

一种长厚臂叉形接头锻件成形工艺与实验

王 涛^{1,2}, 赵慧敏³, 孙红星^{1,4}, 金 鑫³, 刘光辉¹, 刘百宣¹,
张 超¹, 刘 华¹

(1. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 中国机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044;
3. 宇通重工有限公司, 河南 郑州 450051; 4. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 根据长厚臂叉形接头锻件的形状特点, 分析了锻件的成形难度, 初步制定了成形工艺为热锻挤复合成形和立式反挤成形, 并采用数值模拟研究了各工序成形过程以及冲头成形力。通过后续工艺实验发现, 热锻挤复合成形工序成形的锻件在方形上端部分四角处有明显的折叠缺陷, 分析认为这是由于实验过程中锻件长时间的热量散失造成金属流动性降低而产生的。对初步拟定的成形工艺进行了改进, 改进后的成形工艺为热正挤、热锻方和热反挤, 数值模拟分析以及验证实验表明, 改进后的成形工艺可行, 并且设计了具有导向功能的模具结构, 解决了叉形接头锻件壁厚不均的问题。该成形锻件填充饱满、无缺陷, 金属流线分布连贯、合理, 成形工艺和模具寿命通过了批量生产考核。

关键词: 长厚臂; 叉形接头; 热锻挤复合成形; 立式反挤成形; 折叠

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.008

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0061-06

Forming process and experiments for a kind of fork-shaped joint forgings with long and thick arm

Wang Tao^{1,2}, Zhao Huimin³, Sun Hongxing^{1,4}, Jin Xin³, Liu Guanghui¹, Liu Baixuan¹, Zhang Chao¹, Liu Hua¹

(1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

3. Yutong Heavy Industries Co., Ltd., Zhengzhou 450051, China;

4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the shape characteristics of fork-shaped joint forgings with long and thick arm, the forming difficulty was analyzed. Then, the forming process was preliminarily formulated as hot upsetting-extrusion compound forming and vertical backward extrusion forming, and the forming process of each procedure and the forming force of punch were studied by numerical simulation. The subsequent process experiments shows that the forgings formed in the hot upsetting-extrusion compound forming process has obvious folding defect at four corners of square upper end, which is caused by long-term heat loss of forgings during experiment process resulting in the reduction of metal fluidity. Furthermore, the preliminarily drafted forming process was improved, and the improved forming process was hot forward extrusion, hot upsetting into square and hot backward extrusion. The numerical simulation analysis and verification experiments show that the improved forming process is feasible, and the mold structure with guiding function is designed to solve the problem of uneven wall thickness for fork-shaped joint forgings. The forgings are full filled and defect-free, the metal streamline distribution is consistent and reasonable, and the forming process and mold life have passed the mass production assessment.

Key words: long and thick arm; fork-shaped joint; hot upsetting-extrusion compound forming; vertical backward extrusion forming; folding

叉形零部件的品类繁多, 常见的有万向节叉、

连接叉、凸缘叉、滑动叉等。迄今为止, 我国大部分锻造行业均是采用水平分模的开式模锻工艺来生产该类锻件, 其飞边金属的消耗随着叉形件的形状复杂程度各有不同, 有高能能达到锻件自重的30%以上, 导致材料利用率低, 更伴随着加热时电能利用率的降低。近年来, 国内许多学者、工程技术人员对传统工艺进行改进, 取得了较为理想的效果。

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-09-03

基金项目: 郑州市科技重大专项资助项目 (152PZDZX007)

