法兰轴热挤压工艺设计及分析

马勇，彭程，桂伟，赵亚培，魏玉凤
（合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009）

摘要：目的 以某型号法兰轴为研究对象，为了制取性能和结构合格的法兰轴。**方法** 对其进行了结构及加工工艺分析，确定了成形工艺方案为：下料→正挤轴部→顶镦头部→反挤法兰及内腔。根据该工艺，建立了法兰轴的三维模型，利用有限元分析软件对法兰轴的成形缺陷进行了分析，并进行了工艺改进，以获得合格的零件。**结果** 改进后的工艺可以制取合格的零件。**结论** 此工艺方法对实际生产有指导价值。

关键词： 法兰轴；热挤压；工艺设计；数值模拟
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.02.003
中图分类号： TG376.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2014)02-0012-06

Process Design and Analysis of Hot Extrusion of Flange Shaft

MA Yong, PENG Cheng, GUI Wei, ZHAO Ya-pei, WEI Yu-feng
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: Objective In this paper, the flanged shaft was studied to achieve products with qualified performance and structure. **Methods** The structure and process were analyzed, and the specific forming process was finalized as cutting, extruding the shaft part, upsetting the head portion, and anti-extrusion of flange and cavity. Based on this process, a three-dimensional model was established for the formation of the flanged shaft, and the forming defects of the flanged shaft were analyzed with the FEM software, and then the process optimization was made to achieve qualified products. **Results** The results showed that qualified products were obtained after process optimization. **Conclusion** This process can function as valuable guidance for the production practice.

KEY WORDS: flange shaft; hot extrusion; process design; FEM

法兰轴是汽车传动系统中重要的轴类零件，主要作用是支持作回转运动的传动零件并传递运动和动力，在恶劣的工作环境中需承受交变载荷，在生产过程中又要经过热处理、锻造、磨削等易引起各种缺陷的工步[1—2]。传统的成形工艺材料利用率低、机械加工余量大、锻后工步多、生产周期较长等[3—4]，这些缺点使得生产成本很高，有碍企业发展。目前，法兰轴大多采用模锻工艺，如闭式模锻、挤压等[5—7]，可以减少能源消耗、提高锻件表面及内部质量，从而达到提高产品质量，降低产品成本的目的。

本课题研究的某型号法兰轴是一个复杂的杯杆复合成形件，法兰台阶和内腔台阶数量多、截面变化剧烈，较难成形。对该法兰轴采用热挤压工艺，根据挤压件形状结构设计了合理的工艺方案，为企业生

收稿日期： 2013-12-12
基金项目： 2011 教育部科学技术研究重大项目(311025)
作者简介： 马勇(1979—)，女，吉林人，博士，副教授，主要研究方向为塑性成形与模具CAD、连续铸造。

产提供参考。

1　热挤压成形结构分析

法兰轴是一个复杂的杯杆复合成形件,锻件图如图 1 所示。该法兰轴可划分为 3 个部分:①杯口的法兰部分,用于连接汽车传动轴;②复杂异型内腔的杯形结构;③端部的轴杆,与变速箱联接起到传递扭矩的作用。

法兰轴属杯杆复合成形锻件,其法兰及内腔部位变形最大,台阶数量多,截面变化剧烈。由金属镦粗时的变形规律可知,台阶部位属于难变形区域,存在“死角区”,难以充满模腔;法兰部位变形量大,容易在其外表面出现锻造开裂,台阶圆角过渡处出现裂纹、折叠等锻造缺陷[8—14]。根据法兰轴结构及工艺分析,拟定工艺方案:下料→正挤轴部→顶镦头部→反挤法兰及内腔,如图 2 所示。坯料选择 ϕ53 mm×80 mm 的圆棒料,材料利用率为:$V_{锻件}/V_{坯料}$=91.5%,挤压设备选用 10 MN 的热模锻压力机,初始挤压温度为 1100 ℃。

