

## 基于 Deform-3D 的带齿轴套锻造工艺仿真与实践

李月超<sup>1</sup>, 李 婷<sup>2</sup>

(1. 新乡职业技术学院 汽车技术系, 河南 新乡 453000; 2. 天津市第一轻工业学校 教务处, 天津 300232)

**摘要:** 某带齿轴套需经过缩径、镦粗、反挤压、冲孔等多级锻造实现成形, 其工艺复杂、效率低、成本高, 急需改进。提出了一种闭式锻造新工艺, 采用组合式冲头结构实现了一次锻造成形。并利用有限元技术对改进后的工艺进行了全面分析, 包括带齿轴套的成形经过、应力应变分析、载荷曲线变化、轴套锻后温度分布等。根据模拟结果可知, 改进后的工艺简单可靠, 得到的带齿轴套充填完整, 不存在表面缺陷, 内部流线连续均匀, 质量较好。在同等条件下利用液压机进行了锻造试验, 获得的产品与模拟效果一致, 经质检, 产品的齿形清晰完整, 各处尺寸均能达到要求, 表明改进后的工艺能起到提高生产效率和降低成本的作用, 同时证实了有限元技术在工艺研究方面的指导作用。

**关键词:** 带齿轴套; 闭式锻造工艺; 组合式冲头结构; 成形载荷; Deform-3D

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.013

**中图分类号:** TG316.3; TP391.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0093-06

## Simulation and practice on forging process for toothed shaft sleeve based on Deform-3D

Li Yuechao<sup>1</sup>, Li Ting<sup>2</sup>

(1. Department of Automotive Technology, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000, China;

2. Academic Affairs Office, Tianjin First Light Industry School, Tianjin 300232, China)

**Abstract:** A toothed shaft sleeve needs to be formed by multi-stage forging such as reducing diameter, upsetting, back extrusion and punching, and the process was complex with low efficiency and high cost, which needs to be improved urgently. Therefore, a new closed forging process was proposed by using combined punch structure to realize one-time forging, and the improved process was comprehensively analyzed by finite element technology including the forming process of toothed shaft sleeve, stress-strain analysis, load curve change and temperature distribution after shaft sleeve forging. According to the simulation results, the improved process is simple and reliable, the toothed shaft sleeve is completely filled without defects on surface, the internal streamline is continuous and uniform, and the quality is good. Under the same conditions, the forging test was carried out by hydraulic press, and the product obtained was consistent with the simulation effect. Through quality inspection, the tooth shape of product is clear and complete, and all the dimensions meet the requirements. The results show that the improved process improves the production efficiency and reduces the cost, and the guiding role of finite element technology in process research is confirmed.

**Key words:** toothed shaft sleeve; closed forging process; combined punch structure; forming load; Deform-3D

带齿轴套能够实现与轴的同步转动, 同时起到动力传动的作用, 在一些机械传动装置中的应用较多。由于使用材料 (40Cr 合金钢) 的强度较高, 并且零件的结构略微复杂 (图 1), 生产企业通常采用多级锻造的生产方式, 包含缩径、镦粗、反挤压、预冲孔、冲连皮等工序 (图 2),

其工艺复杂、生产效率低, 企业的经济效益差。因此, 为了改善现状, 本文提出了一种闭式锻造新工艺<sup>[1]</sup>, 一次成形锻件, 并结合有限元分析进行了研究<sup>[2-3]</sup>。

有限元分析法是基于计算机技术发展起来的数学计算方法, 其核心思想是将复杂的问题离散为多个简单单元来近似求解, 其精度极高, 在锻造工艺研究领域的应用颇多。黎运宇<sup>[4]</sup>对某凸轮的两种等温锻造工艺进行了研究, 发现通过预成形能降低缺陷产生的概率, 并能减小模具载荷; 郭晶玉等<sup>[5]</sup>采用有限元模拟技术进行了扭力臂热锻工艺的研究,

