

## 弹壳拉深成形工艺分析及模具设计

刘 新<sup>1</sup>, 郭睦基<sup>1</sup>, 李登虎<sup>1</sup>, 周 晗<sup>2</sup>, 刘 东<sup>1</sup>, 张高娟<sup>1</sup>

(1. 重庆长江电工工业集团有限公司, 重庆 401336; 2. 陆军装备部 装备项目管理中心, 北京 100000)

**摘要:** 以某型号弹壳孟子为研究对象, 针对初始设计方案拉深成形后孟子中心底厚超差的问题, 通过数值模拟分析其原因: 第 1 次拉深过程中, 坯料的弯曲变形量过大, 使得坯料无约束底部的弯曲半径变小、径向拉应力过大, 从而导致坯料底部减薄超差。在此基础上, 提出控制坯料第 1 次拉深成形的弯曲变形量、减少坯料底部径向拉应力的优化方案, 数值模拟结果显示, 孟子中心底厚达到 3.43 mm, 中心底厚得到有效提升。采用优化方案进行工艺试制, 其结果表明, 孟子中心底厚平均值达到 3.452 mm, 孟子外径、高度和中心底厚均达到了设计要求。数值模拟结果与实验结果的吻合度高, 其对实际生产具有指导性作用。

**关键词:** 弹壳孟子; 拉深成形; 底厚减薄超差; 模具设计; 金属流动规律; 弯曲变形量

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.012

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0081-06

## Process analysis and die design on cartridge deep drawing

Liu Xin<sup>1</sup>, Guo Muji<sup>1</sup>, Li Denghu<sup>1</sup>, Zhou Han<sup>2</sup>, Liu Dong<sup>1</sup>, Zhang Gaojuan<sup>1</sup>

(1. Chongqing Changjiang Electrical Appliances Industries Group Co., Ltd., Chongqing 401336, China;

2. Equipment Project Management Center, Army Equipment Department, Beijing 100000, China)

**Abstract:** For a certain type of cartridge case, aiming at the problem of out-of-tolerance for center bottom thickness of case after deep drawing in the initial design scheme, the reason was analyzed by numerical simulation. The bending deformation amount of blank was too large during the first deep drawing process, so that the bending radius at the unconstrained bottom of the blank became smaller and the radial tensile stress was too larger, resulting in the thinning of the bottom of blank out of tolerance. On this basis, an optimized scheme was proposed to control the bending deformation amount of blank in the first deep drawing process and reduce the radial tensile stress at the bottom of blank. The simulation results show that the center bottom thickness of case has been effectively increased to 3.430 mm. And the optimized scheme was used for process test. The results show that the center bottom thickness average value of case reaches 3.452 mm, and the outer diameter, height and center bottom thickness of case achieve the designed requirements. Thus, the numerical simulation results are in good agreement with the experimental results, which can guide the actual production.

**Key words:** cartridge case; deep drawing; out-of tolerance of bottom thickness thinning; die design; law of metal flow; bending deformation amount

枪弹的年需求量较大, 且不能重复使用, 还需确保安全性<sup>[1-3]</sup>, 因此, 保证枪弹生产的高效、优质、高稳定性是现阶段数字化技术改造的主要研究方向之一<sup>[4-5]</sup>。而拉深成形作为常规枪弹生产的第 1 道工序, 弹壳孟子成形质量是保证后续各道次加工生产的前提条件。

关于弹壳孟子的加工方法, 目前主要有拉深和挤压两种, 而关于孟子的成形研究主要集中在工艺开发和工艺参数设计。李晓光等<sup>[6]</sup>提出了通过控制坯料与凸模的偏移量来保证热挤压壁厚差的方法。胡冶昌等<sup>[7]</sup>建立了基于 NX 高级仿真模块的弹壳拉深数值仿真模型, 通过计算获得了孟子成形的各场

量云图。彭连友等<sup>[8]</sup>根据孟子的尺寸规格设计了一种热拉深成形方法。王玉松<sup>[9]</sup>对铝合金弹壳的挤压—引长—冲底成形过程进行数值模拟仿真, 并对相应的模具结构进行优化。朱绪强等<sup>[10]</sup>应用有限元分析软件对某款药筒的热拉深过程进行了数值模拟仿真。上述研究对弹壳拉深成形有限元模型的构建及工艺设计具有重要的参考价值。

