

文章编号:1671-8879(2015)03-0143-08

放热中心对 DMC-柴油燃料排放特性的影响

梅德清¹,姜士阳¹,吴 焱¹,任 华¹,Roland Baar²

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

摘 要:为提高柴油机的燃烧热效率及有效降低有害排放物,在 1 台高压共轨单缸柴油机上,运用 2 段预喷和 1 段主喷组合的多段燃油喷射,并耦合高 EGR 率以实现低温预混合燃烧。在不同放热中心及 EGR 率的条件下,对比研究柴油及 D10 燃料(在柴油中掺入 10% 碳酸二甲酯)的排放性能。研究表明:随着放热中心(crank angle 50, CA50)后移,NO_x 排放显著降低,HC 及 CO 排放的变化则相对平缓,PM 排放呈先增加后降低的趋势;通过调整燃油喷射系统参数调控 CA50(燃油路径)及采用 EGR 率(气体路径)均可实现对 NO_x 的控制,但对其他排放物的作用效果却各不相同;高 EGR 氛围耦合较晚的 CA50,即燃油路径与气体路径二者良好的匹配使用,可实现 NO_x 和 PM 这 2 个目标变量的兼顾控制;与柴油相比,使用含氧燃料 D10 后,HC 和 CO 均略有下降,NO_x 排放略有上升,但在 PM 排放方面可以获得大幅度的降低,可为 NO_x 与 PM 排放之间的再平衡提供更大的空间。

关键词:机械工程;碳酸二甲酯;多段喷射;EGR 率;放热中心;排放

中图分类号:TK464 **文献标志码:**A

Impacts of different CA50 on emissions of diesel engine using DMC-diesel blend

MEI De-qing¹, JIANG Shi-yang¹, WU Han¹, REN Hua¹, Roland Baar²

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

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

Abstract: In order to improve the thermal efficiency of combustion of diesel engine and reduce harmful emissions effectively, the multiple injections consisted of two pilot injections and one main injection and high EGR rate were coupled to realize the low-temperature premixed combustion on a single-cylinder common-rail diesel engine. Under different CA50 and EGR rates, the emissions features of diesel and D10 fuel (10% DMC and 90% diesel by volume) were studied. The results show that with the retarding of CA50, the NO_x emissions are significantly reduced and HC and CO emissions vary relatively smooth, while PM emissions fastly increase and then decrease. The NO_x emissions can be regulated by the fuel injection parameters (fuel path) and EGR rate (air path), but different effects of each method are put on other emission matters. Later CA50 is coupled with high EGR, which means that the fuel path combined with the air

收稿日期:2014-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51076069);江苏高校优势学科建设工程项目(苏政办发[2011]6号)

作者简介:梅德清(1974-),男,江苏仪征人,副教授,硕士研究生导师,E-mail:meideqing@ujs.edu.cn。

path, can fulfill a favorable compromised control for both NO_x and PM emissions. Compared with diesel, HC and CO emissions both decrease slightly after using D10 fuel, and NO_x emissions increase appreciably, while the sharp reduction in PM emissions can be gained, which provides large space for the balance between NO_x and PM emissions. 3 tabs, 5 figs, 17 refs.

Key words: mechanical engineering; dimethyl carbonate; multiple injections; EGR rate; center of heat release; emission

0 引 言

柴油机的传统燃烧方式决定了 NO_x 与碳烟排放之间存在着 trade-off 关系^[1],这已成为柴油机满足更高排放标准的阻碍。随着柴油机低温燃烧技术的发展,不采用或者只使用简单功能的后处理器能够满足更严格的法规,正在成为现实^[2-3]。而通过高 EGR 率和多段预喷来提高预混合比例,实现低温预混合 (premixed charge compression ignition, PCCI)燃烧,避开 NO_x 和碳烟的高排放区,从根源上控制有害排放物的水平,已成为达到或接近高排放标准(如欧 V)的一种选择^[4-5]。

