

钣金零件橡皮囊液压成形技术研究现状*

惠小鹏^{1,2}, 万政², 于长旺², 李小强², 李东升²

(1. 中航飞机股份有限公司, 西安 710089;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 橡皮囊液压成形是钣金成型的主要方法之一, 在飞机上有大量橡皮囊液压成形的钣金零件。橡皮囊液压成形工艺制造水平的提升, 能大幅提高钣金零件的表面质量和疲劳寿命, 从而改善飞机的整体性能。针对国内外橡皮囊液压成形工艺的研究现状进行总结, 介绍了橡皮囊液压成形工艺的特点及应用领域, 重点从钣金材料成形性能及工艺参数、成形缺陷、有限元仿真建模等方面综述了橡皮囊液压成形工艺的相关研究成果, 对今后开展橡皮囊液压成形技术研究提供指导。

关键词: 橡皮囊液压成形; 钣金零件; 工艺参数; 成形缺陷; 有限元仿真

Research and Application Status of Rubber Fluid Forming Technology for Sheet Metal Parts

HUI Xiaopeng¹, WAN Zheng², YU Changwang², LI Xiaoqiang², LI Dongsheng²

(1. AVIC Aircraft Co. Ltd., Xi'an 710089, China;

2. Institute of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Rubber fluid forming is one of the main methods of sheet metal forming, there are a large number of sheet metal parts with rubber fluid forming in plane. By improving the manufacturing level of the rubber fluid forming, the surface quality and fatigue life of sheet metal parts can be greatly improved, which greatly improves the overall performance of the aircraft. In this paper, the development of rubber fluid forming technology at home and abroad is researched, the process characteristics and application status of rubber fluid forming technology are introduced, the relevant research results about forming performance, process parameters, forming defects, finite element simulation model of rubber fluid forming process are introduced in detail to provide guidance for the future research of the rubber fluid forming technology.

Keywords: Rubber fluid forming; Sheet metal part; Process parameter; Forming defect; Finite element analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.14.057

目前, 国内外数字化设计制造技术迅猛发展, 国际航空制造企业在数字化制造方面取得了实质性的进展。在国内, 飞机钣金零件加工还停留在手工成形、手工修正的技术层面。

橡皮囊液压成形是利用高压油和天然橡胶的流动性来进行板料成形的技术, 和一般的冲压、落压工艺相比, 具有生产效率高、表面质量优、操作安全可靠、工成本低等优点。

在飞机的结构件中, 有 30%~50% 的零件都是钣金件, 在钣金零件的成形中, 橡皮囊液压成形在飞机框、肋、腹板零件的成形中占到 50% 左右, 同时还有部分零件用橡皮垫成形, 橡皮囊液压成形能占到 70% 左右。

飞机钣金零件液压成形后, 由于回弹等缺陷会影响零件的外形尺寸。最终导致零件装配时, 出现了装配的不协调、导致装配现场敲修较多等问题。

根据大型客机的性能需求, 飞机的结构强度与疲劳寿命必须得到充分保障。橡皮囊液压成形工艺的制造水平的提升, 能带来钣金零件表面质量和疲劳寿命的大幅提高, 极大地改善飞机的整体性能。橡皮囊液压成形过程对于不同类型的零件也比较复杂, 因而需要不断地进行研究积累, 方能达到真正的精密成形过程。

本文旨在对国内外橡皮囊液压成形工艺的研究现状进行调研和总结, 重点从钣金材料成形性能及工艺参数、成形缺陷、有限元仿真建模等方面综述相关研究成果, 对提高钣金零件的一次加工合格率, 对于降低操作工人的劳动强度, 提高零件加工效率, 缩短新研制飞机

* 基金项目: 部门预先研究项目(513180102)。

的研制周期有着重要的意义。

1 橡皮囊液压成形工艺的国内外应用现状

橡皮囊液压成形过程中利用充入液压油的橡皮囊提供成形力,使橡胶软模向刚性模具(或凹模)流动充填或逐渐包覆,从而实现零件的成形。在零件液压成形过程中,橡皮囊是柔性流动的,起到了传压介质的作用,坯料在液压过程中所受压力随着零件变形的增加越来越大。

在国外现代化的飞机钣金零件加工企业中,钣金零件大量采用了橡皮囊液压成形技术,在我国主要飞机制造企业,橡皮囊液压工艺占到 35% 左右。随着国内高校企业对橡皮囊液压技术的深入研究,在进一步掌握液压技术的基础上,该工艺的使用会越来越广泛。

