■ 航天第四研究院红阳机电公司/吴国君　凌　兵　张文明
■ 航天第四研究院万峰科技发展有限公司/汪远菲

多款发动机缸体并行试制工艺设计

2012年底国内某知名汽车公司自主设计了五款汽车发动机，加工任务委托给我公司，要求在两个月时间内完成试制任务。笔者总结了并行试制五款汽车发动机缸体的些许经验，在有限的设备资源条件下，怎样合理安排工艺流程，怎样设计制作工装，怎样进行刀具选型及怎样进行加工过程质量控制，以达到最大限度的节约成本，确保缸体加工质量与加工进度，以供同行在进行多款汽车发动机缸体试制时参考。

产品介绍及工艺性分析

五款发动机缸体，有三款为柴油机缸体，1.2L、1.4L四缸机，1.0L三缸机，带平衡轴孔，材料为铸铁；另外两款为四缸汽油机，排量2.0L与2.4L，材料为铸铝。三款柴油机缸体由气缸体与下缸体组成，两款汽油机缸体由气缸体、下缸体与五个铸铁轴承盖组成（见图1～图3）。

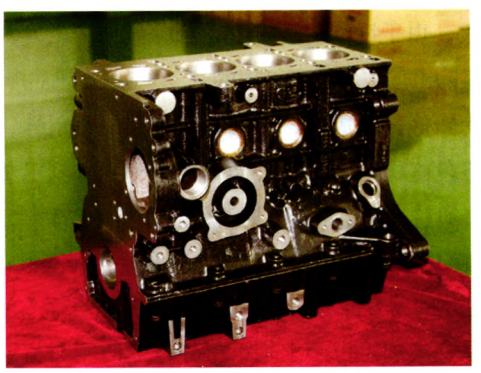

图1 1.4L发动机缸体

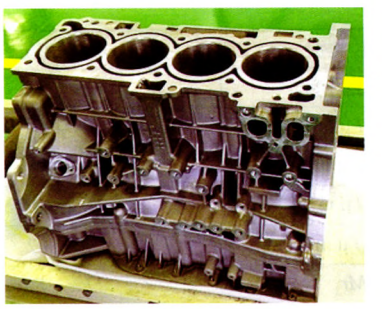

图2 2.4L发动机缸体

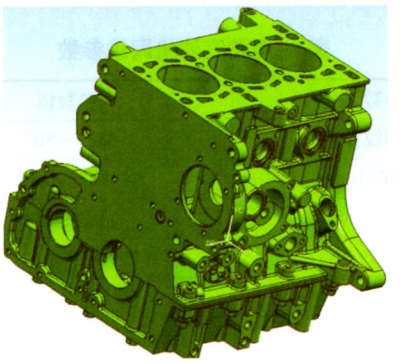

图3 1.0L发动机缸体

五款发动机缸体的主要技术参数见表1～表3。

五款发动机缸体均为来料加工，加工面、孔、螺纹孔等，气缸体及下缸体的六个面及其上的所有孔系均需要金属切削成形，主要工艺方法有铣面、钻孔、铣孔、铰孔、镗孔、攻螺纹，均可在立/卧式加工中心上完成，网纹可通过珩磨形成，中间还需要穿插清洗、检漏等工序。

五款发动机缸体从毛坯加工至成品，需要分两个

表1 五款汽车发动机缸体主要技术参数

发动机排量/L	曲轴孔直径/mm	曲轴孔直径/mm	外形尺寸(l/mm×h/mm)	备注
1.0	54.708～54.726	$72^{+0.03}_{0}$	278×295.6	平衡轴孔孔径：41.128～41.144
1.2	54.708～54.726	$72^{+0.03}_{0}$	359×295.6	
1.4	54.708～54.726	$72^{+0.03}_{0}$	412×295.6	
2.0	56～56.018	$86^{+0.03}_{0}$	448×314.2	
2.4	56～56.018	$88^{+0.03}_{0}$	448×314.2	

表2 三款柴油机网纹参数表

参数类别	参数值
网纹角度	40°～50°
R_z/μm	≤5
R_{pk}/μm	≤3
R_k/μm	0.2～0.9
R_{vk}/μm	0.8～2
Mr_2	77%～85%
Mr_{1max}	10%
W_{tmax}	1%

