

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.001

## 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展

张士宏, 程 明, 宋鸿武, 徐 勇

(中国科学院金属研究所, 沈阳, 110016)

**摘要:** 对于当前航空航天飞行器中广泛存在的金属复杂曲面构件的高性能发展需求, 提出研发针对叶片类零件、大口径薄壁弯管以及复杂钣金构件的楔横轧短流程制坯、颗粒填料辅助推弯成形以及高能率冲击液压成形等精密成形技术, 分别从工艺原理、设备、模具及典型零部件应用等方面对上述技术的研究进展进行阐述和介绍。

**关键词:** 航空航天; 发动机叶片; 大口径薄壁弯管; 复杂钣金构件; 精密成形技术

**中图分类号:** TG394      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)01-0001-11

## Research Progress on Precision Forming Technology for Complex Curved Surface Components in Aerospace

ZHANG Shihong, CHENG Ming, SONG Hongwu, XU Yong

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China)

**Abstract:** Regarding to the current demand of high-performance metal components with complex curved surface which are widely used in aerospace vehicles, the novel precision forming technologies are developed and employed including the short-process blanking of blade parts, granular media filler assisted push bending method for large diameter thin-walled bent tubes and high-energy impact hydroforming of complicated sheet part. In addition, the state-of-the-art of these technologies is introduced from the aspects of process principles, machine, tools, and typical applications.

**Key words:** aerospace; engine blade; large diameter thin-walled bent tubes; complex sheet parts; precision forming technology

伴随着航空航天技术的快速发展, 航空航天器推进系统及承载结构中大量采用了高强轻质合金的复杂曲面构件, 从而有利于装备的轻量化、高精度及整体化的发展需要<sup>[1]</sup>。作为航空发动机中的核心部件, 叶片制造技术正朝向短流程、低成本, 实现高效、精密制造的方向发展。此外, 发动机系统

中具有大量复杂走向的导管系统, 承担燃油输送、滑油输送、空气传输及集束电气等任务。由于需要考虑导管与导管间的关系、导管和发动机附件之间的最小距离以及发动机整体轮廓尺寸, 导管形状较为复杂且结构较为紧凑。在火箭、导弹等运载工具的推进系统中, 也大量采用了复杂导管。由于管路

**基金项目:** 国家自然科学基金(51875548, 51875547)资助项目; 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(SQ2018YFE011170)资助项目; 科技部中国-白俄罗斯科技例会交流(CB02-01, CB02-09)资助项目。

**收稿日期:** 2020-01-18; **修订日期:** 2020-02-05

**作者简介:** 张士宏, 男, 研究员, 主要研究方向有金属板材先进成形技术、精密管材成形技术、塑性加工过程与组织演变数值模拟和智能信息化技术应用等。曾荣获英国机械工程师学会(IMEchE) A.M.Strickland奖; 中国机械工程学会塑性工程分会银砧奖; 中国有色金属工业科学技术奖; 全国有色金属学会一等奖; 国家科技进步二等奖; 第12届数值模拟方法及其在工业成形中应用 O.C. Zienkiewicz 奖等荣誉称号。发表 SCI 论文 130 余篇, 著作 4 部, 获得国家专利授权 30 余项。

**通信作者:** 张士宏, E-mail: shzhang@imr.ac.cn。

**引用格式:** 张士宏, 程明, 宋鸿武, 等. 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 1-11. ZHANG Shihong, CHENG Ming, SONG Hongwu, et al. Research progress on precision forming technology for complex curved surface components in aerospace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 1-11.

众多且设计上要求节省空间,所以不乏一些相对弯曲半径很小的大口径薄壁弯管,避免在有限的空间内管路的相互干涉<sup>[2]</sup>。另外,复杂曲面钣金构件在航空制造业中占有非常重要的地位,构成飞机机体的框架和气动外形,具有总数多、零件尺寸不一、形状复杂、品种多及数量小的特点。据统计,钣金零件约占飞机零件数量的50%、工艺装备数量的65%、制造工作量的20%。可见,钣金零件制造对飞机制造质量、周期和成本有着重要影响<sup>[1,3]</sup>。然而,钛合金、高温合金以及铝合金等典型航空航天材料的室温成形能力较差,导致在加工此类复杂曲面构件时,常出现生产效率低、产品一致性差等缺陷和问题,对传统成形工艺提出了巨大的挑战<sup>[4-5]</sup>。因此,发展复杂曲面构件的精密成形技术具有重要的研究和应用价值。

笔者——中国科学院金属研究所塑性加工先进技术研究团队,针对叶片类零件、大口径薄壁弯管以及复杂钣金构件等航空航天复杂曲面构件,先后开发了楔横轧短流程制坯、颗粒填料辅助推弯成形、高能率冲击液压成形等精密成形技术,并且从材料—工艺—装备—器件等多方位开展了全链条的研究。本文旨在对上述技术的相关研究进展进行综述。

## 1 叶片类零部件楔横轧短流程制坯技术

楔横轧(Cross wedge rolling, CWR)成形技术的工艺原理是将棒材送入带有楔形凸起的模具中间,随着模具运动,模具上的楔子压入棒材表面并使棒材发生转动,从而使棒材发生径向压缩、轴向延伸的局部变形<sup>[6-7]</sup>。楔横轧技术作为一种高效的金属塑性成形技术,是国内外近几十年来发展起来的一种少无切屑、近净成形工艺<sup>[6]</sup>。与传统成形技术相比,它具有金属材料利用率高、生产效率高、环保、产品性能高、生产自动化成本低等一系列优点<sup>[7]</sup>。航空发动机的制造是一项极其复杂的系统

工程,其中最核心的部件当属叶片<sup>[8-9]</sup>。航空发动机叶片的常用材料包括铝合金、钛合金、高温合金等<sup>[10-12]</sup>。这类复杂形状与低塑性材料相互耦合的零件,由于服役环境恶劣,在成形精度、微观组织控制、力学性能和使用可靠性方面有着更高的要求。目前的压气机叶片产品大多采用机械加工或挤压方式来制备锻坯,存在加工效率低、自动化程度低、材料利用率差、难以满足节材降耗和高性能件要求等诸多不足。

