

引文格式: 胡楚峰, 庞秋, 张宇. 搅拌摩擦焊制备泡沫铝夹芯板工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (6): 123-135. HU Chufeng, PANG Qiu, ZHANG Yu. Research on process of preparing aluminum foam sandwich panels by friction stir welding [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (6): 123-135.

## 搅拌摩擦焊制备泡沫铝夹芯板工艺研究

胡楚峰<sup>1</sup>, 庞秋<sup>1</sup>, 张宇<sup>2,3</sup>

1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;
3. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 通过搅拌摩擦焊工艺制备泡沫铝夹芯 (AFS) 板预制坯, 研究焊接转速、进给速度、焊接方向、粉末铺放位置对 AFS 板预制坯的影响。通过单向拉伸试验研究不同温度下 AFS 板预制坯的成形性能。观察不同焊接工艺参数和发泡条件下 AFS 板预制坯接头横截面及泡孔形貌的金相图并进行分析。使用 X 射线能谱仪和扫描电子显微镜对 AFS 板预制坯的微观形貌和成分进行研究。同时, 利用 FLUENT 软件对 AFS 板预制坯制备温度场和发泡过程进行模拟仿真。结果表明: 当焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 获得板粉混合均匀的 AFS 板预制坯接头; 焊接方向沿后退侧叠焊有效消除了月牙形无粉区域; 随着变形温度的升高, AFS 板预制坯的伸长率先上升后下降, 在发泡温度  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 伸长率达到最大值 78%; 并且, 在发泡温度  $680 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 保温 190 s 条件下, 可获得孔径结构均匀的泡沫铝夹芯板。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 泡沫铝夹芯板; 预制坯; 成形性能; 泡孔形貌

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2025) 06-0123-13

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-2012.2025.06.014

## Research on process of preparing aluminum foam sandwich panels by friction stir welding

HU Chu-feng<sup>1</sup>, PANG Qiu<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2,3</sup>

1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The aluminum foam sandwich (AFS) panel preforms were prepared using the friction stir welding process, and the effects of welding speed, feed speed, rotation welding direction and powder placement position on the AFS panel preform were investigated. The formability of AFS panel preforms at different temperatures was studied through uniaxial tensile tests. Metallographic images of the cross-sections and cell morphology of AFS panel preform joints under various welding parameters and foaming conditions were observed and analyzed. The microstructure and composition of the AFS panel preform were examined using X-ray energy dispersive spectrometer and scanning electron microscope. Additionally, the FLUENT software was used to simulate the temperature field and foaming process during the preparation of the AFS panel preform. The results indicate that an AFS panel preform joint with uniformly mixed powder and plate is obtained when the welding rotation speed is  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  and the feed speed is  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Welding in the retreating side direction effectively eliminates crescent-shaped powder-free regions. As the deformation temperature increases, the elongation of the AFS panel preform first rises and then decreases, reaching the maximum of 78% at the foaming temperature of  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Additionally, the aluminum foam sandwich panels with uniform pore structure were achieved at the foaming temperature of  $680 \text{ }^\circ\text{C}$  and holding time of 190 s.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (52275368)

**通信作者:** 庞秋, 女, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事汽车轻量化成形技术研究, E-mail: pqiu@wust.edu.cn

**第一作者:** 胡楚峰, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事先进制造技术研究, E-mail: 1029734706@qq.com

**收稿日期:** 2024-09-17; **修订日期:** 2025-04-17

**Key words:** friction stir welding; aluminum foam sandwich panels; preform; formability; cell morphology

## 引言

随着汽车保有量的不断上升,资源短缺和环境保护的压力日益增大,能源问题和环境保护意识的提高,迫切要求发展汽车轻量化<sup>[1]</sup>。轻量化材料的广泛应用可以降低汽车、航空器等交通工具的自重,进而减少能源消耗,降低燃料消耗和排放,有助于减缓全球变暖等环境问题<sup>[2]</sup>。

泡沫金属正迅速崭露头角,成为一类备受瞩目的新型工程材料。相较于固体金属,泡沫金属具有高强度重量比、高能量吸收能力、大比表面积、高气体和液体渗透性以及低导热性等独特性能<sup>[3]</sup>。尤其是,泡沫铝夹芯(Aluminum Foam Sandwich, AFS)板由高度多孔的泡沫铝(Aluminum Foam, AF)芯和金属面板构成,被视为一类具备出色综合性能的新型功能材料。它不但具备泡沫铝材料的卓越特性,如低密度、高效的能量耗散能力、高比强度和比刚度、良好的隔音隔热性能以及高阻尼等,而且成功克服了单个泡沫铝材料强度低的弱点<sup>[4]</sup>。目前,针对汽车行业,泡沫铝夹芯板可广泛应用于汽车车身和底盘构件,对提高汽车的燃油效率以及乘客和行人安全性是不可或缺的<sup>[5-6]</sup>。

现有制备 AFS 板的方法包括:胶粘连接法<sup>[7-8]</sup>、压接粉末冶金法<sup>[9]</sup>、轧制复合-粉末冶金法<sup>[10-11]</sup>等。胶粘连接法制备 AFS 板即采用胶水将泡沫铝与金属板粘在一起,制备的 AFS 板受环境影响大,样品回收难并产生环境问题,且胶水成本高;压接粉末冶金法制备的 AFS 板产品性能稳定,但需要经过长时间的热压过程才能完成界面结合,受模具尺寸的约束,生产成本高;轧制复合-粉末冶金法制备 AFS 板需预先压制并且轧制前表面处理也十分严格,因此工序复杂、成本高。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种固态连接技术,具有质量高、残余变形小、能耗低等优点。在搅拌摩擦焊接过程中,由于热-力耦合作用,搅拌摩擦焊可以用于同种、异种材料的连接,通过合理选择工具材料、几何形状和工艺参数,搅拌摩擦焊技术广泛应用于铝、镁等轻质合金,也可以应用于高强度和高熔点的钢、钛、镍和铜合金等材料。满足金属连接件之间良好的冶金结合,具有较好的微观组织和力学性能<sup>[12]</sup>。目前,一些学

者使用搅拌摩擦焊 AFS 板预制坯,与其他制备前驱体的技术相比,搅拌摩擦焊的混合能力更强,且焊接过程具有明显的组织细化和均布的效果,满足泡沫铝夹芯板预制坯致密度和均匀性的要求。

国外一些学者已经在采用搅拌摩擦焊制备 AFS 板上取得了阶段性成果,例如 HANGAI Y 等<sup>[13]</sup>以铝板为原材料,通过多道次搅拌摩擦处理技术(Friction Stir Process, FSP)制备泡沫铝夹芯板,将发泡剂良好地分散在铝基体中,在加热炉中加热预制坯从而获得 AFS 板,证明了 FSP 技术在通过更环保的工艺以低成本制备多孔铝方面具有很高的潜力。PENG P 等<sup>[14]</sup>使用 FSW 成功制备了由泡沫铝和两层 6061Al 面板组成的 AFS 板,并证明了 AFS 板相对于 AF 和面板,具有良好的抗冲击性,并表现出优异的吸声和降噪性能。TAKAO U 等<sup>[15]</sup>采用 FSW 方法制备了具有两个 Al 面的三明治型发泡前驱体,并通过该发泡前驱体制备 AFS 板,发现泡沫铝芯的抗拉强度不会因氧化膜的存在而降低,泡沫铝芯与 Al 面板之间界面的结合强度高于泡沫铝芯的抗拉强度。国内学者 PANG Q 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于 FSW 的 AFS 板一体化成形与发泡新方法,可以解决复杂曲面 AFS 零件的制造问题,证明了预制坯在 450 °C 时成形性最高,并将塑性变形预制坯在 680 °C 温度下发泡 225 s,获得孔隙分布均匀的泡沫铝夹芯板。SU X X 等<sup>[17]</sup>提出了一种将 FSW 焊接的前驱体盖板与前驱体发泡焊接 AFS 板相结合的方法,发现 FSW 导致前驱体面板附近的粉末中出现混合区域,发泡后在混合区域形成小泡孔,发泡高度不受 FSW 的影响。从上述实例可以证明,采用 FSW 方法可以成功制备泡沫铝夹芯板,“以板代粉”成本低、生产高效、工序简单。但是,大部分学者针对搅拌摩擦焊时,选择前进侧的方向制备发泡前驱体,并未分析前进侧与后退侧叠焊对预制坯中粉末分布的影响,不同 FSW 方向,不同叠焊间距和发泡剂的不同平铺位置对预制坯粉末分布均匀性影响较大,此方面研究报道较少。因此,本文研究对比了沿前进侧叠焊和沿后退侧叠焊对预制坯中粉末分布的影响,观察了不同焊接间距和发泡剂不同平铺位置下预制坯粉末分布情况,并对沿后退侧叠焊制得的预制坯进行了拉伸试验和发泡,验证了沿后退侧叠焊的可行性。