国外的橡皮囊液压成形工艺已经达到了颇为完善的地步:零件手工敲修量要求严格,基本靠高压机床一次或两次成形即可完成;成形缺陷问题一般依靠模具设计来解决:对于起皱问题,设计了增压块与消皱块等部件;针对下陷结构,在工装模具中考虑了模块化、可重用的侧压块结构;在大多数模具中已考虑了回弹量的补偿,并通过试验积累了常用材料的回弹量数据。

反观国内,所有的主机厂都进口了先进的高压橡皮囊液压机,在硬件设备上并不落后,但制造能力还停留在较低的水平,主要体现在:

- (1) 零件成形的几何精度较低,影响后续装配;
- (2) 手工敲修量大,表面质量差;
- (3) 生产工序较多,效率低。

目前的工序为“退火态成形—手工校形—淬火热处理—新淬火态校形—时效强化”,其中反复的“成形”和“手工校形”特别影响工作效率。

2 橡皮囊液压成形研究现状

橡皮垫成形逐渐发展到了现在的橡皮囊液压成形,研究人员并没有明显区分橡皮囊和橡皮垫成形工艺,尤其是相通之处,例如工艺参数、成形缺陷以及建立仿真模型等方面。这里将这两种成形方式统称为橡皮囊液压成形,综述其研究现状。

国内外对橡皮囊液压成形进行了大量的研究工作,主要是通过理论分析、试验加工与数值模拟等手段对其成形性能、成形的缺陷以及如何优化工艺参数进行研究。

2.1 成形性能及工艺参数研究

自从橡皮囊液压成形技术使用以来,研究人员就开始对其成形性能以及工艺参数进行了大量细致的研究。

最早的是 Browne 等^[1]通过试验方法对橡皮囊液压成形进行研究。通过在 100t 液压机上采用橡皮垫成形

工艺制造了飞机的零件,并进行了多次试验,研究了摩擦系数对成形的影响,以及为防止零件起皱或破裂所需的夹持力与板料材料的关系。

Thiruvarduchelvan 等^[2]设计并制造了一种简化的橡皮囊液压成形机床,机床通过 10000 psi (68.95 MPa) 的液压泵和卸压阀提供成形所需的恒定压力,并采用了由橡胶制成的简易橡皮囊,将凸模安装在单动冲床上,如图 1 所示。他们在该机床上对铜质板料进行了拉深成形,发现铜质板料的拉伸比可达到 2.65。结合试验结果与理论分析,初步提出了液压力的上下范围,即防止板料起皱的最小液压力与防止板料破裂的最大液压力。

Asnafi^[3]结合理论分析和试验研究了铝合金板料的凸弯边橡皮囊液压成形,发现该工艺的起皱极限比传统冲压工艺大几倍。Sala 等^[4]采用有限元算法优化了 MB-339 教练机机身框架零件的橡皮垫成形工艺,并且分析了橡皮囊液压零件的两大成形缺陷——回弹和起皱与模具圆角的半径和板料热处理状态等参数之间的关系。研究发现零件的热处理状态、模具圆角等对零件的回弹影响较大。在同材料、同厚度状态下,模具圆角越大则回弹越大。李靖谊等^[5]通过试验与数值模拟实现了弯曲半管零件的橡皮囊液压成形,较之于落压成形方法,极大地提高了半管零件的疲劳强度和表面质量。

Peng 等^[6]采用库伦摩擦模型对橡皮囊液压成形工艺进行了相关分析,有限元仿真模拟。同年, Ramezani 等则对橡皮囊液压成形过程中的动态和静态摩擦进行了分析^[7-8]。研究发现:与试验结果相比,有限元仿真时使用静态摩擦模型得到的结果(最大凸模载荷偏差为 4.8%)比库伦摩擦模型(最大凸模载荷偏差为 8%)的更好;动态摩擦系数随着压力与板料之间滑动速度的增大而减小;与试验结果相比,有限元仿真时使用斯特里贝克型动态摩擦模型得到的结果(最大凸模载荷偏差为 5.6%)比库伦摩擦模型(最大凸模载荷偏差为 8%)的好。

