

不同米勒循环方案对天然气发动机缸内流动与燃烧的影响

Effect of different Miller cycle schemes on flow and combustion in cylinder for gas engine

包宁 金华玉 吕晓刚 胡芳 李达

一汽解放商用车开发院

摘要: 本文采用 converge 软件对一台天然气发动机进行建模,研究了进气门早关和晚开对发动机缸内流动和燃烧的影响。研究结果表明,进气门早关会导致缸内涡流比降低,湍动能中心更靠近燃烧室底部。进气门晚关正相反。通过对比不同结构的燃烧室,发现进气门早关更适合采用缩口燃烧室,进气门晚关更适合采用敞口燃烧室。

关键词: 天然气发动机、米勒循环、燃烧、converge

Abstract In this paper, a natural gas engine is modeled with converge software, and the effects of intake valve early and late closing on the flow and combustion in the cylinder are studied. The results show that intake valve early closing will reduce the swirl ratio in the cylinder, and the center of turbulent kinetic energy is closer to the bottom of the combustion chamber. The case of intake valve late closing is on the contrary. Comparing the combustion chambers with different structures, it is found that intake valve early closing is more suitable for the use of the reduced combustion chamber and intake valve late closing is more suitable for the use of the open combustion chamber.

Key words: gas engine, Miller cycle, combustion, converge

1. 引言

目前的运输业主要采用化石燃料,化石燃料燃烧产生大量二氧化碳,引起温室效应。人们已经认识到二氧化碳对环境的危害,各国也都推出了愈加严格的排放法规。降低二氧化碳排放成为全世界的共识。相比于柴油,天然气的碳含量更低。采用天然气作为车用燃料,能够大大降低二氧化碳排放。同时,每百公里天然气的消耗价格也比柴油要便宜。因此,天然气发动机成为了各个发动机厂的研发重点,同时也是市场的热点。

米勒循环已经在很多汽油机上得到应用[1]。通过进气门的早关或晚关,能够利用更高的进气压力来降低泵气损失,从而提高热效率[2]。目前,天然气发动机主要采用当量燃烧的方式,对于基于柴油机改造的天然气发动机进气量是足够的。因此,非常适合利用米勒循环提高热效率。

本文主要研究了进气门早关和晚关对天然气发动机缸内流动和燃烧的影响。

2. 计算模型和边界条件

2.1 计算模型

本文利用 converge 2.2 软件针对某天然气发动机进行建模,计算模型如图 1 所示。本文 CFD 仿真过程从排气门打开前 5° CA 开始,包括完整的排气、进气、压缩、燃烧过程。采用 G 方程求解燃烧过程,采用初始化 G 值的方法模拟点火过程。同时采用 RNG k- ϵ 湍流模型。模型基础网格尺寸为

4mm，自适应加密到 1mm，点火区域加密到 0.5mm。计算过程中最大网格数 100 万，计算时间 24 小时。

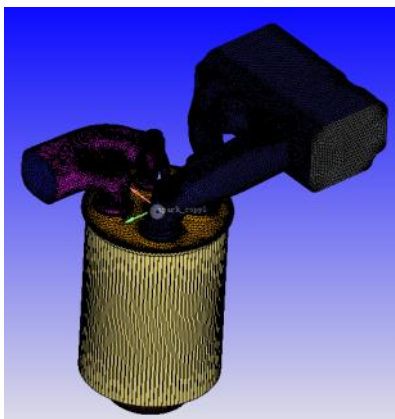


图 1 计算模型

2.2 边界条件

利用 GT-Power 软件对不同进气门关闭时刻进行模拟。在保证能够达到相同扭矩的情况下，从中选出油耗最低的进气门早关方案和进气门晚关方案。三维计算中的边界条件来自于 GT-Power 软件的计算结果。计算中采用的气门升程曲线如图 2 所示。