笔者近年来对GH4169合金压气机静子叶片楔横轧制坯工艺及组织演变规律进行了深入研究<sup>[10,13-14]</sup>。结果表明,采用楔横轧叶片制坯工艺能够显著提高坯料的尺寸精度且高效省时,通过后续的锻造和无余量精密冷辊轧加工,无须切削和喷丸工序,在大大提高材料利用率和加工效率的同时,可以提高叶片的振动疲劳性能,实现高品质叶片的短流程制造<sup>[10-11,13]</sup>。

### 1.1 楔横轧装备的分类及应用

楔横轧装备主要有如图1所示3种类型:辊式、单辊弧形式和板式,其中应用最广泛的是辊式和板式楔横轧<sup>[6-7]</sup>。相比于板式楔横轧,辊式楔横轧没有空转行程,具有更高的生产效率,但模具制造过程复杂且难以保证精度,成本高。而板式楔横轧具有模具制造过程简单、精度高、成本低;轧件稳定性好;模具耐用性好,使用寿命长;装备操作和调试简单等一系列优点<sup>[15]</sup>。由于板式楔横轧装备存在“回程”过程,一般认为其生产效率会略低于辊式楔横轧装备。有分析表明,对工业生产中应用的板式和辊式楔横轧机进行比较,发现辊式轧机由于更换模具困难、修模困难、设备调试困难等原因,在实践中并不能达到额定的生产效率;而同一操作在板式轧机上占用的时间较少,在相同时间(如一个月)生产同样多零件情况下,板式楔横轧较辊式楔横轧的生产效率要高<sup>[15]</sup>。这也指出了认识上的误区,从机械运动原理上来讲,辊式楔横轧机具有更高的生产效率,但从长期生产实践经验来看板式楔横轧机的生产效率并不低,甚至在一定情况下高于辊式楔横轧机。

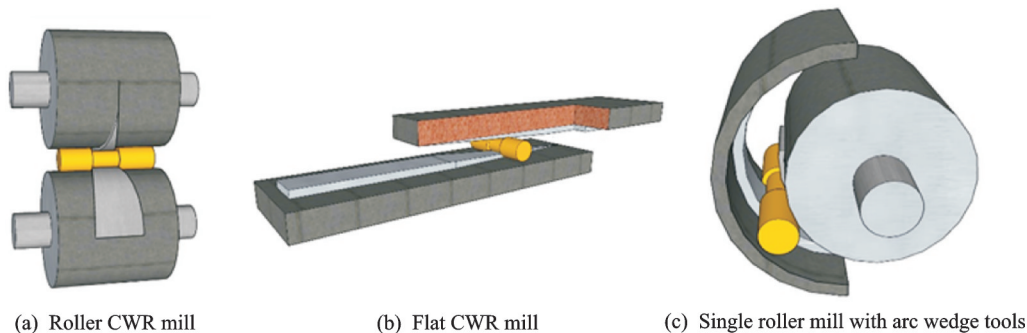


图1 楔横轧机基本类型

Fig.1 Schematic diagram of CWR mill

新产品的生产应用推动了楔横轧工艺的创新发  
展,进一步推动了楔横轧装备的升级更新。目前,白  
俄罗斯科学院物理技术研究所、白俄罗斯 AMT 公  
司、捷克的 Smeral 公司、德国的 Beche 公司、俄罗斯  
的全俄冶金机械制造科研设计研究所以及中国的北  
京科技大学、北京机电研究所等单位都在致力于楔  
横轧装备的研制<sup>[15]</sup>。中国科学院金属研究所与白俄  
罗斯科学院物理技术研究所合作,共同研制了精度  
高、控制性好的新型板式楔横轧技术及装备。

## 1.2 叶片类零件楔横轧制坯工艺研究

笔者基于高温合金材料冷热塑性成形技术方  
面的积累,提出了高温合金压气机叶片连续回转成  
形工艺,即楔横轧制坯-辊轧成形的复合加工技术  
(图 2)。首先利用数值模拟方法分析了 GH4169 合  
金楔横轧成形工艺过程(图 3),然后分别在辊式楔  
横轧机与板式楔横轧机(图 4)上进行了不同变形量  
条件下 GH4169 合金楔横轧成形试验,获得不同尺  
寸规格的 GH4169 合金轧件,如图 5 所示。

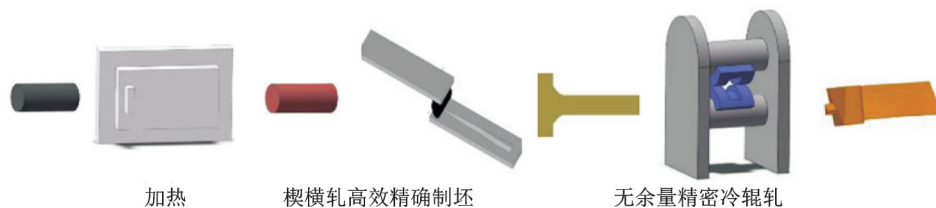
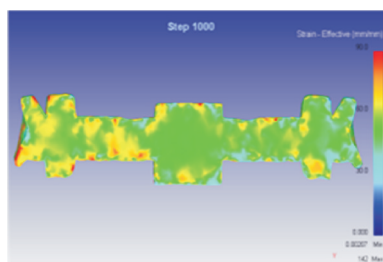
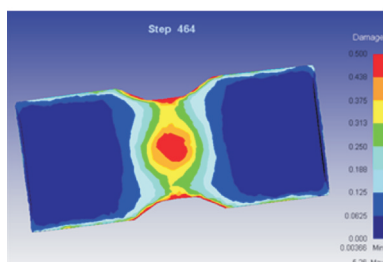


图 2 压气机叶片楔横轧制坯-辊轧成形工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of CWR-roll forming process for compressor blade



