

DISI 发动机采用米勒循环和二次喷射抑制爆震的模拟研究

Numerical Study on the Knock Suppression Effects of Applying

Miller Cycle and Split Injection in a DISI Engine

余洁 邵爱芳

(天津大学内燃机国家重点实验室)

摘要: 本文采用 CONVERGE 三维仿真软件建立了缸内直喷汽油机的湍流燃烧模型, 分别研究了米勒循环和二次喷射策略对缸内湍流、温度、燃油分布以及燃烧速度的影响, 从而分析其抑制爆震的效果和机理。研究表明, 采用米勒循环一方面可以降低缸内整体的湍动能, 降低燃烧速度, 推迟燃烧相位, 具有抑制爆震的作用; 另一方面可以增加滚流强度, 改善燃油分布, 使火花塞附近燃油浓度增加, 而近壁面处燃油浓度降低, 可以促进主火焰传播提高燃烧效率, 抑制末端自然从而降低爆震倾向; 此外, 米勒循环可以降低有效压缩比, 降低压缩终点缸内温度, 具有抑制爆震的作用。采用二次喷射可以增加燃烧时刻湍动能, 促进火焰传播, 从而增加发动机扭矩输出; 另外, 二次喷射推迟了部分燃油喷射和蒸发时刻, 可以有效降低燃烧开始时缸内平均温度, 具有较好的抑制爆震的效果; 同时, 二次喷射可以在缸内形成火花塞附近浓近壁面处稀的燃油分层, 具有促进燃烧和抑制爆震的作用。

关键词: DISI 发动机; 米勒循环; 二次喷射; 爆震; CONVERGE

Abstract: In this article, the multi-dimensional numerical model of a direct injected spark ignition (DISI) engine is established using the software of CONVERGE. Then the knock suppression effects and their mechanism of Miller cycle and split injection are analyzed by investigating the in-cylinder turbulence, temperature, fuel distribution and combustion rate on the basis of the numerical model. The results reveal that on the one hand, Miller cycle can reduce the overall turbulence intensity, thereby decelerating the combustion rate and retarding the combustion phasing, which contributes to the improved knock resistance. On the other hand, the tumble in the cylinder is enhanced, which improves the fuel distribution with increased fuel concentration near the spark plug and reduced fuel concentration in the near-wall region. Therefore, the combustion efficiency is improved due to the enhanced main flame propagation, and the knock propensity is reduced thanks to the inhibited end-gas auto-ignition. In addition, Miller cycle reduces the effective compression ratio of the engine, thereby lowering down the in-cylinder temperature in the end of the compression stroke, which also explains the effect of knock suppression. The strategy of split injection increases the turbulence kinetic energy during combustion and enhances the flame propagation, thereby possessing the potential of promoting engine torque. In addition, part of the fuel is injected in the retarded secondary injection. The evaporation of the retarded injected fuel can effectively reduce the in-cylinder temperature at the beginning the combustion, which contributes to the improved knock resistance. Moreover, the fuel stratification with rich mixture near the spark plug and lean mixture in the near-wall region induced by split injection is also conducive to enhancing combustion and suppressing knock.

Keywords: DISI engine; Miller cycle; split injection; knock; CONVERGE

近年来能源危机加重, 油耗法规的进一步严格, 欧盟预计在 2020 年实现油耗低于 3.8 L/100km, 美国预计在 2020 年实现油耗低于 6 L/100km, 日本预计在 2020 年实现油耗低于

4.9 L/100km, 中国预计在 2020 年实现油耗低于 5 L/100km。采用纯电动汽车或采用混动汽车以及单纯优化内燃机车是三种较为可靠的降低油耗的方法, 但由于电动机车发展较为缓慢, 出现诸多问题需要解决^[1], 因此提出有效提高汽油机燃油利用率策略优化内燃机车成为研究重点。爆震是抑制汽油机热效率提高的主要障碍之一。爆震除了可以抑制热效率的增长以外, 如果长时间发生爆震会导致活塞环损坏、缸盖腐蚀、活塞顶部损坏、活塞融化、增加污染物排放、降低汽油机热效率、提高汽油机油耗输出、造成汽油机结构损坏以及产生更大的汽油机噪声等^[2]。目前提出了很多爆震抑制策略, 例如采用 EGR^[3]、低压缩比、改变燃烧室形状、替代燃料以及推迟点火时刻等方法抑制爆震。采用 EGR、改变点火时刻以及低压缩比等策略会明显降低汽油机的热效率。其中米勒循环和二次喷射可以同时抑制爆震和改善燃烧提高热效率, 因此得到了广泛的关注。

米勒循环可通过提前关进气门 (EIVC) 以及推迟关进气门 (LIVC) 降低有效压缩比, 从而降低压缩终点的缸内温度和压力, 因此米勒循环具有抑制爆震的作用^[4]。Li^[5]等人在缸内自喷火花点火 (DISI) 4 缸汽油机中研究发现, 在高负荷情况下, LIVC 以及 EIVC 均有抑制爆震的效果, 并且 LIVC 的抑制爆震效果更好。除此之外, 米勒循环还具有其他优点。首先, 在部分负荷情况下, 与 Otto 循环相比, 米勒循环具有较大的节气门开度, 因此米勒循环汽油机泵气损失更小, 可以提高汽油机的经济性^[6]。另外, 相对于 Otto 循环, 米勒循环的膨胀冲程大于压缩冲程, 更大的膨胀形成可以更加充分利用尾气中的能量^[7], 因此米勒循环的热效率更高。第三, 由于米勒循环可降低进气量以及排气温度, 因此可以明显降低汽油机的 NO_x 的排放量^[8]。另外, 低速情况下, 进气回流会明显减少米勒循环汽油机的动力输出。因为相对于高速情况, 低速情况下汽油机的进气量较低, 而米勒循环会进一步减少进气量, 从而引起扭矩输出明显下降。因此米勒循环通常应用到混合动力汽油机当中, 在低速情况下不采用汽油机驱动而采用电机驱动。除此之外, 通常采用增压来弥补米勒循环汽油机的动力输出不足的问题, 并且目前汽油机基本配备机械增压或者涡轮增压等装置, 增压技术较易实现。

