

回填式搅拌摩擦点焊接头多点拉剪行为研究

邹阳帆¹, 王非凡², 李文亚¹, 杨夏炜¹, 褚强¹, 谷晨³

(1. 西北工业大学 材料学院 凝固技术国家重点实验室

陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室, 西安 710072;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

3. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要:目的 研究焊点数量及分布对回填式搅拌摩擦点焊接头力学性能的影响。方法 选取2 mm的2219-O和8 mm的2219-CS铝合金板, 采用试验研究和数值模拟相结合的方式, 研究不同焊点数量(2点、3点和4点)及焊点分布对回填式搅拌摩擦点焊接头力学性能的影响, 以及在拉剪力作用下接头的应力分布状态。结果 多点接头成形良好, 无飞边、毛刺产生; 随着焊点数量的增加, 接头力学性能逐渐提高, 并且当上板受力侧焊点数量分布较多时, 接头承载力较高。结论 在拉剪过程中, 靠近上板受力侧的焊点承受较大作用力。当受力侧仅有一个焊点时, 该焊点附近应力集中比较明显; 当受力侧有两个平行焊点时, 焊点平分载荷。当焊点数为4且呈正四边形分布时, 接头承载力较高。

关键词: 回填式搅拌摩擦点焊; 2219 铝合金; 多点接头; 力学性能; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.006

中图分类号: TG406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0035-07

Tensile-shear Behavior of Refill Friction Stir Spot Welded Multi-Point Joints

ZOU Yang-fan¹, WANG Fei-fan², LI Wen-ya¹, YANG Xia-wei¹, CHU Qiang¹, GU Chen³

(1. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, State Key Laboratory of Solidification Processing, School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

3. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China)

ABSTRACT: The paper aims to investigate the influence of the number and distribution of welding spots on the mechanical properties of refill friction stir spot welded joints. 2 mm 2219-O and 8 mm 2219-CS aluminum alloy were selected. A combination of experiment and numerical simulation was used to study the effect of welding spots number (2 points, 3 points and 4 points) and their distribution on the mechanical properties and the stress distribution under the shear test. The results showed that the multi-point joint was well formed, without flash and burr. With the increase of welding spots, the mechanical property of joints was improved gradually. When more welding spots were distributed on the stressed side of the upper plate, the joint strength was higher. The simulation results show that in tensile-shear test, the welding joints near the stressed side of the upper plate bear the larger force. When there is only one welding spot on the stressed side, the stress concentration near the welding spot is obvious. However, when there are two solder joints parallel to the stressed side, the joint stress distribution is more uniform. Therefore, when there are 4 solder joints and the distribution is quadrilateral, the mechanical properties of joints are higher.

KEY WORDS: refill friction stir spot welding; 2219 aluminum alloy; multi-point joint; mechanical properties; numerical simulation

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(U1637601)

作者简介: 邹阳帆(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦焊与冷喷涂。

通讯作者: 李文亚(1976—), 男, 教授, 主要研究方向为摩擦焊接及冷喷涂。

搅拌摩擦点焊 (Friction Stir Spot Welding, FSSW) 是在传统搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 基础上发展起来的一种固态点焊连接新技术, 其原理是通过高速旋转的搅拌头和工件挤压, 利用产生的摩擦热使材料达到塑性状态, 搅拌头在一定时间内充分搅拌, 从而在搭接的板材上形成焊点完成焊接过程^[1-3]。回填式搅拌摩擦点焊 (Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW) 是由德国亥姆霍兹吉斯塔赫特研究中心 (Helmholtz Zentrum Geesthacht, HZG) 于 2002 年提出的, 其焊具由 3 部分组成, 从内到外分别为搅拌针、套筒和压紧环。如图 1 所示, 焊接过程可以分为 4 个阶段, 分别为预热阶段、下压阶段、回填阶段和撤离阶段。回填式搅拌摩擦点焊接头具有强度高、变形小、焊接质量稳定、节能、成本低等优点, 在航空航天和汽车制造等领域具有广阔的应用前景^[4-8]。