(a) Distribution of effective- strain



(b) Distribution of damage

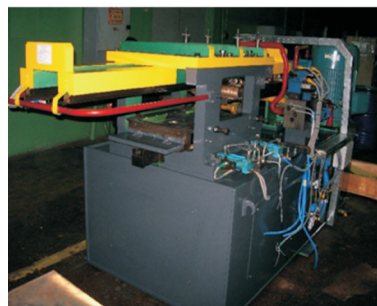
图 3 GH4169 合金楔横轧成形过程数值模拟

Fig.3 Numerical simulation on CWR process of GH4169 alloy

研究表明,楔横轧的变形特点是导致  
GH4169 合金组织均匀和动态再结晶机制不同的  
主要原因,较大的断面收缩率有利于组织均匀化;  
轧件表面以非连续动态再结晶机制为主,而心部以  
连续动态再结晶机制为主<sup>[10]</sup>。在 GH4169 合金楔  
横轧加工过程中,随着动态再结晶的发生,晶体取  
向逐渐变得随机化分布;轧制表面大角度晶界数  
量较轧件心部多,轧件表面织构强度变化不大,轧  
件心部织构强度明显增强<sup>[10,14]</sup>。以上为实现  
GH4169 合金叶片类零件楔横轧制坯、精确控制变  
形组织及性能提供了理论依据。



(a) H630 type roller CWR mill—IMR



(b) Flat CWR mill—PhTI NAS B

图 4 楔横轧机

Fig.4 CWR mill



(a)  $\Psi=40\%$



(b)  $\Psi=60\%$



(c)  $\Psi=80\%$

图 5 GH4169 合金楔横轧件

Fig.5 CWR parts of GH4169 alloy



## 2 大口径薄壁管颗粒填料辅助推弯成形技术

弯管构件具有空心截面,适用于作为输送物料的载体,同时还具有轻量化、强韧化和低耗高效等属性,在航空航天、汽车、船舶等多个领域具有十分广泛的应用。特别是航空航天发动机及运载火箭管路系统中配置了大量大口径、相对壁厚小、相对弯曲小的导管。大口径薄壁管是指管材直径 $D>30\text{ mm}$ ,且相对壁厚薄壁 $D/t>30$ 的管材<sup>[16]</sup>。随着管材直径的增加或者壁厚的减小,弯曲成形技术难度极大,对于航空航天等领域应用到的许多超薄壁(相对壁厚 $D/t\geq 70$ )、大口径( $D>100\text{ mm}$ )弯管,工程上主要采用拼焊法成形,但焊接变形不仅影响导管尺寸精度,而且降低其工作精度、抗疲劳性和耐蚀性,迫切需求无焊缝整体弯头<sup>[17]</sup>。目前,传统的弯曲方法很难做到一体成形,无法满足航空航天等领域。

笔者在固体颗粒介质压力成形技术基础上,提出并发展了固体颗粒填料辅助推弯成形工艺,经过十几年的研究获得了技术突破,已经成形了多种规格(30, 70, 120和144 mm)的航天用不锈钢超薄壁(相对壁厚 $D/t>100$ )弯头,为航天用超薄壁小弯曲半径整体弯管和航空超薄壁导管弯头的成形提供了可行的工艺技术支撑。

### 2.1 颗粒填料辅助推弯成形原理

颗粒填料辅助推弯成形是在传统推弯工艺基础上,将颗粒填料填充于管材并对管材进行弯曲成形的技术,其成形原理如图6(a)所示。在管材弯曲成形之前,按照规定尺寸下料的原始管坯内部填充颗粒填料,随后将管坯放入导套中。弯曲成形时,冲头下行,推动颗粒填料和管材进入模具弯曲型腔,从而实现薄壁管材的弯曲变形,图6(b)给出了管材弯曲成形后的工艺示意图。管材在离散填料辅助推弯成形过程中的受力情况包括冲头的轴向压应力、弯曲模具的作用力与离散填料的作用力。弯曲模具的作用力包括径向力和摩擦力,离散填料的作用力也包括径向力和摩擦力。在冲头的轴向压力、弯曲模具的径向力和离散填料径向力共同作用,管材的材料处于三向压应力状态,能提高金属塑性成形能力,保证推弯顺利进行。

由于颗粒介质属于典型的离散填料,因此计算颗粒填料的变形需要采用离散单元法(Discrete element method, DEM)进行数值模拟。如图7所示的是颗粒系统的弯曲变形过程中某一时刻,系统内部形成的接触力网和弯曲内壁的压力分布图。从

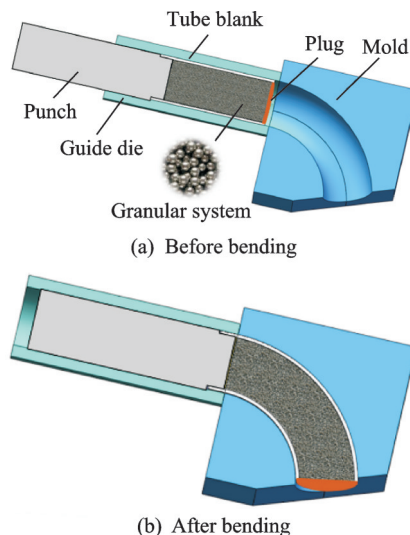


图6 颗粒填料辅助推弯成形原理图

Fig.6 Schematic diagram of granular media filler assisted push bending process of a thin-walled tube

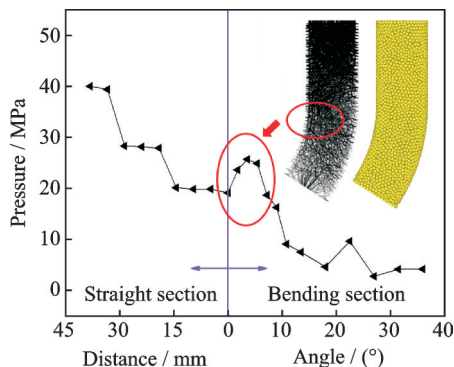


图7 颗粒系统“变形硬化”现象

Fig.7 Bending deformation strengthening of granular system

图中可以看出,颗粒系统受压缩后内部产生接触力网,弯曲颗粒系统在弯曲变形区附近的内压力明显高于弯曲变形的其他区域。

颗粒系统变形区接触力明显增大的现象类似于金属材料的加工硬化或应变硬化现象。不难看出,在颗粒介质辅助薄壁管推弯成形工艺中,颗粒系统这种“硬化现象”对于包裹在其外部且同样处在弯曲变形区的管件将起到重要的支撑作用。这对抑制弯管内侧壁失稳起皱和横截面椭圆畸变起到关键作用<sup>[18]</sup>。

