

# 汽车盘体零件闭式锻造工艺研究与模具设计

万 轶<sup>1</sup>, 陈 林<sup>2</sup>

(1. 南京晓庄学院 环境科学学院, 江苏 南京 211171; 2. 江苏神通阀门股份有限公司, 江苏 南通 226232)

**摘要:** 以汽车盘体零件为研究对象, 针对开式锻造和机加工生产方式耗时废材、产品质量稳定性差的问题, 提出采用闭式锻造成形技术。首先, 根据零件的结构特征, 确定了成形方案, 并设计了 3 种预锻件结构; 其次, 利用 Deform-3D 软件建立了材料的高温流变应力模型及有限元分析模型, 并对 3 种不同方案下盘体零件的成形过程进行了数值模拟, 分析了零件的成形结果, 比较了预锻工序和终锻工序的最大成形力及模具磨损情况; 最后, 根据最佳方案设计了闭式锻造模具结构, 并进行了实际锻造试验。结果表明: 该工艺可靠, 模具结构稳定且无异响, 脱模流畅, 获得的汽车盘体零件成形良好, 无充不满、刮痕等缺陷, 尺寸质量满足要求, 为企业降低了生产成本。

**关键词:** 汽车盘体; 闭式锻造; 最大成形力; 模具磨损; 模具结构

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.003

**中图分类号:** TG316.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0014-07

## Closed forging process study and die design for automobile disc part

Wan Yi<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China;

2. Jiangsu Shentong Valve Co., Ltd., Nantong 226232, China)

**Abstract:** For the problems of time-consuming, waste material and poor product quality stability in open forging and machining production methods, the closed forging forming technology was proposed for automobile disc parts. Firstly, according to the structural characteristics of part, the forming scheme was determined, and three kinds of pre-forgings structures were designed. Secondly, the high temperature rheological stress model and finite element analysis model of material were established by software Deform-3D, and the forming processes of disc body parts under three different schemes were numerically simulated. Then, the forming results of parts were analyzed, and the maximum forming forces and die wears between the pre-forging process and the final forging process were compared. Finally, the closed forging die structure was designed according to the best scheme, and the actual forging test was carried out. The results show that the process is reliable, the die structure is stable, there is no abnormal noise, and the demolding is smooth. The obtained automobile disc body parts are well formed, and there are no defects such as insufficient filling and scratches. The size and quality meet the requirements, which reduces the production cost for the enterprises.

**Key words:** automobile disc; closed forging; maximum forming force; die wear; die structure

近年来, 汽车行业的飞速发展使得汽车制造业面临巨大的挑战, 除了要满足庞大的市场需求外, 生产环境的环保性, 加工设备的选择, 产品质量、精度、性能的保证, 交付时间以及生产成本的控制等均是企业需要考虑的问题。因此, 实现各类零件生产技术的升级, 向“高效、精密、环保、近净成形”方向发展, 是当下企业最主要的目标。本文研

究的汽车盘体零件是汽车制动系统中的重要零件, 其主要生产方式为开式锻造和车削加工。开式锻造的模具成本较低, 但生产外形复杂的锻件时需要后续精加工, 效率低且材料使用率较低; 车削加工后的零件精度较高, 但材料使用率极低, 仅为 34.7%, 且力学性能与锻件相比较差。这两种方法均无法满足企业的需求, 因此, 迫切需要对生产工艺进行改进, 经整体考量后, 本文提出了采用闭式锻造成形技术<sup>[1-2]</sup>。

Deform-3D 有限元分析是一种将工艺过程可视化的虚拟成形技术<sup>[3-4]</sup>, 在锻造方面应用广泛, 能够为工艺开发、模具结构检验和成形设备选择等提

收稿日期: 2022-04-25; 修订日期: 2022-07-20

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2019M651642); 江苏省高等学校自然科学基金项目 (19KJB460006)

作者简介: 万 轶 (1982-), 女, 博士, 副教授

E-mail: yiw@njzxc.edu.cn

供良好的指导作用，且能预判潜在问题<sup>[5-6]</sup>，达到规避风险、控制成本的目的。因此，本文利用 Deform-3D 软件对汽车盘体零件的闭式锻造过程进行研究，通过锻件成形结果来鉴定工艺的可靠性，并以降低模具载荷和模具磨损为目标，对工艺进行择优。

### 1 汽车盘体零件工艺分析与建模

#### 1.1 工艺分析及设计

图 1 为汽车盘体零件的锻件图，为回转类零件，后续建模仿真时可采用 1/2 模型以提高计算速度。锻件的整体结构比较复杂，有凸台、法兰、锥形盲孔、不规则盲孔和凹槽等诸多特征，如果在坯料加热、镦粗后直接终锻成形，则金属流动困难，会使锻件成形后的应力较大，存在开裂风险，同时所需成形力较大，会增加模具的负载，引起模具开裂或加快磨损。因此，综合考虑后，宜增加预锻工序，

