

滑动叉模锻成形技术

程俊伟^{1,2}, 常世超¹, 刘其勇³, 陈喜乐³, 郭艳珺³

(1. 郑州航空工业管理学院 材料学院, 河南 郑州 450046; 2. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 许昌中兴锻造有限公司, 河南 许昌 461111)

摘要: 叉类锻件的工艺难点是劈叉, 其材料利用率一般较低。通过分析某一型号短空心轴滑动叉的外形和金属分布规律, 提出了弯曲成形 U 形叉、挤压成形空心杆的模锻思路, 制定了 5 步模锻工艺方案。预锻成形时进行弯曲和挤压复合变形, 毛坯在凸模作用下弯曲为 U 形, 并挤压成形部分杆部; 终锻成形时, 利用预锻件的外形定位, 挤压成形空心杆部, 并对 U 形叉进行整形。模拟了预锻和终锻成形过程, 验证了理论分析的正确性。根据制定的成形方案, 设计制造了锻模, 并模锻成形出合格的锻件。该方案避免了开式挤压劈叉工艺造成的材料流动不均匀的问题, 同时成形了空心杆部、降低了金属消耗和机械加工量, 而模锻成形产生的飞边和冲孔连皮可利用模具切除。相对于坯料水平分模开式模锻, 该方案材料利用率提高约 15%, 对生产具有一定的指导意义。

关键词: 滑动叉; 模锻; 劈叉; 预锻; 终锻

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.003

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 11-0022-06

Die forging technology for sliding fork

Cheng Junwei^{1,2}, Chang Shichao¹, Liu Qiyong³, Chen Xile³, Guo Yanjun³

(1. School of Materials, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Xuchang Zhongxing Forging Co., Ltd., Xuchang 461111, China)

Abstract: The main process difficulties for fork forgings are to split fork which has lower material utilization. Therefore, through the analysis on the shape and metal distribution law of a certain type of short hollow shaft sliding fork, the die forging idea of bending U-shaped fork and extruding hollow rod was proposed, and a five-step die forging process scheme was proposed. A compound deformation of bending and extrusion was conducted in the pre-forging. The blank was bent into U-shape under the action of punch, and the part of rod was extruded. In the final forging, the shape of pre-forgings was used for positioning, the hollow rod was extruded, and the U-shaped fork was shaped. Then, the deformation processes of pre-forging and final forging were simulated to verify the correctness of theoretical analysis. Furthermore, based on the forming scheme, the forging mold was designed and manufactured, and the qualified forgings were gotten. Using the designed process, the problem of uneven material flow was avoided caused by the open extrusion split process, and the hollow rod was extruded at same time, which reduced the material consumption and the subsequent machining quantity. In addition, the flash and punched skins produced by die forging could be removed by the mold. Relative to the conventional horizontal placing open die-forging process, the material utilization rate is improved by about 15%. Thus, the scheme has certain guiding significance for production.

Key words: sliding fork; die forging; split; pre-forging; final forging

汽车上任一对轴线相交且相对位置经常变化的转轴之间的动力输送, 均需通过万向传递装置来传递; 万向节叉是该装置的关键零件, 成对使用, 用

量较大。在非等速传动轴中, 滑动叉通过花键副与花键轴连接, 传递扭矩的同时还要通过花键副的轴向移动来适应车轴间距的变化。滑动叉和十字轴配合使用传递动力, 要求其具有较高的综合力学性能, 应采用模锻方式生产毛坯^[1-3]。

某型号滑动叉零件的外形结构如图 1 所示, 由叉部和带花键孔的短杆部两个部分组成。该类叉形件的主要成形工艺问题是锻件飞边大、材料利用率低。针对此问题, 国内外许多学者、工程师研究了

收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2022-02-26

基金项目: 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题研究成果 (P2019-016); 河南省高等学校重点科研项目计划 (17A460027); 许昌市转型升级创新专项 (20200111022)

