大尺寸薄壁 LF6 铝合金筒体旋压成形技术

黑爱卿，李钰，邓全得，陈曦，李仲辉
（西安航天发动机有限公司，西安 710100）

摘要：目的 研究大尺寸薄壁 LF6 铝合金流动旋压成形工艺的可行性。**方法** 采用锻件毛坯反向流动旋压技术，通过设计高精度的旋压模具，将模具与旋压机床采用法兰结构形式固定，模具与产品采用固定卡槽形式固定。旋压过程分三道次进行，以控制每道次减薄率，同时每道次采用不同的进给速度和旋压转速；三道次减薄率分别采用 24.3%，32.2%，28.6%，进给速度分别采用 1.4，1.2，1 mm/r，旋压转速分别采用 200，200，100 r/min。**结果** 实现了锻件壁厚由 8.2 mm 分别减薄到 6.2，4.2，3 mm，锻件长度由 650 mm 增长到 840，1250，1800 mm，同时旋压产品的圆度达到了 0.2 mm，整个长度方向壁厚公差为±0.07 mm，母线方向直线度为 0.2 mm。**结论** 采用流动旋压技术实现了大尺寸薄壁 LF6 铝合金筒体的加工，解决了大尺寸薄壁 LF6 铝合金筒体成形的技术难题，同时生产的产品已在型号上得到了应用。

关键词：薄壁；LF6 铝合金；筒形件；流动旋压
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2020.02.007
中图分类号：TG335 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2020)02-0043-05

Spinning Forming Technology of Large Size Thin-wall LF6 Aluminum Alloy Cylinder

HEI Ai-qing, *LI Yu*, *DENG Quan-de*, *CHEN Xi*, *LI Zhong-hui*
(Xi'an Aerospace Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the feasibility of large size thin-wall LF6 aluminum alloy cylinder in spinning forming process. The forging blank reverse spinning technology was adopted to design high-precision spinning mold. The mold and the spinning machine were fixed in the form of flange structure, and the mold and products were fixed in the form of fixed card groove. The spinning process was completed in three steps to control the thinning rate of each step, and different feed speed and spinning speed were adopted for each step. Through three times thinning rate by 24.3%, 32.2% and 28.6% respectively, and feed speed with 1.4, 1.2 and 1 mm/r, spinning speed with 200, 200 and 100 r/min, the forging thinning thickness was reduced from 8.2 mm to 6.2 mm, 4.2 mm and 3 mm; the length of the forgings grow from 650 mm to 840 mm, 1250 mm and 1800 mm; and spinning product roundness was 0.2 mm, the length direction of wall thickness tolerance was ±0.07 mm; and the straightness of bus direction was 0.2 mm. The processing of large size thin-wall LF6 aluminum alloy cylinder is realized by flow spinning technology. It solves the forming technical problem of large size thin-wall LF6 aluminum alloy cylinder. The product has been applied in engineering example.

KEY WORDS: thin-wall; LF6 aluminum alloy; tubular part; flow spinning

大型薄壁圆筒成形的工艺方法主要有板料卷焊和锻坯旋压成形两种。板料卷焊圆筒工艺简单、成本适中，需焊接而成，焊接件耐压强度低于整体产品，同时制造精度难以满足精密装配要求。对于筒体回转类产品，旋压工艺技术是很好的实现方式。所谓旋压，是指借助旋轮作进给运动，加压于随芯

收稿日期：2019-11-13
作者简介：黑爱卿（1986—），男，硕士，工程师，主要研究方向为液体火箭发动机发动机制造。

模沿同一轴线旋转的金属毛坯，使其产生连续的局部塑性变形而成为所需空心回转体零件。旋压成形方法不仅具有节省材料、降低成本、模具简单等优点，而且旋压产品壁厚均匀，易于得到较高的精度，产品材料组织结构好，晶粒细小并具有纤维状特征，强度和硬度得到了提高，可以有效提高材料综合性能[1—2]。

