

连杆无飞边锻造工艺及模具系统研究

刘雅辉, 刘淑梅, 何文涛, 于秋华

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要: **目的** 研究连杆无飞边锻造工艺, 以及闭模锻造过程中中间工序件的设计和所需的模具系统。**方法** 通过建立有限元模型, 分析连杆的预锻和终锻过程中金属流动长度、成形载荷和模具寿命, 为模具设计提供数据支持。**结果** 数值模拟结果表明金属充模效果良好; 连杆大端主要在预锻中成形, 而连杆小端和杆部主要在终锻中成形; 预锻和终锻的最大成形载荷分别为 437 t 和 850 t; 连杆大端的模腔圆角为模具失效危险区。**结论** 通过辊锻制坯、预锻分配物料和终锻精密成形, 实现了连杆的无飞边锻造。

关键词: 连杆; 闭模锻造; 无飞边; 模具系统; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.06.013

中图分类号: TG316

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)06-0084-04

Flashless Forging Process and Tool System of Connecting Rod

LIU Ya-hui, LIU Shu-mei, HE Wen-tao, YU Qiu-hua

(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the flashless forging process connecting rod, as well as the design of intermediate goods and the die system needed for closed-die forging. **Methods** Finite element model was estimated to analyze the metal flowing path during pre and final forging, forming load and tool life, which provided data support for the tool design. **Results** Results of numerical simulation showed that: the metal die-filling was desired; the big end of connecting rod was mainly formed in the pre-forging, whereas small end and stem were mainly formed in the final forging; the maximum forming loads of pre and final forging were 437 t and 850 t, respectively; the dangerous zone of tool failure occurred at the big end of connecting rod in the cavity. **Conclusion** Through rolling for blank preparation, pre-forging for materials distribution and final forging for precision forming, flashless precision forging for connecting rod was achieved.

KEY WORDS: connecting rod; closed die forging; flashless; tool system; numerical simulation

锻造产品具有良好的机械性能, 因而锻造工艺被广泛应用于制造高性能的零件^[1-3], 然而随着制造业的技术革新, 传统的锻造工艺面临着粉末冶金

和铸造的挑战^[4-6]。随着精密成形技术在轴对称零件上的应用, 齿轮等汽车常用的小质量零件均实现了近净成形^[7-9]。有报道称已在实验室实现了两缸

收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(51301105); 民用飞机平尾壁板时效成形工艺研究项目(B-8932-13-011); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(13KY0516)

作者简介: 刘雅辉(1988—), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 主要研究方向为模具 CAD/CAE/CAM。

曲轴的无飞边锻造^[10-12],这将会给锻造行业带来新的竞争优势。

文中以发动机连杆的精密成形工艺为研究对象,并探讨模具系统的设计方案,使用数值模拟技术对连杆的无飞边锻造过程进行分析,研究闭模锻造过程中金属的流动规律和容易出现的成形缺陷,最后分析了模具载荷并对模具磨损进行预测。

1 连杆无飞边锻造工艺链

连杆属于长轴类锻件^[1,4,12],其长宽高3个尺寸依次减小,传统的锻造工艺需要两次预锻和一次终锻成形,相邻工艺的模具匹配复杂且后续还有切边、冲孔和热校正等工序。采用闭模锻造技术生产连杆,即将辊锻所得预制坯放入上下模之间,上模具下行闭合,冲头进入模具并对坯料成形,该过程中无飞边产生,且只需一次预锻和终锻后进行冲孔、控制冷却,其工艺链见图1,连杆材料为C70S6,模具材料为H13钢。