另外,使用具有较优排放性能的代用燃料亦有助于排放的降低。含氧代用燃料可有效降低 HC 和 CO 排放,尤其对减少颗粒物有明显的效果。其中,碳酸二甲酯(dimethyl carbonate, DMC)作为一种非极性酯,相比其他代用燃料具有优越的性能,与柴油的互溶性好,其低沸点有助于加速燃料的雾化及与空气的混合,且含氧量超过 50%^[6-7]。国际上,DMC 主要通过尿素法和酯交换法来生产。在中国,作为煤制乙二醇工艺的副产品,DMC 产量和价格已满足进军能源市场的需求。

目前,国内外学者研究结果表明:在柴油中掺烧部分 DMC,热效率得到提高,除 NO_x 略有升高外,CO、HC 及 PM 均有不同程度降低^[8]。但在多段喷射调控下强调燃烧放热特性与排放之间关联的研究尚不多见。为此,本文通过在 1 台高压共轨单缸柴油机上,采用 2 段预喷和 1 段主喷组合的多段燃油喷射,进行了不同燃料组分(DMC-柴油,柴油)的排放特性研究,并在燃烧过程参数放热中心变化的条件下探究柴油机掺烧 DMC 的排放特性。

1 试验材料与方法

试验样机是 1 台高压共轨单缸柴油机,其原型是 4 缸柴油机 Daimler OM646。发动机的基本参数如表 1 所示。以指示功率 P_i 为基准来评判该试验样机的性能,该机的研发目标是满足欧 V 和欧 VI 排

放标准。在单缸试验机上得到的相关研究成果与结论,可沿用推广至同系列的多缸机上^[9]。试验中使用的主要测试设备为 Siemens 1GG6-164 电力测功机、AVL 735 燃油油耗仪、HORIBA 7170DEGR 排气分析仪,AVL SPC-472 部分流颗粒采样系统及 AVL 439 不透光烟度计。

表 1 发动机的基本参数
Tab. 1 Basic parameters of engine

缸径/mm	88
行程/mm	88.34
排量/L	0.537
压缩比	15.88
标定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	4 000
平均指示压力/MPa	2.05
喷射管理系统	IAV
喷油器	Bosch CRI-2.2

在高 EGR 率氛围下,通过调整柴油机喷油规律(喷油定时、喷油量和喷油速率)使燃烧过程往后推延,实现低温 PCCI 燃烧模式。相应地,表征燃烧放热过程发生“早”或“晚”相位的放热中心 (crank angle 50, CA50)也在变化。放热中心 CA50 为累积放热率达到 50%时所处的曲轴转角^[10-11]。CA50 不仅影响着燃烧的热效率,更是与缸内有害排放物 CO、HC、 NO_x 和 PM 的生成密切相关^[12]。

以柴油为参照,对发动机燃用含 10%DMC 的柴油混合燃料(称为 D10)的性能进行对比研究。柴油与 DMC 燃料的理化特性参见文献[11]。由于 D10 燃料的能量密度比柴油略低,为使在相同喷油脉宽条件下每循环喷入气缸燃料的热值接近,适当提高 D10 的油轨压力(比柴油高 3 MPa)。除了油轨压力的差异外,对于 D10 燃料,首先考虑了与柴油一致的喷油参数方案(D10 无喷油调整);其次对原有的喷油系统参数略作微调(D10 有喷油调整),以实现与柴油工况一致的 CA50。

选取在 NEDC(new european driving cycle)测试循环中出现频率较高的转速 $n=1\,900\text{ r/min}$ 下, $p_{mi}=0.80\text{ MPa}$ 和 $p_{mi}=0.44\text{ MPa}$ 这 2 个负荷作为