本文采用搅拌摩擦焊制备了 AFS 板预制坯。利用搅拌头的旋转作用将 3 块 7075-O 铝合金板与发泡

剂 ( $\text{TiH}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 混合, 研究了搅拌头的焊接转速和进给速度、多道次叠焊间距、粉末的不同平铺位置对预制坯板粉混合分布规律的影响, 探究了 AFS 板预制坯的最佳制备工艺参数; 将 AFS 板预制坯在不同发泡温度和时间下进行发泡, 探究最佳发泡温度和时间; 同时, 将预制体在 350、400 和 450  $^{\circ}\text{C}$  下进行单向拉伸试验, 探究 AFS 板预制坯的流动应力和拉伸率与变形温度的关系, 并对 400  $^{\circ}\text{C}$  下 0.15 应变的 AFS 板预制坯进行 SEM 扫描和 EDS 分析, 观察拉伸后的预制坯中发泡剂和稳定剂的分布情况; 利用有限元软件对 AFS 板预制坯制备过程中搅拌头与母材的温度场和 AFS 板发泡过程进行模拟。

## 1 试验材料和方法

本试验选用 7075-O 铝合金板材作为 AFS 板的基体材料, 其化学成分如表 1 所示, 力学性能如表 2 所示, 其尺寸为 250 mm $\times$ 120 mm $\times$ 2 mm。发泡剂采用粒度为 45  $\mu\text{m}$  的  $\text{TiH}_2$  粉末, 泡沫稳定剂采用粒度为 1  $\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为稳定剂的作用是在发泡时增加铝基体的粘度, 防止  $\text{TiH}_2$  粉末分解产生的气体迅速被释放到样品外部。 $\text{TiH}_2$  粉末在加热过程中, 较低的温度也会使其分解, 在搅拌摩擦

焊过程中,  $\text{TiH}_2$  的过早分解会使基体中产生大量孔隙缺陷。将  $\text{TiH}_2$  粉末进行氧化处理, 保温温度为 480  $^{\circ}\text{C}$ , 保温时间为 120 min, 图 1 所示为原始  $\text{TiH}_2$  粉末和氧化处理后  $\text{TiH}_2$  粉末对比, 可知原始  $\text{TiH}_2$  粉末在加热过程中有多个放热峰, 260  $^{\circ}\text{C}$  时开始缓慢释氢, 400  $^{\circ}\text{C}$  时释氢的速率加快, 然而, 氧化处理后  $\text{TiH}_2$  仅有一个放热峰, 且 480  $^{\circ}\text{C}$  才开始释氢。所以  $\text{TiH}_2$  的氧化预处理可有效延迟  $\text{TiH}_2$  分解。再利用 QM-2SP20 型行星式球磨机将发泡剂和稳定剂

表 1 7075-O 铝合金板材化学成分 (% , 质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of 7075-O aluminum alloy plate (% , mass fraction)

Elements	Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Al
Content	5.33	2.27	1.8	<0.03	0.28	Balance

表 2 7075-O 铝合金板材力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of 7075-O aluminum alloy plate

Parameters	Tensile	Yield	Elongation/ %	Hardness/ HV
	strength/ MPa	strength/ MPa		
Value	207	95	21.4	56.7

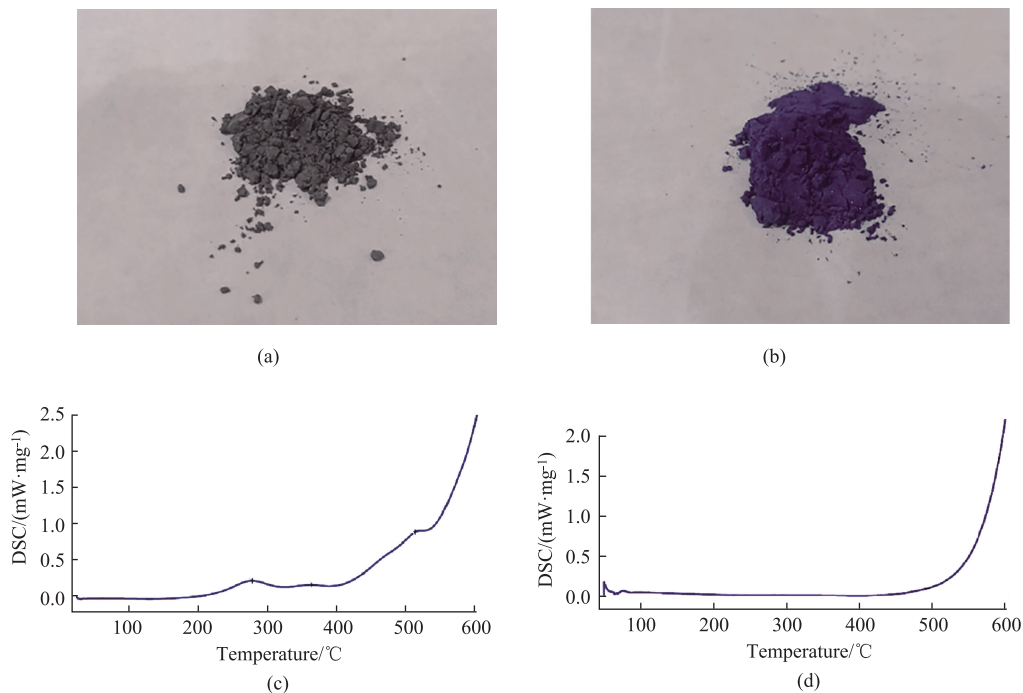


图 1 原始和氧化处理后  $\text{TiH}_2$  粉末对比

(a) 原始  $\text{TiH}_2$  粉末颜色 (b) 氧化处理后  $\text{TiH}_2$  粉末颜色 (c) 原始  $\text{TiH}_2$  粉末 DSC 曲线 (d) 氧化处理后  $\text{TiH}_2$  粉末 DSC 曲线

Fig. 1 Comparison between original and oxidized  $\text{TiH}_2$  powder

(a) Color of original  $\text{TiH}_2$  powder (b) Color of oxidized  $\text{TiH}_2$  powder (c) DSC curve of original  $\text{TiH}_2$  powder (d) DSC curve of oxidized  $\text{TiH}_2$  powder

按板材质量比 3% 和 1% 球磨 120 min 充分混合。搅拌头所选用的材料为热处理模具钢 4Cr5MoV, 它具有良好的耐磨性和导热性, 以及较高的热稳定性和抗冲击性。

图 2 给出了搅拌摩擦焊制备 AFS 板预制坯工艺示意图。将混合后的粉末均匀平铺于 7075-O 铝合金板材上, 装夹完成后, 将旋转的搅拌头插入待焊板中, 并进行多次道次 FSW, 直至获得足够的 AFS 板预制坯面积。通过搅拌头的搅拌, 粉末均匀分布于预制坯中。图 3 所示为中科院研究所研制的 NFSW-650 型号搅拌摩擦焊焊接装置实物图。焊接完成后, 通过切割机沿焊缝横截面切割金相试样和发泡试样, 发泡试样为底面直径为  $\Phi 5$  mm 的圆柱体。由于 7075-O 铝合金的熔点约为  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 且高温可以加速  $\text{TiH}_2$  粉末的分解, 所以发泡温度选择  $660$ 、 $680$  和  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随后, 采用镶嵌机对试样进行热镶嵌, 接着依次用 800、1500、2000 和 2500 目的砂纸进行研磨, 最后使用抛光布和金刚石抛光剂抛光, 直至试样表面无明显划痕。接着, 使用 Keller 试剂 ( $\text{HNO}_3$  :  $\text{HCl}$  :  $\text{HF}$  :  $\text{H}_2\text{O} = 2.5 : 1.5 : 1 : 95$ ) 进行腐蚀处理。最后, 在金相显微镜下观察预制坯板粉混合分布和不同发泡时间、温度下 AFS 泡孔组织形貌。

使用热力模拟试验机分别在  $350$ 、 $400$  和  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$

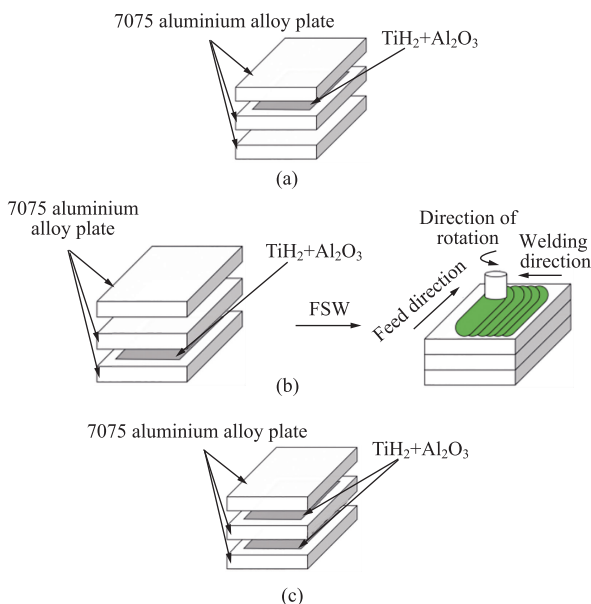


图 2 搅拌摩擦焊制备 AFS 板预制坯工艺示意图

(a) 粉末铺于上层 (b) 粉末铺于下层 (c) 粉末铺于两层

Fig. 2 Schematic diagram of process for AFS panels preform by friction stir welding

