DOI: 10.3901/JME.2020.06.206

高强铝合金 FSW 拼焊板变形规律与成形技术*

胡志力^{1,2,3} 范新欣¹ 华 林^{1,2,3}

- (1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉 430070;
2. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心 武汉 430070;
3. 武汉理工大学湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心 武汉 430070)

摘要: 铝合金拼焊成形技术兼具有材料和结构双重轻量化效果,在汽车轻量化发展趋势下,拥有巨大的应用前景。研究铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能,建立搅拌摩擦焊接头的有限元模型,试验结合力学计算研究搅拌摩擦焊接头的塑性变形规律。结果发现:铝合金搅拌摩擦焊接头具有明显的力学性能不均匀性,搅拌摩擦焊接头在拉伸过程中热影响区最先发生屈服和颈缩;焊后热处理和高温成形可以显著提高拼焊板的成形性和力学性能。2024 铝合金搅拌摩擦焊拼焊板的最佳成形温度为 450 ℃,固溶处理后接头未发现晶粒异常长大现象,热冲压时引入的变形与成形后的时效相结合,产生形变时效的强化效果,可获得高强度的汽车拼焊构件。

关键词: 铝合金;拼焊板;组织性能;塑性变形规律

中图分类号: TH162

Forming Theory and Technology of Aluminum Alloy FSW Tailor Welded Blank

HU Zhili^{1,2,3} FAN Xinxin¹ HUA Lin^{1,2,3}

- (1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;
3. Hubei Engineering Research Center for Green & Precision Material Forming, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: The aluminum alloy tailor-welding forming technology has the dual lightweight effect of material and structure, and has great application prospects under the trend of automobile lightweight development. The microstructure and mechanical properties of friction stir welding joints of aluminum alloys are studied, a finite element model of friction stir welding joints is established, and the mechanical calculation with experiments to study the plastic deformation law of friction stir welding joints is combined. The results show that the aluminum alloy FSW joint has obvious uneven mechanical properties, and the heat affected zone of the FSW joint firstly yields and necks during tensile test; post-weld heat treatment and hot forming can significantly improve the formability and mechanical properties of tailor-welded plates. For AA2024 FSW tailor-welded blanks, 450 ℃ is the optimal forming temperature. AGG is not found in the joint after solution treatment. Combining the deformation during hot stamping with the aging after forming produces a strengthening effect of deformation aging, which can obtain high-strength automotive welded components.

Key words: aluminum alloy; tailor welded blank; microstructure and properties; plastic deformation law

0 前言

拼焊板成形技术是把数块相同或不同材质、尺

寸的金属或非金属板材焊接成一块拼焊板,再对这块拼焊板进行整体冲压成形的技术^[1-2]。目前在汽车工业,汽车钢板拼焊成形技术已被广泛应用于车身内外覆盖件和骨架件,包括车门两侧 A、B 柱,车门内板、中心立板、底板、内后挡板等部件^[3]。

铝合金拼焊成形技术可以达到材料轻量化和结构轻量化的双重减重效果,已经成为国际轻量化技

* 国家自然科学基金(51775397)、中国汽车产业创新发展联合基金(U1564202)和湖北省技术创新专项重大(2019AAA007)资助项目。
20191021 收到初稿,20200204 收到修改稿

术研究热点。研究表明^[4] 5754 铝合金激光拼焊板在拉伸时具有两种典型失效模式: 焊缝开裂和薄区母材开裂。对 6061 铝合金激光拼焊板进行了拉伸试验与热成形试验, 发现 6061 铝合金激光拼焊板在拉伸时热影响区容易开裂, 从而降低拼焊板的成形性能^[5-6]。在热冲压试验中, 根据成形速度不同, 出现两种失效模式: 周向失效和平行焊缝失效^[7]。

由于铝合金对激光吸收率很低, 且熔化焊容易形成气孔、热裂纹等缺陷, 因此铝合金焊接存在较大困难, 尤其是 2XXX 系和 7XXX 系高强铝合金, 被传统焊接方法认为是不可焊铝合金, 故目前铝合金拼焊板研究多集中在 5XXX 和 6XXX 系铝合金, 对于 2XXX 系和 7XXX 系高强铝合金研究较少。搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)作为一种固态连接方法, 在高强铝合金连接方面相比传统熔焊具有巨大的优势^[8-9], 已广泛用于航空航天领域。研究对比铝合金拼焊方式的力学性能发现, 高强铝合金搅拌摩擦焊接头的抗拉强度明显高于激光焊接接头的抗拉强度^[10]。

