

## 基于圆弧形镦粗模合理体积分配的转向节成形工艺

曹 洪<sup>1,2</sup>, 薛世博<sup>1</sup>, 薛传妹<sup>3</sup>, 石文超<sup>1</sup>, 宋中江<sup>4</sup>, 尹夕兵<sup>4</sup>

(1. 合肥工业大学 工业与装备技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥美的洗衣机有限公司, 安徽 合肥 230088;  
3. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009; 4. 安徽星瑞齿轮传动有限公司, 安徽 六安 237000)

**摘要:** 为降低转向节锻件的折叠缺陷和成形载荷, 实现金属的合理分配, 以复杂等级为 S 级的汽车转向节为研究对象, 采用自由锻制坯(镦粗—杆部拔长—压扁)—预锻—终锻的成形工艺方案, 利用 Deform-3D 软件对成形过程开展数值模拟, 并通过实验验证, 研究成形过程中的金属流动规律、等效应力等效应变分布以及载荷变化规律。结果表明: 镦粗上模中部设计为圆弧形对金属起到了良好的分配作用, 减少了预锻头部飞边以及折叠的缺陷。镦粗上模的圆弧半径为 150 mm 时, 鼓形表面的损伤峰值最小。采用圆弧形镦粗上模和自由锻制坯—预锻—终锻的锻造成形方法, 模拟获取的锻件无明显的成形缺陷, 为转向节锻件的实际生产提供了理论指导。

**关键词:** 转向节; 体积分配; 圆弧形镦粗上模; 自由锻制坯; 预锻; 终锻

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.002

**中图分类号:** TG376.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0007-05

## Forming technology of steering knuckle based on reasonable volume distribution for circular arc upsetting die

Cao Hong<sup>1,2</sup>, Xue Shibo<sup>1</sup>, Xue Chuanmei<sup>3</sup>, Shi Wenchao<sup>1</sup>, Song Zhongjiang<sup>4</sup>, Yin Xibing<sup>4</sup>

(1. Institute of Industry Equipment and Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. Hefei Midea Washing Machine Co., Ltd., Hefei 230088, China;  
3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
4. Anhui Xingrui Gear Transmission Co., Ltd., Liu'an 237000, China)

**Abstract:** In order to reduce the fold defect and forming load of steering knuckle forgings and realize the reasonable distribution of metal, for the automobile steering knuckle with complex grade of S-class, the forming process scheme of free forging billet (upsetting-rod flattening), pre-forging and final forging were adopted, and the forming process was simulated numerically by software Deform-3D. Then, the metal flow laws, the distributions of equivalent stress and equivalent strain, and the load change laws during the forming process were studied by experimental verification. The results show that the designed circular arc shape in the middle of upsetting upper die plays a good role in metal distribution, and the defects of flash and folding for the pre-forged head are reduced. When the arc radius of upsetting upper die is 150 mm, the damage peak value of drum surface is the smallest. Using the forging method of circular arc upsetting upper die and free forging billet-pre-forging-final forging, the forgings obtained by the simulation have no obvious forming defects, which provides theoretical guidance for the actual production of steering knuckle forgings.

**Key words:** steering knuckle; volume distribution; circular arc upsetting upper die; free forging billet; pre-forging; final forging

转向节作为汽车转向系统的关键零部件, 起着传递转向力矩的作用<sup>[1-2]</sup>。恶劣的服役条件对结构

复杂的转向节的力学性能提出了较高的要求<sup>[3-5]</sup>。采用铸造法制得的转向节易出现充型不足、冷隔等缺陷<sup>[6-8]</sup>, 难以达到服役要求。锻造成形的转向节表现出优异的力学性能<sup>[9-11]</sup>。但结构复杂的转向节的锻造成形工艺复杂<sup>[12]</sup>, 如何合理分配金属流动从而实现转向节无缺陷近成形尤为重要。

本文研究复杂等级为 S 级的 40Cr 钢转向节锻件, 探索合理的锻造成形工艺, 为转向节锻件的实际生产提供借鉴和思路。

收稿日期: 2021-08-21; 修订日期: 2021-11-25

基金项目: 安徽省重点研究和开发计划项目 (201904a05020075);  
中央高校基本科研业务费专项资金资助 (JZ2020HGTTB0039)

