

大型回转薄壁件对轮旋压成形工艺 装备技术及应用进展

李帆^{1,2}, 赵升吨^{1,2}, 王永飞^{1,2}, 朱成成³, 陈开达^{1,2}, 范淑琴^{1,2}, 写旭⁴,
李靖祥^{1,2}, 韩冬⁴, 杨延涛⁴, 周路⁵

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 金属成形技术与重型装备全国重点实验室,
710018, 西安; 3. 长安大学工程机械学院, 710064, 西安; 4. 西安航天动力机械有限公司,
710038, 西安; 5. 西安博赛旋压科技有限公司, 710087, 西安)

摘要: 针对火箭发动机壳体、封头和民用高端装备中大型回转薄壁件制造面临的芯模成本高、拼焊强度低及成形效率低等瓶颈问题,提出了一种对轮主动旋压成形新工艺。该工艺首创旋轮与主轴双伺服协同驱动机制,通过内、外旋轮主动旋转替代传统芯模,基于塑性变形力学模型揭示了成形过程中的材料流动规律,并推导出旋轮与主轴转速的匹配函数。通过正交试验优化壁厚减薄率、进给比等关键工艺参数,构建了涵盖直壁筒体、槽轮、风机集流器、封头和液化天然气气瓶等 5 类典型构件的工艺数据库。在此基础上,自主研制了多动力源协同控制的全电伺服对轮主动旋压装备,在国内首次实现了最大加工直径为 2 100 mm 的对轮主动强力旋压设备研制及其工艺试验。研究成果已成功应用于运载火箭发动机壳体及各类民用回转构件的生产,不但解决了大直径薄壁件的“无模化”制造难题,而且在近 3 年里累计创造出可观的经济效益,显著提升了我国高端装备制造的自主化能力。

关键词: 回转薄壁件;对轮旋压;旋压成形装备;协同控制;工艺参数

中图分类号: TG301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202604013 **文章编号:** 0253-987X(2026)04-0162-13

Counter-Roll Spinning Forming Process, Equipment Technology and Application Advances for Large-Scale Rotating Thin-Walled Parts

LI Fan^{1,2}, ZHAO Shengdun^{1,2}, WANG Yongfei^{1,2}, ZHU Chengcheng³, CHEN Kaida^{1,2},
FAN Shuqin^{1,2}, XIE Xu⁴, LI Jingxiang^{1,2}, HAN Dong⁴, YANG Yantao⁴, ZHOU Lu⁵

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory of
Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an 710018, China; 3. School of Construction Machinery,
Chang'an University, Xi'an 710064, China; 4. Xi'an Aerospace Power Machinery Co., Ltd., Xi'an 710038,
China; 5. Xi'an Peosper Metal Spinning and Forming Technology Co., Ltd., Xi'an 710087, China)

Abstract: To address bottleneck issues in the manufacturing of large-scale rotating thin-walled parts, such as rocket engine casings, heads, and high-end civil equipment, including high core mold costs, low welding strength, and low forming efficiency, a novel counter-roll active spinning forming process is proposed. This process introduces a pioneering dual-servo collaborative driving

收稿日期: 2025-09-26。 作者简介: 李帆(1993—),男,助理教授;赵升吨(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金
项目: 金属成形技术与重型装备全国重点实验室开放课题资助项目(B2408100.W02); 山西省科技重大专项计划资助项目
(202401110101001); 陕西省重点研发计划资助项目(2024CY2-GJHX-04)。

网络出版时间: 2025-12-01

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251128.1117.006>

mechanism for the spinning rolls and spindle, replacing the traditional core mold with actively rotating inner and outer rolls. Based on a plastic deformation mechanics model, the material flow behavior during forming is elucidated, and a matching function between the roll speed and spindle speed is derived. Key process parameters, including the thickness thinning ratio and feed ratio, are optimized through orthogonal experiments, and a process database covering five typical components, including straight-walled cylinders, grooved wheels, fan volutes, heads, and liquefied natural gas cylinders, is established. On this basis, fully electric servo counter-roll active spinning equipment featuring multi-power-source coordinated control is independently developed. This project marks the first domestic realization of the development and process trials for a counter-roller active power spinning machine featuring a maximum processing diameter of 2 100 mm. The research outcomes have been successfully applied to the production of launch vehicle engine casings and various civil rotating components. This not only resolves the challenge of “mold-less” manufacturing for large-diameter thin-walled parts but has also generated substantial economic benefits over the past three years, significantly enhancing China’s independent manufacturing capability in high-end equipment.

Keywords: rotational thin-walled parts; counter-roller spinning; spinning forging equipment; coordinated control; process parameters

大型回转薄壁构件作为高端装备制造领域的核心结构件,其制造水平直接关系到国家的国防安全与工业经济发展。在航天军工领域,以运载火箭燃料贮箱、导弹壳体及潜艇耐压壳为代表的大直径薄壁筒体,具有直径大、壁厚薄、精度高及比强度高的特点,是衡量国家航天科技水平与综合制造能力的重要标志^[1-4]。与此同时,随着国民经济的转型升级,交通运输、能源化工及建筑机械等民用领域对高性能回转薄壁件的需求亦日益迫切。例如,电梯系统中的大型槽轮、矿用通风设备的集流器、新能源重卡的车载液化天然气(LNG)气瓶以及各类化工容器封头等^[5-6],均对此类构件的整体性、成形精度及生产效率提出了严苛要求。然而,回转薄壁零件的高质量要求与极端服役环境使其加工极具挑战性,如我国的长征五号大型运载火箭发动机采用了5 m级直径结构,其加工难度极大^[7]。

目前,国内外针对此类大直径或复杂型面薄壁件的加工,主要采用金属板材卷弯拼焊或芯模强力旋压工艺^[8-9]。拼焊工艺存在的轴向与环向焊缝不仅降低了构件的整体强度与可靠性,还存在效率低、工件性能不均等问题。芯模强力旋压虽能制造无缝筒体,但严重依赖与工件尺寸一致的巨大芯模,导致模具成本高昂、设备吨位巨大,且难以适应产品规格多样化的民用市场需求^[10-11]。为突破上述瓶颈,对轮旋压工艺应运而生^[12],其通过内、外旋轮协同挤压代替传统芯模,不仅消除了昂贵的模具成本,还解

决了芯模旋压内、外侧变形不均的问题,显著提升了加工质量与灵活性^[13]。

对轮旋压成形工艺能够适用于航天、军工领域大直径薄壁筒形件制造,同时还可在扩展改进后广泛应用于电梯槽轮、聚风罩翻边以及封头等各类产品加工。然而,对轮旋压工艺形性调控复杂,装备研发难度大,核心技术长期受到美国、德国等西方国家的严格封锁,制约了我国重型运载火箭及高端民用装备的自主化发展。为解决这一“卡脖子”难题,西安交通大学赵升吨教授带领的智能控制室科研团队,创新性地提出了通过主轴与旋轮双伺服协同驱动的对轮主动旋压新工艺。该工艺基于分散动力原理,有效克服了传统被动旋压中,筒壁受扭矩过大易失稳、内表面质量难以控制等缺陷。

