

工艺与材料

# 大功率柴油机零件加工及检测新技术

阎甲良, 尹东

(陕西柴油机重工有限公司, 陕西兴平 713105)

**摘要:**介绍了我国大功率柴油机的关键零部件,如机身、曲轴、缸套、活塞、凸轮轴、连杆等的加工及检测的新技术和新设备,以及目前所达到的技术水平。指出只有在引进、吸收、创新的基础上,开发出具有我国自主知识产权的高、精、尖机械加工和检测设备,才能更好地推动我国大功率柴油机零件加工及检测技术的发展。

**关键词:**大功率柴油机; 机械加工; 检测

**中图分类号:** TK426    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2011)01-0048-04

## Machining and Detection of Large Power Diesel Engine's Components

Yan Jialiang, Yin Dong

(Shanxi Diesel Engine Heavy Industry Co., Ltd., ShanxiXingping713105)

**Abstract:** The machining and detection of key components of large power diesel engine, such as engine body, crankshaft, piston, camshaft and connecting rod are introduced from the aspects of new technology and new equipments in our country, as well as the current technical level. It is pointed out that the only way to enhance the development of our country's technology in the machining and detection of large power diesel engine's components is to develop the high-quality and advanced fine mechanical machining and detection equipment with our own intellectual property right, based on introduction, adoption and innovation.

**Keywords:** large power diesel engine; mechanical machining; detection

## 0 前言

大功率柴油机是船舶的心脏,是机车、船舶电站、陆用电站的主动力,结构复杂、体积庞大、技术含量高。其加工技术与一般的中、小型柴油机大不相同;其生产组织往往是多品种、小批量。自改革开放以来,我国大型柴油机加工技术已经取得了突飞猛进的发展,特别是在缸盖、活塞、缸套等关键件技术加工方面取得了骄人的业绩。陕柴重工作为中国最大的大功率柴油机生产厂家之一,自1978年以来先后引进了法国热机协会的PA6、PA6B、PC型;日本大发公司的DK系列;MAN公

司的16/24、21/31、32/40型;MTU公司的MTU956等具有世界先进水平的柴油机。通过对引进技术的消化、吸收、创新,不仅加速了产品的更新换代而且提高了产品的研制起点。陕柴重工前后进行了五次大的技术改造,实现了关键零部件加工设备数控化,柴油机配件生产专业化,零件检测电子化,使陕柴重工大功率柴油机研发生产能力大为提高。配套齐全、技术力量雄厚、规模适中的大功率柴油机研发、生产体系业已形成。

机身、曲轴、缸盖、缸套、活塞、连杆、凸轮轴是柴油机的关键部件,这些零件有的在主机厂生产,有的由专业厂商生产,主机厂组装。制造这些

收稿日期:2009-12-15; 修回日期:2010-07-02

作者简介:阎甲良(1966-),男,高级工程师,主要研究方向为柴油机设计与制造, E-mail: yenchening@yahoo.com.cn.

零件的外国公司都采用了先进的加工设备和最先进的刀具及检测仪器。陕柴重工为了满足 MTU956 - 1163、PA6、PA6B、PC 型、DS、DL、DK、MAN 系列柴油机及风电、核电设备的生产需要,建立了以数百台数控机床为主的集成化生产线和零件总装立体仓库;具有种类完整、规格齐全、先进的检测、试验体系;实现了技术、生产、采购、质量、销售等环节的全面计算机网络管理。生产的柴油机精度、质量、可靠性均接近世界先进水平。本文就这些关键零部件的制造技术发展现状及国内达到的水平作一些介绍。

