

喷射模式对高压压缩比甲醇发动机 爆震特性影响的试验研究

于立信, 尹晓军, 王锡斌, 段浩, 胡二江, 曾科
(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为深入探究高压压缩比甲醇发动机的爆震抑制方法, 在一台压缩比为 15 : 1 的单缸自然吸气点燃式甲醇发动机上, 开展了化学计量比混合气条件下喷射模式对爆震特性影响的试验研究。首先, 在进气道喷射模式下, 研究了负荷、点火时刻和过量空气系数对爆震特性的影响; 其次, 在缸内直喷模式下, 研究了喷射时刻对爆震特性的影响; 最后, 在节气门全开状态下, 研究了多次喷射策略对爆震的抑制效果。结果表明: 采用进气道喷射模式时, 甲醇发动机在中高负荷下均发生了爆震燃烧, 在指示平均有效压力 (p_i) 为 0.7 MPa 时, 出现低频率、高强度的强烈爆震现象, 最大爆震强度达 8.42 MPa; 采用缸内直喷模式时, 发动机爆震现象被显著抑制, 当 p_i 为 0.91 MPa 时, 最大爆震强度下降到 0.43 MPa; 合理的两次喷射策略相比单次喷射策略可进一步降低爆震强度, 同时保持较高的 p_i 。研究验证了缸内直喷结合两次喷射策略在抑制高压压缩比甲醇发动机爆震现象方面的有效性, 为甲醇发动机的发展和应用提供了理论依据和数据支撑。

关键词: 甲醇; 高压压缩比; 爆震特性; 爆震抑制; 喷射策略

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202507011 **文章编号:** 0253-987X(2025)07-0108-10

Experimental Study of the Effect of Injection Mode on Knock Characteristics of High Compression Ratio Methanol Engines

YU Lixin, YIN Xiaojun, WANG Xibin, DUAN Hao, HU Erjiang, ZENG Ke
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the knock suppression methods for high compression ratio methanol engines, an experimental study is conducted on a single-cylinder naturally aspirated spark-ignition methanol engine with a compression ratio of 15 : 1, focusing on the impact of injection modes on knock characteristics under stoichiometric mixed gas conditions. First, the influence of load, ignition timing, and air-fuel ratio on knock characteristics is explored under the intake port injection mode. Second, the effect of injection timing on knock characteristics is examined under the direct injection mode. Finally, the suppression effect of multiple injection strategies on knock is analyzed under wide-open throttle conditions. The results indicate that in the intake port injection mode, the methanol engine experiences knock combustion at medium to high loads, with a strong knock phenomenon characterized by low frequency and high intensity, reaching a maximum knock intensity of 8.42 MPa at an indicated mean effective pressure (p_i) of 0.7 MPa. In contrast, under the direct injection

收稿日期: 2024-11-13。 作者简介: 于立信(1998—), 男, 硕士生; 段浩(通信作者), 男, 助理教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176131)。

网络出版时间: 2025-03-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250325.1849.005>

mode, the knock phenomenon is significantly suppressed, with the maximum knock intensity dropping to 0.43 MPa when p_i is 0.91 MPa. A reasonable two-injection strategy further reduces knock intensity compared to a single injection strategy while maintaining a high p_i . This study confirms the effectiveness of combining direct injection with a two-injection strategy in suppressing knock phenomena in high compression ratio methanol engines, providing theoretical basis and data support for the development and application of methanol engines.

Keywords: methanol; high compression ratio; knock characteristics; knock suppression; injection strategy

化石燃料的持续消耗引发了愈发凸显的环境污染和全球变暖问题,威胁着人们赖以生存的环境,同时制约了经济社会的发展。近年来,我国传统能源对外依存度居高不下,为此必须大力发展清洁、低碳的替代能源^[1]。甲醇生产工艺简单、燃烧产物相对清洁、储运安全,尤其对于我国而言,其来源广泛、制备方便^[2],是当下最契合我国国情的清洁能源之一,引发了大量关注^[3]。

甲醇理化特性良好,作为发动机燃料具有含氧量高^[4]、碳氢比低^[5]、辛烷值高^[6]、着火界限宽^[7]等诸多优势,被认为是“双碳”背景下短期内最具潜力的内燃机代用燃料之一^[8]。甲醇十六烷值低、汽化潜热大、自燃温度高,导致甲醇的自发火性差,难以实现压燃着火^[9-11],故一般应用于火花点火(SI)发动机。同时,甲醇具有比汽油更高的抗爆震性^[12],因而更适用于较高压缩比的发动机,有利于提高发动机的功率密度和热效率。

在高压比 SI 发动机中燃用甲醇燃料仍然存在爆震现象,甚至会出现强烈爆震^[13-15],从而对发动机机械结构产生不可逆的损害^[16]。因此,抑制爆震是甲醇发动机研究领域的重要课题之一,而稀燃和废气再循环(EGR)是当前抑制甲醇发动机爆震的主要手段。Zhen 等^[17]模拟了高压比进气道燃料喷射(PFI)甲醇 SI 发动机在采用化学计量混合气运行时的爆震行为,发现在压缩比高达 17.5 时,仅通过延迟点火角度(θ_{st})无法完全消除爆震现象。Gong 等^[18]通过仿真计算,分析了分层充量直喷火花点火(DISI)甲醇发动机在不同压缩比下的稀薄燃烧特征,结果表明:在当量比为 0.25 时,发动机在无爆震的情况下能够获得较好的性能。Li 等^[19]研究了废气再循环率对高压比 SI 甲醇发动机爆震燃烧的影响,发现采用 EGR 能够削弱发动机的爆震倾向,但也会限制其功率输出。

此外,缸内直喷(DI)技术也是改善发动机缸内燃烧过程、降低爆震倾向的重要技术手段^[20]。相较于稀燃和 EGR 方法,采用缸内直喷技术并结合化

学计量比混合气不会限制发动机的功率输出。然而,现有针对高压比缸内直喷甲醇发动机在化学计量比混合气条件下运行的研究较少,其爆震特性暂不清晰。为此,本文在一台高压比 SI 甲醇发动机上,在化学计量比混合气的条件下通过试验探究了高压比甲醇发动机在 PFI 和 DI 模式下的爆震特性,并验证了缸内直喷技术改善发动机爆震和扩展爆震边界的可行性,研究结果可为改善火花点火甲醇发动机的抗爆性提供思路和方法。