本文以弹壳孟子为研究对象, 设计其初始拉深成形工艺方案, 并应用有限元分析软件 DEFORM 进行数值模拟, 分析其塑性变形过程中金属流动规律及中心底厚的变化情况, 并在此基础上进行成形工艺方案优化, 最后通过工艺试制来验证优化方案的可行性。

### 1 成形工艺分析及有限元模型建立

常规枪弹弹壳的成形工艺流程为: 下料—拉

收稿日期: 2022-01-10; 修订日期: 2022-04-10

作者简介: 刘 新 (1995-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: 18426457621@163.com

深—引长—打凹—平底—冲孔—收口<sup>[11-12]</sup>。拉深作为弹壳塑性成形过程中最基础的工步之一，其孟子的成形质量在全工序中起到决定性作用，是影响弹壳最终成形质量的关键工步。

某款弹壳的下料尺寸规格及拉深后的尺寸要求如图 1 所示。坯料规格为  $\Phi 24.3\text{ mm}\times 3.6\text{ mm}$  的圆柱片，下料质量为  $13.7\sim 14.0\text{ g}$ 。成形后的弹壳孟子有两个重要的尺寸要求，即外壁直径为  $\Phi 17_0^{+0.15}\text{ mm}$  和中心底厚为  $3.40\sim 3.49\text{ mm}$ 。

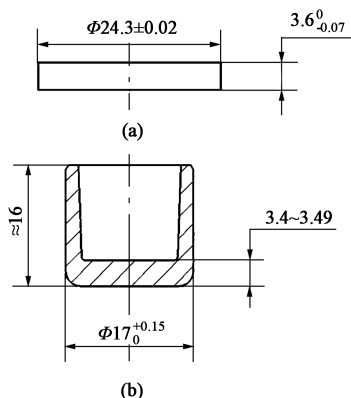


图 1 下料规格 (a) 及零件尺寸要求 (b)  
Fig. 1 Blanking specification (a) and size requirement of part (b)

为了充分了解弹壳拉深成形过程中的金属流动情况以及成形后弹壳孟子的形状尺寸，应用有限元分析软件对弹壳的拉深成形过程进行数值模拟仿真。考虑到弹壳孟子为轴对称零件，因此，采用 AutoCAD 构建坯料及模具的 2D 模型，并导入有限元分析软件 DEFORM-2D<sup>[13-14]</sup> 中构建拉深成形有限元模型，如图 2 所示，模拟相关参数设置见表 1。

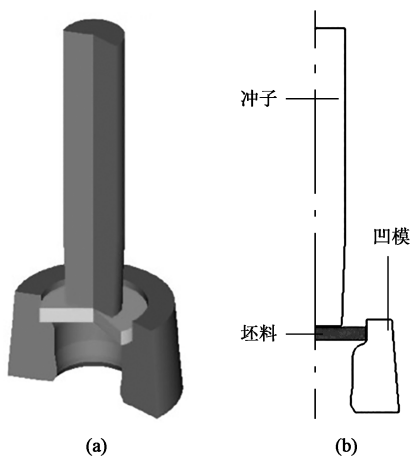


图 2 拉深成形有限元模型  
(a) 三维模型 (b) 二维模型  
Fig. 2 Finite element model of deep drawing  
(a) 3D model (b) 2D model

表 1 模拟参数设置

Table 1 Setting of simulation parameters						
参数	坯料网格数量	材料牌号	成形速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	摩擦类型	摩擦因数	模具属性
设置	2000	H70 黄铜	80	剪切	0.08	刚体 塑性

