

多段燃油喷射对碳酸二甲酯-柴油混合燃料燃烧过程的影响

梅德清¹, 任 华¹, 姜士阳¹, 王 忠¹, Roland Baar²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 柏林工业大学机械与交通工程系, 柏林 10587)

摘 要: 柴油机多段燃油喷射可用来优化缸内燃烧以实现排放净化的目标。该文采用两段预喷和一段主喷组合的多段燃油喷射进行混合燃料 D10 (90%柴油+10%碳酸二甲酯) 燃烧过程的研究。通过预喷相位可调但 3 段喷油之间相位间隔恒定、主喷持续时间可调但第 1、2 段预喷持续时间固定的喷油策略, 实现在目标工况下精确的放热中心 COHR (center of heat release)。当调整多段燃油喷射策略实现目标 COHR 以等步长推移时, 柴油机的燃烧过程呈现如下特点: 各工况的着火时刻均处于第 2 段预喷和主喷之间; 从喷油时刻至着火时刻所经历的曲轴转角越来越小; 着火时刻至放热中心所占用的曲轴转角则越来越大; 缸内燃烧压力峰值出现位置与放热中心位置较为接近, 相对缸内峰值压力出现位置, COHR 不断后移且相距更远。与柴油相比, D10 的滞燃期更长, 其最大压升率也更高。由于易汽化的碳酸二甲酯促进了燃料混合及后续燃烧, 从着火时刻到 10%放热率及 90%放热率对应时刻所占曲轴转角均变小, 说明碳酸二甲酯的加入有助燃烧的迅速进行。基于 COHR 为表征的燃烧特性分析, 为碳酸二甲酯/柴油混合燃料的应用、多段燃油喷射调控燃烧过程及排放控制理论提供指导。

关键词: 柴油机; 燃料; 燃烧; 碳酸二甲酯; 多段喷射

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.009

中图分类号: TK421⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0074-07

梅德清, 任 华, 姜士阳, 等. 多段燃油喷射对碳酸二甲酯-柴油混合燃料燃烧过程的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 74-80.

Mei Deqing, Ren Hua, Jiang Shiyang, et al. Effects of multiple injections strategy on combustion process of mixed fuels with dimethyl carbonate and diesel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 74-80. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

发动机的燃烧过程直接影响其工作性能及尾气排放^[1-3]。为达到更高的燃烧效率及满足日益严格的排放法规, 一般首先优化发动机燃烧过程以实现机内净化, 然后再辅以合适的后处理措施。对柴油机而言, 燃油喷射将对随后的燃烧产生决定性的影响^[4-8]。采用灵活的多段燃油喷射策略, 能够实现理想的燃烧放热规律, 同时兼顾 NO_x 和 PM 排放^[9-12]。燃油喷射参数的不同将直接导致缸内放热率的变化, 为此引入放热中心 (center of heat release, COHR) 将燃油喷射策略和燃烧过程分析及排放控制串联起来。COHR 指放热率为 50%时对应曲轴转角, 是描述发动机燃料燃烧过程的关键相位特征参数, 对发动机的燃烧效率、排放性能等有较大的影响^[13-15]。随着排放法规的实施进程, 满足不同阶段

要求的柴油机的燃烧放热中心有不断向后推移的趋势。以满足欧 V 排放的柴油机为例, 其 COHR 一般落在上止点后 14°~16°曲轴转角附近^[16-18]。

随着石化能源的日益枯竭, 使用非石化燃料部分替代石油资源具有重要意义。其中, 酯类燃料中的碳酸二甲酯 (dimethyl carbonate, DMC) 因含氧量高 (53.3%)、与柴油互溶性好以及实现了工业化生产等特点, 使其在柴油添加剂研究领域备受关注^[19-20]。目前, 已有国内外学者对 DMC 添加至柴油后的燃烧过程进行了分析, 得出柴油掺烧 DMC 后能提高燃烧热效率、加速燃烧以及降低火焰温度等结论^[21-24]。但这些分析只是基于传统的燃烧过程而进行的, 对于在多段燃油喷射技术条件下, 且能适应未来排放法规的研究还未见报道。因此, 有必要对柴油掺烧 DMC 的燃烧过程进行细致分析。

本文在一台高压共轨单缸柴油机上进行不同燃料组分 (柴油, DMC/柴油) 的燃烧过程研究, 结合多段喷射实现对燃烧过程的控制。比较分析不同放热中心位置下柴油与 DMC/柴油混合燃料燃烧过程的联系与区别, 对应用多段喷射控制策略调控发动机燃烧过程具有一定的指导价值, 为发动机排放控制提供依据。

收稿日期: 2013-12-11 修订日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51076069, 51376083), 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (苏政办发〔2011〕6号)

