

考虑弹性影响的活塞环动力响应

余 杨¹, *曾晓辉¹, 徐万海², *虞 钢¹

(1 中国科学院力学研究所, 100190; 2 天津大学, 300072)

摘 要: 在发动机正常运行过程中活塞环在环槽内的往复运动同时伴随着活塞环的弹性变形, 沿环向不均匀的变形会造成局部漏气等危害, 同时也是活塞环发生故障的主要原因之一。本文通过利用有限元软件分析对以上问题进行了分析得到了一定的结果。

关键词: 活塞环弹性变形; 径向位移; 局部漏气; 接触分析

DYNAMIC RESPONSES OF PISTON RING CONSIDERING ITS ELASTIC DEFORMATION

YU Yang¹, *ZENG Xiao-hui¹, XU Wan-hai², *YU Gang¹

(1 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, 2 Tianjin University, Tianjin, 300072)

Abstract: During the engine operation, the reciprocating motion of piston ring is accompanied by the piston ring elastic deformation in the groove. Nonuniform deformation along the circumferential will cause local blowby and other dangers. It is also the main reason for the failure of piston ring of. In this paper we use the finite element software to analyse these problems and give some certain results.

Key words: elastic deformation of piston ring; radial displacement; partial blowby; contact analysis

在高温、高压、高速及润滑困难的条件下工作的活塞环是发动机所有零件中工作寿命最短的。其中活塞环在环槽中的动态响应, 直接影响其封闭性。活塞环运动会使高温高压气体破坏汽缸壁与活塞间必需的润滑油膜, 继而出现金属间干摩擦和散热不良等问题, 引起发动机将出现起动困难、拉缸等不良状况。目前研究大多是在环截面二维模型下仅考虑刚体模态中活塞环失效、润滑能问题分析, 而鲜有对于活塞环三维模型的动力学分析以及弹性变形影响分析。

1 模型建立

本文以柴油机为例, 应用非线性有限元软件建立第一环的有限元模型。模型主要分析了活塞环正常作业时活塞环弹性变形对于整体运动的影响以及发动机运转中活塞环出现问题的特殊工况。

分析中首先建立活塞环、环槽以及气缸模型三维几何模型, 然后设定好环与环槽、环与缸壁的接触对关系。本模型主要考虑的是活塞环相对运动, 所以在假定环槽和气缸是静止不动的情况下施加边界条件。各模型均采用六面体单元并在控制网格疏密的同时保证了网格划分的质量。活塞环工作时的接触情况和压力分布受其端面形状和自由形状的影响且相当敏感, 因此在几何建模中尽量保证模型的准确性下, 将油膜所给的反力和气体压力按照发动机专业软件中得到的活塞环合力与合力矩施加, 进而给出力的边界条件, 最后利用软件显式进行动态分析。

作者简介: 余 杨(1988—), 男, 福建泉州人, 博士生, 主要从事结构动力学研究

*曾晓辉(1972—), 男, 湖南新化人, 副研究员, 主要从事工程结构动力响应和流固耦合研究(E-mail: zzh@imech.ac.cn);

*虞 钢(1958—), 男, 研究员, 主要研究高密度激光制造工艺力学(E-mail: gyu@imech.ac.cn);

徐万海(1981—), 男, 讲师, 主要从事工程结构动力响应和流固耦合研究。

2 计算结果分析

从图 1,2 中可以看出在某一时刻活塞环的径向位移以及垂向位移沿环分布是极不均匀的, 径向位移上一侧与油膜的接触状况良好而另外一侧则变形明显。垂向位移上沿环分布不均说明活塞环不仅存在面内的弯曲同时沿周向还有着不同程度的扭转。因此从保证活塞环使用性能以及安全性的角度出发, 在研究活塞环运动时考虑活塞环弹性是非常有必要的。

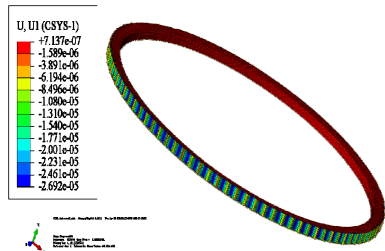


图 2 运动终止时刻活塞环垂向位移

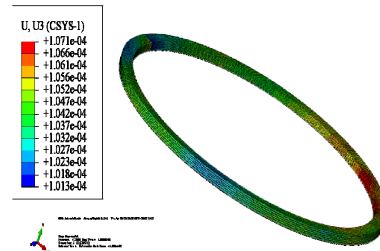


图 2 运动终止时刻活塞环垂向位移

图 3 为各冲程下活塞环径向位移的比较, 其中除压缩段其他变形量均放大 50 倍, 压缩段变形放大 5 倍以便于分析。从做功冲程开始活塞环弹性变形不断加大在吸气处基本达到峰值约为公称直径的 8.5%, 压缩段活塞环弹性变形逐渐减弱在点火后达到最小。活塞环径向的弹性变形就是这样一个循环往复的过程。需要注意的是在压缩段活塞环局部发生了较明显的弹性变形, 此时刻容易出现局部窜漏, 需要注意油膜的润滑情况。