作者简介: 程俊伟 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: hustejw@163.com

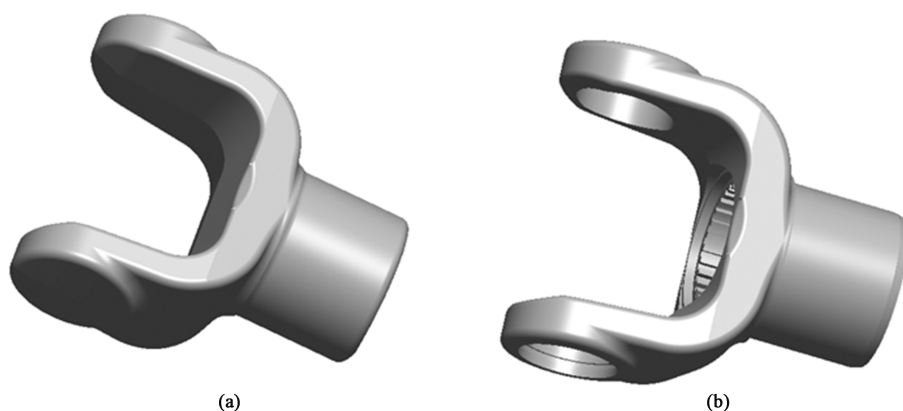


图 1 滑动叉 3D 造型

(a) 锻件 (b) 加工后的零件

Fig. 1 3D modeling of slide fork

(a) Forgings (b) Machined part

不同形式的成形方案,探讨了模锻成形的可行性和经济性,其主要区别在于锻件叉部的成形方式不同。劈料台劈叉工艺简单、便于实施,目前在生产中的应用最广泛,但是材料利用率低;闭式挤压劈叉、开式挤压劈叉、压扁—聚料—弯曲成形叉形等工艺^[3-8],相对于劈料台劈叉,材料利用率得到了大幅提高,但是存在其他工艺问题,如产生的纵向飞边不易切除、模具寿命低、生产效率低等难以在实际生产中推广。

因此,针对不同外形特征和尺寸的叉类件,开发材料利用率相对较高的模锻成形工艺,对实现、推广绿色制造具有重要的现实和理论意义。

1 工艺分析

1.1 锻件的形状结构分析

(1) 锻件的形状复杂系数

锻件的形状复杂系数反映了模锻成形的难易程度,复杂系数越小,需要转移的金属体积越多,一般来说制坯工步越多。对图 1 所示的锻件,其形状复杂系数 C_v 为:

$$C_v = \frac{V_d}{V} = 0.19 \quad (1)$$

式中: V_d 为锻件体积,为 400557 mm^3 ; V 为包容锻件回转体的最小体积,为 2153704 mm^3 。

依据形状复杂系数对锻件进行分类的办法,该锻件属于较复杂锻件^[9],成形难度较大,需要转移的金属较多。

(2) 锻件沿轴线的金属体积分布

锻件沿轴线的金属体积分布可以用其截面分布

图表示,分布图能够较为直观地表示变形时需要转移的金属体积的大小、方向和距离,是制定模锻成形工步的依据。根据成形时坯料的放置方位,轴部的孔可以冲出,也可以不冲出,图 2 为两种情形下金属沿轴线的截面分布图,轴线距离自叉部顶端至圆柱底端面。

如图 2 所示,模锻成形时不管是否成形轴部的孔,金属沿轴线的分布均很不均匀,两叉部需向轴部转移的金属体积较多,特别是 U 形叉和杆部的连接处,需要聚集较多的金属体积。根据金属变形方式不同,这种转移有的较为困难,有的较为容易,从而可能形成不同大小的飞边。

合理的模锻成形方案需是以尽可能少的工步来成形锻件;飞边的宽度合理、均匀;终锻时变形量较小,成形力在合理的范围内;终锻模具有较长的寿命。

1.2 模锻成形工艺方案分析

根据叉形件锻件的形状特点,该锻件的成形方案有水平分模开式模锻、闭式挤压成形和立式曲面分模开式模锻 3 种方案。本文仅研究第 3 种模锻成形方案的可行性与合理性。

叉形件的劈叉制坯是该类锻件模锻成形的工艺难点,主要是由于劈叉时材料非完全对称流动造成的。该锻件的轴部长度较短且非实心,因此,该处需要的金属相对较少,可以采用弯曲成形叉部形状,在预锻(制坯)时基本成形叉部形状,并在叉形的底部聚集足够的金属,初步挤压空心杆部,其工步图如图 3 所示。

