6700转向直臂成形过程设计及微观组织预测

马勇[1,2]，赵亚培[1]，陈文琳[1]，喻建军[1]，沙奔[1]，董潇[1]，吴玉程[1]
（1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009；
2. 合肥工业大学材料科学与工程博士后流动站，合肥 230009）

摘要：通过对锻件结构的分析，设计了辊锻制坯+终锻的生产工艺。运用有限元分析技术，通过对比分析，重点研究了新过程终锻成形时金属流动情况、等效应力应变分布，并对锻件的晶粒度进行了预测。通过对锻件成形、载荷及质量等的综合评定表明，新的生产工艺在改善锻件质量、提高材料利用率与模具寿命等方面具有明显优势。

关键词：6700转向节臂；辊锻；数值模拟；微观组织
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2013.04.003
中图分类号：TG316　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-6457(2013)04-0011-05

Forming Process Design and Microstructure Prediction of 6700 Steering Arm

MA Yong[1,2], *ZHAO Ya-pei*[1], *CHEN Wen-lin*[1], *YU Jian-jun*[1], *SHA Ben*[1], *DONG Xiao*[1], *WU Yu-cheng*[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Materials Science and Engineering Mobile Post-doctoral Stations, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Roll forging billet and then finish forging were designed as a new process of production based on the analysis of the structure of forgings. The finite element analysis techniques were used to research on the metal flow, stress and strain distribution and grain size prediction in the new process. The results show that the new process of production has obvious advantages in improving the quality of forgings, material utilization and die life through comprehensive assessment of forming, load and quality.

Key words: 6700 steering arm; roll forging; numerical simulation; microstructure

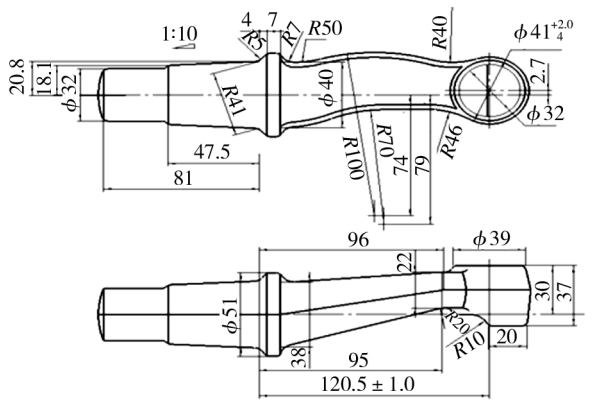
转向直臂是汽车转向系统中起连接作用的重要零件，其使用性能直接影响着汽车的行驶安全，是重要的保安构件。某公司是一个以生产转向系列、连杆、前轴等为主的企业，年产量1.5万t，现有的生产设备仍以摩擦压力机为主，对于需要制坯的锻件一般借助于自由锻或辊锻制坯。在生产6700转向直臂时，为了保证终锻温度，简化了制坯形状，采用圆棒料直接锻造成形，这样不仅材料利用率低，且成形过程中金属流动剧烈，模具磨损严重，直接影响了企业的经济效益。

文中针对在生产6700转向直臂时存在的材料利用率低、模具磨损严重等问题，依托现有的辊锻设备及技术，通过对锻件结构的分析，设计了辊锻制坯，并应用有限元分析技术，研究了成形过程中金属填充性、金属流动性以及等效应力应变分布规律，并将传统工艺与新工艺进行了对比分析，最后基于动态再结晶微观组织预报模型，分别预测了应用2种工艺时锻件的晶粒度，还对锻件质量进行了评定。

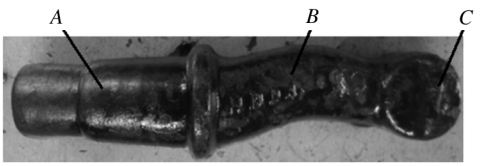
收稿日期：2012-11-05
基金项目：2011教育部科学技术研究重大项目(311025)
作者简介：马勇(1979-)，女，吉林人，博士学位，讲师，主要研究方向为塑性成形与模具CAD，连续铸造。

