

一种提高长轴类转向节锻件材料利用率的组合模具

陈天赋¹, 屈志远², 周 杰², 武建祥¹, 汪 西², 王国文¹, 彭海军³

(1. 湖北三环锻造有限公司, 湖北 襄阳 441700; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;

3. 重庆杰品科技股份有限公司, 重庆 401329)

摘要: 针对立式锻造工艺形成长轴类转向节锻件时存在的锻件轴部充填困难、材料利用率低等问题, 以某长轴转向节锻件为例, 提出了一种新的组合模具, 该模具中的镦粗工序对坯料进行预分料, 使镦粗后的坯料投影全部落在制坯模具型腔内; 制坯、预锻模具采用阻力墙组合结构, 提高坯料轴部的充填能力; 制坯、终锻模具设计定位结构, 提高坯料的定位准确性。并结合数值模拟仿真分析技术, 模拟并分析了新组合模具的成形性能, 最后通过生产试验验证了新组合模具的可行性。结果表明: 采用新的组合模具, 下料重量由原来的 47.7 kg 减小至 42.9 kg, 材料利用率达到了 91%, 较优化前的模具结构提高了 8%。

关键词: 长轴转向节; 组合模具; 阻力墙; 坯料定位; 立式锻造工艺

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.028

中图分类号: TG31

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 08-0185-08

A kind of combined mold on improving material utilization rate for long shaft steering knuckle forgings

Chen Tianfu¹, Qu Zhiyuan², Zhou Jie², Wu Jianxiang¹, Wang Xi², Wang Guowen¹, Peng Haijun³

(1. Hubei Tri-ring Forging Co., Ltd., Xiangyang 441700, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Chongqing Jiepin Technology Co., Ltd., Chongqing 401329, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult filling in the shaft of forgings and low material utilization rate in the vertical forging process for long shaft steering knuckle forgings, for a long shaft steering knuckle forgings, a new combined mold was proposed. In this mold, the billet was pre-separated in the upsetting process so that the projection of billet after upsetting fell into the cavity of billet-making mold, the billet-making and pre-forging molds adept a combined structure of resistance wall to improve the filling capacity of billet shaft, and the positioning structure of billet-making and final forging molds was designed to improve the positioning accuracy of billet. Combined with numerical simulation analysis technology, the forming performance of the new combined mold was simulated and analyzed, and the production test verified the feasibility of the new combined mold. The results show that the material weight is reduced from 47.7 kg to 42.9 kg by using the new combined mold, and the material utilization rate reaches 91%, which is 8% higher than the mold structure before optimization.

Key words: long shaft steering knuckle; combined mold; resistance wall; billet positioning; vertical forging process

长轴类转向节锻件的几何特点为轴长与轴最大直径的比值超过 2.5, 卧式锻造工艺成形该类锻件时的材料利用率低^[1], 现阶段一般采用立式锻造工艺。以某长轴转向节锻件为例, 其几何形状如图 1 所示。该锻件轴部的长度为 210 mm, 直径最大处为

Φ79 mm; 轴部上面为盘面, 盘面厚度为 40 mm; 盘面两侧为两个“叉耳”, 两个“叉耳”的高度分别为 120 和 85 mm, “叉耳”内侧面距离为 100 mm; 较高的“叉耳”(高耳)旁边连接一个“枝丫”, 称为“单枝”, “单枝”的长度为 100 mm、宽度为 45 mm、厚度为 41.6 mm; 较低的“叉耳”(低耳)旁边有两个“枝丫”, 称为“双枝”, “双枝”的长度为 70 mm, 宽度、厚度与“单枝”大致相同。按该锻件的几何形状可划分为“轴-盘-叉”结构转向节锻件^[2]。

该转向节锻件锻造的初始坯料为棒料, 锻造工序为: 镦粗—制坯—预锻—终锻。其中镦粗工序在

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075058)

作者简介: 陈天赋 (1976-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 13871600196@139.com

通信作者: 彭海军 (1992-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: 1342550938@qq.com

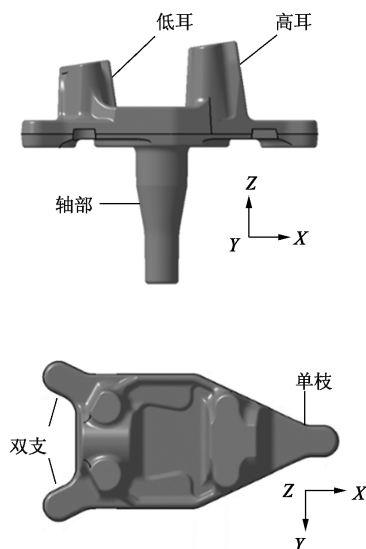


图 1 长轴转向节锻件三维图

Fig. 1 3D drawing of long shaft steering knuckle forgings

液压机上完成,制坯、预锻工序在 6300 t 电动螺旋压力机上完成。镦粗工序的目的主要有两个:(1)去除棒料圆周氧化皮,提高锻件表面质量;(2)光顺坯料端面锯切的尖锐棱角,减小锻造折叠产生的风险。制坯、预锻工序的作用也有两个:(1)分步成形锻件轴部,降低锻件轴部的成形难度;(2)多工位分散成形可以提高金属的塑性^[3],降低模具磨损,提高模具寿命。模具优化前材料利用率为 83%,材料利用率不高。

