

挤压与拉拔

基于 DEFORM-3D 的弹体精密挤压工艺

张彬成¹, 杨 勇¹, 高 远¹, 郝 媛¹, 侯惠敏¹, 张 南¹, 闫红艳¹,
石一磬^{1,2}, 李海涛¹

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 中机真空科技(济南)有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 利用有限元模拟软件 DEFORM-3D 对某 $\Phi 215$ mm 口径弹体的精密挤压成形工艺进行研究。分析了弹体成形过程中大长径比、变截面等工艺难点, 计算了弹体断面收缩率, 明确了可采用精密挤压工艺成形该弹体; 设计了精密挤压成形的工艺模具, 并且为降低成形载荷, 对凸模和凹模的尺寸进行了优化分析; 通过设置弹体壁厚为 6、7 和 8 mm 共 3 组实验, 获得了不同壁厚金属坯料的流动速度场、温度场和等效应变场的分布特征以及成形载荷的变化规律。结果显示, 成形载荷随着壁厚的增大而减小, 其中壁厚为 7 mm 的金属坯料成形过程中的温度分布和金属变形均较为均匀, 其为最优壁厚。壁厚为 7 mm 的金属坯料的成形载荷为 84.0 MN, 应选择公称压力为 90.0 MN 的设备进行试制。

关键词: 弹体; 热挤压; 工艺模具; 成形载荷; 壁厚

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.021

中图分类号: TG376.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0151-06

Precision extrusion process for projectile body based on DEFORM-3D

Zhang Bincheng¹, Yang Yong¹, Gao Yuan¹, Hao Yuan¹, Hou Huimin¹, Zhang Nan¹, Yan Hongyan¹,
Shi Yiqing^{1,2}, Li Haitao¹

(1. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China;

2. Jinan Precision Forming Engineering Technology Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The precision extrusion forming process of a $\Phi 215$ mm caliber projectile body was studied by finite element simulation software DEFORM-3D. Then, the process difficulties of large aspect ratio and variable cross-section during the projectile body forming process were analyzed, and the cross-sectional shrinkage rate of projectile body was calculated. It was clear that the projectile body could be formed by the precision extrusion process. Furthermore, the precision extrusion forming process mold was designed, and the dimensions of punch and die were optimized and analyzed to reduce the forming load. By setting three sets of experiments with the wall thicknesses of 6, 7 and 8 mm for projectile body, respectively, the distribution characteristics of flow velocity field and temperature field and equivalent strain field, and the changing rules of forming load for metal billets with different wall thicknesses were obtained. The results show that the forming load decreases with the increasing of wall thickness, and the temperature distribution and metal deformation during the forming process of the metal billet with the wall thickness of 7 mm are relatively uniform, which is the optimal wall thickness. The forming load of the metal billet with the wall thickness of 7 mm is 84.0 MN, and the equipment with the nominal pressure of 90.0 MN should be selected for the trial production.

Key words: projectile body; hot extrusion; process molds; forming load; wall thickness

在战争中, 大口径弹体占据着非常重要的地位, 是战争中消耗最多的物资之一, 同时也是军工生产中批量最大的产品^[1-2]。根据统计数据, 一战中各参战国总共消耗了数十亿发炮弹, 二战中炮弹的使用数量更为庞大, 数百亿发炮弹被用于陆地、海上

和空中战斗^[3]。炮弹在战场上发挥了重要作用, 为各国提供了致命的火力和战术优势, 有效打击地下、地上的各种军事设施^[4-5], 影响了整个战争的进程和结局。随着科技的进步, 现代战争已经转变为信息化战争^[6-7], 但大口径炮弹在战争中的地位并未改变, 日常军演、训练均会消耗大量炮弹, 除此之外, 随着国际局势的不稳定, 确保充足的弹药供应与我国国防实力综合水平息息相关, 而实现大口径弹体的高速、高质量生产, 同时降低能耗, 也成为当前至关重要的任务^[8-9]。因此, 在弹体的设计方

收稿日期: 2023-08-15; 修订日期: 2023-11-08

作者简介: 张彬成 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: 841197235@qq.com

