

工艺参数对 2024 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊接质量的影响研究

陈志强

(张家界航空工业职业技术学院 湖南 张家界 427000)

摘要: 本文通过实验研究 10mm 厚 2024 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊 (FSW) 焊接工艺, 分析焊接参数对焊缝形貌和力学性能的影响, 研究了搅拌头形状尺寸、搅拌头转速、焊接速度、下压量、主轴倾角、垫块圆角半径等焊接工艺参数对焊接质量的影响。结果表明, 焊接质量是多种参数共同作用的结果, 合适的焊接工艺参数能够获得高质量的焊缝, 同时提高焊接强度和延展性。本文对 2024 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊焊接工艺的研究有一定的参考价值。

关键词: 搅拌摩擦焊; T 型接头; 焊接工艺参数

1 实验背景

2024 铝合金是一种高强度、耐蚀性良好的铝-铜-镁系合金, 广泛应用于航空航天领域^[1]。但是, 2024 铝合金由于含有较多的 Cu 元素, 在传统的熔化焊接过程中容易产生液相分离和热裂纹等缺陷。因此, 搅拌摩擦焊为 2024 铝合金的连接提供了一种有效的解决方案。搅拌摩擦焊 (Friction Stir Welding, FSW) 是一种固相焊接技术, 它利用高速旋转的搅拌针在被焊材料上产生热量和塑性变形, 使被焊材料达到固相连接的状态^[2]。FSW 具有低热输入、无熔池、无气孔、无裂纹等优点, 适用于高强度、难焊的铝合金等轻质材料的连接^[3]。T 型接头是机械工程结构中应用最广泛的焊接接头形式之一, 它不仅可以承受单向应力还能承载复合应力^[2], 飞机、汽车、高速列车等的钣金结构中多采用 T 型接头的壁板+加强筋结构, T 型接头搅拌摩擦焊接工艺研究在相关领域具有工程应用价值。

2 实验材料与方法

本研究的实验材料为 2024-T4 铝合金, 采

用搭接式 T 型接头, 两板的加工尺寸均为 300mm × 120mm × 10mm 板材。为减少组织变化对实验带来的影响, 采用线切割进行板件的加工, 实验设备采用数控式搅拌摩擦焊机型号为 JF-FSW-003, 焊接工艺参数搅拌头旋转速度 1200 ~ 1500r/min, 焊接速度 60 ~ 100mm/min, 下压量 0.1 ~ 0.5mm, 主轴倾角 0 ~ 7°, 垫块的圆角半径 0 ~ 5mm, 详细的焊接工艺参数与对应的编号如表 1 所示。焊接后焊接接头进行强度性能试验, 测量相关性能参数, 拉伸试样尺寸如图 1 所示。

3 实验结果与分析

下文分别对搅拌头的形状尺寸、焊接工艺参数对接头性能的影响进行分析。

3.1 搅拌头的形状尺寸对接头性能的影响

3.1.1 轴肩尺寸及结构

轴肩的作用是通过与工件摩擦产生大量的热能, 使金属软化, 并持续施加压力包拢塑性金属。平板对接时, 轴肩直径、搅拌针直径和板厚之间存在线性关系^[4], 经研究 T 型接头的轴肩直径、搅拌针直

表 1 焊接工艺参数与接头编号

接头编号	转速 n / (r/min)	焊接速度 v / (mm/min)	搅拌头形状编号	下压量 h / mm	倾斜角 θ / °	圆角半径 R / mm
A1 ~ 3	1500	60、80、100	4	0.4	3	3
B1 ~ 3	1200	60、80、100	4	0.4	3	3
C1 ~ 3	1200	80	1、2、3	0.4	3	3
D1 ~ 4	1200	80	4	0.1、0.2、0.3、0.5	3	3
E1 ~ 4	1200	80	4	0.4	0、1、5、7	3
F1 ~ 3	1200	80	4	0.4	3	0、1、5