作者简介: 梅德清 (1974-), 男, 副教授, 博士。主要从事发动机替代能源及排放控制的研究。镇江 江苏大学汽车与交通工程学院, 212013。Email: meideqing@ujs.edu.cn

1 试验材料与方法

试验样机是一台高压共轨单缸柴油机，其由 4 缸柴油机 Daimler OM646 经过适当机械改造而成，改造基准是保持动力性能指标（单缸平均指示压力 p_{mi} ）恒定。发动机的基本参数如表 1 所示。该发动机的研发目标是满足欧 V 和欧 VI 排放标准，相关试验在柏林工业大学发动机研究所完成。为避免柴油掺烧 DMC 后燃烧过程和排放性能可能会出现较大变化，选用 D10 燃料（90%柴油与 10%DMC 的混合物）作为试验燃料，并与纯柴油作对比试验。D10 燃料的能量密度达到柴油的 94.8%，因而可以实现较优的替代。柴油与 DMC 的理化特性如表 2 所示。

表 2 燃料的理化特性

Table 2 Properties of diesel and DMC

燃料特性 Fuel properties	密度 Density/ (g·cm ⁻³)	十六烷值 Cetane number	黏度 Viscosity/ (mm ² ·s ⁻¹)	汽化潜热 Latent heat of vaporization/(kJ·kg ⁻¹)	低热值 Lower heat value/ (MJ·kg ⁻¹)	氧质量分数 Oxygen content/%	沸点 Boiling point/°C	能量密度 Energy density/ (MJ·m ⁻³)	理论空燃比 Stoichiometric air-fuel ratio
柴油 Diesel	0.830	52	2.77	280	42.50	0.09	180~360	35.28	14.30
DMC	1.079	36	0.63	369	15.78	53.33	90.1	17.03	4.59

根据热力学第一定律，利用 AVL 燃烧分析仪 IndiCom 软件可得到实时放热规律。通过插值方法寻找到累积放热率为 50% 对应的曲轴转角，即 COHR。对于特定的发动机工作模式，通过调整喷油参数使得 COHR 在目标值±0.3°范围内。将平均指示压力 p_{mi} 和放热中心 COHR 两者都作为发动机工况的监控目标参数。对于 D10 燃料，考虑了 2 种方案：一是与柴油一致的喷油系统参数（喷油始点，喷油脉宽），其被命名为 D10 无喷油调整；二是对原有的喷油系统参数略作微调，实现与原有柴油工况一致的 COHR，以便于与柴油进行比较，其被命名为 D10 有喷油调整。

2 燃油喷射控制策略

喷油规律（喷油定时、喷油量和喷油速率）将对其后的燃烧过程产生决定性的影响。为弥补 D10 燃料能量密度的下降，D10 的油轨压力要比柴油高 3 MPa。为了抑制初期燃烧放热，同时改善热量利用的及时性和主燃期的热效率，采用 2 段预喷和 1 段主喷的多段燃油喷射策略，探究柴油掺烧 DMC 的燃烧特性。选取转速 $n = 1900$ r/min、平均指示压力 $p_{mi} = 0.80$ MPa 工况为试验工况（EGR 率为 36%），通过调整 3 段喷油定时和喷油持续时间，实现目标工况精确的 COHR。经试验优化后，对应于不同 COHR 工况，柴油和 D10 燃料的详细喷油状态参数见表 3。

表 1 发动机的基本参数

Table 1 Basic parameters of engine

发动机类型 Engine type	单缸、4 冲程、直喷式
缸径 Bore/mm	88
行程 Stroke/mm	88.34
排量 Displacement/L	0.537
压缩比 Compression ratio	15.88
标定转速 Rated speed/(r·min ⁻¹)	4000
平均指示压力 Indicated mean effective pressure/MPa	2.05
喷射管理系统 Injection management system	IAV
喷油器 Injector	Bosch CRI-2.2
最大喷射压力 Maximum injection pressure/MPa	178
油轨压力(1900r/min) Fuel rail pressure/MPa	102

表 3 燃油喷射控制策略

Table 3 Control strategy of fuel injection

	名义放热 中心 Nominal COHR/(°)	实际放热 中心 Practical COHR/(°)	$\theta_{inj1}/$ (°)	$\theta_{inj2}/$ (°)	$\theta_{inj3}/$ (°)	$t_{inj1}/\mu s$	$t_{inj2}/\mu s$	$t_{inj3}/\mu s$
柴油 Diesel	7	6.7	-51.6	-33.3	-10.5	254	224	559
	10	9.7	-48.9	-30.7	-7.9	254	224	563
	13	12.7	-46.2	-28.0	-5.1	254	224	568
	16	15.9	-43.2	-24.9	-2.1	254	224	574
	19	18.9	-40.3	-22.0	0.8	254	224	582
D10 无喷 油调整 D10 without injection adaption	7	5.2	-51.5	-33.3	-10.5	254	224	559
	10	8.2	-48.9	-30.7	-7.9	254	224	563
	13	11.3	-46.1	-27.9	-5.0	254	224	568
	16	14.4	-43.1	-24.9	-2.0	254	224	574
	19	17.6	-40.1	-22.0	0.8	254	224	582
D10 有喷 油调整 D10 with injection adaption	7	6.9	-49.6	-31.4	-8.5	254	224	541
	10	9.9	-46.8	-28.6	-5.7	254	224	545
	13	12.8	-44.0	-25.7	-2.9	254	224	550
	16	15.8	-41.3	-23.0	-0.1	254	224	556
	19	18.9	-38.1	-19.9	2.8	254	224	565