之后, Ramezani 等^[9]通过试验和有限元技术对铝

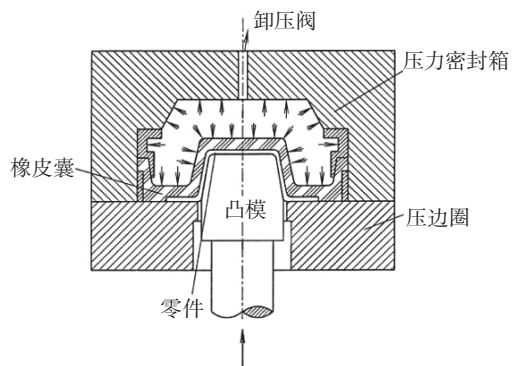


图1 机床示意图

Fig.1 Schematic diagram of machine tool

合金的橡皮垫成形工艺进行了研究。研究了成形速率、橡胶的种类分别对凸模受力与零件减薄的影响,并使用有限元软件 ABAQUS 研究了零件和橡皮凸模的应力应变分布情况。Prete 等^[10]也做了类似的工作,主要研究了橡皮的硬度对板料应力分布的影响。

瑞典 Avure 公司研究了不同成形压力对零件贴膜程度产生的影响。如图 2 所示,两个零件都是在同一模具上采用橡皮囊液压成形制造的,左侧零件采用的压力为 100MPa,而右侧零件采用的压力为 34MPa。可以看出,左侧零件在下陷处的贴膜情况远远好于右侧零件。但对于弧度较大或等直段零件,压力的增大对零件贴膜的影响不是很明显。

Sinke 等^[11]通过试验发现采用橡皮囊液压成形工艺制造的拼接板零件的成形效果非常好。Sun 等^[12]对钛合金的橡皮囊液压成形进行了研究。通过数值模拟研究发现 Ti-15-3 与橡皮之间的摩擦对橡皮囊液压成形的影响很小,而 Ti-15-3 与钢制模具之间的摩擦对冲压成形的影响较大。王福东等^[13]为得到大曲率凸弯边零件的橡皮囊液压成形工艺参数,采用 ABAQUS 有限元软件对成形过程进行了数值模拟,分析了侧压块各参数对该成形结果的影响。结果表明:合适的侧压块参数为侧压块与模具距离取 12mm,侧压块倾角取 70°,侧压块圆角半径取 8mm,对应的坯料搭边尺寸为 20mm;采用优化后的参数可成形出合格的大曲率凸弯边零件,零件厚度分布与数值模拟结果一致。

近年来,橡皮囊液压成形工艺运用到了质子交换膜燃料电池的金属双极板的加工上。Liu^[14]发现橡皮囊液压成形工艺是加工双极板上的通道的理想手段之一。Jin 等^[15]也采用橡皮囊液压成形工艺加工了金属双极板,他们分析了成形速度、成形压力、材料性能、橡皮的硬度和厚度等因素对双极板通道深度的影响,试验表明当橡皮的硬度减小、厚度增大,成形速度和压力增大时,通道的深度会增大。



图2 相同材料用不同压力的回弹
Fig.2 Springback of the parts under different pressure with the same material

2.2 成形缺陷研究

国内高校的研究人员对橡皮囊液压成形后出现的缺陷进行了大量深入分析。1997 年戴美云等^[16]描述了橡皮囊液压成形工艺中常见的缺陷,如起皱、回弹、裂纹等,分析了产生这些缺陷的主要原因以及出现的部位,并提出了相应的预防措施与解决手段。下面主要针对起皱与回弹缺陷进行综述。

Sun 等^[17]基于 ABAQUS/Explicit 对 Ti-15-3 钛合金凸弯边橡皮成形的起皱现象进行分析,通过定量比较凸弯边边缘的皱纹波长和峰高,分析不同硬度的橡皮对 Ti-15-3 钛合金凸弯边橡皮成形起皱的影响。经试验验证,有限元模拟对 Ti-15-3 钛合金凸弯边上皱纹的模拟与试验结果有很好的 consistency。

