

# 大中型全纤维曲轴锻造方法的探讨

万煦义

(中国南车集团资阳机车有限公司,四川 641301)

**摘要:**通过对常用的几种大中型全纤维曲轴锻锻方法进行详细介绍和分析,指出了各方法的优缺点,并提出今后大中型全纤维曲轴锻造方法的发展方向。

**关键词:**全纤维曲轴;锻锻;装置

**中图分类号:** TG316 **文献标识码:** A

## The Exploration of the Forging Method for the Large-Middle Size Continuous Grain Flow Crankshaft

Wan Xuyi

**Abstract:** This article has described and analyzed the several upsetting forging methods of large-middle size continuous grain flow crankshaft in detail, and presented the advantages and disadvantages of different methods, meanwhile the development direction of the forging method for the large-middle size continuous grain flow crankshaft has been set forward as well.

**Key words:** continuous grain flow crankshaft; upsetting forging; device

### 1 前言

曲轴是柴油机的关键零件,工作时曲轴的受力状况极其复杂,其制造质量的好坏是影响柴油机性能和可靠性的重要因素。尤其是大中型柴油机曲轴,制造工艺复杂,其制造成本约占柴油机制造成本的五分之一到四分之一。多年前,世界各国除美国俄亥俄曲轴锻造公司、德国阿尔芬凯思勒工厂采用大型模锻对击锤生产外(仅限长度4.2 m以下曲轴),大多是采用自由锻造工艺生产。也有采用铸造或分段组合锻造工艺的,但这两种工艺存在产品质量差、加工余量大等问题。材料利用率也很低,有的甚至不到20%,严重影响了柴油机的发展和使用。

随着近年世界造船、石油、发电、内燃机车的快速发展,对大中型柴油机曲轴质量要求越来越高,而且需求数量也很大。就世界现有曲轴生产情况来看,不仅铸造、自由锻生产的曲轴达不到技术要求,而且就连普通的锻锻工艺生产的曲轴也存在锻造精度差,加工余量大,金属纤维切断过多,使用寿命不长等问题。甚至有断轴事故发生。面对大中型柴油机、燃气机行业的需求,提高全纤维曲轴挤压精度,减少机械加工余量,提高金属纤维

连续程度,提高曲轴质量已成为锻造行业的主要任务。为了从根本上解决这一问题,单纯依靠改造老设备及工艺上的小改小革显然不行,不但困难重重,而且质量和产量都很难提高。本文通过对目前国内外常用的几种大中型柴油机曲轴锻锻工艺进行对比分析,提出了一些新看法,供同行参考。

### 2 大中型曲轴锻造方法的分析比较

#### 2.1 自由锻造方法

主要用于生产大型船用曲轴及一些批量很小的曲轴。图1所示是曲轴的典型自由锻造方法变形图。上万马力(7.35 MW)的柴油机采用单拐锻造,加工完后再组装。为了保证质量,对选材、冶炼、铸锭、锻造、热处理、检验等整个生产过程都要进行控制,其中锻造工艺的控制极为重要。该工艺通常在20 MN以上的自由锻造水压机上进行。用钢锭直接锻造,所用的工具、工装较简单。通过天车进行扭转。这种锻造方法的缺点是生产效率低,废品高,劳动强度大。由于钢锭中心与曲轴中心线不重合,心部的偏析、夹杂等缺陷易外露。机械加工余量大,加工后金属纤维切断较多,使疲劳寿命受影响。