注： θ_{inj1} 、 θ_{inj2} 和 θ_{inj3} 分别代表第 1、2 次预喷和主喷阶段开始时刻对应的曲轴转角位置（文中的曲轴转角位置均以上止点为参照）； t_{inj1} 、 t_{inj2} 和 t_{inj3} 分别代表第 1、2 次预喷和主喷的持续时间。

Note: θ_{inj1} , θ_{inj2} and θ_{inj3} correspond to the commencing time in crank angle for the first pre-injection, second pre-injection and main injection respectively (All the specified positions in crank angle are referred to the top dead center). t_{inj1} , t_{inj2} and t_{inj3} represent the duration time of the first pre-injection, second pre-injection and main injection respectively.

由表 3 可知，对于不同的 COHR，2 段预喷持续时间分别为 254 和 224 μs 保持不变，改变主喷段的喷油持续时间，实现目标工况恒定的 p_{mi} 。主喷的

持续时间随着 COHR 的增加而延长。为实现与柴油工况一致的 COHR, D10 有喷油调整的 2 段预喷与主喷均相应地延迟, 主喷油量也略微减少。

而在喷油定时方面, 对于每一个特定的燃油喷射方案, 第 1、2 段预喷之间的间隔为 18.2° , 第 2 段预喷与主喷之间的间隔为 22.8° , 也就意味着预喷到主喷之间相距恒定的 41° 。当 COHR 目标值以 3° 的步长往后推移时, 3 段喷射的定时相应地以 3° 名义值推迟。表 3 中柴油、D10 无喷油调整和 D10 有喷油调整 3 种喷油状态下, 相邻工况实际喷油始点差值的均值分别为 2.83° 、 2.85° 和 2.88° ; 对应地, 各个喷油状态下 COHR 实际值与名义值差值的均值分别为 0.22° 、 1.66° 和 0.14° 。其中 D10 无喷油调整的实际平均指示压力 p_{mi} 和 COHR 与名义值的差值相对较大, 这是由于采用了与柴油一致的喷油相位和持续期, 且喷油压力略高, 另外 DMC 的低沸点和含氧特性加速了燃料的混合及后续燃烧, 致使平均指示压力 p_{mi} 增加、COHR 提前。柴油和 D10 有喷油调整的喷油状态均可以精确实现目标 COHR, 比较两者, 可发现相邻的实际喷油的相位差越接近名义值 3° , 则随后 COHR 的实际值与目标值之间的偏差越小。

3 燃烧过程分析

3.1 缸内压力

对于转速 $n = 1900 \text{ r/min}$ 、平均指示压力 $p_{mi} = 0.80 \text{ MPa}$ 试验工况, 通过喷油策略参数的调整 (详见表 3), 使得目标 COHR 以 3° 曲轴转角等步长向后推移。D10 有喷油调整气缸压力曲线如图 1 所示。当喷油相位较迟时, 与平常不同的是, 压力曲线上出现 2 个明显的峰。第 1 个压力峰主要是由压缩和部分预燃造成的, 峰值变化相对较小。而第 2 峰值压力不断减小且滞后, 此峰完全是由缸内燃烧形成的。表征缸内燃烧主要阶段的压力线上单峰或者双峰中的第 2 个峰是主要研究对象。

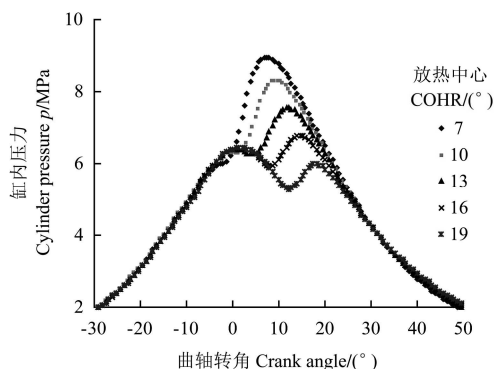
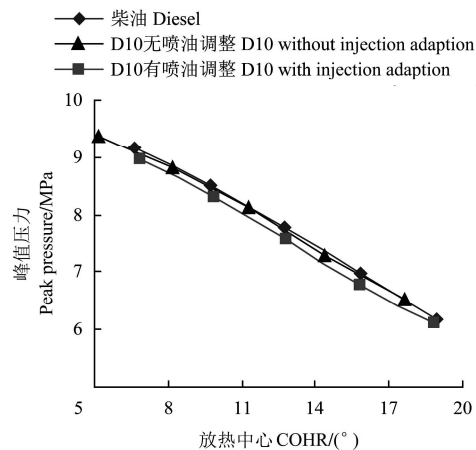


