具头回撤过程中与铆钉顺利分离。

2 材料属性及工艺参数

采用不等厚 6061-T6 铝合金板材开展 FSRW 工艺过程有限元数值模拟研究,工件尺寸分别为 45 mm×45 mm×3 mm 和 45 mm×45 mm×4 mm,铆焊形式为搭接。FSRW 过程是一个包含大变形、接触条件多变复杂的高度非线性动力学问题,涉及传热学、力学、冶金学等学科。在本研究中,6061-T6 铝合金的材料性能参数依据 Simufact 材料库和文献[13-15],密度设为 2 700 kg/m³,弹性模量、屈服应力、泊松比、导热率以及比热容等热物理性能随温度场和材料组织状态的变化发生非线性变化,具体参数值如表 1 所示。

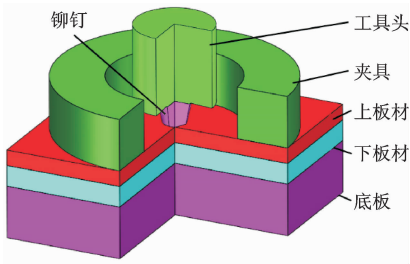
为了研究工艺参数对 FSRW 过程中温度场变化的影响机制,通过改变主轴转速和持续加热时间对比分析。参照前期 6061-T6 铝合金板材搅拌摩擦焊接试验研究结果和文献资料^[16-17],设定主轴转速分别为 800、1 000、1 200、1 400、1 600 和 1 800 r·min⁻¹,6 组工具头持续加热时间分别为 3、5、7、10、12 和 15 s,铆钉和工具头铆焊进给速率为 30 mm·min⁻¹,工具头退出速率为 60 mm·min⁻¹,轴肩下压量为 0.2 mm。

表 1 6061-T6 铝合金热物理性能参数

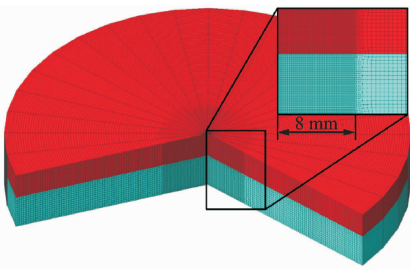
温度 T/℃	弹性模量 E/GPa	屈服应力 σ/MPa	泊松比 ν	导热率 λ/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容 c/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
25.00	66.94	278.12	0.330	167	896
100.00	63.21	260.68	0.334	180	963
148.89	61.32	251.24	0.335	184	1 004
204.44	56.80	221.01	0.336	192	1 028
260.00	51.15	152.26	0.338	201	1 052
315.56	47.17	73.87	0.360	207	1 078
371.11	43.51	36.84	0.400	217	1 104
426.67	28.77	21.58	0.410	223	1 133

3 搅拌摩擦铆焊工艺有限元模型

图 2a 为采用 SolidWorks 软件建立的 6061-T6 铝合金板材 FSRW 三维模型,由夹具、工具头、铆钉、工件和底板组成。将三维模型导入 Simufact Welding 有限元软件进行 FSRW 全过程热力耦合数值模拟。因为在实际 FSRW 过程中,工具头材料多采用高温合金,铆钉材料为中碳钢或高速钢,与工件材料相比,它们均具有很大刚度,焊接过程中的变形很小,可以忽略不计,在模拟过程将工具头和铆钉考虑为解析刚体。为了便于计算和提高计算效率,本模型中对工具头轴肩和铆钉的几何结构进行了简化,轴肩采用内凹式,轴肩直径为 15 mm,圆锥形铆钉大端直径为 6 mm,小端直径为 4 mm,高度为 6 mm。



(a) 搅拌摩擦铆焊三维模型



(b) 工件网格划分

图 2 搅拌摩擦铆焊有限元模型

为了避免模拟过程中产生大的畸变影响计算结果,对待铆接点区域进行局部网格细化,并对上下板材进行网格重划分。模型中采用 Quadtree 和 Adv- Front 两种单元格形式,单元数为 23 332,工件网格划分如图 2b 所示。