本文建立了有限单元法(Finite element method, FEM)和离散单元法(DEM)的耦合算法,实现了颗粒填料辅助薄壁管材推弯成形过程的数值模拟。耦合模型主要为:在DEM中,壁面单元上的接触力以集中力的形式均等地施加在FEM中相应管单元的节点上。而在FEM中,管单元上的节点坐标用于在DEM中创建相应的壁面单元<sup>[19]</sup>。如图

8所示,显示了3种不同直径的颗粒填料下DEM和FEM耦合模型和实验的对比。从图中可以看出,耦合模型可以很好地预测薄壁弯管成形件的内侧壁起皱缺陷。

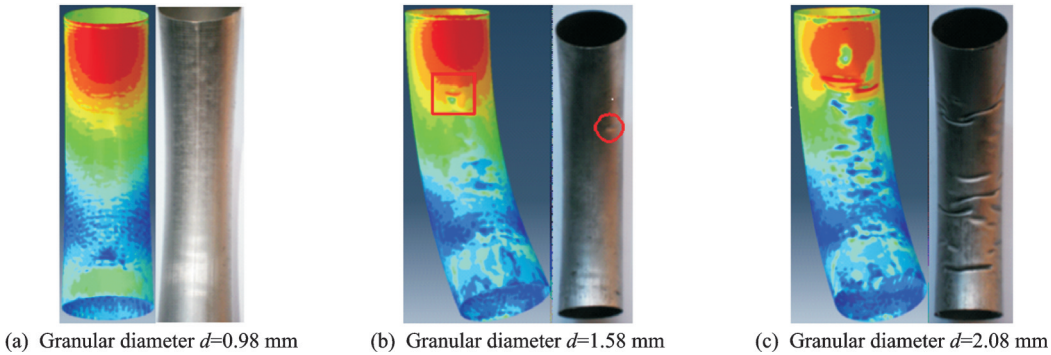


图 8 颗粒填料辅助薄壁管材推弯成形 DEM 和 FEM 耦合模型预测结果与实验对比<sup>[19]</sup>

Fig.8 Simulation results of coupling DEM and FEM, and experimental results in granular media filler assisted push bending process of thin-walled tubes<sup>[19]</sup>

2.2 颗粒填料辅助推弯成形模具及设备

大口径薄壁管颗粒填料辅助推弯成形模具及设备如图 9 所示。首先将液压机上台面升起,固定在上台面的冲头随之上行,如图 9(a)所示;随后将弯曲模具打开,即将弯曲模具左右分离,如图 9(b)所示;然后,将装满颗粒填料的管坯置于引导模具

或弯曲模具的直线段型腔内,如图 9(c)所示;最后将弯曲模具闭合,用螺栓将弯曲模具左右两部分锁紧,液压机下同上台面降下,冲头下行,将装填满颗粒填料的管坯一起推入进弯曲模具的弯曲型腔内,完成对大口径薄壁管材的弯曲成形,如图 9(d)所示。

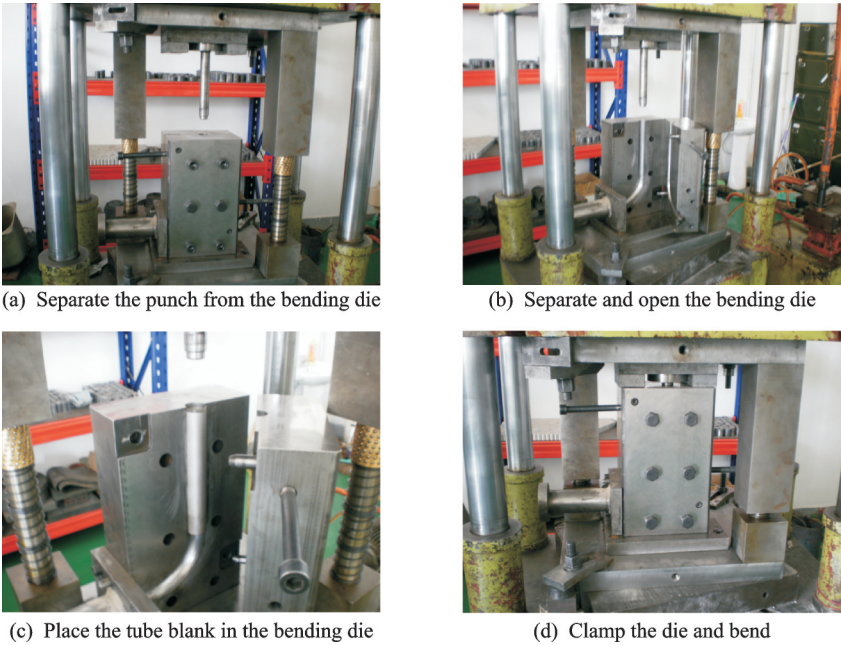


图 9 颗粒填料辅助薄壁管材推弯成形模具设备及实验流程<sup>[18]</sup>

Fig.9 Experimental tools of granular media filler assisted push bending process and the experimental process<sup>[18]</sup>

2.3 大口径薄壁管颗粒填料辅助推弯成形工艺实例

离散颗粒填料具有良好的流动性和内压力非均布特性,在管材弯曲过程中,离散颗粒填料产生的非均布内压能够有效抑制管坯内侧起皱,减小了横截面椭圆形畸变。离散填料推弯成形新工艺为成形大口径薄壁管提供了新的选择。最终,采用颗粒填料辅助推弯工艺,整体成形了多种规格(外径

30,70,120,144 mm)的航天用不锈钢超薄壁(相对壁厚 0.01)、小弯曲半径(相对弯曲半径 1.5)弯头<sup>[18-22]</sup>,如图 10 所示。

图 11 为外径 144 mm、原始壁厚 2 mm 的弯管的壁厚分布和横截面尺寸分布情况。成形的弯头最小壁厚 1.86 mm,最大减薄率 7%,横截面椭圆度 $((D_{\max} - D_{\min})/D_0, D_{\max}, D_{\min}, D_0$ 分别为弯管成形后最大直径、最小直径以及管坯原始直径)为 1.1%。