作者简介: 曹 洪 (1995-), 男, 硕士

E-mail: 1049334549@qq.com

通信作者: 石文超 (1988-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: shiwenchaohfut@hfut.edu.cn

## 1 模拟参数设置

### 1.1 转向节成形方案分析

图 1 为转向节三维锻件图。杆部细而长，杆部小端的直径为  $\Phi 25$  mm。头部成叉形，叉口不对称，叉口部分的宽度为 191 mm。法兰部分的宽度为 119 mm，厚度为 12 mm。法兰部分与两个叉口过渡连接，法兰部分的截面积远大于杆部与叉部。

由于转向节的杆部较长，且其中 1 个叉部的两侧有凸台，采用立式锻造时坯料很难取出，因此，采用卧式锻造。由于该转向节的结构复杂，初始圆棒料一步很难成形，因此，需要增加制坯过程，

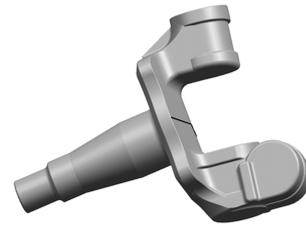


图 1 转向节三维图

Fig. 1 Three dimensional diagram of steering knuckle

对金属进行合理的分配，以降低终锻载荷和减少模具磨损。转向节的锻造工艺为自由锻制坯（镦粗—拔长—压扁）—预锻—终锻，如图 2 所示。

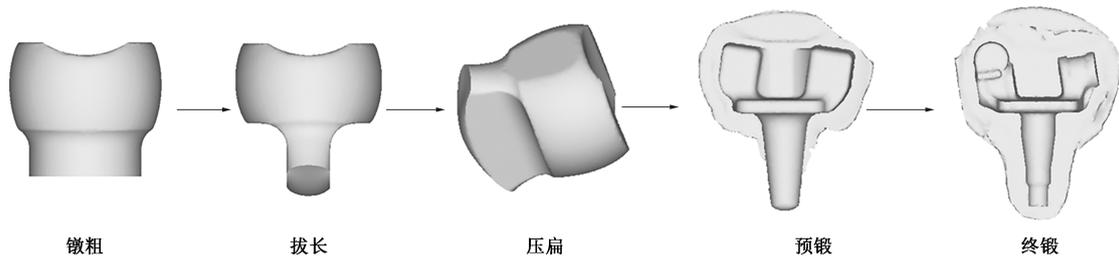


图 2 锻造工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of forging process

### 1.2 有限元模型

为验证工艺方案的可行性，采用 Deform-3D 软件进行锻造过程模拟，如图 3 所示。锻件材料为 40Cr 钢，初始下料尺寸为  $\Phi 100$  mm $\times$ 165 mm，初始坯料划分为 100000 个网格单元。模具材料为 AISI-

H13 钢，设置为刚性体，模具预热温度为 300  $^{\circ}\text{C}$ 。锻件与模具之间采用剪切摩擦，摩擦因数为 0.3。定义热边界条件，选择热交换面，锻件和环境间的热传递系数为  $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ ，在变形过程中接触体之间的热传导系数为  $5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

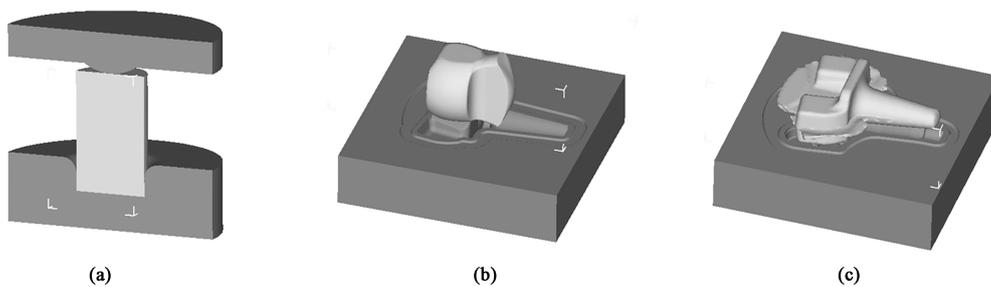


图 3 锻造过程的有限元模型

(a) 镦粗 (b) 预锻 (c) 终锻

Fig. 3 Finite element models of forging process

(a) Upsetting (b) Pre-forging (c) Final forging

## 2 结果与分析

### 2.1 镦粗上模圆弧半径对金属分配效果的影响规律

通过计算锻件头部、法兰和杆部的体积，并利

用圆弧形镦粗上模合理分配金属，使分配后的金属在预锻过程中更好地向两侧流动，防止出现头部飞边过多现象。镦粗过程中等效应力分布较均匀，未出现应力集中现象，如图 4a 所示。如图 4b 所示，由于坯料内部变形不均匀，第 I 区的变形程度最小，

