

# 船用 12 型发动机连杆锻模设计及其锻造工艺验证实例

刘 江<sup>1,2,3</sup>, 徐 皓<sup>1,2,3</sup>

(1. 重庆工程职业技术学院 智能制造与交通学院, 重庆 402246; 2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;  
3. 重庆东科模具制造有限公司, 重庆 401320)

**摘要:** 采用 500 t 双曲柄机械压力机和 2500 t 热模锻压力机生产船用 12 型发动机连杆。通过对该锻件的形状和结构的分析、阐述, 对 3 个工步的制坯模具分别进行设计、分析和论证, 并采用 3 工步分段制坯和模锻复合成形工艺进行小批量生产验证, 得出预成形制坯模具的工步 3 的设计尤为关键, 不但决定了终锻模膛的金属充填性能, 而且对锻件的材料利用率有直接影响, 还可以防止锻件产生折叠缺陷。通过对船用 12 型发动机连杆锻造工艺优化后, 经过现场样件试制验证, 得出船用 12 型发动机连杆的材料利用率为 81.2%, 合格率达 99.4%, 锻造工艺科学合理、切实可行。研究结论对小批量、多品种的锻件的研发试制具有重要的借鉴意义。

**关键词:** 船用 12 型发动机连杆; 分步制坯; 模锻制造工艺; 材料利用率; 金属充填性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.004

中图分类号: TG315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 09-0018-05

## Design on forging die of connecting rod for type-12 marine engine and forging process verification example

Liu Jiang<sup>1,2,3</sup>, Xu Hao<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing and Transportation, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402246, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
3. Chongqing Dongke Mould Manufacturing Co., Ltd., Chongqing 401320, China)

**Abstract:** For the connecting rod of type-12 marine engine, 500 t double crank mechanical press and 2500 t hot die forging press were adopted for production, and the billet-making dies of three steps were designed, analyzed and demonstrated respectively by analyzing and expounding the shape and structure of the forgings. Then, the small batch production verification was carried out by the three-step billet making and die forging compound forming process to obtain that the design of step 3 for the preformed billet making die was particularly critical, which not only determined the metal filling performance of the final forging die, but also had a direct impact on the material utilization rate of the forgings, and prevented the forgings from producing folding defects. After optimizing the forging process of the connecting rod for type-12 marine engine, the trial production of sample on site was conducted. The results show that the material utilization rate for connecting rod of for type-12 marine engine is 81.2%, the qualified rate is 99.4%, and the forging process is scientific, reasonable and feasible. Thus, the research conclusion is of great significance to the research, development and trial manufacture of small batch and multi-variety forgings.

**Key words:** connecting rod of type-12 marine engine; step-by-step billet making; die forging manufacturing process; material utilization rate; metal filling performance

锻造在工业生产中越来越重要, 锻件被广泛应

用于汽车、飞机、工程机械等领域。本文所研究的船用 12 型发动机连杆由铸改锻, 其冲击韧性、相对收缩率和疲劳强度均优于铸件。应用于军用领域时, 工况环境恶劣, 迫使该船用 12 型发动机连杆具有机械强度高、刚度好、使用寿命长等优点。目前, 该类型结构的锻件均采用模锻工艺批量化生产制造, 其中大部分采用楔横轧+电液锤的联合锻造工艺, 该工艺的生产效率高、质量控制较为稳定, 但设备、模具的投入成本高, 尤其是小批量、多品种的锻件生产尤为突出<sup>[1]</sup>。本文通过对船用 12 型发动机连杆的结构和形状进行分析, 采用压力机制坯+2500 t 热

收稿日期: 2022-03-10; 修订日期: 2022-05-29

基金项目: 重庆市教委重大教改项目 (Z211014); “双高”视野下 OBE-CDIO 在高职机电专业一体化课程建设与创新人才培养路径的应用研究 (JG201002); 双创教育背景下高职院校“一核两翼四极”嵌入式创新人才培养模式研究 (JG221014); 38MnVS6 非调质钢 PT132 锻件锻后控制冷却工艺的研究 (KJQN202103409); SVDH20S 非调质钢发动机连杆数值模拟热锻成形分析技术研究与应用 (KJQN202203414)