本文将系统阐述对轮主动旋压成形工艺的理论创新与工程应用。首先,基于塑性变形力学模型揭示材料流动规律与转速匹配机制;其次,通过数值模拟与正交试验优化工艺参数,构建全电伺服对轮主动旋压样机及控制系统;最后,重点介绍该技术在国防与民用两大领域的突破性应用:一方面,在国内首次研制了最大加工直径为2 100 mm的对轮主动强力旋压设备,实现了航天领域大直径D406A超高强钢薄壁筒体的整体成形,验证了其在极端工况下的可靠性;另一方面,将该技术成果推广至民用经济领域,成功开发出针对起重槽轮、风机喇叭口、复杂曲面封头及LNG气瓶等产品的旋压成形新工艺。研

究旨在通过打通材料特性-工艺原理-装备研制-工程应用的全链条,实现军民两用高端回转薄壁件的高效率、低成本与高质量制造。

1 对轮旋压成形工艺理论创新

1.1 芯模旋压与对轮旋压工艺原理

旋压工艺以动态的点接触约束为特征,是一种通过连续局部塑性变形获得薄壁空心回转体零件的金属压力加工方法^[14]。筒体强力旋压成形以环形锻件为坯料,包括锻造开坯、环轧、旋压成形、热处理和精车等流程。芯模强力旋压工艺过程如图 1 所示,图中黑色箭头表示旋轮运动方向。

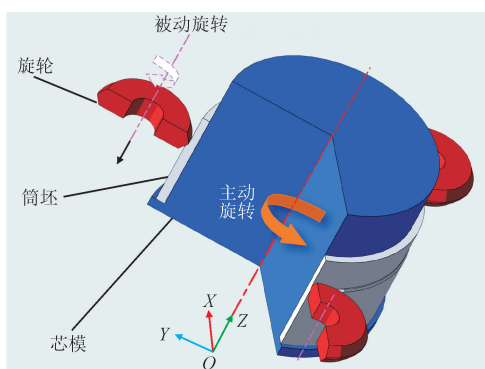


图 1 芯模强力旋压工艺原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle of core-mold power spinning process

芯模旋压具体加工过程为:筒坯套装在芯模上且端部固定,主轴转台带动芯模和筒坯旋转后,旋轮沿筒体径向进给到给定位置,随后沿筒坯轴向以给定速率进给,筒坯受到旋轮和芯模的挤压后减薄成形。由于该种成形工艺下的筒坯内、外侧性能不一致且大直径芯模成本高,故而不适用于大直径甚至超大直径筒体生产。

对轮旋压采用内、外旋轮对筒形件的内、外表面同时挤压减薄^[15-16],工艺原理如图 2 所示。具体过程为:将多对旋轮沿周向均匀布置在筒体坯料内、外两侧,主轴转盘带动筒坯旋转,多对旋轮径向进给至给定位置,内、外旋轮同步沿工件轴向进给,使得筒形件减薄成形。然而,现有对轮旋压易使筒壁发生屈曲变形,单次强旋时壁厚减薄率受限、生产效率降低,同时也易造成强旋时筒体的尺寸精度不足。

1.2 对轮主动旋压成形新工艺原理

课题组通过给旋轮提供动力使其主动旋转,进而提出了对轮主动旋压成形新工艺^[17],其原理如图 3 所示。

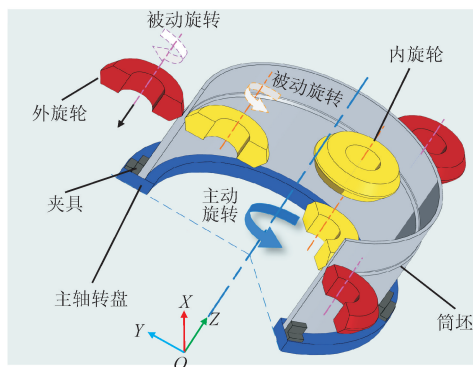


图 2 对轮旋压工艺原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of principle of counter-roller spinning process

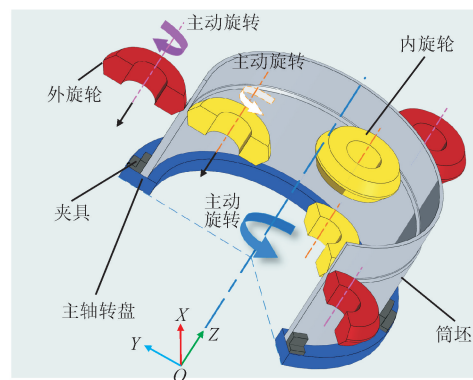


图 3 对轮主动旋压工艺原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of principle of counter-roller active spinning process

对轮主动旋压通过主轴旋转和旋轮主动旋转相配合,有效降低了筒体本身传递的扭矩。对轮被动旋压和主动旋压筒体受到的主轴转矩可写为

$$\begin{cases} M_{\text{pas}} = M_{\text{spindle}} \\ M_{\text{act}} = |M_{\text{spindle}} - n_r M_{\text{roller}}| \end{cases} \quad (1)$$

式中: M_{pas} 为对轮被动旋压下的筒体转矩; M_{act} 为对轮主动旋压下的筒体转矩; M_{spindle} 为主轴转矩; M_{roller} 为旋轮转矩; n_r 为旋轮数。

1.3 对轮主动旋压成形变形规律

旋压成形过程中,内、外旋轮的进给运动可分解为沿筒形件周向旋转和沿筒形件轴向直线进给,故筒形件的旋压变形过程可在轴向-径向截面和周向-径向截面内进行分析。其轴向-径向截面内的变形如图 4 所示,图中 t_f 为旋压后筒体壁厚, t_0 为筒体的初始壁厚, D_m 为筒体中性面的直径, v_a 为材料轴向流动速度, v_r 为旋轮轴向进给速率。

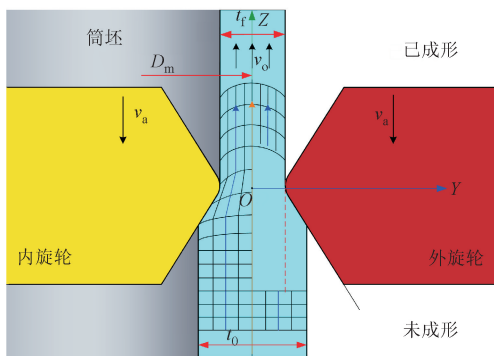


图4 筒体轴向-径向截面上材料流动变形示意图

Fig. 4 Schematic diagram of material flow deformation in the axial-radial section of cylinder

旋轮轴向进给过程中,材料从内、外旋轮的间隙流过,使得筒形件的壁厚变薄而长度增加。筒形件内、外两侧表面的材料分别与内、外旋轮接触,在受到挤压后发生剪切变形,使得边缘材料向壁厚中心流动。筒体周向-径向截面材料的流动变形如图5所示。图中, D_i 为筒体内侧直径,紫色箭头表示旋转方向。由图可见,在变形区域内,材料的周向速度随着变形程度轻微改变,造成径向网格线形状变化。旋轮与工作的工作面可分为前滑区和后滑区。

