

基于浮动下模的车用小型套管冷挤压工艺

陈小梅¹, 黄 惠²

(1. 福州职业技术学院 机电工程系, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对一种小型套管采用棒料挤压成形时工序多、模具成本高的问题, 拟采用管料挤压工艺进行替代, 从而减少与孔成形相关的工序。首先, 通过数值模拟软件 Deform-3D 对原工艺进行成形模拟, 验证了材料模型等建模结果的可靠性。然后, 对新工艺进行模拟分析, 发现成形后套管头部存在折叠缺陷, 与实际试验结果一致, 分析缺陷产生的原因并提出了解决方案, 改进了模具结构, 结果显示: 当下模浮动且合理设置顶环位置时, 能避免折叠缺陷, 并完成管料挤压成形, 获得成形效果较好的套管零件。经实际生产验证, 新工艺能满足生产要求, 成形的套管零件的质量较好, 无折叠等缺陷。与原工艺相比, 虽然坯料价格更高, 但模具成本更低, 材料利用率更高, 总体上实现了降本的目的。

关键词: 小型套管; 折叠缺陷; 棒料挤压; 管料挤压; 模具结构

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.017

中图分类号: TG376.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0116-07

Cold extrusion process on small casing for vehicle based on floating lower die

Chen Xiaomei¹, Huang Hui²

(1. Mechanical and Electrical Engineering Department, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: For the problem of multiple processes and high die cost when forming a small casing by bar extrusion, it was proposed to use tube extrusion process to replace it, thereby reducing the process related to hole forming. Firstly, the forming simulation of the original process was conducted by using numerical simulation software Deform-3D to verify the reliability of the modeling results such as material model. Secondly, a simulation analysis of the new process was conducted, and it was found that there were folding defects in the casing head after forming, which was consistent with the actual test results. Then, the causes of defects were analyzed, and the solutions were proposed to improve the die structure. The results show that when the lower die is floating and the top ring position is set appropriately, folding defects can be avoided, and the tube extrusion forming can be completed to obtain the casing parts with better forming effects. After actual production verification, the new process can meet the production requirements, and the quality of the formed casing parts is good, without various defects such as folding. Compared with the original process, although the billet price is higher, the die cost is lower, the material utilization rate is higher, and overall cost reduction is achieved.

Key words: small casing; fold defect; bar extrusion; tube extrusion; die structure

冷挤压工艺是利用模具在常温下使坯料产生塑性变形, 从而按模腔尺寸成形的一种压力加工方法^[1-2], 不仅具有少、无切削的特点, 并且零件精度较高、性能优越, 因此在制造行业应用较多。但冷挤压过程中金属硬度高, 变形抗力较大, 成形相

对困难, 增大了模具的负载, 不可避免地出现断裂、磨损严重等情况, 导致模具寿命偏低^[3-4], 产生高昂的成本支出。因此, 降低模具成本是每个企业努力的方向, 模具寿命的长短也是工艺评判的标准之一^[5-6]。

本文研究的小型套管是福州一车企的重点产品之一, 其与铆钉配合使用, 在汽车车身中起到紧固连接的作用。目前, 该产品的主要生产方式为多工位冷挤压, 包含反挤压、预镦头、终镦头和冲孔等4道工序, 生产速度较快, 且产品质量较好, 但各工位模具磨损失效较快, 导致模具成本较高, 因此, 企业考虑对现有工艺进行改进, 尝试将坯料由棒料

收稿日期: 2022-09-01; 修订日期: 2022-12-14

基金项目: 2022年福州职业技术学院产学研合作开发项目(FZYKJJCX202202); 国家自然科学基金(青年)资助项目(52105053); 2021年福州职业技术学院教学改革研究课题(2021jgkt016)

作者简介: 陈小梅(1982-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: chenxiaomei0215@163.com