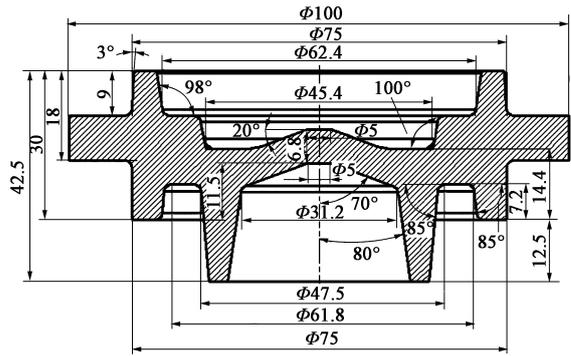


图 1 汽车盘体零件的锻件图

Fig. 1 Forgings drawing of automobile disc part

通过预成形来改善金属流动条件、降低模具负载，最终确定的工艺流程为：下料、加热（1100 °C）、镦粗、预锻、终锻。设计了 3 种预锻件结构，如图 2 所示，其中下料尺寸根据锻造前后等体积原理以及镦粗失稳极限确定<sup>[7]</sup>，下料尺寸为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 92.5 \text{ mm}$ 。

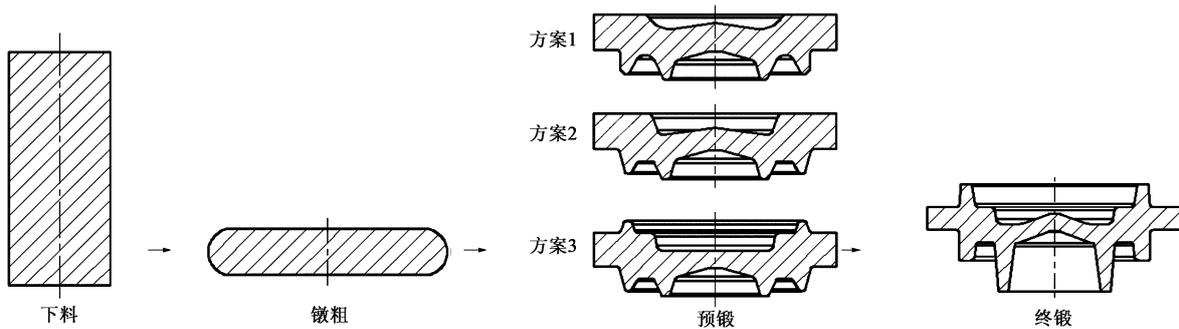


图 2 汽车盘体零件成形工艺流程

Fig. 2 Forming process flow of tutomobile disc part

#### 1.2 有限元建模

通过 UG 分别完成坯料及各道工序模具的建模 (1/2 模型)，并以 STL 格式导出后导入到 Deform-3D 软件中。锻件材料为 42CrMo 钢，通过热模拟机进行高温压缩试验，获得不同应变率、不同温度下的

真应力-真应变曲线拟合结果，如图 3 所示，并将其导入到 Deform-3D 软件中新建材料模型。模拟条件设置中，选择热力耦合模式，坯料设置为塑性体，划分网格数 80000 个，初始温度为 1100 °C；模具材料为 SKD61 钢，设置为刚体，划分网格数 50000

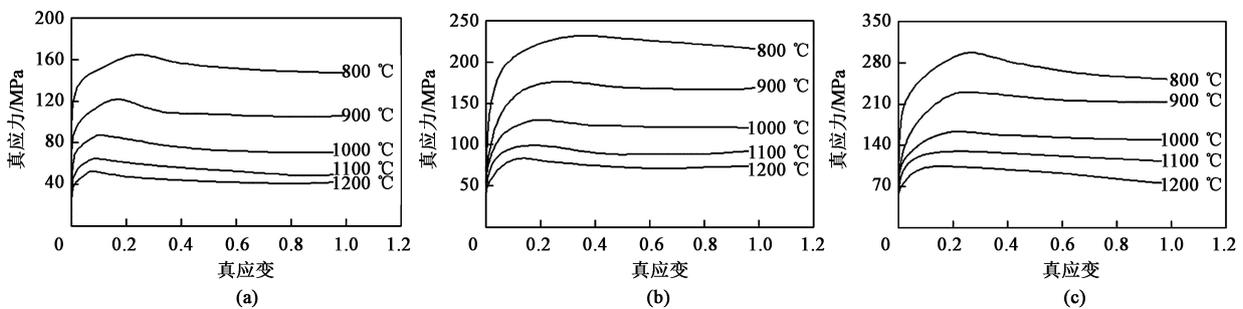


图 3 不同变形条件下的真应力-真应变曲线

(a) 应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b) 应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  (c) 应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3 True stress-true strain curves under different deformation conditions