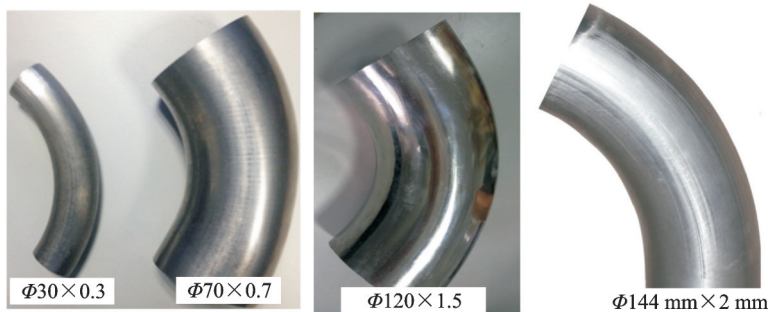


图 10 大口径薄壁管颗粒填料辅助推弯成形试验件

Fig.10 Thin-walled bent tubes formed by the new method

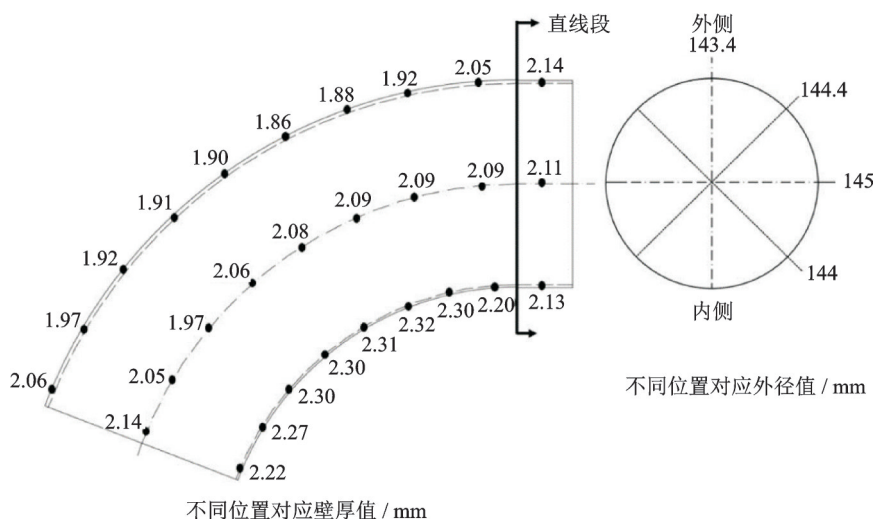


图 11 典型弯头壁厚分布以及横截面直径分布

Fig.11 Wall thickness and cross section diameter of a typical thin-walled bending tube

### 3 复杂钣金构件高能率冲击液压成形技术

复杂曲面钣金构件在航空制造业中占有较大比重,具有形状复杂、零件局部拉深比大、结构和尺寸要求高等特点。该结构类型的钣金构件通常采用的是铝合金、钛合金等难变形材料,其塑性低、室温成形性差,并且由于工艺对于热处理次数的严格限制,该种零件的成形具有较大难度。传统的成形方式主要是落锤成形,利用重物下落来提供成形能量,然而该成形方式具有成形率低、废品多、零件精度差、材料利用率低、模具寿命短等诸多缺点。而冲击液压成形作为一种先进的液压成形工艺,将液体的柔性和冲击波动加载特性进行有机结合,有效提高难变形金属材料的成形性和进给补料,适宜加工复杂曲面钣金构件。

#### 3.1 冲击液压成形的工艺原理

冲击液压成形的基本原理如图 12 所示,通过气体或者液体动力源提供瞬时的初始能量,对冲击体进行加速,高速运动的冲击体打击液室中的液态

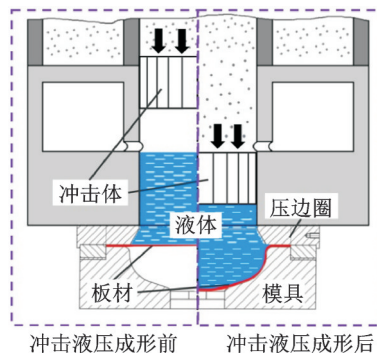


图 12 冲击液压成形的工艺原理

Fig.12 Principle of impact hydroforming

介质,产生瞬时的高压以冲击波的形式向材料传播,冲击波转载到液-固界面后和待成形坯料进行相互作用,最终使板或者管型坯料发生塑性变形,得到指定形状和尺寸的零件。该工艺过程的典型特征为瞬时波动高压,其加载时间和可达到的瞬时压力区间为  $100\sim 500\ \mu\text{s}$ ,  $500\sim 1\ 000\ \text{MPa}$  [23]。

#### 3.2 高能率冲击液压成形设备的设计和研制

通过气-液复合驱动技术的创新性应用,解决冲击能量不足的问题,气体达到指定压力之后进行释放,高压气体驱动液体,液体带动冲击体进行冲



击,可以实现的冲击动能达到 225 kJ,同时可以实现高速高能量冲击动力源的输出及精确控制;此外通过高速油缸无密封圈、冲击行程下腔无油压、液室排气孔的优化设计等实现冲击动态减阻;采用伺服控制,并配合快速可移动工作台设计,实现动态锁模和动态变压边力的精确调控。

如图 13 所示,该新型设备按功能可划分为动力源、加速区、成形区和控制区 4 个主要部分,以及相关液压系统、电控系统、机身结构等。该设备可实现复杂管板零件的高效成形加工;可实现金属材料动态力学性能实验;也可建立动态数据采集系统,包括被冲击液体压力随时间变化数据、冲击体速度随时间变化数据;还可实现高能率冲击成形的关键工艺参数的程序化控制系统,包括冲击能量、压边力等,从而实现成形工艺的控制。该设备的主要技术创新点在于:(1)基于固-液-力多场耦合模型计算的设备关键工艺参数设计方法;(2)采用高压蓄能组合装置和新型驱动结构实现高速高能量冲击源的输出及精确控制;(3)冲击体加速过程的动态减阻技术<sup>[24]</sup>。

图 13 新型高能率冲击液压成形设备  
Fig.13 Novel impact hydroforming machine with high energy efficiency