#### 2.2 曲轴锻锻方法

##### 2.2.1 R-R 锻锻法

由法国人R. Roedrer工程师于20世纪30年

收稿日期:2006-07-27

作者简介:万煦义(1963-),高级工程师,长期从事锻造等热加工工艺、工装设计及改进工作,现为厂副总工程师。

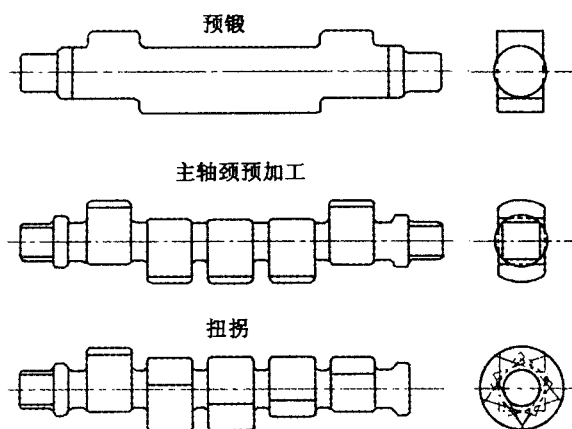


图 1 自由锻造方法变形图  
Figure. 1 The deformation sketch of open forging method

代未发明,50 年代流行,又称“大型曲轴弯曲镦锻法”。是利用一种称为曲轴镦锻装置的专用装置,在一个火次里,将一定长度的光坯料镦粗和弯曲成纤维连续的完整曲拐,通过逐拐变形便可得到金属纤维连续的整体曲轴锻件。镦锻装置分为液压式和机械式两种。图 2 是其变形过程示意图。工作时,将十字头装在压机的活动横梁上,底座固定在压机工作台上。当压机压下时,借助两侧面将压机的压入力分解为用于镦粗的水平力和弯曲的垂直力,斜面的倾角可通过更换垫板来改变,一般多采用 30°、35°、40°。根据不同结构的曲轴可选择合理的斜面倾角。角度一定,水平分力和垂直分力的比例以及相应的行程比例也就不变,它与锻件的变形过程无关。该方法与自由锻造方法相比较,最显著的优点是原材料至少可节约 50% 以上,机械加工工时可减少 60%,而且金属纤维基本连续,曲轴的质量大大提高,其疲劳强度可提高 15% 以上,这就可以相应地减少轴径和曲柄的尺寸。该法最初对于生产椭圆形曲柄的曲轴极为适合,后为了满足各种形状曲轴的需要,在模具和冲头模块的设计中做了许多改进,如全液压封闭镦锻装置等。

2.2.2 T-R 镦锻法

随着柴油机功率的不断加大,发现 R-R 镦锻法所要求的镦粗力太大,一般 50 MN 以上的压力机才能锻出大功率中速机曲轴。基于上述原因,20 世纪 60 年代,波兰波兹南金属成形研究所鲁特(Tadeusz Rut)教授成功的研究了一种 T-R 弯曲镦锻法。其原理与 R-R 弯曲镦锻法相同,但弯曲镦锻装置的结构比较合理,能够得到大得多的水平镦粗力。它是通过肘杆机构,把压力机的压力分解为垂直弯曲分力和水平镦粗分力,力的分

配比较合理。在镦锻过程中,随着肘杆倾角的逐渐变小,水平镦粗力逐渐增大,在镦锻终点时,达到最大值,约为压力机名义压力的 1.2 倍。图 3 所示是 T-R 镦锻装置中镦锻力与肘杆倾角的关系<sup>[1]</sup>。水平镦锻分力的变化趋势和曲柄成形阻力变化规律是相吻合的,所以,T-R 弯曲镦锻装置对压机压力要求小。另外,T-R 弯曲镦锻装置简单,装拆方便,重量轻,装在通用水压机上就可锻造曲轴,拆出装置又可以进行自由锻造。

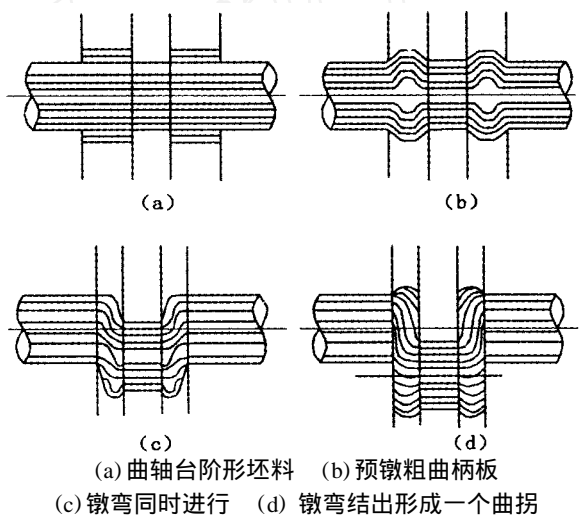


图 2 R-R 变形过程示意图  
Figure. 2 The schematic sketch of R-R deformation process

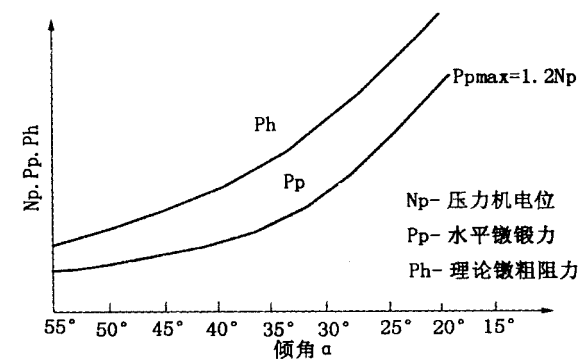


图 3 镦锻力与肘杆倾角的关系  
Figure. 3 The relationship between the upsetting forging force and knuckle rod inclining angle