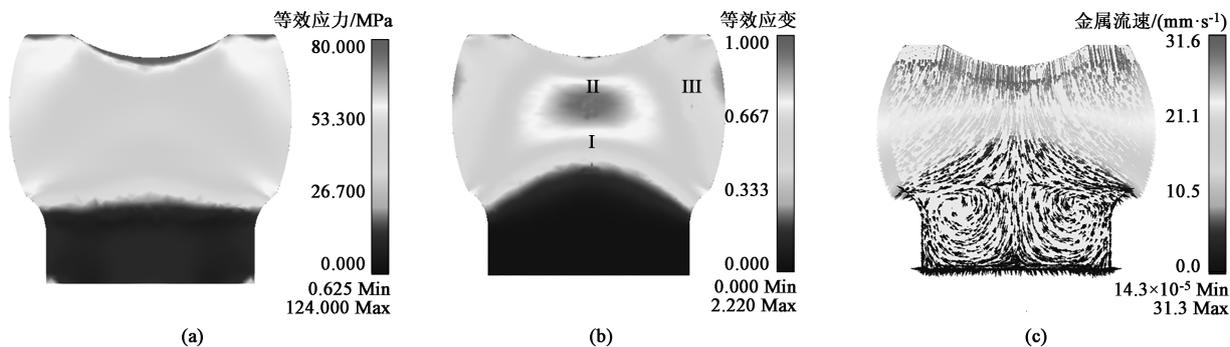


图 4 镦粗过程中等效应力 (a)、等效应变 (b) 及金属流速 (c) 分布云图

Fig. 4 Distribution cloud diagrams of equivalent stress (a), equivalent strain (b) and metal velocity (c) in upsetting process

第 II 区为剧烈变形区，其变形程度最大，第 III 区的变形程度居中，镦粗后坯料侧面呈现鼓形。镦粗上模中部设计为圆弧形，中部金属更多地向两边流动，如图 4c 所示。

为研究圆弧形镦粗上模圆弧半径对镦粗成形效果的影响规律，研究圆弧半径分别为 70、100、150

和 200 mm 的 4 组镦粗成形结果的损伤值，如图 5 所示。圆弧半径较小时，鼓形表面损伤峰值较大。随着圆弧半径的增大，鼓形表面损伤峰值减小。但当圆弧半径增大至 200 mm 时，圆弧半径过大，表面的鼓胀程度更为明显，最大损伤峰值反而增大。