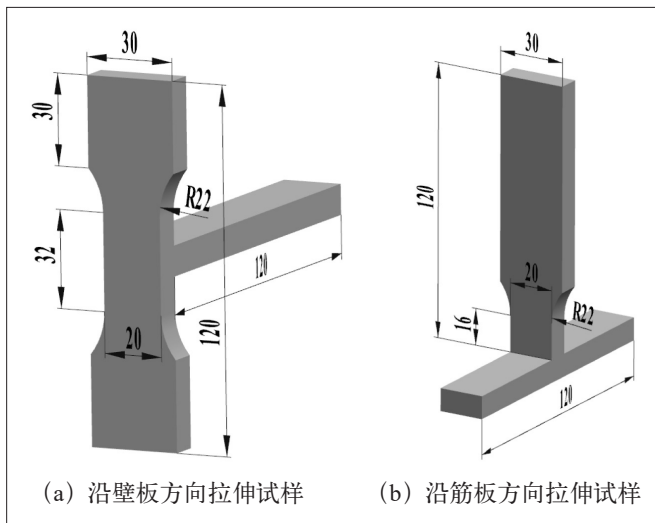


图1 拉伸试样尺寸规格

径和板厚之间仍然存在近似线性匹配关系。轴肩直径与搅拌针直径的比值约为3，若比值过小，产生的摩擦热不足，金属塑化不充分从而易产生焊接缺陷；若比值过大，产生热量过多，则易出现接头弱化等缺陷。

本文研究的轴肩端面形状主要采用平面和凹面两种，研究表明，凹面轴肩相较于平面轴肩顶锻作用更强，对塑性金属的流动包拢效果更好，配合一定的主轴倾角，不易造成流动性金属材料的溢出。常见的轴肩结构如图2所示。从加工性和经济性考虑，端面结构选用光面（第一个）和同心圆（最后一个）两种结构的轴肩应用较广，同心圆轴肩较光面轴肩而言，增大了与焊接表面的接触面积，提高了焊接时的闭合性，能有效地提升塑性金属的流动性，进而拥有更宽的工艺范围。

3.1.2 搅拌针的尺寸及结构

搅拌针的作用是使高塑性状态下的金属沿着焊接方向从前往后和上下往复运动。本研究主要采用的搅拌针的形状结构如图3所示。经研究，圆锥形搅拌针与圆

柱形搅拌针相比较可以减少与固定夹具倒角部位的碰撞概率，可以显著增加金属沿搅拌针轴向的流动效果；3P圆锥带螺纹形搅拌针较其他三种形状的搅拌针更能产生强烈的塑性变形和搅拌效果，在焊缝周围形成细小的晶粒和均匀的组织。

通过文献研究和大量实验表明，搅拌针长度应略小于焊件厚度，其与轴肩直径之比约为1:3为好，搅拌针的直径一般为待焊工件厚度的0.9~1.1倍，搅拌针直径越大焊缝底部热输入越多，但与夹具发生碰撞的概率增加。相较于搅拌针的直径，搅拌针的长度对热输入量的影响较小。对于T型接头而言，搅拌针的长度略长于待焊工件厚度，一般为待焊工件厚度的1.1~1.2倍，过长的搅拌针会使得沿筋板方向的接头强度下降。

3.2 焊接工艺参数对接头性能的影响

3.2.1 搅拌头转速 n 和焊接速度 v

研究表明， n/v 比值对焊缝表面成形质量与力学性能影响较大，搅拌头旋转速度和焊接速度匹配合适可以获得较好的表面质量和焊接质量。 n/v 比值较大时，热输入较大导致焊核区晶粒变粗从而影响接头性能； n/v 比值较小，热输入较小塑性金属的流动性降低搅拌针的搅拌效果不充分，弱结合缺陷愈发的

