

结构与可靠性

基于 AVL-P&R 的某活塞环组仿真计算 及优化过程研究

程婷婷, 王金虎, 姚胜华

(湖北汽车工业学院, 湖北 十堰 442002)

摘要: 运用 AVL Excite P&R 软件建立了发动机活塞环组/缸套仿真模型, 通过改变环的主要结构尺寸参数和工作表面型线类型, 对活塞环的磨损、窜气和机油耗等性能进行了对比分析。得到了影响活塞环工作性能的主要因素及影响规律, 并提出了活塞环的优化方案。

关键词: 活塞环组; 仿真; 结构; 性能

中图分类号: TK423.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)06-0011-05

Resecorch on Simulation and Optimization Process of a Certain Piston Ring Set Based on AVL-P&R

Cheng Tingting, Wang Jinhu, Yao Shenghua

(Hubei University of Automotive Technology, Hubei Shiyan 442002)

Abstract: The simulation model of piston ring set and cylinder liner was built up based on AVL Excite P&R software. The main structure dimensions of the piston ring as well as the profile type of its working surface were changed to carry out comparative analysis on the performance such as wear, blow by and oil consumption. The main factors influencing the working performance of piston rings and the rules were obtained, thus an optimization programme was put forward.

Key words: piston ring set; simulation; structure; performance

0 引言

活塞环是影响发动机性能的重要零部件之一。为了适应车用发动机高动力、高经济性和低排放要求, 对活塞环的性能也提出了更高的要求, 因此活塞环的设计、仿真及改进越来越受到重视。不同类型的发动机, 其活塞环的结构类型和性能也有较大的差异, 掌握其性能、结构特点, 是延长发动机使用寿命和提高运行可靠性的重要保证^[1]。

1 活塞环工作情况

发动机活塞环可以分为气环和油环。其功能可以概括为以下几点: 密封燃气, 控制机油, 传热,

支承^[2]。活塞环是发动机中唯一三维运动的零件, 同时活塞环-气缸体是发动机中磨损最为严重的摩擦副。

1.1 活塞环的运动

活塞环在环槽内的运动十分复杂, 一般认为其基本运动有:

(1) 上、下运动

活塞环随着活塞的上升、下降, 在环槽内作上、下运动。活塞上行, 活塞环贴于环槽下侧面; 活塞下行则反之。但在膨胀行程中, 活塞虽下行, 但活塞环在很高的燃烧压力作用下, 也会贴于环槽的下侧面。所以四冲程发动机在除吸气行程外的各行程中, 活塞环多半是与环槽下侧面相接触的。

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2015-06-05

基金项目: 湖北省教育厅基金项目, B2011810。

作者简介: 程婷婷(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为发动机电控与仿真, E-mail: ctingting_2008@126.com。

(2) 径向运动

由于加工、磨损、紧固、温差等因素引起的气缸锥度和椭圆度,使活塞环在上下运动的同时在环槽内作一张一缩的径向运动。它是引起活塞环槽磨损的主要原因。

(3) 回转运动

回转运动与发动机的转速、气缸的变形等密切相关。回转运动对防止活塞环的偏磨、局部过热以及卡死是有利的,但它也可能引起各活塞环开口的重叠,使工作过程恶化。

(4) 不规则运动

在轴向上,当活塞环换向时,活塞环因惯性力有时会悬浮于环槽中,特别是当发动机高速运转时,活塞环悬浮次数会增多,导致气密性大大降低,窜气加剧。在径向上,如果活塞环与缸套表面接触不相适应,就会产生径向振动,当环与活塞发生共振时,活塞环工作表面将与缸套脱离接触,致使气密性、刮油性、传热性等活塞环的所有机能均降低。另外不规则运动还会加剧环与环槽磨损以及导致活塞环折断^[3]。

1.2 活塞环参数的选择

(1) 平均弹力:转速高时,平均弹力应提高,因为活塞速度快,由于节流作用,活塞环背压下降。活塞直径增加时,活塞环的工作应力增加,应适当减小初弹力,可以减小活塞环的工作应力^[4]。