1 镦粗工序模拟及优化

1.1 镦粗工序模拟

原始成形方案中坯料直径为 $\Phi 140$ mm、高度为 395 mm。镦粗上、下模具的型腔相同,均由大圆弧

连成,如图 2 所示。坯料经过锯切下料,锯切端面存在尖锐棱角,若不经特殊处理,在锻造过程中可能形成折叠缺陷,为了消除这种折叠风险,将镦粗上、下模的型腔设计为大圆弧光滑连接,如此处理,锯切端面的尖锐棱角即可在镦粗工序被压光顺。

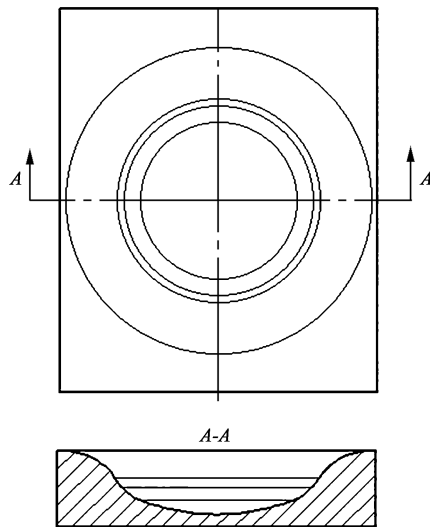


图 2 原始成形方案中镦粗模具二维图

Fig. 2 2D drawing of upsetting mold for original forming scheme

数值模拟软件被广泛应用于工业生产,采用锻造数值模拟软件对锻造工艺进行数值模拟,根据实际生产工艺进行参数设置,模拟结果与实际生产试验的符合度高^[4-5]。坯料的始锻温度为 1200 $^{\circ}\text{C}$,模具的预热温度为 200 $^{\circ}\text{C}$;在液压机上成形,成形速度为 $30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;镦粗时模具不进行润滑处理,镦粗下模、上模与坯料的摩擦因数设置为 0.7,坯料与模具的热交换系数设置为 $1 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

经计算机数值模拟计算,镦粗后的坯料形状近似回转体结构,如图 3a 所示。墩粗后坯料高度约为

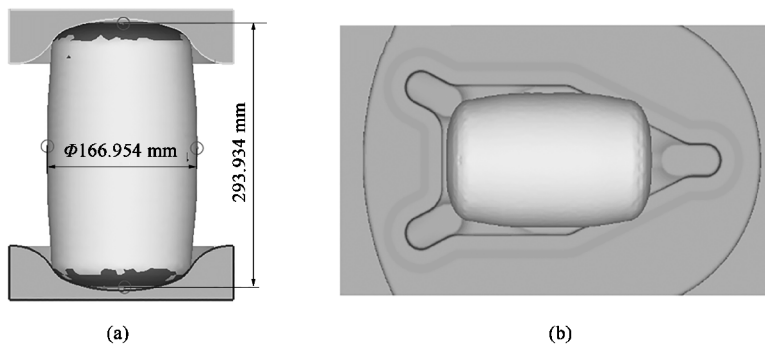


图 3 镦粗后的坯料

(a) 坯料在镦粗模 (b) 坯料在制坯模

Fig. 3 Billet after upsetting

(a) Billet in upsetting mold (b) Billet in billet-making mold

294 mm，直径约为 $\Phi 167$ mm，坯料中间略微鼓肚。墩粗后的坯料在制坯模具中的位置情况如图 3b 所示，从图 3 中可以看出，坯料上、下端面的尖锐棱角被墩光顺，减小了坯料在锻造过程中出现折叠的概率。由于该长轴转向节锻件“单枝”距离锻件中心较远，因此需要将坯料向“单枝”侧靠近；“单枝”侧型腔较窄，坯料部分投影落在型腔外面，落在型腔外面的这部分金属在成形过程中流向飞边槽，造成材料浪费；此外，多余的金属会引起模具局部应力集中，造成模具过早失效，降低模具寿命。原始成形方案中墩粗后的坯料分配不合理，需要改进优化。