收稿日期: 2021-07-04; 修订日期: 2021-10-10

作者简介: 李月超 (1984-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 382645303@qq.com

通信作者: 李 婷 (1989-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: 304229759@qq.com

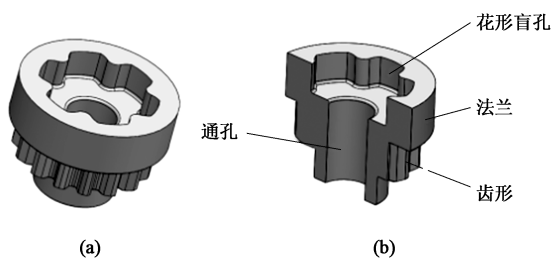


图 1 带齿轴套结构图

(a) 三维模型 (b) 模型剖面

Fig. 1 Structure drawing of toothed shaft sleeve

(a) 3D model (b) Model profile

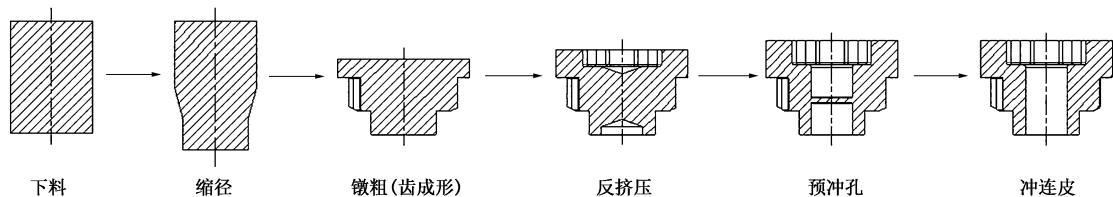


图 2 带齿轴套多级锻造工艺

Fig. 2 Multi-stage forging process of toothed shaft sleeve

## 1 闭式锻造工艺设计与有限元建模

### 1.1 工艺分析与确定

根据图 1 可知,带齿轴套的结构主要包含花形盲孔、法兰、齿形以及通孔 4 处主要特征,因此,设计的闭式锻造过程如图 3 所示,上冲头采用组合式冲头结构,分别由冲孔冲头 1、花形孔冲头以及法兰冲头组成。图 3a 为锻前准备阶段,等待坯料的

通过观察各阶段材料的流动状态及型腔的填充情况,分析了工艺的合理性,并根据结果有针对性进行了优化;卢瑶等<sup>[6]</sup>针对钼合金棒料锻造开裂的问题,将微观组织试验与有限元模拟试验相结合,获得了裂纹的成形机理;张涛等<sup>[7]</sup>采用 Deform 研究了地质钻杆加厚长度尺寸对锻造工艺的影响,并以载荷为优化目标,对厚薄端尺寸进行了合理分配。以上研究表明,有限元模拟能够实现锻造过程的可视化,有效提高锻造工艺的研发效率,降低模具制造及人工的成本。

加入;图 3b 为冲头到位阶段,冲孔冲头 1、花形孔冲头以及法兰冲头的端面对齐,冲孔冲头 2 与凹模型腔的腔底对齐,开始成形;图 3c 为法兰冲头到位阶段,冲孔冲头 1 与花形孔冲头继续挤压,带齿轴套外形初步成形;图 3d 为花形孔冲头到位阶段,冲孔冲头 1 继续挤压,带齿轴套外形基本成形;图 3e 为冲孔阶段,冲孔冲头 1 与冲孔冲头 2 由两端同时向中心挤压,成形通孔,带齿轴套外形完全成形。以下基于 Deform 分析软件来验证该工艺的可行性。