1 锻件结构特点与工艺分析

6700 转向直臂锻件和实物如图 1 所示,锻件长度为 225 mm,是一个具有折弯的长轴类锻件,锻件整体体积分布较均匀,*A* 处为旋转体,连接两端杆部的 *B* 处呈不规则状且空间上有落差,*A* 与 *B* 连接部位凸出,横截面积最大, *C* 处呈不规则状且偏离锻件主体的中轴线。连接 *B* 和 *C* 的部位在结构上截面积最小,在工作时承受较大的力矩,因此单位面积的力矩最大,容易发生断裂,锻件调质后硬度需达到 245 ~285HB,在实际生产中需对锻件此处的强度进行严格检测。



a 锻件



b 实物

图 1 转向直臂

Fig. 1 Forging drawing and physical photo of steering arm

6700 转向直臂传统工艺采用开式模锻,其生产流程为:ϕ40 mm×226 mm 圆棒料下料→中频感应加热→模锻成形→切边→校正→热处理→质量检测。生产使用的模具结构是工作人员依据经验反复试验不断调整确定的,由于没有对 6700 转向节臂锻造工作中坯料的成形规律进行系统分析,现使用的模具在终锻时需采用 1000 t 的摩擦压力机,锻件毛边较大且分布不均匀,模具寿命短,成形 2000 多个锻件即出现磨损严重或开裂现象,如图 2 所示。

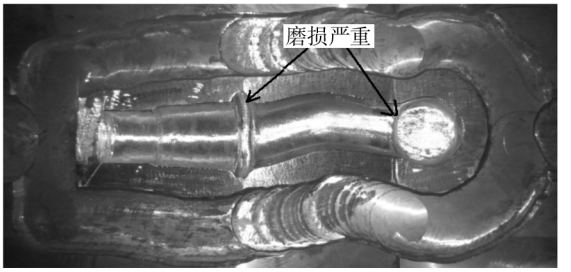


图 2 生产中损坏的模具

Fig. 2 Damaged mold in the production

2 工艺设计

辊锻制坯可有效地解决复杂件截面差大的问题,使制坯形状更接近于锻件展开后的直线形状和尺寸,减少锻件飞边,节省原材料[1]。该转向直臂头部、杆部的截面积差别较大,需要经过制坯工步对坯料重新分布,改善坯料在终锻型腔的流动情况,依托现有的辊锻设备及技术,设计了多道次辊锻制坯工艺。

2.1 确定辊锻道次及型槽

辊锻道次是辊锻尺寸和生产率的保证,道次偏多会增加模具数量,延长生产时间,相反道次较少则会导致金属分布不合理或加剧变形,影响下个道次,以致不能得到辊锻件尺寸[2]。根据转向直臂锻件计算得到其毛坯直径,如图 3 所示,计算其平均直径为 42 mm,因此确定辊锻过程中原始毛坯截面尺寸为 ϕ42 mm×190 mm。

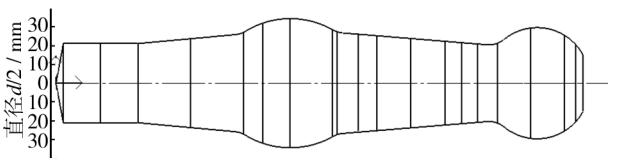


图 3 计算毛坯直径

Fig. 3 Calculation figure of blank diameter

由于锻件截面差较大,为了使制坯形状接近锻件展开后的直线形状,需采用多道次辊锻,辊锻道次的选择主要根据金属伸长率和锻件成形的难易程度,按照公式(1)进行计算[3]:

$$n = \lg\lambda_z / \lg\lambda_p \tag{1}$$

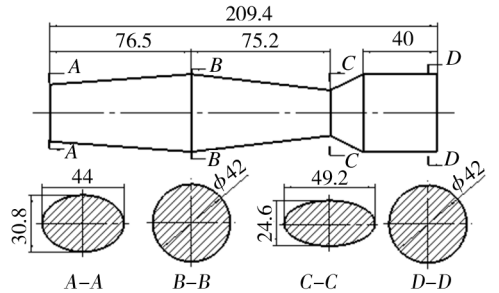
式中:λ_z 为总延伸系数,$\lambda_z = F_0 / F_{min}$;$\lambda_p$ 为平均延伸

