微型涡喷发动机壳体零件旋压工艺研究

唐小虎　冯定艳　席　扬　魏　林
（四川航天中天动力装备有限责任公司，成都 610100）

摘要：针对多段深圆筒深圆锥组合面旋转体壳体零件壁厚小、高度直径比大、对旋压加工工艺要求较高，对此类零件的多道次旋压加工过程进行了详细的工艺方案与工艺流程设计。以控制旋压过程中坯料的起皱开裂现象为优化目标，采用理论分析、数值仿真、实验三者相结合的方式，探索了主轴转速、进给量、旋压轨迹等工艺参数对旋压后工件起皱开裂的影响，并给出了优化取值。按照优化后的工艺参数进行了实验验证，实验结果表明，此工艺方法使旋后工件起皱开裂现象得到了明显改善，产品合格率显著提高。

关键词：壳体；多段深圆筒深圆锥组合面；旋压；起皱控制

中图分类号：TH16　**文献标识码：**A

Spinning Procedure Study on Circular Housing Component of Micro Turbortation Engine

Tang Xiaohu　Feng Dingyan　Xi Yang　Wei Lin
(Sichuan Academy of Aerospace Technology, Chengdu 610100)

Abstract：The shell belongs to the rotating body part combined with multi-section deep cylinders and deep cones , which is mainly used as a coating of micro-jet. The shell has a small wall-thickness and a big ratio of the height to the diameter, which requires high level use of the spinning procedure. In this paper, the procedure scheme design and process design of the multiple spinning manufacturing process are detailed. Taking it as the optimization objective which to control wrinkle and cracking phenomenon of the blank, the effects of the process parameters of the main shaft speed, the amount of feed and the spinning trajectory are studied by theoretical analysis, numerical simulation and experiment, and the optimization value is given. According to the experimental results of the optimized process parameters, the experimental results show that, based on the spinning procedure given in this paper, the phenomenon of the wrinkle and cracking of the work piece is significantly reduced, and the product qualification rate is significantly improved.

Key words：shell；composite surface of multi section deep cylinder and deep cone；spinning；wrinkle control

1　引言

金属旋压是一种金属塑性成形的加工工艺，选用这种工艺能够较容易地制作各种旋转对称的薄壁回转件，因此又称其为回转成形工艺[1]。随着科技的进步，旋压技术已在国外得到了快速的发展和广泛的应用。

近 30 年来，国外金属旋压技术已日臻成熟，旋压设备已经定型，工艺流程稳定，产品多种多样，应用广泛。国内经过几十年的努力，已获得较大发展，加工效率比较高，表面质量好，是目前和今后的发展趋势。

本文通过对涡喷发动机多段深圆筒深圆锥组合面零件壳体进行旋压工艺研究，提高表面质量和加工效

作者简介：唐小虎（1984），工程师，材料成型及控制工程专业；研究方向：金属旋压成形。
收稿日期：2022-01-21

率，掌握旋压工艺在回转体薄壁类零件的加工技术及其推广。

2　技术难点分析

2.1　壳体结构图及技术要求

壳体的结构图 1 所示，技术要求为 B 到 C 段壁厚变化最小≥0.5mm，最大≤1mm。该零件所采用的材料为 1Cr18Ni9Ti。

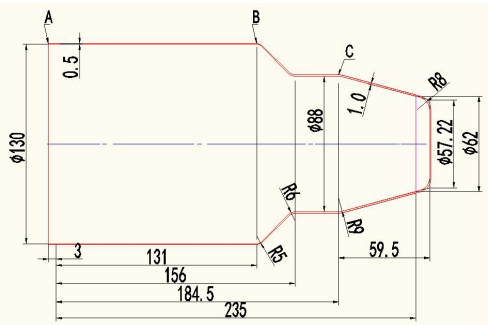


图 1　壳体的结构

2.2　工艺难点分析

a. 小锥面壁厚不易控制。因为旋压时锥面壁厚变薄，材料流动困难，容易出现鼓包，保证锥面壁厚 1.0mm 难度较大。

b. 整体成型难度较大。由于发动机壳体是由两段圆筒、两段圆锥交叉组合而成，大小端直径相差较大（最大直径与最小直径之比约为 1.8），高径比达 3.6（总高度为 215mm，最小直径为Φ60mm）。