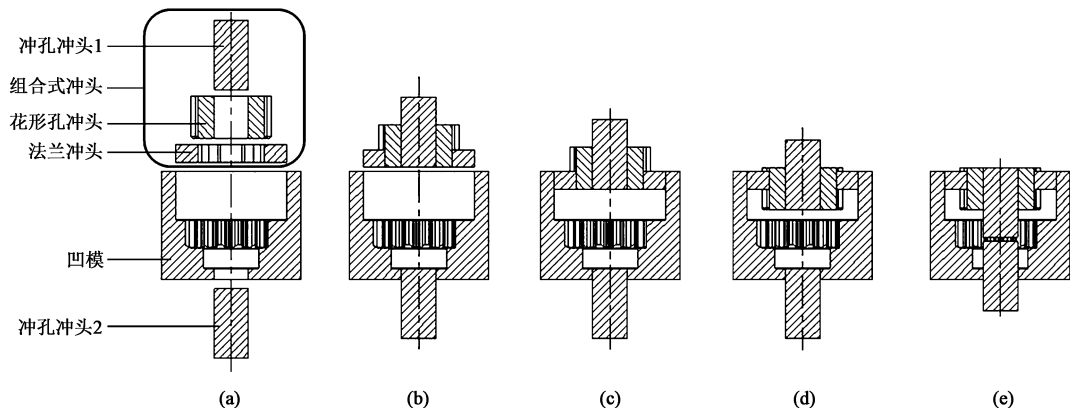


图 3 带齿轴套闭式锻造冲头动作流程

(a) 锻前准备阶段 (b) 冲头到位阶段 (c) 法兰冲头到位阶段 (d) 花形孔冲头到位阶段 (e) 冲孔阶段

Fig. 3 Action flow of closed forging punch for toothed shaft sleeve

(a) Preparation stage before forging (b) Stage of punch in place (c) Stage of flange punch in place

(d) Stage of flower-shaped hole punch in place (e) Punching stage

### 1.2 建模与参数设置

通过 Solidworks 的质量属性可知,带齿轴套的

体积为  $77823 \text{ mm}^3$ ,因此,由锻造前后体积不变原则可确定下料尺寸为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 62 \text{ mm}$ ,高径比为

1.55, 处于锻造失稳极限内<sup>[8]</sup>, 不会出现弯曲折叠现象。结合图3完成装配建模后, 将其导入 Deform-3D 软件中, 经网格处理后, 获得的有限元模型如图4所示。坯料材质选择材料库中与 40Cr 合金钢对应的美国牌号 5140, 始锻温度为 1150 ℃, 定义为塑性体, 考虑到计算过程中网格畸变会造成体积流失从而导致锻件充不满的现象, 为了不影响对工艺的判断, 对其进行体积补偿设置<sup>[9]</sup>; 室温为 20 ℃, 模具预热温度为 330 ℃, 冲孔冲头 1、花形孔冲头等定义为刚体, 凹模保持固定, 各冲头的速度根据图5所示曲线进行设置, 锻造时间为 2 s。由表1可知: 冲孔冲头 1 在 0~2 s 内以 24 mm·s<sup>-1</sup> 的速度稳定挤压; 法兰冲头在 0~5/6 s 内以 24 mm·s<sup>-1</sup> 的速度稳定挤压, 5/6~2 s 内速度为 0; 花形孔冲头在 0~4/3 s 内以 24 mm·s<sup>-1</sup> 的速度稳定挤压, 4/3~2 s 内速度为 0; 冲孔冲头 2 在 0~4/3 s 内速度为 0, 4/3~2 s 内以 24 mm·s<sup>-1</sup> 的速度稳定挤压。各冲头及凹模与坯料的接触传热系数为 11 N·(s·mm·℃)<sup>-1</sup>, 摩擦因数选择 Hot Forging (Lubrication) 选项, 其值为 0.3<sup>[10]</sup>。

