

汽车空心齿轮轴闭塞式锻造工艺仿真与优化

霍天枢¹, 潘鸣宇²

(1. 吉林开放大学 理工系, 吉林 长春 130022; 2. 长春工程学院 工程训练中心, 吉林 长春 130012)

摘要: 为了改善汽车空心齿轮轴的成形质量和尺寸精度、提高生产效率、控制成本, 提出采用闭塞式锻造工艺成形该齿轮轴。通过有限元分析方法, 对锻造成形过程进行了仿真计算, 通过材料流动分析选定了合适的锻模结构方案, 即 4 冲头结构方案, 并在此基础上对各冲头的运动方式进行了研究, 以各模具承受的载荷、表面温度和成形后零件的质量为研究对象, 对工艺方案进行了优化。结果显示: 当冲头的运动方式为方案 B 时, 能够有效地降低空心齿轮轴产生裂纹的概率, 提高成形质量, 同时所需的最小合模力最小, 模具表面温升最不明显, 有利于延长模具寿命。最后, 完成了空心齿轮轴锻件的试制, 所得锻件充型完整, 斜齿质量好, 其结构尺寸达到了设计要求。

关键词: 空心齿轮轴; 闭塞式锻造; 锻模结构; 最小合模力; 冲头

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.002

中图分类号: TG316.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 06-0010-07

Simulation and optimization on closed forging process for automobile hollow gear shaft

Huo Tianshu¹, Pan Mingyu²

(1. Polytechnic Institute, Jilin Open University, Changchun 130022, China;

2. Training Center, Changchun Institute of Technology Engineering, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to improve the forming quality and dimensional accuracy of automobile hollow gear shaft, improve the production efficiency and control the cost, the closed forging process was proposed to form the gear shaft, and the forging process was simulated and calculated by the finite element analysis method. Then, through the material flow analysis, the suitable forging die structure scheme was selected, namely, the four-punch structure scheme, and on this basis, the movement mode of each punch was studied. Furthermore, taking the load on each mold, the surface temperature and the quality of formed parts as the analysis objects, the process scheme was optimized. The results show that when the movement mode of punch is scheme B, it can effectively reduce the probability of cracks on the hollow gear shaft and improve the forming quality. At the same time, the required minimum mold clamping force is the smallest, and the temperature rise on the mold surface is the least obvious, which is beneficial to improve the life of mold. Finally, the trial production of hollow gear shaft forgings is completed, the obtained forgings are filled completely, the quality of helical teeth is good, and the structure and sizes meet the requirements of design.

Key words: hollow gear shaft; closed forging; forging mold structure; minimum mold clamping force; punch

汽车空心齿轮轴是变速箱中的重要零件, 通过齿轮啮合的方式传递动力和运动, 车辆运转时的工作条件恶劣, 需要连续承受交变载荷的作用, 因此, 非常考验零件的成形质量和力学性能^[1]。空心齿轮轴的尺寸结构图如图 1 所示, 包含斜齿、贯穿孔、台阶轴等特征, 具有一定的复杂性, 零件截面的最小尺寸为 53 mm, 不及最大尺寸的一半, 截面尺寸差异大, 同时孔的深径比较大, 这些均加大了成形

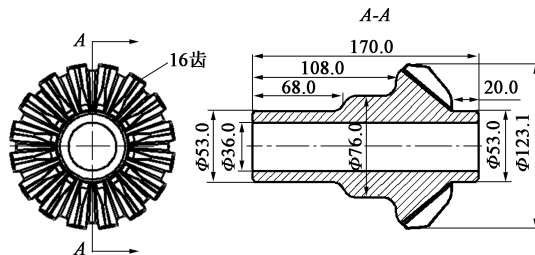


图 1 空心齿轮轴的尺寸结构图

Fig. 1 Dimensional structure diagram of hollow gear shaft

的难度。目前, 该产品在市场上常见的成形工艺有铸造、切削加工、开式锻造、多工位模锻等。其中, 铸造成形易产生缩孔、凹陷等问题^[2-3], 导致零件质量及性能较差, 已无法满足当下需求, 因此已经

