

板体锻造工艺优化及试验验证

闫红艳¹, 王志科¹, 蒋起臣², 王永生², 张杜明², 王丽霞¹, 杨 勇¹

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 北京北方车辆集团有限公司, 北京 100072)

摘要: 优化了板体的锻造工艺, 将锻造工艺中的平面镦粗去氧化皮工步优化为成形镦粗, 将原镦粗的扁平形状改为中间低两边高的形状, 以达到更合理的材料分配。通过优化成形镦粗的形状和高度, 将终锻模具的最大等效应力降低了 30% 左右, 终锻模具易磨损位置的磨损量降低了 25% 左右, 达到了提高终锻模具寿命的目的。同时, 优化了顶杆的安装位置, 在顶杆位置处增加余料仓, 增加材料的流动空间, 降低顶杆受力, 可以有效提高顶杆寿命。试验发现, 成形镦粗件的长度对终锻成形的影响不容忽视, 成形镦粗件长度应小于锻件长度, 否则容易产生折叠缺陷。将试生产锻件与模拟结果对比, 可以确认优化后的成形镦粗工步和顶杆余料仓的作用是有有效的。

关键词: 板体; 镦粗; 模具磨损; 等效应力; 余料仓

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.006

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0036-06

Optimization on plate body forging process and experimental verification

Yan Hongyan¹, Wang Zhike¹, Jiang Qichen², Wang Yongsheng², Zhang Duming², Wang Lixia¹, Yang Yong¹

(1. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd. CAM, Beijing 100083, China;

2. Beijing North Vehicle Group Co., Ltd., Beijing 100072, China)

Abstract: The forging process of plate body was optimized, the plane upsetting and descaling step in the forging process was optimized to forming upsetting, and the flat shape of the original upsetting was changed to a shape with a lower middle and higher sides to achieve a more reasonable material distribution. Then, by optimizing the shape and height of forming upsetting, the maximum equivalent stress of the final forging mold was reduced by about 30%, and the wear amount of the easy-wear position in the final forging mold was reduced by about 25%, achieving the purpose of improving the final forging mold life. At the same time, the installation position of upper eject rod was optimized, and the residual bin was added at the position of eject rod to increase the material flow space and reduce the force of eject rod, which effectively improved the life of eject rod. Experiments show that the influence of the length of formed upsetting parts on the final forging cannot be ignored, and the length of formed upsetting parts should be less than the length of forgings, otherwise it is easy to folding. Comparing the trial production forgings with the simulation results, it can be confirmed that the optimized forming upsetting step and the eject rod residual bin are effective.

Key words: plate body; upsetting; mold wear; equivalent stress; residual bin

板体又称为履带板, 用于保证车辆在松软地面的通过性, 起到降低行驶阻力以及保持对地面的良好的附着力的作用。其形状多种多样, 是工程机械中的一种易损零件, 常用在坦克、挖掘机、推土机、履带起重机、摊铺机等工程机械上, 市场需求量大^[1]。履带板的工作环境恶劣, 设计生产中要求保证其具有较高的强度、耐磨性和良好的韧性^[2-5]。板体的主要生产方法有铸造、轧制、锻造和焊接等。

考虑到锻造工艺既可以节省材料、又可以提高产品性能的优点, 使得锻造板体成为主要生产方式^[6-10]。板体形式复杂多样, 国内很多技术人员均在板体进行研究, 主要包括受力分析、磨损破坏分析、材料分析等^[11-14]。

1 板体锻件

本文介绍的板体锻件如图 1 和图 2 所示, 锻件长度为 308 mm, 宽度为 143 mm, 高度为 62 mm, 筋板厚度为 5 mm, 质量约为 10 kg。板体的整体形状比较简单, 但是筋板和总体厚度相差很大, 会导

