

## 喷射策略对乙醇-汽油发动机燃烧和排放的影响

李庆宇<sup>1</sup>, 刘敬平<sup>1†</sup>, 付建勤<sup>1</sup>, 刘琦<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082;  
2. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 401122)

**摘要:**为改善乙醇-汽油发动机的燃烧和排放性能, 针对一台乙醇-汽油发动机开展了典型工况下不同喷射策略的试验, 对比分析了各种喷射策略和乙醇比例对发动机燃烧和排放的影响. 结果表明, 燃油消耗率(Brake Specific Fuel Consumption, BSFC)随加权喷射正时中心( $T_{\text{COI}}$ )提前呈现先下降而后趋于稳定, 随喷射次数增加而下降. 相比单次喷射, 多次喷射使 BSFC 最大减少 7%, 一氧化碳和碳氢化合物排放明显降低, 但会导致氮氧化物排放略有上升(远小于  $T_{\text{COI}}$  的影响). 汽油掺混乙醇后, 燃烧持续期变长, 但由于点火正时和燃烧重心提前使发动机热效率明显提升. 增大  $T_{\text{COI}}$  和乙醇比例均可降低一氧化碳体积分数, 最大降幅达 15%. 乙醇比例对碳氢化合物和氮氧化物的影响取决于  $T_{\text{COI}}$ .  $T_{\text{COI}}$  能很好地表征喷油特性, 对排放影响比乙醇比例和喷射次数的影响均大. 选取合适的喷射次数、乙醇比例和  $T_{\text{COI}}$  可显著提高发动机热效率并减少排放.

**关键词:**喷射; 排放; 燃烧; 乙醇-汽油; 发动机

**中图分类号:**TK417

**文献标志码:**A

## Effect of Injection Strategies on Combustion and Emissions of Ethanol-gasoline Engine

LI Qingyu<sup>1</sup>, LIU Jingping<sup>1†</sup>, FU Jianqin<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing 401122, China)

**Abstract:** In order to improve the combustion and emission performance of the ethanol-gasoline engine, the tests on an ethanol-gasoline engine were carried out with different injection strategies under typical working conditions. The effects of injection strategies and ethanol proportions on engine combustion and emissions were compared and analyzed. The results showed that the Brake Specific Fuel Consumption (BSFC) decreased first and then became stable with  $T_{\text{COI}}$  in advance, and decreased with the increase of the number of injections. Compared with a single injection, multiple injections reduced BSFC by up to 7%, and carbon monoxide and hydrocarbon emissions were obviously reduced, but it led to a slight increase in nitrogen oxide emissions (much less than the impact of  $T_{\text{COI}}$ ). After gasoline was mixed with ethanol, the combustion duration became longer, but the thermal efficiency of the engine was signifi-

\* 收稿日期:2022-02-13

基金项目:汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放基金项目(NVH SKL-202011), State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology (NVH SKL-202011)

作者简介:李庆宇(1991—),男,湖南醴陵人,湖南大学博士研究生

† 通信联系人, Email:wavyt@msn.com

cantly improved due to ignition timing and early combustion center. Increasing the proportion of ethanol and  $T_{COI}$  can reduce the carbon monoxide concentration by up to 15%. The effect of ethanol proportion on hydrocarbon and nitrogen oxide depended on the  $T_{COI}$ .  $T_{COI}$  was a good parameter of the injection characteristics, and the impact on emissions was greater than that of ethanol proportion and number of injections. Selecting the appropriate number of injections, ethanol proportion, and  $T_{COI}$  can significantly improve engine thermal efficiency and reduce emissions.

**Key words:** injection; emissions; combustion; ethanol-gasoline; engine

清洁高效燃烧技术是实现内燃机高效低排放目标的关键<sup>[1-2]</sup>. 就车用汽油机而言,优化其燃烧和排放的方法包括多次喷射、缸内直喷等.同时,汽油作为不可再生资源,储量不断减少,作为汽车燃料的经济性越来越差<sup>[3]</sup>.基于生物材料制备的乙醇来源广泛,是一种具有碳中性的可再生能源<sup>[4]</sup>,是汽油的理想替代燃料之一.现有大量研究表明,乙醇在提高点燃式发动机性能和改善排放方面的优势非常明显<sup>[5]</sup>.就目前而言,多次喷射在点燃式发动机中的应用研究还相对较少,乙醇-汽油结合多次喷射技术的潜力值得进一步探索.

多次喷射技术最初应用于柴油机,在改善柴油机的碳烟和氮氧化物(Nitrogen Oxide,  $NO_x$ )排放、降低噪声等方面取得了良好的效果<sup>[6]</sup>.喷油器技术的不断进步,为发动机在一个循环内实现多次喷射提供了可能,最高甚至可达5次喷射,这激发了国内外大量学者的研究兴趣,并逐步拓展到汽油机上<sup>[7]</sup>.Wei等人<sup>[8]</sup>研究证明了多次喷射可扩展爆震极限并提高热效率,归因于多次喷射对混合气产生的冷却效果.Zeng等人<sup>[9]</sup>探讨了废气再循环结合2次喷射的分层燃烧模式,证实该燃烧模式具有优化燃烧稳定性和排放、提高热效率等优势.陈征等人<sup>[10]</sup>研究了柴油-丁醇2次喷油燃烧过程对燃烧和排放的影响,发现丁醇比例增大,碳烟排放降低,氮氧化物排放轻微增加,碳氢化合物(Hydrocarbon, HC)和一氧化碳(Carbon Monoxide, CO)排放显著增加.Merola等人<sup>[11]</sup>基于光学诊断方法研究了纯正丁醇燃料与双喷射技术的兼容性,结果发现与汽油相比,替代燃料的蒸发特性更有利于形成均匀混合气,使多次喷射的收益更大.尽管国际上针对汽油机多次喷射开展了大量研究,但很少有研究考虑多次喷射对乙醇-汽油发动机燃烧和排放性能的改善潜力,多次喷射策略结合乙醇替代燃料在缸内直喷(Gasoline Direct Injection, GDI)汽油机上的研究也不够全面.

