多拐曲轴镦挤成形过程轴向流动模拟分析与试验验证

胡丰泽[1]，郭巨寿[2]，袁宇亭[2]，曹燕[2]，林军[3]，康凤[3]

（1.海军装备部，山西 大同 037036；2.北方通用动力集团有限公司，山西 大同 037036；3.西南技术工程研究所，重庆 400039）

摘要：目的 解决多拐曲轴镦挤复合成形过程中，轴向流动导致尺寸精度低的问题。**方法** 从坯料加热、成形过程、成形后冷却等全流程模拟出发，以建立镦挤成形装置运动学、成形过程热力学、曲轴材料本构模型、几何模型等为基础，建立有限元模型，分析产生轴向偏差的原因。**结果** 有限元模拟分析表明，坯料体积、飞边厚度是镦挤成形过程产生轴向流动的关键性因素，可以通过优化台阶轴毛坯几何形状，控制轴向异常流动。**结论** 试验表明，多拐曲轴的轴向流动得到有效控制，单拐轴向长度偏差控制在±1 mm，成品率提高至 90%以上。

关键词： 多拐曲轴；镦挤成形；数值模拟；轴向流动

DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.030

中图分类号： TG316 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2017)06-0175-07

Axial Flow Simulation and Experimental Verification for Upsetting & Extrusion Process of Crankshaft

HU Feng-ze[1], *GUO Ju-shou*[2], *YUAN Yu-ting*[2], *CAO Yan*[2], *LIN Jun*[3], *KANG Feng*[3]

(1.Navy Equipment Department, Datong 037036, China; 2.North General Power Group Co., Ltd., Datong 037036, China; 3.Southwest Technology and Engineering Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the issue of low dimensional accuracy caused by axial flow in upsetting & extrusion process of crankshaft. A finite element model was established according to simulation on the whole flow of heating, forming and cooling of blanks based on kinematics of upsetting & extrusion process device, thermodynamics of forming process, constitutive model of crankshaft material, geometric model, etc. to analyze causes of axial deviation. Based on simulation analysis of finite element, billet volume and flash thickness were the keys for axial flow in upsetting & extrusion forming. The abnormal axial flow might be controlled by optimizing the geometrical shape of blanks for step shaft. Experimental results show that the axial flow of the crankshaft is controlled effectively. The length deviation of single crank shaft is controlled within the range of ±1 mm and the qualified rate of crankshaft forging is up to 90%.

KEY WORDS: crankshaft; upsetting & extrusion forming; numerical simulation; axial flowing

曲轴镦挤复合成形技术（又称全纤维成形技术），是利用水平镦粗、垂直错拐双向成形的方式，逐拐依次成形制备多拐曲轴，该工艺可以提高曲轴疲劳强度 15%[1]、扭转强度 20%以上[2]，曲轴综合承载能力可

收稿日期： 2017-10-16

作者简介： 胡丰泽（1971—），男，高级工程师，主要研究方向为军用柴油发动机设计开发与质量监督。

通讯作者： 林军（1980—），男，博士，高级工程师，主要研究方向为精密塑性成形工艺与工装、计算塑性力学等。

提高 10%以上[2]，是高性能耐疲劳曲轴毛坯制造的首选工艺。镦挤复合成形技术采用逐拐成形方式，其面临充型不饱满、尺寸精度低等多个工艺优化问题[3—5]，其中因轴向尺寸偏差过大导致的不合格产品占据总不合格产品的 50%以上。对于轴向流动产生的原因，若直接采用工艺试验方式研究该问题产生的原因，试验周期和成本将难以承受，而采用数值模拟方式是一个最有效的手段[6—12]。

当前国内外在曲轴镦挤复合成形模拟方面开展了一系列研究。在数值模拟中，一般采用单拐坯料取代大长径比坯料，坯料温度场设置为均匀分布，镦挤成形模具结构采用整体开放式[7]，或采用封闭式型腔[5]，或模具结构无止退模[8]，这 3 种情况下，数值模拟结果较好反映了镦挤成形过程的流动特征，解决了单拐成形过程的充型问题，而对于多拐曲轴镦挤成形过程产生的轴向流动则鲜有报道。波兰 Tadeusz Rut 教授研究了全尺寸台阶轴毛坯局部加热及成形的数值模拟方法[11]，为解决轴向尺寸偏差过大的问题提供了一个有效的途径。

基于该原因，文中在分析多拐曲轴锻件工艺性的基础上，建立多拐曲轴镦挤成形过程的数值模拟模型，通过该模型分析曲轴在镦挤成形过程中产生轴向流动的原因，并通过工艺试验验证模拟结果，获得具有工程应用价值的轴向流动控制方法。