改为管料。虽然，管料的进料价格相比棒料高，但管料挤压省去了棒料挤压中冲孔时的材料浪费，提高了材料利用率。而原材料是以重量计算价格的，因此，对于批量化生产的产品来讲，材料成本差距并不大。此外，管料挤压方案无需孔成形，与棒料挤压相比在工序上减少了 2 道，模具成本明显更低，因此能达到降低成本的目的。本文引入计算机辅助工程 CAE 技术^[7-8]，通过 Deform-3D 对新工艺进行模拟研究，根据动态成形反映工艺是否存在缺陷，是否需要改进模具结构等，并与生产试验结果对比分析，以确保整个开发过程的合理性。

1 工艺分析与建模仿真

1.1 小型套管工艺分析

小型套管零件图如图 1 所示，零件尺寸较小，总高为 22 mm，最大外圆直径为 $\Phi 30$ mm，头部高度为 4.5 mm，心部为通孔，直径为 $\Phi 20$ mm，是一种结构比较简单的回转体零件。零件材料为 AISI-1025 钢，该零件最早通过车削加工生产，但该方法生产效率低，材料浪费严重，对于批量化生产的产品来说，不仅无法保证正常的生产需求，且成本大。因此，目前该产品主要通过效率更高、产品性能更好的挤压方式生产，其成形工艺如图 2a 所示，零件由棒料经

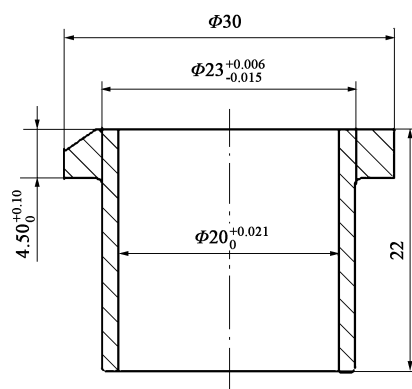


图 1 小型套管的零件图

Fig. 1 Part drawing of small casing

反挤压、预镦头（坯料需垂直翻转 180°）、终镦头、冲孔 4 道工序成形，生产速度快、质量好。但是，该工艺模具成本较高，本文尝试开发一种新工艺，如图 2b 所示，将坯料由棒料改为管料，经正挤压减径、镦头 2 道工序成形。由图 1 可知，套管零件的孔径较大，棒料挤压冲孔时造成了大量的材料浪费，改进后的工艺不仅能通过减少工序道数来减少模具数量，也能避免冲孔工序造成的材料浪费，实现了降本。本文的研究思路为先采用 Deform-3D 软件对原工艺进行成形模拟，与实际零件的成形情况进行对比以验证有限元建模分析的可靠性，再对新工艺进行成形研究。