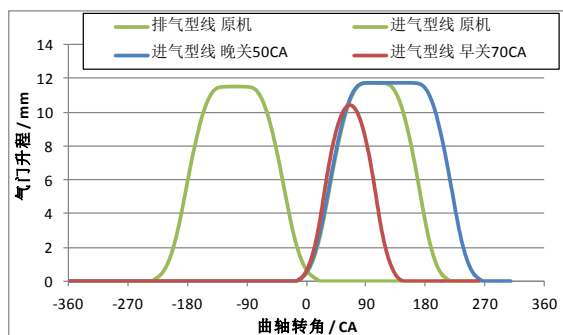


图 2 气门升程曲线

本文还研究了进气门早关和晚关与燃烧室的匹配，分别利用缩口燃烧室和敞口燃烧室在进气门早关和晚关情况下进行模拟。

3. 结果分析

3.1 不同进气门关闭时刻对缸内流动的影响

图 3 是不同进气门关闭时刻缸内质量的变化，其中 360° CA 是压缩上止点。可以看出，在进气门早关时缸内的气体质量增加的最快。这是由于进气门打开时刻变短，同时又要保证扭矩不变，所以进气压力提高了，进气变快。在进气门晚关时，缸内质量在压缩行程有明显减少的阶段，说明有部分进入缸内的气体被排到进气道内。由于一维计算时我们保证扭矩不变，因此进气量应该相差不多。但进气门晚关时，最终缸内的质量明显少于进气门早关，这可能与通过进气门进入和流出缸内的流量系数设置有关。现实中应该是不一样的，但一维计算是采用同一个值。

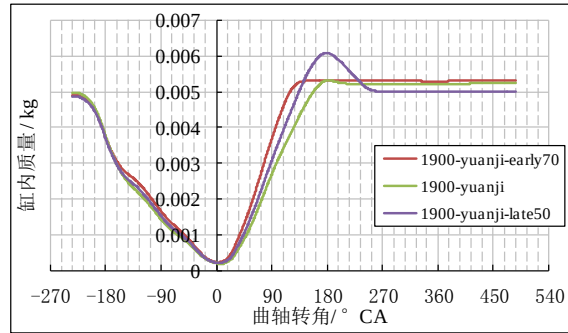


图 3 不同进气门关闭时刻缸内质量的变化

图 4 是不同进气门关闭时刻缸内涡流比的变化。可以看出，在初始涡流比一样的情况下，进气门早关的涡流比明显要低。而与进气门正常关闭时刻相比，进气门晚关的涡流比会稍微高一些。可见，进气门晚关有利于增大涡流比。

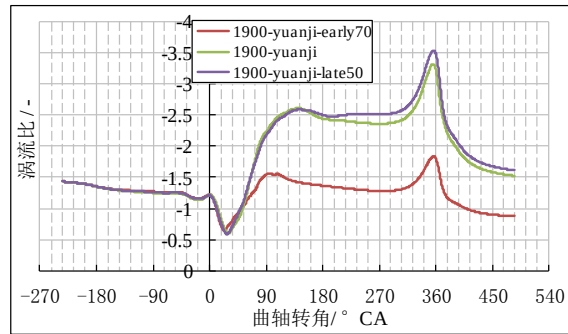


图 4 不同进气门关闭时刻缸内涡流比的变化

图 5 是不同进气门关闭时刻缸内湍动能的变化。可见，进气门晚关与正常关闭的湍动能基本一致。而进气门早关的湍动能在进气行程较低，在压缩行程较高，但在压缩止点附近又较低。

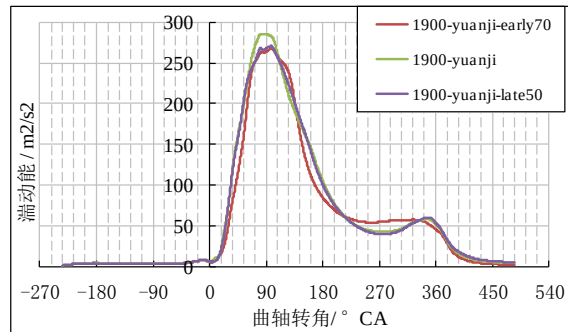


图 5 不同进气门关闭时刻缸内湍动能的变化

图 6 是不同进气门关闭时刻缸内速度场。可以看出，进气门早关时缸内的速度明显较低，并且缸内气流方向不规则。这种不规则的流动导致了在压缩行程中湍动能的增加，但是随着活塞上行，流动越来越规则，湍动能也随之下降。进气门晚关时缸内的速度明显更高，且缸内流动较规则，已形成较明显的涡流。由于 209° CA 时，晚关的进气门还没有关闭，所以缸内的速度向上的分量比较明显。