3　技术措施

3.1　工艺方案设计

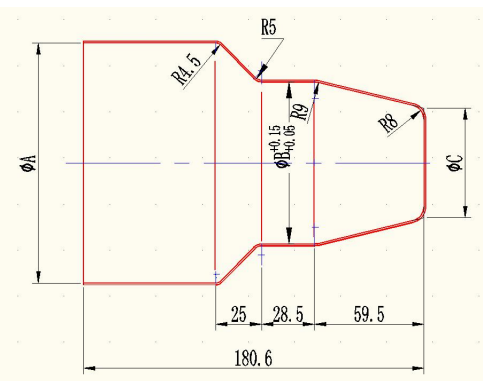


图 2　壳体变壁厚前半成品形状和尺寸

从壳体的结构形状分析，该零件为典型的钣金成型件，其成型的主要工艺方法为剪切旋压和多道次普旋，先剪切旋压成圆锥件，再普旋成形小圆筒段和两锥面段，大圆筒段可通过多道次普旋变薄实现。由于零件整体旋压系数较小，需通过多次旋压才能实现，通过分析，确定出零件旋压后拟达到图2的形状和尺寸要求。

3.2　变壁厚方法分析

变壁厚的方法有两种，变薄拉深和变薄旋压。本次采用变薄旋压工艺方法，采用数控旋压机，先将零件型面旋压成形，小端壁厚控制在 1mm；然后对大圆筒成形，需变壁厚的大圆筒部位壁厚由 1.25mm 变薄为 0.5mm，考虑到内孔$\Phi 110^{+0.16}_{+0.05}$mm 尺寸要求，先多道次普旋将壁厚控制在 0.6mm，再将材料固溶处理，恢复其塑性，一道次成形，这样既可以将壁厚控制在 0.5mm，又可以使零件贴膜，保证其内孔尺寸。

3.3　设计工艺流程

在旋压时，为便于坯料定位，在坯料中心钻Φ14mm 孔；定位基准面选择在小端，即在旋压前先将坯料中心拉伸成形为零件小端型面；初步拟定旋压工艺流程为：备板料→加工外圆内孔→剪切旋压→热处理→旋压筒体→热处理→表面处理→变薄旋压→加工大小端→终检。

3.4　数值模拟及参数优化

3.4.1　三维有限元模型的建立

根据壳体零件旋压力学模型在有限元软件 ABAQUS 平台上建立有限元模型，旋压过程数值模拟属于大变形、接触非线性问题，为了提高计算过程的收敛性，将整个模型的工程特征全部简化。由于不考虑芯模和旋轮的变形，将其设置为刚性体，整个模型中仅板坯设置为弹塑性体。另外，在板坯和芯模的中心部位开小孔，便于采用中心轴法进行网格划分，可以提高计算精度，同时减小网格数量。根据给定的旋压工装，建立的有限元模型如图 3 所示。

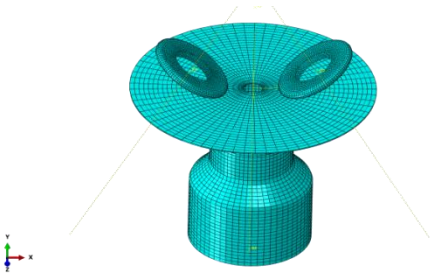


图 3　有限元模型

3.4.2　仿真实验

芯模绕 Y 轴旋转，并沿 Y 轴方向进给，旋轮可绕自身轴线旋转，并沿 X 方向按给定速度平动，限制其自由度。给定板坯材料为 1Cr18Ni9Ti，芯模与旋轮均为刚体。根据前述轨迹进行数值计算，每一道次后保留变形后板坯，重新进行下一道次旋压（卸载）。

旋压不同时期截面处的等效应力图如图 4～图 8 所示。可以看出，旋压成形的前期到中期，最大应力集中于坯料外表面与旋轮接触部分及其后方部分，以及坯料内表面与旋轮接触部分的前方。远离接触区的区域，应力随距离的变大而逐步变小，易发生接触区坯料的拉裂。中期到中后期，最大应力相对均匀地分布于较大的一块区域，不易产生拉裂等缺陷。整个旋压过程应变的产生以坯料与旋轮接触部分及其后方为主，中后期以坯料的中间部分为主，最大等效应变在旋压过程中逐渐变大，最大值产生于坯料的中间部分。