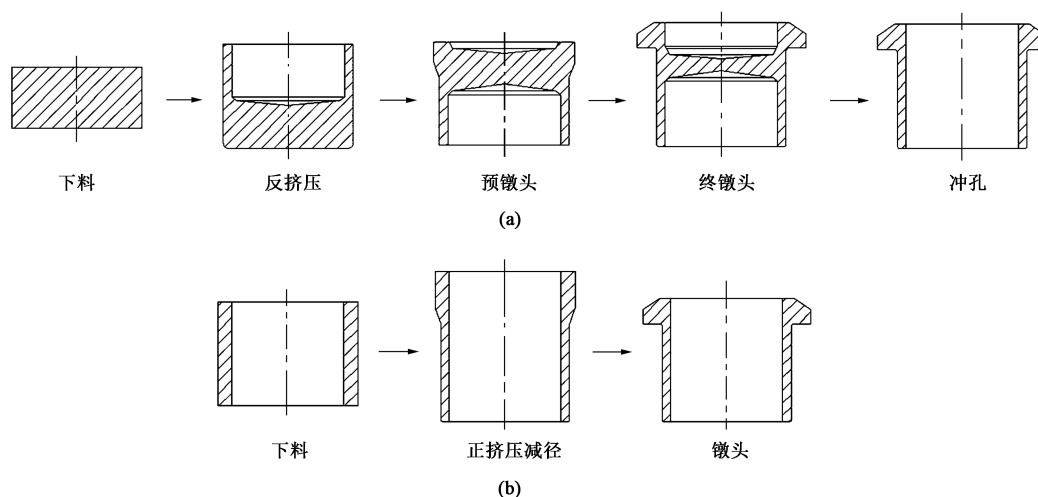


图 2 小型套管成形工艺

(a) 原工艺 (b) 新工艺

Fig. 2 Forming processes of small casing

(a) Original process (b) New process

1.2 有限元建模与仿真分析

为更好地反映实际挤压中金属的变形行为，必须在 Deform-3D 软件中建立 AISI-1025 钢在室温下准

确的流动应力曲线。首先采用 Instron-3367 万能试验机通过室温压缩试验获取压缩高度、载荷等数据，然后通过外推法^[9-10]获得真应力-真应变曲线，如

图 3 所示,之后导入 Deform-3D 数据库中。

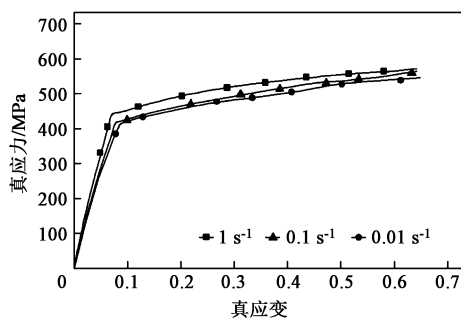


图 3 AISI-1025 钢的真应力-真应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves of AISI-1025 steel

原工艺中,各工序简化后的挤压模具结构以及有限元建模结果如图 4 所示,均为 1/2 模型,由上模、下模、零件和顶杆 4 部分组成,其中零件为塑性体,网格类型选择四面体网格,划分数量为 42000 个,温度按室温条件设置为 20 ℃,上模、下

模、顶杆为刚体,上模挤压速度恒定为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,朝向零件匀速挤压,工件与模具间存在剪切摩擦,冷挤压摩擦因数为 0.12^[11]。经模拟计算后,后处理模块各工序零件的成形情况如图 5 所示。从成形尺寸来看,各工序零件均能按上模、下模、顶杆组成的型腔充分成形,轮廓清晰,未发现角缝等充不满的问题;从成形后零件的金属流线分布来看,预镦头工序的流线分布更为均匀,材料变形较小,而反挤压工序和终镦头工序金属流线的疏密程度不一,反挤压工序中靠近上模工作面的材料变形量较大,终镦头工序中上模与顶杆之间的材料变形量较大,但均未出现流线断裂、交叉和堆叠等现象,表明成形时金属能正常流动转移;从模拟结果看,小型套管的成形情况与实际生产基本相符,证明材料模型的建模过程是准确的,也表明 Deform-3D 模拟具有非常高的应用价值,能准确描述零件的变形行为,帮助科研人员做出正确判断。

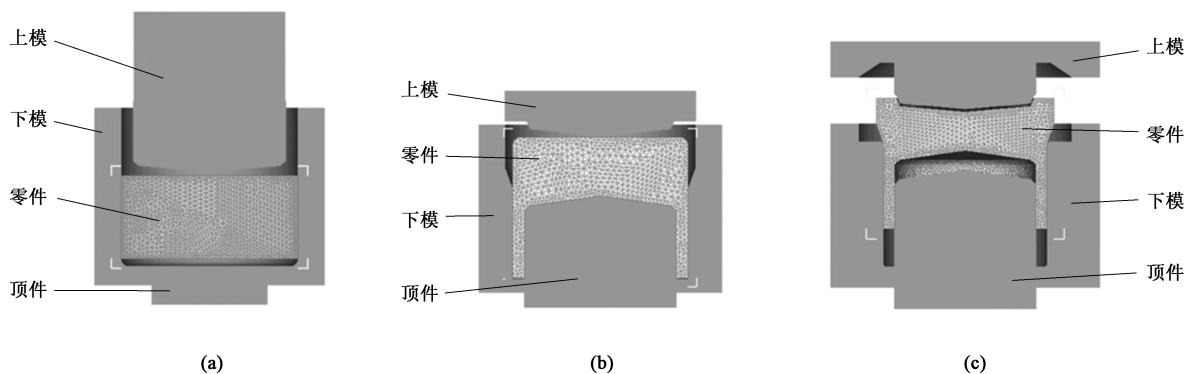


图 4 原工艺各工序的有限元模型

(a) 反挤压工序 (b) 预镦头工序 (c) 终镦头工序

Fig. 4 Finite element models of each process in original process

(a) Backward extrusion process (b) Pre-upsetting process (c) Final upsetting process