(2) 自由端距:越大,工作应力越大。

(3) 径向厚度:厚度增加导致缸径厚度比 D/t 下降。

(4) 轴向高度:趋向于减小,目前最小为 1.5 mm,这样有利于减小活塞高度。

2 分析模型

在对活塞环运动、环间燃气压力、窜气量、磨损、机油耗等仿真计算前,须要建立活塞环动力学及机油耗基本理论和力学模型。

2.1 活塞环动力学模型

将每个活塞环简化为单质量模型,考虑扭曲(包括预扭角),所有运动方程满足牛顿第二定律,建立力学平衡方程,用积分法求得活塞环运动的动态成分^[5]。图 1 为活塞环受力情况。其中,轴向力有惯性力、环/套间摩擦力 $F_{\text{fric,ax}}$ 、气体力 $F_{\text{gas,ax}}$ 、机油阻力 $F_{\text{hydr,ax}}$ 和环弯力 F_{bend} 。径向力有张力 F_{resid} 、气体力 $F_{\text{gas,rad}}$ 、环/槽摩擦力 $F_{\text{fric,rad}}$ 和油膜压力 $F_{\text{hydr,rad}}$ 。

2.2 气体流动模型

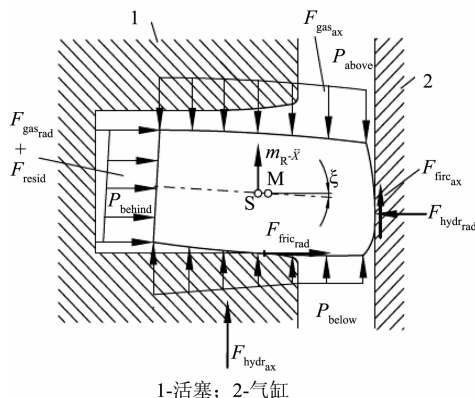


图 1 活塞环受力图

活塞环的密封属于迷宫密封模型。由环与活塞的运动关系,计算环在槽中的实际间隙和位置,确定环端开口间隙,计算环间容积。采用理想气体绝热流动模型计算燃气流动,及随质量和容积变化的气体压力。引用流量系数,由理想流动计算环与槽侧面间、环背后的气体质量流率。环间气体温度用环槽温度由内插法获得,用于气体流动和机油消耗计算^[5]。

2.3 液体动力学模型

首先采用迭代法求解扩展雷诺方程,考虑机油剪切和压力的作用,计算环/套间机油动态压力分布。环与缸套间的实际间隙非常小,致使间隙范围几乎与缸套表面粗糙度相当,可确定表面粗糙度及其方向对压力分布的影响。并根据每环残留机油量来确定补充机油量,获得随时间和位置变化的油膜结果^[5]。

2.4 机油耗

机油耗有以下几部分:缸套表面的蒸发、顶环上部累积机油的向上甩油、顶环端口窜入燃烧室的机油和活塞顶环岸的刮油。

3 仿真计算

采用 AVL Excite P&R 软件,通过输入活塞环结构参数,建立发动机活塞环组/缸套仿真模型;根据力学模型仿真计算活塞环的磨损、窜气和机油耗等;进而根据环的主要尺寸参数和工作表面型线类型,优化改进以降低活塞环的磨损、窜气和机油耗。

3.1 建模与参数输入

建立 EQ6105 发动机活塞环/缸套模型,如图 2。该模型包括缸套、顶环(气环)、第二道环(气环)、油环四个单元。其中顶环为桶面环,第二道环为锥面环,油环为双倒角刮油环。

须要输入的参数包括:全局参数、气缸压力、

热力学数据、缸套型面轮廓、活塞环工作表面型线定义、接触面摩擦及磨损参数、密封特性参数等。其中活塞环轮廓是活塞环整个参数定义的最重要部分。表 1、表 2 分别为该发动机基本参数及活塞环尺寸。

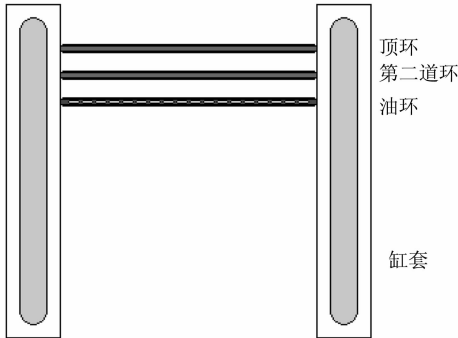


图2 EQ6105 发动机活塞环/缸套模型

表 1 发动机基本参数

转速/(r·min ⁻¹)	5 000
最高燃烧压力/MPa	1.592
缸径×行程/mm×mm	105×120
冲程	4
曲柄半径	60

3.2 计算任务定义与仿真

针对该模型定义三个计算任务：活塞环动力学计算、活塞环运动仿真和机油消耗计算。具体包括每道环的运动成分及受力、燃气在环间的流动、环间压力分布、窜气、润滑间隙、油膜厚度与分布、油膜液动承载能力、环与缸套间液动摩擦及磨损等；机油消耗计算结果具体包括各机理下的润滑油消耗（LOC），每种机理导致的润滑油流量曲线等。

