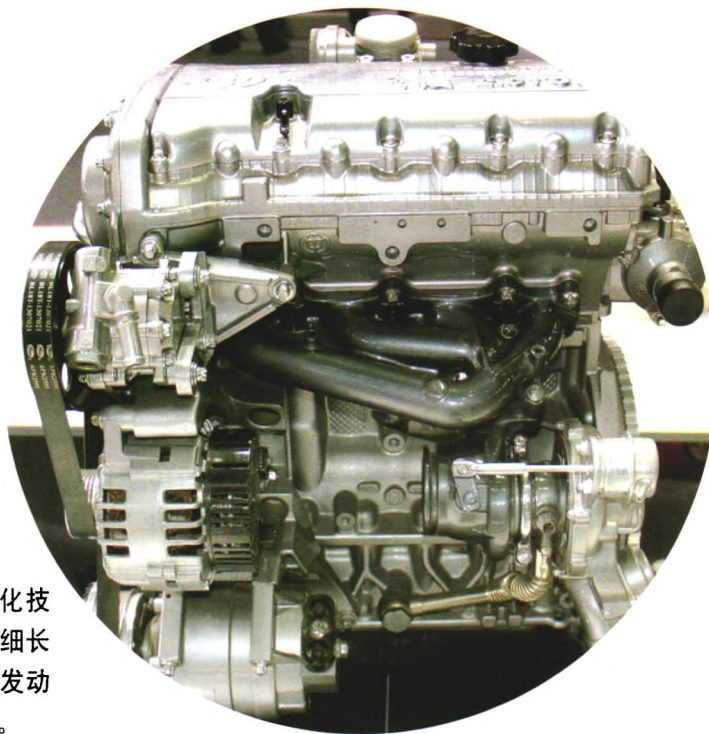


节能发动机 先进制造技术

□ 机械科学研究院/陈长年



节能发动机技术包括TDI技术和发动机轻量化技术。介绍了涡轮增压器粉末成形技术，增压器转子细长轴高精度高刚度数控车削技术和磨削技术，铝合金发动机先进铸造技术以及镁合金在先进发动机中的应用。

在雾霾及节能双重压力下，现代发动机发展趋势是小排量和高功率密度。

宝马、大众等都推出了这种先进发动机，而英国Cosworth公司的小排量高功率发动机引领世界发动机发展潮流——1.6L双增压发动机，功率达到惊人的368kW！

而大排量的高端乘用车（高级轿车、SUV、轿跑车）发动机，最重要的性能是功率/质量比。他们的核心技术主要是TDI技术和轻量化技术。

TDI技术及其关键零部件先进制造技术

(1) TDI即涡轮增压(Turbo)+缸内直喷(Direct Injection)。涡轮增压技术是利用发动机排出废气的能量，带动涡轮增压器转动，将新鲜空气压缩后，送入发动机气缸，提高发动机气缸的空气密度和充气量，从而提高了发动机的功率，改善了燃油的燃烧

条件。可使发动机功率增加20%~50%，减少燃油消耗10%以上，满足国IV以上排放法规要求。

汽油机缸内直喷技术是指将燃油直接喷入气缸燃烧室内的发动机技术，可减少废气排放，提升动力性能，同排量下，最大功率可提高15%。

(2) 国际级汽车企业正在掀起TDI风暴。欧洲国家轿车增压率高达55%以上，载货车增压率为100%。据霍尼韦尔公司预测，2020年中国增压车型的比例将由9%增加到60%，增压器需求量突破2 700万台。

上海通用的“绿动未来”5年战略提出，未来5年将推出12款新发动机，全部集中在1.4~2.5L，先进的缸内直喷、涡轮增压技术和6速变速器将进一步普及。

在采用TDI技术的三款车型中，奥迪A4 2.0TTSI最大功率提升了37.5%，宝马335i提高40%，新君威2.0T则提升了50%。

现代汽车集团以2010年为起点，10年将内燃机的燃油效率提高30%；宝马3系列2012年动力将配备双涡轮增压直喷4缸汽油机。

但由于核心涡轮增压及其制造技术落后等原因，目前，我国轿车汽油发动机涡轮增压器仍然主要由霍尼韦尔等国外公司控制。

1. 涡轮增压器粉末成形技术

粉末成形技术结合了注塑工艺和粉末冶金技术的优点，是新兴的净成形制造技术，可以大批量经济高效地生产三维复杂形状的零部件。

现代可变几何涡轮增压器(VGT)的关键零部件涡轮转子、导向叶片、喷嘴环等高温结构件的形状越来越复杂，尺寸精度要求和表面质量越来越严，工作温度越来越高。精密铸造技术难以满足以上要求。