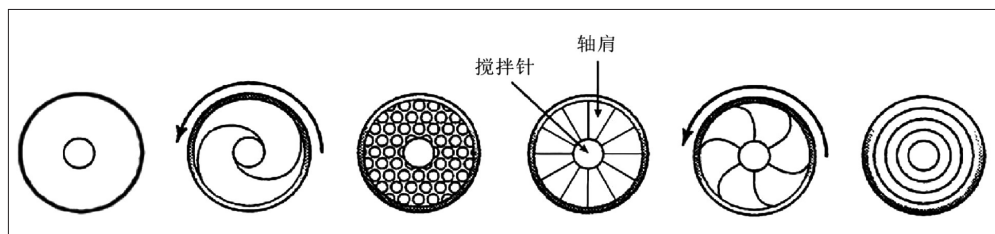


图2 轴肩结构示意图

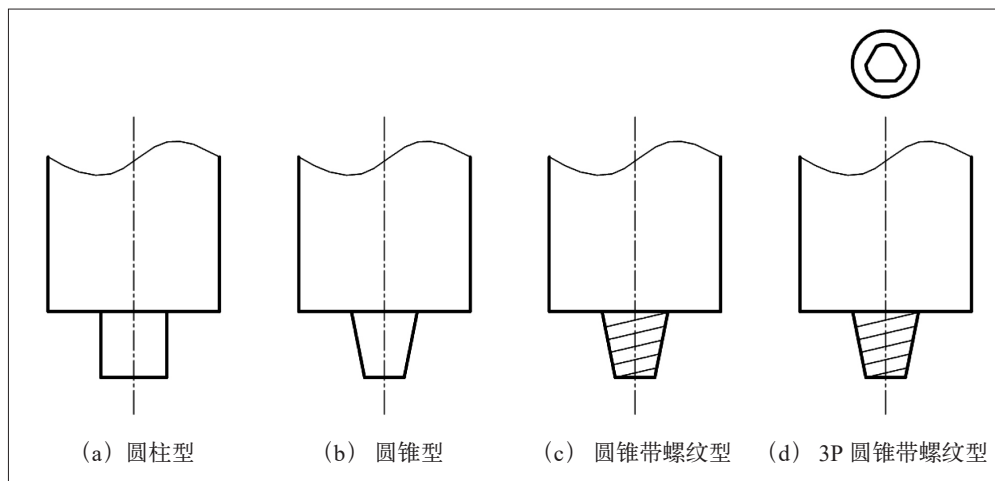


图3 搅拌针结构示意图

明显, 抗拉强度逐渐下降; n/v 比值进一步变小时, 热输入持续减小, 除弱结合外, 还有隧道等缺陷出现, 最终导致抗拉强度快速下降。 n/v 比值在 12 ~ 15 范围内能获得较好的接头。

3.2.2 主轴倾角 θ

主轴倾角 θ 对接头成形有很大的影响, 当主轴倾角较小时, 轴肩后沿对热塑性金属材料的压力不够, 致使焊缝表面粗糙, 两侧飞边较多, 接头强度较低; 当主轴倾角较大时, 轴肩前沿与热塑性金属的摩擦热不足, 在后退侧产生单侧飞边, 倾角的增大同时使焊缝凹陷增加, 焊缝减薄量增加, 使强度降低。通过文献和实验研究表明, 倾角 θ 保持在 $3^\circ \sim 5^\circ$ 可使得焊缝成形较好, 接头强度较高。主轴倾角示意图如图 4 所示。

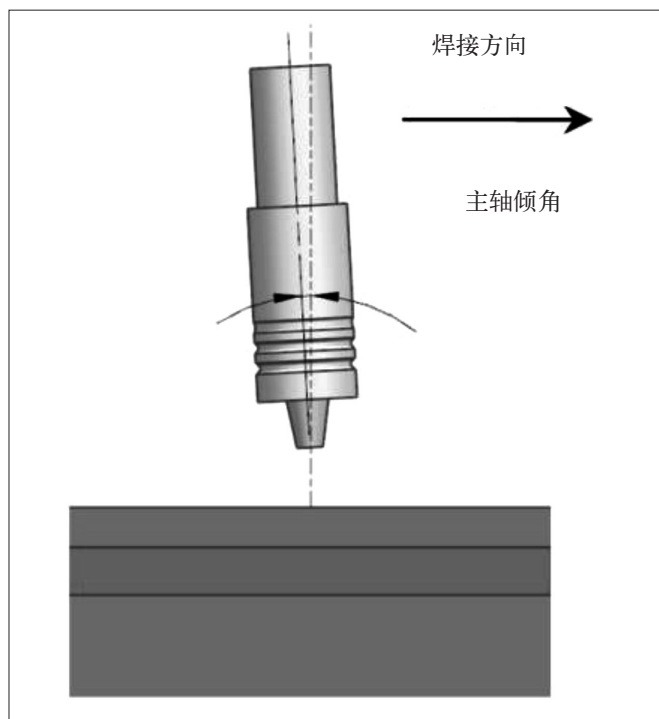


图 4 主轴倾角示意图

3.2.3 下压量 h

下压量 h 是搅拌头施加在工件上的垂直力的大小, 下压量 h 的大小对于焊接头的形貌、变形程度、塑性流动和金属流动状态都有影响。经研究表明, 下压量 h 在 0.2 ~ 0.4mm 时, 接头形貌和力学性能较好; 下压量过小, 顶锻力不足, 金属的塑化和流动性效果较差, 接头力学性能不高; 下压量过大, 飞边严重, 壁板减薄, 热输入量增加组织粗大, 接头力学性能下降。

