

高精度 17-4PH 不锈钢隔碗拉深液压胀形复合成形工艺参数优化

赖亮庆^{1,2}, 陈高升^{1,2}, 冯林兆^{1,2}, 苏正涛^{1,2}, 刘嘉^{1,2}, 李小军³

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 中国航发减振降噪材料及应用技术重点实验室, 北京 100095; 3. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 目的 针对 17-4PH 不锈钢冷成形回弹大、贴模性差等问题, 研究 17-4PH 不锈钢隔碗零件的拉深成形和液压胀形规律, 确定隔碗零件拉深液压胀形复合成形的最佳工艺及参数。方法 利用有限元方法确定并优化了拉深预成形和液压胀形中的工艺参数。基于优化后的结果设计并制造了相关的模具, 最终通过试验验证了有限元方法的有效性。结果 结合数值模拟和试验的方法, 提出了零件先拉深预成形、后液压胀形的多步成形方案, 逐步优化了成形工艺参数, 最终成形出了满足尺寸和精度要求的高精度隔碗零件。结论 通过数值模拟获得了最佳的坯料直径及多步成形中的关键工艺参数, 基于数值模拟优化为主和试验验证为辅的设计制造理念, 解决了 17-4PH 不锈钢冷成形回弹大和贴模性差的问题。

关键词: 拉深成形; 液压胀形; 数值模拟; 回弹

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.03.012

中图分类号: TG386.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)03-0104-08

Processing Parameters Optimization of Drawing-Hydraulic-Bulging Forming of High-Precision 17-4PH Stainless Steel Spacer

LAI Liang-qing^{1,2}, CHEN Gao-sheng^{1,2}, FENG Lin-zhao^{1,2}, SU Zheng-tao^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, LI Xiao-jun³

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, AECC, Beijing 100095, China; 2. Key Lab of Materials and Application Research for Vibration & Noise Reduction, AECC, Beijing 100095, China; 3. Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: In view of the large springback and poor moldability of 17-4PH stainless steel during cold forming, this paper analyzes the deep drawing and hydraulic bulging forming law of the high-precision 17-4PH stainless steel spacer parts, and determines the best process and parameters for the deep drawing and hydraulic bulging of the spacer parts. The finite element method was used to determine and optimize the process parameters in deep drawing pre-forming and hydraulic bulging. Based on the optimized results, related molds were designed and manufactured, and finally the effectiveness of the finite element method was verified through experiments. Combining the methods of numerical simulation and experiment, a multi-step forming scheme was proposed, in which the parts were preformed by deep drawing and then hydrobulged, the forming process parameters were gradually optimized, and finally a high-precision spacer part meeting the size and accuracy requirements was formed. Through numerical simulation, the best blank diameter and key process parameters in multi-step forming are obtained. Based on the design and manufacturing concept of numerical simulation optimization and experimental verification, the problems of large springback and poor moldability of 17-4PH stainless steel during cold forming are solved.

KEY WORDS: deep drawing; hydraulic bulging; numerical simulation; springback

收稿日期: 2021-01-31

基金项目: 民用飞机专项科研 (MJ-2018-F-15)

作者简介: 赖亮庆 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为橡胶弹性元件。

通讯作者: 李小军 (1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为金属板料成形性能。

曲面回转体零件的成形工艺是基于拉深和胀形的一种复合成形工艺，其成形是一个复杂的塑性变形过程。拉深一般是将一块平板坯料在凸模和凹模的共同作用下成形出一个开口空心零件的压制过程^[1-2]，而胀形则是指将直径较小的桶形或锥形坯料通过刚性凸模或液压^[3-5]由内向外膨胀，使之成为各种曲面零件的压制过程。由于完美结合了拉深和胀形工艺的优点，拉深胀形复合成形工艺广泛应用于航空航天和汽车制造等领域。随着国内外航空航天制造零件所要求的形状和精度不断提高，对制造工艺的要求也越来越高，进而对复合工艺的探索得到了有力的推动。对于航空用高精度 17-4PH 不锈钢薄壁隔碗零件的制造成形，拉深和胀形多步复合工艺具有重要的研究意义。

近年来，数值模拟技术广泛应用于板料塑性成形工艺、设备及模具设计等方面^[6]，通过数值模拟技术能够对成形过程中出现的回弹、起皱及破裂等行为进行预测，从而高效优化成形工艺参数，提高成形质量^[7]。采用有限元技术优化工艺将大大减少设计周期和制造成本。Padmanabhan^[8]通过有限元技术对不锈钢拉深成形工艺进行了模拟研究，最终确定了最优的成形工艺参数，并结合试验，验证了数值模拟的有效性。曾一畔^[9]基于数值仿真技术，研究了飞机复杂曲面零件的充液成形工艺，探究了充液工艺参数对复杂曲面膜皮零件成形质量的影响规律。此外，KARAFILLIS A P 等^[10]和 WUL 等^[11]基于有限元技术，深入研究了针对回弹量的模具补偿方法，提出了迭代法修模，最终消除了回弹的影响，使零件满足了精度要求。