图 1 D10 有喷油调整的气缸压力曲线

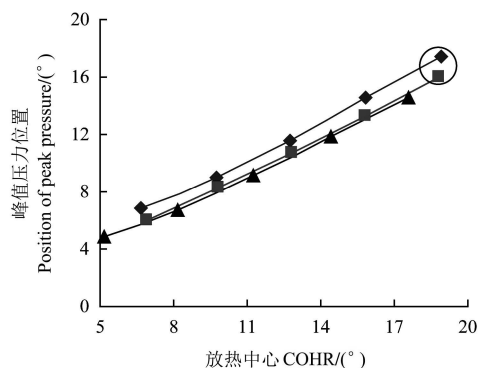
Fig.1 Cylinder pressure of D10 with injection adaption

COHR 对缸内峰值压力 p_{max} 的影响见图 2a。由图 2a 可知, 缸内峰值压力 p_{max} 随 COHR (均为实测值) 的增加呈明显的下降趋势, 这在于不断地延迟喷油导致燃烧爆发压力下降。其中, 对于具有同一喷油相位的柴油和 D10 无喷油调整, p_{max} 随 COHR 的变化几乎落在同一趋势线上, 而喷油相位延迟的 D10 有喷油调整的 p_{max} 随 COHR 变化则几乎平行地位于下方。



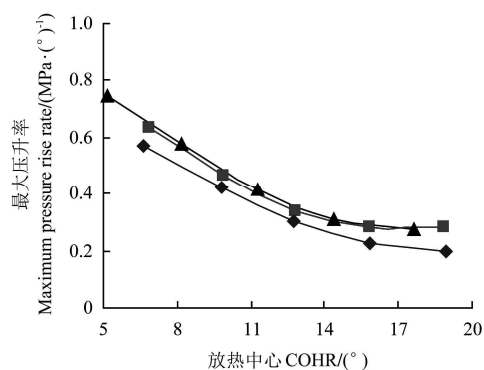
a. 放热中心对缸内峰值压力的影响

a. Effects of COHR on peak pressure in cylinder



b. 放热中心对峰值压力位置的影响

b. Effects of COHR on the position of peak pressure



c. 放热中心对最大压升率的影响

c. Effects of COHR on Maximum pressure rise rate

注: 圆圈位置为主要燃烧阶段的第 2 压力峰的位置。

图 2 放热中心对峰值压力、峰值压力位置及最大压升率的影响

Fig.2 Effects of COHR on peak pressure, position of peak pressure and maximum pressure rise rate

COHR 对缸内峰值压力出现位置的影响如图 2b 所示,可见随着 COHR 的增加,缸内峰值压力出现时刻不断推迟。相对而言,D10 燃料的峰值压力更早地出现,这是由于 DMC 的低沸点造成燃料快速汽化和混合,混合后的混合气加速缸内燃烧,使更多热量在较早时刻被释放出,因而更早地出现峰值压力,热力循环的等容度提高。就 p_{\max} 出现位置与 COHR 的关系而言,通常这两者很接近。当 COHR 较小时,其 p_{\max} 出现位置在 COHR 之后,但随着 COHR 的增加, p_{\max} 出现位置渐渐前移至 COHR 之前,且与 COHR 之间的距离也渐增大。

缸内最大压升率随 COHR 的变化规律如图 2c 所示,可知随着 COHR 的后移,最大压升率明显下降。D10 燃料的最大压升率高于柴油,这在于 D10 的滞燃期要长于柴油,另外,易汽化的 DMC 促进了燃料混合及后续燃烧,使放热更快。为保证柴油机的平稳运行,要将压力升高率控制在 $0.6 \text{ MPa}/(^{\circ})$ 以下^[25]。由图 2c 可见,该范围内发动机工作柔和。