在 FSRW 过程中,发热源主要是工具头轴肩以及铆钉与工件之间的摩擦和待铆焊部位工件材料的塑性应变。为了便于计算,本文采用库仑摩擦模型,6061-T6 铝合金与钢之间的摩擦系数随温度的变化如表 2 所示。

模型的初始温度设定为 25℃,忽略热辐射的影响,仅考虑 FSRW 过程中工件上表面和侧面与空气

之间以及工件底面与底板之间的对流换热,对流换热系数分别为 30 和 150 W/(m²·K)。

表 2 摩擦系数随温度的变化规律^[18]

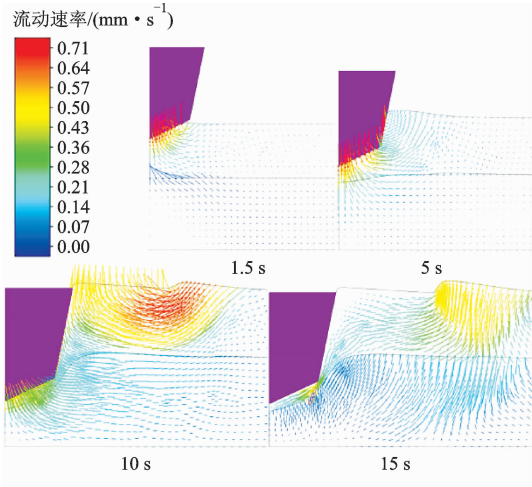
温度 $T/^\circ\text{C}$	摩擦系数
22.0	0.610
34.7	0.545
93.3	0.259
147.5	0.115
210.6	0.064
260.0	0.047
315.6	0.035
371.1	0.020
426.7	0.007
582.0	0.000

4 模拟结果与分析

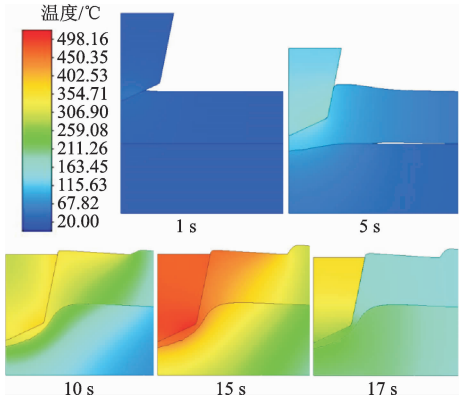
4.1 搅拌摩擦铆焊工艺过程

FSRW 工艺过程的材料流动行为、温度场分布与传统搅拌摩擦点焊相似,如图 3 所示。以主轴转速 1 400 r·min⁻¹、持续加热时间 5 s 为例,铆焊初期,在铆钉的驱动下,底部材料垂直向下运动,速率为 0.2 mm·s⁻¹左右,铆钉与板材相互摩擦作用,周边的材料受到挤压而向外运动,温度逐渐上升到 80 ℃左右。随着铆钉的搅拌和进给,向下和向外运动的部分材料在板材约束和铆钉挤压作用下沿匙孔周围向上和向外运动,材料流动速率为 0.2~0.4 mm·s⁻¹,铆钉及周边材料温度达到 100~180 ℃,位于板材上表面附近的材料甚至会被铆钉旋转挤出,而后被工具头轴肩凹面所包容。

当轴肩与板材接触后,轴肩下方的材料被向下



(a)材料流动形态



(b)温度场分布

图 3 不同时刻 FSRW 工艺的数值模拟结果

挤压,轴肩周边的少部分材料则被旋转挤出形成飞边,大部分塑化的材料则在轴肩与铆钉之间的封闭空间中被剧烈搅拌。随着工具头及铆钉对连接点的持续加热,塑化的材料温度急剧上升,峰值温度达 498.66 ℃,最大材料流动速率为 0.71 mm·s⁻¹。铆焊过程中,此工艺参数下铆焊接头处的峰值温度为 6061-T6 铝合金的熔点(582 ℃)的 86%,可见本模型材料没有出现熔化,符合固相连接的基本特性,温度场分布规律与国内外研究学者所得结论及试验结果^[19-21]一致,说明本文有限元数值模拟模型的合理性与有效性。