金属或陶瓷粉末注射成形(MIM)是新兴的净成形制造技术，与金属加工、锻造、铸造相

比,更加适合大批量经济高效地生产小尺寸的三维复杂形状零部件。欧美已经广泛开始采用该技术生产涡轮增压器的涡轮转子、导向叶片、喷嘴环等。对于目前涡轮增压器高温关键部件广泛采用的镍基高温合金,粉末注射成形产品的高温耐久疲劳强度比精密铸造的要高得多,同时可以使得叶片设计更薄,尺寸精度、表面质量和生产效率更高。

另一方面,一些新开发的高温合金由于铸造过程中易产生偏析等缺陷,只能采用粉末注射成形;而对于新开发的涡轮转子材料如TiAl金属间化合物, Si_3N_4 陶瓷等则只能通过粉末冶金方法成形。在工艺的经济性方面,以轿车用涡轮增压器转子为例,粉末注射成形生产方法比传统采用的精密铸造方法要节约成本40%,而且力学性能大幅提高。

转子的设计和质量是国内外涡轮增压器的主要差距之一,目前国内大部分厂家采取铸造的方法,而国外现采取MIM的方法。铸造方法生产的转子微观结构比MIM生产的差,容易出现缺陷。MIM方法可以高效经济地生产各类高温合金材料的转子,精度高,力学性能好。现大众公司、丰田公司都已大批量使用该增压器转子。

中国燃气涡轮研究院利用航空技术开发了电控可变几何废气涡轮增压器(VGT),是节能、环保、高效内燃机的首选技术之一,荣获2004年国家火炬计划项目。其电子控制器可自动跟随发动机工况变化,提供较佳匹配。与普通涡轮增压器相比,它具有以下特点:

(1) 发动机低速转矩提高

20%左右。

(2) 发动机全程功率提高5%~6%。

(3) 耗油率降低2%;排放烟度更低。

高端先进发动机用结构陶瓷代替高强度合金制造涡轮增压发动机。可将发动机的燃烧温度从700~800℃提高到1000℃以上,热效率提高1倍以上。结构陶瓷质量为铸铁的一半,节能效果非常显著,同时还能减少环境污染,节约钢材等金属材料。

2.增压器转子细长轴高精度高刚度数控车削/磨削技术

满足长径比达15以上的增压器转子高精度、高刚度、高速度数控车削技术,要求硬切削,42HRC硬度工件切削效率 $\geq 50\text{mm}^3/\text{s}$,应用双刀架进给一致性、动态补偿等相关核心技术,主轴反顶、尾架夹持拉伸及双刀架技术。零件加工节拍 $\leq 60\text{s}$, $C_{PK} \geq 1.67$ 。实现细长轴零件的高效稳定加工。

增压器转子细长轴高精度高刚度高速度数控磨削技术。要求零件加工节拍 $\leq 60\text{s}$, $C_{PK} \geq 1.67$ 。需要采用CBN高速磨削技术,直驱传动技术,在线测量和温度/精度动态补偿技术等先进技术。目前主要由瑞士Studer、德国Schaudt、Junker、瑞士Kellenberger、日本丰田工机等企业控制,我国上海机床公司正在开发这种高端磨床。

轻量化技术

1.铝合金发动机先进铸造技术

近年铝合金在汽车上应用日益增加,首推发动机中最重、最大的

铝合金气缸体。日美分别有100%和85%的轿车缸体已经采用铝合金。预计到“十二五”末,我国将有60%的轿车采用铝合金压铸缸体。

国外先进发动机大量采用轻质材料,如奥迪A6L 3L发动机铝硅合金曲轴箱仅重33kg,包括机械增压器在内的发动机仅重189kg。宝马公司将镁铝结合起来,较好地利用这两种金属的特点,在强度大的地方用铝合金,如曲轴支撑座、缸体内壁及气缸体等,缸体外壁连同油底壳用镁合金。既保证了发动机的坚固性,又降低了整机的质量。与铝合金箱体相比,新材料箱体的质量减轻24kg。

全铝发动机缸体优点:减小发动机缸体体积(减小缸筒间距及重量;提高散热效率及均匀性。

目前,我国全铝发动机主要采用镶缸套或压入缸套的办法来保证发动机的耐久性。但铸铁缸套增加了重量,减少了热导率、加剧了由于两种材料热膨胀性不同而导致的潜在失效。新一代全铝发动机为无缸套结构,进一步降低了缸体质量,使尺寸更紧凑,适用于小排量和高功率密度发动机。同时,还具有加工工艺简化和更短的暖机时间等优点。这是现代发动机的前沿技术,是材料轻量化及结构轻量化的典型代表。