表3 两款汽油机网纹参数

参数类别	参数值
网纹角度	40°～50°
R_z/μm	0.25～0.50
R_{pk}/μm	0.3～1.0
R_k/μm	0.4～1.6
R_{vk}/μm	0.3～1.8
Mr_2	80%～90%
Mr_{1max}	13%
R_{tmax}/μm	0.9

阶段完成，第一阶段为气缸体与下缸体的分体加工阶段，该阶段将完成气缸体与下缸体绝大部分的加工内容；第二阶段为合件加工阶段，主要是完成气缸孔与曲轴孔的精加工、离合器面与正室面上的定位销孔的加工，以及气缸孔的珩磨。

气缸孔与曲轴孔是发动机缸体的两个关键特征，孔径精度及形位公差严，需要分粗加工、半精加工、精加工及珩磨分步加工至尺寸。

五款发动机缸体虽然局部结构形式有异、特征尺寸不同，但整体结构大致相同，均为长方体形结构，此外，五款发动机气缸体与下缸体六面均需要进行加工，为保证加工同一面的内容工装能共用，以减少工装的投入，均可采用统一的工艺流程进行加工，只是在加工不同型号缸体时内容做相应调整即可。

根据我公司设备现状及以上工艺性分析，编制五款汽车发动机缸体的加工工艺流程：

（1）气缸体加工 加工气缸体结合面及其上特征→加工气缸体非结合面及其上特征→加工气缸体一侧特征→加工气缸体另一侧特征→精加工气缸体结合面及其上特征→加工气缸体上的所有斜孔→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→加工下缸体非结合面及其上特征→加工气缸体一侧特征→加工气缸体另一侧特征→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→清洗→气密性检查。

（3）气缸体合件加工 合缸→精加工曲轴孔、气缸孔及离合器与正迟面定位销孔→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。

工装设计与制作

夹具是定位加工发动机缸体必备的工艺装备，主要是方便工件定位，确保缸体加工的一致性。通常情况下，加工发动机缸体有多少道工序就应制作多少套工装。某汽车公司委托我公司加工的五款汽车发动机缸体，每款缸体从毛坯加工至成品，不含多处斜孔加工的定位工装，需要工装达13套。如果加工上述五款发动机缸体都单独做工装，显然需要的工装数量多，投入大。由于试制费用有限，单独制作各款发动机缸体工装的工艺方案是不可取的。

为降低试制成本，必须考虑工装的通用性，即在加工五款缸体的同一特征面时，使用同一套工装进行加工，通过改变定位销与搭压板的位置来实现，定位销与工装的联接必须采用间隙配合。在立式加工中心上加工气缸体的结合面与缸盖面、下缸体的结合面与油底壳面；在卧式加工中心上加工气缸体的两侧面与下缸体的两侧面工装，其结构形式采用平板式工装，结构简

单，制作简易，使用方便。在卧式加工中心上精铣气缸体结合面、铣削轴瓦槽、开档与粗镗曲轴孔、精铣下缸体的结合面轴瓦槽、开档与粗镗曲轴孔、加工缸体组合件的工装结构形式采用方箱式结构形式，工装的刚性好，能使用的面多，可以重复使用，这种夹具的性价比高，可在进行发动机缸体试制加工时多推广运用。缸体上有几处斜孔，如果为了加工一处斜孔而制作一套工装，在试制阶段是很不经济的，如果斜孔的位置精度不高，完全可以采用垫块平面直角定位进行加工，可有效控制工装成本。