4.2 工艺参数对搅拌摩擦铆焊温度场的影响

为了进一步确定 6061-T6 铝合金 FSRW 的工艺参数范围,继续研究了转速和持续加热时间对 FSRW 过程中铆钉处温度变化的影响规律。图 4 为不同转速下 FSRW 过程中铆钉处的热循环曲线。由图可见,不同转速下,FSRW 过程中铆钉处的温度变化规律基本一致,但随着转速的不断升高,搅拌摩擦作用更加剧烈,峰值温度也有所升高。当转速为 800 r·min⁻¹时,铆焊过程中铆钉处的峰值温度为 346.76 ℃。当转速为 1 400 r·min⁻¹时,铆钉处的峰值温度为 498.66 ℃;当转速为 1 800 r·min⁻¹

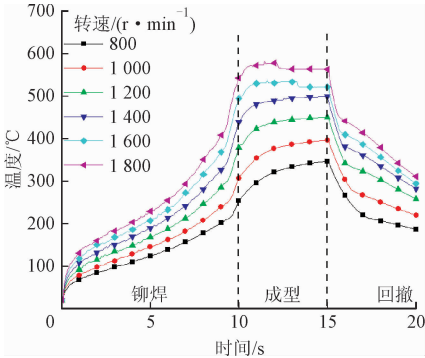


图 4 不同转速下铆钉处的热循环曲线

时,铆钉处的峰值温度为 581.85℃,已经达到 6061-T6 铝合金的熔点,不符合固相连接的特点。

持续加热时间是另一影响 FSRW 过程中温度场变化的关键因素,图 5 为不同持续加热时间下 FSRW 过程中接头处峰值温度的变化规律。持续加热阶段,低转速区间(800~1 000 r·min⁻¹)接头处起始温度为 300℃左右,材料塑化程度不高,铝合金与钢的摩擦系数约为 0.04,工具头轴肩与工件材料的摩擦作用较为剧烈;随着持续加热时间的延长,峰值温度增幅较为明显,增幅约为 80℃。中转速区间(1 200~1 400 r·min⁻¹)持续加热阶段的起始温度达到 400℃,材料塑化程度升高,铝合金与钢的摩擦系数低于 0.02,峰值温度增幅趋于平缓;持续加热时间为 3~7 s 时,增幅约为 40℃;持续加热时间超过 10 s 后,峰值温度进入稳定阶段。高转速区间(1 600~1 800 r·min⁻¹)持续加热阶段起始温度超过 450℃,铝合金与钢的摩擦系数趋近于 0,虽然延长持续加热时间,但是峰值温度并没有大幅提升,受对流换热、材料塑化程度以及铆焊压力等因素的影响,峰值温度甚至会出现略微下降。

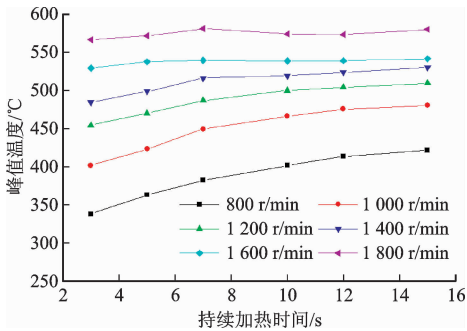


图 5 不同持续加热时间下峰值温度变化规律

4.3 搅拌摩擦铆焊工艺参数优化

转速、进给速率和持续加热时间是影响 FSRW 接头成型及连接质量的关键因素,转速和进给速率决定了 FSRW 过程中产生摩擦热的大小,持续加热时间决定了材料处于塑性状态的时间长短。本文铆焊进给速率恒定,因此转速和持续加热时间的合理匹配才能提供恰当的铆焊热输入量,从而获得性能优良的 FSRW 接头。

