

单片闭式波形弹簧加工工艺研究

牛晋波, 常 涛, 李智军, 梁 伟
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于有限元 ABAQUS 软件平台对单片闭式波形弹簧进行了弯曲回弹数值仿真模拟与分析, 研究了单片闭式波形弹簧母材厚度与冲压力和圆角处的回弹量与摩擦系数之间的关系, 得出了冲压模具设计规范和波形弹簧加工工艺规范, 采用该工艺规范制造的单片闭式波形弹簧已经用于无人机发动机之中, 该发动机已通过地面试车考核, 由此表明: 单片闭式波形弹簧加工工艺是合理、正确和有效的。

关键词: 波形弹簧; 冲压成型; 加工工艺; 仿真分析

中图分类号: V261-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2017) 04-0070-06

Study on machining technology of single-piece closed wave-shape spring

NIU Jinbo, CHANG Tao, LI Zhijun, LIANG Wei
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the finite element ABAQUS software platform, the numerical simulation and analysis of the single-piece closed wave-shape spring are carried out. The relationship among thickness of spring material, punching force, friction coefficient and springback value at circular angle are studied. The design specifications of stamping die and processing technic specifications of wave-shape spring were obtained. The single-piece closed wave-shape spring manufactured with these specifications has been used in a kind of UAV engine. The engine has been passed the ground test. This shows that the processing technology of the single-piece closed wave-shape spring is reasonable, correct and effective.

Keywords: wave-shape spring; stamping forming; processing technic; simulated analysis

0 引言

波形弹簧是一种弹性元件, 具有安装空间小, 弹力调控性好等优点, 广泛应用于航空航

天、石油化工等领域。单片闭式波形弹簧为封闭结构, 无开口, 圈数为 1, 沿圆周方向有若干均布波形, 常用于机械密封中, 为石墨静环组件提供轴向静态预紧力, 机械密封工作时, 为石墨

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-06-21

作者简介: 牛晋波 (1990—), 男, 硕士, 研究领域为金属密封工艺

静环组件提供弹力补偿和缓冲作用，保证机械密封端面比压稳定，同时克服辅助密封、传动件的摩擦、动环的惯性作用，从而保证密封端面摩擦副能够处于良好的贴合状态、动环能够处于良好的动态追随状态，以确保密封有效；波形弹簧的刚度值要求处于一定的范围之内，若波形弹簧的刚度值太小，则支反力较小，密封比压亦较小，在机械密封中起不到有效密封的作用，若波形弹簧的刚度值太大，则支反力较大，由此增大了机械密封静环组件石墨环的磨损量，减少了机械密封的工作寿命。单片闭式波形弹簧通常采用模具冲压成型，在单片闭式波形弹簧的加工过程中，单片闭式波形弹簧的材料会发生不可避免的回弹效应，由此造成了单片闭式波形弹簧波形形状的控制难度增大，单片闭式波形弹簧波形形状的差异性易导致轴端密封力方向发生偏斜，同时单片闭式波形弹簧刚度值亦不易控制，当单片闭式波形弹簧刚度值变化范围较大时，极易导致机械密封密封比压特性发生变化，从而影响密封效果、密封性能、密封稳定性、密封可靠性和密封寿命，本文采用有限元 ABAQUS 软件平台进行了单片闭式波形弹簧弯曲回弹数值仿真分析模拟，由此得出了单片闭式波形弹簧模具设计和冲压成型的制造工艺规范，采用该工艺规范，有效控制了单片闭式波形弹簧波形形状和刚度值散布范围，单片闭式波形弹簧已经应用于中国科学院青岛动力研究所无人机发动机的机械密封之中，该发动机已通过了地面试车考核，单片闭式波形弹簧工作正常和稳定。