(a) Strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (b) Strain rate of  $1 \text{ s}^{-1}$  (c) Strain rate of  $10 \text{ s}^{-1}$

个, 经油淬和两次回火处理, 模具初始硬度为 49 HRC, 模具预热温度为 300 ℃。

模拟过程如下: (1) 加热后坯料移动到镦粗模, 与空气传热, 时间为 6 s; (2) 坯料与镦粗上模接触前, 与镦粗下模和空气传热, 时间为 2 s; (3) 镦粗成形, 与上、下模和空气传热; (4) 坯料与预锻上模接触前, 与预锻下模和空气传热, 时间为 2 s; (5) 预锻成形, 与上、下模和空气传热; (6) 坯料与终锻上模接触前, 与终锻下模和空气传热, 时间为 2 s; (7) 终锻成形, 与上、下模和空气传热。设定与模具的传热系数为  $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{℃})^{-1}$ , 与空气的传热系数为  $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{℃})^{-1}$ , 热锻摩擦因数取  $0.3^{[8]}$ 。

### 1.3 Archard 修正磨损模型建立

Archard 磨损模型是由 Archard J F 提出的<sup>[9]</sup>, 能有效用于分析模具的磨损问题, 但其常规模型存在一定缺陷, 忽略了温度的影响。而本文研究的闭式锻造, 由于锻造时温度较高, 会引起模具材料性能的改变, 因此, 采用修正后的 Archard 模型来反映模具的磨损情况更为准确<sup>[10-11]</sup>, 修正后的模型如式 (1) 所示, 经 FORTRAN 编译后导入 Deform-3D 软件中。

$$W = \int K(T) \frac{P \cdot v}{H(T)} dt \quad (1)$$

式中:  $W$  为磨损深度;  $K(T)$  为磨损系数, 是关于温度  $T$  的变量,  $K(T) = (29.29 \ln T - 168.73) \times 10^{-6}$ ;  $H(T)$  为模具硬度, 是关于温度  $T$  的变量,  $H(T) = 9216.4 T^{-0.505}$ ;  $P$  为表面接触压力;  $v$  为成形时的金属流速;  $t$  为时间。

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 成形结果对比

各方案的预锻、终锻模拟成形结果如图 4 所示, 可明显看出, 各方案中预锻和终锻工序的上模、下模、下凸模表面均与锻件充分接触, 各部分成形饱满, 无空穴、凹坑等问题, 说明最终成形锻件的几何形状、尺寸精度能够满足工艺需求。同时, 图 4 中的锻件截面显示网格变形无紊乱、交叉、断裂、严重畸变等现象, 说明锻件成形过程中材料在型腔内流动合理有序, 无回流、对流产生, 锻件内部不会产生折叠等缺陷, 成形后锻件流线连续性好, 性能较佳。以上分析表明 3 种方案均能实现成形的目的, 获得外观质量、性能较好的汽车盘体锻件。

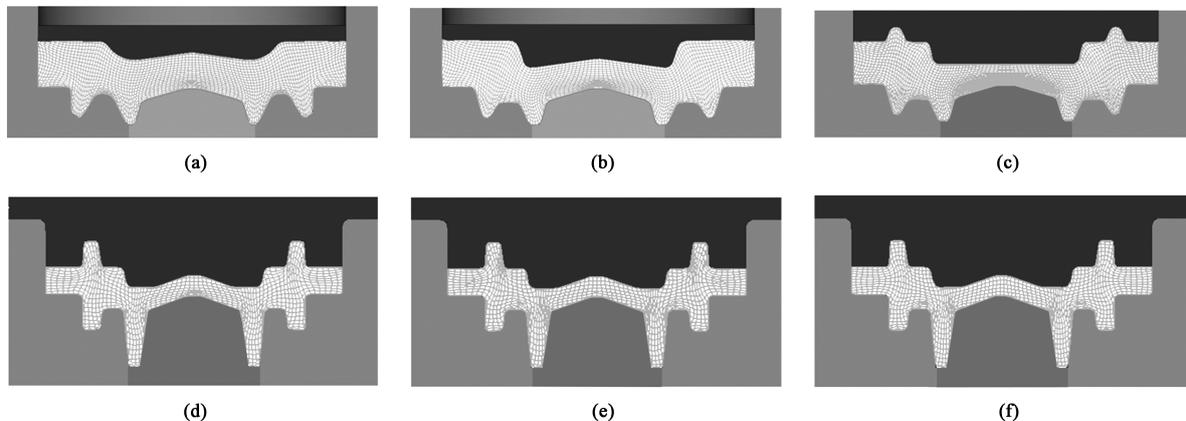


图 4 各方案模拟成形结果

(a) 方案 1 预锻工序 (b) 方案 2 预锻工序 (c) 方案 3 预锻工序 (d) 方案 1 终锻工序 (e) 方案 2 终锻工序 (f) 方案 3 终锻工序

