

阿特金森循环活塞形状研究

Research on Piston Shape in Atkinson Cycle

王振喜 陈海娥 李红洲 刘耀东 段加全 武珊
中国第一汽车股份有限公司技术中心

摘要：本文采用 3 维 CFD 软件 Converge 对一汽 1.3L PFI 阿特金森循环发动机进行模拟，分析了不同活塞形状对缸内流动及燃烧速率的影响。结果表明，活塞凹坑的直径、深度及凸台的高度对缸内流动及燃烧有较大的影响，活塞凹坑和凸台有较大的优化空间。

关键词：阿特金森循环 活塞凹坑 活塞凸台 Converge

Abstract: The influence of piston shape on flow and combustion rate in FAW 1.3L PFI Atkinson cycle Engine was simulated by CFD software Converge. The results show that the diameter, depth of the piston pit and the height of the piston bulge significantly influence flow and combustion rate in cylinder, and piston pit and piston bulge have special optimizations available.

Key words: Atkinson cycle Piston pit Piston bulge Converge

1 概述

随着油耗法规的日益严格，各大汽车厂商面对巨大的压力，一些降低燃油消耗的新技术应运而生，阿特金森循环就是其中之一。相对于传统发动机，阿特金森循环发动机主要通过采用进气门晚关策略和提高压缩比实现。阿特金森循环能通过降低部分负荷工况的泵气损失来提高燃油经济性^[1-4]，但由于改变了进气门关闭相位，其缸内湍动能水平明显减弱，燃烧速度降低^[5-6]。

为了研究能否通过改变活塞形状达到提高阿特金森循环燃烧速度的目的，本文采用 Converge 对 1.3L PFI 阿特金森循环发动机不同形状的活塞方案进行缸内流动及燃烧模拟，分析活塞凹坑的直径、深度及凸台的高度对缸内流动及燃烧的影响，为阿特金森循环发动机的活塞设计提供理论依据。

2 方案介绍

阿特金森循环发动机是由一汽 1.3L PFI 发动机改进而来，其进气门升程曲线包角由 260 °CA 增加到 301.6 °CA，压缩比由 10.9 提高至 13。压缩比 13 通过改变活塞实现，活塞基本形式如图 1 所示。为了保证高压缩比及避让火花塞，在活塞中部有凸台及凹坑特征。活塞凹坑直径、凹坑深度、凸台高度的定义如图 2 所示。

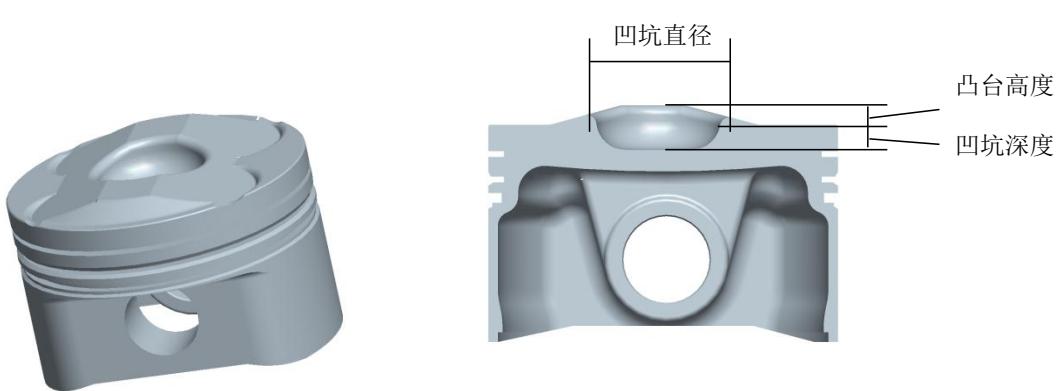


图 1 活塞基本形式

图 2 凹坑直径、凹坑深度、凸台高度定义

为了验证凹坑直径、凹坑深度、凸台高度对缸内流动及燃烧速度的影响，设计 4 种压缩比 13 活塞方案，其结构如表 1 所示，右侧为进气侧。方案 1、2、3 凸台高度相同，其中方案 1 为基础方案，其凹坑形状为圆柱形；方案 2 将凹坑形状由圆柱形变为球形；方案 3 将凹坑直径增大 10mm，同时凹坑深度减小；方案 4 将凸台高度减小 2mm，凹坑直径不变，深度减小。

