

## 基于 Deform 的三缸曲轴锻模设计

徐 华<sup>1,2</sup>, 胡双锋<sup>1</sup>, 付秀娟<sup>1</sup>, 胡小艳<sup>3</sup>

(1. 武汉工程大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430205; 2. 安徽博斯特科技有限公司, 安徽 芜湖 241100;  
3. 武汉汇创精密机械制造有限公司, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 在分析了 42CrMo 钢三缸曲轴结构特征的基础上, 采用 Deform 软件, 优化了预锻件敷料结构, 敷料轮廓由直线相交转变为圆弧过渡, 并将夹角由 15° 优化为 20°, 降低了模膛应力值; 设计了便于变形、分模以及后续配重的余块结构, 并在预锻模边缘设计了半开半闭式挤压筒结构, 分配了预、终锻变形量, 得到了预、终锻模具结构。利用 Deform-3D 对预、终锻成形过程进行了数值模拟, 预锻件飞边为 15~55 mm, 终锻件飞边为 35~65 mm, 预、终锻件飞边的实测值比模拟结果大 5 mm, 锻件预锻温度设计为 1200 °C, 终锻结束时温度高于 900 °C。生产实践表明: 模拟结果可以辅助锻模结构设计, 锻件飞边均匀、模膛填充饱满, 终锻件符合图样技术要求, 满足验收标准。

**关键词:** 三缸曲轴; 锻模设计; 锻件飞边; 预锻; 终锻

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.023

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0161-07

## Design on forging die for three-cylinder crankshaft based on Deform

Xu Hua<sup>1,2</sup>, Hu Shuangfeng<sup>1</sup>, Fu Xiujuan<sup>1</sup>, Hu Xiaoyan<sup>3</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;  
2. Anhui Bestforging Technology Co., Ltd., Wuhu 241100, China;  
3. Wuhan Huichuang Precision Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Based on the analysis of structural characteristics for three-cylinder crankshaft of 42CrMo steel, the dressing structure of pre-forgings was optimized by software Deform, the dressing contour was changed from the straight line intersection to the arc transition, and the intersection angle was optimized from 15° to 20° to reduce the stress value of die cavity. Furthermore, the remaining block structure was designed in order to facilitate deformation, mold splitting and subsequent counterweights, the semi-open and semi-closed extrusion barrel structure was designed at the edge of pre-forging die, the pre-forging and final forging deformation amounts were distributed, and the pre-forging and final forging die structures were obtained. Finally, the forming processes of pre-forging and final forging were numerical simulated by Deform-3D respectively, and the flash values of pre-forgings and final forgings were 15~55 mm and 35~65 mm respectively, which was 5 mm smaller than the measured values. In addition, the pre-forging temperature of forgings was designed to be 1200 °C, and the temperature at the end of final forging was over 900°. The production practice shows that the simulation results can assist the structural design of the forging die, the flash of forgings is uniform, the die cavity is filled fully, and the final forgings meet the technical requirements of drawing and acceptance criteria.

**Key words:** three-cylinder crankshaft; forging die design; flash of forgings; pre-forging; final forging

曲轴作为汽车的关键动力传递部件, 其工况恶劣, 对疲劳、耐磨和强度等性能指标均都有非常高的要求<sup>[1]</sup>。与四缸或六缸曲轴相比, 三缸曲轴作为轻载汽车的优选动力传递部件, 节能减排、造价低,

其应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。

42CrMo 钢三缸曲轴在结构上有自身特点<sup>[2]</sup>。成形过程中, 容易出现锻件飞边不均匀、模膛填充不满、模具磨损速度快、模具寿命低等问题。在分析 42CrMo 钢三缸曲轴结构特点的基础上, 基于 Deform-3D 制定了该曲轴的模锻工艺, 并设计了预、终锻模具结构。

### 1 42CrMo 钢三缸曲轴结构分析及分模面设计

42CrMo 钢三缸曲轴锻件的形状及主要尺寸如图 1 所示。

收稿日期: 2021-01-08; 修订日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575406); 武汉工程大学科学研究基金项目 (K201804)

作者简介: 徐 华 (1979-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 78281063@qq.com

通信作者: 胡双锋 (1981-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 254117912@qq.com