收稿日期: 2021-10-26; 修订日期: 2022-01-23

作者简介: 闫红艳 (1979-), 女, 硕士, 正高级工程师

E-mail: yanhongyan2013@126.com

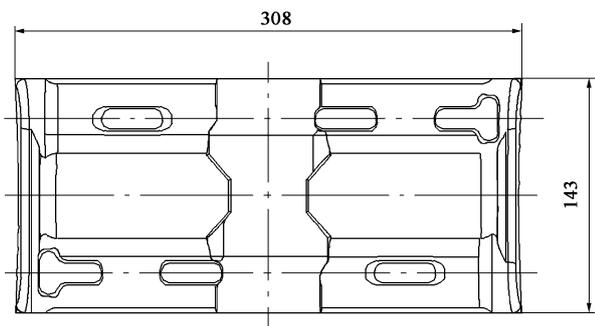


图 1 板体锻件图

Fig. 1 Drawing of plate body forgings

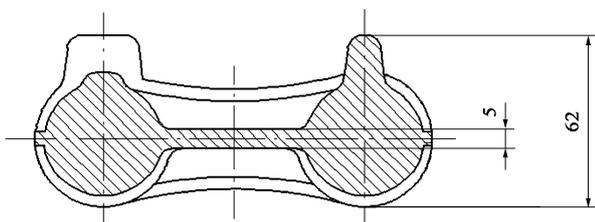


图 2 板体截面图

Fig. 2 Sectional view of plate body

致模具磨损严重，模具的局部应力较大。另外，锻件上不均匀分布 6 个高度为 15 mm 的凸台。

2 板体锻造工艺

此板体的常用生产工艺也比较简单，长圆棒料横向镦粗去氧化皮后一次锻造即可成形。本文主要研究镦粗工步的优化。

模拟锻件如图 3 所示。在锻造时，锻件的 6 个不均匀分布的凸台是最后充满型腔的位置。为了将锻件的 6 个凸台充满，必须将已经充满型腔其他部位的金属材料继续向内或向外挤压。如图 4 所示，锻件筋板处的金属材料已经充满，但还是被迫向内



图 3 模拟锻件图

Fig. 3 Drawing of simulated forgings

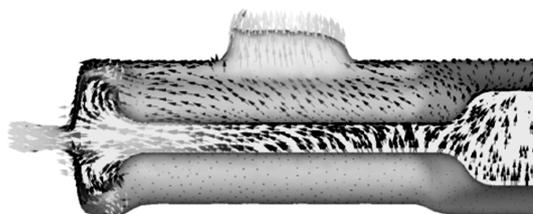


图 4 金属材料流动方向

Fig. 4 Flow direction of metal material

外两侧流动。锻件中间部分已经充满型腔，但其中的金属材料还在持续被挤压，这大大增加了模具的等效应力，降低了模具寿命。为了缓解上述情况，将普通的镦粗去氧化皮工步优化为成形镦粗，可以有效地提高终锻模具寿命。

首先，分析常规镦粗后的模具磨损情况，如图 5 所示。模具材料为 H13 热作模具钢，热处理硬度为 50 HRC，预热温度为 300 °C。由模拟结果可知，上模的最大磨损量约为 0.0397 mm，下模的最大磨损量约为 0.0425 mm。上、下模磨损最大位置均位于锻造板体筋板的两端面圆角处。

从模具等效应力的模拟结果（图 6）可以看出，下模的最大等效应力为 516 MPa，上模的最大等效应力为 679 MPa，模具型腔部分的最大与最小等效

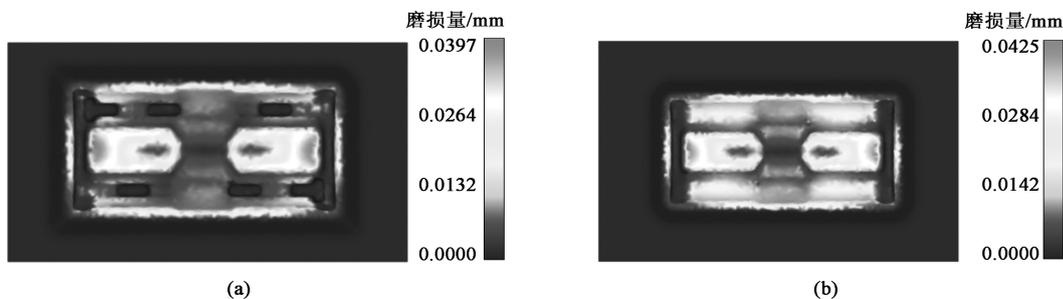


图 5 常规镦粗后的模具磨损量分布图

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 5 Die wear amount distribution diagrams after conventional upsetting

