

盘式转向节锻造工艺优化与过程模拟分析

齐 羿^{1,2,3}, 薛喜云¹, 焦 斐¹, 杨俊煌³, 于 珍², 杨建全¹

(1. 中国重型汽车集团有限公司, 山东 济南 250000; 2. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250000;
3. 山东财经大学 工商管理学院, 山东 济南 250000)

摘要: 某型汽车盘式转向节锻造过程中存在高裂纹率(10.00%)、高废品率(7.36%)的质量问题, 经分析, 由于原锻造工艺设计缺陷, 导致易产生锻造折叠、裂纹和充不满模腔等缺陷。因此, 开展锻造工艺优化, 包括锻件工艺分析、绘制锻件图、选择设备吨位、锻造工艺工步优化、坯料设计和选定、热锻模模具优化设计等。设计两组工艺优化方案: 方案1, 下料(尺寸为 $\Phi 150\text{ mm}\times 280\text{ mm}$)—镦粗(镦粗量为20 mm)—预锻(料段横放型腔)—终锻—切边; 方案2, 下料(尺寸为 $\Phi 150\text{ mm}\times 280\text{ mm}$)—镦粗(镦粗量为50 mm)—预锻(料段立放型腔)—终锻—切边。结合有限元过程模拟, 对比分析两种工艺方案的模拟质量结果, 优化工艺方案。通过过程模拟结果和小批量试制验证对比证明: 两组工艺优化方案得到的产品质量较原生产工艺均有所改善, 其中方案2的效果更好, 锻后废品率由原生产工艺的约7.36%降低至约1.01%, 可优先考虑; 与实际试制结果对比, 过程模拟结果与实际基本吻合, 具有可信性。最后, 提出了一种理想工艺方案, 作为未来锻造技术量产化开发和突破的研究方向。

关键词: 盘式转向节; 锻造工艺; 过程模拟; 工步优化; 坯料设计; 模具优化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.005

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940(2023)09-0032-09

Forging process optimization and process simulation analysis on disc steering knuckle

Qi Yi^{1,2,3}, Xue Xiyun¹, Jiao Fei¹, Yang Junhuang³, Yu Zhen², Yang Jianquan¹

(1. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250000, China; 3. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250000, China)

Abstract: During the forging process of a certain type of automobile disc steering knuckle, there are quality problems such as high crack rate of 10.00% and high scrap rate of 7.36%. After analysis, due to the design defects of the original forging process, defects such as forging folds, cracks and insufficient filling of mold cavity are prone to occur. Therefore, it was necessary to carry out forging process optimization, including forging process analysis, drawing of forgings diagram, equipment tonnage selection, forging process step optimization, blank design and selection, hot forging mold optimization design, etc. Then, two groups of process optimization schemes were designed, scheme 1 was blanking (size of $\Phi 150\text{ mm}\times 280\text{ mm}$) -upsetting (upsetting amount of 20 mm) -pre-forging (material section placed horizontally in the cavity) -final forging-trimming, and scheme 2 was blanking (size of $\Phi 150\text{ mm}\times 280\text{ mm}$) -upsetting (upsetting amount of 50 mm) -pre-forging (material section placed vertically in the cavity) -final forging-trimming. Furthermore, combined with the finite element process simulation, the simulation quality results of the two process schemes were compared and analyzed, and the process schemes were optimized. The comparison between results of process simulation and small batch trial production verification proves that the quality of the products obtained by the two groups of process optimization schemes improves compared with the original production process. The effect of scheme 2 is better, and the scrap rate after forging is reduced from about 7.36% of the original production process to about 1.01%, which is given priority. Compared with the actual trial production results, the process simulation results are basically consistent with the actual situation, which is credible. Finally, an ideal process scheme is proposed as a research direction of mass production development and breakthrough of forging technology in the future.

Key words: disc steering knuckle; forging process; process simulation; step optimization; blank design; mold optimization

近年来, 随着我国市场经济的高速发展和基建

投资的不断加大, 物流运输行业得到了极大的刺激效应, 呈现兴旺的增长态势。对于商用运输车辆需求量呈现井喷式增长^[1], 重卡行业正处于快速发展的成熟期阶段^[2], 前景广阔。随着重卡行业潜力被

收稿日期: 2022-12-09; 修订日期: 2023-02-10

作者简介: 齐 羿(1987-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 114261053@qq.com

激活和市场的蓬勃活跃，汽车转向节的需求量也与日俱增，甚至出现了供不应求的局面^[3]。汽车转向节（俗称羊角），安装在转向前桥上，连接拉杆、车轮制动系统等，工作中随车轮运动做轴向转动，实现汽车转向动作。作为保安件，其在运转过程中的受力情况复杂，承担多变载荷，不仅要完成车体质量支撑，还要实现传递转向力矩，因此，转向节的质量和安全性要求非常严格。

锻造工艺的不断革新和进步是推动转向节产品质量提升的重要基础和核心关键，长期以来，在过程模拟技术出现之前，锻造工艺设计主要依靠工程师个人理论造诣和实践生产经验，通过采用“试验锻打—优化修正—再试验改进”的不断循环往复的试错方法，结合经验判断以发现和解决问题，虽然累计了许多宝贵的经验数据和计算公式，但新产品开发周期长、成本高、效率低，短期内无法实现批量生产、创造效益。随着 CAE 等技术在传统锻造行业的创新开拓和运用，其已经成为一种可以有效预测结果、准确过程分析、优化改进修正的方法，是一种缩短开发周期、降低研发成本的先进手段，大幅提升企业在同行业中的竞争力和话语权。因此，数值模拟技术的应用也越来越广泛^[4-5]。