系数,λ_p 取 1.4 ~ 1.6。

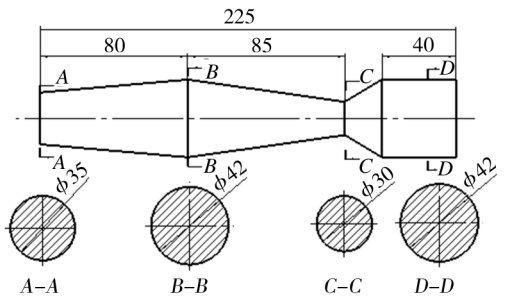
最小截面积 F_{min} = 1146 mm^2,原始坯料截面积为 2247 mm^2,λ_p 取 1.5。带入公式计算出 n = 1.66,因此辊锻道次确定为 2 道次,第 1 道次简单成形,第 2 道次获得接近锻件形状的辊锻件。辊锻制坯常用的型槽系有:椭圆-方、椭圆-圆、菱-方、六角-方等,根据下料和该直臂的形状选择:椭圆-圆-椭圆型槽系[3]。

2.2　辊锻制坯各道次的毛坯尺寸

两道次辊锻所得毛坯形状如图 4 所示,尺寸有所不同,但形状相近,第 2 道次辊锻后毛坯总长为 225 mm,其中 *D-D* 处不需辊锻,在 *B-B* 处直径大于两边变截面的楔形,与终锻件形状相近,第 1 道次辊锻结束后需翻转 90°再进行第 2 道次的辊锻。整个过程 *D-D* 处作为夹持端形状尺寸不发生改变,其它部分金属发生流动,最终充满辊锻模型腔。



a　第1道次



b　第2道次

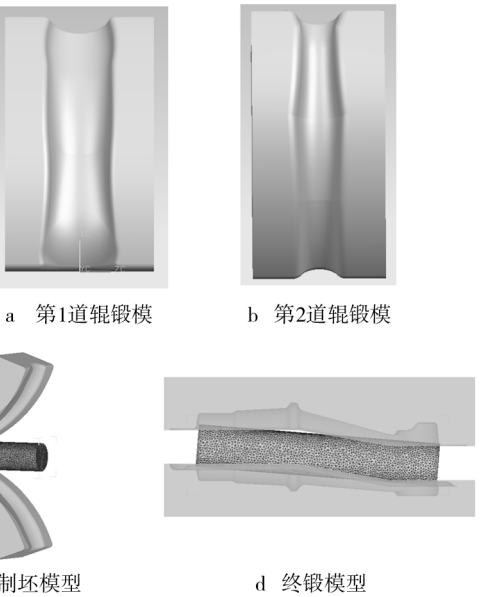
图 4　两道次辊锻毛坯

Fig. 4 Blank drawing of two passes roll forging

3　有限元分析模型建立及模拟结果分析

3.1　建立有限元模型

运用有限元软件,采用刚塑性有限元法对新工艺过程进行数值模拟。初始温度选用实际生产加热温度 1000 ℃,辊锻模采用水基石墨润滑剂润滑,摩擦因子选为 0.4,模具预热到 200 ℃,传热系数为 11W/(m^2 · K),锻辊中心距为 400 mm,上下模间隙为 4 mm,辊锻制坯及终锻有限元模型如图 5 所示。