(a) Upper die (b) Lower die

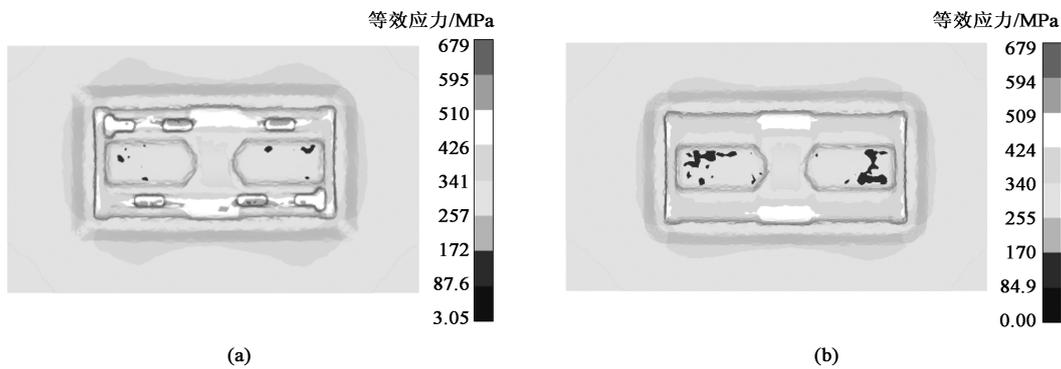


图 6 常规镦粗后的模具等效应力分布图

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 6 Equivalent stress distribution diagrams of dies after conventional upsetting

(a) Upper die (b) Lower die

应力差约为 300 MPa，最大等效应力主要集中在锻件 6 个凸台的位置。可以看出，在最后充满 6 个凸台的位置模具的等效应力最大。

从上述模拟结果来看，模具等效应力的增加是因为坯料中部金属材料过多造成的。如果将成形镦粗形状改为如图 7 所示的形状，中间低两边高，将中间部分的金属向两端分流一部分，则可以减少中间部分的材料。



图 7 修改后的成形镦粗形状

Fig. 7 Forming upsetting shape after modification

模具的磨损情况如图 8 所示。上、下模的最大磨损量约为 0.03 mm，比常规镦粗工艺的最大磨损量降低了约 0.01 mm。

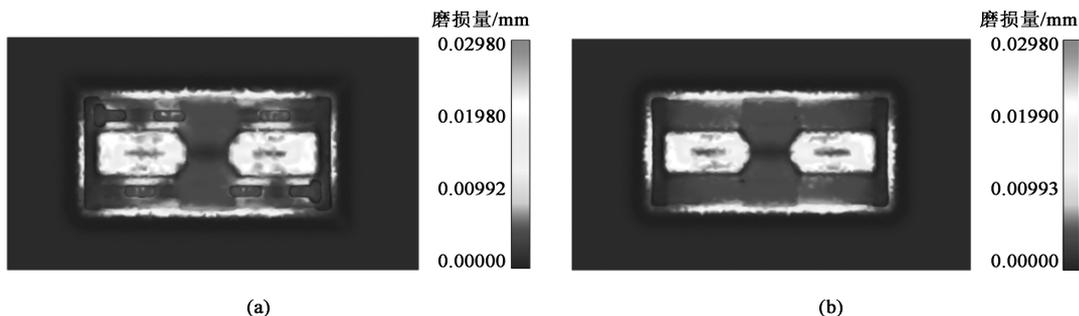


图 8 成形镦粗形状修改后的模具磨损量分布图

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 8 Die wear amount distribution diagrams after forming upsetting shape modification

(a) Upper die (b) Lower die

模具的等效应力分布如图 9 所示。上模的最大等效应力为 500 MPa，比常规镦粗工艺降低约 200 MPa，趋于均匀化。下模的最大等效应力为 450 MPa，与常规镦粗的等效应力基本一致。

从上述模拟结果可以看出：镦粗工步优化后，上模的最大等效应力降低了 30%、最大磨损量降低了 25%；下模的最大等效应力基本不变、最大磨损量降低了 25%。可见，优化后的锻造工艺起到了提高模具寿命的作用。

另外，成形镦粗件的长度需要在合理范围内。如果坯料过长，会出现如图 10 所示情况，金属材料最先接触的是模具飞边桥部，迫使外侧金属向内流动，最终在内外金属流动的交界处形成折叠。如果坯料过短，则会出现填充不足的情况，如图 11 所示。

综上所述，优化后的工艺流程为：下料→加热→成形镦粗→终锻成形→切边，如图 12 所示。坯料尺寸为 $\Phi 85 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ ，成形镦粗件的中部厚度为 30 mm 左右，长度约为 301 mm，延展后长

