

## 车用发动机共轨管精密成形工艺与试验研究

张波<sup>1</sup>, 郭巨寿<sup>2</sup>, 袁宇亭<sup>2</sup>, 曹艳<sup>2,3</sup>, 于霞<sup>2</sup>, 康凤<sup>3</sup>

(1. 海军装备部驻大同地区军事代表室, 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** 为了提高柴油发动机的综合机械性能和降低制造成本, 采用精密成形技术来实现共轨管的制备。**方法** 通过工艺分析, 设计了锻件形状、分模方式、飞边槽形式以及模具主要结构, 建立了共轨管精密成形的有限元模型, 并初步进行了主体设备选型。**结果** 通过有限元模拟, 对设计的精密成形工艺进行了仿真, 获得了成形过程中坯料的速度场、等效应变分布及行程-载荷曲线, 揭示了共轨管成形过程中金属在型腔中的流动情况, 以及成形载荷的变化情况。**结论** 通过最终工艺试制, 验证并确定了工艺方案, 根据零件的自身特点, 突破了传统以投影面最大处为分模面的工艺, 为最终的生产试制提供了参考依据。共轨管锻件充型饱满, 5 个小凸台均充型完全, 尺寸均满足产品的技术要求, 对后续简化工艺、提升产品的性能都有较大的作用。

**关键词:** 精密成形; 共轨管; 有限元; 数值模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.013

**中图分类号:** TP391.7; TH164 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457 (2016)04-0069-04

### Precision Hot-die Forging Process of the Common-rail Pipe

ZHANG Bo<sup>1</sup>, GUO Ju-shou<sup>2</sup>, YUAN Yu-ting<sup>2</sup>, CAO Yan<sup>2</sup>, YU Xia<sup>2</sup>, KANG Feng<sup>3</sup>

(1. Navy in Datong Military Representative Office, Datong 037036, China; 2. Northern General Dynamics Group Company, Datong 037036, China; 3. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** In order to improve the mechanical properties and decrease the production cost of the Common-rail Pipe, precision hot forging process is employed to manufacture the part. Based on the processing analyses, shape of the forge, parting face, and mould structure were determined, and the solid model was established. With the FEM, the distributions of velocity field, equivalent Mises plastic strain and the curves of load-time were obtained. With engineer testing, the process scheme has been certified, and the Common-rail Pipe were full-filled, the measure could meet all of the product requirements. It can help to predigest posterior techniques and improve the mechanical properties.

**KEY WORDS:** precision forging; common-rail pipe; finite element; numerical simulation

高压共轨系统是目前世界上最先进的燃油喷射系统, 是柴油从油箱被齿轮吸出, 经过油水分离器, 过齿轮泵, 到柴油精滤器, 再到高压泵、共轨管、喷油器, 并于传感器和 ECU 组成的闭环燃油供给系

统, 将喷射压力的产生和喷射过程彼此完全分开的一种供油方式。共轨管是共轨系统的核心零件, 主要任务是存储高压燃油, 并将供油泵提供的高压泵的供油和喷油所产生的压力波动, 由共轨管的容积

收稿日期: 2016-05-20

作者简介: 张波 (1977—), 男, 吉林伊通人, 工程师, 主要研究方向为柴油机设计与制造技术。

进行缓冲。在输出较大燃油量时,所有的汽缸共用的共轨压力也保持恒定,从而确保喷油器打开时喷油压力不变<sup>[1]</sup>。

共轨管为细长管件,加工工艺复杂,尺寸精度要求高,加工难度大,且易发生加工变形,特别是直线度难以保证<sup>[2]</sup>。如图1所示,管身平均分布5个凸台,定位精度要求 $\pm 0.2$  mm,凸台外表面不加工,其余部分外表面也只加工轴颈部分和端头,且零件在调质处理后,整体直线度要求控制在0.2以内。该零件由于要求高,一直采用外购进口产品,现采用精密热模锻技术,对该零件进行工艺试制,以替代进口,推动柴油发动机国产化研制。



图1 柴油机共轨管零件  
Fig.1 The Common-rail Pipe

## 1 工艺分析

图2所示为共轨管锻件设计,该零件材料为42CrMo钢,其结构均匀分布5个凸台,设计仍以满足定位精度 $\pm 0.2$  mm为准,凸台直径仅18 mm,高度18 mm,根部圆弧过渡R3 mm,锻件总长超过了700 mm,对锻造工艺来说,长径比达到了18左右,直线度控制难度较大,且由于凸台后续机械加工困难,因此锻件尽量保证其表面不加工,亦加大了该零件的锻造难度。另一方面,为了保证共轨管的性能,还要避免金属流线的缺陷,如穿流、涡流、乱流在零件内形成,以及在机械加工时被大面积切断和露头<sup>[3-4]</sup>。