通信作者: 杨 勇 (1982-), 男, 博士, 硕士生导师

E-mail: yy19821110@163.com

面,对质量、性能、安全性以及生产周期均提出了更为严格的要求^[10]。

目前,国内针对大口径弹体的制造过程普遍采用热挤压工艺。然而,这种方法在成形后往往导致毛坯壁厚存在较大的差异,进而带来一系列问题,包括材料利用率下降、加工余量增大,以及整体生产效率下降^[3]。如果弹体毛坯壁厚设计较厚,会增加工件的加工余量,造成能耗和材料的浪费;如果壁厚设计较薄,挤压过程中会出现变形程度剧烈、平均等效应变变大的问题,不利于工件的挤压成形。本文以某型号弹体为研究对象,通过有限元数值模拟,对不同壁厚的弹体精密挤压工艺进行分析,寻找最优壁厚,为促进大口径弹体产品的精密快速成形提供参考^[11]。

1 弹体精密挤压成形工艺设计

1.1 弹体锻件工艺分析

本文以内径为 $\Phi 215$ mm、长度为 1040 mm、材质为 50SiMnVB 合金钢的大口径弹体为研究对象,采用 $\Phi 190$ mm 的坯料进行挤压,产品如图 1 所示。该弹体的长度较大,壁厚一般要求较薄,头部要求光滑且填充完整,属于典型的薄壁深孔件,具有大长径比、变截面等特点,成形难度较大。

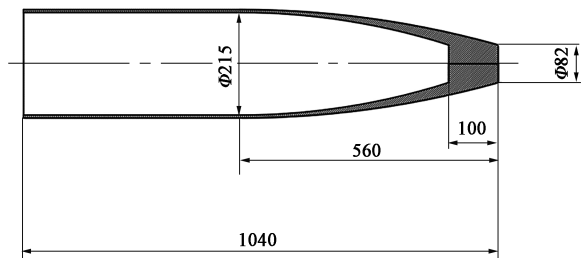


图 1 弹体产品图

Fig. 1 Product diagram of projectile body

通过计算断面收缩率,可初步判断是否可以挤压成形。变形程度一般采用断面收缩率 ε_A 或挤压比 R 来表示,即^[12-13]:

$$\varepsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{A_0}{A_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_0 为挤压变形前坯料的横断面积, mm^2 ; A_1 为挤压变形后工件的横断面积, mm^2 。

将图 1 中相关数据代入式 (1) 可得断面收缩

率,以实验组最小壁厚 6 mm 为例, $\varepsilon_A = \frac{28352.87 - 4165.75}{28352.87} \times 100\% = 85.3\%$ 。碳钢合金结构

钢的允许断面收缩率为 20%~90%,从断面收缩率上来讲,该锻件可以采用精密挤压成形。

1.2 弹体锻件精密挤压成形工艺模具

本文工艺设计为反挤压,模具材料采用耐磨性较好的 H13 钢,毛坯直径设计为 $\Phi 190$ mm。在挤压过程中,凸、凹模结构尺寸的设计是否合理直接影响锻件的成形质量和成形性能。为减小成形载荷并获得良好的成形质量,对模具结构进行如下设计。

(1) 凸模:为减少金属流动摩擦,凸模设计工作带,同时为了减少凸模工作带的磨损,通过理论计算并结合数值模拟,确定工作带长度设计为 12 mm、倒角半径为 1 mm,如图 2 所示。

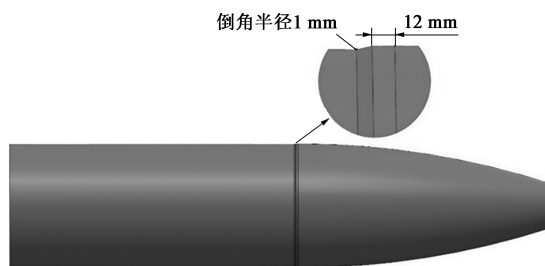


图 2 凸模设计

Fig. 2 Design for punch

(2) 凹模:在反挤压过程中,随着冲头向下移动,金属坯料始终贴着凹模内壁向上流动。凹模高度尺寸过大,会增加摩擦行程,使得成形载荷能较大;但凹模高度尺寸较小,会导致金属坯料脱离凹模之后向外扩散,使得锻件圆周不规整。模拟结果如图 3 所示,最终设计凹模高度为 940 mm。