目前对于回填式搅拌摩擦点焊的研究相对较少, 主要集中在焊接过程和成形机理研究^[9]、焊点的组织和力学性能分析^[10-12]以及焊接过程中材料的流动行为^[13-14]探索。邢艳双等^[15]选用 3 mm 的 6061-T6 和 7075-T6 铝合金为研究对象, 分析了异种合金回填式搅拌摩擦点焊接头的组织和拉剪性能。结果表明, 当套筒刚扎透上板时, 接头内部无缺陷产生, 随着套筒下扎深度的增大, 接头内部会出现孔洞、撕裂和未充分回填等缺陷。接头的断裂载荷随着套筒下扎深度的增大先增大后减小, 当套筒下扎深度为 3.4 mm 时, 焊点断裂强度可达 7236 N。苏志强等^[16]利用 DEFORM-3D 软件对 RFSSW 过程的材料流动进行数值模拟。结果表明, 在下压过程中, 套筒下方材料先向下流动, 在受到下方塑性较差材料的阻碍后又集中向内侧流动; 相反, 搅拌针下方的材料受到套筒下方材料流动的挤压作用而向上流动。在回填过程, 搅拌针下方的材料向下流动至套筒作用深度后, 受到塑性较差材料的阻碍而向外侧运动, 而套筒外侧材料的塑性同样较差, 从而迫使材料在套筒下方向上流动, 填充套筒底部的空间。

以上学者的研究都是针对 RFSSW 单点焊接而开展的, 而对于 RFSSW 多点焊接的研究几乎没有, RFSSW 过程见图 1。文中针对不等厚铝合金 2219-CS

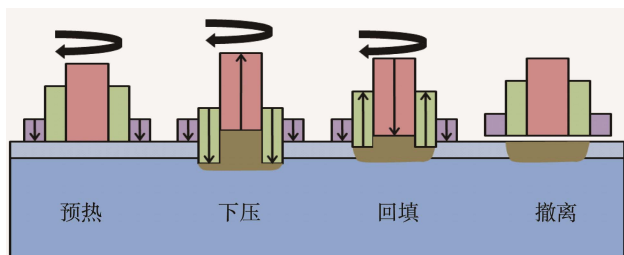


图 1 RFSSW 过程: 预热、下压、回填和撤离

Fig.1 The process of RFSSW: preheating, plunging, refilling, retracting

和 2219-O, 通过试验研究和数值模拟, 分析了不同焊点数量 (2 点、3 点和 4 点) 及焊点分布对接头力学性能的影响, 以及在拉剪力作用下接头的应力分布状态, 从而获得优化设计的焊点数量与分布。

1 材料与方法

试验材料为 2 mm 的 2219-O 与 8 mm 的 2219-CS, 其名义化学成分如表 1 所示。待焊试样尺寸为 150 mm×50 mm, 搭接宽度为 50 mm, 2219-O 为上板, 2219-CS 为下板, 进行多点焊接试验, 焊点分布如图 2 所示。在美国 Instron 3382 型电子万能试验机上进行拉剪试验, 为了保持加载力的方向与连接界面一致, 试样背部放置两个垫片, 如图 3 所示。拉伸速度

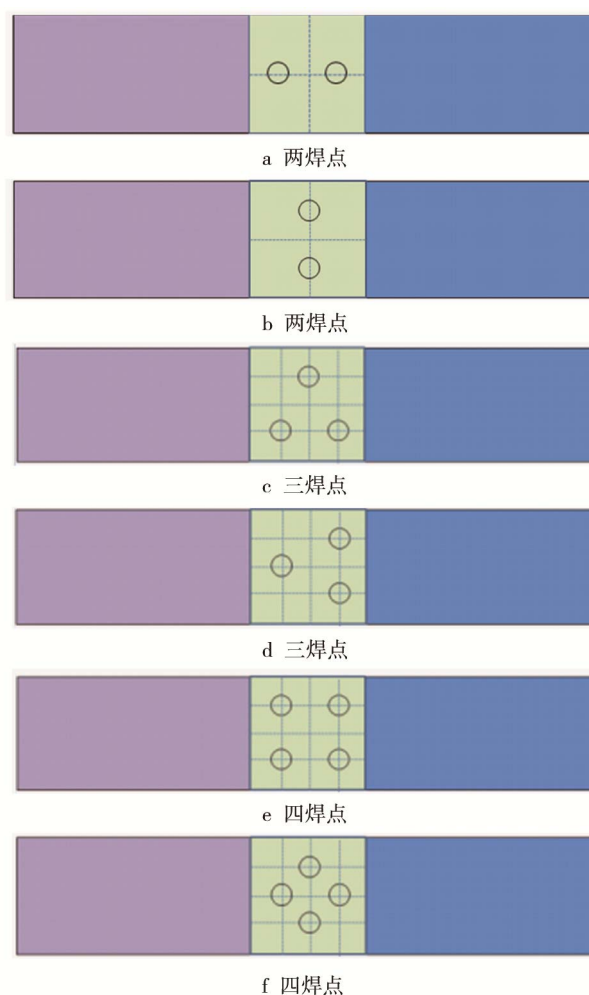


图 2 焊点分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of welding spots distribution