目前研究表明 GDI 发动机具有良好的提高经济性的潜力。相比于进气道喷射发动机, GDI 可以根据实际工况调节进气量, 因此可以改善缸内的喷雾雾化以及混合效率等。与此同时, 直接喷射可以优化缸内的流动情况, 以及改善缸内燃油分布, 具有降低爆震的潜力。另外, 汽油直接喷射到缸内, 降低在进气道内的燃油损失。除此之外, 缸内直接喷射汽油燃油在缸内蒸发可以降低温度, 因此减少末端混合气自燃抑制爆震发生。从而可以进一步提高发动机的压缩比或进一步优化点火提前角, 改善发动机的热效率。在 GDI 发动机当中, 燃油的喷射时刻是影响燃油分布、火焰半径、火焰传播速度以及湍流强度的重要参数, 燃油喷射时刻直接影响发动机的动力特性、经济特性、排放特性以及对爆震的抑制效果^[9]。Marseglia^[10]等人在可视化的发动机中进行试验研究发现, 喷射策略影响爆震的开始时刻。结果表明二次喷射可以降低爆震趋势以及降低循环波动。Wang^[11]等人研究发现二次喷射具有抑制超级爆震的效果。Seokwon^[12]等人研究发现乙醇汽油结合二次喷射可以抑制超级爆震。在稀燃情况下, 研究表明在直喷点燃式发动机当中二次喷射可以降低 NO_x^[13], 碳烟、以及碳氢^[14]的排放。另外, 研究表明二次喷射可以改善混合物分布从而提高发动机冷启动的三元催化器的效率^[15]。

综上所述, 米勒循环和二次喷射在抑制爆震, 提高热效率, 降低排放等方面都具有一定的优势。目前大部分关于米勒循环和二次喷射抑制爆震的研究侧重于试验。但是, 试验手段

很难采集到缸内湍流燃烧的各种细节，难以分析爆震抑制手段的作用机理。多维湍流燃烧模型可以模拟实际发动机爆震燃烧过程，是研究爆震机理及其影响因素的重要手段。因此，本文的目的是通过在 CONVERGE 上搭建 DISI 发动机的三维湍流燃烧模型来探究米勒循环和二次喷射对缸内湍流、温度、燃油分布以及燃烧速度的影响，从而分析其抑制爆震的效果和机理。本文将从以下几个方面进行论述：首先是模型的建立及验证，第二部分是计算结果的讨论与分析，第三部分对主要的结论进行了总结。

1. 模型的建立及验证

本文模拟采用的单缸机原型为 Ricardo E6 直喷点燃式发动机，缸径 80 mm，冲程 100 mm，压缩比 10。具体单缸机进排气道以及单缸机缸体的三维模型如图 1 所示。本模拟采用基础网格 1 mm，温度、速度以及物质种类的自适应网格加密各 1 层，喷雾处固定加密 3 层，缸壁处固定加密 1 层，点火固定加密 5 层，模拟中最大网格数可达 4 百万。采用的湍流模型为 LES 模型、液滴破碎模型为 KHRT 模型、燃烧模型为 G 方程结合 SAGE 模型，具体模型如表 1 所示。计算工况及所用参数如下表 2 所示。

表 1 主要计算的子模型

湍流模型	LES Viscous One Equation 模型
喷雾破碎模型	KH-RT 模型
燃烧模型	G 方程+SAGE
壁面传热模型	O'Rourke and Amsden model
排放模型	Hiroyasu-NSC/extended Zeldovich

表 2 计算工况

计算条件	数值
缸径	80mm
冲程	100mm
压缩比	10:1
转速	1600r/min
计算初始时刻	370 CAD BTDC
计算结束时刻	50 CAD BTDC
点火时刻	16, 22 CAD BTDC
燃料类型	IC8H18
喷油时刻	240 CADBTDC
燃空比	1.0

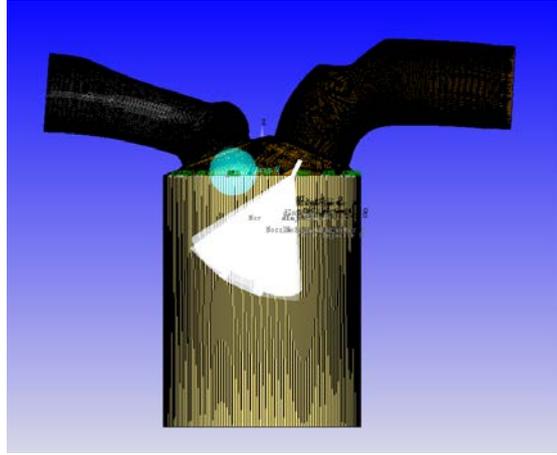


图 1 单缸机计算模型

首先，本章节基于该模型进行正常燃烧过程的标定；之后通过提前点火提前角，进行爆震工况模拟；之后探究米勒循环策略以及二次喷射策略对缸内的湍流、火焰传播速度等影响。在标定过程中，本研究首先基于一维 GT-Power 计算边界条件值，包括壁面温度、压力以及缸内初始温度压力等；之后进行冷态纯压缩标定，确定最终进气温度、压力以及进排气门开闭时刻；并进行喷雾标定；最后基于以上边界条件、缸内初始值以及喷雾标定值进行燃烧标定，计算所得缸压如下 2 图所示。如图中所示，压缩过程模拟与试验负荷良好，在 16 CAD BTDC 进行点火之后，上止点之前模拟缸压与实验缸压完全重合，之后着火过程与试验吻合良好。试验燃烧最大压力可达 4.01 MPa，模拟压力为 4 MPa，相差仅为 0.01 MPa，模拟燃烧相位略有推迟。将点火提前角提前到 22 CAD BTDC，燃烧相位与试验值相接近，说明该模型模拟结果良好。