图 3 凹模高度尺寸较小时的模拟结果

Fig. 3 Simulation result for concave mold with smaller height size

2 弹体精密挤压成形过程多场耦合数值模拟分析

为了对精密挤压成形工艺进行深入分析,使用有限元模拟软件 DEFORM-3D 对弹体成形工艺过程进行数值模拟,设置了壁厚为 6、7 和 8 mm 共 3 组实验对挤压成形情况进行模拟,来研究不同壁厚下

的成形规律, 以获得最优的壁厚弹体。本文采用三维造型软件 SolidWorks 构造了弹体成形模具的三维模型, 另存为 STL 格式, 导入 DEFORM-3D 软件的前处理模块。将坯料的网格划分为 42000 个四面体单元, 设置坯料温度为 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。坯料与模具接触面的传热系数为 $5\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 。采用剪切摩擦形式, 摩擦因数为 0.1。设置模具为刚体, 模具温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 上模的挤压速度为 $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.1 成形过程分析

3 组壁厚模拟实验中, 成形过程相同, 以壁厚为 7 mm 为例对弹体精密挤压成形过程进行分析。速度场变化情况如图 4 所示, 成形过程分为 3 个阶段。

第 1 阶段如图 4a 所示, 为开始变形阶段, 该阶段主要发生镦粗变形。当凸模向下运动时, 坯料金属首先向下填充凹模, 坯料下方金属向下移动的过程

中, 坯料上方金属缓慢镦粗变形; 随着凸模向下移动, 此时坯料上方金属开始快速镦粗变形, 金属在横截面方向的流动速度加快, 但小于向下流动速度, 直至金属上方坯料形变至接触到凹模内壁时, 该阶段结束。

第 2 阶段如图 4b 所示。当镦粗变形完成后, 随着凸模的继续向下运行, 迫使金属向凹模底部流动, 坯料下部金属开始充满凹模底部。坯料下方金属受到的阻力大于上方金属, 使得坯料上方金属的流动速度大于下方金属, 该阶段的成形载荷大于开始阶段的镦粗变形阶段。坯料下方金属坯料接触模具底部时, 该阶段结束。

第 3 阶段如图 4c 所示。随着凸模的向下运动, 底部完全充满, 金属坯料在凸模的挤压下沿着凹模内壁快速向上流动, 直至成形结束。

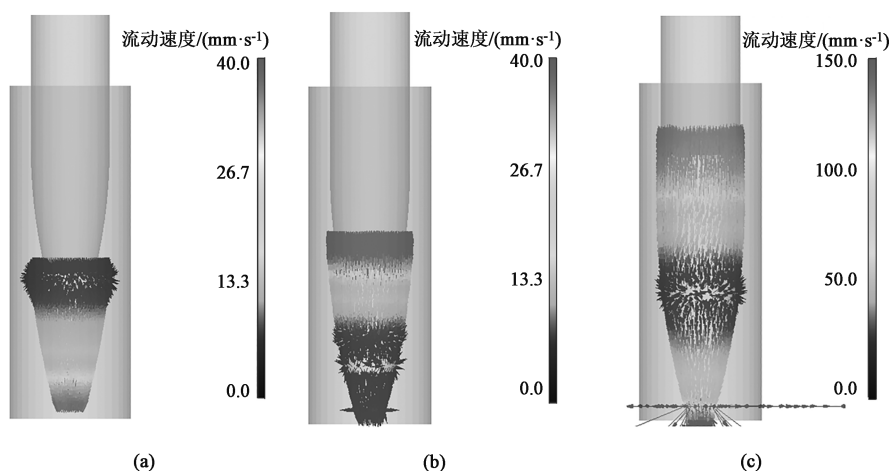


图 4 弹性精密挤压成形过程中金属流动速度分布

(a) 第 1 阶段 (b) 第 2 阶段 (c) 第 3 阶段

Fig. 4 Metal flow velocity distributions during precision extrusion process of projectile body