作者简介: 刘 江 (1982-), 女, 硕士, 讲师, 工程师

E-mail: 379280626@163.com

通信作者: 徐 皓 (1979-), 男, 博士, 教授, 正高级工程师

E-mail: xuhaolj@mail.ustc.edu.cn

模锻压力机联合锻造工艺，通过压力机锻模设计和现场批量生产验证，成功研发了船用12型发动机连杆，对小批量、多品种的锻件的研发和试制具有重要的借鉴意义。

## 1 船用12型发动机连杆初步分析

船用12型发动机连杆的功能分类依据 GB/T 12363—2005<sup>[2]</sup>，其加工余量根据 GB/T 12362—

2003<sup>[3]</sup>。根据 GB/T 3077—1999<sup>[4]</sup>，材料选择为40Cr合金结构钢，40Cr钢材的韧性及耐磨性较好，强度符合锻件图纸要求<sup>[5]</sup>。该锻件的质量为2.5 kg，复杂系数为S2级<sup>[6]</sup>，其特点为头部较细、底部较粗，连接活塞销头部的直径为 $\Phi 52$  mm，连接曲轴的轴颈部宽度为120 mm，总长度为241 mm，横截面结构变化较大，金属流动困难，锻件图如图1所示。

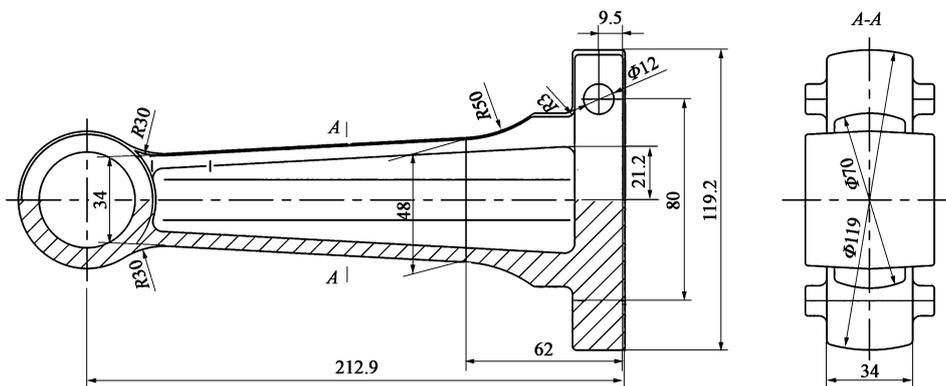


图1 船用12型发动机连杆锻件图

Fig. 1 Forgings diagram of connecting rod for 12-type marine engine

## 2 船用12型发动机连杆锻造工艺分析

### 2.1 锻件锻造制坯工艺

根据重庆东科模具公司类似复杂件的生产制造经验，该锻件为平面分模，采用卧式模锻成形较为科学，其形状和尺寸主要靠精密模具保证，模具结构简单<sup>[7]</sup>，产品试制环节简单可靠。制坯设备采用

德国西马克500 t双曲柄机械压力机，主锻造设备采用俄罗斯TMP公司的2500 t热模锻压力机。

由于船用12型发动机连杆的轴颈与底部的间距为212.9 mm，且形状和截面相差太大。若简单采用圆棒料拍扁制坯，则材料利用率低。故采用制坯工艺，在其轴颈处采用拔长工艺<sup>[8]</sup>，然后通过专用制坯模将其外部轮廓制出，制坯工步简图如图2所示。

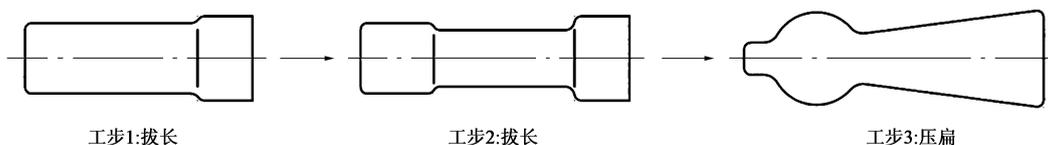


图2 船用12型发动机连杆制坯工艺简图

Fig. 2 Schematic diagram of billet making process for connecting rod of 12-type marine engine

坯料采用尺寸为 $\Phi 70$  mm $\times$ 195 mm的圆棒料，在制坯工步前，采用镦粗工步，镦粗高度为192 mm。工步1做两次90°翻转拔长，工步2对坯料中间部位做4次90°翻转拔长，工步3采用专用制坯模具拔出轴颈部的大致形状。

### 2.2 3工步分段制坯+模锻复合成形工艺

船用12型发动机连杆锻造工艺采用重庆东科模具公司成熟的3工步分段制坯+模锻复合成形工艺。

3工步分段制坯的模具简图如图3所示。

工步1制坯模具即可做1次镦粗，去除氧化后，夹持圆棒料做两次90°翻转拔长，被夹钳夹住的坯料部分保持圆棒料 $\Phi 70$  mm的尺寸不变。然后，在工步2制坯模具中间的凸台上做4次90°翻转拔长。工步3制坯模具也是转向节锻造过程中的关键，通过该工步成形出轴颈圆台及锻件的锥形<sup>[9]</sup>。