大尺寸薄壁LF6铝合金筒体是某型号飞机副油箱的主体部分，为中空回转体零件，长度为1750 mm，壁厚为（3±0.2）mm，直径精度为Φ796±0.5 mm，如图1所示。LF6属于铝镁系热处理不强化变形铝合金，具有较高的塑性及耐蚀性，板料卷焊成形产品精度、强度均不满足相关要求[3]，若采用锻件整体车削加工，成本极高，故急需开展流动旋压工艺技术在大尺寸薄壁筒体类产品上的应用。

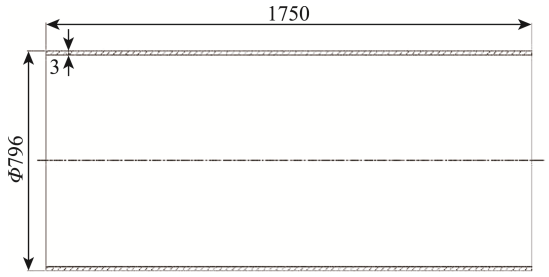


图 1 LF6 铝合金筒体尺寸

Fig.1 Cylinder size of LF6 aluminum alloy

1 材料

LF6铝合金材料的化学成分如表1所示，其室温下的密度为4.5 g/cm^3，抗拉强度≥315 MPa，屈服强度≥160 MPa，伸长率约为15%，断面收缩率约为40%，弯角≥20°。产品的技术要求为：① 壁厚为（3±0.2）mm，形面线轮廓度为±0.3 mm；② 两端口部直径精度为±0.5 mm。产品特点为该产品属于大直径薄壁筒形件，其相对高径比L/φ_D=2.2，相对厚度t/φ_D=0.004。

表 1 LF6 铝合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of LF6 aluminum alloy

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
质量分数/%	0.4	0.4	0.1	0.5~0.8	0.2	0.02~0.1	余量

2 工艺方案

2.1 工艺方案对比

对于上述薄壁筒形产品，目前常用的工艺方法有：① 板材卷筒成形+缝焊；② 锻件直接车削加工成形；③ 锻件圆形毛坯正旋压成形；④ 锻件筒形毛坯反旋成形。从工装尺寸、工序数量、材料成本、工艺难度及产品性能等方面综合对比，上述工艺方法的优缺点比较结果如表2所示。

表 2 圆筒形零件成形工艺方法对比结果

Tab.2 Comparison results of advantages and disadvantages of tube forming process

项目	卷筒成形+缝焊	锻件直接车削加工	锻件圆形毛坯正旋成形	锻件筒形毛坯反旋成形
工装尺寸	大	小	大	小
工序数量	多	少	多	少
材料成本	中	多	高	低
工艺难度	低	低	高	高
产品性能	差	差	好	好

从表2可以看出，筒形锻件毛坯反旋成形的工艺方案具有工艺装备简单、中间工序少、材料利用率高、质量高、废品率低等优点，是大尺寸薄壁筒形件成形的理想工艺方法。

2.2 流动旋压技术特点

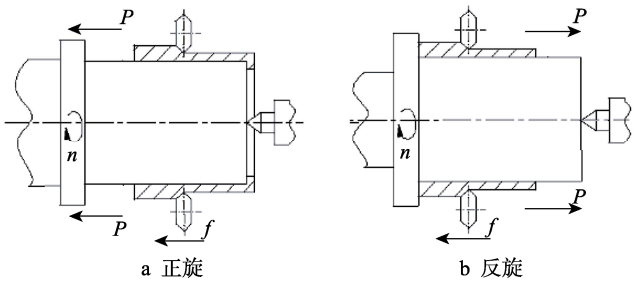
筒形件流动旋压是制造薄壁筒形件最有效的工艺方法之一，采用强力旋压工艺得到的薄壁筒形件具有晶粒致密、强度高、尺寸精度高、材料利用率高、工艺装备简单、所需设备吨位小、成本低等优点[4—5]。