作者简介: 王 涛 (1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师

E-mail: 13623815363@163.com

通信作者: 刘 华 (1962-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员

E-mail: 13903832971@163.com

燕山大学的赵德颖等^[1]采用数值模拟与实验相结合的方法研究成形参数对枝杈类锻件挤压成形过程中折叠缺陷的影响,基于正交实验对底锥相对直径比值、枝杈角度、枝杈根部圆角半径等参数对折叠长度的影响程度进行了综合评价;江苏森威精锻有限公司的朱胜等^[2]对转向节叉冷挤压工艺进行了分析,采用有限元分析法分析了凸模偏载情况,对成形工艺及模具进行了改进,提高了凸模寿命,生产工艺得以稳定;中北大学的贾杨等^[3]对铝合金叉形模锻件的制坯工艺进行了研究,发现采用挤压方式制坯可以改善坯料组织,有利于终锻成形中重金属的流动,金属利用率提高;重庆大江杰信锻造有限公司的潘成海等^[4]提出了某型异形转向节 4 工序精密锻造工艺,包括锻粗、压扁、预锻、终锻工序,对该成形工艺进行了数值模拟计算,并依据模拟分析结果,对该类锻件成形的压机设备选型提出了建议。

本文讨论了一种长厚臂叉形接头,被应用在某些特种车辆中,在某些重要部位起到连接使用,其产品的力学性能及质量可靠性直接关系到车辆的安全性、稳定性。该叉形接头锻件与常见的叉形零件的形状区别较大,如图 1 所示,该锻件杆部与叉部的截面面积相差较大,叉部臂长较长且厚度较厚,此类特点给锻造成形该类零件增加了很大难度。

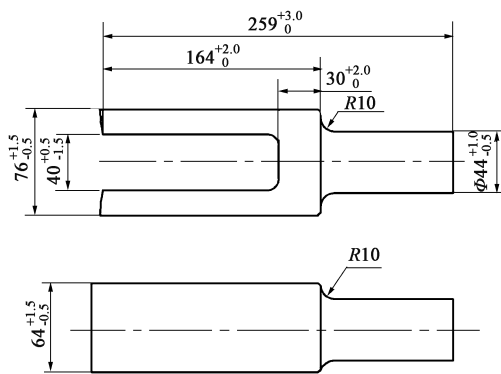


图 1 长厚臂叉形接头锻件图

Fig. 1 Drawing of fork-shaped joint forgings with long and thick arm

1 成形工艺分析

对于长厚臂叉形接头锻件,采用传统的水平分模开式热模锻工艺锻造时的成形难度非常大,其预锻工序比较复杂,终锻时由于叉臂较厚,会造成成形力较大,同时需要设计较大的拔模斜度,致使锻件的机加工余量大,成形时形成的飞边较大。综合分析,采用传统工艺成形势必会造成金属材料的大量浪费,造成

资源与能源的浪费,其产品合格率也难以保证。

根据以上对长厚臂叉形接头锻件的形状以及成形难点的分析,对比同类型锻件工艺分析改进的相关文献资料^[5-8],本文拟采用热锻挤复合成形工艺制坯,然后采用立式反挤成形工艺成形叉形接头的长厚臂部分,其成形工艺简图如图 2 所示。该成形工艺可以避免开式热模锻工艺产生的大量飞边缺陷,几乎不用设计拔模斜度即可实现顺利出模,节约大量金属材料。