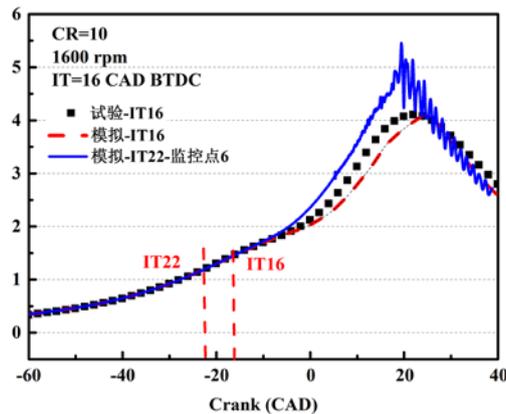


图 2 单缸机模拟试验缸压对比

2. 计算结果讨论与分析

2.1 米勒循环策略模拟研究

为研究米勒循环对抑制爆震效果的影响,本文进行湍动能、缸内温度以及燃空比的分析。经文献调研,推迟关进气门米勒循环策略具有较好抑制爆震效果,因此本文进行 LIVC 策略模拟研究。原发动机进气门关闭时刻为 130 CAD BTDC,为了实现米勒循环,分别将进气门关闭时刻推迟 15 CAD 以及 30 CAD,被命名为 LIVC 15 以及 LIVC 30。本文图片均为点火火花塞处截图,该位置直接影响燃烧过程,因此选择该位置进行研究。

2.1.1 米勒循环对缸内气流状态影响

如图 3 所示,在 240 CAD BTDC 时,本研究中米勒循环策略相对于单次喷射的湍动能提高,这是由于喷油略有不同,产生湍动能有轻微差别。在 20 CAD BTDC 着火之后,米勒循环策略的湍动能升高时刻有一定推迟,这是由于米勒循环缸内总气体量下降,导致燃烧有一定滞后。另外,如下图 4 所示可知,在采用米勒循环之后层流火焰速度降低,会导致最终的燃烧相位推迟。因此米勒循环策略可通过进一步提前点火提前角,达到最佳的着火相位,提高发动机热效率,并且降低有效燃油消耗率。另一方面,米勒循环策略相对于基准循环滚流强度增加。改善气流运动可以增加燃油与缸内气体相互作用,增加油气之间传热速度,缩短燃油液滴蒸发的时间,进一步促进氧气与燃油之间的相互作用,改善空气与燃料的混合特性,从而促进燃烧,提高热效率降低油耗。