为解决上述问题,本文开展了多次喷射对乙醇-汽油发动机燃烧和排放性能的影响研究.针对一台GDI汽油机,分别开展了不同喷射次数和乙醇比例的发动机试验,获得各种喷射策略和乙醇比例下的发动机燃烧性能参数、热效率和排放物.在此基础上通过开展试验数据详细分析,揭示多次喷射和乙醇比例对发动机燃烧和排放性能的影响.本文的研究为改善乙醇-汽油发动机燃烧和排放性能提供理论指导和数据支撑.

## 1 试验系统及方法

试验对象为一台增压直喷、火花点燃式发动机,可燃用纯汽油E0(100%的基准汽油,研究辛烷值92)和E100(100%的无水乙醇),以及不同乙醇掺混比的乙醇-汽油混合燃料.基于该发动机,开展不同喷射策略和乙醇比例参数敏感性试验.

### 1.1 试验系统和发动机

图1为GDI发动机试验示意图.试验装置包括一台市面上量产的2.0 L四缸直列涡轮增压GDI发动机,并配备了博世压电式喷油器.测试发动机的主要参数见表1.就目前而言,大多数点燃式发动机都是采用电磁阀式喷油器,喷射次数一般不超过3次.而本研究采用快速压电式喷油器(Piezo-electric喷油器),具备每个循环最多5次喷射的能力.与电磁阀式喷油器相比,Piezo-electric喷油器的控制更加精准、稳定,更适合进行多次喷射研究.

该发动机配备了喷射导向的燃烧系统,其核心部件是具有外开喷嘴的压电式喷油器,能够非常精确、稳定地分配最短的喷射脉冲.在工作寿命的时间范围内具有强大的抗积碳和稳定工作的优点.与传统的多孔喷嘴相比,压电式喷嘴几乎无节流,喷射压力也明显提升(可达20 MPa,高于多孔阀的13 MPa);喷雾液滴气化速度提升了4倍左右,由此可显

著提高抗碳化和堆积的鲁棒性.此外,压电式喷油器的高喷射压力与非常小的气门间隙喷嘴,共同作用产生锥形空心喷雾,其贯穿距仅为传统多孔喷嘴的50%左右.正是考虑到上述优点,本研究以压电式喷油器为对象,开展精准的多次喷射策略与乙醇比例对GDI发动机燃烧和排放特性的影响研究.

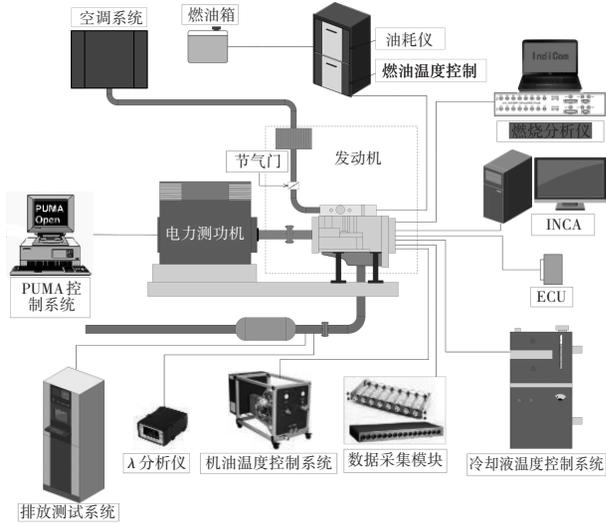


图1 GDI发动机试验示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the GDI engine

表1 测试发动机的主要参数

Tab.1 Main specifications of test engine

参数名	参数值
发动机型式	直列4缸
缸径/mm	83
行程/mm	92
排量/L	2.0
压缩比	9.8
气阀形式	液压驱动双VVT,进排气阀定时变化范围:50°
额定功率/kW	155
喷油型式	缸内直喷
冷却方式	水冷
吸气方式	涡轮增压

1.2 试验测试设备及方法概述

试验发动机燃料是由基准汽油和无水乙醇按不同体积比组成的混合燃料,基准汽油和无水乙醇的物化特性见表2.本次研究考虑了E0(100%的基准汽油)、E10(10%的无水乙醇+90%的基准汽油)、E30和E85等4种不同比例的乙醇-汽油混合燃料.采用活塞式流量计测量燃料流量.

试验测试设备包括AVL燃烧分析仪、电荷放大器、燃油流量传感器、温度传感器和压力传感器等.GDI发动机台架试验测试设备如图2所示.采用火花

塞压力传感器(Kistler 6115BFD34Q04)和电荷放大器(Kistler 5010)采集缸内的压力.通过发动机标定软件来设置各工况下特定的试验条件,主要包括喷射参数和过量空气系数等,并通过传感器记录进气压力、排气压力(涡轮前后)、排气温度、机油和冷却液温度、发动机机油压力和燃油导轨压力等参数.表3列出了发动机的试验边界条件,包括缸压、爆震极限涡轮后温度的极限值(或最大允许值).

表2 基准燃料的物化特性对比

Tab.2 Comparison of physical and chemical properties of two based fuels

参数名	基准汽油(E0)	无水乙醇(E100)
蒸气压20°C/kPa	62.5	5.95
低热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	42.9	26.9
理论空燃比	14.6	9.0
氢碳比值	1.89	3.0
含氧量(质量分数)/%	<5	约35
研究法辛烷值	92	约108
马达法辛烷值	84	91
辛烷值敏感性	8	17
蒸发焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	25.5	93.3
初馏点/°C	34	78

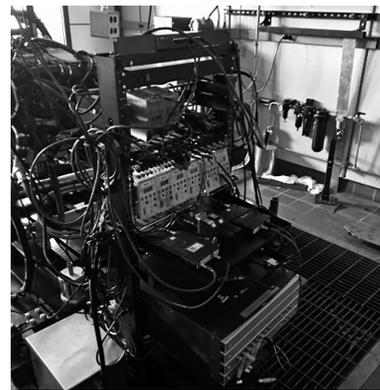


图2 GDI发动机台架试验测试设备  
Fig.2 The facilities for bench test of the GDI engine

基于表3的边界条件,开展了不同喷射策略对乙醇-汽油发动机的燃烧和排放性能影响的试验研究.针对不同的试验工况条件,采用单变量扫描的方法开展了喷射次数、喷油正时和乙醇比例(体积分数)等参数的敏感性试验,测试汽油机的缸压、各项状态参数(如进排气压力、流量、温度等)、性能参数(功率、扭矩、比油耗等)和排放参数(包括NO<sub>x</sub>、CO和HC源排放).通过缸压传感器测得各缸的动态缸压,然后经过燃烧分析仪处理得到每个试验工况的燃烧特征参数;通过AVL排放分析仪对采集的废气进行

分析,得到各种试验边界下的排气组分和浓度.