为降低试制成本，进行多款缸体并行试制加工，在进行工艺设计时充分考虑工装的通用性是工装设计与制作时最应遵循的原则。图4所示为平板结构夹具，图5所示为方箱结构夹具。

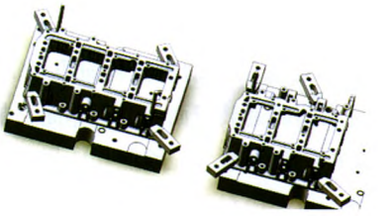

图4 平板结构夹具

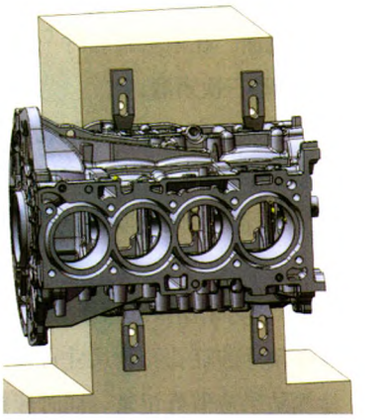

图5 方箱结构夹具

刀具的选型与采购

1.刀具的选型

刀具的选型对试制发动机缸体至关重要，任何细小的纰漏都有可能影响到试制缸体质量与试制的加工进度，做好刀具选型工作是做好试制工作首要工作。

缸体特征精度高、特征一致性要求高的特点，决定了加工缸体的刀具精度要求高。应具有以下特点：种类多，精度要求高，非标结构多。发动机缸体上各种类型的孔，如光孔、螺纹孔及小孔径深孔等，各种规格与结构形式的孔多达上百种，决定了需要购买的刀具种类多。其中非标类孔径的孔、大量的深孔及轴瓦槽的加工、止推面的加工、开档的加工、曲轴孔的加工及部分安装面的定位销孔的加工，都需要运用非标类刀具进行加工，决定了加工缸体需要定制的非标类刀具种类多。缸体上的许多定位孔，如合缸定位孔、加工定位的工艺销孔及曲轴孔等，精度等级均在6～7级，其中缸孔与曲轴孔的精度等级高达5级。

发动机缸体试制加工的成本主要由夹具制作费与刀具采购费构成，均占成本40%左右。并行试制多款发动机缸体，控制成本除了需要考虑夹具的通用性外，还必须考虑刀具的选型。上述三款柴油机缸体与两款汽油机缸体许多重要特征的尺寸都是相同的，如轴瓦槽的宽度与直径、气缸孔的孔径、曲轴孔的孔径、合缸定位销孔、工件与夹具联接的定位销孔均相同，所以在设计刀具时应尽可能兼顾多款缸体的加工。由于发动机缸体外形尺寸有差异，兼顾制作刀具的原则是按最大尺寸的缸体来制作刀具，这样可将小尺寸缸体加工包容其中。

为确保刀具的刚性，在满足加工要求的情况下刀具越短越好，刀杆的轴径则相反。精加工曲轴孔的刀具，业内普遍采用德国玛帕公司刀具进行加工，在试制阶段是否需要选择那么昂贵的刀具来加工曲轴孔值得商榷。笔者认为，目前在国内有很多刀具厂家都具备了制作试制缸体曲轴孔铰刀的经验，在缸体试制阶段，为降低刀具成本，可以选用国产品牌的曲轴孔铰刀来进行曲轴孔的试制加工，但需要说明的是，选择孔的公差中间值来制作铰刀是不可取的，受机床精度的影响，尤其是主轴的跳动精度，这种尺寸的刀具加工出的曲轴孔，往往会超出设计值上差0.005～0.008mm，所以曲轴孔精铰刀的直径应按曲轴孔的公差下差值或比下差值－0.003mm来制作。

我公司长期选用重庆某刀具厂家的曲轴孔铰刀来试制加工缸体曲轴孔，到目前已成功加工了近20款汽车发动机缸体，取得了很好的效果。珩磨头是加工气缸孔的必须刀具，选用进口珩磨头费用高，定制周期长，在缸体试制阶段完全可选用国产珩磨头进行气缸孔珩磨。事实证明，在不要求加工节拍缸体试制阶段，使用国产珩磨头加工出的气缸孔，完全能满足设计试制要求。我公司在长期试制缸体的加工过程中选

用了河南某公司制作的珩磨头，使用效果良好。细长孔的刀具设计，应充分考虑刀具的刚性，在满足加工要求的前提下，制作的刀具越短越好，柄部的直径则应尽可能大。

2. 刀具的采购

缸体试制阶段，刀具的投入是最大的，在刀具选型的过程中应邀请有经验的刀具商介入选型，事先做好询价，达到事半功倍。刀具采购方式可根据费用的多少，或比价采购或招标采购。比价采购程序简单，适合于小金额刀具采购，招标采购程序烦琐，公开透明，适合于大金额刀具采购，此次试制五款汽车发动机缸体刀具总投入50万元左右，我们采取比价的方式采购刀具，程序简单，缩短了刀具的采购周期。