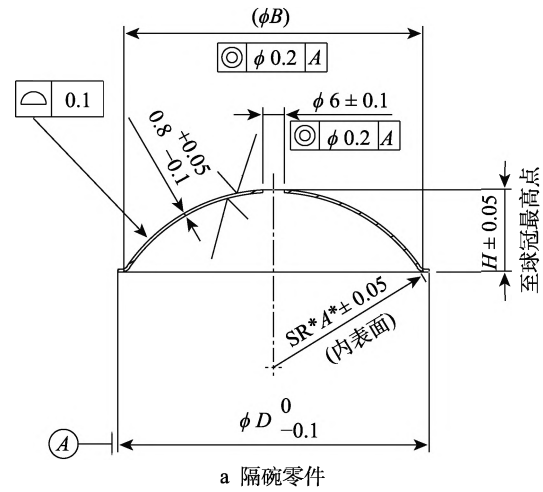
不锈钢隔碗零件一般由不锈钢材料制造而成。唐为鹏^[12]针对 17-4PH 不锈钢弹性轴承金属隔碗冷成形回弹大、贴模性差的特点，研究了采用热成形的方法保证了该零件的尺寸精度，同时分析了热成形中成形方法、成形温度、压边间隙、冲压速度等工艺参数对成形零件尺寸的影响，但热成形工艺操作繁琐、生产效率低，不适宜批量生产。与传统的拉深成形相比，液压胀形具有可以提高成形极限和消减内皱等优点^[13-14]。此外，该工艺在提高成形尺寸精度、表面质量及降低模具成本等方面有较大的优势^[15]。通过对以上隔碗成形工艺的研究和分析，文中提出了采用先拉深工艺预成形，后通过液压胀形最终定形的多步复合工艺的方法制造不锈钢 17-4PH 不锈钢隔碗零件。

1 成形工艺分析与方案设计

1.1 隔碗零件成形工艺分析

某型飞机用高精度 17-4PH 不锈钢薄壁隔碗零件为曲面浅球形结构，其零件结构及尺寸如图 1a 所示。因该系列形状零件都是形状类似，尺寸有所差异如表 1 所示，故选取 1#零件作为研究分析。1#零件添加工

艺补充面后，其形状如图 1b 所示。



b 带工艺补充面的隔碗零件

图 1 零件结构及尺寸

Fig.1 Part structure and dimension

表 1 隔碗零件系列尺寸

Tab.1 Dimension of a series of spacer part

隔碗编号	球面半径 /mm	法兰边内径 ΦB /mm	法兰边外径 ΦD /mm	隔碗高度 H /mm
1#	48.60	81.52	86.52	22.93
2#	51.55	84.00	89.00	22.46
3#	54.55	86.45	91.46	22.07
4#	57.55	88.85	93.86	21.77
5#	60.60	91.25	96.26	21.51
6#	63.70	93.64	98.64	21.31
7#	66.90	96.09	101.10	21.14
8#	70.15	98.54	103.54	21.01
9#	73.45	101.00	106.00	20.92
10#	76.80	103.48	108.48	20.85
11#	80.20	105.98	110.98	20.80

根据图 1 零件结构及尺寸、尺寸公差的范围、高度以及直径，给定坯料厚度为 0.8 mm，成形后的零件弧面段的厚度不低于 0.7 mm，即厚度减薄量需控制在 15%以内，同时保证零件弧面轮廓度的公差为 0.1 mm。在成形件的法兰部分，厚度不能超过 0.8 mm，需要采用后续工序切除。法兰与弧面段之间

的过渡圆角半径为 $R=2\text{ mm}$ ，零件成形后的高度 H 在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 的范围内。

通过对隔碗零件尺寸以及所用料进行分析，该零件的成形特点主要如下。

1) 零件终成形的高度 H 公差为 $\pm 0.05\text{ mm}$ ，轮廓度为 0.1 mm ，直径公差为 $\pm 0.1\text{ mm}$ ，要保证零件型面贴合度和尺寸稳定均匀性，宜采用拉深和胀形结合的复合成形，但应考虑在零件圆弧顶端区域内的减薄量，如果减薄较大，减薄量容易超差，更有甚者使顶部破裂。

2) 材料采用 17-4PH 沉淀化不锈钢材料进行零件成形，由于材料的强度较高，塑性差，伸长率低，回弹大。零件成形时容易破裂，成形后产生的回弹会严重影响零件弧面轮廓以及零件的高度，不利于尺寸精度的控制。

3) 零件法兰需要切除到 0.8 mm 以内，切边后应力不均，容易再次变形，对工装设计以及后续加工技术要求高。

1.2 隔碗零件成形方案设计

通过对隔碗零件的结构及尺寸公差的分析，结合实际生产研制条件，拟采用成形方案：预拉深工艺+液压胀形工艺。

半球形或者浅球形零件的拉深系数对于任何直径均为定值，即 $m=0.707$ ，一般均可一次拉成，其拉深方法根据相对料厚 t/D 的不同，可选用带校正作用的凹模、带压边圈的拉胀模、具有拉胀筋的凹模或反拉胀凹模等，但是由于隔碗材料塑性差、强度大、回弹大的特性，一次成形精度差，尺寸稳定均匀性没办法保证，成形高度较高，很容易顶部破裂，故采用多步成形复合工艺，即第一道次以储料为主的拉深预成形和第二道次以液压为主的胀形工艺。