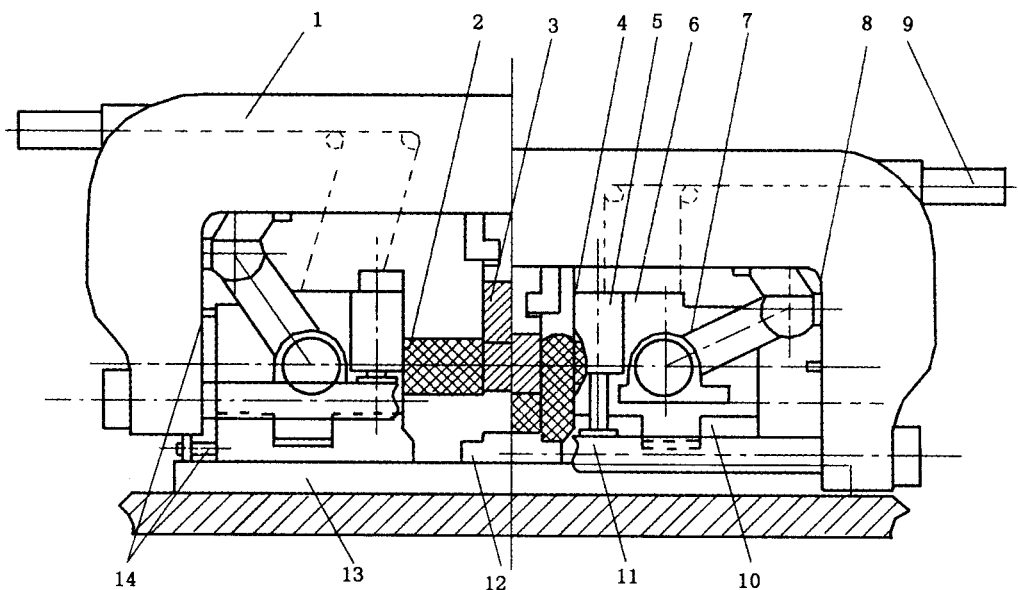
由于 T-R 弯曲镦锻装置具有这些优点,所以近年来正在逐渐代替 R-R 弯曲镦锻方法和其它方法。如西班牙的 Astilleros Espanoles 已经停止使用 R-R 方法,而改用 T-R 法;日本制钢所原来使用自己的曲轴锻造工艺,而现在在两台压机上应用 T-R 法;德国 Krupp 公司已将“Schloemann”工艺改换成 T-R 法。从 1968 年来,世界上已有 20 多家企业采用 T-R 方法,设计出的 T-R

锻装置可以与 12 MN 到 80 MN 的水压机配套使用。

如图 4 所示是 T-R 弯曲锻装置工作原理。肘杆机构 7 联结在上模架 1 (C 形框架) 和上模块 6 之间, 是分解与传递力的关键构件, 共有四套。包括肘杆上下支承轴, 上下半轴套等构件。肘杆机构分解出的垂直分力  $P_{\text{垂}}$  把锻件 2 夹紧在上模架 6 和下模块 10 之间。水平分力  $P_{\text{水}}$  通过两个模块的侧面锻光坯。上下模块的定位和同步移动靠其本身的锁扣来保证。下半模在底板 13 的导向滑槽中滑动。上下模块的初始位置由限位螺钉 14 调整定位。

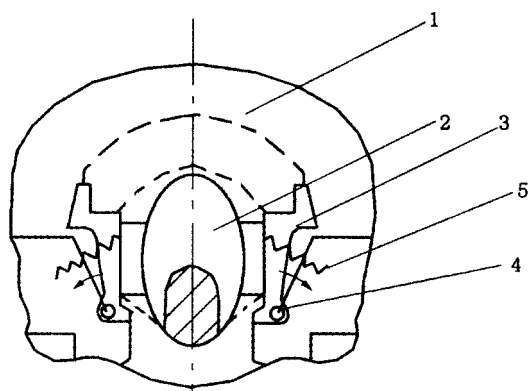
叉形弯曲用上冲头 3 安装在上模架的顶部,

装拆方便。弯曲锻开始时又在光坯的曲柄销部位, 推动光坯料弯曲, 最后在固定不动的下砧块成形。上模架是主要受力构件, 同时又是上模的支承, 它与拉杆 11 组成一个封闭受力系统。调节垫块 8 和调节垫块 4 根据不同曲轴可以调换, 以此来调节锻粗量和错拐量。在上模架顶部外侧装有四个上油缸, 通过链条、滑轮将上模块悬挂在上模架上, 主要是锻终了时拉住上模块, 使之保持原位, 防止倾斜和滑落, 以便顺利地卸去上模块。垂直油缸 5 是辅助上油缸起平衡作用。脱模以后上油缸和垂直油缸卸压, 上模块在重力作用下平稳回到初始位置。下模块依靠复位缸复位。



1 - 上模架 2 - 锻件 3 - 冲头 4 - 调节垫块 5 - 垂直油缸 6 - 上模块 7 - 肘杆  
8 - 调节垫块 9 - 上油缸 10 - 下模块 11 - 拉杆 12 - 下砧块 13 - 底板 14 - 限位螺钉  
图 4 T-R 曲轴弯曲锻装置工作原理图

Figure. 4 The working principle scheme of T-R crankshaft curve upsetting forging device



1 - 上模块 2 - 锻件的曲柄  
3 - 挡块 4 - 销轴 5 - 弹簧

图 5 曲柄成形挡块

Figure. 5 The forming repelling block of crank shank

在下模块曲柄成形型槽外侧有两对(四片)曲柄成形挡块(图 5)。一方面是防止金属向曲柄的短轴方向流动, 另一方面, 挡块在曲拐成形完毕待上模块提起与锻件脱离接触后才离开锻件, 起到脱模作用。

近 20 年来, 鲁特教授对 T-R 法又进行了改进, 现已开发出第三代锻装置。图 6 为第三代 T-R 法变形过程示意图<sup>[2]</sup>。最新的 T-R 锻法具有不对称预锻粗功能, 能够用仅在曲柄销处开槽的光坯锻造曲轴锻件。当采用可调整的后挡块时, 只需在光坯上加工一个很浅的定位槽便可锻造曲轴锻件。在第一锻造工步中, 由于采用了不对称预锻粗, 在预锻模具中, 首先使金属材料向曲柄需要材料更多的方向流动, 达到预成形。在第