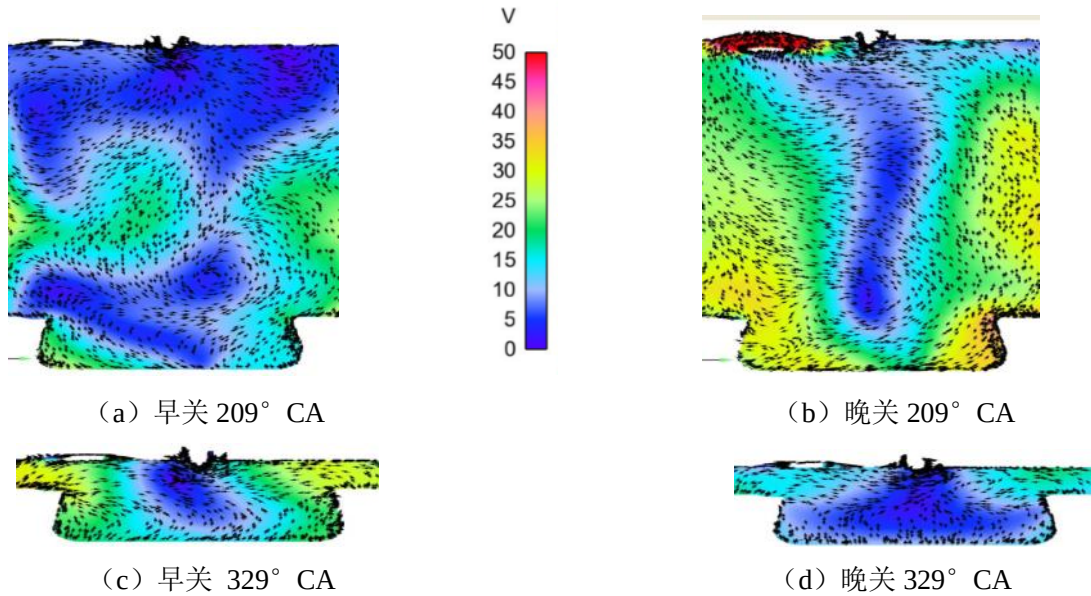


图 6 不同进气门关闭时刻缸内速度场

图 7 是不同进气门关闭时刻缸内湍动能。可见，在 209° CA 时，进气门早关时缸内湍动能中心位于气缸中心。进气门晚关时湍动能中心偏上，这与此时进气门还没有关闭，缸内气体向上运动有关。这导致了点火时刻进气门早关的缸内湍动能中心更靠下，进气门晚关的缸内湍动能中心更靠上。