1 多拐曲轴锻件工艺性分析

研究的多拐曲轴见图 1，选材为 34CrNiMo6 合金结构钢。该曲轴有 5 个曲拐，相邻连杆颈成 72°夹角，因整体尺寸偏小，成形难点主要有：曲臂难以实现饱满充型；主轴颈长度为 27 mm，由于水平镦粗力较大，极易产生轴向流动，从而难以保证主轴颈长度尺寸；该问题仅仅依靠传统的“试错法”，难以满足工艺试验周期与成本要求，必须依赖数值模拟得到基本的工艺规律，为后续工艺试验提供参考数据。然而，镦挤成形工艺是采用逐拐成形方式，工序为：局部加热→移料→成形→冷却→下一拐成形，其中局部加热工步产生不均匀温度场，这对坯料的塑性流动影响较大；又因为采用单个曲拐作为模拟对象，则无法获得主轴颈轴向尺寸变化，因此必须在模拟模型中考虑这两个问题，才能获得具有工程参考价值的模拟结果。

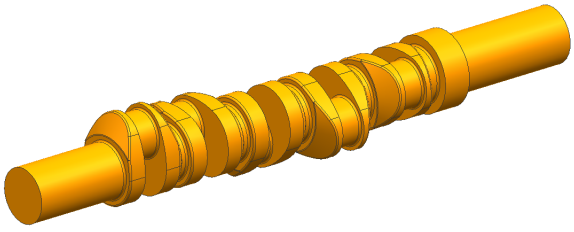


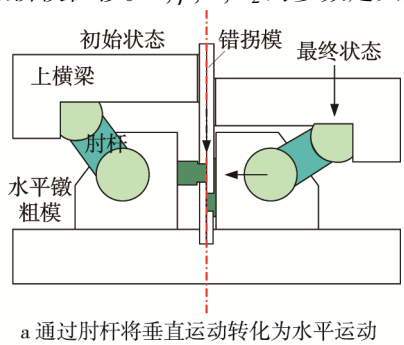
图 1 曲轴锻件

Fig.1 Forging of crankshaft

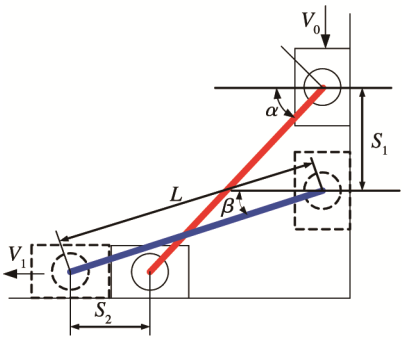
2 镦挤成形模拟模型分析

2.1 镦挤成形过程模具运动学

采用的全纤维镦挤成形装置主体结构形式见图 2a（其他专用于曲轴成形的专用结构有 RR 和 TR 等[12—16]），其中错拐模和上模架可以独立运动，且上模架通过肘杆驱动镦挤模水平运动。上横梁通过肘杆驱动水平镦粗模的运动简图见图 2b。对于一个已经制造镦挤成形装置，其终锻角 β 和肘杆长度 L 是已知参数。由于上横梁向下运动，可以确定肘杆起始角度 α、水平镦挤模位移。α, β, L, S_2 的参数定义见图 2b。



a 通过肘杆将垂直运动转化为水平运动



b 水平和垂直运动的几何关系

图 2 曲轴镦挤成形装置运动特点

Fig.2 Moving characteristic of upsetting & extrusion forming equipment for crankshaft

由图 2b 可以得到，上横梁的垂直位移和镦粗模水平位移的关系为：

$$S_1 = L(\sin\alpha - \sin\beta)$$

$$S_2 = L(\cos\beta - \cos\alpha)$$

上横梁垂直运动速度和镦粗模水平运动的关系为：$V_2 = V_1 \tan\theta$，其中，$\beta \le \theta \le \alpha$。

文中采用的镦挤成形装置终端角为 16°、肘杆长度为 600 mm，根据上述参数得到镦粗模水平位移 S_2 和肘杆的起始角度 α 之间关系。

2.2 曲轴镦挤复合成形几何模型

一般采用单个曲拐研究镦挤成形过程仅能解决曲臂位置充型不饱满的问题[3—4,7]，却对主轴颈轴向长度的变化规律分析则无能为力。为了通过有限元模

拟准确的分析上述 2 个问题，首先采用 2 个曲拐及与实际锻件一样的左右辅料（见图 3，两个拐主轴颈偏差 90º），研究镦挤成形过程产生轴向流动的原因。

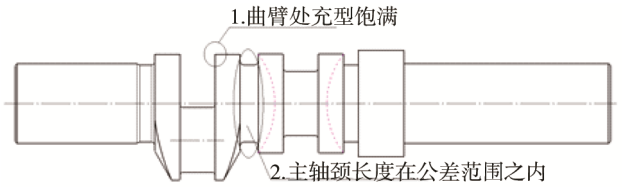


图 3　用于模拟分析双拐曲拐锻件几何形状
Fig.3 Geometric model of crankshaft forging for simulation analysis