目前, 铝合金 FSW 拼焊板成形主要还存在以下几个难点: ① 高强铝合金 FSW 拼焊板焊缝各区域组织和力学性能不均匀, 室温成形性差^[11]; ② 高强铝合金 FSW 拼焊板变形时应变分布不均匀^[12-13], 变形规律尚不清楚; ③ 高强铝合金 FSW 拼焊板在焊后热处理过程中焊核区容易出现晶粒异常长大(Abnormal grain growth, AGG)的现象, 严重影响拼焊板的超塑性、疲劳性能和腐蚀性能^[14-16]。

针对上述问题, 本文系统研究了高强铝合金 FSW 拼焊板接头变形规律, 分析研究了铝合金 FSW 接头微观组织和力学性能, 建立 FSW 接头的有限元模型, 研究了接头力学性能失配对铝合金拼焊板塑性成形性能的影响规律和机理以及铝合金 FSW 拼焊板热成形过程中接头晶粒异常长大问题, 研究了铝合金拼焊板热冲压成形关键技术, 并对高强度铝合金 FSW 拼焊板进行了热冲压成形。

1 试验材料与方法

本文以 3 mm 厚退火态 2024 铝合金作为研究对象, 采用搅拌摩擦焊技术, 搅拌头的材料为热处理模具钢 4Cr5MoV, 热处理之后硬度为 HRC50~60, 该搅拌头的轴肩直径 12 mm, 搅拌针为带有右螺纹的圆锥, 长度为 2.9 mm, 根部直径为 5 mm。焊接速度为 100 mm/min, 20 mm/min 两种, 焊接转速为低转速 800 r/min 和高转速 2 500 r/min, 下压量为 0.1 mm。

焊后沿横截面截取试样, 金相试样经研磨、抛光后, 使用凯勒试剂(2 mL HF+5 mL HNO₃+3 mL HCl+190 mL H₂O)进行腐蚀。透射试样先将样品磨薄至 100 μm, 冲下一个 φ 3 mm 的小圆片, 使用 100 mL HNO₃+400 mL CH₃OH 溶液进行电解双喷减薄, 然后使用 JEM-2100F 透射电子显微镜进行观察。室温和高温拉伸试验在 SANS CMT-5205 万能电子试验机上进行, 拉伸方向垂直于焊缝, 拉伸速度 2 mm/min, 拉伸结果取 3 个试样的平均值。通过电腐蚀打标机在试样上印制 1 mm×1 mm 网格, 利用 ASAME 网格应变测试系统测量接头各区域的应变。通过对拉伸试验的数据处理得到接头的屈服强度、抗拉强度、应力应变曲线以及伸长率。使用 ABAQUS 对不同失配比接头塑性变形进行应力应变分析。室温杯突试验使用 100 mm×100 mm 的 FSW 拼焊板, 结果取三个试样的平均值。热冲压试验在 B 柱成形模具上进行, 保温温度为 450 °C, 保温时间 20 min。

2 铝合金 FSW 接头塑性变形规律

2.1 FSW 接头拉伸变形规律

为了研究 FSW 接头的拉伸变形特性, 采用 ASAME 方法对其拉伸过程中不同区域的塑性变形应变分布进行了定量评价。从图 1 可以看出, 当接头整体伸长率为 2% 时, 接头应变相对均匀, 焊核区(Nugget zone, NZ)的塑性应变最低。当整体伸长率为 5% 时, 在 NZ 中没有观察到明显的应变变化, 其塑性应变仍为最低, 此时接头仍处于均匀变形阶段。但是当整体伸长率增加到 7% 时, 接头变形出现了不均匀性, 此时在前进侧热影响区(Heat affected zone, HAZ)中局部应变达到了 11.4% 以上, 而后退侧仅为 8.5%。当焊接接头的整体伸长率达到 10% 时, 接头变形呈现出高度不均匀, 接头两侧的应变值差异变大。前进侧热影响区应变为 23%, 并可以观察到局部颈缩, 而后退侧热影响区的局部应变仅为 10.5%。此时最低应变值仍在 NZ, 为 2.5%~3.3%。这是因为焊核区硬度明显高于其他区域, 在进行塑性变形时, 焊核区变形量很低, 从而导致接头变形不均匀。