表 3 发动机的试验边界条件

Tab.3 Test boundary conditions of the engine

参数名	参数值
发动机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 750
过量空气系数	1(或标定值)
喷射压力/MPa	20
进气提前角/(°)	15
进气迟关角/(°)	32
排气提前角/(°)	31
排气迟关角/(°)	27
冷却液出水温度/°C	85
中冷后温度/°C	30
发动机缸压/MPa	≤ 10
爆震因子	≤ 0.1
涡后温度/°C	≤ 900

为了便于比较不同喷射次数对发动机性能的影响,引用加权喷射正时中心( $T_{\text{coi}}$ ).该概念是由 Imaoka 等人<sup>[12]</sup>在研究 GDI 喷油时提出的,如式(1)和式(2)所示.

$$T_{\text{coi}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i m_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \quad (1)$$

$$T_i = (T_s + T_e)/2 \quad (2)$$

式中: $T_s$ 和 $T_e$ 分别为第*i*次喷射正时的开始和结束时刻; $m_i$ 为第*i*次喷射时间内的总质量; $N$ 为喷射次数.由式(1)可知, $T_{\text{coi}}$ 综合考虑了喷射正时和每次喷射量占比的影响,因而可以更全面客观地评价多次喷射的效果.如果没有特别说明, $T_{\text{coi}}$ 均指在压缩上止点前的绝对值.本节先考虑 E10 发动机在进气压力 125 kPa 条件下,单次喷射和多次喷射对发动机性能影响的对比.多次喷射试验边界条件如表 4 所示.

表 4 多次喷射试验边界条件

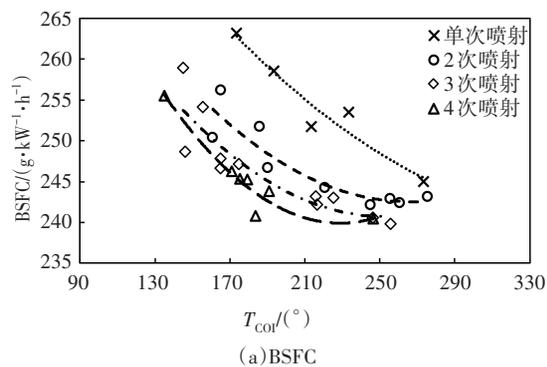
Tab.4 Experimental conditions for multiple fuel injections

参数名	参数值
发动机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 750
进气压力/kPa	125, 150
过量空气系数	1.0
喷油压力/MPa	20
进气温度/°C	30
冷却水温度/°C	85
喷射次数	1, 2, 3, 4
喷射燃油质量分布	均匀分布
燃料	E10

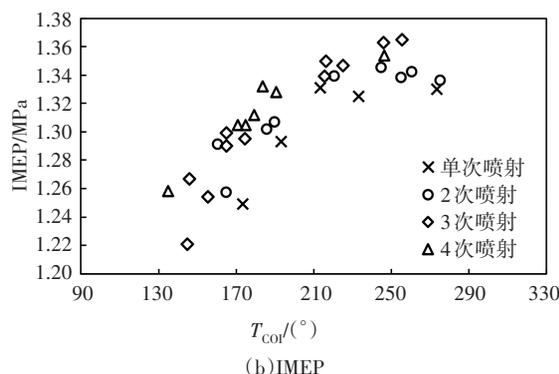
## 2 结果与讨论

### 2.1 喷射策略对发动机燃烧和排放的影响

在相同的燃料含量条件下,燃油喷射量主要由进气压力、转速和过量空气系数决定.喷射次数的改变,并不会改变燃油喷射总量,但会影响燃油质量的分配.图 3 是当进气压力  $P_{\text{in}}=125$  kPa 时,喷射次数对 BSFC 和平均有效压力 (Indicated Mean Effective Pressure, IMEP) 的影响.由图 3(a)可知,BSFC 随  $T_{\text{coi}}$  提前而下降,但下降的趋势逐渐变缓.另外,从试验数据拟合的趋势线可以看出,多次喷射的 BSFC 明显低于单次喷射,并且随着喷射次数增加,BSFC 整体水平一直下降.这说明增加喷射次数可以有效改善发动机的燃油经济性.从图 3(b)可以发现类似的规律,即 IMEP 随  $T_{\text{coi}}$  的提前和喷射次数的增加而增大.该现象解释如下:一方面,随着  $T_{\text{coi}}$  提前(前提是未发生燃油湿壁),更多燃油提前喷射,可以增加油气混合时间,由于混合气更均匀,燃烧效果更好,从而导致 IMEP 上升;另一方面,多次喷射不仅可以减少燃油湿壁、获得更均匀的油气混合气,还可以实现分层燃烧的效果,因而可以提高缸内热功转换效率,



(a) BSFC



(b) IMEP

图 3 喷射次数对 BSFC 和 IMEP 的影响 ( $P_{\text{in}}=125$  kPa)

Fig.3 Effects of injection times on BSFC and IMEP ( $P_{\text{in}}=125$  kPa)

效率,获得更大的 IMEP. 但是,喷射次数达到3次以后,继续增加喷射次数并不会引起IMEP的增加. 事实上,IMEP的最大值出现在喷射次数为3的情况.