a　第1道辊锻模　　b　第2道辊锻模

c　辊锻制坯模型　　d　终锻模型

图 5　有限元模型

Fig. 5 Finite element model

3.2　金属充填分析

两道次辊锻过程所得毛坯如图 6 所示,得到的毛坯长度为 224.889 mm,与设计的毛坯长度 225 mm 相吻合。

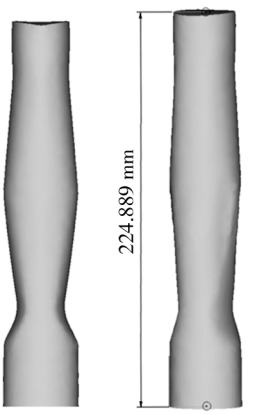


图 6　辊锻制坯变形过程

Fig. 6 Blank deformation process of roll forging

采用 2 种工艺终锻都能成形零件,由于终锻件在杆部 *B* 处的弯曲连接部分形状复杂,坯料径向流动明显,都产生较大的飞边,如图 7 所示。传统工艺

过程中模具闭合时头部 *A* 处侧面较多的金属迅速向模腔外流动,如图 8a 所示,形成较大的飞边。采用新工艺后金属更好地缓慢向轴向流动,如图 8b 所示,新工艺成形后终锻保证金属充满型腔的同时大大减少了飞边的面积。选用新的原始棒料尺寸,材料利用率由原来的 80% 提高到 86.9%。

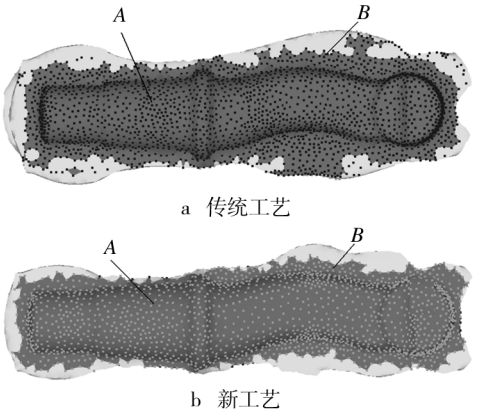


图 7 终锻成形结果

Fig. 7 Finish forging results

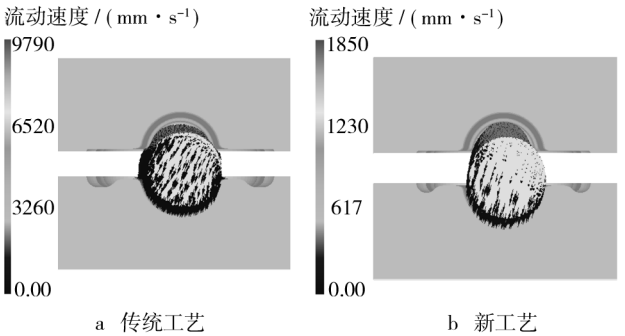


图 8 金属流动情况对比

Fig. 8 Comparison of metal flow conditions

3.3 行程载荷分析

终锻时行程-载荷曲线如图 9 所示,可以看出,2 种工艺的终锻成形均可分镦粗、成形、靠模等阶段,靠模阶段 2 种工艺的载荷都出现了明显上升的趋势,但新工艺的最大载荷数值明显小于传统工艺,只有 6030 kN,比用圆棒料直接进行锻打时的最大载荷 8350 kN 降低了 27.8%,最大载荷分别出现在行程为 31.8 mm 和 28.2 mm 处,如图 9 所示。这是由于新工艺经辊锻制坯后,毛坯形状更接近锻件展开后的直线形状和尺寸,金属流动更加合理,这对提高模具寿命、降低能耗、节约生产成本具有积极的作用。

