

发动机制造



发动机是汽车的“心脏”，其技术发展和制造技术直接影响发动机的性能。曲轴、缸体、缸盖等关键零部件的加工历来是发动机制造的重点，诸多的加工机床、成形设备、切削刀具、工装夹具供应商都将发动机零部件的制造作为体现其技术水平的标志。本期策划主题发动机制造，既有对发动机制造装备的介绍，也有关键零部件的加工工艺，精彩内容，敬请关注。

策划：于永初





曲轴生产中的高端制造装备

汽车工业的发展既依赖于机床工业的科技进步，又带动了机床工业的发展。一方面，汽车的制造水平和质量取决于装备水平；另一方面，一个国家汽车工业和一个汽车企业的国际竞争力又取决于装备的先进性和制造成本。正是近年来大量先进数控设备的采用，使我国汽车装备整体进入柔性化时代，促进了我国汽车工业的飞速发展。

曲轴作为汽车发动机的核心零件，精度要求极高且属于极难加工的零件。其特殊性决定了需要大量的专用机床，为在激烈的市场竞争中求生存，必须不断改进制造装备，提升制造技术。由于目前国内设备制造水平还不能达到曲轴工艺要求，近年来国内大型企业引进了许多高端曲轴制造装备。

高端制造装备的特点

1. 高精度和高效率

高精度、高效率是制造业永恒的主题。高精度，如用于发动机生产线的高速加工中心，定位精度 $\pm 0.003 \sim \pm 0.004 \text{ mm}$ ，重复定位精度 $\pm 0.0015 \sim \pm 0.0020 \text{ mm}$ 。高效率，一是指高端专用设备，如曲轴高效专用数控机床；二是指现代高效柔性自动生产线及其需要的高速数控机床，主轴转速超过 $10\,000 \text{ r/min}$ 。

2. 自动化和柔性化

自动化生产可以大幅度提高生产率，同时大大降低工人的劳动强度，改善工作环境。20世纪90年代，

发动机流水生产线率先进入柔性化时代，如发动机缸盖、缸体和曲轴柔性自动线，包括自动输送上下料、检测、压装、清洗和试漏等全部过程自动化，可多品种混流生产。由于装备技术的进步，汽车产品更新换代的周期已经从最初的十几年缩短到了三五年，先进的柔性自动生产线对此功不可没。

3. 集成化和信息化

集成化主要体现在加工技术与新材料、新工艺等相关专业技术高度集成，综合应用各种单元技术并结合工艺技术的集成应用已成为一种新的趋势。信息化主要体现在接口和通信、数据库技术及软件工程等方面；制造执行系统包含看板拉动生产、暗灯生产指示系统；在生产线、设备层面又包含有自动化和防错系统等。

4. 可靠性和稳定性

流水线目前是大批量生产的惟一方式。设备排列特点是串联，全线机床不能独立工作，一台机床出现故障则全线停产，因而对可靠性和稳定性有严格要求。国外产品平均无故障时间达到 $5\,000 \text{ h}$ 左右，基本上保证生产线上的数控机床只需每年作例行检修，而不会因出现故障而引起停产。国内加工中心先进水平的平均无故障时间仅为 $600 \sim 800 \text{ h}$ ，相距甚远。

曲轴生产中的高端制造装备

加工装备的技术水平决定了企业的整体发展方

向，只有高质量的设备才能制造出高品质的零部件已成为行业共识。以前发动机曲轴生产线基本上是由普通机床、组合机床和专用机床组成的刚性生产线；现在，刚性生产线向柔性生产线方面发展，越来越多的数控机床、加工中心等高端制造设备用于曲轴生产，这些高速和高效加工装备为快速生产高质量的发动机曲轴奠定了坚实的基础。