该模锻成形方案分为 5 工步,分别为镦粗、预

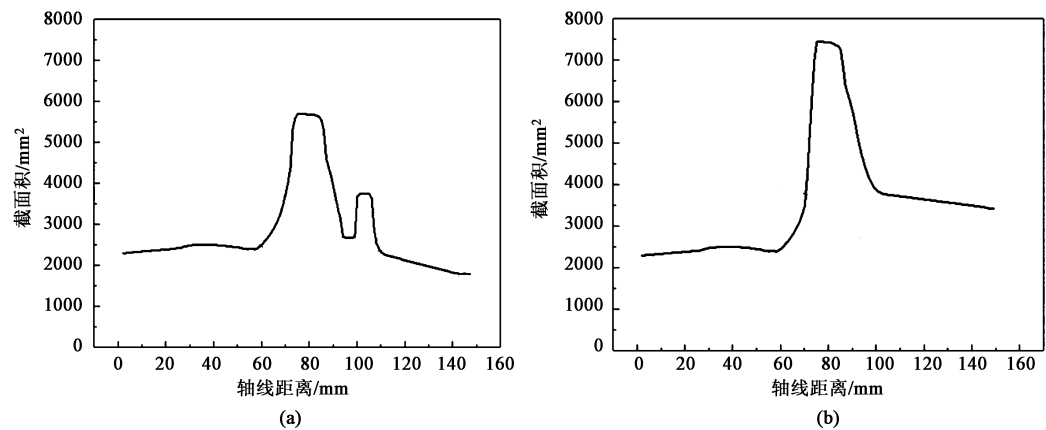


图 2 锻件截面分布图
(a) 实心轴锻件 (b) 空心轴锻件
Fig. 2 Distribution diagrams of cross section for forgings
(a) Forgings with solid shaft (b) Forgings with hollow shaft

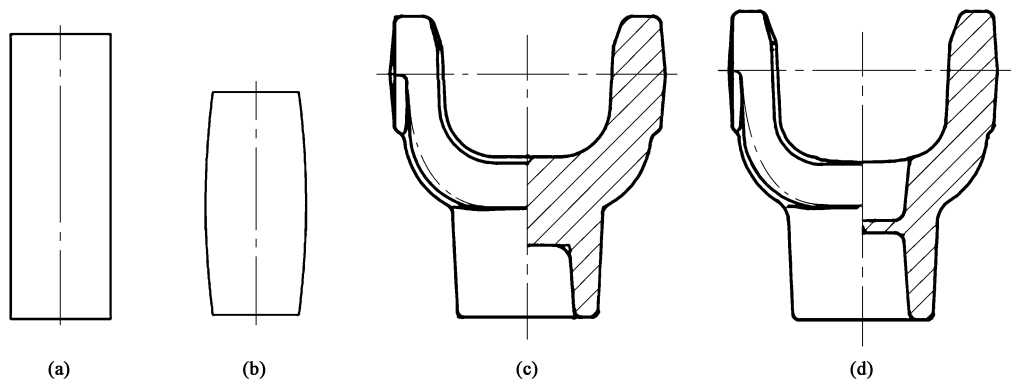


图 3 立式曲面分模开式模锻成形工步图
(a) 坯料 (b) 镦粗 (c) 预锻 (d) 终锻
Fig. 3 Forming steps drawing of open die forging for vertical curved surface parting
(a) Blank (b) Upsetting (c) Pre-forging (d) Final Forging

锻、终锻、切边、冲孔（第 4、第 5 工步未在图 3 中列出）。镦粗时去除氧化皮，并在坯料的中部聚集金属；预锻工步是该成形方案的关键，决定了该成形方案的成功与否。

(1) 预锻成形分析

预锻成形示意图如图 4 所示，镦粗后的圆柱形坯料放置在预锻型腔的定位台上，被水平置于凹模的定位槽内，在凸模的作用下，坯料发生弯曲和挤压复合变形。

坯料两端支撑，在凸模作用下发生自由弯曲；当凸模和凹模两侧的间隙小于坯料的直径时，坯料两端部分的金属受到挤压变形，凸模正下方的金属近似刚性平移（图 4 中 A 区域内金属），带动两端的金属向下移动，直至接触凹模内表面为止。在这一阶段，金属的变形区域局限于两叉部，近似为局部变形，变形力一般较小。