收稿日期: 2022-08-06; 修订日期: 2022-11-12

基金项目: 企事业单位委托科技项目 (ZC20222003)

作者简介: 霍天枢 (1989-), 女, 硕士, 讲师

E-mail: huotianshu000@163.com

淘汰,而另外几种工艺仍有采用,但均存在一定缺陷,例如:切削加工工艺的材料成本较高,利用率低,仅为25.14%,并且加工后的零件组织连续性差,会影响斜齿强度、降低空心齿轮轴的使用寿命;开式锻造工艺,仍需配合切削加工,无法一次成形,大大影响了生产效率;多工位模锻工艺^[4-5]是当下空心齿轮轴生产使用最多的工艺,适合大批量生产,零件的质量和性能较佳,斜齿强度也能得到保证,但需经反挤成孔、正挤缩径、镦粗成齿、冲孔等多道工序,模具成本相对较高,并且成形方案不唯一,风险点较多,需根据实际生产不断优化,因此,均无法在市场上形成绝对的竞争优势。企业要想脱颖而出,提高市场销量,必须开发一种集材料利用率、生产效率、产品质量性能、模具成本、自动化程度等优势于一身的生产工艺,因此,最终决定尝试将闭塞式锻造工艺应用于该轴件的生产。

闭塞式锻造工艺是对可分凹模施加一定的合模力,以保证模具闭合形成封闭型腔,再通过若干冲头从不同方向挤压坯料,使零件在一次变形中获得复杂型面的一种加工工艺^[6-7]。在变形时,坯料处于三向压应力状态,有利于大变形的进行^[8-9],能够有效促进晶粒细化,同时,通过材料转移实现成形,有利于消除内部缺陷,保证连贯的金相组织,因此,最终成形件的质量和性能更好。但是,闭塞式锻造工艺中冲头数量和运动方式的不同,对零件成形质量和模具寿命的影响甚大,因此需进行优化,采用有限元分析方法,对锻模结构及冲头运动方式进行研究,以达到提供工艺参数设计依据、减小实际试验成本、加快实现生产应用的目的。

1 工艺分析与设计

空心齿轮轴的材料为42CrMo合金钢,其强度高、韧性好,常温下的锻造变形抗力大,对锻压设备的吨位要求较高,也易造成零件开裂、冲头折断等问题,因此,通常在材料加热后再进行锻造。设计的空心齿轮轴的锻件图如图2所示,将投影面积最大的平面作为分模面^[10],采用竖直锻造,以便于锻件出模和锻模制造。锻件连皮设计在中部,若在两侧,会导致冲头的长度过长、加大断裂风险。设计的两种闭塞式锻模结构方案如图3所示,一种采用3冲头结构,模具结构相对简单,另一种采用4冲头结构,成形时间短。两种方案中坯料均定位简单,坯料规格相同,需严格控制坯料下料尺寸,

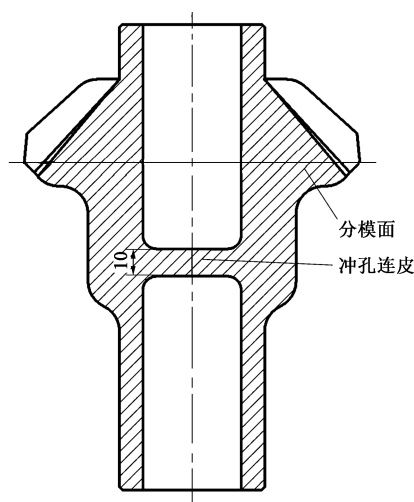


图2 空心齿轮轴锻件图

Fig. 2 Diagram of hollow gear shaft forging

料少会造成锻件充填不满,料多则会损坏模具,依据体积不变定律^[11],可知坯料尺寸为 $\Phi 53.0 \text{ mm} \times 250.5 \text{ mm}$ 。实际成形流程为:锯床下料→坯料称重筛选→坯料加热、模具预热→闭塞锻造→冲连皮→余热退火。

