

喷射压力对甲醇缸内直喷发动机燃烧和排放特性影响的实验研究

任宪丰^{1,2}, 王金平³, 牛凯丽³, 尹晓军¹, 段浩¹, 胡二江¹, 曾科¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国重型汽车集团有限公司
汽车研究总院, 250102, 济南; 3. 潍柴动力股份有限公司, 261061, 山东潍坊)

摘要: 为准确揭示喷射参数对发动机性能的影响规律,基于单缸柴油机构建了甲醇缸内直喷发动机实验平台,利用台架实验系统研究了中等转速和中等负荷工况下,喷射压力对直喷甲醇发动机动力性、经济性、燃烧和排放特性的影响规律。结果表明:提升喷射压力对放热速率改善作用有限,对燃烧始点、燃烧重心、燃烧终点、火焰发展期和燃烧周期影响较小,但能显著降低缸内循环变动。喷射压力的提升可改善混合气均匀性与充气效率,增大发动机指示平均有效压力(IMEP)和缸内压力峰值($p_{\max}$)。当进气压力为0.065 MPa时,相比甲醇喷射压力为6 MPa和22 MPa时IMEP的循环变动和 $p_{\max}$ 的循环变动分别降低了42.7%和37.3%,IMEP增加了6.8%。此外,喷射压力对排放物影响复杂:随着喷射压力的提升,CO排放量近似线性下降,NO_x排放量大幅增加,碳氢化合物和甲醇排放量因进气压力而异,甲醛排放量则略有上升。研究明确了喷射压力对甲醇缸内直喷发动机的影响,可为实际发动机控制策略的开发和优化提供理论基础和数据指导。

关键词: 甲醇发动机;缸内直喷;喷射压力;经济性;动力性;排放

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202506002 **文章编号:** 0253-987X(2025)06-0011-10

Experimental Study on the Influence of Injection Pressure on the Combustion and Emission Characteristics of Methanol Direct Injection Engine

REN Xianfeng^{1,2}, WANG Jinping³, NIU Kaili³, YIN Xiaojun¹,

DUAN Hao¹, HU Erjiang¹, ZENG Ke¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Automotive Research Institute, China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250102, China;
3. Weichai Power Co., Ltd., Weifang, Shandong 261061, China)

Abstract: To accurately reveal the influence mechanism of injection parameters on engine performance, this paper built an experimental platform for a direct-injection methanol engine based on a single-cylinder diesel engine. A bench test system was used to investigate the influence of injection pressure on the power, economy, combustion, and emission characteristics of the direct-injection methanol engine under medium-speed and medium-load conditions. The results suggest that the method of augmenting the injection pressure plays a limited role in enhancing the heat release rate, exerting only a minor influence on the combustion start point, combustion center of gravity, combustion

end point, flame development period, and combustion cycle. Nevertheless, it can remarkably reduce the in-cylinder variation coefficients. Simultaneously, an increase in injection pressure can improve the uniformity and charging efficiency of the mixture, thereby raising the indicated mean effective pressure (IMEP) and the peak in-cylinder pressure ($p_{\max}$) of the engine. For instance, at an intake pressure of 0.065 MPa, when the methanol injection pressure is increased from 6 MPa to 22 MPa, the coefficient of variation of IMEP and coefficient of variation of $p_{\max}$ decrease by 42.7% and 37.3%, respectively, while the IMEP increases by 6.8%. Furthermore, the influence of injection pressure on emissions is intricate. As the injection pressure rises, CO emissions decline in an approximately linear manner, NO_x emissions increase substantially, the trends of hydrocarbon and methanol emissions vary depending on the intake pressure, and formaldehyde emissions exhibit a slight increment. This study can offer a theoretical foundation and data-based guidance for the development and optimization of practical engine control strategies.

Keywords: methanol engines; in-cylinder direct injection; injection pressure; economy; dynamics; emission

在“双碳”目标下,内燃机领域对清洁、高效代用燃料的探索成为研究热点。甲醇凭借优异的理化特性,被广泛认为是短期内极具潜力的内燃机代用燃料之一^[1]。具体而言:含氧量高,有助于促进燃料的充分燃烧,减少不完全燃烧产物的生成^[2];碳氢比低,意味着燃烧过程中产生的碳排放量相对较低,契合减碳要求^[3];辛烷值高,赋予其良好的抗爆性能,有利于发动机在高压比下稳定运行,从而提升热效率^[4];着火界限宽,使其在不同工况下都能更易于着火,增强了发动机运行的适应性和可靠性^[5]。

然而,爆震问题限制了甲醇发动机压缩比和热效率的提升空间^[6-7]。目前,稀燃和废气再循环(EGR)是抑制甲醇发动机爆震现象的关键技术手段。Zhen等^[8]对高压比进气道喷射甲醇火花点火发动机采用化学计量混合气运行时的爆震行为进行了模拟,发现当压缩比升至17.5时,仅靠延迟点火已难以完全消除爆震现象。Gong等^[9]对分层充量直喷甲醇发动机在不同压缩比下的稀薄燃烧特性展开了分析,结果显示:当量比为0.25时,发动机能够在无爆震的状态下获得较为理想的性能。Li等^[10]研究了EGR率对高压比甲醇发动机爆震燃烧的影响,发现采用EGR技术虽然能够削弱爆震倾向,但会对功率产生一定限制。

缸内直喷技术^[11-12]能够充分挖掘并发挥甲醇高潜热与高抗爆性的特性,提升发动机的功率密度和热效率,从而为解决甲醇发动机在发展过程中面临的性能提升、爆震抑制等难题开辟了新的技术路径。相较于采用甲醇进气道喷射方案的双燃料发动机^[13-14],甲醇直喷发动机^[15-16]在燃料喷射策略的控制上具有更高的灵活性,可通过精准调控甲醇喷射