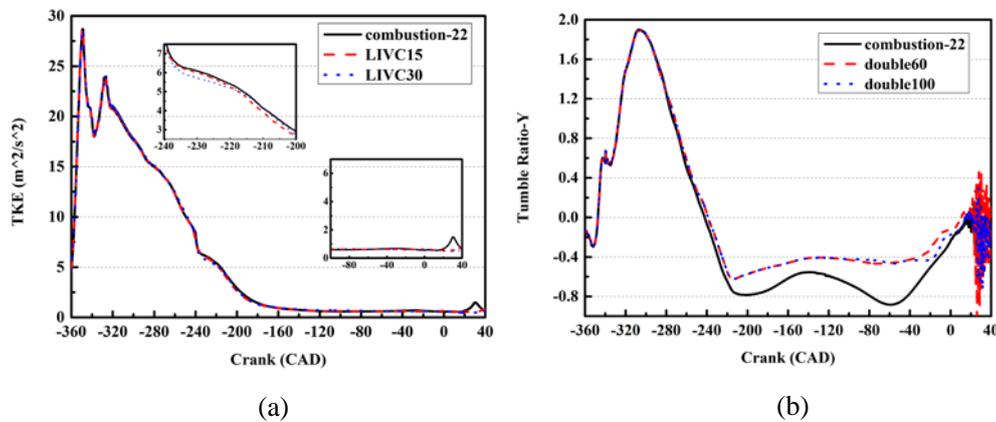


图 3 米勒循环及单次喷射湍动能对比图: (a) 湍动能; (b) 滚流

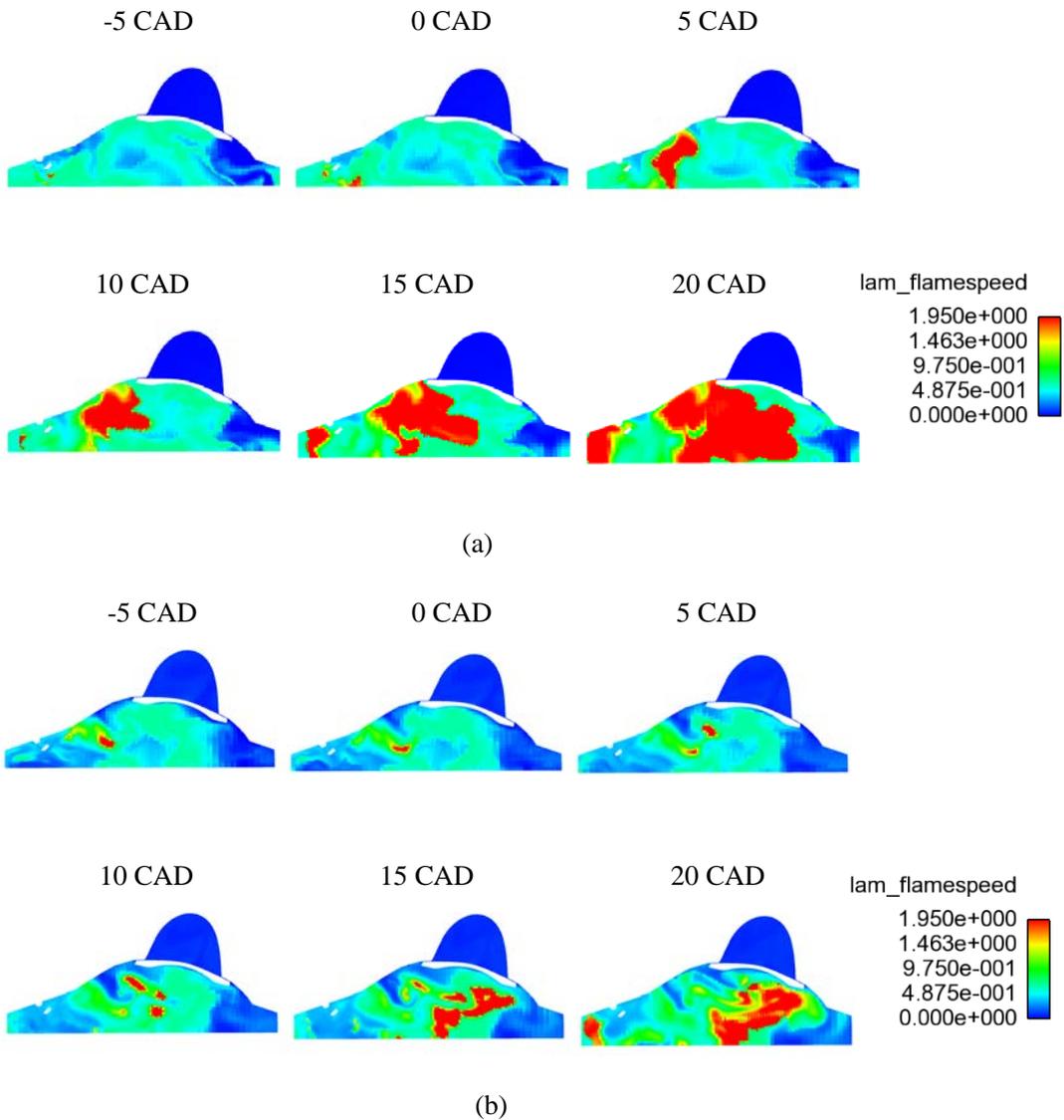


图 4 不同时刻下，米勒循环以及单次喷射层流火焰速度对比图：(a) 单次喷射不同时刻层流火焰速度分布图；(b) LIVC 30 不同时刻层流火焰速度分布图

2.1.2 米勒循环对缸内温度影响

如图 5 所示，随着压缩的逐渐进行，米勒循环同非米勒循环之间的温度差值明显增加，且在压缩上止点处的缸内平均温度明显低于非米勒循环，米勒循环可以明显降低缸内温度。米勒循环的主要作用之一是降低发动机的有效压缩比，从而降低压缩末尾燃烧室内，燃气混合物的热力学状态从而抑制爆震。