在 FSRW 过程中,通过控制铆焊时的热输入量控制接头组织,从而控制接头质量。参照搅拌摩擦点焊工艺,众多学者试验研究表明,当工艺参数合理匹配使焊接过程中峰值温度为熔点的 70%~90%时,可以获得无气孔、裂纹等冶金缺陷且力学性能优良的搅拌摩擦点焊接头^[22-24]。因此,对于 6061-T6

铝合金 FSRW 工艺,转速和持续加热时间的合理参数范围如图 6 所示。一般情况下,铆钉和工具头的转速为 1 000~1 400 r·min⁻¹,持续加热时间为 3~15 s。

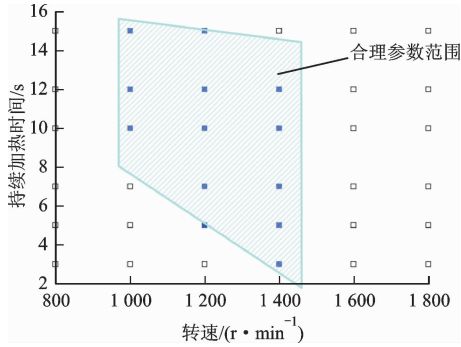
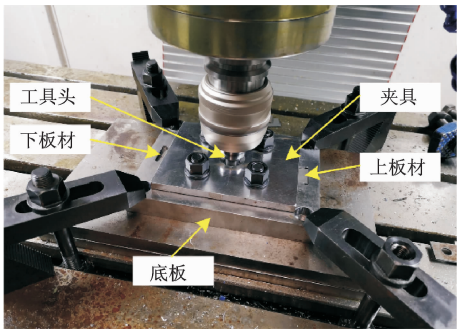


图 6 6061-T6 铝合金 FSRW 工艺的参数范围

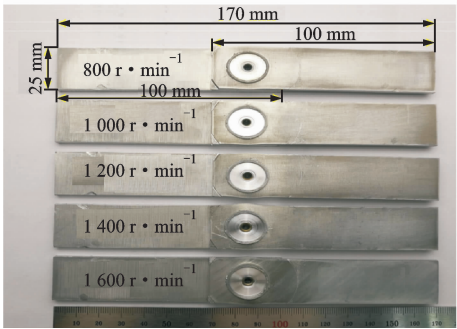
5 铝合金搅拌摩擦铆焊试验研究

5.1 试验装置及样件

根据工艺参数优化结果,在自行改造的数控加工中心上进行了螺纹铆钉式 FSRW 试验研究,如图 7a 所示。选用 3 mm 厚和 4 mm 厚铝合金 6061-T6 板材,试样尺寸为 25 mm×100 mm,铆焊形式为搭接,搭接宽度为 30 mm,如图 7b 所示,工具头轴肩直径为 15 mm,螺纹铆钉高 6 mm,螺纹参数为 M6



(a)FSRW 试验设备



(b)6061-T6 铝合金 FSRW 接头试样

图 7 FSRW 试验设备及 6061-T6 铝合金 FSRW 接头试样

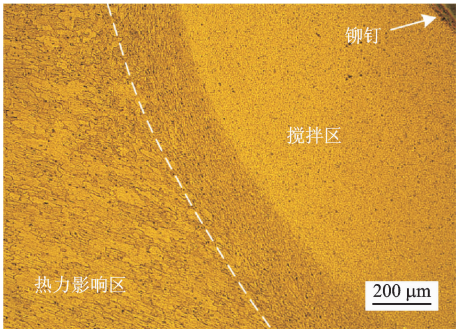
×1。设定的 5 组转速分别为 800、1 000、1 200、1 400和1 600 r · min⁻¹，两组持续加热时间分别为 5 s 和 10 s，铆钉和工具头铆焊进给速率为 30 mm · min⁻¹，工具头退出速率为 60 mm · min⁻¹，轴肩下压力为 0.2 mm。所获 FSRW 接头试样如图 7b 所示，接头表面光滑无毛刺，铆钉与周围材料紧密结合，铆焊点周围受铆钉和工具头的摩擦挤压作用有飞边产生。随着焊接热输入量的升高，局部焊接热过度积聚，焊缝处软化的金属材料的量和体积增加，导致软化的金属材料被挤出形成飞边缺陷。因此，转速越高，飞边和铆焊点周围材料变形越明显。