表 1 活塞结构

方案 1	方案 2	方案 3	方案 4

3 计算模型及边界条件

与传统 CFD 软件相比，Converge 在计算过程中自动生成三维计算网格，节省了大量划分网格时间。

计算模型基础网格采用 2mm，对速度梯度和温度梯度自适应加密至 0.5mm，最大网格数 100 万。湍流模型选取 RNG $\kappa-\epsilon$ 模型，燃烧模型选取 G-Equation 加化学反应机理（38 组分，59 反应）。

计算工况选取 4000rpm 全负荷，图 3 所示为原始气门升程曲线及增大进气包角后的阿特金森循环气门升程曲线，720 °CA 为压缩上止点。进气道入口设定质量流量和温度边界，排气道出口设定压力和温度边界。计算时刻为 270 °CA 至 850 °CA，点火时刻为 716.6 °CA。

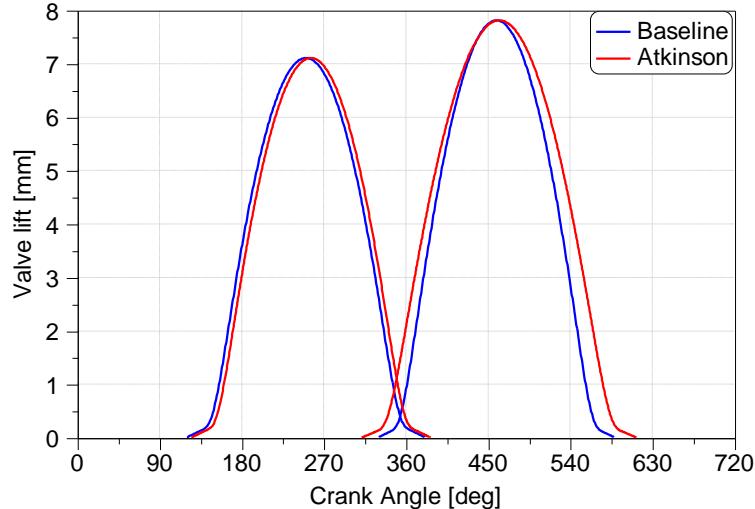


图 3 气门升程曲线

4 计算结果

4.1 滚流比

图 4 所示为缸内计算得到的瞬态滚流比，只改变凹坑大小与深度的方案 2 与方案 3 在进气行程滚流水平无明显变化，但在压缩行程，滚流水平相对于方案 1 提升明显。因此，将凹坑直径加大或增加凹坑深度都利于压缩行程滚流运动的发展。方案 4 相对于方案 1 凸台高度下降了 2mm，减小了对滚流运动发展的阻碍，因此在进气及压缩行程滚流均有明显的提升。

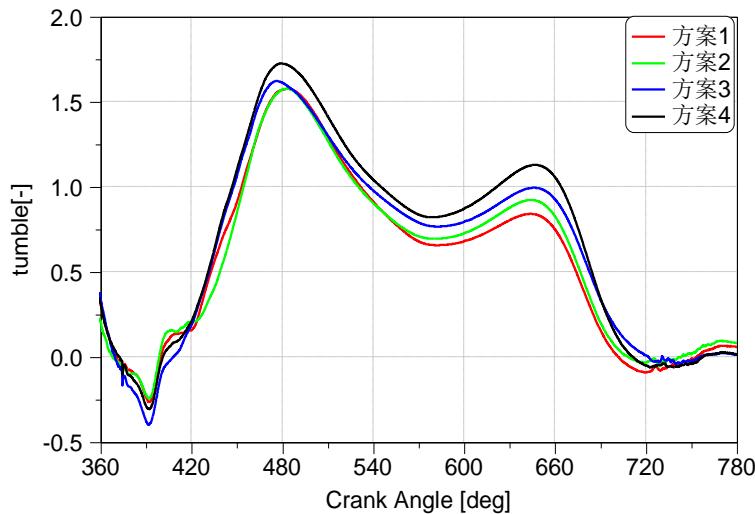


图 4 滚流比

4.2 湍动能

图 5 所示为缸内计算得到的湍动能，进气行程各方案湍动能无明显差异；压缩行程前期，方案 2 及方案 3 滚流保持性较好，未能有效的转化为湍动能，导致湍动能偏低，方案 4 湍动能保持性较好，处于较高水平。压缩行程后期，方案 2 及方案 3 湍动能耗散较慢，与方案 1 湍动能水平相当，方案 4 湍动能保持性较好，依然处于较高水平。因此，改变凹坑的直径及深度对压缩行程后期湍动能的贡