1 试验方法及研究方案

1.1 试验装置

本研究所用的高压比缸内直喷甲醇发动机由一台单缸柴油机改造而来。表 1 列出了改造后发动机的参数。

表 1 试验发动机的类型及参数

Table 1 Specifications of the test engine

项目及参数	类型及参数值
发动机类型	单缸自然吸气、DISI 发动机
内径×冲程	92 mm×75 mm
压缩比	15.0
排量	0.498 L
喷油器	BOSCH GDI 喷油器,6 孔
进气门开/关角度	-376°/-136°
排气门开/关角度	132°/372°

原柴油喷油器的位置被火花塞取代,在距火花塞径向 15 mm 处重新打孔,以安装缸内直喷喷油器。根据 Gong 等^[18]的研究成果,将试验发动机的几何压缩比从 19.0 改为 15.0,原柴油机燃烧室改为中间带有凸起的盆型燃烧室,发动机剖面如图 1 所示。节流阀安装在进气口处,用于调整进气流量。为实现进气道燃料喷射模式,在进气道内安装了低压喷油器,并配置了低压供油系统。点火时刻和喷油参数由课题组自主开发的电子控制单元(ECU)控制。试验用甲醇的质量分数为 99.7%。

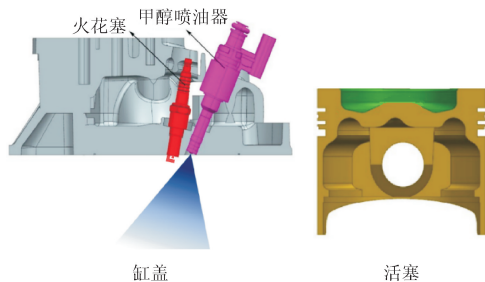


图1 试验发动机的剖面图

Fig. 1 Section views of the test engine

试验中,采用一台电力测功机(CAC37)测量发动机的扭矩和转速。发动机缸内压力数据由压电传感器(Kistler 6058A)进行检测,随后经电荷放大器(Kistler 5064)放大。缸内压力和曲轴转角均由燃烧分析仪(Kibox)同步记录。同时,利用空燃比分析仪(MEXA-730λ)检测排气中的氧浓度,以测量过量空气系数(λ)。试验装置示意如图2所示。

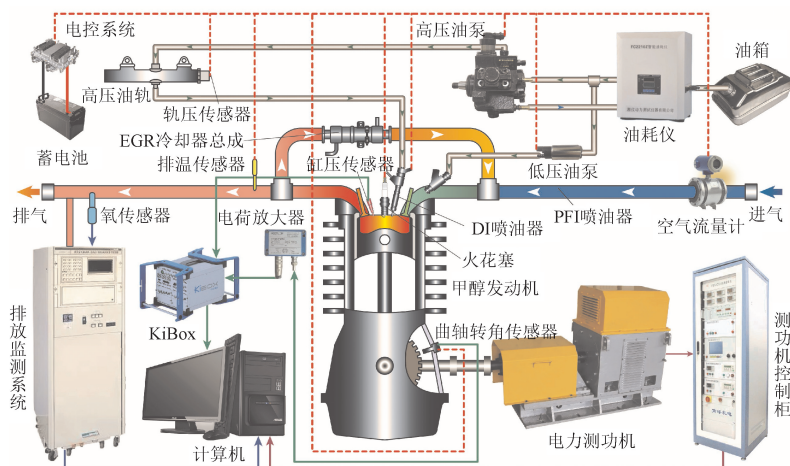


图2 甲醇发动机试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup for methanol engine

1.2 指标定义

本文采用爆震强度(I_k)定量评价甲醇发动机爆震强度,定义如下

$$I_k = \int_{\theta_1}^{\theta_2} |p_k| d\theta \quad (1)$$

式中: θ_1 为缸内压力峰值对应的曲轴转角; θ_2 为 θ_1 后 30° 对应的曲轴转角; p_k 为爆震发生时缸内压力震荡的瞬时值。

发动机爆震强度 I_k 代表了高频振动中所含的能量^[21],且与发动机零部件的热力破坏和疲劳破坏高度相关^[22]。依据 I_k 的值,可将爆震强度分为4个不同级别: $I_k < 0.2 \text{ MPa}$ 为无爆震; $0.2 \text{ MPa} \leq I_k < 1.0 \text{ MPa}$ 为轻度爆震; $1.0 \text{ MPa} \leq I_k < 2.0 \text{ MPa}$ 为中度爆震; $2.0 \text{ MPa} \leq I_k$ 为强烈爆震。爆震发生正时由爆震起始曲轴转角(KOCA)表示,KOCA由气缸压力振荡的急剧增加确定^[23]。经过标定,选取 0.015 MPa 作为爆震起始点的判断阈值,能够准确识别爆震起始点,并排除噪声信号的干扰。试验中,缸内压力峰值($p_{\max}$)控制在 8.5 MPa 以内,以避免发动机机械负荷过大。此外,为控制发动机燃烧噪声,缸内压力升高率峰值($R_{\max}$)被控制在 $0.5 \text{ MPa}/(^{\circ})$ 以下。

1.3 试验流程

试验中,转速被固定在 $1500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。首先,

发动机在PFI模式下启动,暖机后 λ 保持为 1.0 ,指示平均有效压力(p_i)保持 0.4 MPa 。通过逐渐增加喷油量以增加发动机负荷,直至发生强烈爆震。在每种 p_i 下,每个循环的点火时刻均维持在最佳点火提前角。当观察到强烈爆震时,增加 λ 并推迟 θ_{st} 以减轻爆震强度。随后,将试验发动机切换到DI模式。将发动机负荷保持在 0.91 MPa , λ 保持在 1.0 ,并将喷射开始时刻角度(θ_i)从压缩上止点后(aTDC) -300° 逐渐提前至 -350° 。最后,在节气门全开(WOT)时进行单次喷射和分段喷射策略的对比试验。在每种工况下,当发动机稳定运行 5 min 后,记录200个连续工作循环的缸内压力数据,并取其平均值进行分析。经计算,参数 I_k 、 p_i 和 $R_{\max}$ 的不确定度均小于 5% ,表明试验测量结果可靠。