3.2 瞬时放热率

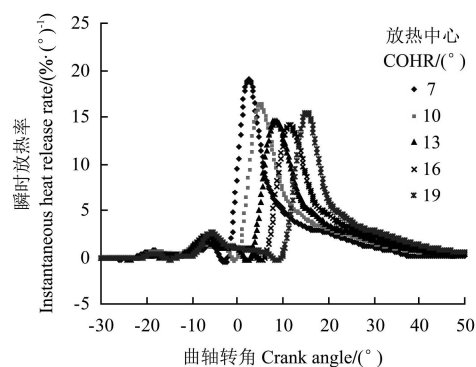
D10 有喷油调整的瞬时放热率如图 3a 所示。以 COHR 分别为 13° 和 16° 为例,对应的放热率峰值出现时刻相差 3.2° ,非常接近两者的放热中心差值 3° 。而为了实现此放热中心的差别,两者的喷射时刻平均相差 2.8° 左右。由此可见,两者的燃油喷射时刻、放热中心与放热率峰值出现时刻的差值均非常接近。随着 COHR 的后移,D10 有喷油调整的放热率峰值不断减小且出现位置相应延迟,但 COHR 由 16° 变为 19° 时,其放热率峰值反而有增大的趋势,主要是喷油的过度延迟造成的。

柴油的瞬时放热率如图 3b 所示。柴油的瞬时放热率曲线显示出与 D10 有喷油调整相似的特点,各放热中心的间隔角与放热峰之间的间隔角也十分接近。缸内燃烧初始阶段的放热情况对比见表 4。由表 4 可见,在相同 COHR 条件下,滞燃期与着火时刻到 10% 放热率所经历的曲轴转角均是 D10 燃料更短。显示 D10 燃料在初始阶段的放热率比柴油快,这在于 DMC 的易挥发性促进燃料与空气的混合以及随后的燃烧进程。

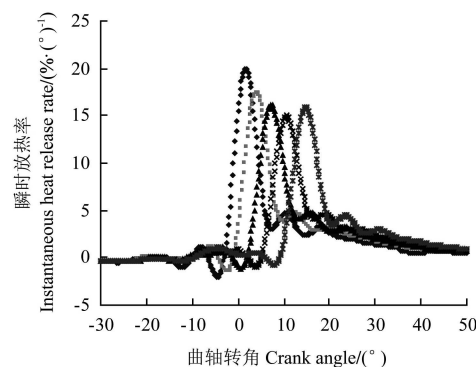
图 3c 列出了 D10 无喷油调整的瞬时放热率。由于 D10 有喷油调整的预喷与主喷均相应地延迟,与图 3a 比较可发现,D10 有喷油调整各放热率主峰出现时刻要晚于 D10 无喷油调整。

由图 3 可知,在放热率主峰之前,有一个较小

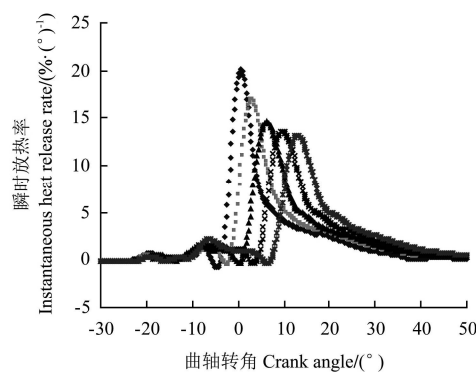
的初始放热峰。放热率曲线会在某一位置处上升,同样在压升率曲线的同一位置处也会出现拐点,据此可推断出各工况的着火点,具体如图 4 所示。各工况的着火时刻均处于第 2 段预喷和主喷之间。由图 4 可见,含 DMC 的混合燃料着火时刻略有延迟。随着 COHR 的增加,各工况的着火时刻均有不同程度的延迟;从着火时刻至 50% 放热中心所占用的曲轴转角越来越大。这也间接说明热效率将下降^[26]。另外,由表 4 可知,燃料的滞燃期随着 COHR 的推迟而变短。