## 1 大功率柴油机主要零件的机械加工及其检测

### 1.1 机身

大功率柴油机的机身的现代加工原则是工艺高精度集中:“一次安装、五面加工”,采用高精度,多功能的数控龙门铣镗床和数控钻床。德国 WERNERKOLB 公司生产的机身柔性制造系统是目目前世界上先进机身生产线的典型,其主体设备是 CNC 龙门铣床、CNC 钻床和加工中心。目前,国内已经引进多台龙门铣镗床,如大连船用柴油机厂、沪东船厂、资阳柴油机厂从德国 WALDRICH COBURG 公司进口了数控龙门铣镗床。陕西重工建立了由划线机、龙门刨床、七头龙门铣镗床、机身翻转架、龙门铣镗加工中心、数控龙门加工中心、导轨钻、落地铣镗床等 13 台设备组成的主机机身加工生产线,能够满足陕柴重工的 PA、PC、DK、MAN、MTU 等系列柴油机的主机机身以及风电、核电零件的生产加工任务。其中龙门铣镗加工中心是陕柴重工从德国 WALDRICH COBURG 公司进口的,该加工中心电机为 80 kW,配有 9 种铣头附件,链式刀库,80 多种刀具位置;配有西门子 8400C 系统,能进行 15 轴控制,4 轴连动,具有铣、镗、钻、铰、铣螺纹等功能;并实现自动检测。能够实现一次装夹,五面加工。主轴功率大,滑枕性能好、截面大,能够进行强力切削和精细切削。铣头能够实现 90° 自动分度,定位精度高,配有自动换头和换刀系统,因此一台机身三次装夹就能够进行三大孔(曲轴孔、缸孔、凸轮轴孔及中间孔系)、相关平面及孔系(缸盖螺栓孔、主轴承孔、各种螺栓孔)的加工。铣头的微倾功能能够提高加工面的表面粗糙度。具有生产尺寸为 7700 × 2850 × 3000 大型机身及箱体、壳体的能力。陕西重工为了从主机专营向主辅机兼营的战略格局转变,新

组建了由划线平台、捷克龙门铣、明斯克龙门镗铣床、钻床、深孔钻、卧式加工中心、定梁龙门镗铣床、粗精镗缸机、数控龙门镗铣床、数控龙门铣床、镗凸轴孔专用机床等 13 台设备组成的辅机机身生产线。能够满足 MAN21/31、DK20、MAN32/40、MAN16/24 等辅机机身生产的需要。

### 1.2 曲轴

曲轴是柴油机的关键零件之一,是柴油机功率传递的命脉。曲轴质量的好坏直接影响柴油机的运行安全,特别是大功率柴油机,船规已经普遍要求采用“TR”锻锻工艺,主轴颈和连杆轴颈要求高频淬火,硬度要求达到 HS65 以上,尺寸精度要求达到 6 级。

武汉铸锻有限公司 2008 年采用“TR”锻锻工艺为陕柴重工成功锻造出了 6PC2 - 6 柴油机曲轴。该曲轴长 5 495 mm,重量达到 10 t,主轴颈精加工尺寸为 315 mm,圆柱度公差为 0.02 mm。

曲轴的粗加工,在国外已经发展到了以铣代车的局面,效率大大提高。北方动力有限公司、河南柴油机重工有限公司从奥地利 GFM 公司引进的 FKP20/I 型曲轴仿型铣床,具有 20 世纪 90 年代初世界先进水平。曲轴铣削分内铣和外铣两种方法,内铣法采用数控或者手控内刃式曲轴铣床,曲轴安装在铣刀圆盘孔内,加工时曲轴不转动,铣刀盘以径向转动切削曲轴。陕柴重工组建了由大型曲轴车铣中心、数控曲轴磨床、曲轴探伤机、曲轴动平衡机等 19 台设备组成的曲轴加工生产线,其中大型曲轴车铣中心为双主轴箱、单立柱、双刀架、带有 B 轴功能,功率为 75 kW,具有车、铣、钻、镗、攻丝、深孔加工、车铣内外螺纹等功能的五轴车铣复合加工中心,主要用于曲轴主轴颈及连杆颈磨削前各部位的加工。其加工水平达到国际先进水平。

目前的大功率柴油机曲轴表面都需要进行高频淬火,如德国 MTU396、956 柴油机曲轴;大发公司的 DK 系列柴油机曲轴;PA、PC 系列柴油机曲轴等。为此陕柴重工自行研制出了曲轴淬火机床,功率 500 kW、频率 8 000 Hz,成功地完成了 PA6、MTU956 等柴油机曲轴的淬火,此项技术接近国际领先水平。

曲轴经过粗加工后需要进行磨削。目前最先进的曲轴磨床是德国 NAXOS-UNION 公司生产的 KM 系列曲轴磨床,该磨床刚性好,双头转动同步性好,具有自动平衡和修正砂轮,自动检测功能。目前四川柴油机厂、资阳柴油机厂、武汉重型铸锻有限公司都引进了 KM 系列曲轴磨床,特别是武汉重

型铸锻有限公司引进的 KM300 曲轴磨床是目前国内最大最长的曲轴磨床, 陕柴重工也购买了数控曲轴磨床, 这些磨床的引进标志着我国曲轴精磨水平进入世界先进水平行列。

### 1.3 缸盖

气缸盖是组成柴油机燃烧室的零件之一, 其上安装有进排气门、摇臂机构、喷油器、示功阀等, 结构复杂; 承受高温、高压燃气的作用; 材料一般采用球墨铸铁或蠕墨铸铁。树脂砂生产线铸造, 数控机床加工是缸盖生产的发展方向。在国外, 如日本大发、新泻铁工所、法国热机协会等均采用多台加工中心组成缸盖生产线。陕柴重工 1997 年从意大利引进了一条树脂砂铸造生产线, 用于生产本公司各型柴油机的缸盖、机身、缸套的铸造。陕柴重工还组建了由精密卧式加工中心、Z3100 钻床、

