DOI: 10.3901/JME.2021.20.108

静轴肩 FSW 铝合金 6061-T4 板的 T 形接头 组织特征及动静载特性研究*

李冬晓¹ 杨纯¹ 黄鑫¹ 邢广强¹ 杨新岐²

(1. 北京卫星制造厂有限公司北京市航天器焊接技术与装备工程技术研究中心 北京 100094;

2. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300072)

摘要: 利用自主开发的静止轴肩焊接工具及工装, 在不同的焊接参数下均获得了外观成形良好、无焊接缺陷的 T 形接头, 并对接头内部成形、显微组织、硬度、静载强度和疲劳性能及疲劳失效机制进行了研究。研究表明铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头内部质量良好, 无缺陷, 接头表面存在表面超细晶区, 且焊核区内部由于流动状态不同导致组织及硬度存在一定差异, T 形接头底板及筋板硬度较母材有不同程度的降低, 底板和筋板拉伸试验均断裂于接头热影响区, 在优化的参数下底板和筋板方向的接头系数均高于 0.7, 在 2×10^6 疲劳寿命下的特征疲劳强度可达 101.0 MPa, 远高于 IIW 建议的设计准则。焊接速度对接头疲劳性能及疲劳失效机制影响较大, 疲劳裂纹萌生于 T 形接头底板和筋板过渡处, 低焊速时断裂机制为穿晶断裂, 高焊速时由于晶界稳定性差, 断口呈现穿晶断裂和晶间断裂的混合形貌。完成了铝合金 T 形接头的无缺陷焊接及组织性能研究, 为铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头在新型轻量化航天器密封舱结构中的应用提供了技术支撑。

关键词: 铝合金; 静止轴肩搅拌摩擦焊; T 形接头; 疲劳性能; 断裂机制

中图分类号: TG453

Microstructure Characteristics, Static and Fatigue Properties of Stationary Shoulder Friction Stir Welded T-joint of AA6061-T4

LI Dongxiao¹ YANG Chun¹ HUANG Xin¹ XING Guangqiang¹ YANG Xinqi²

(1. Beijing Research Center of Welding Technology and Equipment for Manufacturing of Spacecrafts,

Beijing Spacecrafts, Beijing 100094;

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: T-joints of AA6061-T4 were fabricated by self-made stationary shoulder friction stir welding tool. Defect-free T-joints with good appearance were obtained under different welding parameters. The weld formation, microstructure, micro-hardness, static performance and fatigue properties of the T-joint were evaluated. The weld surface was characterized by super fine equiaxed grains. Microstructure and hardness distribution in weld nugget vary due to the material flow condition. The hardness in the skin and stringer decreased at different levels compared to that of the base material. T-joints failed at the heat affected zone during the tensile tests in both skin and stringer direction. Using optimized welding parameter, the characterized fatigue strength was 101 MPa at the cycle of 2×10^6 . Fatigue crack initiated at the corner of skin and stringer, the failure mechanism in fatigue tests was transgranular fracture for T-joints at low welding speed and a mixture of intergranular and transgranular fracture for T-joints at high welding speed. The study of microstructures and mechanical properties of defect-free T-joint provides basic technical support for the manufacturing of the next-generation light-weight spacecraft structure.

Key words: aluminum alloy; stationary shoulder friction stir welding; T-joint; fatigue; failure mechanism

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1306400)。20200920 收到初稿,
20210317 收到修改稿

0 前言

T 形焊接接头在航天飞行器的金属结构中有着广泛的应用,可以满足高强铝合金结构的轻量化高承载的设计需求^[1-2]。轻质铝合金 T 形接头常采用传统搅拌摩擦焊从 T 形接头加强筋背部进行焊接,国内外学者及机构对传统搅拌摩擦焊 T 形接头焊接工艺过程、工装、组织、缺陷及性能等方面开展了较为系统的研究,但此种方式 T 形接头中由于搅拌针末端材料流动不足,很难通过工具设计及工艺过程完全避免底板与筋板间的弱连接、隧道等焊接缺陷^[1,3-6],因而在很大程度上限制了其应用前景。