另外，米勒循环推迟进气门关闭时刻，使更多的气体被推迟气缸内，并带走缸内一部分热量，因此具有良好的降低缸内温度的作用。如图 5 所示，随着米勒循环深度增加，缸内温度逐渐降低，LIVC 30 工况相对于 LIVC 15 工况缸内温度进一步下降。如下图 6 所示，LIVC 30 在 100 CAD BTDC、80 CAD BTDC、60 CAD BTDC、40 CAD BTDC 以及 20 CAD BTDC，点火之前的缸内温度分布情况，米勒循环通过降低缸壁以及缸内整体温度，减少在缸壁处自燃的发生，从而抑制爆震。

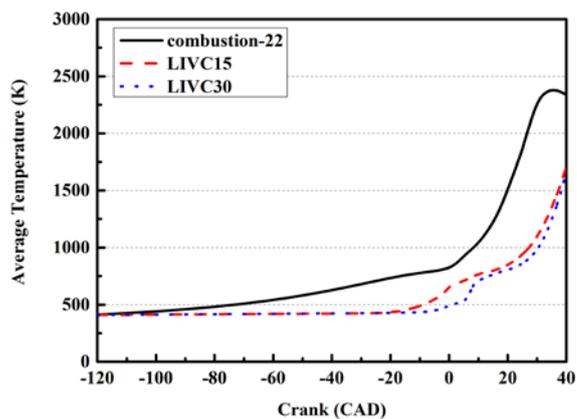
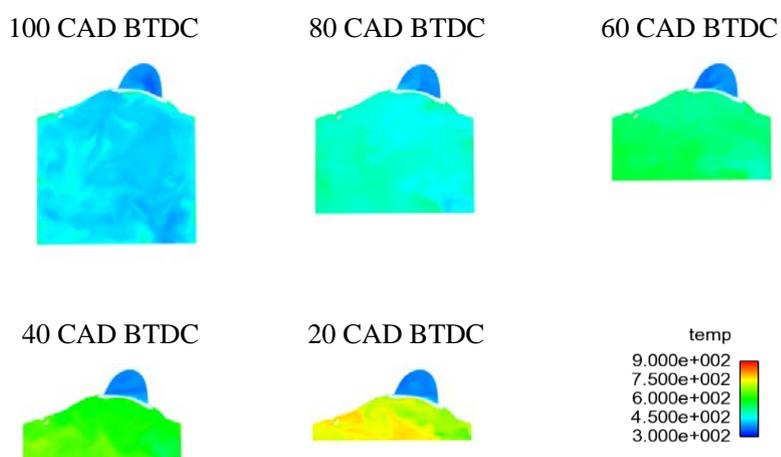
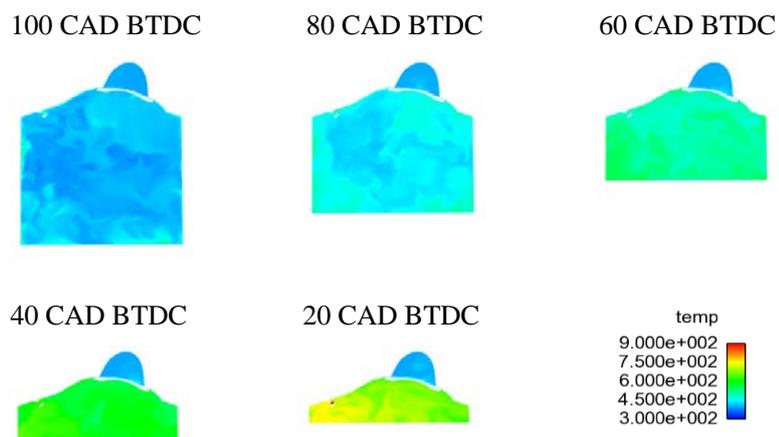