二锻造工步中,在终锻模具中最终成形,中间无需加热,使曲轴从锻件到成品轴径的单边加工余量可达到 12 mm~15 mm,曲柄厚度单边的加工余量偏差不得少于另一边的加工余量的 1/3,相邻曲拐间的最大角度偏差可在  $\pm 2^\circ$  以内,锻件的纤维流线连续程度可达 76 % 以上。改变了以往 T-R 锻法曲柄难充满,易形成塌角等状况。该方法消耗材料较以前的 T-R 锻法更少,但锻件仍存在飞边较大现象,不利于车削加工。该方法已先后在德国阿尔芬凯思勒工厂、中国南车集团资阳机车有限公司 T-R35 锻锻装置、韩国现代集团 T-R16 锻锻装置上采用。近年,波兰金属成形研究所鲁特教授又开发出采用光坯直接挤压方案。用两个定位挡块固定光坯料,将进一步提高曲轴

外轮廓的金属纤维连续性,使曲轴的疲劳强度更高。但要解决的问题是,光坯在夹紧挤压过程中是否存在打滑现象。

2.2.3 NR-R 锻锻法

又称新 R-R 锻锻法或三步动作锻造法<sup>[3]</sup>,其锻锻原理如图 7 所示。20 世纪 50 年代初期,日本神户制钢所高砂工厂从法国引进了 R-R 锻锻技术,在 50 MN 水压机上生产锻锻曲轴,发现有些曲轴拐夹尖角处充不满模膛。后经反复试验,在 80 年代终于摸索出预锻—锻弯(同时进行)—后锻三步动作锻造法,成形效果良好,加工余量和工时均可减少,材料利用率提高了 10 %,并将锻件的机械加工成本降到一般 R-R 方法的一半以上,锻件质量尤其是曲轴的疲劳强度也相应提高。根据工艺要求对 50 MN 水压机进行了改造,即在弯曲冲模上方、压机的中心部位加了一个 10 MN 的液压缸用于错拐。该缸可以单独操作,用差分变位仪精确控制弯曲行程,图 8 所示是新 R-R 锻锻装置示意图。采用该方法最重要的是可以采用光棒料直接锻造,并针对不同结构的曲轴选好预锻粗的锻粗比,其它与 R-R 锻锻法相似,但仍存在水平锻粗力不够的问题。

2.2.4 VSG 锻锻法

VSG 锻锻法是德国蒂森集团 VSG 公司锻造曲轴的一种方法<sup>[4]</sup>。该方法适用于中等批量到大批量生产,也可单件生产,避免了中间冷却,能降低生产成本和时间,装置成本低,金属纤维较连续。锻造方法见图 9。第一次加热,预成形一根光棒料。第二次加热,预成形主轴径。第三次加热,采用专用装置,最终成形所有曲拐和角度位置,没有中间冷却。图 10~13 所示是曲轴在专用装置里的锻造过程。相对上述的全纤维锻造方法,VSG 锻锻法的原理是:在闭式模具中,径向锻粗伴随径向错拐,在同一次加热中锻造各拐,每锻一拐,曲轴被操作机和天车移动一拐的长度,并转动到一个规定的角度。压机安装该装置需要 1 h,拆卸该装置需要大约 0.5 h。终锻时每一根曲轴需要三块模具,两块闭式凹模用于锻粗,一块冲模用于连杆径错拐,并充满下模。该方法精度不高,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。

2.2.5 卧式双向水压机锻造曲轴

美国国家锻造公司(现改名为依尔武德国家曲轴公司)于 1961 年起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>。图 14 所示