实现燃料活性与浓度分层的解耦控制,因而在优化发动机性能方面展现出更为显著的潜力。Sileghem等^[17]在一台缸内直喷汽油发动机上对比研究了燃用甲醇、乙醇、丁醇和汽油时的性能,结果表明:使用醇类燃料时发动机的热效率均高于汽油,且使用甲醇时发动机热效率最高;在爆震限制条件下,使用甲醇时的热效率比汽油高5%,气态污染物和颗粒物排放量也大幅优化。Nguyen等^[18]在一台缸内直喷发动机上研究了甲醇稀燃时的燃烧特性,结果表明:当节气门全开、过量空气系数(λ)处于1.2~1.4范围内时,可获得41%的有效热效率。Sahu等^[19]在一台小缸径缸内直喷发动机中,利用数值模拟方法研究了燃用甲醇时喷射时刻对发动机燃烧和排放特性的影响,结果发现:当喷射时刻为上止点后110°时,可获得发动机经济性和排放的最佳折中;除NO_x外,燃用甲醇时其余常规排放物均显著少于燃用汽油时。

然而,现有针对直喷模式下甲醇喷射和点火参数匹配方面的研究不足,无法全面、深入地揭示这两组参数间复杂的相互作用机制及其对甲醇发动机综合性能的影响规律。因此,本文旨在通过台架实验,系统地研究甲醇喷射压力对甲醇燃烧和排放特性的影响规律,实现发动机性能的显著提升、爆震现象的有效抑制以及排放的进一步降低,以推动甲醇发动机技术的进步与应用,为实际发动机控制策略的开发和优化提供理论基础和数据支撑。

1 实验方法及研究方案

1.1 实验平台搭建

实验用原型机为常柴F192单缸风冷柴油机,排

量、缸径、行程和连杆长度分别为 0.498 L、92 mm、75 mm 和 121 mm,压缩比为 19.0。在原型机缸盖上加装了甲醇缸内直喷喷嘴,匹配了大流量径向三柱

塞高压油泵,并通过控制油量计量单元的开度进行轨压控制,从而实现甲醇的高压缸内直喷。图 1 给出了甲醇缸内直喷发动机台架的整体布置方案。

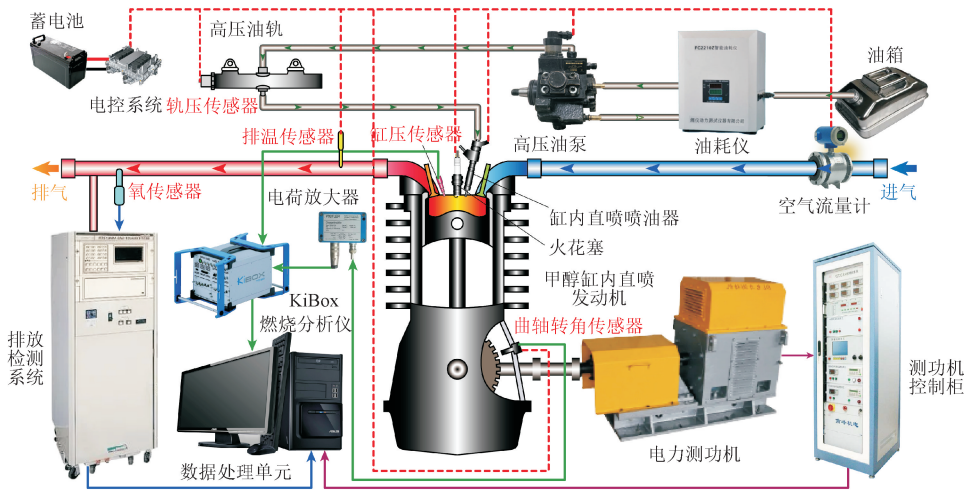


图 1 发动机实验台架布置
Fig. 1 Arrangement of engine test stands

发动机转速与扭矩监测采用湖南湘仪动力测试仪器有限公司生产的 CAC37 电力测功机。转速测量范围为 0~9 000 r·min⁻¹,精度为±1 r·min⁻¹;扭矩测量范围为 0~117 N·m,精度为±0.2 N·m。通过调节测功机的负载率使发动机转速稳定在目标转速。甲醇消耗由高精度电子秤称量,量程为 0~30 kg,精度为±0.1 g。空气流量测量配备 TOCEIL20N080 热式气体质量流量计,量程为 15~750 kg·h⁻¹,精度为±0.1%。NO_x、碳氢化合物(HC)和 CO 在排气中的体积分数利用 AVL 4000 废气分析仪测量,CO 测量范围为 0~15%,精度为±0.001%;HC 测量范围为 0~30 000×10⁻⁶,精度为±1×10⁻⁶;NO_x 测量范围为 0~5 000×10⁻⁶,精度为±1×10⁻⁶。发动机缸内燃烧状态借助 KiBox 燃烧分析仪实时监测,缸内压力和曲轴转角

信号分别通过 Kistler 6058A 压力传感器(量程为 0~25 MPa,精度为±0.03 MPa)与 Kistler2619A11 曲轴转角传感器(量程为 0~360°,精度为±0.1°)测量,在同一运行工况下采集 200 个连续工作循环的缸压数据用于燃烧特征参数分析。此外,采用自研的电控系统,结合标定软件 ATI VISION 修改点火时刻、喷射压力、喷射时刻等参数。

1.2 实验方案

实验过程中,转速固定为 2 000 r·min⁻¹,通过调节节气门开度使进气压力分别稳定在 0.065 MPa 和 0.087 MPa,对应的点火时刻分别为上止点后-16.5°和-15.5°,喷射时刻固定在上止点后-180°。在改变喷射压力时,同步调节喷射脉宽,保证λ始终稳定在 1.0。发动机实验工况方案如表 1 所示。

表 1 发动机实验工况方案
Table 1 Schemes of the engine experimental operating condition

方案	转速/(10 ³ r·min ⁻¹)	进气压力/MPa	点火时刻/(°)	喷射时刻/(°)	喷射压力/MPa
1	2	0.065	-16.5	-180	6
2	2	0.065	-16.5	-180	10
3	2	0.065	-16.5	-180	14
4	2	0.065	-16.5	-180	18
5	2	0.065	-16.5	-180	22
6	2	0.087	-15.5	-180	6
7	2	0.087	-15.5	-180	10
8	2	0.087	-15.5	-180	14
9	2	0.087	-15.5	-180	18
10	2	0.087	-15.5	-180	22