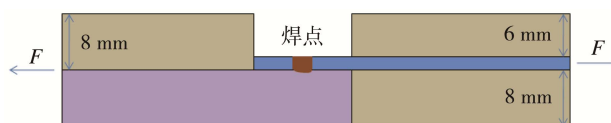


图 3 拉剪试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of tensile-shear test

表 1 2219 铝合金主要化学成分
Tab.1 Main chemical compositions of 2219 aluminum alloy

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
质量分数/%	0.3	0.3	6.0~7.0	0.4~0.8	0.05	0.10	0.1~0.2	余量

保持为 1 mm/min，当搭接的上下两个板完全分离时结束试验，并记录实验数据。每组参数下的试验值为 3 个样品拉伸载荷的平均值。旋转速度为 1800 r/min，下压量为 2.6 mm，焊接时间为 6 s。

2 数值分析模型建立

针对回填式搅拌摩擦点焊接头的拉剪试样模拟，设置待焊试板的尺寸为 150 mm×50 mm，搭接面积为 50 mm×50 mm，上下板厚度分别为 2 mm 和 8 mm。因为焊接所用搅拌针的直径为 6 mm，套筒外径为 9 mm，故模拟过程中将焊点分为两部分，内圈直径为 6 mm，外圈直径为 9 mm。将焊点外圈（热力影响区）的屈服强度近似为母材的 60%，将焊点内圈（焊核区）的屈服强度近似为母材的 80%。如图 4 所示，为不同焊点数量及分布的接头模型。

选用八节点六面体减缩积分位移/温度耦合实体单元 C3D8RT，对点焊接头进行网格划分。此单元能有效防止沙漏现象的产生，并且对网格扭曲敏感性较低，使得其具有较高的抗畸变能力。为了获得兼顾计算精度与效率的网格单元模型，采用网格局部细化技术，即将焊点附近的单元尺寸离散得尽量小，来保证焊接模拟计算的精度，其他地方的单元尺寸可以尽量划分得大些，来保证计算效率。如图 5 所示，为点焊接头的网格划分情况。

在实际的拉剪试验过程中，上下试板均受到两侧的拉伸力作用，而在模拟过程中，为简化模型，仅对上板施加拉伸载荷，将下板固定，故对下板的边界条件设定应为约束其 6 个自由度，即固支约束（ $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ ）。同时，对上板施加一个水平的位移载荷（-5 mm），表示加力过程。