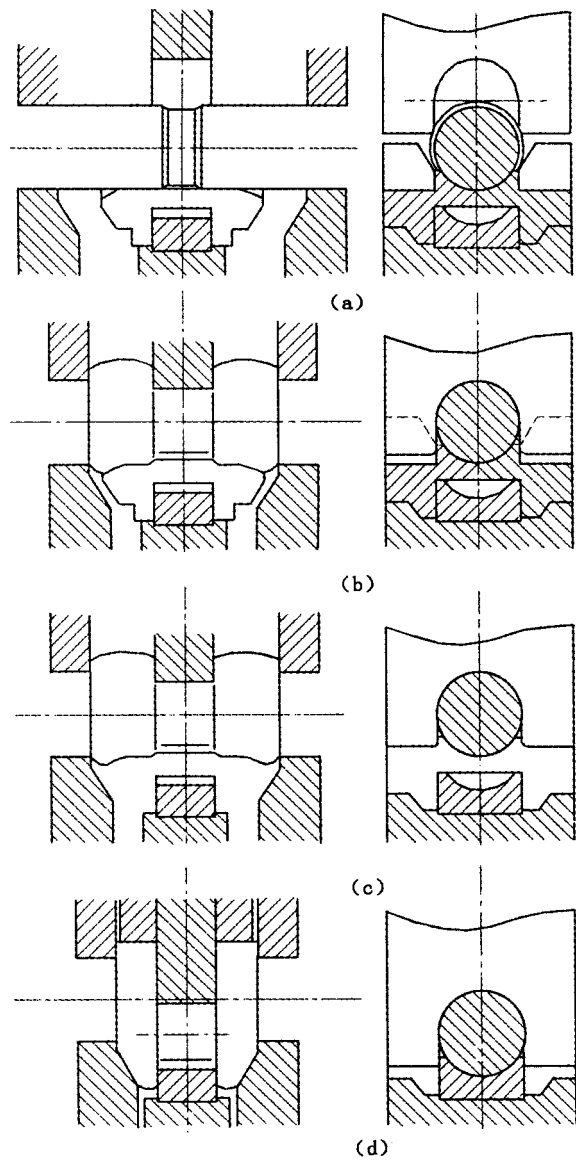


图 6 第三代 T-R 法变形过程示意图

Figure.6 The schematic sketch of the third generation T-R method deformation process

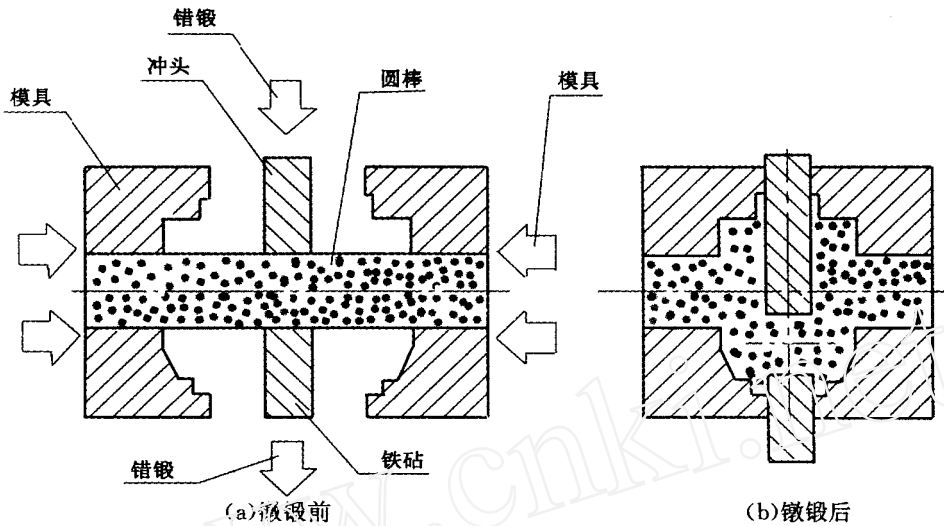


图 7 新 R-R 墩锻法墩锻原理图

Figure. 7 The principle scheme of the new R-R upsetting forging method

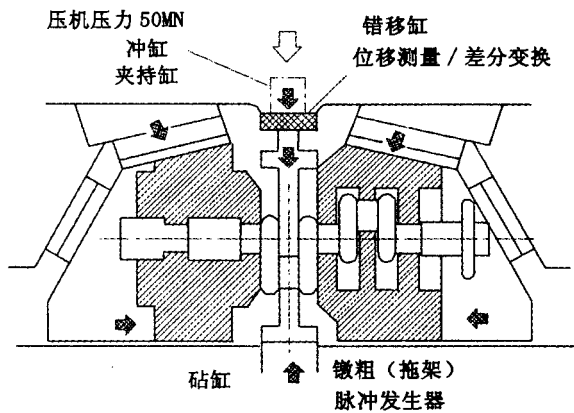


图 8 新 R-R 墩锻装置示意图

Figure. 8 The schematic sketch of the new R-R upsetting forging device

是美国国家锻造公司多向锻造压机结构示意图。此水压机分轴向和径向两部分,前者是 40 MN 用

于墩粗成形的四柱压机,后者是 22 MN 用于压紧和曲柄销错位的压机。各工作缸可实现单独控制和程序控制,其墩锻原理和 R-R 方法一样,也是单拐成形,因此锻出的曲轴是全纤维的。水压机长 32 m、宽 12.2 m。轴向左侧 B、C 缸各装一个直径 882 mm、行程 1 397 mm 的冲头。“U”形导轨长约 8 m。两导轨之间最大距离为 2 m。两缸之间装有一行程为 6.7 m 的可调支承轴。四根拉柱直径 324 mm、长 24 m,材料为锻钢。

横向水压机(也叫做“C”型框架)的一侧有两个液压缸,上装直径 483 mm、行程 610 mm 的顶头,用于夹紧;此外还有一直径 635 mm、行程 838 mm 的冲头,用于曲柄销的错位。

