# 压弯半径对 7A85 结构壁板退火展平成形尺寸 与组织性能的影响研究

樊振中<sup>1,2</sup>,张东<sup>3</sup>,韩金全<sup>4</sup>,魏佳乐<sup>1,2</sup>,许晨玲<sup>5</sup>,陆政<sup>1,2</sup>

(1.中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;2.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心,北京 100095;3.北京宇航系统工程研究所,北京 100076;4.北京航空航天大学,北京 100191;
 5.大连汇程铝业有限公司,辽宁 大连 116105)

摘要:目的 为满足结构舱段用高强高韧铝合金宽幅薄壁高筋整体成形壁板的精密制备需求,在材料退火组 织状态下,结合不同压弯半径展平工装,实现 7A85 结构壁板的展平处理。方法 采用 ABAQUS 有限元软件 计算不同压弯半径下的结构回弹尺寸,采用万能力学性能试验机测试不同区域的力学性能,结合扫描电镜 完成组织形貌与断口形貌的观察。结果 随着压弯半径的增大,7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域的应力峰值持 续下降,结构回弹尺寸误差先下降后上升,立筋区域的应力峰值持续下降,随着压弯半径的增大,应力峰 值先上升后下降,结构回弹尺寸误差明显提高。结论 结合 7A85 铝合金挤压圆筒不同区域金属型退火展平 模具,成功制备出了幅长为 8 000 mm、幅宽为 1 280 mm 的 7A85 铝合金结构壁板。 关键词: 7A85 铝合金;结构壁板;压弯半径;退火压平;成形尺寸;组织性能 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2022.09.007 中图分类号; TG319 文献标识码;A 文章编号: 1674-6457(2022)09-0050-10

# Effect of Bending Radius on Annealing Flattening Size and Microstructural Properties of 7A85 Structural Panel

FAN Zhen-zhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Dong<sup>3</sup>, HAN Jin-quan<sup>4</sup>, WEI Jia-le<sup>1,2</sup>, XU Chen-ling<sup>5</sup>, LU Zheng<sup>1,2</sup>

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 4. Beihang University, Beijing 100191, China; 5. Dalian Huicheng Aluminum Co., Ltd., Liaoning Dalian 116105, China)

**ABSTRACT:** The work aims to meet the precise preparation requirements of high-strength and high-toughness wide thin-wall high-reinforcement integrally-formed aluminum alloy panel for structural cabin, so as to flatten the 7A85 structural panel by combining flattening tools with different bending radii under the annealing microstructure of the materials. The rebound structural size under different bending radii was calculated by ABAQUS FEM software, the mechanical properties were tested by universal testing machine, and the microstructure and fracture morphology were observed by scanning electron microscopy. The peak stress inside the skin regions of 7A85 aluminum alloy structural panel decreased with the increase of bending radius, and the rebound structural size error decreased firstly and then increased. The peak stress in the vertical reinforcement area continued to decrease, and the rebound structural size error decreased firstly and then increased. When FSW thickened area was sub-

收稿日期: 2022-02-10

作者简介:樊振中(1985—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新型轻质合金材料研制与轻量化复杂结构制件精 密成形制造。

ject to bending, the peak stress decreased continuously with the increase of bending gap. With the increase of bending radius, the peak stress firstly increased and then decreased, and the rebound structural size error increased obviously. Combined with metal mold annealing flattening dies of 7A85 aluminum alloy extrusion cylinder in different areas, 7A85 aluminum alloy structural panel with a width of 1 280 mm and a length of 8 000 mm is successfully prepared.

**KEY WORDS:** 7A85 aluminum alloy; structural panel; bending radius; annealing flattening; forming size; microstructural properties

铝合金因具有密度低、比强度高、比刚度高、耐 蚀性佳、批量生产制造成本低、效率高、加工性能与 连接成形性能良好等特点,在民用建筑结构材料、船 舶与海洋装备中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。作为传统的 金属结构材料,与复合材料、镁合金等轻质材料相比, 铝合金服役寿命长、结构可靠性高、连接成形与修复 性好且结构疲劳寿命预测准确度高,目前仍然是航空 航天轻质构件一体化设计制造的主选材料<sup>[3]</sup>。近年 来,随着新能源汽车行业的飞速发展,铝合金一体化 制件及全铝车身的工程应用研究不断受到重视,铝合 金在城市轨道交通车辆方面的应用也日趋扩大<sup>[4]</sup>。