2 建立刚塑性有限元模型

通过Solidworks软件建立了图3所示的闭塞锻模结构的简化模型,其中,上、下凹模装配成闭模状态,坯料置于型腔中,确定好各冲头的位置关系后,取1/2模型作为模拟对象导入Deform中进行模拟计算,以提高模拟精度和计算速度。锻件材料为42CrMo合金钢,可根据文献[12]获得其在高温条件下的压缩流变模型,具体模型如式(1)所示,将其导入软件中完成模型建立。

$$\dot{\epsilon} = 1.34 \times 10^{18} [\sinh(8.198 \times 10^{-3} \sigma)^{8.1434}] \cdot \exp[-4.6334 \times 10^{-5} / (RT)] \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为流变应力, MPa; R 为气体常数,取 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为绝对温度, K。

采用刚塑性有限元法,选择热力耦合分析模式,模具为刚体,加热温度为 380°C ,上、下凹模划分网格数为42000个,冲头划分网格数为12000个,坯料为变形体,加热温度为 1050°C ,划分网格数为50000个。设定传热面和对称面,传热系数恒定为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。设定摩擦条件,润滑状态下摩擦因数为0.3^[13]。两种锻模结构中各冲头的运动方式按照图4在软件中进行设置:3冲头方案中,上冲头1和上冲头2沿图3a中箭头所示方向运动,

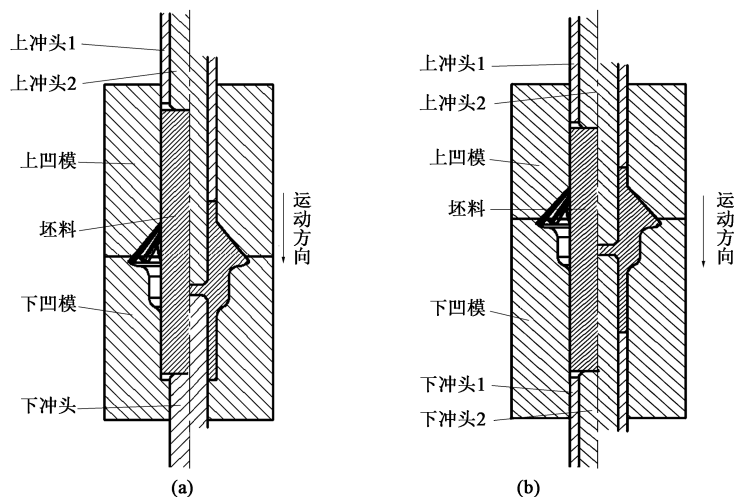


图 3 空心齿轮轴闭塞式锻模结构设计方案

(a) 3 冲头结构 (b) 4 冲头结构

Fig. 3 Structural design schemes of closed forging die for hollow gear shaft

(a) Three-punch structure (b) Four-punch structure

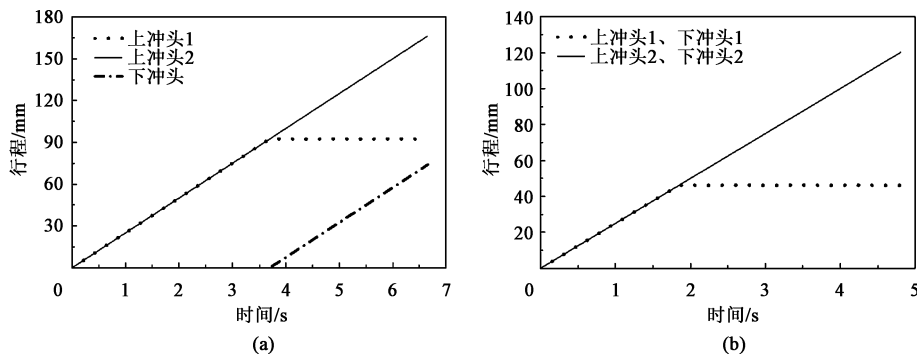


图 4 各冲头的运动方式

(a) 3 冲头结构 (b) 4 冲头结构

Fig. 4 Movement mode of each punch

(a) Three-punch structure (b) Four-punch structure

下冲头沿箭头反方向运动；4 冲头方案中，上冲头 1 和上冲头 2 沿图 3b 中箭头所示方向运动，下冲头 1 和下冲头 2 沿箭头反方向运动。

3 模拟结果分析

3 冲头结构中空心齿轮轴的成形过程如图 5a 所示，虽然棒料的高径比较大，但在上、下凹模型腔约束下不会出现失稳弯曲现象。受上冲头 1 和上冲头 2 挤压后，金属迅速向下流动，但受到下凹模及下冲头的制约，导致金属主要流向阻力更小的水平方向，开始锻粗填充斜齿型腔。但是，仍有少量金属会流入下凹模与下冲头之间的缝隙中形成飞边，因此，可能会出现金属过多流失造成后期锻件充不满的问题。上冲头 1 到达最终位

