

甲醇多次喷射对直喷射流点火发动机 燃烧特性的影响

寇海亮^{1,2}, 赵鹏喜², 段浩¹, 尹晓军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. 河南机电职业学院, 451192, 郑州)

摘要: 为解决被动预燃室发动机稀燃能力不足的问题, 基于一台缸内甲醇直喷、预燃室射流点火发动机展开试验研究, 在过量空气系数为 1.0~1.4 的不同运行工况下, 探索单次、两次和三次喷射策略对发动机燃烧特性及排放特性的影响。试验结果表明: 多次喷射可有效提升预燃室混合气浓度, 增强预燃室射流点火能量, 进而提高发动机燃烧稳定性。在当量比燃烧工况下, 多次喷射虽使燃烧持续期延长, HC、CO 排放量略有升高, 但在稀燃工况下优势凸显。当过量空气系数为 1.4 时, 单次喷射、两次喷射、三次喷射的指示平均有效压力循环变动系数分别为 4.96%、4.36%、3.79%。相较于单次喷射, 两次喷射和三次喷射的燃烧持续期分别缩短了 15.3%、17.5%; 两次喷射和三次喷射的 HC 比排放量分别降低了 0.26、0.35 g · (kW · h)⁻¹, CO 比排放量分别降低了 0.44、0.93 g · (kW · h)⁻¹, 指示热效率分别提高了 0.5%、1.1%。从优化喷射策略来看, 该研究结果为提升被动预燃室发动机稀燃性能提供了一定的参考。

关键词: 甲醇直喷; 射流点火; 热效率; 燃烧特性; 排放特性

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202512012 **文章编号:** 0253-987X(2025)12-0139-10

Influence of Multiple Injection on Combustion Characteristics of Methanol Direct-Injection Jet-Ignition Engines

KOU Hailiang^{1,2}, ZHAO Pengxi², DUAN Hao¹, YIN Xiaojun¹,
HU Erjiang¹, ZENG Ke¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 451192, China)

Abstract: To address the problem of poor lean-burn capacity for passive pre-chamber engines, an investigation was conducted on a methanol direct-injection engine equipped with pre-chamber jet ignition (PCJI) system. Specifically, tests were carried out under varied operating conditions with the excess air coefficient ranging from 1.0 to 1.4 to explore the influence of single, double, and triple injection strategies on combustion and emission characteristics of the engine. The findings reveal that the multiple injection strategies significantly enhanced the mixture concentration within the pre-chamber, increased the jet ignition energy, and thereby improved the combustion stability. Under stoichiometric combustion conditions, the multiple injection strategy slightly

收稿日期: 2025-06-18。 作者简介: 寇海亮(1983—), 男, 博士生; 尹晓军(通信作者), 男, 博士, 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: 2025-08-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250804.1455.002>

extended the combustion duration and led to a marginal increase in HC and CO brake specific emissions. However, obvious benefits were observed under lean-burn conditions. When the excess air coefficient was 1.4, the coefficient of variation of the indicated mean effective pressure for the single injection, double injection, and triple injection strategies was 4.96%, 4.36%, and 3.79%, respectively. Compared with the single injection strategy, the double injection and triple injection strategies resulted in reductions in HC brake specific emissions by $0.26 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ and $0.35 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, reductions in CO brake specific emissions by $0.44 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ and $0.93 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, and increases in indicated thermal efficiency by 0.5% and 1.1%, respectively. These research findings offer valuable references for enhancing the lean-burn performance of passive pre-chamber engines through the optimization of injection strategies.

Keywords: methanol direct-injection; jet ignition; thermal efficiency; combustion characteristics; emissions characteristics

为实现双碳战略目标,摆脱对化石能源的过度依赖,能源多元化已成为全球能源发展的必然趋势。在此背景下,清洁替代燃料和先进燃烧技术在内燃机上的协同应用成为行业研究热点^[1-4]。甲醇作为可再生低碳含氧燃料^[5],其缸内直喷技术因能发挥高辛烷值与汽化潜热的优势备受关注^[6]。相对于进气道喷射,缸内直喷具有更精准的空燃比控制,避免了进气道液膜蒸发带来的高 HC 排放^[7]。因此,甲醇缸内直喷具有进一步提升发动机热效率和降低排放的潜力。

目前,甲醇缸内直喷发动机多由柴油机改造而来。受结构限制,缸内混合气的分布并不理想,在充量分层稀薄燃烧运行模式下,存在循环变动大、HC 排放量高的问题^[8]。为提高燃烧稳定性,双火花塞点火、高能点火、预燃室射流点火(PCJI)等技术应运而生,由于射流点火面积更大,PCJI 在改善燃烧稳定性方面具有显著优势^[9-10]。Hua 等^[11]通过对预燃室结构和预燃室喷油时刻的协同优化,在过量空气系数 λ 为 2.0 的超稀薄运行工况下,将 PCJI 发动机指示平均有效压力 p_i 的循环变动系数 δ_i 控制在 5.0% 以下。该试验所用发动机为汽油机,预燃室没有主动供油和 λ 为 1.4 工况下, δ_i 高达 62.5%。龚世华等^[12]研究表明,主动预燃室可有效拓宽甲醇直喷发动机的稀燃极限,但发动机性能对主动预燃室喷射时刻高度敏感,在 $\lambda > 1.4$ 的稀燃工况下,燃烧定容度下降,指示燃油消耗率升高。Leng 等^[13]通过数值模拟,优化了大缸径甲醇射流点火发动机的燃烧控制策略,高度稀燃存在燃烧效率下降、HC 排放量升高的问题。华剑雄^[14]研究表明,主动预燃室由于容积较大,导致传热损失增加,一定程度上抵消了稀燃带来的收益。此外,高昂的生产和维护成