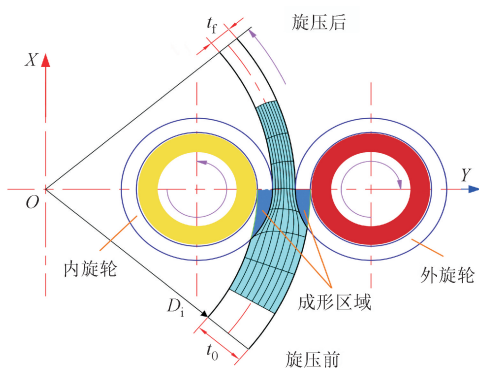


图5 筒体周向-径向截面上材料流动变形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of material flow deformation in the circumferential-radial section of cylinder

1.4 对轮主动旋压成形过程转速匹配

对轮被动旋压时,旋轮与筒体坯料之间存在着速度差和相应的滑动与摩擦,如图6所示。图中, V' 和 V 分别为筒体内、外侧的线速度, v_c^{or} 为外旋轮周向线速度, v_c^{wo} 为筒体外侧与外旋轮接触区域材料的轴向线速度, v_c^{ir} 为内旋轮周向线速度, v_c^{wi} 为筒体内侧材料的圆周速度, α 为成形角。由于外旋轮在纵截面内的周向线速度 v_c^{or} 大于中面处筒体外侧入口的线速度 v_{Ca}^{or} ,而筒体外侧成形区域材料的周向速度 v_{Cb}^{wo} 大于出口处的线速度 v_{Cb}^{wo} ,则必存在中性点 j ,使

得 aj 段的 $v_c^{or} < v_c^{wo}$, jb 段的 $v_c^{or} > v_c^{wo}$ 。

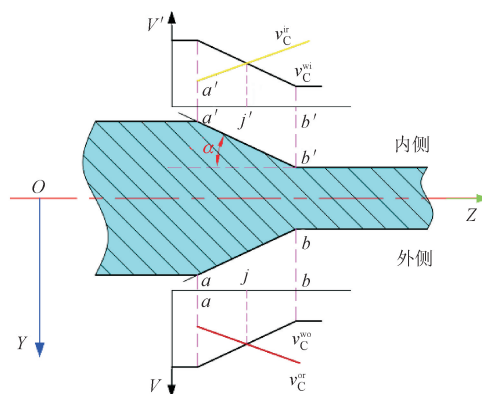


图6 旋轮与筒体轴向截面上的周向线速度差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of circumferential linear velocity difference of axial section between spinning roller and cylinder

旋轮中面处筒体外侧入口的线速度 v_{Ca}^{or} 可写为

$$v_{Ca}^{or} = \frac{D_o}{2} \omega_t \quad (2)$$

式中: D_o 为筒体外侧直径; ω_t 为角速度。

筒体外侧出口处线速度 v_{Cb}^{wo} 的计算式可写为

$$v_{Cb}^{wo} = \left(\frac{D_o}{2} - \Delta t \right) \omega_t \quad (3)$$

式中: Δt 为外旋轮压下量。

由此可知,旋轮主动旋转转速的取值范围与外旋轮直径 D_{R_o} 有关,应为 $[2v_{Cb}^{wo}/D_{R_o}, 2v_{Ca}^{or}/D_{R_o}]$ 。

本节归纳了提出的旋轮主动旋转与主轴旋转协同作用的对轮主动旋压成形工艺新原理,推导了成形过程中旋轮主动旋转的取值范围理论公式。

2 对轮旋压成形工艺参数优化

大直径薄壁筒形件对轮主动旋压成形过程中,工艺参数的选取直接影响着材料变形过程、成品工件质量、旋压力 and 实际生产效率。通过有限元软件,建立2219铝合金筒体的对轮主动旋压仿真模型,分析了工艺参数对成形结果的影响规律。取筒坯的外径为500 mm,壁厚为10 mm,高度为100 mm。2219铝合金完全退火态材料的Johnson-Cook本构关系如下

$$\sigma = (98.4 + 196.73\epsilon_p^{0.4177}) \left(1 + 0.0116 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \quad (4)$$

式中: σ 为应力; ϵ_p 为塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。

2.1 基于正交试验的仿真试验设计

建立正交试验模型,分析工艺参数对成形结果的影响规律^[18]。壁厚减薄率直接影响着筒形件旋

压力和最终工件质量^[19],可在 15%~50%之间选取,有利于提高成形稳定性和精度^[20]。旋轮进给比直接影响着筒形件的尺寸精度和表面光洁度,可取为 0.3~3.0 mm/r。成形角 α 通常取为 15°~45°。旋轮圆角半径 r 直接影响到工件的尺寸精度和表面质量,一般可取为壁厚的 0.6~1.0 倍。根据上述分析,设计正交试验方案的因素水平如表 1 所示。

表 1 正交试验因素水平

Table 1 Orthogonal experimental factors levels

因素 水平	壁厚减薄率/ %	进给比/ (mm·r ⁻¹)	旋轮圆角 半径/mm	成形角/ (°)
水平 1	15	1.0	4	15
水平 2	25	1.5	6	25
水平 3	35	2.0	8	35
水平 4	45	2.5	10	45

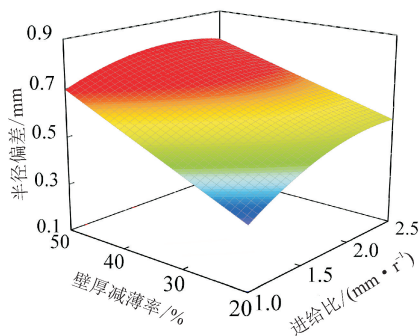
2.2 工艺参数对成形结果的影响规律

工艺参数对成形筒形件半径偏差的影响为:随着壁厚减薄率增大,半径偏差呈线性增大,精度降低。筒形件的半径偏差随进给比的增大而逐渐增大,当进给比达到 1.5 mm/r 后,半径偏差的增大趋势趋于平缓。此外,筒形件的半径偏差随旋轮圆角半径和成形角的增大先减小后增大。

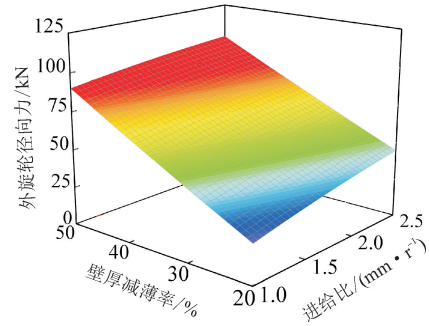
径向和轴向旋压成形力的变化规律为:内、外旋轮的径向成形力均随着壁厚减薄率和进给比的增大而增大。随着旋轮圆角半角的增大,内、外旋轮的径向成形力先增大后减小。随着成形角的增大,内、外旋轮的径向成形力先减小后增大。随着壁厚减薄率和成形角度的增大,内、外旋轮的轴向成形力逐渐增大。