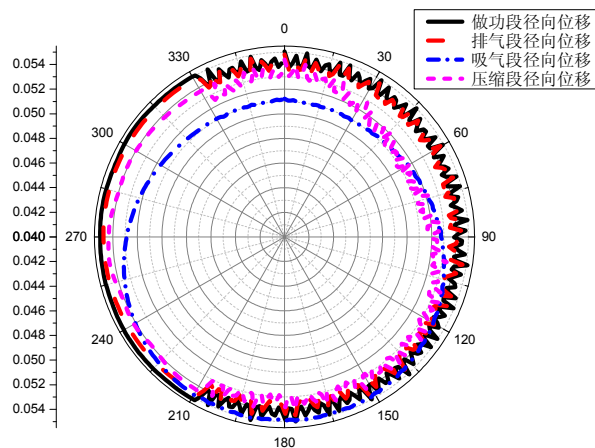


图 3 各冲程下活塞环径向位移的比较

对于活塞环全环的应力状态选取了活塞环模型运行一周期终止时刻与环口相距 60 度和 180 度圆心角处截面进行了压力分布图的绘制。可以看出在同一时刻活塞环上不同位置的应力状态沿截面高度及厚度变化规律以及峰值大小都有极大差异。如图 4 和图 6 比较与环口相差 60 度的径向应力峰值约为与环口相差 180 度处的 4 倍; 图 5 和图 7 之前垂向应力峰值上更是相差 6 倍。联系上文中所提到的环上各点径向位移以及垂向位移的差异, 活塞环的弹性扭曲是比较剧烈的。

显著的弹性扭转对于活塞环的动力响应影响会非常大。其产生原因主要包括两方面: 其一, 弹性扭曲使得活塞环的外径部分与上槽长期接触, 这样封闭了槽上沿气体流动的路径。其二, 弹性扭曲使得环与槽下沿保持一定宽度的间隙, 第二槽脊中的气体不断进入, 间隙中气体压力与第二槽脊大致相同。为了克服惯性力以及气体压力, 气缸压力作用于外径上部方向指向槽内。这样活塞环被压入槽内, 活塞环与气缸内壁之间产生很大的间隙, 直接发生窜漏, 增大油耗, 影响油循环。整个活塞环与曲线梁相类似, 动态响应更为复杂。尤其是对于活塞环粘环、磨损等特殊情况下, 其弹性变形也应该是需要考虑; 同时活塞环的轴