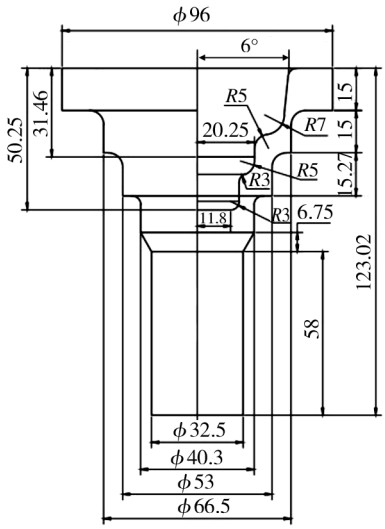


图 1　法兰轴锻件尺寸

Fig. 1 Forging figure of the flange shaft

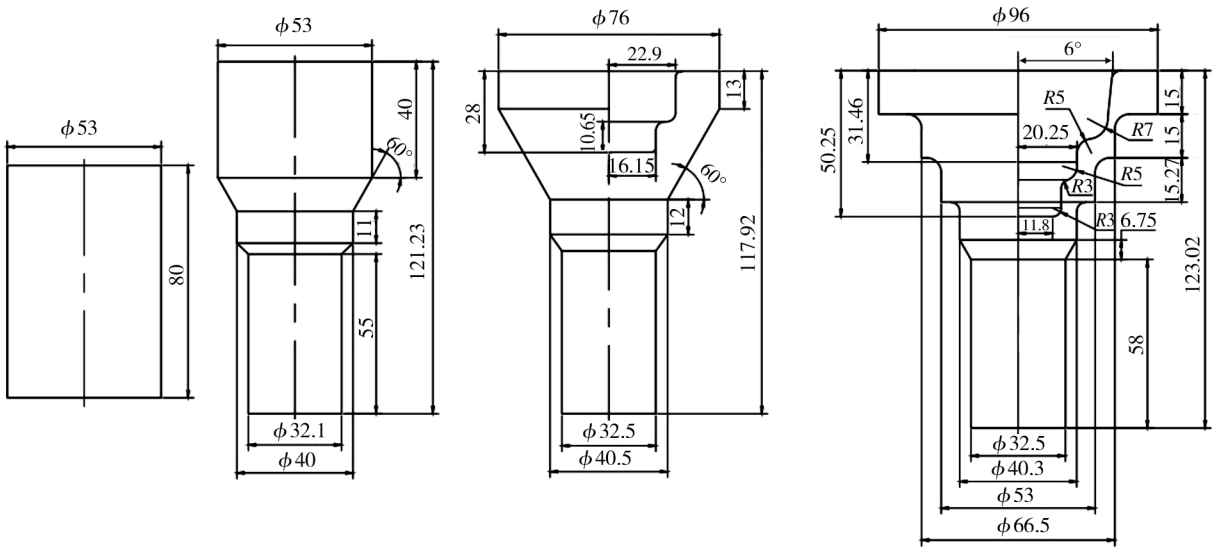
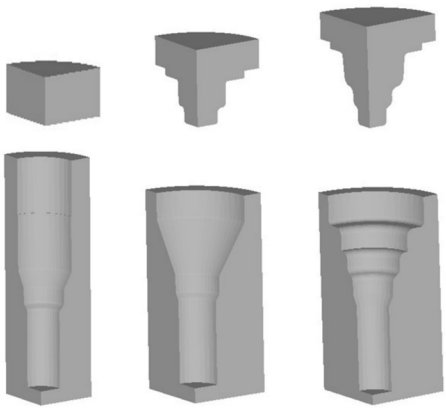


图 2　法兰轴的成形方案

Fig. 2 Forming program of the flanged shaft

2　有限元模型建立

法兰轴的材料为 45 号钢,在 DEFORM-3D 中选用 AISI-1045[1650-2200F(900 ~ 1200 ℃)],凸模和凹模预热到 300 ℃,模具为刚性体,热传导系数为 11 W/(m^2×K),挤压速度为 1 mm/s。对于摩擦选择塑性剪切摩擦模型,坯料挤压前经过磷皂化处理,摩擦因数为 0.3。由于零件为旋转体,所以取其 1/4 进行模拟计算,网格数为 1.2 万个,且网格畸变较大时系统自动重划网格,增量步为每步 0.2 mm。法兰轴成形工艺各工步的模具三维图如图 3 所示。