2.3 回归分析构建合理工艺参数优化模型

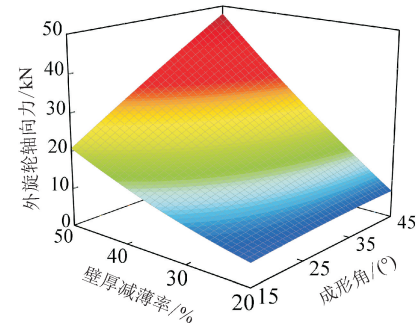
根据筒形件对轮主动旋压成形数值仿真正交试验结果,分别选取半径偏差和外旋轮径向与轴向旋压成形力进行回归分析,得到用于预测筒形件旋压成形结果的响应面,如图 7 所示。图中,壁厚减薄率和进给比的相互作用表明,筒形件的成形精度和径向旋压成形力随着壁厚减薄率和进给比的增大而增大。



(a) 对半径偏差的影响



(b) 对外旋轮径向力的影响



(c) 对外旋轮轴向力的影响

图 7 筒形件对轮旋压成形结果的预测响应面

Fig. 7 Predictive response surface of forming results of counter-roller active spinning of cylinder

3 对轮主动旋压成形新工艺试验验证

课题组在提出对轮主动旋压成形新工艺的同时,自主研制了加工直径为 660 mm 的全电伺服对轮主动旋压样机及其控制系统,成功获得美国和中国授权发明专利 5 项;并在该设备上成功试制出直径为 500 mm、壁厚为 2.5 mm 的 2219 铝合金筒体,有效验证了对轮主动旋压工艺的优越性。

3.1 新原理全电伺服旋压样机研制

全电伺服立式三对轮主动旋压样机的主要技术参数见表 2,其可加工的筒形件直径为 440~660 mm。

表 2 旋压样机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of spinning prototype

参数	数值
最大径向力/kN	60
最大轴向力/kN	35
最大轴向行程/mm	500
最大径向行程/mm	120
主轴最大转速/(r·min ⁻¹)	60
主动旋轮最大转速/(r·min ⁻¹)	120
主轴最大转矩/(N·m)	4 000
主动旋轮最大转矩/(N·m)	595

该样机采用全电伺服的驱动方式,整体装置可分为机械本体系统、电气控制系统和在线监测系统。机械系统的整体结构如图8所示。其采用立式结构,6个内、外旋轮分别组成3组对轮,3组内、外旋轮在筒形件内、外侧对称均匀布置。将3个外旋轮轴连接交流伺服电机和伺服行星减速机,使其变为可独立精确调节转速转矩的主动旋轮,该主动旋转的旋轮与主轴转速匹配是本研究系列化技术成果的核心要素。各组内、外旋轮可沿筒体轴向和径向独立运动,并根据加工需求进行调节。样机的机械系统包括内、外旋轮进给组件、主轴及装夹组件和旋轮主动旋转组件等运动部件以及机身组件,各运动部件通过机身连接。

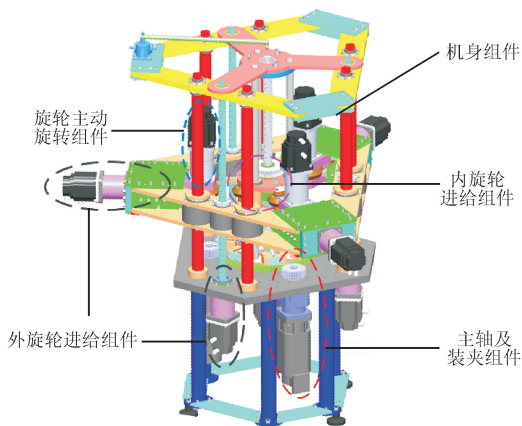


图8 旋压样机机械结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of mechanical architecture of spinning prototype

电气控制系统主要由上位机、运动控制器、数据采集卡、交流电机和传感器组成,其核心是深圳正运动技术ZMC4系列EtherCAT接口16轴总线式运动控制器。系统硬件连接如图9所示,其中上位机

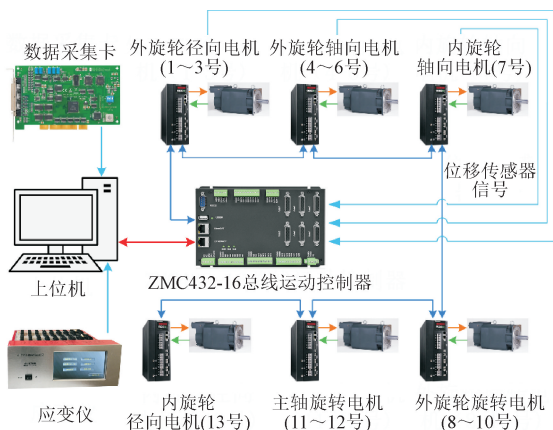


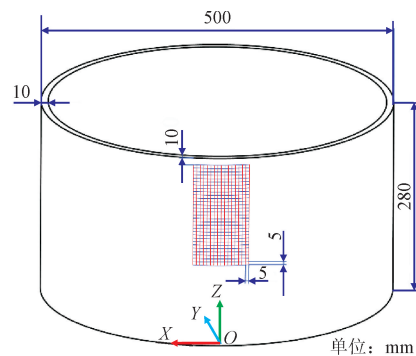
图9 旋压样机电气控制系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of electrical control system of spinning prototype

通过以太网电缆与ZMC432控制器连接,控制器的通讯接口连接伺服驱动器。

3.2 对轮主动旋压2219铝合金筒体工艺试验

试验选用厚度为10 mm的2219铝合金冷轧板材制造的筒坯,其尺寸和实物如图10所示。坯料的半径偏差为12.5 mm,圆度误差为8.5 mm。2219铝合金^[21-22]是一种可热处理强化的Al-Cu合金,具有比强度高、断裂韧性和疲劳韧性优异、耐腐蚀性能强、可焊性好以及机械性能良好的特点^[23-24]。



(a)外形尺寸



(b)卷焊筒体坯料实物

图10 2219铝合金筒坯外形尺寸及实物

Fig.10 Dimensions and physical appearance of 2219 aluminum alloy cylinder

在全电伺服立式三对轮主动旋压样机上对2219铝合金筒体开展旋压试验,试验装置如图11所示。筒坯安装在主轴转盘上,旋压成形开始之前,内、外旋轮架固定在筒坯上方。每道次的壁厚减薄率控制在30%左右,四道次旋压成形后的筒形件如图12所示。

筒体坯料和各道次旋压后筒形件的半径偏差和圆度误差沿轴向分布情况如图13所示。由图可见,经过四道次旋压后,工件的最终半径偏差和圆度误差分别为0.51、0.56 mm,与筒体坯料相比,分别降低了87.56%、86.86%。