1. 曲轴质量定心机

曲轴属于细长类零件，加工过程中主要定位基准是两端中心孔，按其加工位置可分为两种：一种是利用双V形块或其他方式找出曲轴支承轴颈的几何中心，在此中心上加工出的中心孔称为几何中心孔；另一种是利用专门的质量定心机测出曲轴的质量中心，在此中心上加工出的中心孔称为质量中心孔。由于毛坯的几何形状误差和质量分布不均等原因，一般两者并不重合，国外大都采用了质量中心孔，利用专门设计的测试设备来测试质量中心，然后加工出中心孔，并且可将铣两端长度和加工质量中心孔合并为一道工序，采用CNC控制技术，加工效率很高。这样就基本解决了由于采用几何中心孔而造成的问题。但值得注意的是，若毛坯弯曲变形严重或质量严重分布不均匀，采用质量中心孔仍不能彻底解决上述问题。

全自动曲轴质量定心机的工作原理：曲轴放置在两端滑动单元法兰盘的支撑上并被夹紧，法兰盘回转中心形成测量中心线。回转过程中，支撑的位置即曲轴的位置不断调整，使质量中心线靠近回转中心线。当曲轴毛坯不平衡量很小，接近设定值时，钻削单元钻中心孔。此中心孔作为后续加工步骤的定位基准。

目前曲轴质量定心机的核心技术掌握在德国和美国等发达国家手中，他们生产的设备是比较成熟的机床，国内公司近几年已开发出曲轴质量定心机并成功应用于生产。

2. 曲轴铣端面、钻中心孔、套车外圆机床

如果曲轴毛坯质量足够好，那么曲轴的几何中心与质量中心就几乎重合，在这种情况下就不必投资购置质量定心机而改打几何中心孔。笔者查阅近几年有关资料以及走访调研的情况，国内4缸轿车曲轴已近80%弃用质量中心孔而改为几何中心孔，节省了设备投资。究其原因就是近年来国内铸造水平快速提升，铸造技术和工艺已满足曲轴的技术要求。

正是基于目前的这种状况，一种打几何中心孔、铣两端面、套车两端外圆的设备应运而生。该设备的问世，将以前三道工序集成在一台机床上，高速、高效、节省空间。

图1是德国某公司生产的一台曲轴铣端面、钻中心孔、套车外圆机床核心部位。该机床装有左右两个铣刀盘，用于铣削曲轴两端面；在铣刀盘中心安装有中心钻，用于钻两端中心孔；该机床还装有左右两个套车外圆刀具，用于对曲轴大小头外圆的车削。采用CNC控制技术，加工效率很高。

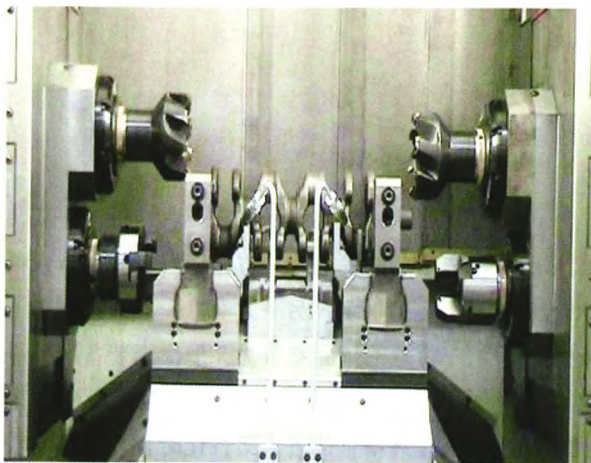


图1 曲轴铣端面、钻中心孔、套车外圆机床

3. 数控曲轴车—车拉机床

车拉技术起源于美国的一项专利技术，在曲轴加工中逐渐得到发展。目前应用较为普遍，在国外大量用于半精加工曲轴的主轴颈和连杆轴颈。车拉技术加工形式可分为三种：直线车拉、内环刀具旋转车拉和外环刀具旋转车拉。车拉工艺大约在1983年左右开发出来，在1983~1988年短短的5年中，车拉工艺从直线式发展成回转式，到1988年发展到车—车拉工艺，到目前为止其拉削方法也逐步改为梳刀工艺。

