

文章编号:1672-6413(2008)06-0198-03

# 大型曲轴弯曲锻锻技术的研究

张学忠, 何文武, 刘建生, 郭会光

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:**介绍了大型曲轴现代弯曲锻锻工艺的进展及其工艺特点,评述了整体曲轴弯曲锻锻技术在国内外的发展和  
应用,以及弯曲锻锻数值模拟体系的概况。

**关键词:**全纤维锻压; 锻锻法; 锻造工艺; 曲轴

**中图分类号:** TG316 **文献标识码:** A

## 1 大型曲轴的结构

大型曲轴主要用于铁路机车和船舶的发动机,其主要功能是将连杆传来的力转变为扭矩,从而使直线运动转变为旋转运动,使发动机工作。曲轴是发动机中最主要的零件之一,其受力状况极其复杂,所以不仅要求有良好的刚度和强度,还要有较高的尺寸精度、形状精度和耐磨性。按结构曲轴可分为整体式和组合式,它由曲拐、主轴径和曲柄销构成,见图1,其中AB面为曲轴危险面<sup>[1]</sup>。曲轴承受交变应力作用时,AB区域容易产生疲劳裂纹,因此要求纤维连续,防止疲劳断裂破坏。为了提高曲轴的承载能力和使用寿命,发展应用了全纤维制造曲轴技术。

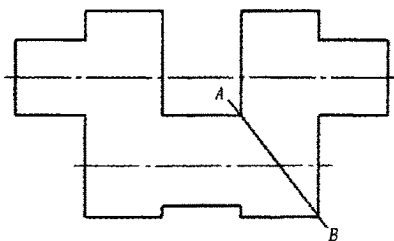


图1 曲轴危险面

## 2 大型曲轴成形方案

大型曲轴的成形有以下几种方法:

(1) 块锻法:块锻法就是先将毛坯锻造成一个方块,然后机加工成曲轴形状。块锻法的优点是工艺简单、易加工。但由于要使钢锭有足够的锻造比,而且要成形曲柄,就需要足够大的毛坯。块锻法的机加工量较大,导致大量纤维被切断,不但使材料的利用率大大降低,而且曲轴的质量得不到保证。

(2) 环锻法:环锻法先锻造出U型毛坯,然后压

出两侧的锥面,再利用模锻块实现最终成形。该方法工艺复杂,成形过程难以控制。但锻造后的加工余量较小,可以较好地保留金属纤维的完整。

(3) 模锻法:模锻法是先将坯料锻打成两侧为轴中间为块的细长轴,然后放入模具中,利用水压机将坯料的内部压实,再压入冲头使中间部分成形为左、右曲柄。模锻法的最大优点是内部组织致密,流线型好,加工余量少,但对工装、设备的要求都较高。

(4) 弯锻法:该法是将钢锭压成中间厚两边薄的长条饼状,然后再利用模具将其弯曲并最终成形。该方法对模具及设备的要求都不高,工艺简便,金属纤维流线较好,但弯曲过程中易出现缺陷。

(5) 锻锻法:锻锻法是一种双向锻造方法,锻坯同时受到锻粗和错移的力,最终锻成曲柄,这样逐次锻出每个曲拐,最后形成多拐曲轴。与普通自由锻造的曲轴相比,锻锻法曲轴的机械性能、耐疲劳和耐冲击性能得到改善,具有机械加工余量小和机加工工时少等优点,是当前最为成功的全纤维曲轴锻压工艺。

## 3 几种主要的锻锻方法

### 3.1 RR 锻锻法

20世纪30年代末由法国工程师R Roedrer发明了RR锻锻法,又称“大型曲轴弯曲锻锻法”。20世纪50年代这种方法开始流行,其利用一种称为曲轴锻锻装置的专用装置来加工<sup>[2]</sup>,压机压下时,借助上模架的两个斜面将压机的压入力分解为用于实现锻粗的水平力和弯曲错移锻件的垂直力,斜面的倾角可通过更换垫板来改变。将一定长度的圆棒料锻锻和弯曲成纤维连续的整体曲拐,通过逐拐变形便可得到金属纤维连续的整体曲轴锻件。RR锻锻法和自由锻相比节约了55%以上的原材料和70%的机加工量,且在所有的危