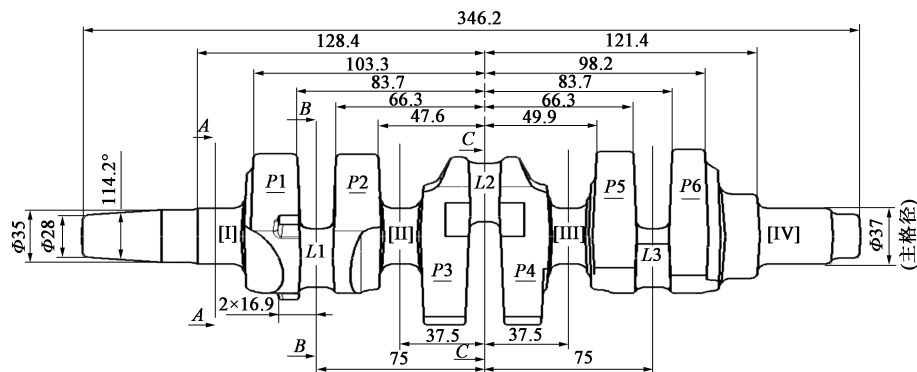


图 1 42CrMo 钢三缸曲轴主视图

Fig. 1 Front view for three-cylinder crankshaft of 42CrMo steel

42CrMo 钢三缸曲轴带有 6 个平衡块, 分别为  $P1 \sim P6$ , 以连杆颈  $L1 \sim L3$  连接, 呈  $120^\circ$  排列; 主颈从左至右依次为 [I] ~ [IV]。成品总重为 8.0 kg, 其质量较轻, 总长度为 346.2 mm; 平衡块高度为 86 mm, 宽度为 17.3 mm, 壁厚变化不均, 最薄处为 14.5 mm, 中间平衡块外形呈非线性弧形

结构, 呈  $120^\circ$  排列。因此, 其  $P1$ 、 $P2$ 、 $P5$  和  $P6$  平衡块处的分模线设计为曲线结构,  $P3$ 、 $P4$  平衡块处分模线设计为其几何中心线<sup>[2]</sup>, 如图 2 所示。图 2c 中,  $R$  为平衡块曲柄半径,  $D$  为连杆颈直径,  $H$  为平衡块与连杆颈分模线位置高度,  $\alpha$  为连杆颈  $L2$  出模角度,  $r$  为连杆颈的回转半径。

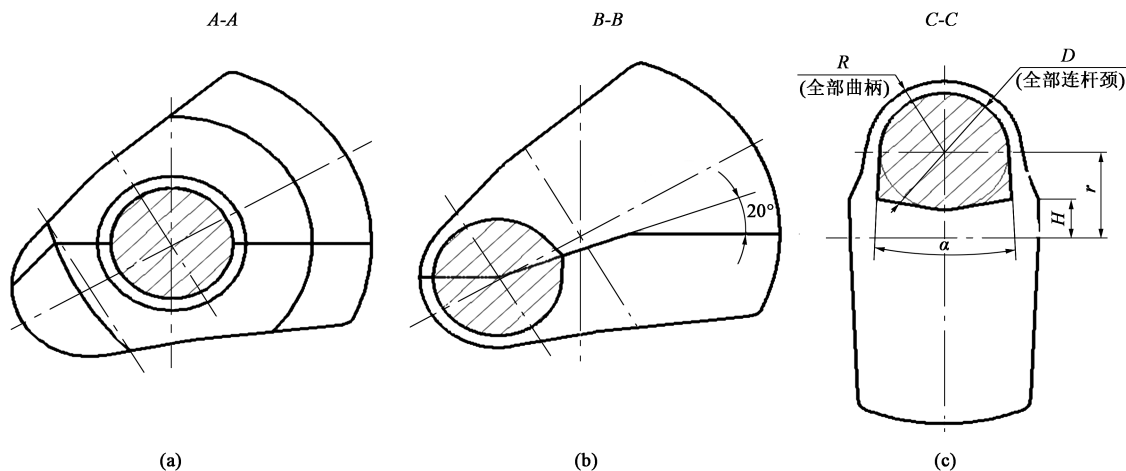


图 2 曲轴各平衡块处分模线示意图

(a) 截面 A-A (b) 截面 B-B (c) 截面 C-C

Fig. 2 Schematic diagrams of parting lines for each counterbalance of crankshaft

(a) Section A-A (b) Section B-B (c) Section C-C

## 2 42CrMo 钢三缸曲轴的模锻工艺及设备

42CrMo 钢三缸曲轴的非加工表面较多, 技术要求较高, 尺寸公差与表面质量要求严格。因此, 在预锻、终锻的基础上设计了切边工序; 除了机械性能指标外, 还需满足动平衡试验和探伤的要求<sup>[3]</sup>。制定的工艺如下: 下料→中频加热→锻粗→预锻→终锻→切边→校正→调质→抛丸→探伤→检查→防锈→入库。