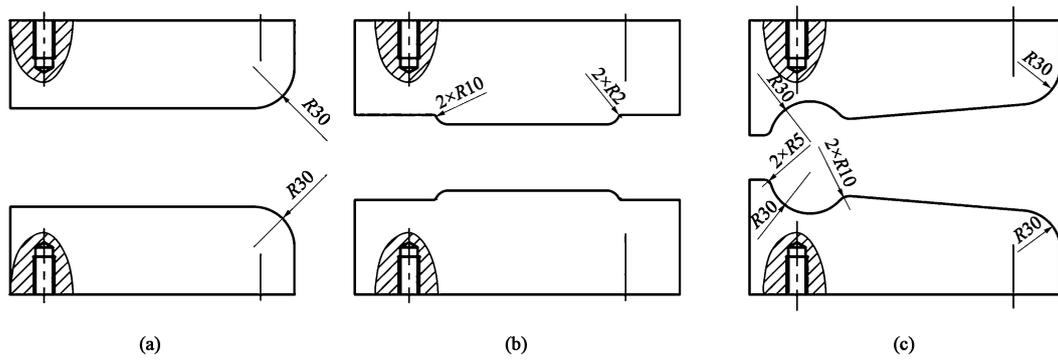


图 3 船用 12 型发动机连杆的 3 步制坯模具

(a) 工步 1 (b) 工步 2 (c) 工步 3

Fig. 3 Three-step billet making dies of connecting rod for 12-type marine engine

(a) Step 1 (b) Step 2 (c) Step 3

### 3 船用 12 型发动机连杆锻模设计

#### 3.1 连杆锻模设计

结合重庆东科模具公司现有的俄罗斯 TMP 公司的 2500 t 热模锻压力机工作台面尺寸, 并尽量节省模具材料, 只需加工制造终锻开放式模 1 副, 模具型腔轴颈部位分别设有上下顶杆孔, 以方便锻件顺利脱模。锻模图如图 4 所示。

锻模材料选用 4Cr5MoSiV1 热作模具钢, 该材料的化学成分与美国的 H13 空淬硬化热作模具钢近似, 但因 4Cr5MoSiV1 钢的钒含量高于美国的 H13 钢, 故在 500~600 °C 温度范围内, 4Cr5MoSiV1 钢的机械性能较美国 H13 钢更具优势。4Cr5MoSiV1 钢

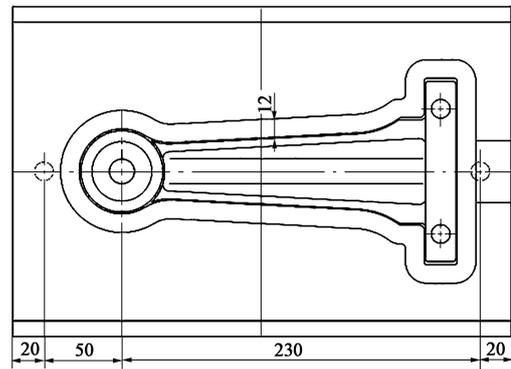


图 4 船用 12 型发动机连杆锻模图

Fig. 4 Forging die diagram of connecting rod for 12-type marine engine

材料的化学成分见表 1。

表 1 4Cr5MoSiV1 钢材料的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 4Cr5MoSiV1 steel material (% , mass fraction)

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	S	P	Ni	Cu
0.37~0.43	0.08~0.10	0.20~0.44	5.0~5.8	0.3~1.1	1.2~1.5	≤0.005	≤0.02	≤0.25	≤0.25

#### 3.2 连杆终锻模型腔设计

船用 12 型发动机连杆在锻粗预成形后, 预锻件直接放入终锻模膛, 采用开放式模锻造, 未注圆角半径设为 2 mm, 热锻件的尺寸按照冷锻件的尺寸在水平方向放大 1.011~1.014 倍<sup>[10-11]</sup>。锻模型腔尺寸的公差范围高于锻件尺寸的公差范围, 以提高锻件精度和锻模寿命。在下模具型腔锻件两圆台凸起处易堆积石墨乳脱模剂, 造成圆台充填不满的锻造缺陷。依据现场验证经验得出, 每锻打 50 件后清理 1 次残留模腔内的金属氧化皮与石墨乳脱模剂, 可提高锻件的合格率<sup>[12]</sup>。