(a) The first stage (b) The second stage (c) The third stage

2.2 成形过程温度场分析

不同壁厚的弹体精密挤压成形过程中的温度场分布如图 5 所示, 在 3 组实验中, 坯料始锻温度均为 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。坯料与模具间的热传导 (包括环境) 和形变升温均会对锻件的最终成形温度产生影响。模拟结果显示: 当弹体壁厚为 6 mm 时, 坯料在挤压过程中由于形变升温起主导作用, 最终成形坯料过热点较多; 当弹体壁厚为 8 mm 时, 因为壁厚相对较厚, 散热慢, 在形变热的作用下, 最终成形坯料过热点较多。可以看出, 当弹体壁厚为 7 mm 时, 坯料的成形温度分布较为均匀。

2.3 成形过程应变场分析

不同壁厚的弹体精密挤压成形过程中的应变场

分布如图 6 所示。模拟结果显示, 3 组实验中应变值较大处均集中出现在弹体头部。当弹体壁厚为 6 mm 时, 弹体平均应变值较大区域的面积较大, 分布不均匀; 当弹体壁厚为 7 和 8 mm 时, 应变分布较为均匀, 说明在弹体挤压成形过程中金属变形较为均匀, 壁厚为 7 和 8 mm 时的应变值差别不大, 且壁厚为 7 mm 时应变分布更为均匀, 没有出现应变值较大的点。

2.4 成形过程载荷分析

不同壁厚弹体精密挤压成形过程中的成形载荷曲线如图 7 所示, 可以看出: 几种壁厚的成形载荷曲线基本相同。成形过程的第 1 阶段和第 2 阶段中, 成形载荷随着凸模向下移动而缓慢增加; 在第 2 阶

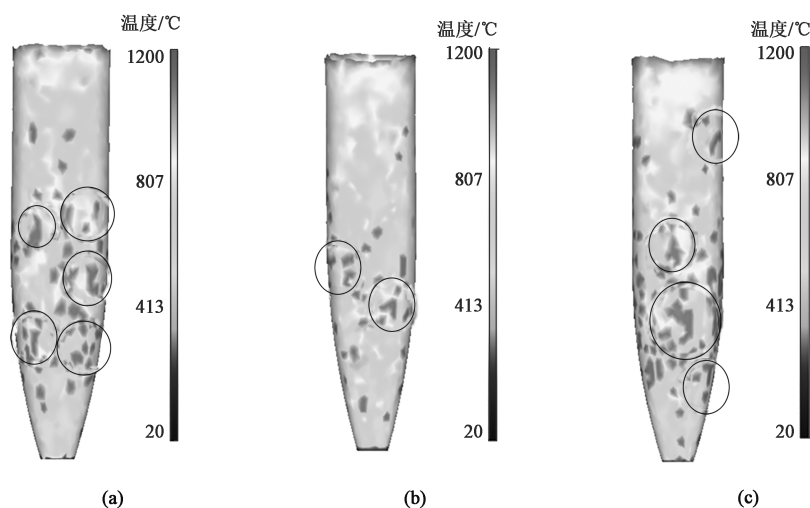


图 5 不同壁厚的弹体精密挤压成形过程中温度场分布

(a) 壁厚为 6 mm (b) 壁厚为 7 mm (c) 壁厚为 8 mm

Fig. 5 Temperature field distributions during precision extrusion forming process of projectile body with different wall thicknesses