1.2 墩粗下模优化及模拟

优化后的坯料直径为 $\Phi 140$ mm、高度为 355 mm。为了提高材料利用率，使墩粗后的坯料在制坯下模中的投影全部落在型腔内，重新设计了墩粗下模，其几何形状如图 4 所示。墩粗下模优化后，其型腔深度为 110 mm，在离型腔底面 60 mm 处设计有定位小凸台，方便坯料定位；型腔拔模斜度为 7° ，型腔四周采用大圆弧倒圆角，定位凸台采用大圆弧过渡，整个型腔表面光顺，近似椭圆形。

将优化后的墩粗下模几何模型导入至数值模拟软件，得到墩粗完成后的坯料形状如图 5 所示，图 5a 为 Y 轴方向视图，图 5b 为 X 轴方向视图。与原始成

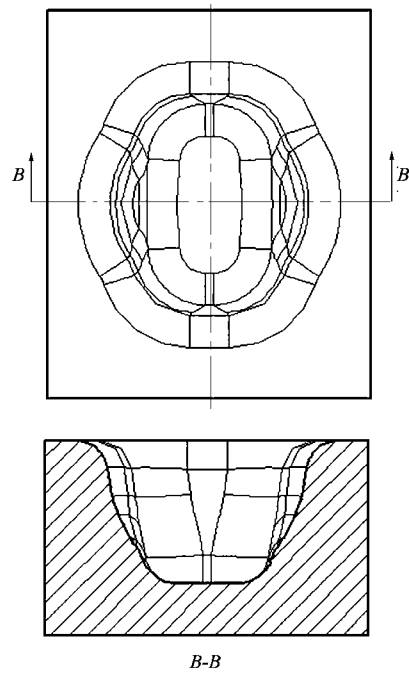


图 4 优化后的墩粗下模
Fig. 4 Upsetting lower mold after optimization

形方案相比，坯料高度减小约 10 mm，坯料上半部分呈回转体结构，坯料中间最大直径约为 $\Phi 178$ mm；坯料下半部分被挤扁，呈扁平椭圆结构。金属集中在坯料中间，有利于提高锻件轴部的充填性能。

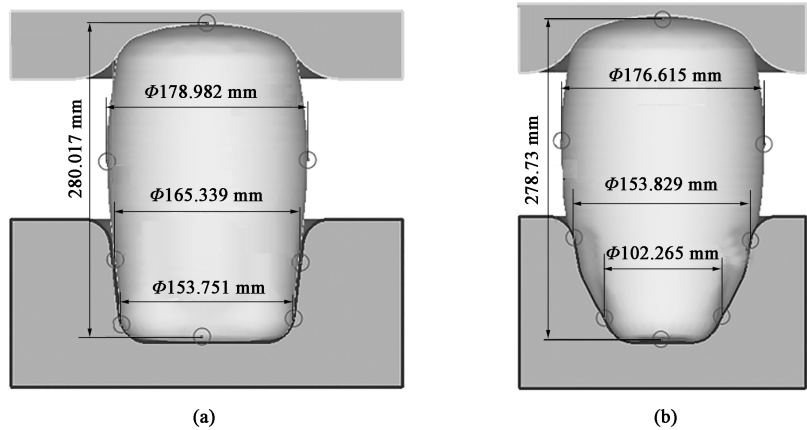


图 5 墩粗下模优化后的坯料图
(a) Y 轴方向视图 (b) X 轴方向视图
Fig. 5 Billet diagrams after optimization of upsetting lower mold
(a) View of Y-axis direction (b) View of X-axis direction

墩粗下模优化后，坯料形状发生了较大改变，其在制坯下模中的位置如图 6 所示。从图 6 中可知，由于墩粗时对坯料进行了预分料，坯料金属分布合理，坯料投影完全落在了制坯下模型腔内。

2 制坯模、预锻模阻力墙组合结构

2.1 制坯模、预锻模阻力墙组合结构设计

提高材料利用率是锻造模具结构设计的一个重

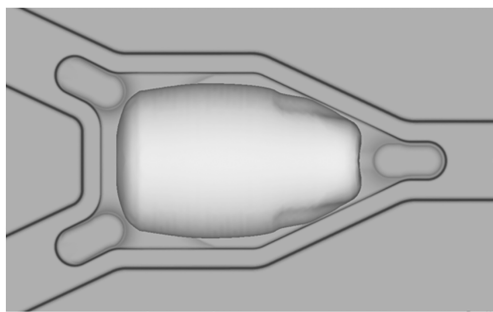


图 6 锻粗下模优化后坯料在制坯模

Fig. 6 Billet in billet-making mold after optimization of upsetting lower mold

要任务。重庆大学周杰教授等^[6-7]于 2007 年提出了阻力墙结构,研究了阻力墙结构参数对锻造过程中各物理变量的影响规律,随后 2008 年该新型阻力墙结构在曲轴模具中得到了应用并取得了较好成果。