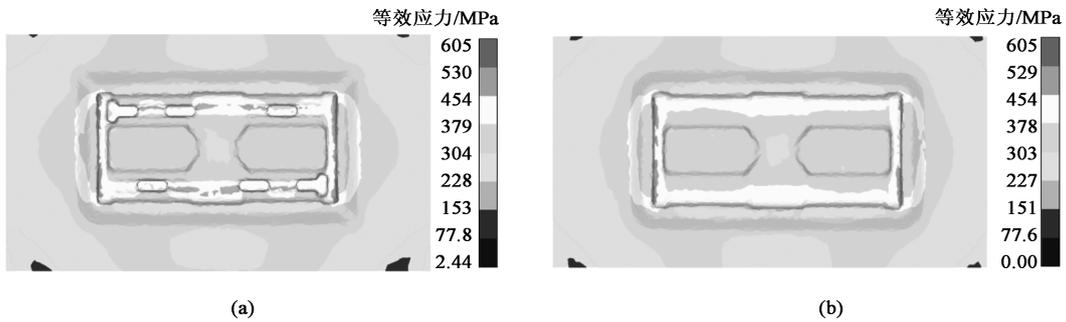
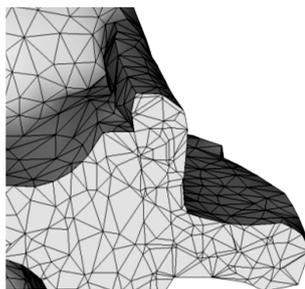


图 9 成形镦粗形状修改后的模具等效应力分布图

(a) 上模 (b) 下模

Fig. 9 Equivalent stress distribution diagrams of dies after forming upsetting shape modification

(a) Upper die (b) Lower die



(a)



(b)

图 10 坯料过长时的折叠倾向

(a) 模拟锻件 (b) 实际锻件

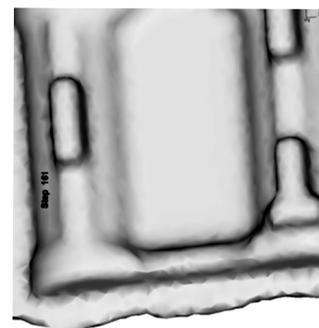
Fig. 10 Fold tendency with too long blank

(a) Simulated forgings (b) Actual forgings

度要求不超过锻件长度。终锻件成形还是中间部位首先完成填充, 6 个凸台最后填充完成, 且凸台高度从中部向两端逐渐降低。

3 模具设计

板体的模具设计比较简单, 本文重点研究顶杆的设计。通常锻造时将复杂形状放在上模, 一方面



(a)



(b)

图 11 坯料过短时的填充不足

(a) 模拟锻件 (b) 实际锻件

Fig. 11 Insufficient filling with too short blank

(a) Simulated forgings (b) Actual forgings

有利于填充型腔, 另一方面可以缩短锻件与复杂型面的接触时间, 起到保护模具的作用。本文板体锻件将带凸台的模具作为上模, 因为锻件凸台位置为最后充满的位置, 也是最难脱模的位置, 如果顶出不及时, 锻件会随滑块模具一起被带起, 也会增加锻件与模具的接触时间, 降低模具寿命。如果将顶杆放在飞边位置, 顶出后可能会使锻件产生弯曲变形, 尤其是板类锻件很容易在顶出时发生变形。安装顶杆最合理的位置是在锻件 6 个凸台的位置, 如果沿用以往的锻造工艺, 并在 6 个凸台位置放置顶杆, 其寿命会非常低。