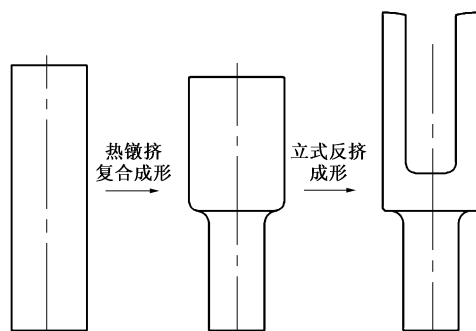


图 2 拟定成形工艺简图

Fig. 2 Schematic diagram of proposed forming process

2 成形工艺数值模拟分析

为了验证工艺的可行性,在 DEFORM-3D 中对成形工艺进行数值模拟验证。

2.1 热锻挤复合成形工序数值模拟分析

首先,确定坯料的尺寸。为了减少挤压变形的时间,棒料长度应尽可能短,考虑到最终锻件叉臂的厚度为 64 mm,以及棒料的热胀冷缩现象,原始坯料直径设置为 $\Phi 62$ mm,保证棒料可以顺利插入模具,同时减少挤压时间,并根据最终锻件的体积推算出原始棒料的长度。然后,建立本工序成形的有限元模型。如图 3 所示,模型主要由凹模、挤压筒、冲头组成,将原始棒料插入挤压筒中,在三维软件中建模并导入 DEFORM-3D 模拟软件。结合实际实验条件,并参考相关文献资料^[9-12],确立了数值模拟相关边界条件:坯料网格划分采用四面体网格单元法,划分网格数量为 150000 个,坯料温度为 1150 $^{\circ}\text{C}$,坯料与模具的摩擦因数设置为 0.3,冲头挤压速度为 15 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在 DEFORM-3D 后处理中观察锻件成形过程,如图 4 所示。棒料在凹模的方形模腔中先锻粗,随着棒料在挤压筒中逐步挤压,金属逐渐填充凹模的方形型腔,在方形型腔下端开始正挤变形,成形

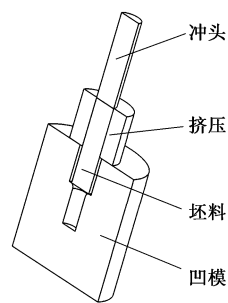


图 3 热镦挤复合成形工序有限元模型

Fig. 3 Finite element model of hot upsetting-extrusion compound forming process

出细杆部分，当棒料金属全部挤压到型腔中后下部细杆时正挤变形完成。锻件成形过程中未观察到明显的折叠现象，在成形锻件上端有明显的圆环形毛刺，这是由于冲头与挤压筒内孔有间隙造成的。图 5 为该工序成形过程中冲头的时间-载荷曲线。当棒料镦粗使金属填充凹模方形型腔时，成形力逐渐上升；当方形型腔填充饱满时冲头压力最大，达到了 1000 kN；在随后的正挤成形细杆阶段，冲头压力缓慢降低；在凹模整个型腔即将填充饱满时，冲头压力陡然增大。

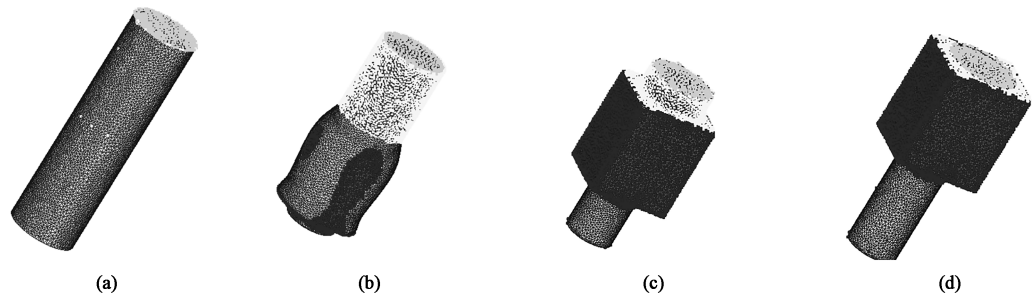


图 4 热镦挤复合成形工序模拟成形过程

(a) 第 1 步 (2) 第 114 步 (c) 第 270 步 (d) 第 360 步

Fig. 4 Simulation forming process of hot upsetting-extrusion compound forming process