Fig. 4 Simulated forming results of each scheme

(a) Pre-forging process of scheme 1 (b) Pre-forging process of scheme 2 (c) Pre-forging process of scheme 3

(d) Final forging process of scheme 1 (e) Final forging process of scheme 2 (f) Final forging process of scheme 3

### 2.2 最大成形力对比

图 5 为 3 种方案中预锻和终锻过程中的锻造成形力变化曲线图。成形过程中, 锻件与模具间产生的摩擦阻力会随着接触面积的增大而不断增大, 同时材料的变形抗力也在增加, 从而造成材料流动受阻, 成形难度加大。因此, 成形力的整体变化趋势

是稳步上升的, 而且由于是封闭式成形, 材料流动空间受限, 因此, 在最后阶段成形力在短时间内会迅速上升至峰值以克服阻力的作用, 完成最终成形。由图 5 可知, 方案 1 中预锻和终锻工序需要的最大成形力分别为 1816.3 和 1674.6 kN, 方案 2 中预锻和终锻工序需要的最大成形力分别为 1528.7 和

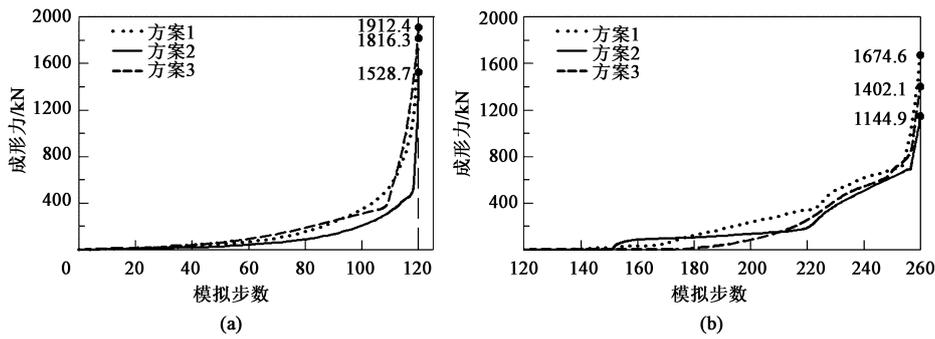


图 5 锻造成形力变化曲线

(a) 预锻工序 (b) 终锻工序

Fig. 5 Variation curves of forging forming force

(a) Pre-forging process (b) Final forging process

1144.9 kN，而方案 3 中预锻和终锻工序需要的最大成形力分别为 1912.4 和 1402.1 kN。很明显，方案 2 中两道工序需要的成形力更小，长期工作中模具出现开裂的风险更低，同时对设备的要求也更低，能起到降成本的作用。因此，在均能实现锻件成形的前提下，选择方案 2 更佳。

### 2.3 模具磨损对比

图 6 为 3 种方案的预锻和终锻过程中的模具磨损分布图，从磨损数据可以看出，各方案终锻工序的模具磨损情况均比预锻工序的模具磨损情况严重。预锻工序中，3 种方案的上、下模的结构是不同的，因此，磨损严重的部位也各不相同，但模具寿命的计算方式是一致的，均可通过最大磨损深度来预测<sup>[12]</sup>。由图 6 可得：方案 1 中预锻上、下模的最大磨损深度分别为  $4.71 \times 10^{-6}$  和  $6.20 \times 10^{-6}$  mm；方案 2 中预锻上、下模的最大磨损深度分别为  $4.40 \times 10^{-6}$  和  $5.12 \times 10^{-6}$  mm；方案 3 中预锻上、下模的最大磨损深度分别为  $5.70 \times 10^{-6}$  和  $7.46 \times 10^{-6}$  mm。显然，同等条件下，方案 2 的模具磨损量更小，使用寿命更长。在终锻工序中，3 种方案的上、下模结构和尺寸相同，图 6 中显示磨损严重的部位也基本一致，而磨损程度不同。方案 1 中终锻上、下模的最大磨损深度分别为  $1.44 \times 10^{-5}$  和  $1.67 \times 10^{-5}$  mm；方案 2 中终锻上、下模的最大磨损深度分别为  $1.34 \times 10^{-5}$  和  $1.37 \times 10^{-5}$  mm；方案 3 中终锻上、下模的最大磨损深度分别为  $1.42 \times 10^{-5}$  和  $1.53 \times 10^{-5}$  mm。可以看出，仍然是方案 2 的模具磨损深度最小，因此，选择方案 2 更利于提高模具寿命、降低成本。通过锻件的工艺要求可知，预锻件和终锻件的公差要求为 0.1 mm，表示当锻模的最大累计磨损深度达到 0.1 mm 时，获得超差锻件的概率会明显提升，此时