本文针对某盘式转向节的质量现状，结合锻造工艺优化与过程模拟，提出两种优化方案并对比分析，旨在探索能够实现减少锻造折皮（折叠）和裂纹等质量缺陷、降低废品率的最佳工艺模式，为企业实现提升产品质量、降低废品损失提供借鉴和指导。

1 质量现状分析

目前，该型盘式转向节面临的主要质量问题为：选择 8000 t 热模锻压力机实际量产时，盘面边缘处不满模（充不满模腔），废品率约为 1.82%，见图 1。盘面外边缘多处锻造折纹，锻后探伤折纹比例约为 10.00%，集中在盘翅位置，见图 2。经清磨后，因折纹深度超差的致废比例约为 5.54%。经分析，原工艺模式为制坯过程中锻模模腔内横向拍扁，拍扁后原料段的两个端面存在局部尖角，盘翅位置接近终锻完毕才能全部充填锻模型腔，有来自原料段的内外两股料在该位置流动汇合，易产生锻造折叠或裂纹。

2 锻造工艺优化

该型盘式转向节属于长轴线型枝叉不对称复杂



图1 盘翅不满模

Fig. 1 Insufficient filling mold of disc wing

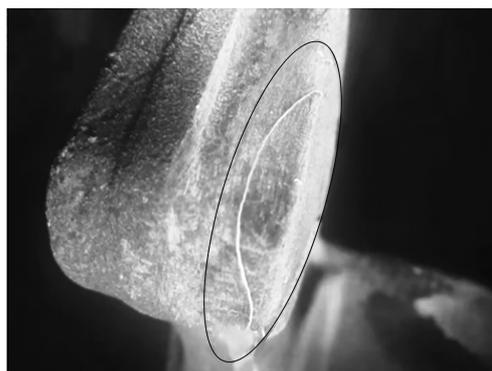


图2 盘翅锻造折纹

Fig. 2 Forging fold on disc wing

结构件^[6]，具有宽大法兰盘、沿轴向截面尺寸变化较大、大小爪明显不同、内档深且宽等特征。因此，其锻造工艺特点按照制坯、预锻、终锻工步过程设计相关热模锻锻模，其中预锻过程应考虑坯料分流。重点关注金属模内成形流向和充型效果，合理选择适合锻模尺寸、热处理工艺、造型材质，达到理想和预期的模具寿命和锻造精度。

2.1 锻件图设计

根据工艺设计规则^[6]，质量 ≤ 250 kg、长度 ≤ 2500 mm 的模钢件（钢制模锻件）在锻件图设计时，制定如下主要工艺参数：分模面、机械加工余量及公差、模锻斜度与圆角半径、冲孔连皮等。综合计算并结合设计考虑，加工部位增加有 3 mm 加工余量，锻件图见图 3。

2.2 锻造工步设计

(1) 终锻工步设计，以冷锻件图作为依据设计终锻热锻件图，重点考虑热收缩率、锻件外形尺寸等，中低碳合金钢的锻件图上关键尺寸线性热收缩率一般可选择 1.5%，终锻件的终锻拔模斜度设计为 3°、模具分模圆角半径 $r=3$ mm。

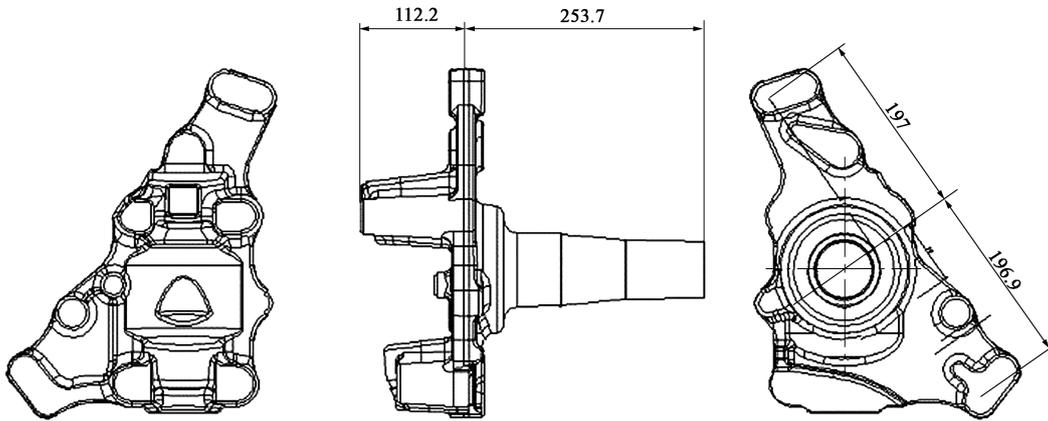


图 3 盘式转向节锻件图

Fig. 3 Forgings diagrams of disc steering knuckle

(2) 预锻工步设计, 基于终锻工步图的设计定型。对于枝叉型锻件的设计要点是叉形部位可采用劈开分流方式, 选择的劈料中间若具有平直段特征, 叉口设计宽度约为叉口宽度的 $1/4 \sim 1/3$ 较为合适, 斜面斜度建议选择 $5^\circ \sim 7^\circ$ 。基于上述设计要点, 预锻工步设计拔模斜度为 5° 、模具分模圆角半径 $r=5 \text{ mm}$ 。