试验工况^[13],具体参数如表 2 所示。将平均指示压力 p_{mi} 和放热中心 CA50 两者都作为发动机工况的监控目标参数。根据实测气缸压力可以计算得到瞬时累积放热率 50% 对应的曲轴转角(即 CA50)。对于特定的发动机工作模式,通过调整喷油参数可使 CA50 控制在目标值 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 范围内。基于 CA50 为表征的燃烧特性分析参见文献[11],该文作为后续研究,在分别改变 CA50 及 EGR 率的条件下,研究柴油-DMC 混合燃料的排放性能。对于 $p_{mi}=0.80\text{ MPa}$ 工况,考虑 CA50 变动则 EGR 率固定在 36%,考虑 EGR 率变动则 CA50 固定在 $16\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 。对于 $p_{mi}=0.44\text{ MPa}$ 工况,考虑 CA50 变动则 EGR 率固定在 44%。文中排放数据均为原始排放,未加装任何后处理装置。排放性能评价以比排放的形式给出。

表 2 发动机工况和试验方案($n=1\ 900\text{ r/min}$)

Tab. 2 Operating mode and test procedure

工况	p_{mi}/MPa	p_{jq}/MPa	p_{yg}/MPa	CA50/ $^{\circ}\text{CA}$	EGR/%
1	0.80	0.137	102	7,10,13,16,19	31,36,41
2	0.44	0.117	71	7,10,13,16,19	34,39,44

注: p_{jq} 为进气负荷; p_{yg} 为油轨负荷。

2 燃油喷射参数

在高 EGR 率耦合推迟喷油相位实现低温 PCCI 燃烧模式的指导思想下,燃油供给采用 2 段预喷和 1 段主喷组合的多段喷射策略,实现对以参数 CA50 为表征的不同低温燃烧工况的调控。控制 2 段预喷的喷油相位及喷油量,在主燃烧阶段之前 2 段预喷释放出适量的热量,促进更多的燃油雾化,增加低温环境下的预混合燃烧比例,同时改善主燃期的热量利用及时性和热效率。本文的燃油喷射控制参数为第 1 段预喷、第 2 段预喷和主喷 3 段喷射的开始曲轴转角 θ_{inj1} 、 θ_{inj2} 和 θ_{inj3} (文中的曲轴转角位置均以上止点为参照)及对应的喷油脉宽 t_{inj1} 、 t_{inj2} 和 t_{inj3} 。为实现不同的目标工况参数调整,燃油喷射系统的管理策略见文献[11]。 $p_{mi}=0.44\text{ MPa}$ 工况的详细喷油参数见下页表 3。由表 3 可知,对于某一燃油喷射方案, θ_{inj1} 、 θ_{inj2} 和 θ_{inj3} 的相位间隔分别为 $13.7\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 和 $12.5\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 。当喷油方案改变时,此间距保持恒定。此外,第 1 段预喷和第 2 段预喷的喷油脉宽保持恒定。 $p_{mi}=0.80\text{ MPa}$ 工况的喷油参数也呈现出一致的规律^[11]。

图 1 展示了某一工况下 3 种燃油喷射状态的电

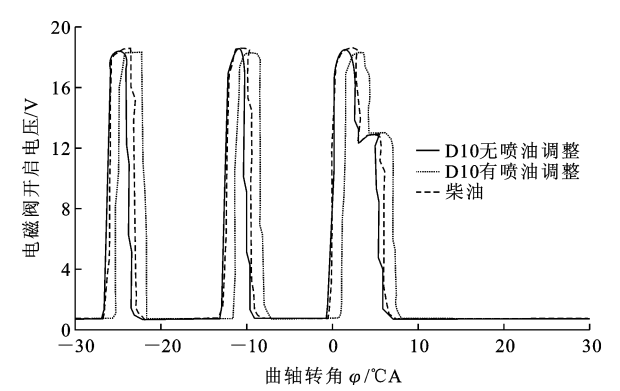


图 1 燃油喷射脉宽 ($p_{mi}=0.44\text{ MPa}$, CA50= $16\text{ }^{\circ}\text{CA}$)