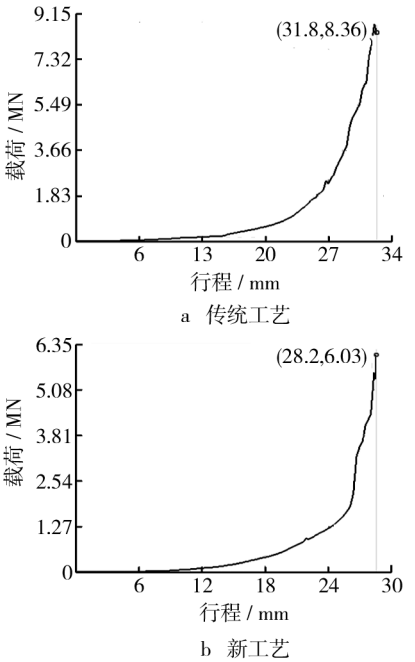


图 9 终锻行程-载荷曲线

Fig. 9 Load-stroke curve of finish forging process

3.4 等效应力应变分析

从图 10 可以看出,2 种成形工艺过程下,锻件

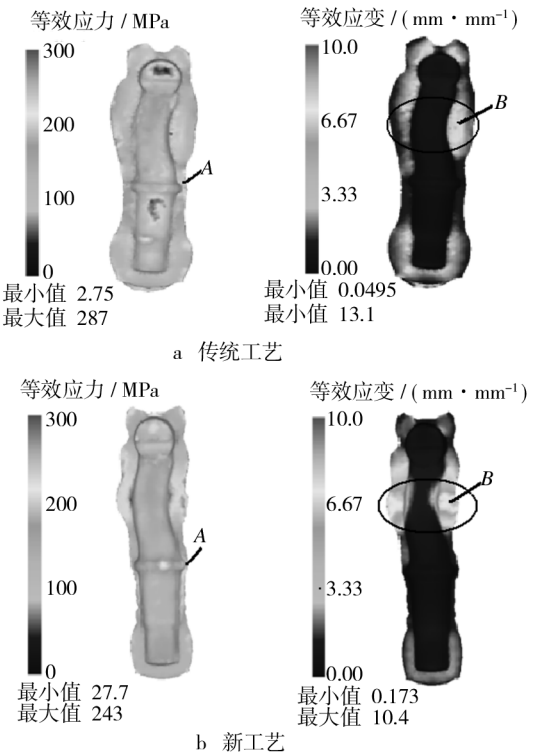


图 10 等效应力应变分布

Fig. 10 Effective stress and strain distribution

最大应力均分布在中间最大直径的飞边上(即图 10 中 *A* 处)。这是由于此处材料与模具接触面积较大,受轴向流动影响但变形空间小,受到了较强的挤压力。同时,飞边部位特别是锻件头杆部相接 *B* 处的飞边上,等效应变比锻件相应部位大。这是由于在闭模阶段飞边所受变形阻力较大,变形量较大。对比 2 种成形工艺,传统成形工艺下终锻成形时最大等效应力达 287 MPa,如图 10a 所示;新成形工艺终锻成形时最大等效应力为 243 MPa,如图 10b 所示,可看出降低了连续锻打过程对模具的损坏程度,有助于提高模具寿命。新成形工艺下 *B* 处飞边上的等效应变为 6 ~ 6.8,明显大于传统成形工艺下的 3 ~ 3.5,而且该处锻件上的等效应变也大于传统成形工艺。

4　锻件晶粒度预测及分析

产品的质量很大程度上是由锻件的微观组织决定的,根据霍尔-佩奇理论,金属材料晶粒尺寸与力学强度间的关系如公式(2)所示[4]:

$$\sigma_s = \sigma_i + k_y d^{-1/2} \tag{2}$$

式中:σ_s 为材料的屈服强度;σ_i 为材料的基体强度,与材料晶体结构及位错密度有关;k_y 为材料系数;d 为平均晶粒直径。

从式(2)中可见,零件强度与晶粒尺寸成反比,晶粒越细小,零件强度越高。晶粒度预报技术作为工艺制定时的重要参考依据,已广泛应用于工业生产,以增加工艺制定过程中企业对产品质量的控制能力,降低产品的生产成本。

