

发动机缸体试制加工策略（上）

- 航天科工第四研究院红阳机电科技公司/吴国君
- 东风汽车集团股份有限公司/周立民 黄洪浪
- 湖北航天计量测试技术研究所/穆腾飞



基于排量在2.4L以下发动机缸体结构平台，本文对做好发动机缸体试制各环节工作做了较详细的阐述，尤其对试制加工发动机缸体的工艺流程安排、刀量具选用、工艺夹具设计与制作、质量过程控制等试制加工发动机缸体的关键技术进行了重点介绍。

缸体结构简介

目前一般乘用车发动机缸体毛坯均采用高温铸造成型。柴油发动机缸体选用的材料一般为铸铁，汽油发动机缸体选用的材料一般为铸铝，不同企业设计的不同排量的发动机缸体结构形式虽然有差异，但汽车发动机缸体的整体结构都大同小异。发动机缸体一般均由上、下缸体两部分组合而成，即分体式结构，另外还有整体式缸体与多部件组合缸体。上、下缸体组合式是发动机缸体的主流结构形式，排量在2.4L以下的汽车发动机缸体组装后外形尺寸基本在450mm（长）×250mm（宽）×310mm（高）左右，铸铝发动机缸体上一般还会镶嵌有四处气缸孔铸铁钢套，有的铸铝发动机缸体在上下缸体上还预埋了曲轴孔铸铁龙门。本文以分体结构形式2.4L排量以下的发动机缸体为例，对如何做好发动机缸体试制加工进行详细阐述。

缸体加工工艺性分析

发动机缸体毛坯制作成坯后，上下缸体的6个面都需要采用金属切削加工的工艺方法最终加工成缸体成品，在加工过程中还要穿插气密检测、清洗、珩磨缸孔等工艺方法。金属切削加工发动机缸体主要包括：铣面、铣孔、钻孔、镗孔、铰孔和攻丝等。

发动机缸体的加工可划分为两个阶段，

一是分体加工阶段，二是组件加工阶段。分体加工阶段主要是将上下缸体上的精度要求不太高的一般结构特征、组合后不便加工的结构特征及关系到合缸的结构特征加工到位或去除大部余量，主要包括合缸面、合缸定位销孔、进排气两侧的安装面与孔系、止推面及轴瓦槽等特征。发动机缸体的重要结构特征，如曲轴孔、气缸孔、缸盖面、前后端的定位销孔等必须安排在发动机缸体合缸后进行精加工。

发动机缸体制制加工的工艺流程安排可视企业设备现状进行合理安排，一般来讲，采用立式加工中心进行加工，装夹较为方便，但工序会相对分散，需要投入的工艺装备较多，会加大试制的加工成本。采用卧式加工中心进行加工，可以使工序相对集中，投入的工装较少，可降低试制加工成本。

我公司在安排发动机缸体制制加工工艺流程时，根据公司设备现状（见表1），采用了立式加工中心与卧式加工中心联合使用的折中工艺加工方案，既方便装夹，又节约试制成本的目的。一般发动机缸体毛坯，上、下缸体上都会预铸有加工第一道工序的粗定位基准，粗定位基准预铸在上下缸体的结合面上，结构形式为三处带扁锥孔。三处粗定位基准的公差要求较低，表面质量较差，所以以三处粗定位基准定位工件加工第一道工序，安排在立式加工中心上来进行，不仅可以方便装夹，同时也可方便定位调整。第一道工序加工完成后，精加工定位基准通常已形成，后续工序安排何种设备进行加工则可视情况而定，上下缸体的第一序安排在

立式加工中心上来完成是非常必要的。

发动机缸体制制通用工艺流程如下：

（1）上缸体加工：加工上缸体结合面及其上特征→加工上缸体缸盖面及其上特征→加工上缸体进排气两侧特征→精加工上缸体结合面及其上特征→加工上缸体上的所有斜孔→中间清洗→气密性检查。

（2）下缸体加工：加工下缸体结合面及其上特征→加工下缸体油底壳面及其上特征→加工下缸体进排气两侧特征→精加工下缸体结合面及其上特征→加工下缸体上的所有斜孔→中间清洗→气密性检查。