本,是主动预燃室发动机没有得到推广的原因之一。

相对于主动预燃室,被动预燃室无需安装喷油器,具有结构简单、控制变量少的优势,可以选用相对较小的预燃室容积,以减少传热损失,但因其混合气浓度依赖缸内全局空燃比,应用于传统进气道喷射发动机时稀燃能力受限^[15]。当被动预燃室与缸内直喷技术相结合,灵活的喷射控制策略有望打破这一限制。通过推迟喷射或多次喷射,可在稀燃工况下定向调节预燃室混合气浓度,优化点火条件。因此,本文采用被动预燃室中置和喷油器偏置方案,开展了预燃室射流点火甲醇直喷发动机的试验研究,以及多次喷射对发动机稀燃稳定性和排放特性的影响。

1 试验方法及研究方案

1.1 试验台架与设备

试验发动机以一台压缩比为 19.0 的四冲程单缸自然吸气高压共轨柴油机(192FA)为改制对象。考虑到甲醇具有较高的抗爆性^[16],同时为了提高发动机的稀燃能力,将目标压缩比调整为 16.5,并将燃烧室形状改为直口型。试验发动机的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要参数

Table 1 Specification of the prototype engine

参数	数值
缸径/mm	92
冲程/mm	75
压缩比	16.5
排量/L	0.498
最大扭矩/(N·m)	25
转速/(r·min ⁻¹)	1 500

文献[17]研究表明,被动预燃室容积 V_{pc} 可占发动机压缩余隙容积 V_c 的 $1\% \sim 20\%$,但当 V_{pc} 占比超过 V_c 的 5% ,将会导致较低的射流速度和较低的燃烧速率。实际应用中,预燃室射流火焰受到预燃室通道直径、射流孔径、预燃室内端动能和 λ 分布等因素的影响。文献[18]的研究表明,当预燃室射流孔径为 1.26 mm 时,甲醇-空气混合气的燃烧速率最快。文献[19]指出,相对于 1.4 、 1.6 、 1.2 mm 的射流孔径具有最高的射流速度和射流贯穿距离。文献[20]通过无量纲参数 C_t 、 β ,将发动机缸径、预燃室通道直径和射流孔径联系起来, C_t 、 β 的计算式如下

$$C_t = \left[\left(\frac{D}{d} \right)^2 - \frac{1}{2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\beta = BA_t/V_{pc} \quad (2)$$

式中: D 为预燃室通道直径; d 为射流孔径; C_t 为 Craya-Curter 数,是用于描述同轴射流系统的无量纲参数, C_t 越小,意味着射流动量越大; B 为发动机缸径; A_t 为射流孔总的流通面积; β 为射流孔节流量无量纲参数,值约为 0.4 。

参考文献[17-20],将 V_{pc} 设定为 900 mm^3 ,占 V_c 的 3% , D 设定为 6 mm , d 设定为 1.2 mm ,呈四孔均匀分布。考虑到中置火花塞具有各向对称的火焰传播距离,有利于降低末端混合气自燃倾向,本文采用预燃室中置方案。喷油器选用通用公司的 35 MPa GDI 喷油器,根据发动机运行工况的变化,喷

射压力可在 $3 \sim 35 \text{ MPa}$ 之间变换。为降低 GDI 喷油器的热负荷和便于安装,将其倾斜安装在预燃室点火总成右侧。甲醇缸内直喷预燃室射流点火发动机燃烧系统示意图如图 1 所示。

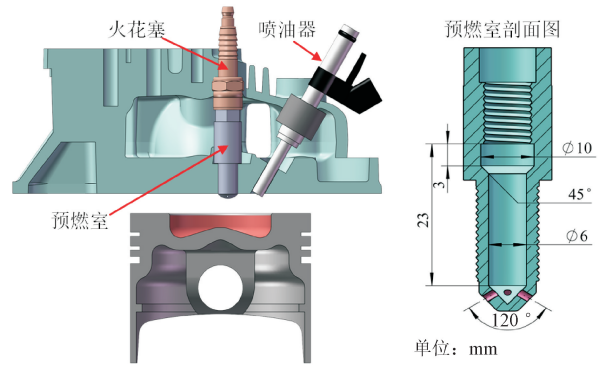


图 1 试验发动机的燃烧系统示意图

Fig. 1 Combustion system of the test engine

CAC37 电力测功机、Powerlink FC2000 控制柜用于控制和监测发动机的转速、扭矩,压电式压力传感器(Kistler 6058A)用于测量气缸压力,曲轴转角传感器(Kistler 2619A11)测量曲轴转角信号,发动机的常规排放物由 Horiba MEXA-584L 排气分析仪进行监测,Ki-box 燃烧分析仪根据采集到的气缸压力和曲轴转角信号进行放热率计算,发动机台架测试系统如图 2 所示。发动机电子控制单元(ECU)由课题组自主研发,可实现喷射正时、点火正时和喷射次数的灵活控制,测试设备参数如表 2 所示。

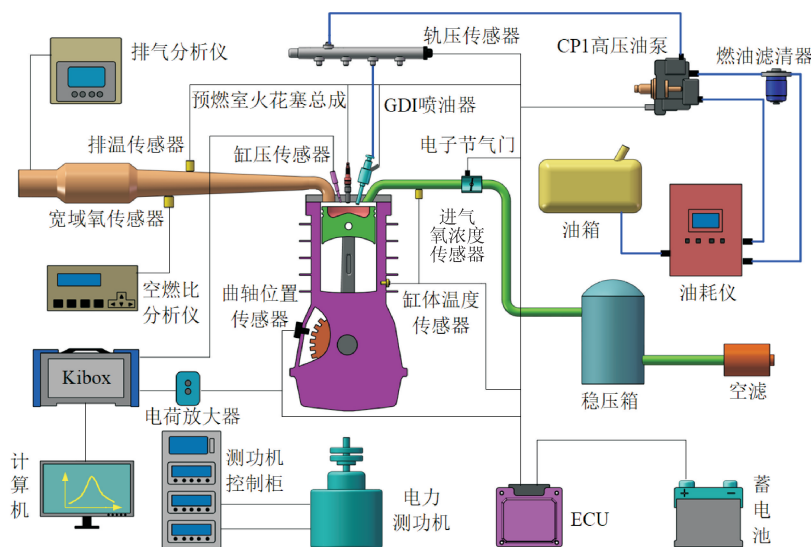


图 2 发动机台架测试系统

Fig. 2 Engine bench test system

表2 测试设备参数

Table 2 Information of the test instrument

参数	数值	精度
扭矩/(N·m)	0~117	±0.2
转速/(r·min ⁻¹)	0~9 000	±1
压力/bar	0~250	±0.3
λ	0.275~30	±0.069
HC 体积分数/%	0~1	±0.001 2
CO 体积分数/%	0~10	±0.06
NO _x 体积分数/%	0~0.5	±0.003