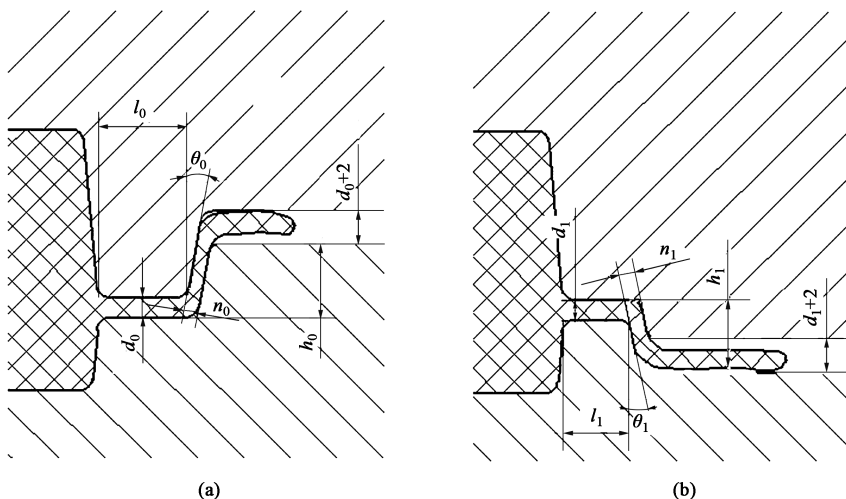


图 7 阻力墙结构示意图

(a) 制坯模阻力墙结构 (b) 预锻模阻力墙结构

Fig. 7 Schematic diagrams of resistance wall structure

(a) Resistance wall structure of billet-making mold (b) Resistance wall structure of pre-forging mold

不同阻力墙结构参数对锻件成形力、锻件充填性能的影响不同。一般情况下,桥部宽度越宽、阻力墙高度越高,锻件的充填性能越好,锻件的成形力越高;桥部高度越低、阻力墙间隙越小,锻件的充填性能越好,锻件的成形力越高。为了平衡锻件的充填性能和成形力,设计制坯模、预锻模的阻力墙结构参数,如表 1 所示。

2.2 制坯、预锻工序数值模拟

制坯、预锻工序采用石墨型润滑剂润滑,摩擦因数设置为 0.3;制坯和预锻在电动螺旋压力机上成形,上模速度为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,其他参数设置与锻粗工序相同。

长轴类转向节锻件的轴部成形困难,王冬良、陈南^[8]基于数值模拟模拟技术,采用卧式锻造工艺成形了长轴类转向节锻件;上海工程技术大学何文涛等^[9]研究了阻力墙结构参数对“孔-盘-叉-臂”结构转向节锻件成形过程中各物理变量的影响规律,使该转向节锻件材料利用率提高了 3.2%。

对于长轴类“轴-盘-叉”结构转向节锻件,模具飞边槽结构为开式飞边槽时,锻造成形过程中金属向模具型腔外流出较多,材料利用率不高。针对这种情况,提出了一种制坯、预锻模具相互匹配的阻力墙飞边槽结构,该结构如图 7 所示。制坯模具阻力墙凸台在制坯下模,预锻模具阻力墙凸台在预锻上模;制坯模和预锻模阻力墙的结构参数分别有:桥部宽度 l_0 和 l_1 、桥部高度 d_0 和 d_1 、阻力墙高度 h_0 和 h_1 、阻力墙斜度 θ_0 和 θ_1 和阻力墙间隙 n_0 和 n_1 。

表 1 制坯模和预锻模阻力墙结构参数 (mm)

Table 1 Structural parameters of resistance wall for billet-making mold and pre-forging mold (mm)

参数	桥部宽度 l	桥部高度 d	阻力墙高度 h	阻力墙斜度 θ	阻力墙 间隙 n
制坯模	18	3	30	7	2
预锻模	14	4	15	10	3

该长轴转向节锻件的轴长为 210 mm,轴部较长。制坯、预锻下模孔设计得比较深,原因主要有两点:(1) 希望锻件轴部尽量充填长一点,降低终锻锻件轴部的充填难度;(2) 减小下模孔憋气对锻件成形的影响。制坯下模型腔的设计深度为 130 mm,预锻

下模型腔的设计深度为 213 mm，与终锻下模型腔的深度相同。

制坯、预锻各阶段锻件轴部的充填情况分别如图 8a 和图 8b 所示，所取截面包含下模孔中心轴且与阻力墙结构垂直。在制坯、预锻成形过程中，主要关注两个方面：坯料杆部的充填情况和飞边结构及形态。由图 8a 可知，制坯开始时，上模轮廓线与坯料紧密贴合；制坯上模向下运动，金属向轴部及飞边桥部流动，然后充满飞边桥部；制坯上模继续向下运动，飞边桥部的金属一部分向阻力墙间隙流动，一部分向制坯下模型腔中流动；最后飞边桥部