实验中,每个工况下发动机需要稳定一段时间后再进行数据采集。同一工况下,重复进行 20 次实验取平均值。为确保数据的准确性,基于文献[20-21]的计算方法,对关键测量参数和整个测试系统的不确定度进行了计算。结果显示:各测量参数的不确定度小于 2.0%,整个测试系统的不确定度为±4.2%,满足限值 5.0%的要求^[22]。因此,本文的实验数据精度可以得到保证。

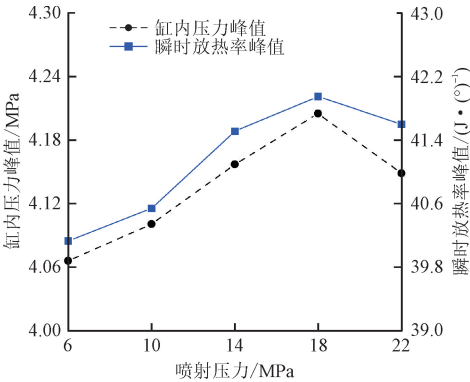
2 结果与讨论

2.1 喷射压力对燃烧特性的影响

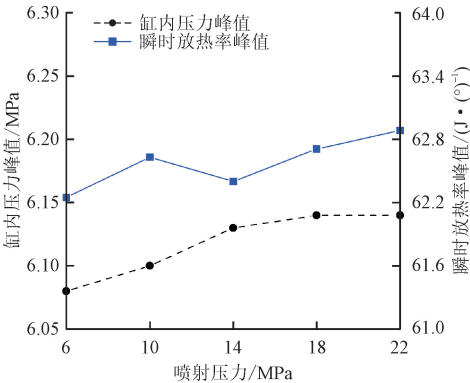
图 2 为喷射压力对缸内压力峰值($p_{\max}$)和瞬时放热率峰值($h_{\max}$)的影响。总体来看, $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$ 均随着喷射压力的升高而增大。当进气压力为 0.065 MPa,甲醇喷射压力分别为 6、10、14、18 MPa 时,缸内压力峰值分别为 4.01、4.10、4.16、4.21 MPa,瞬时放热率峰值分别为 40.13、40.54、41.51、41.95 J·(°)⁻¹。喷射压力增大后,甲醇喷雾的平均粒径更小,对空气的卷吸更强烈,有利于甲醇的蒸发和混合。同时,高喷射压力进一步增强了喷雾对空气的卷吸作用,使得同等空燃比下,缸内甲醇蒸发更完全,分布更均匀,反应活性更强,火焰传播速度更高。

然而,当进气压力为 0.065 MPa、喷射压力由 18 MPa 增大至 22 MPa 时, $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$ 反而略有下降。这是由于 22 MPa 时虽然甲醇雾化更好,但更大的喷射压力会使喷雾的动量增大、贯穿距增加^[23],导致喷射结束时更多的燃料被输运到喷油器对向的缸壁附近。在点火时刻,靠近缸壁的燃料与空气混合不充分,混合气均匀度反而有所下降,进而造成燃烧反应速率降低, $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$ 降低。同时,由图 2(b)可知:当进气压力为 0.087 MPa、喷射压力超过 18 MPa 时, $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$ 的改善十分有限。总体来看,提升喷射压力对放热速率的改善作用有限。当进气压力为 0.065 MPa 时,喷射压力由 6 MPa 提升至 18 MPa, $h_{\max}$ 仅升高了 4.5%;当进气压力为 0.087 MPa 时, $h_{\max}$ 随喷射压力提升的改善幅度则更小。在中、高负荷时,14~18 MPa 是较为理想的喷射压力。

图 3 为喷射压力对燃烧始点(CA05)、燃烧重心(CA50)和燃烧终点(CA90)等燃烧参数的影响。由图可知,当进气压力为 0.065、0.087 MPa 时,喷射压力对 CA05、CA50、CA90、火焰发展期和燃烧周期影响均很小,不同喷射压力间上述各参数的最大差值仅有 1.2°。这是因为燃烧过程主要受化学反应动力学和混合气形成过程的影响。甲醇燃烧的化学反应速率主要取决于温度、压力和反应物浓度。本实验中喷射压力的变化对这些因素的影响较小,使得化学反应速率变化不明显,进而对 CA05、CA50 和 CA90 等燃烧参数影响较小。在混合气形成方面,虽然喷射压力会影响甲醇喷雾的状态,但在不同喷射压力下,混合气在着火前均可达到一定的均匀度,且着火后火焰传播过程受混合气整体特性影响,并非单纯取决于喷射压力。所以,喷射压力对火焰生成、发展和传播过程的影响较小,这与图 2 中喷射压力对 $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$ 的影响规律是一致的。