2 结果与讨论

2.1 PFI模式下的爆震特性

当200个连续循环 p_i 分别为 0.4 、 0.6 和 0.7 MPa 时, θ_{st} 均维持在最佳点火提前角, λ 为 1.0 ,PFI模式下的 I_k 分布情况见图3。如图所示:在 $p_i = 0.4 \text{ MPa}$ 条件下未检测到爆震循环;随着 p_i 从 0.4 MPa 增至

0.6 MPa,爆震倾向增加,在几个循环中出现中度爆震;当 p_i 进一步增至 0.7 MPa 时,发动机出现明显强烈爆震,且出现频率高于轻度和中度爆震循环;同时,发动机发出断断续续的低沉撞击声,异于传统汽

油机爆震时的持续尖锐金属敲击声。由图 3(c)可知, I_k 最大值高达 8.42 MPa,超出爆震阈值约 40 倍,此时的爆震现象呈现出频率低、强度高的特点,与增压汽油机中的超级爆震相似^[24]。

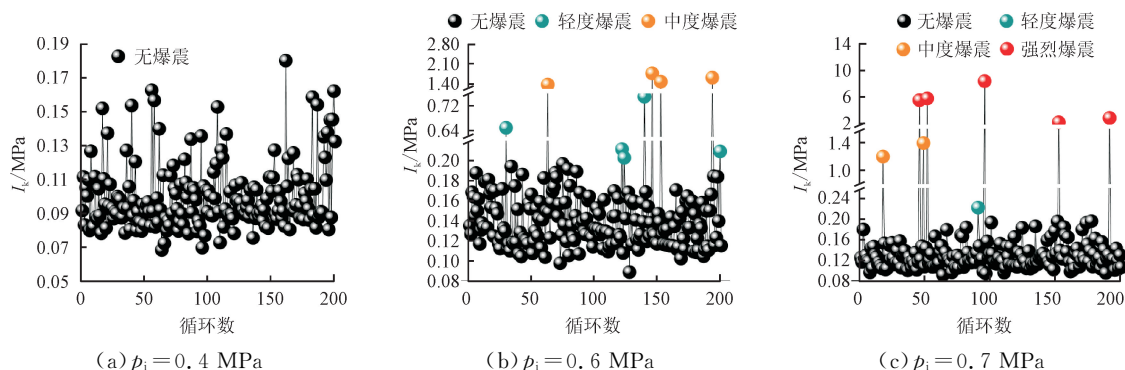


图 3 不同 p_i 时 PFI 模式下的 I_k 分布

Fig. 3 I_k distributions of PFI mode at different p_i

当 p_i 为 0.7 MPa 时,200 个连续循环的 I_k 、 p_i 、燃烧持续期(BD)、燃料的累积放热量达到循环总放热量 5% 所对应的曲轴转角(θ_{CA05})以及燃料的累积放热量达到循环总放热量 50% 对应的曲轴转角(θ_{CA50})的分布情况见图 4。通常,当点燃式发动机遭受严重爆震时,其功率输出和燃油经济性会大幅降低。从图 4(a)可以看出,5 个强烈爆震循环的 p_i

急剧下降。一方面,缸内压力振荡强化了缸壁的传热,导致较大的传热损失;另一方面,爆震循环燃烧相位的过度提前大幅增加了压缩负功,从而使循环指示功急剧下降。由图 4(c)和(d)可证实,强烈爆震循环的 θ_{CA05} 和 θ_{CA50} 均比正常循环大幅提前。此外,如图 4(b)所示,爆震循环的燃烧持续期明显短于正常循环,表明爆震循环的总体燃烧速度更快。

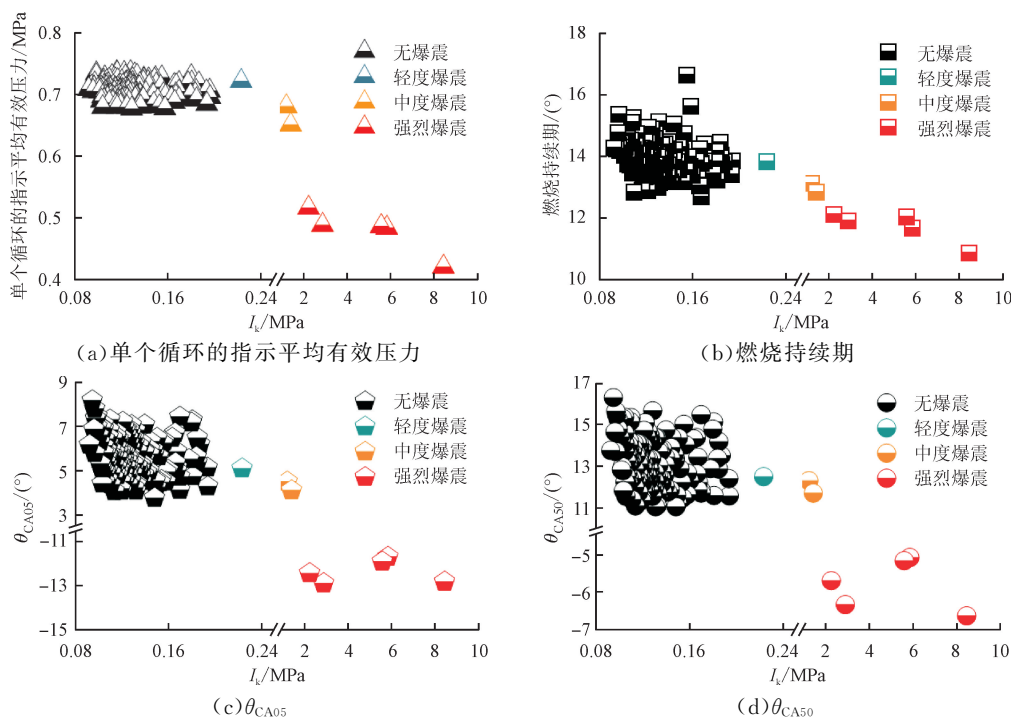


图 4 $p_i = 0.7$ MPa 时燃烧特性参数随 I_k 的变化

Fig. 4 Variations of combustion characteristic parameters with I_k at $p_i = 0.7$ MPa