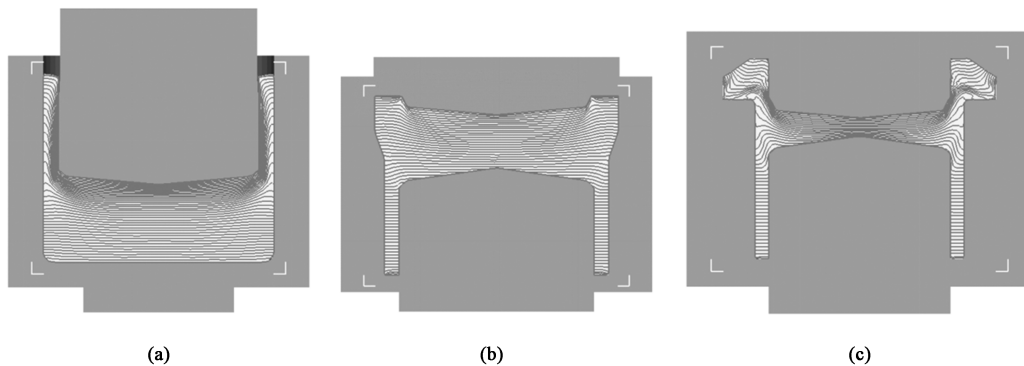


图 5 原工艺各工序的模拟结果

(a) 反挤压工序 (b) 预镦头工序 (c) 终镦头工序

Fig. 5 Simulation results of each process in original process

(a) Backward extrusion process (b) Pre-upsetting process (c) Final upsetting process

2 新工艺仿真分析与改进

2.1 管料挤压过程分析

管料挤压的 2 道工序的模具结构简图如图 6 所示，均由零件、上模、下模、芯棒和顶环 5 部分组成。正挤压减径工序成形过程如图 7a 所示，在下模与芯棒的约束下，受上模挤压力作用，金属仅能向下流动进行缩径，最终在密闭型腔内完成成形，金属变形比较简单，不会产生缺陷。镦头工

序成形过程如图 7b 所示，成形进行到 60% 时，向下流动的金属与顶环接触后受到限制，致使零件头部上端金属不能及时向下流出而产生鼓形，与头部下端金属形成折叠趋势；成形进行到 90% 时，头部上端金属在上模挤压下与头部下端金属交汇，产生折叠现象；成形到 99% 时，可明显看出折叠形成，对套管零件的质量有较大影响，容易疲劳失效导致裂纹产生^[12]。经实际挤压试验，获得的套管试验件如图 8 所示，头部中间部位存在明显的折叠问题，与模拟件出现折叠的位置完全相同，

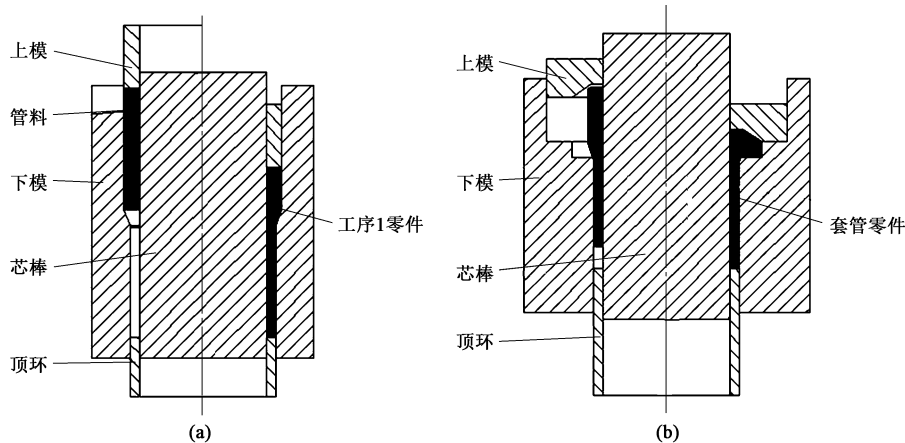


图 6 管料挤压模具结构简图
(a) 正挤压减径工序 (b) 镦头工序
Fig. 6 Structure diagrams of extrusion die for tube material
(a) Forward extrusion reducing process (b) Upsetting process