静轴肩搅拌摩擦焊是在传统搅拌摩擦焊基础上发明的一种新型搅拌摩擦焊方法,其具有表面成形好、热输入小、组织均匀性好及残余应力小等优点。近期, TWI 提出了利用静止轴肩从 T 形接头根部进行双道焊接的方法,采用 8 mm 厚度的 6082-T6 和 5083-O 铝合金进行了验证,所得到的接头平整光滑、无明显的减薄,且拉伸性能优异^[7]。BUFFA 等^[8-10]对静轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头焊接工具、工艺及力学性能进行了研究,曾申波等^[11-12]对其流动特性及典型缺陷进行了研究。结果表明静轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头对搅拌工具可靠性要求较高,在优化的参数下采用静止轴肩搅拌摩擦焊可以获得表面平整、组织致密、力学性能良好的 T 形接头。Manchester 大学的 WU 等^[13-14]较为系统地研究了 7050 铝合金静止轴肩 T 形接头组织特点、应力分布及静载性能等并对焊接温度场进行了模拟。

到目前为止,静止轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头的研究仍不多见,有关静止轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头轴肩及搅拌工具设计、接头组织、静载性能及断裂机制等方面有待于进一步深入的研究,且其疲劳性能无相关研究。本文利用自主研制的搅拌工具针对 6061-T4 铝合金 T 形接头进行了静轴肩搅拌摩擦焊研究,对 T 形接头的成型、组织、硬度、静载强度、疲劳性能及疲劳失效机制等进行了较为系统的研究,为铝合金静止轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头在新型轻量化航天器密封舱等结构中的应用提供技术支撑。

1 试验材料、设备与方法

本试验所采用的焊接材料为厚度 5 mm 的 6061-T4 铝合金,屈服强度和抗拉强度分别为

170 MPa 和 267 MPa。底板尺寸为 450 mm×193 mm,筋板尺寸为 410 mm×99 mm。采用自主研制的静止轴肩搅拌头及工装进行 T 形接头的焊接(图 1),搅拌头采用 H13 钢,轴肩采用 45 调质钢。主轴转速为 1 500 r/min,焊接速度为 100 mm/min 和 300 mm/min,搅拌工具倾角 2°,下压量 0.2 mm。

图 1 SSFSW T 形接头焊接过程及工具示意图

焊接完成之后,沿垂直于焊缝的方向切取尺寸为 40 mm×20 mm 的试样,进行接头组织金相分析和显微硬度测试。采用 Olympus-GX51 光学显微镜对接头组织进行观察,而后采用 Vilson 432SVD 硬度计在接头两个方向中心线位置分别沿底板和筋板两个方向进行硬度测试,载荷为 9.8 N,加载时间为 10 s,测量间距为 0.5 mm。沿垂直于焊接方向切取宽度为 10 mm 的拉伸试样,进行拉伸测试,每个参数下测试 3 个试样,并取其平均值,拉伸示意图如图 2 所示。

图 2 拉伸示意图

采用 Instron ElectroPlus E10000 全电子式疲劳试验机对接头试样进行 4 点弯曲疲劳测试,试样尺寸及结构与拉伸试样相同。在 118~149 MPa 应力范围内选取 6 个名义应力范围水平进行测试,每个应力范围水平测试 3 个试样,应力比为 0.1,加载波形为正弦波,加载频率 30 Hz。使用 Matlab 软件以应力范围为 Y 轴,疲劳寿命为 X 轴,在双对数坐标

系下按照 Basquin 公式对疲劳数据以最小二乘法进行线性拟合, 得到中值 $S-N$ 曲线以及常数 m 和 C , 拟合公式如式(1)所示

$$\lg N = \lg C - m \lg S \quad (1)$$

式中, S 为应力范围, m , C 为常数, N 为疲劳寿命。

使用 Matlab 软件对单侧预测区间进行计算得到 90%置信度 97.5%存活率下的特征 $S-N$ 曲线, 计算方法如式(2)所示^[15]

$$\lg N_{p\%} = \mu - ts \quad (2)$$

式中, $N_{p\%}$ 为单侧预测寿命, μ 为基于样本的中值寿命, t 为基于样本容量的 t 分布系数, s 为基于样本容量的寿命标准差。

最后, 使用 Hitachi S4800 扫描电子显微镜对疲劳断口形貌进行观察分析并对断裂机制进行了分析讨论。

2 结果与分析

2.1 接头外观成形

图 3 为转速为 1 500 r/min, 焊速为 100 mm/min 和 300 mm/min 焊接参数下的 T 形接头焊缝外观成形。在所选定的参数下, 焊接过程平稳顺畅, 焊接速度对表面成形影响较小, 所有焊接接头成形美观, 表面光滑, 轴肩下部没有出现明显的减薄现象, 且焊缝飞边很小, 接头没有明显变形。T 形接头的静