将图 3 的曲轴划分为变形区和非变性区（见图 4），同时设计的台阶轴预制坯见图 5。依据双拐曲轴锻件和台阶轴几何形状（见图 4—5），初步设计的第一拐和第二拐模具系统见图 6—7。可以看出，第一

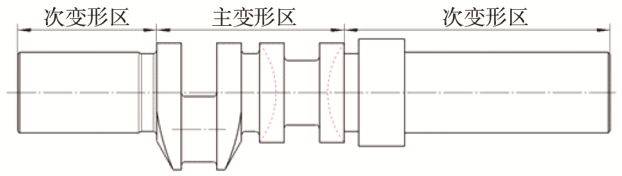


图 4　用于模拟的曲轴锻件区域划分
Fig.4 Geometric assignment of crankshaft forging for simulation

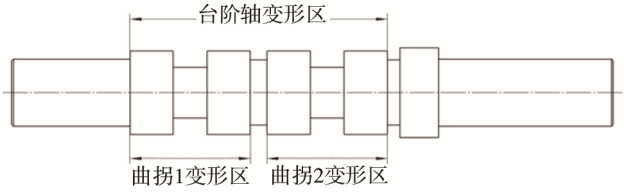


图 5　台阶轴几何形状
Fig.5 Geometric model of billet

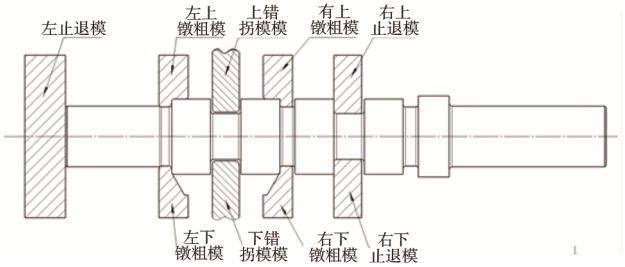


图 6　第一拐镦挤成形模具系统
Fig.6 Die system used to forming the first crank

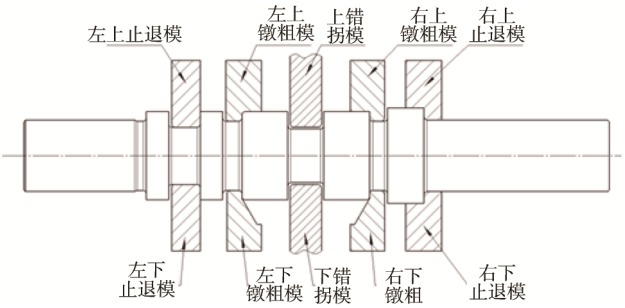


图 7　第二拐镦挤成形模具系统
Fig.7 Die system used to forming the second crank

拐和第二拐的左上/左下/右上/右下镦粗模、上/下镦粗模可以通用；而左右止退模则不同。其他多拐曲轴的成形模具与 2 拐曲轴模具相似。

2.3　镦挤成形模拟模型关键参数

2.3.1　加热、上料、冷却过程的热交换系数

曲轴毛坯的局部加热设备为燃气加热炉，为了防止成形毛坯在加热过程产生热裂纹，减少成形毛坯加热区域在高温区的停留时间，采用两步加热方法。在模拟模型中各步的辐射给热系数如下[9]：在室温加热至 850 ℃时（炉温 900 ℃），给热系数设置为 197 W/(m^2·K)；在 850 ℃加热至 1150 ℃时（炉温 1200 ℃），给热系数为 410 W/(m^2·K)。

上料过程中，坯料主要对空气产生热辐射，热辐射系数设置为 10 W/(m^2·K)；在成形过程中，坯料与模具的非接触区域，坯料主要对空气产生热辐射系数也为 10 W/(m^2·K)。在成形后的冷却过程中，采用风冷方式，坯料对空气的热辐射系数设置为 50 W/(m^2·K)。

2.3.2　摩擦模型

在镦挤成形有限元模拟中，拟采用库仑摩擦定律，即：

$$\begin{cases}\tau=\mu\sigma_{\mathrm{n}} & (\mu\sigma_{\mathrm{n}}<\overline{m}\dfrac{\sigma_0}{\sqrt{3}})\\ \tau=\overline{m}\dfrac{\sigma_0}{\sqrt{3}} & (\mu\sigma_{\mathrm{n}}>\overline{m}\dfrac{\sigma_0}{\sqrt{3}})\end{cases}$$