1 波形弹簧设计技术要求

单片闭式波形弹簧结构如图 1 所示，单片闭式波形弹簧材料为高温合金 GH4169 带材，材料状态为固溶态，该材料具有良好的机械加工性能和长期的组织稳定性，20 ℃时抗拉强度和延伸率较高，即常温塑性较好，适合用于冲压力较大情况下的弯曲成型，而不会因为材料发生较大塑性变形造成材料使用性能发生较大变化，其力学性能见表 1。单片闭式波形弹簧设计技术和一般性能参数范围见表 2，本文研究的单片闭式波形弹簧的设计要求为：外径 $D=\Phi 95.6\text{ mm}$ ，内径 $d=\Phi 86.6\text{ mm}$ ，壁厚 $\delta=0.25\text{ mm}$ ，波高 $H=5.5\text{ mm}$ ，波数 $N=5$ ；刚度要求为：当单片闭式波形弹簧波高由 $H=5.5\text{ mm}$ 压缩至 $H=1.62\text{ mm}$ 时，所施加的作用力 $F=19.6\text{ N}$ ；单片闭式波形弹簧的波形为：由直线+弯角（弯角的圆角半径为 R ）构成的曲面，其结构如图 1 所示。

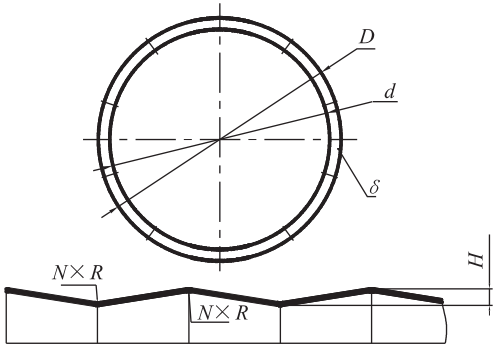


图 1 单片闭式波形弹簧结构示意简图
Fig. 1 Structural diagram of single-piece closed wave-shape spring

表 1 GH4169 带材力学性能(固溶态 20 ℃)

Tab. 1 Mechanical properties of GH4169 strip-shape material (solid solution at 20 ℃)				
屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	弹性模量/MPa	泊松比
520	915	0.22	2 040 000	0.22

表 2 单片闭式波形弹簧设计技术要求和性能参数范围

Tab. 2 Design requirements and performance parameters of single-piece closed wave-shape spring						
	外径/mm	内径/mm	壁厚/mm	波高/mm	波数	工作压力/N
工程代号	D	d	δ	H	N	F
一般范围	16~240	—	0.2~1.4	2.0~7.5	3~6	—
设计要求	95.6	86.6	0.25	5.5	5	19.6

2 波形弹簧数值仿真模拟与分析

单片闭式波形弹簧的外形结构为：内径、外径、厚度、波高、波峰半径、波谷半径及波形轨迹，5个波峰与波谷沿圆周均布，波形轨迹为直线，波峰与波谷之间夹角为 60° ，波形为由直线+弯角构成的曲面。本文使用有限元分析中的ABAQUS软件平台对波形弹簧进行弯曲回弹数值仿真模拟分析，仿真模拟分析过程由3个步骤组成：前处理（建立几何模型，创建材料和界面属性，定义装配件，设置分析步，定义边界条件和载荷及网格划分）、有限元分析计算和后处理。仿真模拟时材料参数与表1中GH4169带材力学性能（固溶态， 20°C ）参数一致，采用壳单元计算，首先运用Explicit动态显示算法模拟冲压弯曲过程，将凹模固定，使用指定压力向下压凸模，再抬起凸模；然后运用Standard静态隐式算法模拟回弹过程，去除凸凹模，只留下弯曲件，将冲压弯曲的应力场加载在弯曲件上，完成回弹过程仿真模拟分析。波形弹簧弯曲回弹仿真分析假设、物性参数、相关定义和壳单元网格划分方式是：凸、凹模设定为刚体，波形弹簧设定为变形体；GH4169材料设为弹塑性材料，塑性变形服从Mises屈服准则，硬化方程为幂指数函数形式 $\bar{\sigma}=k\bar{\varepsilon}^n$ ，GH4169材料状态为固溶态，泊松比 $\lambda=0.3$ ，密度 $\gamma=8.24\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ，弹性模量 $E=204\text{ GPa}$ ，屈服强度 $\sigma_s=520\text{ MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_b=915\text{ MPa}$ ，延伸率 $\delta=22\%$ ，根据应力应变关系可得：硬化指数 $K=1115.8$ ，强度系数 $n=0.123$ ；摩擦力符合库伦摩擦定律，摩擦系数 $\mu=0.1\sim 0.14$ ；定义波形弹簧与冲压模具的接触面为“面-面”法向摩擦接触类型；施加载荷让凸模发生运动，载荷作用力的方向与凸模运动的位移方向一致；仿真模型采用S4R壳单元网格划分，单元网格大小为 1×1 。影响波形弹簧回弹的主要因素是冲压力大小、凸模圆角半径、波形弹簧与冲压模具间的摩擦系数，3个因素从不同方面分别影响波形弹簧冲压成型后回弹量的大小，而且3个因素彼此之间相互独立，为此，采用基于有限元模型的单因素法，研究冲压力、凸模圆角半径、波形弹簧与冲压模具