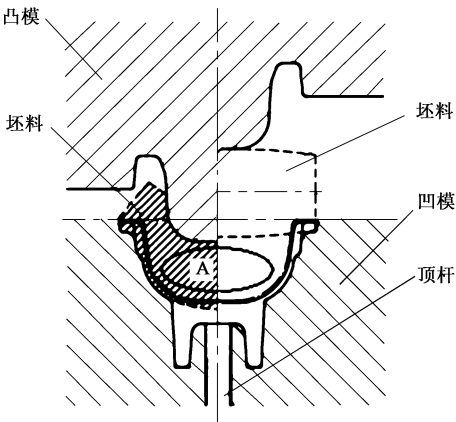


图 4 预锻成形示意图
Fig. 4 Schematic diagram of pre-forging

随着凸模继续下行，凸模和凹模之间的间隙继续减小，坯料整体上处于压缩变形状态，凸模正下

方的金属产生正挤压成形杆部。此时变形方式可以近似为宽度不变、发生平面变形的坯料上挤压环形凸起^[10]。图 5 为平砧间平面应变锻粗变形示意图, 其中, 变形体的宽度和厚度为 b 和 h , 选择的变形体微单元体的位置为 x 、厚度为 dx , σ_x 和 $\sigma_x + d\sigma_x$ 为变形体微单元体左右两侧的正应力, σ_y 为变形体端面的正应力, K 为材料的剪切强度, τ 为变形体端面摩擦力。

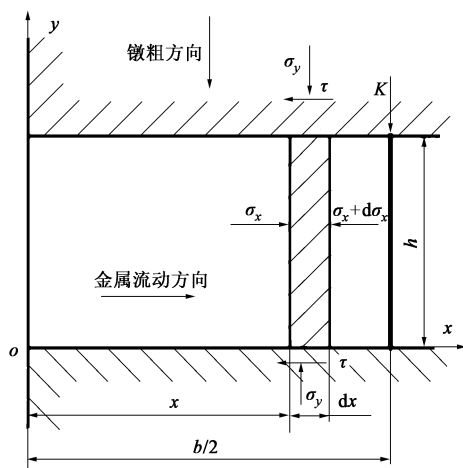


图 5 平砧间平面应变锻粗变形示意图

Fig. 5 Schematic diagram of plan strain upsetting in flat anvil

坯料表面所受的平均压力 p 为:

$$p = 2K \left(1 + \frac{m}{4} \cdot \frac{b}{h} \right) \quad (2)$$

式中: m 为常摩擦因数。

式 (2) 表明, 坯料表面受到的平均压力 p 随着 b 值的增大、 h 值的减小而快速上升。

随着凸模下行, 坯料的厚度减小, 和凸模接触的长度增加, 成形力快速增大。因此, 在预锻时成形的空心杆部的高度能够方便在终锻时定位预锻件即可, 不建议成形大部分的杆长。

在整个预锻成形过程中, 材料始终受压应力, 这是一种有利于塑性变形的应力状态, 材料不存在变形开裂问题。

(2) 终锻成形分析

终锻成形时, 预锻件与终锻模具相对位置如图 6 所示, 其中 L 为飞边槽桥部宽度。终锻时的变形主要有两部分: 成形空心杆部和叉部的准确形状。

杆部区域为正挤压且为局部变形, 只要区域 D (图 6 中虚线部分) 有足够的金属且材料处于变形温度范围内, 则变形较容易进行, 成形力较小。

根据模锻成形工步, 终锻件区域 D 的体积为

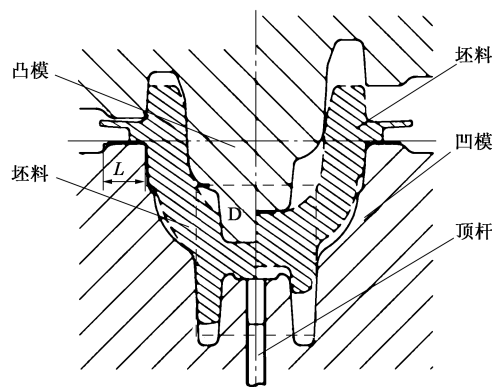


图 6 终锻成形示意图

Fig. 6 Schematic diagram of final forging

V_1 , 预锻件区域 D 的体积为 V_2 , 则:

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\% \approx 11\% \quad (3)$$

相对于锻件, 该部分聚集的金属体积约有 11% 的盈余, 可满足终锻成形要求。

挤压空心杆部时, 可以近似看做将直径 $d_0 = \Phi 65$ mm 的坯料经正挤压为内径 $d = \Phi 40$ mm 的空心管, 其断面收缩率 ε_1 为:

$$\varepsilon_1 = \frac{\pi d^2}{\pi d_0^2} \times 100\% = \frac{40^2}{65^2} \times 100\% = 37.9\% \quad (4)$$

可以看出, 杆部的断面收缩率 ε_1 处在许可的范围 [25%, 75%] 内^[10]。

在终锻成形的末段, 两叉部分的金属整体上为锻粗变形, 只要飞边槽桥部宽度 L 设置合理, 可成形锻件的两叉形状, 且能够控制成形力在合理的范围内。

2 数值模拟

采用模拟软件对滑动叉模锻成形过程进行数值模拟, 验证模锻成形工步设计的合理性。坯料模型设为刚塑性有限元模型, 材料为 45 钢, 选用软件材料库中的 AISI-1045 钢替代。为了减少计算量, 不考虑温度变化对材料充模的影响, 坯料温度设置为 1150 °C, 取 1/4 模型模拟计算; 网格划分选用绝对尺寸模式并设置最小尺寸为 1.5 mm; 摩擦模型选用剪切模型, 常摩擦因数 $m=0.3$; 凸模的速度设置为 $600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[8,11-12]。

2.1 预锻成形模拟

图 7a~图 7d 分别为预锻成形时凸模从坯料变形位置下行 38.0、46.9、55.9 和 64.9 mm 时的等效应变分布图, 其中 B 、 C 数值为等效应变等高线的数值, $P_1 \sim P_{12}$ 为在中心对称面选取的 3 组 12 个点。

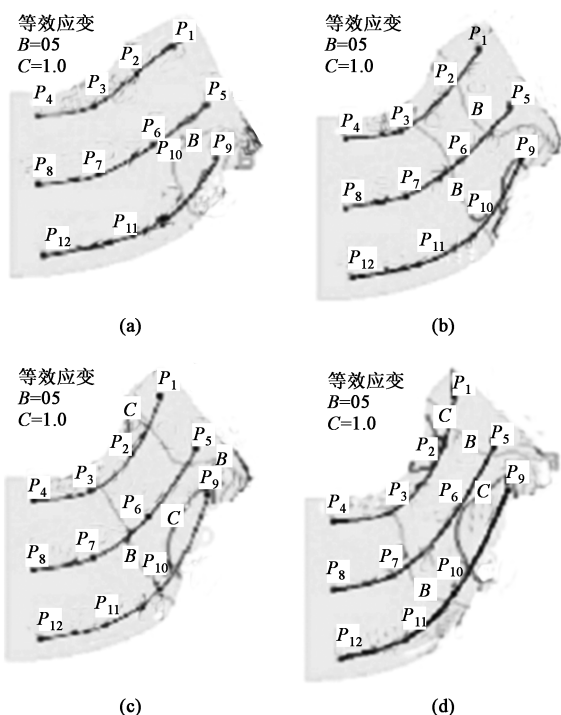


图 7 预锻成形模拟结果

- (a) 凸模下行 38.0 mm (b) 凸模下行 46.9 mm
(c) 凸模下行 55.9 mm (d) 凸模下行 64.9 mm

Fig. 7 Simulation results of pre-forging

- (a) Punch down of 38.0 mm (b) Punch down of 46.9 mm
(c) Punch down of 55.9 mm (d) Punch down of 64.9 mm

图 7 显示, 坯料的变形总体上比较均匀, 且变形主要集中在弯曲圆角至端部的一段区域。随着凸模下行, 凸、凹模的间隙逐渐减小, 坯料发生挤压变形, 截面由圆形逐渐变为椭圆形, 在凸模的作用下, 沿叉的轮廓方向有一定的伸长。从 $P_1 \sim P_4$ 、 $P_5 \sim P_8$ 、 $P_9 \sim P_{12}$ 连线的变化明显看出, 该部分产生一定的伸长变形, 且端部的伸长量大, 向对称面的方向逐渐减小; 凸模正下方的材料近似刚性平移。