(a) Powder is spread on upper layer (b) Powder is spread on lower layer (c) Powder is spread on two layers

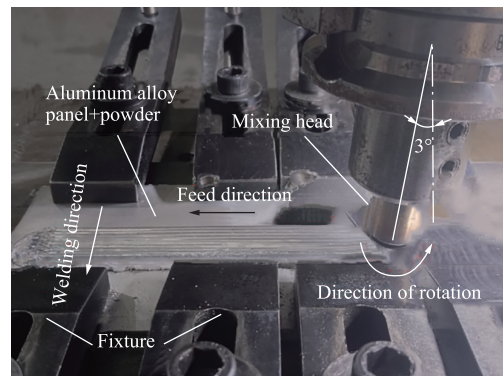


图 3 搅拌摩擦焊焊接装置实物图

Fig. 3 Friction stir welding device physical drawing

下进行拉伸试验, 图 4 所示为拉伸试样尺寸、切割及实物图, 加热速率为  $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ , 应变速率为  $0.01\text{ s}^{-1}$ , 拉伸试样沿垂直于焊缝切割。

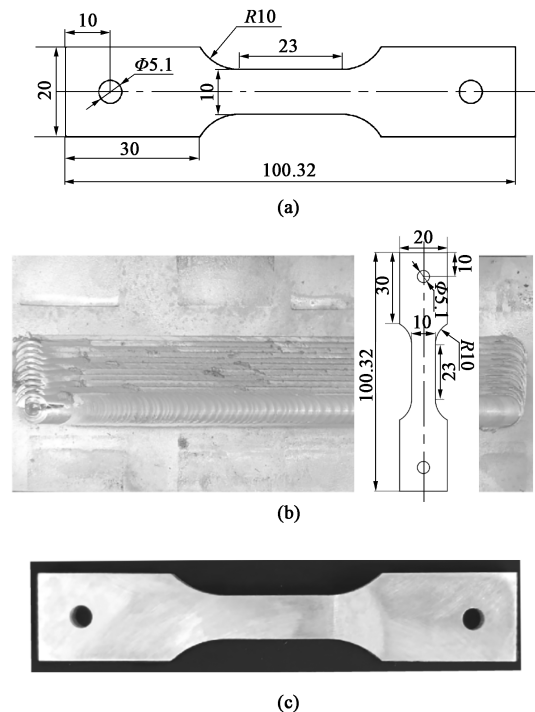


图 4 拉伸试样尺寸 (a)、切割 (b) 及实物 (c) 图

Fig. 4 Drawing of size (a), cutting (b) and physical (c) for tensile specimen

利用 FLUENT 软件对 AFS 板预制体制备过程温度场进行仿真, 研究焊接转速对接头质量的影响规律。其中 7075-O 铝合金板的尺寸为  $200\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ , 两块板重合叠放, 几何模型如图 5 所示。在模拟过程中, 将母料视为绕过旋转搅拌头的流体, 将铝合金板上表面、下表面和 4 个侧面均设为移动墙, 移动速度为搅拌头进给速度  $30\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 移动方向与搅拌头进给速度方向相反。轴肩端面与搅

拌头侧面定义为旋转墙，旋转方向为顺时针旋转，旋转速度为 1000、1500 和 2000  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，采用欧拉流动公式进行计算。

$$\eta = \frac{1}{3\bar{\varepsilon}\alpha} \ln \left\{ \left[ \frac{Z(T, \bar{\varepsilon})}{A} \right]^{-\frac{1}{n}} + \left[ 1 + \left( \frac{Z(T, \bar{\varepsilon})}{A} \right)^{\frac{2}{n}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

$$Z(T, \bar{\varepsilon}) = \bar{\varepsilon} \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) \quad (2)$$

式中： $\eta$  为粘度； $\bar{\varepsilon}$  为应变速率； $T$  为温度； $Q$  为激活能， $Q = 176876 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； $R$  为普适气体常数， $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ； $\alpha$ 、 $A$  和  $n$  为与材料有关的常数，其中  $\alpha = 0.016 \text{ MPa}^{-1}$ ， $\ln A = 19.6 \text{ s}^{-1}$ ， $n = 4.27$ 。

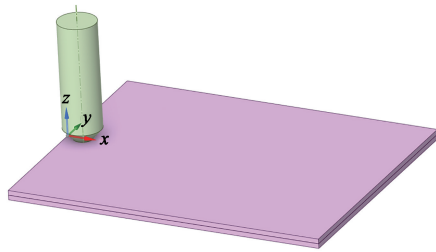


图5 AFS板预制坯FSP几何模型

Fig. 5 FSP geometric model of AFS panel preform

## 2 结果与分析

由文献 [18] 可知，搅拌摩擦焊叠焊间距选用 3 mm，可以得到宏观形貌较好的 AFS 板预制坯。图 6 给出了叠焊间距为 3 mm，进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下进行 12 道次 FSW 制备的 AFS 板预制坯的宏观形貌，可以看到其焊接质量较好，样品表面光滑、致密而平整，表面飞边较小，无沟槽等不良缺陷。图 7 为叠焊间距为 3 mm，进给速度为  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊接转速为  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下进行 7 道次 FSW 制备的 AFS 板预制坯的宏观形貌，此样品表面出现翻皮和沟槽等不良缺陷，由于转速过低，搅拌头热输入量不足，随着搅拌头的移动，搅拌头轴肩不能将搅拌头移动方向前的母材挤入搅拌头后方由于搅拌头移动所导致的空腔内，以至于接头焊缝处出现沟槽，预制体表面出现部分连续飞边。

图 8 所示为单道次下，焊接转速为 1000 和  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，进给速度为 25、30 和  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时接头横截面的金相组织形貌。当焊接转速较低时，

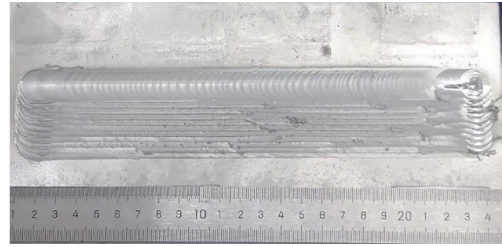


图6 叠焊间距为 3 mm，进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下的 AFS 板预制坯宏观形貌

Fig. 6 Macro morphology of AFS panel preform with stacking spacing of 3 mm, feed rate of  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  and welding rotation speed of  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

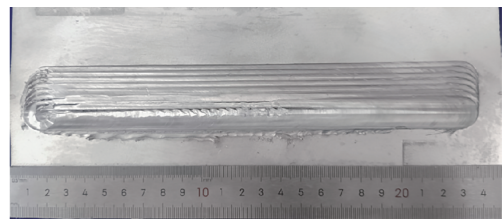


图7 叠焊间距为 3 mm，进给速度为  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊接转速为  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下的 AFS 板预制坯宏观形貌

Fig. 7 Macro morphology of AFS panel preform with stacking spacing of 3 mm, feed rate of  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  and welding rotation speed of  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

进给速度为  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，摩擦产生的热量较少，基体没有充分热塑性熔化，粉末仍然不能均匀混合在基体中，存在分层现象。相对于转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的接头横截面金相组织形貌，粉末混合区域宽度更窄，转速越高，搅拌作用更加剧烈，粉末的流动性越好，搅拌区的板粉混合均匀性也随之增加。然而当焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  不变时，提高进给速度，粉末混合的情况并没有明显的变化。因此，泡沫铝预制坯最佳制备工艺为：进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

图 9 给出了搅拌摩擦焊时沿前进侧方向叠焊间距对 AFS 板预制坯的影响，粉末均铺于下层，可以清楚地观察到，随着焊接间距的增大，道次间的无粉区域逐渐变宽，月牙形的无粉区域逐渐消失，但由于粉末流动的原因，即使在焊接间距为 1.5 mm 时，道次间月牙形的无粉区域仍然存在，如图 9a 所示。在焊接间距为 3 mm 时，仍然可以观察到明显的月牙，如图 9d 所示。而在焊接间距为 3.5 和 4 mm 时月牙形状消失，道次间的无粉区域变成更宽的“通道”，粉末不能均匀地分散于 AFS 板预制坯，如图 9e 和图 9f 所示。由于焊接间距在 1.5~3 mm，