向宽度相对较小，径向厚度又较大，在外载荷作用下可能产生弯扭共振现象，这也是不可忽视的问题。

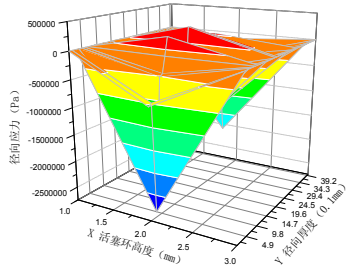


图 4 与环口差 60 度圆心角处截面径向压力分布图

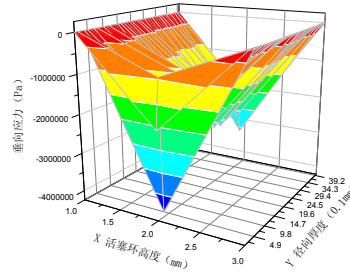


图 5 与环口差 60 度圆心角处截面垂向压力分布图

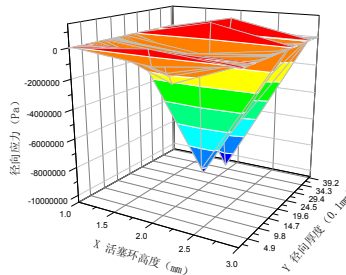


图 6 与环口差 180 度圆心角处截面径向压力分布图

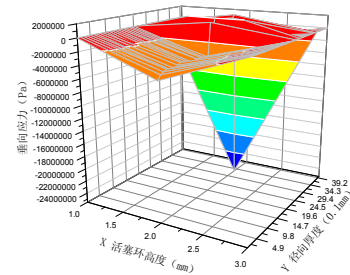


图 7 与环口差 180 度圆心角处截面垂向压力分布图

3 发动机运转时所产生几种问题的模拟分析

3.1 粘环

活塞环粘环不仅会导致发动机工作不正常、窜气、增加油耗，而且会导致活塞环折断。粘环后活塞环环向及径向的运动都会沿周向有明显变化，活塞环的弹性变形将会加剧，是活塞环在发动机中的致命事故。本文主要考虑因油泥堆积物胶结等引起的粘环，对于与环口相距 180 度位置的截面与槽底面粘连的情况进行了模拟分析，结果如下图。

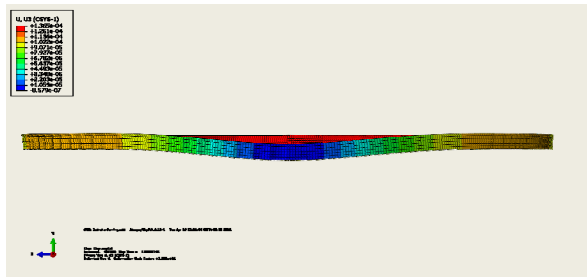


图 8 粘环垂向应力集中处位移情况

通过分析可以看出活塞环在局部产生了较大的变形，这会致使窜气产生，发动机机能下降，机油消耗增加。粘环附近活塞环应力集中明显，很容易发生折断现象。

3.2 偏向磨损

偏向磨损在活塞环整个圆周的各部分显著不同，对于活塞环中弹性变形较大的部分进行偏磨处理，磨损厚度为 0.05 毫米。在偏磨处活塞环的弹性变形有一定的增大，不规则的径向变形势必会更加容易发生窜气现象。同时活塞环各方向应力都有增大，其中径向应力增幅较大，这会在一定程度上破坏油膜厚度。如果不采取措施最后甚至会导致折断。

表 1

	正常活塞环	偏磨后活塞环
比较区域内最大径向位移/mm	0.02692	0.04424
比较区域内最大径向应力/MPa	11.16	14.71

3.3 过度磨损

在维护保养不善的情况下，活塞环就会出现过度磨损，其沿环四周大致均匀，不仅存在于径向上，在垂向高度上也会有显著的变化，首环尤为严重。因此对于首环模型进行如下磨损处理，垂向磨损高度 0.05 毫米径向磨损厚度 0.05 毫米沿环轴向均匀。数值模拟中模型在排气段即变形过大终止运算。虽然不像偏向磨损会引起折断，但环整体变形已进入塑性阶段，直接导致活塞环失效需要进行更换。

通过以上分析可以看出活塞环首先要避免偏向磨损的出现，以保证发动机能够正常运行，减少机油消耗提高发动机的性能；同时为了延长活塞环的使用寿命也要注意活塞环的保养。

4 讨论

本文计算数据是根据发动机计算软件中活塞环部分对其截面二维受力分析，通过力和力矩的平衡关系，合理施加在三维活塞环上；但由于实际上活塞环的预张力以及活塞环的接触压力沿周向分布是不均匀的，并且预张力和接触压力是预应力。为了保证计算的准确性本文所涉及的计算中已将活塞环的预张力和接触压力根据平衡条件去除，即活塞环在自由状态下是圆，无放入气缸中预应力。为进一步提高分析的准确性，可建立流固气耦合模型进行更细致的分析。

5 结论

在对于活塞环动力学响应的研究之中，活塞环弹性是不能忽视的重要组成部分，它会引起发动机运转中诸多问题。将二维活塞环润滑计算模型与三维动力学模型相结合才能更好得解决活塞环整体响应问题。

参考文献：

- [1] Dan Richardson, Understanding the fundamentals of piston ring axial motion and twist and the effects on blow-by[C], Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division 2009 Spring Technical Conference, 2009.
- [2] T Tian, Dynamic behaviours of piston rings and their practical impact. Part 1: ring flutter and ring collapse and their effects on gas flow and oil transport[M], IMechE ASME, 2002.
- [3] Krisada Wannatong, Simulation algorithm for piston ring dynamics[J], ScienceDirect, 2008.
- [4] T Tian, Modeling the performance of the piston ring-pack in internal combustion engines[D], PHD thesis. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. June 1997:89—122.
- [5] 根茨布尔克, 谢仲群. 活塞环理论[M], 机械工业出版社, 1986.