3.3 基于固-液耦合有限元模拟的冲击液压成形性能评价

冲击液压成形是一种瞬间完成的工艺,为了研究其动态成形过程,并有效地分析材料在此工艺下的成形性能,采用基于任意的拉格朗日欧拉单元的固-液耦合有限元模拟,应用 Gruneisen 液体状态方程对冲击过程中液体的行为进行准确描述,表征其在动态加载下以冲击波的形式对待成形板材进行作用;分别从速度路线和能量路线进行冲击的定量描述,同时应用改进的 John-Cook 本构模型对材料硬化行为进行描述,更加准确地描述冲击载荷下材料的延伸率和强度;并且利用流体结构互动算法 (Fluid structure interaction, FSI) 分别实现冲击体和液态介质,液态介质和成形板材之间的耦合,实

现能量有效传递<sup>[25-27]</sup>。

板材的冲击液压成形性能评价需要充分考虑不同应变速率和不同拉深比对板材成形性能的影响,需要同时考虑拉深比对冲击能量以及拉深比对拉深深度的定量化影响。基于课题组的前期研究,采用固-液耦合有限元模拟可以实现冲击过程中材料成形性能的评价,并开展相应的冲击液压成形实验进行验证,对该种工艺条件下成形性进行系统研究。所采用的成形性能评价实验模具几何模型如图 14 所示,模具主要包括上模、固定圈、下模、定位圈、导向圈以及模座,凹模型腔直径为 38.5 mm,凹模圆角半径为 5 mm,采用的材料为二系铝合金 2B06。

图 14 冲击液压成形性能评价模具几何模型  
Fig.14 Geometrical model of dies using formability evaluation of impact hydroforming

表 1 所示为成形性能评测所采用初始坯料的直径和相应拉深比,分别对不同拉深比的试样进行冲击液压成形实验,通过精确控制冲击液压成形速度,使试样实现不完全拉深、完全拉深和开裂 3 种不同的成形状态,每个成形状态进行 3~5 次重复实验。通过固-液耦合有限元模拟和相应冲击液压成形实验获得的成形试样分别如图 15(a) 和 (b) 所示。

表 1 成形性能评测试样初始直径和对应拉深比

Table 1 Initial diameter and relative deep drawing ratio for formability evaluation

圆板直径/mm	51.2	54.7	57.8	63.9	70.5	77.0	83.6
拉深比	1.42	1.51	1.60	1.77	1.95	2.13	2.31

当拉深比小于 1.77 时,只要冲击能量足够,板材可以完全拉深进入模具型腔而不发生开裂缺陷;而当拉深比为 1.95 时,如果冲击能量控制合理,板材能够实现完全拉深,但是如果能量过高,容易发生开裂的缺陷;而板材在 2.13 和 2.31 两个拉深比下进行变形,能量相对较小时只能实现不完全拉深,而能量过大时即发生开裂,没有完全拉深的可能性。相应实验获得的试样从形态和成形规律上

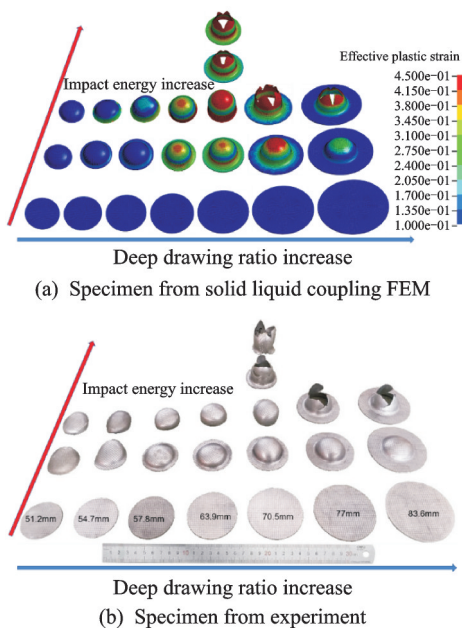


图15 冲击液压成形性能评价试样

Fig.15 Specimen of formability evaluation for impact hydroforming

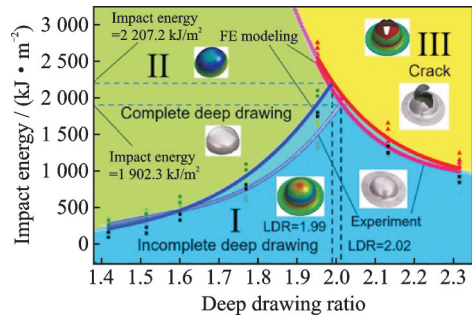
与有限元模拟基本一致。当拉深比大于2.02时,试样发生开裂时通常分裂为3~4部分。另外,由模拟结果发现,等效塑性应变较大的区域主要为试样底部中心区域和凹模圆角相对应位置。

以前文叙述的固-液耦合有限元模拟和相应实验为基础,建立起冲击能随拉深比以及拉深深度比随变形比的动态变化曲线,具体分别如图16(a)和(b)所示。

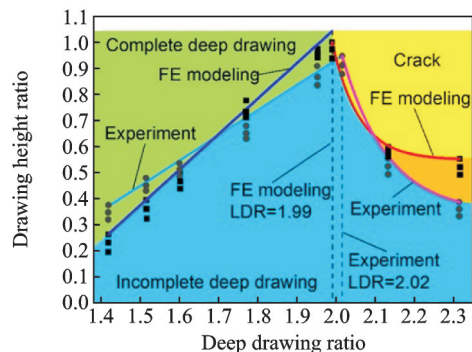
经由固-液耦合模拟和冲击液压成形性实验获得的极限变形比分别为1.99和2.02,均大于准静态条件下板材的变形比(约1.95),并且确定了不完全变形、完全变形、开裂的边界区域,得到了该冲击体质量级别下的冲击能量与变形比之间的定量关系,为工艺量化设计提供理论基础。同样,采用固-液耦合有限元模拟和实验的方式分别获得的极限成形深度比分别为1.04和0.95,并且获得两者量化关系,为冲击液压成形工艺不同成形深度的设计提供理论支撑。冲击能量、拉深深度比随拉深比变化曲线定量描述分别如下

$$E_{\text{impact}} = \begin{cases} -18807.21 + 38792.44D_{\text{ratio}} - 27104.02D_{\text{ratio}}^2 + 6488.88D_{\text{ratio}}^3 & D_{\text{ratio}} \leq 1.99 \\ 800.47 + 8.35e70.00402D_{\text{ratio}} & D_{\text{ratio}} > 1.99 \end{cases} \quad (1)$$

$$D_{\text{hratio}} = \begin{cases} -1.67 + 1.36D_{\text{ratio}} & D_{\text{ratio}} \leq 1.99 \\ 0.55 + 2.15E12(4.27E - 7)^{D_{\text{ratio}}} & D_{\text{ratio}} > 1.99 \end{cases} \quad (2)$$