锻造力与锻件材质和锻件分模面的投影面积有

关, 分析得出锻件在分模面的投影面积 (包括飞边的桥宽为 1.8 cm) 为  $404 \text{ cm}^2$ , 变形抗力系数为  $55 \text{ kN} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。计算得到锻造力为 22.2 MN, 选用 25000 kN 的摩擦压力机可满足要求。

毛坯的重量除锻件本体之外, 还须包含飞边 (2.4 kg) 与火耗 (0.1 kg)。本锻件毛坯总重为 10.5 kg。

圆棒材下料过程中, 首先确定圆棒材直径  $d$ , 其计算公式为  $d = 2\sqrt{0.6s}$ , 其中,  $s$  为平衡块最大截面积, 取平衡块最大截面积的 60%~70%, 为  $7850 \text{ mm}^2$ , 则得  $d = \Phi 77 \text{ mm}$ , 考虑到后续增设全尺寸阻料桥以及

在飞边桥处设置预锻件的顶出工位,  $d$  取  $\Phi 80 \text{ mm}$ <sup>[3-6]</sup>。最终, 下料尺寸为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 266 \text{ mm}$ 。

### 3 预、终锻模结构设计与分析

对主轴颈的动平衡决定了平衡块的质量与结构。考虑到出模方便, 平衡块底部材料的填充性与分模面材料飞边的均匀性, 以及预、终锻的衔接, 需要对预锻模结构进行优化设计<sup>[5-6]</sup>。

#### 3.1 预锻模结构设计一般原则

(1) 预锻件厚度比终锻件小  $0.6 \text{ mm}$ , 在预锻件平衡块处设计余块, 如图 3 所示。其目的为降低第 3、4 平衡块的加强筋高度, 储料以备材料向厚度方向变形, 方便预锻件脱模。

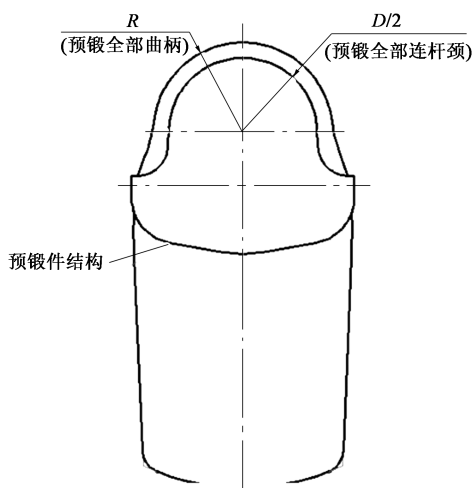


图 3 预锻件第 3、4 平衡块处余块结构

Fig. 3 Remaining block structure for No 3 and No 4 counterbalances of pre-forgings

(2) 预锻件圆角要比终锻件大, 其目的为减小金属流动阻力, 防止产生折叠缺陷, 方便预锻件进入终锻模腔。预锻件凹圆角 (预锻型腔凸圆角) 为终锻件圆角的  $1.5 \sim 2.5$  倍, 凸圆角为终锻件圆角的  $1.5 \sim 2.0$  倍; 打击方向的设计见图 4。

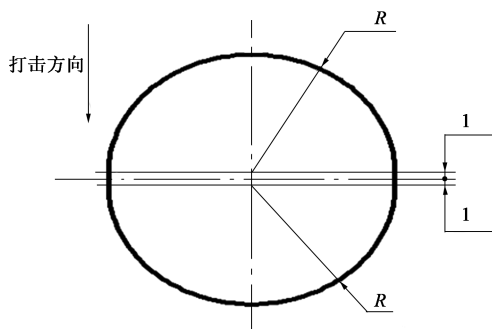


图 4 打击方向

Fig. 4 Strike direction

(3) 预锻件必须保证分型面、出模角度 ( $1.5^\circ$ )、收缩率与终锻件一致。

(4) 预锻模设计: 在锻造力作用下, 为使坯料较好地流动并充满型腔, 迫使材料向最难填充处流动, 在预锻模边缘设计半开半闭式挤压筒, 其结构见图 5<sup>[7-8]</sup>。