(a) 1 500 r/min & 100 mm/min

(b) 1 500 r/min & 300 mm/min

图 3 SSFSW T 形接头外观

轴肩搅拌摩擦焊过程中, 高速旋转的搅拌针与材料进行摩擦, 焊接区材料在摩擦热与变形热的作用下发生软化并在搅拌针的搅拌作用下发生流动, 在静止轴肩及焊接区周围未充分软化的材料双重约束下在搅拌针的前进过程中受到剧烈的挤压, 位于搅拌针前方的粘塑性材料经过焊缝后退侧流动到搅拌针后方, 在静轴肩的约束下完成焊缝成形, 形成表面平整光滑的 T 形接头焊缝外观。

2.2 接头内部组织

图 4 为转速 1 500 r/min, 焊速为 100 mm/min 和 300 mm/min 的焊接参数下, T 形接头横截面宏观形貌。可见, 不同参数下压入量相差不多, 约为 0.2 mm。两道焊接的焊核区(Nugget zone, NZ)相互重叠呈现为伞形, 焊核区内部组织存在深浅色差, 在低焊接速度(100 mm/min)下, 材料流动范围更大且混合更充分, 底板和筋板原始界面完全消失。在高焊接速度(300 mm/min)下, 仍可见底板和筋板的原始界面残余, 界面向后退侧(Retreating side, RS)发生不同程度的移动, 通过原始界面残余可发现焊核底部材料流动范围更大, 且组织深浅色差与材料流动存在直接的联系。有研究表明, 搅拌针螺纹结构与焊核区流动差异导致的组织深浅色差有关^[13], 且静轴肩搅拌摩擦焊焊核区深浅条纹与搅拌针螺纹结构直接相关, 不同螺纹结构导致的流动剧烈程度不同, 进而出现深浅条纹特征差异。由于 T 形接头焊接中轴肩直角对焊接区材料流动的阻碍作用, T 形接头直角外侧材料沿搅拌针切向移动时将在轴肩

(a) 1 500 r/min & 100 mm/min

(b) 1 500 r/min & 300 mm/min

图 4 SSFSW T 形接头横截面宏观形貌

尖角的阻碍作用下改变原切向移动方向绕过轴肩并向焊核内侧进行流动, 进而导致焊核区底部流动性明显增加。

图 5 为图 4 中标记位置的显微组织形貌。母材(图 5a)为典型的轧制组织, 晶粒为长饼状, 结晶相及沉淀相分布在晶界及晶粒内部。焊核区顶部热影响区(图 5b)晶粒在焊接压力及热输入的影响下已经发生不完全再结晶, 原长饼状晶粒演变为多个较小的晶粒, 由于其紧临焊核区, 焊接时温度较高, 结晶相和晶粒内部沉淀相发生了溶解, 尺寸较母材有所减小^[16]。图 5c 为焊核内部深浅组织交界位置显微组织照片, 两侧晶粒形状及尺寸差别不大, 均为细小的等轴晶, 晶粒尺寸约为 13 μm 。深色区域受金

相腐蚀剂的腐蚀程度更高, 晶粒内部分布着大量的腐蚀坑。深色区域硬度为 79.8 HV, 而浅色区域硬度较低, 为 62.8 HV。可见, 焊核材料流动特性不同导致不同区域组织颜色深浅不同, 深色区域沉淀相转变更充分, 沉淀相与铝基体界面共格程度更低, 界面能更高, 因此更易受金相腐蚀剂的影响, 进而显示出不同的明暗衬度。图 5d 可见 T 形接头焊接区表面靠近轴肩位置约 100 μm 深度的表层区域为超细等轴晶, 晶粒尺寸约为 3 μm 。由于焊接区表层承受轴肩压力更大, 晶粒变形量更大, 且轴肩在焊接过程中不产热, 温度显著低于焊缝温度, 表层区域再结晶后晶粒长大受到抑制, 因而产生了表面超细晶。