孙永娜等^[18]针对 TB5 凸弯边橡皮囊液压成形容易产生起皱的现象,将液压成形过程中出现起皱量化作为优化目标,以钣金凸弯边零件的起皱作为缺陷考察的主要指标以及侧压块优化目标函数,基于数值模拟和试验的设计,设计了不同位置形状的侧压块,进行了数值模拟液压试验,通过模拟试验来调正侧压块的形式和位置,设计出合理的侧压块。贾敏等^[19]对 TB5 高强度钛合金隔板零件进行橡皮高压冷成形的有限元数值模拟及试验研究,研究消除起皱的解决方案。依据模拟成形结果,进行了隔板零件的橡皮囊液压成形试验,增加了楔形消皱块。最终确定出橡皮高压冷成形中的展开料、模具结构和成形压力等主要影响因素的最佳参数值。Chen 等^[20]通过正交试验设计方法和有限元仿真技术研究了铝合金凸弯边橡皮囊液压成形的起皱现象,同时设计出一种能有效控制起皱的措施三步成形法。研究发现:对于 O 态的 2024 和 7075 铝合金,翻边高度 h 越大,弯边半径 R 越小,起皱越严重;随着模具圆角半径 r 的增加以及液压力 P 增大,起皱会先增加然后逐步缩小。对于 T3 态 2024 铝合金,其起皱程度远大于 O 态的两种铝合金;随着模具弯边半径 R 和液压力的增加,起皱会逐步的减小。对铝合金 2024-T3 状态下起皱的影响程度由大到小依次是 $R > P > r > h$,而对于 O 态的 2024 和 7075 铝合金, r 和 h 的影响程度相同。

总之,在零件破裂与起皱的预测方面,研究工作较深入,并积累了一定的基础数据和模具设计经验。

随着有限元技术的进步,对钣金液压回弹的模拟更加有效果,对回弹问题的研究也越来越多。

Datta 等^[21]分别对 2524-T3 状态和 2024-T3 状态的铝合金在一系列压力下进行了橡皮囊液压试验。试验结果如图 3 和图 4 所示,结果表明成形压力和回弹角成非线性负相关关系。

杜建宁等^[22]以典型飞机橡皮成形件为例,利用橡

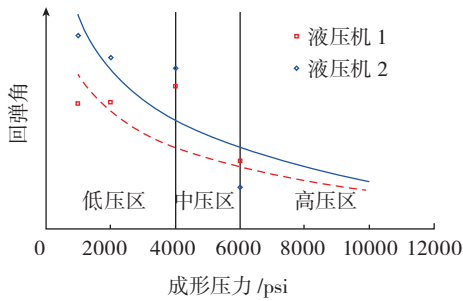


图3 2524铝合金直边零件的回弹角与液压压力的关系
Fig.3 Relationship between the springback angle and the hydraulic pressure of 2524 aluminum alloy straight flanging parts

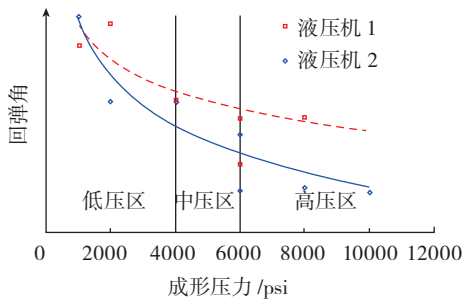


图4 2024铝合金直边零件的回弹角度与成形压力的关系
Fig.4 Relationship between the springback angle and the hydraulic pressure of 2024 aluminum alloy straight flanging parts

皮成形快速工艺分析系统和 PAM-STAMP 模拟零件的成形和回弹过程,并拟合补偿回弹角的模具型面,获得合格的零件。陈磊等^[23-24]通过试验获取了铝合金板 2024 和 7075 在 O 态的直弯边回弹量,认为直弯边零件压力到 20MPa 以后再增大压力对回弹影响不大。陈磊等^[25-26]还研究了基于 PAM-STAMP 的橡皮囊液压成形工艺回弹补偿方法,试验表明,曲弯边零件的回弹补偿对减小几何误差的效果十分明显。曾一畔^[27]完成了直、曲线翻边新淬火态下橡皮囊成形模具设计和相应的正交试验与成形试验,研究了新淬火态 2024 和 2A12 不同条件下的回弹值,给出了不同条件下的回弹范围,用有限元法对几种典型的飞机钣金零件进行了橡皮囊“一步法”成形模拟,探讨了其成形特点,并对这些零件成形后的回弹分布进行了研究,对出现的翘曲与回弹问题给出了解决的建议。

2.3 仿真模型研究

在国内外对橡皮成形数值模拟方面的研究中,大多采用体单元描述橡皮垫。这种方法比较符合橡胶材料的变形过程,但在实际分析中效果并不好。Sala^[4]在对某段机身铝合金零件的橡皮垫成形工艺进行数值模拟研究时,使用了体单元描述橡皮的建模思路,如图 5 所示。在分析中发现,使用体单元计算橡皮垫的变形时,