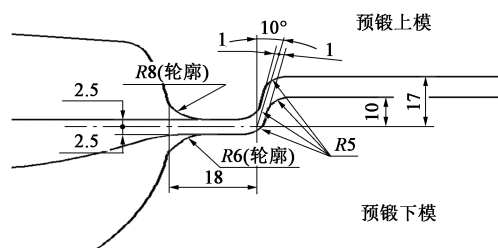


图 5 预锻模边缘半开半闭式挤压筒结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of semi-open and semi-closed extrusion barrel structure at edge of pre-forging die

(5) 为了确保终锻时有多余的金属向高度方向流动以充满模腔, 42CrMo 钢曲轴预锻件的平衡块内侧设计了敷料结构 (图 6)。经模拟验证, 终锻件能够完全充满, 但是应用 Deform-3D 模拟模具所受应力时发现, 平衡块内侧加强筋受应力不均, 见图 7。图 7 中, 在平衡块内侧加强筋最上端所受应力最大, 其值为  $916 \text{ MPa}$ , 加强筋另外一侧最上端所受应力最小, 其值为  $315 \text{ MPa}$ , 应力差值为  $601 \text{ MPa}$ 。巨大的应力差值使得在批量生产时, 平衡块内侧加强筋容易倒伏, 造成模具开裂而报废。根据图 7 所示模具应力分布不均匀的情况, 重新设计平衡块内侧敷料, 见图 8, 将敷料外轮廓线夹角由  $15^\circ$  改为  $20^\circ$ , 轮廓形状由直线连接改进为圆弧过渡, 再次用 Deform-3D 模拟模具所受应力, 结果见图 9。在图 9 中发现, 还是在平衡块内侧的加强筋侧面所受应力最大, 其值为  $543 \text{ MPa}$ , 但相比最高值降低了  $40.7\%$ , 最

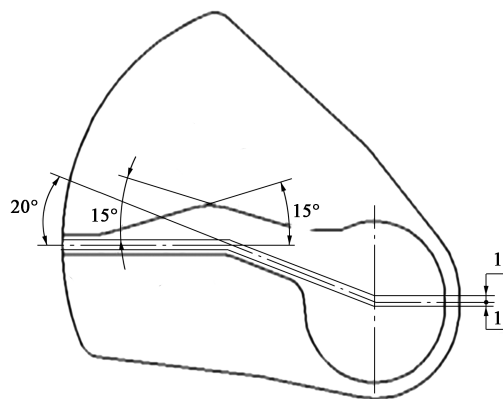


图 6 一般敷料结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of general dressing structure