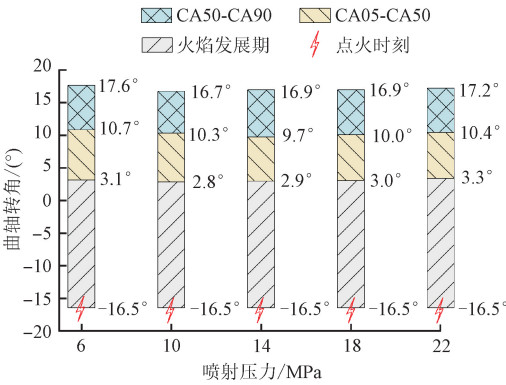
(a) 进气压力为 0.065 MPa



(b) 进气压力为 0.087 MPa

图 2 不同喷射压力下的 $p_{\max}$ 和 $h_{\max}$

Fig. 2 $p_{\max}$ and $h_{\max}$ under different injection pressures



(a) 进气压力为 0.065 MPa

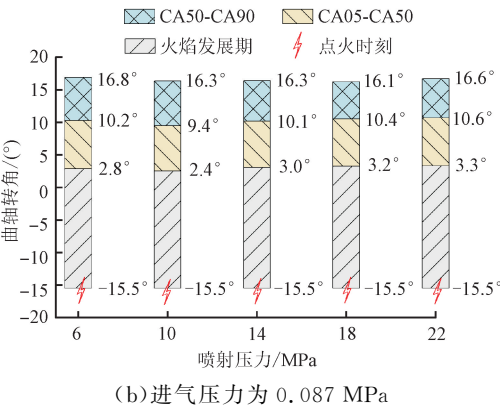


图 3 不同喷射压力下的燃烧参数

Fig. 3 Combustion parameters under different injection pressures

压力升高率(R)是评价发动机燃烧粗暴度的重要指标,对于点燃式发动机,压力升高率峰值($R_{\max}$)一般不应超过 $0.50 \text{ MPa}/(^{\circ})^{[24]}$ 。最大压力振荡幅值($\Delta p_{\max}$)是判定发动机是否进入爆震工况的重要指标,判定阈值通常为 $0.10 \text{ MPa}^{[25]}$ 。图 4 为不同喷射压力时的 $\Delta p_{\max}$ 和 $R_{\max}$ 。显然,不同进气压力下, $\Delta p_{\max}$ 均远低于 0.10 MPa ,且喷射压力对 $R_{\max}$ 和 $\Delta p_{\max}$ 的影响很小。特别是进气压力为 0.065 MPa 时, $\Delta p_{\max}$ 几乎不随喷射压力的改变而变化。这是因

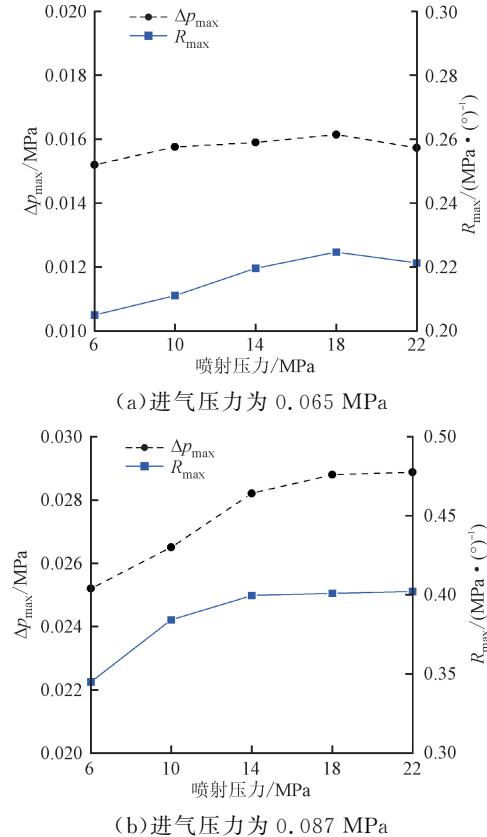


图 4 不同喷射压力下的 $\Delta p_{\max}$ 和 $R_{\max}$

Fig. 4 $\Delta p_{\max}$ and $R_{\max}$ at different injection pressures

为进气压力较低,负荷较小,发动机远离爆震工况。 $R_{\max}$ 是放热速率和燃烧相位共同作用的结果。在不同的喷射压力下,CA50 均位于上止点后 10° 附近,意味着燃烧相位相对稳定。由于放热速率的变化主导了 $R_{\max}$ 的变化,所以二者随喷射压力的变化规律相似,均随喷射压力的提升略有升高。

燃烧过程的循环变动是点燃式发动机固有的特性,影响发动机动力输出的平顺性、燃油经济性和污染物排放水平。最常用的循环变动评价指标为 IMEP 的变动系数,以 δ_{IMEP} 表示,一般不宜超过 $5\%^{[26]}$ 。 $p_{\max}$ 的变动系数更敏感且计算更简便,适合用于在线控制,以 $\delta_{p_{\max}}$ 表示。文献[27]研究表明,由于火花塞周围局部混合气成分和流场具有差异,循环变动在火花塞放电后就已经产生。点火时,火花塞周围混合气的浓度、温度和流速等因素会影响点火初期火焰的发展。当混合气成分和流场不均匀时,火焰传播速度会出现差异,导致不同循环的燃烧过程不一致,进而产生循环变动。因此,改善混合气均匀性是降低循环变动的首要措施。提高喷射压力使甲醇喷雾更细,与空气混合更均匀,有利于改善混合气均匀性。如图 5 所示,随着喷射压力升高,混合气均匀性提升,

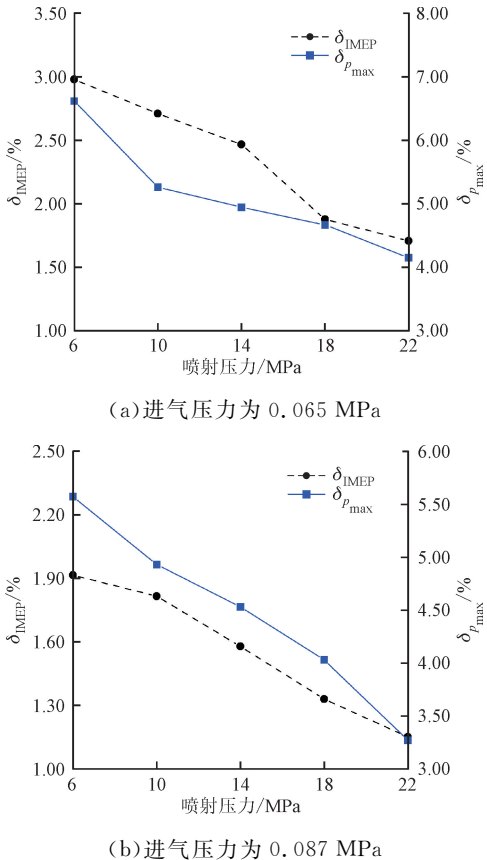


图 5 不同喷射压力下的 δ_{IMEP} 和 $\delta_{p_{\max}}$

Fig. 5 δ_{IMEP} and $\delta_{p_{\max}}$ at different injection pressures

各循环间燃烧过程的一致性增强,所以 δ_{IMEP} 和 $\delta_{p_{max}}$ 均显著降低。当进气压力为0.065 MPa、甲醇喷射压力由6 MPa提高到22 MPa时, δ_{IMEP} 和 $\delta_{p_{max}}$ 分别降低了42.7%和37.3%。