必须更换模具以保证锻件质量。因此，假设每次锻造时锻模的最大磨损深度相同，同时以两道工序中上、下模的磨损深度较大的模具作为预测对象，可简单计算得到预锻模具的寿命为 19531 件，终锻模具的寿命为 7299 件。

### 3 锻模结构与试验

根据以上分析结果，按照方案 2 进行模具结构设计。设计结果如图 7 所示，包括上模组件、下模组件以及顶料组件，考虑到闭式锻造中模具的受力及磨损较大，换模较多，因此，采用快换结构，制造安装后进行小批量试生产。生产流程为：通过高速锯床锯切下料，下料尺寸为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 92.5 \text{ mm}$ ，随后送至 500 kW 中频感应炉加热至  $(1100 \pm 20)^\circ\text{C}$ ，冷却润滑液采用石墨乳，镦粗至  $\Phi 94 \text{ mm}$ ；再由机械手夹至预锻下模中，通过镦粗件外径定位，压力机滑块下行使预锻上模挤压镦粗件；待预锻件成形后，压力机滑块上行，预锻下凸模在顶杆带动下顶出预锻件，完成脱模；再由机械手夹至终锻下模；通过预成形凹槽定位，其成形过程与预锻相同，压力机滑块下行使终锻上模挤压预锻件；待终锻件成形后，压力机滑块上行，终锻下凸模在顶杆带动下顶出终锻件，完成脱模，循环进行。经一段时间生产，未发现异常现象，生产线运行平稳，各工序衔接顺畅，模具结构稳定，脱模流畅，经统计，盘体锻件的生产效率为每小时 250 件左右。

试验获得的各工序锻件如图 8 所示，锻件成形状况良好，凸台、法兰、盲孔和凹槽等特征均成形较好，无明显缺肉、刮痕等缺陷，与模拟结果吻合。最终盘体锻件剖面图如图 9 所示，可看出锻件内部