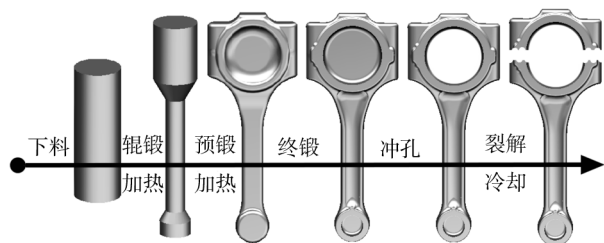


图1 连杆精锻工艺链布局

Fig. 1 Layout of precision forging chain for connecting rod

2 精锻模具系统设计

2.1 中间工序件的设计

由于精锻连杆要求预制坯与预锻、终锻模腔的尺寸有较好的匹配,因此需采用辊锻制坯。近净成形过程无飞边产生,只允许模具之间有微小的毛刺,在确定工序件的体积时,除了考虑体积收缩补偿外,还应考虑锻造过程的成形载荷和模具应力。图2为微车连杆无飞边锻造成形的中间工序件。

但需要注意3点:首先,应考虑锻件体积收缩补偿,这是因为金属受温度变化会出现尺寸和体积变化,尽管体积不变,尺寸变化也将影响锻件精度,因

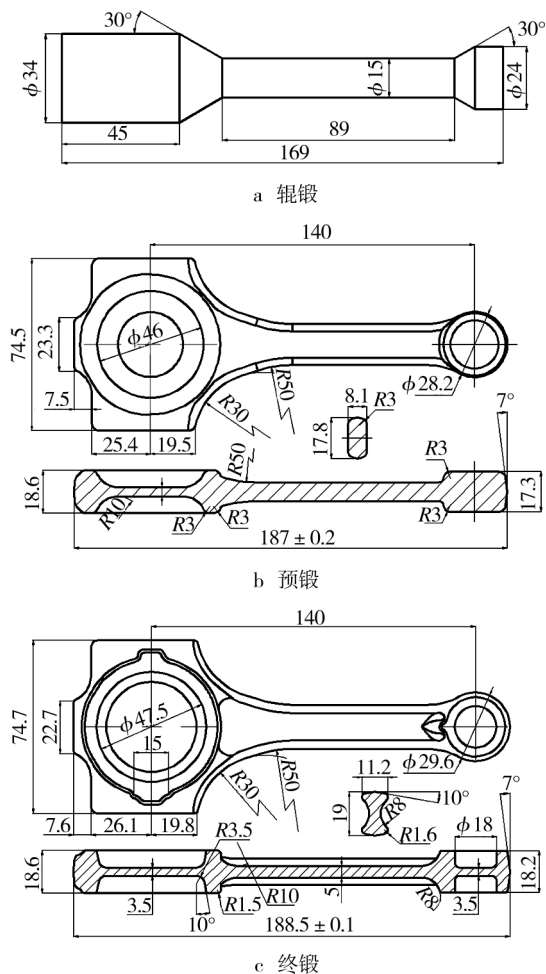


图2 中间工序件设计

Fig. 2 Design of intermediate goods

此需要采用物理实验研究不同材料和温度对锻件体积收缩的影响^[12]。其次,要考虑中间工序件的设计,不同的表面和截面设计会影响坯料的散热和流动,进而影响锻件质量^[4]。最后,合理设计终锻件代加工部位,以减少后续机加工的余量,这里主要是指连杆的大小孔及两侧端面^[6,8]。

2.2 模具系统的设计

精锻模具系统的设计因零件与锻造工艺的不同而差别较大。常见的闭模锻造工艺的工作部件主要包括上下模和冲头,基于锻件受力状态的考虑,预锻一般有一个冲头而终锻有上下两个冲头。图3为连杆精锻模具示意图,其中预锻模具的运动次序是:上下模开启,预制坯放入,上下模闭合且锻件不变形,上冲头下行进入上模对坯料成形。终锻模具的运动

次序类似:上下模开启,预锻件放入,上下模闭合且锻件不变形,上、下冲头分别进入上、下模从坯料两侧进行成形。

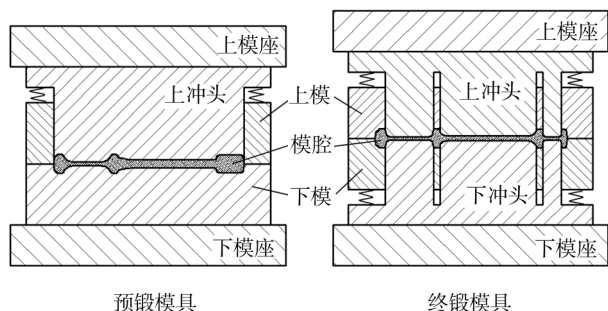


图3 精锻模具系统示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of precision forging tool systems