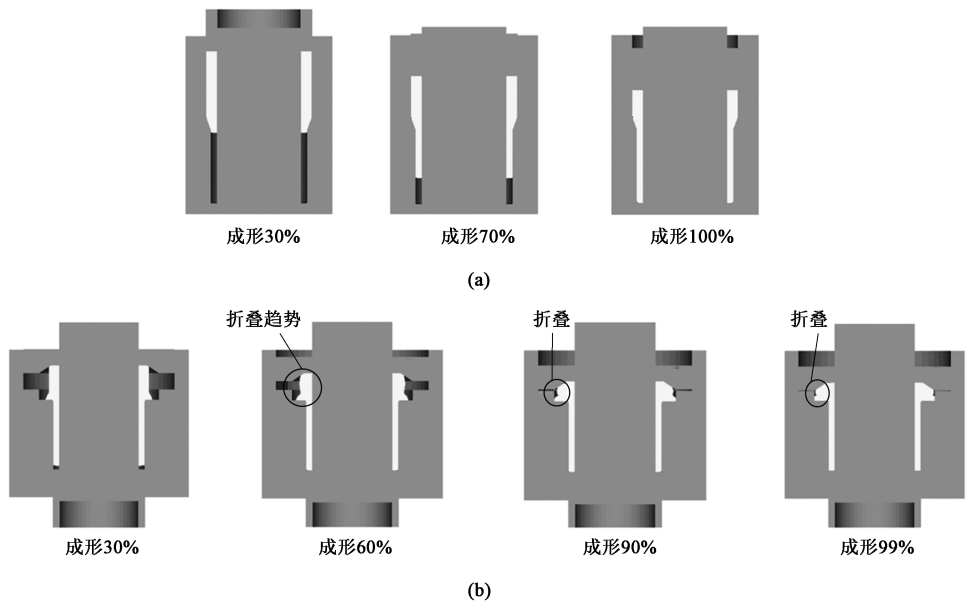


图 7 新工艺各工序的零件成形过程
(a) 正挤压减径工序 (b) 镦头工序
Fig. 7 Forming process of parts in each process for new process
(a) Forward extrusion reducing process (b) Upsetting process

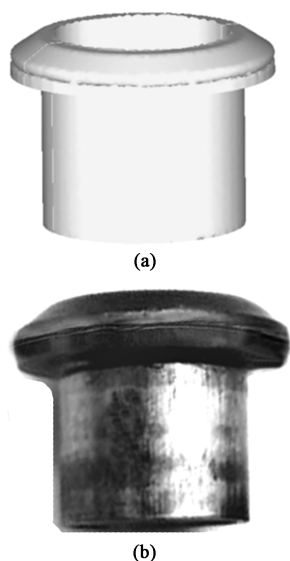


图 8 模拟件 (a) 与试验件 (b) 成形情况对比

Fig. 8 Comparison of forming conditions between simulated (a) and tested (b) parts