献不大，但是降低凸台高度能够明显提高压缩行程的湍动能水平。

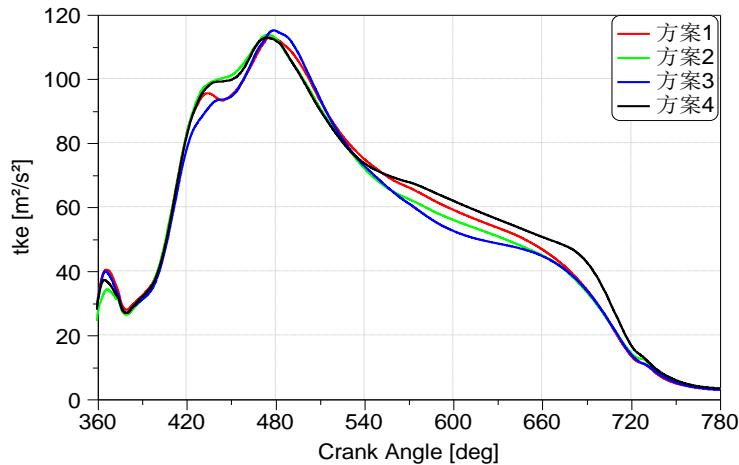
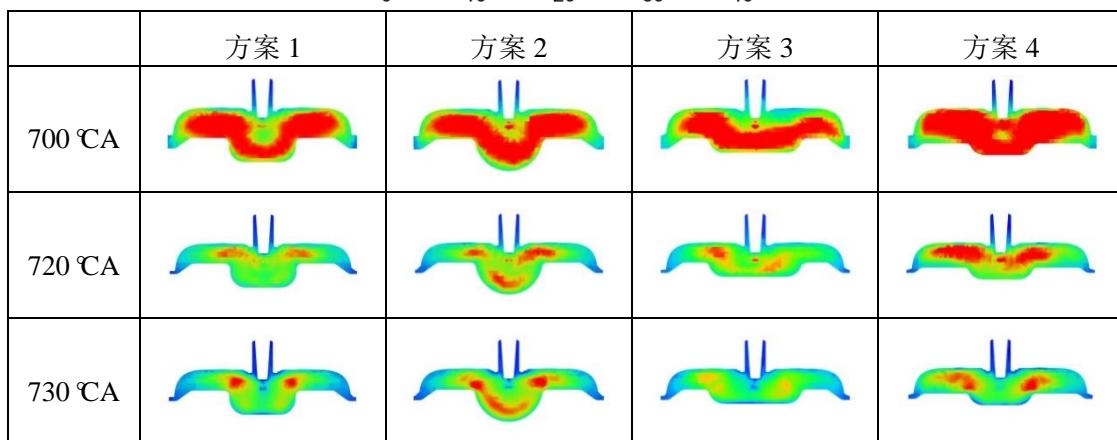
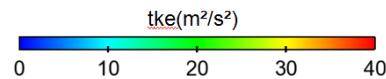


图 5 湍动能

各方案上止点附近湍动能的分布见表 2，方案 4 湍动能整体水平明显高于另外 3 个方案，但是方案 2 能在凹坑内形成较高的湍动能。

表 2 湍动能分布



4.3 放热率

图 6 为缸内瞬时放热率及累积放热率，方案 2 由于在压缩上止点附近时刻在凹坑内形成较高的湍动能，点火之后火焰在凹坑内能迅速传播，提高燃烧速度，缩短燃烧持续期；方案 3 凹坑内湍动能较低，燃烧初期火焰无法快速传播，燃烧速度变慢；方案 4 凹坑内湍动能水平较低，初期燃烧速度并未加快，但得益于降低凸台高度后缸内湍动能整体水平的提升，其燃烧速度加快。

