镁合金尾翼类构件径向同步加载工艺研究

张治民^{a,b}, 贾晶晶^{b,c}, 董蓓蓓^{a,b*}, 薛勇^{a,b}

(中北大学 a.材料科学与工程学院 b.国防科技工业复杂构件挤压成形技术创新中心 c.机电工程学院,太原 030051)

摘要:目的 针对常规挤压工艺成形尾翼类构件飞行时翼片径向产生挠曲变形的问题,提出了一种可调控金属流动的径向同步加载成形方法。方法 结合 ANSYS、Deform-3D 有限元模拟和物理实验,分析径向同步加载的金属流动行为、等效应变和金属流线分布,通过拉伸实验测试成形翼片挤压方向(Extrusion Direction, ED)和横截面方向(Transverse Direction, TD)的力学性能,并通过观察显微组织揭示径向强化机理。结果 径向同步加载通过对坯料施加周向压应力促进了金属径向流动,形成了沿径向分布良好的金属流线,有利于提升径向力学性能;采用该工艺试制构件表面质量良好,无宏观缺陷,且形成沿径向分布的宏观流线; 翼片径向力学性能显著提升,屈服强度提升了 57.8 MPa,抗拉强度提升了 80.1 MPa,延伸率提升了 1.4%, 其强塑性的提升与纤维组织和块状 LPSO 相的纤维强化密切相关。结论 实现了尾翼类构件的径向同步加载 整体成形,通过调控金属流动形成径向分布良好的金属流线,提升了成形翼片径向强度,为高性能镁合金 尾翼类构件的整体成形提供了理论基础和技术支撑。

关键词:尾翼类构件;径向同步加载;整体成形;金属流线;VW124A 镁合金 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.07.005 中图分类号: T146.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-6457(2024)07-0057-09

Radial Synchronous Loading Forming of Magnesium Alloy Empennage-shape Components

ZHANG Zhimin^{a,b}, JIA Jingjing^{b,c}, DONG Beibei^{a,b*}, XUE Yong^{a,b}

(a. School of Materials Science and Engineering, b. Innovation Center of Science and Technology Industry of National Defense for Complex Component Extrusion Forming Technology, c. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem that the wing in the empennage-shape components formed by the conventional extrusion process is prone to radial flexural deformation, the work aims to propose a radial synchronous loading (RSL) forming method with adjustable metal flow. Through the combination of ANSYS, Deform-3D finite element simulation (FEM) and physical experiment, the metal flow behavior, equivalent strain and metal streamline distribution of RSL were analyzed. The mechanical properties of the wing in extrusion direction (ED) and transverse direction (TD) were tested by tensile test, and the

Received: 2024-05-29

收稿日期: 2024-05-29

基金项目:中国科协青年人才托举工程(2022QNRC001);山西省青年科学研究项目(202203021212145)

Fund: Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2022QNRC001); Shanxi Province Science Foundation for Youth (202203021212145)

引文格式: 张治民, 贾晶晶, 董蓓蓓, 等. 镁合金尾翼类构件径向同步加载工艺研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(7): 57-65. ZHANG Zhimin, JIA Jingjing, DONG Beibei, et al. Radial Synchronous Loading Forming of Magnesium Alloy Empennage-shape Components[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(7): 57-65.

^{*}通信作者 (Corresponding author)

radial strengthening mechanism was revealed by microstructure observation. The RSL promoted the radial flow of metal by applying circumferential compressive stress to the billet, forming a well-distributed metal streamline along the radial direction, which was conducive to improving the radial mechanical properties. The surface quality of the formed component was good, without macroscopic defect, and a macroscopic streamline distributed along the radial direction was formed. The radial mechanical properties of the wing were significantly improved, the yield strength (YS) increased by 57.8 MPa, the ultimate tensile strength (UTS) increased by 80.1 MPa, and the elongation (EL) increased by 1.4%. The improvement of the strength and plasticity was closely related to the fiber microstructure and the fiber strengthening of the block-shaped LPSO phase. The proposed process realizes the RSL integral forming of empennage-shape components. By regulating the metal flow, a metal streamline with good radial distribution is formed, and the radial strength of the formed wing is improved, which provides theoretical basis and technical support for the integral forming of high-performance magnesium alloy empennage-shape components.