为了减少模块数量和换模时间,以及保证拐和拐之间的角度偏差,其定位模块配有角度旋转

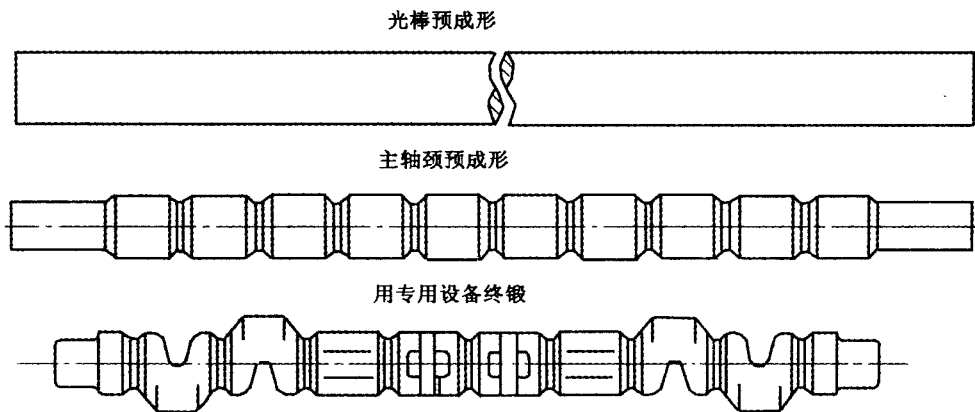


图 9 VSG 锻造方法

Figure. 9 The VSG forging method

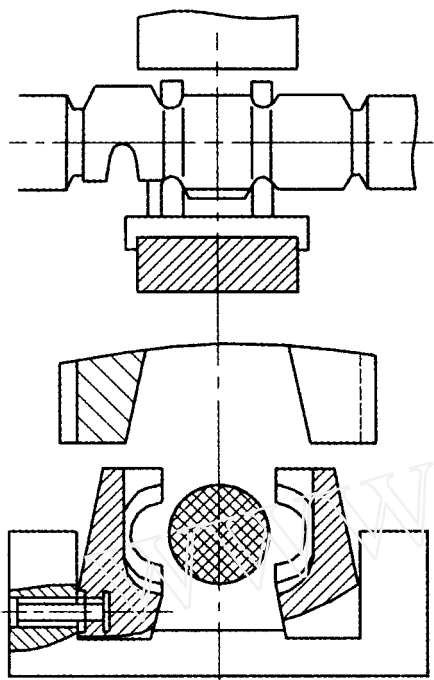


图 10 光坯料经预成形放入专用装置  
Figure. 10 The bare blank undergone the preformed process was put into the special device