图4是当进气压力 $P_{in}=150$  kPa时,喷射次数对BSFC和IMEP的影响. 对比图3和图4不难发现,两组进气压力(或负荷)下BSFC和IMEP随 $T_{COI}$ 的变化规律比较相似. 例如,BSFC随 $T_{COI}$ 提前呈先下降后稳定,随喷射次数的增加持续下降. 在进气压力为150 kPa时,多次喷射对发动机性能影响更为明显. 尤其是当 $T_{COI}$ 在 $170^{\circ}\sim 240^{\circ}$ 内,多次喷射的BSFC比单次喷射最大可以减少 $20$  g/(kW·h),下降率达到7%左右;相应地,也会使IMEP出现更为明显的增加(最大增幅达到0.05 MPa). 与图3(b)一样,当喷射次数达到3次后,继续增加喷射次数对改善IMEP几乎无影响.

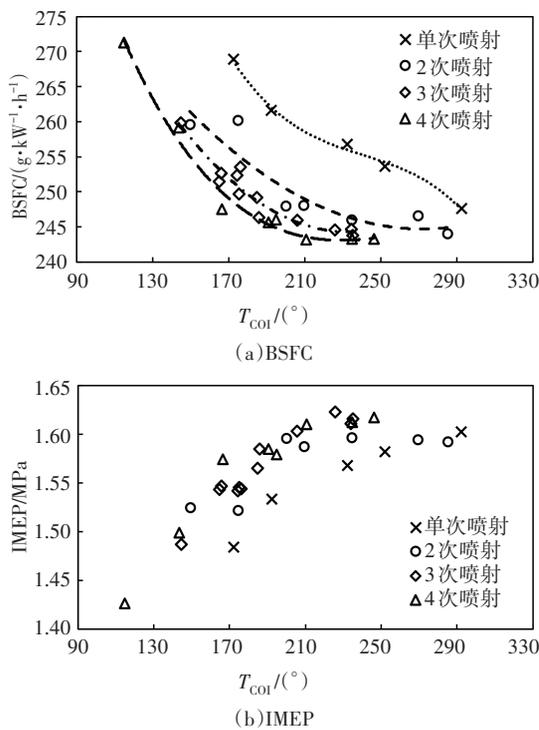


图4 喷射次数对BSFC和IMEP的影响 ( $P_{in}=150$  kPa)  
Fig.4 Effects of injection times on BSFC and IMEP ( $P_{in}=150$  kPa)

由前面分析可知,当喷射次数为3次时,发动机综合性能表现更佳. 图5为3次喷射下不同 $T_{COI}$ 的对比,由图5可知,随着 $T_{COI}$ 提前,缸压逐渐升高,但当 $T_{COI}$ 提前到一定程度后,缸压升高的幅度并不明显. 当 $T_{COI}$ 为 $145^{\circ}$ 时,其缸压曲线尤其是最大爆发压力明显低于 $T_{COI}$ 提前的工况. 同时,从图5(b)所示的放热率曲线上也可以很明显地看出类似的规律.

为了更好地评估燃烧放热率与燃烧相位对发动机缸内热功转换过程,引入有效膨胀比(Effective Expansion Ratio, EER)的概念<sup>[13]</sup>,如式(3)和式(4)所示.

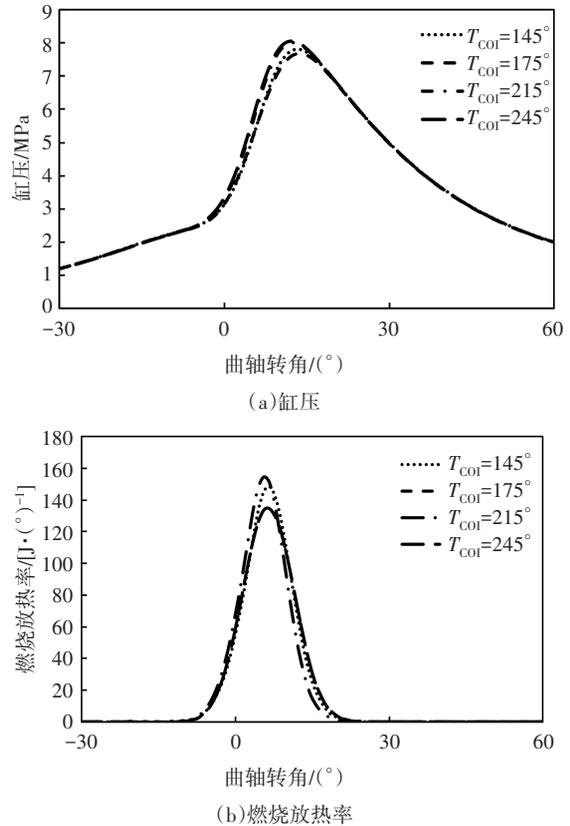


图5 3次喷射下不同 $T_{COI}$ 的对比  
Fig.5 Comparison of different  $T_{COI}$  under three jets

$$\varepsilon_{EER} = \frac{\int_{T_{SOC}}^{T_{EOC}} \varepsilon_{HRR}(\theta) \varepsilon_{ER}(\theta) d\theta}{\int_{T_{SOC}}^{T_{EOC}} \varepsilon_{HRR}(\theta) d\theta} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ER}(\theta) = V_a / V_c \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{ER}(\theta)$ 为瞬时有效膨胀比; $V_a$ 和 $V_c$ 分别为发动机运行的瞬时容积和燃烧室容积, $L$ ;  $T_{SOC}$ 和 $T_{EOC}$ 分别为燃烧的开始和结束时刻, $(^{\circ})$ ;  $\varepsilon_{HRR}(\theta)$ 为瞬时放热率, $J/(^{\circ})$ . 由式(3)可知, $\varepsilon_{EER}$ 表述的是燃油瞬时放热率与瞬时有效膨胀比乘积的积分. 图6为 $T_{COI}$ 对EER的影响,由图6可知, $T_{COI}$ 越提前, $\varepsilon_{EER}$ 也越大.  $\varepsilon_{EER}$ 的数值越大,表明缸内热功转换过程更完备,发动机高压循环热效率越高,比油耗就越低,这与图3(a)的结果相吻合.

