■ 奇瑞重工股份有限公司/王　浩　张勇刚

汽油发动机缸体开发流程

近年来，不论是国内还是国际乘用车市场，自主品牌汽车都出现了蓬勃发展的态势。由于汽油发动机本身的特性，其更新换代越来越快，国内与国际先进发动机的差距也越来越小，甚至出现反超。作为发动机的关键部件，缸体的设计开发也日益体现其重要性。

缸体是内燃机整机的骨架和外壳，其内外布置了几乎发动机所有主要零部件。曲轴箱内部安装有曲柄连杆机构；外部是驱动轮系，如起动机、发电机、动力转向泵和空调压缩机；上部安装发动机气缸盖总成；下面连接油底壳和机油收集器。另外发动机悬置支架也布置在缸体上，同时该部件又是燃烧室、冷却系统和润滑系统的重要组成部分。

缸体的功用决定了其形状复杂、壁薄、呈箱形，要求有一定的强度和足够的刚度，以保证零部件的几何形状和零部件之间的配合关系。而且要做好机体冷却，一方面减少机体各部位的热应力，另一方面控制机体温度在一定值内，此外机体的外廓尺寸要紧凑，以便减轻质量。机体各部接缝处要严密，防止漏水、漏气和漏润滑油。

概念设计

曲轴箱的设计首先要确定发动机的主要结构参数，然后对零部件按系统或功能进行模块化设计。确定发动机匹配的整车及相关边界条件，由于发动机的振动，要求发动机各零部件与整车前舱的各部件之间必须保证一定间隙，一般来讲最小间隙为：前后间隙25mm，上下间隙25mm，左右间隙19mm。

根据对benchmark发动机分析，以及借助热力学分析性能软件确定发动机性能参数、质量及尺寸，进行可行性分析，确定缸体形式、气缸数、缸径、冲程、缸心距、连杆长度、活塞压缩高度和爆发压力等热力学相关参数，根据这些参数确定缸体高度、缸心距、前端面、后端面、宽度、主盖螺栓和缸盖螺栓的位置等参数。进一步分析确定缸体的结构：平分、龙门；确定缸体的材料：铸铁、铸铝、镁铝合金等；确定工艺方式：高压、低压、重力铸造等以及使用缸套和轴座镶件等。

将上述已经确定的主要参数、结构方式、工艺方式以及边界条件在缸体SKL模型中体现出来，为后续建模提供参考。

布置设计

完成发动机整体概念设计后，进入发动机布置设计阶段，细化设计的相关参数，主要包括：

1）发动机具体零部件结构及参数设计：前端面、后端面、进气侧、排气侧、油底壳、连杆以及曲轴等和缸体相关件的具体结构和尺寸。

2）和缸体本身相关，尤其是在缸体上布置的系统结构及参数设计：冷却系统水泵、水路；润滑系统机油泵、油路；正时导轨、涨紧器的油路；通风系统回油、通风、窜气等；附件系统用凸台或支架、起动机、变速器等以及悬置。

3）考虑缸体的设计基准点和夹紧点的布置、加工工艺的实现性以及铸造模拟分析的可行性。

根据这些输入条件更新细化缸体的SKL骨架线。

详细设计阶段

发动机设计是一个反复修正过程，布置阶段和详细设计阶段并没有明确的界限，是一个不断修正和丰富的过程。这两阶段是将参数化变为模型化的主要阶段，借助三维软件PROE或UG通过布置阶段的SKL骨架线的边界进行模型化。对于正向设计，一般采用铸造或压铸模具化的思维进行设计，此方法具有条理清晰、更新方便、提高工作效率等优点，正在被企业和设计院所广泛接受，缸体数模的主要模块包括前端模块（包括水泵芯）、后端模块、进气侧模块、排气侧模块、顶面模块（包括水套芯、通风系统芯）和底面模块（包括曲轴箱芯），另外有的缸体主油道、缸间通风的集成在前后模块里。某款汽油机缸体的模块化设计如图1所示。

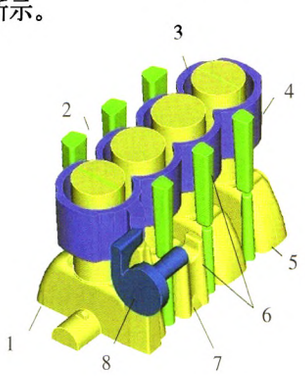

图1 某缸体模块化设计示意图

1.前端模块 2.排气侧模块 3.水套芯 4.后端模块 5.进气侧模块 6.回油道和通风孔芯 7.曲轴箱芯 8.水泵芯

1.顶面模块

（1）水套 当曲轴箱形状确定之后，开始确定水套的形状，水套形状设计必须在同时考虑缸盖螺栓布置和缸体充分冷却的前提下进行。水套可分为开式水套和闭式水套，汽油机高压铸造铝合金缸体都采用开式水套（见图2）。

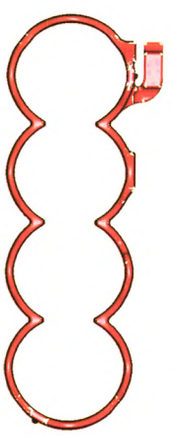

图2 缸体水套示意图

水套高度的确定：理论上从第一道活塞环开始到缸体的火力面；由于发动机结构紧凑，两缸之间通常加工斜水孔来代替常规意义的水套。另外，一般在缸体前端布置水泵，水流从水泵进入缸体，然后流入缸盖。