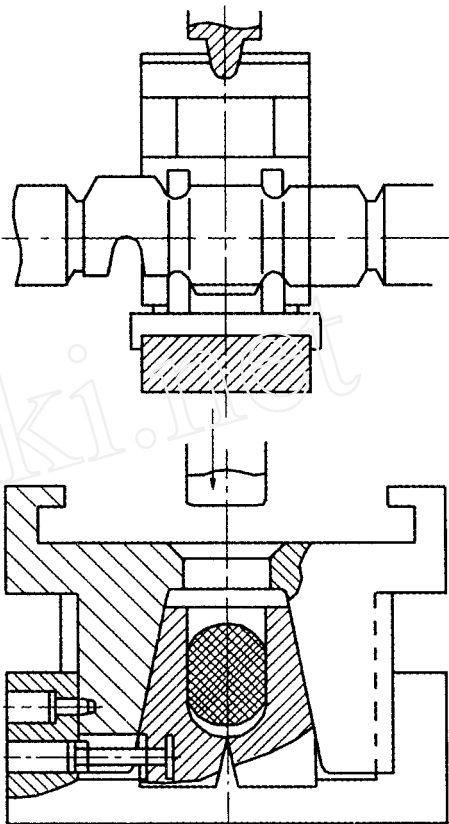


图 12 用冲头径向错拐  
Figure. 12 The radial upsetting forging with a punch head

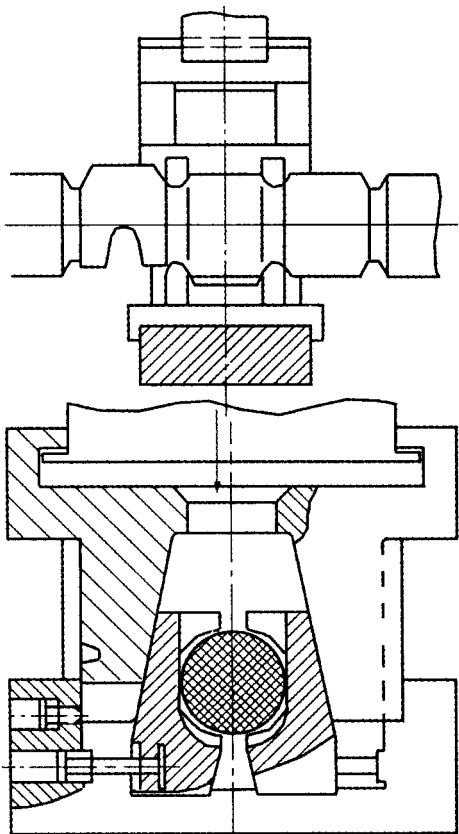


图 11 用一对模具径向墩粗  
Figure. 11 The radial upsetting forging with a couple of die

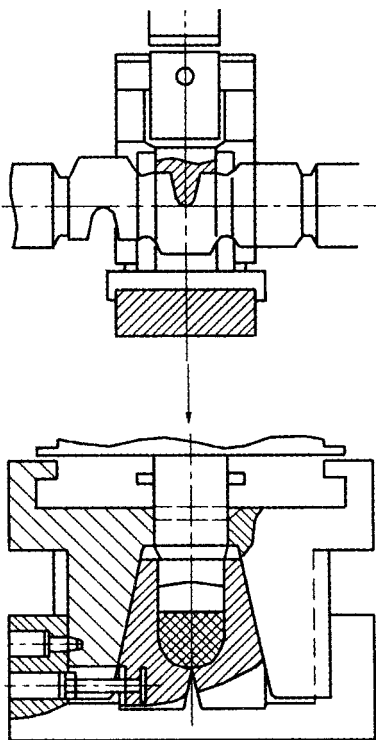
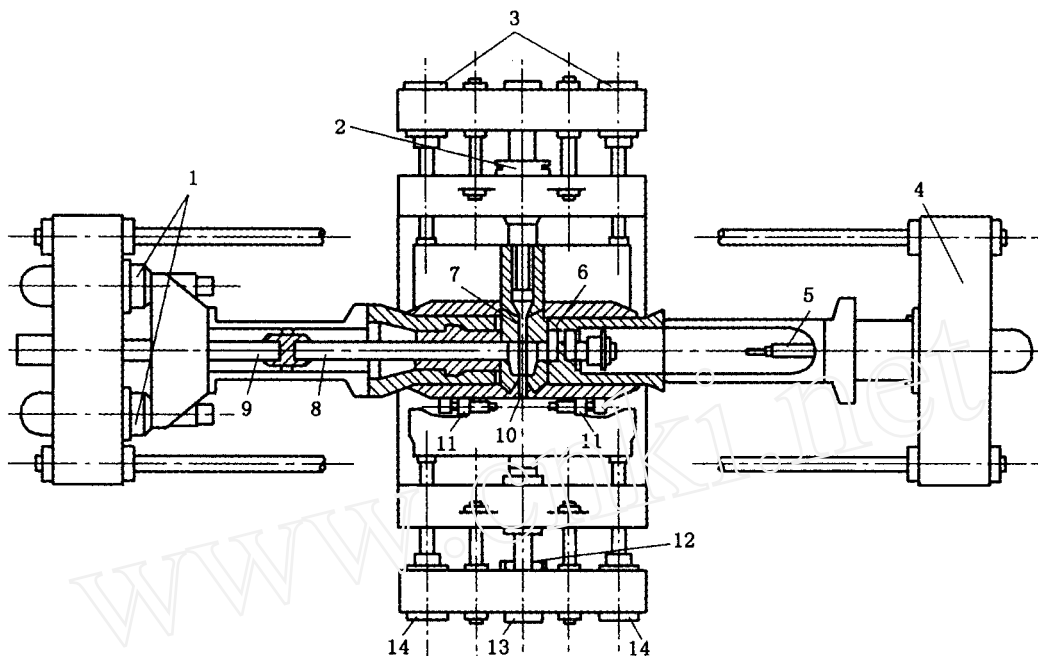


图 13 最终已锻成的拐  
Figure. 13 The finished throws



1 - 双缸 2 - 模板缸 3 - 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 14 - 压紧缸  
图 14 美国国家锻造公司多向锻造压机

Figure. 14 The multi-direction forging hydraulic press of US National Forging Company

机构。由于各工作缸的力量可以直接作用在锻件上,无需压力转化和分解机构,根据曲轴不同的形状和要求,可任意选择几步成形。这点是 R-R、T-R 法无法实现的。可采用直径更小的光坯料直接挤压,无需加工定位台阶。该专业压机成形精度高,加工余量小,金属纤维连续程度更高。一般主轴径和曲柄直径单边余量仅有 9.5 mm,拐夹单边余量仅有 6 mm,相当于 R-R、T-R 法的 1/3 到 1/4,不但节约了大量的加工工时,而且材料的利用率可达到锻坯的 80 % 以上。尤其经过近年来对水压机的改造,采用了一些现代控制技术,压机的可靠性更高及拐间的角度偏差更小,可在 1° 以内,材料利用率更高。

该机配有精确的支承装置,锻后不需校直。由于采用了电感应加热,配有专用的启吊运输工具,所以生产效率很高。该压机可锻造主轴径尺寸为 320 mm、连杆径尺寸为 280 mm、冲程为 228.6 mm、最长为 9 760 mm、重量达 10 t 的曲轴。

### 3 大中型曲轴锻造方法分析探讨

R-R 锻锻法已在国内外广泛采用,其结构也日趋完善,但它有两个不可克服的缺点。一是受上模架斜面角度的限制,压机的吨位不能充分发

挥出来,在 角为 30°~45° 时,压机压力转换成水平锻粗力的效率为 33 %~60 %,并且每一个角度值其转换效率是固定值。因此,对大型曲轴若采用 R-R 锻锻法生产,势必选用更大的水压机才能胜任。这从能源消耗的角度来看是不经济的,其结果是曲轴锻件的价格很昂贵。二是 角度值决定了水平锻粗和垂直错拐之间的位移关系,不能依工艺变形时的需要加以调整。这种工艺变形设计必须适应锻锻装置的情况是不对的,两者的适应关系应该颠倒过来。

T-R 锻锻法在压机的效率转换方面前进了一步。该装置的转换效率随装置上曲柄 角的减少而增加,较好的适应了曲拐在锻锻时模具的夹紧力由大到小,而水平锻粗力由小到最大的要求。T-R 装置虽然可以通过更换其上的曲柄以适应各种型号的曲轴锻锻,却由于曲柄 角度值将水平锻粗和垂直错拐之间的关系约束起来,使工艺变形缺乏广泛的适应性。