生产用棒料的原始微观组织如图 11 所示,平均初始晶粒度为 175.6 μm,数值模拟所采用的 42CrMo 微观组织本构模型来自文献[5-7]。终锻成形后的动态再结晶平均晶粒尺寸分布如图 12 所示。2 种工艺加工过程下,锻件 *A* 段和 *C* 段动态再结晶平均晶粒尺寸接近原始尺寸,这是由于这些部位变形量小,晶粒细化作用不明显,其终锻后的晶粒度并不会发生明显变化。在 *B* 段以及 *B* 段与 *C* 段的连接处,2 种加工工艺下的平均晶粒尺寸明显不同。图 12a 中,传统加工工艺下,*B* 段平均晶粒尺寸与原始平均晶粒尺寸接近,只在 *B* 段与 *C* 段连接的 *D* 处,晶粒尺寸有一定程度的细化,其平均晶粒尺寸达到 168 μm。与图 12a 不同,图 12b 中,采用辊锻制坯后,*B* 段方框内终锻成形后晶粒尺寸都得到了不同程度的细化,其平均晶粒尺寸达到了 160 ~ 168 μm。由于锻件杆部 *B* 段和头部 *C* 段相连接处,在实际应用时最容易发生断裂,故其强度及晶粒等级是决定锻件质量的重要指标。新加工工艺通过辊锻制坯,促使锻件的关键部位产生大变形,此处应变大,温度高,有利于动态再结晶发生,因此终锻后锻件晶粒更加细小,强度得到提高。另一方面,关键部位经细化也可在一定程度上提高锻件的塑性和韧性,降低其裂纹扩展的速度,从而降低锻件发生脆性断裂的几率,这对提高锻件质量具有积极的作用。

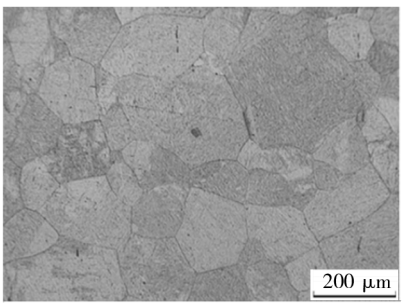
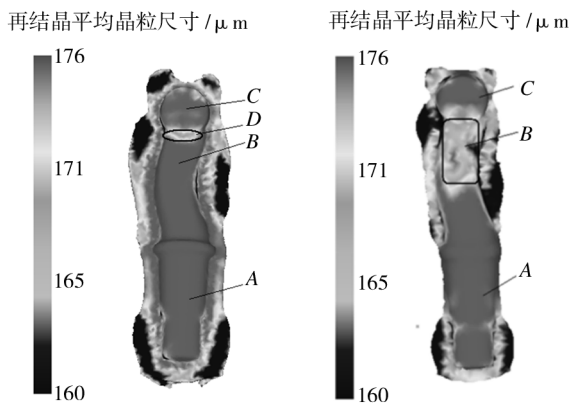


图 11　毛坯原始微观组织

Fig. 11 Original microstructure of blank



a　传统工艺　　b　新工艺

图 12　终锻成形后的平均晶粒尺寸值分布

Fig. 12 Average grain size distribution of finish forging process

5　结语

针对某公司 6700 转向直臂锻件在实际生产中存在材料利用率低、模具磨损严重等问题,设计了辊锻制坯+终锻的新工艺,并应用有限元分析技术,对传统工艺与新工艺进行了对比分析,得出以下结论。

1) 采用“辊锻制坯+终锻”的新工艺,可保证终

(下转第 39 页)