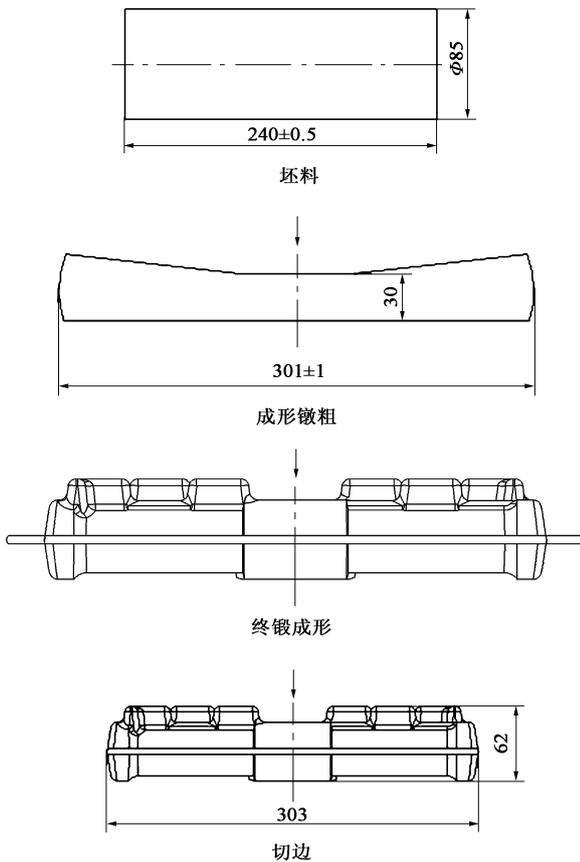


图 12 优化后的锻造工艺流程图

Fig. 12 Flow chart of optimized forging process

在顶杆设计时，其长度按原尺寸缩短 2~3 mm，作为余料仓。锻件的 6 个凸台在模具型腔内的填充情况并不一致，中间凸台的充满程度高于两端的凸台。所以，中间凸台预留 3 mm 余料仓，两侧凸台预留 2 mm 余料仓，可以降低锻件对顶杆的作用力，改善顶杆的工作环境。

通过顶杆优化前后的模拟结果可以看出，缩短顶杆预留余料仓可以缓解顶杆的受力。如图 13 所示，未预留余料仓时顶杆的等效应力最大为 593 MPa，大部分等效应力集中在 300~400 MPa；

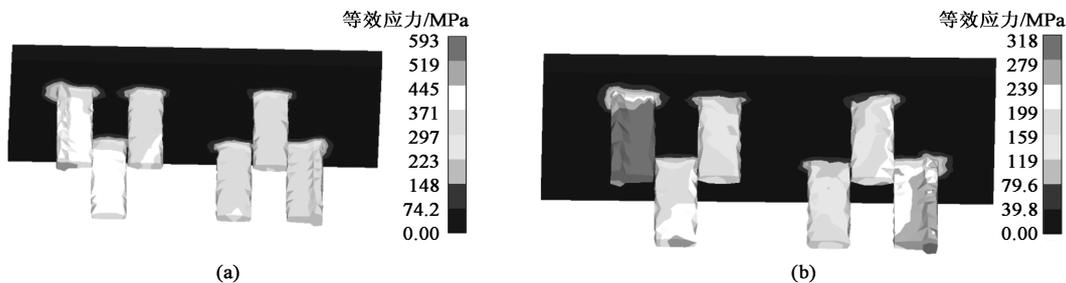


图 13 有无余料仓时顶杆的等效应力分布图

(a) 无余料仓 (b) 有余料仓

Fig. 13 Equivalent stress distribution diagrams of ejector rod with and without residual bin

(a) Without residual bin (b) With residual bin

预留余料仓时顶杆的等效应力最大为 318 MPa，比没有余料仓时顶杆的等效应力降低了约 300 MPa。从模拟数据上看，顶杆寿命提高了约 50%。值得注意的是，模拟只是得到一个理想状态下的结果，顶杆的工况受安装结构、工艺过程以及锻件温度、润滑等因素的影响，其等效应力及磨损情况等会比模拟结果更复杂。

4 生产应用

生产实际发现，锻件的成形情况、飞边形状及模具明显磨损的位置与模拟结果基本一致，如图 14 所示。影响磨损量的因素很多，磨损数据需要稳定量产之后才可进一步总结。顶杆寿命较其他模具偏低，如不加装顶杆，则每件均需要人工卸料，所以顶杆要根据生产要求设计。另外，需要注意的是成形镦粗件的底面依然为平面，锻件在工步之间转移的过程中要注意摆正锻件的位置，如果偏向一端，会出现一端折叠、另一端充不满的情况。可以在模具加工时做台阶标记或者划线标记。

5 结语

板体的锻造工艺比较简单，将镦粗工步改为成形镦粗，按锻件形状将坯料进行简单分配，可有效降低模具的等效应力及磨损，是提高模具使用寿命的有效方法。通常在有飞边锻造时，对于坯料尺寸的要求均不高，但类似板体这种中间筋板、两边凸起的锻件，需要注意坯料的长度选择。坯料太长会出现折叠缺陷，太短又很难充满型腔。顶杆尽量布置在锻件的中间部分，尤其是板类锻件，顶出飞边容易使锻件弯曲变形。在顶杆处预留余料仓，可以降低其受力并改善工况，提高使用寿命。