2 成形工艺仿真分析

对隔碗的成形性能进行分析如下：指定初步的成形工艺，然后在三维建模软件里面建立毛坯、模具几何形状，然后采用板料冲压有限元软件 Dynaform 进行有限元数值模拟，根据模拟情况设计模具工作尺寸、确定试制工艺及调整成形参数，然后不断调整模具尺寸、成形条件，直至得到理想的零件。整个零件试制控制流程如图 2 所示。

2.1 拉深预成形工艺仿真分析

2.1.1 预成形数值模型建立

首先在 CATIA 三维建模软件里面建立毛坯、模具几何形状，然后采用板料冲压有限元软件 Dynaform 进行有限元数值模拟。由于零件具有轴对称的特点，为了减少计算时间，采用 1/4 模型进行模

拟。由单拉试验获取材料参数，经三参数 Barlat 屈服准则处理后输入软件中。板料采用四节点 Belytschko-Tsay 壳单元，自适应网格划分；凸凹模及压边圈可看作刚体，选择刚性四节点单元进行离散网格划分。接触方式采用罚函数，接触类型为单向面-面接触，摩擦因数设为 $\mu=0.125$ ，拉深预成形的有限元模型如图 3 所示。

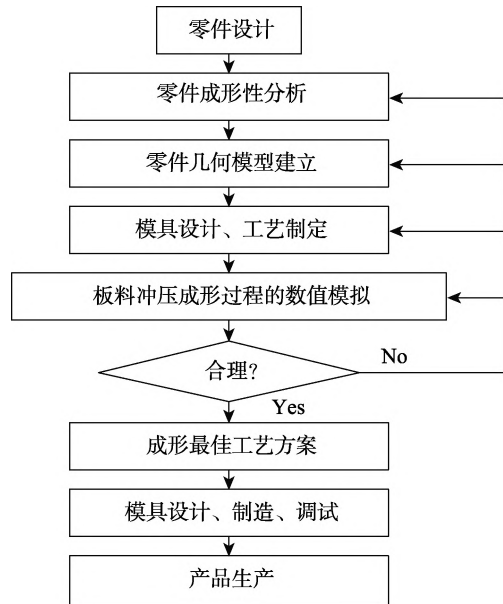


图 2 隔碗成形工艺流程
Fig.2 Process flow diagram of spacer forming

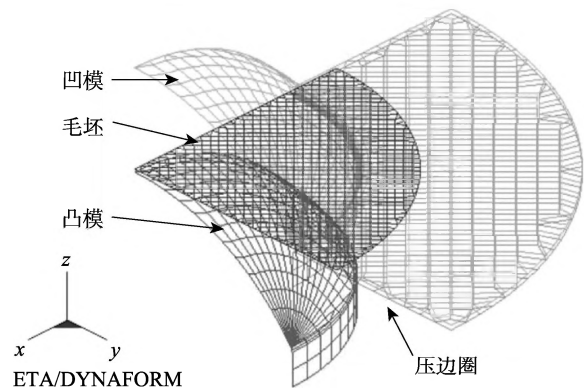


图 3 拉深预成形有限元模型
Fig.3 Finite element model of deep drawing pre-forming

2.1.2 预成形数值模拟结果

利用刚性凸模进行拉深预成形仿真，各工艺参数设置为：毛料直径为 130 mm ，刚性凸模的直径为 78 mm ，胀形高度为 20 mm 。拉深预成形模拟结果如图 4 所示，模拟结果显示零件成形良好。

2.2 液压胀形工艺仿真分析

2.2.1 液压胀形数值模型建立

基于第一道次成形模拟结果，取第一道次成形后试样的几何模型作为第二道次试样的初始模型，同样

取 1/4 进行建模，材料模型及网格单元类型同上，进行第二道数值模拟，模拟中以零件内侧的均布载荷作为液压压力，此时使零件贴模的载荷主要来源于均布压力，而凸模基本不起作用。其有限元模型如图 5 所示。