Z3080 钻床、立式车床、立式加工中心、数控镗床、立式数控铣床、三坐标测量仪等 17 台设备并配以先进的刀具的主、辅机缸盖机加生产线。陕柴重工 DK20 柴油机缸盖铸造毛坯经过两次装夹就可以完成所有孔系(进排气门孔、喷油器孔、缸盖螺栓孔、摇臂轴安装孔等)及上平面、燃烧室面、侧平面的加工工序。采用三坐标测量仪进行孔径、深度及相关位置尺寸的检验, 采用超声波探伤机、磁粉探伤机检测零件内部的裂纹、夹渣等铸造缺陷。图 1 为 DK20 缸盖的工艺简图。陕柴重工从德国引进的 ACTION2600 精密卧式加工中心, 功率 25 kW, 重复定位精度 0.004 mm, 其加工能力居世界领先水平。气缸盖是加工中心的典型加工对象, 同时也是各种先进刀具如组合镗刀、扩孔钻发挥作用的最好对象。

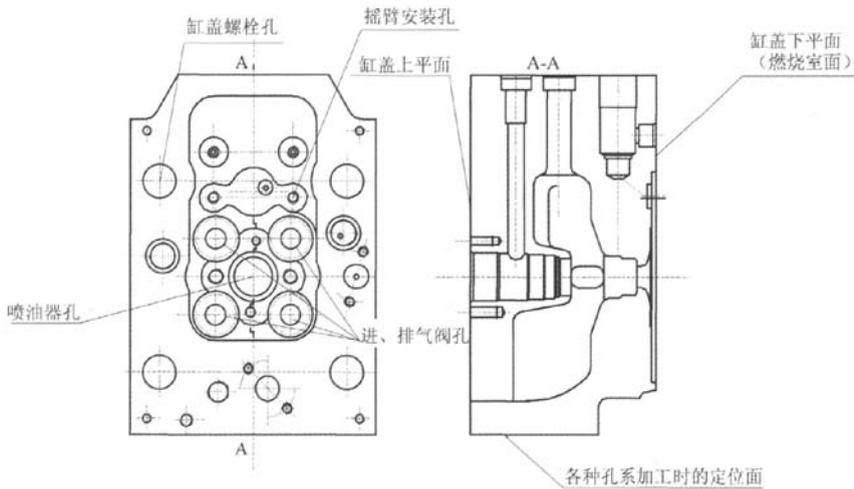


图 1 DK20 气缸盖工艺简图

### 1.4 活塞

随着强化程度的提高, 大功率中速柴油机的活塞由钢顶铝裙结构向整体式球墨铸铁活塞转变。陕柴重工已经批量生产了日本大发公司 DK 系列整体式球墨铸铁活塞, 其活塞铸造水平已经接近国际先进水平。

我国活塞加工整体水平已经接近国际先进水平, 山东滨州活塞厂、石家庄柴油机配件厂、大连鑫泽活塞厂、陕柴重工都从德国引进了机加设备和生产技术, 其中陕柴重工 1999 年引进了由变椭圆活塞加工车床、圆度仪、数显镗床、卧式加工中心等 15 台设备组成的活塞加工生产线。其中的变椭圆活塞加工车床装置能够加工椭圆、偏心及其他非

圆零件, 其所配置的六角刀架如再配上专用刀具就可以加工活塞环槽、活塞顶型腔曲面, 该机床数控系统具有六轴控制, 三轴联动功能, 精度为 0.05 mm。262 圆度仪配上活塞型线检测软件, 可以对活塞型面进行扫描, 并直接打印结果, 具有加工、检测尺寸为  $\phi 500 \times 750$  以内变椭圆活塞类零件的能力。陕柴重工还研制了活塞环槽激光淬火技术, 该技术在 DK、PA6 柴油机活塞上取得成功, 解决了活塞环槽高频淬火成功率低的问题。