的高度为 3 mm，阻力墙的间隙为 2 mm，因此，制坯完成后坯料飞边的厚度在 2~3 mm 之间，坯料轴部实际充填 105 mm。由图 8b 可知，预锻开始时，飞边结构斜向上伸出；预锻上模向下运动，飞边向下被压弯，有向外伸出的趋势；预锻上模继续向下运动，金属流向轴部的同时也向飞边桥部流出，直至充满飞边桥部；最后飞边桥部的金属一部分通过阻力墙间隙向外流出，一部分留在飞边桥部，形成飞边的一部分。预锻完成后，坯料的飞边桥部的高度为 4 mm，阻力墙的间隙为 3 mm，因此，预锻完成后坯料的飞边厚度在 3~4 mm 之间，坯料轴部实际充填 183 mm。

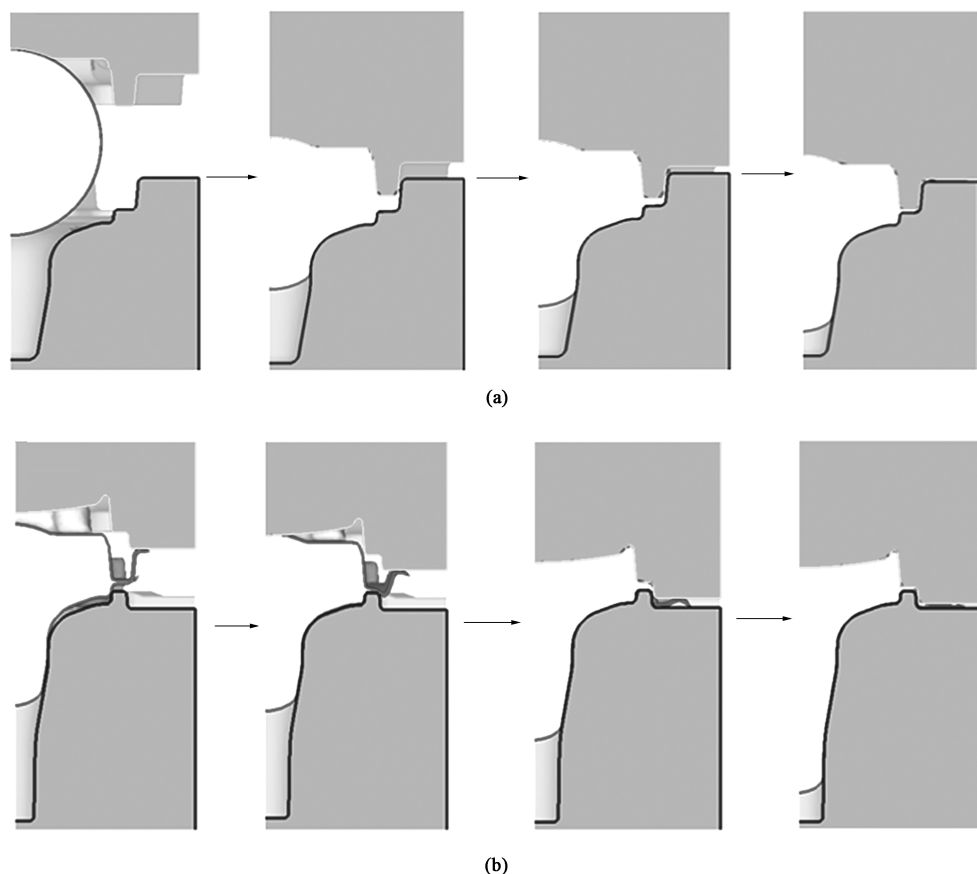


图 8 制坯 (a) 和预锻 (b) 时坯料充填过程

Fig. 8 Filling process of billet during billet-making (a) and pre-forging (b)

制坯模阻力墙的桥部宽度为 18 mm，预锻模阻力墙的桥部宽度为 14 mm，预锻模阻力墙的桥部宽度较制坯模阻力墙的桥部宽度小；制坯模阻力墙的斜度为 7° ，预锻模阻力墙的斜度为 10° ，预锻模阻力墙的斜度较制坯模阻力墙的斜度大；制坯模阻力墙的桥部高度为 3 mm，预锻模阻力墙的桥部高度为 4 mm，预锻模阻力墙的桥部高度较制坯模阻力墙的桥部高度高。按照这种规律进行制坯、预锻模的阻力墙结构参数设计，模拟结果显示飞边结构较小，