2 数值模拟分析

采用初始方案进行弹壳拉深成形数值模拟。根据拉深成形载荷曲线 (图 3)，可将整个成形过程划分为两次拉深成形。第 1 次拉深成形过程又可以大致分为 3 个阶段：阶段 1 为弯曲阶段，如图 4a 所示，在冲头作用下，与冲子接触的坯料中心区域向下运动，边缘处则以凸模圆角为转动中心发生弯曲，此阶段的成形载荷由零载荷快速上升；阶段 2 为稳定阶段，如图 4b 所示，坯料底部弯曲大致结束，主要变形为侧壁进入凹凸模间隙，成形载荷略有一些波动；阶段 3 为拉入阶段，如图 4c 所示，在冲头作用下坯料全部拉入第 1 次拉深凹模，成形载荷快速下降。

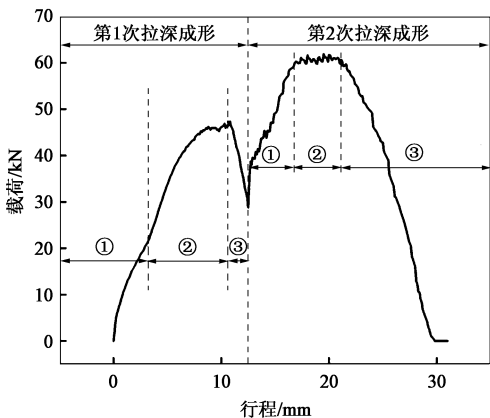


图 3 初始方案的拉深成形过程的行程-载荷曲线  
Fig. 3 Stroke-load curve of deep drawing process in initial scheme

在第 2 次减薄拉深成形过程中，又可以大致分为 3 个阶段：1 阶段为挤入阶段，如图 4d 所示，在冲子的作用下坯料逐渐减径进入锥形区域，成形载荷再次快速上升；2 阶段为稳定阶段，如图 4e 所示，随着坯料逐渐通过定径带，减径变形趋于稳定，此阶段的成形载荷略有波动但变化不大；3 阶段为冲出阶段，如图 4f 所示，坯料随着冲子下行，逐渐脱离模具，坯料与模具的接触区域逐渐减少，成形载荷快速下降，直至完成拉深全过程，载荷降至零。

对拉深成形模拟结果进行测量，结果发现，拉深件的外径和高度可满足设计要求，但中心底厚仅有  $3.33\text{ mm}$ ，小于设计要求 ( $3.40\sim 3.49\text{ mm}$ )。