为了更深入地了解 FSW 接头的拉伸变形规律, 文献[12]中建立了一种简单的分析模型来研究抗拉强度与相对厚度与母材和焊缝的强度比之间的关系

$$\sigma_y = 2 / \sqrt{3} \sigma_s \exp \frac{2K}{B} \left(\frac{W}{2} - X \right) \quad (1)$$

图1 FSW 接头不同整体伸长率下的应变分布

当 $x=0$ 时, 得到最大抗拉强度

$$\sigma_{y\max} = 2/\sqrt{3}\sigma_s \exp \frac{-K}{H} \quad (2)$$

式中, σ_y 为抗拉强度, σ_s 为屈服强度, K 为母材与焊缝的抗拉强度的比值, B 为焊缝宽度, W 为母材宽度, H 为相对厚度(B/W)。

从式(1)可以看出, 抗拉应力(σ_y)取决于焊缝的相对厚度(H)和母材和焊缝的强度比(K)。当材料和焊接工艺确定时, 拉应力(σ_y)随焊缝相对厚度(H)增大而增大。此外, 拉伸应力(σ_y)沿 x 轴呈指数增长, 如图2所示。因此, 它形成了一个“易变形区”, 与母材相比, 由于其抗拉应力较大, 形状为锥形。

图2 FSW 接头应力状态分区

2.2 不同失配比接头塑性变形的应力应变分析

通过上文可以看出, 铝合金 FSW 接头具有明显的力学性能不均匀性, 为进一步研究 FSW 接头的变形规律, 利用 ABAQUS 软件对不同失配比接头塑性变形的应力应变进行分析。

由于铝合金的强度与硬度存在比例关系, 因此可以通过应力应变的关系, 在已知接头各分区的硬度后, 以数值计算的方法建立材料模型。根据《机

械设计手册(第三版)》提供了铝合金板材硬度与强度换算值, 以及名义应力与真实应力、名义应变与真实应变之间的关系可得出以下公式^[13]

$$\sigma_b = 3.43HV + 22.22 \quad (3)$$

$$\sigma_b = E\varepsilon_0 \left(\frac{1}{e} + \frac{n}{e\varepsilon_0} \right)^n \quad (4)$$

$$\sigma_s = 3.73HV - 122.60 \quad (5)$$

$$\sigma_s = \frac{E\varepsilon_0}{1.002 + \sigma_s/E} \left[1 + \frac{\ln(1.002 + \sigma_s/E)}{\varepsilon_0} \right]^n \quad (6)$$

式中, E 为弹性模量, σ_b 为抗拉强度, ε_0 为真实屈服应变, n 为硬化指数。

将 AA2024 铝合金焊态接头各个区域的维氏硬度值代入式(3)和式(4)可得到对应的 σ_b 和 σ_s 的值, 然后联立式(5)和(6)可求得 ε_0 和 n 的值, 由此可以准确的建立各分区的材料模型, 如图3所示。

(a) 材料性能参数与维氏硬度的关系

(b) 接头各分区真实应力-应变曲线

图3 接头各区材料模型

已知 2024-O 母材的力学性能, 可计算得到对应的屈服强度和抗拉强度, 从而根据应力应变幂函数规律, 转化得到相应的真实应力-应变曲线, 然后进行单向拉伸试验有限元模拟。

图4为接头等效应力与等效应变沿试样长度方向的分布特征。从图中可以看出, 屈服强度最小的

地方出现在热影响区。FSW 接头在拉伸过程中最先发生屈服和缩颈的位置在热影响区。

图 4 搅拌摩擦焊接头等效应力应变的分布特征

3 铝合金 FSW 拼焊板的成形性

3.1 热处理对 FSW 拼焊板的成形性的影响

铝合金 FSW 拼焊板由于焊缝与母材组织性能不均匀导致拼焊板成形性能较差, 根据已有的研究表明,

焊后热处理可以有效提高铝合金 FSW 拼焊板的成形性^[16-17]。表 1 为 2024-O 铝合金 FSW 拼焊板焊后经过不同温度退火后的室温拉伸性能。从表中看出, 焊态接头与母材的抗拉强度相同, 但伸长率比母材降低 44%。在进行了焊后热处理之后接头伸长率得到显著改善, 并且随着退火温度的降低而增加。在 300 °C 退火后, 接头的最大伸长率高达 20.2%, 相当于焊接接头的 1.6 倍。此外, 所有接头在不同的退火温度下显示出与 BM 相同的拉伸强度, 这说明焊后退火处理可以有效提高接头的塑性, 而不会损失抗拉强度。