图 5 T 形接头内部显微组织

2.3 接头硬度分布

图 6 是在主轴转速为 1 500 r/min、焊接速度分别为 100 mm/min 和 300 mm/min 参数下沿着 T 形接头底板方向的显微硬度分布。热影响区硬度较母材降低明显, 热影响区中硬度值随与焊核中心距离的增大逐渐升高, 由于焊核中由流动状态导致的组织不均匀, 焊核硬度波动较大, 在深色区域硬度较高。

当焊接速度较低时(100 mm/min), 焊核硬度范围为母材的 47%~89%, 第二道焊缝热影响区硬度低于第一道焊缝, 第一道焊缝和第二道焊缝热影响区最低硬度分别为母材的 58%和 47%。在较高焊接速度下(300 mm/min), 焊核区硬度分布范围为母材的 58%~89%, 第二道焊缝热影响区和第一道焊缝热影响区最低硬度水平相当, 约为母材硬度的 58%。

图 6 T 形接头底板方向硬度分布

较高焊速下接头底板中心硬度和第二道焊缝热影响区最低硬度明显高于低焊速下接头相应位置的硬度。不同焊速下, 第一道焊缝热影响区最低硬度差别不明显。低焊速下接头热影响区宽度较高焊速接头更宽。整体来看低焊速下焊核区硬度略低于高焊速下所得接头硬度。

图 7 为不同焊接速度下 T 形接头筋板中心处沿筋板方向硬度分布。沿筋板方向, 焊核硬度随着与底板外表面距离的增加逐渐升高, 焊核中硬度升高缓慢, 热影响区硬度升高较快, 直至达到母材硬度水平。

图 7 T 形接头筋板方向硬度分布

由于热影响区沉淀相在焊接热循环的影响下长大或溶解, 故硬度值产生不同程度的下降, 而焊核区中不同位置沉淀相转化程度不同进而产生较大的硬度波动。在低焊接速度下, 接头第一道焊缝的热影响区在第二道焊缝焊接中受到了二次热循环的影响, 其中的沉淀相出现进一步析出, 故第一道焊缝热影响区硬度出现一定程度的提高。当焊接速度较快时, 第二道焊接热输入温度较低且持续时间较短, 因此第一道焊缝热影响区硬度受影响较小。

2.4 接头抗拉强度

表 1 及图 8 为不同焊接参数下 T 形接头抗拉强度与断裂位置。在较高焊接速度下, 底板方向和筋

板方向的抗拉强度分别可达母材的 78% 和 96%。筋板方向拉伸断裂位置为与焊核相临的筋板热影响区, 底板方向拉伸断裂位置与焊接速度相关, 低焊速下底板断裂在第二道焊缝热影响区, 高焊速下底板断裂在第一道焊缝热影响区。结合不同参数下 T 形接头的硬度分布可知, 较低焊接速度下, 第一道焊缝热影响区硬度比第二道焊缝热影响区大约高 10 HV。这是由于在较低焊接速度下, 焊接热输入较大, 第二道焊接热输入导致第一道焊缝热影响区沉淀析出更充分, 因而在较低焊接速度下, 底板方向拉伸断裂于第一道焊缝热影响区。在较高焊接速度下, 焊接热输入小, 第二道焊缝热量对第一道焊缝热影响区影响较小, 因而在较高焊接速度下, 沿底板拉伸断裂于第一道焊缝热影响区。

表 1 拉伸结果及断裂位置

主轴转速/ (r/min)	焊接速度/ (mm/min)	底板抗拉强度 /MPa	底板断裂位置	筋板抗拉强度 /MPa	筋板断裂位置
1 500	100	185	第二道热影响区	235	热影响区
1 500	300	207	第一道热影响区	256	热影响区