因此必须对工艺进行改进。

2.2 模具结构优化

由上述分析可知, 镦头工序产生折叠的直接原因是向下流动的金属与顶环过早接触, 使得头部上端金属流出不及时而出现鼓形引起的, 因此, 必须将顶环的位置下移一段距离, 但不受顶环限制后会造金属流失, 引起套管下端圆环尺寸过长而套管头部出现充不满现象, 仍然无法获得合格的套管, 如图 9 所示。参考文献 [13] 和文献 [14], 决定将下模改为浮动模, 改进后模具结构简图如图 10 所示, 顶环下移 6 mm, 以避免向下流动的金属过早接触顶环引起头部折叠, 同时上模与下模接触后再共同向下移动 6 mm, 以保证套管头部成形饱满。顶环下移 6 mm 是通过多次模拟试验确定的, 当顶环下移距离 < 6 mm 时, 向下流动的金属仍然接触顶环较早, 成形后套管头部仍存在折叠风险; 而顶环下移距离 ≥ 6 mm 时, 则能完全消除头部折叠缺陷。同时, 顶环下移距离越大, 则下模浮动距离越大, 弹簧力越大, 需要的成形力也越大, 因此, 设计顶环下移距离为 6 mm。模具改进后镦头模拟过程如图 11 所示, 成形进行到 60% 时, 上模与下模刚好接触, 此时零件的成形状态与图 9 所示完全相同, 而下模改为浮动模后, 使得上模能继续向下移动; 当成形进行到 75% 时, 向下流动的金属受顶环限制无法再向下流动, 从而保证了套管下端圆环的尺寸, 最终金属只能向套管头部空腔转移; 成形进行到

100% 时, 零件完全充满上模、下模、芯棒和顶环组成的型腔, 套管成形。新工艺改进后各工位零件的金属流线分布情况如图 12 所示, 正挤压减径工序变形主要集中在零件下端, 镦头工序变形主要集中在零件上端, 流线排布有序, 无交叉等现象。最终套管成形效果如图 13a 所示, 套管头部中间位置的折叠问题得到解决。实际生产中上模退出后, 可由顶环顶出套管完成取件。重新进行挤压试验后, 获得的套管试验件如图 13b 所示, 套管零件质量较好, 头部无折叠缺陷, 内孔质量佳, 与模拟结果相同。企业长期试生产后发现, 产品生产效率高, 且合格率接近 100%, 管料挤压工艺能替代原来的棒料挤压工艺。与原工艺相比, 虽然管料的价格要高于棒料, 但材料利用率得到了提高, 且由于减少了 2 道工序, 即减少了 2 套模具, 同时对挤压设备的选择性更多, 总体上成本与原工艺相比得到了降低。