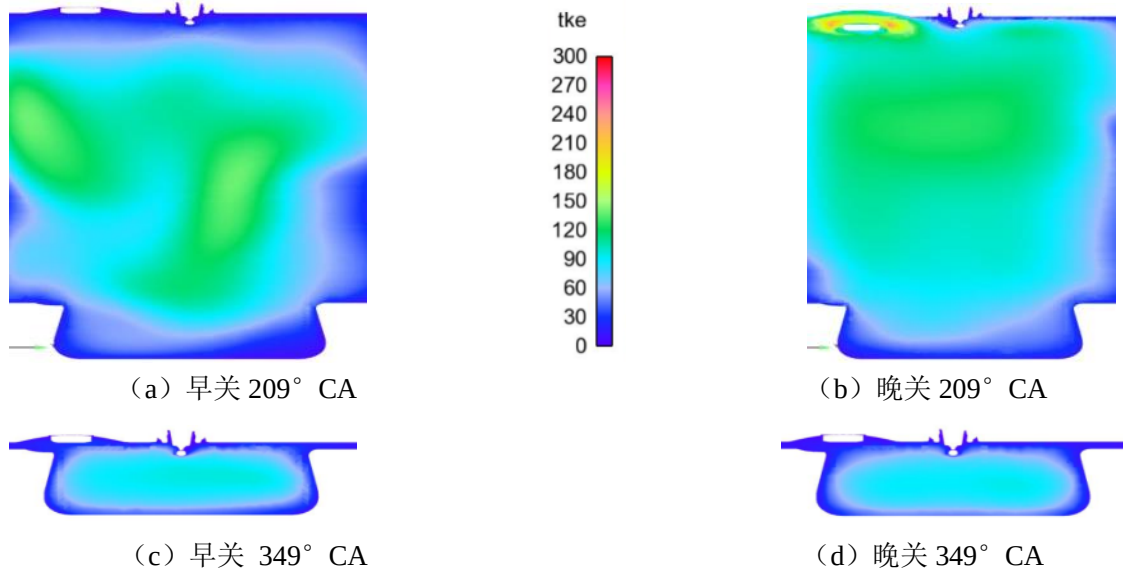


图 7 不同进气门关闭时刻缸内湍动能

总之，进气门早关和晚关对缸内流动和湍动能影响很大。

3.2 进气门早关时不同燃烧室的燃烧过程

图 8 是在进气门早关的情况下，不同燃烧室的放热率和燃烧持续期对比。可以看出，在进气门早关的情况下，缩口燃烧室的燃烧持续期更短，燃烧更快。从放热率来看，初始敞口燃烧室的燃烧更快，但中后期缩口燃烧室的燃烧更快。