其主要特点有：一次设定能完成所有同心圆的车削，具有在同一台机床上完成车—车拉加工、高效率、通过使用特殊卡盘和刀具系统实现柔性加工、机床保养简便、维护成本低等优点，特别适用于平衡块侧面不需加工、轴颈有沉割槽的曲轴。其中拉削工艺可用高效的梳刀技术代替，梳刀加工通常放到该工序的最后，通过微量的径向进给和纵向车削实现高速精加工。采用梳刀工艺的的优点在于精度高、效率高、切屑易清理、轴向进刀量小等优点。图2为双刀盘车—车



拉，主要应用于轿车曲轴的高速加工，完工后可直接精磨，省去粗磨工序。

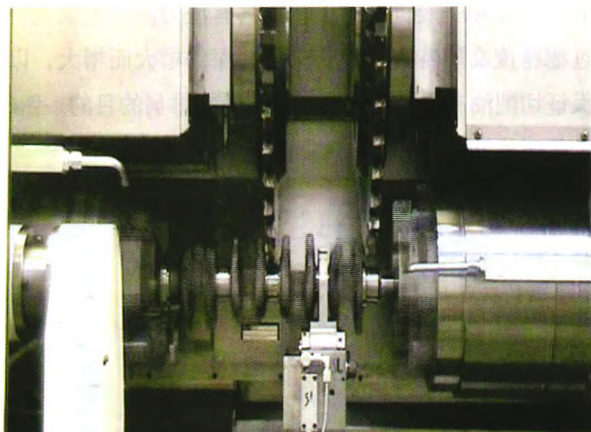


图2 数控曲轴车-车拉机床

4. 数控曲轴高速随动外铣机床

20世纪90年代中期开发出来的CNC高速外铣技术，它针对平衡块侧面需要加工的曲轴，比CNC车削、CNC内铣、车-车拉的生产效率还要高。以四拐曲轴为例：CNC车-车拉工艺加工连杆轴颈要二道工序，而CNC高速外铣只要一道工序就能完成（应用工件回转和铣刀进给伺服连动控制技术，可以一次装夹不改变曲轴回转中心随动跟踪铣削曲轴的连杆轴颈）。该工艺具有以下优点：切削速度高（可高达350m/min），切削时间较短，工序循环时间较短，切削力较小，工件温升较低，刀具寿命高，换刀次数少，加工精度更高，柔性更好。所以CNC高速外铣将是曲轴主轴颈和连杆轴颈粗加工的发展方向。图3为双刀盘高速外铣，同样主要是应用于轿车曲轴的高速加工。

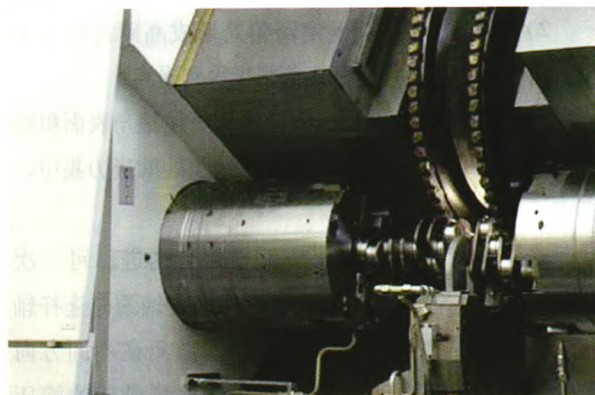


图3 数控曲轴高速随动外铣机床

5. 数控曲轴内铣机床

数控内铣是20世纪80年中期出现的工艺，数控内

铣加工性能指标要高于普通外铣加工，尤其是对于锻钢曲轴，内铣更有利于断屑，刚性特别好。数控内铣工艺是目前国际上曲轴连杆颈粗加工先进的加工方法之一，尤其是对于大功率锻钢曲轴的加工内铣工艺更是首选。内铣机床有多种加工形式，使用最多的是曲轴固定型数控曲轴内铣加工工艺。其主要特点是：生产效率高、加工精度好、适用范围广、柔性好，其具有代表性的工艺装备有德国HELLER公司开发的数控曲轴内铣机床系列。其主要功能特点有：曲轴固定后不动，铣刀跟随连杆颈铣削；机床床身为复合材料一体化结构；工件两端电子同步电动机旋转驱动；具有干式切削、加工精度高、切削效率高等特点。控制系统通过输入零件的基本参数，即可生成自动加工程序。图4为数控曲轴内铣机床，主要是应用于大型锻钢曲轴的高速加工。