(3) 制坯工步设计, 主要分为: 镦粗、挤压和弯曲^[7]。对于镦粗工步, 经剪切下料的原金属料段外径尽可能地以接近锻件外径为宜, 镦粗饼外径一般比锻件的最大外径小约 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 。对于挤压工步, 一次下压量不能超过坯料高度的 $1/3$ 。一旦下压后宽度与高度比值大于 2.5 , 在后工步中易产生锻造折纹, 影响产品质量, 要注意合理控制下压量。同时, 还要注意聚料效果和压挤模膛形状设计。对于弯曲工步, 弯曲后坯料的厚度要比预锻模膛的宽度小。建议大圆角圆滑过渡设计, 横截面设计为扁圆形, 有利于避免形成对流折纹, 消除锻造相关缺陷。基于上述设计要点, 制坯工步设计为镦粗工步, 具体镦粗行程参数由坯料的尺寸和拟定的工艺优化方案确定。

2.3 模锻力计算与设备选择

2.3.1 模锻力计算

参考开式模锻算公式式 (1):

$$P = (50 \sim 70)F \quad (1)$$

式中: P 为模锻力, kN ; F 为锻件投影面积 (含飞边桥部), cm^2 ; 系数 $50 \sim 70$ 的选择需根据锻件形状决定, 一般形状简单取小值, 形状复杂取大值。

根据锻件图计算可得 $F = 94883 \text{ cm}^2$, 系数取 60 , 故 $P = 60 \times 94883 \text{ kN} = 5692980 \text{ kN}$ 。

2.3.2 设备选择

根据大量生产实践经验, 热模锻压力机设备公称压力应该大于理论计算模锻力, 选择公称压力系数为

1.10 , 热模锻压力机公称压力应约为 $5692980 \text{ kN} \times 1.10 \approx 6262278 \text{ kN}$ 。因此, 应选择 6300 t 以上锻压设备为宜。现有一台 MP 型 6300 t 热模锻压力机较为合适, 该台设备的行程次数为每分钟 42 次, 滑块行程为 450 mm , 滑块调节量为 35 mm , 工作台尺寸为 $1840 \text{ mm} \times 2300 \text{ mm}$, 封闭高度为 1250 mm , 额定传动功率为 300 kW 。

2.4 坯料选择与设计

(1) 计算坯料体积 V_m

$$V_m = (V_D + V_f + V_l)(1 + \delta) \quad (2)$$

式中: V_D 为锻件本体体积, mm^3 , 本体体积以锻件厚度方向的正偏差 50% 取值为标准; V_f 为飞边体积, mm^3 , 飞边体积计算取坯料充满飞边仓部体积 $1/2$; V_l 为连皮体积, mm^3 ; δ 为火耗, $\%$, 中频感应加热取 1% 。

根据式 (2), 计算坯料体积 $V_m = 4263239 \text{ mm}^3$ 。

(2) 坯料尺寸计算

预锻时采用劈开分流方式, 使金属沿叉形流至飞边位置, 叉形截面应取平均截面积。叉形体积应适当增大 $10\% \sim 13\%$, 应按照长度方向的最大截面积选择坯料。

$$F_{D,c} = (V_{D,c} + V_{f,c})(1.1 \sim 1.3)/L_c \quad (3)$$

$$D_m = 1.13\sqrt{F_{D,c}} \quad (4)$$

式中: $F_{D,c}$ 为锻件叉形平均截面积, mm^2 ; $V_{D,c}$ 为锻件叉形部位体积, mm^3 ; $V_{f,c}$ 为锻件叉形飞边体积, mm^3 ; L_c 为锻件叉部长度, mm ; D_m 为计算坯料直径, mm 。

根据式 (3) 和式 (4) 可得, 坯料直径 $D_m \approx \Phi 147 \text{ mm}$ 。

(3) 坯料选定

根据计算的坯料直径尺寸, 选定 $\Phi 150 \text{ mm}$ 圆钢

料，以保证最终锻件外形尺寸足够，多余体积的料将以飞边形式处理。

计算坯料长度 L_m 的表达式为：

$$L_m = \frac{V_m}{\frac{\pi}{4} D_m^2} \quad (5)$$

可得 $L_m \approx 280$ mm。最终，确定坯料规格为：直

径为 $\Phi 150$ mm、长度为 280 mm 的 42CrMo 中碳合金圆钢料，质量约为 38 kg。确定锻造工艺为热模锻，路径包括下料—加热—镦粗—预锻—终锻—切边。