之间的摩擦系数对波形弹簧冲压成型后回弹量的影响情况，以获得各个因素的最优解。波形弹簧计算机数值仿真模拟流程如图2所示。在波形弹簧计算机数值仿真模拟分析时，施加在凸模上的初始弯曲力

$$F=\frac{(b_1+b_2+\cdots+b_n)t^2\sigma_b}{1000(r+t)} \quad (1)$$

式中： F 为弯曲力， kN ； σ_b 为材料抗拉强度， MPa ； b_1 为弯曲线长度， mm 。代入数值，可求得施加在凸模上的初始弯曲力为 $F=13.5\text{ kN}$ 。

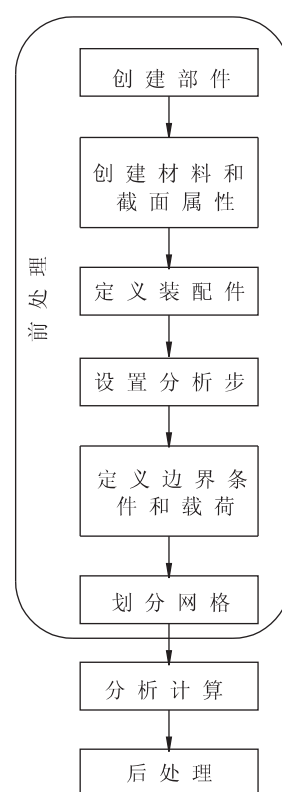


图2 波形弹簧计算机数值仿真模拟流程框图

Fig. 2 Flow block diagram of computer numerical simulation for wave-shape spring

根据图2波形弹簧计算机数值仿真模拟流程框图和波形弹簧弯曲回弹仿真分析假设、物性参数、相关定义和壳单元网格划分方式，可得出冲压力、凸模圆角半径、波形弹簧与冲压模具间的摩擦系数与波形弹簧冲压成型后回弹量之间的关系。经过计算机仿真模拟分析可知，冲压力与波形弹簧回弹量和母材厚度减薄率有关，表3给出

了不同冲压力下波形弹簧回弹后波形高度值的模拟结果，由表 3 可见，冲压力越大，反弹量越小，冲压后波形弹簧回弹后的波形高度值则越大，当冲压力过大时，被冲压件则会出现大面积塑性变形，将会导致无回弹甚至出现负回弹现象，波形弹簧完成冲压制造后会在其内部残存应力、应变，在使用过程中会出现波形高度值缩小的现象，为此，波形弹簧冲压成型时要将其波形高度值比设计值增大 0.2~0.5 mm，波形弹簧波形高度设计要求值为 5.5 mm，初步选取冲压力为 17~18 kN。波形弹簧冲压过程导致的塑性变形直接表现为波形弹簧母材厚度发生了减薄，图 3 是波形弹簧冲压成型后母材厚度与冲压力之间的关系曲线，由图 3 可见，冲压力越大，波形弹簧母材厚度就越小，若波形弹簧厚度较小时，会造成波形弹簧发生断裂现象，影响使用寿命，为此，初步选取冲压力为 9~17 kN。综上所述，选取冲压力为 17 kN 是合理的。冲压模具凸凹模圆角半径对波形弹簧冲压成型后的回弹量亦有影响，凸凹模是配套使用的，仅需研究凸模或凹在对其施加 17kN 冲压力后，其回弹后的圆角半径值即可，为此，选取凸模作为研究对象，在冲压力为 17 kN 的情况下分别选取凸模圆角半径值分别为 4.5 mm，5 mm，5.5 mm 及 6 mm 进行计算机数值仿真模拟分析，计算机数值仿真模拟分析结果见表 4，由表 4 可见，凸模圆角半径设定值越大，则圆角半径回弹量就越小，凸模圆角半径回弹模拟结果波动范围的变化较小，为此，选取凸模圆角半径为 5.5 mm 较为合理，凸模圆角半径值的改变主要影响弯曲成型回弹后的波形弹簧的外径和内径值，对波形弹簧母材厚度的影响可以忽略不计。波形弹簧冲压过程中，冲压模具与被冲压的波形弹簧材料之间会发生摩擦作用，摩擦力的大小除了与冲压力、接触力有关外，还与界面间的表面状态、润滑状态有关，波形弹簧材料弯曲变形过程中，内、外表面分别产生压应力和拉应力，摩擦力的作用可增大拉应力变形区，使内、外表面的应力状态趋向一致，摩擦力越大，波形弹簧圆角处的回弹量就越减小，图 4 波形弹簧圆角处的回弹量与摩擦系数之间的关系曲线就表明