a. D10 有喷油调整
a. D10 with injection adaption



b. 柴油
b. Diesel



c. D10 无喷油调整
c. D10 without injection adaption

图 3 不同燃油的瞬时放热率

Fig.3 Instantaneous heat release rates for different fuels

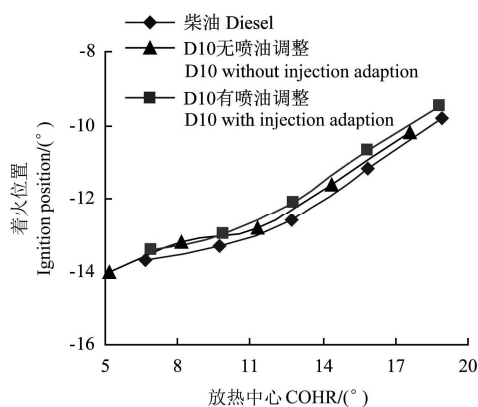


图4 不同放热中心下燃烧过程的着火时刻

Fig.4 Ignition timing of combustion process under different COHR

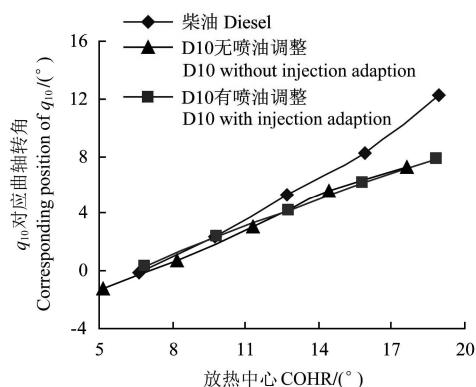
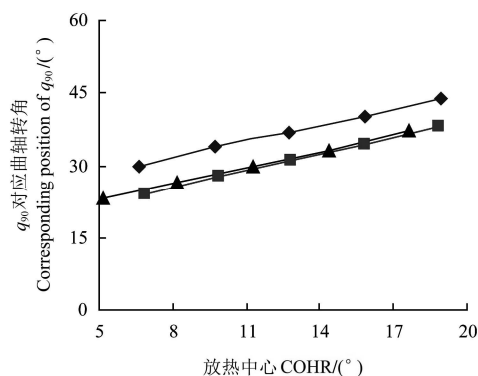
表4 燃烧初期的缸内放热情况

Table 4 Initial situation of cylinder heat release

	名义放热中心 Nominal COHR/(°)	滞燃期 Ignition delay in crank angle/(°)	10%放热率对 应曲轴转角 Crank angle for 10% heat release/(°)	着火到 10%放热率 的曲轴转角 Interval from ignition to 10% heat release in crank angle/(°)
柴油 Diesel	7	37.9	-0.1	13.6
	10	35.7	2.4	15.7
	13	33.6	5.3	17.9
	16	32.0	8.3	19.5
	19	31.3	12.2	21.2
D10 无喷油 调整 D10 without injection adaption	7	37.5	-1.3	12.7
	10	35.5	0.8	14.0
	13	33.3	3.1	15.9
	16	31.5	5.5	17.1
	19	29.9	7.2	17.4

10%放热量 q_{10} 和 90%放热量 q_{90} 对应的曲轴转角随 COHR 的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知, q_{10} 和 q_{90} 放热量对应的曲轴转角随 COHR 的增加呈增大的趋势, 这是因为随着 COHR 的增加, 喷油推迟, 燃烧进程整体后移。由图 5a、着火时刻图及表 4 可知, 随着 COHR 的延后, 从着火开始到释放出 10% 热量所占用的曲轴转角也随之增加。同样释放出 10% 热量的这个阶段, D10 所需时间略短。其次, 随着 COHR 的增加, 10%放热率到 50%放热率之间所经历的曲轴转角基本呈增大的趋势, 这在于喷油推迟后, 缸内压力升高率以及瞬时放热率均相应地减小, 从而造成前期的放热变慢。而图 5b 表现出来的趋势则更明显, 50%放热率到 90%放热率之间所经历的曲轴转角以 D10 无喷油调整为例, 从 COHR=7° 的 15.90° 增加到 COHR=19° 的 17.45°, 可见随着 COHR 的增大呈一定规律性的增大。表明后期放热也随着 COHR 的增加而变慢。从 3 种喷油状态可见, 对于 q_{90} 的出现位置, D10 总体上提前 6°

左右出现, 说明柴油的放热过程更缓慢。柴油的各阶段放热时刻整体也晚于 D10 燃料, 这也体现出 DMC 的雾化性能较好, 起到加速燃烧进程的作用。

a. 不同放热中心下 q_{10} 对应曲轴转角a. Corresponding crank angle of q_{10} under different COHRb. 不同放热中心下 q_{90} 对应曲轴转角b. Corresponding crank angle of q_{90} under different COHR

注: q_{10} 和 q_{90} 分别代表 10%放热量和 90%放热量。

Note: q_{10} and q_{90} respectively represent 10% heat release and 90% heat release.

图5 不同放热中心下 q_{10} 和 q_{90} 对应曲轴转角Fig.5 Corresponding crank angle of q_{10} and q_{90} under different COHR

4 结 论

1) 通过预喷相位可调但 3 段喷油之间的相位间隔恒定、主喷持续时间可调但第 1、2 段预喷持续时间固定的喷油策略, 实现以放热中心为表征的燃烧过程精确调控。当燃料从柴油更换为混合燃料 (10%碳酸二甲酯+90%柴油) 时, 仅微调喷油相位和主喷油量, 即可实现与柴油工况一致的放热中心。

2) 当 3 段喷射的定时相应的以 3°曲轴转角推迟, 可以实现目标放热中心以 3°曲轴转角的步长往后推移。当放热中心位置以等间隔变化时, 相邻工况的燃油喷射时刻、放热中心与放热峰出现时刻的差值均非常接近。

3) 当调整多段燃油喷射策略后, 随着目标放

热中心的推移,柴油机的燃烧过程呈现如下特点:各工况的着火时刻均处于第2段预喷和主喷之间;从喷油时刻至着火时刻所经历的曲轴转角越来越小;着火时刻至放热中心所占用的曲轴转角则越来越大;缸内燃烧压力峰值出现位置与放热中心位置较为接近,且峰值压力出现位置相对放热中心将前移。