KEY WORDS: empennage-shape component; radial synchronous loading; integral forming; metal streamline; VW124A magnesium alloy

当前,我国正处于高质量发展的战略转型期,对 关键构件的高性能整体成形提出了新要求^[1-5]。材料 的高性能化、构件的整体化与轻量化、生产的高效 化与低成本化等重大需求,对材料制造过程精确控 制的要求更加严格^[6-8]。基于材料成分、组织、工艺 和性能的综合调控,实现复杂关键构件的几何结构、 材料和性能一体化控制成形是实现高性能制造的重 要途径。

高强韧稀土镁合金 VW124A 由于具有低密度、 高比强度、高比刚度以及优异的室温和高温力学性能 等特点,具有巨大的应用前景^[9-12],是成形该类复杂 关键构件的首选材料,采用该合金替代传统的钢和铝 合金可有效提高"结构重量比",显著提升装备的机动 反应能力, 增加有效载重。尾翼类构件作为某装备的 主要稳定系统,对弹体飞行稳定性、射程和打击精度 至关重要。该类构件形状复杂,为带翼片的空心筒体, 且关键部位对承载性能要求高,整体成形困难,对 材料及成形工艺都提出了极高要求。常规分体成形 后再将圆筒和翼片焊合或使用卡槽安装的方法,操 作复杂,连接处难以满足构件对力学性能和承载能 力的需求^[13]; 传统的机械切削加工存在加工周期长、 材料利用率低和金属流线被切断等问题[14];而型材挤 压工艺存在翼片金属流动不均匀、金属流线分布紊乱 且流线分布方向与受拉方向不一致等问题[15-16],难以 发挥材料的承载潜力。

针对上述问题,本文以镁合金尾翼类构件的整体 成形为研究目标,根据尾翼类构件的几何特征及性能 需求,创新性地提出了一种镁合金尾翼类构件径向同 步加载(Radial Synchronous Loading, RSL)成形方法,并通过模具结构设计将立式压力机的轴向运动转换为分瓣模的径向向心运动,实现了立式压力机的径向同步加载。该工艺的提出突破了镁合金尾翼类构件整体成形的难题,克服了常规挤压成形金属流动和等效应变分布不均匀的问题,为高性能镁合金尾翼类构件的整体成形提供了理论基础和技术支撑。

1 有限元模拟与实验

1.1 有限元模拟参数

尾翼变形分析是在 ANSYS 有限元模拟软件上进 行的, VW124A 材料密度为 1.85 g/cm3, 泊松比为 0.35, 云图中所施加的气动载荷是根据 Fluent 流体仿 真软件模拟尾翼飞行过程中所受的流场压力值而确 定的,其中,环境压强设为101 325 Pa,马赫数 Ma 设为 1.5, 温度设为 300 K, 并将获得的流场压力通 过远场力的形式施加在尾翼上。采用 Deform-3D 有限 元软件对径向同步加载成形过程进行数值模拟,凸 模、凹模和垫板选用 H13 热作模具钢,并设置为刚 性体, 坯料选用 VW124A 镁合金, 设置为塑性体, 该合金的 KEY 文件由课题组自主创建^[17]。坯料网格 划分采用四面体单元,设置体积补偿,网格数为 100 000。挤压温度为 450 ℃, 坯料与模具之间的摩 擦方式为剪切摩擦,摩擦因数为 0.3。选用 Spare 求 解器和 Newton-Paphson 迭代法进行求解计算。模拟 参数设置如表1所示。

表 1 径向同步加载有限元模拟参数

| Tab.1 Finite element simulation parameters of RSL process | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------|---|--|-----------------|--|--|--|
| Method | Extrusion tempera- ture/°C | Extrusion speed/($mm \cdot s^{-1}$) | Friction coefficient | Heat transfer coefficient between billet and $mold/(N \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot C^{-1})$ | Heat transfer coefficient between mold and $air/(N \cdot s^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot C^{-1})$ | Number of grids | | | |
| RSL | 450 | 1 | 0.3 | 11 | 0.02 | 100 000 | | | |

Bal.