5.2 接头宏观、微观组织形貌分析

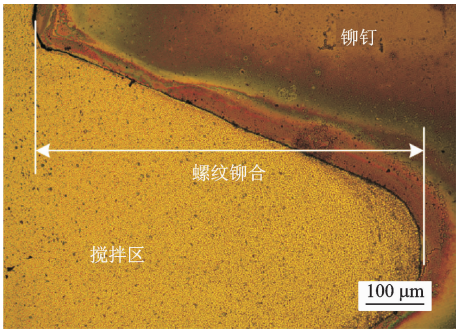
试验转速为1 200 r · min⁻¹时所获接头与数值模拟结果对照如图 8 所示。铆焊接头上表面宏观形貌和数值模拟结果吻合度较高，接头表面光滑无毛刺，但是有飞边产生，如图 8a 所示。在工具头轴肩挤压和铆钉的搅拌作用下，接头组织高度依赖于冶金温度，从图 8b 可以看出，FSRW 接头可以分为 4 个区域，即搅拌区、热力影响区、热影响区和母材。从接头横截面可以观察到上下板材之间形成了冶金结合，利用光学显微镜测量上下板材之间冶金结合区域半径 R 约为 3.15 mm，且铆钉螺纹处已经嵌实了铝合金材料，上下板材与螺纹铆钉实现铆合。

FSRW 接头微观组织如图 9 所示，图 9a、图 9b

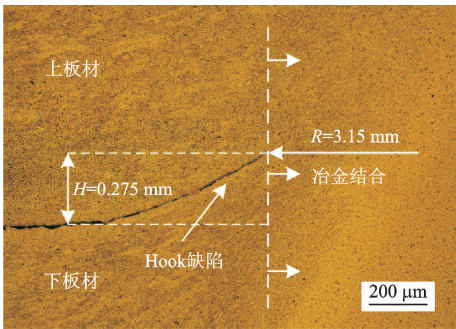
和图 9c 分别为图 8b 中 a 、 b 和 c 3 个区域的微观组织形貌。搅拌区在螺纹铆钉和工具头轴肩的强烈搅拌摩擦挤压作用下，经历了较高温度的热循环，组织发生动态再结晶，该区域组织致密，晶粒细小均匀。热力影响区受铆钉和轴肩的搅拌摩擦挤压和热循环作用不及搅拌区明显，部分组织发生动态再结晶，并在铆钉的搅拌挤压作用下发生塑性流动，晶粒发生严重变形并具有明显的取向性。搅拌区和热力影响区有较为明显的边界，如图 9a 所示。虽然铝合金组织发生了充分的塑性变形，将铆钉紧密地包裹镶嵌，形成了如图 9b 所示的螺纹铆合，但是铆钉与搅拌区组织分界明显，并没有发生冶金结合。这主要是由于试验中没有对铆钉进行镀锌等表面处理，铆钉表面在焊接热作用下极速氧化，阻碍了铝合金与钢的