图7为喷射次数和 $T_{COI}$ 对CO排放的影响,由图7可知,在多次和单次喷射条件下,CO排放随 $T_{COI}$ 的变化趋势基本一致,并且两组进气压力(或负荷)下变

化趋势也基本相同,即 CO 排放的体积分数随  $T_{\text{COI}}$  提前均先升高而后降低,最后趋于平稳或略有上升.也就是说,CO 排放的体积分数只在中间一段  $T_{\text{COI}}$  范围(对多次喷射而言,在  $160^{\circ}\sim 250^{\circ}$  内)出现下降趋势.在这个  $T_{\text{COI}}$  范围,油气混合气随着  $T_{\text{COI}}$  提前混合更加均匀,使缸内燃烧更加充分.另外,在两组进气压力下 CO 排放的体积分数峰值均出现在下止点附近,此时缸内运动较弱,燃料雾化效果不好;而当  $T_{\text{COI}}$  过大时,过早的喷油容易导致燃油湿壁(碰到活塞上部),同样导致雾化不良和燃烧不完全.另外,在两组进气压力下(或负荷)下,虽然多次喷射相比于单次喷射能在一定程度上降低 CO 排放,但当喷射次数大于 2 次后,CO 排放的体积分数变化不明显.也就是说,2 次喷射就可以保证缸内油气混合均匀,此时继续增加喷射次数对 CO 的影响甚微.

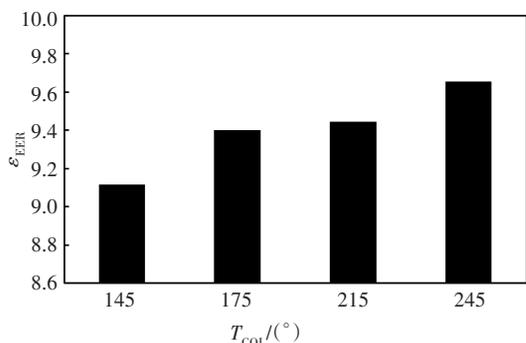
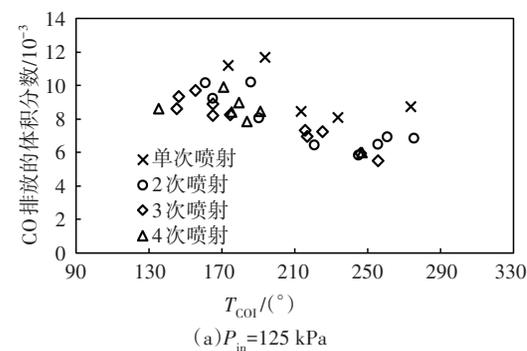
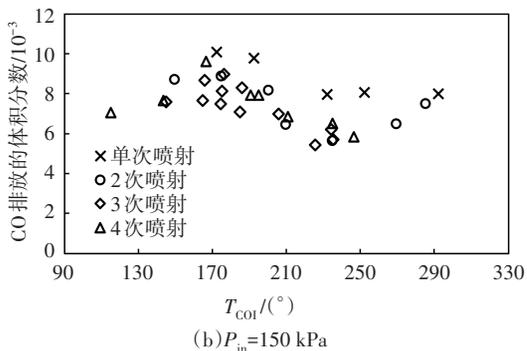


图 6  $T_{\text{COI}}$  对  $\epsilon_{\text{EER}}$  的影响  
Fig.6 Effects of  $T_{\text{COI}}$  on  $\epsilon_{\text{EER}}$



(a)  $P_{\text{in}}=125$  kPa



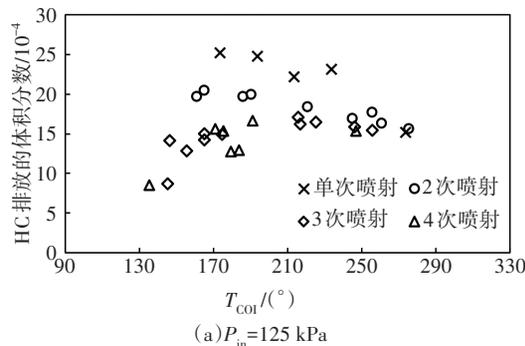
(b)  $P_{\text{in}}=150$  kPa

图 7 喷射次数和  $T_{\text{COI}}$  对 CO 排放的影响

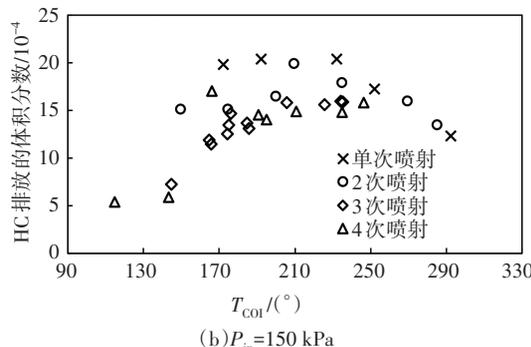
Fig. 7 Effects of injection times and  $T_{\text{COI}}$  on CO emission

图 8 为进气压力分别为 125 kPa 和 150 kPa 时,喷射次数和  $T_{\text{COI}}$  对 HC 排放的影响.与 CO 不同,喷射次数对 HC 排放的影响较大,增加喷射次数可以明显降低 HC 排放,这是因为多次喷射可以获得更加均匀的可燃混合气,并且降低了燃油湿壁的可能性,燃烧相较于单次喷射更加充分,从而可以明显降低 HC 排放.另一方面,进气压力(或负荷)对 HC 排放也有比较明显的影响.

在进气压力为 125 kPa 时,单次和 2 次喷射下的 HC 排放的体积分数随  $T_{\text{COI}}$  提前而下降;3 次和 4 次喷射下的 HC 排放的体积分数随  $T_{\text{COI}}$  提前先升高后趋于稳定或略有下降.而在进气压力为 150 kPa 时,单次和 2 次喷射下的 HC 排放的体积分数大致都是随  $T_{\text{COI}}$  提前先增加后下降;3 次和 4 次喷射下的 HC 排放的体积分数均随  $T_{\text{COI}}$  提前而升高.总体来看,2 次喷射对 HC 排放的改善效果比较有限,只有当喷射次数增加到 3 次后,HC 排放才有明显的下降,但当喷射次数继续增加到 4 次时,HC 排放不再发生明显变化.