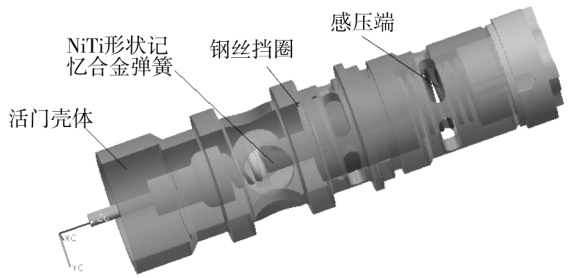


图 9　NiTi 形状记忆合金元件作为驱动装置的感温感压活门结构

Fig. 9　Structure drawing of the temperature-pressure radiator valve using NiTi shape memory alloy as driving device

能,不需要更多的防护。

5　结语

文中采用形状记忆合金弹簧替代传统感温包作为驱动装置的感温感压活门,能实现与传统感温感压活门相同的功能及工作原理。由于形状记忆合金元件为金属功能材料,具有高可靠性及寿命,可实现感温感压活门与空气滑油散热器主体同寿。

参考文献:

[1]　张行周,马重芳. 汽车发动机散热器特征仿真研究[J]. 车用发动机,2005(4):23-26.

[2]　王双连,郭乙木,陶伟明,等. 带活门轴对称变截面管道中强激波的传播特性[J]. 浙江大学学报:工学版,2001,35(5):540-545.

[3]　LAI Y G, CHANDRAN K B, LEMMON J. A Numerical Simulation of Mechanical Heart Valve Closure Fluid Dynamics[J]. Journal of Biomechanics,2002,35:881-892.

[4]　耿文苑. 形状记忆合金及其应用现状[J]. 特殊钢,1988(4):1-8.

[5]　中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册. 第 5 卷. 粉末冶金材料精密合金与功能材料[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 357-365.

[6]　朱春华,梁建明,余秀萍. 形状记忆合金材料的发展及应用[J]. 河北建筑工程学院学报,2003,21(2):13-14.

[7]　SHAW J A. KYRIAKIDESS. On the Nucleation and Propagation of Phase Transformation Fronts in a NiTi Alloy[J]. Acta Mater,1997,45:683-700.

(上接第 15 页)

锻金属充满型腔的同时,大大减少飞边的面积,材料利用率由原来的 80% 提高到 86.9%。同时,最大等效应力值降低,终锻阶段金属流动更加合理,最大载荷比传统过程降低了 27.8%,这对改善锻件质量,提高模具寿命,降低生产成本等具有积极的作用。

2) 新工艺通过辊锻制坯促使锻件的关键部位产生大变形,使终锻后锻件最容易发生断裂处的晶粒明显细化,强度得到提高,同时可在一定程度上提高锻件的塑性和韧性,降低锻件发生脆性断裂的几率。该研究从微观层面上预测锻造工艺对锻件晶粒的影响,为企业生产高质量锻件提供了技术支持。

参考文献:

[1]　邓明,李庆,吕琳. 连杆锻坯辊锻模具设计与计算机有限元模拟[J]. 热加工工艺,2008,37(9):57-60.

[2]　LI Ru-xiong, JIAO Song-hua, WANG Jin-lyu. Roll-forging Technology of Automotive Front Axle Precision Performing and Die Design[J]. IERI Procedia,2012(1):166-171.

[3]　张承鉴. 辊锻技术[M]. 北京:机械工业出版社,1986.

[4]　SHEN Yu, YU Hu-ping, RUAN Xue-yu. Discussion and Prediction on Decreasing Flow Stress Scale Effect[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2006(1):132-136.

[5]　蔺永诚,陈明松,钟掘. 形变温度对 42CrMo 钢塑性成形与动态再结晶的影响[J]. 材料热处理学报,2009,30(1):70-74.

[6]　蔺永诚,陈明松,钟掘. 压下率对 42CrMo 钢塑性成形与微结构演化的影响[J]. 中南大学学报,2008,39(5):1005-1010.

[7]　LIN Yong-cheng, CHEN Ming-song, ZHONG Jue. Numerical Simulation for Stress/Strain Distribution and Microstructural Evolution in 42CrMo Steel during Hot Upsetting Process[J]. Computational Material Science,2008,43:1117-1122.