（3）缸体组合件加工：合缸→精加工曲轴孔、气缸孔及前后端定位销孔→珩磨→检曲轴孔与气缸孔并打分组标识→拆缸→检漏→最终清洗→合缸、油封、装箱。

发动机缸体制制加工工艺流程安排合理科学与否对于缸体的加工质量及成本控制十分关键，确保缸体制制质量的原则是：关键特征必须安排在合缸后精加工阶段，甚至是最后一道工序来完成。因为试制阶段各种工具，如吊装工具等都不会太全，而缸体较重，极易造成装卸过程划线及磕碰伤工件表面。对于控制成本，就是在安排工艺流程时应尽可能采取工序集中的原则，这样可以降低试制成本，主要

表1 我公司缸体生产加工线设备明细

序号	设备名称	设备型号	数量	主要技术参数/mm	制造厂家
1	立式加工中心	PV1000S	3	X\Y\Z轴定位精度：0.006 重复定位精：0.005	成都普瑞斯
2	双工作台卧式加中心	XH765A	2	X\Y\Z轴定位精度：0.005 9 重复定位精度：0.0039	上海第三机床厂
3	双工作台卧式加中心	HTM-63H	2	X\Y\Z轴定位精度：0.008 重复定位精度：0.005	海天精工
4	双工作台卧式加中心	MCH250	1	X\Y\Z轴定位精度：0.005 9 重复定位精度：0.003 9	德国HELLER
5	双工作台卧式加中心	MCH250	1	X\Y\Z轴定位精度：0.005 9 重复定位精度：0.003 9	德国HELLER
6	双工作台卧式加中心	M500	1	X\Y\Z轴定位精度：0.005 9 重复定位精度：0.003 9	美国Hass
7	立式加工中心	VF3SS	3	X\Y\Z轴定位精度：0.005 9 重复定位精度：0.003 9	美国Hass
8	立式珩磨机	VSM 8-60SV-NC	1	珩孔直径范围：25~120	德国NAGEL
9	立式珩磨机	2MKA2215Z	1	珩孔直径范围：50~150	中卫大河
10	检漏机	非标	1		无锡伊维玛
11	连续通过式清洗机	非标	1	中间清洗	宜昌英汉
12	浪泳式清洗机	非标	1	最终清洗	宜昌英汉

是可以减少工装的投入,可以最大限度地共享资源,如刀具与刀柄的共享等。此外工序集中还可减少周转及装卸的频次与时间,有效降低操作者的劳动强度。

缸体试制加工关键控制点设定

发动机缸体从毛坯加工至成品,加工的特征多,需要控制保证的尺寸多,其中绝大多数特征与尺寸只要采用合理的工艺方法是很容易保证的,但缸体上的几个关键特征,如曲轴孔、气缸孔及止推面等对整个发动机的装配与使用性能都会有重大影响,所以设计图样对于上述特征尺寸规定的精度要求极高,在试制加工过程中必须加以严格控制,尺寸一旦超差,客户方一般会做出工件报废处理。

1. 曲轴孔的加工

曲轴孔不连续分多档贯穿整个发动机缸体,长度在450mm左右、直径40~64mm,孔的精度一般为 $\phi(+0.018/0)$ mm,全跳动为 $\phi 0.02$ mm,孔的表面粗糙度值 $R_a=0.8\mu\text{m}$,可见发动机缸体曲轴孔的精度要求是相当高的,表面质量要求也相当高。

为确保试制发动机缸体曲轴孔加工质量,需要做好下面几方面的工作:

(1) 合理安排工序。曲轴孔加工必须分粗加工、半精加工、精加工三个步骤。粗加工可在上、下缸体分体阶段采用镗削或铣削的加工方式排余量,单边给后续半精加工留余量0.5mm左右,半精加工与精加工可安排在加工组合件时一次