整体壁板作为飞机与运载火箭的主承力结构,由 于其结构可靠性高、制造成本低、生产周期短,近年 来在商业运载火箭领域不断受到重视<sup>[5]</sup>。李政等<sup>[6]</sup>基 于改进的 Koiter 摄动理论,提出了一种精确预测复合 材料壁板非线性屈曲分析的摄动有限元降阶方法 ,提 高了仿真计算的精度。刘相柱等<sup>[7]</sup>提出了一种关于 FEM 仿真预估结构壁板铣削加工变形的数学模型, 该模型结合铣削加工工艺参数优化,有效控制了大 尺寸整体结构壁板的铣削加工变形。艾森等<sup>[8]</sup>开发 出了一种机翼加筋壁板结构强度校核软件,实现了 机翼壁板结构强度预测与校核的流程化与自动化。 孙勇毅等<sup>[9]</sup>针对 T800 碳纤维/环氧树脂复合材料加筋 壁板,建立了固化变形数学计算模型,在复合材料加 筋壁板成形制造过程中通过优化工艺参数实现了对 加筋壁板尺寸变形的控制。王文理等[10]通过优化高速 铣削加工工艺,实现了对大规格整体结构壁板加工变 形的控制。当前国内外针对整体结构壁板的研究主要 侧重于复合材料真空高压固化成形及整铝厚板高速 铣削加工过程中的变形问题,通过建立数学模型与优 化加工路径工艺,以实现大规格结构壁板的精密成形 制造。

美国 NASA 在 2019 年采用整体挤压工艺制备了 铝合金结构壁板,结合搅拌摩擦焊(FSW)连接成形 工艺,实现了运载火箭结构舱段的模块化设计与制 造,与传统铆接制造工艺相比,结构减重达15%以上, 生产周期缩短了1/3,制造成本降低了20%以上。7A85 铝合金作为第4代高强高韧Al-Zn-Mg-Cu系合金, 具有淬透性高、各向力学性能差异小、断裂韧度高等 优点,可用于制造飞机主承力结构制件。国内研究了 7A85 铝合金时效强化过程中析出相的生长机理与析 出次序、塑性变形过程中的流变应力演变规律及机 理、热压缩变形过程中的微观组织演变规律、热加工 过程中的本构变形行为及组织演变规律[11-15]。目前对 7A85 铝合金结构壁板开展的研究相对较少,采用 7A85 铝合金整体挤压壁板工艺,结合 FSW 纵向、横 向焊接工艺,可实现运载武器结构舱段的模块化设计 与制造。国内徐世伟等<sup>[16]</sup>、李泰岩等<sup>[17]</sup>、李向博等<sup>[18]</sup> 针对 2×××系铝合金和 7×××系铝合金,开展了 FSW 焊接速度、焊接接头结构对焊缝区域组织及性能影响 的研究,为 7A85 铝合金整体挤压壁板 FSW 连接成 形奠定了一定的工艺制备基础。文中以 7A85 铝合金 挤压圆筒为试验对象,结合有限元仿真计算研究了压 弯半径对 7A85 结构壁板退火展平成形尺寸精度的影 响,采用 OM、SEM 完成了 7A85 铝合金材料组织及 性能的测试分析,以期为结构舱段用整体成形壁板研 制提供数据支持与工艺参考,为整体挤压圆筒退火展 平成形精确控制提供理论支持。

## 1 试验

#### 1.1 材料

采用德国西马克 150 MN 正向挤压机完成了 7A85 铝合金"O"形挤压圆筒的制备,在 20T 燃气保温 炉内完成了 7A85 铝合金挤压圆筒的退火保温热处 理,退火保温热处理温度为(350±10)℃、时间为 (10±2)h,退火热处理保温后采用大型液压机对 7A85 退火态挤压圆筒进行展平成形处理。图 1 为 7A85 铝合金挤压圆筒结构示意图,退火展平成形主 要涉及 3 个区域,分别是蒙皮区域(壁厚为6 mm, 弧长为 140 mm),立筋区域(壁厚为9 mm,弧长为 50 mm), FSW 连接成形加厚区域(壁厚为9 mm,弧 长为 55 mm)。