1.2 成形实验

12.26 4.12 2.18

成形实验所用参数和模具结构与有限元模拟中的一致,挤压温度为 450 ℃,挤压速度为 1 mm/s, 成形实验在中北大学精密成形中心的 4-THP61-630 压力机上进行,毛坯为空心圆棒,实验材料为镦挤变 形态 VW124A 合金,其化学成分如表 2 所示。

表 2 VW124A 合金化学成分 Tab.2 Chemical composition of the VW124A alloy wt.% Gd Y Zn Zr Cu Ni Fe Mg

 $\leq 0.002 \leq 0.002 \leq 0.001$

0.37

所需观察的金相试样经机械抛光后用腐蚀液 (1g苦味酸+2mL冰乙酸+2mL去离子水+14mL酒精的混合液)腐蚀10s,然后立即用清水冲洗并吹干, 在金相显微镜(Metallographic Microscope, ZEISS Axio Imager A2m, Germany)下观察。采用日立 SU5000 扫描电子显微镜(SEM, Scanning Electron Microscope, Japen)进行SEM观察,扫描电镜的工作 电压为20kV,光斑强度为50,工作距离为10mm。 拉伸测试在万能试验机(Universal Testing Machine, Instron3382, American)上进行,拉伸速度为 0.01 mm/s。

2 构件工艺分析及成形方案

2.1 尾翼类构件几何特征

尾翼类构件为带翼片的空心筒体,翼片部位厚度 很薄, 仅为 2 mm, 翼片部位的厚径比大, 整体成形 时金属填充困难, 其形状及基本尺寸如图 1 所示。

2.2 翼片变形行为

气动载荷作用下不同步数对应的尾翼变形云图 如图 2a~c 所示,图 2a~c 中椭圆虚线框的放大图如图

2d~f 所示。有限元模拟中材料密度设为 1.85 g/cm³, 泊松比为 0.35。在尾翼变形云图中施加的气动载荷是 根据 Fluent 流体仿真软件模拟尾翼飞行过程中所受 的流场压力值确定的,并通过远场力的形式施加在尾 翼上。可以看出,飞行时翼片沿径向发生变形,翼梢 变形程度最大达 1.03 mm。若翼片产生挠曲变形并发 生塑性变形将影响构件的正常工作,因此,在成形工 艺设计方面应着重提升翼片以及翼根处的屈服强度, 减小翼片变形程度。

翼片变形量随径向(ED)和轴向(TD)方向屈 服强度的分布图及相应的拟合曲线如图 3 所示,其 中,图 3a 是 TD 方向屈服强度为 400 MPa 时,翼片 变形量随 ED 方向屈服强度变化的分布图,图 3b 是 ED 方向屈服强度为 400 MPa 时,翼片变形量随 TD 方向屈服强度变化的分布图,图 3c 是变形量随翼片 ED 和 TD 方向屈服强度同时变化时的分布图。可以 看出,翼片 ED 方向屈服强度的提升可显著降低翼片 的变形,而 TD 方向屈服强度的提高对翼片变形的影 响并不显著,当 TD 方向屈服强度由 340 MPa 提高到 460 MPa 时,变形量仅减小了 2.14%。若要减小翼片 的变形,则应提升径向屈服强度或同时提高 ED 和 TD 方向的屈服强度。

2.3 成形方案

径向同步加载工艺的几何模型如图 4 所示。该工 艺通过 4 个分瓣式组合凹模间隔围成供坯料置入的 模具型腔,相邻分瓣模之间的间隙形成翼片型腔,通 过在凸模底部开设与分瓣模外侧壁斜面配合的内侧 壁斜面型腔,使立式锻压机下行时,凸模型腔的内侧 壁斜面与分瓣模的外侧壁斜面接触并做相对斜楔运 动,即在下压型腔 4 个分瓣模的同时向内径移动挤压 坯料,将坯料挤压进翼片型腔中。在挤压过程中,T 形键的底部在T形导轨上滑动,实现分瓣模的径向运 动。该工艺通过模具结构设计将立式锻压机的轴向运 动转变为分瓣模的径向运动,实现径向同步加载。待



图 1 尾翼类构件基本尺寸 Fig.1 Dimensions of the empennage-shape component





Fig.2 Deformation cloud maps corresponding to different steps during the flight of the empennage-shape component



图 3 翼片的轴向和径向屈服强度对变形量的影响分布图 Fig.3 Distribution of the effect of the axial and radial yield strength on the deformation of the wing





Fig.4 Radial synchronous loading (RSL) forming process: a) schematic diagram of finite element model; b) assembly diagram of RSL mold and the shape change of the billet before and after forming; c) RSL method of split mold