流动旋压的特点如下[6—7]：① 制品整体无焊缝，相对于卷焊圆筒，消除了纵向焊缝影响，并通过塑性变形极大提高了工件的机械性能，同时，减少了筒体制造过程中的焊接、退火、探伤等工序，降低了制造成本；② 由于金属变形区具有对称性，工件残余应力状态得到明显改善，内表面贴胎间隙为0.1 mm，外表面由对称旋轮进行加工，这是实现筒形件高尺寸精度、高表面质量的关键因素；③ 材料利用率高，由于旋压为无切削加工，旋压加工与其他机加工相比，可节约大量原材料；④ 制品范围广，旋压可以成形大直径薄壁管材、变断面管材、椭圆形等带有阶梯状和变化壁厚的几乎所有的回转类零件。

流动减薄旋压根据金属流动的方向又可分为正旋和反旋。正旋时已加工区受到拉应力的作用，而未加工区不受应力作用。金属流动方向同旋轮进给方向相同。反旋时未加工区受到压应力作用，已加工区不受应力作用。金属流动方向与旋轮进给方向相反。对于筒形件来说，一般会改变工件的壁厚和筒形件的长度，而内径不变。正、反旋压示意图如图2所示。

由于流动反旋时毛坯悬空，在相同的初始壁厚和变形程度下，反旋旋压胎长度为正旋时的一半左右，

极大降低了模具成本，故本方案采用反旋加工。



a 正旋　　b 反旋

图 2　筒体正、反旋流动旋压过程

Fig.2 Positive and reverse spin flow spinning process of cylinder-shaped part

3　流动旋压成形工艺设计

3.1　毛坯计算

旋前锻坯为塑性良好的退火态，根据流动旋压过程中毛坯体积不变定律，并忽略毛坯与芯模的装配间隙、壁厚不均匀等因素的影响，旋压成品的长度计算如式（1）[8]，其中当 $d>>t_0, t_f$ 时，$t_0 l_0 \approx t_f l_f$。

$$l = l_0 \frac{t_0(d_m + t_0)}{t(d_m + t)} \tag{1}$$

式中：t_0 为旋压前筒形毛坯厚度；l_0 为旋压前筒形毛坯长度；t_f 为旋压后筒形毛坯厚度；l_f 为旋压后筒形毛坯长度；l 为旋压产品长度；d_m 为芯模直径。

3.2　极限减薄率计

流动旋压成形材料一次旋压极限变薄率与断面收缩率关系的经验计算公式为[8]：

$$\Psi_{max} = \frac{z}{0.17 + z} \times 100\% = \frac{t_0 - t_i}{t_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中：z为材料断面收缩率；t_0为筒形件初始壁厚；t_i为筒形件旋压后壁厚。

变薄旋压减薄率反映工件变形程度。变薄旋压道次减薄率对工件内径的胀缩量及尺寸精度的影响较大，在总变薄率确定后，根据工艺条件和工件尺寸的精度要求，可分成若干道次进行变薄旋压。减薄率过小会导致加工效率低下，道次减薄率过大容易造成材料堆积，表面呈现波纹、折叠等缺陷。道次减薄率过小会引起工件厚度变形不均，工件内表变形不充分而出现裂纹。道次减薄率为20%~30%时是最佳选择值[9−10]。

LF6 合金在室温下断面收缩率约为 40%，塑性较好。根据式（2）得出极限减薄率为 70%，实际确定从锻坯到薄壁工件总减薄率约为 62.5%，减薄量约为 5 mm，分 3 道次减薄变形，每道次减薄率约 30%，进给量约 1 mm/r。第一道次大变形量，可以使管坯变形充分，避免出现外部金属流动过快而内壁变形不充分产生的内裂现象。最后一个道次为保证工件精度采用小减薄率。筒体口部坯壁可不加工或加厚，加强圆度控制。