在无飞边锻造过程中,模具承受的载荷较大,不合理的模腔结构设计将会带来应力集中甚至断裂失效等不良后果^[4,6],加之锻造过程的周期冲击载荷和热载荷,模具寿命势必缩短,因此应利用数值模拟技术,在设计过程中发现和改善不合理设计。

3 精锻数值模拟和分析

采用 DEFORM 软件进行数值模拟和分析。坯料温度为 1250 °C,坯料网格为 68 800 个;模具温度为 250 °C,冲头运行速度为 50 mm/s;采用混合摩擦模型:摩擦因数为 0.2,摩擦因数为 0.4,模具传热系数为 11 W/(m·°C),空气传热系数为 0.02 W/(m·°C)。

3.1 金属流动规律分析

金属流动规律是在模具设计阶段就应该考虑的问题,主要体现在锻造过程中坯料至模腔壁面的距离^[12-13],即金属流动长度,金属流动长度越大则坯料充模越困难,越容易出现充填不足的缺陷;而金属流动长度越不平衡则锻件受力越不平衡,越容易导致金属紊乱流动甚至出现折叠缺陷。图 4 给出了连杆精锻过程中的变形过程,可见棒状坯料在变形过程中主要是横向流动:连杆大端的 4 个顶角是金属流动距离最大的位置,而连杆大孔边缘冲头一侧依靠金属回流成形,相当于反挤压,此二处成形困难。但为了降低预锻载荷,不易完全充模。

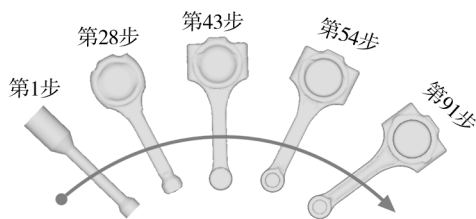


图4 连杆的主要变形步骤

Fig. 4 Main forming sequence of connecting rod

图 5 为精锻过程中连杆的位移场分布,可见预锻中金属的位移远大终锻。由于连杆大孔在预锻中成形,连杆小孔在终锻中成形,因此避免了锻件两端受力不均衡发生翘曲。由图 6 可见,预锻中连杆小端的等效应力和等效应变与杆部的水平相当。

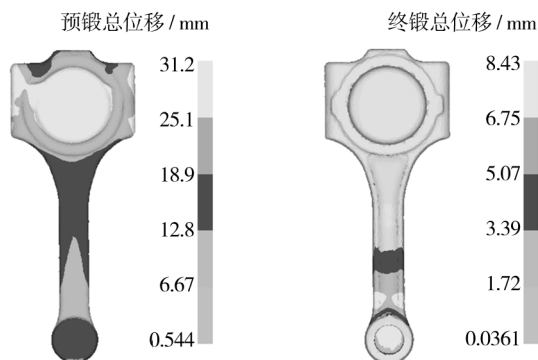


图5 无飞边锻造中位移场分布

Fig. 5 Distribution of displacement field in flashless forging

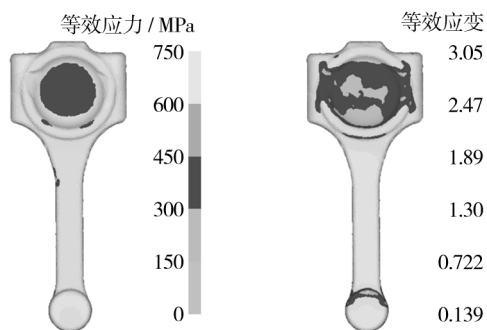


图6 预锻的等效应力和等效应变

Fig. 6 Effective stress and effective strain in pre forging

温度对小质量锻件的尺寸精度影响较大,尤其是重量和晶粒度要求较高的连杆,需要密切关注锻件温升和温降。由图 7 可见,锻造过程中锻件与传统接触的大小孔部位,温降较大,因此需对模具进行