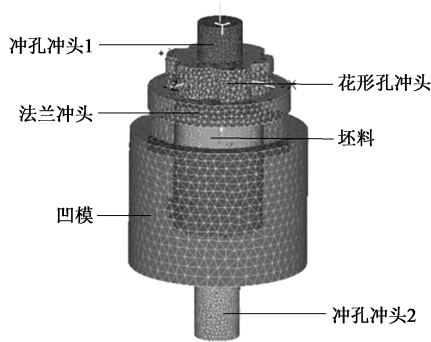


图4 锻造有限元模型  
Fig. 4 Finite element model of forging

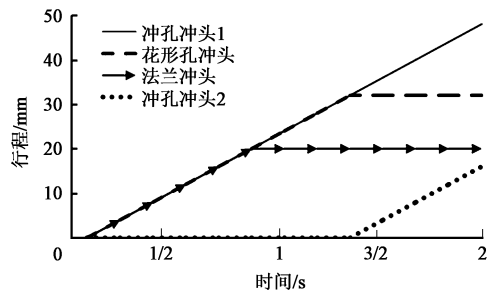


图5 各冲头的行程-时间曲线  
Fig. 5 Stroke-time curves of each punch

表1 各冲头的速度 (mm·s<sup>-1</sup>)  
Table Velocities of each punch (mm·s<sup>-1</sup>)

冲头	时间/s													
	0	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{5}{6}$	1	$\frac{7}{6}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{11}{6}$	2	
冲孔冲头 1	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	
花形孔冲头	0	4	8	12	16	20	24	28	32	32	32	32	32	
法兰冲头	0	4	8	12	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
冲孔冲头 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	8	12	16	

2 模拟结果分析

2.1 成形过程分析

图6为带齿轴套的成形过程。成形初期, 材料在组合式冲头的挤压作用下向下流动(图6a), 缩径成形底部; 随着受到凹模型腔的约束影响, 部分材料开始转移为径向流动, 成形齿部和法兰(图6b); 到280步时, 锻件底部和齿部基本成形完成, 法兰大径填充完成, 与凹模侧壁接触(图6c); 在花形孔冲头及冲孔冲头1的继续挤压下, 材料主要向上逆向流动成形花形盲孔(图6d); 到440步时, 在冲孔冲头1和冲孔冲头2的相向挤压下, 部分材

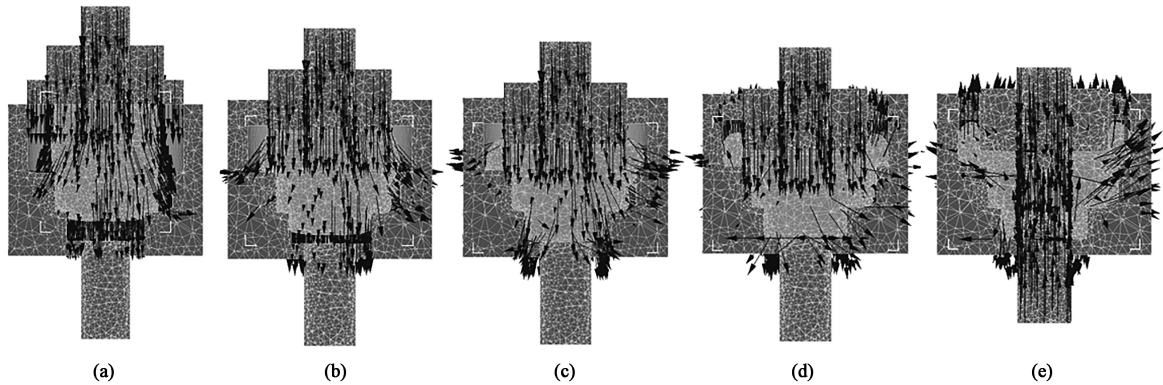


图6 带齿轴套成形过程  
(a) 90步 (b) 200步 (c) 280步 (d) 320步 (e) 440步  
Fig. 6 Forming process of toothed shaft sleeve  
(a) Step 90 (b) Step 200 (c) Step 280 (d) Step 320 (e) Step 440