2.2 喷射压力对发动机性能的影响

甲醇蒸发潜热高、挥发性好,对新鲜充量有很强的冷却效应,有利于提升发动机的充气效率^[28]。考虑到甲醇喷射参数对直喷发动机进气过程和动力性的影响更大,本文研究了甲醇喷射压力对充气效率(η_v)和燃烧效率(η_c)的影响,如图6所示。图中,充气效率以标准大气压为参考值,并根据空气流量计实测的发动机进气量计算得到。不同进气压力下, η_v 和 η_c 均随着喷射压力的升高而升高。当进气压力为0.065、0.087 MPa时,随着喷射压力由6 MPa提升至22 MPa, η_v 分别改善了1.2%和1.6%。由于喷射压力升高后喷雾粒径更小、动量更大,导致喷射持续时间更短。较小的喷雾粒径增加了甲醇与新鲜充量的接触面积,而更大的动量使甲醇能够与新鲜充量充分混合,均有利于更好地发挥甲醇对新鲜充量的冷却作用。缸内温度和压力降低后,在相同的进气条件下,更多的新鲜空气进入气缸,充气效率提升,燃烧效率提高。

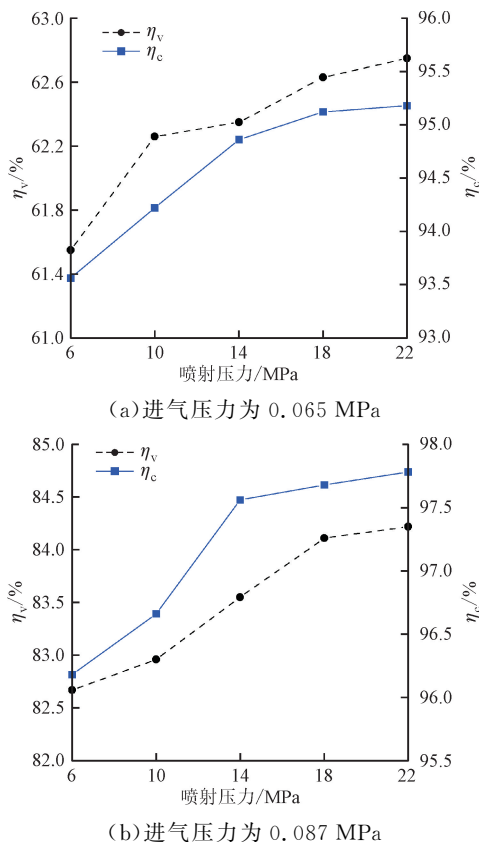


图6 不同喷射压力下的 η_v 和 η_c

Fig. 6 η_v and η_c under different injection pressures

图7给出了不同喷射压力下IMEP和指示热效率(η_i)随喷射压力的变化规律。尽管随着喷射压力的提升,燃烧相位、放热率峰值、燃烧周期等参数的优化幅度不大,但缸内过浓区和液相区明显减少,混合气均匀性的改善十分显著,使得燃料与氧气的接触更充分,反应更接近化学计量比,促进了燃烧反应的进行。在高喷射压力下,甲醇燃烧更加完全,IMEP更大,指示热效率更高。因此,增大喷射压力可以有效提高发动机的动力性和经济性。当进气压力为0.065、0.087 MPa时,随着喷射压力由6 MPa提升至22 MPa,IMEP分别提高了6.8%和3.8%。

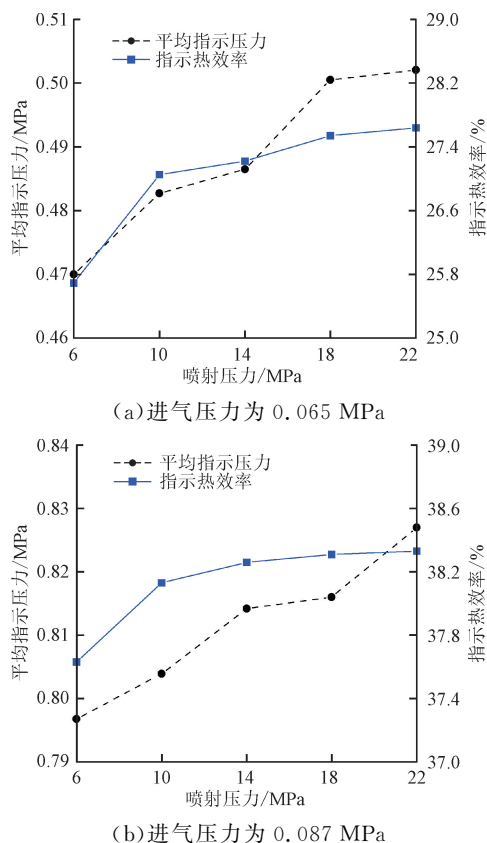


图7 不同喷射压力下的IMEP和 η_i

Fig. 7 IMEP and η_i at different injection pressures

2.3 喷射压力对排放特性的影响

由于分子中不含C—C键,甲醇被认为是无烟燃料,因此本文仅讨论CO、NO_x和HC这3种常规排放物,以及甲醇、甲醛和甲酸这3种非常规排放物。

图8给出了排气中CO体积分数随喷射压力的变化规律。显然,随着喷射压力的升高,CO体积分数近似线性下降。当含碳燃料氧化过程中氧气不足时,CO会大量生成。尽管实验过程中缸内混合气的 λ 保持为1.0,但无法保证缸内混合气绝对均匀,