2.5 锻模设计

终锻模设计采用立式开式锻造，终锻设置飞边桥部间隙为 7 mm、宽度为 20 mm，见图 4。

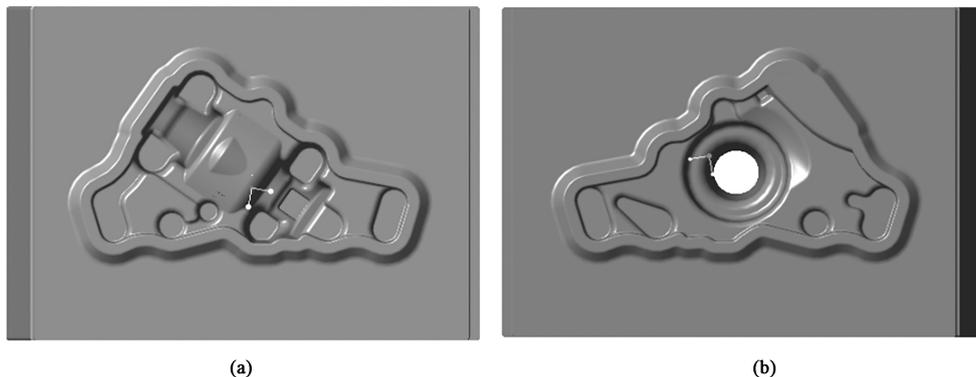


图 4 终锻模设计图

(a) 上模腔 (b) 下模腔

Fig. 4 Design diagrams of final forging mold

(a) Upper mold cavity (b) Lower mold cavity

预锻模设计采用立式开式锻造，预锻间隙设置为 8 mm，高度方向比终锻件高 3 mm，预锻模在部

分位置增加挡墙，预锻件的横截面积稍大于终锻件尺寸对应位置的横截面积，以保证终锻满模，见图 5。

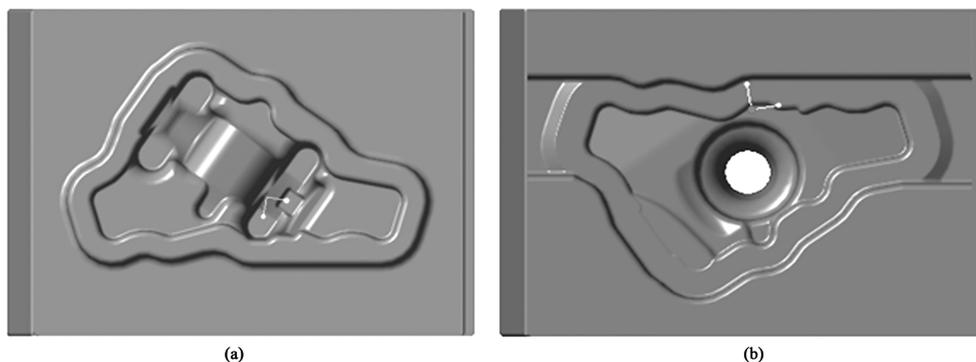


图 5 预锻模设计图

(a) 上模腔 (b) 下模腔

Fig. 5 Design diagrams of pre-forging mold

(a) Upper mold cavity (b) Lower mold cavity

镦粗模设计：6300 t 热模锻压力机带有镦粗平台，可直接使用。

2.6 工艺优化方案

通过长期生产经验积累发现，当同一种料段预锻拍扁和镦粗时，得到的锻件质量会有较大区别，同时，在同一模腔中料段不同的摆放方式也会对质量产生很大影响。对于立式锻造方式来说，横、纵的坯料放法对转向节盘部、杆部的金属流向和充型

效果表现可能不同，因此，本文共设计两组工艺优化方案：

(1) 方案 1：下料（尺寸为 $\Phi 150$ mm × 280 mm）—镦粗（镦粗量为 20 mm）—预锻（料段横放型腔）—终锻—切边。

(2) 方案 2：下料（尺寸为 $\Phi 150$ mm × 280 mm）—镦粗（镦粗量为 50 mm）—预锻（料段立放型腔）—终锻—切边。

3 过程模拟分析

3.1 模型简化及初始条件设置

采用 CREO 软件制作三维模型, 以 DEFORM-3D 为工作平台, 按照两组工艺优化方案, 开展锻造成形过程模拟分析, 具体为: 采用 CREO 软件对锻模和初始坯料进行三维建模, 转为 STL 格式, 导入 DERORM-3D 模拟系统; 坯料规格为 $\Phi 150 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$, 坯料选取美国牌号为 AISI-4140, 对标我国牌号 42CrMo; 预锻和终锻工步的始锻温度均定义为 $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 采用控制网格数量法, 以设定的坯料为塑性体、模具为弹塑性体为前提条件, 设定几何温度、材料, 单元类型设定为四面体网格; 坯料划分网格为系统设定, 相对值中元素数定义为 80000 个, 并局部细化; 在定义接触边界时, 对上、下模具以及坯料靠模, 选择剪切摩擦因数, 定值为 0.3; 设定预锻、终锻的上模运动速度均为 $450 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 定义每步压下量为 1 mm ; 定义模具温度为 $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 定义热传导率为 $5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

3.2 方案 1 过程模拟分析

3.2.1 制坯过程模拟

经过墩粗下压 20 mm , 坯料段长度缩减但截面增大, 为预锻的金属流动和充填做准备, 同时去除表面经高温加热产生的较厚的氧化皮层, 避免预锻时挤入主体。

3.2.2 预锻过程模拟

预锻开始, 上模型腔与圆坯料段上表面多点接触, 形成轻微错动, 后随着上模继续下压, 两者开始呈现多面接触, 接触面积逐渐增大, 坯料不再错动、被稳定挤压。高温坯料逐步在各位置型腔内充填, 多余金属以飞边形式开始出现并向飞边槽侧挤出, 直至完成全部约 140 mm 的压下量, 锻件预锻结束, 预锻型腔已经完成充满, 多余金属形成残余飞边, 被排入设计的飞边槽中。

图 6 为预锻压力曲线, 预锻初期压力变化较平缓, 随着飞边的逐渐形成和外排, 锻造压力急剧上升。预锻的最大压力约为 $5.99 \times 10^7 \text{ N}$ 。图 7 和图 8 分别为预锻等效应变和等效应力分布云图。由图 7 可知, 预锻型腔内大部分区域的等效应变小于 2.5, 而大部分飞边的等效应变均在 $2.5 \sim 4.0$, 个别位置的最大值超过 5.5, 接近 6.0, 集中出现在模具设计增加的阻挡墙位置区域, 可见阻挡墙的设计使用对金属流动阻延 (增加金属流动阻力) 效果明显。由