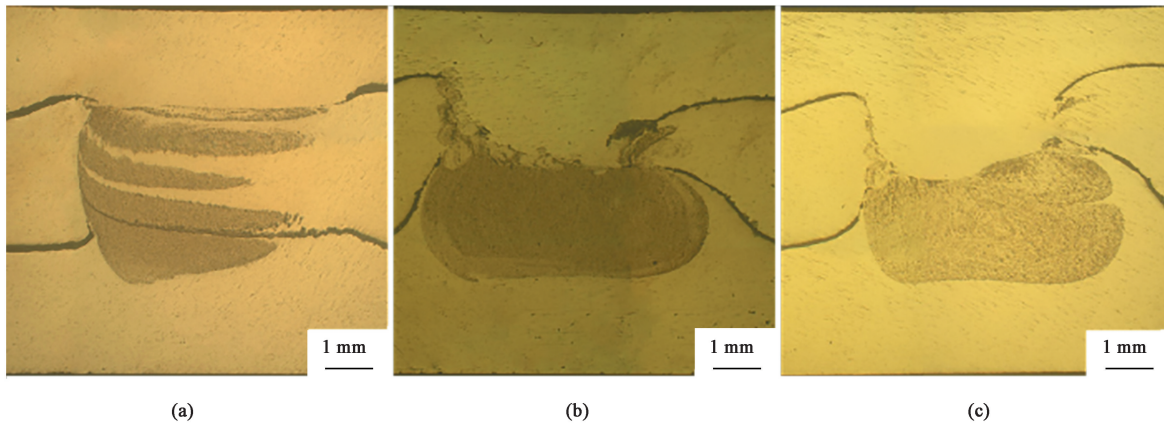


图 8 焊接转速和进给速度对 AFS 板预制坯的影响  
 (a)  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (b)  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (c)  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$   
 Fig. 8 Effect of welding rotation speed and feed speed on AFS panel preforms

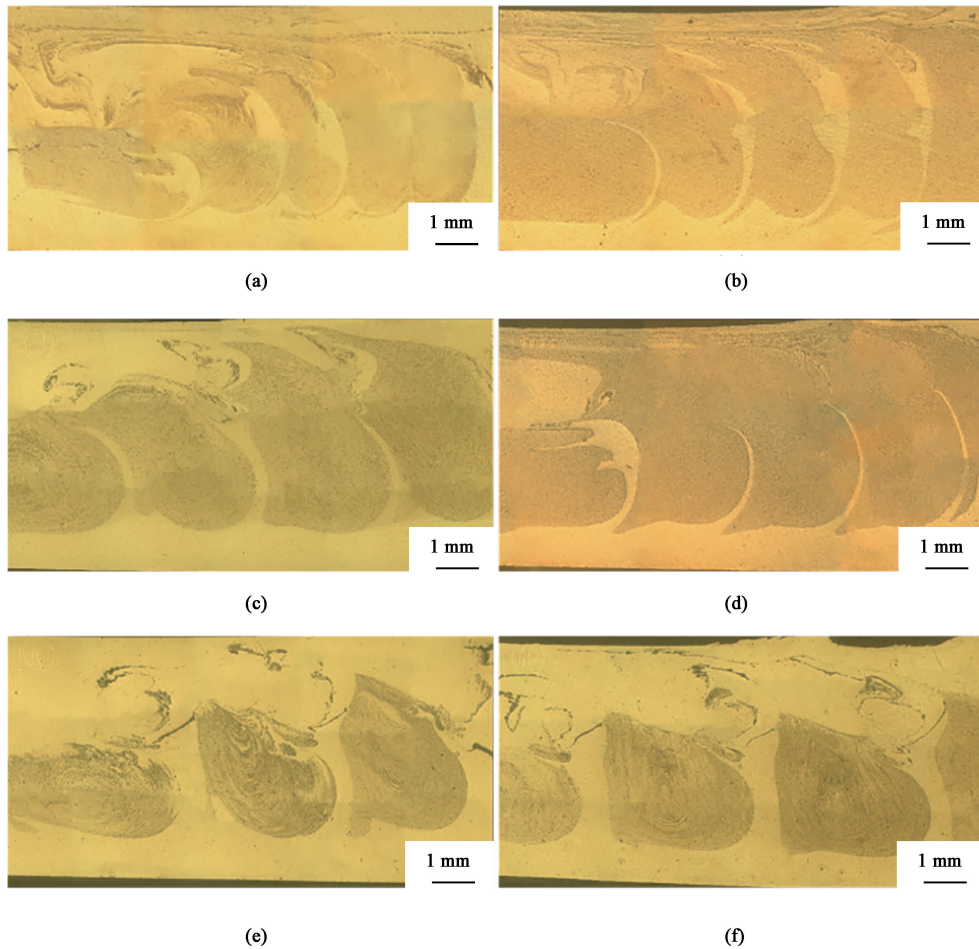


图 9 沿前进侧叠焊间距对 AFS 板预制坯的影响  
 (a) 1.5 mm (b) 2 mm (c) 2.5 mm (d) 3 mm (e) 3.5 mm (f) 4 mm  
 Fig. 9 Effect of stack welding spacing along forward side on AFS panel preforms

道次间均会形成月牙形的无粉区域，粉末混合更均匀，但焊接间距太小，热输入量更大，飞边也会增

多，AFS 板预制坯表面质量差，搅拌头的磨损更快，对多道次叠焊极其不利，所以焊接间距为 3 mm 更

合适。

图 10 所示为沿后退侧叠焊粉末铺放位置对 AFS 板预制坯的影响，试验条件为焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，叠焊间距为  $3 \text{ mm}$ 。对比图 9 沿前进侧叠焊可知，图 10 中沿后退侧叠焊消除了月牙形的无粉区域，不同道次间粉末相互连接，且粉末上下宽度更小，较为均匀的分布在预制坯的中间层，相比于沿前进侧叠焊，粉末的

分布更为集中。由图 10 可知，粉末铺在上层时，由于粉末向上流动，使最上层的铝板也混入粉末，破坏了预制坯的夹心结构，(图 10a)；而粉末铺于下层有利于形成夹芯结构 (如图 10b 和图 10c)。所以改变粉末的位置可以解决粉末上流现象，沿后退侧叠焊，且叠焊间距为  $3 \text{ mm}$  时，可以得到粉末混合均匀且粉末集中在母材中间层的 AFS 板预制坯。

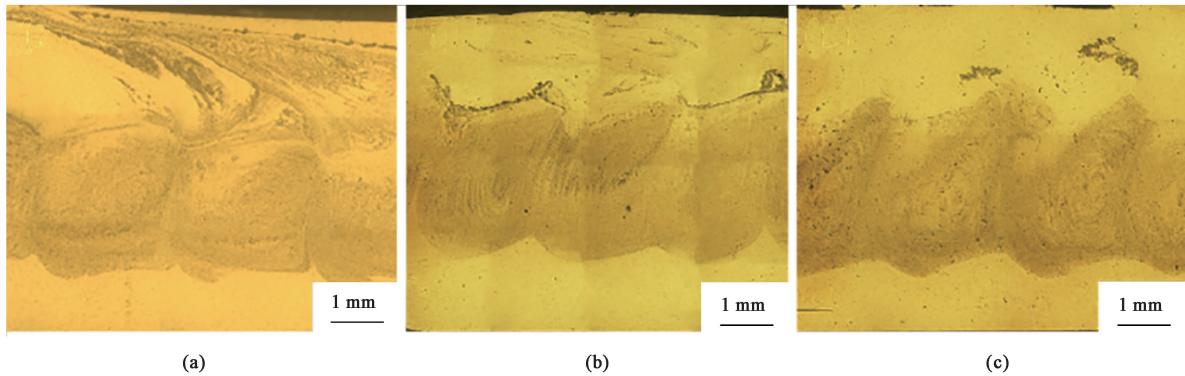


图 10 沿后退侧叠焊粉末位置对 AFS 板预制坯的影响

(a) 上层 (b) 两层 (c) 下层

Fig. 10 Effect of stack welding powder position along setback side on AFS panel preforms

(a) Upper layer (b) Two layers (c) Lower layer

用单轴拉伸试验研究了预制坯在高温下的热变形行为，利用真应力-真应变曲线来反映预制坯在拉伸过程中的应力应变变化，计算公式如下。

$$\sigma_{\text{ture}} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{ture}} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4)$$

式中： $\sigma_{\text{ture}}$  为真应力； $\sigma$  为工程应力； $\varepsilon_{\text{ture}}$  为真应变； $\varepsilon$  为工程应变。

不同变形温度下真实应力-真实应变曲线如图 11 所示，在拉伸初始阶段，流动应力急剧增加并达

到峰值，随着拉伸的进一步增加而趋于稳定，而流动应力最初是由于加工硬化而升高的，晶粒间形成线位错而导致位错密度急剧增大，从而表现出线性加工硬化现象<sup>[19]</sup>，随着变形程度的增大，发生了动态回复现象，当位错密度达到临界值时，新的动态再结晶晶粒开始出现，使得位错的线缺陷不断被愈合，这种软化效应使得流动应力迅速降低<sup>[20]</sup>。对比不同温度下的真应力-真应变曲线可知，真应力随着变形温度的升高而降低。这是由于温度越高，晶