图 5 为 2024-O 铝合金 FSW 焊态拼焊板与经过焊后固溶处理拼焊板的杯突值对比。如图所示, 焊态接头的杯突值仅为 4.9 mm, 在所有接头中成形性最低, 经过 450 °C 固溶处理的 FSW 接头的杯突值为 7.3 mm, 约为焊态接头的 1.5 倍。值得注意的是, 经过 450 °C 固溶处理的焊接接头杯突值高于经过 495 °C 固溶的焊接接头杯突值, 但仍低于母材杯突值。这主要是由于经过 495 °C 热处理的拼焊板中出现了 Z 线或晶粒异常长大现象导致了成形性能下降。

表 1 不同退火温度下室温拉伸性能

样品	温度	伸长率(%)	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	失效位置
退火接头	450 °C	10.7	197	86	焊核区/热机影响区
	400 °C	14.7	197	81	焊核区/热机影响区
	350 °C	18.9	198	80	焊核区/热机影响区
	300 °C	20.2	206	85	母材区
	250 °C	18.7	206	91	母材区
焊态接头	室温	12.5	206	92	母材区
母材	室温	22.2	207	88	—

图 5 2024-O 铝合金 FSW 拼焊板和母材杯突值

3.2 Z 线对接头力学性能的影响

在 FSW 接头焊后热处理过程中, Z 线是一种常见且严重的缺陷, 是由于在焊接过程中焊接表面氧化皮未去除导致的^[18]。Z 线的存在严重降低了焊后热处理接头的力学性能, 尤其是伸长率^[17]。研究表明, 在进行焊后热处理之后, 所有焊接参数接头中都出现了 Z 线, 而提高热输入量可以抑制 Z 线的产生, 如图 6 所示。在 450 °C 热处理下的接头, 低热输入量的接头比高热输入量接头 Z 线更加明显, 当

热处理温度上升至 495 °C 时, Z 线明显变粗, 且不同热输入量接头中 Z 线的差异被消除。这说明 Z 线与焊后热处理温度有关, 焊后热处理温度越高, Z 线越明显, 如图 7 所示。

(a) 低热输入量

(b) 高热输入量

图 6 焊接热输入量对焊态接头 Z 线的影响

3.3 热成形淬火工艺

由于高温可以提高铝合金的塑性, 因此热成形淬火工艺作为一种新型工艺已被广泛应用于铝合金的成形^[19-20]。热成形淬火工艺将板材的固溶与成形

图7 焊接热输入量和焊后热处理对接头Z线的影响

过程相结合,显著提高了拼焊板的成形性,其过程示意图如图8所示。

图8 热成形淬火工艺流程图

拼焊板成形性能与成形温度有关。对 2024-O 铝合金 FSW 拼焊板进行高温拉伸试验以确定最佳成形温度。图9为在不同热成形温度下 2024-O 铝合金 FSW 接头高温拉伸的应力应变曲线图,可以看出随着成形温度增加,真应力降低,而真应变在 450 °C 以前随温度增加而增加,450 °C 时真应变达到 0.45,伸长率高达 50%,温度达到 495 °C 时真应变急剧下降,仅为 0.1。450 °C 为 2024 铝合金 FSW 拼焊板的最佳热成形温度。

图9 不同成形温度下应力应变曲线图

对 2024-O 铝合金 FSW 拼焊板采用热成形淬火

工艺进行成形,对成形后的构件不同位置进行取样测试其力学性能。成形的 B 柱构件以及取样位置如图 10 所示,其中 1, 3 为侧壁,2 为顶部,4 为平面。由图 11 可以发现 1 处抗拉强度最大,为 425 MPa,相对于焊态接头提高了 118%,相对于拼焊板焊后 450 °C-20 min 固溶自然时效后的接头,增幅达 19%,这是因为冲压时引入的变形与成形后的时效相结合,产生形变时效的强化效果。