3.3　旋压力计算

流动旋压过程中，旋压力可求解为：

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} K \sigma_m \delta_0 \sqrt{D_{\rho i} f \cot \alpha_\rho} \tag{3}$$

$$K = \ln \frac{1}{1 - \psi_t} \tag{4}$$

式中：δ_0 为毛坯材料的厚度；f 为进给率；α_ρ 为旋轮成形角；$D_{\rho i}$ 为旋轮直径；σ_m 为平均有效应力。

3.4　过程工艺参数确定

1）旋压道次：流动旋压时把初始筒形锻坯减薄至近成品件厚度 3 mm，考虑到筒体口部刚性预留尺寸，流动旋压引起的扩径量、减薄率、后续车切余量，由此一步步反推算出旋压次数为 3 次，及初始锻坯尺寸为 8 mm×Φ789.2 mm×800 mm，锻坯尺寸精度经车削保证。

2）旋轮参数：单旋轮旋压时径向力不平衡，适宜薄壁短件成形。双旋轮适宜中等规格的旋压件[11]，工件直径为Φ200~Φ400 mm，长度小于2 000 mm。均布三旋轮方案更为合理，成形过程中可以有效夹紧坯料，减少模具偏心，增加塑性变形区及有益改善应力分布。文中因条件限制采用对称双旋轮旋压。旋轮直径影响旋轮轴承的安装空间与使用寿命，对旋压件的质量影响不大，一般取（Φ150~Φ300 mm）。

旋轮主要结构参数为成形角α_ρ和顶部圆角R_ρ：当α_ρ增大时，工件变形区畸变增大，使隆起和堆积倾向增大；当α_ρ减小时，旋轮和毛坯接触面积增大，容易扩径[12−13]。α_ρ选择范围为15°~30°，R_ρ增大可使旋轮与毛坯接触面积增大，从而提高旋压表面质量，同时又会增加旋压径向力和轴向力，容易使毛坯在旋压过程中发生起皱、倾倒失稳、拉裂；当R_ρ减小时，有利于毛坯贴胎，同时会造成切削现象，使旋压件表面起皮、掉屑、挤断。根据毛坯材料、尺寸及旋压特点，一般选取R_ρ=（0.6~1）t_0，表面粗糙度Ra=0.8 μm，表面跳动量为0.015 mm，旋轮材料选用W18Cr4V，表面硬度HRC58~HRC60。

3）进给率 f 与转速 n：进给率含义是芯模每转一周旋轮沿着工件母线的进给量。变薄旋压时，进给率对工件直径的胀缩和工件质量均有影响。适量的大进给率有助于提高效率和缩颈，但易造成旋轮前材料的堆积，小进给率有利于提高表面质量，但易

出现起皮和扩径。筒形件流动旋压常用的进给比一般在 0.5~1.5 mm/r 之间，同时结合实际产品多次试验的经验，三道次旋压的进给比分别为 f_1=1.4 mm/r，f_2=1.2 mm/r，f_3=1.0 mm/r。转速 n 与进给率 f 有关，常搭配使用[14]。在旋压进给量一定的条件下，转速高则进给率下降，转速低则进给率上升。提高主轴转速可以提高生产效率并改善旋压质量。此外，转速提高后，增加变形热，还会引起机床震动等现象。通常转速 n 取 30~200 r/min。

4）旋压间隙：旋轮与旋压胎的法向距离。一般旋压间隙=实际料厚±偏移量（根据实际情况酌情调整）。

5）润滑剂：机油+M_oS_2+氯化石蜡。

6）旋压温度：室温。

综上所述，旋压工艺参数如表 3 所示。

3.5 零件成形工艺流程

根据以上分析计算及有效控制一旋、二旋、三旋减薄率和产品质量，最终确定了筒体成形的工艺流程，如图 3 所示。

表 3 圆筒形产品旋压工艺参数

Tab.3 Spinning process parameters of cylindrical products

道次	减薄率/%	进给速度/(mm·r^{-1})	转速/(r·min^{-1})	壁厚变化/mm	变形部位长度变化/mm
一道次	24.3	1.4	200	8.2→6.2	650→840
二道次	32.2	1.2	200	6.2→4.2	840→1250
三道次	28.6	1	100	4.2→3	1250→1800