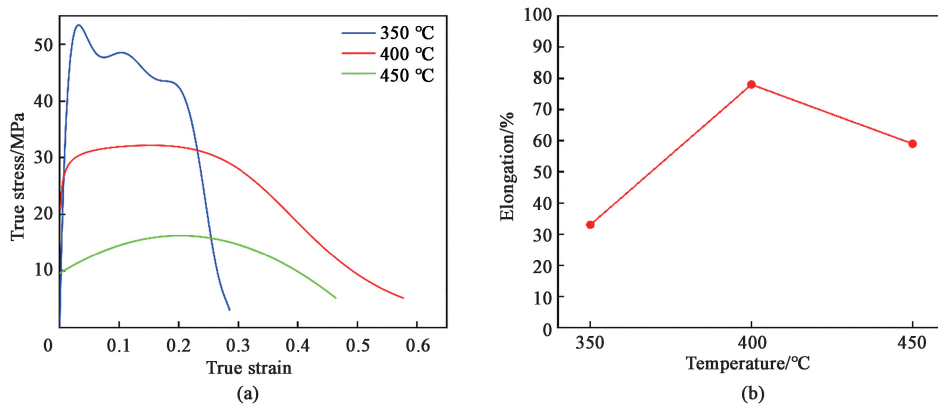


图 11 不同变形温度下真应力-真应变曲线 (a) 及伸长率 (b) 曲线

Fig. 11 True stress-true strain curves (a) and elongation curves (b) at different deformation temperatures

界处位错的滑移能力越强,合金的动态回复能力越强<sup>[21]</sup>。当变形温度为 350 ℃时,伸长率为 33%,而在 400 ℃时,伸长率达到 78%,当温度升高到 450 ℃时,伸长率为 59%,可见,当温度为 400 ℃时,预制坯的拉伸性能最好。

为了进一步分析不同变形量下 AFS 板预制坯中发泡剂  $\text{TiH}_2$  粉末和稳定剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末在铝板中的分布规律,在变形温度为 400 ℃时,对焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下的预制坯进行拉伸变形。如图 12 所示为 400 ℃拉伸变

形后 0.15 应变 AFS 板预制坯的 SEM 图像,如图 12a 的洋葱圈上分布着均匀的白色颗粒,灰色部分为铝基体。对局部进行放大,如图 12b 和图 12c 所示,可以观察到大量白色颗粒和少量黑色颗粒,由于添加  $\text{TiH}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的比例为 3:1,可以推断白色颗粒为  $\text{TiH}_2$ ,黑色颗粒为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。如图 12d 所示,可以看到在 AFS 板预制坯内分布着一些细小的裂纹,这些裂纹在  $\text{TiH}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒周围萌生和发展。而在 AFS 板预制坯的发泡过程中,泡孔会优先沿着这些裂纹生长。

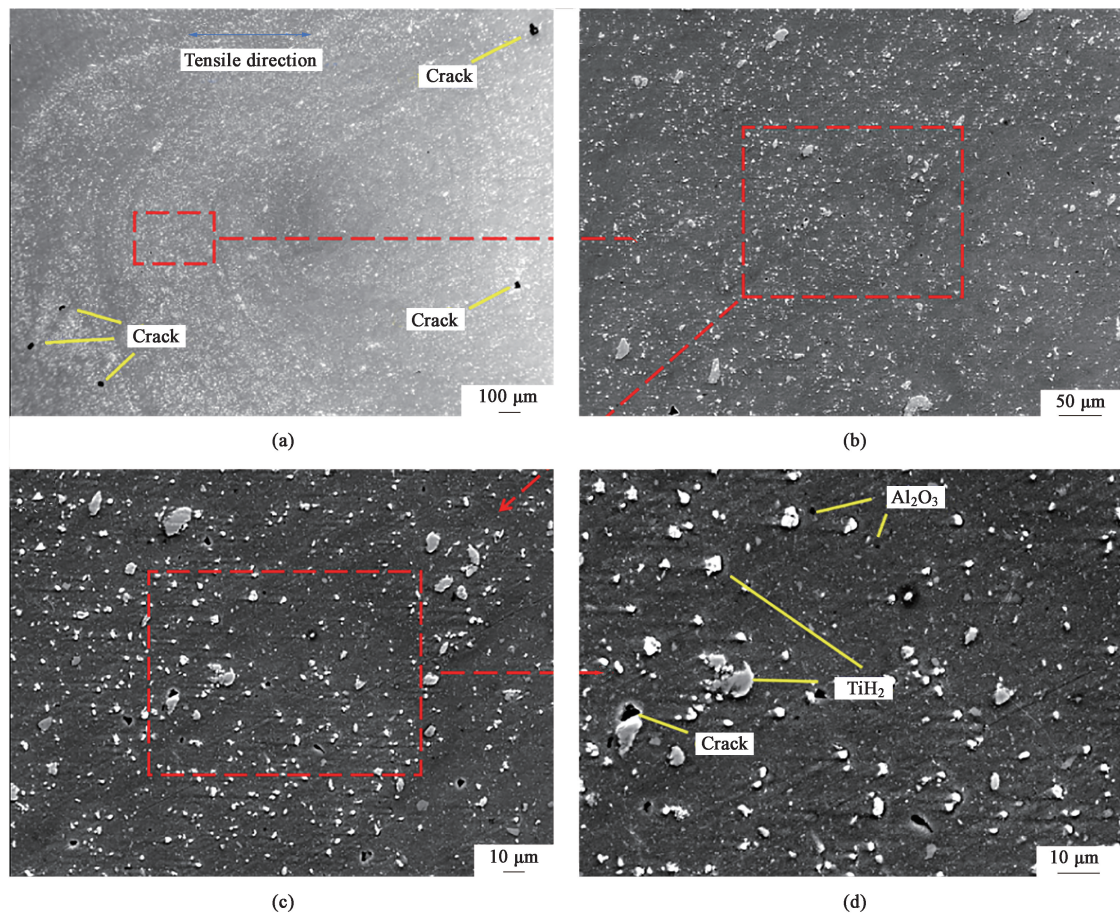


图 12 400 ℃拉伸变形后 0.15 应变下的 SEM 图像

(a) 50× (b) 200× (c) 500× (d) 1000×

Fig. 12 SEM images with strain of 0.15 after tensile deformation at 400 ℃

为了进一步明确  $\text{TiH}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末的分布情况,如图 13 给出了 AFS 板预制坯 EDS 分析结果。对 1000 倍的 AFS 板预制坯的 SEM 图所示区域进行 EDS 面扫描,如图 13a 所示,可以看到 Al、Cu、Mg、O 和 Zn 元素占据了绝大部分,其中 Al 元素几乎占据所有区域,质量分数达到 80.4%,如图 13b 和图 13i 所示;Cu 元素的质量分数为 1.8%,Mg 元素的质量分数为 2.6%,主要来源于母材 Al 板中,

如图 13c、图 13d 和图 13i 所示;O 元素的质量分数为 6.7%,而 Ti 元素的质量分数最少,为 1.5%,Zn 元素的质量分数为 7.0%,如图 13f~图 13h 所示。对比图 13a 和图 13g,在白色颗粒分布的地方,Ti 元素显示了更高的分布,可以推断出,白色颗粒为  $\text{TiH}_2$  粉末,而在一些白色颗粒所分布的地方,O 元素也显示了更高的分布,如图 13a 和图 13f 所示,可以证明这些白色颗粒不仅为  $\text{TiH}_2$  粉末,也含有部