Fig. 1 Pulse width of fuel injection

磁阀开启正时和喷油脉宽。由图 1、下页表 3 可知,依据喷油参数的内在联系,通过调整喷油定时和喷油持续时间,使各实际 CA50 与名义 CA50 之间的差别很小,实现精确的 CA50 控制。此外,尽管采用与柴油一致的喷油时刻及喷油脉宽,但 D10 无喷油调整的 p_{mi} 略大,且 CA50 提前出现。因而,通过适当的推迟喷油和减少主喷持续时间,即表 3 中的 D10 有喷油调整方案,可实现与柴油工况一致的目标 p_{mi} 和 CA50。

3 燃油经济性

考虑到节能与减排之间的矛盾性,在分析排放性能之前比较了 $n=1\ 900\text{ r/min}$ 、 $p_{mi}=0.80\text{ MPa}$ 工况下 3 种燃油喷射状态在不同 CA50 下的指示热效率,如图 2 所示。由图 2 可知,D10 燃料的指示热效率整体高于柴油,主要是因为 DMC 的易挥发特性促进了混合燃料的蒸发及燃烧。随着喷油逐渐推迟,燃烧相位不断后移,使得燃料释放出来的热量利用率下降,指示热效率逐渐降低。但即使 CA50 处于 $19\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 时,D10 燃料的指示热效率也能维持在 43% 附近。

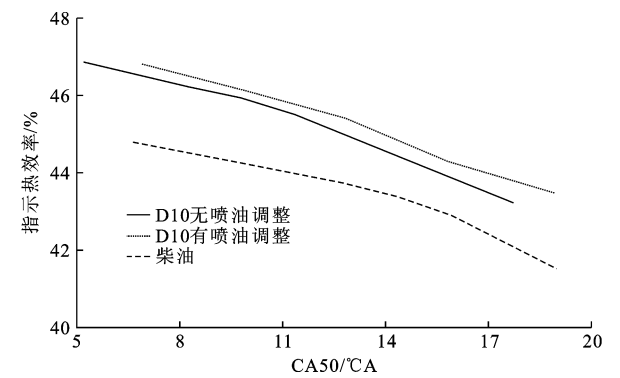


图 2 不同 CA50 下的指示热效率

Fig. 2 Indicated thermal efficiency of different CA50

表 3 燃油喷射控制策略($p_{mi}=0.44\text{ MPa}$,EGR 率 44%)
Tab.3 Control strategy of fuel injection ($p_{mi}=0.44\text{ MPa}$,EGR rate 44%)

工况	CA50(名义)/ ℃A	p_{mi} /MPa	CA50(实际)/ ℃A	θ_{mi1} / ℃A	θ_{mi2} / ℃A	θ_{mi3} / ℃A	$t_{inj1}/\mu\text{s}$	$t_{inj2}/\mu\text{s}$	$t_{inj3}/\mu\text{s}$
柴油	7	0.436	7.0	-35.2	-21.5	-9.0	253	253	505
	10	0.438	9.9	-32.5	-18.8	-6.3	253	253	508
	13	0.436	13.0	-29.5	-15.8	-3.2	253	253	512
	16	0.435	15.9	-26.6	-12.9	-0.4	253	253	515
	19	0.434	18.9	-24.3	-10.6	1.9	253	253	520
D10 无喷油调整	7	0.442	6.9	-35.2	-21.5	-9.0	253	253	505
	10	0.441	8.8	-32.5	-18.8	-6.3	253	253	508
	13	0.445	11.9	-29.4	-15.7	-3.2	253	253	512
	16	0.444	14.6	-26.6	-12.9	-0.4	253	253	515
	19	0.446	17.1	-24.3	-10.6	1.8	253	253	520
D10 有喷油调整	7	0.433	7.0	-34.3	-20.6	-8.0	253	253	504
	10	0.438	10.0	-31.3	-17.6	-5.1	253	253	507
	13	0.437	12.9	-28.4	-14.6	-2.1	253	253	511
	16	0.436	16.0	-25.1	-11.4	1.0	253	253	513
	19	0.435	19.0	-22.7	-9.0	3.4	253	253	518