(a)  $P_{\text{in}}=125$  kPa



(b)  $P_{\text{in}}=150$  kPa

图 8 喷射次数和  $T_{\text{COI}}$  对 HC 排放的影响

Fig.8 Effects of injection times and  $T_{\text{COI}}$  on HC emission

图 9 为进气压力分别为 125 kPa 和 150 kPa 时,喷射次数和  $T_{\text{COI}}$  对  $\text{NO}_x$  排放的影响.由图 9 可见,在 2 组进气压力下, $\text{NO}_x$  排放随  $T_{\text{COI}}$  的变化表现出相似的规律,即  $\text{NO}_x$  排放随  $T_{\text{COI}}$  提前先增加后基本保持不变或略有减少.这是因为  $T_{\text{COI}}$  提前使缸内混合气更加均匀,燃烧更充分,燃烧温度升高,从而导致  $\text{NO}_x$  排放增加.另外,增加喷射次数同样会导致  $\text{NO}_x$  排放略

微升高,但喷射次数对NO<sub>x</sub>的影响相对较小(远小于T<sub>coi</sub>的影响).

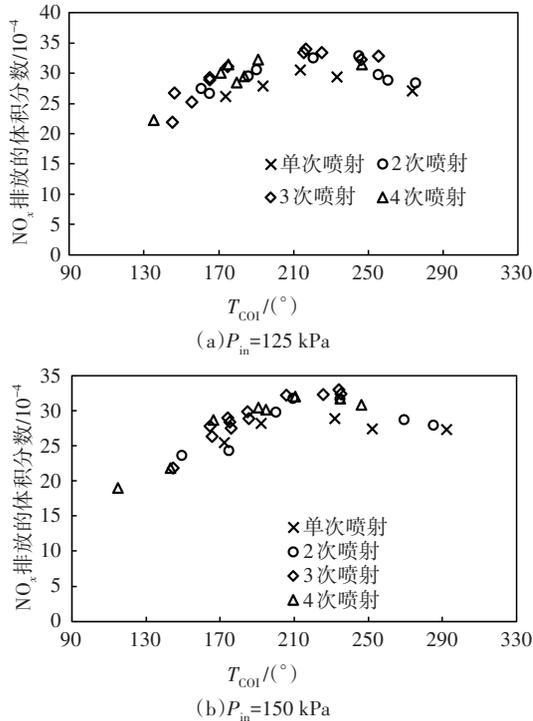


图9 喷射次数和T<sub>coi</sub>对NO<sub>x</sub>排放的影响  
Fig.9 Effects of injection times and T<sub>coi</sub> on NO<sub>x</sub> emission

### 2.2 乙醇比例对发动机燃烧和排放的影响

图10是在3次喷射条件下,燃料E0、E30和E85对发动机性能影响的对比.试验工况为转速1750 r/min、进气压力125 kPa.相比于T<sub>coi</sub>,发动机热效率对混合燃料中乙醇比例的影响更加敏感.发动机燃用E85时有效热效率最高,较E0和E30最大提高分别约为9%和4%.乙醇比例对发动机性能的影响反映在IMEP上更明显.相比于E0,发动机燃用E85的IMEP提高了0.4 MPa左右.燃料中乙醇比例提高后,发动机缸内热功转换效率得到明显提高[图10(a)],因此,在相同喷油条件下输出更多的有效功.然而,当乙醇比例进一步提高后,IMEP的提升并不明显(此时热效率也没有明显提升).

图11给出了3次喷射条件下,乙醇比例(E0、E30和E85)和T<sub>coi</sub>对燃烧参数的影响.从图11(a)可知,不管燃料中乙醇比例如何变化,T<sub>coi</sub>对燃烧重心的影响均很小,尤其是在E0条件下,燃烧重心在整个T<sub>coi</sub>范围内几乎保持不变(维持在15°左右).当燃料掺入乙醇后,由于燃料抗爆性增强和乙醇燃料较大的蒸发潜热,点火正时提前.从图11(a)可以看到,E30和E85的燃烧重心大部分落在8°~10°内,相比于E0大幅提前,这很好地解释了为什么掺入乙醇

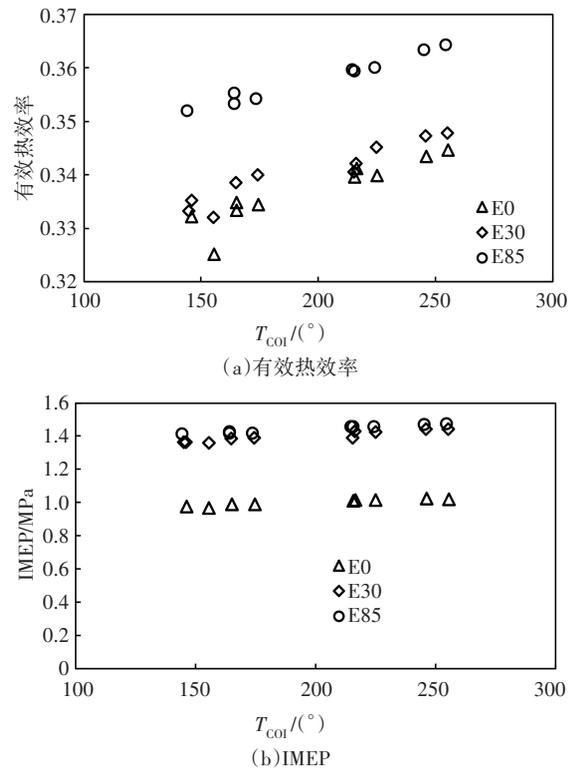


图10 乙醇比例和T<sub>coi</sub>对发动机性能影响  
Fig.10 Effects of ethanol ratio and T<sub>coi</sub> on engine performance