局部过浓区甚至液相区依然有可能存在,成为 CO 的主要生成来源。因此,改进混合气均匀性的措施都会降低 CO 排放量。提高喷射压力有利于改善缸内混合气的均匀性,减少局部过浓区和液相区,从而促进 CO 的进一步氧化,减少 CO 排放量。当进气压力为 0.087 MPa 时,CO 体积分数更低,最大降幅达到了 35%。这是因为高进气压力带来了更强的缸内气流运动,甲醇的蒸发混合更充分,混合气均匀度也更好。此外,高进气压力时的缸内燃烧温度更高,有利于 CO 在膨胀行程和排气行程中的进一步氧化。

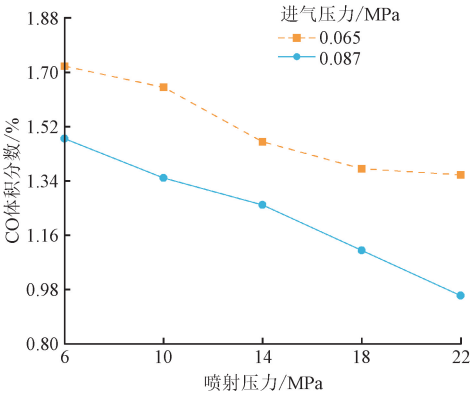


图 8 不同喷射压力下的 CO 体积分数
Fig. 8 CO volume fraction at different injection pressures

图 9 给出了排气中 NO_x 体积分数随喷射压力的变化规律。可以明显看出,随着喷射压力的升高,NO_x 体积分数大幅增加。点燃式内燃机排气中的 NO_x 主要成分为 NO。作为一种无氮燃料,甲醇燃烧过程中不会生成燃料型 NO;作为一种饱和一元醇,甲醇燃烧也不会生成激发型 NO。因此,甲醇燃烧产生的 NO_x 排放几乎都来源于热力型 NO。热力型 NO 的形成具有很强的温度依赖性,而氧浓度和反应时间是除温度以外的两个次要因素。考虑到实验中发动机转速和空燃比均不变,氧气浓度和反应时间差异不大,故缸内温度的差异是造成 NO 生成速率不同的主导因素。由前文可知, h_{max} 和 p_{max} 随喷射压力的提升有所改善,意味着缸内平均温度也会增大,从而促进 NO_x 的生成。然而,较低的喷射压力使混合气均匀性下降,过浓区和过稀区在缸内空间所占比例上升。在过浓区,氧浓度下降抑制了 NO_x 的生成;在过稀区,虽然氧气充足,但燃烧温度下降,同样会抑制 NO_x 的生成。因此,不同进气压力下 NO_x 排放量均随着喷射压力的提升而大幅增加。当进气压力为 0.065、0.087 MPa 时,随着喷射

压力从 6 MPa 增大到 22 MPa,NO_x 体积分数分别增加了 2 倍和 1.75 倍。另外,热力型 NO 的生成速率与温度成指数关系。当进气压力为 0.087 MPa 时,缸内平均温度更高,导致 NO_x 生成量大幅升高。当进气压力为 0.087 MPa、喷射压力为 6 MPa 时,NO_x 体积分数比进气压力为 0.065 MPa 时高 50.4%。

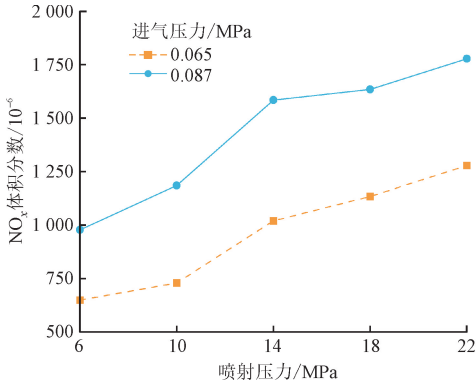


图 9 不同喷射压力下的 NO_x 体积分数
Fig. 9 NO_x volume fraction at different injection pressures

图 10 为排气中 HC 体积分数随喷射压力的变化规律。由图可知,0.087 MPa 进气压力下的 HC 体积分数随喷射压力的增大显著下降,最大降低幅度接近 30%。纯甲醇发动机排气中的 HC 排放主要为甲醇和甲醛,以及少量乙醛、丙烯醛和丙酮等羰基化合物^[29]。HC 排放生成途径主要有壁面淬熄、狭隙效应、润滑油膜的吸附与解吸、燃烧室表面沉积物的影响和体积淬熄^[30]。对于甲醇直喷发动机:首先,由于燃烧过程几乎不形成碳烟,所以燃烧室表面和活塞头部不会形成沉积物;其次,甲醇与润滑油的溶解性很差,润滑油膜和缸内沉积物的吸附和解吸作用可以忽略不计。因此,壁面淬熄、狭隙效应和体积淬熄是甲醇发动机 HC 排放的主要生成途径。随着甲醇喷射压力的增大,混合气均匀性提升,燃烧更接近化学计量比,减少了局部混合气过稀造成的体积淬熄和局部过浓造成的不完全燃烧比例,导致排气中未燃甲醇及其他未完全燃烧组分的浓度下降,有利于降低 HC 排放量。当进气压力为 0.065 MPa 时,随着甲醇喷射压力由 6 MPa 增大到 14 MPa,HC 体积分数下降,同样归因于混合气质量的改善。然而,随着甲醇喷射压力的进一步提高,HC 体积分数反而增加。这是由于喷射压力过高时,喷雾锥角和贯穿距大幅增大。同时,当进气压力较低时,缸内气流运动较弱,甲醇喷雾撞击缸壁的概率增大。撞击缸壁的甲醇液滴附着于缸套表面,在压缩行程被卷