式中：σ_{n} 为接触面法向压应力；σ_0 接触面上的坯料流动应力；μ 取 0.3；$\overline{m}$ 取 0.5。

2.3.3　接触传热模型

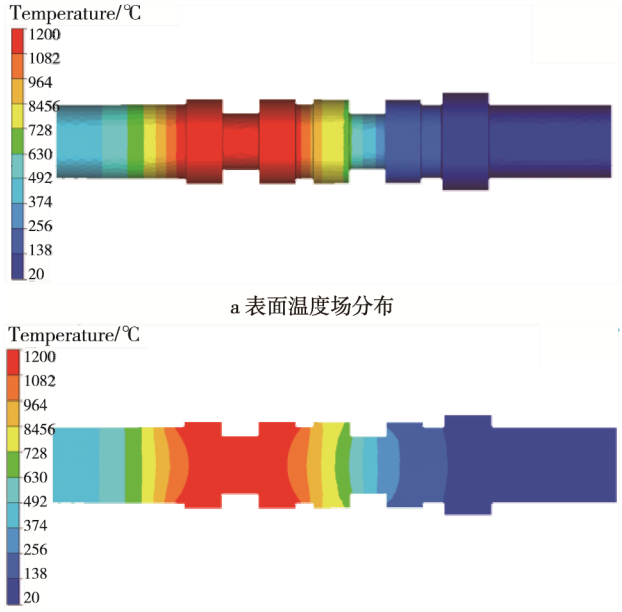
在有限元模拟模型中，坯料与模具之间产生接触后，高温坯料将向模具传递热量，传热系数设置为 4000 W/(m^2·K)。

3　多拐曲轴镦挤成形全流程有限元模拟

3.1　加热及移料过程模拟

台阶轴毛坯燃气炉加热采用两步加热法，第一步炉温为 900 ℃，加热时间为 18 min；第二步炉温为 1200 ℃，加热时间为 12 min，总加热时间为 30 min，加热过程模拟结果见图 8，可以看出，连杆颈区域温度最高为 1188 ℃，主轴颈温度为 1050 ℃，显示出了明显的温度梯度，但热影响区较小。

将加热后的坯料由加热炉移至镦挤成形装置上，一般需要 30~40 s 的时间，为了保证模拟结果可用，



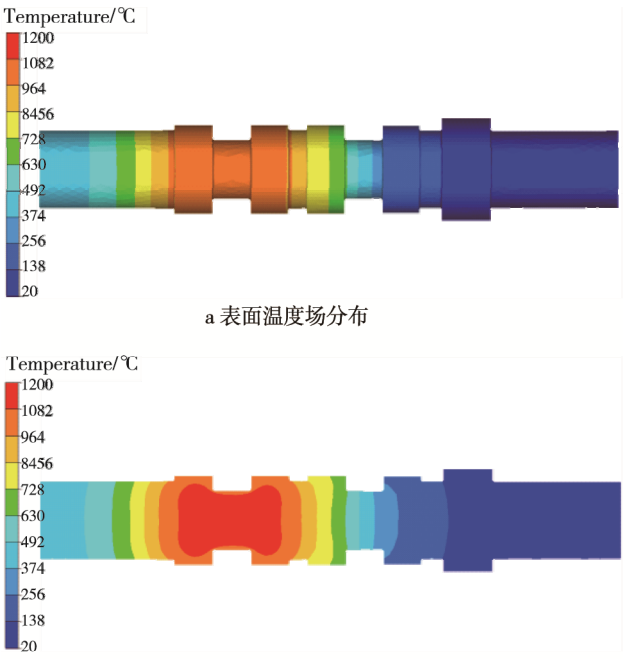
a 表面温度场分布

b 中心剖面温度场分析

图 8 台阶轴局部加热过程模拟结果

Fig.8 Billet temperature field of local heating process

移料过程坯料冷却模拟时间设为 40 s。移料后的坯料温度场见图 9，其中坯料表面温度降至 1000 ~ 1050 ℃，但是芯部温度高达 1150 ℃，从移料结束后的表面与芯部温度来看，坯料的温度完全满足后续成形需求。



a 表面温度场分布

b 中心剖面温度场分析

图 9 台阶轴毛坯移料过程温度场模拟

Fig.9 Billet temperature field of transforming process

3.2 镦挤成形过程模拟及分析

移料后的第一拐镦挤成形模具与坯料位置见图 10。成形后的等效应变见图 11（飞边厚度为 5 mm），可以看出，沿着曲臂斜对角位置已产生充分的变形，可以有效细化晶粒，同时在主轴颈和连杆颈与曲臂的结合处也产生一定的变形，但是却在第二拐曲臂的坯料处产生局部镦粗，也就是说，在镦挤成形过程中，坯料产生了轴向流动，这也造成了台阶轴主轴颈长度在变形后变为 31 mm，而无减少现象。

