高功率密度发动机连杆热模锻工艺模拟与优化

高峰[1]，林军[2,3]
(1. 北方通用发动机有限公司, 山西 大同 037036;
2. 国防科技工业精密塑性成形技术研究应用中心, 重庆 400039;
3. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要：目的 研究某高功率密度发动机连杆的锻造工艺。**方法** 首先采用传统设计方法设计了连杆模锻工艺，再通过有限元模拟分析优化工艺。**结果** 根据有限元模型，分析了传统设计方法下的毛坯充型效果，直观地再现了终锻成形过程中的坯料外形演变和容易出现成形缺陷，在此基础上，优化了毛坯尺寸，满足了终锻充型要求。**结论** 通过工艺试验进一步验证了模拟结果，获得的锻件没有出现缺肉、折叠等缺陷，微观组织较均匀，能够满足技术要求。

关键词： 连杆；缺陷；数值模拟；工艺优化
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.04.014
中图分类号： TG316.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2015)04-0066-05

Hammer Forging Process Simulation and Optimization of Connecting Rod of High-Power-Density Engine

GAO Feng[1], *LIN Jun*[2,3]
(1. Norththern General Dynamic Group Ltd., Datong 037036, China;
2. National Research and Application Center of Precise Forming, Chongqing 400039, China;
3. Southwest Technology and Engineering Research Institute of China, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the hammer forging process of connecting rod of one high-power-density engine. The classical process design method was employed to design the hammer forging process, and the finite element method was used to analyze the process. By using numerical simulation, the filled effect was analyzed, the geometrical evolution of preform and defect were shown in numerical simulation results, and the geometry of preform and hammer process were optimized. Experimental work verified the accuracy of numerical simulation results. The obtained forging of connecting rod has homogeneous microstructure without any defects, which can satisfy all the technical requirements.

KEY WORDS: connecting rod; defect; numerical simulation; process optimization

连杆主要功能是将内燃机各缸的往复功传递到曲轴上，通过回转运动将能量传递出去。由于工况复杂，工作负荷大，承受着周期性变化的弯曲应力、扭转应力及惯性力、振动产生的附加应力等，因此连杆为I类功能锻件，应严格确保其质量[1]。

连杆的塑性成形工艺主要有传统模锻[2—3]和闭塞挤压[4]两类，传统模锻的典型工艺为锤上模锻[5]。该工艺是小批量中小型连杆锻件的最佳成形工艺[6]，

收稿日期： 2015-04-13
作者简介： 高峰(1982—)，男，山西五台人，工程师，主要研究方向为精密机械制造。

其常用锻造流程为:拔长→滚挤→拍扁→预锻→终锻[2]。虽然一些连杆锻造工艺设计采用了优化方法来优选工艺参数,如 BP 神经网络优化[7]、正交试验优化[8]和其他一些优化方法[9—10],都是针对单工序优化,同时模拟次数多,设计效率较差。根据高功率密度发动机连杆批量小,同时兼顾连杆质量,缩短工艺流程,减少试模次数,文中首先通过传统经验计算获得预制坯几何形状,再通过有限元模拟对连杆锻造全过程进行模拟分析[11—12],再进行工艺试验,使锻件质量得到保证。

1　连杆锻件工艺设计

1.1　飞边槽设计与设备选择

某军用发动机连杆锻件为连杆体和连杆盖 2 件一体合锻成形(如图 1 所示),材质为 34CrNiMo6 钢,其化学成分见表 1,该钢在高温下变形抗力约为 45 钢的 1.5 倍[3]。连杆锻件在分模面上投影面积 F_1 = 283.2 cm^2,周边长度 L=79.6 cm,长度 31.3 cm,初步选定 5 t 模锻锤,因此选用基本型式 I 的飞边槽[2,5],考虑到飞边槽对充型效果的影响[14—16],其尺寸设计为:h=4 mm,h_1=6 mm,b=12 mm,b_1=50 mm,r=2 mm,如图 2 所示。那么飞边平均宽度=$b+b_1/2$=37 mm,飞边投影面积 $F_2=(b+b_1/2)L$=295 cm^2,则包含飞边在内的锻件水平投影面积为 $F=F_1+F_2$=578.2 cm^2,那么所需要模锻锤质量[5]为 m=6×578.2/1000 =3.5 t。按计算,选定的 5 t 模锻锤满足设计要求。