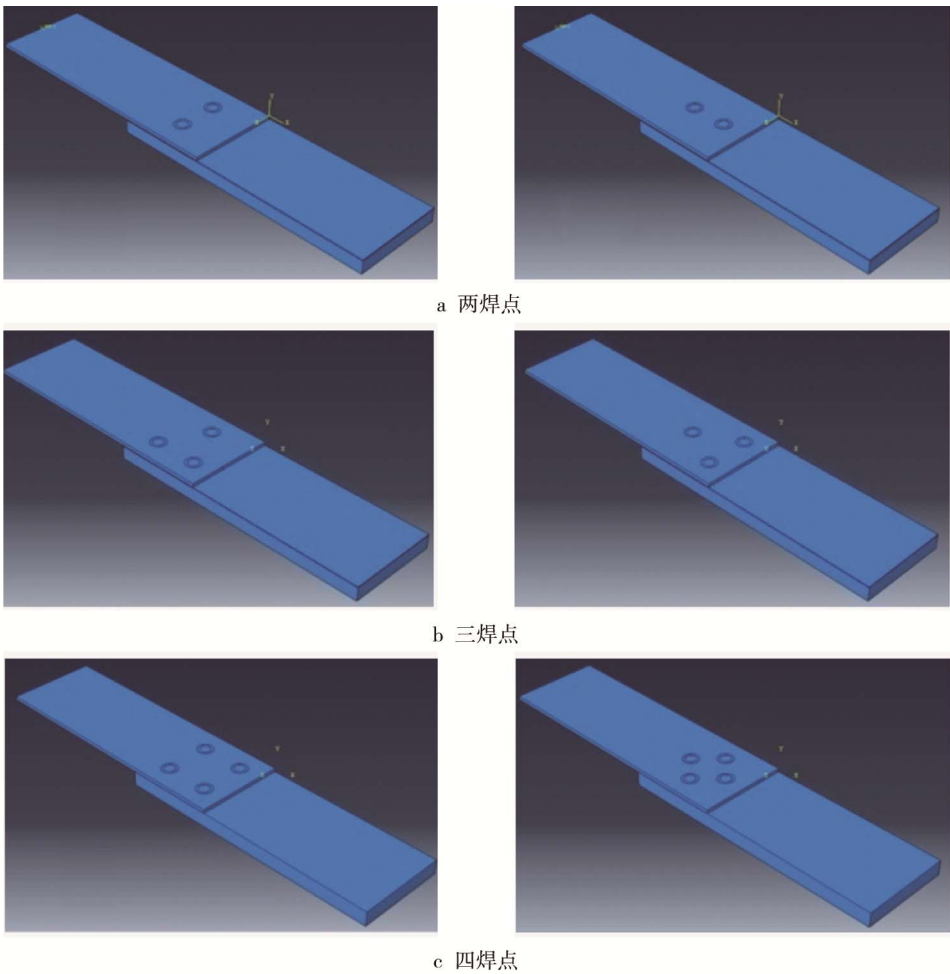


图 4 点焊接头拉剪模型
Fig.4 Tensile-shear model of RFSSW joints

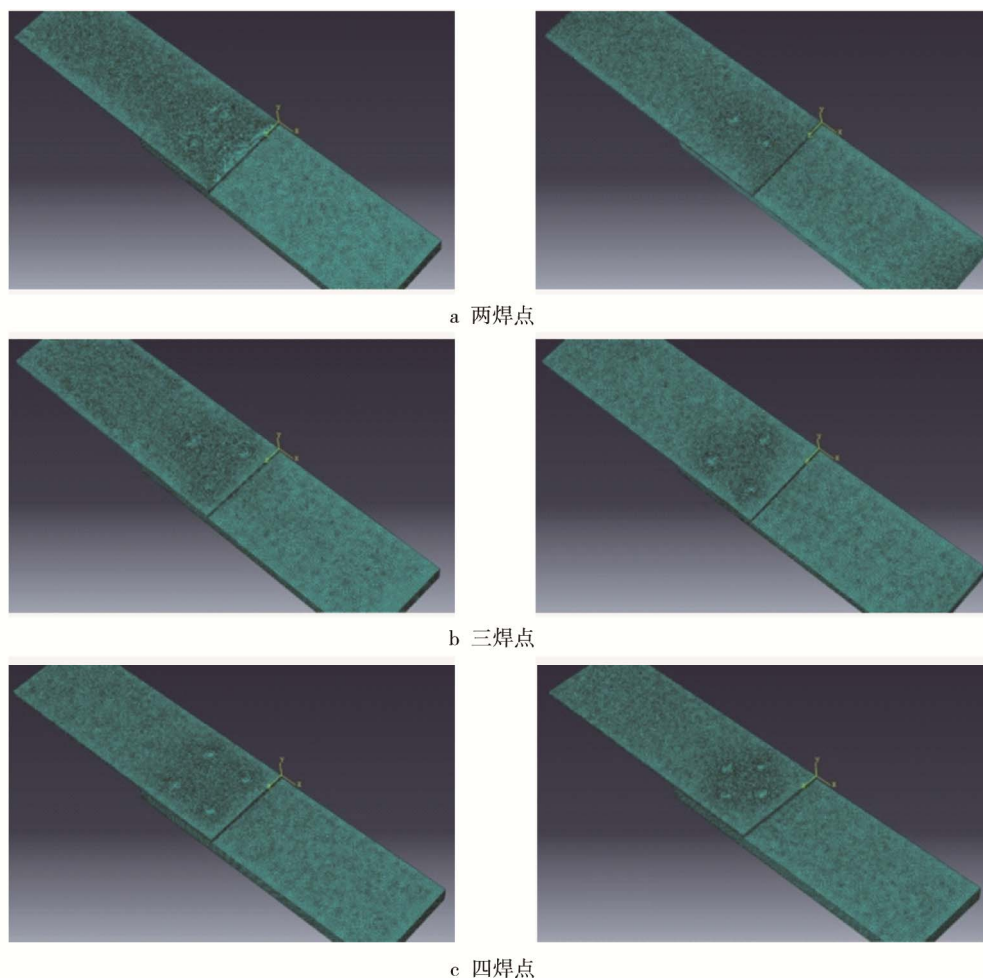


图5 拉剪模型的网格划分

Fig.5 Mesh generation of tensile-shear model

焊接完成后,部分原始界面消失,故在模拟过程中,对消失的界面进行绑定(Tie),其中,需要绑定的界面有搅拌针作用区外侧与套筒作用区内侧、套筒作用区外侧与上板内侧、套筒作用区外侧与下板内侧、套筒作用区底面与下板上表面及搅拌针作用区底面与下板上表面。