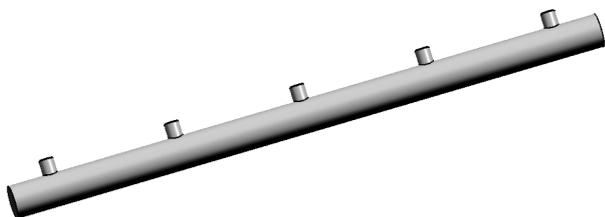


图2 共轨管锻件  
Fig.2 The forging of Common-rail Pipe

针对共轨管的形状特点,由于5个凸台为局部小体积充型,无拔模斜度,难度较大,极易充型不饱满<sup>[5]</sup>,因此工艺设计时将圆台高度增加了5 mm,保证凸台充型的尺寸满足要求。经过对共轨管的整

体工艺分析,设计分模形式如图3所示,传统工艺一般将最大投影面设计在分模面上<sup>[6]</sup>,但由于该零件最大投影面是包含5个凸台的截面,总的来说与其他投影面相差不大,且若以5个凸台处分模,会导致5个凸台周身分布飞边,非常不利于加工,因此作如图3的分模工艺。分模面设计在上模腔,以保证包含凸台的上半部分形状的金属流动充分,型腔充填完全<sup>[7]</sup>。由于形变主要集中在5个小凸台上,为了防止金属在充填凸台前向外边缘流动,飞边槽的设计非常重要。

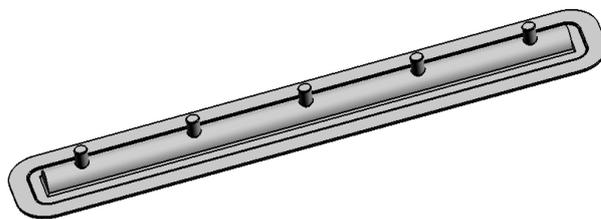


图3 共轨管分模形式  
Fig.3 The parting surface of Common-rail Pipe

图4所示为共轨管飞边槽设计,由于该零件变形主要集中在顶部凸台,采用这类飞边形式,桥部高度设计为2.5 mm,长度为10 mm,增加金属流动阻力,防止金属过多地流出模腔,但对该零件来说,最终仍有较多的金属流入仓部,因此仓部设计尺寸较大,为20 mm。

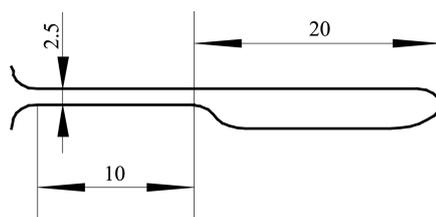


图4 飞边槽设计  
Fig.4 Design of the gutter

## 2 模具设计及设备选型

共轨管产品的精锻工艺流程为:下料→加热→精密热模锻→切边→正火→冷却→喷丸→清理,其中精密热模锻成形的设备为螺旋压力机,切边工序则采用机械压力机,因此成形主体设备仅考虑螺旋压力机的吨位。首先根据经验公式 $P=KS/q$ 计算出设备的吨位<sup>[8]</sup>,共轨管锻件投影面积计算结果为 $36250$  mm<sup>2</sup>,系数 $K$ 根据热精锻经验取为 $80$  kN/cm<sup>2</sup>,变形系数 $q$ 取1.3,经计算,公称压力 $P$ 为 $22308$  kN,因此成形设备选用 $3000$  t螺旋压力机。

如图 5 所示为共轨管的模具结构设计，在模具结构中，锻件的凸台形状设置在下模腔，一是方便凸台的金属充型，二是由于凸台没有设计拔模，型腔深，若设计在上模则无法脱模，下模有顶料机构，脱模时有顶出力协助出料。其中锻件热收缩尺寸按照 1.5% 计算。

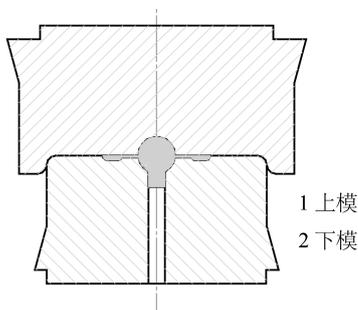


图 5 模具主体结构  
Fig.5 Principal Structure of Dies

### 3 有限元工艺模拟

为了对共轨管成形工艺进行进一步分析和验证，采用有限元法对设计的精密成形工艺进行模拟仿真，分析分模方式、坯料尺寸以及模具结构形式对共轨管成形的影响，为下一步工艺试验奠定基础，节省试模成本。