建模与数控程序编制

缸体试制编制数控加工程序的工作量大，五款发动机缸体需要编制数控加工程序70多个，为减轻建模工作量，应争取要到委托加工方的数模，这样可以大大减轻数控编程建模工作量。同时，此举可以规避再次建模可能出现的错误，但就算是委托方提供了数模，在编制程序前也应结合工程图进行认真的尺寸校验，发现问题可及时将信息返馈委托方解决处理。

缸体加工一般是面与孔的加工，所以加工的程序一般较简单，每面的数控程序编制只需要在整体数模上截取每面的局部模型，通过数控编程软件转换成适合于数控编程的模型进行程序编制即可，缸体加工程序需要手工后处理的地方很多，甚至许多程序只能采用手工的方式进行编制，尤其是在编制气缸孔两侧面高低不一样的凸台面铣削加工、钻孔、攻螺纹及铣轴瓦槽的程序时，一定要仔细校验程序深度数值及进退刀时的程序点。一旦出现数据错误，易发生撞刀或撞机事故，这要引起足够重视，因为在试制阶段采购的刀具数量非常有限，一旦出现刀具折断现象，便会严重影响试制加工进度。

加工过程质量控制

发动机缸体加工涉及到的工艺方法较多，主要有切削加工、珩磨、气密性检测和清洁度检测等。无论哪一个环节出现问题，都会影响到缸体加工质量，所以确保缸体加工质量应对缸体加工过程进行全过程质量控制，其中气缸孔、曲轴孔和止推面等加工应作为关键控制点进行质量控制。

1.气缸孔加工的质量控制

气缸孔是发动机缸体的关键特征，尺寸公差为$d_0^{+0.02}$mm，圆柱度0.006mm，圆度0.008mm。同时对缸壁表面要求很高，要求有规则网纹，控制气缸孔的加工质量是关键，应设定为加工发动机缸体的主要质量控制点之一。确保缸孔加工质量，应合理安排工序，可进行粗加工，留余量1mm，精加工留余量0.05mm～0.06mm，最后采用珩磨加工至尺寸。其中，控制精镗缸孔工序尺寸是关键。因为缸孔圆柱度与圆度的好坏在该工序已基本形成，除了确保该工序的尺寸，还应尽可能降低精镗时孔壁的表面粗糙度值，因为该工序给后续珩磨所留余量少，如果表面太粗糙在后续珩磨时会造成局部位置珩磨不到，影响内壁的网纹质量，该工序检测缸孔尺寸可采用接杆千分尺进行检测。

珩磨工序是加工发动机缸体缸孔的最后一道工序，缸孔内表面既是装配面又是工作面，加工质量的优劣直接影响到发动机装配性能和使用性能。缸孔内表面的最终加工手段目前业界普遍采用平顶珩磨的工艺方法来完成。

缸孔平台珩磨工艺流程为粗珩→精珩→平台珩。为形成平台珩磨表面，在珩磨缸孔时一般需要进行粗珩、精珩、平台珩磨三次珩磨：

（1）粗珩　预珩阶段，主要是形成几何形状正确的圆柱形孔和适合后续加工的基本表面粗糙度。

（2）精珩　基础平台珩磨阶段，形成均匀的交叉网纹。

（3）平台珩　平台珩磨阶段，形成平台断面。

加工至最终尺寸的缸孔孔径尺寸可采用气动量仪进行检测，检测结果应做好记录，同时应按图样要求在规定位置打孔径分组标识。珩磨头在加工正式产品前，应用试件进行反复修正，以消除砂条上凸出的砂粒，从而避免在加工正式件时在缸体内壁出现划伤，影响质量。

2.曲轴孔加工的质量控制

曲轴孔是发动机缸体的又一关键特征，尺寸公差要求严格，属深孔加工，并且加工为断续加工，有难度。

确保曲轴孔的加工质量主要应做好以下工作：首先合理安排工序，曲轴孔加工分粗加工、半精加工、

精加工分步进行；其次设计制作合适结构与合适公差的精加工刀具，曲轴孔精加工刀具应分为三部分，分别是引入部分、切削部分与导向部分；再次应选择刚性较好、定位精度要求较好的机床进行曲轴孔加工，曲轴孔加工一般应选择进口高档设备，我公司在加工上述五款缸体曲轴孔时选择了德国HELLO公司MC300型卧式加工中心，加工质量稳定可靠；最后在加工过程中充分冷却对加工曲轴孔的表面质量至关重要。