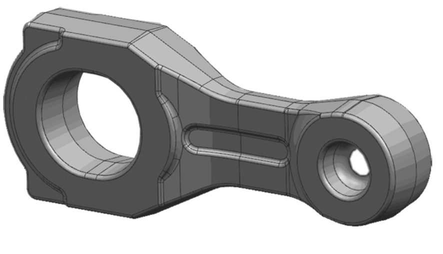


图 1　连杆锻件

Fig. 1 Forging of connecting rod

表 1　34CrNiMo6 钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 34CrNiMo6 steel in wt%

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
0.37	1.44	1.37	0.25	0.66	0.26	0.011	0.013

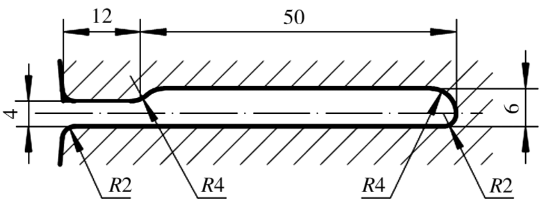


图 2　终成形飞边槽

Fig. 2 Dimension of flash for finish forging process

1.2　预制坯设计

根据 1.1 章节给出的飞边槽尺寸,将图 1 中连杆锻件大头的通孔部分补上辅料,那么含有飞边的锻件三维模型如图 3 左上所示。根据连杆锻件三维模型,锻件沿着长度方向截面积分布如图 3 右上所示。将图 3 右上的截面积转为坯料直径分布,绘制于图 3 左下内。为了方便制坯成形,将图 3 左下中的坯料尺寸补料后设计的坯料直径分布如图 3 右下所示,具体尺寸及三维模型如图 4 所示。从锤上模锻工艺角度来