如图 6 所示为共轨管精密成形有限元模型，材料设定为刚-粘塑性，模具为刚性体，如图 2 所示，坯料为 42CrMoA，在材料库中选用近似材料 AISI 4140，摩擦模型为常剪应力摩擦模型，摩擦因子为 0.25<sup>[9-10]</sup>，有限元参数设置：摩擦因子为 0.25，网格数为 20000，凸模速度为 30 mm/s，坯料温度为 1150 °C，模具温度为 300 °C。

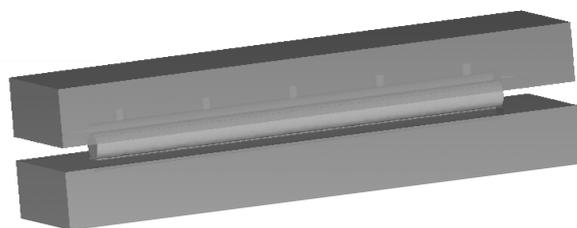


图 6 共轨管成形有限元建模  
Fig.6 FEM Model of Common-rail Pipe Forging

如图 7 所示为共轨管的模拟充型结果，从共轨管的充型来看，在成形初期就有部分金属向凸台处流动，充填模腔，而到了成形尾声，5 个小凸台均充填完整，由于整个变形量都不大（如图 7b 所示），金属充型时并没有将飞边槽充填完全。从图 7a 可以看出，金属流动主要以填充凸台的方向和外侧飞边的方向为主，而从最终的流线图来看（如图 7c 所示），也与图 7a 一致，金属基本向底部的凸台处以及外侧流动。

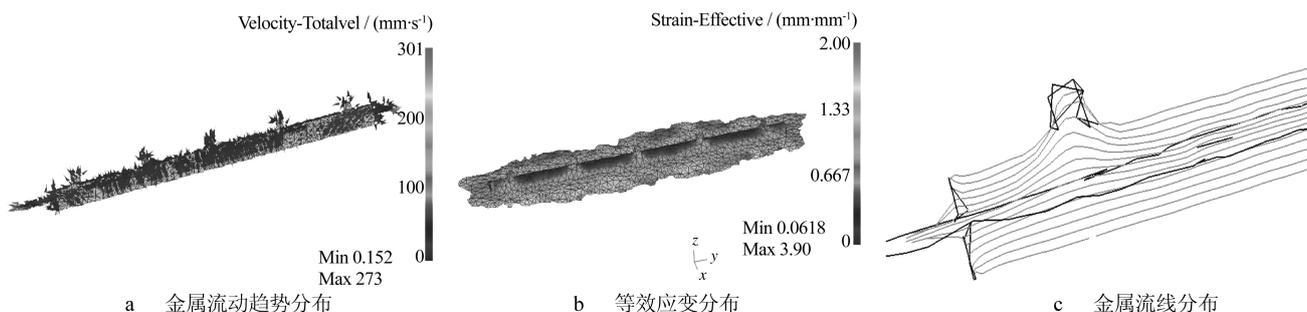


图 7 共轨管的模拟充型结果  
Fig.7 FEM result of the forging

图 8 所示为成形过程中的行程-载荷曲线，从图 8 可以看出，在变形初期，还没有开始充填凸台时，整个变形过程载荷增加非常缓慢，而当凸模继续下行，金属开始充填凸台时，载荷迅速增加，直到上下模即将合模，凸台充填完全，飞边开始产生时，变形接近尾声，坯料温度下降，成形载荷上升到最大，约为 22000 kN，因此上述成形设备选用 3000 t 螺旋压力机能够满足要求。

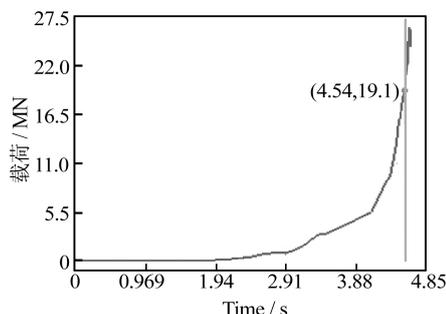


图 8 行程-载荷曲线  
Fig.8 Stroke-Force Curve

## 4 工艺试验

根据工艺设计和模拟结果,对共轨管开展了精密成形工艺试验,成形主体设备为3000 t螺旋压力机,其他辅助工装有:中频感应加热炉、机械压力机、抛丸机,润滑剂为水基石墨。主要工艺流程为:下料—加热—润滑—成形—切边—喷丸—清理—检验—入库。试验开始前,模具先采用氧乙炔进行加热,再用加热到1200℃的45钢进行保温,避免冷模效应<sup>[1]</sup>,试验结果如图9所示。共轨管锻件充型饱满,5个小凸台均充型完全,经检测尺寸均满足产品的技术要求。制备的共轨管锻件切边带位于侧面分模面处,5个凸台处不再需要机械加工,对后续简化机加工工艺以及提升产品的性能都有较大的作用。