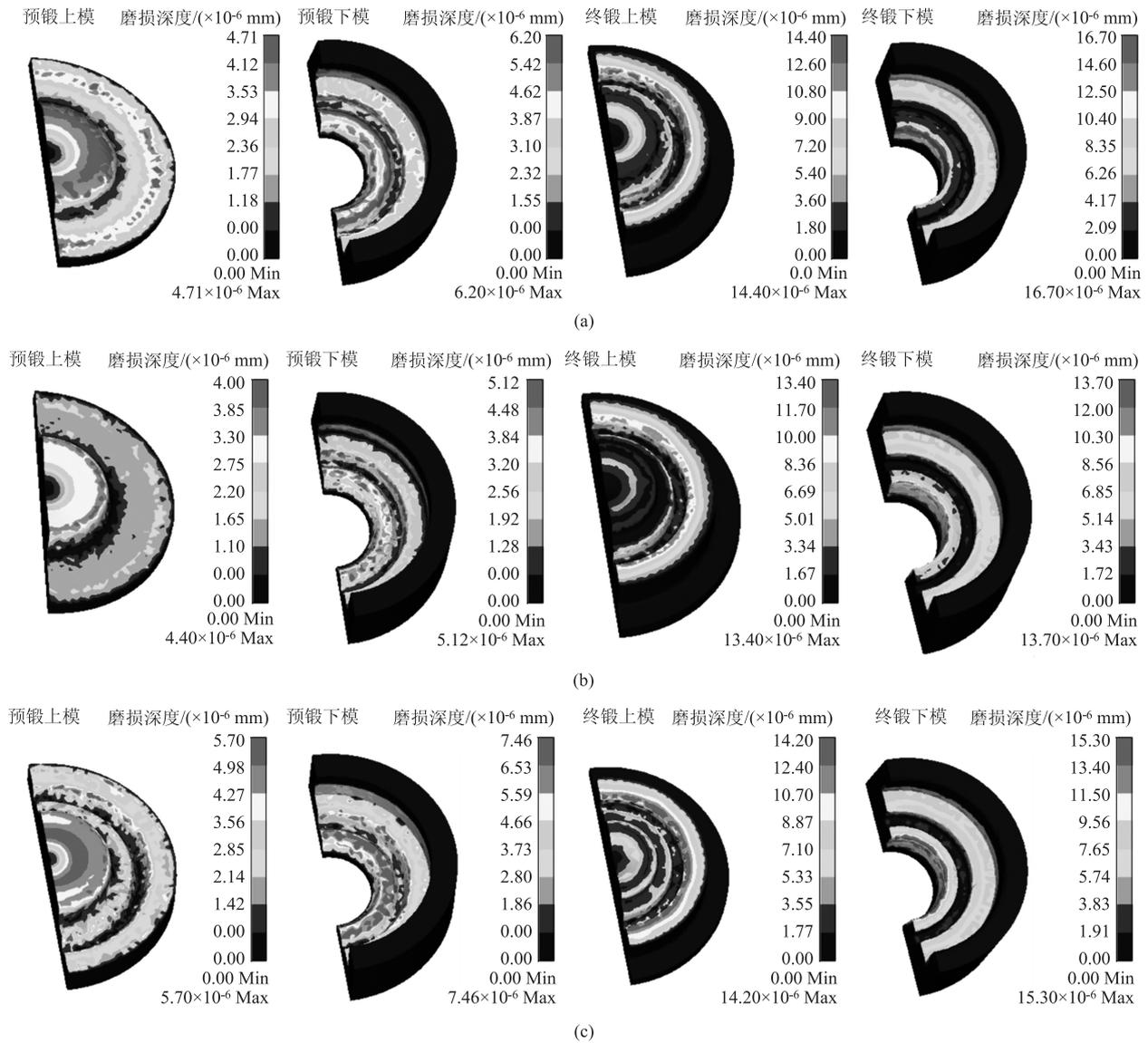


图 6 模具磨损结果

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

Fig. 6 Die wear results

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3

的金属流线连续性较好,表明成形过程中的金属流动性较好。图 9 中各关键尺寸的测量结果为:  $A_1$  为  $\Phi 99.97$  mm,  $A_2$  为  $\Phi 74.99$  mm,  $A_3$  为  $\Phi 62.44$  mm,  $A_4$  为  $\Phi 45.43$  mm,  $A_5$  为  $\Phi 47.48$  mm,  $A_6$  为  $\Phi 61.80$  mm,  $A_7$  为  $\Phi 74.99$  mm,  $B_1$  为 42.50 mm,  $B_2$  为 29.97 mm,  $B_3$  为 17.98 mm,  $B_4$  为 8.99 mm,  $B_5$  为 7.21 mm,  $B_6$  为 14.38 mm, 均满足锻件的尺寸要求。这表明该工艺方案下,锻件能够完全充满,经测试,锻件质量能够满足企业要求。与之前的开式模锻相比,由于闭式锻造锻件成形后无需切除飞边,不会造成金属纤维切断以及外露,因此,锻件

质量得到较大提升,同时材料利用率由原来的 34.7% 增加至 95.2%,大幅减少了材料的浪费,达到了技术升级的目的。通过企业长期生产的换模记录可知,预锻模具和终锻模具的平均寿命分别为 20155 和 7660 件左右,与模拟预测值相比,误差分别为 3.2% 和 4.9%,均在 5% 以内。这说明 Deform-3D 有限元分析的预测精度较高,可指导实际生产中的换模实践。