图 8 T 形接头拉伸测试断裂位置

2.5 接头疲劳性能

主轴转速为 1 500 r/min, 焊接速度为 100 mm/min 和 300 mm/min 参数下 T 形接头的中值 $S-N$ 曲线和 90% 置信度 97.5% 存活率下的特征 $S-N$ 曲线如图 9 所示, 线性拟合参数如表 2 所示。

由表 2 可见, 低焊速下和高焊速下 T 形接头 $S-N$ 曲线拟合的线性相关系数分别为 0.863 1 和 0.809 0, 拟合的线性相关性较好。不同焊速下曲线斜率相近, 但在 2×10^6 疲劳寿命下具有 90% 置信度 97.5% 存活率的特征疲劳强度有一定的差距, 在低焊

速下接头的特征 FAT 值为 101 MPa, 高焊速下接头的特征 FAT 值为 89.3 MPa。

图 9 不同参数 T 形接头的 S-N 曲线

表 2 不同参数 T 形接头疲劳数据线性拟合结果

主轴转速 r/min	焊接速度 mm/min	线性相关系数 r	常数 m	特征 FAT (R97.5C90) /MPa
1 500	100	0.863 1	8.057 3	101.0
1 500	300	0.809 0	8.057 1	89.3

由图 9 可见, 两种焊接速度下的 S-N 曲线基本平行, 但低焊速下接头的 S-N 曲线明显高于高焊速下接头的 S-N 曲线, 且其分散带宽度较窄。

在较高焊速时(300 mm/min), 在 121 MPa 的应力范围下, 试样疲劳寿命可达 680 657, 而在 118 MPa 的应力范围下, 试样疲劳寿命均超出了 2×10^6 。焊接速度较低时(100 mm/min), 在 125 MPa 应力范围下, 试样疲劳寿命可达 866 000, 当应力范围进一步降低到 121 MPa 时, 3 个试样中有 2 个试样的疲劳寿命超出了 2×10^6 , 另外 1 个疲劳断裂位置位于轴肩压入处边缘。可见, 两种焊接速度下, 在 118 MPa 的低应力水平时, S-N 曲线存在一个明显的转折点, 应力水平将近达到无限疲劳寿命阶段, 不再符合有限疲劳寿命阶段的疲劳寿命与应力水平的 Basquin 关系。

对于本文中相同结构的铝合金熔化焊 T 形接头, 在底板方向单向拉伸载荷下, IIW 建议在 75%置信度 97.5%存活率下, 具有 2×10^6 疲劳寿命时的名义 FAT 值为 28 MPa。本文疲劳测试虽采用 4 点弯曲载荷, 但据相关研究, 弯曲载荷与拉伸载荷对疲劳寿命的影响不大^[17-18]。静轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头底板与筋板过渡处虽圆角半径很小, 但不同速度下的特征

FAT 值均显著高于 IIW 建议值, 低焊速和高焊速下分别达到 IIW 建议值的 361%和 319%^[19]。

图 10 为不同参数下静轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头与传统 FSW 及熔化焊对接接头中值 S-N 曲线对比^[20-25]。可以发现, 搅拌摩擦焊对接接头疲劳性能优于 MIG、TIG 熔化焊对接接头。本研所得 T 形接头底板与筋板过渡处形状突变大应力集中大, 文献中传统搅拌摩擦焊及熔化焊接头疲劳试样多为过渡光滑的双曲线试样, 应力集中较小。综上可见, 静轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头具有优异的疲劳性能, 采用传统铝合金熔化焊疲劳设计准则较为保守。

图 10 传统对接接头与搅拌摩擦焊 T 形接头 S-N 曲线对比

除在应力范围为 121 MPa 时有 1 个试样疲劳断裂于轴肩边缘位置外, 其余 32 个疲劳试样均断裂于筋板和底板的过渡处, 如图 11 所示。疲劳裂纹萌生于底板与筋板过渡处, 由于过渡圆角较小, 在四点弯表面拉应力的作用下, 过渡处产生较大的应力集中, 导致疲劳裂纹的产生。