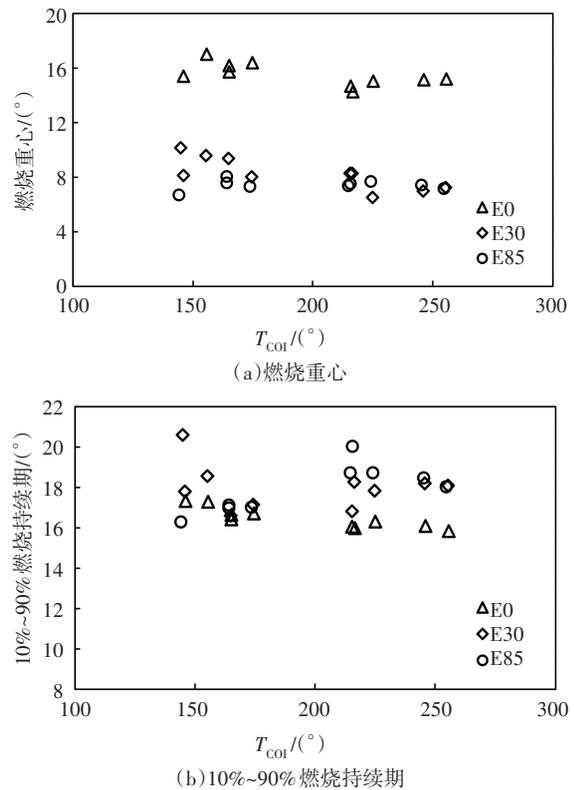


图11 乙醇比例和T<sub>coi</sub>对燃烧参数的影响  
Fig.11 Effects of ethanol ratio and T<sub>coi</sub> on combustion parameters

后发动机热效率会升高. 另外,若在 E30 基础上继续增加乙醇比例,燃烧重心并不会发生明显变化. 这也解释了为什么继续增加乙醇比例,IMEP 和热效率变化幅度很小. 由图 11(b)可知,混合燃料的乙醇比例越高,10%~90% 燃烧持续期越长. 这一规律在  $T_{\text{COI}}$  大于  $200^\circ$  时尤为明显. 这主要是因为乙醇的汽化潜热高,缸内混合气温度低,整体燃烧速度明显慢于燃烧纯汽油(E0)<sup>[14]</sup>. 但是 10%~90% 燃烧持续期对缸内热功转换效率以及 IMEP 的影响较弱(远不及燃烧重心)<sup>[11]</sup>.

图 12 给出了 3 次喷射条件下,乙醇比例(E0、E30 和 E85)和  $T_{\text{COI}}$  对发动机排放的影响. 从图 12(a) 可以看出,随着  $T_{\text{COI}}$  提前,CO 排放的体积分数一直降低,这和前面的分析是一致的[图 7(a)],提前喷油可以使油气混合更均匀从而使燃烧更充分. 另外,CO 是燃烧不完全的产物(往往由缺氧或油气混合不均匀导致),而乙醇是含氧燃料具有助燃效果,燃料中氧会促进燃烧反应,这就解释了为什么在这 3 种燃料中乙醇比例越高,CO 排放的体积分数越低(最大下降率达到 15%).

从图 12(b)可以看出,不管燃料中乙醇比例如何变化,未燃 HC 排放的体积分数在绝大多数工况下随着  $T_{\text{COI}}$  的提前均先增加后减小. 但在  $T_{\text{COI}}$  小于  $180^\circ$  时,E85 产生的未燃 HC 最多,E30 次之,E0 最少. 而在  $T_{\text{COI}}$  大于  $220^\circ$  时,E85 产生的 HC 最少且最大降幅

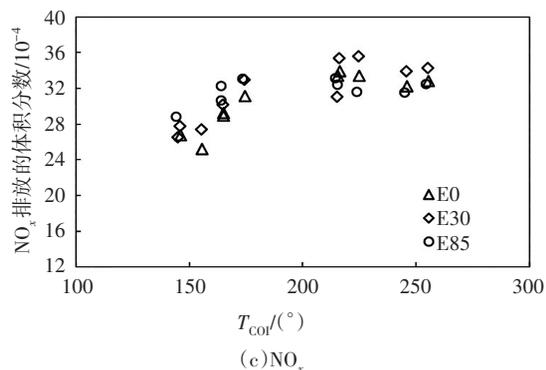
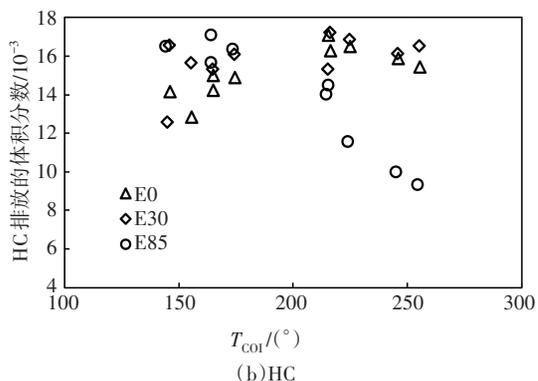
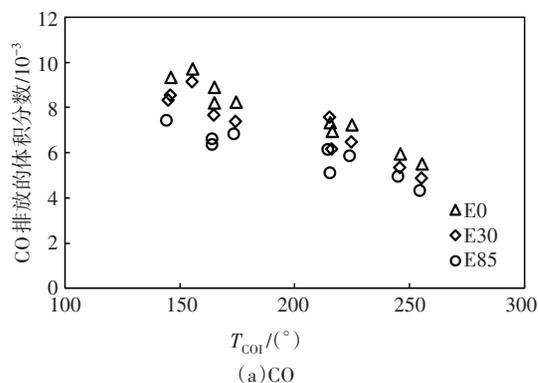


图 12 乙醇比例和  $T_{\text{COI}}$  对排放物的影响

Fig.12 Effects of ethanol ratio and  $T_{\text{COI}}$  on emissions

达到 50%. 上述现象是乙醇物化特性和燃烧相位共同作用的结果:在  $T_{\text{COI}}$  较晚时,乙醇汽化潜热的影响更为明显,导致滞燃期延长,促进 HC 生成;而当  $T_{\text{COI}}$  提前时,乙醇汽化潜热的影响减弱(燃油有足够的时间混合均匀),燃烧速率加快,抑制 HC 生成.

如图 12(c)所示,随着  $T_{\text{COI}}$  的提前,3 种燃料对应的  $\text{NO}_x$  排放的体积分数在绝大多数工况下均先增加后保持不变或稍有下降. 这是因为随着  $T_{\text{COI}}$  提前,燃烧放热加快[图 5(b)],缸内温度升高更快,从而为  $\text{NO}_x$  的生成创造了条件. 在  $T_{\text{COI}}$  小于  $180^\circ$  时,E85 产生的  $\text{NO}_x$  多于 E0,这是因为更多的燃料在上止点附近燃烧[图 11(a)]、缸内最高燃烧温度上升,有助于  $\text{NO}_x$  生成;而在  $T_{\text{COI}}$  大于  $220^\circ$  时,最高  $\text{NO}_x$  排放出现在 E30,此时 E85 中的乙醇气化潜热过大降低了缸内温度,导致  $\text{NO}_x$  的生成量稍微减少.