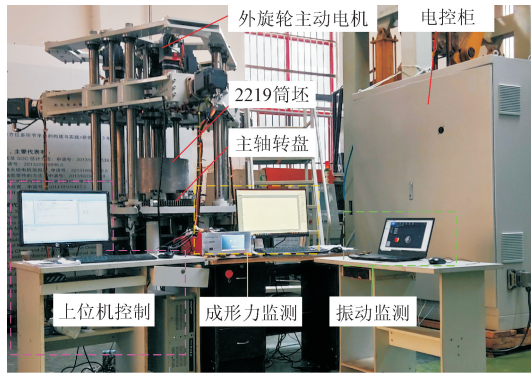


图 11 2219 铝合金筒体对轮主动旋压成形试验装置
Fig. 11 Experimental device of counter-roller active spinning forming of 2219 aluminum alloy cylinder

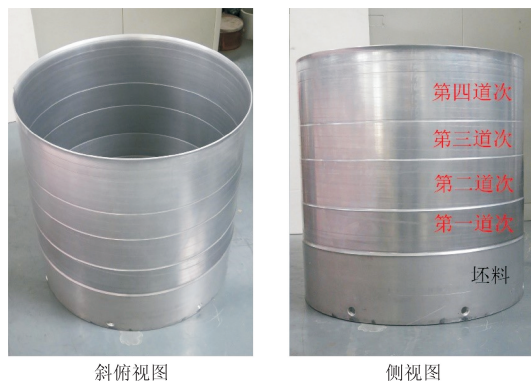


图 12 成形后的 2219 铝合金筒形件
Fig. 12 Formed 2219 aluminum alloy cylindrical workpiece

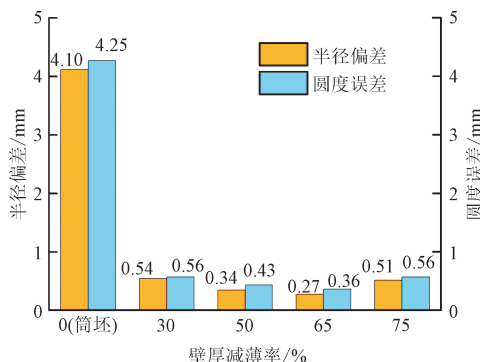


图 13 旋压成形后筒形件尺寸精度的变化
Fig. 13 Variation of dimensional accuracy of cylinder after spinning

2219 铝合金筒体坯料和各道次对轮主动旋压后的拉伸试验结果如图 14 所示。由图可见,2219 铝合金筒坯材料在轴向和周向方向上均具有良好的延展性。筒坯的轴向抗拉和屈服强度分别为 205.5、76.5 MPa。经过四道次对轮主动旋压后,筒

形件的轴向抗拉和屈服强度分别提高至 326.3、249.9 MPa,相较于筒坯分别提升了 58.78%、226.67%。随着壁厚总减薄率增大,筒形件轴向和周向的屈服强度和极限拉伸强度几乎呈线性增加,这主要是由于晶粒细化和加工强化作用所导致^[25]。

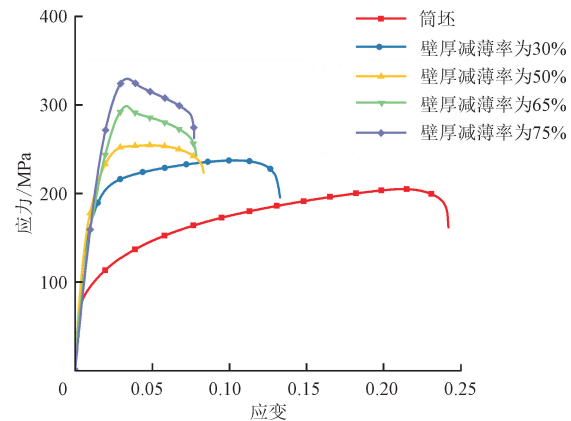


图 14 各道次旋压后筒形件的轴向应力-应变曲线
Fig. 14 Axial stress-strain curves of cylinder after each spinning pass

4 大直径对轮主动强力旋压设备研制

通过对 2219 铝合金筒体开展旋压成形试验,有效验证了对轮主动旋压成形薄壁筒体的可行性。在此基础上,课题组针对航天领域大直径 D406A 超高强钢薄壁筒体加工需求,研制出最大加工直径为 2 100 mm、总功率为 1 385 kW 的全电伺服立式对轮主动旋压设备,设备国产化率达到 100%。

课题组自主研制了大直径超高强钢薄壁筒体加工的全电伺服对轮主动旋压装备,通过理论分析和数值模拟,获得了 D406A 钢大直径薄壁筒体旋压成形旋压力及筒体尺寸的参数变化规律,确定了装备的主要性能参数,如表 3 所示。

表 3 对轮旋压装备的主要性能参数

Table 3 Main performance parameters of counter-roller spinning equipment

参数	数值及范围
旋压工件最大直径/mm	2 100
旋压工件最大长度/mm	3 540
最大径向力/kN	612
最大轴向力/kN	407
最大毛坯壁厚/mm	40
径向进给速度/(mm · min ⁻¹)	3~140
轴向进给速度/(mm · min ⁻¹)	3~360
设备功率/kW	1 385

对轮主动旋压设备 3D 模型如图 15 所示。该设备采用三对旋轮的立式结构形式,设备动力系统采用分散布置。每个旋轮轴上均连接有额定功率为 43 kW、额定转矩为 2 000 N·m 的交流伺服直驱转矩电机,驱动旋轮主动旋转。通过对主轴和每组旋轮轴的转速转矩进行协调控制,提高了筒体旋压减薄成形过程的稳定性。

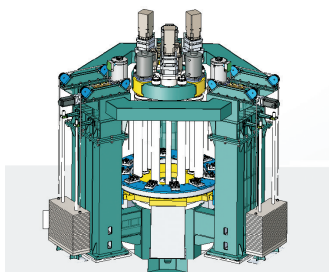


图 15 最大加工直径为 2 100 mm 的对轮主动旋压装备

Fig. 15 3D model of the counter-roll active spinning machine with maximum processing diameter of 2 100 mm

对主动旋压装备进行调试,主要包括调试机身精度和调试电控系统。精度调试包括精调机床床身的水平和机床几何精度,通过移动床身上各个可移动部件,在设备全行程内观察记录机床水平的变化情况,并调整相应的机床几何精度,使其达到允许误差范围。电控系统调试主要是对旋压机使用的永磁同步电机进行驱动调试、对传感器的工作调试以及对电控系统控制精度进行调试,确保对轮旋压机能顺利进行对内、外旋轮进给的精准调控,以及旋转升降平台的旋转和升降运动的精准调控。同时,在该设备上完成了直径 2 000 mm 级的 D406A 超高强钢薄壁筒体对轮主动强力旋压成形,获得了良好的成形结果。

相较于德国 MT 公司的对轮旋压设备,本研究装备的 3 组内、外旋轮均增加功率为 43 kW 的交流伺服电机作为动力源,使得内、外旋轮均可主动旋转,提高了筒体成形稳定性。此外,本装备的主轴转速为 25 r/min,高于 MT 公司对轮旋压设备的最大主轴转速 24 r/min,加工效率较高。