图 11 T 形接头疲劳测试断裂位置

图 12 为 T 形接头疲劳断口形貌。裂纹源表面及内部无可见宏观及微观缺陷, 疲劳裂纹均匀萌生于底板与筋板过渡圆角根部, 为二维线疲劳源, 并在交变载荷作用下向接头内部扩展。疲劳裂纹萌生区和扩展位置均处于焊核区。疲劳断口主要包括裂纹源区、稳定扩展区、快速扩展区和瞬断区。低焊速下, 疲劳源为穿晶断裂, 存在明显的塑性变形, 由于表面超细晶的存在, 裂纹扩展中受到晶界的阻

碍, 因此呈现一种塑性颗粒状断口, 稳定扩展区为尺寸较大的等轴晶, 断裂特征为典型的穿晶断裂, 断口较平整, 疲劳条带明显可见。在较高焊速下, 疲劳源区呈现塑性、脆性断裂的混合特征, 可以见到明显的晶间断裂(如图 12d 箭头所示), 扩展区同为塑性、脆性断裂混合形貌, 存在明显的疲劳条带及晶间断裂特征, 同时存在沿晶界的二次裂纹。

在交变应力作用下, 接头表面产生的循环塑性变形不断积累并形成疲劳裂纹, 静轴肩搅拌摩擦焊 T 形接头焊核区表面超细晶具有更优异的变形协调

能力, 可以有效延缓疲劳裂纹的产生且大量晶界对裂纹扩展阻碍明显, 因而其具有优异的疲劳性能。低焊速下接头焊核区材料流动充分, 结晶相破碎程度较高, 且热输入较大, 焊核区沉淀相演化充分。高焊速下热输入小, 材料内部沉淀相转变不完全, 与基体间界面能晶界能较高, 且晶界稳定性差, 疲劳裂纹扩展到晶界时对裂纹阻碍作用小, 虽拉伸断裂位置不位于焊核区, 在疲劳载荷下焊核区易发生晶间断裂, 故其疲劳性能较低焊速接头较差。

图 12 T 形接头疲劳断口形貌

3 结论

(1) 通过自主开发的静止轴肩 T 形接头焊接工具及工装在适当的焊接参数下可以得到表面成型平整光滑, 减薄量少且内部组织致密无缺陷的 T 形接头。接头焊接区表层在轴肩压力与焊接热输入的作用下发生再结晶, 为细小的等轴晶。焊核内部材料流动差异导致组织和硬度的不均匀性。

(2) T 形接头底板上沿厚度方向中心线上焊核的硬度波动较大, 接头筋板上沿中心线最低硬度位于热影响区, 焊核内部由于材料变形程度的差异导致再结晶程度不同, 且硬度波动较大, 为母材硬度的 47%~72%。在 1 500 r/min 转速时, 较高的焊接速度 300 mm/min 下接头底板及筋板抗拉强度均高于较低焊接速度 100 mm/min 下得到的接头, 底板方向和筋板方向的抗拉强度分别可达到母材的 78% 和 96%。

(3) 在 90% 置信度 97.5% 存活率下, 使用 1 500 r/min & 100 mm/min 和 1 500 r/min & 300 mm/min 焊接参数下所得 T 形接头在 2×10^6 疲劳寿命时的特征疲劳强度分别为 101.0 MPa 和 89.3 MPa, 明显高于 IIW 推荐值。疲劳裂纹萌生于底板和筋板过渡处, 低焊速下疲劳机制为穿晶断裂, 高焊速下为穿晶和晶间混合断裂机制。表面超细晶和充分的热输入有利于接头疲劳性能的提高。