这种变形特征, 有利于在预锻成形叉部形状的同时, 在其底部保留较多的材料, 利于终锻成形时挤压成形杆部的形状。

在以上变形过程中, 除了凸模正下方的材料外, 其余部分材料受到模具的挤压作用, 在压应力的作用下能够保持较好的塑性, 使材料的塑性得到了充分的发挥而未产生拉裂问题。

2.2 终锻成形模拟

图 8a 和图 8b 分别为终锻成形时坯料和模具的初始相对位置、凸模实际下行 27.0 mm (从凸模实际挤压孔开始算起) 时的等效应变分布图, 其中 B 、 C 的数值为等效应变等高线的数值。

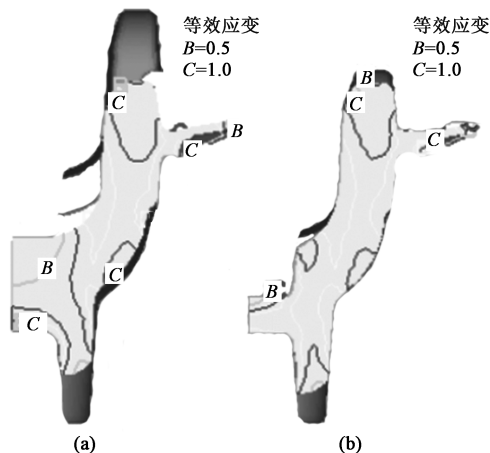


图 8 终锻成形模拟结果

- (a) 预锻成形时坯料的初始位置 (b) 凸模下行 27.0 mm 的变形

Fig. 8 Simulation results of final forging

- (a) Initial position of blank in pre-forging
(b) Deformation of punch down of 27.0 mm

在变形的初始阶段, 凸模和坯料局部接触, 随着凸模下行挤压成形空心杆部, 这种局部变形方式可使挤压较为容易进行。在变形的末段, 两叉部的变形相当于整形, 仅发生较小的镦粗量, 只要飞边槽设计合理, 将成形力控制在合理的范围内, 便可使终锻模具具有较高的寿命。

预锻和终锻成形时金属流动过程的模拟结果基本和理论分析一致, 说明了该方案的理论分析基本是合理、可行的。

3 实验

根据设计的模锻成形方案, 设计、制造了锻模, 如图 9 所示。锻模分为预锻模块和终锻模块, 在预锻模块上设置有镦粗平台。锻模安装在 2500 t 高能螺旋压力机模锻成形; 切边、冲孔分别在 250 t 曲柄压力机上完成, 3 台压力机成一条生产线, 依次完成成形、切边、冲孔; 采用电加热、石墨混合液润

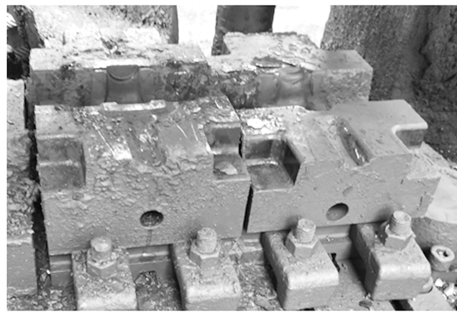


图 9 锻模照片

Fig. 9 Photo of forging die

滑。在该锻模上成形的锻件和飞边如图 10 所示, 飞边外形分布与模拟结果基本一致。

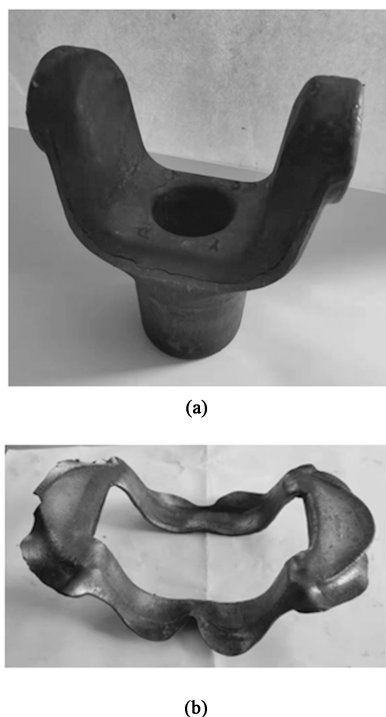


图 10 锻件 (a) 及飞边 (b) 照片
Fig. 10 Photos of forgings (a) and flash (b)