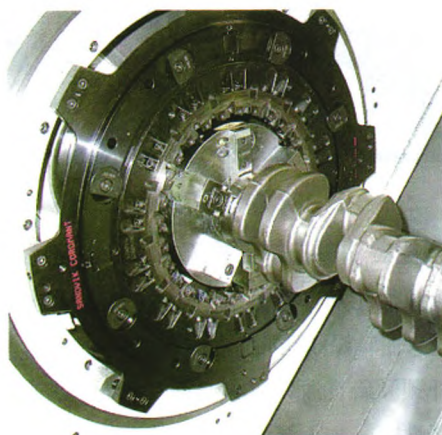


图4 数控曲轴内铣机床

6. 数控曲轴磨床

以德国埃尔温勇克机器制造有限公司（JUNKER）的摆动跟踪系列磨床为例，该设备采用了用于高速加工的CBN砂轮和使用油冷却曲轴的组合，适用于加工汽车发动机曲轴，质量可靠。主要性能有：在加工过程中检测并修正轴颈圆度和尺寸；带有“学习功能”的控制系统，附加对圆度偏差和干扰量的自动补偿，可进行补偿的干扰量是：温度，机械及动力影响，磨削余量的变化，材料以及金相结构的变化，砂轮的可切削性，机床的磨损状况；由于磨削主轴颈和连杆轴颈一次装夹，理论上的偏差为零；切入式磨削及摆动式磨削；对“敏感工件”的支撑，在主轴上采用自动对中心的三点式中心架；CNC控制的冷却剂供给保障了磨削区域的持久用量；采用静压圆形导轨，无爬行

效应，确保持久的高精确度（X轴导轨，进给丝杠，止推轴承）；减振抗扭转床身，使用矿物铸铁浇注而成，具有良好的吸振抗弯功能；砂轮轴适用于高达140m/s的磨削。图5是型号为“JUCRANK 6 000/50-50”的数控曲轴磨床。该磨床具有四片CBN砂轮，每片均可独立磨削，一次装夹可磨削全部主轴颈和连杆颈。

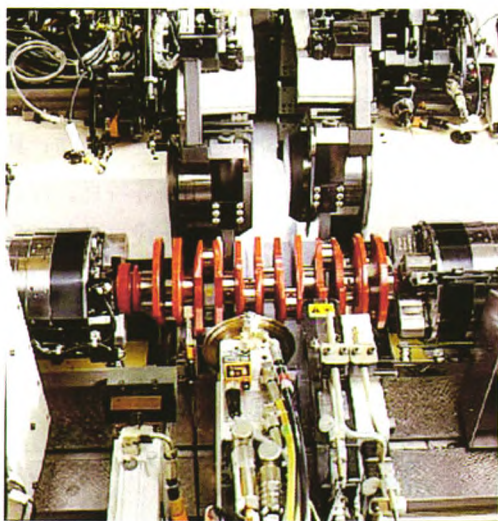


图5 数控曲轴磨床

7. 数控曲轴深孔加工机床

曲轴深油孔加工是曲轴尤其是锻钢曲轴加工中的一个难题。曲轴深油孔的直径一般为5~8mm，从主轴颈到连杆颈倾斜贯通，属典型细长孔而且在曲面上加工，工艺性差。加工深油孔最好的办法是采用枪钻工艺。