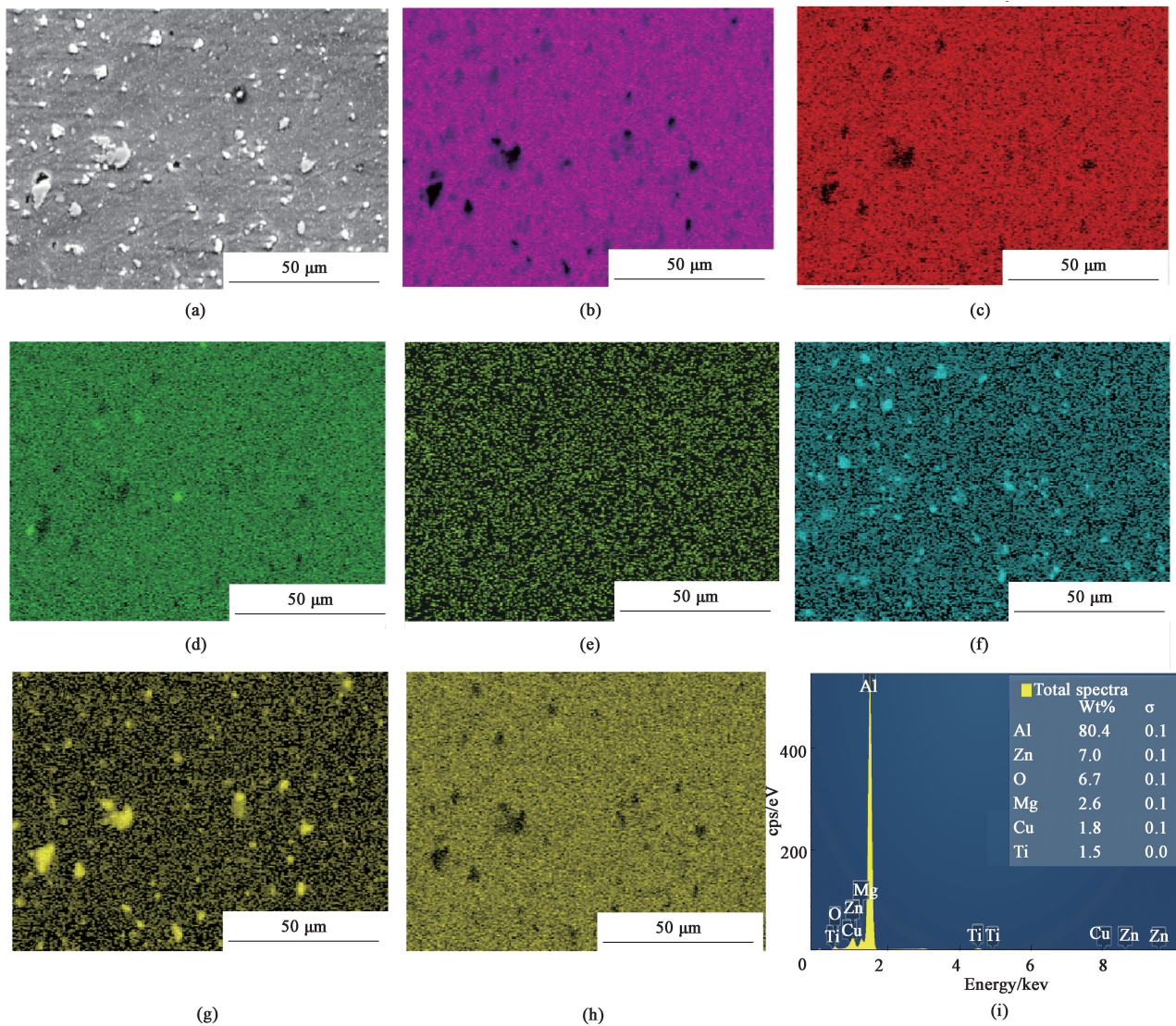


图 13 拉伸变形后 0.15 应变下的 EDS 分析

(a) SEM 图像 (b) Al 元素 (c) Cu 元素 (d) Mg 元素 (e) Mn 元素 (f) O 元素 (g) Ti 元素 (h) Zn 元素 (i) 总数谱图

Fig. 13 EDS analysis with strain of 0.15 after tensile deformation

(a) SEM image (b) Al element (c) Cu element (d) Mg element (e) Mn element (f) O element (g) Ti element (h) Zn element (i) Total number spectrum

分  $TiO_x$  ( $x$  为 Ti 和 O 的不同化合物组合中 O 元素的指数) 氧化物颗粒<sup>[22]</sup>。而添加物中, 只有  $Al_2O_3$  中含有 O 元素, 且 SEM 图像中的白色颗粒和黑色颗粒的分布与 O 元素的分布相同, 可以推断出黑色颗粒为  $Al_2O_3$  粉末。

图 14 给出了  $660\text{ }^\circ\text{C}$  不同保温时间下泡孔组织形貌的演变, 可以看到, 发泡时间为  $120\text{ s}$  时, 如图 14a 所示, 泡孔多为裂纹状, 这是因为样品受热时间较短, 基体没有充分软化,  $TiH_2$  粉末刚开始分解。且裂纹产生于搅拌区周围, 由于搅拌头的旋转作用, 由图 7 可知, 沿后退侧叠焊时, 发泡剂和稳定剂均均匀的分布在基体中, 这也是发泡初始阶段

的成核位点。随着发泡时间的增加, 如图 14b~图 14d 所示, 泡孔逐渐长大且圆度增加, 并逐渐向上移动, 泡孔间相互合并, 形成大泡孔, 此时基体处于熔融态,  $TiH_2$  粉末开始大量分解, 泡孔分布均匀。当发泡时间继续增加到  $210\text{ s}$  时, 泡孔不断上移合并, 基质在重力的作用下下沉, 泡孔在基体上方积累, 然后破裂, 泡孔开始坍塌, 气体从试样上方溢出, 如图 14e 所示。

图 15 所示为  $680\text{ }^\circ\text{C}$  不同保温时间下泡孔组织形貌的演变。图 16 所示为  $700\text{ }^\circ\text{C}$  不同保温时间下泡孔组织形貌的演变。对比图 14 可知, 在保温时间为  $120\text{ s}$  时,  $680\text{ }^\circ\text{C}$  下泡孔形核长大比  $660\text{ }^\circ\text{C}$  下要更迅

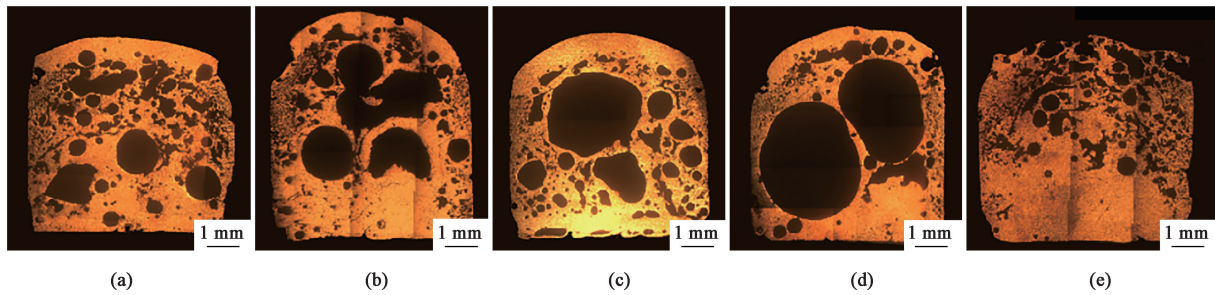


图 14 660 °C 不同保温时间下泡孔组织形貌的演变

(a) 120 s (b) 150 s (c) 180 s (d) 195 s (e) 210 s

Fig. 14 Evolution of cell microstructure morphology at 660 °C with different holding time

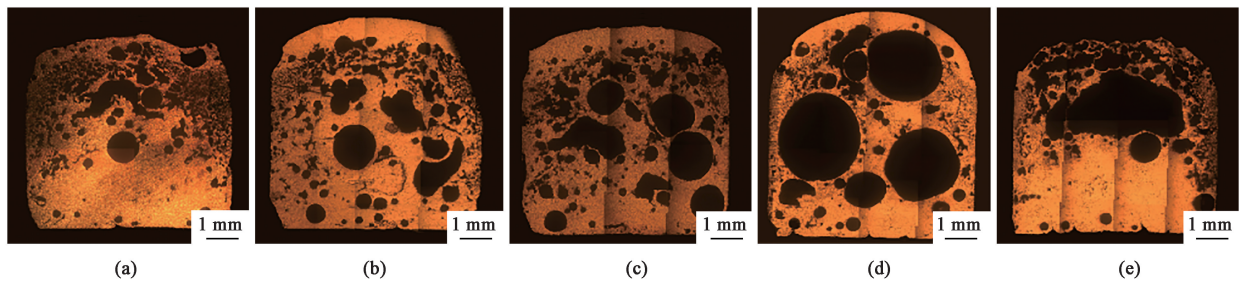


图 15 680 °C 不同保温时间下泡孔组织形貌的演变

(a) 120 s (b) 150 s (c) 180 s (d) 195 s (e) 210 s

Fig. 15 Evolution of cell microstructure morphology at 680 °C with different holding time

速, 发泡温度越高, 基体母材软化时间更短, 680 °C 下发泡 120 s 时, 已经出现圆度较高的泡孔, 分布也较为均匀, 如图 14a 和图 15a 所示。而 700 °C 下发泡 90 s, 泡孔已经开始逐渐合并, 如图 16a 所示。随着发泡时间的增加, 与 660 °C 相同, 泡孔组织同样出现泡孔接触合并的过程, 如图 15b~图 15d 和图 16b~图 16d 所示。发泡温度为 680 °C, 发泡时间为 195 s 时, 泡孔逐渐合并成为两个占据大部分基体的大泡孔, 如图 15d 所示, 而在 210 s 时, 泡孔最终上移并破裂, 而剩余的孔则又变成裂纹状, 如图 15e 所示。当发泡温度为 700 °C, 发泡时间为 130 s 时, 孔径增长迅速但圆度降低, 孔径

大小分布不均匀且大小差异较大, 如图 16d, 而在 150 s 时, 泡孔已经破裂并坍塌, 其余的泡孔同样变为裂纹状, 如图 16e 所示。图 17 为 680 °C 下发泡 190 s 的泡孔组织形貌, 可见其泡孔结构均匀、孔隙率高、泡孔分布均匀、圆度较高, 孔隙率为 51%, 平均孔径为  $\Phi 345 \mu\text{m}$ 。所以 680 °C 是最理想的发泡温度, 发泡温度和发泡时间对 AFS 泡孔组织有着直接的影响, 温度越高, 发泡过程时间越短, 对泡孔组织更难控制, 发泡温度越低, 所需发泡时间更长, 效率较低。

图 18 所示为搅拌头进给速度为  $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、不同焊接转速下 AFS 板预制坯数值模拟温度场云