锻件轴部充填较好，材料利用率有很大提高。

3 终锻工序模拟

终锻、制坯和预锻在同一个电动螺旋压力机上成形，终锻工序模拟参数设置与制坯、预锻工序相同。

终锻各阶段坯料轴部的充填情况如图 9 所示。上模向下运动，几乎同时完成锻件轴部及盘面上、

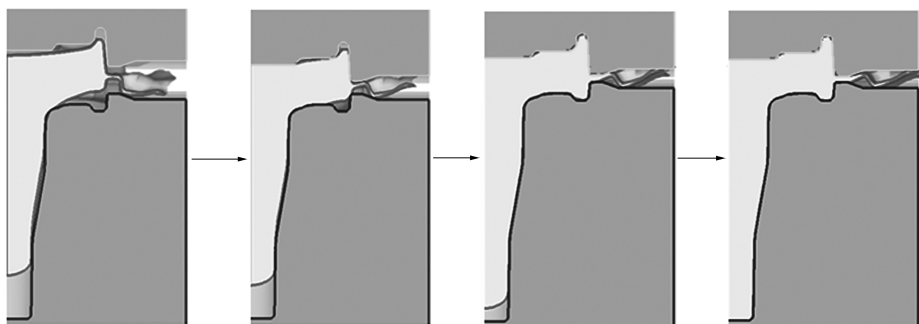


图 9 终锻时坯料充填过程

Fig. 9 Filling process of billet during final forging

下筋条的充填；飞边向外延伸，飞边厚度在 2 ~ 5 mm 之间，金属向模具型腔外流出较少。

终锻完成后，该转向节锻件的上模面和下模面的充填情况分别如图 10a 和图 10b 所示。深色

区域为坯料与模具的接触区域，由图 10 可知，坯料上、下表面均与模具型腔表面接触，锻件充填饱满；阻力墙处飞边宽度较窄，模拟结果较好。

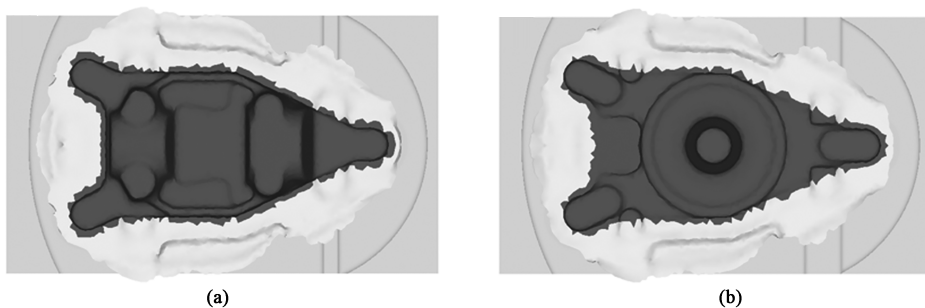


图 10 终锻时坯料充填情况

(a) 上模面 (b) 下模面

Fig. 10 Filling condition of billet during final forging

(a) Upper mold surface (b) Lower mold surface

锻造各工序的成形力如图 11 所示。锻件的几何模型关于对称面对称，因此取锻件 1/2 作为模拟对象，数值计算得到的成形力为锻件成形力的 1/2。由图 11 可知，制坯、预锻和终锻的总成形力分别为 38024、60564 和 51548 kN；制坯坯料的形状简单，成形吨位较小；预锻坯料的形状与终锻件相差不大，预锻模具上设计有阻力墙结构，易形成应力集中，

成形吨位最大；终锻模具的飞边槽为开式飞边槽，成形吨位反而小些。该锻件设计在 61740 kN 电动螺旋压力机上进行，设备能力满足要求。

4 制坯、终锻定位结构设计

坯料在模具中定位的优劣往往决定着锻件的质量和实际工程应用能力。在锻造生产实际应用中，希望坯料定位准确，在成形过程中坯料无刚性转动或移动，锻件成形一致性高，锻件质量稳定^[10-12]。

4.1 制坯定位结构设计

锻粗下模优化后，坯料形状变化较大，为了提高坯料在制坯模具中定位的准确性，需要在制坯模具型腔中设计相应的随形结构，坯料在制坯模具中的定位情况如图 12 所示。由图 12 可知，在坯料与制坯上模、下模接触区域内，无论是 X 轴方向还是 Y 轴方向，模具轮廓线与坯料轮廓线的匹配度高，