1.2 试验方案

对于改造后的甲醇缸内直喷 PCJI 发动机性能,在原机最大扭矩转速和节气门全开当量比运行工况下,PCJI 发动机的扭矩远超原柴油机最大扭矩。出于对发动机的保护,试验采用定油调气的 λ 控制方式。循环供油量的设置条件如下:进气压力为 0.08 MPa,进气温度为 293 K,喷射压力为 20 MPa,喷射角度为 -300° ,调整喷射脉宽后 $\lambda=1.0$,此时发动机扭矩为 20 N·m,达到原机负荷的 80%。之后,固定喷射脉宽,逐渐增大节气门开度,以 0.1 为间隔, λ 由 1.0 逐渐增大到 1.4,在每个 λ 工况下进行不同喷射策略的数据采集。

在当量比燃烧模式下,当喷射正时位于进气行程初段,发动机的容积效率和混合气均质性较好,发动机具有较高的指示平均有效压力。当喷射正时位于压缩行程,发动机的循环变动较小,但由于压缩行程喷射减弱了甲醇直喷对进气充量的冷却效应,容积效率随之降低,指示平均有效压力略有下降^[21]。随着 λ 逐渐增大,进气行程喷射的燃烧稳定性逐渐下降, $\lambda=1.4$ 时,循环变动系数 δ_i 已接近 5%。因此,在稀燃工况下,通过多次喷射来改善发动机燃烧稳定性和动力性能,多次喷射方案的设计原则是:在压缩行程少量微喷,尽可能在保证发动机容积效率不受影响的同时,预燃室内混合气浓度得以提升。

表 3 为单次和多次喷射策略的甲醇喷射角度设置,表中 S1 代表单次喷射,D2 代表两次喷射,T3 代表三次喷射。D2 方案的喷射比例依次为 80%、20%,T3 方案的喷射比例依次为 80%、10%、10%。

表3 多次喷射方案

Table 3 Schemes of the multiple injection

方案 编号	第 1 次喷射 角度/(°)	第 2 次喷射 角度/(°)	第 3 次喷射 角度/(°)
S1	-300		
D2	-300	-140	
T3	-300	-140	-90

在发动机充分热机后进行缸压数据采集,不同喷射方案下的点火正时采用发动机获得最大扭矩时的最小点火提前角(MBT)。在数据分析中,定义 CA05、CA50、CA90 分别为燃料累积放热量达到 5%、50%、90% 时对应的曲轴转角。着火延迟期为点火时刻到 CA05 间隔的曲轴转角,燃烧持续期为 CA05 到 CA90 间隔的曲轴转角。

为确保试验数据的准确可靠,减少工况切换和设备精度带来的测量误差,需待发动机稳定运行一段时间后再进行数据采集。每个工况以曲轴转角 0.1° 为间隔,连续采集 200 个循环的缸压数据,发动机扭矩、油耗和排放数据分别采集 3 组,取其平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 多次喷射对燃烧特性的影响

不同稀燃工况下,喷射次数对着火延迟期的影响如图 3 所示。可以看出,多次喷射的着火延迟期明显短于单次喷射,三次喷射的着火延迟期略短于两次喷射,影响着火延迟期的因素主要包括点火时刻火花塞电极附近混合气的浓度、温度条件^[22]。压缩行程采用少量微喷,一定程度上降低了点火时刻的缸内温度,这对于缩短着火延迟期是不利的。而多次喷射的着火延迟期短于单次喷射,说明预燃室内混合气浓度对着火延迟期起主导作用。在单次喷射的基础上,压缩行程进行少量微喷提高了预燃室内混合气浓度。在两次喷射的基础上,增加第 3 次小比例喷射,预燃室内混合气浓度得到进一步提升。虽然第 3 次喷射角度更晚一些,但第 3 次喷射开始时缸内温度和压力更高,有利于小比例甲醇喷雾的蒸发、混合。同时,第 3 次喷射提高了活塞接近上止点时缸内的湍动能,有利于主燃室内的混合气被压入预燃室。

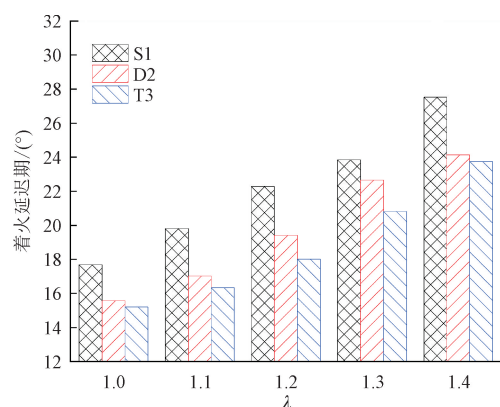


图3 不同喷射方案的着火延迟期

Fig. 3 Ignition delay periods for various injection strategies

预燃室混合气浓度的提升增强了射流点火能量,进而促进了后续的燃烧过程,使得多次喷射方案下的

点火提前角比单次喷射滞后。推迟点火使点火时刻的缸内温度略有上升,这有利于改善点火稳定性。为对比不同喷射方案的点火稳定性,图 4 给出了连续 200 个循环的燃烧始点 CA05 和燃烧重心 CA50 的散点分布图。燃烧始点意味着火焰核心已经稳定形成,并且开始进入到火焰快速传播阶段,燃烧始点大小可反映点火稳定性的优劣。