了这一变化关系，由图 4 可见，摩擦系数较大时，波形弹簧圆角处的回弹量较小，若摩擦系数大，则摩擦力亦大，此时，极易磨损波形弹簧带材表面，加之波形弹簧母材厚度较小，为了确保波形弹簧表面质量和使用强度，摩擦系数不能太大，为此，在冲压模具表面粗糙度较小的情况下，通过增大冲压力或减小凸模圆角半径等方法来补偿和抵消由摩擦系数引起的波形弹簧回弹量的增加。综上所述，波形弹簧冲压过程中，工艺规范和模具参数为：冲压力为 17 kN，凸、凹模圆角半径 5.5 mm；摩擦系数 0.1。

表 3 波形弹簧回弹后的波形高度值仿真结果
Tab. 3 Simulation results for springback height of wave-shape spring under different impact pressures

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
冲压力/kN	9	12	15	17	18
回弹后的高度/mm	2.1	3.2	4.9	5.25	6

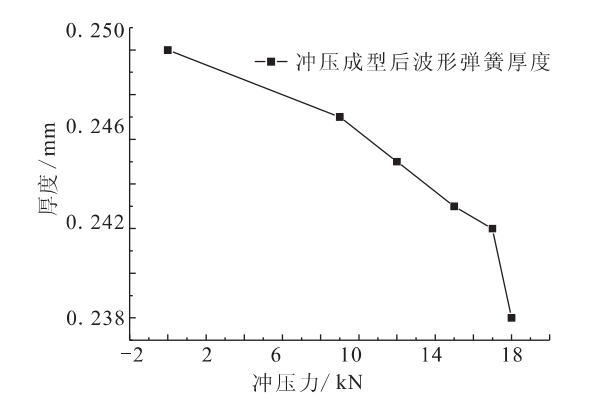


图 3 波形弹簧母材厚度与冲压力之间的关系曲线
Fig. 3 Relationship between thickness of wave-shape spring material and impact force

表 4 凸模圆角弯曲回弹仿真结果
Tab. 4 Simulation results of springback under different fillet radius

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
凸模圆角	4.5	5	5.5	6
回弹后圆角	6.3	6.8	7.1	7.3

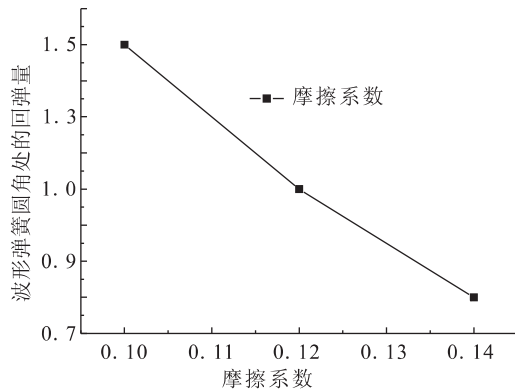


图 4 波形弹簧圆角处的回弹量与摩擦系数之间的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the springback value and friction coefficient at circular angle of wave-shape spring