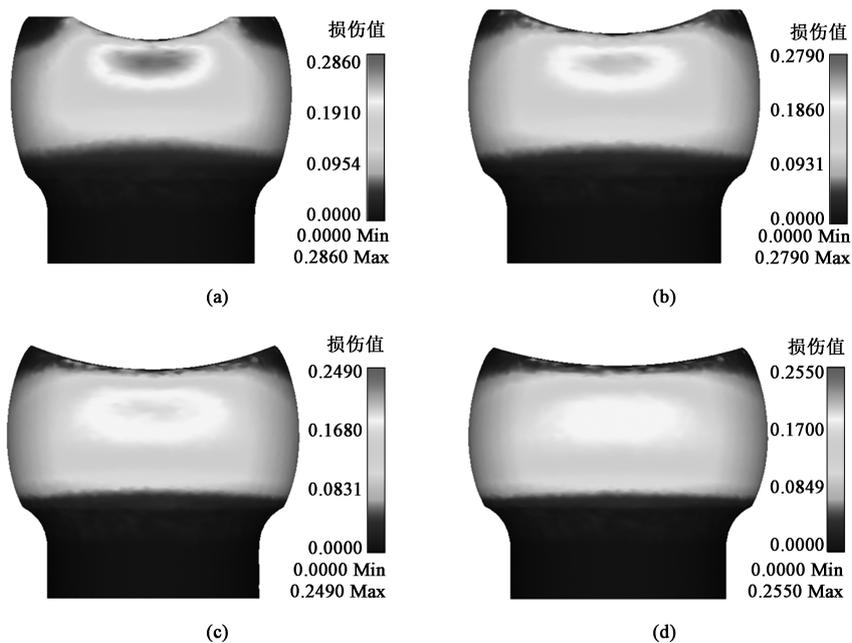


图 5 不同镦粗上模圆弧半径下镦粗成形结果的损伤值

(a) 70 mm (b) 100 mm (c) 150 mm (d) 200 mm

Fig. 5 Damage values of upsetting results under different circular arc radiuses for upsetting upper die

### 2.2 镦粗上模圆弧半径对预锻成形效果的影响

由于转向节两个叉部不对称，预锻将锻件叉部、法兰部以及杆部进行合理的金属分配，可以促进终锻时金属流动，降低成形载荷，减少终锻模具的磨损。如果不对其进行合理的金属分配，在终锻时将出现小叉部先充满、多余金属过早地流向飞边，而大叉部充满不满的现象，从而导致锻件出现严重的质量缺陷。

图 6 为预锻过程的成形效果图。预锻的前期主要成形两个叉部 (图 6b)，金属向杆部的流动较少，载荷较小且平稳上升 (图 7)。在叉部基本充满后，金属开始向法兰部充填，最后完成杆部的充填 (图 6c)。

预锻过程中，在两叉部金属型腔逐渐充满后，多余金属流向飞边槽，其中头部汇聚的金属较多，因此，在头部区域容易出现折叠等缺陷。图 8 为不

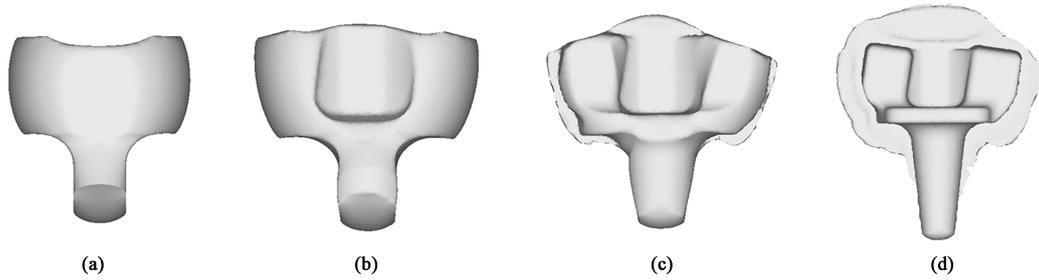


图 6 预锻过程的成形效果图

(a) 0% (b) 25% (c) 50% (d) 100%

Fig. 6 Forming effect diagrams of pre-forging process

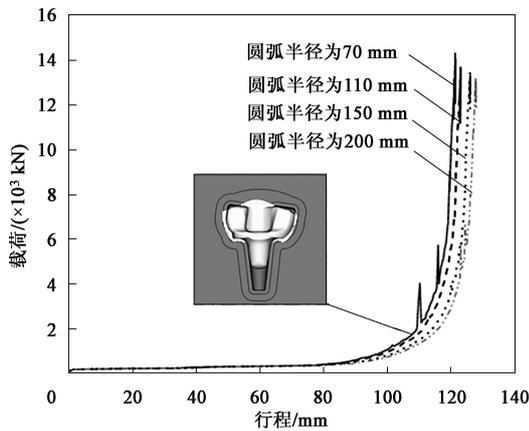


图 7 不同镦粗上模圆弧半径下预锻成形过程的行程-载荷曲线

Fig. 7 Stroke-load curves of pre-forging process under different circular arc radiuses for upsetting upper die

同镦粗上模圆弧半径下预锻件的折叠缺陷分布图。镦粗上模圆弧半径为 70 mm 时，头部飞边出现较多折叠缺陷。随着镦粗上模圆弧半径的增大，折叠缺陷减少，仅在头部飞边边缘出现少量折叠缺陷，且成形载荷不断减小（图 7）。表明圆弧形镦粗上模对锻件头部金属分流有明显效果，可有效地减少头部折叠缺陷并降低成形载荷。