(a) Wall thickness of 6 mm (b) Wall thickness of 7 mm (c) Wall thickness of 8 mm

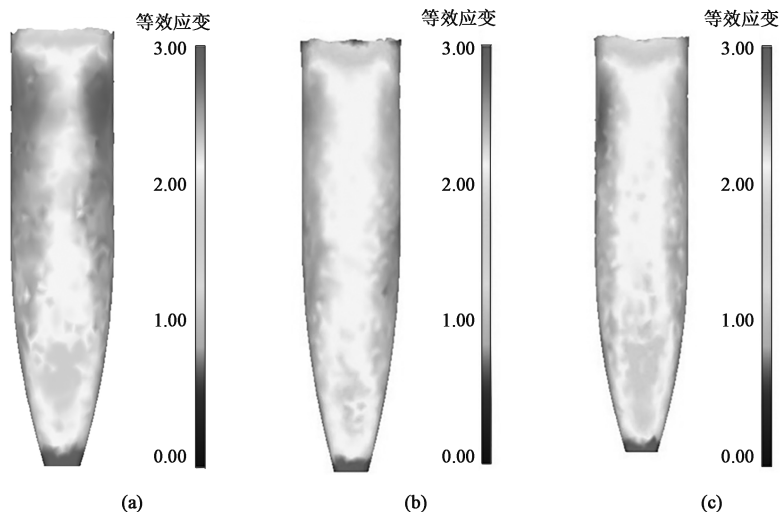


图 6 不同壁厚的弹体精密挤压成形过程中应变场分布图

(a) 壁厚为 6 mm (b) 壁厚为 7 mm (c) 壁厚为 8 mm

Fig. 6 Strain field distributions during precision extrusion forming process of projectile body with different wall thicknesses

(a) Wall thickness of 6 mm (b) Wall thickness of 7 mm (c) Wall thickness of 8 mm

段完成后,随着变形量的增加,成形载荷急剧增大,这是因为金属坯料与凹模摩擦增大;成形载荷曲线在成形即将结束时均出现了波动,这是由于凸模向下移动过程中,坯料金属与凹模接触的面积是动态变化的,使得成形载荷产生一定的波动。

模拟结果显示,壁厚为 6 mm 时最大成形载荷为 91.5 MN,壁厚为 7 mm 时最大成形载荷为 84.0 MN,壁厚为 8 mm 时最大成形载荷为 63.1 MN,可以看出,成形载荷随着壁厚的增大而减小。

通过模拟分析可以看出,壁厚为 7 mm 时的成形温度分布较为均匀,在挤压成形过程中金属变形

较为均匀。从成形载荷的结果看,应选择公称压力为 90.0 MN 的设备进行试制。

3 分析与讨论

图 8 为文献 [14] 的薄壁筒形件热挤压工艺实验,实验在专用液压机上进行,采用玻璃防护润滑剂进行润滑,设置坯料温度为 1150 °C,模具温度为 200 °C。通过对实验产品的几何尺寸、成形质量等参数的实际测量,得到成形件的壁厚差为 0.82 mm,符合模拟结果;成形件表面光滑,底部充填饱满,未出现毛刺、折叠等现象,模拟结果与

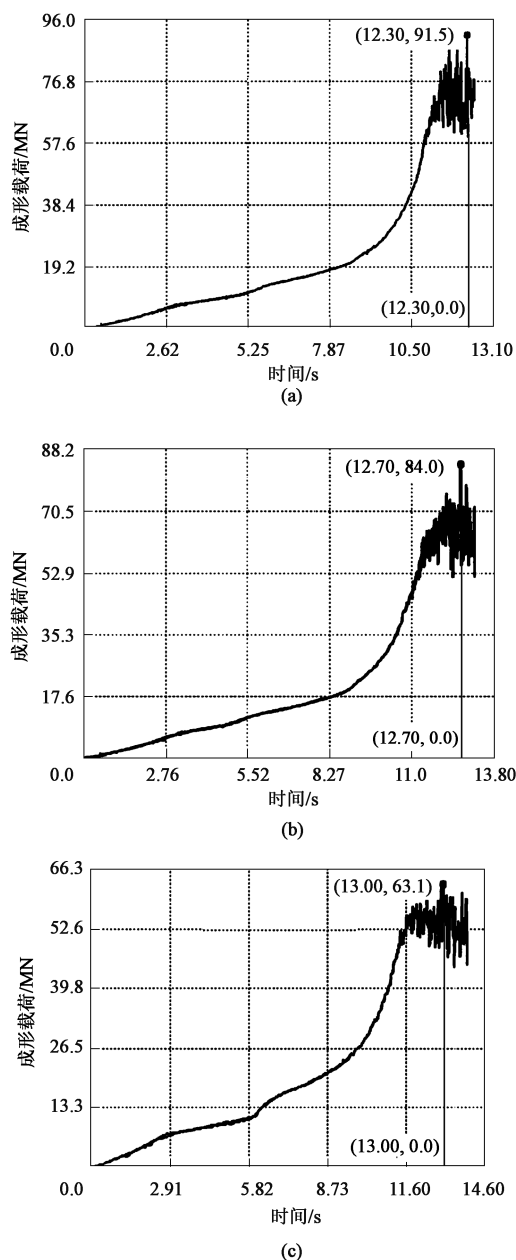


图 7 不同壁厚的弹体精密挤压成形过程中的成形载荷曲线

(a) 壁厚为 6 mm (b) 壁厚为 7 mm

(c) 壁厚为 8 mm

Fig. 7 Forming load curves during precision extrusion forming process of projectile body with different wall thicknesses