## 1.2 方法

采用 XioObserverA 金相显微镜对退火展平成形 7A85 铝合金结构壁板微观组织进行了分析,结合 WDW-500 型万能力学性能试验机对退火展平后 7A85 铝合金结构壁板的不同区域进行了力学性能 测试,退火展平成形后的 7A85 铝合金结构壁板断口



a 7A85 挤压圆筒实物



c 7A85 挤压圆筒分区示意图

玉圆筒实物 b 7A85 挤压圆筒剖面 c 7A85 挤压
 图 1 7A85 铝合金退火态挤压圆筒结构示意图
 Fig.1 Diagram of annealed extrusion cylinder structure of 7A85 aluminum alloy

扫描分析由 EVOMA10 型扫描电子显微镜完成。为 了提高退火展平成形有限元计算的精度,试验在对 7A85 铝合金挤压圆筒进行退火保温热处理时,分别 沿挤压圆筒纵向(L向)横向(LT向)切取了部分 试样,并实测了该部分材料的相关力学性能,结果 见表1与图2。结合表1与图2,得到了7A85退火 态挤压圆筒展平成形过程中的塑性应力-应变数据, 如表2所示。

表 1 7A85 铝合金挤压圆筒退火态力学性能测试结果 Tab.1 Mechanical properties test results of annealed 7A85 aluminum alloy extrusion cylinder

试样	屈服强度 $\sigma_{ m p0.2}/ m MPa$	抗拉强度 $\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	断面收缩率 Ψ/%	伸长率 $\delta_5$ /%	弹性模量 E/MPa	应变硬化指数 n
L 向	183.17	336.55	17.76	13.49	62 757.90	0.26
LT 向	196.81	352.72	16.16	13.35	60 102.30	0.26
平均值	189.98	344.64	16.96	13.42	61 430.10	0.26
标准差	9.64	11.44	1.31	0.09	1 877.79	0
误差	13.63	16.17	1.60	0.14	2 655.60	0

表 2 7A85 挤压圆筒展平成形过程塑性应力-应变数据

Tab.2 Plastic stress-strain parameters of 7A85 extrusion cylinder during the flattening process									
应力/MPa	塑性应变	应力/MPa	塑性应变	应力/MPa	塑性应变				
186.5	0.000 0	306.5	0.045 0	369.5	0.093 9				
216.0	0.006 5	323.0	0.054 7	378.0	0.103 8				
244.5	0.016 0	336.0	0.064 5	385.5	0.113 7				
267.5	0.025 6	349.0	0.074 3	392.5	0.123 6				
288.5	0.035 3	359.0	0.084 1	393.5	0.127 5				



图 2 7A85 铝合金退火态位移--载荷曲线与工程应力--应变曲线

Fig.2 Displacement-load curve and engineering stress-strain curve of annealed 7A85 aluminum alloy

第14卷 第9期

# 2 结果与分析

# 2.1 压弯半径对蒙皮区域退火展平成形尺 寸的影响

结合图 2 中 7A85 铝合金材料工程应力-应变曲 线与实际生产经验,采用金属型"下凹-上凸"展平模 具对 7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域进行压展,利用 ABAQUS 有限元仿真计算软件完成了不同压弯半径 下 7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域的应力计算。由于 7A85 铝合金结构壁板蒙皮退火展平区域为对称结 构,为减小计算量,蒙皮退火展平区域采用 1/2 模型, 结构壁板蒙皮区域壁厚为 6.0 mm,展平模具模型按 预设区域完全压至结构壁板蒙皮区域即可,采用部分 型面模型,仿真计算结果见图 3。由图 3 仿真计算结 果可知,7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域在退火展平 成形过程中受金属型展平模具作用,沿弧长方向产生 尺寸延伸,整体受拉应力作用,且结构壁板蒙皮区域 中间位置所受拉应力最大,结构壁板蒙皮与加强筋连 接区域所受拉应力最小;随着压弯半径的持续增大, 结构壁板蒙皮区域中间位置所受的峰值拉应力持续 下降,峰值拉应力由157.7 MPa 降至103.6 MPa。图 4 为不同压弯半径下7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域 回弹误差仿真计算结果。由图4可知,随着压弯半径 的持续增加,7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域回弹误 差先减小后增大,见图4a;当金属型"下凹-上凸"展 平模具压弯半径为800 mm时,结构壁板蒙皮区域经 退火展平成形后回弹尺寸与理论型面尺寸误差最小, 最大误差仅为0.19 mm,平均误差仅为0.08 mm,见 图4b。