3 结果及分析

3.1 试验结果

3.1.1 宏观形貌

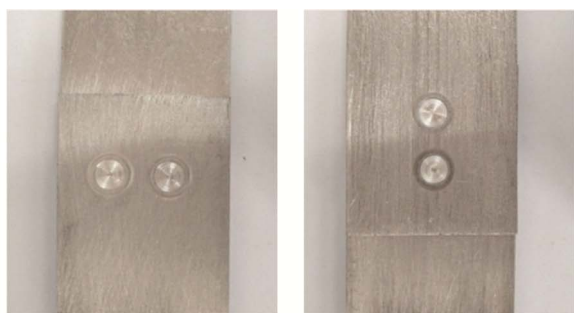
图6给出了多点接头上表面宏观形貌,可以看出多点接头成形良好,无飞边、毛刺产生,但在部分焊点表面存在凹陷缺陷,这是由于在回填点焊下扎过程中,处于高温低流动应力状态的材料会流入焊具各组件的间隙中,而这部分材料在回填过程中难以被充分回填,造成一定的材料损失,这些损失的材料造成了回填过程中的缺料现象,从而形成凹陷缺陷。

单点接头拉剪断裂后,有3种断裂形式,若整个焊核都残留在下板,为塞型断裂;若焊点从上下板的

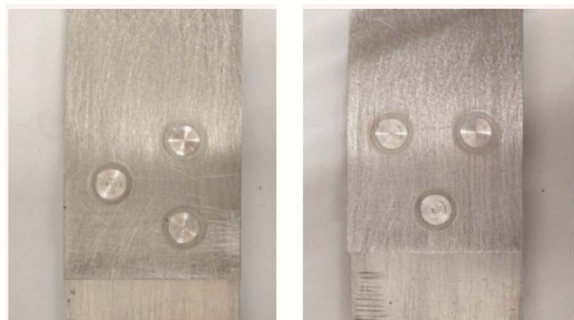
界面处断开,为剪切型断裂;若部分焊核留在下板,则为混合型断裂。如图7所示,为多点焊接接头拉断宏观形貌。可以看出,当焊点数为2和3时,接头断裂形式均为混合型断裂,而当焊点数为4时,接头断裂形式为塞型断裂。

3.1.2 力学性能

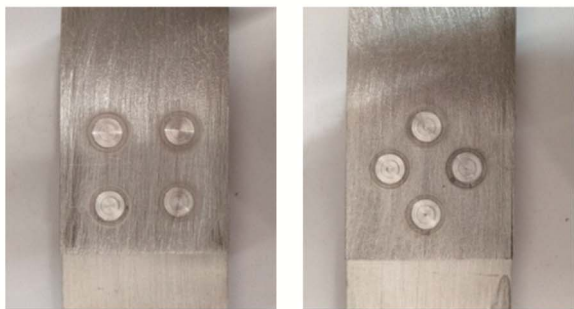
回填式搅拌摩擦点焊过程中,当焊点个数为2,分布情况如图2a所示时,拉剪力为22 657 N,焊点分布如图2b所示时,拉剪力为19 901 N;当焊点个数为3,分布情况如图2c所示时,拉剪力为20 052 N,分布情况如图2d所示时,拉剪力为24 754 N;当焊点个数为4,分布情况如图2e所示时,拉剪力为29 292 N,分布情况如图2f所示时,拉剪力为24 603 N。可以看出,多点接头拉剪力普遍较高。对比不同焊点数量所获接头的力学性能值,可以看出在板厚及材料组合、焊接参数一致的情况下,增加焊点数量有利于提高接头的承载力(如图8所示)。此外,不同的焊点分布形式对点焊接头的承载力也有一定影响,采用合理的焊点分布形式可以提高接头承载力。对比结果可以看出,当上板受力侧焊点数量分布较多时,接头承载力较高。