当 p_i 为 0.7 MPa 时,8 个爆震循环中缸内压力升高率峰值 R_{max} 、缸内压力峰值 p_{max} 与 I_k 之间的关

系见图 5。显然, R_{max} 和 p_{max} 均随 I_k 的增大而增大。爆震循环下,燃烧阶段提前(如图 4 所示),燃烧速度

增大,导致了 $p_{\max}$ 和 $R_{\max}$ 的显著升高。特别是 5 个强烈爆震循环下, $p_{\max}$ 和 $R_{\max}$ 分别远超 8.5 MPa 和 0.5 MPa/(°) 的限值,极大地增加了燃烧噪声。

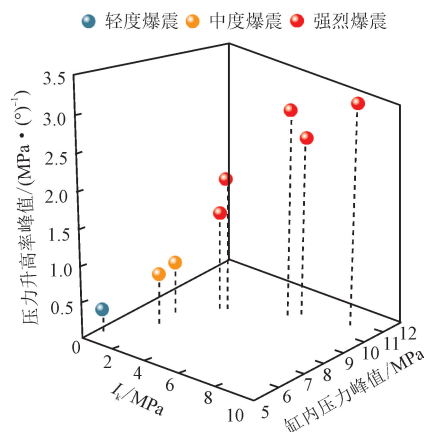


图 5 $p_i=0.7$ MPa 时爆震循环的 $R_{\max}$ 、 $p_{\max}$ 和 I_k 的关系
Fig. 5 Relation among $R_{\max}$, $p_{\max}$, and I_k of the knock cycles under the $p_i=0.7$ MPa

推迟点火角度 θ_{st} 和加浓混合气是汽油机中抑制爆震的常用方法^[25],但加浓混合气会降低发动机热效率。为探索在不损失燃油经济性的情况下抑制爆震的可能性,试验研究了 θ_{st} 延迟和稀混合气条件下的爆震情况。试验首先保持 $p_i=0.7$ MPa, $\lambda=1.0$, θ_{st} 以 -13° (最佳点火提前角) 为基准分别推迟 1° 、 2° 和 3° , 研究 θ_{st} 延迟条件下的爆震情况。图 6 显示了不同 θ_{st}

处的 I_k 分布。当 θ_{st} 从 -12° 推迟到 -10° 时, I_k 的最大值降低了 50% 以上,表明爆震倾向大大降低,但强烈爆震仍然存在。同时, θ_{CA50} 和缸内压力峰值对应的曲轴转角分别延迟至 17.2° 和 21.5° 。缸内放热过程过度延迟,甲醇燃料的经济性已然丧失。因此,在 PFI 模式下,仅依靠延迟 θ_{st} 来抑制爆震,燃油经济性损失过大,总体效果不佳。

在点火角度为 -13° 时,不同 λ 下连续 200 个循环的 I_k 分布见图 7。可以看出, λ 为 1.2 和 1.3 时,爆震强度和频率均有所降低。一方面,采用稀混合气时,火焰发展期和燃烧持续期延长,燃烧相位延迟,缸内温度和压力降低。同时,缸内充量的总质量增加,相同负荷下缸内混合气热容量更高,导致末端混合气温度降低,从而抑制了爆震倾向。然而,与图 3(c) 的 λ 为 1.0 时相比, λ 为 1.1 时,爆震强度未显著降低,爆震频率却增加。这是因为,较小的 λ 使得空气的稀释作用减弱,混合气燃烧速度和燃烧峰值温度下降幅度小。但是,更多的氧气有利于甲醇焰前反应,产生更多的高活性物质和自由基,从而使末端混合气中高活性物质和自由基浓度增加,着火滞燃期缩短,爆震发生倾向增大。当 λ 为 1.2 和 1.3 时,强烈爆震循环的最大 I_k 较 λ 为 1.0 时略有下降,爆震频率保持同一水平。可见,在 PFI 模式下,采用稀混合气和推迟点火抑制爆震的效果欠佳。

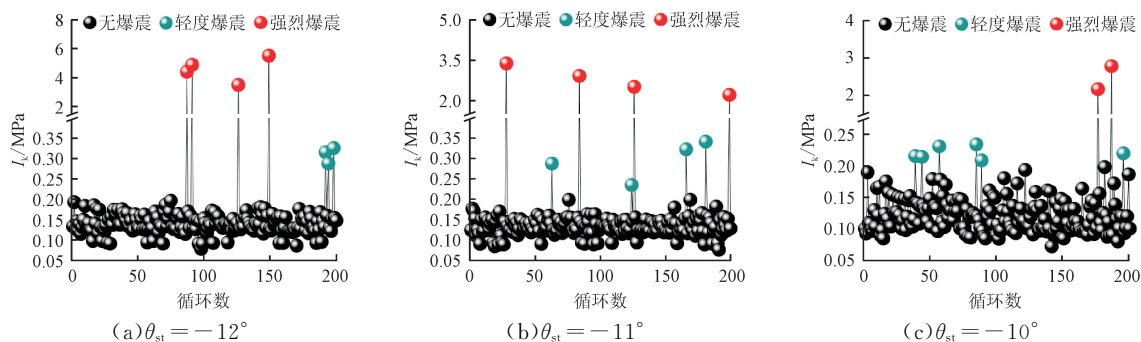


图 6 $\lambda=1.0$ 且 $p_i=0.7$ MPa 时的 I_k 分布
Fig. 6 I_k distributions with $\lambda=1.0$ and $p_i=0.7$ MPa