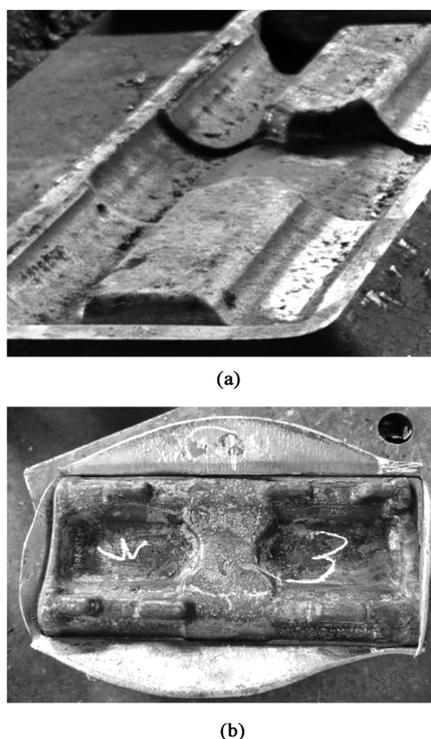


图 14 实际生产中的模具磨损及锻件成形情况

(a) 下模圆弧处磨损情况 (b) 终锻件及飞边

Fig. 14 Die wear and forming conditions of forgings in actual production

(a) Wear condition at arc of lower die (b) Final forgings and flash

参考文献:

- [1] 蔡圣, 刘欣梅, 陈军. 薄板渐进成形数值仿真研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 1-12.
Cai S, Liu X M, Chen J. Research progress on numerical simulation of incremental sheet forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 1-12.
- [2] 江荣忠. 墙式阻力毛边槽在复杂锻件中的研究和应用 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
Jiang R Z. Wall-type Flash Cave in Complex Forgings Research and Application [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [3] 王国丽. 工程机械用典型锻件锻造工艺模具设计及成形过程数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
Wang G L. Design of Forging Process and Dies and the Numerical Simulation of Typical Forgings for Construction Machinery [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [4] 孙兴辰. 推土机履带板锻造全过程工艺设计及质量控制的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
Sun X C. Research on Forging Process Design and Quality Control of Bulldozer Crawler Plate [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [5] 李科锋, 孙晓东, 陈波, 等. 薄壁深长筋履带下板体成形工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2016, (9): 86-88.
Li K F, Sun X D, Chen B, et al. Research on thin-walled deep muscle tracks the lower body forming technology [J]. New Technology & New Process, 2016, (9): 86-88.
- [6] 李科锋, 渠育杰, 孔令晶. 铝负重轮的设计与工艺研制 [J]. 新技术新工艺, 2016, (8): 84-88.
Li K F, Qu Y J, Kong L J. Design and process development for aluminum road wheel [J]. New Technology & New Process, 2016, (8): 84-88.
- [7] 徐皓, 刘江. 高强度精密锻钢活塞锻造预锻模具设计及加工关键点实践研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (11): 50-55.
Xu H, Liu J. Practice research on key points of pre-forging die design and machining for high strength precision forged steel piston forging [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (11): 50-55.
- [8] 石然然, 李名尧, 王波, 等. 基于 DEFORM-3D 的曲轴锻造模具应力分析 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (3): 121-123.
Shi R R, Li M Y, Wang B, et al. Die stress analysis of crankshaft forging based on DEFORM-3D [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (3): 121-123.
- [9] 张松泓, 徐颖若. 基于响应面法发动机连杆热锻模具磨损失效分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 178-184.
Zhang S H, Xu Y R. Analysis on wear failure of hot forging die for engine connecting rod based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 178-184.
- [10] 马才伏, 周兵. 汽车三叉式万向节精密成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 41-47.
Ma C F, Zhou B. Precision forming process on automobile trident universal joint [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 41-47.
- [11] 赵中里, 薛勇杰, 吴大鸣, 等. 热锻模高温摩擦磨损探讨及对策 [J]. 模具工业, 2021, 47 (5): 1-5.
Zhao Z L, Xue Y J, Wu D M, et al. High temperature friction and wear behavior of hot forging die and its countermeasures [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (5): 1-5.
- [12] 翟崇琳, 唐友亮, 徐青青, 等. 基于正交试验的汽车扭力臂热锻模具磨损分析及优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 185-189.
Zhai C L, Tang Y L, Xu Q Q, et al. Wear analysis and optimization of hot forging mold for automobile torque arm based on orthogonal test [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 185-189.
- [13] 齐双强. 活塞预锻模具磨损失效研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 21-26.
Qi S Q. Research on wear failure for pre-forging die of piston [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 21-26.
- [14] 杨红超, 淳道勇, 和永岗, 等. GH4169 合金叶片挤杆工序模具磨损及寿命的数值模拟分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 198-207.
Yang H C, Chen D Y, He Y G, et al. Numerical simulation analysis on wear and life of mold in bar extrusion process for GH4169 alloy blade [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 198-207.