挤压完成后,将凸模抬起,分瓣模失去下压型腔的束 缚后自动散开,即可取出尾翼构件,实现脱模。

凸模下压型腔内侧壁斜面与分瓣模外斜面接触 并产生相对运动的示意图如图 5 所示,分瓣模径向挤 压行程可通过初始坯料尺寸和最终成形构件尺寸之 间的差值确定,关系式如式(1)所示。

$$y = \frac{x}{\tan \theta} \tag{1}$$

式中: *y* 为凸模的下行距离; *x* 为分瓣模径向挤 压行程; θ 为凸模内斜面倾角。



图 5 凸模内型腔斜面与分瓣模外侧壁接触 并做相对运动的示意图

Fig.5 Schematic diagram of the contact and relative motion between the inner slope of the convex mold and the outer side wall of the split mold

3 结果与分析

3.1 有限元模拟结果

径向同步加载金属充填过程示意图如图 6 所示。 可以看出, 翼片部位金属是"由内向外"逐步充填的, 其成形过程主要是"翼片生长"过程。初始坯料为空 心圆棒, 凸模随滑块下行, 当凸模的内型腔斜面与分 瓣模外侧壁斜面接触时, 4个分瓣模开始同时做径向 向心运动, 挤压坯料, 促使金属沿分瓣模之间的间隙 径向流动。分瓣模施加在坯料上、下部分的周向压应 力相同, 有利于翼片部位金属的均匀充填, 使成形翼 片平直度好, 成形均匀性好。随着挤压过程的进行, 分瓣模不断向径向移动, 挤压金属使之向分瓣模之间 的间隙流动, 此时, 分瓣模之间的间隙(即翼片厚度) 也不断减小, 翼片部分同时受分瓣模内弧面的挤压作 用和相邻分瓣模之间间隙平面的压缩作用, 翼片部位 同时进行"变薄"和"伸长"过程, 直至挤压完成。

径向同步加载过程的金属流速矢量分布图、等效 应变分布图和金属流线分布图如图 7 所示。从图 7a 可以看出,在径向同步加载过程中,翼片部位金属沿 径向均匀流动,翼片上、下部分金属流速一致,变形 均匀性好,且随着挤压过程的进行,翼片部位金属流 速逐渐增大,翼片充填饱满。而且翼片部位等效应变 分布均匀,自上而下翼片等效应变分布近乎一致,仅 在远离挤压变形区域(翼梢处)等效应变值较高且自上 而下分布均匀一致,这有利于细化翼根的微观组织, 增强翼根处的承载能力和抗弯能力。

径向同步加载过程中 x-z 平面的金属流线分布图 如图 7b 所示,金属流线的网格畸变程度越大,表示 变形程度越高。从图 7b 可以看出,在径向同步加载 过程中,翼片部位的网格畸变程度均匀一致,且形成 沿翼片径向均匀分布的金属流线,有利于提升翼片径 向的承载能力。

3.2 成形试制

为了验证有限元模拟结果的可靠性和径向同步加 载工艺的可行性,采用 VW124A 镁合金进行成形试制, 其成形模具结构、毛坯形状及成品实物如图 8 所示。可



图 6 径向同步加载成形充填过程示意图 Fig.6 Schematic diagram of RSL filling process



图 7 金属流速矢量分布图及等效应变分布图(a)及金属流线分布图(b) Fig.7 Velocity field distribution and equivalent strain distribution maps (a) and metal streamline distribution maps (b)



图 8 模具结构(a)、分瓣模结构(b)、初始坯料(c)以及成品实物(d,e) Fig.8 Mold structure (a), split mold structure (b), initial billet (c) and finished product (d and e)

见,成形翼片充填饱满,无宏观缺陷,成品轮廓尺寸、 成形质量、外观形貌满足使用要求,且形成沿径向有 序分布的宏观金属流线,如图 8e 所示。

3.3 拉伸性能及显微组织

拉伸试样及微观组织取样位置如图 9a 所示,机械切削加工与径向同步加载成形构件的拉伸性能柱形图如图 9b 所示。沿翼片 F1、F2 和 F3 高度处取拉伸试样和金相观察试样,探究翼片拉伸性能各向异性及不同区域的拉伸性能均匀性,图 9b 中数据为 F2 区域的拉伸性能平均值。