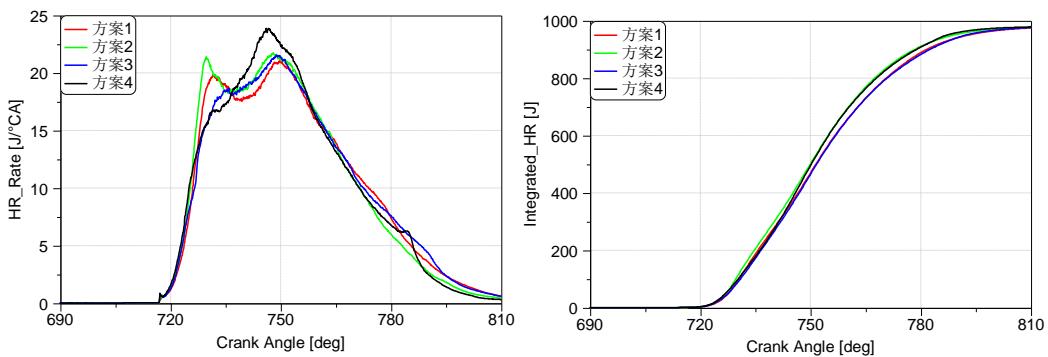


图 6 瞬时放热率、累积放热率

图 7 为各方案滞燃期及燃烧持续期的对比，方案 2 滞燃期和燃烧持续期最短，燃烧效果最好，方案 4 次之，方案 3 最差。

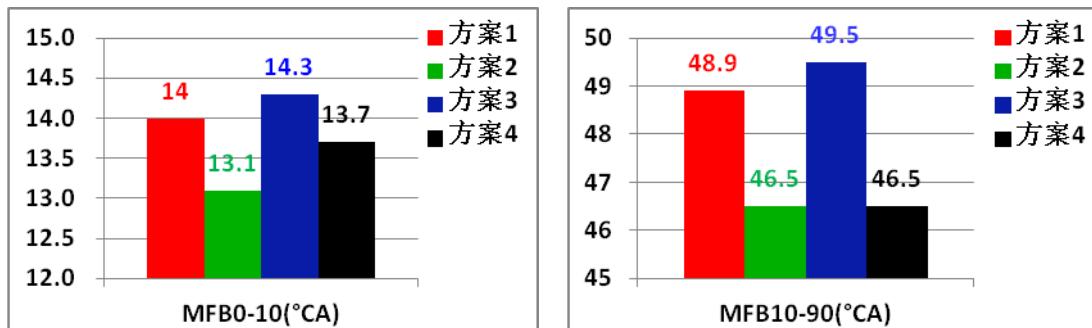


图 7 滞燃期、燃烧持续期

4.3 缸内温度

图 8 为各方案缸内温度对比，方案 2、4 缸内温度相对较高，进一步证明了方案 2、4 能够提高燃烧速度。方案 3 与方案 1 较为接近，未能改善燃烧速度。

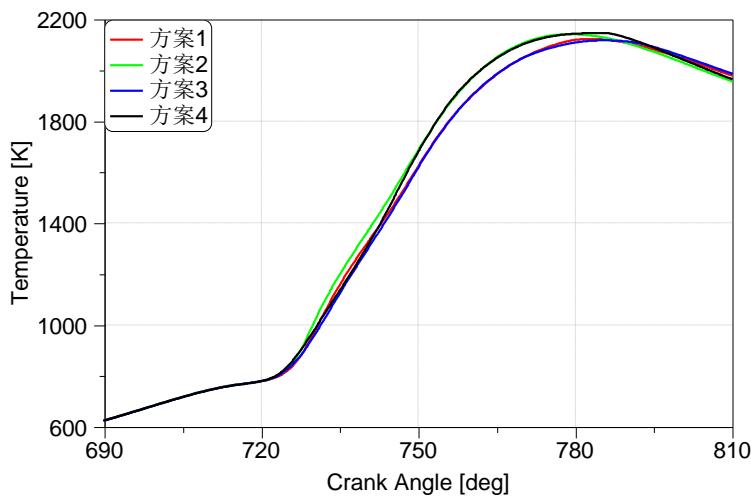
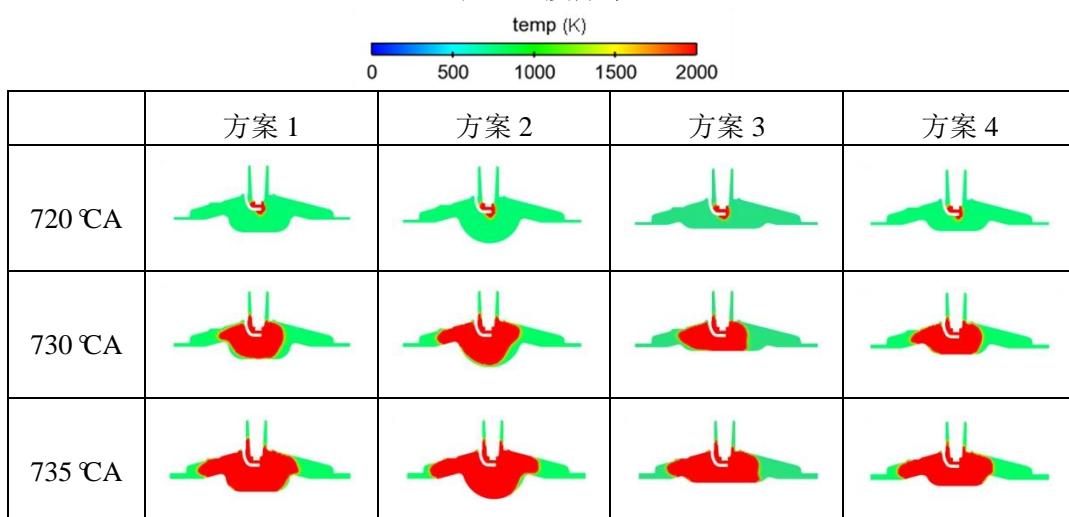