图 4 不同压弯半径下 7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域回弹误差仿真计算结果

Fig.4 Rebound error simulation results of 7A85 aluminum alloy structural panel skin region under different bending radii

# 2.2 压弯半径对立筋区域退火展平成形尺 寸的影响

7A85 铝合金结构壁板的主承力部位为立筋区域, 立筋区域壁厚为 9.0 mm、宽度为 40 mm。7A85 铝合 金结构壁板在完成蒙皮区域的退火展平成形后,挤压 圆筒已基本由"O"形转变为"曲弧"结构,采用金属型 "下凸-上凹"展平模具对 7A85 铝合金结构壁板立筋区 域进行压展,利用 ABAQUS 有限元仿真计算软件计算 不同压弯半径下立筋区域的应力大小。考虑到 7A85 铝合金结构壁板立筋区域也为对称结构,为减小仿真 计算工作量,立筋区域仿真计算模型采用 1/2 模型, 展平模具模型按立筋区域完全压至平面即可,采用 1/2 型面模型,仿真计算结果见图 5。在挤压过程中,7A85 铝合金结构壁板立筋区域的立筋结构为外置加强筋, 即蒙皮区域退火展平成形后,立筋结构布局形式为外 凸结构;在退火展平成形时,立筋沿轴向方向不受外 力作用,沿径向方向受退火展平模具延展作用,受拉 应力且拉应力峰值出现于筋根及筋根底部 3.0~5.0 mm 区域,且随着压弯半径的持续增大,峰值拉应力连续 下降,由 150.3 MPa 降至 135.2 MPa。图 6 为不同压 弯半径下 7A85 铝合金结构壁板立筋区域回弹误差仿 真计算结果。由图 6 可知,随着压弯半径的连续增大, 7A85 铝合金结构壁板立筋区域回弹误差方, 7A85 铝合金结构壁板立筋区域回弹误差方,



因了一个问应与于任于"A03" ü古亚名将主体加强肋区或应力力带仍具有并结束

Fig.5 Stress distribution simulation results of 7A85 aluminum alloy structural panel stiffener region under different bending radii





# 2.3 压弯间隙与压弯半径对 FSW 加厚区退 火展平成形尺寸的影响

为了减少 7A85 铝合金结构壁板在制造结构舱段 时的铆钉数量,考虑采用搅拌摩擦焊工艺(FSW)替 代现有的铆接工艺,进行 7A85 铝合金结构壁板的纵 向连接成形,以实现结构减重。因此,在 7A85 铝合 金结构壁板幅宽两端增设了 FSW 加厚区,FSW 加厚 区壁厚为 9.0 mm、宽度为 60 mm。为了减少退火展 平成形模具的投入,试验考虑采用结构壁板蒙皮区域 金属型"下凹-上凸"展平模具,通过控制展平间隙来 实现 FSW 加厚区的展平成形,间隙分别设置为 0.0、 1.0、2.0 mm,利用 ABAQUS 有限元软件计算不同压 弯间隙下 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区在展平 过程中的应力大小,计算结果见图 7。由图 7 可知, 在退火展平成形过程中,随着金属型"下凹-上凸"展 平模具的持续下压,FSW 加厚区沿径向方向尺寸不 断延伸,受拉应力作用;随着压弯间隙的增加,FSW 加厚区与展平模具接触的峰值拉应力由端面中心位 置转移至加厚区心部位置,且峰值拉应力持续下降, 由 291.2 MPa 降至 142.1 MPa。图 8 为不同压弯间隙 下 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区回弹误差仿真 计算结果。由图 8a 可知,随着压弯间隙的持续增加, 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区回弹误差先减小后 增大。当金属型"下凹-上凸"展平模具压弯间隙为 2.0 mm 时,结构壁板 FSW 加厚区经退火展平成形后 回弹尺寸与理论型面尺寸误差最小,此时最大误差为 0.29 mm,平均误差为 0.15 mm,见图 8b。考虑到 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区退火展平压弯成形时, 0.0~2.0 mm 的压弯间隙很难通过压机下压量或下压 力进行控制,因此需在蒙皮区域金属型"下凹-上凸" 展平模具上增设压弯限位结构,但这将导致蒙皮区域 金属型"下凹-上凸"展平模具结构设计更加复杂,同 时也会增加模具装配连接精度的控制难度,因此不适 宜采用控制压弯间隙的方式对 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区进行退火展平处理。



Fig.7 Stress distribution simulation results of 7A85 aluminum alloy structural panel FSW region under different bending gaps