(a) Variation curves of impact energy with deep drawing ratio



(b) Variation curves of deep drawing height ratio with deep drawing ratio

图16 材料冲击液压成形性评价方法和成形性曲线

Fig.16 Formability evaluation method and formability curves under impact hydroforming

### 3.4 复杂航空薄壁口框零件的工艺开发

以复杂航空铝合金薄壁口框零件为代表的复杂零件,通常具有多于两个腔室的特征,拉深比通常可以超过3.5,很难采用冲压、落压等传统方式进行成形,而如果采用液压成形,需要超过90 MPa的成形压力,经常会出现起皱、开裂等缺陷。不论使用哪种成形方法,都无法一次成形,因此需采用多道次成形。第一道次采用准静态液压成形技术进行预成形,通过预成形改善和控制材料在两道次成形过程中的流动和分配。第二道次成形在预成形的基础之上,使用冲击液压成形进行最终成形。预成形零件在原有零件设计的基础之上加大了两个凹腔内侧底面圆角部位的尺寸,从2 mm增加到了20 mm,扩大了10倍。而采用充液拉深预变形并且配合冲击液压成形的工艺(相应的模具结构设计如图17(a)和(b)所示),结合固-液耦合有限元模拟的优化,可以实现该种类型的复杂结构零件的成形,利用冲击液压成形的波动冲击和柔性的复合作用,实现材料的充分补料和成形性能提高,有效避免难变形材料大拉深比成形条件下起皱和开裂等缺陷,尤其是小圆角填充效果非常好,制备的航空口框零件如图18所示<sup>[28-29]</sup>。

利用所研发的新型冲击液压成形技术成功实现了航空铝合金复杂薄壁口框零件的成形。该技



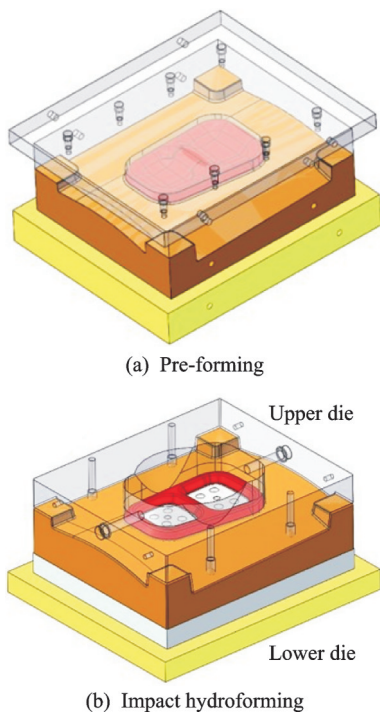


图 17 冲击液压成形实验模具

Fig.17 Dies of impact hydroforming process



图 18 冲击液压成形制备的航空复杂曲面钣金构件

Fig.18 Complex-curved sheet component used in aeronautic field by impact hydroforming

术制造的零件产品具有更均匀的壁厚减薄率、更好的小圆角填充能力,并且能够有效地抑制回弹。与现有落锤生产技术相比,该技术可将传统铝合金板材成形过程中8道次以上的人工辅助制造改变为2道次的自动化生产过程,无须中间工艺热处理,生产效率提高了400%。此外,该技术也可用于需要同等成形能量的管材成形、汽车板件成形、板材与管材的冲孔等工序。

## 4 总结与展望

复杂曲面构件的精密成形技术在航空航天制造工程中日益发挥重要作用。然而,目前围绕新技术的研发和应用仍然存在着较多亟待解决的技术难题。对大口径曲面薄壁件填料辅助推弯成形技术而言,在管材弯曲过程中影响颗粒填料非均布内压分布的因素、调控方法还有待研究,颗粒填料辅

助推弯成形管材的成形极限尚不明确。因此,有必要研究分析其影响内压特征的因素以及其对弯管缺陷的作用机制和规律,掌握内压调控方法,明确该工艺的可成形极限。而楔横轧工艺已广泛应用于以黑色金属为主的汽车和工程机械轴类件制造领域,但在钛合金、高温合金、高强铝合金等难变形材料主导的航空航天部件制造领域,目前仍不能完全满足产品的成形精度及组织性能要求。因此,揭示楔横轧变形过程中这类材料的组织演变规律以及工艺与性能的关联机制将是未来的研究重点。高能率冲击液压成形技术能够有效提高难变形材料的成形能力,产品精度高、工艺流程短,对于航空航天复杂曲面构件的成形具有显著优势。但是对于钛合金、铝锂合金等高强轻质材料的成形,对冲击能量和速度等关键工艺参数的精确调控提出了更高的要求。此外,航空航天领域应用的大多数钣金零件的尺寸较大。因此,有待开发大型化和智能化的冲击液压成形精密装备。

综上所述,开展复杂曲面构件精密成形技术的研发是在传统塑性加工理论基础上的不断深化和拓展,并且有望摆脱以往依靠人工干预的落后工艺,加速包括新原理、新工艺、新设备和新产品在先的先进成形技术的应用,解决中国在航空航天复杂曲面构件加工中的关键共性技术问题,提升航空航天制造业的整体技术水平,进一步推动国家安全保障水平的提升。

## 参考文献:

- [1] 王海宇. 飞机钣金工艺学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.  
WANG Haiyu. Aircraft sheet metal technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013.
- [2] 刘欣, 王国庆, 李曙光, 等. 重型运载火箭关键制造技术发展展望[J]. 航天制造技术, 2013(1): 1-6.  
LIU Xin, WANG Guoqing, LI Shuguang, et al. Forecasts on crucial manufacturing technology development of heavy lift launch vehicle[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(1): 1-6.
- [3] 刘仁春. 航空关键零部件制造工艺及未来先进工艺发展趋势[J]. 金属加工, 2018, 14: 4-7.  
LIU Renchun. Aviation key parts manufacturing process and future advanced process development trends [J]. Metal Working, 2018, 14: 4-7.
- [4] 陈子勇, 刘莹莹, 靳艳芳, 等. 航空发动机用耐650℃高温钛合金研究现状与进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(19): 22-30.