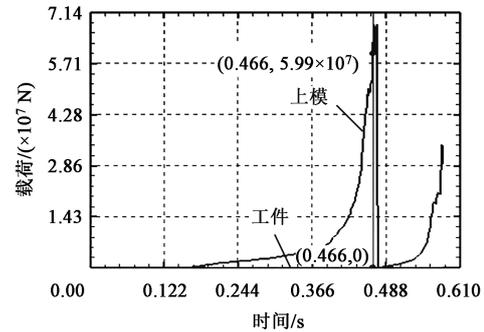


图 6 方案 1 预锻压力曲线

Fig. 6 Pre-forging pressure curve in scheme 1

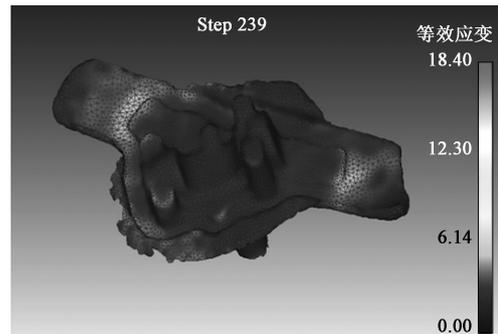


图 7 方案 1 预锻等效应变分布图

Fig. 7 Equivalent strain distribution diagram of pre-forging in scheme 1

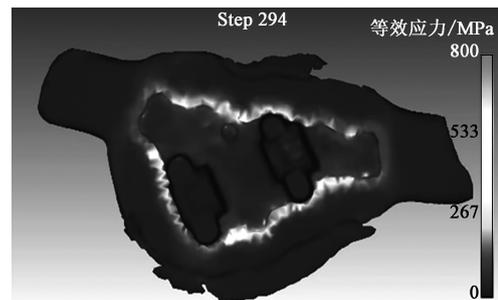


图 8 方案 1 预锻等效应力分布图

Fig. 8 Equivalent stress distribution diagram of pre-forging in scheme 1

图 8 可知, 预锻等效应力的最大值约为 280 MPa , 出现在不易填充的爪端部和盘翅边缘, 但整体应力值并不大。图 9 为预锻件温度场分布云图, 图 10 为预锻件模拟图。从图 9 可知, 预锻成形后锻件的整体温度处于 $1200 \sim 1240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 局部盘翅边部处已超过 $1240 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更高, 说明该位置的局部应力较大, 成形变化剧烈, 金属料温度高且料间温度存在一定差异, 流动速度快, 容易导致折叠出现。图 10 中分布的多个点为系统模拟识别出的预锻过程中可能出现的产品缺陷, 如折叠等, 大部分分布在飞边边缘, 排出后并不影响产品质量, 但图 10 圆圈标出位置较

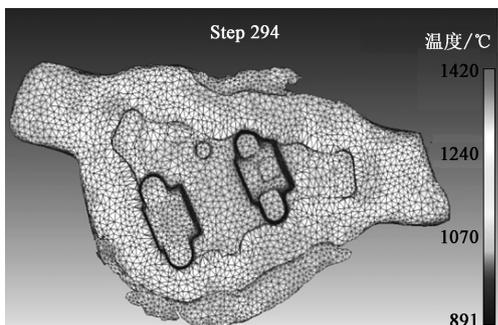


图 9 方案 1 预锻件温度场分布图

Fig. 9 Temperature field distribution diagram of pre-forgings in scheme 1

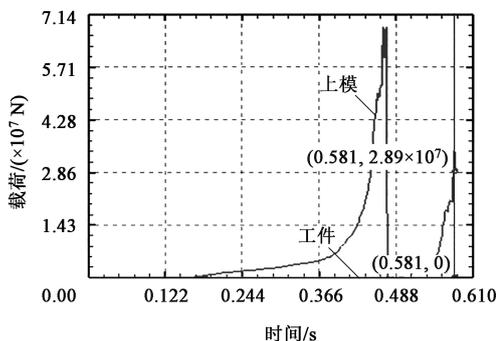


图 11 方案 1 终锻压力曲线

Fig. 11 Final forging pressure curve in scheme 1

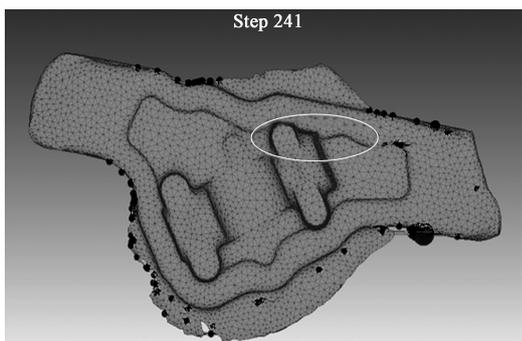


图 10 方案 1 预锻件模拟图

Fig. 10 Simulation diagram of pre-forgings in scheme 1

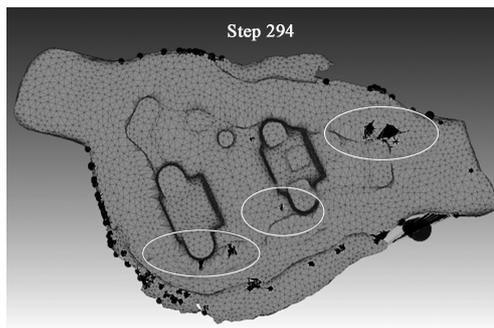


图 12 方案 1 终锻件模拟图

Fig. 12 Simulation diagram of final forgings in scheme 1

为特殊，其位于预锻件本体盘翅边部，未与飞边一起排出。通过图 9 与图 10 综合分析判断显示，预锻过程可能已经在转向节本体上产生了折叠缺陷，还要通过后续终锻情况进行验证和确定。