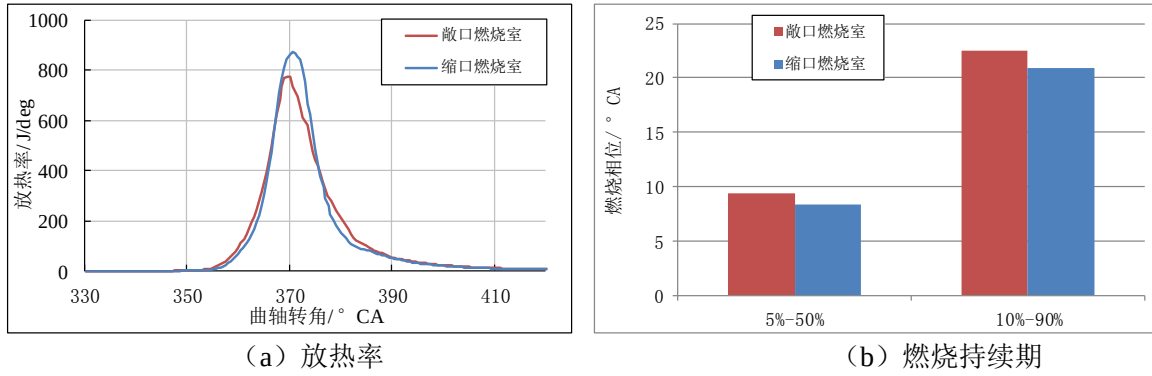


图 8 不同燃烧室对比

图 9 是在进气门早关的情况下，不同燃烧室的湍动能对比。可以看出，缩口燃烧室的湍动能一直大于敞口燃烧室。

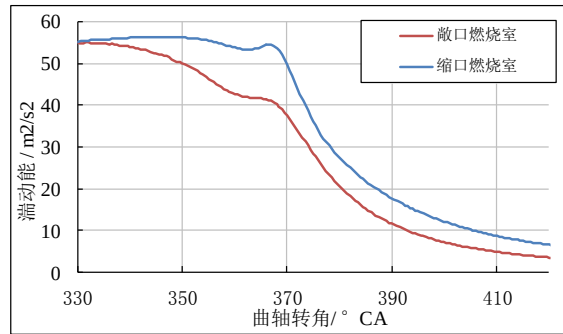


图 9 不同燃烧室的湍动能对比

图 10 是在进气门早关的情况下，不同燃烧室的燃烧过程对比。可以看出，360° CA 时，敞口燃烧室燃烧更快，但 376° CA 时缩口燃烧室的燃烧过程更快。

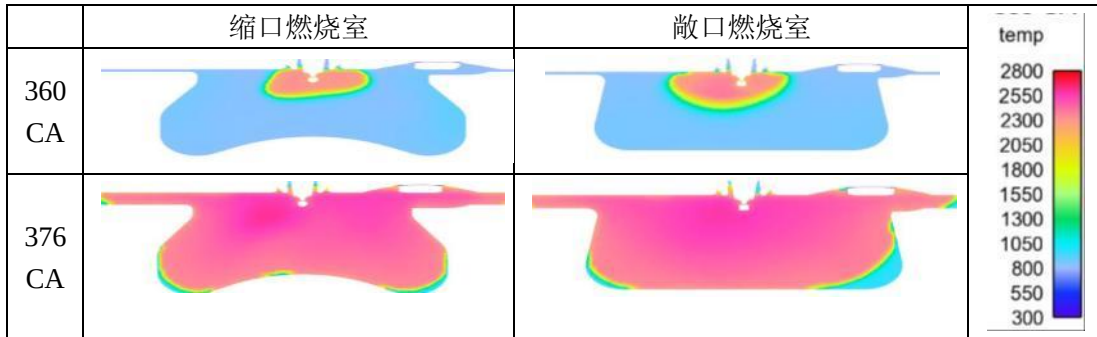


图 10 不同燃烧室的燃烧过程对比

图 11 是在进气门早关的情况下，不同燃烧室的湍动能切图对比。可以看出，虽然缩口燃烧室缸内的总体湍动能更高，但是在点火时刻附近（340° CA），敞口燃烧室在火花塞平面的湍动能更高，更利于火焰传播。这是敞口燃烧室初期燃烧更快的原因。随着燃烧的发展，缩口燃烧室的缸内整体湍动能高的优势就体现出来了。在 365° CA 时，缩口燃烧室底部的湍动能明显更高，导致了其后期的燃烧加速，最终的燃烧持续期短。

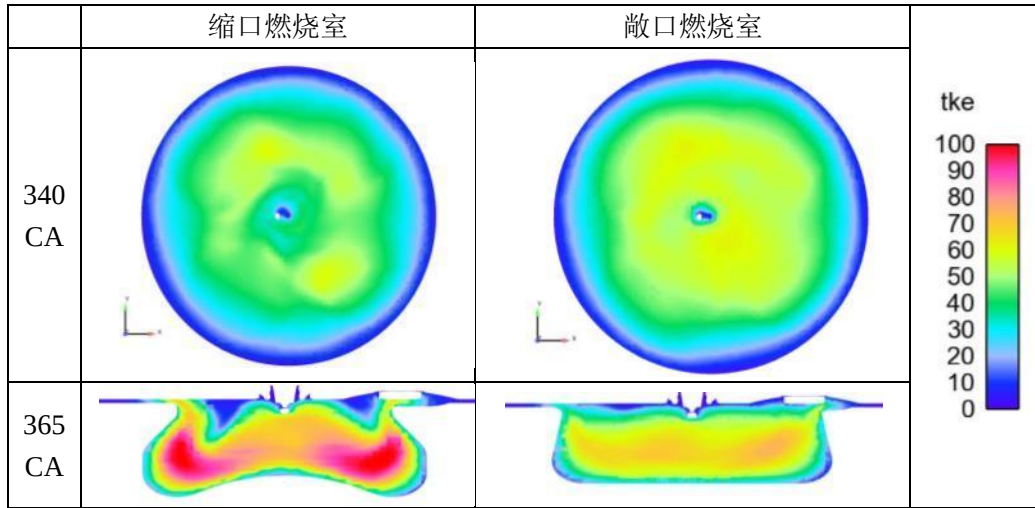


图 11 不同燃烧室的湍动能切图对比

综上所述，进气门早关更适合缩口燃烧室。

3.3 进气门晚关时不同燃烧室的燃烧过程

图 12 是在进气门晚关的情况下，不同燃烧室的放热率和燃烧持续期对比。可以看出，在进气门晚关的情况下，敞口燃烧室的燃烧持续期更短，燃烧更快。从放热率来看，初始缩口燃烧室的燃烧更快，但中后期敞口燃烧室的燃烧更快。