置后，形成与空心齿轮轴外轮廓相同的密闭型腔，上冲头 2 继续向下挤压，下冲头开始向上挤压，两端内孔开始成形，两端金属主要向中间聚集，进一步填充斜齿型腔，完成锻件成形。最终锻件的充型结果如图 6a 所示，齿轮轴斜齿上端节点缺失，表明该部位未与模具型腔完全接触，存在齿形成形不足的问题，理论上可通过增大坯料体积或者控制下凹模和下冲头间的配合间隙来解决^[14]，但是会影响模具寿命和锻件脱模。

4 冲头结构中空心齿轮轴的成形过程如图 5b 所示，增加 1 个冲头后，上冲头 1、上冲头 2 和下冲头 1、下冲头 2 等速相向挤压，两端金属同时向中间流动填充斜齿型腔，避免了金属的流失。上冲头 1 和下冲头 1 同时达到最终位置后，上冲头 2 和下冲头 2 继续保持等速相向挤压以成形两端内

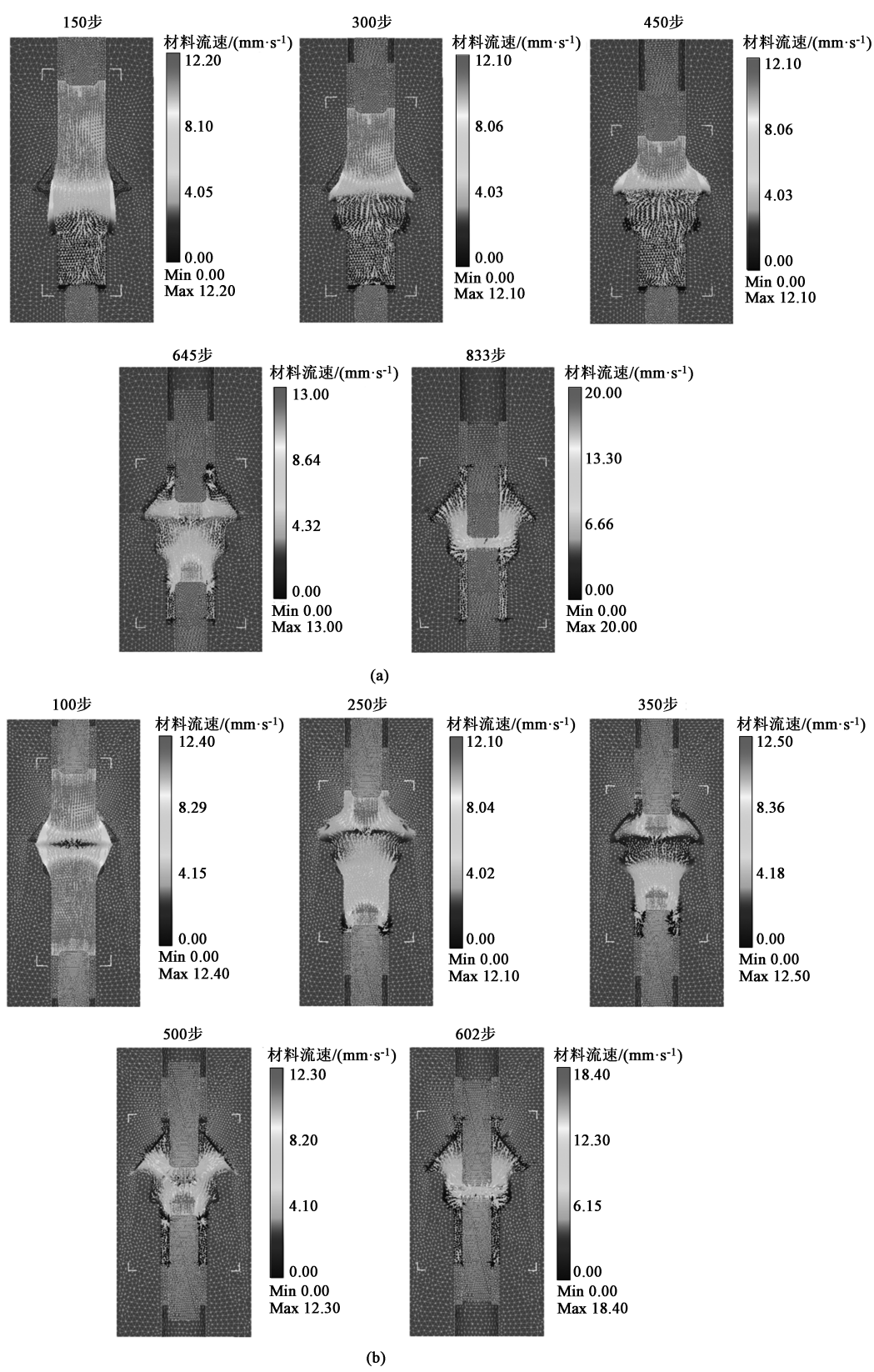


图 5 空心齿轮轴的模拟成形过程
(a) 3 冲头结构 (b) 4 冲头结构
Fig. 5 Simulated forming process of hollow gear shaft