上述发动机壳体的先进铸造技术主要是真空压铸技术。

(1) 真空压力铸造是国际上普遍采用的铝合金发动机铸造技术。与普通压铸相比,增加了抽真空技术,可将型腔中的气体抽出,金属液在真空状态下填充型腔,减少了卷入的气体,力学性能高于普

通压铸件。推动了汽车轻合金铸件向大型、复杂、薄壁方向快速发展。使铸件结构减重明显。美国蓝石公司的铝合金超高真空薄壁压铸技术，其铸件精度高，壁厚2~4mm，气孔含量很少，具有高强、高延展、可热处理、可焊接、可铆接等特点。

先进的真空压铸技术属于近净成形技术，铸件表面质量非常好。

其关键技术包括：稳定高效的高致密真空压铸工艺；高排气能力真空压铸系统；高真空压铸实时控制系统；真空压铸中型腔-压室系统的密封工艺；模具温度精确控制工艺。

由于压铸件大批量生产的特点，模具温度不断上升，影响铸件毛坯的合格率。目前，我国压铸企业大部分采用模温机控制模具温度，但该装置只能对进口及出口加热油温进行控制，无法精确控制模具具体位置的温度。国外已开发出可实现模具具体位置温度精确控制装置，并与压铸控制系统集成实现了智能控制，显著提高了压铸件的生产节拍和铸件合格率。

(2) 大马力发动机缸体的Cosworth铸造技术。Cosworth工艺是国际上生产大功率全铝发动机常用的先进成形技术，由英国Cosworth公司于20世纪70年代末发明。该公司正是依靠这项技术，使其发动机全球领先。它是一种精确锆英树脂自硬砂的组芯造型，在可控气氛、压力下充型的铸造工艺。采用Cosworth工艺生产的缸体铸件，强度可提高30%左右，铸件重量减轻约10%~15%，金属液的利用率高达80%~90%。是大功率发

动机的轻量化制造技术。

目前，福特、奔驰、通用等汽车厂商均采用此工艺技术或改进技术生产大马力全铝发动机高性能缸体铸件，并在自动化设备配合下，大幅度提高了铸件的生产效率。如，福特公司已建成批量生产线，具备了55件/h，年产90万件全铝发动机缸体能力。

2. 镁合金在先进发动机中的应用

镁合金具有减重、减振、降噪效果，并可100%的回收。国外近几年在汽车上的应用以年平均25%的速度快速增长。国际已经有镁合金发动机缸体、气缸盖罩、发动机支架。

镁合金加工性能优势有以下几个方面：

(1) 溶化成本只有铝的2/3。

(2) 压铸成型性优良：镁合金可压铸制造复杂的零部件和超薄外壳件，最薄可达0.45mm（ABS塑料为1.2~2mm，铝合金为1.5~2mm），镁铸件的表面质量和外观明显比铝好；镁压铸件与模具的亲合力远低于铝，模具寿命是铝的2倍以上。

(3) 压铸生产效率比铝高25%，金属模铸造比铝高300~500K，消失模铸造比铝高200%。

(4) 切削加工性能好：镁合金的硬度低、具有较好的切削加工性能，切削阻力仅为铝合金的56%、黄铜的43%。加工时可采用较高的切削速度和廉价的切削刀具，工具消耗低。而且不需要磨削和抛光，用切削液就可以得到十分光洁的表面。

镁合金在电动汽车上应用更具经济性。目前电动汽车面临的一大问题就是笨重的电池增加了汽车质量。镁合金电池壳体用于电动汽车的极板，高能电池的壳体，预计近年国内需求200t/年，国外需求3000t/年。研究成果表示，如果电池成本在5000美元，节省的电池和用电成本能够完全抵消增加的材料成本。

3. 钛合金连杆

钛是一种质量很轻、强度很高的材料，价格非常昂贵，一般只在航空领域采用。但是，这种航空材料最终还是被应用在了汽车上，不过仅限于高性能的运动轿车，因为只有这些汽车才会为了提高性能而不计成本的采用尽可能适合的材料。兰博基尼的Diablo，法拉利F355 / 360、550 M，保时捷的911 GT3等，都采用钛合金连杆，以提高发动机的转速。