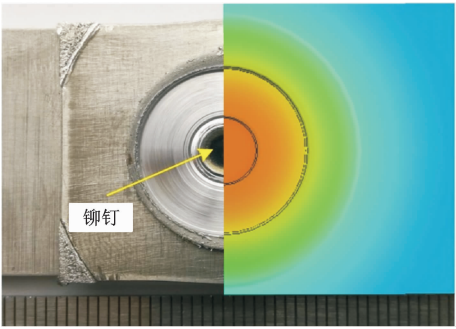
(a) 铆钉周围微观组织形貌



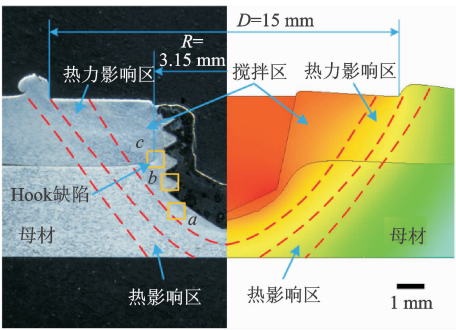
(b) 螺纹铆合形式



(c) 冶金结合形式



(a) 温度分布和接头上表面宏观形貌



(b) 温度分布和接头横截面宏观形貌

图 8 FSRW 接头与数值模拟结果对照

图 9 FSRW 接头微观组织形貌

冶金结合^[25-26]。

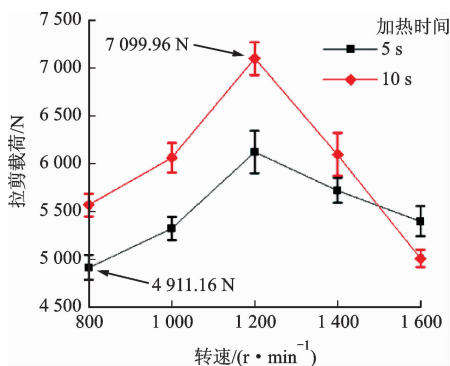
与 FSW 工艺接头组织形貌相似^[27],如图 9c 所示,铆钉周围塑化的材料组织在剧烈的搅拌摩擦挤压和热循环作用下,上下板材之间形成了较好的冶金结合。同样,如图 8b 和图 9c 所示,本文所获 FSRW 接头也存在 Hook 缺陷^[28],Hook 缺陷高度 H (Hook 缺陷末端距上下板材之间界面的高度)约为 0.275 mm,通过改变工艺参数,改善 FSRW 接头成型质量可作为进一步研究重点。

5.3 接头连接强度测试

按照 GB2651—1989 标准,在 Instron 5982 材料性能试验机上进行铆焊接头连接强度测试,如图 10a 所示。测试过程中,试样两端增加垫块以保证拉伸剪切力加载方向沿试样搭接界面,拉剪速率为 $1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,接头拉剪载荷取 3 次重复测试的平均值,以提高试验的准确性和可靠性,不同工艺参数所得接头的拉剪载荷如图 10b 所示。



(a) 拉伸剪切测试



(b) 工艺参数对接头拉剪载荷的影响规律

图 10 接头拉伸剪切强度测试

随着转速和持续加热时间的增加,接头拉剪载荷呈现先增大后减小的变化规律。当转速较低和持续加热时间较短时,产生的焊接能量较低,不足以使接头处的材料充分塑化,易出现孔洞等铆焊缺陷,拉剪过程中裂纹在铆焊缺陷处扩展,导致接头拉剪载荷较低。当转速较高且持续加热时间较长时,焊接

热输入量较高,接头处的材料塑化程度较高,容易出现过热组织或者固溶析出相发生聚集,材料组织晶粒长大,脆性增加,降低接头的拉剪载荷。本文试验中,当转速为 $800\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、持续加热时间为 5 s 时,所获接头拉剪载荷最低为 4 911.16 N;当转速为 $1\,200\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、持续加热时间为 10 s 时,所获接头最大拉剪载荷为 7 099.96 N。