预热。

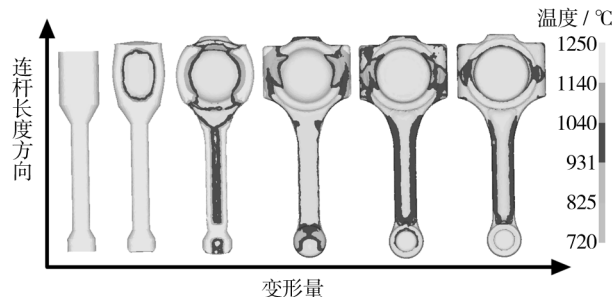


图7 变形过程中锻件温度的变化

Fig. 7 Evolution of forging temperature in the forming process

3.2 成形载荷的分析

根据模拟结果:预锻中上冲头与下模的最大载荷一致,均为 437 t,上模载荷小于 1 t;终锻中上下冲头最大载荷均为 850 t,上下模的最大载荷均为 670 t。图 8 为连杆预锻和终锻中上冲头的行程-载荷曲线。尽管成形主要在预锻完成,但终锻模腔圆角较小,成形载荷仍出现急剧上升。

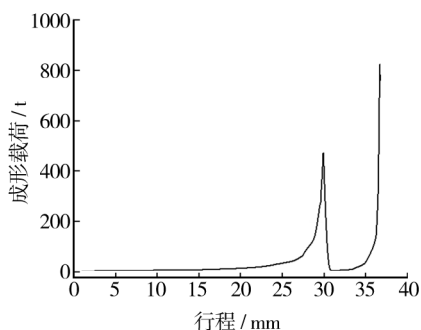


图8 上冲头的行程-载荷曲线

Fig. 8 Stroke-load curve of top punch

3.3 模具寿命的预测

热锻模具因承受热载荷、机械载荷、化学腐蚀和摩擦等作用而容易发生磨损失效和断裂失效。通过数值模拟可以在设计阶段对设计进行优化^[14-15]。利用 Archard 计算模具磨损^[16-17],发现冲头顶端为磨损严重区。连杆大端的模腔圆角处为模具应力危险区。

4 结论

1) 采用闭模锻造技术开发了连杆无飞边锻造工艺,工序链主要包括辊锻制坯、预锻和终锻等工

序。

2) 连杆无飞边锻造中,预锻模具采用一个上冲头形式,而终锻采用上下 2 个冲头的设计以保证连杆两侧受力均衡。

3) 数值模拟结果表明,坯料充填效果良好,上冲头的预锻和终锻最大载荷分别为 437 t 和 850 t,连杆大端的模腔圆角为模具失效危险区。

参考文献:

- [1] GRONOSTAJSKI Z, HAWRYLUK M. The Main Aspects of Precision Forging [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8(2): 39—55.
- [2] DUGGIRALA R. Design of Forging Dies for Forming Flashless Ring Gear Blanks Using Finite Element Methods [J]. Journal Materials Shaping Technology, 1989, 7(1): 33—47.
- [3] BACH F W, KERBER K. Prozesskette Präzisionsschmieden [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [4] PARK J J, HWANG H S. Preform Design for Precision Forging of an Asymmetric Rib-web Type Component [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187—188: 595—599.
- [5] OH S I, WU W T, ARIMOTO K. International Symposium on Advanced Forming and Die Manufacturing Technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1-3): 2—9.
- [6] BEHRENS B A, ODENING D. Process and Tool Design for Precision Forging of Geared Components [J]. International Journal of Materials Forming, 2009, 2(1): 125—128.
- [7] DOEGE E, NÄGELE H. FE Simulation of the Precision Forging Process of Bevel Gears [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1994, 43(1): 241—244.
- [8] DOEGE E, BOHNSACK R. Closed Die Technologies for Hot Forging [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2): 165—170.
- [9] HARTLEY P, PILLINGER I. Numerical Simulation of the Forging Process [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(48-49): 6676—6690.
- [10] BEHRENS B A, BOUGUECHA A, LÜKEN I, et al. 3. 16—Near-net and Net Shape Forging [J]. Comprehensive Materials Processing, 2014, 3: 427—446.
- [11] BEHRENS B A, NICKEL R, MÜLLER S. Flashless Precision Forging of a Two-cylinder-crankshaft [J]. Production Engineering, 2009, 3(4-5): 381—389.