钛合金连杆传统制造工艺是：等温锻造→热处理→金属加工。由于等温锻造模具成本比钛合金还高，钛合金属于难加工材料等原因，制造成本高。

钛合金零部件的加工具有材料去除量大、难切削、加工效率低等特点，热氢处理技术是提高钛合金切削性能的重要方法。即利用氢致塑性、氢致相变和氢的可逆合金化作用，实现钛氢系统最佳组织结构，促使其工艺性能和力学性能得到改善，从而改善钛合金的切削加工性，提高钛合金加工效率，降低钛合金构件制造成本。

为降低制造成本，这种小批量生产的跑车可以采用3D打印的方法

制造钛合金连杆。我国研发的飞机钛合金大型整体关键构件激光成形技术是“3D打印技术”的高端发展，是一项“变革性”的短周期、低成本、数字化先进制造技术。节约了90%十分昂贵的原材料，加之不需要制造昂贵的模具，原本相当于材料成本1~2倍的加工费用现在只需要原来的10%。

新型发动机制造模式——多品种，变批量

新型发动机在相当一段时间内，无法达到少品种大批量采用的敏捷柔性自动生产线（AFTL）模式。需求应对多用户的多品种、变批量制造模式的挑战。面对兼顾高柔性、高效率、低投资的要求，以及市场快速反应能力的挑战，多品种、变批量制造模式核心技术是可重构制造系统RMS（Reconfigurable Manufacturing Systems）。1998年，美国国家研究委员会将RMS列为未来20年制造业必须优先解决的10大关键技术之首。我国国家自然科学基金和“863”计划也支持了“可重构制造技术”的研究课题。

德国斯图加特舒尔茨教授调研欧、美、亚洲25个国家300余家批量生产的企业得出：在批量生产条件下，80%的数控机床只应用了20%的功能，存在着功能冗余是导致组成生产线的成本过高的主要原因。

1992年美国密歇根大学Y.Koren教授在美国科学基金（NSF）资助下，首先系统地提出发展可重构制造系统的方案。1996年建成了可重构制造系统工程研究

中心（ERC/RMS）。该工程中心拥有了企业界、科学界和政府部门的60位专家。并已集结了机床制造企业（如Cincinnati、Cross Huller、Lamb Technicon等）、汽车制造企业（通用、福特、克莱斯勒等）、及测量、切削刀具、控制系统企业等30家合作企业。迄今已有一些研究成果在生产上应用，为新一代可重构生产线发展提供实践基础。例如德国Ex-cell-O公司联合10余家公司共同开发出高效的采用复合刀具的可重构机床，美国哈挺公司研发的模块重构的精益制造单元，美国密歇根大学ERC/RMS于2002年研制出用于加工发动机缸体的可重构机床，以及可重构在线测量机在工厂应用等。

目前国内可重构生产线正沿着生产系统的重构规划、体系布局以及加工设备的结构与控制重构两个方面进行研究和验证，并在一些局部应用中取得了效果。从1998年起已在国家自然基金、“863”计划和国家科技攻关等资助下取得较好的研究成果。

90年代中我国个别企业引入国外企业使用的可重构技术经验，从1996年至今成功地实现了生产线和CNC加工中心生产线的重构，为企业带来了良好的效益。例如，江苏

某计算机零部件制造厂利用RMS和其他先进技术与管理使企业利用可重构的RMS线，而不用传统的按不同类型零件分别建立9种产品制造线的方法，可以按每周订单要求实现重构，在4年中发展成为计算机硬盘录放零件的世界第一大供应商，其产量占该类零件世界年总需求的40%以上（1999年），为企业带来年千万级美元的利润，而四年来在产品不断变换中设备投资并未新增。

RMS着眼于制造系统的快速调整能力，原理是通过对机床配置的调整和机床功能模块的增减，迅速构成适应新品生产或批量变化的市场环境。其主要技术为：

（1）适应发动机缸体、缸盖等加工并具有可重构性的高效精密多轴卧式加工中心。

（2）基于可重构技术的多品种加工柔性夹具。

（3）优化工艺和工艺装备与物流系统的配置方案，可重构的二维物流布局模式。

（4）实现适应产品生产规模快速调整的布局模式。

（5）实现均衡生产的控制策略和管理技术。

（6）基于网络化平台的制造过程信息集成管理系统。 **AME**



陈长年

机械科学研究院“汽车制造技术与装备”资深顾问，研究员，曾任中国汽车工程学会装备部部长、中国机床工具工业协会市场部主任。成果获得过机电部、北京市、广西区科技进步一、二、三等奖。参加过百余个国家重大科技项目策划、评议，申报书编写。