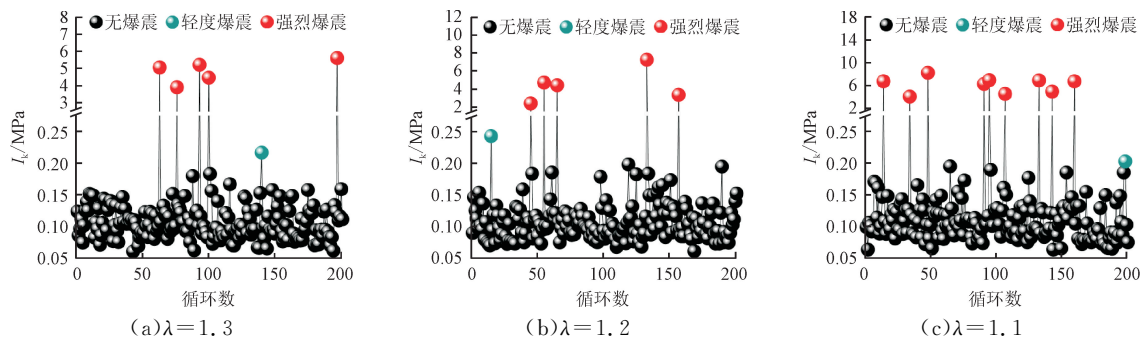


图 7 在 $\theta_{st}=-13^\circ$ 和 $p_i=0.7$ MPa 条件下的 I_k 分布
Fig. 7 I_k distributions with $\theta_{st}=-13^\circ$ and $p_i=0.7$ MPa

2.2 DI 模式下的爆震研究

辛烷值敏感度(S)定义为研究法辛烷值与马达法辛烷值之差,可用于指示燃料自燃动力学对发动机运行工况(尤其是进气温度)的敏感性。在 SI 发动机中,马达法辛烷值相近的燃料中,具有较高 S 的燃料通常抗爆性更好。甲醇因高汽化潜热可抑制爆震,其 S 高达 20 左右,但在甲醇发动机中,抗爆性与实际的进气冷却效果高度相关。Stein 等^[26]证实,DI 比 PFI 模式具有更好的抗爆震效果。因此,本节将讨论不同缸内直喷策略对爆震燃烧的影响。

在 DI 和 PFI 模式下, p_i 为 0.7 MPa 时 200 个循环的 I_k 分布见图 8。显然,DI 模式消除了强烈和中度爆震循环,仅存在轻度爆震循环。DI 模式下,充量冷却效果显著,缸内平均温度峰值比 PFI 模式更低,使得未燃混合气的热力学状态远离爆震区间,导致中度和强烈爆震循环消除, I_k 平均值大幅降低至 0.145 MPa。

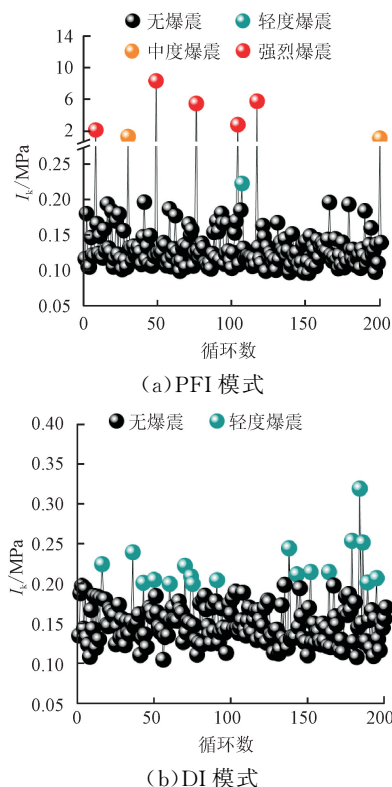


图 8 PFI 模式和 DI 模式在 $p_i=0.7$ MPa 时的 I_k 分布
Fig. 8 I_k distributions of PFI mode and DI mode at $p_i=0.7$ MPa

DI 模式下,当发动机 p_i 增加到 0.91 MPa 时,200 个连续循环的平均 I_k 超过了 0.2 MPa 的无爆震限值,且爆震主要发生在较早的喷射工况。为了深入探究喷射角度(θ_i)对 I_k 的影响,使用单次喷射模式,两种点火角度分别设定为固定 θ_{st} 为 -17.5° 和调整 θ_{st} 以保持 θ_{CA50} 为 12° 的条件下进行试验。如图

9 所示,固定 θ_{st} 为 -17.5° 时, I_k 随喷射时刻的推迟而逐渐降低。在 θ_i 早于 -330° 时, I_k 超过限值,最大值为 0.43 MPa。与图 3(c) p_i 为 0.7 MPa 的 PFI 模式下的 I_k 的最大值相比, p_i 为 0.91 MPa 的 DI 模式下的 I_k 最大值仅为 5.1%。在 DI 模式下,且发动机的负荷比 PFI 模式下的负荷更大的条件下,但 I_k 的最大值却远小于 PFI 模式,这表明 DI 模式对爆震的抑制效果显著。在 θ_{CA50} 维持 12° 时, I_k 整体更低,但当喷射时刻为 -350° 时, I_k 超出了限值。喷射时刻会对喷雾的发展状态产生影响,进而导致不同的混合气冷却效果。当喷射时刻早于 -300° 时,一定量的甲醇不可避免地会冲击活塞顶并形成液膜。这部分附着在活塞顶部的甲醇主要从活塞而非缸内混合气中吸收热量,降低了甲醇对混合气的冷却效果。

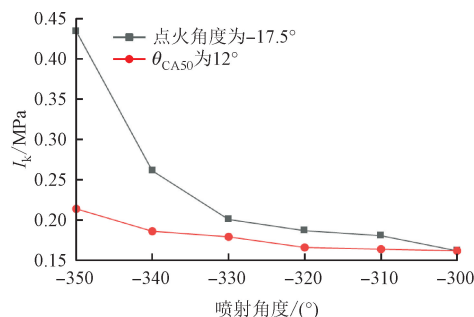
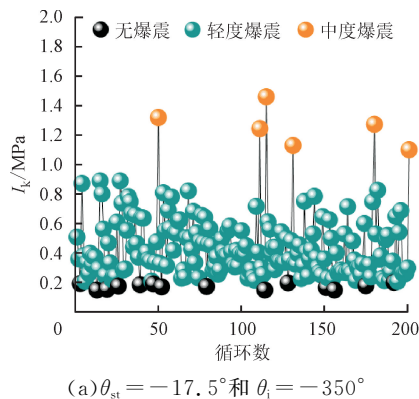


图 9 $p_i=0.91$ MPa 时 I_k 随 θ_i 的变化
Fig. 9 Variations of I_k with θ_i at $p_i=0.91$ MPa