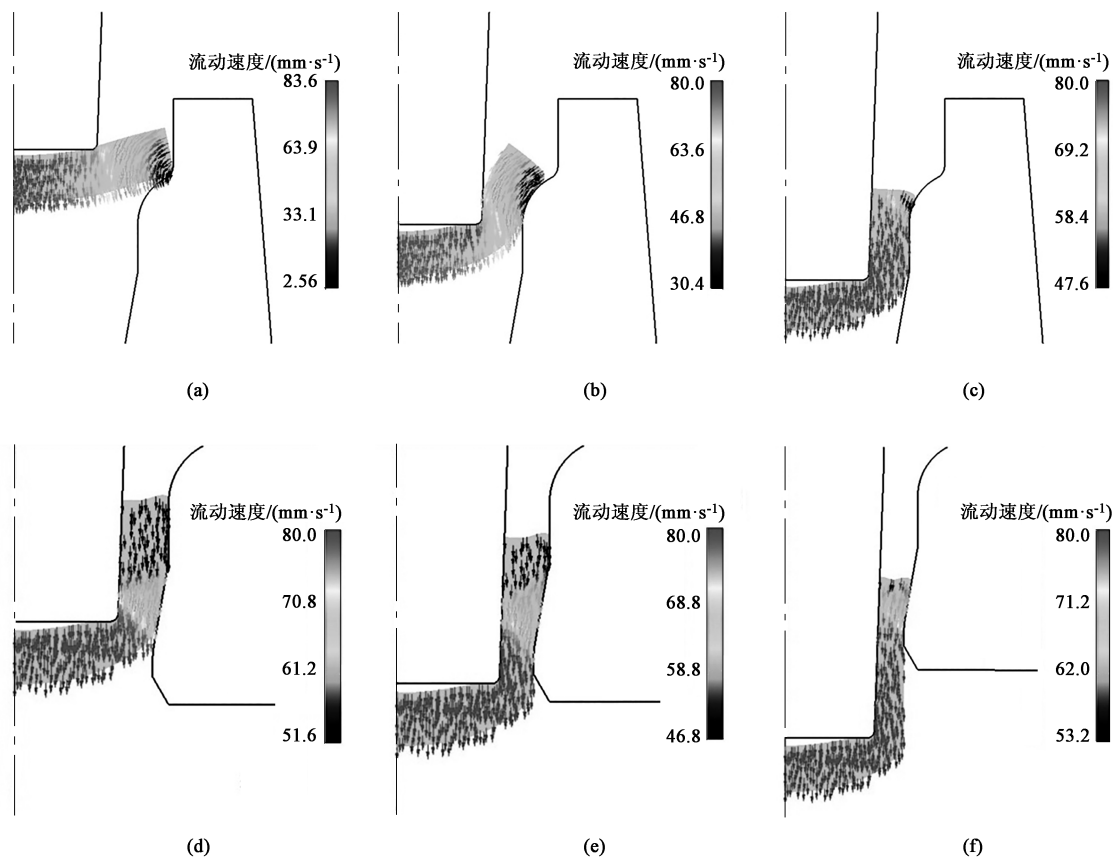


图 4 初始方案拉深成形过程的数值模拟结果

(a) 第 1 次拉深成形的阶段① (b) 第 1 次拉深成形的阶段② (c) 第 1 次拉深成形的阶段③ (d) 第 2 次拉深成形的阶段①  
(e) 第 2 次拉深成形的阶段② (f) 第 2 次拉深成形的阶段③

Fig. 4 Numerical simulation results of deep drawing process in initial scheme

(a) Stage ① of the first deep drawing (b) Stage ② of the first deep drawing (c) Stage ③ of the first deep drawing  
(d) Stage ① of the second deep drawing (e) Stage ② of the second deep drawing (f) Stage ③ of the second deep drawing

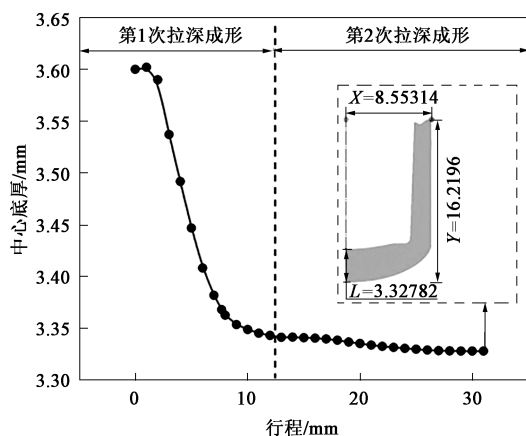


图 5 初始方案中孟子中心底厚的变化情况

Fig. 5 Variation conditions of center bottom thickness for case in initial scheme

为了分析拉深成形过程中底厚的变化情况,对孟子的中心底厚进行追踪,其结果如图 5 所示。在第 1 次拉深成形过程中,拉深件的半径  $X$  和高度  $Y$

可满足设计要求,中心底厚  $L$  已减薄至 3.40 mm 以下;第 2 次拉深成形过程中,中心底厚仅略有减薄。第 1 次拉深成形对孟子底厚的影响程度明显大于第 2 次拉深成形。

为了分析导致拉深后孟子中心底厚变薄的原因,首先对底部进行点追踪(以中心为起点,每间隔 2 mm 取点,共计 5 点),获取拉深成形过程中底部应力的变化情况,如图 6a 所示。其次,对拉深成形过程中孟子外侧轮廓进行提取,获取不同行程下孟子中心底部的轮廓形状,如图 6b 所示。在第 1 次拉深成形过程中,坯料底部处于无约束状态,冲子向下,使得坯料发生弯曲,坯料底部受径向拉应力作用而导致板厚减薄,如图 6a 所示。并且,在冲子行程  $s$  为 2~8 mm 时,坯料快速拉入凹模,受凹模口部圆角的限制,其弯曲半径快速变小,如图 6b 所示,这也是导致该阶段坯料底部径向拉应力快速上升、板厚快速减薄的原因。当  $s$  在 8~12 mm 范围