采用不同成形方式后的翼片拉伸性能比较如表3

所示。可以看出,机械切削加工成形构件翼片 TD 方向 YS、UTS 和 EL 分别为 239.4 MPa、282.2 MPa 和 3.7%, ED 方向 YS、UTS 和 EL 分别为 232.7 MPa、259.2 MPa 和 3.1%。采用相同状态坯料径向同步加载成形后,翼片 TD 和 ED 方向的拉伸性能均显著提高,TD 方向 YS 和 UTS 分别提高了 15.3 MPa 和 40.5 MPa,ED 方向 YS 和 UTS 分别提高了 57.8 MPa 和 80.1 MPa,ED 方向的强度显著提升,YS 和 UTS 分别提高了 50.9%和 62.1%。采用该种工艺可有效提升成形翼片的径向强度且保持适当的延伸率,有利于提升尾翼类构件的承载能力和抗弯能力。而且,成形构件不同区域 TD 和 ED 方向的拉伸性能均匀一致,展



图 9 拉伸试样及组织观察取样位置(a)以及机械切削加工和径向同步加载成形构件翼片 TD 和 ED 方向的拉伸性能柱形图(b)

Fig.9 Tensile specimens and microstructure observation and sampling location map (a) and tensile properties of the wing parts formed by machining and RSL processes in TD and ED directions

现出优异的力学性能均匀性。TD 方向 F1、F2、F3 区域的 YS、UTS 和 EL 分别为:YS(255.1 MPa→254.7 MPa→254.3 MPa), UTS (320.9 MPa→322.7 MPa→321.8 MPa)及 EL(4.0%→4.1%→4.1%)。
ED 方向 F1、F2、F3 区域的 YS、UTS 和 EL 分别为:YS (289.0 MPa→290.5 MPa→290.3 MPa), UTS

(338.2 MPa→339.3 MPa→339.1 MPa) 及 EL (4.6%→ 4.5%→4.5%)。

为了探究翼片径向力学性能提升的原因,对切削 加工翼片及径向同步加载成形翼片不同区域的显微 组织进行观察,成形翼片 F1、F2 和 F3 区域的 OM 和 SEM 图及切削加工翼片的 SEM 图如图 10 所示。SEM



图 10 成形构件 F1、F2 和 F3 区域的 OM 和 SEM 图及切削加工翼片(M)的 SEM 图 Fig.10 OM and SEM images at F1, F2 and F3 positions of formed components and SEM images of the machined wing (M)

| 表 3 | 翼片拉伸性能 |
|---------------------|------------------------------|
| Tab.3 Tensile prope | rties of the empennage-shape |

| components | | | | | | | | | |
|------------|-----------|--------|---------|------|--|--|--|--|--|
| Method | Direction | YS/MPa | UTS/MPa | EL/% | | | | | |
| Cutting | TD | 239.4 | 282.2 | 3.7 | | | | | |
| processing | ED | 232.7 | 259.2 | 3.1 | | | | | |
| | TD1 | 255.1 | 320.9 | 4.0 | | | | | |
| | ED1 | 289.0 | 338.2 | 4.6 | | | | | |
| DCI | TD2 | 254.7 | 322.7 | 4.1 | | | | | |
| KSL | ED2 | 290.5 | 339.3 | 4.5 | | | | | |
| | TD3 | 254.3 | 321.8 | 4.1 | | | | | |
| | ED3 | 290.3 | 339.1 | 4.5 | | | | | |
| | | | | | | | | | |

图中不规则块状相(箭头标记)为长周期有序堆垛相 (Long Period Stacking Ordered, LPSO),先前的研 究证实其为14H-LPSO相^[18-20]。从SEM 图可以看出, 不同区域显微组织中块状 14H-LPSO 相均沿径向呈 纤维状分布,具有纤维组织特征。从OM 图可以看出, 径向同步加载成形后显微组织中块状 14H-LPSO 相破 碎,沿径向呈碎片状分布,显微组织显著细化,存在大 量动态再结晶晶粒。上述分析表明,径向同步加载成形 有利于显微组织细化,形成沿径向分布的纤维组织。大 量动态再结晶晶粒和纤维状分布的块状 14H-LPSO 相 是翼片径向屈服强度提升的主要原因^[21-25]。

4 结论

针对镁合金尾翼类构件提出了一种可调控金属 流动的径向同步加载成形方法,分析了径向同步加载 成形的金属流动行为、等效应变和金属流线分布,测 试了成形翼片的力学性能,并通过显微组织观察揭示 了径向强化机理。主要的研究结论如下:

1) 基于 ANSYS 有限元模拟开展尾翼类构件变 形行为分析,研究结果表明,提高翼片径向屈服强度 或同时提高径向和轴向屈服强度可显著减小尾翼飞 行中翼片的变形。基于构件的几何特征及性能需求, 创新性地提出了一种镁合金尾翼类构件径向同步加 载成形方法,并通过模具结构实现了立式压力机的径 向同步加载成形。

2)采用该工艺成形构件,翼片充填饱满,无宏观缺陷,成品轮廓尺寸、成形质量、外观形貌满足使用要求,且形成沿径向有序分布的宏观金属流线,为镁合金尾翼类构件的整体成形提供理论基础和技术支撑。

3) 径向同步加载工艺有效提升了翼片径向力学性能,与切削加工相比,其 YS 和 UTS 分别提高了 57.8 MPa 和 80.1 MPa,提高了 50.9%和 62.1%,有 利于提升尾翼类构件的承载能力和抗弯能力,其强 度的提升与纤维组织和块状 LPSO 相的纤维强化密 切相关。

参考文献:

- ZHANG Z M, YU J M, XUE Y, et al. Recent Research and Development on Forming for Large Magnesium Alloy Components with High Mechanical Properties[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11(11): 4054-4081.
- [2] 周杰,刘左发,屈志远,等.大型航空关键构件整体 精密模锻成形技术研究进展[J].航空制造技术,2023, 63(5):14-25.
 ZHOU J, LIU Z F, QU Z Y, et al. Research Progress of Integral Precision Die Forging Technology for Large

Aviation Key Components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 63(5): 14-25.

- [3] 雷煜东, 詹梅, 樊晓光, 等. 带筋薄壁构件成形制造 技术的发展与展望[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 1-17.
 LEI Y D, ZHAN M, FAN X G, et al. A Review on Manufacturing Technologies of Thin-Walled Components with Ribs[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 1-17.
- [4] ZHANG Z M, CHEN Z, XUE Y, et al. Investigation on Low Hydrostatic Stress Extrusion Technology for Forming of Large Thin-Walled Components with High Ribs[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2024, 198: 104149.
- [5] YANG Y B, CHEN J, GAO L X, et al. Low-Cycle Fatigue Behaviour of Extruded 7075 Aluminium Alloy Bar: Competition of Grain Sizes and Textures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 897: 146258.
- [6] 张治民,李国俊,王强,等. 多向加载旋转挤压成形 技术及装备[J]. 机械工程学报, 2023, 59(12): 264-271. ZHANG Z M, LI G J, WANG Q, et al. Multi-Directional Loading Rotary Extrusion Forming Technology and Equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(12): 264-271.
- [7] 王强,于建民,薛勇,等.面向剧烈塑性变形的几种 挤压成形技术[J]. 锻压技术, 2022, 47(10): 12-16.
 WANG Q, YU J M, XUE Y, et al. Several Extrusion Technologies for Severe Plastic Deformation[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(10): 12-16.
- [8] 刘勇达,徐杰,单德彬,等. 铝合金微型热管分流挤 压模具变形分析与优化研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 265-274.
 LIU Y D, XU J, SHAN D B, et al. Tool Deflection Analysis and Optimization of Porthole Die for Micro Heat Pipe in Aluminum Alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22): 265-274.
- [9] 潘复生,蒋斌. 镁合金塑性加工技术发展及应用[J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1362-1379.
 PAN F S, JIANG B. Development and Application of Plastic Processing Technologies of Magnesium Alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1362-1379.
- [10] 曾朝伟, 袁婷, 彭威, 等. 塑性成形方法对镁合金耐 蚀性的影响及展望[J]. 精密成形工程, 2023, 15(7):

65

ZENG C W, YUAN T, PENG W, et al. Effect of Plastic Forming Method on Corrosion Resistance of Magnesium Alloy and Its Prospects[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(7): 104-119.