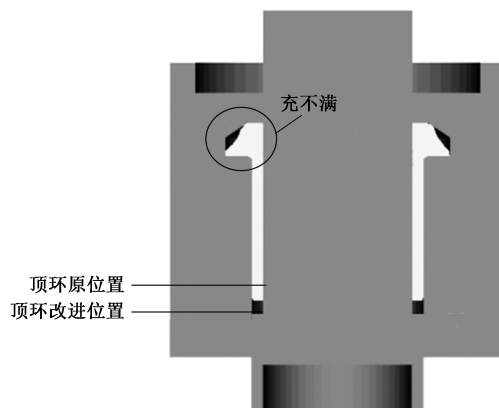


图 9 顶环下移后的套管成形结果

Fig. 9 Casing forming result after top ring moving down

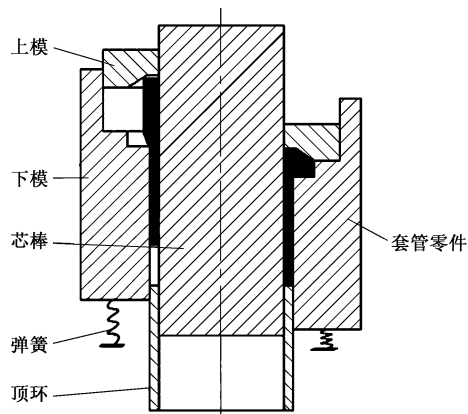


图 10 采用浮动模的模具结构简图

Fig. 10 Structure diagram of die using floating die

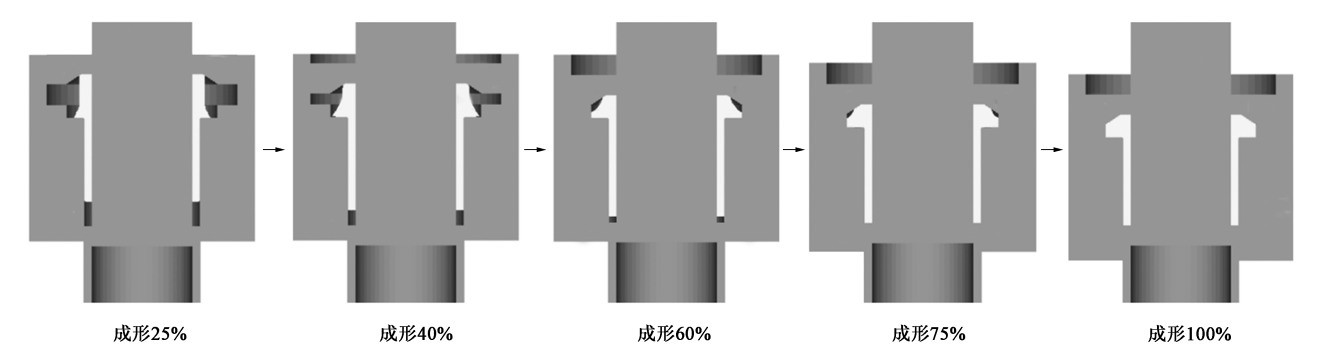


图 11 改进后的镦头工序模拟成形过程

Fig. 11 Simulated forming process of upsetting process after improvement

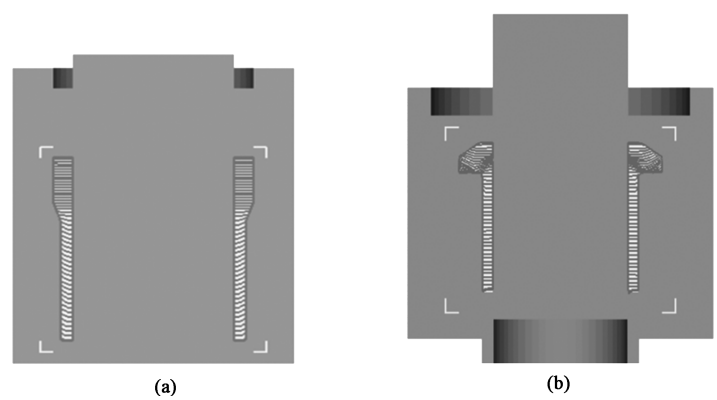


图 12 新工艺各工序的零件流线分布情况

(a) 正挤压减径工序 (b) 镦头工序

Fig. 12 Streamline distributions of part in each process for new process

(a) Forward extrusion reducing process (b) Upsetting process



图 13 模具改进后模拟件与试验件成形情况对比

(a) 模拟件 (b) 试验件

Fig. 13 Comparison of forming conditions between simulated and tested parts after die improvement

(a) Simulated part (b) Tested part

3 结论

(1) 针对小型套管棒料挤压工艺中模具成本高

的问题，提出通过管料挤压工艺来替代，并结合 Deform-3D 模拟进行研究，利用室温压缩试验并采用外推法获得了 AISI-1025 钢的准确的流动应力曲线，并导入 Deform-3D 中，以提高模拟结果的准确性。

(2) 通过对管料挤压工艺的模拟发现, 在镦头工序中存在折叠缺陷, 对零件质量有较大影响, 并通过挤压试验证实了该结论。经分析可知, 该问题是因为顶环结构位置设置不当造成的。

(3) 对镦头工序的模具结构进行了改进, 将顶环位置下移 6 mm, 同时增加弹簧结构, 并将下模改为浮动模, 有效解决了套管头部的折叠问题, 并通过挤压试验证实了该结论。

(4) 有限元模拟结果和长期生产均表明, 管料挤压工艺能较好地替代棒料挤压工艺, 完成套管的生产, 减少了 2 套模具, 提高了材料利用率, 解决了企业面临的模具成本高的难题。

参考文献:

- [1] 周志伟, 龚红英, 贾星鹏, 等. 铝合金蓄能器壳体冷挤压成形多目标优化 [J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12 (1): 67-74.
Zhou Z W, Gong H Y, Jia X P, et al. Multi-objective optimization of cold extrusion forming of aluminum alloy accumulator shell [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12 (1): 67-74.
- [2] 夏玉峰, 叶彩红, 王力, 等. 基于响应面法的直齿轮冷挤压工艺多目标优化 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44 (1): 70-75.
Xia Y F, Ye C H, Wang L, et al. Multi-objective optimization of cold extrusion process for planetary spur gear based on RSM [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2016, 44 (1): 70-75.
- [3] 褚忠, 瞿伟, 刘铭心, 等. 冷挤压模具磨损优化设计 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2895-2899.
Chu Z, Qu W, Liu M X, et al. Optimum design of cold extrusion die wear [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (12): 2895-2899.
- [4] 赵霞, 王霄. 基于数值模拟驱动的斜花齿零件冷挤压成形工艺参数优化 [J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50 (4): 17-20.
Zhao X, Wang X. Process parameters optimization of cold extrusion forming for the oblique tooth parts based on numerical simulation driving [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2021, 50 (4): 17-20.
- [5] 张京, 吴淑芳, 陈凤龙. 气门顶杆冷挤压过程模具磨损研究 [J]. 机械工程与自动化, 2019, 213 (2): 33-35.
Zhang J, Wu S F, Chen F L. Research on wear of cold extrusion die for valve stem [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019, 213 (2): 33-35.
- [6] 范建祥, 程道来, 倪伟豪. 基于正交试验汽车六角螺母冷挤压模具磨损规律分析及优化 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (4): 929-932.
Fan J X, Cheng D L, Ni W H. Process analysis and optimization on die wear in cold extrusion for vehicle hex nut [J]. Foundry Technology, 2018, 39 (4): 929-932.
- [7] 王波, 张加正. 四通阀体热锻成形 CAE 分析及工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 7-11.
Wang B, Zhang J Z. CAE analysis and process optimization on hot forging for four-way valve body [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 7-11.
- [8] 赵顺治, 景财年, 林涛, 等. 基于 Deform-3D 的风机主轴空心轴预制坯成形优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 47-54.
Zhao S Z, Jing C N, Lin T, et al. Forming optimization on hollow shaft preform of wind turbine spindle based on Deform-3D [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 47-54.
- [9] 周鹏, 张培彦. 基于 A/H 外推法的低碳钢 Q235 真实应力应变关系研究 [J]. 铸造技术, 2013, 34 (12): 1637-1639.
Zhou P, Zhang P Y. Research on true stress-strain curves of mild steel Q235 based on A/H extrapolation [J]. Foundry Technology, 2013, 34 (12): 1637-1639.
- [10] 杨雨童, 罗锐, 程晓农, 等. 喷射成形高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的高应变速率塑性变形行为 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (12): 2700-2708.
Yang Y T, Luo R, Cheng X N, et al. Plastic deformation behavior of spray formed high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy at high strain rate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29 (12): 2700-2708.
- [11] 冯文杰, 钟江涛, 陈莹莹, 等. 花键过渡套浮动式芯棒冷挤压成形方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2017, 312 (2): 73-75, 79.
Feng W J, Zhong J T, Chen Y Y, et al. Research on floating mandrel cold extrusion process for spline transition housing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017, 312 (2): 73-75, 79.
- [12] 赵德颖, 张连东, 朱恩领, 等. 枝杈类锻件挤压成形工艺参数对折叠缺陷的影响分析 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (23): 118-121, 125.
Zhao D Y, Zhang L D, Zhu E L, et al. Influence analysis of extrusion forming process parameters on folding defects for branch-like forgings [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (23): 118-121, 125.
- [13] 冯玮, 李明丽. 浮动凹模温精密成形圆柱斜齿轮变形规律分析 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (1): 35-40.
Feng W, Li M L. Analysis of deformation law for warm precision forging helical gears using floating die process [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (1): 35-40.
- [14] 谭险峰, 谢保华, 刘霞. 基于浮动凹模和约束分流的直齿轮精锻试验与数值模拟 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (1): 7-10.
Tan X F, Xie B H, Liu X. Experiment and numerical simulation on precision forging for spur gear based on floating die and restrained split-flow [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (1): 7-10.