表 2 活塞环尺寸

活塞环	顶环	第二道环	油环
轴向高度/mm	3.0	2.5	5.0
径向厚度/mm	4.5	4.0	3.7
闭口间隙/mm	0.41	0.47	0.425
结构型式	非对称桶面环	锥面环	双倒角刮油环

3.2.1 活塞环、环槽型线

通过仿真可以获得气环和油环的整体形状、工作表面型线、环槽形状，如图 3 所示。图中三道环与环槽配合背隙存在差异：顶环的背隙最小，且环岸与缸套配合紧密，这样减少了顶环漏光，从而减小窜气量和润滑油消耗；油环的背隙最大，且油环环岸与缸套之间预留较大间隙，为油环设置了减压腔，让润滑油更快地流通更新，从而使油环更好地刮油及布置油膜。

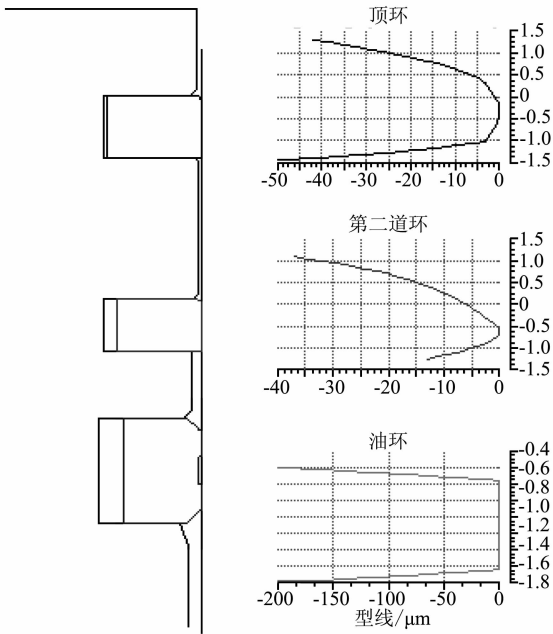


图3 活塞环和环槽表面型线

3.2.2 环的轴向相对运动

当活塞在气缸内做高速往复运动时，活塞从下止点到上止点的运动中，产生正负加速度，在减速过程中，活塞环由于自身惯性力克服了缸壁与环的摩擦阻力及作用在活塞环上的气体压力，就产生了相对运动。这种相对运动即为环的轴向振动，也可理解为环的短暂悬浮现象。图 4 是顶环、第二道环和油环相对于环槽的轴向相对运动速度图。可见应尽量减少或尽快衰减这种振动，以免发生共振。

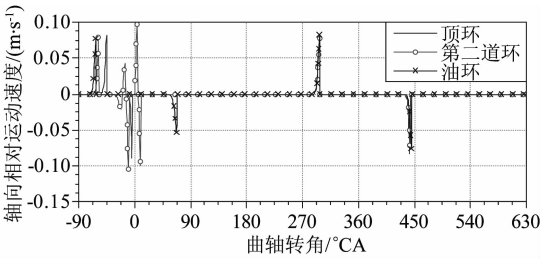


图4 环的轴向相对速度

3.2.3 摩擦与磨损

活塞环与缸套之间的摩擦主要为液动摩擦，当油膜出现破损时，就产生了粗糙接触摩擦，这种状态下会加剧环接触面的磨损。而且环与缸套的粗糙接触摩擦主要发生在上下止点附近，是因为此时活塞减速，油膜厚度下降，液动摩擦力逐渐减小，粗糙接触摩擦力逐渐增大，相应地活塞环接触面磨损率峰值也出现在相应区域内。比较发现，气环所受轴向摩擦力要高于油环，且持续时间较油环长。如图 5、6 所示，油环的磨损率要比气环低很多，这与油环本身的结构有关。