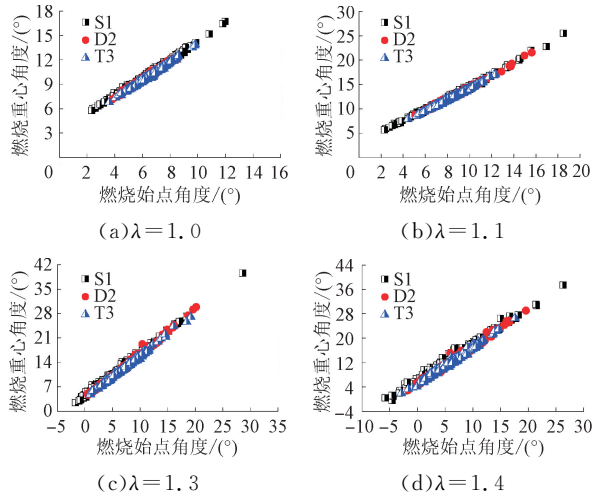


图 4 不同喷射方案燃烧始点和燃烧重心的分布

Fig. 4 Distribution of combustion onset and combustion center for various injection strategies

从图 4 可以看出,不同 λ 工况下,多次喷射的燃烧始点分布更加集中。 λ 为 1.0 时,S1、D2、T3 燃烧始点的分布区间,即最大值与最小值之差分别为 9.7° 、 5.7° 、 6.2° ; λ 为 1.4 时,S1、D2、T3 燃烧始点的分布区间分别为 32.1° 、 21.2° 、 20.5° 。这说明多次喷射对提高稀燃工况下的点火稳定性具有显著效果。

不同喷射方案燃烧持续期的变化如图 5 所示,在当量比和适度稀燃条件下,单次喷射的燃烧持续期短于多次喷射。这是因为,在单次喷射条件下,甲醇液滴具有最长的蒸发和混合时间,混合气均质性较好。 λ 为 1.0、1.1 时,均质混合气具有较快的层流火焰速度^[23]。虽然多次喷射提升了预燃室混合气浓度,但同时也增加了主燃室内混合气的均质性,影响火焰传播速率。随着 λ 逐渐增大,多次喷射方案的燃烧持续期明显短于单次喷射,三次喷射较两次喷射更短。 λ 为 1.4 时,D2、T3 方案较 S1 方案缩短燃烧持续期分别达 15.3%、17.5%。这是因为,在稀燃条件下采用多次喷射,预燃室混合气浓度和射流点火能量得以提升,主燃室的着火稳定性得以改善。另外,产生于射流火焰之前的射流冷焰^[14]增加了主燃室的湍流强度,促进了预燃室先期燃烧产生的高活性反应物与主燃室混合气的进一步混合。同时,较晚的二次、三次喷射角度趋于在主燃室

形成气缸中心浓、气缸壁附近稀的分层混合气,更有利于火焰传播。

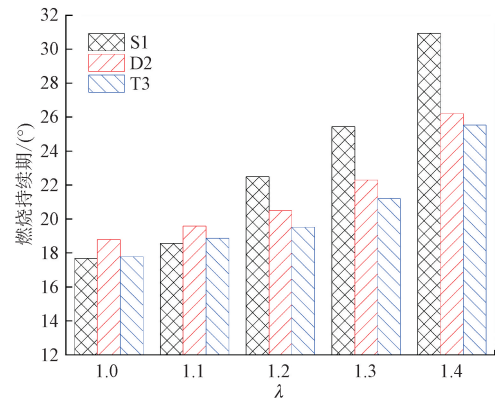
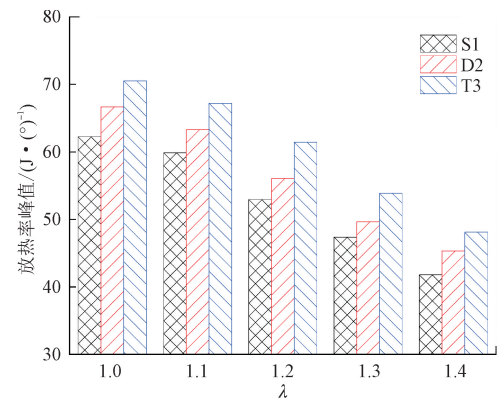


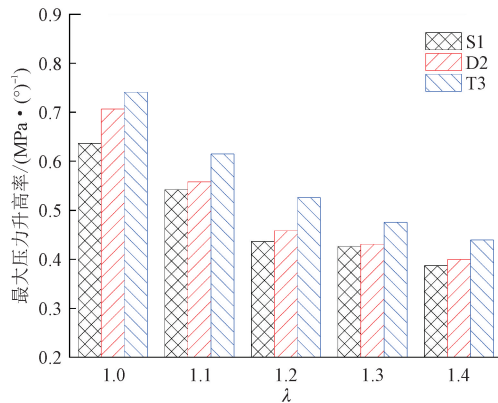
图 5 不同喷射方案燃烧持续期的变化

Fig. 5 Trends of combustion duration for various injection strategies

3 种喷射方案在不同稀燃条件下的放热率峰值和最大压力升高率如图 6 所示。可以看出,在不同稀燃工况下,放热率峰值、最大压力升高率均随着喷射次数的增加而显著增大,这说明压缩行程增加 1、2 次少量喷射,可有效提高预燃室内混合气浓度和射流点火能量。



(a) 放热率峰值



(b) 最大压力升高率

图 6 不同喷射方案燃烧特征参数的变化

Fig. 6 Trends of combustion parameters for various injection strategies

λ 为 1.0、1.1 时,虽然单次喷射的燃烧持续期短于多次喷射,但单次喷射的放热率峰值却明显更低。这是因为,放热率峰值对应的曲轴转角通常与燃烧重心重合^[24]。在前半程燃烧持续期,燃烧空间相对较小,更强的射流火焰必然带来更为集中的放热。而在后半程燃烧持续期,主燃室内的混合气分布对火焰传播起到至关重要的作用。三次喷射将两次喷射的压缩行程喷射量分为两次,缩短了喷束贯穿距离,由于第 3 次喷射角度更晚,喷束几乎全部落在燃烧室凹坑中,避免了燃料过度分散,更有利于浓混合气被压入到预燃室,从而使射流点火能量得到增强,三次喷射比两次喷射的燃烧持续期略短。