定位中进行,一般半精加工会采用镗削的加工方式,给精加工留量约0.1mm,最后精铰至尺寸。

(2) 合理选择刀具。曲轴孔粗加工可选用一般镗刀或定制相应规格的球头铣刀,半精加工必须选用高品质进口防振镗刀进行,且不得采用调头的方式加工。这是因为半精加工给后续精铰曲轴孔留的余量较小,只有一次镗通方可确保孔的同轴度与余量留量均匀。我们选用了一款山特维克可乐满的防振镗刀,加工稳定可靠。精铰刀是加工曲轴孔的关键刀具,目前业界普遍选用曲轴孔精镗刀具是德国玛帕公司的品牌刀具,曲轴孔精铰刀具一短一长,需要根据曲轴孔的尺寸大小与公差定制,在玛帕公司定制此类刀具价格较昂贵,制作的周期也较长。

笔者认为,试制一款新的发动机缸体,客户给的加工费用有限,而进度要求又较急,是否需要选用进口的品牌刀具值得商榷。事实上,我公司一直选择在重庆力恒工具公司定制曲轴孔精加工刀具,完全可以解决曲轴孔精加工的技术难题,同玛帕公司制作的曲轴孔精铰刀具比,使用的效率与刀具的使用寿命都相对要差些,但质量完全可以保证设计要求。所以笔者主张,在发动机缸体试制阶段可以选用国产品牌精镗曲轴孔刀具,这样可大大降低试制加工成本,同时也为国产品具制造企业树立了信心。

(3) 合理选择加工设备。曲轴孔较长,对全跳动要求较高,除了对刀具的精度要求高外,对设备的精度要求也是有较高要求的,最好选用主轴端面跳动精度高及主轴

刚性较好的进口设备来完成曲轴孔的半精加工与精加工。我公司长期使用德国HELLER公司MCH250型卧式加工中心进行曲轴孔的半精与精加工,加工稳定可靠。

(4) 必须确保加工过程中冷却充分。曲轴孔的表面质量要求高,表面粗糙度值 $R_a=0.8\mu\text{m}$,所以在精铰过程中需要充分冷却,主要是防止切屑粘附在刀具或已加工表面,划伤已加工表面影响到曲轴孔表面的加工质量,所以设备与刀具系统选择带内冷却功能是很必要的,合适的内冷压力在2MPa左右较佳。

(5) 加强曲轴孔过程检测。曲轴孔加工至尺寸过程中需要操作者注意观察曲轴孔的表面质量情况,同时要使用气动量仪对曲轴孔进行检测,以便及时发现问题,以防批次性超差与报废。

2. 气缸孔的加工

缸孔材料一般为高强度铸铁,缸孔的精度一般为: $\phi(+0.015/0)$ mm、圆柱度为: $\phi 0.008$ mm,缸孔的表面要求有特定参数网纹,缸孔的加工质量直接影响到发动机整机的装配与性能使用,所以把加工缸孔设定为加工缸体的关键控制点是十分必要的。

确保发动机缸体气缸孔的加工质量,需要做好以下几方面的工作:

(1) 合理安排加工工序。发动机缸体气缸孔的加工必须分粗镗、精镗、珩磨分步加工至尺寸。珩磨又需要分粗珩、精珩、平顶珩加工出符合设计规定的表面网纹。

(2) 控制珩磨前缸孔加工质量。气缸孔珩磨后能否确保缸孔尺

寸、缸孔的圆柱度及表面质量，形成合格的网纹，同上道精镗工序加工质量的好坏具有直接的关系，尤其圆柱度很大程度上是靠上道精镗工序来形成的，珩磨只能起到修正缸孔圆柱度的作用。一般精镗只需要给珩磨留0.04~0.06mm的加工余量，所以对精镗的表面粗糙度也应做相应控制，表面粗糙度值至少应控制 $R_a=1.6\mu m$ ，否则会影响珩磨后缸孔表面网纹质量（主要是指因精镗表面质量不好造成珩磨后缸孔表面网纹出现局部贫秃及网纹错乱等缺陷）。