a 工步一 b 工步二 c 工步三

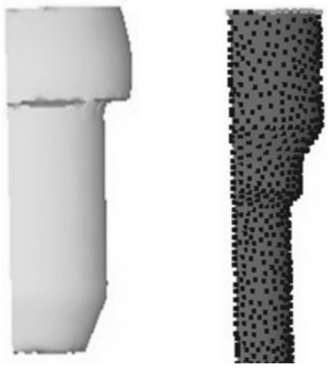
图 3 模具三维图

Fig. 3 Three-dimensional figure of the mold

3 成形过程分析

3.1 工步一

图 4a 为工步一正挤轴部的成形效果图,坯料在成形过程中向模具两边流动而溢出,产生镦粗现象,这是因为坯料在台阶部分沿径向受阻力过大,导致受力不均匀,而使坯料向横向流动。因此考虑在凹模上加套环,靠套环的径向压力来防止坯料在成形时的溢出镦粗[15],其效果如图 4b 所示,此时锻件充满情况良好,无溢出现象。



a 加套环前 b 加套环后

图 4 工步一模拟效果

Fig. 4 Simulation effects of the first step

3.2 工步二

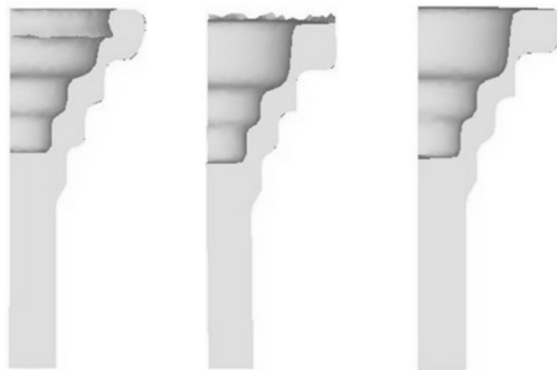
图 5 为工步二顶镦的成形效果图,法兰轴上部镦粗的同时形成较浅的型腔,在型腔各区域都能顺利地完成金属填充,台阶部分圆滑,锻件成形效果良好。

图 5 工步二的模拟效果

Fig. 5 Simulation effects of the second step

3.3 工步三

图 6 为工步三反挤法兰及型腔的成形效果图。从图 6a 可以明显看到,法兰头部在成形过程中产生严重的折叠,这是由于头部成形时挤压失稳造成的。将凸模头部直径由 75 mm 增至 80 mm,内腔台阶直径分别加 2 mm,其成形效果如图 6b 所示,法兰头部未出现折叠现象,但在凸凹模间隙中产生了很明显的毛刺,台阶部位的充满情况也不好。将凸模头部直径改为 76 mm,内腔台阶直径分别加 1 mm,其成形效果如图 6c 所示,型腔的各个区域都能顺利地完成金属填充,台阶部分填充效果良好,锻件成形效果较好。



a 改进前 b 改进一 c 改进二

图 6 工步三的模拟效果

Fig. 6 Simulation effects of the third step

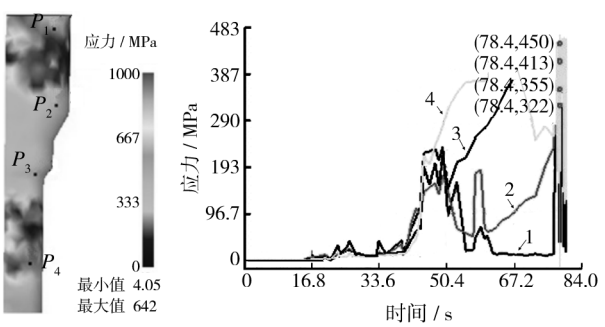
4　结果分析

等效应力应变能够判断金属成形过程受力情况及变形程度[16],为了研究成形过程等效应力应变分布及变化情况,在每个工步锻件上取若干点进行追踪记录,得到点追踪应力-时间曲线。