卧式垂直相交双向曲轴锻锻压机是现阶段比较理想的、专业化很强的曲轴生产设备。由两台压机分别担任水平锻粗和错拐,两者之间可以没有联系,因此可以选择最佳变形方案。对每种曲轴都可以在最佳变形条件下将两台压机用程控技术联系起来,以得到完全合格的曲轴锻件。同时

因为其内部设计有角度旋转定位装置,就取消了R-R、T-R 墩锻法生产中的换模工作,使压机的生产效率大为提高。在全纤维曲轴锻件成本中,压机的费用所占的比例是比较高的,因此压机生产效率的提高将直接反应在曲轴锻件出厂价格上面。

随着世界经济的发展,在未来相当长一段时间里,全球的船用、石油、发电、机车柴油机及燃气机、空压机需求量都将呈稳步上升趋势,尤其是航运业。中国的船舶工业已连续十年位居世界第三,并将在2015年构建成造船第一大国。并且,中国现已成为全球的制造中心,尤其是曲轴的需求量大、质量要求高。为了解决高质量曲轴的供需矛盾,显然不适于再发展一机多用的通用设备。

#### 4 结束语

通过上述几种方法的对比,提出以下建议,供同行参考。

(1)如新上曲轴锻造设备,且生产批量大时,建议采用专用液压机。其优点十分明显:可采用光棒挤压,无需加工台阶,且不用担心会出现废品,金属纤维连续性很高;工作缸可单独控制,易于实现多步锻造,曲柄成形饱满,可实现曲柄不加工;拐和拐之间的角度偏差很小,成形精度高,加工余量小,锻件质量高,并且可节约大量的贵重金属材料 and 机加工工时、刀具、机床备件;节省模块更换时间,生产效率高;由于是卧式压机,不需要高大厂房等设施。

(2)由于专用液压机投资大,除墩锻外,不能

承担其它锻造工作,通用性差。所以在生产批量不大时应利用现有水压机进行技术改造:在普通立式水压机上加装一台水平卧式压机,即所谓的立式双向压机。这样就可以将卧式双向压机的全部优点吸收过来,而又不失去原来立式压机的其它锻造性能。因为墩粗的弯曲错拐力一般地说比水平墩粗力小得多,所以这个改造应按弯曲力选择在较小的压机上进行,而较大的压机只抽出很少一部分台时为其进行曲轴的整体整形工作。该设想还没有进行实际试验。

(3)在现有水压机安装第三代T-R曲轴弯曲墩锻装置。该方法见效快,投资较少,能较高的提高曲轴的锻造水平。

#### 参考文献

- [1] 张志文. 锻造工艺学. 北京:机械工业出版社,1983.05.
- [2] Ing. Werner W. Adlof, Hangen Fortschritte beim Schmieden gro er Kurbelwellen Report Schmiede - Jnalour, September. 1997.
- [3] Araki S. Ochi T. Fujita H. Hirano J. Takahara H. New Forging Process for CGF-Crankshafts in upsetting and off-setting operation. 11th International Forgemasters Meeting. Terni/ Spoleto. Juni 1991.
- [4] Dr. D. Bokelmann; Prof. Dr. K. Forch; Dipl.-Ing. M. Fleischer; Prof. Dr. R. Kopp; Forging of Heavy for Continuous Grain Flow (CGF) Crankshafts Without Intermediate Cooling 12th International Forgemasters Meeting. Chicago, IL. SEPT. 11 - 16, 1994.
- [5] J. R. Becker. Metal Forging Crankshafts on a Horizontal Multi-Directional Forging Press Forming January 1968.

责任编辑 龙礼建

(上接第41页)

(4)实际工作的构件受力状态比较复杂,对于复杂受力状态下的寿命预测也是疲劳寿命预测的一个重要方面。

#### 参考文献

- [1] 徐灏. 机械设计手册(二)[M]. 北京:机械工业出版社.
- [2] 戚国胜. 工程结构元件疲劳寿命的估计[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2003, 22(增刊).
- [3] 吴富民. 结构疲劳强度[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1985.
- [4] 袁熙, 李舜酩. 疲劳寿命预测方法的研究现状与发展[J]. 航空制造技术, 2005(12).

- [5] 曾春华, 邹十践. 疲劳分析方法及应用[M]. 北京:国防工业出版社. 1991.
- [6] Tucker L E, Landgraf R W, Brose W R. Technical report on fatigue properties. SAE J1099, 1979.
- [7] 赵少汴. 局部应力应变法的推广应用[J]. 机械强度, 2000, 22(3).
- [8] 李玉香, 姚卫星, 温卫东. 应力场强法在多轴疲劳寿命估算中的应用[J]. 机械强度, 2002, 24(2).
- [9] 尚德广, 王大康, 李明. 随机疲劳寿命预测的局部应力应变场强法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(1).
- [10] 陈志伟, 王智. 不同载荷谱下裂纹扩展寿命分析[J]. 第六届全国疲劳学术会议文集, 厦门, 1993.

责任编辑 龙礼建