(3) 修正珩磨头。珩磨头的修正包括两个方面，一是指使用前的砂条规圆。此工作一般是采用专用夹具，在外圆磨床上完成，也可委托珩磨头供应商完成，使用时无需再进行规圆。二是指珩磨头正式使用前对砂条砂粒的修磨。目的是为了防止个别砂粒有凸起，在正式珩磨缸孔时造成凸出的砂粒划伤缸孔表面，影响缸孔的表面质量，方法是：用规圆后的珩磨头，对缸体工艺试验件缸孔进行反复珩磨，直至检测网纹参数合格。

目前业界普遍使用德国格林与纳格尔公司（NAGEL）的珩磨机来进行发动机缸体气缸孔的珩磨，但原装珩磨头的采购费用昂贵，制作周期长，很难满足试制的预算与试制加工进度，笔者认为在缸体试制阶段采用国产珩磨机与国产珩磨头来珩磨发动机缸体，只要能保证图样要求也应是合适的选择。我公司有一台德国纳格尔公司的原装进口珩磨机 and 一台国产中卫大河珩磨机，在试制发动机缸体过程中一直倾向于选择国产珩磨机 and 郑州大地

公司的国产珩磨头来进行缸孔的珩磨，效果良好，网纹参数完全满足设计图样要求。

通过对进口珩磨机与国产珩磨机加工缸孔对比发现，两种机床加工出的网纹参数经检测差距甚微，进口珩磨机的优势体现在加工效率更高，质量稳定性也稍优于国产珩磨机，但试制阶段更侧重于缸体的加工质量而不是效率，选择国产珩磨机与珩磨头来进行发动机缸体的试制是可行的，选用国产珩磨机进行缸体试制优势是经济实用，售后服务也更有保障。

(4) 重视缸孔加工过程检测。缸孔加工的过程检测包括两个阶段，一是珩前孔的检测；二是珩后孔的检测。关注珩前孔的检测主要是缸孔材料为高强度铸铁，在精镗过程中刀具磨损快，按时检测可以及时发现孔的变化，可以及时调整刀具刻度或更换刀片，检具可使用接杆千分尺；珩磨后缸孔的检测，主要是记录记分组，检具一般使用气动量仪，需要注意的是珩后的缸孔不宜使用接杆千分尺进行测量，以防触头伤及网纹。

此外，需要特别强调的是曲轴孔的精加工与气缸孔的精镗加工最好安排一次定位装夹完成，只有这样才能保证两者的相对位置度及曲轴孔与气缸孔的垂直度要求。

3. 止推面的加工

止推面是控制发动机工作过程中曲轴轴向窜动量的重要功能面，厚度公差一般为 $\pm 0.04mm$ ，尺寸的精度不算高，止推面的结构形式一般为两个同心半圆，结构较简单，理论上是较易保证的加工特征，之

所以把止推面设定为加工发动机缸体的关键控制点之一，是因为在缸体试制加工过程中，多次出现过因止推面加工超差造成发动机装配过程中曲轴抱死的严重质量事故，所以必须引起足够重视。

确保止推面加工质量的措施：

(1) 合理安排工序。两侧止推面必须一次定位装夹，采用正反铣的方式一次加工完成，只有这样方可保证两侧的两个半圆的同心度。

(2) 制作的刀具刚性要好。加工止推面的刀具结构形式一般为梯形结构的三面刃铣刀，采用正反铣的方式，刀具的悬长较长，刀具刚性差的话极易造成加工过程中的让刀现象，使得加工出的两侧面厚度不一致，导致两面与曲轴孔的垂直度难以得到保证，所以加工止推面的刀具刚性一定要好，刀杆需要进行调质处理，另外，刀具刃尖 R 不得超过 $R0.5mm$ ，否则会影响止推片与止推面的贴合，影响曲轴的窜动，甚至造成发动机工作过程中出现干涉现象。（待续）

AUTO1950

吴国君

高级工程师，在数控加工行业从业十余年，长期活跃在生产一线最前沿，对数控加工汽车发动机缸体、缸盖、其他汽车零部件、模具及复杂结构件的工艺设计、数控编程、刀量具选型、生产管理等方面积累了较丰富的经验，在国家与省部级杂志上发表了各类技术论文40余篇，与他人合著两本。