Fig.8 Rebound error simulation results of 7A85 aluminum alloy structural panel FSW region under different bending gaps

针对 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区,重新 设计了金属型"下凹-上凸"展平模具,为了减少仿真 计算工作量,FSW 加厚区采用了 1/2 模型,展平模具 模型按 FSW 加厚区完全压至平面进行处理,采用整 体型面模型,不同压弯半径下 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区应力分布仿真计算结果见图 9。由图 9 可知,FSW 加厚区在退火展平过程中,曲弧形状受 金属型"下凹-上凸"展平模具的作用不断平直化,整 体受拉应力作用;峰值拉应力位于 FSW 加厚区与蒙 皮连接区域,且随着压弯半径的增加,峰值拉应力 先增加后下降,由 194.6 MPa 降至 153.2 MPa。图 10 为不同压弯半径下 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区回弹误差仿真计算结果。由图 10a 可知,随着压弯半径的持续增加,7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区回弹误差先减小后增大。当金属型"下凹-上凸"展平模具压弯半径为 800 mm 时,结构壁板 FSW 加厚区经退火展平成形后回弹尺寸与理论型面尺寸误差最小,此时最大误差为 0.16 mm,平均误差为 0.07 mm,见图 10b,明显小于压弯半径为 300 mm 的型面误差。



图 9 不同压弯半径下 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区应力分布仿真计算结果 Fig.9 Stress distribution simulation results of 7A85 aluminum alloy structural panel FSW region under different bending radii



图 10 不同压弯半径下 7A85 铝合金结构壁板 FSW 加厚区回弹误差仿真计算结果 Fig.10 Rebound error simulation results of 7A85 aluminum alloy structural panel FSW region under different bending radii

#### 2.4 组织性能测试分析

在完成 7A85 结构壁板退火展平后,分别沿 7A85

结构壁板蒙皮 L 向、蒙皮 LT 向与加强筋 L 向切取本 体试样进行力学性能测试,结果见图 11。由图 11 可 知,壁板蒙皮 L 向试样的平均抗拉强度、屈服强度与

伸长率分别为 237 MPa、168 MPa、13.4%, 壁板蒙皮 LT 向试样的平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别 为 224 MPa、150 MPa、9.5%,加强筋 L 向试样的平 均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为 229 MPa、 167 MPa、13.2%, 可以看到, 壁板蒙皮 L 向试样的 力学性能优于加强筋 L 向试样的力学性能,壁板蒙皮 LT 向试样的力学性能最差。图 11d 为 7A85 结构壁板 蒙皮 L 向、蒙皮 LT 向与加强筋 L 向试样的工程应力-应变曲线。7A85 铝合金结构壁板退火展平不同区域 微观组织与拉伸断口 SEM 测试结果见图 12。7A85 铝合金结构壁板经退火热处理后 ,铸态组织中沿晶界 分布的非平衡相受热不断熔入初生 α-A1 基体内部,



7A85 铝合金结构壁板退火展平不同区域力学性能测试结果 图 11

Fig.11 Mechanical properties test results of 7A85 aluminum alloy structural panel in different areas after annealing flattening 注:1-5 表示壁板蒙皮 L 向试样;6-9 表示壁板蒙皮 LT 向试样;10-11 表示加强筋 L 向试样。



e 加强筋L向SEM断口扫描

f 壁板蒙皮LT向SEM断口扫描

图 12 7A85 铝合金结构壁板退火展平不同区域微观组织测试分析结果 Fig.12 Microstructure test results of 7A85 aluminum alloy structural panel in different areas after annealing flattening

晶界上低熔点 T 相((Al,Zn)49Mg32相与 Al2Mg3Zn3相) 形貌转变为线棒状,仍沿晶界有序分布,见图 12a、 12b 与 12c 中箭头位置所示。7A85 铝合金经退火处理 后具有良好的延展性,壁板蒙皮与加强筋拉伸试样断 口的断裂机制均为典型的韧窝断裂,见图 12d、12e 与 12f 中矩形线框位置所示, 韧窝平均长度约为 12 µm, 平均宽度约为 4 µm。