压胀形力 25 MPa，压边力为 50 kN。模拟结果如图 6 所示，零件成形情况良好，符合要求。

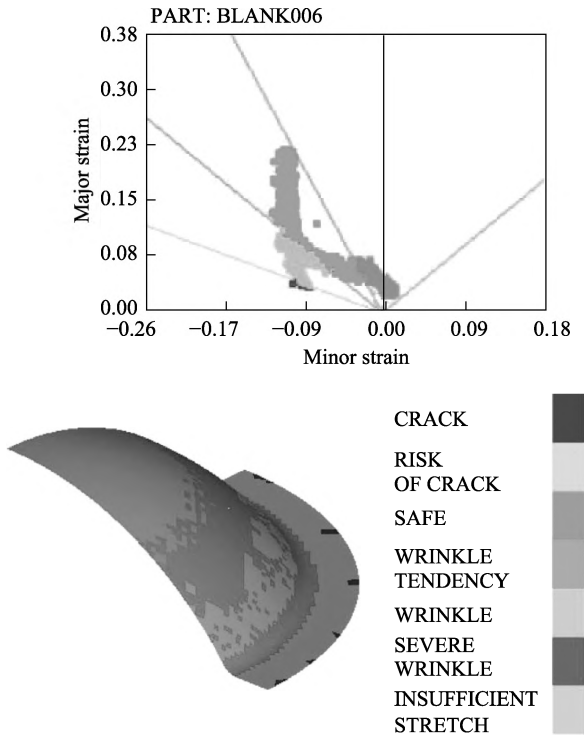


图 4 拉深预成形模拟结果

Fig.4 Simulated result of deep drawing pre-forming

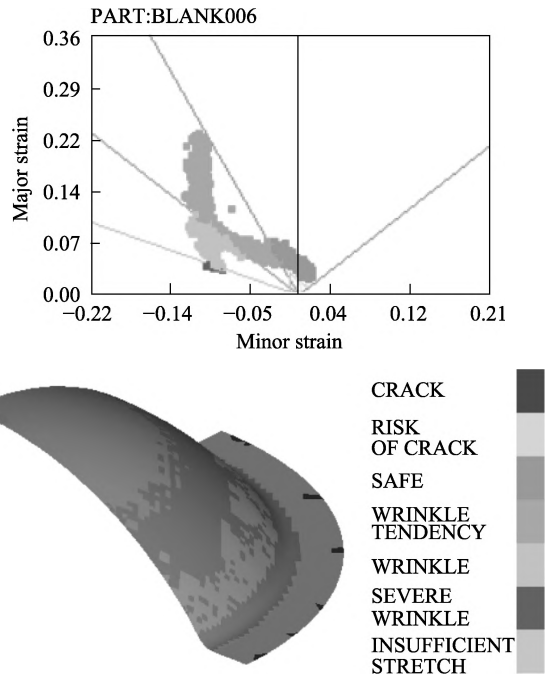


图 6 液压胀形模拟结果

Fig.6 Simulated result of hydraulic bulging

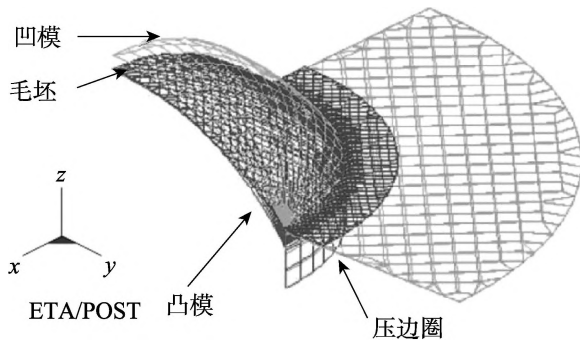


图 5 液压胀形有限元模型

Fig.5 Finite element model of hydraulic bulging

2.2.2 液压胀形数值模拟结果

利用液压力使板料与凹模贴膜，成形出所需尺寸的隔碗零件。

$$p = K \frac{t}{R} \sigma_b \tag{1}$$

式中： p 为单位液压力 (MPa)； K 为形状系数，球面形状时 $K=2$ ； t 为厚度， $t=0.8$ mm； R 为球面半径， $R=48.2$ mm (按中性层球面计算)； σ_b 为材料的抗拉强度， $\sigma_b=1340.5$ MPa。

计算得液压胀形力 $p=25.69$ MPa，可以先给定液

3 结果分析与试验验证

3.1 拉深预成形过程工艺参数影响分析

在隔碗零件的拉深预成形过程中，压边力是影响成形的主要因素之一。当压边圈所给压力过小时，拉深件的法兰边与零件的球面都有可能发生起皱现象；当压边圈所给压力过大时，零件的厚度减薄量容易超差，甚至发生拉断破裂的现象。

首次进行拉深有限元模拟时，不确定压边力的大小，可以采用定间隙压边的方式压边。常用压边间隙为 $1.1t$ ，其中 t 为材料厚度，有限元模拟采用的板料厚度为 0.8 mm，则设置压边间隙为 0.88 mm，在模拟拉深成形过程中，压边圈保持不动。对 17-4PH 材料的隔碗零件预拉深成形所需压边力进行确定。利用拉深有限元模型进行计算，毛料直径为 130 mm，拉深模拟结果如图 7—8 所示。

从图 7 可以看出，隔碗成形过程中最大的应力及应变主要发生在圆角过渡区，该区域应力比较大，材料从凹模圆角流入曲面段成形，产生较大应力应变，是比较危险的区域，主要呈现为减薄和起皱。