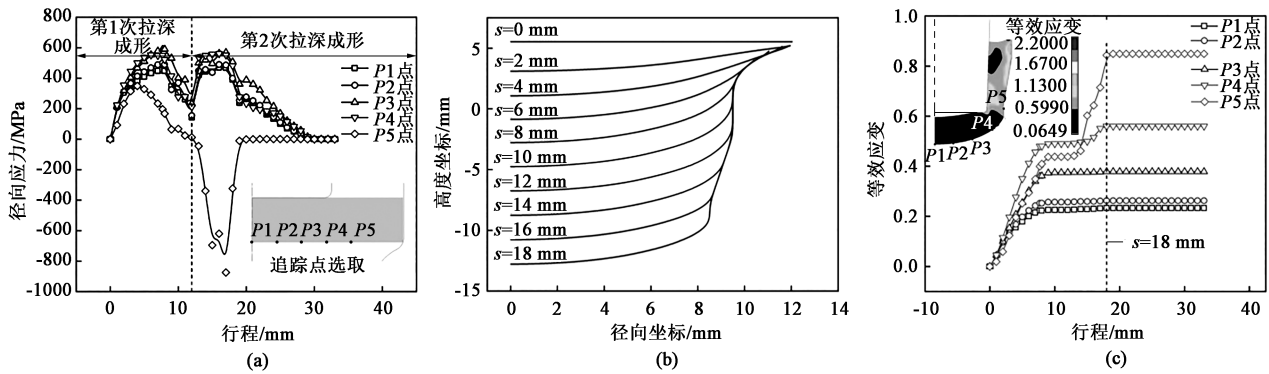


图 6 初始方案的点追踪分析结果

(a) 径向应力变化曲线 (b) 坯料底部轮廓变化曲线 (c) 等效应变变化曲线

Fig. 6 Point tracking analysis results in initial scheme

(a) Changing curves of radial stress (b) Changing curves of bottom profile for blank (c) Changing curves of equivalent strain

时, 坯料弯曲半径的变化较小, 因此, 该阶段的径向拉应力值降低。在第 2 次减薄拉深成形过程中, 主要为孟子壁厚的减薄变形, 坯料弯曲半径变化不大, 如图 6c 所示, 孟子中心底部的变形主要集中在与壁厚连接的边缘侧, 底部只在通过锥形区域时略有变形。综上分析可知, 导致孟子中心底厚减薄超差的主要原因为: 第 1 次拉深成形过程中, 凹模口圆角半径设计较小导致坯料的弯曲变形量过大, 从而使得坯料底部的弯曲半径变小、径向拉应力过大, 从而使得坯料底部减薄超差。

### 3 模具优化设计

针对初始方案出现的孟子中心底厚减薄超差的情况, 提出在第 1 次拉深成形过程中控制坯料的弯曲变形量, 减少因快速弯曲导致的坯料底部径向拉应力过大而导致的底厚减薄现象, 图 7 为优化后的凹模形状。具体优化为: 将凹模口圆角半径由原来的  $R_1$  增大至  $R_2$ , 同时将原设计中直径为  $D$  的直侧壁修改为锥角为  $\alpha$  的锥形侧壁。