### 1.5 缸套

大功率柴油机缸套一般采用离心铸造法, 材料为超高磷铸铁、特殊铸铁等。缸套的粗车外圆、粗镗内孔, 已经从用普通车床、专用镗床发展到采用

数控车铣中心。上海船厂改造了一台能两轴联动的大型缸套车床,能够加工外圆、圆弧及大型活塞杆。陕柴重工对缸套生产线进行了改造,建立了由数显镗床等12台数控设备组成的柴油机缸套加工生产线,每年的加工能力为6000件以上,内外圆同轴度达到0.03 mm,圆度达到0.02 mm,平面度达到0.01 mm。为了防止大功率柴油机缸套拉缸,需改善润滑条件,需要对缸套内表面进行珩磨、软氮化,为此陕柴重工引进了缸套数控珩磨机,珩磨头具有平顶与珩磨两个功能,带有两个油石,并且能够自动转换,数控系统能够自动改变珩磨参数及自动测量珩磨尺寸。陕柴重工还进口了德国的T2000型粗糙度检测仪,能够测量平顶网纹的各项参数,其分辨率达到0.001 mm,而且具有自动打印功能。

### 1.6 凸轮

在电喷系统全面应用之前,柴油机的喷油定时、进排气定时仍然由凸轮轴系统来完成,是柴油机的重要零件。大功率柴油机的凸轮一般是片状结构,其加工是通过磨削型面的方法进行的。大功率柴油机的凸轮和凸轮轴既有整体结构,也有分体结构。其凸轮片的加工已经由粗车凸轮型面发展到数控铣凸轮,从而杜绝了车削加工带来的凸轮型面变形的问题。凸轮型面磨削也由普通磨床磨削发展到由CNC磨床磨削,精度也大为提高。陕柴重工从德国引进的凸轮轴磨床,最大型面误差可以达到 $\pm 0.005$  mm,加工表面粗糙度 $R_a$ 小于等于0.4,最大磨削长度大于2000 mm,最大磨削直径620 mm。制动系统为FANUC、SIEMENS或HEIDENHAIN主流数控系统,可实现X、Y、Z轴三轴联动,是目前国内最大、精度最高的凸轮轴磨

床。

凸轮型线检测也由传统的分度头检测发展到电子自动检测和自动打印。陕柴重工从美国引进的三坐标测量仪,在其PHIOMO测头上配置一套ODCAMS检测软件,能够测量凸轮型线及其相位,并自动打印出结果。

### 1.7 连杆

连杆将活塞的直线往复运动转换为曲轴的回转运动,将气缸内气体对活塞所作的功传递给曲轴并以扭矩的形式通过飞轮向外输出。连杆主要承受交变的气体压力和往复惯性力的作用。大功率柴油机的连杆采用优质碳素结构钢和合金结构钢进行模锻,然后在卧式加工中心上进行连杆螺栓孔、连杆外型、分型面的加工。大功率柴油机连杆杆身与大端盖的连接以锯齿型斜切口或者锯齿型直切口连接,要求贴合面积大于等于75%,因此连杆杆身的锯齿型部位是连杆加工的关键部位。陕柴重工引进瑞士的MGC磨削中心,该中心具有强力磨削功能和X、Y、Z三轴联动功能,砂轮能够自动平衡,用金刚石修正砂轮,以保证锯齿精度。

## 2 结束语

由此可以看出,目前我国大功率柴油机零件加工及检测技术已经达到或接近世界先进水平,但是也要看到我国柴油机零件加工和检测所采用的设备大部分都是从国外引进的,具有自主知识产权的高、精、尖加工设备还不足以同外国品牌抗衡。这就要求我国广大科技人员在引进、吸收、创新的基础之上设计出具有自主知识产权的高、精、尖机械加工和检测设备,推动我国大功率柴油机零件加工及检测技术的发展。

(上接第47页)

(2)计算了轴系的扭转振动,对减振器的参数进行了初步标定。临界转速计算值与测试值偏差小于6%,而角位移幅值需要做进一步的标定。减振器的扭转刚度由 $5 \times 10^6$  (N·mm)/rad降低到 $3 \times 10^6$  (N·mm)/rad,则4.5谐次的振幅由0.43°降至0.15°,但6、7.5谐次的振幅没有影响;阻尼调低时,4.5谐次的振幅随之升高,与测试值接近。

(3)应力计算的结果表明,选用合适、有效的减振器可以降低轴系的最大应力,疲劳安全系数由2.25提高至2.51。

### 参考文献

- [1] 郭磊,郝志勇等.曲轴强度多体动力学与有限元子模型法仿真[J].浙江大学学报,2009,43(9):1638-1643.
- [2] 李民,舒歌群等.多体动力学建模方法对发动机主轴承载荷计算影响[J].农业工程学报,2008,24(12):57-61.
- [3] 段秀兵,郝志勇.车用柴油机曲轴扭振的仿真[J].农业机械学报,2006,37(7):42-44.
- [4] 张俊红,郑勇.内燃机振动、噪声的多体动力学分析[J].中国机械工程,2006,17(1):25-28.