(a) Wall thickness of 6 mm (b) Wall thickness of 7 mm

(c) Wall thickness of 8 mm

实验结果基本一致。

本文基于数值模拟技术,对弹体精密挤压成形进行了研究,通过对模具进行设计和工艺优化,获得了较为理想的壁厚对锻件的影响规律。文献[14]的产品采用的工艺与本文工艺设计路线相同,均采用反挤压精密成形,但本文锻件比文献[14]

的产品尺寸相对较大,目前对该型号产品的精密挤压成形工艺的研究较少,本文的工艺参数还有待结合实验进行进一步的研究,以便更好地对实际应用进行指导。

4 结论

(1) 以某型 $\Phi 215$ mm 口径弹体为研究对象,设计了弹体精密挤压成形工艺模具,其中凸模设计工作带长度为 12 mm,倒角半径为 1 mm;为减少摩擦行程、保证成形质量,设计凹模高度为 940 mm。

(2) 模拟结果显示,壁厚为 7 mm 时成形温度分布较为均匀,在挤压成形过程中金属变形较为均匀。

(3) 成形载荷随着壁厚的增大而减小,当壁厚为 7 mm 时成形载荷为 84.0 MN,应选择公称压力为 90.0 MN 的设备进行试制。

参考文献:

- [1] 程林,霸书红,蒋大千,等. 大口径火炮内弹道参数的计算及仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(11): 69-72.
Cheng L, Ba S H, Jiang D Q, et al. Interior ballistic parameters calculation and simulation of large caliber gun[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(11): 69-72.
- [2] 孙全兆. 大口径榴弹炮弹带挤进动力学研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
Sun Q Z. Study on Dynamics of Rotating Band Engraving for Large Caliber Howitzers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [3] 赵熹. 大口径弹体辊挤—引伸成形技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
Zhao X. Research on Roll Extrusion Extension Forming Technology for Large Caliber Bullet Bodies[D]. Taiyuan: Central North University, 2014.
- [4] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(I): 侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析[J]. 爆炸与冲击, 2005, (6): 499-505.
Chen X W. Mechanical design of kinetic energy deep penetration projectiles(I): Penetration/armor piercing theory and analysis of body wall thickness[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, (6): 499-505.
- [5] 张满慧,姚忠,曹中臣,等. 大口径舰炮研制技术风险评估及后果仿真[J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42(3): 93-99.
Zhang M H, Yao Z, Cao Z C, et al. Risk assessment and consequence simulation of large caliber naval gun development technology[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2021, 42(3): 93-99.
- [6] 赵彦森,周云华,邱群先. 美欧 155 毫米舰炮的研制与启示[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(5): 138-141.
Zhao Y S, Zhou Y H, Qiu Q X. Development and inspiration of 155 mm naval gun in the United States and Europe[J]. Ship Sci-