4)与柴油的燃烧过程相比,混合燃料(10%碳酸二甲酯+90%柴油)的滞燃期更长,最大压升率也较高。由于易汽化的碳酸二甲酯促进了燃料混合及后续燃烧,从着火时刻到10%放热率及90%放热率对应时刻所占用曲轴转角均变小,说明碳酸二甲酯的加入有助燃烧的迅速进行。

[参 考 文 献]

- [1] Kurtz E M, Kuhel D, Anderson J E, et al. A comparison of combustion and emissions of diesel fuels and oxygenated fuels in a modern DI diesel engine [J]. SAE Technical Paper, 2012, 2012-01-1695.
- [2] Timothy V J. Diesel emission control in review[J]. SAE Technical Paper, 2009, 2009-01-0121.
- [3] Gumus M. A comprehensive experimental investigation of combustion and heat release characteristics of a biodiesel (hazelnut kernel oil methyl ester) fueled direct injection compression ignition engine[J]. Fuel, 2010, 89(10): 2802—2814.
- [4] Robert K, Eiji T, Nobuyuki K, et al. Effects of spray impingement, injection parameters, and EGR on the combustion and emission characteristics of a PCCI diesel engine[J]. Appl Therm Eng, 2012, 37: 165—175.
- [5] Nicolas D, Marc L, Iyad B. Combination of high EGR rates and multiple injection strategies to reduce pollutant emissions[J]. SAE Technical Paper, 2005, 2005-01-3726.
- [6] Hotta Y, Inayosh M, Nakakita K. Achieving lower exhaust emissions and better performance in an HSDI diesel engine with multiple injection[J]. SAE Technical Paper, 2005, 2005-01-0928.
- [7] 董伟, 于秀敏, 于洪洋, 等. 共轨柴油机起动油量和主喷提前角对起动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 64—68.
Dong Wei, Yu Xiumin, Yu Hongyang, et al. Influences of starting fuel quantity and main injection advance angle on starting characteristics of common rail diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(3): 64—68. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王忠, 李仁春, 张登攀, 等. 甲醇/柴油双燃料发动机燃烧过程分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 78—83.
Wang Zhong, Li Renchun, Zhang Dengpan, et al. Combustion process analysis of methanol/diesel dual fuel engine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 78—83. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王浒, 尧命发, 郑尊清, 等. 多次喷射与EGR耦合控制对柴油机性能和排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(1): 26—32.
Wang Hu, Yao Mingfa, Zheng Zunqing, et al. Experimental study of the influence of multi-injection coupled with EGR on diesel performance and emissions[J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(1): 26—32. (in Chinese with English abstract)
- [10] Wang J X, Wu F J, Xiao J H, et al. Oxygenated blend design and its effects on reducing diesel particulate emissions[J]. Fuel, 2009, 88(10): 2037—2045.
- [11] Yao Mingfa, Wang Hu, Zheng Zunqing, et al. Experimental study of n-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions[J]. Fuel, 2010, 89(9): 2191—2201.
- [12] Mancaruso E, Merola S S, Vaglieco B M. Study of the multi-injection combustion process in a transparent direct injection common rail diesel engine by means of optical techniques[J]. Int J Engine Res, 2008, 9(6): 483—498.
- [13] 于超, 王建昕, 王志, 等. 汽/柴油混合燃料对柴油机燃烧与排放特性影响的试验研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(5): 1—6.
Yu chao, Wang Jianxin, Wang Zhi, et al. Experimental research on effect of gasoline/diesel blends on combustion and emissions characteristics of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨福源, 杨雨平, 欧阳明高, 等. 柴油机基于缸压的闭环反馈控制技术[J]. 内燃机学报, 2012, 30(2): 172—178.
Yang Fuyuan, Yang Yuping, OuYang Minggao, et al. Research on close-loop control strategy of diesel engine based on in-cylinder pressure[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(2): 172—178. (in Chinese with English abstract)
- [15] Diezemann M, Puschmann H, Müller S, et al. Diesel RME ethanol fuel for diesel engines[J]. MTZ Worldwide, 2014, 75(4): 4—11.
- [16] Kalghatgi G T, Hildingsson L, Harrison A J, et al. Autoignition quality of gasoline fuels in partially premixed combustion in diesel engines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 3015—3021.
- [17] Heike Puschmann, Matthias Diezemann, Sven Mueller. Influence of innovative diesel-ethanol blend on combustion, emission and fuel-carrying components[J]. SAE Technical Paper, 2013, 2013-01-2696.
- [18] Stölting E, Seebode J, Gratzke R, et al. Emission-based engine management for heavy-duty applications[J]. MTZ Worldwide, 2008, 69(12): 30—35.
- [19] Kitagawa H, Murayama T, Tosaka S, et al. The effect of oxygenated fuel additive on the reduction of diesel exhaust particulates[J]. SAE Technical Paper, 2001, 2001-01-202.
- [20] Lapuerta M, Armas O, Herreros J M. Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine[J]. Fuel, 2008, 87(1): 25—31.
- [21] Zhu L, Cheung C S, Zhang W G, et al. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends[J]. Fuel, 2011, 90 (5): 1743—1750.
- [22] Mohammadi A, Ishiyama T, Kakuta T, et al. Fuel