6 结 论

(1)实现了 3 mm 和 4 mm 厚 6061-T6 铝合金板材 FSRW 过程中材料流动和温度场的数值分析。研究了转速和持续加热时间对 FSRW 过程中峰值温度的影响规律:转速越高,峰值温度越高。当转速为 $1\,800\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,峰值温度达到铝合金熔点,不符合固相焊接要求;持续加热时间延长,峰值温度增幅明显,但随转速的升高,峰值温度增幅不断降低,峰值温度超过铝合金熔点的 75% 后,随持续加热时间的延长,峰值温度甚至会出现略微下降。

(2)转速和持续加热时间是影响 FSRW 接头连接质量的关键因素,通过控制铆焊过程中的热输入量进行了工艺参数优化。当进给速率和轴肩下压量恒定时,适用于 3 mm 和 4 mm 厚 6061-T6 铝合金板材 FSRW 的转速范围为 $1\,000 \sim 1\,400\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,持续加热时间为 3~15 s。

(3)获得了 3 mm 和 4 mm 厚 6061-T6 铝合金板材的螺纹铆钉式搅拌摩擦铆焊接头,通过对比分析接头金相组织分布区域和温度场分布情况,可确定接头组织高度依赖于冶金温度,6061-T6 铝合金的 FSRW 接头包括搅拌区、热力影响区、热影响区和母材 4 个区域。上下板材之间形成冶金结合,塑化材料与螺纹铆钉之间形成机械结合。

参考文献:

- [1] 李永兵,马运五,楼铭,等.轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J].机械工程学,2016,52(24):1-23.
- LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.
- [2] 龙江启,兰凤崇,陈吉清,等.钢铝一体化车身结构机械连接技术试验研究[J].塑性工程学报,2009,16(1):88-94.
- LONG Jiangqi, LAN Fengchong, CHEN Jiqing, et al. Experimental investigation of the joints of mechani-

- cal clinching in the steel-aluminum hybrid structure car body [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(1): 88-94.
- [3] 魏文杰, 何晓聪, 易金权, 等. TA1 铆焊复合接头与自冲铆接头力学性能对比 [J]. *塑性工程学报*, 2019, 26(4): 207-212.
- WEI Wenjie, HE Xiaocong, YI Jinquan, et al. Comparison of mechanical properties between TA1 rivet-welding composite joint and SPR joint [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2019, 26(4): 207-212.
- [4] 韩晓兰, 陈超, 刘辰, 等. 双层板材平底无铆塑性连接的抗拉强度预测模型 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(24): 61-68.
- HAN Xiaolan, CHEN Chao, LIU Chen, et al. Predictive model of tensile strength in flat clinching [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(24): 61-68.
- [5] 陈超, 赵升吨, 崔敏超, 等. 铆压重塑形工艺的铆钉优化与试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(3): 94-100.
- CHEN Chao, ZHAO Shengdun, CUI Minchao, et al. Rivet optimization and experimental research on the reshaping method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(3): 94-100.
- [6] REZA-E-RABBY M, ROSS K, OVERMAN N R, et al. Joining thick section aluminum to steel with suppressed FeAl intermetallic formation via friction stir dovetailing [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 148: 63-67.
- [7] EVANS W T, GIBSON B T, REYNOLDS J T, et al. Friction stir extrusion: a new process for joining dissimilar materials [J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 5: 25-28.
- [8] 王希靖, 张亚州, 李经纬, 等. 铝/镀锌钢搅拌摩擦铆焊接头组织与力学性能 [J]. *材料科学与工艺*, 2015, 23(2): 103-108.
- WANG Xijing, ZHANG Yazhou, LI Jingwei, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir rivet welding joint between aluminum and galvanized steel [J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 23(2): 103-108.
- [9] LI Yongbing, WEI Zeyu, WANG Zhaozhao, et al. Friction self-piercing riveting of aluminum alloy AA6061-T6 to magnesium alloy AZ31B [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(6): 061007.
- [10] MILES M, HONG S T, WOODWARD C, et al. Spot welding of aluminum and cast iron by friction bit joining [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(6): 1003-1006.
- [11] MESCHUT G, HAHN O, JANZEN V, et al. Innovative joining technologies for multi-material structures [J]. *Welding in the World*, 2014, 58(1): 65-75.
- [12] MAIWALD D I M, THIEM D I J. Joining without a pilot hole using friction welding [J]. *Atzproduktion Worldwide*, 2012, 5(2): 10-17.
- [13] ZINA N, ZAHAF S, BOUAZIZ S A, et al. Numerical simulation on the effect of friction stir welding parameters on the peak temperature, von Mises stress, and residual stresses of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, 19(6): 1698-1719.
- [14] 张洪武, 张昭, 陈金涛. 搅拌摩擦焊接过程的有限元模拟 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(9): 13-18.
- ZHANG Hongwu, ZHANG Zhao, CHEN Jintao. Finite element analysis of friction stir welding process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(9): 13-18.
- [15] RIAHI M, NAZARI H. Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55(1/2/3/4): 143-152.
- [16] ROSTAMIYAN Y, SEIDANLOO A, SOHRABPOOR H, et al. Experimental studies on ultrasonically assisted friction stir spot welding of AA6061 [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, 15(2): 335-346.
- [17] FERREIDUNI E, MOVAHEDI M, KOKABI A H. Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 224: 1-10.
- [18] SATHIYA P, SHANMUGAM S N, RAMESH T, et al. Temperature distribution modeling of friction stir spot welding of AA 6061-T6 using finite element technique [J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2008, 4(1): 1-14.
- [19] 崔俊华, 柯黎明, 刘文龙, 等. 搅拌摩擦焊接全过程热力耦合有限元模型 [J]. *材料工程*, 2014, 42(12): 11-17.
- CUI Junhua, KE Liming, LIU Wenlong, et al. Thermo-mechanical coupled finite element model for whole process of friction stir welding [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 42(12): 11-17.
- [20] 肖毅华, 张浩锋. 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊温度场的数值模型和参数影响分析 [J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(1): 119-126.