料相向流动成形通孔, 部分材料继续向上逆向流动完成法兰的成形 (图 6e); 其余材料完成角隙的填充, 直至充满型腔, 实现锻件的最终成形。从整个锻造过程来看, 未观察到材料折叠现象, 各冲头的动作顺序合理, 成形对象明确, 各阶段材料流动顺畅, 能够保证材料充满型腔。

## 2.2 应力、应变及温度分布分析

图 7 为带齿轴套成形后的等效应力、等效应变分布图。由图 7a 可知, 最大等效应力主要集中分布在锻件的齿部及底部, 最大等效应力值在

420.00 MPa 左右, 其原因是受到凹模的束缚, 无法变形, 但间接表明了齿形等已经完全成形充分; 锻件表面及内部其他区域的等效应力分布均比较均匀, 能够有效防止等效应力分布不均匀而产生的微裂纹及内部组织缺陷<sup>[11]</sup>。通过图 7b 可知, 由于成形末期坯料在冲孔冲头 1 和冲孔冲头 2 的挤压下成形通孔, 因此, 最大等效应变出现在冲孔冲头的头部与锻件的接触区域, 其余区域的变形量较小, 因此, 等效应变不大, 整体而言, 等效应力的分布均匀度更佳, 锻件成形的质量较好。

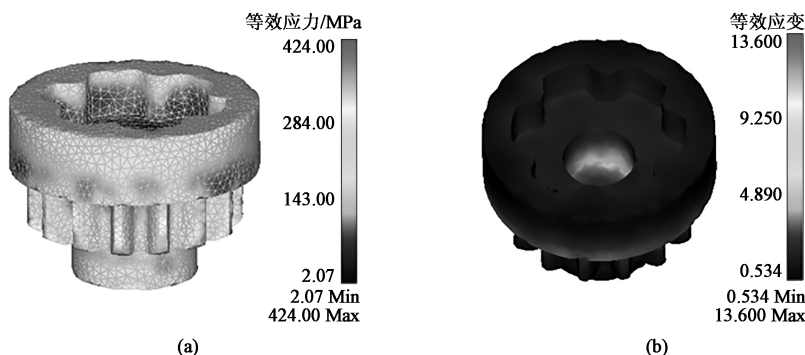


图 7 带齿轴套成形后的等效应力 (a) 和等效应变 (b) 分布图

Fig. 7 Distribution diagrams of equivalent stress (a) and equivalent strain (b) for toothed shaft sleeve after forming

带齿轴套锻造后的温度场分布情况如图 8 所示。由剖面结构可知: 轴套锻件中心的温度最高, 为 1020 °C 左右, 其原因为: 受上、下两端冲头的挤压, 中心材料的变形最猛烈, 产生的变形热较多, 远大于流失给冲头的热量, 温升明显; 锻件齿部和底部的温

度最低, 为 640 °C 左右, 其原因为: 底部和齿部的成形时间较早, 与凹模内壁已完全接触, 部分温度转移到了温度较低的凹模; 其余部位的温度分布相对比较均匀, 处于 800~950 °C 区间内, 符合终锻温度要求, 不会由于晶粒粗大而导致锻件的性能差或产生裂纹<sup>[12]</sup>。