### 3 结论

1) BSFC 随  $T_{\text{COI}}$  提前先下降而后趋于稳定,随喷射次数增加(不超过 3 次)而下降. 相比于单次喷射,多次喷射可以使 BSFC 最大下降 7%,IMEP 最大上升 50 kPa.

2) 与单次喷射相比,多次喷射可以降低 CO 排放,但当喷射次数大于 2 次后效果不明显. 只有当喷射次数增加到 3 次后,HC 排放才有明显下降. 多次喷射导致  $\text{NO}_x$  排放略有上升,但远小于  $T_{\text{COI}}$  的影响. 随着  $T_{\text{COI}}$  提前,CO 的排放先升高而后降低, $\text{NO}_x$  先增加后基本保持不变或略有减小.

3) 汽油掺混乙醇燃料后,燃烧持续期变长,但由于点火正时和燃烧重心提前,发动机热效率和 IMEP 明显提升. 随着乙醇比例增加,热效率明显提高,但

IMEP 增幅不明显. 相比于乙醇比例,  $T_{\text{COI}}$  对发动机燃烧参数和性能影响较弱.

4) 增大乙醇比例可降低 CO 排放的体积分数 (E85 比 E0 最大下降 15%). 乙醇比例对 HC 和  $\text{NO}_x$  的影响取决于  $T_{\text{COI}}$ , 在  $T_{\text{COI}}$  小于  $180^\circ$  时, E85 产生的 HC 和  $\text{NO}_x$  最多; 而在  $T_{\text{COI}}$  大于  $220^\circ$  时, E85 产生的 HC 最少,  $\text{NO}_x$  也出现下降 (小于 E30).

## 参考文献

- [1] MA X, XU H M, JIANG C Z, *et al.* Ultra-high speed imaging and OH-LIF study of DMF and MF combustion in a DISI optical engine[J]. *Applied Energy*, 2014, 122:247-260.
- [2] 付建勤, 刘敬平, 阳辉勇, 等. LNG 发动机低速工况下瞬态燃烧过程试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(2): 64-69.  
FU J Q, LIU J P, YANG H Y, *et al.* Experimental study on the transient combustion process of LNG engine under low-speed conditions[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(2):64-69. (In Chinese)
- [3] 侯献军, 熊纳, 王友恒, 等. 汽油/压缩天然气两用燃料发动机颗粒物排放特性研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(3):74-80.  
HOU X J, XIONG N, WANG Y H, *et al.* Particulate matter emission characteristics of gasoline/compressed natural gas dual-fuel engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(3):74-80. (In Chinese)
- [4] ZHUANG Y, HONG G, WANG J. Preliminary investigation to combustion in a SI engine with direct ethanol injection and port gasoline injection (EDI+GPI) [C]//18th Australasian Fluid Mechanics Conference. Launceston, Australia: University of Sydney, 2012(123):338-347.
- [5] SINGH R, BURCH T, LAVOIE G, *et al.* Effects of fuel injection events of ethanol and gasoline blends on boosted direct-injection engine performance [J]. *SAE Technical Paper*, 2017 (1): 2238-2254.
- [6] JORQUES M C, STENLAAS O, TUNESTAL P. Investigation of small pilot combustion in a heavy-duty diesel engine[J]. *SAE International Journal of Engines*, 2017, 10(3):1193-1203.
- [7] 陈桢皓, 李铁, 王斌, 等. 柴油微引燃乙醇发动机燃烧、性能及排放特性研究[J]. *车用发动机*, 2017(6):7-12.  
CHEN Z H, LI T, WANG B, *et al.* Combustion, performance and emission characteristics of ethanol-fueled engine with diesel micro-pilot injection ignition [J]. *Vehicle Engine*, 2017(6):7-12. (In Chinese)
- [8] WEI H Q, YU J, SHAO A F, *et al.* Influence of injection strategies on knock resistance and combustion characteristics in a DISI engine[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2019, 233(10):2637-2649.
- [9] ZENG W, SJÖBERG M. Utilizing boost and double injections for enhanced stratified-charge direct-injection spark-ignition engine operation with gasoline and E30 fuels[J]. *International Journal of Engine Research*, 2017, 18(1/2):131-142.
- [10] 陈征, 刘敬平, 吴振阔. 柴油-丁醇复合喷油燃烧模式的排放研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(12):45-49.  
CHEN Z, LIU J P, WU Z K. Study on emissions of diesel-butanol combined injection combustion [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(12):45-49. (In Chinese)
- [11] MEROLA S S, IRIMESCU A, TORNATORE C, *et al.* Split injection in a DISI engine fuelled with butanol and gasoline analyzed through integrated methodologies [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(2):474-494.
- [12] IMAOKA Y, SHOUJI K, INOUE T, *et al.* A study of a multistage injection mechanism for improving the combustion of direct-injection gasoline engines [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2015, 8(3):1080-1087.
- [13] 刘敬平, 夏孝朗, 赵智超, 等. 内燃机燃烧放热率的典型特征参数对比以及对热-功转换效率的影响[J]. *内燃机学报*, 2012, 30(3):260-265.  
LIU J P, XIA X L, ZHAO Z C, *et al.* In-cylinder heat release related parameters and their influences on thermal-power conversion efficiency of an ICE [J]. *Transactions of CSICE*, 2012, 30(3):260-265. (In Chinese)
- [14] 唐琦军, 蒋蕪, 刘敬平, 等. 丙酮-丁醇-乙醇/汽油混合燃料对高速发动机性能影响的试验研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(3):33-40.  
TANG Q J, JIANG P, LIU J P, *et al.* Experimental study on the effects of acetone-butanol-ethanol/gasoline blends on the performance of a high-speed engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(3):33-40. (In Chinese)