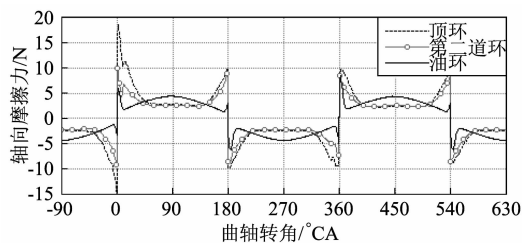


图 5 活塞环轴向摩擦力

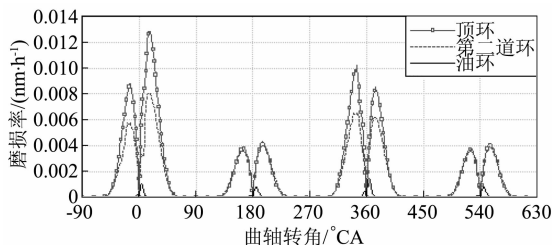


图 6 活塞环磨损率

3.2.4 窜气量

窜气主要发生在活塞第一次到达上止点前后，如图 7 所示。即压缩冲程终了到做功冲程这段行程内。结合图 4，由于活塞环的轴向振动，窜气行为发生在该位置是必然的。

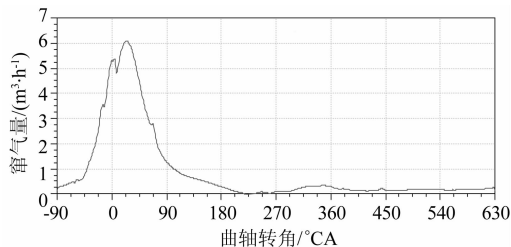


图 7 窜气量

3.2.5 机油耗

润滑油从缸壁的蒸发量占机油耗较大比例，峰值可达到 $2.65 \text{ (g} \cdot \text{h}^{-1})$ ，主要分布在做功冲程，其次分布在排气冲程。这是由于做功和排气冲程缸内温度最高，故机油蒸发量大。通过环闭口间隙窜油峰值为 $0.0125 \text{ (g} \cdot \text{h}^{-1})$ ，大致在活塞第一次通过下止点后。活塞顶岸刮油和甩油量较少，发生在活塞到达上止点附近。

3.3 活塞环结构优化

多目标优化是现代内燃机设计过程中必不可少的重要设计方法。本文主要研究顶环高度、顶环径向厚度、顶环闭口间隙、顶环工作表面型线对活塞环的磨损、窜气和机油消耗的影响，得出最优结构参数。

3.3.1 顶环高度

对于该发动机缸径而言，顶环高度的 SAE 标准为 $2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ ，本文分别采用等差高度对其进行分析。通过仿真获得其扭曲角、磨损率和机油耗

情况，如图 8、9、10 所示。

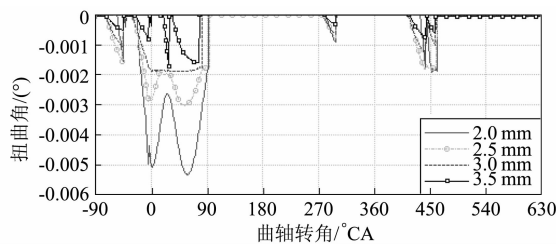


图 8 顶环扭曲角

由图 8 可知：环的高度过小，会使环产生大的纵向扭曲，将导致环折断。

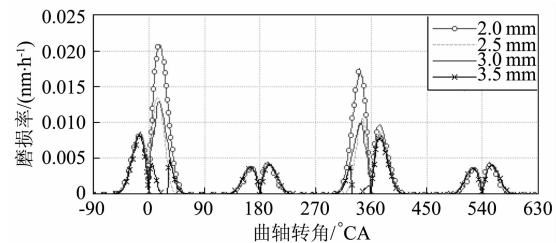


图 9 顶环磨损率

由图 9 可知：环高减小后接触面积减小，滑动面所承受压力升高，磨损率会增大。

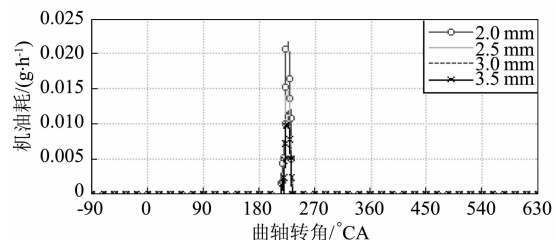


图 10 机油耗

由图 10 可知：环高度变化对窜油影响较明显，随环的轴向高度增加，通过闭口间隙的窜油量逐渐减小。

3.3.2 顶环径向厚度

查表可知该发动机缸径的顶环厚度 SAE 标准为 $4.04 \sim 4.52 \text{ mm}$ 。仿真结果表明，厚度过小，纵向扭曲增大，环易折断，如图 11 所示。环厚度对窜气和机油耗影响不明显。