图 8 缸内温度

表 3 为各方案在压缩上止点附近的温度分布，方案 2 由于凹坑内湍动能较高，初期燃烧速度明显高于其它方案。

表 3 温度分布



5 结论

为了研究凸台高度、凹坑直径及深度对阿特金森循环发动机缸内流动及燃烧的影响，本文基于三维 CFD 软件 Converge 对一汽 1.3L PFI 阿特金森循环发动机 4 种活塞方案进行模拟分析，结论如下：

- 1) 方案 2 的球形凹坑能有效提高压缩行程的滚流水平，在压缩上止点附近时刻利于在凹坑内形成较高的湍动能，点火之后火焰在凹坑内能迅速传播，提高燃烧速度，缩短燃烧持续期。
- 2) 方案 3 的大凹坑在压缩行程能显著提高滚流水平，但对湍动能影响较小，点火之后火焰无法在凹坑内快速传播，燃烧恶化。
- 3) 方案 4 降低凸台高度能明显提高滚流及湍动能水平，加速燃烧。

凸台高度、凹坑直径及深度对阿特金森循环发动机缸内的流动及燃烧影响较大，有较大的优化空间。采用较小较深的凹坑及降低凸台高度为提高燃烧速度的两种途径。

6 参考文献

- [1] James Taylor, Neil Fraser. Benefits of Late Inlet Valve Timing Strategies Afforded Through the Use of Intake Cam In Cam Applied to a Gasoline Turbocharged Downsized Engine. SAE Paper 2011-01-0360, 2011.
- [2] Fredrik Söderberg, Bengt Johansson. Load Control Using Late Intake Valve Closing in a Cross Flow Cylinder Head. SAE Paper 2001-01-3554, 2001.
- [3] Lubomir Miklanek, Oldrich Vitek, Ondrej Gotfryd, Vojtech Klir. Study of Unconventional Cycles (Atkinson and Miller) with Mixture Heating as a Means for the Fuel Economy Improvement

- of a Throttled SI Engine at Part Load. SAE Paper 2012-01-1678, 2012.
- [4] Yu Wan, Aimin Du. Reducing Part Load Pumping Loss and Improving Thermal Efficiency through High Compression Ratio Over-Expanded Cycle. SAE Paper 2013-01-1744, 2013.
- [5] DR.-ING. Martin Scheidt, DR.-ING. Christoph Brands, Matthias Kratzsch, Michael Gunther. Combined Miller/Atkinson Strategy for Future Downsizing Consetps. MTZ.
- [6] Paul Ferrey, Yves Miehe, Cyrille Constensou, Vincent Collee. Potential of a Variable Compression Ratio Gasoline SI Engine with Very High Expansion Ratio and Variable Valve Actuation. SAE Paper 2014-01-1201, 2014.