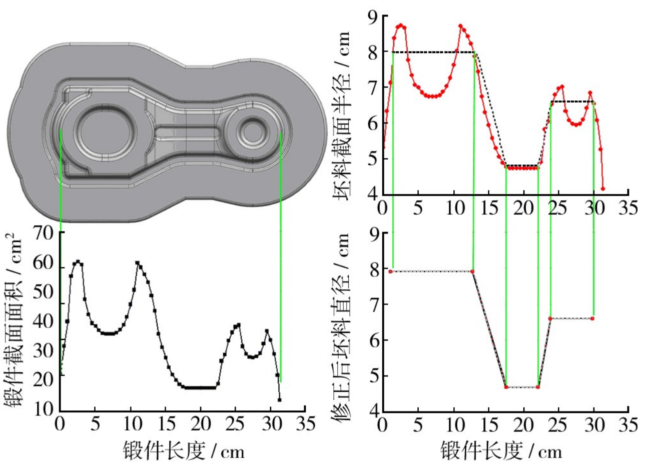


图 3　锻件预制坯尺寸设计

Fig. 3 Design of preform

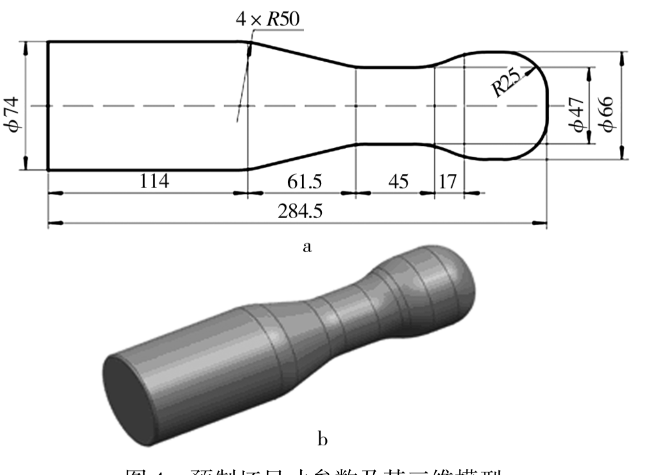


图 4　预制坯尺寸参数及其三维模型

Fig. 4 Dimension Parameters of preform and 3D model

看,图 4 所示坯料成形工序适合拔长+滚挤制坯[5]。

1.3 毛坯尺寸设计

由于采用拔长+滚挤模膛制坯,制坯过程中连杆大头不变形,所以毛坯尺寸首先要满足连杆大头截面积要求,根据等体积换算可以得出毛坯坯料尺寸为 ϕ79 mm×206 mm,考虑到加热过程的料耗(定为1.5%),实际坯料尺寸初步定为为:ϕ80 mm×209 mm。

1.4 工序设计

根据毛坯和预制坯几何形状,以及锻件批量等角度出发,设计的锻造工序如下。

1)轻拍。由于加热后的毛坯表面带有氧化皮,因此在锻造之前,在锤锻模光滑平面上轻拍一下,去除表面氧化铁皮。

2)制坯。采用夹钳夹住大头坯料,拔长并滚挤杆部和小头,其尺寸由模具保证,翻转坯料锤击共 3 ~5 次,制坯工步就结束。

3)拍扁。制坯结束后,坯料外形近似为回转体,置于终锻模腔内将会产生转动,因此需要拍扁坯料,拍扁后的坯料尺寸应该尽量满足均匀变形的要求[4]。

4)终锻。预锻和终锻采用同样一个模腔成形。将坯料在终锻模型内的成形分为两步:第一步,预成形,由于拍扁后毛坯大头部分截面面积与锻件大头截面面积不完全相同,需要对坯料在锻件长度方向再一次分配,弥补制坯工步的不足,一般采用 2 次较轻的锤击;第二步,终成形,采用全能量锤击,完成型腔充型。

2 工艺模拟试验

2.1 连杆锤上模锻工艺几何模型设计

在 1.4 章节的工序设计中,工序 2 获得的坯料尺寸如图 4a 所示,三维模型如图 4b 所示。为了确保在终锻时变形程度一致,拍扁型腔尺寸设计如图 5 所示。终锻模型腔采用图 3 左上所示的三维模型进行设计。

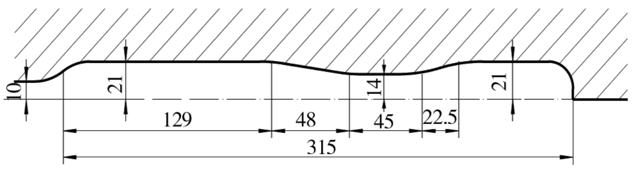


图 5 拍扁型腔的几何尺寸

Fig. 5 Geometric dimension of press cavity

2.2 连杆锤上模锻模拟模型控制参数设计

34CrNiMo6 钢材料模型来自文献[6],坯料初始温度为 1150 ℃,模具温度为 300 ℃,选用剪切摩擦模型,摩擦因数取 0.25;坯料与模具之间的热传导系数为 5 W/(m·K)。锻锤为 5 t 模锻锤,假定上滑块质量为 5.5 t(含上模),最大打击能量为 125 kJ,最大打击效率为 0.45,每锤间隔为 4 s。拍扁工序采用 2 次打击,首次打击能量为最大打击能量的 60%,考虑到锤头下降速度对打击效率的影响,打击效率为 0.40,第 2 次为 100%,效率为 0.45;终锻打击次数为 4 次,首次为最大打击能力的 50%,打击效率为 0.35,第 2 次为 60%,效率为 0.40,第 3 次和第 4 次采用最大打击能量的 100%,打击效率为 0.45。