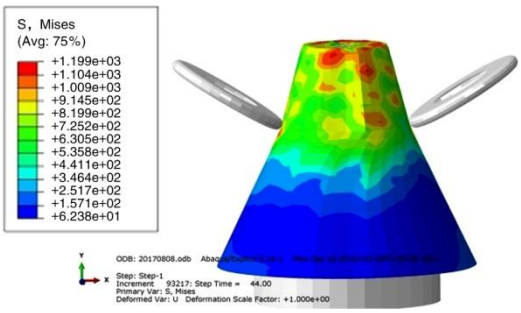


图 4　旋压前期变形后板坯应力云图

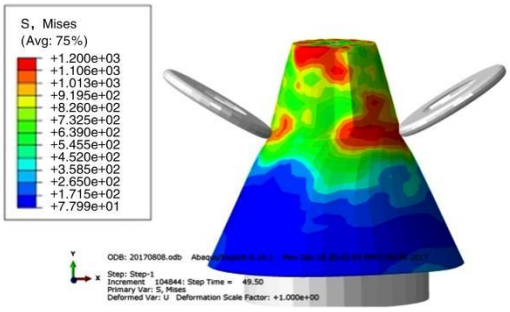


图 5　旋压前中期变形后板坯应力云图

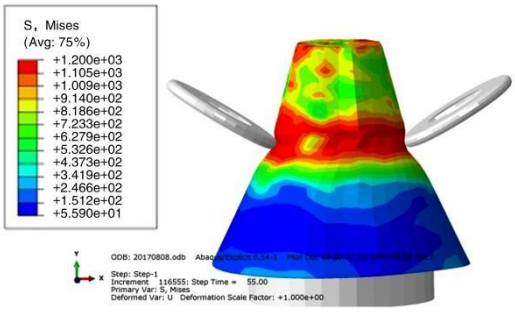


图 6　旋压前中后期变形后板坯应力云图

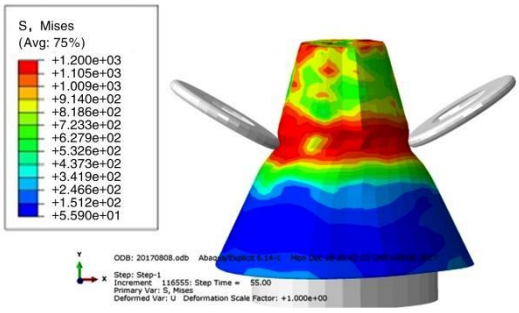


图 7　旋压后期变形后板坯应力云图

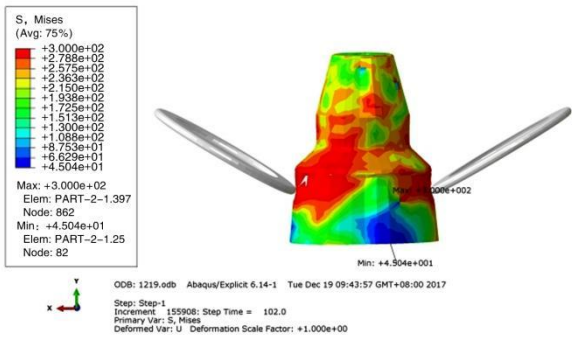


图 8　旋压成形后变形后板坯应力云图

3.5　旋压工艺参数研究

旋压过程中主要的工艺参数包括：主轴转速、进给量、芯模和旋轮的间隙、旋压道次、旋轮运动轨迹。

3.5.1　主轴转速与进给量

根据该零件材料和坯料厚度，结合以往经验，采用恒线速进行剪切旋压；通过正交试验选出其转速与进给量较优化的值。试验情况见表1。

表 1　不同工艺参数对旋压变薄的影响情况

变薄后零件厚度/mm	主轴转速/r·min^{-1}	进给量/mm·r^{-1}	实际变薄情况	表面质量	备注
1.25	190	0.2	变薄效果差	好	—
1.25	190	0.5	变薄效果好	差，有轻微的纹路	—
1.25	210	0.2	变薄效果好	好	—
1.25	210	0.5	变薄效果好	差，有轻微的纹路	—
1.25	250	0.2	零件出现裂纹	不合格	发烫
1.25	250	0.5	零件出现裂纹	不合格	发烫
1.25	280	0.2	零件出现裂纹	不合格	发烫
1.25	280	0.5	零件出现裂纹	不合格	发烫