a 两焊点



b 三焊点

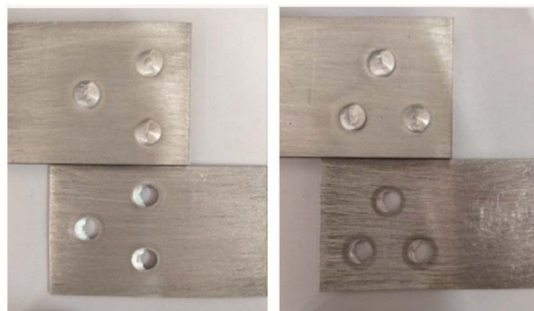


c 四焊点

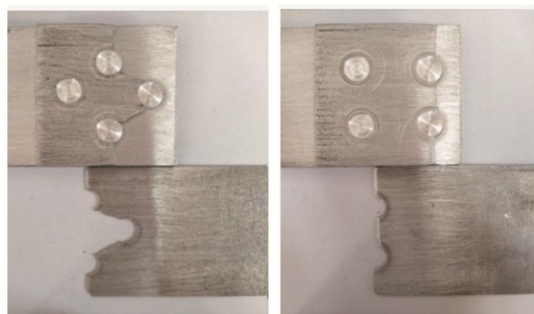
图 6 焊点的上表面形貌
Fig.6 Surface morphology of the joints



a 两焊点



b 三焊点



c 四焊点

图 7 接头拉剪断裂宏观形貌
Fig.7 Tensile-shear fracture morphology of the joints

3.2 模拟结果

3.2.1 两焊点接头拉剪模拟

图 9 为两点接头拉剪模拟结果，图 9a 中的接头在拉剪过程中，上板焊点受拉侧容易产生应力集中，接头应力分布呈对称状态（两个焊点基本平均分担载荷），最终可能沿着焊点应力集中处发生开裂。从图 9b 可以看出，当两焊点连线平行于受力方向时，上板靠近受力侧的焊点应力集中情况比较严重，后侧焊点应力较小，接头应力场分布极不均匀。

3.2.2 三焊点接头拉剪模拟

如图 10 所示，为三点接头拉剪模拟结果。可以看出，焊点分布呈正三角时，接头应力分布对称，上板受力侧焊点应力集中情况较为明显，后侧焊点应力较小。当焊点分布为斜三角时，接头应力分布明显不对称，但应力集中最明显的区域仍然是距离上板受力侧最近的焊点。

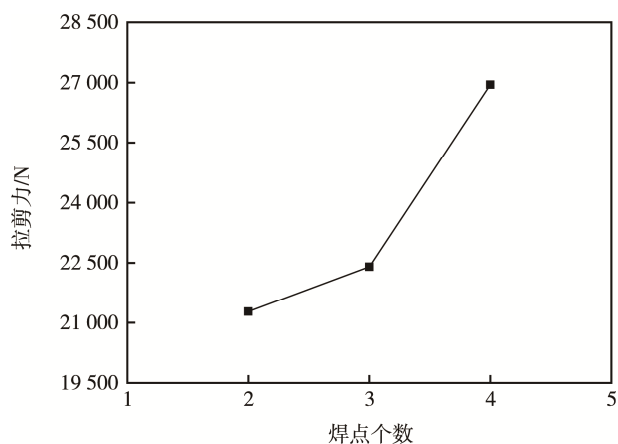
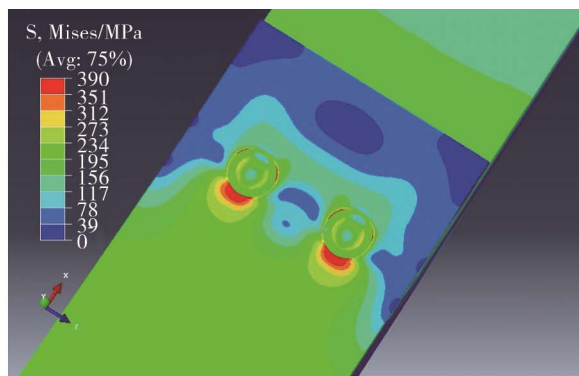


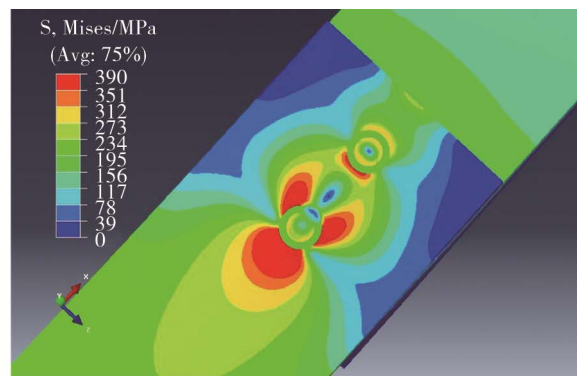
图 8 多点接头力学性能变化趋势
Fig.8 Variation trend of mechanical properties of multi-point joint