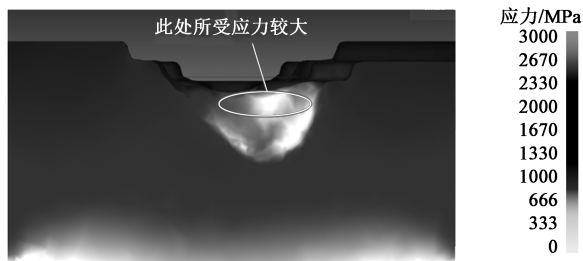


图 7 平衡块模膛应力分布

Fig. 7 Stress distribution in die cavity of counterbalance

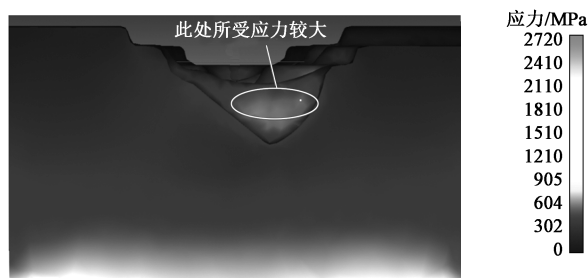


图 9 优化后平衡块模膛应力分布

Fig. 9 Stress distribution in die cavity of optimized counterbalance

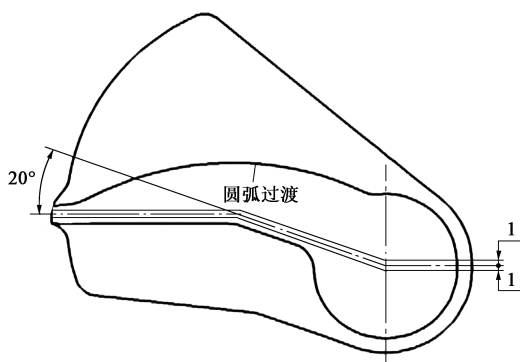


图 8 优化后敷料结构

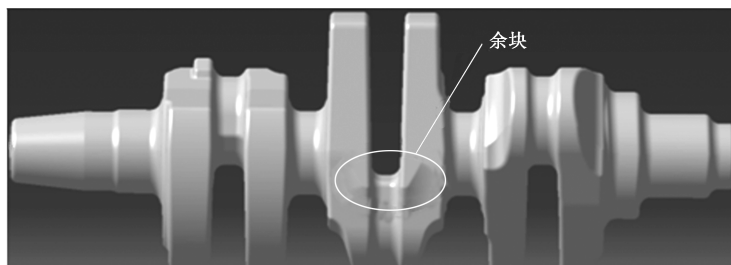
Fig. 8 Dressing structure after optimization

小值为 315 MPa。改进结构后, 模膛的最大应力值减小, 应力分布相对均匀。

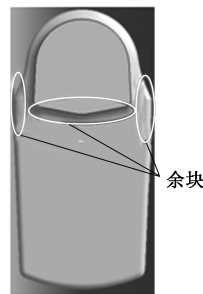
### 3.2 终锻模具设计

终锻件型腔是在锻件图基础上加上收缩率后得到的。收缩率的取值规则取决于打击次数与预锻件结构, 安徽博斯特科技有限公司采用 25000 kN 摩擦压力机 (2 台) 联合生产, 各打击一次, 终锻结束温度为 1000~1100 °C, 收缩率取 1.65%。

终锻件中间连杆颈第 3、4 平衡块处存在出模负角, 同时, 为了后期平衡块的配重, 在此处设计余块, 如图 10 所示。



(a)



(b)

图 10 终锻件第 3、4 平衡块处余块

(a) 终锻件余块位置 (b) 终锻件余块主视图

Fig. 10 Remaining block for No 3 and No 4 counterbalances of final forgings

(a) Position of remaining block for final forgings (b) Front view of remaining block for final forgings

### 3.3 预、终锻模结构

(1) 设计采用长方形模坯, 预、终锻尺寸为 500 mm×300 mm×150 mm, 单腔模膛;

(2) 采用 4 个锁扣进行导向定位, 并平衡锻模错移力; 模具锁扣的尺寸设计为 90 mm×90 mm, 高度为 45 mm, 斜度为 5°, 锁扣侧面间隙为 0.2 mm, 同时锁扣也可以作为模具承击面, 防止出现锻造负差, 造成产品不合格;

(3) 因上模架没有顶杆排布位置, 为了保证曲

轴锻件顺利从模膛中出模, 下模设计 4 个  $\Phi 18$  mm 顶杆; 预、终锻件轮廓圆角中, 上模的轮廓圆角比下模大 2 mm, 见图 5 中的轮廓圆角, 因下模粘模力大于上模, 这样锻件可顺利粘在下模, 然后通过顶杆将锻件顶出;

(4) 预、终锻模下模的型腔较深, 锻造速度达到  $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 排气困难, 塑性变形受阻。在预、终锻模下模型腔的最深处分别设置尺寸为  $\Phi 1.2$  mm 排气孔, 同时在底部开排气槽 (图 11)。