试验结果：主轴转速 210r/min，进给量 0.2mm/r，能保证壁厚要求，表面质量好。

3.5.2　芯模和旋轮的间隙

剪切旋压时，可根据正弦规律确定芯模与旋轮的间隙δ，其值应等于零件壁厚；而在普旋时，考虑到由于旋压过程中旋压机的弹性变形，仿形系统的液压退让等都会使工件壁厚产生不同程度的弹性回跳，因此其取值$\delta=t\times80\%$。

3.5.3　旋压道次

旋压道次与减薄率密不可分，1Cr18Ni9Ti 钢板的极限减薄率能达到 75%，剪切旋压加工锥形件时，遵循正弦定律，即按式（1）计算：

$$\psi=\frac{t_0-t}{t_0}=1-\sin\alpha \qquad (1)$$

式中：ψ——减薄率；t_0——坯料厚度；t——剪切旋压后的厚度；α——半锥角。$\psi=1-\sin30°$；其减薄率ψ为 50%，小于 75%，所以一道次即可旋成。

普旋的旋压道次取决于旋轮沿毛坯表面的进给量、道次间距、旋轮圆角半径、坯料力学性能，以及旋压轨迹。首先根据材料塑性的变形量确定道次间距，再根据道次间距设计旋压轨迹，通过试验最终确定此零件的旋压道次。

3.5.4　旋压轨迹

剪切旋压轨迹理论上与芯模型面结构一致，一次旋压到尺寸。普旋时，结合工厂数控旋压机的性能特点（手工画旋压轨迹线，自动生成旋压程序），根据道次间距设计旋压轨迹为曲线。

4　方案验证及优化

4.1　实验验证工艺方案

为了验证工艺方案、旋压工艺参数、模具设计的合理性及旋压参数的调试，按工艺流程加工试验件；试验件在普旋时，由于锥面变薄时，出现鼓包，见图9a。继续加工，小锥面型面已基本成形，到圆筒成形时，试验件成形困难，出现起皱、开裂，见图9b。

a　小锥面鼓包　　b　圆筒成形起皱

图 9　旋压起皱的零件

4.1.1　旋压缺陷分析

为避免方案验证过程中旋压成形容易产生失稳鼓包、起皱、裂纹等缺陷问题，须分析其成因并采取相应的预防措施。

本次试验零件在旋压小端时，未控制零件的减薄量，造成零件壁厚变薄太少，成形贴膜后，材料向大端流动困难，导致鼓包。控制措施：为了保证零件壁厚要求，在旋压小锥面时，将其壁厚控制在 1mm。根据图 9b 所示初步分析其原因是零件在剪切旋压后，材料变形不均匀，成形圆筒时，局部料太多，易出现起皱、开裂。控制措施：剪切旋压后，平大端面，保证其均匀性。

4.1.2　旋压变壁厚工艺试验

由于该零件结构的特殊性，不同段壁厚要求不一致，即：小端 1mm，BC 段逐渐变薄，AB 段壁厚为 0.5mm，如图 10 所示。在旋压编程时，可将其划分为三段，分段编程。

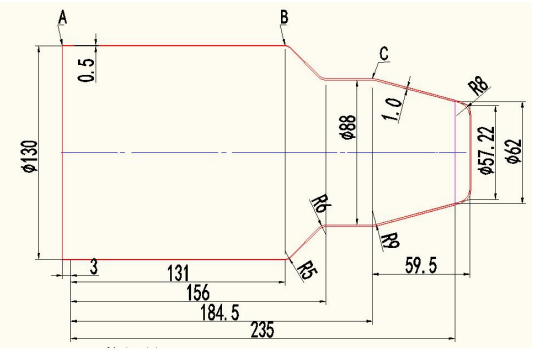


图 10　普旋成型图

普旋成形小端时，须将壁厚控制在 1mm，此时，影响壁厚的因素主要是旋轮与芯模的间距δ，因此将旋轮与芯模的间距δ作为变量，分别选取 0.5mm、0.6mm、0.7mm、0.8mm 进行工艺试验，试验后测零件壁厚，其试验结果见表 2。试验件旋压小端δ选用 0.6mm。