3.2.3 四焊点接头拉剪模拟

图 11 为四点接头拉剪模拟结果，当焊点分布呈正四边形时，接头应力分布呈对称状态，距离上板受



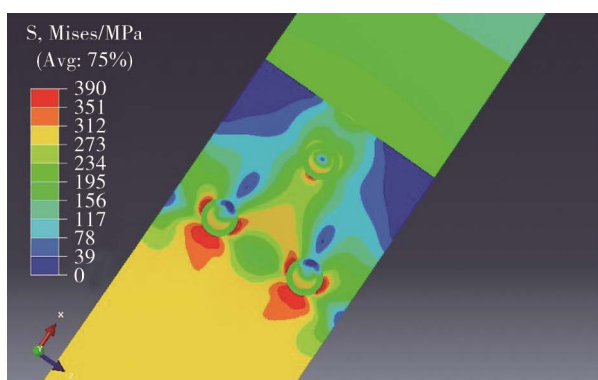
a 两点连线垂直于受力方向



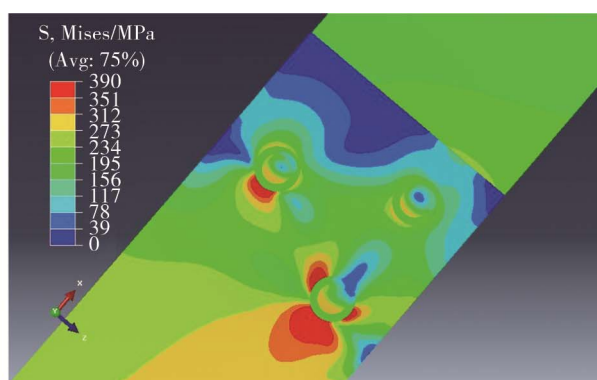
b 两点连线平行于受力方向

图9 两点接头拉剪模拟结果

Fig.9 Tensile-shear simulation results of two-point joint



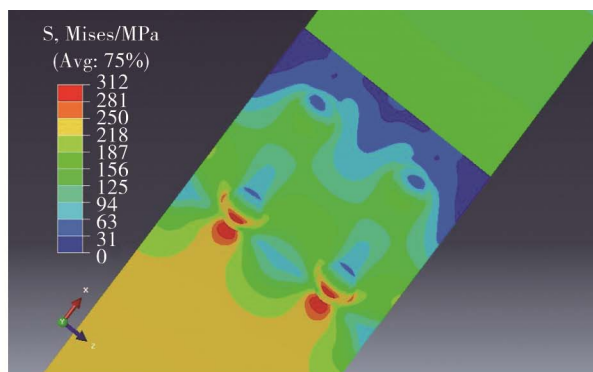
a 正三角形分布



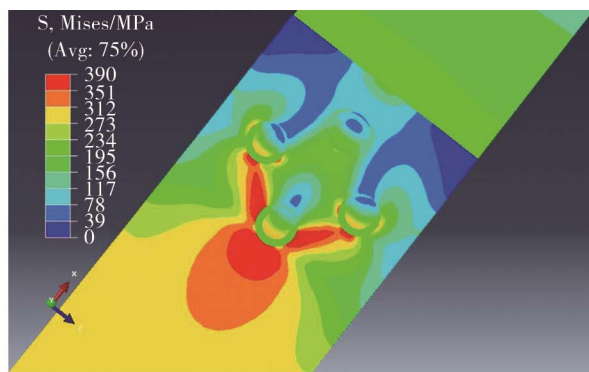
b 斜三角形分布

图10 三点接头拉剪模拟结果

Fig.10 Tensile-shear simulation results of three-point joint



a 正四边形分布



b 斜四边形分布

图11 四点接头拉剪模拟结果

Fig.11 Tensile-shear simulation results of four-point joint

力侧较近的两焊点应力集中情况较明显。当焊点分布呈斜四边形时,上板受力侧仅一个焊点,故此应力集中比较显著。

基于以上多点接头拉剪模拟结果可以看出,在拉剪过程中,靠近上板受力侧的焊点主要承受较大力的作用。当受力侧仅有一个焊点时,该焊点附近应力集中比较明显,且接头拉剪性能较差;当受力侧有两个平行焊点时,焊点平分载荷,拉剪性能较好。可以预