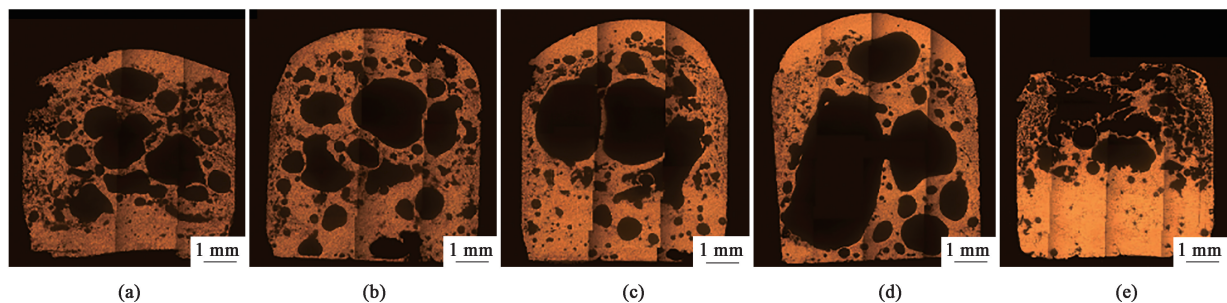


图 16 700 °C 不同保温时间下泡孔组织形貌的演变

(a) 90 s (b) 105 s (c) 120 s (d) 130 s (e) 150 s

Fig. 16 Evolution of cell microstructure morphology at 700 °C with different holding time

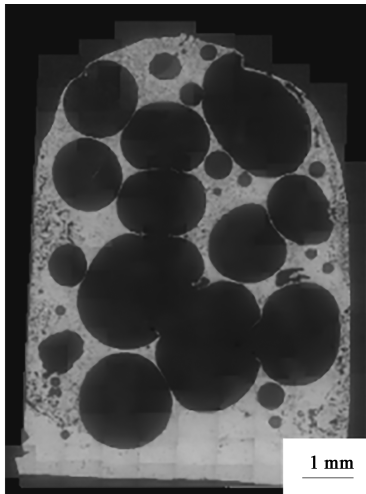


图 17 680 °C 下发泡 190 s 的泡孔组织形貌

Fig. 17 Microstructure and morphology of cell at 680 °C for 190 s

图。从图中可以看出，旋转的搅拌头（包括肩部和搅拌针）与母材表面接触，产生较大摩擦力，这个摩擦力是主要的热源，使母材迅速升温。在摩擦热的作用下，母材局部材料温度升高，达到塑性状态，搅拌头的挤压和搅拌使这些材料发生塑性变形，进一步产生变形热。而随着焊接转速的增加，摩擦所产生的热量也升高，当焊接转速为  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时，最高温度达到  $371 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，如图 18a 所示，此时基体温度较低，摩擦产热较少，材料流动性较差。而当焊接转速达到  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时，如图 18b 所示，轴肩与母材上表面接触摩擦产生的热量更多，且搅拌针与母材间摩擦产生的热量更多，工件表面温度达到  $465 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，与周围环境的热对流更多。而当焊接转速为  $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时，如图 18c 所示，工件表面温度达到  $543 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 19 所示为焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下 AFS 板预制坯横截面数值模拟温度场云图。由图可知，

温度最高的位置来自轴肩和母材表面的接触面，还有搅拌针和母材内部的接触面，主要因为搅拌头与母材间摩擦产生热量，工件与周围环境的热对流，轴肩影响区和焊核区的温度最高。当焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时，基体得到充分热塑性熔化，搅拌作用剧烈，粉末的流动性好，搅拌区的板粉混合均匀。

为了反映 AFS 板预制坯发泡过程中泡孔组织形貌的演变规律，利用 FLUENT 软件对 AFS 板预制坯发泡过程进行模拟仿真。在模型中设置了 3 个氢气入口，持续向熔体中释放气体，以模拟  $\text{TiH}_2$  颗粒不断释放气体并促进气泡形核和生长的过程。图 20 所示为气泡群形核过程模拟，也就是气体刚进入熔体时的状态，此时气泡较小，从入口进来便一分为三，并向四周扩散。图 21 展示了气泡群上升过程模拟，上升过程中气泡会发生形态转变，由圆形变为月牙状，这是由于泡孔生长是驱动力和阻力之间的竞争，泡孔生长的驱动力主要来自泡孔内部气体的压力，而泡孔生长的阻力主要由泡孔熔体压力、表面张力、熔体粘度和泡孔变形组成。该模型设置了 3 个氢气入口，并不断输送氢气到熔体内，上升气泡的形态和动力学行为取决于雷诺数和键数的大小，因此高表面张力（或低键数）和粘性（低雷诺数）力会阻止气泡扭曲，并相应地保持气泡的圆形形状<sup>[23]</sup>。由于密度梯度的存在，静止气泡在浮力的作用下上升，而熔体在垂直壁附近沿重力方向下降，这种机制导致气泡形状发生变化，形成月牙状<sup>[24]</sup>。图 22 所示为气泡群合并阶段，此时，不同氢气入口的气泡相互合并，气泡逐渐在中间形成扁平的长气泡，气泡主要集中在中部和上部。随着气泡的持续上升，会在底部区域形成一定的负压，促使下方产生的气泡上升速度不断加快，气泡快速合并分散，迅速充满

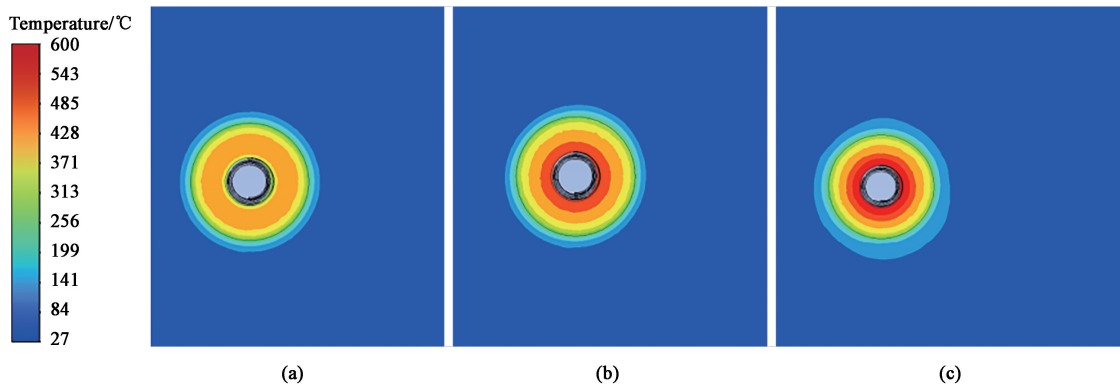


图 18 不同焊接转速下泡沫铝预制坯水平截面数值模拟温度场云图

(a)  $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (b)  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  (c)  $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 

Fig. 18 Numerical simulation temperature field cloud maps of horizontal cross-section of aluminum foam precast billet with different welding speeds

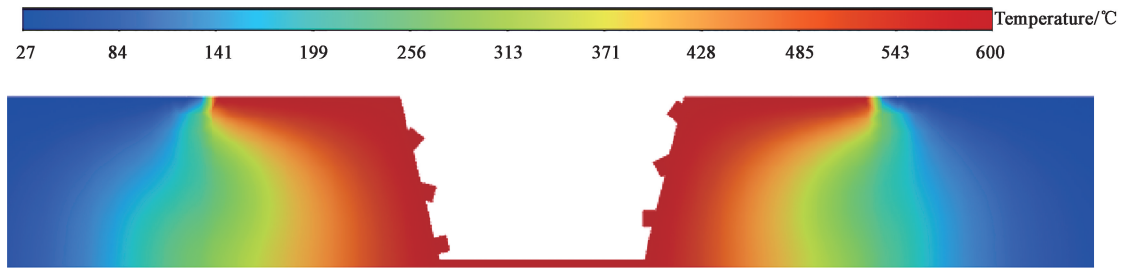


图 19 焊接转速为  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下 AFS 板预制坯横截面数值模拟温度场云图

Fig. 19 Numerical simulation temperature field cloud map of cross-section of AFS panel preform with welding rotation speed of  $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$

整个计算域，最终形成孔隙分布均匀泡孔形态。随着发泡时间的延长，泡孔破裂并坍塌。

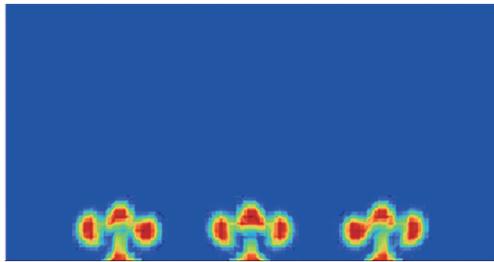


图 20 气泡群形核过程模拟

Fig. 20 Simulation of nucleation process of bubble group

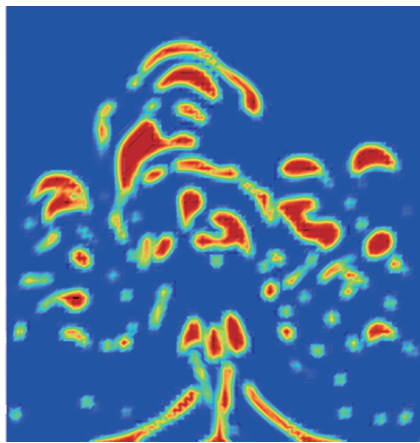


图 21 气泡群上升过程模拟

Fig. 21 Simulation of rising process of bubble group

可见，AFS 板预制坯发泡过程的模拟与实际情况相似，上浮过程中发生相同的形态转变，由圆形变为月牙状，由于气泡内部气体压力的作用，气泡不断合并长大，最终在基体上方积累，然后破裂，泡孔开始坍塌。