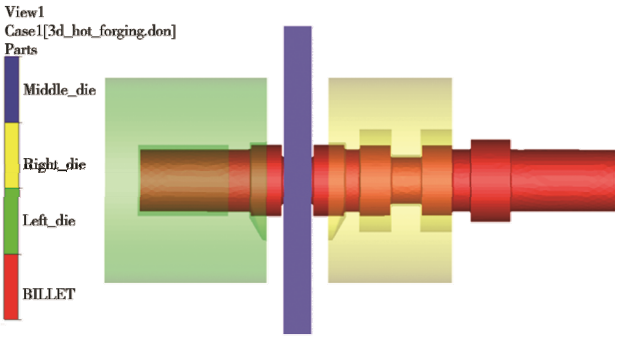


图 10 第一拐成形模具与坯料位置

Fig.10 Position of die and billet for first crank

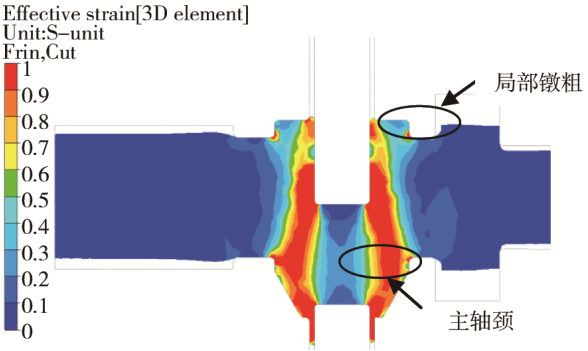


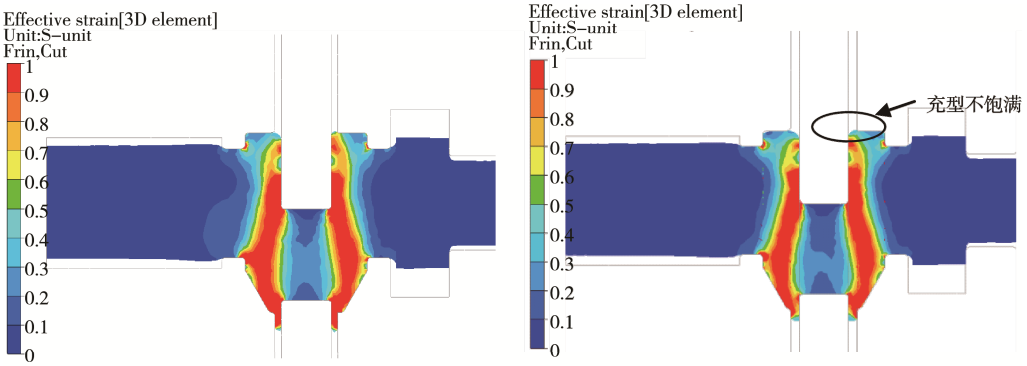
图 11 曲拐等效应变分布

Fig.11 Equivalent strain distribution of crankshaft

当将飞边厚度分别调整为 7 和 9 mm，模拟结果分别见图 12。从图 12b 可以看出，当飞边厚度为 9 mm 时，虽然曲臂顶部有轻微的充型不饱满，但是这个缺陷不影响后续加工，而且轴向流动小，无明显镦粗现象，主轴颈长度经镦挤变形后，其长度初始设计的 30 mm 变为 28.5 mm。飞边厚度分别为 5, 7, 9 mm 时的载荷曲线见图 13，可以看出，随着飞边厚度的增加，水平镦粗力由 1250 t 减少至 900 t，成形力降低幅度大，有效减少了成形过程的能耗。

第二拐镦挤成形模具与坯料位置见图 14（飞边厚度设计为 9 mm）。成形前后的温度场、表面等效应变、剖面等效应变分别见图 15a—d。由图 12b 和图 15d 可以看出，两个曲拐均在连杆颈根部产生足够的变形，可以有效提高晶粒度。对成形后的第一拐与第二拐相连的主轴颈长度检测，其由第一拐成形后的 28.5 mm 变为 27.2 mm，可以得出，当提高飞边厚度，减小飞边的投影面积，可以有效控制镦挤成形过程坯

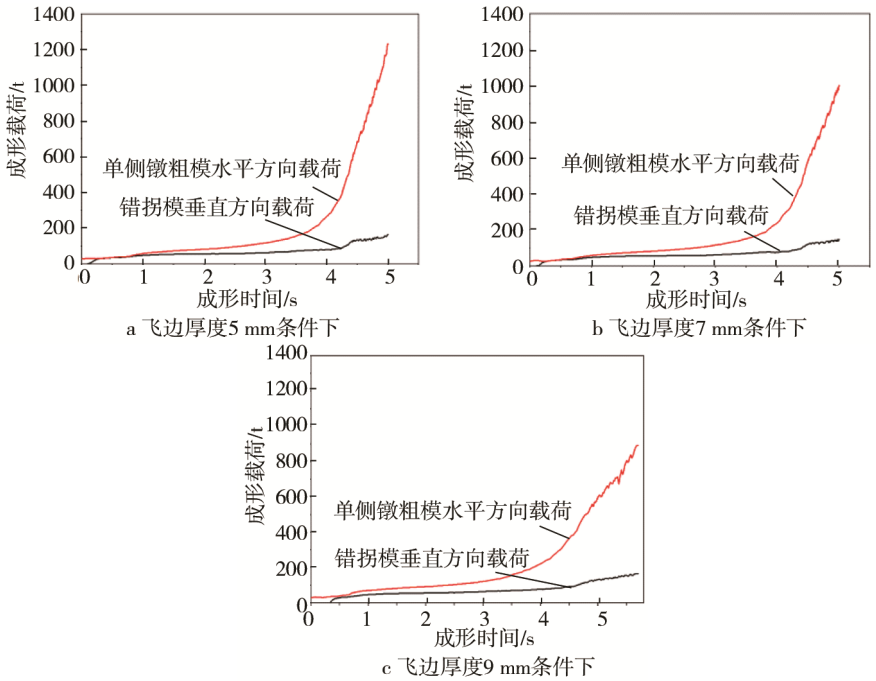
料在水平方向的流动。也就是说，在坯料设计时，充分考虑坯料体积与锻件体积的比例关系，控制成形后的飞边投影面积，可以有效控制轴向流动，从而有效提高曲轴锻件的轴向尺寸精度。