图10 热冲压成形的 B 柱构件以及取样位置

图11 热成形 AA2024 拼焊构件不同位置取样室温拉伸结果

3.4 晶粒异常长大

在对铝合金 FSW 拼焊板进行热成形过程中,焊核区组织不稳定是一个严重的问题。铝合金 FSW 拼焊板在固溶时焊核区细小的等轴晶粒会变得极不稳定,很短的时间内就会迅速粗化成几百微米,甚至毫米级的粗晶组织,即晶粒异常长大(Abnormal grain growth, AGG),又称为二次再结晶。AGG 现象严重影响了拼焊板的超塑性、疲劳性能和耐腐蚀性能^[16, 21-22]。根据目前的研究结果,AGG 形成的原因大致有以下几点:① 晶界能量和迁移率各向异性;② 由于颗粒的粗化或溶解而引起钉扎力减少;③ 由于晶粒尺寸引起的热力学驱动力分配^[23]。

试验表明 AGG 的程度与焊接工艺参数和热处理工艺有关,焊接时热输入量越大,在焊后热处理过程中对 AGG 的抑制越明显;另外,AGG 的发生与焊后热处理温度和时间同样有关,固溶温度越低、时间越短,焊后热处理过程中 AGG 程度越轻,如图 12 所示。这是因为热输入高的接头温度梯度和晶

粒尺寸分布均匀, 且 Al_2CuMg 析出物均匀分散, 提高了钉扎值 Z_p ^[24]。

由于 2024-O 拼焊板进行焊后 450 °C、40 min 固溶处理后未发生 AGG, 因此, 在 450 °C 固溶处理后配合大的塑性变形, 接头抗拉强度达到 425 MPa, 相比于未加入冷变形的接头, 其强度得到了明显的提高, 如图 11 所示。这是由于固溶后的冷变形提供了大量的位错, 促进了强化相的析出, 位错强化和析出强化作用增强, 导致接头强度提高^[25]。

图 12 不同焊接参数、热处理工艺接头 AGG 情况

4 结论

(1) O 态搅拌摩擦焊接头在拉伸变形时表现出力学性能高度不均匀性。随着接头整体变形程度的增加, 接头各区域应变差异变大, 接头最低应变值位于焊核区, 最高应变值位于前进侧热影响区。

(2) 焊后热处理可以明显改善接头变形的不均匀性和伸长率, 从而提高成形性。当退火温度为 300 °C 时, 接头的室温拉伸伸长率达到最大, 为 20.2%; 在杯突试验中, 经过 450 °C 固溶处理的搅拌摩擦焊拼焊板杯突值最大, 为 7.3 mm。

(3) 高温能够提高搅拌摩擦焊接头的成形性, 当温度达到 450 °C 时, 接头伸长率达 50%。热成形淬火工艺极大地提高了搅拌摩擦焊拼焊板的成形性和力学性能, 对采用热成形淬火工艺成形的拼焊构件进行力学性能测试, 其最大强度达到了 425 MPa, 相对于焊态接头提高了 118%。

(4) 搅拌摩擦焊接头在焊后热处理过程中容易发生晶粒异常长大, 晶粒异常长大的程度与焊接工艺和焊后热处理工艺参数有关, 焊接热输入量越大, 焊缝细晶热稳定性越好, 对焊后热处理过程中晶粒异常长大的抑制效果越明显; 焊后热处理温度越低, 时间越短, 晶粒异常长大程度越轻。

参 考 文 献

[1] 陈炜, 杨继昌. 拼焊板覆盖件成形过程中的焊缝移动和成形性能[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 62-66.
CHEN Wei, YANG Jichang. Weld-bead movement and

formability of tailor-welded blanks during forming automobile panels[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 62-66.

[2] 刘玉山, 徐安平, 富大伟. 基于预偏移的激光拼焊板焊缝优化补偿方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 59-63.

LIU Yushan, XUN Anping, FU Dawei. Pre-offset-based approach to optimizing and compensating weld-line of tailor-welded blanks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 59-63.

[3] 李淑慧, 林忠钦, 倪军. 拼焊板在车身覆盖件冲压成形中的研究进展[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 1-7.