- XIAO Yihua, ZHANG Haofeng. Numerical model and influence analysis of parameters for temperature field in friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(1): 119-126.
- [21] ZHANG Biao, CHEN Xin, PAN Kaixuan, et al. Thermo-mechanical simulation using microstructure-based modeling of friction stir spot welded AA 6061-T6 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 71-81.
- [22] 万震宇, 张昭. 基于网格重剖分的搅拌摩擦焊接数值模拟及搅拌头受力分析 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 107-113.
- WAN Zhenyu, ZHANG Zhao. Adaptive re-meshing based numerical simulation of friction stir welding and tool force analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(2): 107-113.
- [23] 刘其鹏, 顾乃建, 刘泽, 等. AA6061-T6 板材搅拌摩擦焊温度场仿真 [J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(3): 80-85.
- LIU Qipeng, GU Naijian, LIU Ze, et al. Simulation of temperature field of AA6061-T6 sheet in friction stir welding [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2018, 39(3): 80-85.
- [24] 别俊, 刘亚丽, 张昭. 搅拌摩擦焊接中参数变化对温度场分布的影响 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 212-217.
- BIE Jun, LIU Yali, ZHANG Zhao. Effect of processing parameters on temperature distributions in friction stir welding [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 212-217.
- [25] ZHENG Qixian, FENG Xiaomei, SHEN Yifu, et al. Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 686: 693-701.
- [26] 林健, 赵海峰, 雷永平, 等. 钢铝搅拌摩擦焊搭接接头的机械结合与冶金结合方式 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 106-112.
- LIN Jian, ZHAO Haifeng, LEI Yongping, et al. Mechanical and metallurgical bonding in friction stir welding joint of steel-aluminum dissimilar materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 106-112.
- [27] BABU S, SANKAR V S, JANAKI RAM G D, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir spot welded aluminum alloy AA2014 [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(1): 71-84.
- [28] LI Wenya, LI Jinfeng, ZHANG Zhihan, et al. Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect [J]. Materials & Design, 2014, 62: 247-254.

(编辑 杜秀杰)