### 2.3 终锻过程分析

图 9 为终锻成形过程的载荷-行程曲线。终锻过程主要分为 2 个阶段：第 1 个阶段的载荷较低且平稳上升；在型腔基本充填完整之后进入第 2 个阶段，此时转向节的大致轮廓已经成形，主要充填部位为叉部与法兰部位的圆角等难充填部位，载荷急剧上升。坯料的温度越高，成形所需载荷越小。

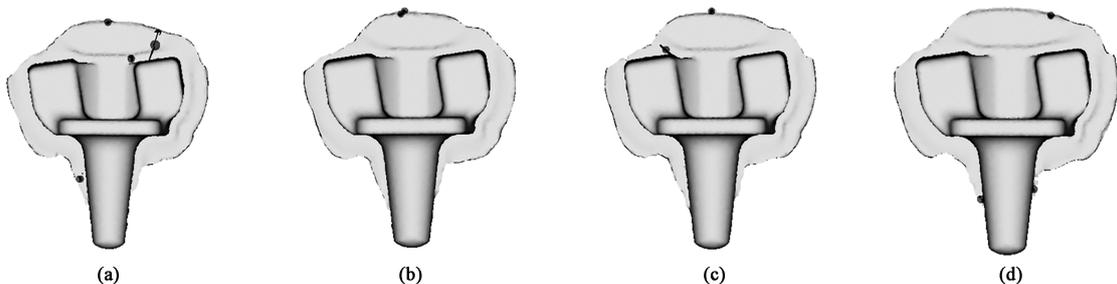


图 8 不同镦粗上模圆弧半径下预锻件的折叠缺陷

(a) 70 mm (b) 100 mm (c) 150 mm (d) 200 mm

Fig. 8 Folding defects of pre-forgings under different circular arc radiuses for upsetting upper die

图 10 为终锻成形后转向节的等效力和等效应变分布图。两叉部中间部位的变形较其他部位剧烈，法兰与杆部交接部位两侧的变形剧烈，其余部位的变形相对较均匀。两叉部中间以及叉部圆角部位出现局部应力集中现象。

### 3 实验验证

图 11 为实验完成后得到的转向节终锻件。锻件成

形良好，主体无明显折叠缺陷，飞边主要集中在头部区域，验证了模拟结果的可靠性。实验表明，采用圆弧形镦粗上模制坯对金属起到了良好的分配作用，该方法生产、成形合格锻件的材料利用率达到了 78.9%。

### 4 结论

(1) 镦粗上模圆弧的半径越大，坯料表面损伤峰值越小。但镦粗上模圆弧半径大于 200 mm 时，

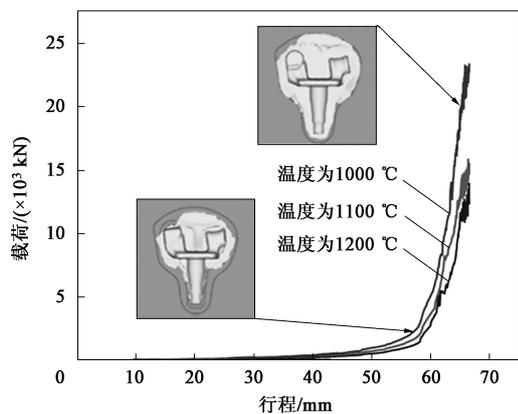


图9 终锻成形过程行程-载荷曲线

Fig. 9 Stroke-load curves of final forging process

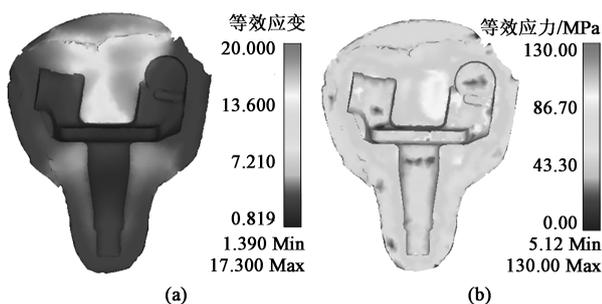


图10 终锻成形后转向节的等效应变 (a) 和等效应力 (b) 分布图

Fig. 10 Distribution diagrams of equivalent strain (a) and equivalent stress (b) for steering knuckle after final forging