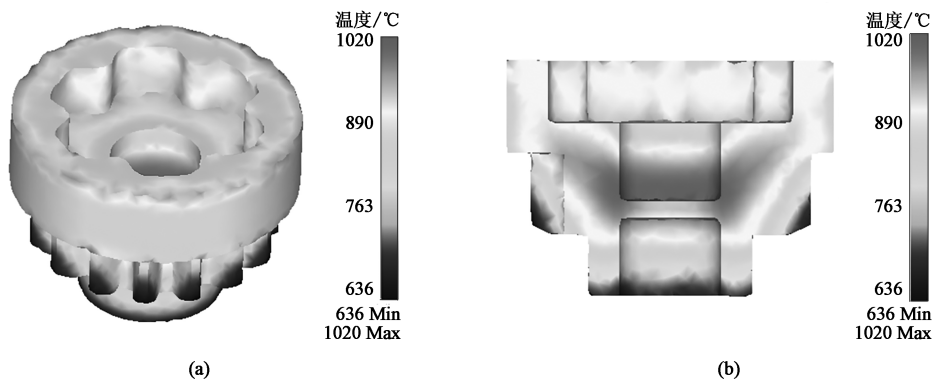


图 8 带齿轴套的锻后温度场分布图

(a) 完整结构 (b) 剖面结构

Fig. 8 Temperature field distributions of toothed shaft sleeve after forging

(a) Complete structure (b) Profile structure

## 2.3 成形载荷分析

图 9 为带齿轴套成形过程中各冲头的载荷变化曲线图。成形初期, 由于坯料的直径较小, 并未与法兰冲头有接触, 仅在冲孔冲头 1 和花形孔冲

头挤压下开始变形, 因此, 法兰冲头前期没有受载; 到 1.54 s 左右时, 逆向流动的材料开始与法兰冲头接触, 载荷开始快速上升, 直至成形完成, 载荷达到最大值, 为 471.0 kN, 如图 9b 所示; 而



冲孔冲头 1 和花形孔冲头所受载荷均随着与坯料接触面积的增加而增大, 并同样在成形最终阶段达到最大值, 分别为 135.0 和 366.0 kN, 如图 9a 和图 9c 所示。成形初期处于缩径阶段, 凹模底部未充满, 坯料未与冲孔冲头 2 接触, 因此, 冲孔冲头 2 直到 1.12 s 左右才开始接触受载, 并随着冲孔冲头 2 开始运动, 其与坯料的接触面积稳定增加, 载荷的增长趋势同冲孔冲头 1 保持一致, 载荷最大值也为 135.0 kN, 如图 9a 所示。

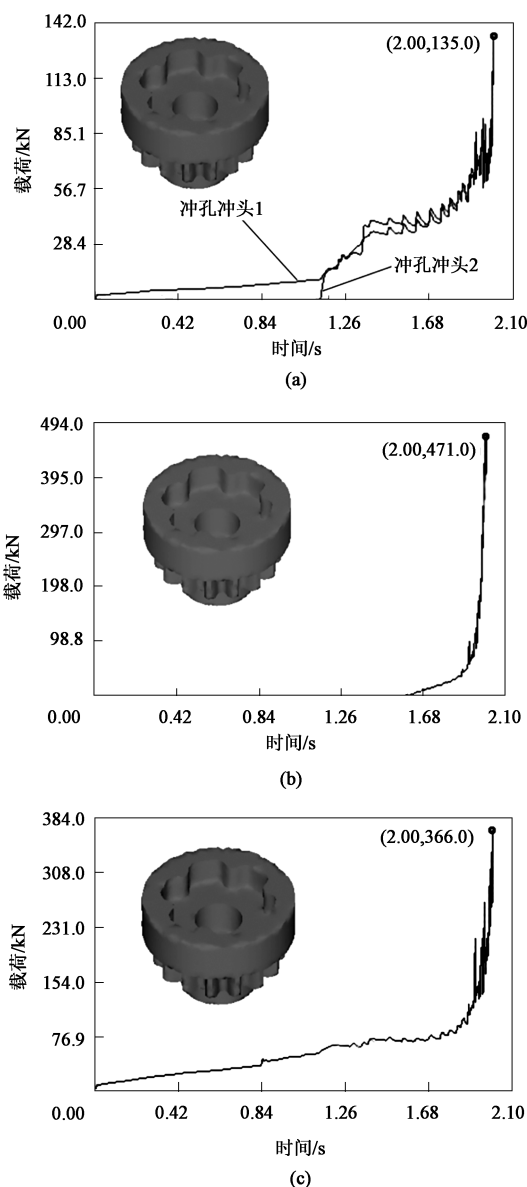


图 9 各冲头载荷变化曲线

(a) 冲孔冲头 1 和冲孔冲头 2 (b) 法兰冲头  
(c) 花形孔冲头

Fig. 9 Changing curves of load for each punch

(a) Punching punch 1 and punching punch 2 (b) Flange punch  
(c) Flower-shaped hole punch