LI Shuhui, LIN Zhongqin, NI Jun. Current development and trends of the tailored blank application auto-body stamping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 1-7.

[4] SHAKERI H, LEE Y, WORSWICHK M. Weld failure in formability testing of aluminum tailor welded blanks[R]. SAE Technical Papers, 2001-01-0090, 2001.

[5] LI Yuntao, YE Juan, WANG Jinkui. Study on micro-structure and formability of laser tailor-welded joints of aluminum alloy thin sheet[J]. Advanced Materials Research, 2011, 239-242: 876-880.

[6] LI Yuntao, ZHANG Wenjun, YANG Lijun. Laser tailor welding of aluminum alloy sheet and cup axon formability of TWB[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 81-84.

[7] LIU Jun, WANG Ailing, GAO Haoxiang. Transition of failure mode in hot stamping of AA6082 tailor welded Blanks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 33-34.

[8] MERKLEIN M, JOHANNES M, LECHNER M, et al. A review on tailored blanks—production, applications and evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 151-164.

[9] MARCO P, SAFDARIAN R, SANTOS A, et al. A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83: 2129-2141.

[10] 王国庆, 赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.

WANG Guoqing, ZHAO Yanhua. Friction stir welding of aluminum alloy[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010.

- [11] CAI Biao, ZHENG Zhizhen, HE Diqu, et al. Friction stir weld of 2060 Al-Cu-Li alloy: microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 649: 19-27.
- [12] HU Zhili, YUAN Shijian, WANG Xiaosong. Quantitative investigation of the tensile plastic deformation characteristic and microstructure for friction stir welded 2024 aluminum alloy[J]. *Materials Characterization*, 2012, 73: 114-123.
- [13] WAN Xinyong, HU Zhili, DAI Mingliang. Plastic deformation behavior of friction stir welded tailor-welded blank of aluminum alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(11): 3357-3365.
- [14] AVDIN H, BAYRA A, DURGUN İ. The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(5): 2568-2577.
- [15] CHARIT I, MISHRA R. High Strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy via friction stir processing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 359(1-2): 290-296.
- [16] YUAN Shijian, HU Zhili, WANG Xiaosong. Formability and microstructural stability of friction stir welded Al alloy tube during subsequent spinning and post weld heat treatment[J]. *Materials Science Engineering A*, 2012, 558(1-2): 586-591.
- [17] WANG Zhibiao, HE Zhubin, FAN Xiaobo, et al. High temperature deformation behavior of friction stir welded 2024-T4 aluminum alloy sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 247: 184-191.
- [18] HU Zhili, PANG Qiu. Microstructure and mechanical properties of friction stir welding joint during post weld heat treatment with different zigzag lines[J]. *Rare Metals*, 2019, 38(11): 1070-1077.
- [19] KO D C, KO D H, KO J H. Development of a partition panel of an Al6061 sheet metal part for the improvement of formability and mechanical properties by hot forming quenching[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(2): 1-15.
- [20] KO D C, KO D H, KO J H. Novel method for predicting hardness distribution of hot-stamped part using FE-Simulation coupled with quench factor analysis[J]. *Metall. and Materi. Trans. B*, 2015, 46: 2072.
- [21] AYDIN H, BAYRA A, DURGUN İ. The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(5): 2568-2577.
- [22] CHARINT I, MISHRA R. High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy via friction stir processing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 359(1-2): 290-296.
- [23] HUMPHREYS F. Unified theory of recovery, recrystallization and grain growth, based on the stability and growth of cellular microstructures—II. The effect of second-phase particles[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(12): 5031-5039.
- [24] PANG Qiu, ZHANG Jiaheng, MOHAMMAD J, et al. Characterization of microstructure, mechanical properties and formability for thermomechanical treatment of friction stir welded 2024-O alloys[J]. *Materials Science Engineering A*, 2019, 765: 138303.
- [25] HU Zhili, DAI Mingliang, PANG Qiu. Influence of welding combined plastic forming on microstructure stability and mechanical properties of friction stir-welded Al-Cu alloy[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2018, 27: 4036-4042.

作者简介: 胡志力(通信作者), 男, 1983 年出生, 副教授。主要研究方向为轻量化技术。

E-mail: zhilihuhit@163.com