(a) Step 1 (b) Step 114 (c) Step 270 (d) Step 360

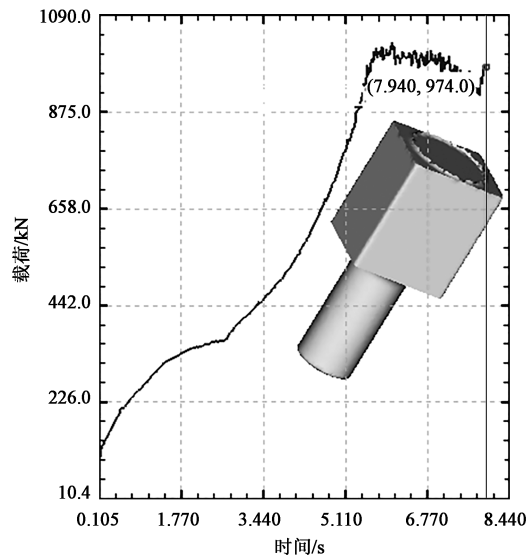


图 5 热镦挤复合成形工序冲头的载荷-时间曲线

Fig. 5 Load-time curve of punch in hot upsetting-extrusion compound forming process

2.2 立式反挤成形工序数值模拟分析

以上述成形得到的锻件形状为成形的坯料，建立本工序成形有限元模型。如图 6 所示，模型主要由凹模、反挤冲头组成，在三维软件中建模并导入 DEFORM-3D 模拟软件中继续参与计算。坯料温度

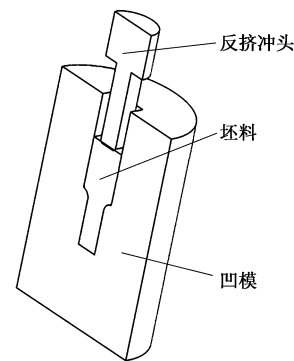


图 6 立式反挤成形工序有限元模型

Fig. 6 Finite element model of vertical backward extrusion forming process

设置为 1150 ℃，坯料与模具的摩擦因数设置为 0.3，冲头挤压速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算完毕后在 DEFORM-3D 的后处理中观察反挤成形长厚臂的过程，如图 7 所示。方形冲头下端接触坯料后挤压坯料上端部，坯料金属沿方形冲头两侧向上流动，冲头逐步下压直至挤压到指定位置后停止，整个成形过程中未发现折叠以及其他明显缺陷。图 8 显示了立式反挤成形过程中方形冲头的受力，可以看出：冲头接触金属坯料后，压力开始升高；当金属开始反挤变形时压力基本稳定在 780 kN，冲头承受的单