(a) Three-punch structure (b) Four-punch structure

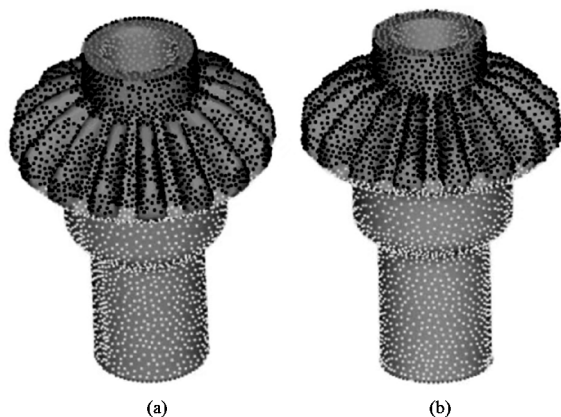


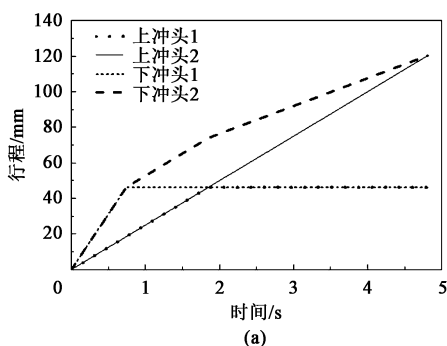
图 6 空心齿轮轴充型结果

(a) 表面节点缺失 (b) 表面节点完整

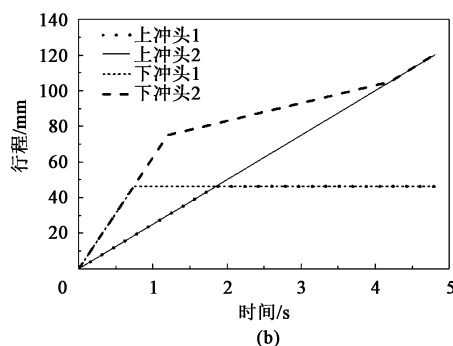
Fig. 6 Filling results of hollow gear shaft

(a) Surface node missing (b) Surface node integrity

孔, 此时金属仍然是以向中间流动填充斜齿型腔为主, 少量金属存在沿冲头反向流动的趋势, 但是分别会受到上冲头 2 和下冲头 2 表面摩擦力的限流作用, 因此, 不会流入冲头与凹模的缝隙中。最终锻件充型结果如图 6b 所示, 锻件表面节点分布均匀完整, 表明成形锻件与模具型腔完全接触, 空心齿轮轴成形饱满。结合模拟结果可知, 4 冲头结构方案是更适合成形空心齿轮轴的方案, 风险更小。