图 5 米勒循环及单次喷射平均温度对比图



(a)



(b)

图 6 米勒循环以及单次喷射缸内平均温度对比图：(a) 单次喷射不同时刻缸内温度分布图；(b) LIVC30 不同时刻缸内温度分布图

2.1.3 米勒循环对燃油分布影响

如上所述，通过改变进气门的关闭时刻，明显可以改变缸内气流流动状态，对液滴与压缩气体的碰撞过程有重要影响，从而影响缸内燃空混合情况。如图 7 所示，米勒循环工况在火花塞附近的当量比分布略浓于非米勒循环工况，该分布方式可以在一定程度上优化点火以及燃烧，增加燃烧的热效率。另外，如图 7 所示，米勒循环工况在缸壁处的燃料分布低于非米勒循环工况，降低壁面出的当量比，在一定程度上具有降低爆震的作用。

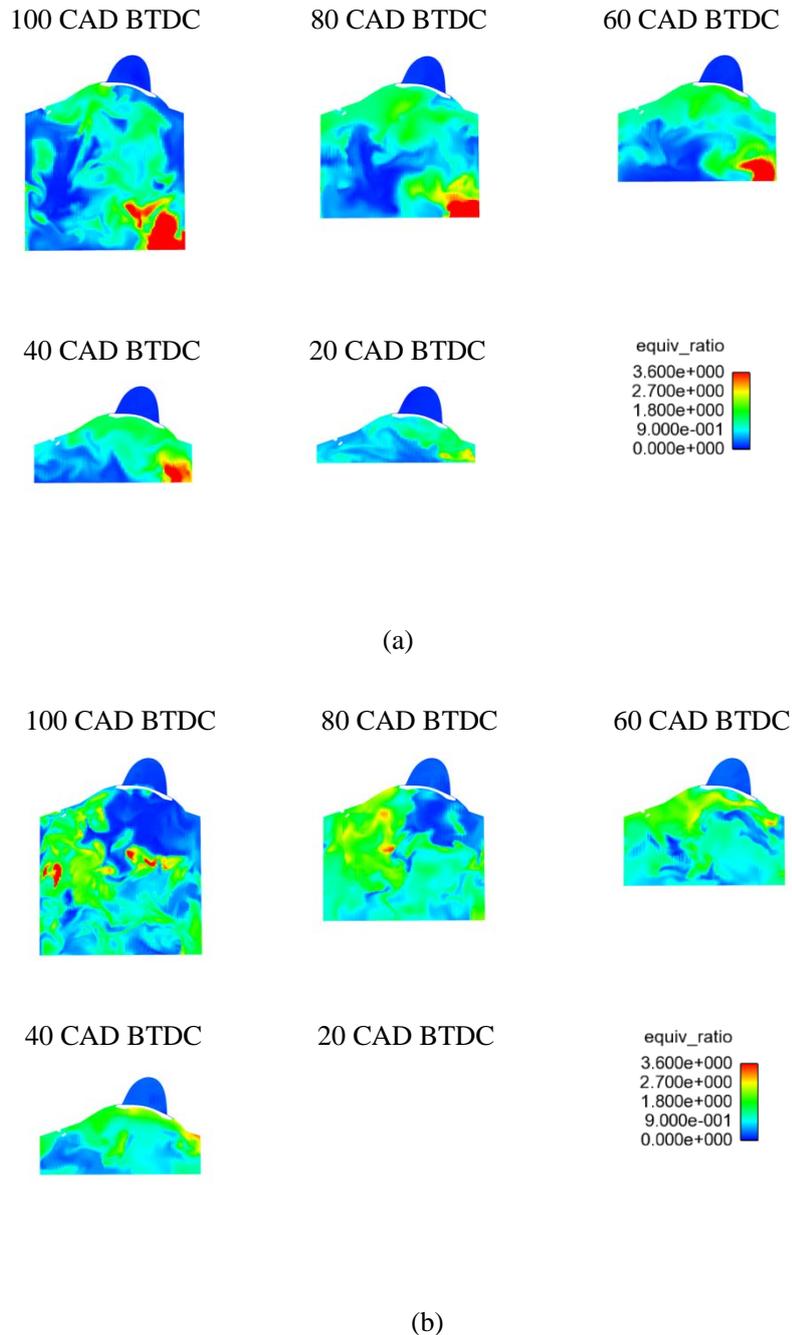


图 7 米勒循环以及单次喷射当量比对比图：(a) 单次喷射不同时刻当量比分布图；
(b)LIVC30 不同时刻当量比分布图

2.2 二次喷射策略模拟研究

本文主要研究二次喷射对发动机缸内的影响。在二次喷射模拟中保证当量比为 1，进气量相同，进排气门的开闭时刻相同。点燃式发动机不同于压燃式发动机，二次喷射中的第一次喷射的质量应该略高于第二次喷油质量或者与第二次喷油质量相接近，因此选择第一次喷射时刻为 240 CAD BTDC 的基础上进行优化。喷射比例为 4:1，第二次喷油时刻分别为 60 CAD BTDC 以及 100 CAD BTDC。

2.2.1 二次喷射对缸内气流状态影响

二次喷射的主要作用为增加动能、加快燃烧速度以及降低缸内温度。首先，如下图 8 所示在，在 240 CAD BTDC 时刻，采用二次喷射策略产生的湍动能相对于单次喷射较低，原因为二次喷射在该时刻的喷射燃料质量下降，从而引起的湍动能下降。在 100 CAD BTDC 时刻进行第二次喷射，因此此刻二次喷射的湍动能增加，并在燃烧之后增加缸内的湍动能。除增加湍动能，二次喷射可以改善缸内的滚流情况，如下图 8 所示，采用二次喷射可以增加缸内 Y 方向的滚流强度。增加湍动能以及滚流强度均具有一定加速作用，如下图 9 层流火焰速度可知，在 20 CAD BTDC 到 5 CAD BTDC，由于滞燃期影响该段时间内层流火焰速度基本相同，因此本文中并没有列出相关图片，由 5 CAD BTDC 到 20 CAD ATDC 的单次喷射以及二次喷射的层流火焰速度对比可知，在相同时刻下，二次喷射的层流火焰速度均高于单次喷射，说明二次喷射具有加快火焰传播的作用，从而促进燃烧，改善发动机燃烧相位，可进一步增加发动机扭矩输出并抑制爆震。