表 2　不同旋轮与芯模的间距对零件壁厚减薄的影响

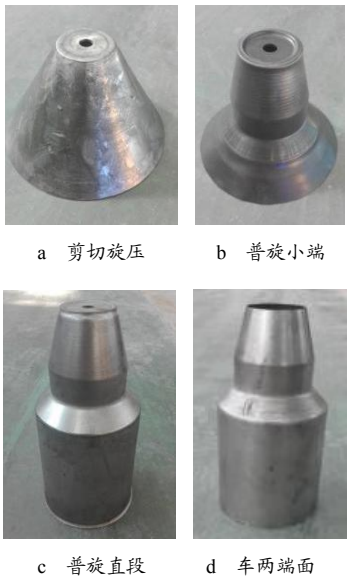
旋轮与芯模的间距δ/mm	壁厚/mm	零件表面是否起皱
0.5	1.08	零件表面未起皱
0.6	1.00	零件表面未起皱
0.7	1.1	零件表面未起皱
0.8	1.15	零件表面未起皱

根据小端成形壁厚控制的经验，在 BC 段，通过继续调整该值达到图纸要求的壁厚，通过试验，在 BC 段其旋轮与芯模的间距δ为 0.4mm 时，其表面质

量较好，零件贴膜，保证其内孔尺寸$\Phi 70^{+0.16}_{+0.05}$ mm，壁厚由 1mm 逐渐变为 0.85mm；AB 段，由于零件成形后要求壁厚在 0.5mm，在该段继续调整其旋轮与芯模的间距，但由于受材料应力影响，材料的变薄量与间距δ不是等比变化；该段的旋轮与芯模的间距值也是通过试验获得，最终δ取值为 0.35mm，成形后壁厚在 0.6～0.7mm，由于零件因多次旋压，料表面已硬化，壁厚很难变薄，且零件很难贴模，无法保证 AB 段内孔尺寸。热处理后再次旋压直边，此时δ取值 0.2mm，一道次旋压 AB 段，成形后壁厚 0.5mm，内孔尺寸$\Phi 110^{+0.16}_{+0.05}$ mm。通过调整旋轮与芯模的间距δ值，实现零件变薄成形是可行的，经过试验得出：小端变薄成形，其δ取值 0.6mm，BC 段成形，δ取值 0.4mm，AB 段贴膜成形，δ取值 0.2mm。

表 3　壳体试验件检测数据　　mm

设计	$\Phi A^{+0.15}_{+0.05}$	$\Phi B^{+0.16}_{+0.05}$	小端壁厚 1	圆筒段壁厚 0.5	$\Phi C\pm 0.25$	—
件号	实测尺寸					结论
1	合格	合格	0.95～0.98	0.51～0.55	合格	合格
2	合格	合格	0.91～0.95	0.50～0.52	合格	合格
3	合格	合格	0.94	0.51～0.52	合格	合格
4	合格	合格	0.96～0.98	0.53～0.56	合格	合格
5	合格	合格	0.98～1	0.56～0.60	合格	合格
6	合格	合格	0.93～0.95	0.50～0.53	合格	合格
7	合格	合格	0.96～1	0.53～0.55	合格	合格
8	合格	合格	0.95～0.99	0.53～0.55	合格	合格
9	合格	合格	0.97～1.05	0.55～0.57	合格	合格
10	合格	合格	0.95～1.02	0.55～0.58	合格	合格
11	合格	合格	0.96～0.99	0.53～0.56	合格	合格
12	合格	合格	0.94～0.99	0.55～0.58	合格	合格
13	合格	合格	0.95～1.02	0.51～0.54	合格	合格
14	合格	合格	0.96～0.99	0.52～0.55	合格	合格
15	合格	合格	0.95～1.02	0.53～0.58	合格	合格
16	合格	合格	0.96～1.05	0.55～0.58	合格	合格
17	合格	合格	0.95～0.99	0.56～0.58	合格	合格
18	合格	合格	0.96～1.02	0.56～0.59	合格	合格
19	合格	合格	0.97～1.05	0.54～0.56	合格	合格
20	合格	合格	0.98～1.03	0.53～0.57	合格	合格



a　剪切旋压　　b　普旋小端

c　普旋直段　　d　车两端面

图 11　零件成形过程

为了进一步验证工艺方案，再次加工试验件，完成各环节的验证试验，零件全部合格，检测数据见表 3，证明壳体整体旋压成形的工艺方法摸索成功。试验过程中的试件形状如图 11 所示。