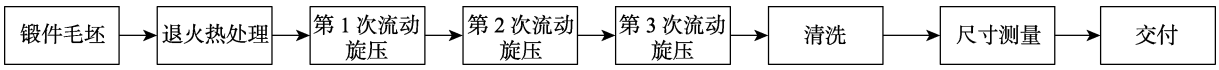


图 3 筒形件成形工艺流程

Fig.3 Cylindrical product forming process

4 设备选用及工装

4.1 旋压所用工装及模具

根据零件尺寸中的径深比、尺寸精度和旋压过程中旋压力，结合机床加工范围和功能，选用 CZ1500/2 CNC 数控双轮旋压机床。

在旋压过程中，芯模是决定产品成形质量的主要零件，必须具有足够的强度、刚度和表面粗糙度[15−16]。旋压模胎是旋压加工的主要关键工艺装备，其设计精度直接影响旋压成形件的质量。要求旋压胎体回转形面与大端安装定位面轴线同轴度≤0.03 mm、回转跳动量≤0.03 mm、形面轮廓度≤0.03 mm，粗糙度 Ra≤0.8 μm，材料选用 5CrMnMo，表面硬度为 HRC50~HRC55，通过转接法兰与旋压机床固定，通过卡槽固定块实现旋压产品的固定，如图 4 所示。

4.2 端面车切所用设备及工装夹

根据零件高度及最大回转直径，选用 C6016 卧式落地车床。用车切夹具来保证零件两端面的平行度、端面对轴线的垂直度。



图 4 旋压模胎实物

Fig.4 Spinning mould

5 旋压过程及产品质量

按照上述确定的工艺参数、旋压设备及工装磨具对2件LY6筒形毛坯进行旋压，整个旋压过程与上述理论分析相符。使用测量工具对旋压后的产品尺寸进行了测量，结果为：壁厚从大端到小端变化均匀，壁厚公差≤±0.1 mm；内形面与切内样板间隙≤0.1 mm（局部≤0.20 mm）；内表面、外表面粗糙度 Ra≤3.2 μm，表面光滑无缺陷；大、小端内径公差≤±0.2 mm，详见表4。

表 4　产品尺寸精度
Tab.4 Dimension accuracy of product　　mm

项目	长度	外径	圆度	壁厚	母线直线度
要求	≥1750	Φ796±0.5	±0.3	3±0.2	±0.3
实测	>1800	Φ795.8~Φ796.2	0.2	2.93~3.05	0.2

6　结论

流动反旋成形工艺方法，具有工艺简单、操作方便、经济合理、质量可靠、合格率高、制件一致性好的优点。采用筒形锻坯流动反旋成形的工艺方法对大尺寸薄壁 LF6 铝合金的加工研究，可得出以下结论。

1）采用筒形锻坯流动反旋成形工艺方法实现了大尺寸薄壁 LF6 铝合金的加工。

2）使用对称双旋轮旋压设备和高精度旋压模胎，确定旋轮成形角 α_p、顶部圆角 R_p、道次、进给率和转速等工艺参数，能够保证旋压后壁厚公差均满足≤±0.1 mm，内形面与切内样板间隙≤0.1 mm，内表面、外表面粗糙度 Ra≤3.2 μm，大、小端内径公差≤±0.2 mm 的高精度合格产品。

参考文献：

[1] 吴磊，刘彬. 旋压技术的研究现状[J]. 装备制造技术, 2016(9): 70—72.
WU Lei, LIU Bin. Research the Status of Spinning Technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(9): 70—72.

[2] 许强. 异形件旋压技术研究[D]. 沈阳：沈阳航空航天大学, 2015.
XU Qiang. Asymmeterical Spinning Process[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2015.

[3] MI Guo-fa, ZHAO Da-wei, DONG Cui-fen, et al. Void Damage Evolution of LF6 Aluminum Alloy Welded Joints under External Load and Thermal Cycling Conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 1968—1973.