2.3 模拟结果分析

2.3.1 拍扁工序结果分析

图 4 预制坯经过拍扁后的尺寸参数如图 6 所示,其长度为 316 mm,最大宽度为 107 mm,恰好能够放入终锻型腔内。

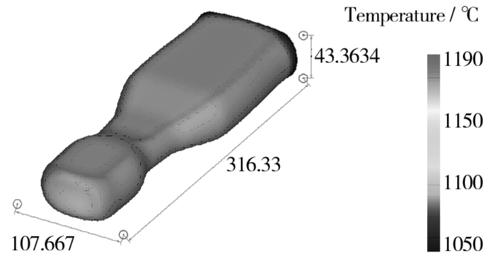


图 6 拍扁后的坯料外形尺寸及其温度分布

Fig. 6 Dimension and temperature distribution of billet after press process

2.3.2 初步设计的预制坯充型效果与尺寸优化

将拍扁工序获得的坯料导入终锻成形模拟模型中,再经过终锻 4 次锤击后,坯料高度为 48.6 mm(热态),坯料在模具型腔内的充型效果如图 7 所示,由于在图 7 的 *A* 处没有形成飞边,导致了在大头 4 个尖角处不能充型。对图 3b 的截面积分布图进一步分析后,须将大头部分坯料增长 4 mm,再一次进行模拟。

3.2.3 优化后坯料充型效果

采用优化后坯料的模拟结果如图 8 所示,从图 8 中可以看出,由于 *B* 处形成飞边,使得连杆大头端部的 4 个尖角完全充型。在终锻工序中,四次打击完成后坯料温度场分布如图 9 所示,从图 9 可以看出,锻件飞边上的最大温度为 1250 ℃ 以上,而本体温度低

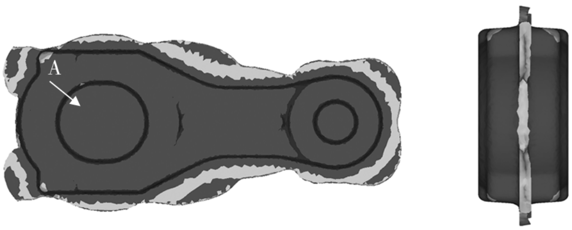


图 7　初步设计坯料在终锻工序下的充型效果

Fig. 7 Filling effect after finishing forging process by using the initial preform

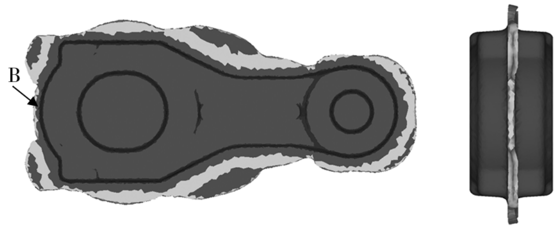
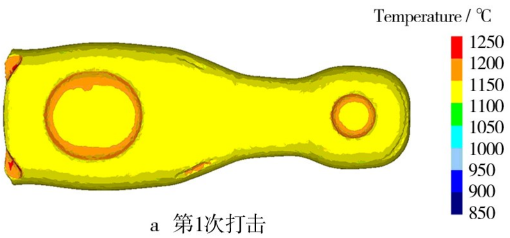
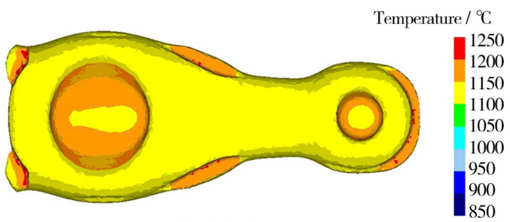


图 8　优化后的坯料在终锻中的充型效果

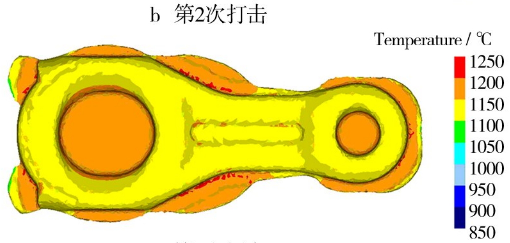
Fig. 8 Filling effect after finishing forging process by using the optimized preform



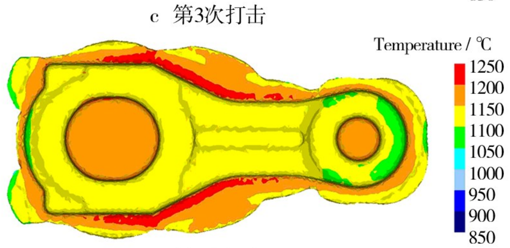
a　第1次打击



b　第2次打击



c　第3次打击



d　第4次打击

图 9　终锻过程锻件几何外形演变及温度分布

Fig. 9 Geometry evolution and temperature distribution of billet during finishing forging process