2.2 多次喷射对发动机性能的影响

不同喷射方案指示热效率 η_i 的变化如图 7 所示,随着 λ 的增大, η_i 逐渐增大。这意味着节气门开度增大,降低了节流损失,更多的氧气有利于促进燃料完全燃烧,更高的 λ 使混合气具有更大的比热容比,有利于减少传热损失^[25]。

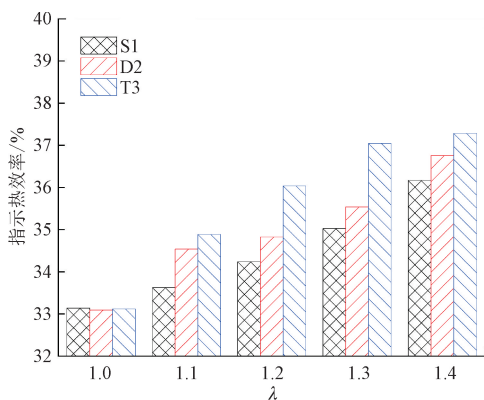


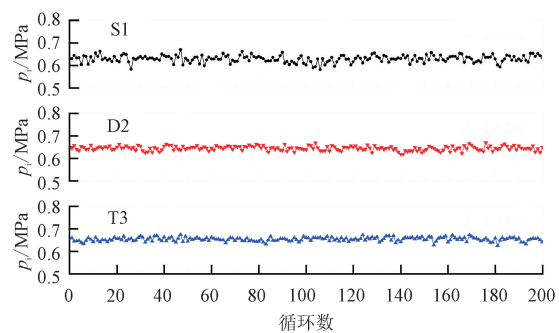
图 7 不同喷射方案指示热效率的变化

Fig. 7 Trends of indicated thermal efficiency for various injection strategies

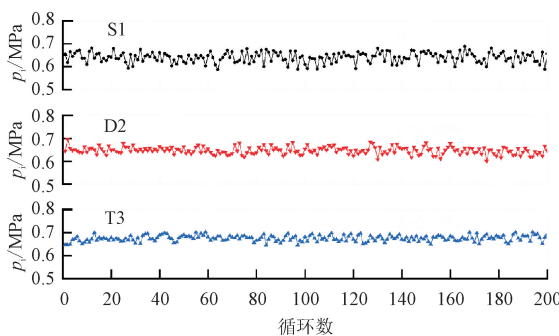
λ 为 1.0 时,单次喷射的指示热效率略高于多次喷射,但总体差异很小。这是因为,在当前工况下,所有喷射方案的 δ_i 均低于 2.0%,单次喷射的 η_i 略高,这是因为混合气均质性更好,有利于完全燃烧。随着混合气逐渐被稀释,燃烧稳定性变差,循环变动成为影响 η_i 的重要因素。相对于单次喷射,多次喷射具有更好的稀燃稳定性,多次喷射在稀燃条件下的燃烧持续期更短,更高的燃烧定容度有利于降低传热损失,稀燃条件下,多次喷射的指示热效率更高。 λ 为 1.4 时,相较于单次喷射,两次、三次喷射指示热效率分别提高了 0.5%、1.1%。

文献^[24]表明,以完全燃烧的放热循环为基准,

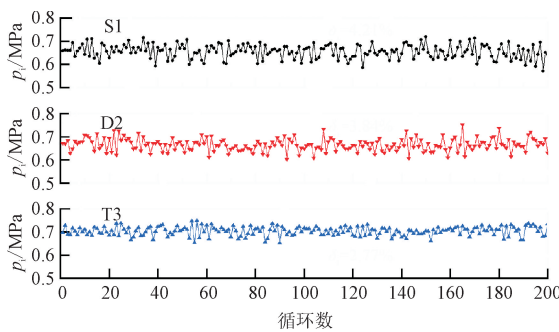
δ_i 每增大 1.0%, p_i 将损失 1.5%。3 种喷射方案在不同稀燃工况下 δ_i 的变化如图 8 所示。当 λ 为 1.1 时,单次喷射的 δ_i 为 2.5%,多次喷射的 δ_i 则低于 2.0%;当 λ 增大至 1.4,单次喷射的 δ_i 已接近 5.0%,而多次喷射的 δ_i 处于可接受的水平。



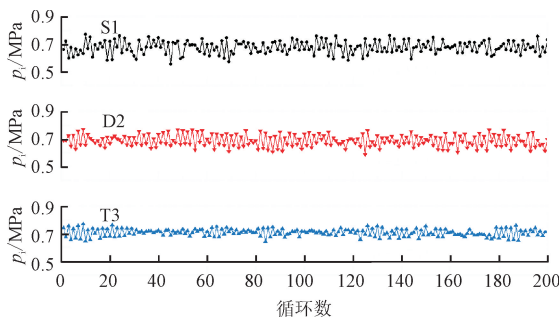
(a) $\lambda = 1.1$



(b) $\lambda = 1.2$



(c) $\lambda = 1.3$



(d) $\lambda = 1.4$

图 8 不同喷射方案的燃烧循环变动

Fig. 8 Combustion cyclic variations for various injection strategies

对于点燃式发动机,燃烧循环变动通常始于着火延迟期^[26]。虽然通过有组织的进气涡流和滚流可大幅降低循环变动,但却无法完全消除该现象,导致每一循环点火时刻火花塞电极附近的混合气浓度和气体流速均不相同^[27]。通过推迟喷射,缩短喷射与点火的时间间隔,可弱化流场随机性对甲醇混合气分布的影响。在不同的 λ 运行工况下,多次喷射的燃烧始点比单次喷射更加集中,这得益于预燃室混合气浓度的提升,同时反映了预燃室混合气浓度在不同循环间具有较好的一致性,从而使燃烧稳定性得到显著改善。与热功转换密切相关的燃烧重心,呈现出与燃烧始点明显的线性相关,这说明,燃烧重心越集中,意味着 p_i 的分布越集中,反映在整个燃烧过程,多次喷射下的 δ_i 更小, p_i 的平均值更高。