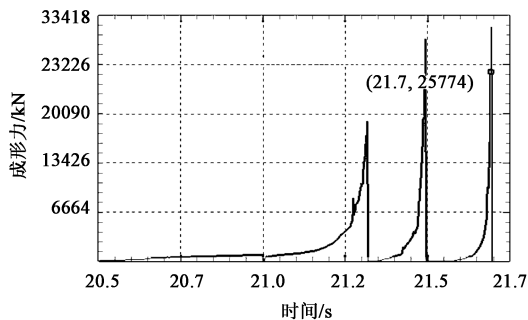


图 11 各工序成形力

Fig. 11 Forming force of each process

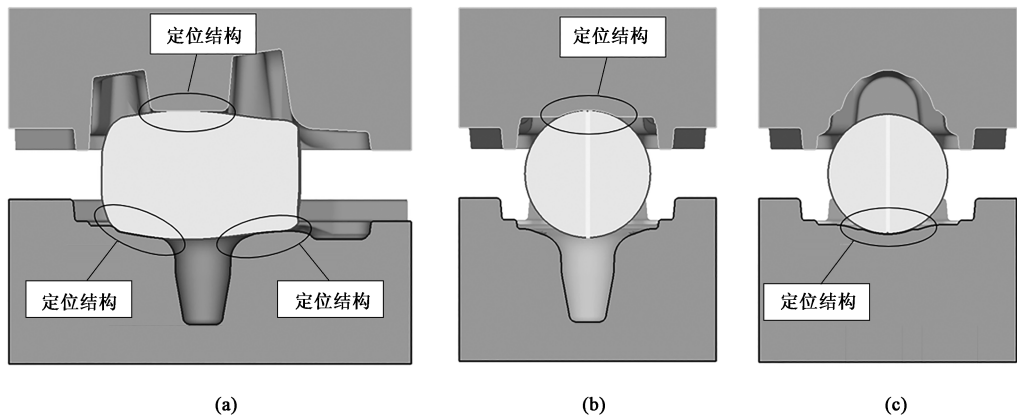


图 12 制坯模中坯料定位情况
(a) X 轴方向对称截面 (b) Y 轴方向截面 1 (c) Y 轴方向截面 2

Fig. 12 Position conditions of billet in billet-making mold
(a) Symmetric section in X-axis direction (b) Section 1 in Y-axis direction (c) Section 2 in Y-axis direction

坯料与模具紧密贴合，在成形过程中可有效防止坯料刚性转动和移动，提高锻件质量的稳定性和尺寸一致性。

4.2 终锻下模定位结构设计

由于坯料经过预锻后，飞边毛刺向下，终锻下模的型腔较浅，因此需要设计辅助结构使坯料定位准确。坯料轴部细长，可以以坯料轴部大致定位，为了使坯料放置角度准确，在终锻下模“枝丫”两

侧设计有定位凸台结构，如图 13a 所示。坯料放入终锻下模后，坯料与终锻下模的最小距离如图 13b 所示。坯料深色部分与模具的最小距离较小，在 2 mm 以内，可以认为坯料与模具接触。由图 13b 可知，坯料“枝丫”两侧和轴部与终锻下模的最小距离在 2 mm 以内，坯料此处与终锻下模接触，坯料“枝丫”卡在定位凸台中间，坯料定位准确。

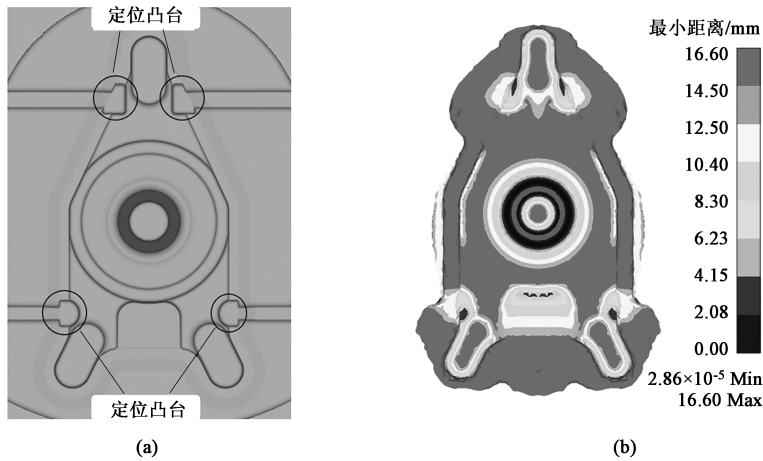


图 13 终锻下模中坯料定位情况
(a) 终锻下模定位凸台结构 (b) 坯料与终锻下模的最小距离

Fig. 13 Position conditions of billet in lower mold of final forging
(a) Positioning boss structure of lower mold of final forging (b) Minimum distance between billet and lower mold of final forging

5 生产验证

用优化后的组合模具进行试生产，试制得到的

锻件如图 14 所示。由图 14 可知，锻件总体充填饱满，无缺料、塌角等缺陷；制坯成形力约为 39396 kN，预锻成形力约为 61250 kN，终锻成形力接近 54880 kN。该转向节锻件的充填性能基本与模拟结果相符，成