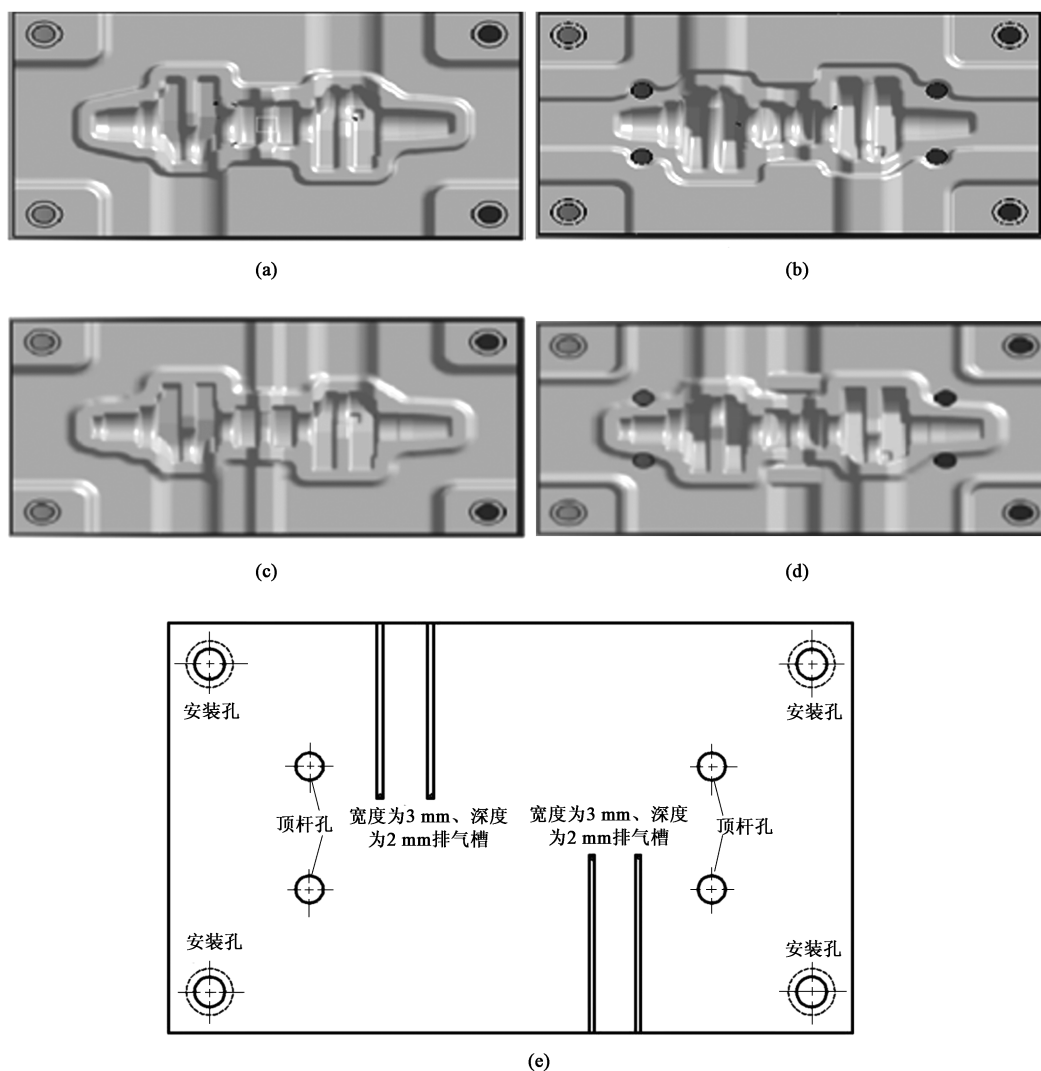


图 11 预、终锻模具结构

(a) 预锻上模 (b) 预锻下模 (c) 终锻上模 (d) 终锻下模 (e) 排气槽结构

Fig. 11 Die structures of pre-forging and final forging

(a) Pre-forging punch (b) Pre-forging die (c) Final forging punch (d) Final forging die (e) Vent groove structure

## 4 预、终锻成形模拟

采用 Deform-3D, 全尺寸模拟模锻结束时模具型腔的充满情况、飞边情况与应力分布。

### 4.1 预锻成形模拟

- (1) 坯料选用 4140 钢材料, 初始温度为 1200 ℃; 坯料网格划分为 350000;
- (2) 模具材料为 H13 模具钢, 模具视为刚体;
- (3) 锻造前, 模具温度预热至 300 ℃;
- (4) 剪切摩擦, 摩擦因数设为 0.3, 热传导系数为  $5 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  [9-10]。

图 12b 分析可知, 预锻模拟结束时, 其预锻件

温度在 1100 ℃ 以上, 第 3、4 平衡块各节点位移在 51.5~80.5 mm 范围内, 锻件端部的位移在 67~90 mm 范围内, 型腔能够充满。分模面上节点最大位移为 90 mm, 最小位移为 51.5 mm, 得到相对位移值在 15~55 mm 范围内, 实际测量得到的飞边宽度在 20~45 mm 范围内, 误差在 5~10 mm 范围内。由以上分析可知, 预锻结束时, 坯料变形量较大, 型腔得到较好的填充, 分型面飞边比较均匀。