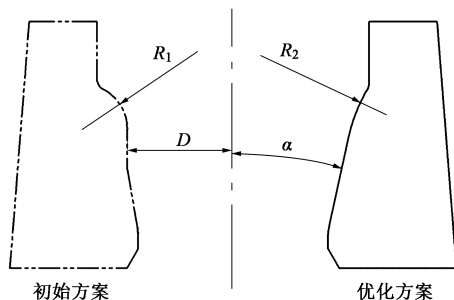


图 7 凹模优化前后对比图

Fig. 7 Comparison of die before and after optimization

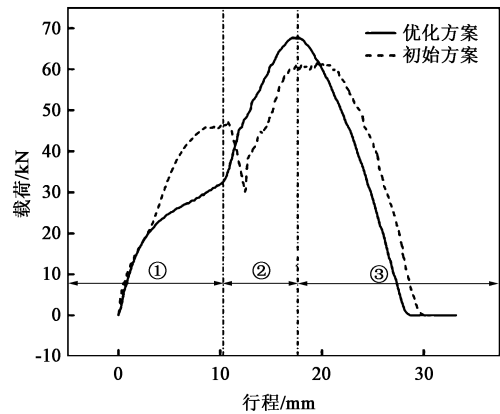


图 8 优化方案的拉深成形过程的行程-载荷曲线

Fig. 8 Stroke-load curves of deep drawing process in optimized scheme

根据优化方案的行程-载荷曲线 (图 8), 可将优化方案的拉深成形过程大致分为 3 个阶段: 阶段①为弯曲阶段, 如图 9a 示, 在冲子的作用下坯料以凸模圆角为转动中心发生弯曲, 成形载荷相较于初始方案明显降低; 阶段②为挤入阶段, 如图 9b 所示, 坯料通过凹模圆角后逐渐进入锥形区域, 由于锥形侧壁相较于直侧壁的变形量大, 并且坯料与凹模的接触面积也逐渐增加, 因此, 该阶段的成形载荷逐渐升高; 阶段③为冲出阶段, 如图 9c 所示, 坯料经凹模定径带后逐渐与模具脱离接触, 成形载荷快速下降。

对优化方案的拉深成形模拟结果进行测量, 结果如图 10 所示, 孟子的外径、高度和中心底厚均达到了设计要求, 其中心底厚达到 3.43 mm, 相较于初始方案得到了明显提升。

相较于初始方案, 优化方案中第 1 次拉深成形后侧壁为锥形, 坯料的弯曲半径是逐渐变小的,



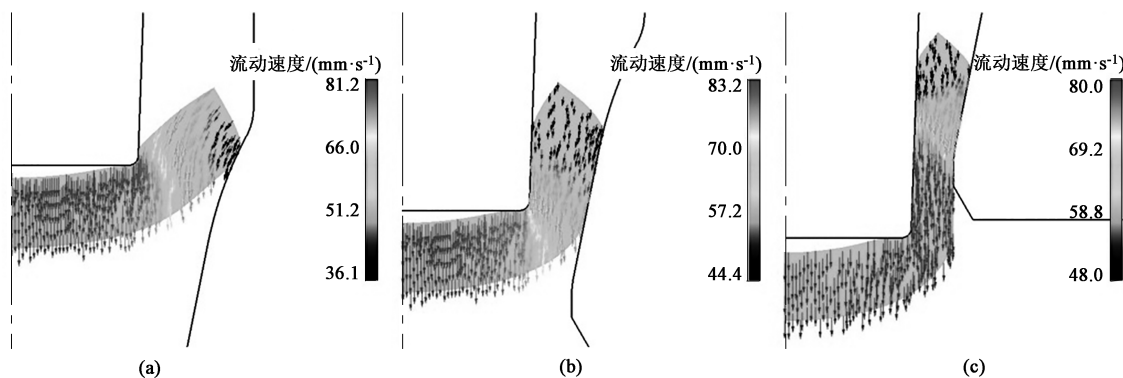


图 9 优化方案的拉深成形过程数值模拟结果

(a) 阶段① (b) 阶段② (c) 阶段③

Fig. 9 Numerical simulation results of deep drawing process in optimized scheme

(a) Stage ① (b) Stage ② (c) Stage ③

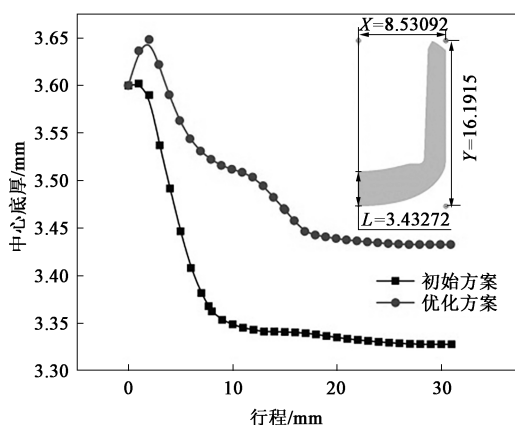


图 10 优化方案中孟子中心底厚的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of case center bottom thickness in optimized scheme