a 7 mm飞边厚度的模拟结果　　b 9 mm飞边厚度的模拟结果

图 12　调整飞边后的第一拐镦挤成形模拟结果

Fig.12 Simulation results of the first crank upsetting & extrusion forming after adjusting the thickness of flash



a 飞边厚度5 mm条件下　　b 飞边厚度7 mm条件下

c 飞边厚度9 mm条件下

图 13　首拐成形过程载荷分析

Fig.13 Loading curves of the first crank forming process

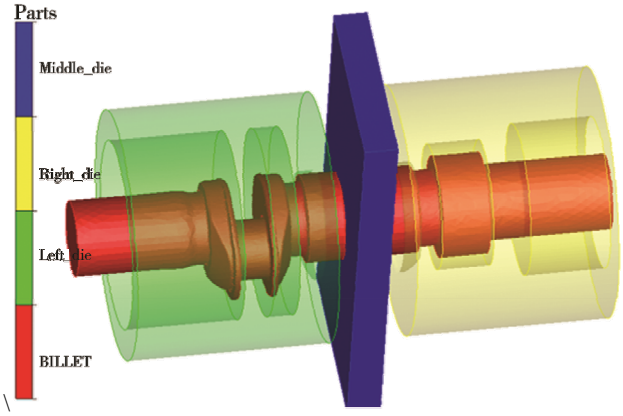
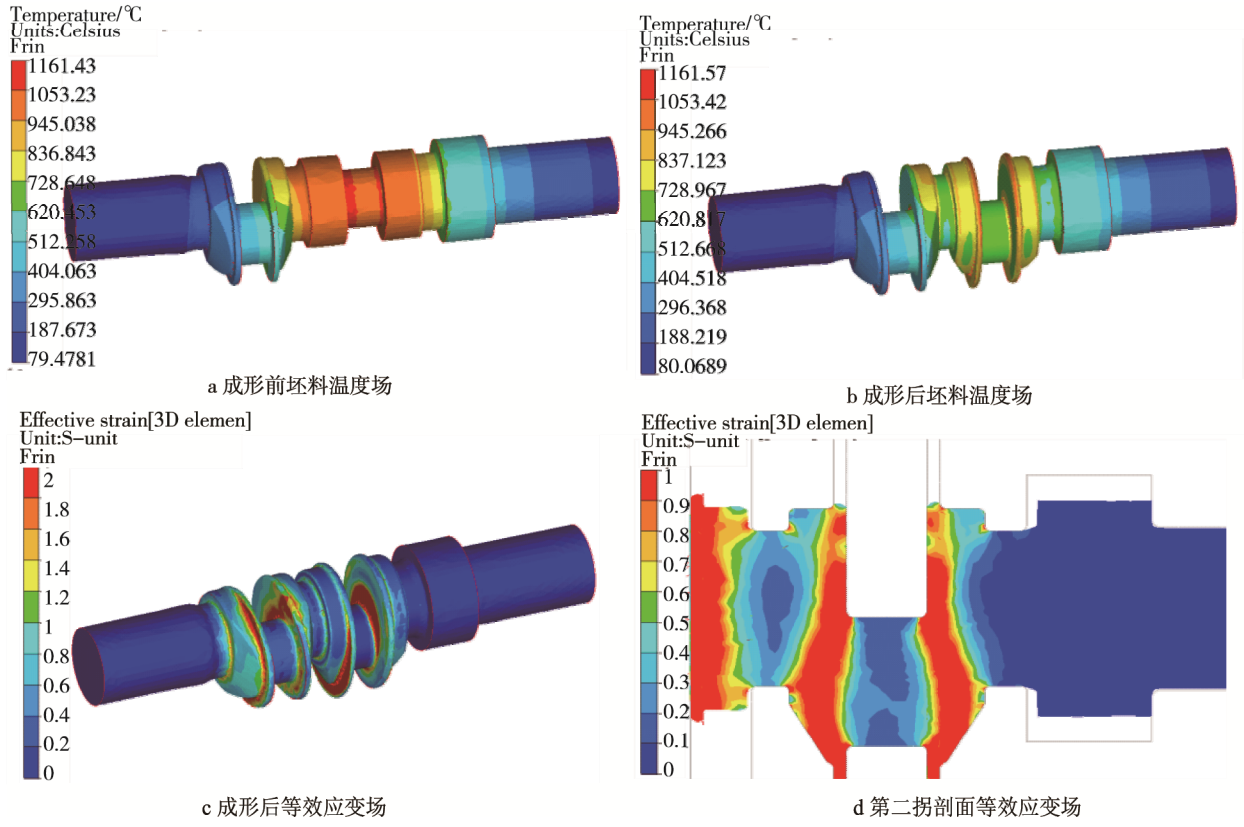