4.1　应力分析

4.1.1　工步一

图 7 为工步一的等效应力分布。由图 7a 可以看出,法兰轴在台阶部位形状发生变化,轴杆尾部直接与凹模底部相接,这两处的等效应力都较大,而头部和轴杆上部的等效应力相对较小。由图 7b 可以看出,在挤压开始阶段,整个工件主体的等效应力整体呈上升趋势,当 50 s 之后,点 P_1 的等效应力不断变小,点 P_2,P_3 的等效应力先变小后又持续增大,点 P_4 的等效应力一直处于较大值。这是由于点 P_1 金属变形量较小,点 P_2,P_3 处金属与凹模接触面积小且变形剧烈,点 P_4 一直与凹模底部相接,始终处于高压状态。



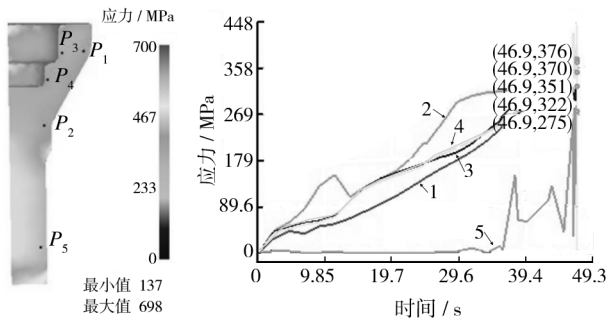
a　应力分布　　b　应力-时间曲线

图 7　工步一的等效应力分布

Fig. 7 Equivalent stress distribution of the first step

4.1.2　工步二

图 8 为工步二的等效应力分布。由图 8a 可以看出,法兰轴在台阶部位和轴杆尾部的等效应力明显较大,法兰轴轴杆不发生变形,因此等效应力均匀且较小。由图 8a 可以看出,法兰轴顶部点 P_1,P_2,P_3,P_4 的应力曲线较为平滑,应力值均匀升高。P_5 处的应力一开始变化很小,在约 80 步左右,增长速度加快,这是因为凸模在挤压内腔台阶时,在径向施加的力增大,从而使轴杆所受到的应力增大。



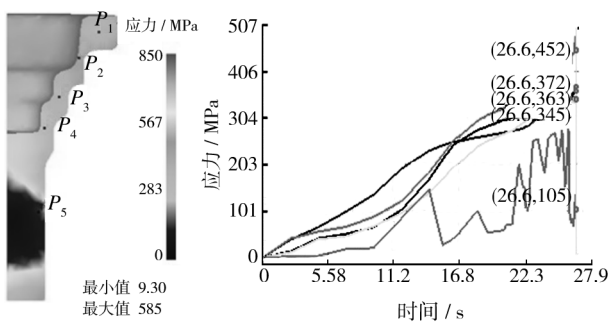
a　应力分布　　b　应力/时间曲线

图 8　工步二的等效应力分布

Fig. 8 Equivalent stress distribution of the second step

4.1.3　工步三

图 9 为工步三的等效应力分布。由图 9a 可以看出,只有法兰轴第一个台阶处型腔的等效应力最大,这是因为成形过程只有这里的金属发生了较大变形。由图 9b 可以看出,点 P_1,P_2,P_3,P_4 的应力均匀升高,P_5 处的应力出现波动升高,这是因为工步三金属变形流畅,变形不剧烈。