### 4.2 终锻成形模拟

将预锻模具替换为终锻模具, 其他参数设定一致, 模拟结果如图 13 所示。图 13b 分析可知, 终锻模拟结束时, 锻件温度在 1000 ℃ 以上, 第 3、5 平衡块各节点的位移在 80.6~100.6 mm 范围内,

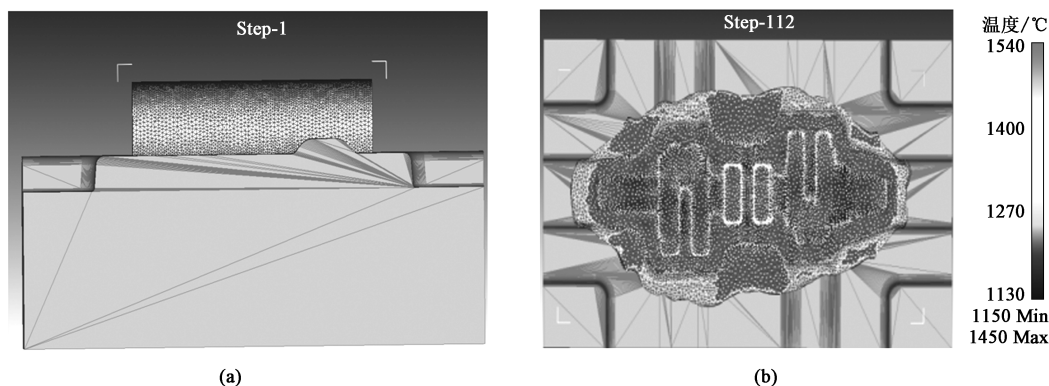


图 12 预锻成形模拟结果

(a) 网格划分 (b) 飞边与温度场

Fig. 12 Simulation results of pre-forging

(a) Meshing (b) Flash and temperature field

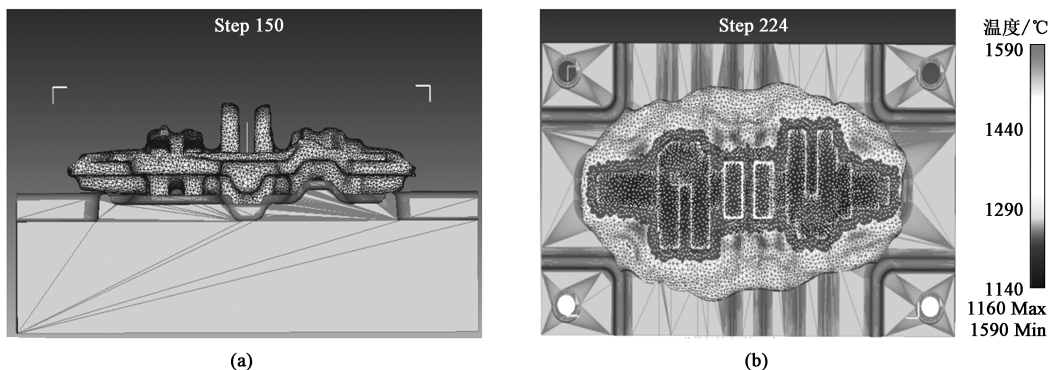


图 13 终锻成形模拟结果

(a) 网格划分 (b) 飞边与温度场

Fig. 13 Simulation results of final forging

(a) Meshing (b) Flash and temperature field

锻件端部的位移在 78.5~96.6 mm 范围内,较好地充满了型腔。分模面上节点最大位移为 100.6 mm,最小位移为 78.5 mm,得到相对位移值在 35~65 mm 范围内,实际测量得到的飞边宽度在 35~65 mm 范围内,与模拟相比,误差在 5 mm 范围内。

由此可知,终锻后坯料飞边均匀分布在型腔周围,坯料变形充分,模腔填充性完好,应力值分布也比较均匀。切边后的终锻件如图 14 所示。



图 14 42CrMo 钢三缸曲轴终锻件

Fig. 14 Final forgings of three-cylinder crankshaft for 42CrMo steel

## 5 结论

(1) 42CrMo 钢三缸曲轴的平衡块属于薄板高筋形状,排列方位不一致,特别是中间平衡块成形困难,本设计中通过两个途径进行改善:①预锻件平衡块内侧设计适当厚度的工艺敷料,并将夹角由 15°改进为 20°,将直线相交改为弧线过渡;②预锻模型腔两侧设计半开半闭式挤压筒,使一部分金属由开式模锻转变为闭式挤压。通过以上改善途径,使平衡块变形充分、填充饱满,预锻件形体符合图样要求。