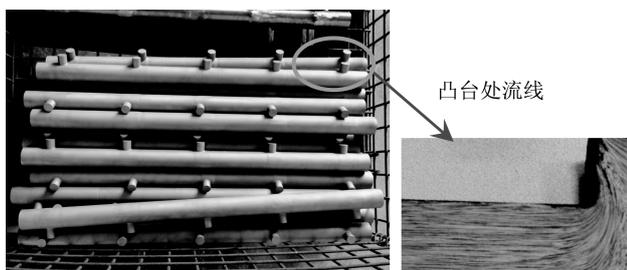


图9 共轨管样件

Fig.9 The Forged Part of Common-rail Pipe

## 5 结论

1) 应用有限元技术对共轨管的精密成形工艺进行了模拟,通过对前期工艺设计的分模方式、模具形式、坯料形状等进行仿真成形试验,验证并确定了工艺设计方案,根据零件的自身特点,突破了传统以投影面最大处为分模面的工艺,为最终的生产试制提供了参考依据。

2) 根据工艺设计和模拟结果,对共轨管开展了精密成形工艺试验试制,试制结果表明,共轨管锻件充型饱满,5个小凸台均充型完全,尺寸均满足产品的技术要求。共轨管锻件切边带位于侧面分模面处,5个凸台不再需要机加工,对后续简化工艺、提升产品的性能都有较大的作用。

### 参考文献:

[1] 龚罗自来,常汉宝,张晓怀,等.船用大功率柴油机共轨管设计仿真与试验研究[J].内燃机,2012(6):37—39.

- LUO Zi-lai, CHANG Han-bao, ZHANG Xiao-huai, et al. Simulation and Experiment Study of Common Rail Pipe for Marine Heavy Duty Diesel Engines[J]. Inner Combustion Engines, 2012(6): 37—39.
- [2] 杨振恒. 锻造工艺学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1986.
- YANG Zhen-heng. Forging Technology[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1986.
- [3] 郭巨寿,高峰,王斌,等.发动机泵体精密热模锻成形工艺研究[J].精密成形工程,2014,6(6):111—115.
- GUO Ju-shou, GAO Feng, WNG Bin, et al. Precision Hot-die Forging Process of Engine Pump Body[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014,6(6): 111—115.
- [4] 吕炎. 锻件组织性能控制[M].北京:国防工业出版社,1988:170—181.
- LYU Yan. Forging Microstructure and Properties Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 170—181.
- [5] 范生连. 长轴类锻件锤上模锻工艺及模具设计[J]. 模具工业,1992(11):46—48.
- FAN Sheng-lian. Die Forging Process and Die Design for Long Shaft Forging Die[J]. Die Industry, 1992(11): 46—48.
- [6] 杜九汪,王强,王宏伟,等.低合金钢阀体的模锻工艺研究[J].热加工工艺,2014,43(7):120—122.
- DU Jiu-wang, WANG Qiang, WANG Hong-wei, et al. Research on Die Forging Technology of Low Alloy Steel Valve Body[J]. Hot Working Technology, 2014,43(7): 120—122.
- [7] 陈春,易幼平,李蓬川.23Co13Ni11Cr3Mo超高强度钢模锻件锻造工艺研究[J].热加工工艺,2011,40(17):15—18.
- CHEN Chun, YI You-ping, LI Peng-chuan. Research on Forging Process for 23Co13Ni11Cr3Mo Ultra High Strength Steel[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(17): 15—18.
- [8] 高峰,林军.高功率密度发动机连杆热模锻工艺模拟与优化[J].精密成形工程,2015,7(4):66—70.
- GAO Feng, LIN Jun. Hammer Forging Process Simulation and Optimization of Connecting Rod of High-Power-Density Engine[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(4): 66—70.
- [9] 冀东生,夏巨谌,朱怀沈,等.汽车传动轴叉形件精密模锻工艺研究[J].锻压技术,2010,35(6):14—18.
- JI Dong-sheng, XIA Ju-chen, ZHU Huai-shen, et al. Investigation of Precision Die Forging Process for Fork Parts Used in Automotive Propeller Shaft[J]. Forging & Stamping Technology, 2010,35(6): 14—18.
- [10] 何健,阚泽东,李路.1041转向节热模锻工艺及模具设计[J].精密成形工程,2009,1(2):86—88.
- HE Jian, KAN Ze-dong, LI Lu. Hot Forging Process and Die Design for 1041 Knuckle[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(2): 86—88.
- [11] 何云勇. JH70拨叉热模锻工艺与模具设计[J].模具工业,2009,35(4):57—60.
- HE Yun-yong. Hot Die Forging Process and Die Design for JH70 Shifting Fork[J]. Die Industry, 2009,35(4): 57—60.