4.2　优化完善工艺方案

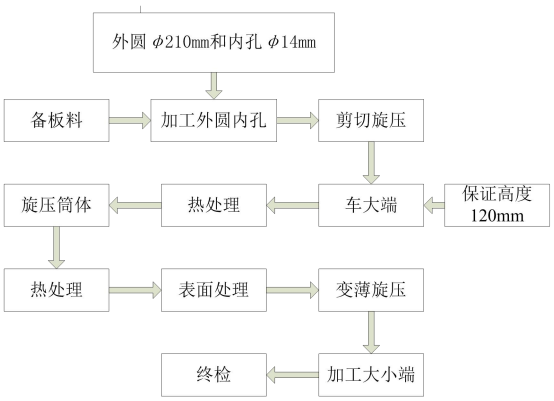


图 12　壳体旋压流程图

通过对原工艺方案的验证，摸索出实现壳体整体旋压成形的工艺方法，其工艺流程如图12所示。

5　小批量生产情况

为了验证优化完善后的工艺并检验其合格率，投制了 20 件，按工艺规程组织生产，20 件零件加工完后经检测全部合格，零件的检测数据见表 4，合格率为 100%。

表 4　壳体小批验证检测数据　　mm

设计	$\Phi A^{+0.15}_{+0.05}$	$\Phi B^{+0.16}_{+0.05}$	小端壁厚 1	圆筒段壁厚 0.5	$\Phi C\pm0.25$	—
件号	实测尺寸					结论
1	合格	合格	0.96～0.99	0.50～0.52	合格	合格
2	合格	合格	0.95～1.02	0.50～0.52	合格	合格
3	合格	合格	0.96～1.05	0.51～0.52	合格	合格
4	合格	合格	0.95～0.99	0.54～0.58	合格	合格
5	合格	合格	1.02	0.56～0.58	合格	合格
6	合格	合格	0.97～1.05	0.57～0.60	合格	合格
7	合格	合格	0.98～0.90	0.50～0.52	合格	合格
8	合格	合格	1.04	0.51～0.52	合格	合格
9	合格	合格	0.95～1.05	0.56～0.59	合格	合格
10	合格	合格	0.98～1.05	0.56～0.60	合格	合格
11	合格	合格	0.99～1.0	0.57～0.60	合格	合格
12	合格	合格	0.98～1.0	0.50～0.52	合格	合格
13	合格	合格	1.0	0.51～0.52	合格	合格
14	合格	合格	0.95～0.98	0.56～0.59	合格	合格
15	合格	合格	0.98～1.0	0.56～0.60	合格	合格
16	合格	合格	0.98～1.05	0.57～0.60	合格	合格
17	合格	合格	0.99～1.0	0.50～0.52	合格	合格
18	合格	合格	0.98～1.0	0.51～0.52	合格	合格
19	合格	合格	1.0	0.56～0.59	合格	合格
20	合格	合格	0.95～0.98	0.56～0.60	合格	合格

6　结束语

分析发动机壳体的工艺难点，拟定了旋压工艺方案，制定了壳体整体旋压成型工艺流程和变壁厚各技术难点的突破措施；利用试验确定旋压工艺参数、探索多道次旋压轨迹和小端型面尺寸精度控制；通过对旋压方案的设计，确定了零件坯料厚度与大小，合理的设计出了各工序图；利用仿真对各工序的模拟加工，确定了理论最优的工艺参数；通过旋压主轴转速与进给量的正交试验和旋压工艺参数试验，最终确定了旋压各工艺参数，突破了多段深圆筒深圆锥组合结构零件因旋压旋轮运动轨迹设计不合理造成的零件不能成形、表面质量差等多种技术难点，经试件和小批加工验证，实现了壳体整体旋压成形零件，合格率达到了规定指标要求，证明各研究技术运用合理、可靠。

参考文献

1　张涛. 旋压成形工艺[M]. 北京：化学工业出版社，2008