测,如果垂直于受力方向均匀布置多点,有利于缓解每个焊点的承载力。

4 结论

1) 多点接头上表面成形良好,无明显缺陷。接头拉剪力普遍较高,当焊点数量为4且呈“正四边形”分布时,接头拉剪性能最优,为29 292 N。

2) 在拉剪过程中, 靠近上板受力侧的焊点主要承受较大力作用。当受力侧仅有一个焊点时, 该焊点附近应力集中比较明显, 且接头拉剪性能较差; 当受力侧有两个平行焊点时, 焊点平分载荷, 拉剪性能较好。

参考文献:

- [1] SHEN Zhi-kang, DING Yu-quan, GOPKALO O, et al. Effects of Tool Design on the Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Al Alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 751—759.
- [2] MARTIN Reimann, JANNIK Goebel, JORGE F. Microstructure and Mechanical Properties of Keyhole Repair Welds in AA 7075-T651 Using Refill Friction Stir Spot Welding[J]. *Materials & Design*, 2017: 132.
- [3] SHEN Zhi-kang, YANG Xin-qi, ZHANG Zhao-hua, et al. Microstructure and Failure Mechanisms of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminum Alloy Joints[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 476—486.
- [4] DONG Zhi-bo, SONG Qi, AI Xin-xin, et al. Effect of Joining Time on Intermetallic Compound Thickness and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded Dissimilar Al/Mg Alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019: 42.
- [5] CAMILA C D C, ATHOS H P, GABRIEL P D, et al. Investigation of Geometrical Features on Mechanical Properties of AA2198 Refill Friction Stir Spot Welds[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 330—339.
- [6] CHEN Kai, LIU Xun, NI Jun. Keyhole Refilled Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 249: 452—462.
- [7] CHU Qiang, LI Wen-ya, YANG Xia-wei, et al. Microstructure and Mechanical Optimization of Probeless Friction Stir Spot Welded Joint of an Al-Li Alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1739—1746.
- [8] ISAM J I, GUNEY G Y. Application of a Novel Friction Stir Spot Welding Process on Dissimilar Aluminum Joints[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 35: 282—288.
- [9] 罗凌云. 2A12-T4 铝合金回填式搅拌摩擦点焊工艺及机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LUO Ling-yun. Research on Process and Mechanism of Refill Friction Stir Spot Welding for 2A12-T4 Aluminum Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [10] LI Gao-hui, ZHOU Li, LUO Ling-yun, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded Alclad 2A12-T4 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019.
- [11] SHEN Zhi-kang, DING Yu-quan, CHEN Jin, et al. Microstructure, Static and Fatigue Properties of Refill Friction Stir Spot Welded 7075-T6 Aluminium Alloy Using a Modified Tool[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(7): 587—600.
- [12] 任香会, 李继忠, 董春林, 等. 2024 铝合金回填式搅拌摩擦点焊接头组织和性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(23): 52—55.
- REN Xiang-hui, LI Ji-zhong, DONG Chun-lin, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy Refilled Friction Stir Spot Welded Joint[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(23): 52—55.
- [13] 岳玉梅, 李政玮, 姬书得, 等. 搅拌头形状对回填式搅拌摩擦点焊过程中材料流动行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(9): 2428—2434.
- YUE Yu-mei, LI Zheng-wei, JI Shu-de, et al. Effect of Tool Geometry on Material Flow Behavior during Friction Spot Welding Process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(9): 2428—2434.
- [14] 李政玮. 铝合金 RFSSW 的材料流动规律及力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.
- LI Zheng-wei. Material Flow Behavior and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welding Aluminum Alloy[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [15] 邢艳双, 党鹏飞, 李丰, 等. 异种铝合金回填式搅拌摩擦点焊的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2018, 39(1): 22—25.
- XING Yan-shuang, DANG Peng-fei, LI Feng, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Refill Friction Stir Spot Welded Dissimilar 7075/6061 Aluminum Alloys[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(1): 22—25.
- [16] 苏志强, 董康英, 孙世烜, 等. 回填式搅拌摩擦点焊过程中材料流动的数值模拟[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(17): 225—228.
- SU Zhi-qiang, DONG Kang-ying, SUN Shi-xuan, et al. Numerical Simulation of Material Flow during Refill Friction Stir Spot Welding Process[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(17): 225—228.