(a)



(b)

图 7 各冲头运动方式的改进方案

(a) 方案 B (b) 方案 C

Fig. 7 Improvement schemes for movement mode of each punch

(a) Scheme B (b) Scheme C

但其能够改善金属的流动情况, 方案 B 及方案 C 通过前期对材料的预分配降低了金属变形的难度, 因此产生的变形热较少, 锻件的最高温度分别为 818 和 852 $^{\circ}\text{C}$, 均要小于方案 A 的 923 $^{\circ}\text{C}$ 。结论显而易见, 当冲头的运动方式为方案 B 时, 锻后零件各部位的最大温差更小, 能够有效减小冷却时的不均匀程度, 控制温度应力大小, 最大程度上防止冷却裂纹的产生, 从而提高空心齿轮轴的质量。

4 4 冲头结构方案的优化

根据图 2 所示锻件图可知, 以连皮为中心线, 锻件上、下两部分的体积比为 2.5 左右。因此, 为降低后期成形阻力、方便锻件斜齿成形, 在成形前期趁模具型腔自由空间较大时应预先使金属更多地向上聚集。最终在方案 A (图 4b) 的基础上提出了图 7 所示的方案 B 和方案 C。

4.1 冲头运动方式对锻件质量的影响

锻件冷却时会产生冷却温度应力, 这是锻件各部位温差大、冷却不均引起的, 当该应力大于材料的抗拉强度时, 锻件会出现裂纹, 导致锻件快速失效。因此, 对空心齿轮轴锻后温度分布的分析至关重要, 并且, 可以有效地降低锻件产生裂纹的风险, 指导实际生产。不同冲头运动方式下的锻件温度分布结果如图 8 所示, 各方案下的温度分布规律相同, 锻件温度由两端至中间不断升高, 这是因为锻件两端与模具接触时间长, 变形小, 热损失较多, 而中间金属受两端挤压变形大, 产生了较多的变形热, 并且与模具接触时间短, 热损失较少。从图 8 中可以看出, 由于锻件两端初始即与冲头接触直至成形结束, 因此, 各方案中锻件的最低温度差距不大, 分别为 523、520 和 521 $^{\circ}\text{C}$,

4.2 冲头运动方式对模具的影响

在实际的闭塞式锻造中, 对于合模力的确定非常关键: 合模力选择太大, 对锻造设备的吨位要求就越大, 不仅会造成资源浪费, 对上、下凹模的寿命也有影响; 而合模力选择太小, 又无法锁住材料, 会导致金属流入上、下凹模的间隙中形成飞边, 无法满足齿轮轴的成形。因此, 通过成形模拟对上、下凹模的载荷进行分析并考虑安全裕度, 能有效指

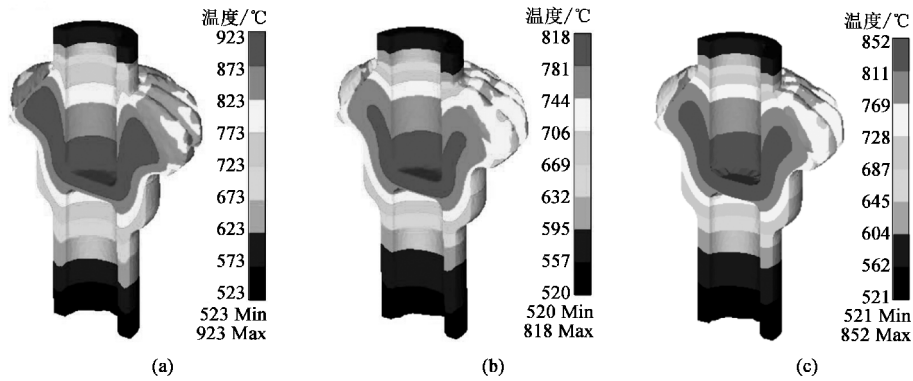


图 8 不同方案的锻件温度分布结果
(a) 方案 A (b) 方案 B (c) 方案 C
Fig. 8 Temperature distribution results of forgings for different schemes
(a) Scheme A (b) Scheme B (c) Scheme C