[4] HUANG Liang, ZENG Long, ZHANG Xiao-ting. Study on Plastic Deformation Behavior of Hot Splitting Spinning of TA15 Titanium Alloy[J]. Materials and Design, 2014, 58: 465—474.

[5] WU Xiao-yan, ZHANG Hua-rui, CHEN Huan-liang, et al. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of A356 Aluminum Alloy Processed by Hot Spinning Process[J]. Research & Development, 2017, 14(2): 13—14.

[6] 李继贞，刘德贵，王健飞. 强力旋压成形技术在航空领域的新进展[J]. 航空制造技术, 2014(10): 40—44.
LI Ji-zhen, LIU De-gui, WANG Jian-fei. New Progress of Power Spinning Technology in Aeronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(10): 40—44.

[7] 马世成，王东坡，汪宇羿，等. 超长筒形件同步旋转张力旋压成形技术[J]. 制造技术研究, 2016(5): 23—25.
MA Shi-cheng, WANG Dong-po, WANG Yu-yi, et al. Technology of Synchronous Rotating Tension Spinning for Super Long Cylindrical Parts[J]. Manufacturing Technology Research, 2016(5): 23—25.

[8] 戴国勇. 1J50 软磁合金筒形件流动旋压成形方法研究[D]. 广州：华南理工大学, 2016.
DAI Guo-yong. Flow Spinning Method of 1J50 Soft Magnetic Alloy Tube[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

[9] 郭福林，李萍，钱阵豪，等. 筒形件强力旋压工艺模拟及试验研究[J]. 精密成形工程, 2010, 2(5): 15—16.
GUO Fu-lin, LI Ping, QIAN Zhen-hao, et al. Simulation and Experiment Research on the Powerful Spinning Process for Cylindrical Parts[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(5): 15—16.

[10] 刘燕平. 超薄壁筒形件变薄旋压过程稳定性研究[D]. 长沙：中南大学, 2012.
LIU Yan-ping. Stability of Ultra Thin Walled Tube during the Flow Forming Process[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[11] 王东坡，马世成，孙昂，等. 基于剪普复合旋压方法的双轮同步旋压技术[J]. 宇航材料工艺, 2015(4): 23—30.
WANG Dong-po, MA Shi-cheng, SUN Ang, et al. Processing of Technology of Double-Roller Mirror Spinning Based on Conventional-Shear Composite Spinning[J]. Aerospace Materials Technology, 2015(4): 23—30.

[12] 冯志刚，樊文欣，赵俊生，等. 基于正交试验的连杆衬套强力旋压成形分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(7): 100—103.
FENG Zhi-gang, FAN Wen-xin, ZHAO Jun-sheng, et al. Forming Analysis of Power Spinning of Connecting Rod Bushing Based on Virtual Orthogonal Experiment[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(7): 100—103.

[13] 徐焕超. 钛合金轮辋分形制坯-多道旋压复合成形工艺的数值模拟[D]. 长春：吉林大学, 2015.
XU Huan-chao. Numerical Simulation on the Process Combined Splitting Spinning Preforming and Multi-Pass Spinning Forming of Al-alloy Rim[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[14] 赖鹏. 旋压成形设备设计关键技术研究及应用[D]. 杭州：浙江大学, 2014.
LAI Peng. Research on Key Technology of Spinning Machine and Its Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[15] 夏琴香，吴竞飞，程秀全，等. 旋轮结构对高强钢筒形件流动旋压成形影响规律研究[J]. 模具技术, 2017(2): 2—5.
XIA Qin-xiang, WU Jing-fei, CHENG Xiu-quan, et al. Research on the Influence of Roller Structure on Forming Quality of High-Strength Steel during Flow Spinning Forming[J]. Die and Mould Technology, 2017(2): 2—5.

[16] 李明涛. 旋压机滑座系统的研究与应用[D]. 青岛：青岛理工大学, 2016.
LI Ming-tao. Research and Application of Spinning Machine Slide System[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.