根据图 3—10 中 7A85 铝合金结构壁板蒙皮区 域、立筋区域与 FSW 加厚区退火展平仿真计算结果, 设计制造了不同区域的退火展平模具,并对 7A85 铝 合金结构壁板进行了退火展平处理 ,退火展平过程见 图 13。采用退火展平模具完成了 7A85 铝合金挤压圆 筒的退火展平过程,最终制得了幅长为8000 mm、 幅宽为1280 mm的7A85铝合金结构壁板,见图13f。



d 壁板蒙皮压弯成形

e 壁板蒙皮平直压弯 图 13 7A85 铝合金结构壁板退火展平过程

Fig.13 Annealing flattening process of 7A85 aluminum alloy structural panel

#### 3 结论

1)7A85 铝合金结构壁板蒙皮区域在"下凹-上 凸"模压退火展平时受拉应力作用且拉应力沿中心向 边缘持续下降,随着压弯半径的增加,应力峰值持续 下降且结构回弹尺寸误差先下降后上升 ;立筋区域在 "下凸-上凹"模压退火展平时沿轴向不受力,沿径向 受拉应力且峰值应力位于筋根临近区域,随着压弯半 径的增大持续下降,结构回弹尺寸误差随着压弯半径 的增大先下降后上升。

2)采用"下凹-上凸"模具结构退火展平时,FSW 加厚区受拉应力作用,且随着压弯间隙的增加,FSW 加厚区与展平模具接触区域的峰值拉应力由端面中 心位置转移至加厚区心部位置,且峰值拉应力持续下 降;随着压弯半径的增加,FSW 加厚区与蒙皮接触 区域的峰值拉应力呈现出先上升后下降的变化趋势, 且结构回弹尺寸误差明显增大。

3) 壁板蒙皮 L 向试样的平均抗拉强度、屈服强 度与伸长率分别为 237 MPa、168 MPa、13.4%, 优于 加强筋 L 向的,两者均高于壁板蒙皮 LT 向试样的力 学性能,从退火展平后结构壁板不同区域的微观组织 中均可观察到线棒状低熔点 T相((Al, Zn)49Mg32相、 Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>相)沿晶界呈链状分布,拉伸断口为典型 的韧窝断裂, 韧窝平均长度为 12 μm, 平均宽度约

4 µm,结合金属型退火展平模具成功制备出了幅长为 8 000 mm、幅宽为 1 280 mm 的 7A85 铝合金结构壁板。

#### 参考文献:

- [1] 邢国华, 王晓盼, 李翔宇, 等. 铝合金材料在建筑结 构中的应用研究进展[J]. 结构工程师, 2021, 37(5): 214-221. XING Guo-hua, WANG Xiao-pan, LI Xiang-yu, et al. Research Progress in the Application of Aluminum Alloy Materials in Building Structures[J]. Structural Engineer, 2021, 37(5): 214-221. [2] 刘占先. 铝合金材料在船舶与海洋工程装备中的应用
- [J]. 船舶物资与市场, 2021, 29(6): 47-48. LIU Zhan-xian. Application of Aluminum Alloy Material in Ship and Ocean Engineering Equipment[J]. Ship Supplies and Markets, 2021, 29(6): 47-48.
- [3] 张丽娇. 航空航天高强铝合金材料应用及发展趋势研 究[J]. 新材料产业, 2021(3): 7-11. ZHANG Li-jiao. Application and Development Trend of Aerospace High Strength Aluminum Alloy Materials[J]. New Material Industry, 2021(3): 7-11.
- [4] 常树民, 申永勇, 石得春. 城市轨道交通车辆轻量化 设计研究[J]. 装备机械, 2020(1): 21-26. CHANG Shu-min, SHEN Yong-yong, SHI De-chun. Research on Lightweight Design of Urban Rail Transit

Vehicles[J]. Equipped with Mechanical, 2020(1): 21-26.

- [5] 王端志,胡勇,孙海霞,等. 高强韧铝合金结构壁板研究进展[J].强度与环境,2020,47(5):28-36.
   WANG Duan-zhi, HU Yong, SUN Hai-xia, et al. Research Progress of High Strength and Toughness Aluminum Alloy Structural Panels[J]. Strength and Environment, 2020, 47(5):28-36.
- [6] 李政,梁珂. 压剪联合载荷作用下复合材料壁板屈曲 及后屈曲性能计算与优化方法研究[J]. 宇航总体技术, 2021,5(6): 20-26.
   LI Zheng, LIANG Ke. Study on Calculation and Optimization of Buckling and Post-Buckling Performance of

mization of Buckling and Post-Buckling Performance of Composite Panels under Compression-Shear Combined Load[J]. Space Technology, 2021, 5(6): 20-26.