导实际生产中最小合模力的确定，实现精益生产。同时，通过对模具载荷和模具温度进行分析，能够有效判断模具寿命的长短，从而确定最有效的冲头运动方式。从表 1 中可知，方案 B 所需的最小合模力最小，对设备吨位要求最小，另外各冲头受载也全部小于另外两种方案，有利于冲头寿命的提升。从表 2 中可知，当冲头的运动方式为方案 B 时，模具表面温升最不明显，对模具硬度的影响更小，有利于降低模具表面磨损、延长使用寿命。

表 1 不同方案中模具所受载荷 ($\times 10^5$ N)

Table1 Loads on mold under different schemes ($\times 10^5$ N)					
方案	上冲头 1	上冲头 2	下冲头 1	下冲头 2	最小合模力
A	2. 21	5. 01	2. 26	4. 69	13. 32
B	1. 43	4. 11	1. 67	3. 72	8. 61
C	1. 79	4. 78	1. 82	4. 42	10. 69

表 2 不同方案中模具表面温度 (°C)

Table 2 Mold surface temperature under different schemes (°C)						
方案	上冲头 1	上冲头 2	下冲头 1	下冲头 2	上凹模	下凹模
A	497	793	497	738	626	640
B	460	727	425	666	611	620
C	467	765	434	701	615	625

5 空心齿轮轴锻件试制及结果

为检验最终工艺的正确性，通过热模锻设备对空心齿轮轴锻件进行试制，闭塞式锻模结构采用 4 冲头结构，最小合模力、冲头运动方式等均按照分析结论进行设置。锻造材料为 42CrMo 合金钢，规格为 $\Phi 53.0\text{ mm}\times 250.5\text{ mm}$ ，加热时间为 10 min，加热温度为 1050 °C，模具预热温度为 380 °C，成形时通过水基石墨乳连续润滑。试制获得的空心齿轮轴

锻件如图 9 所示，分模面位置未产生飞边，上、下端基本无毛刺，各部位充型完整，斜齿质量较好。将空心齿轮轴锻件沿着对称面切开，并对剖切面进行腐蚀，结果如图 10b 所示，可以看出，锻件内孔质量较好，孔壁未见裂纹、折叠等问题，同时锻件的锻造流线沿着锻件外形轮廓连续分布，无断裂、乱流等问题，有利于提高锻件的强度，与图 10a 所示有限元模拟结果非常接近。同时，通过测量可知，空心齿轮轴的关键尺寸为：上、下端内孔孔径均为 $\Phi 36.03\text{ mm}$ ，上、下端轴外径均为 $\Phi 52.99\text{ mm}$ ，齿轮轴高度为 170.04 mm，斜齿部最大外轮廓尺寸为 123.08 mm，连皮尺寸为 10.01 mm，均符合图纸要求 ($\Phi 36_0^{+0.039}\text{ mm}$ 、 $\Phi 53_{-0.019}^0\text{ mm}$ 、 $(170\pm 0.2)\text{ mm}$ 、 $(123\pm 0.5)\text{ mm}$ 、 $(10\pm 0.5)\text{ mm}$)，测量其余各锻件也均符合要求，证明该工艺能够满足企业的生产需求，能大大提高生产效益。

6 结论

(1) 采用有限元分析方法，对空心齿轮轴的闭塞式锻造工艺进行了研究，该工艺与铸造工艺、多工位模锻工艺等传统工艺相比，综合了质量稳定、性能好、精度高、效率高、材料利用率高等优点，并通过模拟成形试验和实际锻造试验证明该工艺的可行性。

(2) 通过模拟试验确定了合适的闭塞式锻模结构，有效指导了模具设计，减少了试模费用，采用 3 冲头结构时，空心齿轮轴存在斜齿成形不足、下端毛刺多的风险，而采用 4 冲头结构时，空心齿轮轴充型饱满。