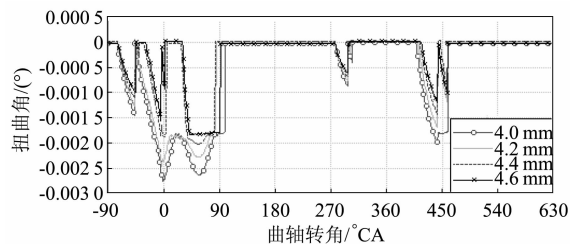


图 11 顶环扭曲角

3.3.3 顶环闭口间隙

顶环闭口间隙的 SAE 标准是: 0.330 ~ 0.635 mm。仿真结果表明随间隙增大, 窜气量和机油耗呈增加态势。如图 12 和 13 所示。

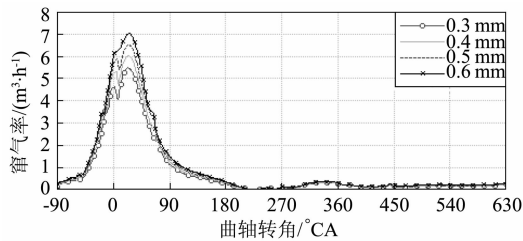


图 12 窜气量

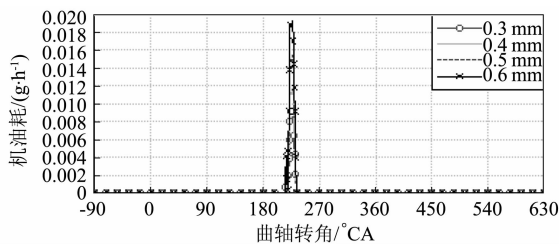


图 13 机油耗

3.3.4 顶环工作表面型线

本文分别对矩形面、锥面、圆面和非对称桶面四种型线进行了仿真计算, 结果见图 14。由图 14 可知: 非对称桶面的磨损率是最低的, 而且磨损区域小; 矩形面最差。这说明工作表面带有一定弧度的桶面环具有良好的磨损性能。由图 15 可知: 锥面环的下行刮油效果最好, 能有效阻止机油上窜, 但其防止甩油效果不好。综合考虑, 非对称桶面环整体效果还是最好。但要根据具体情况设计合适的桶面度, 过大反而增加机油消耗。

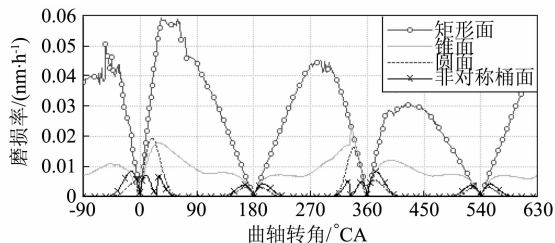


图 14 磨损率

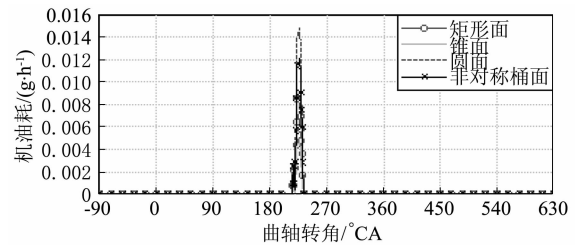


图 15 机油耗

4 结 论

通过以上仿真分析及对比, 可得出以下结论:

- (1) 顶环高度对窜油影响比较明显。适当的增大顶环高度可增大窜油通道行程, 增加窜油阻力, 进而降低机油耗。
- (2) 环的径向厚度对窜气及机油耗影响不明显, 但过小的厚度会增大扭曲运动, 使环发生振动, 甚至折断。
- (3) 闭口间隙对窜气和机油耗影响比较明显。为了减小窜气量和机油耗, 顶环的闭口间隙要适当小。
- (4) 非对称桶面环的磨损率最低, 设计时可以考虑采用这种环来提高使用寿命。

参考文献

- [1] 刁鹏. 4G6 发动机活塞环的优化设计 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [2] 陈家瑞. 汽车构造 (第 2 版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [3] 上海内燃机配件厂译. 活塞环 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1978.
- [4] 袁兆成. 内燃机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] AVL 公司. AVL 软件功能介绍 [R]. 2010.