于 1150 ℃,满足材料的最大允许温度。终锻成形过程的打击力及打击能量如图 10 所示,从图 10 可以看出,最大打击力为 3300 t,4 次打击恰好满足终成形需求。

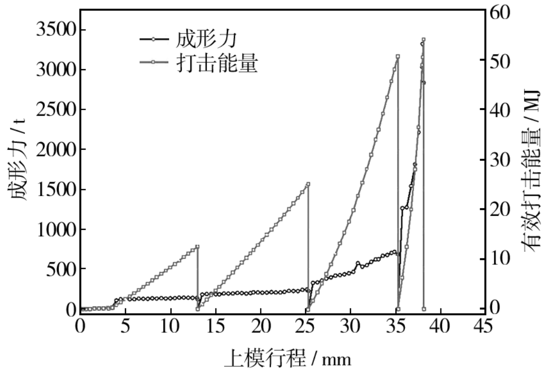


图 10　终锻四次锤击成形力及成形能量曲线

Fig. 10 Curves of forging force and energy for finishing forging process

3　工艺试验

根据模拟结果,设计了模具,在 5 t 模锻锤上进行了工艺试验。坯料加热温度为 1150 ℃,模具预热温度为 300 ℃,采用水基石墨润滑。试验获得的锻件和调质后典型区域微观组织如图 11 所示。从图 11 中可以看出,经过有限元分析与优化后,锻件没有塌角、折叠等缺陷,微观组织均匀性好,满足产品技术要求。

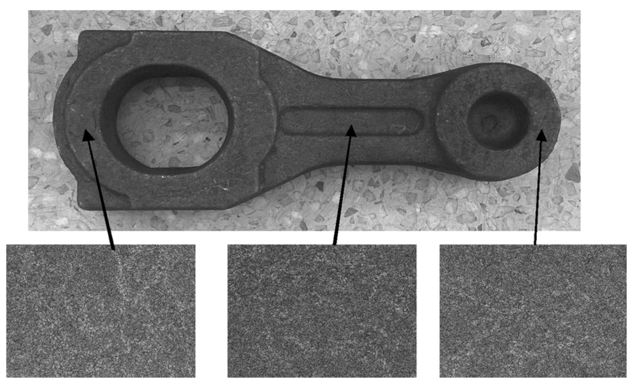


图 11　试验获得连杆锻件及其典型位置微观组织(调质态,500×)

Fig. 11 Connecting rod obtained by experimental work and its typical microstructure

4　结论

1) 对采用传统方法设计的毛坯和预制坯,进行有限元模拟验证,优化了毛坯几何尺寸,改善了锻件在终锻型腔内的充型效果,终锻件与毛坯的体积比为

87.5%,大大降低了材料成本。

2)通过有限元模拟进一步减少了试锻次数,从而节省时间和费用。

3)为了保证连杆锻件的组织一致性,连杆各区域在终锻部分变形程度一致,有效控制了锻件组织一致性。

参考文献:

[1] 李志广,安文忠,刘振杰. 396柴油机连杆模锻成形工艺研究[J]. 锻压技术,2013,38(2):17—20.
LI Zhi-guang, AN Wen-zhong, LIU Zhen-jie. Research on Forming Technology for 396 Diesel Engine Connecting Rod Die Forging[J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 38(2):17—20.

[2] 黄虹,陈元芳,王昶. 中小型连杆锤上模锻优化设计[J]. 锻压机械,2002(2):28—30.
HUANG Hong, CHEN Yuan-fang, WANG Chang. Optimaled Design for Forging Die of Small and Medium Connecting Rod for Forging Hammer[J]. Metalforming Machinery, 2002(2):28—30.

[3] 杨振恒,陈镜清. 锻造工艺学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1985.
YANG Zhen-heng, CHEN Jing-qing. Forging Technology[M]. Xi´an: Northwest Polytechnic University Press, 1985.