图 10(a)和(b)展示了在 θ_{st} 为 -17.5° 时, θ_i 分别为 -350° 和 -300° 下连续 200 个循环的 I_k 分布。可以看出, θ_i 为 -350° 时, I_k 比 θ_i 为 -300° 时大幅提高。显然,这是由于在 $\theta_i=-300^\circ$ 下冷却效应更强所导致的。从图 10(c)看出,将 θ_{CA50} 保持在 12° (相应地, $\theta_{st}=-15.3^\circ$) 可以平衡燃料经济性并减少爆震倾向。与图 10(a)相比,延迟 θ_{st} 完全消除了中度爆震循环,但与图 10(b)相比, I_k 有所提高。结果表明,与 PFI 模式相比,DI 策略可将爆震边界扩展到 $p_i=0.91$ MPa,且没有发生强烈爆震,但存在轻度爆震循环。



(a) $\theta_{st}=-17.5^\circ$ 和 $\theta_i=-350^\circ$

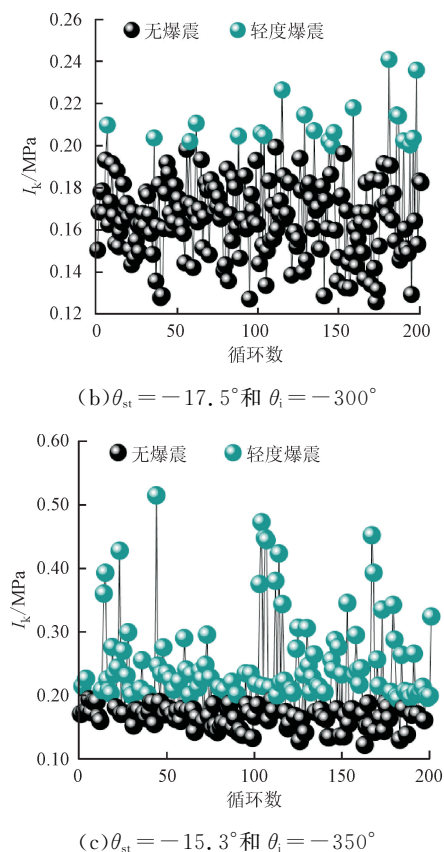


图 10 DI 模式在 $p_i = 0.91$ MPa 时不同 θ_{st} 和 θ_i 下的 I_k 分布
Fig. 10 I_k distributions of DI mode at $p_i = 0.91$ MPa under different θ_{st} and θ_i values

2.3 WOT 状态 DI 模式下喷射策略对爆震的影响

为进一步降低爆震强度,研究了 λ 为 1.0 时,单次喷射的喷射时刻对 WOT 状态下甲醇发动机爆震特性的影响。图 11 显示了在保持 $\theta_{st} = -20^\circ$ 和调整点火时刻以保持 θ_{CA50} 在 12° 时, I_k 随 θ_i 的变化。结果表明;延迟 θ_i , I_k 先增大后减小,峰值位于 $\theta_i = -270^\circ$ 处;保持 $\theta_{st} = -20^\circ$ 时,除 $\theta_i = -330^\circ$ 和 $\theta_i = -90^\circ$ 外,其他 θ_i 条件下 I_k 均超过无爆震限值;调整点火时刻保持 $\theta_{CA50} = 12^\circ$, I_k 显著降低。

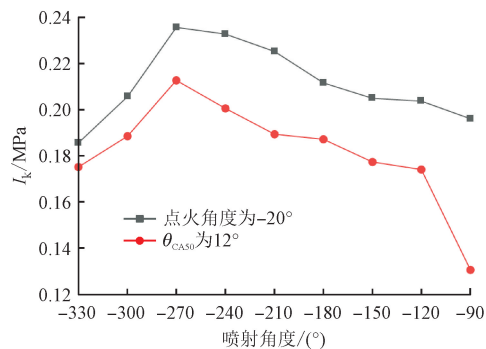


图 11 在 WOT 条件下 I_k 随 θ_i 的变化
Fig. 11 Variations of I_k with θ_i under WOT condition

此外,如图 12 所示,当调整点火时刻保持 $\theta_{CA50} = 12^\circ$ 时, p_i 和 R_{max} 均随 θ_i 的推迟先增大后减小, p_i 在 -210° 达到峰值, R_{max} 在 -270° 达到峰值,表明过早喷射和晚喷都会使 p_i 和 R_{max} 大幅下降。随着喷射时刻的变化, R_{max} 的值均低于 0.50 MPa/(°) 的限值,发动机燃烧噪声处于较低水平。

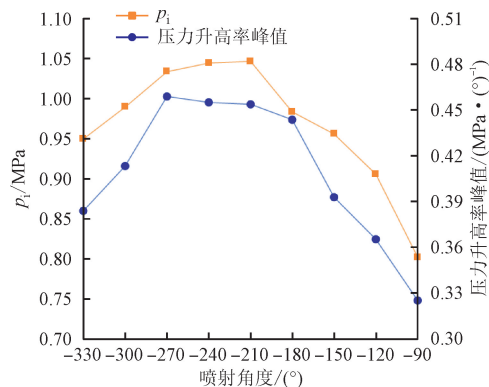


图 12 在 WOT 条件下 p_i 和 R_{max} 随 θ_i 的变化
Fig. 12 Variations of p_i and R_{max} with θ_i under WOT condition

分析影响因素主要有:混合气均匀性、充量冷却效应和充量系数。在 $-330^\circ \sim -210^\circ$ 的喷射时刻下,甲醇喷雾有足够时间蒸发。同时,进气冲程中存在强烈的进气涡流和滚流,加速了空气和甲醇喷雾的混合。因此,在压缩冲程结束时,混合气的均匀性相对较好。 θ_i 在 $-330^\circ \sim -210^\circ$ 时,随 θ_i 的推迟可减少甲醇喷雾的碰壁质量,增强对混合气的冷却效应,使充量系数随 θ_i 的延迟而增加, p_i 逐渐增大且峰值出现在 θ_i 为 -210° 处。当 θ_i 晚于 -180° 时,由于进气冲程结束,进气冷却效应不会带来额外的充量系数改善。此外,随着 θ_i 的延迟,由于蒸发时间缩短和缸内流动减弱,混合气更不均匀,导致燃烧速度和效率降低,进而造成 p_i 和 R_{max} 的下降。综上,在 WOT 状态下,当 $\theta_i = -210^\circ$ 时,发动机可获得最大功率输出,且通过优化点火角, I_k 和 R_{max} 均能控制在限值以下。