枪钻也叫深孔钻，代表着先进、高效的孔加工技术。它不但可用来加工深孔（径长比1:250），而且也可用来加工浅孔（径长比1:1）。枪钻由钻柄（用于装夹刀具）、钻杆（用于连接刀头，按加工孔的长度确定，采用韧性较好的材料）、钻头（切削部分，刀尖是偏心的，采用硬质合金材料）三部分焊接在一起，中间有一通孔，外侧面有一直V形槽。依靠中间通孔实现内冷却，切削液从后刀而上的小孔处喷出，可直接对切削区冷却。当使用高压切削液时，其切屑能从被加工孔中通过直V形槽有效排出，无需在钻削过程中定期退刀来排出切屑。在加工细长孔时，枪钻可以将钻孔、镗孔和铰孔一次完成。

加工发动机曲轴的深油孔时需选择专用的枪钻油。一般枪钻用切削液应有极压添加剂，以保证在高

压下形成油膜，防止产生干摩擦。切削液的粘度与钻孔直径有关，直径越小，粘度越低。送往枪钻切削区的切削油和一般机械加工相比具有压力高、流量大、过滤精度高的特点。流量应随孔深的增大而增大，以保证切削油有更大的流速，达到通畅排屑的目的。图6是德国某公司生产的一款曲轴深孔加工机床。

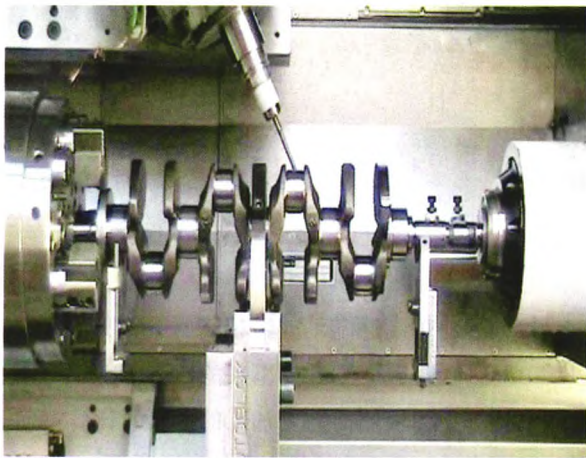


图6 数控曲轴深孔加工机床

8. 曲轴圆角滚压机床

曲轴工作时需承受较大而复杂的冲击载荷，对抗疲劳强度有较高的要求。曲轴轴颈与侧面的连接过渡圆角处为应力集中区，也是曲轴疲劳破坏的敏感区域，是薄弱环节。因此，国外发展了圆角深滚压技术提高疲劳强度。曲轴的圆角滚压，就是利用滚轮的压力作用，在曲轴的主轴颈和连杆颈过渡圆角处形成一条滚压塑性变形带，这条塑性变形带具有以下特点：

- 1) 产生的残余压应力，可与曲轴在工作时的拉应力抵消或部分抵消，从而提高疲劳强度。
- 2) 硬度提高。滚压使圆角处形成高硬度的致密层，使曲轴的机械强度和疲劳强度得到提高。
- 3) 表面粗糙度降低。圆角滚压可使圆角表面粗糙度值 $R_a \leq 0.1\mu m$ ，从而大大减小了圆角处的应力集中，提高了疲劳强度。

国外应用的圆角滚压技术已相当先进。可一次对所有圆角进行滚压完成，且可作到主轴颈与连杆轴颈圆角的压力不同，同一连杆轴颈圆角在不同方向上的压力也可不同。这样可经济地达到最佳的滚压效果，最大限度地提高曲轴的抗疲劳强度。经德国HEGENSCHEID公司测定，球铁曲轴经滚压后寿命可增至100%~280%。图7为德国HEGENSCHEID公司某



型号圆角滚压机床。



图7 曲轴圆角滚压机床

9. 曲轴止推面精车滚压机床

该设备用于对曲轴止推面精车滚压加工, 具有以下技术特点: 滚压抛光止推面并在线测量、滚压抛光代替磨削加工、可同时进行车削加工、在刀盘上装有滚压抛光装置, 可获得更高精度。目前性能较好的设备有德国HEGENSCHEID公司的曲轴止推面精车滚压机床等, 如图8所示。