曲轴孔的检测可采用气动量仪与三坐标测量机并行进行。上述五款发动机缸体共有三种孔径曲轴孔，如果三种孔径曲轴孔都制作多管气动量仪，费用会相对昂贵，在试制阶段可制作三种规格单管气动量仪即可满足检测要求，气动量仪主要是用于检测曲轴孔孔径，进行曲轴孔的孔径分组。

3.止推面、定位孔及深孔加工的质量控制

发动机缸体上的止推面、定位销孔及深孔加工也是较难保证的重要特征，这些特征的保证对刀具与设备的依赖性较强，尤其象定位销孔加工的合格与否除了依赖于刀具外，对选用的机床及切削参数都需要在实验中摸索。有时一把同样的铰刀选用同样的切削参数，在不同的机床上加工会出现不同的结果，所以在加工过程中需要随时抽检定位销孔。尺寸稳定后要固化切削参数，不要随意更改参数，更换刀具。止推面一般是采用三面刃铣刀来进行加工，受产品结构的影响，加工止推面的刀杆往往较长，刀具的整体刚性较差，应选择低转速、慢进给的方式进行切削加工，止推面的加工除选用专用三面刃铣刀来加工外，选用通用的加长镗刀调头加工也是可取的工艺方法。采用镗铣的工艺方法加工出的表面质量优于三面刃铣刀铣削；深孔加工过程中刀具易发生折断现象，加工细长深孔时应注意刀具的变化情况，刀具磨损后应及时更换刀具。

发动机缸体加工的质量过程控制是全方位的，任何一个环节的失误与纰漏都会影响到缸体的加工质量，除了上述列举的几个缸体关键特性与难加工点需要重点加以控制外，缸体的气密性检测、合缸、清洁度检测工序都需要重点控制。

结语

上述五款发动机缸体试制加工前进行了充分的论证，由于各项准备工作做得较充分，工艺设计合理，对加工过程的各环节工作控制有效，加上拥有前期的缸体试制经验，整个试制过程都比较顺利，五款发动机缸体共50件产品按客户要求在两个月内分四批交付客户，加工出的产品质量可靠，产品的一致性较好，赢得了客户的赞誉。

关键词：
缸体 并行试制 工艺
（收稿日期20130811）

专栏征稿函

十载历程 十年成长

喜迎《现代零部件》创刊10周年

2003～2013

时光如水，岁月如歌。《现代零部件》即将走过悠悠十载春秋，在2013年迎来创刊十周年。十年来，《现代零部件》在广大作者和读者的支持与帮助下，脚踏实地，一步一个脚印，取得了令人欣喜的成绩。回首创刊之初，她犹如一株树苗，在春天萌发嫩芽，沐浴阳光雨露，伴随季节更替，历经重重洗礼，一路茁壮成长。而今已有沉甸甸的十岁年轮，并在行业媒体中崭露头角。十年历程，您与我们携手并肩一起走过，一起见证，一路播洒，一路收获。

2013创刊十周年是《现代零部件》的大事、喜事，也是我们与大家共同分享的重要节日。为此，《现代零部件》特举办“喜迎《现代零部件》创刊十周年”主题征文活动，诚邀您参与其中，把您的所思、所想、所感、所悟与我们一起分享，您的每一句祝福，每一个建议，每一篇稿件都是我们不断创新、不断前进的源源动力！

征文内容及要求：在关注《现代零部件》不断成长的这十年，您的感想、体会和收获；汽车零部件的制造装备或加工工艺十年来的发展状况与趋势；汽车制造业十年来在新产品、新技术和新工艺方面的重大突破，以及给汽车产业带来的变化。来稿将刊登于每期杂志的“十周年专栏”。

您的参与，
就是对我们最大的支持！
在您的帮助下，
我们将立足于新起点，精心策划，不断进取！

投稿文体不限、字数不限。来稿请发至mcworld_ed@126.com，
注明“十周年专栏”，并附上您的近照及联系方式。
咨询电话：010-88379797转613