对制定的模锻成形工艺方案进行了小批量生产, 工艺稳定, 经检测, 锻件的质量和几何尺寸均满足技术要求, 相对于坯料水平分模开式模锻方案, 材料利用率提高约 15%。这表明了此成形方案是合理、可行的, 具有一定的先进性。

4 结论

(1) 针对研究对象的形状特点和金属沿轴线的分布规律, 根据叉部成形的基本方式, 提出了弯曲挤压复合成形叉部、挤压成形空心杆部的思路, 制定了 5 工步模锻工艺, 并分析了预锻、终锻成形时金属的流动规律, 理论分析合理。

(2) 采用 Deform 软件对预锻、终锻的成形过程进行了模拟, 模拟结果与理论分析吻合, 弯曲挤压复合成形叉部形状时, 材料在压应力作用下, 内外侧金属发生伸长变形, 并在叉的底部保留了足够体积的金属, 以便在终锻成形时挤压成形锻件的杆部。

(3) 根据优化后的方案, 设计并制造了锻模, 并进行了小批量生产, 得到了合格锻件; 相对于坯料水平分模开式模锻方案, 飞边合理, 材料利用率提高约 15%。因此, 该模锻成形方案具有一定的理

论与现实意义。

参考文献:

- [1] 朱伟成. 汽车零件精密锻造技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
Zhu W C. Precision Forging Technology of Automobile Parts [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999.
- [2] 张才东, 李伟, 白玉冰. 万向节叉锻造成形工艺改进 [J]. 锻造与冲压, 2019, (21): 54-56.
Zhang C D, Li W, Bai Y B. Improvement of universal joint fork forging process [J]. Forging & Metalforming, 2019, (21): 54-56.
- [3] 程俊伟, 李思忠, 冯宪章, 等. 汽车滑动叉闭式模锻工艺研究 [J]. 锻压技术, 2014, 39 (1): 21-24.
Cheng J W, Li S Z, Feng X Z, et al. Study on closed die forging process for auto slide fork part [J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39 (1): 21-24.
- [4] 高锦张. 塑性成形工艺与模具设计 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
Gao J Z. Plastic Forming Process and Die Design [M]. 3rd Edition. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [5] 孙瑜. 叉类件劈叉变形规律及锻造成形工艺研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
Sun Y. Research on the Splitting Deformation Law and Forging Technology of Fork-shaped Forgings [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [6] 文琰, 卢凤兰, 周杰. 传动轴万向节叉精密成形研究与试验 [J]. 金属成形工艺, 2003, 21 (4): 66-68.
Wen L, Lu F L, Zhou J. Study and test of precision forming of universal joint fork of transmission shaft [J]. Metal Forming Technology, 2003, 21 (4): 66-68.
- [7] 陈胜. 万向节叉锻造成形过程模拟与分析 [J]. 金属加工: 热加工, 2015, (15): 22-24.
Chen S. Simulation and analysis of forging process for universal joint fork [J]. MW Metal Forming, 2015, (15): 22-24.
- [8] 夏巨湛. 闭式模锻 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
Xia J C. Close Die Forging [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [9] 马勇, 赵亚培, 彭程, 等. 法兰盘热挤压工艺设计 [J]. 精密成形工程, 2013, 5 (6): 46-50.
Ma Y, Zhao Y P, Peng C, et al. Process design and analysis of hot extrusion of flange [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5 (6): 46-50.
- [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] Sheljaskov S. Current level of development of warm forging technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, (46): 3-18.
- [12] 李云松, 李彩霞, 毕江涛. 基于有限元方法的支承法兰盘结构优化研究 [J]. 机械, 2010, 37 (5): 15-17.
Li Y S, Li C X, Bi J T. A study of structural optimization of bearing flange based on finite element method [J]. Machinery, 2010, 37 (5): 15-17.