## 4 结论

(1) 提出了一种汽车盘体零件的闭式锻造工

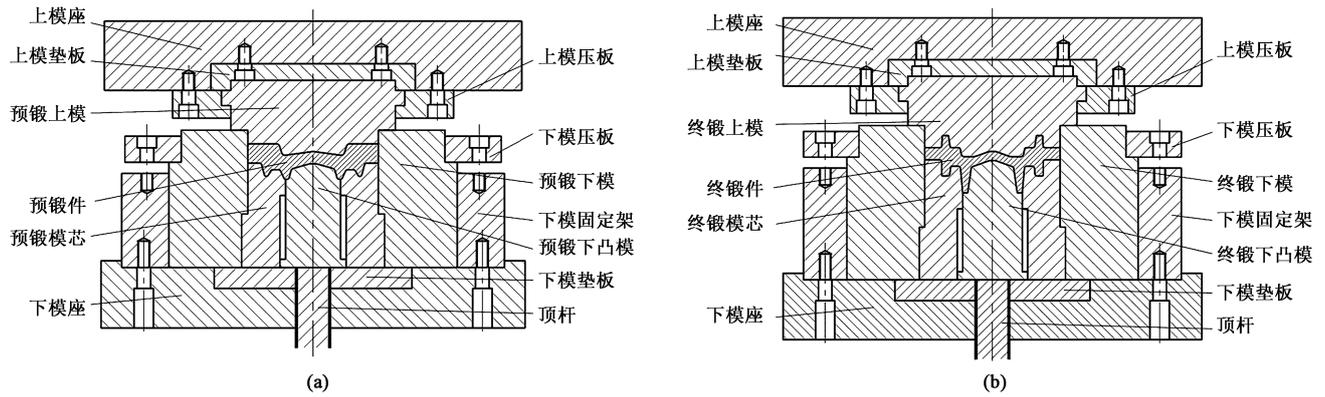


图 7 锻模结构

(a) 预锻模 (b) 终锻模

Fig. 7 Structure of forging dies

(a) Pre-forging die (b) Final forging die

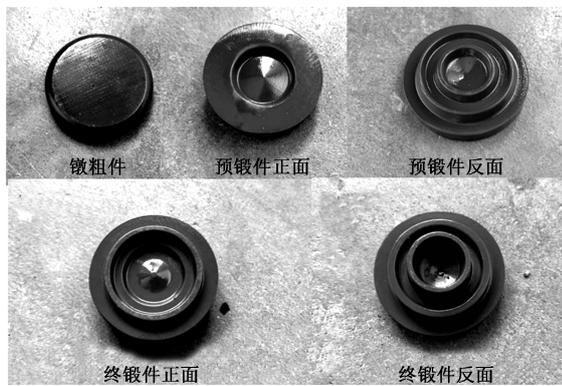


图 8 各工序锻件

Fig. 8 Forgings of each process

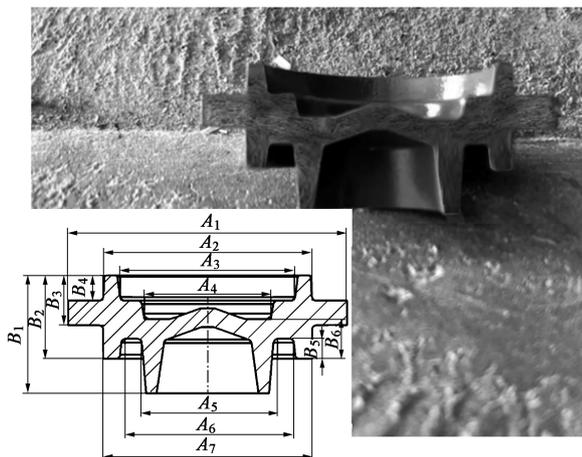


图 9 锻件剖面图

Fig. 9 Section drawing of forgings

艺，以达到高效、近净成形、精密生产的目的；并设计了自动化闭式锻造模具结构，进行了闭式锻造试验，获得了尺寸质量较好的汽车盘体零件，达到了技术升级的目的。

(2) 利用 Deform-3D 软件建立了材料的高温流变应力模型及有限元分析模型，从而更真实地模拟材料的变形过程，根据成形结果分析了工艺的可靠性，并通过实际锻造试验进行了验证。

(3) 对 3 种不同的预锻件结构进行了分析，结果表明：3 种结构均能够实现成形的目的，获得外观质量和性能较好的汽车盘体锻件，但采用方案 2 成形的锻件的成形力更小，能够有效降低模具的开裂风险，对设备的要求也更低，同时模具的磨损深度也更小，有利于模具寿命的提高。

参考文献：

[1] 张晓波, 闫中原, 田轶环, 等. 铝合金空调压缩机斜盘闭式模锻成形数值模拟研究 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 22-26.  
Zhang X B, Yan Z Y, Tian Z H, et al. Numerical simulation of closed-die forging for aluminium alloy swashplate of air conditioning compressors [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 22-26.

[2] 柴民杰, 于华丽. 基于 ANSYS 的锥齿轮轴闭式模锻数值模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (5): 151-153, 157.  
Chai M J, Yu H L. Numerical simulation and process optimization of closed die forging for bevel gear shaft based on ANSYS [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (5): 151-153, 157.

[3] 卜军伟, 蔡云. 基于 DEFORM 的直齿圆柱齿轮精锻工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 43-48.  
Bu J W, Cai Y. Precision forging process for spur gear based on DEFORM [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 43-48.

[4] 肖智海, 熊俊, 姚志文. 基于 Deform 的航空发动机叶片金属锻造仿真 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (5): 204-208.  
Xiao Z H, Xiong J, Yao Z W. Forging simulation of aeroengine