收稿日期:2008-04-15; 修回日期:2008-06-28

作者简介:张学忠(1979-),男,山西太原人,硕士研究生。

险断面上纤维连续,曲轴的疲劳强度提高了15%~20%。缺点在于:水平力与设备公称力的比值较小,设备能力不能充分得到利用;锻粗和弯曲同时进行,工艺参数不能调整,曲臂尖角处容易出现填充不满模膛的情况,导致加工余量较大,材料利用率低;采用台肩式棒料毛坯,金属纤维被切断,减小了曲轴的强度;由于局部加热,多拐分步成形后需热校直。

### 3.2 TR 锻造法

20世纪60年代波兰波兹南金属成形研究所鲁特博士研究成功了一种TR弯曲锻法。其原理与RR锻法相同,但弯曲锻装置的结构比较合理,其装置称为TR装置或CLOP装置。它是通过肘杆机构把压力机的压力分解为垂直分力和水平分力,力的分配比较合理,TR法锻造示意图见图2。在锻过程中,随着肘杆倾角的逐渐变小,水平锻粗力逐渐增大,在锻粗终点时达到最大值,约为压机名义压力的1.2倍。另外,TR弯曲锻装置简单、体积小、重量轻、装拆方便,装在水压机上就可锻造曲轴<sup>[3]</sup>。但和RR锻法一样由于模具的限制,锻粗过程的工艺参数不能随意调整。

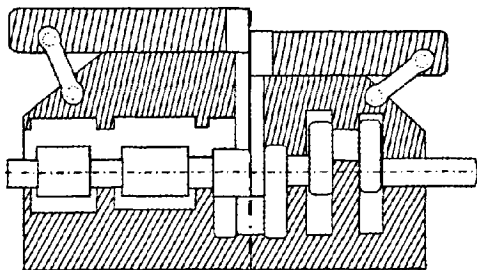


图2 TR法锻造示意图

### 3.3 NRR 锻造法

20世纪50年代,日本神户制钢公司高砂工厂引进了RR技术,并于20世纪80年代在冲头位置加装了可单独控制的弯曲缸,用于错拐,从而实现了“预锻—弯锻(同时进行)—终锻”3步锻造法,被称为“NRR”法<sup>[4]</sup>。该方法弯曲和锻粗的速度和行程可以进行调整,可采用光坯料直接挤压;曲柄的形状和尺寸可以接近设计要求,加工工时和加工余量有所减少,材料利用率有所提高;与RR法存在相似问题,即压机压力转换为的水平锻粗力没有达到足够大。

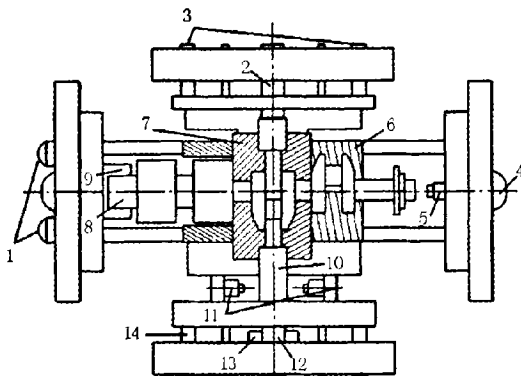
### 3.4 双向水压机锻造法

1961年美国National锻造公司(现改名为依尔武德国国家曲轴公司)利用一台专用的卧式封闭模锻双向水压机锻造柴油机曲轴<sup>[5]</sup>,轴向部分用于锻粗成形,径向部分用于压紧和曲柄销错位,其锻造示意图见图3。由于工作缸的力量可以直接作用在锻件上,无需压力转换和分解机构。根据曲轴的不同形状和要求,可任意选择几步成形,并可采用光坯料直接挤压,无须定位台阶。该专用压机成形精度高、加工余量小、金属纤维连续程度更高。