从图 8 可以看出，隔碗顶部应变较大，符合曲面成形的特性，顶部为等双拉胀形区域，在凸模摩擦力以及材料硬化的作用下，顶部减薄明显，故调整不同压边力和毛坯直径，调整压边力得到最优结果，如图 9 所示。

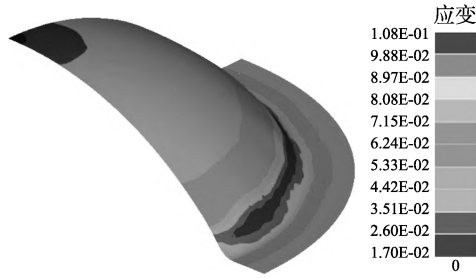


图7 第1主应变
Fig.7 First principal strain

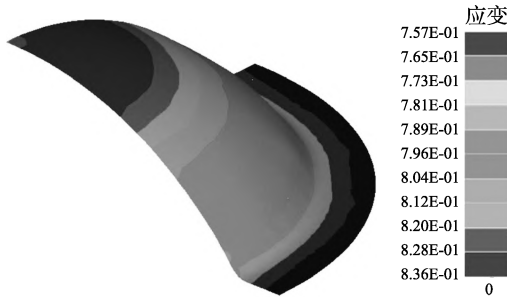


图8 第2主应变
Fig.8 Second principal strain

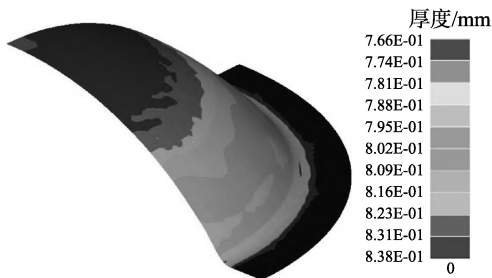


图9 零件整体厚度分布
Fig.9 Overall thickness distribution of part

模拟结果显示,模拟零件的成形效果均良好,未出现起皱及破裂等现象,零件贴模情况良好,零件的厚度变化均处于公差允许的范围之内;最大减薄处均位于弧面顶端,其中,17-4PH 材料的最小厚度为 0.76 mm。在 Dynaform 后处理软件中可导出不同材料拉深过程中压边圈的受力载荷时间曲线,如图 10 所示。对于 17-4PH 材料,其在拉深过程中所需最大压边力为 70 kN。图 11 展示了该条件下毛坯直径为 130 mm 时的模拟回弹结果,回弹计算采用软件的单步隐式算法。由图 9 和图 11 可知,零件成形后最大减薄处与最大回弹量处均位于零件的球面顶端。

通过改变毛坯直径的尺寸,进行毛坯直径工艺参数优化,基于上述建立的有限元模型,得到 17-4PH 不锈钢板毛坯直径对零件成形及回弹的影响如表 2 所示。

由表 2 可知,在拉深预成形模拟中,毛坯直径对减薄量及回弹的影响趋势是一致的。在 125~135 mm 的范围内,毛坯直径的变化对厚度的减薄量基本没有影响,而对零件顶部的最大回弹量却存在影响,当毛

坯直径增大时,零件成形后的最大回弹量变小,且在相同毛坯直径的拉深条件下,17-4PH 材料的最大回弹量较大,因此,在隔碗零件的拉胀控制试验中,毛料的直径可选择 130 mm。

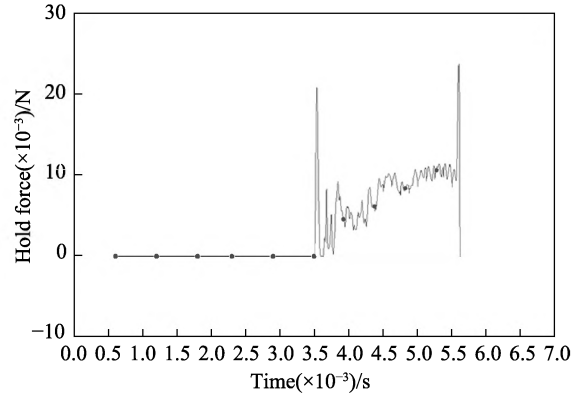


图10 拉深压边力历程
Fig.10 Course of blank holder force of deep drawing

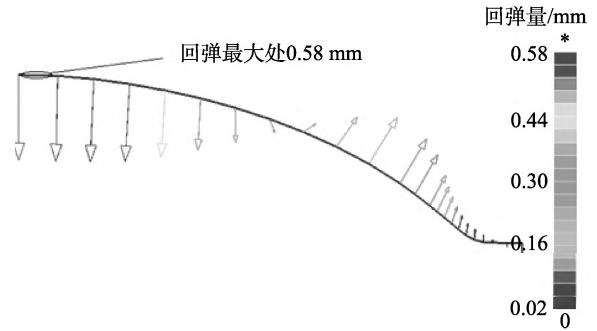


图11 直径 130 mm 时模拟回弹结果
Fig.11 Simulated result of springback at the diameter 130 mm