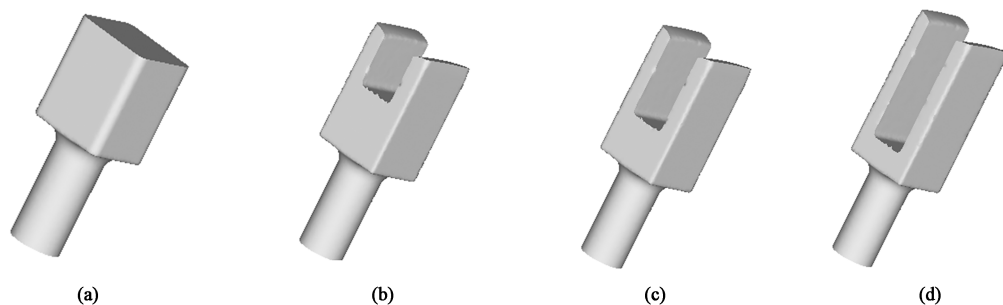


图 7 立式反挤成形工序模拟成形过程

(a) 第 1 步 (b) 第 73 步 (c) 第 113 步 (d) 第 168 步

Fig. 7 Simulation forming process of vertical backward extrusion forming process

(a) Step 1 (b) Step 73 (c) Step 113 (d) Step 168

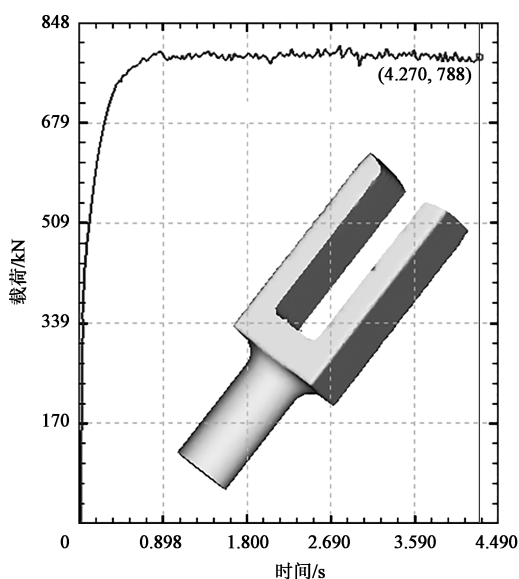


图 8 反挤成形工序冲头的载荷-时间曲线

Fig. 8 Load-time curve of punch in backward extrusion forming process

位压力为 304 MPa, 远未达到冲头应承受的极限。

3 成形工艺实验验证

采用上述成形工艺方案设计模具, 并进行实验验证。在进行第 1 步热镦挤复合成形工序时发现, 所成形锻件在方形上端部分四角处有明显的折叠缺陷, 如图 9 所示。经过后续机加工检验发现, 折叠在四角处的延伸较深, 无法通过少量机加工消除。实验中出现了与数值模拟时不同的现象, 经过分析认为, 由于坯料的挤压行程长, 同时锻件坯料在实验过程中热量散失严重, 尤其是与模具接触部位的热量散失严重, 以及在实验过程中辅助操作如热坯料的转移、压机的操作等造成过长时间的热量流失, 以上因素均会造成后挤压进入模腔中的金属的温度

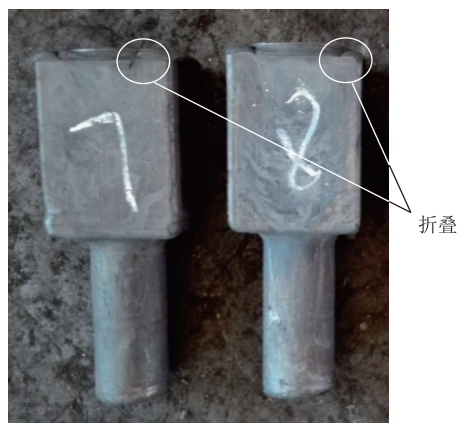


图 9 热镦挤复合成形工序的成形锻件

Fig. 9 Forgings formed by hot upsetting-extrusion compound forming process

降低, 使其流动性降低, 如同较硬的物体扎进较软的物体中时软硬部分有明显界限。该部位的折叠缺陷无法在后续的锻造成形过程中消除, 因此, 该工序方案需要改进。

4 工艺改进及验证

为了避免上述热镦挤复合成形工序中由于变形量过大、变形时间过长造成锻件出现折叠缺陷, 对成形工艺进行改进。将上述热镦挤复合成形工序分解为两步: 首先将棒料正挤成形出细杆部分, 然后再将上部圆棒料镦粗为长方体。如图 10 所示, 改进后长厚臂叉形接头的成形工艺为: 热正挤, 圆棒料正挤成形细杆部分; 热镦方, 圆棒料热镦成形长方体部分; 热反挤, 方坯料部分反挤成形长厚臂部分。

数值模拟分析显示, 热正挤冲头最大成形力为 800 kN, 热镦方冲头的最大成形力为 1820 kN, 两个过程中冲头所承受的单位成形压力远低于其承载极限, 其成形锻件也无明显缺陷。