参 考 文 献

- [1] CUI Lei, YANG Xinqi, ZHOU Guang, et al. Characteristics of defects and tensile behaviors on friction stir welded AA6061-T4 T-joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 543: 58-68.
- [2] THREADGILL P L, LEONARD A J, SHERCLIFF H R, et al. Friction stir welding of aluminium alloys[J]. International Materials Reviews, 2009, 54(2): 49-93.
- [3] FRATINI L, BUFFA G, MONACO L L. Improved FE model for simulation of friction stir welding of different materials[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15(3): 199-207.
- [4] 谢永辉, 杨新岐, 崔雷. 6061-T4 铝合金单双道搅拌摩擦焊 T 型接头组织及性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 72-79.
- XIE Yonghui, YANG Xinqi, CUI Lei. Microstructure and property of 6061-T4 aluminum alloy T-joints by friction stir welding under single pass and double passes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 72-79.
- [5] CUI Lei, YANG Xinqi, XIE Yonghui, et al. Process parameter influence on defects and tensile properties of friction stir welded T-joints on AA6061-T4 sheets[J]. Materials & Design, 2013, 51: 161-174.
- [6] DONATI L, TOMESANI L, MORRI A. Structural T-joint produced by means of friction stir welding (FSW) with filling material[J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(1): 295-298.
- [7] MARTIN J P, STANHOPE C, GASCOYNE S. Friction stir welding and processing VI[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2011.
- [8] BUFFA G, FRATINI L, ARREGI B, et al. A new friction stir welding based technique for corner fillet joints: Experimental and numerical study[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 1039-1042.
- [9] 吉华, 徐萌, 封小松, 等. 静止轴肩搅拌摩擦焊 T 型接头组织及力学行为[J]. 电焊机, 2013, 43(9): 37-40.
- JI Hua, XU Meng, FENG Xiaosong, et al. Research on microstructure and mechanical behavior of T-joint welded by stationary shoulder friction stir welding[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(9): 37-40.
- [10] 郝云飞, 马建波, 毕煌圣, 等. 铝合金 T 形接头静止轴肩搅拌摩擦焊接及组织性能分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 48-54.
- HAO Yunfei, MA Jianbo, BI Huangsheng, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of the aluminum alloy T-joint welded by stationary shoulder friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 48-54.
- [11] 曾申波, 陈高强, 张弓, 等. T 形接头角接静轴肩搅拌摩擦焊三维流动特征[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 1-5.
- ZENG Shenbo, CHEN Gaoqiang, ZHANG Gong, et al. Three-dimensional flow characteristics of the T-joint by corner stationary shoulder friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 1-5.
- [12] 曾申波, 陈高强, 刘瞿, 等. T 型接头角接静轴肩搅拌摩擦焊缺陷研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 193-199.
- ZENG Shenbo, CHEN Gaoqiang, LIU Qu, et al. Study on defects of T-joints by corner stationary shoulder friction stir welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 193-199.
- [13] WU Hao. Systematic analysis of the advantages of

- stationary shoulder friction stir welding in joining high strength aluminium alloy AA7050-T7651[D]. Manchester: The University of Manchester, 2017.
- [14] SUN T, ROY M J, STRONG D, et al. Weld zone and residual stress development in AA7050 stationary shoulder friction stir T-joint weld[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 263: 256-265.
- [15] SCHNEIDER C, MADDUX S. Best practice guide on statistical analysis of fatigue data[R]. Cambridge: The Welding Institute Report, 2003.
- [16] 万震宇, 周霞, 张昭. 6005-T6 铝合金搅拌摩擦焊接微观组织演变计算及力学性能预测[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(8): 129-136.
- WAN Zhenyu, ZHOU Xia, ZHANG Zhao. Calculations of microstructural changes and predictions of mechanical properties in friction stir welding of AA6005-T6[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(8): 129-136.
- [17] MACDONALD K. Fracture and fatigue of welded joints and structures[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [18] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials[M]. Berlin: Springer Science Business Media, 2001.
- [19] HOBACHER A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [20] ERICSSON M, SANDSTROM R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(12): 1379-1387.
- [21] ZHOU Caizhi, YANG Xinqi, LUAN Guohong. Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al-Mg alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2006, 98(2-3): 285-290.
- [22] DI Shusheng, YANG Xinqi, LUAN Guohong, et al. Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006(435-436): 389-395.
- [23] DI Shusheng, YANG Xinqi, FANG Dapeng, et al. The influence of zigzag-curve defect on the fatigue properties of friction stir welds in 7075-T6 Al alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007(104): 244-248.
- [24] MADDUX S J. Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(12): 1359-1378.
- [25] LOMOLINO S, TOVO R, DOS SANTOS J. On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(3): 305-316.
-
- 作者简介: 李冬晓, 男, 1988 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为搅拌摩擦焊及先进星船焊接技术。
- E-mail: azure0117@126.com