- [11] WAN Y C, TANG B, GAO Y H, et al. Bulk Nanocrystalline High-Strength Magnesium Alloys Prepared via Rotary Swaging[J]. Acta Materialia, 2020, 200: 274-286.
- [12] CHE X, WANG Q, DONG B B, et al. The Evolution of Microstructure and Texture of AZ80 Mg Alloy Cup-Shaped Pieces Processed by Rotating Backward Extrusion[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(5): 1677-1691.
- [13] 崔亚, 汪炜, 赵熹, 等. 超高强铝合金尾翼架形性一体 化控制成形[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(1): 79-87. CUI Y, WANG W, ZHAO X, et al. Integrated Control Forming of New High-Strength Aluminum Alloy Rear Wing Frame[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(1): 79-87.
- [14] 霍文娟,张宝红,祁威,等.钢质尾翼架热冷复合成 形工艺研究[J]. 兵器材料科学与工程,2018,41(5): 49-52.

HUO W J, ZHANG B H, QI W, et al. Compound Forming Process of Hot Extrusion and Cold Sizing for Steel Mounting of Fin[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(5): 49-52.

- [15] 陆宗敏, 姜全振, 杨楚霏. 超硬铝合金尾翼冷挤压成 形工艺及计算[J]. 科学技术创新, 2023(11): 204-207. LU Z M, JIANG Q Z, YANG C F. Cold Extrusion Forming Process and Calculation of Super Duralumin Tail[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(11): 204-207.
- [16] 郭耀华,张宝红,张治民.超薄尾翼径向挤压和多步挤压成形的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(1): 108-110.
 GUO Y H, ZHANG B H, ZHANG Z M. Numerical Simulation of Lateral Extrusion and Multi-Step Extrusion for Ultra Slim Empennage[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(1): 108-110.
- [17] 贾晶晶,张治民,于建民,等.基于响应面法的轻质 尾翼均匀挤压成形数值模拟及模具结构优化[J]. 兵工 学报. [2023-06-03].https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11. 2176.TJ.20230602.1153.002.html.
 JIA J J, ZHANG Z M, YU J M, et al. Numerical Simulation of Uniform Extrusion Forming and Die Structure Optimization of Lightweight Empennage-shape Component Based on Response Surface Method[J]. Acta

Armamentarii. [2023-06-03].https://kns. cnki.net/kcms2/detail/11.2176.TJ.20230602.1153.002.ht ml.

- [18] JIA J J, ZHANG H L, MENG M, et al. Strain-Induced Heterogeneous Bimodal Microstructure Behavior of Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy Containing LPSO Phase during Hot Compression[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 4264-4277.
- [19] LIU Y F, LU D L, WU G Q, et al. Deformation Mechanism and Hardening Behavior of Gradient Heterostructured Magnesium Alloys Prepared by Severe Shear Deformation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 985: 174099.
- [20] 李璐瑶,任璐英,闫钊鸣,等.变形态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金热处理微观组织演变规律与硬度研究[J]. 兵器装 备工程学报,2023,44(10): 72-77.
 LI L Y, REN L Y, YAN Z M, et al. Effects of Heat Treatment Processing on Microstructure Evolution and Microhardness of Deformed Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloys[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(10): 72-77.
 [21] 徐健 郑本 刘芸尔 等 不同预时效将压态
- [21] 徐健,郑杰,刘莞尔,等.不同预时效挤压态 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的再结晶行为和强化机制[J].中 国有色金属学报,2024,34(2):480-503.
 XU J, ZHENG J, LIU W E, et al. Recrystallization Behavior and Strengthening Mechanism of Extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy with Different Pre-aged States[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2024, 34(2):480-503.
- [22] WU G Q, LI Z C, YU J M, et al. Optimization in Strength-Ductility of Mg-RE-Zn Alloy Based on Different Repetitive Upsetting Extrusion Deformation Paths[J]. Materials & Design, 2023, 232: 112114.
- [23] LI C Q, LI X, KE X T, et al. Enhancing Corrosion Resistance of Mg-Li-Zn-Y-Mn Alloy Containing Long Period Stacking Ordered (LPSO) Structure Through Homogenization Treatment[J]. Corrosion Science, 2024, 228: 111829.
- [24] CHEN X M, XIAO B C, LIN Y C, et al. Experimental Study of Low-Cycle Fatigue Behavior in a Mg-Y-Zn Alloy with Initial LPSO Phase[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 899: 146414.
- [25] HAGIHARA K, MAYAMA T, YAMASAKI M, et al. Contributions of Multimodal Microstructure in the Deformation Behavior of Extruded Mg Alloys Containing LPSO Phase[J]. International Journal of Plasticity, 2024, 173: 103865.

^{104-119.}