5 对轮旋压工艺研究成果在民用经济领域的典型应用

5.1 槽轮工件对轮旋压成形

大型绳轮作为起重设备的重要组成部分,已被

广泛用于重工、建筑等行业。常见的曳引式电梯需用诸多大型绳轮,包括曳引轮、轿顶轮等。随着经济发展,电梯行业蓬勃进步,大型绳轮需求强劲^[20]。课题组发明了对轮旋压成形制造此类部件的新工艺,克服了传统整体铸造、切削等工艺存在的材料和能源浪费多等缺点。其成形工艺原理如图 16 所示,图中 G1、G2、G3 分别表示沿轴向的第 1、2、3 个槽,箭头表示成形过程中旋轮的进给方向。

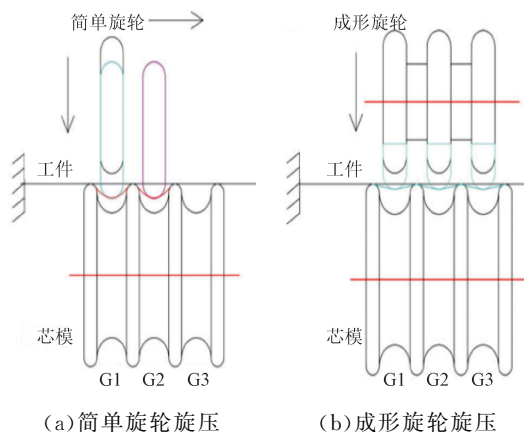


图 16 槽轮对轮旋压成形原理示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the principle of grooved pulley spinning forming

在自主研制的双对轮数控旋压设备上开展 Q235 钢对轮旋压成形槽轮试验,坯料直径为 1 000 mm,壁厚为 1 mm,高度为 240 mm,槽轮旋压试验如图 17 所示。Q235 筒形件经过三道次旋压深度为 5.20 mm 的对轮旋压后,初始成形深度为 4.96 mm。

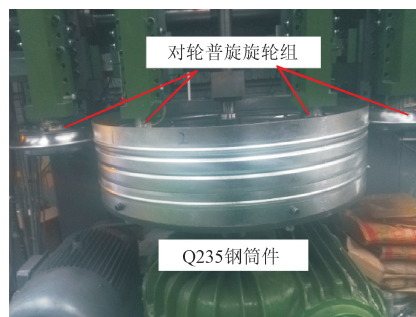


图 17 Q235 钢槽轮零件对轮旋压成形

Fig. 17 Counter-roller spinning forming of Q235 steel grooved pulley components

5.2 对旋式轴流风机集流器喇叭型面对轮旋压成形

对旋式轴流通风机在矿场被广泛使用,可将

矿井中的有毒有害气体及时排除,同时为工人输送新鲜的空气。采用喇叭型面的集流器,可将通风机的工作效率提升 $10\% \sim 15\%$,其结构如图 18 所示。



图 18 对旋式轴流通风机喇叭口集流器

Fig. 18 Axial flow fan with bell-mouth inlet collector

将对轮旋压与双辊夹持旋压复合式新工艺用于加工上述喇叭形集流器,先通过对轮旋压对坯料进行减薄,再将减薄的工件作为坯料进行双辊夹持旋压成形,其工艺路线如图 19 所示,图中黑色箭头表示旋轮运动方向。成形后的零件如图 20 所示。

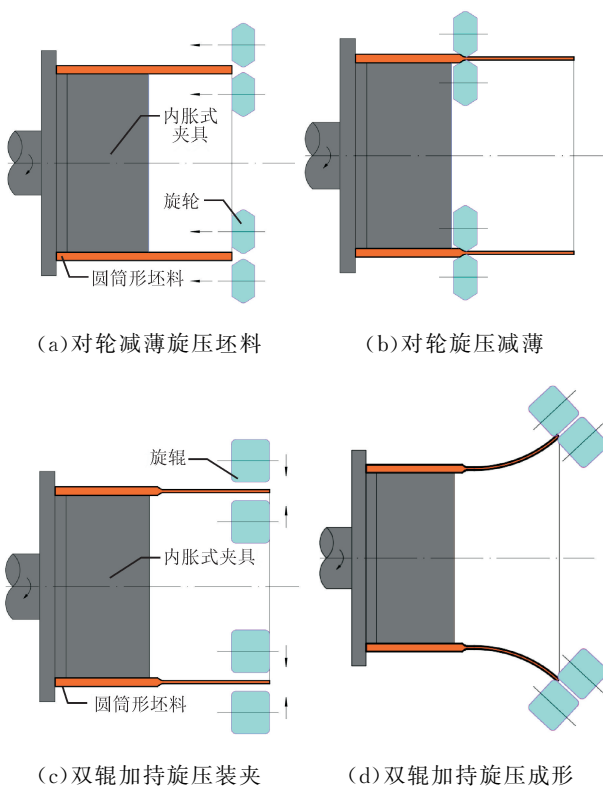


图 19 集流器对轮旋压与双辊夹持旋压成形工艺路线

Fig. 19 Process route for spinning forming of inlet collector



图 20 Q235 碳钢筒体双辊夹持旋压件

Fig. 20 Spun Q235 carbon steel cylindrical workpiece

5.3 封头复杂曲面对轮旋压成形

大直径封头作为一种整体化、薄壁、重量轻、形状复杂的大型零件,被应用于航空航天中的燃料储罐、固体火箭发动机外壳和大型压力容器,属于复杂曲母线结构型面零件,加工难度极大。针对该零件,课题组提出了封头类复杂曲面零件对轮旋压成形新工艺,外环夹持圆板形毛坯零件,多道次成形封头零件,每一道次成形过程中毛坯在内、外旋轮的作用下发生形状变形,通过多个道次最终完成封头零件的成形。其工艺原理如图 21 所示。

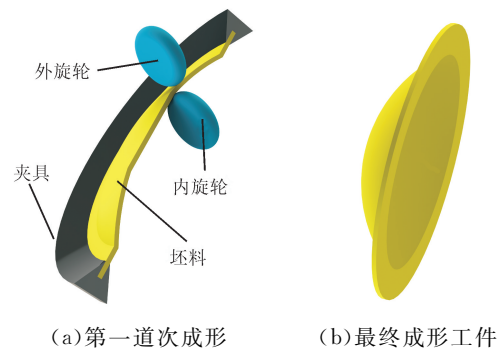


图 21 封头对轮旋压工艺

Fig. 21 Counter-roller spinning process for tank domes

将直径为 180 mm、厚度为 1.5 mm 的 1060 铝合金板料作为旋压坯料,旋压过程中主轴转速为 90 r/min,得到的封头零件实物如图 22 所示。

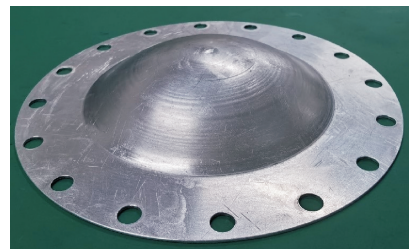


图 22 对轮旋压成形的封头

Fig. 22 Tank dome formed by counter-roll spinning

5.4 车载液化天然气(LNG)气瓶对轮主动旋压成形

随着新能源汽车的不断发展,LNG 汽车经常应用在重型卡车领域。车载 LNG 气瓶的具体结构如图 23 所示,包括内胆、外壳、绝热夹层、内部管路等。

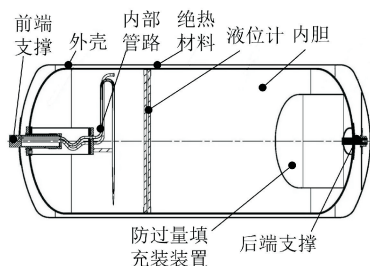


图 23 车载 LNG 气瓶系统结构示意图

Fig. 23 Schematic diagram of system structure of LNG vehicle cylinder

传统的 LNG 气瓶内胆和外壳加工主要采用焊接、芯模强旋等方法,在成形精度、加工等方面存在缺陷和局限。基于此,课题组提出了车载液化天然气不锈钢瓶体对轮主动旋压工艺,如图 24 所示。通过对厚壁筒坯进行多道次对轮主动旋压减薄成形,得到高质量的无缝薄壁筒体,再将该筒体作为坯料进行缩径旋压成形。