### 3.5 专用压机锻造法

VSG 锻法是德国帝森集团VSG公司锻造曲轴的一种方法。第1次加热,预成形一根棒料;第2次加热,预成形主轴径;第3次加热,采用专用装置最终成形所有曲拐和角度位置。成形过程中没有中间冷却。在闭式模具中错拐和锻粗同时进行,每锻粗一拐后,会被移动一拐的距离,并被旋转一个要求的角度。该方法适用于中等批量到大批量生产,也可单件生产。其装置成本低,曲轴金属纤维较连续,但精度不高。由于没有对光坯进行超声波及化学、物理性能检查,出现废品时损失较大。

20世纪70年代初,英国发明了CIVROD法,采用了专用装备锻压曲轴的方法,取代了水压机。该装置两侧是垂直夹紧缸和水平锻缸,装置中间是2个弯曲缸和2个曲臂成形缸,4个缸随中心架一起回转,从而控制曲柄间的角度关系。该方法可以一火锻一根曲轴,大大提高了生产效率。



1—双缸; 2—模板缸; 3, 14—压紧缸; 4—主缸; 5—限位装置;  
6—旋转模; 7—模板; 8—轴; 9—可调挡杆; 10—支承杆;  
11—模具移动缸; 12—机械支承挡块; 13—支承缸

图3 双向水压机锻造示意图

## 4 国内的整体曲轴弯曲锻技术

国内全纤维曲轴锻造起步较晚,1964年一机部机械科学研究所杨志敏等与天津铸锻件厂和八机部潍坊柴油机厂组成的联合小组对6160曲轴进行弯曲锻粗实验。以1:3缩小的比例对6160曲轴模拟锻压,并最终实验取得成功。1965年2月,太原重型机械学院郭会光教授用铅及塑泥对RR和错拐等连续纤维成形方法进行了模拟实验。同年天津重型机械厂在2500吨水压机上采用RR装置成功锻出6160型全纤维曲轴,并于1966年投入批量生产,结束了我国不能生产全纤维曲轴的落后局面。到20世纪80年代中期,我国已经形成了天津重型机械厂(RR法)、资阳内燃机车车辆厂(TR法)和武汉重型铸锻厂(RR法)3个生产基地。

1975年第一重型机器厂在12000吨水压机上试制了大型全纤维曲轴。1978年太原重型机器厂在30MN水压机上用错拐法锻出6390全纤维曲轴。近年来,天津大学和天津市康库德机电技术有限公司联合研究出NTR锻造法,提出了新的锻造工艺,工作循

环包含预上弯—预锻—锻弯组合—终锻4个工步。

经过20多年的生产实践,天津重型机械厂于1989年在60MN水压机上采用了210吨的新RR装置,一次试锻成功,并投入生产。利用该方法生产后,使曲轴锻件的疲劳强度提高了20%,节约了40%的原材料。

## 5 数值模拟研究新工艺

从20世纪80年代开始,许多发达国家的曲轴锻压技术广泛采用了CAD/CAM,通过生产管理信息系统和集成制造系统,实现锻造生产中的原材料、工艺和工艺装备最佳方案的选择和对整个锻造过程的控制,使锻造成形技术的开发和应用更加合理,更加符合实际生产情况,便于优化生产工艺和模具,带动了曲轴锻造业的整体上升。