（2）回油和通风 曲轴箱上必须布置回油孔，用来将缸盖上的润滑油回到油底壳中重复使用，同时还需布置通风孔，确保气门室罩盖和曲轴箱内部的气压平衡。

2.底面模块

气缸体的基本参数已经确定，由此来确定曲轴箱的形状。这个过程需要知道连杆运动轨迹的包罗线，然后根据连杆的运动轨迹，给出至少5mm以上的间隙确定曲轴箱的内壁形状，如图3和图4所示。

图3 连杆运动轨迹的包洛线

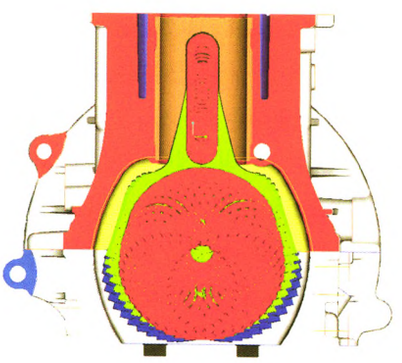

图4 曲轴箱的外形

3.前、后端模块

一般正时驱动轮系布置在曲轴箱的前端，而变速器布置在后端。在设计时，前端面模块的形状应根据轮系的布置而定，保证相关件的间隙，还要重点考虑与前罩盖密封带的设计以及螺栓布置等关键性问题。后端面模块中缸体法兰面的结构强度、加强筋的布置以及形状是设计的关键，此处同时还需考虑起动机的位置和输出轴（半轴的位置）。

4.进、排气侧模块

进、排气侧模块主要考虑的是进、排气系统支撑凸台布置，附件系统的空压机、助力泵、发电机和起动机安装凸台的布置，另外再考虑凸台的强度以及整个发动机的结构强度其加强筋的布置，也是设计能力的具体体现。

5.主轴承盖

主轴承盖的作用是承受曲柄连杆机构的作用力，因此主轴承盖必须具有很高的力学性能和结构强度，材料一般选择铸铁，而且需要进行有限元结构分析。铝合金曲轴箱一般采用框架结构，并且将主轴承盖镶嵌在框架内部，以增加其结构强度。

主轴承盖上的曲轴孔部位一般需经过粗加工来保证定位精度和浇注质量，曲轴孔的直径一般要大于曲轴主轴径2～3mm，以保证整个曲轴孔都为同一种材料，避免一边为铸铁一边为铝合金而使加工不能顺利进行。

在进行上述设计以及在数据冻结前的复检过程中，要遵循以下几个原则：

（1）间隙要求　毛坯面对毛坯面间隙≥5.0mm，毛坯面对加工面间隙≥3.0mm，加工面对加工面间隙≥1.5mm，皮带对其他件≥1.5mm，缸套对连杆小头≥1.5mm。

（2）一般壁厚　铸铁3.5～4.0mm，重力铸造铝合金4.0～4.5mm，压铸铝合金4.0mm。

（3）法兰面厚度　铸铁7.0～10.0mm，铸铝10.0～12.0mm。

（4）工艺凸台（支撑和夹紧用）　铸铁12.0～15.0mm，铸铝15.0～17.0mm。

（5）密封带宽度　涂胶密封8.0mm，缸垫片密封6.0～8.0mm，纸垫片密封8.0mm，钢片密封5.0～8.0mm。

（6）拔模角　砂铸造，一般拔模角≤3°；水套拔模角≤1°；压铸，一般拔模角≤1.5°；水套拔模角≤1°。

（7）一般螺纹联接　铝合金螺纹旋合长度2～3倍的螺栓直径，灰铁的螺纹旋和长度1.5～2倍的螺栓直径。

近年来，CAE（计算机辅助工程）的发展也越来越成为发动机开发的有益补充，在此阶段开发缸体一般要包括水套CFD（计算机流体动力学）分析和缸体温度场分析和缸体结构分析三个部分，通过水套CFD分析，得到水套中冷却液体的流苏、压力损失、对流传热系数等。然后将部分CFD分析结果作为输入条件施加到结构分析的有限元模型中，计算缸体温度场分布。最后在基于温度场的分析结果进行结构分析，主要包括装配载荷、热载荷、工作载荷等工况，通过这一系列工况分析，对冷却水套冷却效果、缸孔曲轴孔的变形等进行评估。

试验验证

为了减少开发成本和加快开发进度，发动机的试验验证主要是根据发动机开发过程中处于不同阶段进行的相关试验。侧重点不同，对缸体而言分两个阶段：发动机台架试验，在快速成形样件阶段主要注重功能性方面的试验，比如冷却系统、润滑系统、曲轴箱通风系统和静态缸孔变形量试验；工装样件阶段主要考查的是可靠性和耐久性方面，主要包括疲劳试验、额定功率、负荷交变试验、冷热冲击试验和共振试验等。整车试验主要包括三高试验、高环试验和路试试验。在试验过程中，参照国家规定的试验标准进行试验，如果某项试验不合格，通过分析研究，查出是缸体的问题，对设计做出相应的修改。这是个持续反复的过程。

缸体模具定型

在缸体通过相关试验验证后，以及前期生产部门关于缸体加工线和发动机装配线的相关输入确定后，可以下发开模指令进行批量生产准备，进而进行工程样件OTS（工装样件认可）认可、生产件批准程序（PPAP）、小批量试装、SOP（标准操作程序）批量上市等流程。

结语

曲轴箱的设计属于一个系统工程，牵涉到许多方面，因此在曲轴箱的设计过程当中需要全面考虑各种因素，综合应用相关知识方可进行。

关键词：发动机 缸体 开发流程
（收稿日期20130305）