(3) 通过模拟试验确定了各冲头的运动方式，



图 9 试制得到的空心齿轮轴锻件

Fig. 9 Hollow gear shaft forgings obtained by trial production

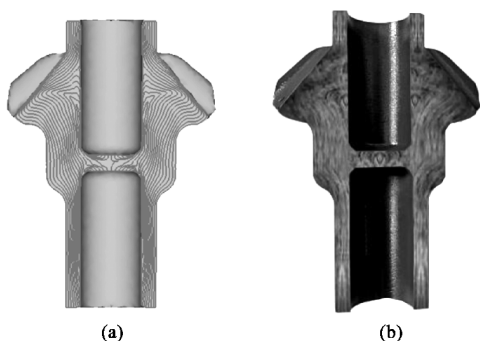


图 10 空心齿轮轴锻件的剖面图

(a) 锻造流线模拟结果 (b) 实际锻造流线

Fig. 10 Sectional drawings of hollow gear shaft forgings

(a) Simulation result of forging streamline (b) Actual forging streamline

合理预测了最小合模力，完成了工艺的优化，有效提高了模具寿命，实现了资源利用的最大化，并保证了空心齿轮轴的质量。

参考文献：

- [1] 王国强, 孙红艳, 翟旭军. 基于 ANSYS 的锥齿轮轴闭式模锻工艺的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (23): 97-99, 106.
Wang G Q, Sun H Y, Zhai X J. Numerical simulation of closed die forging process for bevel gear shaft based on ANSYS [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (23): 97-99, 106.
- [2] 夏伟, 杜航, 徐慧, 等. 基于铸造仿真技术的铝合金缸盖缩孔缺陷控制 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (11): 1202-1204.
Xia W, Du H, Xu H, et al. Shrinkage porosity control in aluminum alloy cylinder head based on casting simulation technology [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39 (11): 1202-1204.
- [3] Jiehua L I, Oberdorfer B, Habe D, et al. Determining casting defects in near-net shape casting aluminum parts by computed tomography [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13 (1): 1-5.
- [4] 胡锦玲, 胡强. 基于有限元的转轴多级锻造成形仿真及试验研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (7): 164-167.
Hu J L, Hu Q. Simulation and experimental research on multi-stage forging forming of rotary shaft based on finite element [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (7): 164-167.

- [5] Jiang H W, Song Y, Wu Y R, et al. Microstructure evolution and mechanical anisotropy of M50 steel ball bearing rings during multi-stage hot forging [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34 (11): 254-266.
- [6] 周淑娟. 汽车齿轮轴闭式模锻成形工艺研究与试验 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 25-32.
Zhou S J. Research and experiment on closed die forging process for automobile gear shaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 25-32.
- [7] Yin J, Hu R F, Shu X D. Closed-die forging process of copper alloy valve body: Finite element simulation and experiments [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 10 (1): 1339-1347.
- [8] Kanhu C N, Susanta K S. Experimental and finite element analysis of closed-die combined extrusion-forging process: Development of socket adpater [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18 (P7): 3482-3491.
- [9] Pandya V A, George P M. Preform optimization for the anchor shackle during closed die forging process on one ton hammer [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47 (P11): 3256-3262.
- [10] 夏巨湛. 精密塑性成形工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
Xia J C. Precision Plastic Forming Process [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [11] 陈凌翔, 李月超. 汽车六角球头冷锻工艺优化与数值仿真 [J]. 材料科学与工艺, 2020, 28 (5): 75-82.
Chen L X, Li Y C. Optimization and numerical simulation of cold forging process for automobile hexagonal ball head [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 75-82.
- [12] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢的热压缩流变应力行为 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 181 (3): 549-553.
Lin Y C, Chen M S, Zhong J. Flow stress behaviors of 42CrMo steel during hot compression [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 181 (3): 549-553.
- [13] 闫中原, 张晓波, 徐洪磊, 等. 齿套闭式锻造成形研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 33-38.
Yan Z Y, Zhang X B, Xu H L, et al. Closed die forging forming of the truncated tooth sleeve [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 33-38.
- [14] 杨程, 丁伯良, 庄晓伟, 等. 不对称喷嘴器体闭塞锻造成形 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 21-25.
Yang C, Ding B G, Zhuang X W, et al. Closed die forging of asymmetry fuel injector body [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 21-25.