随着计算机硬件的快速发展,计算机模拟为工业生产提供了有力支持,也成为研究曲轴的有力工具。国内外在曲轴锻造方面也已大量使用塑性有限元数字模拟技术,特别是采用计算机来模拟优化RR法和TR法的弯曲锻造成形。计算机模拟解决了大型曲轴工艺以及模具设计带来的人力物力财力浪费。例如:清华大学的王纪武等人,利用开发的三维有限变形弹塑性程序,模拟大型曲轴的RR法成形过程,得到了不同摩擦条件变形过程的应力场、应变场和载荷位移曲线,为确定合理的成形工艺方案和模具形状及提高成形质量和模具寿命提供了可靠的依据<sup>[6]</sup>;太原科技大学材料学院的刘建生教授等采用三维刚粘塑性软件TFORM-3D对12V240曲轴RR法限制成形工艺及模具结构进行了设计分析,提出了防止成形缺陷产生的新的模具结构方案,从而为曲轴RR法锻锻工艺及模具设计提供了理论依据,采用三维刚塑性有限元模

拟研究了6160曲轴的成形过程,得到曲轴的塑性变形分布规律并分析了摩擦因素对曲轴成形后变形分布及外形的影响<sup>[7~8]</sup>;罗晴岚、罗延杰对在63MN热模锻压力机生产线上采用压扁、预锻、终锻工艺生产4JA型曲轴,提出和分析了影响金属充满程度的因素;华北工学院的任建平利用有限元分析结果,计算了曲轴工作的疲劳强度安全系数,从而减少了加工余量,优化了设计,提高了材料利用率;山东省内燃机研究所的林基超等人将刚粘塑性模拟技术和CAD/CAM技术相结合,充分运用刚粘塑性有限元正向模拟与反向模拟技术进行模具设计及工艺优化处理,提高了锻造工艺水平,改善了锻件质量,降低了锻造费用,同时提高材料利用率10%以上,将模具寿命提高了2倍。

## 参考文献:

- [1] 白雪寒. 柴油机曲轴R.R. 锻压工艺[J]. 机车车辆工艺, 1993(1): 23-25.
- [2] 郭志仁. 国内外大型全纤维曲轴锻造工艺及其装置[J]. 热加工工艺, 1982(1): 39-46.
- [3] 郭会光, 陈慧琴, 刘建生. 6160曲轴弯曲锻过程的有限元数值模拟[J]. 大型铸锻件, 2002(2): 12-15, 26.
- [4] 王仲仁. 曲轴RR法锻锻成形的数值模拟与缺陷预测[J]. 中国机械工程, 2001(4): 429-432.
- [5] 万煦义. 大中型全纤维曲轴锻造方法的探讨[J]. 大型铸锻件, 2006(3): 49-56.
- [6] 王纪武, 刘庄. 曲轴全纤维成形的三维有限元变形弹塑性有限元模拟[J]. 大型铸锻件, 1998(3): 9-12, 38.
- [7] 刘建生, 陈慧琴, 郭会光. 大型曲轴RR法弯曲锻过程的三维刚塑性有限元模拟[J]. 太原重型机械学院学报, 2002(3): 195-198.
- [8] 刘建生. 大型曲轴弯曲锻过程的热力耦合分析[J]. 锻压机械, 2001(2): 13.

# Development of the Bending and Upsetting Forging Method for the Integral Crankshaft

ZHANG Xue-zhong, HE Wen-wu, LIU Jian-sheng, GUO Hui-guang

(School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** This article has described the several forging methods of the crankshaft and their features, and presented the advantages and disadvantages, meanwhile the forward development of the bending and upsetting forging methods for the integral crankshaft in the world.

**Key words:** all fiber forging; upsetting forging; forging technology; crankshaft

(上接第197页)

## Application of Antithesis in Machinery Innovation

SHI Chang-wei<sup>1</sup>, SUN Wen-lei<sup>1</sup>, LIANG Zhao-ji<sup>1,2</sup>, ZHAO Qun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, China; 2. Xinjiang Petroleum Institute, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** This article mainly introduced the basic concept of antithesis in the mechanical theory, and introduced the machinery innovation theory simply. Then, it analyzed the application of antithesis in the machinery innovation, pointed out the transformation between explicit and implicit in the space. Through the analysis to some example, summarized the essence of the machinery innovation, and put forward that antithesis would lead machine innovation.

**Key words:** antithesis; innovative design; transformation between explicit and implicit