3 波形弹簧加工工艺

波形弹簧加工工艺主要工序有：下料、冲压、热处理和校形。波形弹簧毛坯尺寸下料精度对波形弹簧成型后的结构、内外径尺寸起着重要的影响作用，采用激光切割机下料，下料尺寸可通过图 5 波形弹簧弯曲展开件一个波峰的展开长度的计算公式来求得，波形弹簧弯曲半径与其厚度的比值 $R/t=28>10$ ，波形弹簧弯曲展开件可按展开件的中轴尺寸来进行计算，取加工过程材料的延伸率 $\varepsilon=1\%$ ，波形弹簧弯曲展开件一个波峰的展开长度

$$L=2l+\pi r \frac{\alpha}{180^\circ} \varepsilon \quad (2)$$

波形弹簧弯曲展开件周长

$$D=10 \times (L-l) \quad (3)$$

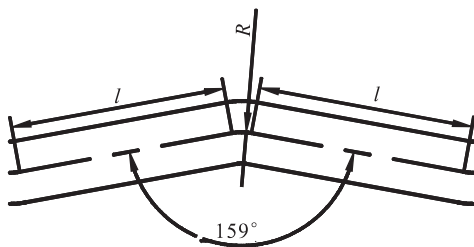


图 5 波形弹簧弯曲展开件的波峰图

Fig. 5 Wave crest dimension of unfolded wave-shape spring

波形弹簧弯曲展开件毛坯半径

$$R=\frac{D}{\pi} \quad (4)$$

对于本文研究的波形弹簧，经计算可得：波形弹簧毛坯外径 $R=97.15 \text{ mm}$ ，内径 $R_i=88.15 \text{ mm}$ 。

波形弹簧波形的外形结构（即波形轨迹）由冲压成型工序完成，通过设计计算、加工控制冲压模具的圆角半径、波形高度等结构尺寸和冲压力的大小等工艺因素以完成波形弹簧波形外形结构的精确控制，冲压模具凸模的圆角半径

$$r_T=\frac{1}{\frac{1}{r}+\frac{3\sigma_s}{Et}} \quad (5)$$

式中： r_T 为凸模圆角半径，mm； r 为弯曲件圆角半径，mm； σ_s 为弯曲件材料屈服强度，MPa； E 为材料拉压弹性模量，MPa； t 为材料厚度，mm。代入数值，可得初始的凸模圆角半径。

冲压模具三维模型图见图 6，冲压模具采用 $\text{HRC} \geq 42$ 的模具钢制造，模具垂直度 ≤ 0.05 ，模具平面度 ≤ 0.05 ，模具限位环与凸凹模配合间隙 ≤ 0.05 ，模具波峰、波谷圆角半径均为 5.5 mm ，在 WDW-850 型、量程为 50 kN 的压力机上进行波形弹簧弯曲成型，冲压力为 17 kN ，冲压成型过程中要求冲压模具水平放置，模具上表面水平跳动量 ≤ 0.02 ，缓慢下压，压速 $\leq 2 \text{ m/s}$ ；完成冲压成型工序后的波形弹簧装入校形模具进行真空固溶、时效、热处理，调整波形弹簧的刚度和校正波形弹簧波形的的外形尺寸，将其调整到最佳值，以符合设计要求；影响波形弹簧刚度的主要因素有：结构、母材的力学性能、母材厚度减薄率等因素，通过真空热处理方法和温度曲线来调整母材的晶粒度、硬度和组织结构，进而调整波形弹簧的刚度；冲压成型时，冲压接触点附近母材厚度的减薄率亦影响着波形弹簧刚度值的大小，当冲压力较大时，接触点附近母材厚度的减薄率则较大，此时，波形弹簧的刚度值较小，当冲压力较小时，接触点附近母材的减薄率则较小，此时，波形弹簧的刚度值则较大，由此，通过调整冲压力的大小，控制接触点附近母材厚度的减薄率，从而可达到控制和调整波形弹簧刚度