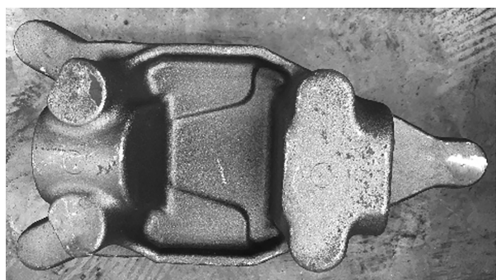


图 14 试制转向节实物图

Fig. 14 Actual diagram of steering knuckle in trial production

形力较模拟结果略大。

6 结论

(1) 锻粗下模型腔加深, 由原来的圆形回转体模型腔优化为扁平型腔, 锻粗后坯料金属分布合理, 制坯时坯料投影完全落在制坯下模型腔内。

(2) 制坯上、下模设计有与坯料形状相同的曲面结构, 坯料在制坯模具中定位准确; 终锻下模设计有定位凸台结构, 坯料在终锻下模中定位准确。由于制坯、终锻工序模具设计有合适的坯料定位结构, 锻造工艺稳定性得到了极大提高。

(3) 制坯、预锻模具设计有相互匹配的阻力墙结构, 提高了金属向外流动的阻力。下料重量由原来的 47.7 kg 减小至 42.9 kg, 材料利用率达到了 91%, 较原始成形方案提高了 8%。

参考文献:

- [1] 唐庆顺, 杨元慧, 卢森加, 等. 汽车转向节模锻工艺改进 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (19): 128-130.
Tang Q S, Yang Y H, Lu S J, et al. Die forging process improvement of automobile steering knuckle [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (19): 128-130.
- [2] 肖永清, 杨忠敏. 汽车前桥及转向系统结构与维修 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
Xiao Y Q, Yang Z M. Structure and Maintenance of Automobile Front Axle and Steering System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [3] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
Yu H Q, Chen J D. The Principle of Metal Plastic Forming [M].

Beijing: China Machine Press, 2019.

- [4] 陈婕, 邱春林, 李长生, 等. 两种模型对锻造成形数值模拟结果的影响 [J]. 热加工工艺, 2022, 51 (11): 82-86.
Chen J, Qiu C L, Li C S, et al. Effect of two models on numerical simulation results of forging forming [J]. Hot Working Technology, 2022, 51 (11): 82-86.
- [5] 田世伟, 江海涛, 张业飞, 等. 锻造技术在轻金属中的应用 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 9-15.
Tian S W, Jiang H T, Zhang Y F, et al. Application of forging technology in light metals [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 9-15.
- [6] 周杰, 刘敏, 王平, 等. 汽车曲轴终锻模阻力墙新型结构参数试验 [J]. 机械工程学报, 2007, (8): 229-234.
Zhou J, Liu M, Wang P, et al. Experiment on parameters of new finishforging die structural of automobile crankshaft called resistance wall [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, (8): 229-234.
- [7] 王梦寒, 门正兴, 周杰, 等. 一种带阻力墙的新型飞边槽结构设计 [J]. 热加工工艺, 2008, 37 (17): 62-64.
Wang M H, Meng Z X, Zhou J, et al. Structural design on a new flash with resistance wall [J]. Hot Working Technology, 2008, 37 (17): 62-64.
- [8] 王冬良, 陈南. 基于数值模拟的汽车转向节精密成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 38-43.
Wang D L, Chen N. Precision forming process for automobile steering knuckle based on numerical simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 38-43.
- [9] 刘雅辉, 刘淑梅, 何文涛, 等. 阻力墙设计对转向节模锻成形工艺的影响 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (3): 44-48.
Liu Y H, Liu S M, He W T, et al. Effect of resistance wall design on the drop forging for steering knuckle [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (3): 44-48.
- [10] 李蓬川, 周文武, 杨靖云. 某机匣锻件模锻时新的坯料定位方法及坯料优化设计 [J]. 大型铸锻件, 2018, (2): 5-7, 13.
Li P C, Zhou W W, Yang J Y. A new method of billet positioning and optimization design of billet forming process of aeroengine case [J]. Heavy Casting and Forging, 2018, (2): 5-7, 13.
- [11] 欧文学. 大型模锻件坯料的定位状态分析与摩擦参数测定 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Ou W X. Analysis of Positioning Status of Large-Scale Forging Billets and the Test of Friction Parameters [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [12] 贾向, 李凤武, 赵立国, 等. 热成型模具几种典型定位问题的改善 [J]. 模具制造, 2017, 17 (2): 25-27.
Jia X, Li F W, Zhao L G, et al. Series of typical location problems improvement for the hot forming die [J]. Die & Mold Manufacture, 2017, 17 (2): 25-27.

新资讯
新营销
新媒体



《QC检测》神页



《机加工》神页



QC检测仪器-公众号



天下机械-公众号

天下机械网 www.qctms.cn
QC检测仪器网 www.qctester.com

【神页: 扫码直接阅读、
收藏、下期自动更新。】