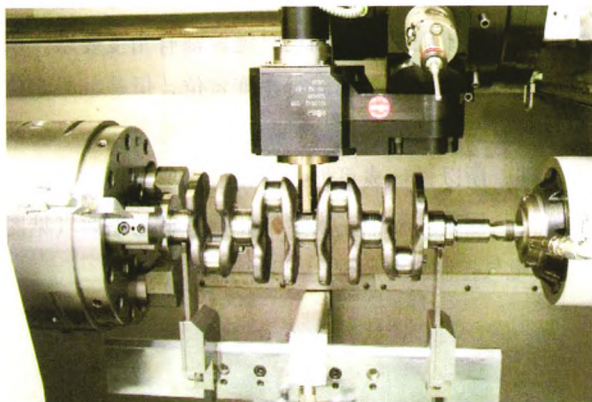


图8 曲轴止推面精车滚压机床

10. 曲轴数控法兰孔机床

以国产某曲轴数控法兰孔机床为例介绍其配置及功能: 该机床具有加工精度高、性能稳定可靠、自动化程度高、生产效率高等特点。除人工上、下工件外, 其余加工过程全部由机床自动完成。采用自动液压夹具, 工件自动夹紧、自动松开; 一次装夹可完成曲轴两端所有孔的加工(如: 螺纹孔、销孔、轴承孔等); 可同时装夹和加工2支曲轴; 自动找正工件定位轴颈轴心的坐标以确定工件加工坐标系; 可使用内冷刀具; 可对加工完成后的工件进行在线检测; 可对刀具切削力矩进行编程控制; 可对刀具寿命和刀具破损进行监控; 刚性攻丝; 自动换刀; 自动冷却、排屑; 自动润滑; 销孔的位置度误差 $\leq \phi 0.03 \text{ mm}$; 螺纹孔的

位置度误差 $\leq \phi 0.05 \text{ mm}$; 销孔粗糙度值 $R_a \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。

2. 数控曲轴砂带抛光机

曲轴的主轴颈、连杆轴颈及止推面都要求超精加工和抛光, 传统工艺是采用靠模油石超精加工机床, 加工后严重地破坏了轴颈的几何形状——形成马鞍形(凹形), 而且对轴颈尺寸影响较大。国外曲轴的超精加工早已采用数控砂带抛光工艺, 而且这种砂带是防潮静电植砂的(保证砂粒尖锋朝外), 为了能对圆角和轴肩抛光, 砂带两侧开槽以便与加工面贴合。国外曲轴砂带抛光机有德国的格尔公司, 美国的IMPCO公司和日本的小松公司, 可同时抛光主轴颈、连杆轴颈、圆角、轴肩及止推面。其结构均采用对夹式, 每个轴颈上用4片垫块(中凹型)压紧砂带, 垫块和砂带宜根据工件材质和硬度选择, 机床上的卷带机能保证每个轴颈都有一段新砂带(长度可调)参加工作, 抛光的方式以超精加工的原理进行, 而其效率与效果都远远高于和优于油石。例如合金钢曲轴, 可从 $R_a=0.63 \mu\text{m}$ 抛光至 $R_a=0.20 \mu\text{m}$, 球铁曲轴可从 $R_a=0.8 \mu\text{m}$ 抛光至 $R_a=0.20 \mu\text{m}$, 止推面从 $R_a=1.6 \mu\text{m}$ 抛光至 $R_a=0.63 \mu\text{m}$ 。

结语

曲轴高端制造装备不同于普通加工机床, 许多工序必须使用专用刀具, 如上面介绍的内铣、车-车拉和高速外铣, 所使用的都是专用刀具, 这些刀具的刀体制造复杂, 价格也比较昂贵。随着现代高新技术在生产中的综合运用, 曲轴生产中使用的高端装备技术越来越多, 如零件表面处理技术、精密成形技术、材料成型设备等。这些新技术和新设备的应用使得曲轴朝着生产过程柔性化、敏捷化、智能化及信息化方向发展。

关键词:

高端制造装备 曲轴加工

(收稿日期20140510)