- CHEN Ziyong, LIU Yingying, JIN Yanfang, et al. Research on 650 °C high temperature titanium alloy technology for aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(19): 22-30.
- [5] 成靖, 李晓军, 曾一畔, 等. 航空复杂钣金构件冲压成形的研究与应用[J]. *锻压技术*, 2018, 43(12): 25-29.
- CHENG Jing, LI Xiaojun, ZENG Yipan, et al. Research and application of stamping forming for complex sheet metal parts in aviation industry[J]. *Forging and Stamping Technology*, 2018, 43(12): 25-29.
- [6] 胡正寰. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- HU Zhenghuan. Forming technology and simulation of cross wedge rolling parts[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [7] 束学道. 楔横轧理论与成形技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- SHU Xuedao. Cross wedge rolling theory and forming technology[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [8] 陈光. 航空发动机结构设计分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.
- CHEN Guang. Analysis of aeroengine structure design [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2014.
- [9] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016(21): 50-56.
- LIU Weiwei. Research progress on key manufacturing technologies for aeroengine blades [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(21): 50-56.
- [10] 甘洪岩, 陈岩, 程明, 等. GH4169 合金航空叶片类零件楔横轧制坯工艺的研究[J]. *锻造与冲压*, 2017(21): 22-25.
- GAN Hongyan, CHEN Yan, CHENG Ming, et al. Research on cross wedge rolling process for manufacturing GH4169 alloy blade[J]. *Forging and Stamping*, 2017(21): 22-25.
- [11] 李俊玲. TC6 钛合金叶片楔横轧成形与微观组织演变规律研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- LI Junling. Research on the forming and microstructure evolution during cross wedge rolling of TC6 alloy blade[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [12] 张宁, 王宝雨, 胡正寰. 楔横轧成形 GH4169 合金的热力耦合数值模拟[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(11): 1396-1401.
- ZHANG Ning, WANG Baoyu, HU Zhenghuan. Numerical simulation of thermo-mechanical coupling of GH4169 alloy in cross wedge rolling[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(11): 1396-1401.
- [13] 邵清安, 王丹, 关红, 等. 一种压气机双安装板静子叶片坯料成形方法: CN108080544A [P]. 2018-05-29.
- TAI Qingan, WANG Dan, GUAN Hong, et al. Method for manufacturing static blade preform of compressor: CN108080544A [P]. 2018-05-29.
- [14] 甘洪岩, 程明, 宋鸿武, 等. GH4169 合金楔横轧微观组织演变及动态再结晶机制[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(11): 3556-3562.
- GAN Hongyan, CHENG Ming, SONG Hongwu, et al. Dynamic recrystallization and microstructure evolution of GH4169 alloy during cross-wedge rolling[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(11): 3556-3562.
- [15] 瓦列里·雅科夫列维奇·休金, 格拉日娜·瓦列里耶夫娜·科热夫尼娃. 板式楔横轧工艺及装备[J]. *锻压技术*, 2009, 34(6): 4-7.
- SHCHUKIN V Y, KOZHEVNIKOVA G V. Technics and equipment of flat wedge cross-wedge rolling [J]. *Forging and Stamping Technology*, 2009, 34(6): 4-7.
- [16] 曾元松. 航空钣金成形技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- ZENG Yuansong. Aeronautical sheet metal forming technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [17] 鄂大辛, 周大军. 金属管材弯曲理论与成形缺陷分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- E Daxin, ZHOU Dajun. Metal tube bending: Theory and forming defects analysis[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016.
- [18] 刘海. 密集颗粒系统微观接触力计算的静力学方法及应用[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2016.
- LIU Hai. Statics method for simulation of contact forces in dense granular system and its application [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [19] LIU Hai, ZHANG Shihong, SONG Hongwu, et al. 3D FEM-DEM coupling analysis for granular-media-based thin-wall elbow tube push-bending process[J]. *International Journal of Material Forming*, 2019, 12: 985-994.
- [20] 陈仕清. 特薄壁金属管件填料推弯成形新工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- CHEN Shiqing. Research on a new process of filler push bending for very thin metal tubes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [21] LIU Hai, ZHANG Shihong, CHENG Ming, et al. DEM simulation of bead packs as fillers in thin-wall

- tube push bending process[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1532: 708-713.
- [22] JIANG Weihao, XIE Wenlong, SONG Hongwu, et al. A modified thin-walled tube push-bending process with polyurethane mandrel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106: 2509-2521.
- [23] 徐勇, 张士宏, 马彦, 等. 新型液压成形技术的研究进展[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5): 7-14.
- XU Yong, ZHANG Shihong, MA Yan, et al. Hydroforming technology: State-of-the-arts and recent developments[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(5): 7-14.
- [24] MA Yan, XU Yong, ZHANG Shihong, et al. Investigation on formability enhancement of 5A06 aluminium sheet by impact hydroforming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67: 281-284.
- [25] CHEN Dayong, XU Yong, ZHANG Shihong, et al. A novel method to evaluate the high strain rate formability of sheet metals under impact hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019. DOI: 10.1016/j.jmatprotec. 2019. 116553.
- [26] ZHANG Shihong, CHEN Dayong, XU Yong, et al. High strain rate formability of AA2B06-O alloy during impact hydroforming[C]//Proceedings of NUMIFORM2019: The 13th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. New Hampshire, USA: [s.n.], 2019: 349-352.
- [27] XU Yong, EI-ATY A A, ZHANG Shihong, et al. Effect of novel impact hydroforming technology on the formability of Al alloys[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/651/1/012053.
- [28] ZHANG Shihong, MA Yan, XU Yong, et al. Experimental investigation of novel impact hydroforming technology on sheet metal formability[C]//Proceedings of the 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes. Tokyo, Japan: IOP, 2018.
- [29] ZHANG Shihong, MA Yan, XU Yong, et al. Effect of impact hydroforming loads on the formability of AA5A06 sheet metal[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/418/1/012114.

(编辑: 胥橙庭)