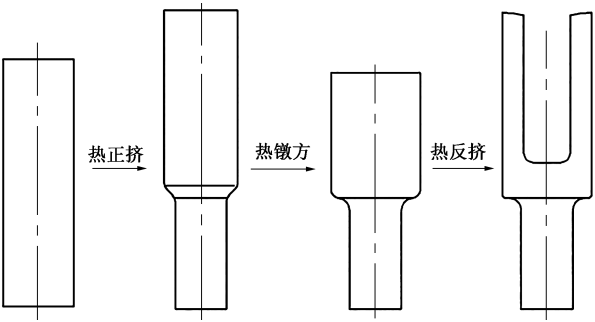


图 10 改进成形工艺简图
Fig. 10 Schematic diagram of improved forming process

以改进工艺方案制作成形模具，进行了实物实验。热正挤时，仅对坯料进行部分加热，即仅加热变形部分金属；热镦方时，加热上部圆棒料；成形后将坯料直接放入热反挤凹模中进行反挤变形。成形工序中的锻件如图 11 所示，热正挤、热镦方工序成形的锻件填充饱满，未发现有折叠缺陷，成形力略高于数值模拟值，热正挤冲头的最大成形力为 910 kN，热镦方冲头的最大成形力为 2030 kN；热反挤成形长厚臂过程与上述数值模拟过程相同，成形锻件填充饱满，冲头的最大成形力为 850 kN。实际成形力略高于数值模拟结果，与坯料成形过程中热量散失造成金属流动性差有关。对成形锻件的金属流线进行了检测，图 12 为锻件金属流线分布图，金属流线分布与叉形零件外轮廓相符，流线连贯，结合图 12 分析该零件的使用状态，可以看出零件工作时所受拉应力的方向与流线方向平行，流线分布有利于零件受力。



图 11 改进成形工艺各工序的成形锻件
Fig. 11 Forgings formed by each process of improved forming process

对改进成形工艺进行了小批量化生产验证。如图 13 所示，成形锻件的填充较为饱满，形状满足尺寸要求，表明长厚臂叉形接头锻件改进后的成形工艺具有可操作性。在后续的生产过程中发现，反挤成形工序冲头易过热变形，反挤冲头下端头部与金



图 12 成形锻件金属流线分布
Fig. 12 Distribution of metal streamline for formed forgings



图 13 小批量生产的锻件
Fig. 13 Forgings produced in small batches

属的接触时间长，且坯料金属在该处流动产生强烈的摩擦，该部位金属极易退火并产生塌陷，塌陷金属在冲头两侧堆积，会造成冲头出模困难，因此，锻造过程中要对反挤压冲头进行充分冷却，并使用润滑效果较好的润滑剂。反挤较深的孔或叉形锻件时，由于冲头过长会出现锻件壁（臂）厚不均的问题，长厚臂叉形接头锻件的实验生产过程中也出现此问题，针对叉形锻件成形过程中冲头未被金属完全包裹的特点，设计并制造了具有冲头导向功能的反挤压模具，如图 14 所示，反挤压冲头侧部带有导向凸台，凸台与冲头导向块中的导向凹槽配合使用，坯料完全放入凹模中，挤压时冲头伸入导向块中，冲头在接触成形坯料之前冲头导向凸台滑入冲头导向块凹槽中，以保证在成形过程中反挤压冲头的位

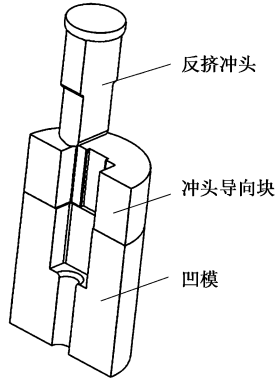


图 14 具有冲头导向功能的反挤压模具
Fig. 14 Backward extrusion mold with punch guiding function

置精度, 使长厚臂叉形接头锻件的臂部厚度均匀。

5 结语

根据长厚臂叉形接头锻件的形状特点, 初步拟定了锻件成形工艺, 并且进行了有限元数值模拟和实验验证。实验发现, 热锻挤复合成形工序成形的锻件在方形上端部分四角处有明显的折叠缺陷, 与数值模拟结果不相符, 经过分析认为这是由于实验过程中锻件长时间的热量散失导致金属流动性降低而造成的。为此对成形工艺进行了改进, 通过数值模拟和实验验证, 最终确定了长厚臂叉形接头锻件的合理成形工艺为: 热正挤—热锻方—热反挤, 各工序成形的锻件填充饱满、无缺陷, 成形锻件保留有良好的金属流线。在实际生产过程中对模具进行了持续改进, 根据叉形锻件反挤成形过程中冲头未被金属完全包裹的特点, 设计了带有导向功能的模具结构, 保证了长厚臂叉形接头锻件臂部的厚度均匀性。通过理论计算、数值模拟、实验验证, 确立了稳定的成形工艺和可靠性较高的模具结构, 成形工艺和模具寿命及精度通过了批量生产考核。