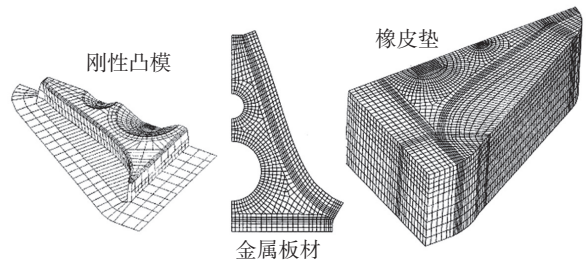


图5 橡皮垫成形工艺的数值模拟
Fig.5 Numerical simulation of rubber fluid forming process

不仅模型网格数量巨大、计算耗时极长,而且容易出现沙漏和穿透。

杨伟俊等^[28]研究了液压橡皮囊成形工艺的数值模型建立方法。基于对橡皮的不同描述方法,提出了橡皮成形工艺的 3 种有限元模型,即不考虑橡皮垫、用壳单元描述橡皮垫和用体单元描述橡皮垫,并应用到直弯边成形的分析中。讨论了橡皮对板料变形流动的影响,认为橡皮垫在成形过程中能起到减小回弹的作用。利用不同弯曲半径的直弯边回弹试验数据,比较了几种简化方式在回弹预测上的准确性,发现采用壳单元描述橡皮垫的模型的回弹预测结果与试验结果相比,误差较小,同时计算效率高。

总之,国内外对橡皮成形的数值模型研究有如下特点: 鉴于橡皮成形与传统冲压工艺的相似性,以上研究中借用了商用冲压分析软件进行橡皮成形的仿真分析,但忽略了计算结果精确性的验证;对于橡胶材料自身的变形流动以及橡胶对板料变形的影响,分析较少;研究中提到了目前使用体单元的分析方法耗时长,计算不稳定的现象,但在简化模型准确性上的分析与验证较少。因此,对于橡皮成形工艺的数值模拟,由于橡皮成形面对的零件种类按千计,耗时太长的计算方法较难广泛应用,而建立快速工艺分析模型更有实用价值。

3 结束语

随着橡皮囊液压成形工艺在汽车和飞机钣金零件制造中应用的增多,国内外学者对橡皮囊液压成形进行了大量的研究工作。其中,在成形性能、工艺参数和成形缺陷等方面取得了很多成果,但在数值模拟方面的研究还不够完善,如简化模型的准确性和计算结果的精确性还有待提高,建立快速有效的工艺分析模型来解决大批零件仿真耗时太长的的问题。

参考文献

[1] BROWNE D J, BATTIKHA E. Optimisation of aluminium sheet forming using a flexible die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55(3-4): 218-223.