图 14　第二拐成形模具与坯料位置

Fig.14 Position of die and billet for second crank



a 成形前坯料温度场　　b 成形后坯料温度场

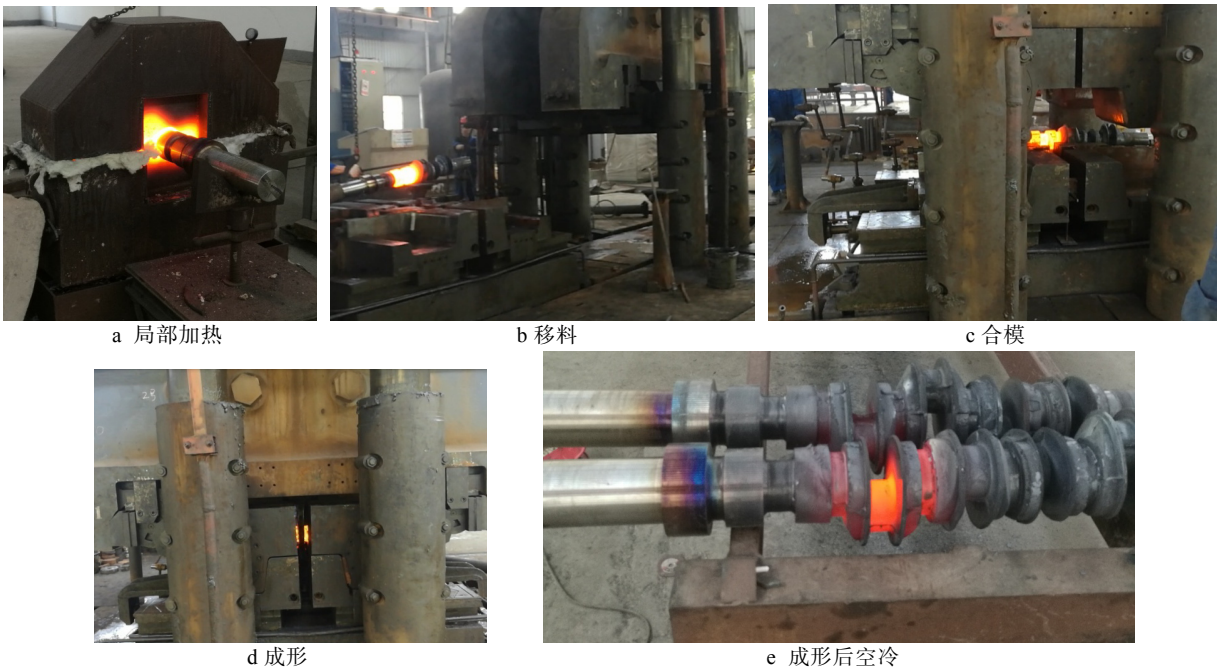
c 成形后等效应变场　　d 第二拐剖面等效应变场

图 15　第二拐镦挤成形模拟结果

Fig.15 Simulation results of the second crank

4　基于5拐曲轴的轴向流动控制试验

采用上述控制轴向流动的方法，改进设计了已有台阶轴几何参数，并在镦挤成形设备上开展工艺试验，试验全流程见图 16。对图 16e 的曲轴锻件检测主轴颈尺寸，5 拐曲轴主轴颈长度控制在±1 mm 以内，5 拐曲轴总长度控制在±2 mm。成形后的曲轴锻件经检测轴向尺寸均满足锻件设计要求。



a 局部加热　　b 移料　　c 合模

d 成形　　e 成形后空冷

图 16　镦挤成形工艺试验

Fig.16 Process test of upsetting & extrusion forming

5　结论

1) 建立了适合曲轴镦挤成形轴向流动模拟的仿真模型，模拟结果可靠、有工程参考价值。

2) 通过仿真发现在镦挤成形过程产生轴向流动的原因主要是台阶轴与锻件体积比例、飞边厚度之间的关系，在指定的坯料与锻件体积比例关系下，合理控制飞边厚度是控制轴向流动的关键原因，并且能够有效降低成形过程的能耗。

3) 通过 5 拐曲轴镦挤成形验证性工艺试验表明，成形后主轴颈轴向尺寸控制在设计值的±1 mm 以内，因主轴颈轴向尺寸偏差过大导致的废品率基本得到解决。

参考文献：

[1] 郭志仁. 国内外大型全纤维曲轴锻造工艺及其装置[J]. 重型机械, 1983(3): 39—46.
GUO Zhi-ren. The Domestic and Foreign Heavy Crankshaft Forging Process and Its Device[J]. Heavy Machinery, 1983(3): 39—46.