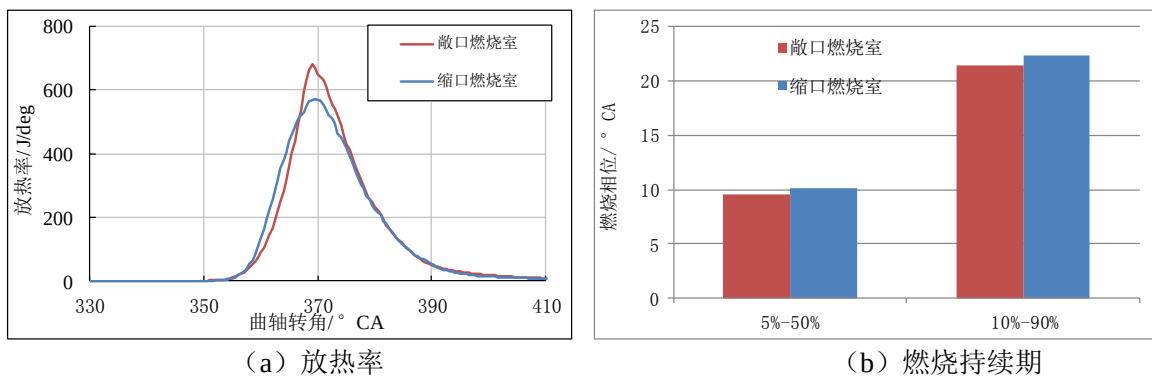


图 12 不同燃烧室对比

图 13 是在进气门晚关的情况下，不同燃烧室的湍动能对比。可以看出，缩口燃烧室的湍动能一直大于敞口燃烧室。

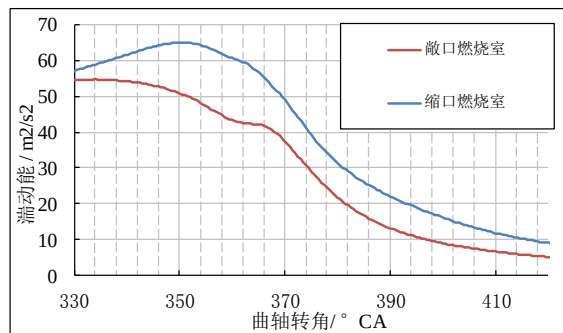


图 13 不同燃烧室的湍动能对比

图 14 是在进气门晚关的情况下，不同燃烧室的燃烧过程对比。可以看出，362° CA 时，缩口燃烧室燃烧更快，但很快撞到燃烧室壁面，导致燃烧速度下降。但 388° CA 是敞口燃烧室的燃烧过程更快。

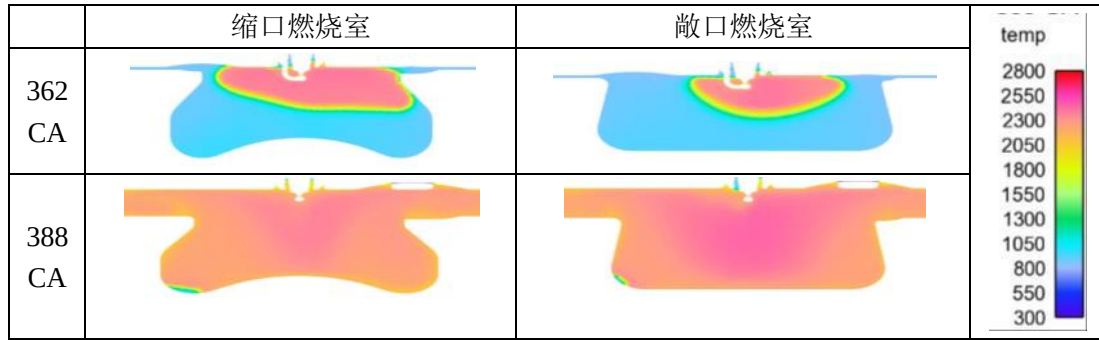


图 14 不同燃烧室的燃烧过程对比

图 15 是在进气门晚关的情况下，不同燃烧室的湍动能切图对比。可以看出，缩口燃烧室火花塞附近的湍动能非常高，这是其初期燃烧速度快的原因。同时，这也使火焰面迅速向燃烧室壁面传播。进气门晚关会导致湍动能中心偏上，因此燃烧室底部的湍动能差别不大，如 370° CA 的切图。这使得两种燃烧室后期燃烧速度相近。