3.2.3 终锻过程模拟

终锻开始，盘式转向节锻件的主体部分的形状变化差异不大，重点在于最终充满型腔，多余金属全部排出至飞边槽内，对锻件实现精整和最终成形，未出现明显的盘边缘不满模现象。

图 11 为终锻压力曲线，与预锻压力曲线相似，最初平稳缓升、后期急剧上升。终锻满模时的最大压力为 2.89×10^7 N，与经验算法的值近似，相差较小。图 12 为终锻件模拟图，预锻时可能已经产生的锻造折叠缺陷通过终锻过程不仅未消除，反而越发明显，不仅在相同位置的各点处的识别范围扩大，同时在底盘面处也出现缺陷点识别标记，预示着以该方案进行锻造生产时，存在锻后产品出现多处折叠缺陷的风险。原设备工艺模式锻造的产品一直存在类似产品缺陷，是否与此有关，还有待后续实际生产验证。

3.3 方案 2 过程模拟分析

3.3.1 制坯过程模拟

经过墩粗下压 50 mm，其他均与方案 1 中的制

坯过程相似。

3.3.2 预锻过程模拟

预锻开始，由于料段立放，压下量明显大于方案 1 中横放的压下量，总约为 220 mm，预锻效果良好，完成充型。

图 13 中显示预锻最大压力为约 5.96×10^7 N，6300 t 热模锻压力机可满足需求。图 14 为预锻等效应变分布云图，预锻型腔内区域和飞边区域的等效应变均处于 2.5 以下，均匀性好于方案 1，对阻挡墙的冲击较小，金属流动更好更稳定。图 15 为预锻等效应力分布云图，预锻的等效应力最大值约为 340 MPa，略高于方案 1 中的最大预锻等效应力，差异主要存在于本体与飞边连接处，本体上的应力分布较为均匀，无明显位置差异，与实际锻造过程也是吻合的。图 16 为预锻件温度场分布云图，预锻成形后的锻件内槽温度较低，约为 1100~1150 ℃，局部盘翅边部处超过 1300 ℃，整体温度分布均匀性存在一定差异，波动大于方案 1，说明该方案锻造后产品不同位置的温度分布存在一定的不稳定、不一致因素，增加了质量缺陷风险。但是从图 17 预锻件模拟图中可以看出，缺陷标识点均分布于飞边边缘、均排出，锻件本体上无明显系统识别的折叠缺陷，方