入活塞与缸套之间的狭缝中,并在膨胀行程中被释放,但此时缸内氧浓度和温度已大幅下降,因此甲醇难以被完全氧化,导致 HC 排放量的显著上升。

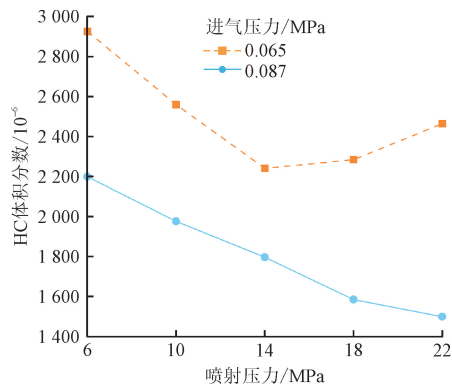
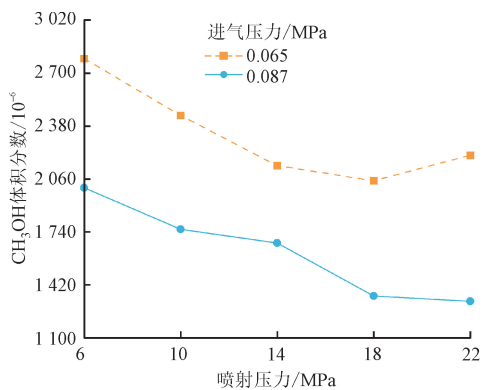


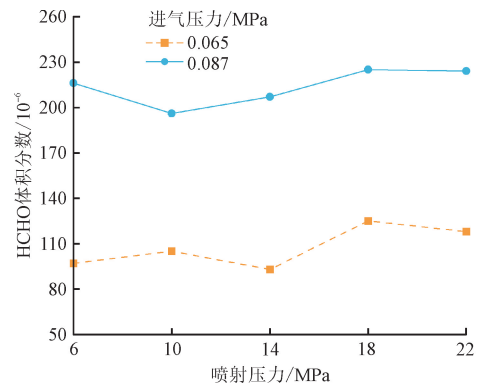
图 10 不同喷射压力下的 HC 体积分数

Fig. 10 HC volume fraction at different injection pressures

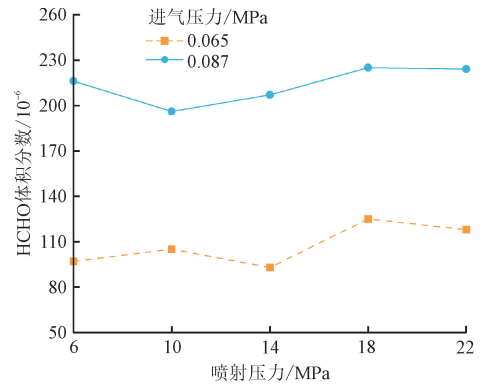
图 11 分别给出了排气中甲醇、甲醛和甲酸体积分数随喷射压力的变化规律。由图 11(a)可知:当进气压力为 0.087 MPa 时,随着甲醇喷射压力的提升,甲醇体积分数逐渐下降;当进气压力为 0.065 MPa 时,甲醇体积分数先下降后上升。这与图 10 中 HC 体积分数的变化趋势十分接近,主要是因为绝大部分 HC 排放为未燃甲醇,达到了 80%~95% (体积分数)。由图 11(b)可知,甲醛体积分数随喷射压力的提升略有上升。甲醛是甲醇氧化过程中最重要的中间产物,甲醇中几乎所有的碳原子都会先转化为甲醛,随后生成 CO 而消耗^[31],不会大量留存至排气行程。由此可见,在排气管中甲醇的低温氧化是甲醇发动机甲醛排放的主要生成途径^[32]。随着喷射压力提升,可能导致部分甲醇未完全燃烧就进入排气管,并发生低温氧化生成甲醛,造成甲醛排放量的增加。同时,当进气压力为 0.087 MPa 时,甲醛体积分数整体比进气压力为 0.065 MPa 时高一倍左右,主要是因为前者排气温度比后者高了约 80 K,导致排气中的未燃甲醇低温脱氢反应速率升高,甲醛排放量增加。由图 11(c)可知,喷射压力对甲酸体积分数影响较小,并且甲酸体积分数很低(数量级为 10×10^{-6})。这可能是由于甲酸在高温下不稳定,燃烧过程中产生的甲酸被快速分解,同时其生成主要取决于化学动力学过程而非喷射压力主导的物理过程^[33]。此外,观察到当进气压力为 0.087 MPa 时,甲酸体积分数更高。这可能是由于甲酸主要在排气过程中的低温氧化阶段生成,而较高的进气压力下排气温度更高所造成的。



(a)CH₃OH 体积分数



(b)HCHO 体积分数



(c)HCOOH 体积分数

图 11 不同喷射压力下的甲醇、甲醛和甲酸体积分数

Fig. 11 Volume fractions of CH₃OH, HCHO and HCOOH at different injection pressures

3 结 论

- (1) 提升喷射压力对放热速率的改善有限,对燃烧特性参数的影响均很小。随着喷射压力的升高, δ_{IMEP} 和 $\delta_{p_{max}}$ 显著降低。当进气压力为 0.065 MPa 时,随着甲醇喷射压力由 6 MPa 提高到 22 MPa, δ_{IMEP} 和 $\delta_{p_{max}}$ 分别降低了 42.7% 和 37.3%。
- (2) 喷射压力的提升可减少缸内过浓区和液相区,改善混合气均匀性。同时,有利于提升充气效率

和发动机的 IMEP。当进气压力分别为 0.065、0.087 MPa 时,随着喷射压力由 6 MPa 提升至 22 MPa,IMEP 分别提高了 6.8%和 3.8%。

(3)喷射压力对甲醇发动机排放物的影响较为复杂。CO 体积分数随喷射压力升高近似线性下降,当进气压力为 0.087 MPa 时最大降幅为 35%; NO_x 体积分数随喷射压力提升大幅增加,当进气压力为 0.065 MPa 时最高可增加 2 倍;不同进气压力下,HC 和甲醇的体积分数随喷射压力的变化趋势有所差异,甲醛体积分数随喷射压力提升略有上升。

参考文献:

- [1] 高志斌,刘志浩,姜鹏飞,等. 车用替代燃料甲醇在中国的发展状况 [J]. 石油化工技术与经济, 2023, 39(5): 1-4.
GAO Zhibin, LIU Zhihao, JIANG Pengfei, et al. Development status of methanol as an alternative fuel for vehicles in China [J]. Technology & Economics in Petrochemicals, 2023, 39(5): 1-4.
- [2] 魏衍举,石自航,张亚杰,等. 商用纯甲醇发动机的非常规排放特性研究 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(10): 1022-1029.
WEI Yanju, SHI Zihang, ZHANG Yajie, et al. Unregulated emission characteristics of a heavy-duty pure methanol engine [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57(10): 1022-1029.
- [3] 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.
- [4] 冯浩,吴翔,林思聪,等. 甲醇直喷及高压压缩比对点燃式发动机性能的影响 [J]. 内燃机学报, 2023, 41(6): 490-497.
FENG Hao, WU Xiang, LIN Sicong, et al. Effects of methanol direct injection and high compression ratio on the performances of a turbocharged spark-ignition engine [J]. Transactions of CSICE, 2023, 41(6): 490-497.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 高舒芳. 缸内直喷技术在中小型汽油机上的应用研究分析 [J]. 内燃机与配件, 2022(4): 94-96.
GAO Shufang. Application research and analysis of in-cylinder direct injection technology in small and medium-sized gasoline engines [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(4): 94-96.
- [12] 李本正,宫艳峰,刘圣华,等. 甲醇缸内直喷发动机的燃烧特性 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1372-1376.
LI Benzhen, GONG Yanfeng, LIU Shenghua, et al. Combustion characteristics of a direct-injection spark-ignition methanol engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1372-1376.
- [13] 孙滔,陶文辉,卢康博,等. 甲醇替代率对双燃料发动机燃烧及其循环变动的影响 [J]. 内燃机工程, 2022, 43(6): 48-54.
SUN Tao, TAO Wenhui, LU Kangbo, et al. Research on the influence of methanol substitution rates on the combustion and cycle fluctuations of dual-fuel engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(6): 48-54.
- [14] CHEN Yexin, JIANG Yankun, ZHANG Beidong, et al. Simulation study on the impact of injection strategies on the performance of methanol-gasoline dual-fuel engines [J]. International Journal of Automotive

- Technology, 2024, 25(4): 821-836.
- [15] SEKO T, YOSHIDA Y, YAMAGUCHI I, et al. Combustion exhaust emissions of the spark-assisted methanol diesel engine [C]//1986 SAE International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1986: 861165.
- [16] 黄勇成, 周龙保, 刘圣华. 火花点火缸内直喷灵活燃料发动机的开发 [J]. 内燃机工程, 2004, 25(4): 1-5. HUANG Yongcheng, ZHOU Longbao, LIU Shenghua. Development of a spark-ignited direct injection flexible fuel engine for gasoline and alcohol fuels [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(4): 1-5.
- [17] SILEGHEM L, ICKES A, WALLNER T, et al. Experimental investigation of a DISI production engine fuelled with methanol, ethanol, butanol and ISO-stoichiometric alcohol blends [C]//SAE 2015 World Congress & Exhibition. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2015: 2015-01-0768.
- [18] NGUYEN D K, STEPMAN B, VERGOTE V, et al. Combustion characterization of methanol in a lean burn direct injection spark ignition (DISI) engine [C]//WCX SAE World Congress Experience. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2019: 2019-01-0566.
- [19] 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.
- [20] TANG Qijun, JIANG Pin, PENG Caiwang, et al. Comparison and analysis of the effects of spark timing and lambda on a high-speed spark ignition engine fuelled with n-butanol/gasoline blends [J]. Fuel, 2021, 287: 119505.
- [21] YIN Xiaojun, SUN Nannan, SUN Ting, et al. Experimental investigation the effects of spark discharge characteristics on the heavy-duty spark ignition natural gas engine at low load condition [J]. Energy, 2022, 239(Part C): 122244.
- [22] YIN Xiaojun, XU Leilei, DUAN Hao, et al. In-depth comparison of methanol port and direct injection strategies in a methanol/diesel dual fuel engine [J]. Fuel Processing Technology, 2023, 241: 107607.
- [23] LEE Z, KIM T, PARK S, et al. Review on spray, combustion, and emission characteristics of recent developed direct-injection spark ignition (DISI) engine system with multi-hole type injector [J]. Fuel, 2020, 259: 116209.
- [24] DUAN Qimeng, YIN Xiaojun, WANG Xiaochen, et al. Experimental study of knock combustion and direct injection on knock suppression in a high compression ratio methanol engine [J]. Fuel, 2022, 311: 122505.
- [25] WEI Haiqiao, FENG Dengquan, PAN Jiaying, et al. Knock characteristics of SI engine fueled with n-butanol in combination with different EGR rate [J]. Energy, 2017, 118: 190-196.
- [26] SAITO H, SHIRASUNA T, NOMURA T. Extension of lean burn range by intake valve offset [J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6(4): 2072-2084.
- [27] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1988: 413-423.
- [28] BALKI M K, SAYIN C. The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fueled with pure ethanol, methanol and unleaded gasoline [J]. Energy, 2014, 71: 194-201.
- [29] 葛蕴珊, 尤可为, 王军方, 等. 甲醇燃料汽车的排放特性研究 [J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(4): 314-318. GE Yunshan, YOU Kewei, WANG Junfang, et al. A study on exhaust emission from methanol vehicle [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(4): 314-318.
- [30] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 539-562.
- [31] LIU Jiajun, GONG Changming, PENG Legao, et al. Numerical study of formaldehyde and unburned methanol emissions of direct injection spark ignition methanol engine under cold start and steady state operating conditions [J]. Fuel, 2017, 202: 405-413.
- [32] 刘方杰, 苗家轩, 刘圣华, 等. 醇类燃料发动机醛排放产生机理 [J]. 内燃机学报, 2014, 32(3): 236-241. LIU Fangjie, MIAO Jiaxuan, LIU Shenghua, et al. Formation mechanism of aldehyde emissions from gasohol fueled SI engine [J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(3): 236-241.
- [33] ICHIMIYA T, TAKAHASHI K, FUWA Y. Wear mechanisms of methanol fueled engine [C]//3rd International Pacific Conference on Automotive Engineering. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1985: 852199.

(编辑 陶晴)