[2] 郭志仁. 大型曲轴用 TR 墩锻法及其发展[J]. 国外机车车辆工艺, 1982(3): 1—5.
GUO Zhi-ren. TR Forging Method for Large Crankshaft and Its Development[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 1982(3): 1—5.

[3] 王栋彦, 张连洪. NTR 弯曲镦锻速度对全纤维曲轴成形塌角量的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(1): 141—144.
WANG Dong-yan, ZHANG Lian-hong. Influence of NTR Bending and Upsetting Velocity on Collapse Angle Quantity of Full Fiber Crankshaft[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(1): 141—144.

[4] 徐戊矫, 朱若岭, 周杰. 大型船用曲轴 TR 法镦锻成形缺陷分析与工艺优化[J]. 热加工工艺, 2010, 39(7): 155—158.
XU Wu-jiao, ZHU Ruo-ling, ZHOU Jie. Forming Defect Analysis and Process Optimization of Heavy Marine Crankshaft Formed by TR Upsetting-bending[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(7): 155—158.

[5] 门海豹, 康凤, 林军, 等. 一种车用错拐曲轴全纤维成形技术研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(1): 93—95.
MEN Hai-bao, KANG Feng, LIN Jun, et al. Study on Full Fiber Forging Technology of Vehicle Crankshaft[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1): 93— 95.

[6] 尤洁. 大型曲轴 RR 法弯曲镦锻成形有限元模拟[D]. 天津: 天津大学, 2004.
YOU Jie. FEM Simulation of RR Method Bend-Upset Forging of Heavy Crankshaft[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004

[7] 张学忠. 基于光棒毛坯的全纤维曲轴精密成形与试验研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2008.
ZHANG Xue-zhong. Study on the Upsetting Theory and Experiment of the Full Fabric Crankshaft Formed by Bare Rod Blank[D]. Taiyuan: University of Science and Technology of Taiyuan, 2008.

[8] 朱若岭. 大型全纤维曲轴 TR 法成形工艺及动态再结晶模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
ZHU Ruo-ling. Research on the TR Method Forging Process of Heavy Crankshaft and Dynamic Recrystallization Simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[9] 王纪武, 刘庄, 王本一, 等. 曲轴 TR 法成形的三维有限变形弹塑性有限元模拟[J]. 锻压技术, 1998, 23(3): 6—9.
WANG Ji-wu, LIU Zhuang, WANG Ben-yi, et al. 3D Finite Deformation Elasto-plastic FEM Simulation of TR Upsetting Process of Crankshaft[J]. Forging & Stamping Technology, 1998, 23(3): 6—9.

[10] 王纪武, 刘庄, 王本一. 280 曲轴 RR 法成形的三维有限变形弹塑性有限元模拟[J]. 塑性工程学报, 1999, 6(2): 73—77.
WANG Ji-wu, LIU Zhuang, WANG Ben-yi. 3D Finite Deformation Elastoplastic Femsimulation of RR Upsetting Process of 280 Crankshaft[J]. Journal of Plasticity Engineering, 1999, 6(2): 73—77.

[11] TEKKAYA A E, HOMBERG W, BROSIUS A. 60 Excellent Inventions in Metal Forming[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[12] MIN C S, TYNE C J V, JIN R C, et al. Optimization of Preform Design in TR Forging of Heavy Crankshafts[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2017, 139(9).

[13] 陈太生. 曲轴全纤维弯曲镦锻成形技术 RR 法、TR 法、NTR 法对比研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
CHEN Tai-sheng. Comparative Analysis and Research of RR, TR and NTR Upset-Bending Processes for Heavy Crankshaft of Continuous Grain Flow[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[14] 范海清, 李双义, 张连洪, 等. 曲轴弯曲镦锻加中 RR 法和 TR 法的分析与比较[J]. 锻压机械, 2002, 37(5): 29—31.
FAN Hai-qing, LI Shuang-yi, ZHANG Lian-hong, et al. Analysis and Comparison to RR-Method and TR-Method of Crankshaft Upset Forging[J]. Metal Forming Machinery, 2002, 37(5): 29—31.

[15] 胡锋涛. 大型曲轴 TR 法成形及 TR 装置结构强度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
HU Feng-tao. Study on the TR Method Forging Process of Heavy Crankshaft and TR Forging Device Structural Strength Analysis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.