a　应力分布　　b　应力/时间曲线

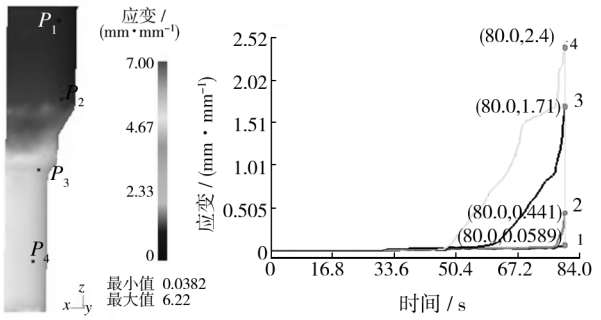
图 9　工步三的等效应力分布

Fig. 9 Equivalent stress distribution of the third step

4.2　应变分析

4.2.1　工步一

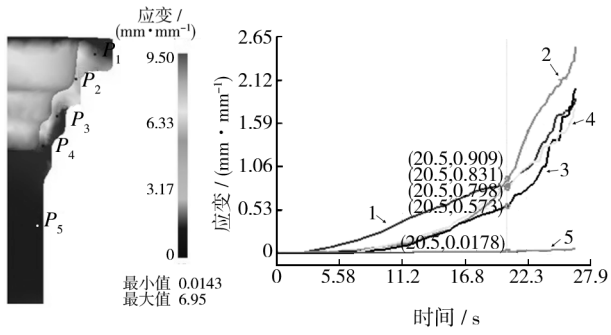
图 10 为工步一的等效应变分布。由图 10a 可以明显看出,法兰轴轴杆的应变值明显大于其他部位,这是因为轴杆处直径减小,发生了较大变形。由图 10a 可以看出,法兰轴在挤压过程中,整个工件的等效应变在 50 s 左右开始呈上升趋势,此时开始成形台阶,并且点 P_3,P_4 的等效应变变化大,说明在轴杆处工件变形量较大。



a 应力分布 b 应变-时间曲线

图 10 工步一的等效应变分布

Fig. 10 Equivalent strain distribution of the first step



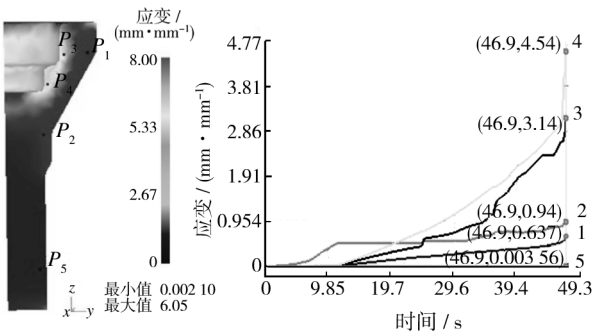
a 应力分布 b 应变-时间曲线

图 12 工步三的等效应变分布

Fig. 12 Equivalent strain distribution of the first step

4.2.2 工步二

图 11 为工步二的等效应变分布。由图 11a 可以看出,法兰轴型腔内的应变值明显大于其他部位,该工步其他部位并没有发生大变形。由图 11b 可以看出,点 P_3,P_4 处的应变变化较大且应变值大于点 P_1,P_2,P_5 处的应变,而这两点所处的位置正是法兰内腔台阶处,相应的金属变形量大;点 P_1,P_2,P_5 处的应变值较小且变化不大,说明这三处的金属变形量小。



a 应力分布 b 应变-时间曲线

图 11 工步二的等效应变分布

Fig. 11 Equivalent strain distribution of the first step

4.2.3 工步三

图 12 为工步二的等效应变分布。由图 12a 可以看出,法兰轴型腔台阶处的等效应变较大,这是法兰轴最后成形的部位,变形量较大。由图 12b 可以看出,点 P_1,P_2,P_3,P_4 处的应变值不断增大,这是因为在挤压成形型腔过程中,这些部位都发生了较大变形,出现了 3 个台阶,型腔尺寸变大,壁厚明显减薄。

5 结论

以法兰轴为研究对象,对其进行了结构及工艺分析,拟定工艺方案并模拟成形过程,根据其效果,分析了缺陷原因并作工艺优化,确定了最终工艺方案,最终可得如下结论。

1) 法兰轴属杯杆复合成形锻件,其法兰及内腔部位变形量大,台阶数量多,截面变化剧烈。根据工艺分析,拟定法兰轴成形工艺方案为:下料→正挤轴部→顶镦头部→反挤法兰及内腔。

2) 对其成形过程进行有限元模拟及改进,改进后型腔的各个区域都能顺利地完成金属充型,台阶填充效果较好,无毛刺、折叠等缺陷,锻件整体成形效果良好。

3) 对改进方案的模拟结果进行应力应变分析,分析了每个工步挤压件应力应变分布及变化情况,为实际生产提供理论指导。

参考文献:

[1] 朱正德. 当代汽车发动机厂轴类零件适用探伤方法扫描[J]. 现代零部件,2006(2):89—94.
ZHU Zheng-de. Contemporary Automobile Engine Factory Axle Parts Suitable for Scan Testing Method[J]. Modern Parts,2006(2):89—94.