表 2 17-4PH 不锈钢板直径对成形及回弹的影响
Tab.2 Effect of the diameter of 17-4PH stainless steel sheet to forming and springback

模拟试验	压边力 F/kN	毛坯直径 Φ/mm	最大厚度减薄量 Δt/mm	最大回弹量/mm
1	70	125	0.03	0.64
2	70	128	0.02	0.58
3	70	130	0.03	0.53
4	70	135	0.03	0.58

3.2 液压胀形过程工艺参数影响

影响液压胀形成形的工艺参数较多,例如压边力、液压胀形力、摩擦因数以及胀形速度等,而其中压边力和液压胀形力是最重要的影响因素。当压边力过小时,液压胀形过程中会发生液压油的泄漏,而液压胀形力的大小也直接影响到毛料与凹模的贴合。

3.2.1 压边力影响

首次进行液压胀形有限元模拟时,不确定压边力的大小,可以采用定间隙压边的方式压边。常用压边间隙为 1.1t,其中 t 为材料厚度,有限元模拟采用的

板料厚度为 0.8 mm, 则设置压边间隙为 0.88 mm, 在模拟液压胀形过程中, 压边圈保持不动。设置液压胀形力为 25 MPa (按式 (1) 估算)。计算完成后, 压边圈的受力载荷时间曲线如图 12 所示。

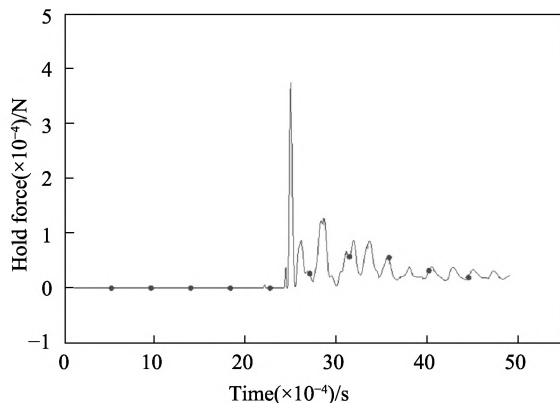


图 12 液压胀形压边力历程

Fig.12 Course of blank holder force of hydraulic bulging

分析图 12 可知, 在刚模拉胀成形阶段 (2.5×10^{-3} s 之前), 压边力在 5 kN 左右时, 即可保证毛料被凸模顺利顶起而不发生起皱; 在 2.5×10^{-3} s 之后, 压边力

开始迅速爬升, 最高达到 45 kN, 由于此时正处于液压胀形阶段, 因此压边力才会瞬间增大, 因此, 可以选择压边力大小为 45 kN, 如果压边力小于这个值, 则在液压胀形阶段, 液压油就很可能发生泄漏, 从而使胀形不能顺利进行。

3.2.2 液压胀形力影响

在液压胀形的预成形阶段, 主要是要找到能够使毛料与凹模贴合的液压胀形力, 通过式 (1) 的计算, 估算出了液压胀形力 p 的值为 30 MPa。为了得到满足实际成形试验的液压胀形力的值, 还需通过有限元模拟进行确定。根据已估算出成形所需的液压胀形力 30 MPa, 基于有限元模拟的结果对预成形液压胀形力进行确定。

模拟试验中, 毛料直径为 130 mm。工步一中, 刚性凸模直径为 105 mm, 刚模拉胀成形高度为 20 mm; 工步二中, 液压胀形的压边力设置为 45 kN, 则模拟结果如表 3 所示。

从表 3 的模拟结果可以看出, 液压胀形力在 25 MPa 以上时, 毛料就能够与凹模进行贴合, 因此要保证液压胀形力 $p \geq 25$ MPa, 才能使零件成形顺利。

表 3 不同液压胀形力下毛料的贴模情况

Tab.3 Mold fitting result of blank material under different hydraulic bulging forces

模拟试验	毛料直径 Φ /mm	凸模直径/mm	胀形高度/mm	液压胀形压边力/kN	液压胀形力/MPa	毛料贴模情况
1	130	105	19	45	10	不贴模
2	130	105	19.5	45	15	不贴模
3	130	105	20	45	20	不贴模
4	130	105	20	45	25	贴模
5	130	105	20	45	30	贴模