### 3 结论

(1) 采用搅拌摩擦焊沿前进侧叠焊制备 AFS 板预制坯，最佳焊接间距为  $3 \text{ mm}$ ，道次间的无粉区域

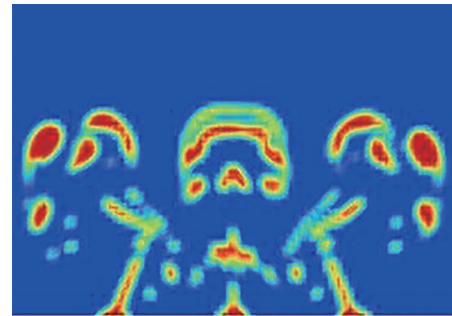


图 22 气泡群合并过程模拟

Fig. 22 Simulation of merging process of bubble group

较窄，但是缩小焊接间距，道次间月牙形的无粉区域仍然存在。沿后退侧叠焊可以有效消除月牙形的无粉区域。粉末铺于下层有利于形成夹芯结构，解决粉末上流现象。

(2) AFS 板预制坯的流动应力随着变形温度的升高而降低，而伸长率随着变形温度的升高先上升后下降。当变形温度为  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  时，伸长率为  $33\%$ ，而  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  时，伸长率达到  $78\%$ ，当温度升高到  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  时，伸长率为  $59\%$ 。

(3) 随着发泡时间的增加，AFS 板预制坯中的泡孔从发泡剂的分解到泡孔形核长大，最后合并上升破裂。发泡温度越高，发泡过程时间越短，对泡孔组织更难控制。最理想的发泡温度为  $680 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在  $680 \text{ }^\circ\text{C}$  下发泡  $190 \text{ s}$  得到泡孔结构均匀、孔隙率高、泡孔分布均匀、圆度较高，孔隙率为  $51\%$ 、平均孔径为  $\Phi 345 \text{ }\mu\text{m}$ 。

(4) 不同焊接转速下 AFS 板预制坯数值模拟温度场云图表明：随着焊接转速的增加，摩擦所产生的热量也升高。当焊接转速达到  $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  时，轴肩与母材上表面接触摩擦产生的热量更多，工件表面温度达到  $543 \text{ }^\circ\text{C}$ 。AFS 板预制坯发泡过程的模拟与实际情况相似。

#### 参考文献：

[1] 刘贞山, 李英东, 赵经纬, 等. 汽车轻量化用铝合金材料及应

- 用技术的研究 [J]. 中国材料进展, 2022, 41 (10): 786-795, 807.
- LIU Zhenshan, LI Yingdong, ZHAO Jingwei, et al. Research on aluminum alloy materials and application technology for automobile lightweight [J]. Progress of Materials in China, 2022, 41 (10): 786-795, 807.
- [2] 陈宇豪, 薛松柏, 王博, 等. 汽车轻量化焊接技术发展现状与未来 [J]. 材料导报, 2019, 33 (S2): 431-440.
- CHEN Yuhao, XUE Songbai, WANG Bo, et al. Development status and future of lightweight welding technology for automobiles [J]. Materials Reports, 2019, 33 (S2): 431-440.
- [3] 刁明霞, 果春焕, 高华兵, 等. 泡沫金属复合材料的研究进展 [J]. 材料工程, 2022, 50 (12): 60-70.
- DIAO Mingxia, GUO Chunhuan, GAO Huabing, et al. Research progress of metal foam composites [J]. Materials Engineering, 2022, 50 (12): 60-70.
- [4] 张曦. 泡沫铝夹芯板曲面的塑性成形与典型成形缺陷研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- ZHANG Xi. Study on plastic forming and typical forming defects of curved surface of aluminum foam sandwich panel [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [5] 柏丽敏, 毕彦豪. 汽车轻量化设计在提升燃油经济性中的关键技术分析 [J]. 内燃机与配件, 2024, (15): 19-21.
- BAI Limin, BI Yanhao. Analysis of key technologies in improving fuel economy in automobile lightweight design [J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2024, (15): 19-21.
- [6] 伍杰, 毛祖莉, 任芝兰. 汽车轻量化用铝合金拼焊板的研究进展 [J]. 锻压技术, 2016, 41 (9): 1-6, 12.
- WU Jie, MAO Zuli, REN Zhilan. Research progress of tailored blank for automotive lightweight [J]. Forging & Tamping Technology, 2016, 41 (9): 1-6, 12.
- [7] KWEON J H, JUNG J W, KIM T H, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding [J]. Composite Structures, 2006, 75 (1-4): 192-198.
- [8] BASTURK S B, TANOGLU M. Development and mechanical behavior of FML/aluminium foam sandwiches [J]. Appl. Comp. Mater., 2013, 20: 789-802.
- [9] 梁晓军. 泡沫铝芯三明治的粉末冶金制备及其性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
- LIANG Xiaojun. Preparation of powder metallurgy and its properties of aluminum foam core sandwich [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [10] 张敏, 陈长军, 姚广春. 泡沫铝夹芯板芯材发泡的研究 [J]. 功能材料, 2008, 39 (4): 596-599.
- ZHANG Min, CHEN Changjun, YAO Guangchun. Research on foaming of core material of aluminum foam sandwich panel [J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39 (4): 596-599.
- [11] 祖国胤, 郝亮, 张敏, 等. 轧制复合对泡沫铝夹芯板组织与性能的影响 [J]. 东北大学学报, 2007, 28 (12): 1725-1728.
- ZU Guoyin, HAO Liang, ZHANG Min, et al. Effect of rolling composite on microstructure and properties of aluminum foam sandwich panel [J]. Journal of Northeastern University, 2007, 28 (12): 1725-1728.
- [12] PADHY G K, WU C S, GAO S. Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: A review [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34 (1): 1-38.
- [13] HANGAI Y, UTSUNOMIYA T. Fabrication of porous aluminum by friction stir processing [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40 (2): 275-277.
- [14] PENG P, WANG K S, WANG W, et al. High-performance aluminium foam sandwich prepared through friction stir welding [J]. Materials Letters, 2019, 236: 295-298.
- [15] TAKAO U, KOHEI O, YOSHIHIKO H. Fabrication of aluminum foam core sandwich using sandwich-type foamable precursor with two face sheets by friction stir welding route [J]. Materials Transactions, 2018, 59 (6): 999-1004.
- [16] PANG Q, ZHENG J, HU Z L. Microstructural characteristics and mechanical properties of 7075 aluminum alloy foam sandwich panels fabricated via integrated forming and foaming [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 133-145.
- [17] SU X X, HUANG P, FENG Z H, et al. Study on aluminum foam sandwich welding by friction stir welding technology [J]. Materials Letters, 2021, 304: 130605.
- [18] 庞秋, 吴正健. 搅拌摩擦加工制备的闭孔泡沫铝的组织及性能 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (1): 140-147.
- PANG Qiu, WU Zhengjian. Microstructure and properties of closed-cell aluminum foam prepared by friction stirring [J]. Chinese Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (1): 140-147.
- [19] KHODASHENAS H, MIRZADEH H, MALEKAN M, et al. Constitutive modeling of flow stress during hot deformation of Sn-Al-Zn-Cu-Mg multi-principal-element alloy [J]. Vacuum, 2019, 170: 108970.
- [20] 彭宇, 杨程, 彭迎娇, 等. 7075-T6 高强铝合金温热处理本构方程及热加工图 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 230-238.
- PENG Yu, YANG Cheng, PENG Yingjiao, et al. Constitutive equation and thermal processing diagram of thermothermal deformation of 7075-T6 high-strength aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 230-238.
- [21] 陶志伟, 王雷刚, 杨兴旺, 等. 喷射成形 7055 铝合金回收粉挤压态的热变形行为 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (6): 87-93.
- TAO Zhiwei, WANG Leigang, YANG Xingwang, et al. Hot deformation behavior of sprayed 7055 aluminum alloy recycled powders as extruded [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (6): 87-93.
- [22] 徐文斌, 胡志力, 庞秋. 泡沫铝夹芯板预制坯热变形行为 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (5): 44-50.
- XU Wenbin, HU Zhili, PANG Qiu. Thermal deformation behavior of prefabricated billets of aluminum foam sandwich panels [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (5): 44-50.
- [23] PANG M J, LU M J. Numerical study on dynamics of single bubble rising in shear-thinning power-law fluid in different gravity environment [J]. Vacuum, 2018, 153: 101-111.
- [24] HYSING S, TUREK S, KUZMIN D, et al. Quantitative benchmark computations of two-dimensional bubble dynamics [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 60: 1259-1288.