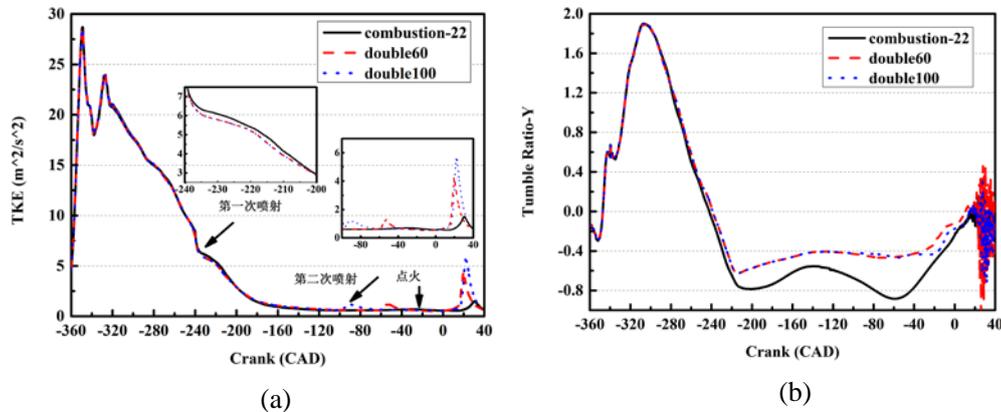


图 8 二次喷射及单次喷射湍动能以及滚流对比图：(a) 湍动能；(b)Y 滚流

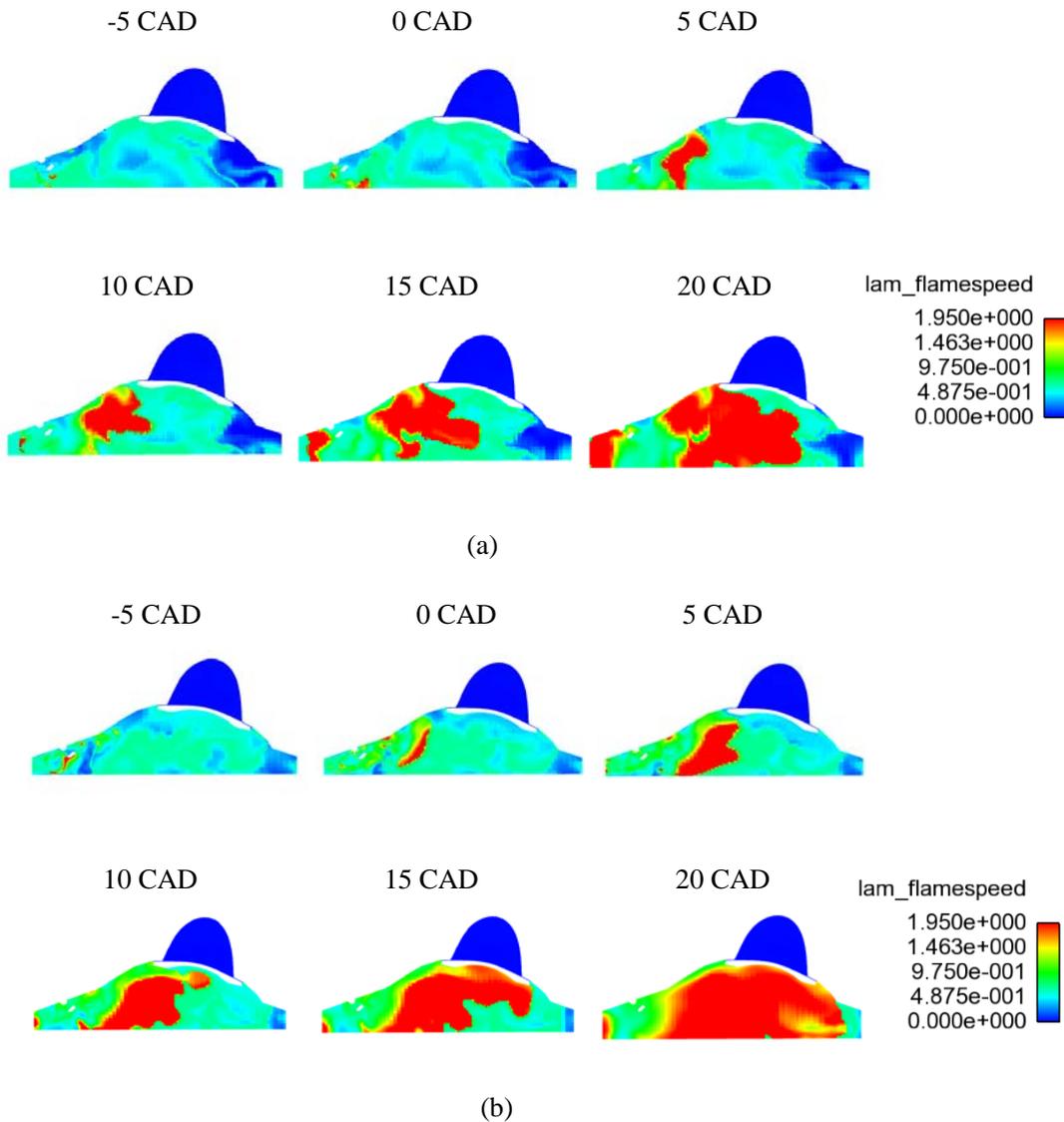


图 9 二次喷射以及单次喷射层流火焰速度对比图：(a) 单次喷射不同时刻层流火焰速度分布图；(b) Split 100 不同时刻层流火焰速度分布

2.2.2 二次喷射对缸内温度影响

二次喷射主要作用之一为降低缸内温度，具体如下图 10 所示，在 100 CAD BTDC 进行第二次喷射时，二次喷射的缸内平均温度相对于单次喷射有所降低，并在 10 CAD ATDC 前均低于单次喷射，主要原因为第二次喷射时燃油蒸发会降低缸内温度，该作用可以降低爆震发生趋势。在 10 CAD ATDC 之后，二次喷射缸内平均温度高于单次喷射平均温度，主要原因为二次喷射增加湍动能、加快火焰传播速度，进一步改善燃烧，从而导致在 10 CAD ATDC 之后，缸内平均温度增加。

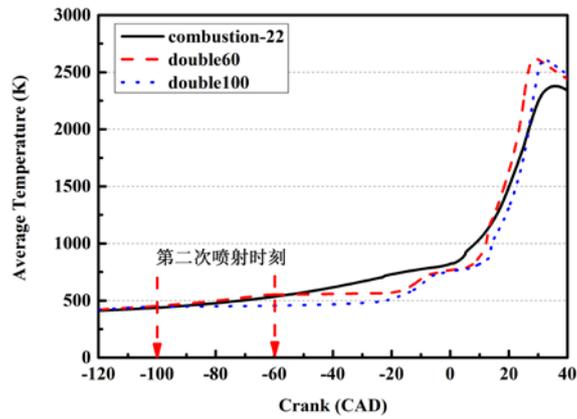
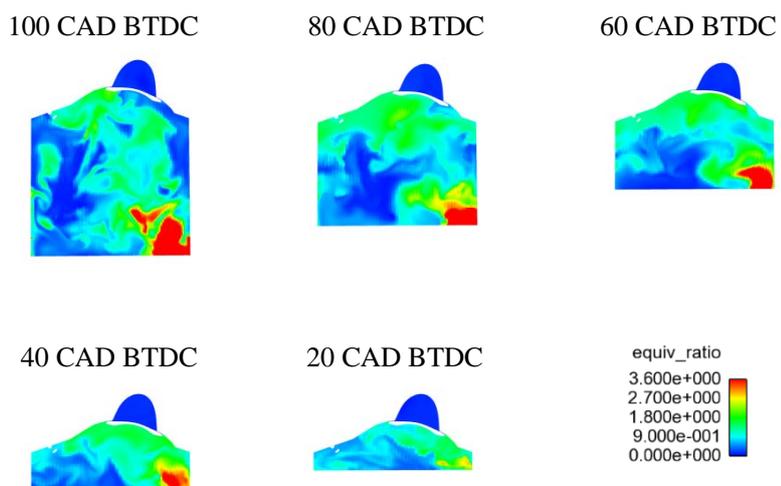