值范围之目的。

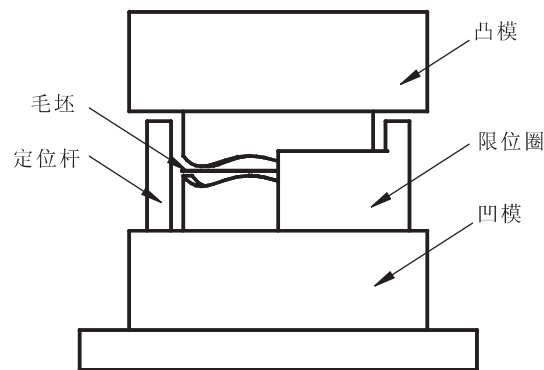


图 6 冲压模具三维模型图
Fig. 6 3D model of stamping die

4 波形弹簧试验验证

采用上述工艺方法和工艺规范，生产制造了单片闭式波形弹簧 20 件，单片闭式波形弹簧尺寸和刚度试验检测结果见表 5。

表 5 波形弹簧尺寸和刚度检测结果

Tab. 5 Detected results of wave-shape spring dimensions			
关键指标	要求值	实测值	偏差
外径/mm	95.6±0.1	94.8~96.5	-
内径/mm	86.6±0.1	85..8~87.5	-
波高/mm	5.5	5.42~5.52	0.1
压力/N	19.6	19.6~20.8	1.2

单片闭式波形弹簧刚度是在 TLS-W2000 型压力机上完成试验测试的，由表 5 可知，单片闭式波形弹簧波形和结构尺寸满足设计技术要求，波高最大偏差<0.1 mm，刚度最大偏差为 1.2 N (<7%)，单片闭式波形弹簧已经用于中国科学院青岛动力研究所无人机发动机的机械密封之中，该发动机已通过地面试车考核，单片闭式波形弹簧工作状态正常，刚度稳定，发动机端面密封比压满足设计技术要求，由此表明：单片闭式波形弹簧加工工艺是合理、正确和有效的。

5 结论

本文基于有限元 ABAQUS 软件平台对单片闭式波形弹簧进行了弯曲回弹数值仿真模拟与分析，研究了了影响波形弹簧波形和刚度的因素、波形弹簧母材厚度与冲压力和圆角处的回弹量与摩擦系数之间的关系，得出了冲压模具设计规范和单片闭式波形弹簧加工工艺规范，采用该工艺规范制造的单片闭式波形弹簧已经用于中国科学院青岛动力研究所无人机发动机的机械密封之中，该发动机已通过地面试车考核，单片闭式波形弹簧工作状态正常，刚度稳定，发动机端面密封比压满足设计技术要求，由此表明：单片闭式波形弹簧加工工艺是合理、正确和有效的。

参考文献：

[1] 李大为, 沈子建, 周汝林. 波形弹簧的有限元设计分析[C]// 全国弹簧学术会论文集, 上海: 中国工程机械出版社, 2010.

[2] 薛新, 刘强, 阮峰. 基于数值模拟的弧形件板料弯曲回弹补偿研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 17(6): 59-61.

[3] 张宏新. 波纹簧弯曲模设计[J]. 模具制造, 2012(6): 41-42.

[4] 李学新. 波形弹簧成形模曲面的在线加工[J]. 郑州纺织工学院学报, 2001, 12(3): 19-21.

[5] 姜春英, 李盈毅, 赵淳宁, 等. 波形弹簧材料及热处理工艺选择[J]. 郑州纺织工学院学报, 1996, 7(3): 15- 20.

[6] PANTHI S K, RAMAKRISHNAN N, CHOUHAN J S. An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method [J]. Journal of materials processing technology, 2007, 186: 120-124.

[7] XUE P, YU T X, CHU E. An energy approach for predicting springback of metal sheets after double-curvature forming[J]. International journal of mechanical sciences, 2001, 180(43): 1915-1924.

[8] 朱成龙, 张杰, 何康康, 等. 弯管成型截面畸变有限元数值仿真分析[J]. 火箭推进, 2015, 41(5): 77-82.

ZHU Chenglong, ZHANG Jie, HE Kangkang, et al. Finite element numerical simulation analysis on section distortion in bending process of tube[J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(5): 77-82.

(编辑：马 杰)