(下转第 121 页)

- [10] SEMIATIN S L, SEETHARAMAN V, WEISS I. Flow Behavior and Globularization Kinetics during Hot Working of Ti-6Al-4V with a Colony Alpha Microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 263: 257—271.
- [11] PRASAD Y V R K. Recent Advances in the Science of Mechanical Processing[J]. Indian Journal of Technology, 1990, 28: 435—451.
- [12] 罗子健, 杨旗, 姬婉华. 考虑变形热效应的本构关系建立方法[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(6): 804—808.
- LUO Zi-jian, YANG Qi, JI Wan-hua. Considering the Deformation Heat Effect of Constitutive Relation Method is Established[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(6): 804—808.
- [13] MCQUEEN H J, BELLING Fry J. Constitutive Constants for Hot Working of A-1 4.5Mg-0.35Mn[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2000, 39(4): 483—492.
- [14] RAO K P, HAWBOLT E B. Development of Constitutive Relationship Using Compression Testing of a Medium Carbon Steel[J]. Engineering Materials and Technology, 1992, 114: 116—123.
- [15] KREUSS G. Deformation Processing and Structure[M]. Ohio: American Society for Metal, 1984.
- [16] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the Mechanism of Hot Deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9): 1136—1138.

(上接第 87 页)

- [12] BEHRENS B A, DOEGE E, REINSCH S, et al. Precision Forging Processes for High-duty Automotive Components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185(1-3): 139—146.
- [13] BEHRENS B A, WOLTER F E, BLANKE P, et al. Inverse 3D - Materialflusssimulation zur Zwischenformauslegung für das Gesenkschmieden [EB/OL]. [2014-05-06]. www.utfscience.de.
- [14] KNÖRR M. Auslegung Von Masivumformwerkzeugen Gegen Versagen Durch Ermüdung[M]. Berlin: Springer, 1996.
- [15] STUTE-SCHLAMME W. Konstruktion und Thermomechanisches Verhalten Rotationssymmetrischer Schmiedegesenke[D]. Hannover: Universität Hannover, 1981.
- [16] JAHANMIR S, SUH N P, ABRAHAMSON II E P. The Delamination Theory of Wear and the Wear of a Composite Surface[J]. Wear, 1975, 32(1): 33—49.
- [17] SOBIS T, ENGEL U, GEIGER M. A Theoretical Study on Wear Simulation in Metal Forming Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1992, 34(1-4): 233—240.

(上接第 110 页)

- [13] 胡成亮, 刘全坤, 赵震, 等. 考虑弹性变形行为的齿形凹模修正方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(1): 52—55.
- HU Cheng-liang, LIU Quan-kun, ZHAO Zhen, et al. Modification Method of Gear-Shaped Die Considering Elastic Deformation Behavior[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(1): 52—55.
- [14] CEILIK M. Comparison of Three Teeth and Whole Body Models in Spur Gear Analysis[J]. Mechanism and Machine Theory, 1999(34): 1227—1235.
- [15] 李建国, 汤文成. 基于热力耦合的减振轴套挤压成形有限元模拟研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 30—33.
- LI Jian-guo, TANG Wen-cheng. Finite Element Simulation Research of Vibration bushings Forging Based on the Thermal-mechanical Coupling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(10): 30—33.