多次喷射以形成分层混合气是减少涡轮增压汽油发动机早燃和爆震的有效方法^[27]。正如 Gong 等^[18] 的研究所示,高压压缩比甲醇发动机可以使用分层混合气来抑制爆震。因此,研究了多次喷射策略对减少甲醇发动机爆震的影响。

在试验过程中, θ_{st} 和 λ 分别保持在 -20° 和 1.0。第 1 次喷射开始时刻 (θ_{i1}) 保持在 -270° , 而第 2 次喷射开始时刻 (θ_{i2}) 从 -90° 变化到 20° , 以形成分层混合气。

首先,固定 θ_{i2} 为 -60° ,研究 I_k 随第2次喷射甲醇质量分数(w_{i2})的变化。如图13所示,结果表明, I_k 随 w_{i2} 的增加而减少。当 w_{i2} 在10%以内时,混合气浓度梯度太小,不能有效降低末端混合气的自燃倾向。当 w_{i2} 超过10%时,爆震强度迅速下降。随着 w_{i2} 超过12.5%, I_k 的下降幅度变小。然而,当 w_{i2} 超过10%时,一氧化碳(CO)排放急剧增加。因为过多的二次喷射质量,会造成局部过浓的混合气,从而增加CO排放。因此,为了平衡爆震强度和CO排放,选择固定 w_{i2} 为12.5%。

其次,研究固定 w_{i2} 为12.5%时, I_k 随 θ_{i2} 的变化情况。如图13所示,当 θ_{i2} 从 -90° 推迟到 -20° 时, I_k 下降明显。当 θ_{i2} 晚于 -20° ,观察到 I_k 已呈现小幅波动,此时缸内压力高频振荡分量的振幅与背景噪声的振幅已经处于同一量级。

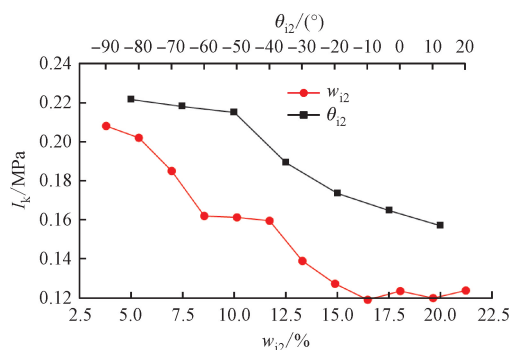


图13 在WOT条件下 $\theta_{st} = -20^\circ$ 时 I_k 随 w_{i2} 和 θ_{i2} 的变化
Fig. 13 Variations of I_k with w_{i2} and θ_{i2} at $\theta_{st} = -20^\circ$ under WOT condition

如图14所示,太迟的 θ_{i2} (晚于 -40°)可能会因为燃烧相位推迟和更低的燃烧效率而使燃烧过程恶化,从而减小发动机功率, p_i 下降。

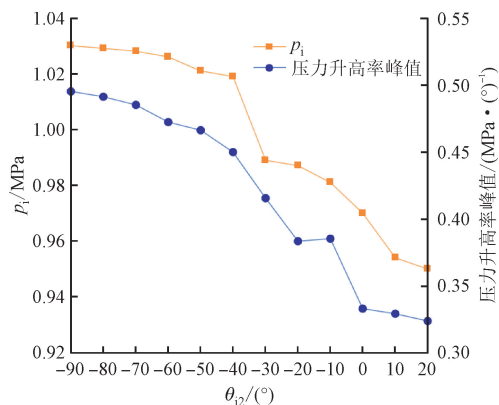


图14 在WOT条件下 $\theta_{st} = -20^\circ$ 时 p_i 和 R_{max} 随 θ_{i2} 的变化
Fig. 14 Variations of p_i and R_{max} with θ_{i2} at $\theta_{st} = -20^\circ$ under WOT condition

此外,对比图14与图12可知,两次喷射的最佳 p_i 仅比单次喷射低0.02 MPa。两次喷射时, θ_{i2} 晚于 -40° 时的 p_i ,优于单次喷射 θ_{i1} 晚于 -180° 的 p_i 。合理的两次喷射策略可进一步降低 I_k 。与 θ_{CA50} 保持 12° 且 θ_{i1} 为 -210° 的单次喷射相比,两次喷射固定 θ_{i1} 为 -270° , w_{i2} 为12.5%, θ_{i2} 为 -60° 且 θ_{st} 为 -20° 时, I_k 降低14.3%, p_i 仅损失0.022 MPa。综上,在WOT条件下,两次喷射固定 θ_{i1} 为 -270° , θ_{i2} 在 $-40^\circ \sim -60^\circ$ 之间变化, θ_{st} 为 -20° ,且 w_{i2} 为12.5%是实现发动机高功率和低爆震强度的最佳策略。

3 结 论

本文针对一台高压比甲醇发动机开展爆震特性与抑制试验研究,主要结论如下。

(1) 在进气道喷射工况下,指示平均有效压力为0.6 MPa时,发动机出现轻度和中度爆震;指示平均有效压力增至0.7 MPa时,产生低频率强烈爆震,爆震强度最大值为8.42 MPa。延迟点火或采用稀混合气均无法消除强烈爆震。

(2) 缸内直喷策略能有效缓解爆震。在该模式下,优化甲醇喷射时刻可将爆震边界扩展到全负荷工况。节气门全开时,喷射时刻处于 $-240^\circ \sim -210^\circ$ 之间,指示平均有效压力可达1.05 MPa左右,同时爆震强度低于0.2 MPa无爆震限值。

(3) 在缸内直喷并结合两次喷射的模式下,通过对喷射时刻、点火时刻、两次喷射甲醇质量分数的协同优化,合理的两次喷射策略可进一步降低爆震强度,同时保持甲醇发动机较高的指示平均有效压力。

参考文献:

- [1] 续哈,姚安仁,姚春德. 高压比甲醇发动机中爆震现象研究[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(2): 153-160.
XU Han, YAO Anren, YAO Chunde. The detonation phenomenon of high compression ratio methanol engines [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(2): 153-160.
- [2] 胡正兴. 大功率甲醇发动机爆震和性能的仿真分析与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023: 4-6.
- [3] 姚春德,姚安仁. 甲醇燃料的应用现状及其展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(5): 521-535.
YAO Chunde, YAO Anren. Review on methanol as fuel for engines and its future prospect [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2023, 14(5): 521-

- 535.
- [4] NUTHAN PRASAD B S, PANDEY J K, KUMAR G N. Impact of changing compression ratio on engine characteristics of an SI engine fueled with equi-volume blend of methanol and gasoline [J]. *Energy*, 2020, 191: 116605.
- [5] 陈烨欣, 蒋炎坤, 张备东. 甲醇掺混富氢混合气在发动机缸内燃烧特性研究进展 [J]. *车用发动机*, 2024 (5): 1-11.
- CHEN Yexin, JIANG Yankun, ZHANG Beidong. Study progress of engine in-cylinder combustion characteristics for methanol blended with hydrogen-rich mixtures [J]. *Vehicle Engine*, 2024(5): 1-11.
- [6] SAHU S, KUMAR P, DHAR A. Effect of injection timing on combustion, performance and emissions characteristics of methanol fuelled DISI engine: a numerical study [J]. *Fuel*, 2022, 322: 124167.
- [7] 胡正兴, 朱建军, 张其生, 等. 大功率甲醇发动机爆震的仿真分析与研究 [J]. *可再生能源*, 2023, 41(5): 578-585.
- HU Zhengxing, ZHU Jianjun, ZHANG Qisheng, et al. Simulation analysis and research on knock of high-power methanol engine [J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(5): 578-585.
- [8] 杨一方, 欧训民, 刘建喆. 绿色甲醇的技术进展与应用前景 [J]. *科技中国*, 2024(8): 60-66.
- YANG Yifang, OU Xunmin, LIU Jianzhe. Technological progress and application prospects of green methanol [J]. *China Scitechnology Think Tank*, 2024 (8): 60-66.
- [9] LIU Xinlei, SHARMA P, SILVA M, et al. Computational investigation of methanol pre-chamber combustion in a heavy-duty engine [J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 15: 100192.
- [10] LENG Xianyin, DENG Yicheng, HE Dongze, et al. A preliminary numerical study on the use of methanol as a mono-fuel for a large bore marine engine [J]. *Fuel*, 2022, 310(Part B): 122309.
- [11] CHENG Chong, FAURSKOV CORDTZ R, BERG THOMSEN T, et al. Application of methanol with an ignition improver in a small marine CI engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 271: 116311.
- [12] 薛劲梓. 点燃式甲醇发动机稀薄燃烧和爆震试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021: 1-3.
- [13] ZHEN Xudong, WANG Yang, ZHU Yongsheng. Study of knock in a high compression ratio SI methanol engine using LES with detailed chemical kinetics [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 75: 523-531.
- [14] ZHEN Xudong, WANG Yang, XU Shuaiqing, et al. Study of knock in a high compression ratio spark-ignition methanol engine by multi-dimensional simulation [J]. *Energy*, 2013, 50: 150-159.
- [15] ZHEN Xudong, WANG Yang. Study of ignition in a high compression ratio SI (spark ignition) methanol engine using LES (large eddy simulation) with detailed chemical kinetics [J]. *Energy*, 2013, 59: 549-558.
- [16] 姚春德, 续晗, 姚安仁, 等. 缸内激波对锥顶型燃烧室的活塞破坏机理 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(1): 57-64.
- YAO Chunde, XU Han, YAO Anren, et al. Damage mechanism of detonation wave to piston in combustion chamber with cone-type roof [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(1): 57-64.
- [17] ZHEN Xudong, WANG Yang, XU Shuaiqing, et al. Numerical analysis on knock for a high compression ratio spark-ignition methanol engine [J]. *Fuel*, 2013, 103: 892-898.
- [18] GONG Changming, YI Lin, ZHANG Zilei, et al. Assessment of ultra-lean burn characteristics for a stratified-charge direct-injection spark-ignition methanol engine under different high compression ratios [J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114478.
- [19] LI Xiaoyan, ZHEN Xudong, WANG Yang, et al. The knock study of high compression ratio SI engine fueled with methanol in combination with different EGR rates [J]. *Fuel*, 2019, 257: 116098.
- [20] 雷先华, 杨启正, 叶幸. 现代汽油发动机燃油喷射技术综述 [J]. *机电工程技术*, 2020, 49(6): 19-20.
- LEI Xianhua, YANG Qizheng, YE Xing. Summary of fuel injection technology of modern gasoline engine [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(6): 19-20.
- [21] ZHEN Xudong, WANG Yang, XU Shuaiqing, et al. The engine knock analysis: an overview [J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 628-636.
- [22] FERRARO C V, MARZANO M, NUCCIO P. Knock-limit measurement in high-speed S. I. Engines [C]//SAE International Congress and Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1985: 850127.
- [23] WEI Haiqiao, FENG Dengquan, PAN Mingzhang, et al. Experimental investigation on the knocking combustion characteristics of n-butanol gasoline blends in a DISI engine [J]. *Applied Energy*, 2016, 175: 346-355.
- [24] WANG Zhi, LIU Hui, SONG Tao, et al. Investigation on pre-ignition and super-knock in highly boosted

- gasoline direct injection engines [C]//SAE 2014 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2014: 2014-01-1212.
- [25] WANG Zhi, LIU Hui, REITZ R D. Knocking combustion in spark-ignition engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 61: 78-112.
- [26] STEIN R A, POLOVINA D, ROTH K, et al. Effect of heat of vaporization, chemical octane, and sensitivity on knock limit for ethanol-gasoline blends [J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2012, 5(2): 823-843.
- [27] SINGH E, MORGANTI K, DIBBLE R. Optimizing split fuel injection strategies to avoid pre-ignition and super-knock in turbocharged engines [J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(1): 199-221.
- (编辑 杜秀杰)