#### 3.3 连杆飞边桥仓设计

锻模采用开放式模锻, 在下模上设置飞边桥,

高度为 10 mm, 宽度为 8 mm。飞边桥的主要作用是利用模具上下模腔面的摩擦力来阻止模具型腔内的金属外流, 有利于锻件充填。飞边桥以外为飞边桥仓, 多余的金属被挤压进入飞边桥仓, 防止金属挤压变形时产生变形抗力, 损坏飞边桥的结构, 降低模具寿命<sup>[13]</sup>。飞边桥仓的结构见图 5。

### 4 现场批量生产验证

#### 4.1 船用 12 型发动机连杆生产工艺流程

目前重庆东科模具公司采用进口俄罗斯 TMP 公司生产的 2500 t 热模锻压力机进行锻造, 该设备的打击速度快、模具热接触时间短、模具使用寿命长。

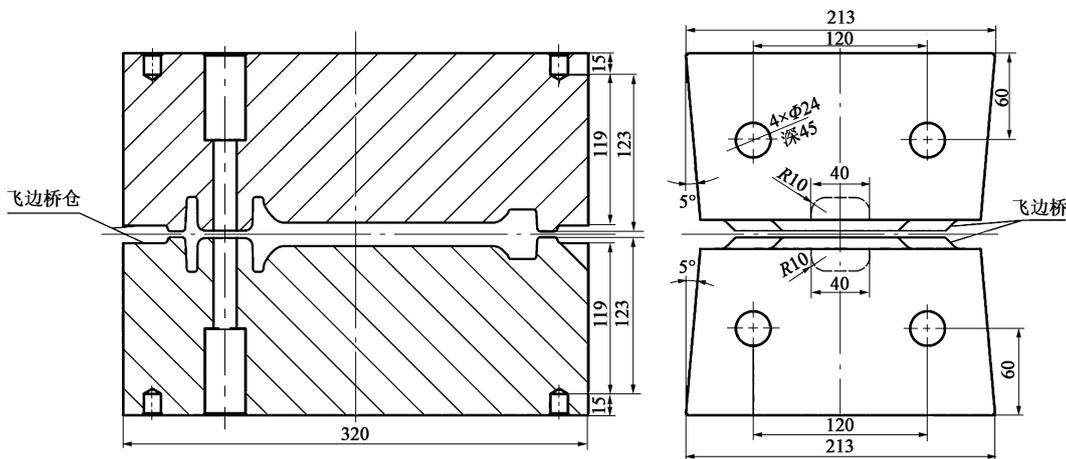


图5 终锻合模图

Fig. 5 Die assembly diagram of final forging

船用12型发动机连杆的错模通过上、下模架的导柱与导套来保证。圆棒料加热采用600 kW中频炉加热至1100~1140℃。锻件的锻造工艺一般包括以下

工序：进厂检验、下料、加热、分段制坯、锻造、切边、冲孔、校正、热处理、抛丸清理、磁粉检测、产品检测及包装入库<sup>[13-16]</sup>。其生产工艺流程如图6所示。

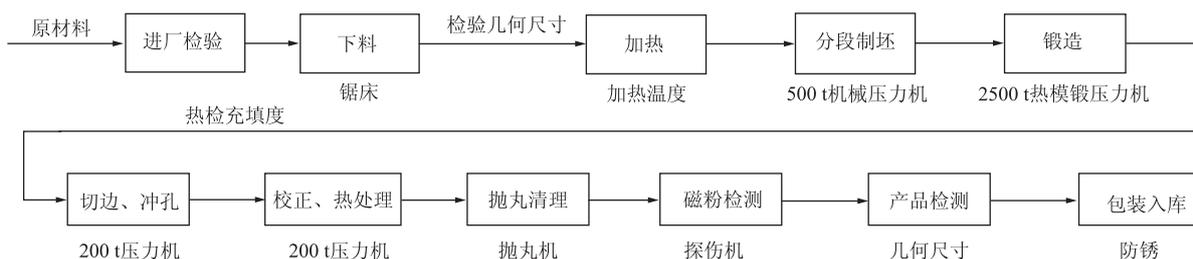


图6 船用12型发动机连杆生产工艺流程图

Fig. 6 Production process flow chart of connecting rod for 12-type marine engine

## 4.2 样件生产验证

对上述船用12型发动机连杆3工步分段制坯+模锻复合成形工艺进行了现场生产验证，样件生产的船用12型发动机连杆样件如图7所示。该船用12型发动机连杆的材料利用率为81.2%，合格率达99.4%。后续可以考虑一模两件优化设计，对小批量、多品种的锻件研发试制具有重要的借鉴意义。



图7 生产所得船用12型发动机连杆实物

Fig. 7 Real object of connecting rod for 12-type marine engine obtained from production