此外,得益于甲醇喷雾在蒸发、混合过程中的冷却效应,压缩行程少量微喷降低了压缩终了的缸内温度。同时,由于多次喷射的点火提前角比单次喷射滞后,在压缩上止点前,多次喷射的放热量要小于单次喷射。两种因素共同作用下,导致多次喷射在压缩上止点的缸内压力低于单次喷射,这有利于降低发动机的压缩功,提高热功转化效率^[24]。 λ 为 1.0、1.4 时,3 种喷射方案的气缸压力和瞬时放热率曲线如图 9 所示。

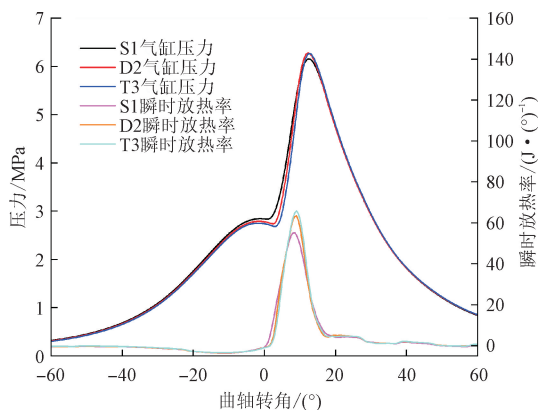
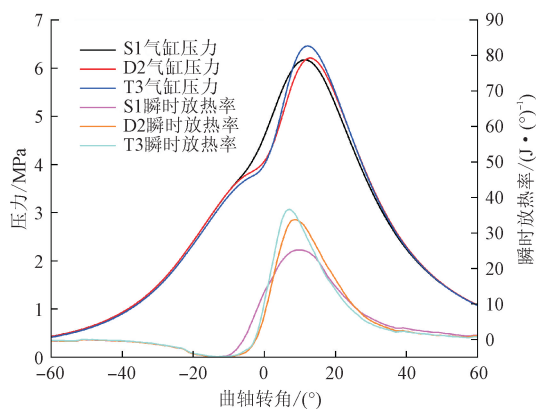
(a) $\lambda = 1.0$ (b) $\lambda = 1.4$

图 9 不同喷射方案的缸内压力和瞬时放热率曲线

Fig. 9 In-cylinder pressure and heat release rate curves for various injection strategies

2.3 多次喷射对排放特性的影响

通常情况下, $\lambda < 1.0$ 时具有较为稳定的燃烧过程,但由于缺氧,将导致不完全燃烧以及较高的 HC、CO 排放量,热效率较低。因此,除了燃烧稳定性和燃烧相位,燃烧效率也是影响热效率的重要因素,燃烧效率主要反映在 CO、HC 排放指标上。

不同喷射方案和运行工况下的 CO 比排放量如图 10 所示。可以看出,3 种喷射方案的 CO 比排放量均随着 λ 增大显著下降,在 λ 为 1.4 时又略有上升。这是因为,CO 排放主要是碳氢燃料在缺氧和低温环境下的不完全燃烧产物,与 λ 直接相关^[28]。在适度稀燃条件下,混合气中有足够的氧促进 CO 的氧化,因此 CO 比排放量较低。当 λ 增大到 1.4,燃烧速度减慢,燃烧定容度和缸内最高燃烧温度下降,较低的燃烧温度降低了 CO 的氧化效率。同时,稀燃条件下燃烧循环变动增大,导致不完全燃烧循环增多,CO 比排放量又略有上升。

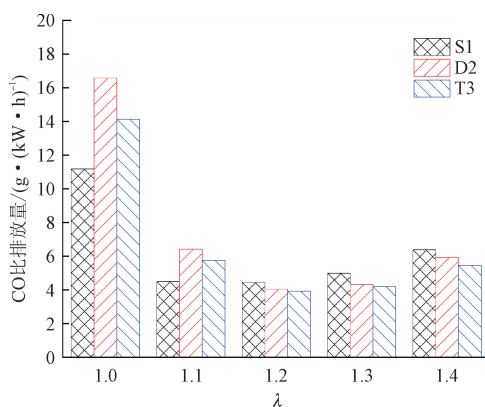


图 10 不同喷射方案的 CO 比排放量

Fig. 10 CO brake specific emission for various injection strategies

当 λ 为 1.0、1.1 时,单次喷射比多次喷射具有更快的燃烧速率,因为单次喷射的混合气均质性更好。事实上,即使采用单次早喷,缸内混合气也不可能达到完全均质,缸内一定存在 $\lambda < 1.0$ 的混合气浓区,喷束撞击在燃烧室底面形成的混合气浓区,以及由于过度混合,导致压缩余隙内积聚了较多的混合气,这些区域浓混合气不完全燃烧是 CO 排放的主要来源。采用多次喷射后,由于压缩行程喷射的燃料混合时间较短,混合气均质性比单次喷射更差,因此多次喷射的 CO 比排放量高于单次喷射。

随着 λ 的逐渐增大,缸内 $\lambda < 1.0$ 的混合气浓区逐渐减少,因缺氧导致不完全燃烧产生的 CO 明显下降。多次喷射由于提高了预燃室射流点火能量,

在稀燃工况下比单次喷射具有更短的燃烧持续期和燃烧稳定性,燃烧效率得以提高,故 CO 排放略有下降。 λ 为 1.4 时,相较于单次喷射,两次、三次喷射的 CO 比排放量分别降低了 0.44、0.93 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