(2) 第 3、4 平衡块处设计的余块不仅可以作为储料方便填充模膛,而且便于预、终锻件脱模,同时,为后续动平衡配重提供了余量。

(3) Deform-3D 全尺寸模拟了预、终锻曲轴成形结束时的飞边情况。结果表明:在预锻模边缘设

置半开半闭式挤压筒, 对预锻件平衡块的充满有明显作用, 终锻结束时, 飞边分布比较均匀, 模拟结果可以为锻模设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 李伟柱. 国六发动机曲轴新材料应用及研究 [J]. 内燃机, 2021, (2): 44-45, 50.  
Li W Z. Application and research of the new material for the state 6 engine crankshaft [J]. Internal Combustion Engines, 2021 (2): 44-45, 50.
- [2] 熊琳. 曲轴的设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1956.  
Xiong L. Crankshaft Design [M]. Beijing: China Machine Press, 1956.
- [3] 谢静. WD615 扭拐曲轴的模锻 [J]. 大型铸锻件, 2000, 2 (2): 29-29.  
Xie J. Die forging of WD615 crankshaft [J]. Heavy Casting and Forging, 2000, 2 (2): 29-29.
- [4] 夏巨湛. 中国模具设计大典 [M]. 江西: 江西科学技术出版社, 2003.  
Xia J C. Chinese Mold Design Canon [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2003.
- [5] 舒鹤鹏. 基于 Deform 的汽车发动机曲轴模锻数值模拟及模具优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 180-182.  
Shu D P. Numerical simulation and die optimization of automotive engine crankshaft die forging based on Deform [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (3): 180-182.
- [6] 洪慎章. 实用热锻模设计与制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.  
Hong S Z. Design and Manufacture of Practical Hot Forging Die [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [7] 姬金金, 周杰, 卢先正. 某微车曲轴模具结构的优化 [J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40 (23): 231-234.  
Ji J J, Zhou J, Lu X Z. Die structure optimization of mini car crankshaft die [J]. Casting · Forging · Welding, 2011, 40 (23): 231-234.
- [8] 王梦寒, 周杰. 基于 CAD/CAE 技术的多拐曲轴精密模锻工艺开发 [J]. 金属加工: 热加工, 2010, (23): 18-19.  
Wang M H, Zhou J. Process development of precision die forging for several cylinder sleeve crankshaft based on CAD [J]. MW Metal Forming, 2010, (23): 18-19.
- [9] Wang X, Qi Z, Chen K, et al. Study on the forming accuracy of the three-cylinder crankshaft using a specific die with a preformed dressing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104 (1-4): 551-564.
- [10] 洪慧平. 金属塑性成形数值模拟 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.  
Hong H P. Numerical Simulation of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: Higher Education Press, 2014.

# 锻压技术

## DUANYA JISHU

### FORGING & STAMPING TECHNOLOGY

我们藉行业 翘楚之势,  
为您搭建 广阔的信息桥梁

#### 欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

1958年创刊。中国机械工业联合会主管, 北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会合办。

全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(核心版, CSCD)、中国科技期刊引证报告(CJCR)、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)。

**金属塑性工程行业专业技术(月刊)期刊 国内外公开发行**

地址: 北京市海淀区学清路18号 《锻压技术》编辑部 100083  
电话: 010-62920652 82415085  
E-mail: fst@263.net (稿件咨询) fst\_linyutong@163.com (广告咨询)

**发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>**




主要栏目	
综述	技术交流
锻造	节能技术
模具	摩擦与润滑
标准化	计算机应用
管材成形	装备与成套技术
板料成形	加热与热处理
特种成形	材料与成形性能
测试技术	理论与实验研究

**全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购**

- ◆ 国内邮发代号: 2-322
- ◆ 国外邮发代号: BM5549
- ◆ 国内定价: 25元/册, 300元/年
- ◆ 国内刊号: CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号: ISSN 1000-3940
- ◆ 广告许可证: 京海工商广登字20170021号 杂志网站 微信公众号