[4] 马斌. 6061铝合金连杆闭塞锻造成形过程的数值分析与实验研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
MA Bin. Numerical Analysis and Experimental Research on Forming Process of 6061 Aluminum Alloy Connecting Rods Closed-die Forging[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

[5] 吕炎. 锻模设计手册[K]. 北京:机械工业出版社,2005.
LYU Yan. Handbook of Forging Die Design[K]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005.

[6] 康凤,杨鄂川,林军,等. 曲轴用34CrNiMo6高强结构钢热变形行为研究[J]. 材料导报,2013,27(2):49—50.
KANG Feng, YANG E-chuan, LIN Jun, et al. Study on Hot Deformation Behavior of High Strength Construction Steel 34crnimo6 for Crankshafts[J]. Materials Review, 2013, 27(2):49—50.

[7] 吴旭. 连杆锻造成形数值模拟及工艺参数优化[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
WU Xu. Forging Process Numerical Simulation and Parameters Optimization of Connecting Rod[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

[8] 刘雅辉,刘淑梅,于秋华,等. 基于立体正交试验的连杆热锻模优化设计[J]. 上海工程技术大学学报,2015(1):14—18.
LIU Ya-hui, LIU Shu-mei, YU Qiu-hua, et al. Optimization Design of Connecting Rod Forging Die Based on Cubic Orthogonal Test[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2015(1):14—18.

[9] 万亚飞. 发动机连杆预锻过程数值模拟与工艺优化[D]. 长春:长春理工大学,2014.
WAN Ya-fei. Numerical Simulation and Optimization of Engine Connecting Rod Pre-forging Process[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.

[10] 杨兆伟,崔晓萍,孙康岭. 摩托车连杆锻造过程的数值模拟[J]. 热加工工艺,2010,39(17):101—103.
YANG Zhao-wei, CUI Xiao-ping, SUN Kang-ling. Numerical Simulation of Forging Process for Motorcycle Connecting Rod[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(17):101—103.

[11] 王建国,冯州鹏,黄引平,等. 柴油机连杆锻造成形工艺的数值模拟[J]. 热加工工艺,2008,37(23):70—72.
WANG Jian-guo, FENG Zhou-peng, HUANG Yin-ping, et al. Numerical Simulation of Forging Technology for Diesel Engine Rod[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(23):70—72.

[12] 赵新海,赵国群,王广春,等. 锻造预成形多目标优化设计的研究[J]. 机械工程学报,2002,38(4):61—65.
ZHAO Xin-hai, ZHAO Guo-qun, WANG Guang-chun, et al. Multiple Objective Optimal Preform Die Shape Design in Metal Forging[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(4):61—65.

[13] 赵祖德,陈学文,陈军,等. 基于近似模型和数值模拟的连杆热锻成形工艺设计优化[J]. 上海交通大学学报,2008,42(5):748—751.
ZHAO Zu-de, CHEN Xue-wen, CHEN Jun, et al. The Design Optimization for Hot Forging Process of Connecting-rod Based on Approximate Model and Numerical Simulation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5):748—751.

[14] 叶焕君. 热模锻模具的飞边槽优化设计[J]. 锻压技术,2008,33(1):90—92.
YE Huan-jun. Optimized Design of Die Flash Groove for Hot Die Forging[J]. Forging & Stamping Technology, 2008, 33(1):90—92.

[15] 管婧,王广春,赵国群. 飞边槽结构形式对模锻成形的影响[J]. 热加工工艺,2002,31(5):40—41.
GUAN Jing, WANG Guang-chun, ZHAO Guo-qun. Influence of Different Type of Flash on the Open-die Forging[J]. Hot Working Technology, 2002, 31(5):40—41.

[16] 刘永熙. 普通飞边槽与楔形飞边槽成形阻力的比较和选用[J]. 合肥工业大学学报,1983,6(2):71—76.
LIU Yong-xi. Comparison of Forming Resistance and Choice Between Common Flash and Wedged Flash[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1983, 6(2):71—76.