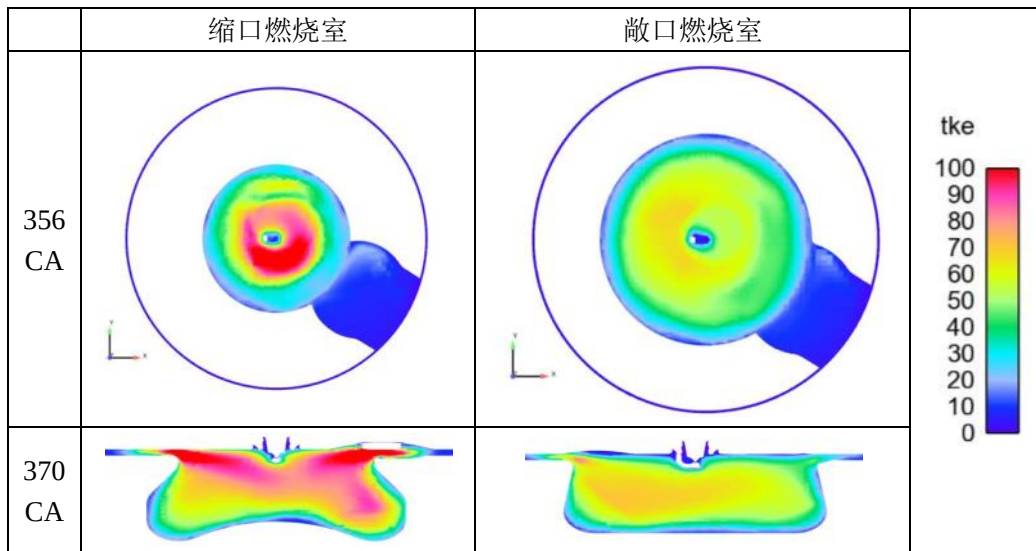


图 15 不同燃烧室的湍动能切图对比

图 16 是在进气门晚关的情况下，不同燃烧室的速度场对比。可以看出，缩口燃烧室有明显向上的速度场，这是其后期燃烧放缓的主要原因。

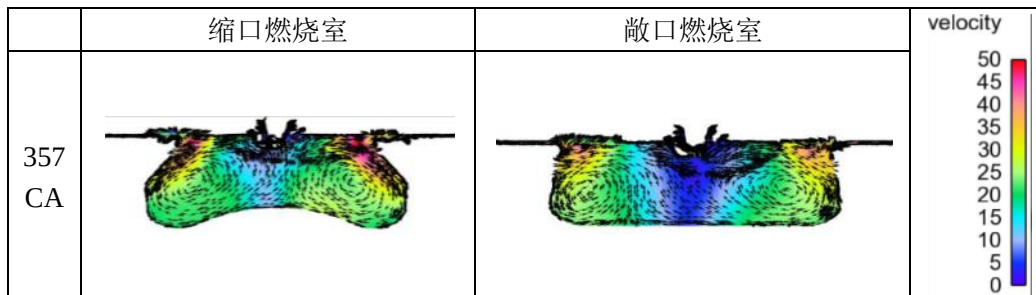


图 16 不同燃烧室的速度场对比

综上所述，进气门晚关更适合敞口燃烧室。

4. 总结

本文应用 converge 软件对天然气发动机进行了气道和缸内建模，采用 G 方程求解燃烧过程。研究了不同进气门关闭时刻的米勒循环方案对缸内流动和燃烧的影响。得到以下结论：

1、进气门早关的米勒循环方案，缸内涡流比较低，缸内速度场更无规则，缸内湍动能更靠近燃烧室底部。进气门晚关的米勒循环方案，缸内涡流比较高，缸内速度场更规则，缸内湍动能更靠近缸盖。

2、进气门早关的米勒循环方案，缩口燃烧室前期放热较敞口燃烧室低，但燃烧持续期更短。这主要是因为燃烧室底部的湍动能较高。进气门早关更适合缩口燃烧室。

3、进气门晚关的米勒循环方案，敞口燃烧室前期放热较缩口燃烧室低，但燃烧持续期更短。这主要是因为缩口燃烧室内速度场与火焰传播方向相反。进气门晚关更适合敞口燃烧室。

5 参考文献

[1] 尹伊郡、封岑，米勒循环涡轮增压汽油机燃烧数据预测，2018 idaj 中国区用户年会，2018

[2] 钟博，刘林龙，郭立新，米勒循环在天然气发动机上的应用，2018 idaj 中国区用户年会，2018