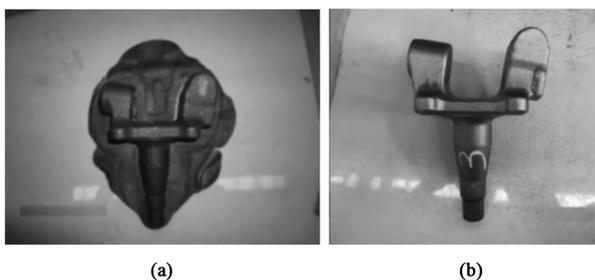


图11 转向节终锻件

(a) 带飞边 (b) 未带飞边

Fig. 11 Final forgings of steering knuckle

(a) With flash (b) Without flash

坯料表面损伤峰值反而增大。

(2) 镦粗上模圆弧半径较小时, 预锻件头部的折叠缺陷较多。随着镦粗上模圆弧半径的增大, 预锻件折叠缺陷减少。镦粗上模圆弧半径大于 100 mm 时, 有利于金属分配, 可降低预锻件头部的折叠缺陷和成形载荷。

参考文献:

[1] 赵毅, 刘淑梅, 何文涛, 等. 汽车转向节热锻工艺分析及模具结构优化设计 [J]. 精密成形工程, 2016, 8 (3): 40-44.  
Zhao Y, Liu S M, He W T, et al. Hot forging process analysis and

die structure optimization design of automobile steering knuckle [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (3): 40-44.

[2] 冯典东, 介路阳, 韩英, 等. 汽车转向节的铸造工艺模拟及优化 [J]. 长春工业大学学报, 2022, 43 (1): 28-34.  
Feng D D, Jie L Y, Han Y, et al. Simulation and optimization of casting process of automobile steering knuckle [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2022, 43 (1): 28-34.

[3] 赵宁, 张运军, 陈天赋, 等. V5 型转向节臂部锻造开裂研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (3): 6-12.  
Zhao N, Zhang Y J, Chen T F, et al. Arm forging crack of V5 type steering knuckle [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (3): 6-12.

[4] 张运军, 陈天赋, 杨杰, 等. 房车转向节整体模锻关键技术与模具装置研发 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (17): 2125-2130.  
Zhang Y J, Chen T F, Yang J, et al. Development on key technologies and facilities of integral die forging for motorhomes steering knuckles [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (17): 2125-2130.

[5] Li F J, Sun J Q, Bao J Q, et al. Failure analysis of truck steering knuckle [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106537.

[6] 单际强. 乘用车转向节铝合金铸件金属型重力铸造缺陷成因及工艺优化研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.  
Shan J Q. Causes of Defects in Aluminum Alloy Castings of Passenger Car Steering Knuckle by Metal Mold Gravity Casting and Process Optimization [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.

[7] Jeon G T, Kim K Y, Moon J H, et al. Effect of Al6061 alloy compositions on mechanical properties of the automotive steering knuckle made by novel casting process [J]. Metals, 2018, 8 (10): 857.

[8] 李宇飞, 冯志军, 李泽华, 等. 挤压铸造高强度铝合金汽车转向节铸件 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (12): 1308-1311.  
Li Y F, Feng Z J, Li Z H, et al. Squeeze casting of high strength aluminum alloy automobile steering knuckle [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39 (12): 1308-1311.

[9] Zhou J, Lin L, Luo Y. The multi-objective optimization design of a new closed extrusion forging technology for a steering knuckle with long rod and fork [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72 (9-12): 1219-1225.

[10] Zhang Y J, Cao S J, Huang M W, et al. Research and application of precision forging forming process for flat thin flash of automobile disc steering knuckle [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 50: 32-36.

[11] 韩利亚, 陈天赋, 甘万兵, 等. 高温转向节锻件自动化三维测量与精度检测技术 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (5): 53-59.  
Han L Y, Chen T F, Gan W B, et al. Automatic three-dimensional measurement and precision inspection technology for high temperature steering knuckle forgings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (5): 53-59.

[12] 成林, 张文明, 隋美丽. 热锻参数对汽车转向节力学性能的影响分析 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (9): 148-151.  
Cheng L, Zhang W M, Sui M L. Effect of hot forging parameters on mechanical properties of automobile steering knuckle [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (9): 148-151.