3.2.4 圆角半径 R

T 型接头搅拌摩擦焊中圆角的作用是可以加强接头的承载能力, 圆角可以减小搅拌摩擦焊接头处的应力集中, 从而降低接头产生的残余应力, 提高接头的抗拉强度和疲劳寿命。圆角过小时, 与搅拌针的碰撞概率增加, 应力集中程度相对较高; 圆角过大时, 倒角垫块与工件之间的间隙更大, 需要填充的金属越多, 在前进侧易产生隧道缺陷。焊接工艺参数不当时, 在圆角处易产生结合线缺陷等, 从而降低接头的强度。板厚 10mm 的 T 型接头, 圆角半径 R 在 1 ~ 3mm, 接头性能较好。垫块圆角如图 5 所示。

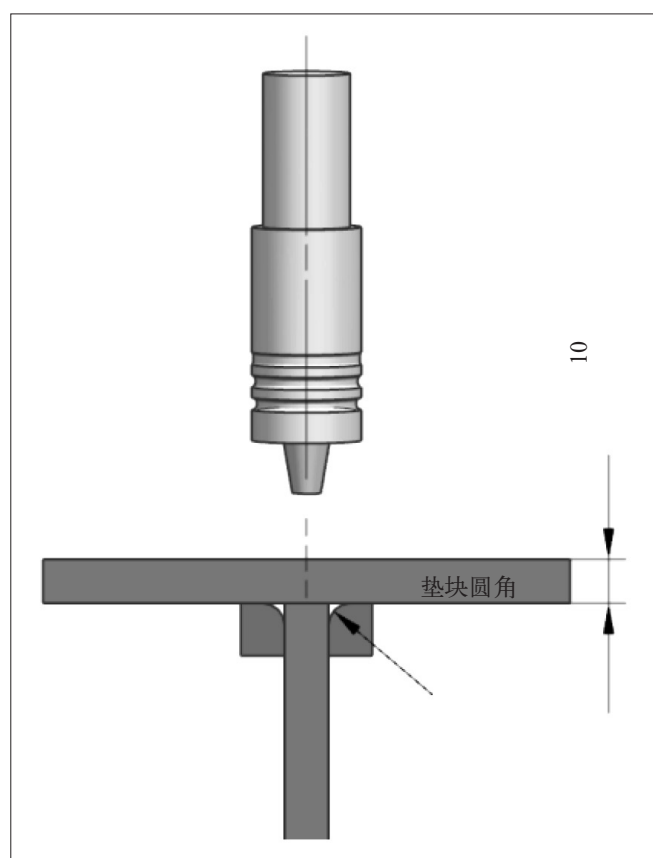


图 5 垫块圆角

4 结语

本文针对工艺参数对 2024 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊接质量的影响进行了研究, 得出以下结论:

(1) 搅拌头的形状与尺寸对搅拌摩擦焊接质量影响较明显, 不同的结构和尺寸会影响热输入的大小、金属塑化与流动性, 晶粒的尺寸和组织分布。在

选择搅拌头的形状与尺寸时,应当根据所要焊接材料的性质、板厚、加工成本以及焊接工艺参数等因素综合考虑,进行实验和优化,并根据实际应用场景的要求进行适当调整。

(2) 焊接工艺参数的合理选择对焊接质量起决定性作用,主要参数有搅拌头转速和焊接速度,这也是国内外学者研究的重点。在其他条件选定的情况下,探索合适的工艺参数规范优化焊接工艺。此外还有主轴倾角、下压量、圆角半径等参数也是获得优质焊缝的关键,各参数之间相互影响共同作用。

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目:2024 铝合金 T 型接头搅拌摩擦焊焊接工艺研究(20C1890)。

参考文献:

- [1] 王进军,王桂珍,刘鹏,等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头组织结构及力学性能[J]. 电焊机,2015,45(06):86-90.
- [2] 刘德佳,丁江灏,涂文兵,等. T 型接头搅拌摩擦焊接的研究进展[J]. 材料导报,2016,30(23):68-73.
- [3] I. RADISAVLJEVIC, A. ZIVKOVIC, N. RADOVIC, V. GRABULOV. 搅拌摩擦焊工艺参数对 2024-T351 铝合金搭接焊接头成形质量和力学性能的影响(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2013,23(12):3525-3539.
- [4] 高守栋. 基于热力耦合分析的搅拌头结构设计及接头组织研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

作者简介:陈志强(1982.09-),男,汉族,江西景德镇人,硕士研究生,副教授,研究方向:机械设计与制造。