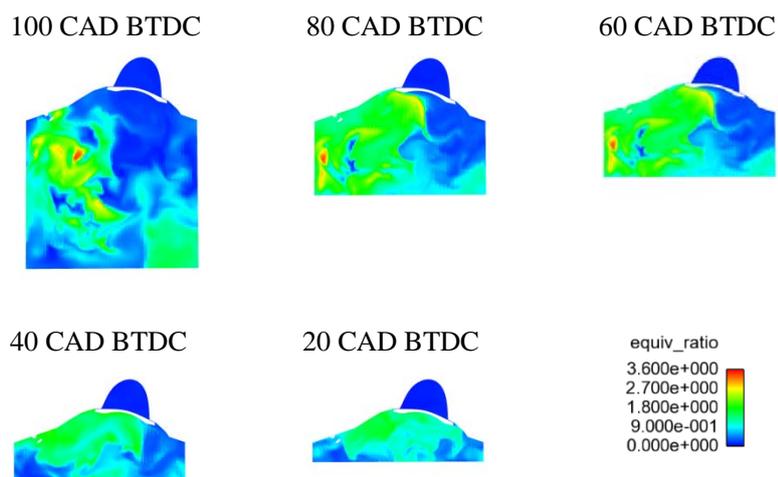
图 10 二次喷射及单次喷射平均温度对比图

2.2.3 二次喷射对缸内燃油分布影响

二次喷射改变当量比分布是影响其着火过程的主要因素之一，如下图 11 所示，在 220 CAD BTDC 时刻时，由于在第一次喷射时刻时，单次喷射以及二次喷射的燃料喷射量接近，并且图片所展示位置为火花塞附近，距离喷油器有一定距离，因此此刻二者的当量比分布基本相同。在 100 CAD BTDC 进行第二次喷射，此刻二者的当量比分布产生区别，喷油器位置为与火花塞相对位置，此时喷射可以直接增加火花塞附近当量比分布，并随着活塞继续向上推动，Y 方向滚流增加，进一步增加火花塞附近的当量比分布，由图可知，在点火提前角附近，采用二次喷射策略，使火花塞附近当量比在 1 左右，单次喷射火花塞附近当量比处于较低水平，因此二次喷射可以更加促进燃烧。另外，由图 11 可知采用单次喷射在缸壁附近的燃空比分布明显高于二次喷射，缸壁附近较高的当量比分布会增加爆震发生的可能性。



(a)



(b)

图 11 二次喷射当量比对比图: (a) 单次喷射不同时刻层流火焰速度分布图; (b)Split
100 不同时刻层流火焰速度分布

3. 结论

- (1) 采用米勒循环可以降低缸内整体的湍动能,降低燃烧速度,推迟燃烧相位,具有抑制爆震的作用,允许发动机采用更大的点火提前角,优化发动机热效率。
- (2) 米勒循环可以增加滚流强度,改善缸内燃油分布,使火花塞附近燃油浓度增加,而近壁面处燃油浓度降低,可以促进主火焰传播提高燃烧效率,抑制末端自然从而降低爆震倾向。
- (3) 本文通过采用进气门晚关的米勒循环,减少进气量,缩短了压缩行程,可以降低有效压缩比,降低压缩终点缸内温度,具有抑制爆震的作用。
- (4) 采用分别在进气行程和压缩行程喷油的二次喷射策略可以增加第二次喷油时刻到燃烧开始时刻缸内的湍动能,促进火焰传播,从而增加发动机扭矩输出。
- (5) 二次喷射推迟了部分燃油喷射和蒸发时刻,可以有效降低燃烧开始时缸内平均温度,具有较好的抑制爆震的效果。
- (6) 二次喷射可以在缸内形成火花塞附近浓近壁面处稀的燃油分层,具有促进燃烧和抑制爆震的作用。

4. 参考文献:

- [1] Zhao R, Zhang S, Liu J, et al. A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 299:557-577.
- [2] Nates R J, Yates A D B. Knock Damage Mechanisms in Spark-Ignition Engines [J]. *SAE Technical Paper*, 1994, 942064.
- [3] Bozza F, Bellis V D, Teodosio L. Potentials of cooled EGR and water injection for knock resistance and fuel consumption improvements of gasoline engines [J]. *Applied Energy*, 2016, 169:112-125.
- [4] Li Y. Synergy between Boost and Valve Timings in a Highly Boosted Direct Injection Gasoline Engine Operating with Miller Cycle [J]. *SAE Technical Paper*, 2015, 2015-01-1262.
- [5] Li T, Gao Y, Wang J, et al. The Miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs. LIVC [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 79:59-65.
- [6] Zhao J. Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines - A review [J]. *Applied Energy*, 2017, 185:300-319.
- [7] Martins J J G, Uzuneanu K, Sousa B, et al. Thermodynamic Analysis of an Over-Expanded Engine [J]. *SAE Technical Paper*, 2004, 2004-01-0617.
- [8] Wang Y, Lin L, Zeng S, et al. Application of the Miller cycle to reduce NOx emissions from petrol engines [J]. *Applied Energy*, 2008, 85(6):463-474.
- [9] Sementa P, Vaglieco B M, Catapano F. Thermodynamic and optical characterizations of a high performance GDI engine operating in homogeneous and stratified charge mixture conditions fueled with gasoline and bio-ethanol [J]. *Fuel*, 2012, 96(7):204-219.
- [10] Marseglia G, Costa M, Catapano F, et al. Study about the link between injection strategy and knock onset in an optically accessible multi-cylinder GDI engine [J]. *Energy Conversion & Management*, 2017, 134:1-19.
- [11] Wang Z, Xu Y Q, Wang J X. Suppression of super-knock in TC-GDI engine using two-stage injection in intake stroke (TSII) [J]. *China Science*, 2014, 57(1):80-85.

- [12] Cho S, Kim N, Chung J, et al. The Effect of Ethanol Injection Strategy on Knock Suppression of the Gasoline/Ethanol Dual Fuel Combustion in a Spark-Ignited Engine[J]. SAE Technical Paper, 2015, 2015-01-0764.
- [13] Mohan B, Yang W, Chou S K. Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 28:664-676.
- [14] Li T, Nishida K, Zhang Y, et al. Effect of split injection on stratified charge formation of direct injection spark ignition engines [J]. International Journal of Engine Research, 2007, 8(2):205-219.
- [15] Costa M, Catapano F, Marseglia G, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Split Injections on the Performance of a GDI Engine Under Lean Operation [J]. SAE Technical Paper, 2015, 2015-24-2413.