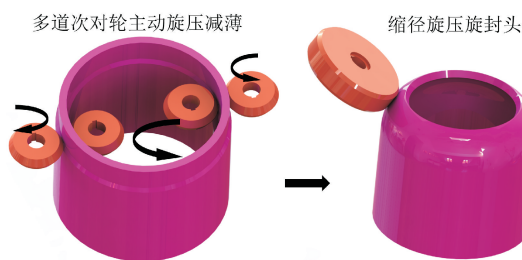


图 24 多道次对轮旋压和缩径旋压复合工艺

Fig. 24 Multi-pass combined process of counter-roller spinning and reducing diameter spinning

5.5 研究成果转化应用

课题组针对高性能回转类零件的高效低成本加工,发明了各自具有驱动交流伺服电机的旋轮和主轴转盘,在两者驱动转矩的协同作用下,实现了零件旋转并成形的多对轮主动旋压工艺的新原理,攻克了旋轮与主轴转速转矩合理匹配的关键问题;开发了高性能回转类零件对轮主动旋压材料性能强化方式、多工艺参数尺寸精度优化技术,解决了槽轮零件、喇叭口集流器、封头零件、LNG 气瓶和薄壁筒体

等多种回转类零件的成形工艺参数优化和形性调控问题。

已授权中国发明专利 30 件,美国发明专利 3 件,在审的中国发明专利 6 项;发表对轮旋压密切相关学术论文 40 篇,其中 SCI 论文 12 篇。成功研发了拥有自主知识产权的全电伺服立式数控双对轮旋压设备、封头对轮旋压成形设备、中型全电伺服立式三对轮主动旋压装备、2 000 mm 级大直径全电伺服立式三对轮主动旋压装备等多种对轮旋压装备设计理论与关键技术。研究成果已推广应用到机械制造、汽车运输、航空航天等行业的多家企业,包括西安德仕汽车零部件有限责任公司、襄阳恒德、广东博赛数控机床有限公司、西安博赛旋压科技有限公司、西安弘祥机电有限公司和扬州中旋机械科技有限公司。经统计,2022—2024 年累计新增销售额 6.95 亿元,累计新增利润 4 685.98 万元。相关研究成果经陕西省机械工程学会鉴定为“国际先进水平,无芯模对轮旋压国际领先”,并荣获 2025 年度陕西省机械学会科学技术一等奖。

6 结 论

(1)创新性地提出无芯模对轮主动旋压新工艺,解决了大型薄壁筒体成形难的问题。通过内、外旋轮全电独立驱动的新模式,建立了内、外旋轮转速、转矩与主轴转盘转速、筒体直径及其壁厚减薄率的函数表达式,显著降低了筒体所受扭矩。对轮径向位置的在线连续可调,实现了不同构型/尺寸回转薄壁件的高效高精度旋压成形,解决了传统旋压成形工艺存在的模具成本高、筒体易起皱、内、外侧力学性能不一致及生产效率低等难题。

(2)发明了对轮旋压成形工艺优化技术,获得了壁厚减薄率、进给比、旋轮尺寸等主要工艺参数对大型回转薄壁件的尺寸精度、力学性能、微观组织等的影响规律。2219 铝合金筒体经四道次旋压,轴向屈服强度提高了 226.67%。国内首次实现了直径为 2 000 mm、长度为 3 500 mm、壁厚为 7 mm 的 D406A 超高强度钢薄壁筒体的对轮旋压成形。

(3)技术成果工程化应用广泛,推动了国防与民用领域高端制造自主化发展。该工艺在火箭发动机壳体等国防领域实现突破,并扩展至民用经济领域,创造了显著经济效益,成功实现了槽轮、喇叭口集流

器、封头和 LNG 气瓶等零件的对轮旋压成形。相关成果授权中美专利 33 项,研制出多类装备(如立式三对轮旋压机)在西安德仕等企业应用,近 3 年新增经济效益达 4 685.98 万元,提升了我国高端装备的国际竞争力。

7 对轮旋压技术发展趋势与展望

尽管课题组在对轮旋压技术理论模型构建、工艺参数优化、装备研制及工程化应用方面取得了显著突破,成功解决了大直径薄壁筒体“无模化”制造难题,但面对未来航天运载工具大型化、轻量化以及民用高端装备极端化工况的发展需求,该技术仍需在以下几个关键方向深入研究。

(1)超大直径重型对轮旋压装备的研发。针对重型运载火箭所需的 5 m 级甚至 10 m 级超大直径贮箱结构,现有的装备吨位与结构刚度仍面临挑战。未来的研究重点将聚焦于超大吨位对轮旋压装备的结构拓扑优化设计,解决超大跨度下设备机身的刚度保持与微变形补偿难题,攻克多组重型旋轮与超大直径主轴的超高精度协同驱动技术,以满足未来航天超级工程的制造需求。

(2)基于数字孪生的智能化形性调控。未来应将数字孪生技术引入对轮旋压成形全过程,建立高保真的虚拟镜像模型,结合多传感器融合技术,实现对壁厚偏差、圆度误差及应力状态的在线实时监测与反馈。通过深度学习算法,开发具备自感知、自决策、自适应能力的智能控制系统,实现从自动化旋压向智能化无人旋压的跨越。

(3)难变形材料与复杂异形构件成形工艺拓展。随着航空航天及深海探测领域对材料性能要求的提升,针对钛合金、镍基高温合金及金属基复合材料等难变形材料的对轮旋压温/热成形工艺将是研究热点。此外,研究将不再局限于标准回转筒体,将进一步探索带内筋/外筋筒体、变壁厚曲线回转件及非对称异形薄壁件的对轮主动旋压成形机理,拓展该工艺的通用性与适应性。

(4)多能场辅助与复合制造工艺集成。为进一步突破材料成形极限并提高加工效率,未来将探索对轮旋压与激光加热、电磁感应、超声振动等多能场的辅助成形技术。同时,研究“旋压+增材制造”、“旋压+减材加工”的复合制造工艺,在一台设备上