[2] 许超,商鸿池. 汽车轴类零件非均匀材质力学特性的有限元分析[J]. 传动技术,2008,22(1):36-37.
XU Chao,SHANG Hong-chi. Finite Element Analysis of Inhomogeneous Automotive Shafts Mechanical Properties of Materials[J]. Transmission Technology,2008,22(1):

36—37.

[3] 苏月娟,孙建新,王玉洁. 带中间法兰的大型轴锻件的锻造工艺研究[J]. 河北省科学院学报,2010,27(1):24—26.
SU Yue-juan, SUN Jian-xin, WANG Yu-jie. Studies of Large Shaft Forgings Forging Process with Intermediate Flange[J]. Hebei Academy of Sciences, 2010, 27(1): 24—26.

[4] 程俊伟,冯宪章,刘长红. 大变形法兰轴镦锻成形数值分析[J]. 热加工工艺,2011,40(19):72—74.
CHENG Jun-wei, FENG Xian-zhang, LIU Chang-hong. Large Deformation Flange Shaft Upsetting Forming Numerical Analysis[J]. Thermal Processing, 2011, 40(19): 72—74.

[5] 李志广. 法兰轴类锻件顶锻拔模斜度的设计[J]. 模具设计与制造,1998(1):51—52.
LI Zhi-guang. Upset Forging Flange Shaft Design Draft Angle[J]. Mold Design and Manufacturing, 1998(1): 51—52.

[6] 柴蓉霞,于力,郭成. 法兰轴温挤压成形工艺分析与挤压凸、凹模参数优化[J]. 模具工业,2012,38(9):62-66.
CHAI Rong-xia, YU Li, GUO Cheng. Hotbox Flange Extrusion Process Analysis and Squeeze Convex and Concave Mold Parameter Optimization[J]. Mold Industry, 2012, 38(9): 62—66.

[7] 冯宪章,程俊伟,刘长红,等. 大变形法兰轴镦锻成形技术研究[J]. 热加工工艺,2011,40(15):21—23.
FENG Xian-zhang, CHENG Jun-wei, LIU Chang-hong. Flange Shaft Upsetting Large Deformation Forming Technology Research[J]. Thermal Processing, 2011, 40(15): 21—23.

[8] MIN Jie, WANG Hai-sheng. The Numerical Simulation for Compaction of Loose Defects of Large Forgings with DEFORM[C]. Industrial Control and Electronics Engineering, 2012.

[9] 高锦张. 塑性成形工艺与模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
GAO Jin-zhang. Plastic Forming Process and Die Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.

[10] 郝滨海. 挤压模具简明设计手册[K]. 北京:化学工业出版社,2005.
HAO Bin-hai. Extrusion Die Concise Design Manual[K]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[11] 贾宪安,胡九锡. 热挤压工艺及模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,1986.
JIA Xian-an, HU Jiu-xi. Hot Extrusion Process and Die Design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1986.

[12] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册(锻造分册)[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
Chinese Mechanical Engineering Society of Plastic Engineers. Forging Manual (Forging Volume)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.

[13] 张大伟,杨合,孙志超. 多向加载近净成形研究动态[J]. 精密成形工程 2009,1(1):39—46.
ZHANG Da-wei, YANG He, SUN Zhi-chao. Multi-directional Loading on the Near-NET Shape Dynamics[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(1): 39—46.

[14] 刘全坤. 材料成形基本原理[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
LIU Quan-kun. Materials Forming Principles[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.

[15] 李春峰. 金属塑性成形工艺及模具设计[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
LI Chun-fen. Metal Forming Technology and Die Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

[16] 胡建军,李小平. DEFORM-3D 塑性成形 CAE 应用教程[M]. 北京:北京大学出版社,2011.
HU Jian-jun, LI Xiao-ping. DEFORM-3D Forming CAE Application Tutorial[M]. Beijing: Beijing University Press, 2011.