- injection strategy for clean diesel engine using ethanol blended diesel fuel[J]. SAE Technical Paper, 2005, 2005-01-1725.
- [23] Li Xiaolu, Chen Hongyan, Zhu Zhiyong, et al. Study of combustion and emission characteristics of a diesel engine operated with dimethyl carbonate[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(11/12): 1438—1448.
- [24] Rounce P, Tsolakis A, Leung P, et al. A comparison of diesel and biodiesel emissions using dimethyl carbonate as an oxygenated additive[J]. Energy Fuels, 2010, 24(9): 4812—4819.
- [25] 周龙保, 刘忠长, 高宗英. 内燃机学: 3 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 10.
- [26] 梅德清, 任华, 王忠, 等. 基于喷油策略和 EGR 耦合控制的单缸共轨柴油机燃用 DMC/柴油调和燃料的研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(5): 7—12.
- Mei Deqing, Ren Hua, Wang Zhong, et al. Study on the single-cylinder common-rail diesel engine fueled with DMC/diesel blend based on coupling strategies of fuel injection and EGR[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(5): 7—12. (in Chinese with English abstract)

Effects of multiple injections strategy on combustion process of mixed fuels with dimethyl carbonate and diesel

Mei Deqing¹, Ren Hua¹, Jiang Shiyang¹, Wang Zhong¹, Roland Baar²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Department of Mechanical Engineering and Transport Systems, Technical University of Berlin, Berlin 10587, Germany)

Abstract: In order to achieve the target of emission purification within the aspect of combustion optimizing in a cylinder, as well as the partial replacement of fossil fuels, a study on the combustion process of dimethyl carbonate (DMC)-diesel fuel blend was carried off. A fuel blend D10 (10% DMC and 90% diesel by volume) was chosen as the test fuel. The experiments were conducted on a single-cylinder research engine originated from a Daimler Benz OM646 2.2 litre common rail direct injection four-cylinder in-line diesel engine. As for the research engine, the indicated mean effective pressure p_{mi} was adopted as the baseline for assessment of engine performance. A given load at 1900 r/min was chosen as the engine operating mode. According to the first law of thermodynamics, the heat release rate can be presented in real-time by the IndiCom software. The exact position in the crank angle of the center of heat release (COHR, 50% of the total heat release) can be figured out by interpolation. It was a key parameter to describe the combustion process of the engine. Through a fuel injection strategy characterized by an adjustable first pre-injection phase but constant phase intervals between the three injections and adjustable main injection duration but fixed durations of first pre-injection and second pre-injection, the accurate COHR target at a steady working mode can be implemented. Therefore five modes with an even interval of COHR, under the same engine speed and p_{mi} , were inspected. As for D10 fuel, to compensate for its energy density falling, the rail pressure of D10 was 3 MPa higher than that of a diesel. While using D10 fuel, two schemes were considered. One was to keep the injection parameters of fuel system unchanged. The other was to slightly adjust the injection parameters, thus the COHR can be precisely accorded with the original diesel engine. When multiple injection strategy was adjusted to achieve the exact COHR which was delayed in constant step, the features of the combustion process of a diesel engine were analyzed. The ignition for each operating mode occurred between the second pilot injection and the main injection. For every two adjacent modes varying with COHR, the crank angle intervals of the fuel injection timings as well as center of heat release and the location of heat release peak were almost identical. With the increase of COHR, the duration in crank angle taken from injection timing to ignition became shorter, while the duration in the crank angle taken from ignition to the center of the heat release became longer. As compared with the location of a peak pressure in-cylinder, the COHR would be moved backward far away. As for D10 fuel, because the easy vaporization of dimethyl carbonate promoting the mixing of fuel and air and combustion, both crank angle intervals, from the ignition to 10% of heat release and from ignition to 90% of heat release, were shorter, which indicated that the added dimethyl carbonate could help to promote the combustion process. These analyses of combustion features based on COHR will provide a fundamental guidance for the application of dimethyl carbonate/diesel blends, multiple injections regulating the combustion process, and emission control theory.

Key words: diesel engines; fuels; combustion; dimethyl carbonate; multiple injections

(责任编辑: 张俊芳)