参考文献:

- [1] 赵德颖, 张连东, 朱恩领. 枝杈类锻件挤压成形折叠缺陷影响参数分析 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (1): 41-45.
Zhao D Y, Zhang L D, Zhu E L. Analysis of affecting parameters on folding defects of branch-type forgings in the process of extrusion [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (1): 41-45.
- [2] 朱胜, 胡成亮, 季微微, 等. 转向节叉冷挤压工艺分析 [J]. 模具技术, 2009, (3): 24-26, 47.
Zhu S, Hu C L, Ji W W, et al. Process analysis for the cold extrusion of steering yoke [J]. Die and Mould Technology, 2009, (3): 24-26, 47.
- [3] 贾杨, 王松林. 铝合金叉形模锻件的制坯工艺研究 [J]. 轻合金加工技术, 2014, 42 (1): 57-59.
Jia Y, Wang S L. Research on blanking process for aluminum alloy fork forging [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2014, 42 (1): 57-59.
- [4] 潘成海, 曾琦, 董旭刚, 等. 汽车转向节精锻工艺设计与锻造主机选型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 26-31.
Pan C H, Zeng Q, Dong X G, et al. Design on precision forging process of automobile steering knuckle and selection of forging main press [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 26-31.
- [5] 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.
- [6] 李路, 周杰, 卢先正, 等. 转向节热挤压方案工艺性对比分析 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (23): 131-133, 137.
Li L, Zhou J, Lu X Z, et al. Comparative analysis about different processes of knuckle hot extrusion [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (23): 131-133, 137.
- [7] Hu C L, Zeng F, Zhao Z, et al. Process optimization for design of duplex universal joint fork using unequal thickness flash [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2015, 16 (12): 2517-2527.
- [8] 苗站, 张治民, 于建民, 等. 不同参数对铝合金枝杈类构件金属流线的影响及优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 105-110.
Miao Z, Zhang Z M, Yu J M, et al. Influence of different parameters on metal streamline of aluminum alloy part with branch and optimization [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 105-110.
- [9] 王熠昕, 权国政, 黄文超. 汽车万向节叉热挤压成形的数值模拟分析 [J]. 精密成形工程, 2010, 2 (6): 60-63.
Wang Y X, Quan G Z, Huang W C. Simulation analysis of hot extrusion forming for universal joint fork of automobile [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2 (6): 60-63.
- [10] Xu J Y, Sun B S, Li N. Research on forging forming force in the composite technology of cross wedge rolling (CWR) and forging for universal joint fork [J]. Metallurgy, 2019, 58 (1): 131-134.
- [11] Hawryluk M, Jakubik J. Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 396-409.
- [12] 权国政, 王熠昕, 周杰. 万向节叉正反挤压成形的宏微观耦合模拟 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (21): 105-107.
Quan G Z, Wang Y X, Zhou J. Macro-micro coupled simulation of positive and negative extrusion for universal joint fork [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (21): 105-107.

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益, 坚决抵制学术不端行为, 积极倡导优良学风, 努力为学术创新营造良好氛围, 本刊郑重声明: 对一稿多投, 重复发表, 存在署名有争议, 引用他人著述未注明出处, 抄袭、剽窃、弄虚作假, 或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章, 坚决拒绝刊登。一经发现, 立即撤稿, 并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚, 情节严重者, 将以适当方式予以公布, 该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部