- [2] THIRUVARUDCHELVAN S, LEWIS W. A note on hydroforming with constant fluid pressure[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88(1-3): 51-56.
- [3] ASNAFI N. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 96(1): 198-214.
- [4] SALA G, LANDRO L D, CASSAGO D. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: polymers thermoforming[J]. Materials & Design, 2002, 23(1): 21-39.
- [5] 李靖宜, 王化明, 张中元, 等. 弯曲半管橡皮囊液压成形工艺过程数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2003, 20(1): 43-48.
- LI Jingyi, WANG Huaming, ZHANG Zhongyuan, et al. Numerical simulation study on the hydraulic forming process of a curved pipe with a half pipe[J]. Journal of Computational Mechanics, 2003, 20(1): 43-48.
- [6] PENG L, HU P, LAI X, et al. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process—simulation and experiments[J]. Materials & Design, 2009, 30(3): 783-790.
- [7] MAZIAR R, MOHD R Z, ROSLAN A. Computer aided modelling of friction in rubber-pad forming process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4925-4934.
- [8] RAMEZANI M, RIPIN Z M, AHMAD R. Numerical simulation of sheet stamping process using flexible punch[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2009, 223(7): 829-840.
- [9] RAMEZANI M, RIPIN Z M, AHMAD R. Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation [J]. Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 3(3):196-203.
- [10] PRETE A D, PAPADIA G, MANISI B. Computer aided modelling of rubber pad forming process [J]. Key Engineering Materials, 2011, 473: 637-644.
- [11] SINKE J, IACONO C, ZADPOOR A A. Tailor made blanks for the aerospace industry[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1):849-852.
- [12] SUN Y N, WAN M, WU X D. Friction coefficient in rubber forming process of Ti-15-3 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12): 2952-2959.
- [13] 王福东, 陈明和, 熊杰. 大曲率凸弯边零件橡皮囊液压成形工艺的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2011(12):107-111.
- WANG Fudong, CHEN Minghe, XIONG Jie. Large curvature convex bending rim parts rubber bladder hydraulic forming process numerical simulation[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2011(12): 107-111.
- [14] LIU Y X, HUA L. Fabrication of metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells by rubber pad forming[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(11): 3529-3535.
- [15] JIN C K, JEONG M G, KANG C G. Effect of rubber forming process parameters on micro-patterning of thin metallic plates [J]. Procedia Engineering, 2014, 81:1439-1444.
- [16] 戴美云, 张和兴. 橡皮囊液压成形零件常见缺陷分析[J]. 航空制造工程, 1997(2): 27-28.
- DAI Meiyun, ZHANG Hexing. Analysis of the common defects of rubber sac hydraulic forming parts[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1997(2): 27-28.
- [17] SUN Y N, WAN M, WU X D. Wrinkling prediction in rubber forming of Ti-15-3 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(10): 3002-3010.
- [18] 孙永娜, 万敏, 吴向东. TB5 钛合金凸弯边橡皮囊液压成形中侧压块优化设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(10): 1292-1297.
- SUN Yongna, WAN Min, WU Xiangdong. TB5 titanium alloy convex bending rim rubber bladder hydraulic forming pressure block optimization design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(10): 1292-1297.
- [19] 贾敏, 白颖, 许海燕, 等. 钛合金板料橡皮高压冷成形起皱数值模拟与控制研究 [J]. 锻压技术, 2014, 39(6): 132-136.
- JA Min, BAI Ying, XU Haiyan, et al. Titanium alloy sheet rubber cold high pressure forming numerical wrinkling simulation and control[J]. Forging Technology, 2014, 39(6): 132-136.
- [20] CHEN L, CHEN H, WANG Q, et al. Studies on wrinkling and control method in rubber forming using aluminium sheet shrink flanging process[J]. Materials & Design, 2015, 65: 505-510.
- [21] SUBHRANGSHU D. The effect of forming pressure on springback in 2XXX aluminum alloys[R]. Nevada: World Aviation Congress, 2004.
- [22] 杜建宁, 李小强, 李鹰, 等. 液压橡皮成形弯边零件有限元模拟及回弹补偿应用研究 [J]. 飞机设计, 2015(1):40-43.
- DU Jianing, LI Xiaoqiang, LI Ying, et al. Research on the application of finite element simulation and springback compensation for the bending and bending parts of hydraulic rubber forming[J]. Aircraft Design, 2015(1): 40-43.
- [23] 陈磊, 邱晔, 李善良, 等. 橡皮囊液压成形直弯边回弹试验与分析研究 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 47-50.
- CHEN Lei, QIU Xi, LI Shanliang, et al. The test and analysis of the rebound test and analysis for the formation of the rubber capsule hydraulic pressure[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 47-50.
- [24] 陈磊, 邱晔, 李善良, 等. 新淬火铝合金板材成形回弹试验与数值模拟 [J]. 锻压技术, 2008, 33(1): 39-41.
- CHEN Lei, QIU Xi, LI Shanliang, et al. New quenching aluminum alloy sheet forming springback test and numerical simulation[J]. Forging Technology, 2008, 33(1): 39-41.
- [25] 陈磊, 邱晔, 李善良, 等. 橡皮囊液压成形凸弯边成形试验与分析研究 [J]. 锻压技术, 2007(6): 29-33.
- CHEN Lei, QIU Xi, LI Shanliang, et al. Rubber fluid forming convex bending forming experiment and analysis of rubber bladder hydroforming[J]. Forging Technology, 2007(6): 29-33.
- [26] 陈磊, 李善良, 张亚兵. 板料凹弯边橡皮囊液压成形回弹分析与控制方法 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17(2): 1-5.
- CHEN Lei, LI Shanliang, ZHANG Yabing. Analysis and control method of springback in sheet metal forming process [J]. Plastic Engineering Journal, 2010, 17(2): 1-5.
- [27] 曾一畔. 橡皮囊“一步法”成形模具设计与试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.
- ZENG Yipan. The design and experimental study of the "one step" forming die design and experiment of rubber capsule[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

(下转第67页)