## 5 结论

(1) 船用12型发动机连杆已试制成功，材料利用率达到81.2%，合格率为99.4%。

(2) 此类锻件采用3工步分段制坯+模锻复合成形工艺，具体工艺流程为：锻粗→两次90°翻转拔长→4次90°翻转拔长→预成形制坯→终锻→切边、冲孔→热矫正。

(3) 预成形制坯模具的设计尤为关键，决定了终锻的金属充填效果及材料利用率。

### 参考文献：

[1] 赵一平, 张如华, 蒋鹏, 等. 汽车典型锻件生产 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.  
Zhao Y P, Zhang R H, Jiang P, et al. Automotive Typical Forgings Production [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

- [2] GB/T 12363—2005, 锻件功能分类 [S].  
GB/T 12363—2005, Classification of forging functions [S].
- [3] GB/T 12362—2003, 钢质模锻件公差及机械加工余量 [S].  
GB/T 12362—2003, Tolerances and machining allowances for steel die forgings [S].
- [4] GB/T 3077—1999, 合金结构钢 [S].  
GB/T 3077—1999, Structural alloy steel [S].
- [5] 中国机械工程学会锻压学会. 锻压手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
Chinese Society of Mechanical Engineering Forging Society. Forging Manual [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.
- [6] 吕炎. 锻模设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
Lyu Y. Die Design Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [7] 吕炎. 锻造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.  
Lyu Y. Forging Technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1995.
- [8] 詹辉, 苟建华. 高档客车转向节锻件模锻工艺开发 [J]. 金属加工: 热加工, 2004, (12): 17-19.  
Zhan H, Gou J H. Development of die forging technology for high-grade steering knuckle forgings for passenger cars [J]. MW Metal Forming, 2004, (12): 17-19.
- [9] 徐皓, 刘铭, 刘江. 基于 Deform 的依维柯汽车转向节的预锻优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 30-34.  
Xu H, Liu M, Liu J. Pre-forging optimization of steering knuckle for IVEVO automobile based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 30-34.
- [10] 刘江, 徐皓. 基于 Deform 的长杆类汽车转向节锻模设计及锻造工艺生产验证 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (2): 9-13.  
Liu J, Xu H. Forging die design and forging process production verification of long rod steering knuckle based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (2): 9-13.
- [11] 苟建华. 汽车 884N 转向节模锻工艺开发 [J]. 金属加工: 热加工, 2004, (7): 66-67.  
Gou J H. Automobile 884N steering knuckle die forging process development [J]. MW Metal Forming, 2004, (7): 66-67.
- [12] 吕炎. 锻件缺陷分析与对策 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.  
Lyu Y. Analysis and Countermeasures of Forging Defects [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [13] 徐皓, 刘江, 林雪冬, 等. 6061 铝合金汽车转向节的预锻优化设计应用研究 [J]. 轻合金加工技术, 2020, 48 (5): 41-44, 50.  
Xu H, Liu J, Lin X D, et al. Automobile 884N steering knuckle die forging process development [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48 (5): 41-44, 50.
- [14] 徐皓, 刘江. CH1018 转向节锤锻模具优化设计实例 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 179-183.  
Xu H, Liu J. Example of optimal design on hammer forging die of steering knuckle CH1018 [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 179-183.
- [15] 徐皓, 刘江. 余热淬火循环泵数量对锻造转向节内部组织的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 194-197.  
Xu H, Liu J. Influence of quantity of residual heat quenching circulating pump on internal organization for forging steering knuckle [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 194-197.
- [16] 徐皓, 刘江. 长城 2020 转向节锻模设计及其锻造工艺生产验证 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 24-28.  
Xu H, Liu J. Forging die design of Great Wall 2020 steering knuckle and production verification of its forging process [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 24-28.

## 关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程（锻压）分会成立于1963年，是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体，是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定：凡承认本会章程并符合条件者，可申请为本会会员。

**会员的权利与义务：**1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌，铜牌由秘书处统一制作并颁发，可申请定制；2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠；3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动；4. 优先获得本会的有关学术资料，免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志；5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo链接；6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权；7. 接受本会委托，进行论证、评议、咨询等工作；8. 享有入会、退会的自由。

**申请手续：**提交入会申请表。申请个人会员，需填写《个人会员入会申请表》，同时提交“个人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员，需填写《团体会员入会申请表》，同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处，并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱；也可登陆学会网站，进行在线注册。经审批通过后，将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记，由学会秘书处颁发会员证书。

地 址：北京市海淀区学清路18号707室塑性工程分会      联系人：李佳盈、秦思晓、周林、金红

电 话：010-62912592 传 真：010-62912592 邮 箱：duanya@cmes.org 网 址：http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会