3.3 试验验证

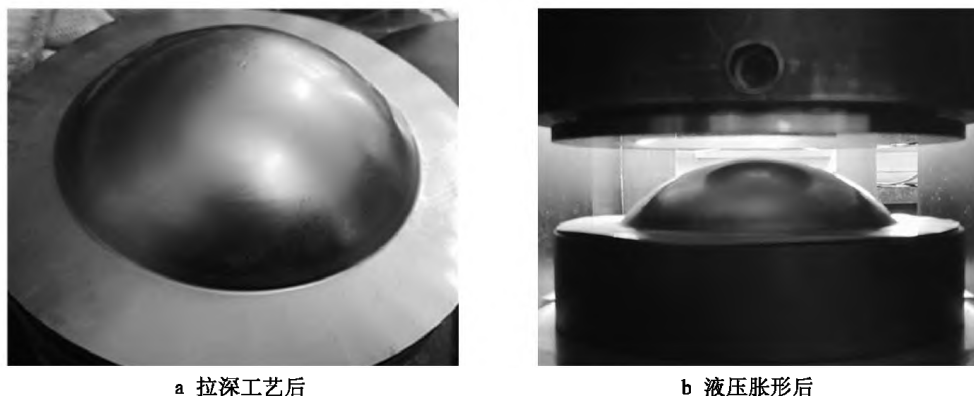
根据隔碗零件成形的工艺路线, 结合仿真情况, 设计各工步所需要的模具, 最后进行隔碗零件的研制试验。当第 1 道工序 (拉深预成形) 将毛料胀形到一定高度之后, 利用液压胀形模进行液压胀形工序, 压边圈与凹模间必须采取密封圈进行密封, 否则液压油会溢出, 影响胀形顺利进行。成形试验机通过顶杆的推力作用于压边圈内的液压油产生液压胀形力, 液压胀形力作用于毛料, 最终使之与凹模贴合。利用专用设备 BCS-30D/100 结合所设计的胀形模具, 进行了隔碗零件的胀形成形试验。其中, BCS-30D/100 通用板材成形性能试验机的公称压力为 300 kN, 压边缸公称压力为 200 kN, 完全满足试验所要求。

各道次试验后的零件如图 13 所示, 在拉深预成形工艺中, 毛坯为圆形板材, 直径 Φ 为 130 mm, 与凸模接触的那一面采用漆片润滑, 压边力为 70 kN,

凸模加载速度为 20 mm/min, 刚模拉胀成形高度为 20 mm, 毛料的成形情况良好。液压胀形工艺中, 将预成形得到的半成品零件进行液压胀形, 给定压边力为 45 kN, 液压胀形力设置为 50 MPa, 最终得到成形后的隔碗零件如图 13b 所示。

为了更好地描述成形后隔碗零件的弧面厚度情况, 在测量时选取了弧面顶部、弧面中部以及法兰边 3 个位置处的厚度值 t_1 , t_2 , t_3 进行测量, 厚度的测量工具采用高精度的超声波测厚仪, 如图 14a 所示。同时, 为了检验成形件的贴模情况, 设计了测量用检验模, 并结合塞规进行轮廓度误差测量, 测量过程如图 14b 所示。

进行 5 组成形试验, 所得测量结果如表 4 所示。为了更好地描述弧面轮廓度误差, 在弧面外表面沿高度方向均匀选取 3 个点, 测量其轮廓度误差 Δa , Δb , Δc 。由于最大回弹量基本位于零件的顶部, 则 Δa 值即为零件的最大回弹量。

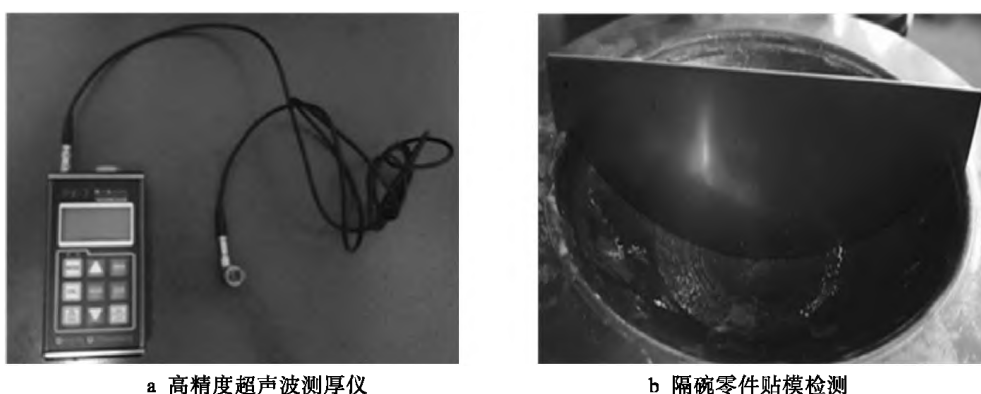


a 拉深工艺后

b 液压胀形后

图 13 优化工艺后最终成形隔碗零件

Fig.13 Final spacer part after optimizing the forming process



a 高精度超声波测厚仪

b 隔碗零件贴模检测

图 14 检测工具及贴模检测

Fig.14 Testing tool and mold fitting test

表 4 隔碗零件多步工艺成形试验测量结果 (修模前)

Tab.4 Multi-step forming compound process result of spacer part (before mold repair)

mm

试验	零件高度 H	弧面顶部厚度 t_1	弧面中部厚度 t_2	法兰边厚度 t_3	轮廓度误差 Δa	轮廓度误差 Δb	轮廓度误差 Δc
1	22.93	0.75	0.78	0.82	-0.43	-0.20	0.15
2	22.95	0.755	0.78	0.82	-0.45	-0.19	0.14
3	22.90	0.74	0.78	0.82	-0.44	-0.21	0.13
4	22.98	0.752	0.786	0.82	-0.45	-0.17	0.14
5	22.89	0.75	0.779	0.82	-0.42	-0.16	0.13