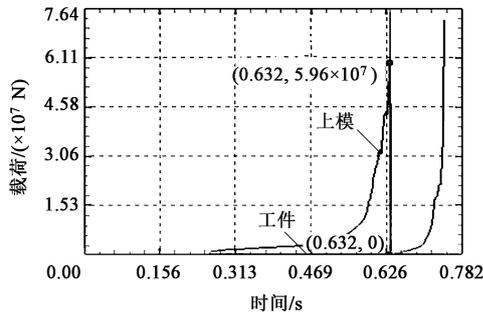


图 13 方案 2 预锻压力曲线

Fig. 13 Pre-forging pressure curve in scheme 2

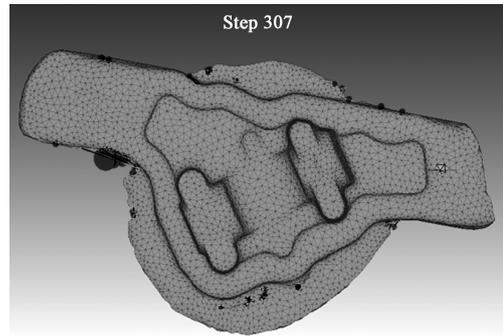


图 17 方案 2 预锻件模拟图

Fig. 17 Simulation diagram of pre-forgings in scheme 2

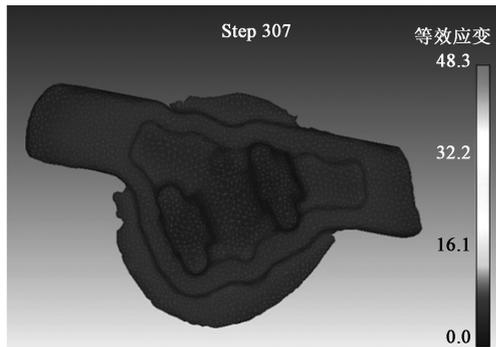


图 14 方案 2 预锻等效应变分布图

Fig. 14 Equivalent strain distribution diagram of pre-forging in scheme 2

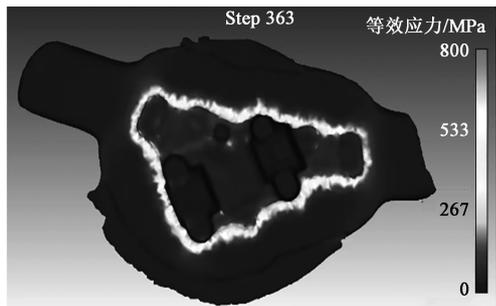


图 15 方案 2 预锻等效应力分布图

Fig. 15 Equivalent stress distribution diagram of pre-forging in scheme 2

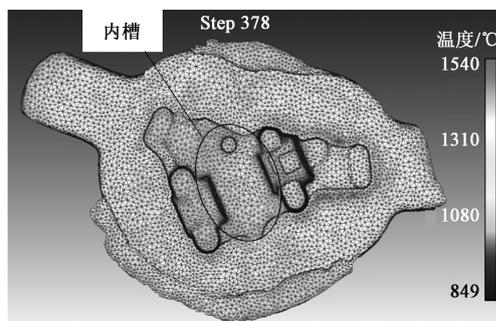


图 16 方案 2 预锻件温度场分布图

Fig. 16 Temperature field distribution diagram of pre-forgings in scheme 2

案 2 的预锻模拟质量效果要强于方案 1，这与温度分布云图分析情况存在一定偏差，均有待后续终锻确认。

3.3.3 终锻过程模拟

图 18 为终锻压力曲线，与方案 1 中终锻压力曲线的变化趋势相同，终锻满模时的最大压力为 4.28×10^7 N，与经验算法的值近似，相差较小。终锻压力大于方案 1 中的最大终锻压力，但仍可满足现有选择设备的吨位能力技术要求。图 19 为终锻件模拟图，该方案得到的终锻模拟结果未出现明显不满模缺陷，也未出现折叠缺陷识别，这是与方案 1 中最大的不同和优势。

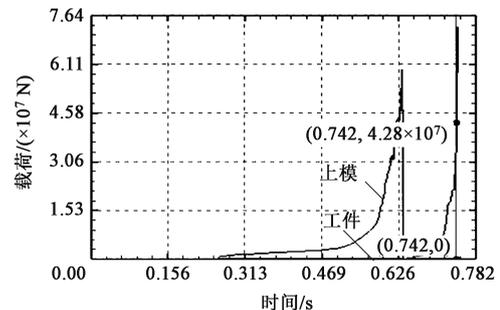


图 18 方案 2 终锻压力曲线

Fig. 18 Final forging pressure curve in scheme 2

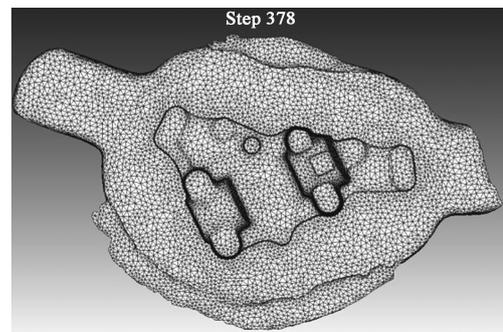


图 19 方案 2 终锻件模拟图

Fig. 19 Simulation diagram of final forgings in scheme 2

3.4 一种理想方案过程模拟分析

本文还提出了一种理想状态下的优化工艺方案，即对毛坯原料段的设计进行改进。为此，模拟设计

一种椭圆形金属料段，其尺寸中最宽直径和长度与前述两组工艺方案中选择的料段相同，但由于两端向内收紧，经三维造型计算，原料段体积可节省约20%以上，见图20。

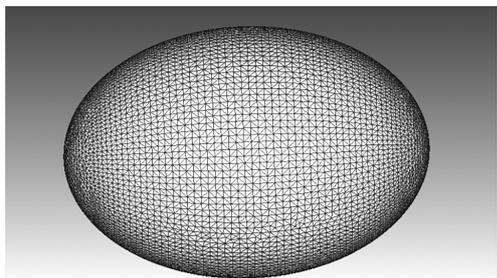


图20 椭圆形料段设计示意图

Fig. 20 Schematic diagram of ellipse section design

优化工艺方案设计为：预锻—终锻—切边，经预锻过程和终锻过程模拟分析，转向节未出现明显的不满模现象，也未出现折叠缺陷识别，终锻毛边量明显小于前两组方案的终锻毛边量。该方案最终得到的模拟转向节质量效果较好，同样做到了满模和无折叠缺陷出现；原金属料段节省了将近20%，取消了制坯镦粗工步，大幅缩短了锻造工艺节拍，减少了生产工位，节省了人工成本投入，经济效益明显。同时，得利于减料改进，锻压机组预锻和终锻所需压力降低，对设备的使用状态和服役寿命均有利好。目前，该种尺寸和形状的金属料段无法形成批量供应，各钢厂提供该型料段也存在技术困难，如果提前进行粗车成形反而会增加锻造前工序的大量资本投入，得不偿失。因此，该方案是未来技术突破和成形改进的方向和目标。

4 生产验证

4.1 热锻模制造

模具费用在锻造行业的生产成本中占比非常大^[8]，因此，模具制造时必须综合考虑，既要保证性能和质量，又要节省制造成本。热模具因材料选择和热处理质量因素导致的常见失效模式有磨损、疲劳、变形、开裂^[9]，为避免模具过早磨损变形塌陷而提前下场，要严谨选择和设计。本文选用的锻模材质为5CrNiMo模具钢^[10]，配合选用新型水基石墨润滑剂模腔润滑。

4.2 生产验证

两组工艺优化方案投入实际生产，各组织300件小批试制验证。分组生产完毕后，使用28GN滚

筒式抛丸机对两组锻后转向节抛丸，主要作用为去掉表面氧化皮，露出本体，再进行两步质量检验。第1步，100%人工检测锻件满模情况（工艺要求锻件表面不满模 <1.5 mm）；第2步，通过无损检验（荧光磁粉探伤）方式^[11-12]验证锻后折叠和裂纹情况。收集汇总全部数据，两种工艺优化方案做实际数据对比，并与前期模拟结果进行验证。

将两组工艺方案生产验证的产品的外观质量和磁粉探伤结果汇总对比，见表1。

表1 两种工艺优化方案的质量结果（%）

Table 1 Quality results of two process optimization schemes (%)

检验指标	原质量状态	方案1	方案2
不满模废品率	1.82	0.67	0.34
锻后折叠率	10.00	4.00	1.34
折叠致废率	5.54	2.00	0.67