- [7] 刘相柱,陈沛,刘晓,等. 航天器 X 型整体壁板加工变 形控制技术研究[J]. 机械科学与技术, 2021(10): 14-22.
   LIU Xiang-zhu, CHEN Pei, LIU Xiao, et al. Research on Machining Deformation Control Technology of X-Type Integral Panel of Spacecraft[J]. Mechanical Science and Technology, 2021(10): 14-22.
- [8] 艾森, 王晓辉, 许向彦, 等. 飞机金属加筋板结构强 度校核软件设计与实现[J]. 机械科学与技术, 2022(2): 322-328.
   AI Sen, WANG Xiao-hui, XU Xiang-yan, et al. Design

and Implementation of Aircraft Metal Stiffeners Structural Strength Checking Software[J]. Mechanical Science and Technology, 2022(2): 322-328.

[9] 孙勇毅, 许英杰, 唐闻远, 等. 共固化成型复合材料 加筋板的固化变形仿真技术研究[J]. 航空制造技术, 2022(4): 107-120.

SUN Yong-yi, XU Ying-jie, TANG Wen-yuan, et al. Study on Simulation Technology of Curing Deformation of Co-Curing Formed Composite Stiffened Plate[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022(4): 107-120.

[10] 王文理,邵坤,罗锐,等.飞机大型铝合金整体壁板 高速铣削加工工艺[J]. 航空制造技术,2021,261(23): 12-18.
WANG Wen-li, SHAO Kun, LUO Rui, et al. High Speed Milling Process of Aircraft Large Aluminum Alloy Integral Dana[U]. A gramutical Manufacturing Technology

tegral Panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 261(23): 12-18.

- [11] CHEN Zhong-wei, YAN Kang, REN Cong-cong, et al. Precipitation Sequence and Hardening Effect in 7A85 Aluminum Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021(875): 1-10.
- [12] ZHAO Qi-yue, GUO Chuang, NIU Ke-ke, et al. Long-Term Corrosion Behavior of the 7A85 Aluminum Alloy in an Industrial-Marine Atmospheric Environ-

ment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021(12): 1350-1359.

- [13] 胡建良, 焦子腾, 金森, 等. 7A85 铝合金塑性变形过 程位错密度模型[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(6): 1263-1269.
  HU Jian-liang, JIAO Zi-teng, JIN Miao, et al. Dislocation Density Model of 7A85 Aluminum Alloy during Plastic Deformation[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6): 1263-1269.
- [14] 焦子腾, 胡建良, 金森, 等. 7A85 铝合金热变形过程 中微观组织演变规律研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(3): 137-145.
  JIAO Zi-teng, HU Jian-liang, JIN Miao, et al. Study on Microstructure Evolution of 7A85 Aluminum Alloy during Hot Deformation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(3): 137-145.
- [15] 高岩,丛大鹏,于春鹏,等. 7A85 航空铝合金热加工 过程的本构变形行为及组织演变[J].塑性工程学报, 2019, 26(5): 225-231.
  GAO Yan, CONG Da-peng, YU Chun-peng, et al. Constitutive Deformation Behavior and Microstructure Evolution of 7A85 Aviation Aluminum Alloy during Hot Working[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(5): 225-231.
- [16] 徐世伟,李茂林,张体明,等. 2219 铝合金搅拌摩擦 接头组织和性能的不均匀性研究[J].精密成形工程, 2021, 13(6): 145-150.
  XU Shi-wei, LI Mao-lin, ZHANG Ti-ming, et al. Study on Non-Uniformity of Microstructure and Properties of Friction Stir Joint of 2219 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(6): 145-150.
- [17] 李泰岩,陈芙蓉,张志函. 焊接速度对 7A52 铝合金 FSW 组织及力学性能的影响[J]. 精密成形工程,2015, 7(5): 72-76.
  LI Tai-yan, CHEN Fu-rong, ZHANG Zhi-han. Effect of Welding Speed on Microstructure and Mechanical Properties of 7A52 Aluminum Alloy in FSW Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 72-76.
- [18] 李向博, 徐杰, 薛克敏, 等. 搅拌摩擦加工对 7A60 铝
   合金组织性能的影响[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 77-80.

LI Xiang-bo, XU Jie, XUE Ke-min, et al. Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Properties of 7A60 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 77-80.

责任编辑:蒋红晨