由表 4 的测量结果可知,成形零件的厚度能够满足厚度公差的要求,然而弧面的轮廓度公差与曲面高度不满足要求,这与模拟结果是一致的,零件不完全贴模与回弹有着直接的关系。为了得到满足尺寸公差要求的零件,需要对液压胀形凹模进行修模。为了保证成形零件的高度满足公差要求,拉深凹模设计为带有裕度的椭圆形。修模后零件贴模效果很好,如图 14b 所示。修模后的成形零件尺寸形状公差均满足要求,证明零件多步复合成形方案是可行的,同时也验证了有限元模拟结果的可靠性。

零件最终定型需要切除多余的法兰边,顶部球冠孔的加工,以及法兰切薄 0.1 mm,以便配合后续工序。最终研制出复合生产要求的隔碗零件,如图 15 所示。



图 15 最终成形隔碗零件

Fig.15 Final spacer part

4 结论

主要针对某型飞机高精度隔碗零件的成形控制进行了研究, 通过隔碗零件的工艺分析, 提出了成形方案。利用有限元模拟技术和试验的方法, 对这种方案进行了论证, 并确定了成形方案的工艺参数及其对成形质量的影响, 得出以下几点结论。

1) 针对 17-4PH 不锈钢材料隔碗零件的成形特点, 采用的最佳冷成形工艺为先进行拉深预成形、后进行液压胀形多步复合成形工艺, 对该工艺方案进行了有限元模拟仿真。

2) 通过对预拉深工艺过程的数值仿真结果分析, 确定了预拉深的压边力和坯料直径的最佳尺寸为 130 mm, 此时成形后的回弹量最小。

3) 通过对液压胀形工艺的数值模拟结果分析, 液压胀形力在 25 MPa 以上时, 毛料才能与凹模进行贴合, 因此要保证液压胀形力 p 不低于 25 MPa, 才能使零件顺利成形。

参考文献:

- [1] 胡世光. 钣料冷压成形的工程解析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 254—262.
HU Shi-guang. Engineering Analysis of Sheet Metal Cold Forming[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009: 254—262.
- [2] 胡世光. 板料冷压成形原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 91—115.
HU Shi-guang. Principles of Sheet Cold Forming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979: 91—115.
- [3] ZHANG S H, DANCKERT J. Development of Hydro-Mechanical Deep Drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83: 14—25.
- [4] ZHANG S H. Developments in Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 91(1/2/3): 236—244.
- [5] LEE M G, KORKOLIS Y P, KIM J H. Recent Developments in Hydroforming Technology [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2014, 229(4): 572—596.
- [6] 吴向东, 张毅升, 万敏, 等. 板材成形性能试验方法及应用[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 42—50.
WU Xiang-dong, ZHANG Yi-sheng, WAN Min, et al. Application and Test Methods of Sheet Metal Formability[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 42—50.
- [7] 宋波, 于忠奇, 桑阳. 客机镜面翼尖零件拉深成形工艺[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 50—53.
SONG BO, YU Zhong-qi, SANG Yang. Deep Drawing Process for Airplane Wingtip with Mirror Surface[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(6): 50—53.
- [8] PADMANABHAN R, OLIVEIRA M C, ALVES J L, et al. Influence of Process Parameters on the Deep Drawing of Stainless Steel[J]. Finite Elements in Analysis Design, 2007, 43(14): 1062—1067.
- [9] 曾一畔, 董锦亮, 宋炳毅, 等. 飞机复杂曲面蒙皮零件充液拉深技术研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 59—65.
ZENG Yi-pan, DONG Jin-liang, SONG Bing-yi, et al. Hydrodynamic Deep Drawing for Complex Curved Skin Part of Aircraft[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 59—65.
- [10] KARAFILLIS A P, BOYCE M C. Tooling Design in Sheet Metal Forming Using Springback Calculations[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1992, 34(2): 113—131.
- [11] WU L. Tooling Mesh Generation Technique for Iterative FEM Die Surface Design Algorithm to Compensate for Springback in Sheetmetal Stamping[J]. Engineering Computations, 2013, 14(6): 630—648.
- [12] 唐为鹏. 直升机旋翼弹性轴承隔片热成形工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 48—59.
TANG Wei-peng. Research on Thermoforming Process of Elastic Bearing Spacer for Helicopter Rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 48—59.
- [13] WANG J, YANG C K. Failure Analysis of Hydroforming of Sandwich Panels[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(2): 256—262.
- [14] YUAN S J, ZHANG W W. Analysis of Shape Variation during Hydro-Forming of Ellipsoidal Shells with Double Generating Lines[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 107(3): 180—187.
- [15] MENG B, WAN M, WU X, et al. Inner Wrinkling Control in Hydrodynamic Deep Drawing of an Irregular Surface Part Using Drawbeads[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(3): 697—707.