### 3 试验验证

根据以上模拟结果进行带齿轴套的锻造试制, 主要流程为落料→感应炉加热→模锻→冷却→探伤→检验。坯料完成下料后, 经感应炉加热 (1150 ℃), 模具经天然气预热 (330 ℃), 模具表面通过雾化喷枪均匀喷涂石墨乳, 能够起到润滑、隔热、冷却、帮助脱模的作用, 法兰冲头、花形孔冲头、冲孔冲头 1 及冲孔冲头 2 按要求顺序加载, 通过锻压机锻压得到的带齿轴套如图 10 所示。可以看到, 法兰、花形孔成形完整, 齿形的轮廓清晰饱满, 表面顺滑、无褶皱, 质量好。经质检, 各处尺寸公差均达到设计要求, 与原工艺相比, 大大提高了生产效率, 给企业带来了良好的经济效益, 并证实了有限元技术在工艺研究方面的指导作用。

### 4 结语

针对带齿轴套原工艺成形过程复杂、效率低、成本高的问题, 采用 Deform-3D 对闭式锻造新工艺进行了研究。采用组合式冲头结构实现一次锻造成形, 并从带齿轴套的成形过程等多方面分析、验证新工艺的可行性。模拟结果证实, 新工艺简单、可靠, 各冲头动作合理, 材料流动顺畅, 得到的带齿轴套充填完整, 不存在表面缺陷, 内部流线连续、均匀, 质量好, 并通过实际锻造试验获得了质量合格的带齿轴套产品, 很好地解决了企业的实际问题。

#### 参考文献:

- [1] 孙建辉, 谢瑞, 薛克敏, 等. 带轴齿轮坯闭式精锻成形数值模拟与实验研究 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (5): 137-141.  
Sun J H, Xie R, Xue K M, et al. Numerical simulation and experimental study on closed precision-forging for shaft gear billet [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (5): 137-141.
- [2] 姜天亮, 龚红英, 赵小云, 等. 基于 DEFORM-3D 的花键轴坯料结构尺寸优化设计 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (6): 111-115.  
Jiang T L, Gong H Y, Zhao X Y, et al. Optimum design of spline shaft blank structure dimension based on DEFORM-3D [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (6): 111-115.
- [3] 王永刚. 螺旋锥齿轮精锻有限元分析与实验研究 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (12): 2985-2988.