- blade metal material based on Deform [J]. *Computer Simulation*, 2021, 38 (5): 204-208.
- [5] 赵德颖, 张连东, 朱恩领, 等. 挤压工艺参数对枝杈类锻件折叠缺陷的影响 [J]. *塑性工程学报*, 2018, 25 (2): 99-105.
- Zhao D Y, Zhang L D, Zhu E L, et al. Effects of extrusion processing parameters on folding defects in branch-type forging [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2018, 25 (2): 99-105.
- [6] 张巍. 车用 2A12 铝合金连接锻件变形规律分析与工艺设计 [J]. *材料科学与工艺*, 2022, 30 (1): 90-96.
- Zhang W. Deformation analysis and process design of 2A12 aluminum alloy connecting forgings for vehicles [J]. *Materials Science and Technology*, 2022, 30 (1): 90-96.
- [7] 李振红, 黄英娜, 陈聪, 等. 基于 DEFORM 的轮毂法兰盘锻造工艺优化设计 [J]. *热加工工艺*, 2015, 44 (21): 111-113, 116.
- Li Z H, Huang Y N, Chen C, et al. Optimum design of hub flange forging process based on DEFORM [J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44 (21): 111-113, 116.
- [8] 刘琥珀, 黄昌文, 吴玉国, 等. 转向节预锻下模热锻过程中的磨损研究 [J]. *安徽工业大学学报: 自然科学版*, 2019, 36 (3): 244-249.
- Liu H P, Huang C W, Wu Y G, et al. Research on wear of pre-forging lower die of steering knuckle during hot forging [J]. *Journal of Anhui University of Technology: Natural Science*, 2019, 36 (3): 244-249.
- [9] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24 (8): 981-988.
- [10] 曲雪菱. 基于 Simufact Forming 的涡轮叶片热锻模具磨损计算机仿真分析 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (21): 196-198, 202.
- Qu X L. Computer simulation analysis on wear of hot forging die for turbine blade based on Simufact Forming [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (21): 196-198, 202.
- [11] 李彦奎, 吕彦明, 倪明明. 航空叶片模具设计参数对模具磨损影响分析 [J]. *材料科学与工艺*, 2019, 27 (3): 79-84.
- Li Y K, Lyu Y M, Ni M M. The analysis of influence of design parameters of air blades on die wear [J]. *Materials Science and Technology*, 2019, 27 (3): 79-84.
- [12] 张帅帅, 张彦敏, 韩文奎, 等. 基于响应曲面法的 QCr0.5 铜合金热挤压冲头磨损数值分析 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (9): 80-85.
- Zhang S S, Zhang Y M, Han W K, et al. Numerical analysis of punch wear of QCr0.5 copper alloy in hot extrusion based on response surface method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (9): 80-85.

## (上接第 6 页)

- Chen J C. Research on Diameter Reduction Process and Forming Quality Analysis of Micro Thin-walled Copper Tube by Rotary Forging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [3] Ghaei Abbas, Movahhedy Mohammad R. Die design for the radial forging process using 3D FEM [J]. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2006, 182 (1): 534-539.
- [4] 栾谦聪, 董湘怀, 吴云剑. 径向锻造工艺参数对锻透性的影响 [J]. *中国机械工程*, 2014, 25 (22): 3098-3103.
- Luan Q C, Dong X H, Wu Y J. Effect of radial forging process parameters on forging permeability [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25 (22): 3098-3103.
- [5] Rong L, Nie Z R, Zuo T Y. FEA modeling of effect of axial feeding velocity on strain field of rotary swaging process of pure magnesium [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16 (5): 1015-1020.
- [6] Rong L, Nie Z R, Zuo T Y. 3D finite element modeling of cogging-down rotary swaging of pure magnesium square billet—Revealing the effect of high-frequency pulse stroking [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 464 (1): 28-37.
- [7] 周昆凤, 周志明, 涂坚, 等. 基于 Forge 的汽车空心 EPS 转向轴旋锻成形数值模拟及工艺优化 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (19): 83-86.
- Zhou K F, Zhou Z M, Tu J, et al. Numerical simulation and process optimization of rotary forging of automotive hollow EPS steering shaft based on Forge [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (19): 83-86.
- [8] 余琼. 压下率与送进率对径向锻造锻件质量影响的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- Yu Q. Study on the Influence of Reduction Rate and Feeding Rate on the Quality of Radial Forging [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [9] 王旭, 李勇, 韩皓阳, 等. 薄壁铜管旋转模压法缩径成形质量实验与仿真研究 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (5): 72-78.
- Wang X, Li Y, Han H Y, et al. Experimental and simulation study on the quality of thin-walled copper tube reduction by rotary die pressing [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (5): 72-78.
- [10] Svetlana Ortmann-Ishkina, Dhia Charni, Marius Herrmann, et al. Development of residual stresses by infed rotary swaging of steel tubes [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021, 91: 3637-3647.
- [11] 周大隽. 金属体积冷成形技术与实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Zhou D J. *Metal Bulk Cold Forming Technology and Examples* [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [12] 周秉华. 冷态旋转锻造 [J]. *机械科学与技术*, 1984, (1): 29-37, 113.
- Zhou B H. Cold rotary forging [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 1984, (1): 29-37, 113.