不同喷射方案和运行工况下的 HC 比排放量如图 11 所示。可以看出, λ 为 1.0、1.1 时,3 种喷射方案的 HC 比排放量均较低。这是因为,在当前工况下,缸内燃烧温度较高,有利于 HC 的氧化^[29]。不同喷射方案的 HC 比排放量差异较小,相比之下,两次喷射方案的 HC 排放略高,这是因为二次喷射增大了狭隙效应^[26]。狭隙效应是指混合气在形成过程中,混合气被挤入到活塞与缸壁之间的间隙、活塞环与环槽之间的间隙,这部分混合气由于火焰很难传播,导致不能完全燃烧,形成 HC 排放。两次喷射时,第 2 次喷射角度为 -140° ,此时活塞距离上止点较远,喷束得以充分发展,使得甲醇液滴积聚在气缸壁面附近较多,这部分混合气在活塞高速上行过程中极易形成狭隙效应。三次喷射时,由于第 3 次喷射角度更为推迟,甲醇液滴很难扩散到缸壁附近,故三次喷射的狭隙效应要低于两次喷射,HC 比排放量也略低。

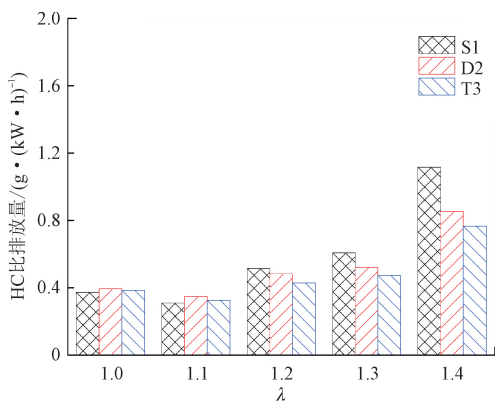


图 11 不同喷射方案的 HC 比排放量

Fig. 11 HC brake specific emissions for various injection strategies

随着 λ 逐渐增大至 1.2~1.4,从整体上看,HC 排放逐渐上升。这是因为,在稀燃工况下,燃烧速度减慢,较低的燃烧温度降低了 HC 氧化效率。相比之下,多次喷射具有更快的燃烧速率和燃烧稳定性,预燃室混合气浓度的提升使射流火焰点火能量得以增强,更强的射流火焰减少了稀燃工况下的容积淬熄。因此,多次喷射的 HC 比排放量较单次喷射明显更低,且三次喷射的 HC 排放优于两次喷射。 λ 为 1.4 时,相较于单次喷射,两次、三次喷射的 HC

比排放量分别降低了 0.26、0.35 $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

不同喷射方案和运行工况下的 NO_x 比排放量如图 12 所示。可以看出, λ 为 1.1 时,不同喷射方案的 NO_x 排放均达到最大值。这是因为, NO_x 主要形成于高温富氧环境^[30],适量多的氧气促进了燃料的完全燃烧。随着 λ 逐渐增大,缸内燃烧温度下降, NO_x 随之降低,不同的 λ 工况下,喷射次数对 NO_x 排放的影响有所不同。当 λ 为 1.0、1.1 时,单次喷射的 NO_x 比排放量最高,两次喷射次之,三次喷射最低。这是因为,当前运行工况下,单次喷射的燃烧速度高于多次喷射,多次喷射的冷却效应降低了燃烧温度。随着 λ 逐渐增大至 1.2~1.4,虽然多次喷射的冷却效应依然存在,但预燃室混合气浓度的提升使射流点火能量得以增强,更强的射流火焰提高了燃烧定容度和缸内最高燃烧温度,导致 NO_x 排放略有升高。

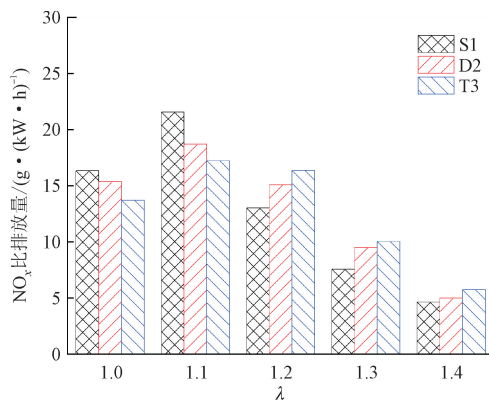


图 12 不同喷射方案的 NO_x 比排放量

Fig. 12 NO_x brake specific emissions for various injection strategies

3 结 论

(1)多次喷射通过提升预燃室混合气浓度,显著缩短了着火延迟期,降低了不同运行工况下的循环变动。 $\lambda=1.4$ 时,单次喷射、两次喷射、三次喷射的指示平均压力循环变动系数分别为 4.96%、4.36%、3.79%。

(2)在当量比和适度稀燃工况,多次喷射的燃烧持续期较单次喷射略有增大;在 $\lambda \geq 1.2$ 的稀燃工况,多次喷射的燃烧持续期明显缩短; $\lambda=1.4$ 时,相较于单次喷射,两次喷射和三次喷射的燃烧持续期分别缩短了 15.3%、17.5%。

(3)在当量比工况,多次喷射的指示热效率相较于单次喷射无明显提升,且 HC、CO 比排放量略高

于单次喷射。在 $\lambda \geq 1.2$ 的稀燃工况,多次喷射的优势凸显, $\lambda = 1.4$ 时,两次喷射和三次喷射 HC 比排放量分别降低了 0.26 、 $0.35 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,CO 比排放量分别降低了 0.44 、 $0.93 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,指示热效率分别提高了 0.5% 、 1.1% 。

参考文献:

- [1] YU Xiumin, GUO Zezhou, SUN Ping, et al. Investigation of combustion and emissions of an SI engine with ethanol port injection and gasoline direct injection under lean burn conditions [J]. *Energy*, 2019, 189: 116231.
- [2] YAO Chunde, PAN Wang, YAO Anren. Methanol fumigation in compression-ignition engines: a critical review of recent academic and technological developments [J]. *Fuel*, 2017, 209: 713-732.
- [3] ZHU Sipeng, AKEHURST S, LEWIS A, et al. A review of the pre-chamber ignition system applied on future low-carbon spark ignition engines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111872.
- [4] 王罗玺,任飞,李卓航,等. 预燃室氢射流火焰引燃氨预混气火焰发展及着火特性数值研究 [J]. *内燃机工程*, 2023, 44(5): 24-32.
WANG Luoxi, REN Fei, LI Zhuohang, et al. Numerical investigation on the flame development and ignition characteristics of ammonia premixed gas ignited by hydrogen jet flame in a pre-chamber [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2023, 44(5): 24-32.
- [5] VERHELST S, TURNER J W, SILEGHEM L, et al. Methanol as a fuel for internal combustion engines [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 70: 43-88.
- [6] ZHEN Xudong, WANG Yang. An overview of methanol as an internal combustion engine fuel [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 477-493.
- [7] 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.
- [8] 赖开昌,冯浩,郑尊清,等. 稀燃对甲醇直喷点燃式发动机性能的影响 [J]. *内燃机工程*, 2023, 44(4): 16-22.
LAI Kaichang, FENG Hao, ZHENG Zunqing, et al. Effects of lean burn on performance of a methanol direct injection spark ignition engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2023, 44(4): 16-22.
- [9] TIAN Jiangping, CUI Zechuan, REN Zhongyong, et al. Experimental study on jet ignition and combustion processes of natural gas [J]. *Fuel*, 2020, 262: 116467.
- [10] WANG Bin, XIE Fangxi, HONG Wei, et al. Study on ignition mode transition of methanol pre-chamber jet ignition system controlled by boundary condition parameters [J]. *Fuel*, 2024, 372: 132238.
- [11] HUA Jianxiong, ZHOU Lei, GAO Qiang, et al. Influence of pre-chamber structure and injection parameters on engine performance and combustion characteristics in a turbulent jet ignition (TJI) engine [J]. *Fuel*, 2021, 283: 119236.
- [12] 龚世华,车胜楠,刘宗宽,等. 湍流射流点火甲醇发动机燃烧特性及预燃室喷射策略研究 [J]. *内燃机工程*, 2023, 44(1): 68-75.
GONG Shihua, CHE Shengnan, LIU Zongkuan, et al. Investigation on the combustion characteristics and pre-chamber injection strategy of the methanol engine by turbulent jet ignition [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2023, 44(1): 68-75.
- [13] 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: 122309.
- [14] 华剑雄. 湍流射流点火(TJI)的燃烧特性及其对发动机稀薄燃烧的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [15] 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.
- [16] 李本正,刘圣华,农金吉,等. 甲醇缸内直喷发动机分层燃烧和均质燃烧的试验研究 [J]. *内燃机学报*, 2009, 27(6): 505-510.
LI Benzhen, LIU Shenghua, NONG Jinji, et al. Experimental study on stratified and homogeneous combustion of a methanol direct-injection spark-ignition engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(6): 505-510.
- [17] BJ H. Internal combustion engine fundamentals [M]. [S.l.]: McGraw-Hill, 1988: 449-450.
- [18] WANG Bin, XIE Fangxi, HONG Wei, et al. The effect of structural parameters of pre-chamber with turbulent jet ignition system on combustion characteristics of methanol-air pre-mixture [J]. *Energy Con-*

- version and Management, 2022 274: 116473.
- [19] LEE D E, IYER C, WOOLDRIDGE S, et al. Impact of passive pre-chamber nozzle diameter on jet formation patterns and dilution tolerance in a constant-volume optical engine [J]. SAE International Journal of Engines, 2024, 17(2): 221-235.
- [20] REVUELTA A, MARTÍNEZ-BAZÁN C, SÁNCHEZ A L, et al. Laminar Craya-Curtet jets [J]. Physics of Fluids, 2004, 16(1): 208-211.
- [21] KOU Hailiang, HU Wenzhu, LI Tao, et al. Effects of injection timing on combustion and mixture formation of a methanol direct injection engine equipped with a small volume passive pre-chamber [J]. Fuel, 2025, 384: 133910.
- [22] GALLONI E. Analyses about parameters that affect cyclic variation in a spark ignition engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5/6): 1131-1137.
- [23] ZHANG Zhiyuan, HUANG Zuohua, WANG Xiangan, et al. Measurements of laminar burning velocities and Markstein lengths for methanol-air-nitrogen mixtures at elevated pressures and temperatures [J]. Combustion and Flame, 2008, 155(3): 358-368.
- [24] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [25] 黄震, 金兆辉, 姜北平, 等. 稀燃条件下甲醇汽油发动机燃烧和排放特性的试验研究 [J]. 内燃机工程, 2018, 39(2): 48-52.
- HUANG Zhen, JIN Zhaohui, JIANG Beiping, et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of a lean burn engine fueled with methanol/gasoline [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(2): 48-52.
- [26] DUAN Xiongbo, DENG Banglin, LIU Yiqun, et al. Experimental study the impacts of the key operating and design parameters on the cycle-to-cycle variations of the natural gas SI engine [J]. Fuel, 2021, 290: 119976.
- [27] RAKOPOULOS D C, RAKOPOULOS C D, KOSMADAKIS G M, et al. Assessing the cyclic variability of combustion and NO emissions in hydrogen-methane fueled HSSI engine via quasi-dimensional modeling under the influence of flame-kernel turbulence and equivalence ratio variation mechanisms [J]. Energy, 2024, 288: 129813.
- [28] NING Le, DUAN Qimeng, LIU Bing, et al. Experimental assessment of lean-burn characteristics for a modified diesel engine operated in methanol direct injection spark ignition (DISI) mode at full throttle condition [J]. Fuel, 2020, 279: 118455.
- [29] DUAN Qimeng, KOU Hailiang, LI Tao, et al. Effects of injection and spark timings on combustion, performance and emissions (regulated and unregulated) characteristics in a direct injection methanol engine [J]. Fuel Processing Technology, 2023, 247: 107758.
- [30] LI Xiaoyan, ZHEN Xudong, WANG Yang, et al. Numerical comparative study on performance and emissions characteristics fueled with methanol, ethanol and methane in high compression spark ignition engine [J]. Energy, 2022, 254: 124374.

(编辑 赵炜)