从表1中数据分析：（1）两方案产品的质量较原来均呈现显著提升，不满模废品率、锻后折叠率、折叠致废率均有大幅降低，说明两种工艺优化方案是正确有效的，对于产品的质量提升、减少废品带来的成本损失是有实质性效益的；（2）两方案的实际生产对比结果与前期过程模拟结果基本吻合，说明过程模拟是可信的；（3）两方案中，方案2较方案1的效果更为明显，各项不良指标率的降低幅度更大，在实际制造生产中的收益更好，成果更显著。

但同时也发现问题：（1）两方案模拟仿真过程中，均未出现转向节不满模情况，与实际锻造生产结果有所偏差；（2）两方案模拟仿真过程中，方案1从预锻开始直到终锻结束的过程中，在转向节盘翅部位存在产生折叠缺陷的风险，这与实际生产结果相符的；方案2全过程模拟均未出现折叠的系统风险识别，但实际制造中还是出现折叠废品，虽然较原产品质量状态得到了极大改善，但模型数据与实际结果仍存在一定差异。

5 结论

（1）对研究对象进行工艺分析、绘制锻件图、选择设备吨位、确定锻造工步、设计和选定坯料、设计与开发热锻模模具，提出两组锻造工艺优化方案，并通过实际生产制造结果验证，产品现存高废

品率的问题得到了极大改善,效果明显;同时,还提出了一种理想工艺方案,提供一种未来技术开发和突破的方向。

(2) 对两锻造工艺优化方案进行成形过程模拟,对比实际产品试制结果,证明过程模拟具有较高的符合性和准确性,效果可信,可有效指导和协助实际生产。

(3) 两工艺优化方案得到的产品质量较原生产工艺均有了大幅提升,其中方案 2 的效果更加优于方案 1。因此,方案 2 对改善该型盘式转向节现有的质量问题,并后期批量生产具有极大的参考和使用价值,即采用(6300 t 热模锻压力机)下料—加热—镦粗—预锻(料段立放型腔)—终锻—切边工艺,废品率由原来的约 7.36%降低至约 1.01%,挽救废品损失,效益显著。

参考文献:

- [1] 袁学辉. 卡车用柴油机行业 2015 年市场分析及 2016 年展望 [J]. 商用汽车, 2016, (Z1): 118-121.
Yuan X H. A review of 2015 and 2016 outlook of domestic diesel engine market [J]. Commercial Vehicle, 2016, (Z1): 118-121.
- [2] 李永钧. 国内重卡市场分析及 2021 年展望 [J]. 重型汽车, 2020, (6): 3-4.
Li Y J. Analysis of the domestic heavy truck market and prospects for 2021 [J]. Heavy Truck, 2020, (6): 3-4.
- [3] 吴前. 2020-2025 年全球及中国汽车转向节行业发展全面调研与未来趋势预测报告 [EB/OL]. 2016-05-26.
Wu Q. Comprehensive research and future trend prediction report on the development of the global and Chinese automotive steering knuckle industry from 2020 to 2025 [EB/OL]. 2016-05-26.
- [4] 赵德颖, 孙慧学, 苏升贵. 数值模拟在轿车转向节闭塞挤压成形中的应用 [J]. 热加工工艺, 2007, 36 (13): 74-77.
Zhao D Y, Sun H X, Su S G. Application of numerical simulation in obliterated extrusion forming for car steering knuckle [J]. Hot Working Technology, 2007, 36 (13): 74-77.
- [5] 李宏伟, 马宇, 马永杰. 基于 Deform 的转向节成形参数优化设计 [J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2008, 23 (4): 55-58.
Li H W, Ma Y, Ma Y J. Forming parameters optimization of knuckle based on Deform [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry: Natural Science Edition, 2008, 23 (4): 55-58.
- [6] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册 (第 1 卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
China Society for Technology of Plasticity, CMES. Forging Handbook (Volume 1) [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [7] 周杰, 齐文涛, 陶亚平, 等. 转向节闭式挤锻工艺多目标优化设计 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (7): 1108-1113.
Zhou J, Qi W T, Tao Y P, et al. Closed extrusion-die forging process of steering knuckle for multi-objective optimization design [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (7): 1108-1113.
- [8] 胡亚民, 王伟, 孙金刚. 从《锻造工艺过程及模具设计》教材看锻造工艺发展的新进展 [J]. 锻压装备与制造技术, 2012, 47 (1): 53-57.
Hu Y M, Wang W, Sun J G. The new progress for forging process and forging die design [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2012, 47 (1): 53-57.
- [9] 莫才颂. 连杆锻造模具应力模拟及失效分析 [J]. 工具技术, 2020, 54 (8): 69-72.
Mo C S. Stress simulation and failure analysis of connecting rod forging die [J]. Tool Technology, 2020, 54 (8): 69-72.
- [10] 周新军, 李萌蘖, 卜恒勇. 提高 5CrNiMo 模具钢力学性能的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (14): 1-6.
Zhou X J, Li M N, Bu H Y. Research progress on improving mechanical properties of 5CrNiMo die steel [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (14): 1-6.
- [11] 包增成. 荧光磁粉探伤法应用技术探讨 [J]. 科技风, 2010, (18): 228-229.
Bao Z C. Discussion on the application technology of fluorescent magnetic particle testing method [J]. Technology Style, 2010, (18): 228-229.
- [12] 王伟. 锻件磁粉探伤技术与磁化设备的应用 [J]. 锻造与冲压, 2021, (7): 62-66.
Wang W. Application of forging magnetic particle inspection technology and magnetizing machines [J]. Forging & Metalforming, 2021, (7): 62-66.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部