实现毛坯制备、旋压成形、表面精整及热处理的一体化制造,推动大型回转薄壁构件制造向绿色、高效、短流程方向发展。

参考文献:

- [1] 武新峰,彭祺攀,张海联,等.国内外载人运载火箭发展历程分析与思考[J].载人航天,2020,26(6):783-793.
WU Xinfeng, PENG Qibo, ZHANG Hailian, et al. Analysis and investigation on development of crew launch vehicles in China and abroad [J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(6): 783-793.
- [2] ZHANG Xuemei. Optimal launch capacity trajectory design for SpaceX's super heavy starship launch vehicle [C]//Third International Computing Imaging Conference (CITA 2023). Bellingham, WA, USA: SPIE, 2023: 129213M.
- [3] YANG He, LI Heng, ZHANG Zhiyong, et al. Advances and trends on tube bending forming technologies [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1-12.
- [4] 张克.大型薄壁筒体类零件焊接变形控制工艺研究[J].新技术新工艺,2015(12):8-10.
ZHANG Ke. Research on the control of welding deformation process for large thin-walled cylindrical and rectangular parts [J]. New Technology & New Process, 2015(12): 8-10.
- [5] 曾宇航.导弹头壳体旋压成型数值模拟及实验分析[D].西安:长安大学,2019.
- [6] 黑爱卿,李钰,邓全得,等.大尺寸薄壁 LF6 铝合金筒体旋压成形技术[J].精密成形工程,2020,12(2):43-47.
HEI Aiqing, LI Yu, DENG Quande, et al. Spinning forming technology of large size thin-wall LF6 aluminum alloy cylinder [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(2): 43-47.
- [7] 李东,李平岐.长征五号火箭技术突破与中国运载火箭未来发展[J].航空学报,2022,43(10):160-171.
LI Dong, LI Pingqi. Technological breakthroughs of LM-5 and future developments of China's launch vehicle [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 160-171.
- [8] 宋建岭,李超.搅拌摩擦焊在运载火箭贮箱制造中的应用与发展[J].焊接,2018(5):21-27.
SONG Jianling, LI Chao. Application of FSW technol-

- ogy to tank manufacturing of launch vehicle and its development [J]. *Welding & Joining*, 2018(5): 21-27.
- [9] 丁新玲, 郭博闻. 美国重型“太空发射系统”结构及制造技术 [J]. *航天制造技术*, 2017(2): 1-7.
- DING Xinling, GUO Bowen. Structure and manufacturing technology of space launch system [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2017(2): 1-7.
- [10] ZHANG Ranyang, YU Huan, ZHAO Gangyao. Role of friction in prediction and control ellipticity of high-strength casting aluminum alloy tube during hot power backward spinning [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(5): 2709-2720.
- [11] KOCABIÇAK A C, ABDEL WAHAB M. Multiphysics numerical modelling of backward flow forming process of AISI 5140 steel [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2022, 121: 102656.
- [12] 曹学文, 张立武, 杨延涛, 等. 对轮旋压技术研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42(9): 115-117.
- CAO Xuewen, ZHANG Liwu, YANG Yantao, et al. Progress of research on counter-roller forming [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(9): 115-117.
- [13] HUANG Tao, LU Bo, LUO Wei, et al. Study on counter-roller spinning technology of large diameter aluminum alloy cylindrical parts [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2101(1): 012039.
- [14] XIA Qinxian, XIAO Gangfeng, LONG Hui, et al. A review of process advancement of novel metal spinning [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 85: 100-121.
- [15] ZHU Chengcheng, LI Fan, MENG Dean, et al. A study of large sheave counter-roller spinning force [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2261(1): 012009.
- [16] ZHANG Dawei, LI Fan, LI Shuaipeng, et al. Finite element modeling of counter-roller spinning for large-sized aluminum alloy cylindrical parts [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14(3): 351-357.
- [17] LI Fan, ZHU Chengcheng, ZHAO Shengdun. Research on a new counter-roller active spinning process for forming Al alloy thin-walled cylinders [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 326: 118309.
- [18] KANNAN S, KUMARAN S S, KUMARASWAMIDHAS L A. Optimization of friction welding by Taguchi and ANOVA method on commercial aluminium tube to Al2025 tube plate with backing block using an external tool [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(5): 2225-2235.
- [19] 夏琴香, 张鹏, 程秀全, 等. 筒形件错距旋压成形工艺参数的正交试验研究 [J]. *锻压技术*, 2012, 37(6): 42-46.
- XIA Qinxian, ZHANG Peng, CHENG Xiuquan, et al. Orthogonal experimental study on forming process parameters of tube stagger spinning [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2012, 37(6): 42-46.
- [20] XIAO Gangfeng, ZHU Ningyuan, LONG Jinchuan, et al. Research on precise control of microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy cylindrical parts during hot backward flow spinning [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34(Part A): 140-147.
- [21] SU Hongliang, HUANG Liang, LI Jianjun, et al. Formability of AA 2219-O sheet under quasi-static, electromagnetic dynamic, and mechanical dynamic tensile loadings [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 70: 125-135.
- [22] GOGOI S, BANERJEE S, KIRTANIA S, et al. Computational modelling of tensile flow parameters for 2219Al alloys microalloyed with Cd [J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024, 18(4): 2007-2016.
- [23] LU Xiaohong, MENG Xiangyue, MA Chong, et al. Microstructure and mechanical properties of FSW medium thickness 2219 aluminum alloy [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(16): 9072-9080.
- [24] HE Shi, CHEN Shuai, ZHAO Yanqiu, et al. Study on the intelligent model database modeling the laser welding for aerospace aluminum alloy [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 63: 121-129.
- [25] YANG Yangyang, CHEN Hongsheng, ZHOU Jun, et al. Study on interface behavior and mechanical properties of Al/Cu laminated tubes fabricated by strong staggered spinning at room temperature [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 7307-7324.

(编辑 李慧敏)

团队介绍:

西安交通大学智能控制室团队长期围绕“先进成形技术与智能装备”领域的重大科学问题和技术难题开展系统深入研究,团队成员包括教授 3 人、副教授 4 人、助理教授 5 人、工程师 1 人、在读博士生 20 余人、在读硕士生 60 余人。目前,已培养圆满毕业的硕士研究生 136 名(企业工程硕士 13 名)、博士研究生 50 名(交大首届工程博士 1 名)。团队负责人赵升吨,二级教授、国务院政府特殊津贴专家,现任全国数控成形装备联盟副理事长、全国塑性工程学会副理事长、金属成形技术与重型装备全国重点实验室副主任。主持 16 项国家自然科学基金、2 项国家 863 项目,参与国家 16 个重大专项和国家智能制造专项课题中的 7 项,主持和参与的省级科研项目共 20 余项,其他主持和参与的横向课题共 80 余项;发表论文 600 余篇,SCI/EI 收录 400 余篇;申请国家专利 700 余项,已获得授权国家专利 500 余件(包含国际专利 8 件)。团队荣获国家级科技成果二等奖 1 项,省部级科技成果奖 8 项(陕西省科学技术奖一等奖 2 项)。



团队负责人:赵升吨教授



团队合影