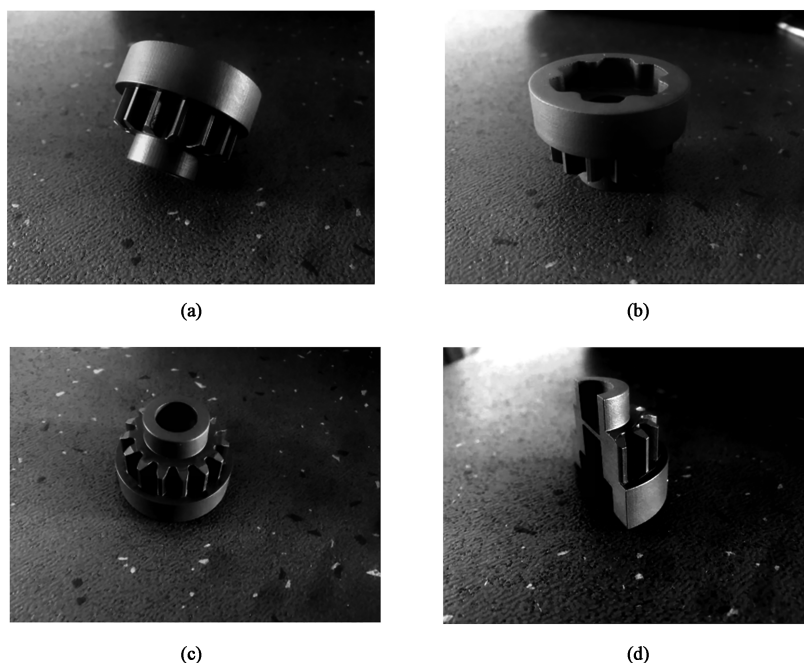


图 10 带齿轴套的试制锻件

(a) 成形结果 (b) 花形孔及法兰特征 (c) 齿形特征 (d) 截面

Fig. 10 Trial forgings of toothed shaft sleeve

(a) Forming result (b) Flower-shaped hole and flange features (c) Tooth feature (d) Section

Wang Y G. Simulation and experimental study on forming process of spiral bevel gear [J]. Foundry Technology, 2017, 38 (12): 2985-2988.

- [4] 黎运宇. 基于 DEFORM 3D 的凸轮等温锻造工艺数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (19): 136-138.

Li Y Y. Numerical simulation of cam isothermal forging process based on DEFORM 3D [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (19): 136-138.

- [5] 郭晶玉, 邓小虎, 郑宝星, 等. Ti55531 钛合金扭力臂热锻成形工艺设计及优化 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (2): 96-104.

Guo J Y, Deng X H, Zheng B X, et al. Design and optimization for hot forging process of Ti55531 titanium alloy twisting force arm [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (2): 96-104.

- [6] 卢瑶, 杨栋林. 大规格钼合金径向锻造中心裂纹成因分析及改进措施 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2021, 49 (1): 35-39.

Lu Y, Yang D L. Cause analysis and improvement measures of center cracks of large-size molybdenum alloys during radial forging [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2021, 49 (1): 35-39.

- [7] 张涛, 史文雅, 王菲. 基于 DEFORM 的煤矿用地质钻杆端部挤压锻造模具的优化设计 [J]. 煤矿机械, 2019, 40 (11): 100-102.

Zhang T, Shi W Y, Wang F. Optimization design of extrusion forging die for geological drill pipe end used in coal mine based on DEFORM [J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40 (11): 100-102.

- [8] 陈剑, 张东民, 周伟民, 等. 球头销多工位冷锻挤工艺研究及模具设计 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (11): 153-156.

Chen J, Zhang D M, Zhou W M, et al. Process research and die design of multi-station cold upsetting-extrusion of ball head pin [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (11): 153-156.

- [9] 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. DEFORM-3D Plastic Forming CAE Application Course [M]. Beijing: Peking University Press, 2011.

- [10] 夏巨谌, 金俊松, 邓磊, 等. 中空分流锻造关键尺寸参数的理论计算及应用 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (3): 1-4.

Xia J C, Jin J S, Deng L, et al. Theoretical calculation of key parameters in hollow divided flow forging [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (3): 1-4.

- [11] 赵志繁, 侯怀书, 钱瑞福, 等. 六角法兰面锁紧螺母冷锻挤成型数值模拟及优化 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (17): 101-104, 107.

Zhao Z F, Hou H S, Qian R F, et al. Numerical simulation and optimization of cold heading-extrusion of hexagon flange face locking nuts [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (17): 101-104, 107.

- [12] 张驰, 张蕊, 梁峰, 等. 石油管道阀体大锻件晶粒尺寸的数值模拟及实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (2): 168-174.

Zhang C, Zhang R, Liang F, et al. Numerical simulation and experimental study on grain size of large forgings for oil pipeline valves [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (2): 168-174.