如图 11a 所示。优化方案中第 2 次拉深成形前的弯曲半径均大于初始方案, 也正因此, 如图 11b 所示, 坯料底部 ( $P1$  点处) 第 1 次拉深的最大径向拉应力值为 370.8 MPa, 较初始方案相应位置处的 454.4 MPa 下降了 18.4%, 孟子中心底厚减薄在第 1 次拉深成形过程中得到了有效控制。由于优化方案中第 1 次拉深成形后侧壁为锥形, 因此, 在第 2 次拉深成形过程中, 侧壁的变形量比初始方案的变形量大, 这也导致了底厚在第 2 次拉深成形过程中持续受拉应力而减薄, 如图 11c 所示, 底部在冲出阶段前持续发生减薄变形, 但减薄量较小, 孟子的中心底厚仍在 3.40~3.49 mm 的设计要求之内。

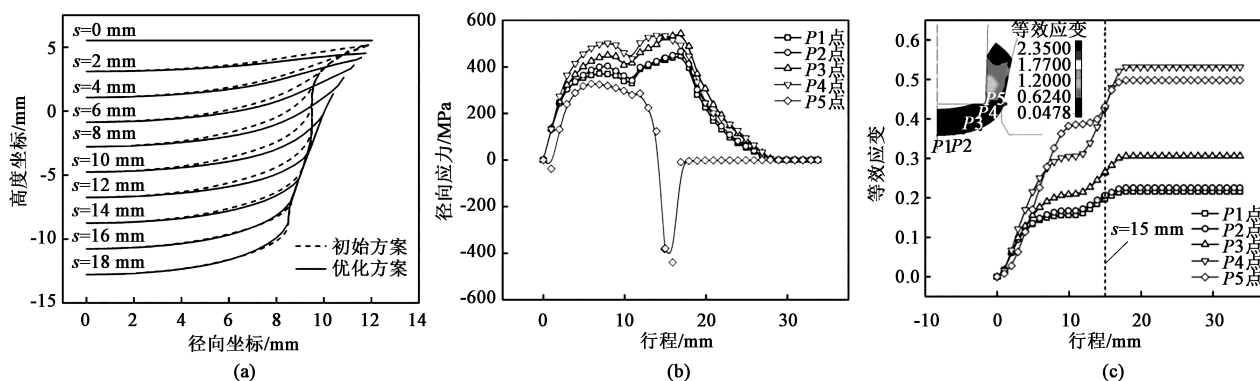


图 11 优化方案的点追踪分析结果

(a) 坯料底部轮廓变化曲线 (b) 径向应力变化曲线 (c) 等效应变变化曲线

Fig. 11 Point tracking analysis results in optimized scheme

(a) Variation curves of bottom profile for blank (b) Variation curves of radial stress (c) Variation curves of equivalent strain

## 4 实验验证

采用优化方案进行工艺试制, 图 12 为实验样

件, 随机抽选 5 个样件应用尖头千分尺对中心底厚进行测量, 经测量 5 个样件的中心底厚均在 3.40~3.49 mm 的设计要求范围内, 其平均值为 3.452 mm。

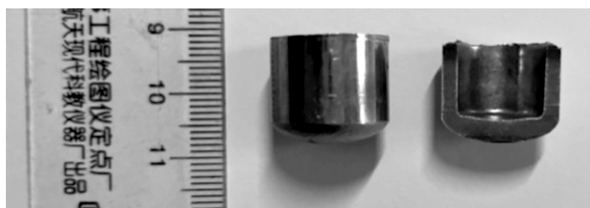


图 12 工艺实验样件

Fig. 12 Samples of process test

## 5 结论

(1) 为了对弹壳的拉深成形过程进行仿真,应用 DEFORM-2D 构建弹壳拉深成形有限元模型,模拟分析了弹壳拉深成形过程中的金属塑性流动规律及应力、应变的变化情况。

(2) 经数值模拟分析可知,初始设计方案中弹壳孟子中心底厚减薄超差的主要原因为:第 1 次拉深成形过程中,坯料快速弯曲导致无约束底部的弯曲半径变小、径向拉应力过大,从而使得坯料底部减薄超差。