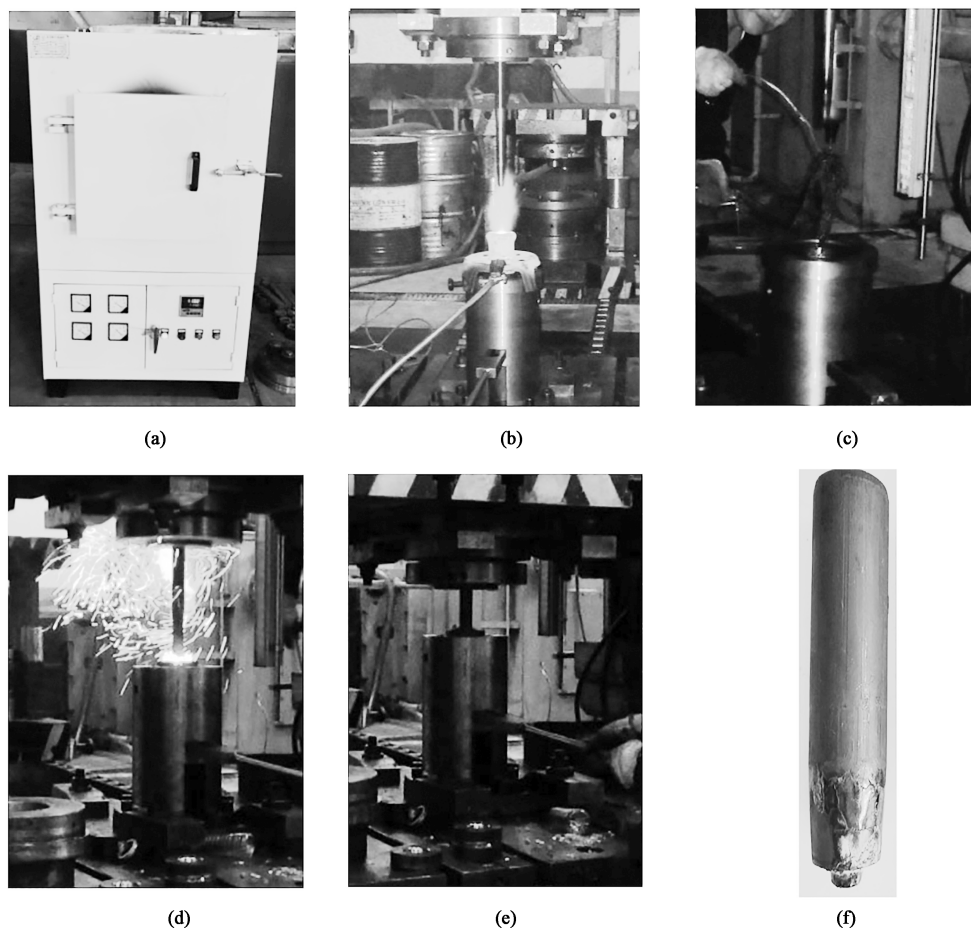


图 8 薄壁筒形件热挤压工艺实验

(a) 坯料加热 (b) 模具预热 (c) 模具润滑 (d) 挤压 (e) 卸料 (f) 成形件

Fig. 8 Hot extrusion process test for thin-walled cylindrical parts

(a) Blank heating (b) Mold pre-heating (c) Mold lubrication (d) Extrusion (e) Unloading (f) Formed part

ence and Technology, 2013, 35 (5): 138-141

- [7] 梁培培. 铝合金弹体铸造工艺设计与优化 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.

Liang P P. Design and Optimization of Aluminum Alloy Bullet Body Casting Process [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023

- [8] 王兴雷. 某 H70 弹壳体成形工艺数值模拟及实验研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.

Wang X L. Numerical Simulation and Experimental Research on the Forming Process of a H70 Cartridge Case [D]. Taiyuan: Central North University, 2023.

- [9] 李硕. 特种材料筒形件精密热挤压关键技术及实验研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团, 2021.

Li S. Key Technologies and Experimental Research on Precision Hot Extrusion of Special Material Cylindrical Parts [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2021.

- [10] 高景龙. 基于人工智能的榴弹设计专家系统的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.

Gao J L. Research on the Expert System for Grenade Design Based on Artificial Intelligence [D]. Chengdu: University of Electronic

Science and Technology, 2014.

- [11] 李尧. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

Li Y. Principles of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.

- [12] 许丁. 炮弹弹体毛坯精化新工艺研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.

Xu D. Research on New Technology for Refinement of Shell Body Blank [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.

- [13] 李春天, 王昶, 胡亚民, 等. 镁合金电动螺丝刀刀把等温挤压成形研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (3): 105-108, 111.

Li C T, Wang C, Hu Y M, et al. Study on isothermal extrusion forming of magnesium alloy electric screwdriver handle [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (3): 105-108, 111.

- [14] 谢志平, 万博维, 张治民, 等. 大型深孔圆锥形构件省力挤压成形工艺研究 [J]. 锻压技术, 2015, 40 (2): 87-92.

Xie Z P, Wan B W, Zhang Z M, et al. Research on labor-saving extrusion forming process of largedeep hole conical workpiece [J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40 (2): 87-92.