(3) 针对该问题,提出一种控制坯料第 1 次拉深成形的弯曲半径、减少坯料底部径向拉应力的优化方案。数值模拟和实际试制结果均显示,该优化方案可以有效改善孟子中心底厚,避免减薄超差的缺陷问题。

### 参考文献:

- [1] 肖善超. 弹壳多模一次连续变薄拉深工艺研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2012.  
Xiao S C. Research on Multi-mode-one-off Ironing Process for Cartridge Case [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [2] 陈跃健, 王浩. 某带减速气囊的航空子弹气动特性研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (10): 60-64, 85.  
Chen Y J, Wang H. Research on aerodynamic characteristics of a bullet with deceleration airbag [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42 (10): 60-64, 85.
- [3] 宋晨, 李磊. 旋翼飘带稳定式子弹降落弹道特性 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (11): 134-139.  
Song C, Li L. Descending trajectory characteristics of rotor-wing and ribbon stabilized bullets [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42 (11): 134-139.
- [4] 冉松, 涂集林, 黎梅, 等. 智能制造在枪弹制造行业内的应用 [J]. 兵工自动化, 2020, 39 (11): 24-26, 35.  
Ran S, Tu J L, Li M, et al. Application of intelligent manufacturing system in ammunition industry [J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39 (11): 24-26, 35.
- [5] 涂集林, 李登虎, 张亚军, 等. 枪弹大批量定制发展策略研究 [J]. 机械, 2021, 48 (7): 44-51.  
Tu J L, Li D H, Zhang Y J, et al. Development strategy of mass customization of ammunition [J]. Machinery, 2021, 48 (7): 44-51.
- [6] 李晓光, 魏志芳, 高建中, 等. 枪弹弹壳挤孟组合模新型设计与研究 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (2): 82-85.  
Li X G, Wei Z F, Gao J Z, et al. New design and research of bullet casting extrusion combined die [J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35 (2): 82-85.
- [7] 胡治昌, 魏志芳, 李晓光, 等. 基于 NX 高级仿真的弹壳冲孟工序数字化模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (2): 122-127.  
Hu Y C, Wei Z F, Li X G, et al. Digital model study on the cartridge case extrusion forming based on NX advanced simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (2): 122-127.
- [8] 彭连友, 黄志星, 张琦. 一种新的孟子毛坯成形工艺技术 [J]. 模具技术, 2013, (2): 34-36.  
Peng L Y, Huang Z X, Zhang Q. A new craft for cup-shaped blank forming process [J]. Die and Mould Technology, 2013, (2): 34-36.
- [9] 王玉松. 7050 铝合金弹壳成形工艺优化及热处理工艺的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
Wang Y S. Research on the Heat Treatment Process and Optimization of Forming Process of 7050 Aluminum Alloy Cartridge [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [10] 朱绪强, 李德才, 王龙, 等. 小口径药筒轻量化及其工艺 [J]. 兵工自动化, 2013, 32 (1): 81-83.  
Zhu X Q, Li D C, Wang L, et al. Lightweight of small caliber cartridge case and technological process [J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32 (1): 81-83.
- [11] 廖仕军, 吕刚, 薛松, 等. 弹壳底部平底成形工艺优化 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (11): 182-185, 206.  
Liao S J, Lyu G, Xue S, et al. Study on flattening shaping process-optimized for campaign bullet [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41 (11): 182-185, 206.
- [12] 范才河, 沈彤, 胡泽艺. 铝合金弹壳成形及失效分析 [J]. 包装学报, 2019, 11 (1): 87-93.  
Fan C H, Shen T, Hu Z Y, et al. Forming and failure analysis of aluminum alloy cartridge case [J]. Packaging Journal, 2019, 11 (1): 87-93.
- [13] 胡建军, 李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.  
Hu J J, Li X P. Application Tutorial of CAE in Plastic Forming by DEFORM-3D [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.
- [14] 隋毅, 梁强. 组合形活塞销冷镦挤成形工艺 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 109-113, 124.  
Sui Y, Liang Q. Cold upsetting-extruding process for combination piston-pins [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 109-113, 124.