4 排放性能分析

4.1 高负荷工况

下页图 3 为 $p_{mi}=0.80\text{ MPa}$ 工况下各排放物随 CA50 的变化趋势。由图 3(a)可知,随着 CA50 的后移, NO_x 排放显著降低。这是由于采用了多段喷射策略,2 段预喷分散了燃料放热,使最高燃烧温度降低;且随着喷油的推迟,在上止点附近气缸体积较小处,燃烧的推后使热量未能及时释放,缸内处于高温状态的时段显著减少,而更多地呈现低温燃烧的模式,所以 NO_x 排放不断降低。另外,纯柴油的 NO_x 排放整体水平要低于 D10 燃料,主要是因为 DMC 的含氧特性使 NO_x 的生成量增加。就传统柴油机而言,CA50 处于 $10\text{ }^\circ\text{CA}$ 附近^[10,14],通过推迟喷油并结合高 EGR 率实现 PCCI 燃烧模式,使燃烧放热中心不断后移。有文献提出当 CA50 处于 $16\text{ }^\circ\text{CA}$ 附近时,可将 NO_x 和 PM 排放控制在较理想的水平,且有利于实现欧 V 排放标准^[9]。因而设定 CA50 在 $10\text{ }^\circ\text{CA}$ 、 $13\text{ }^\circ\text{CA}$ 及 $16\text{ }^\circ\text{CA}$ 下,考察 CA50 在这 3 处的 NO_x 排放变化情况。如图3(a)所示,当 CA50 从 $10\text{ }^\circ\text{CA}$ 增加至 $13\text{ }^\circ\text{CA}$ 时,3 种燃油喷射状态的 NO_x 排放几乎一致地下降了约 19%;而当 CA50 从 $13\text{ }^\circ\text{CA}$ 增加到 $16\text{ }^\circ\text{CA}$ 时, NO_x 排放则平均降低了约 18%。

HC 排放随 CA50 的变化特性见图 3(b)。分析燃烧过程得知^[11],随着喷油逐渐推迟,滞燃期将缩短。HC 排放应随着火延迟期缩短而减少;但另一

方面,主燃烧相位的推迟导致缸内温度的下降,不利于 HC 的氧化,因而 HC 排放随 CA50 变化幅度较小。柴油与 D10 有喷油调整的曲线趋势基本一致。另外,与纯柴油相比,D10 燃料的 HC 排放略低,主要是由于 D10 燃料与柴油的含氧率差异造成的。

图 3(c)展示了 CO 排放随 CA50 的变化趋势。CO 是化学反应动力学产物,燃烧温度对其最终生成量的影响很大。当缸内温度能够使混合气发生低温和蓝焰反应,但没有热焰反应发生时,会抑制 CO 的进一步氧化^[15]。因而,随 CA50 后移,主燃烧相位过度推迟导致缸内温度降低,CO 排放随之缓慢升高。

由图 3(d)可看出,PM 排放随 CA50 后移呈现先增后减的趋势。随着喷油推迟,缸内燃烧温度逐渐下降,而先期产生的 PM 需要较高的温度才得以在缸内继续氧化,因而 PM 排放逐渐增多。随着 CA50 的更晚出现,高 EGR 氛围及较晚的 2 段预喷形成的缸内低温环境使预混合燃烧比例增加,PM 排放得以降低。在本文的试验样机上,当使用乙醇-生物柴油-柴油混合燃料时,PM 排放随 CA50 的变化特性也出现与本文一致的规律^[9]。D10 燃料的 PM 排放水平整体较柴油低。当 CA50 处于 $16\text{ }^\circ\text{CA}$ 时,D10 有喷油调整的 PM 排放甚至比柴油少了 55%,而 NO_x 排放则只增加了 13%。这也说明 D10 燃料对 NO_x 和 PM 这 2 种排放物之间的再平衡具有更大的优势。D10 燃料的 PM 排放下降幅度较大的原因在于低沸点 DMC 易汽化的特性促进了柴油

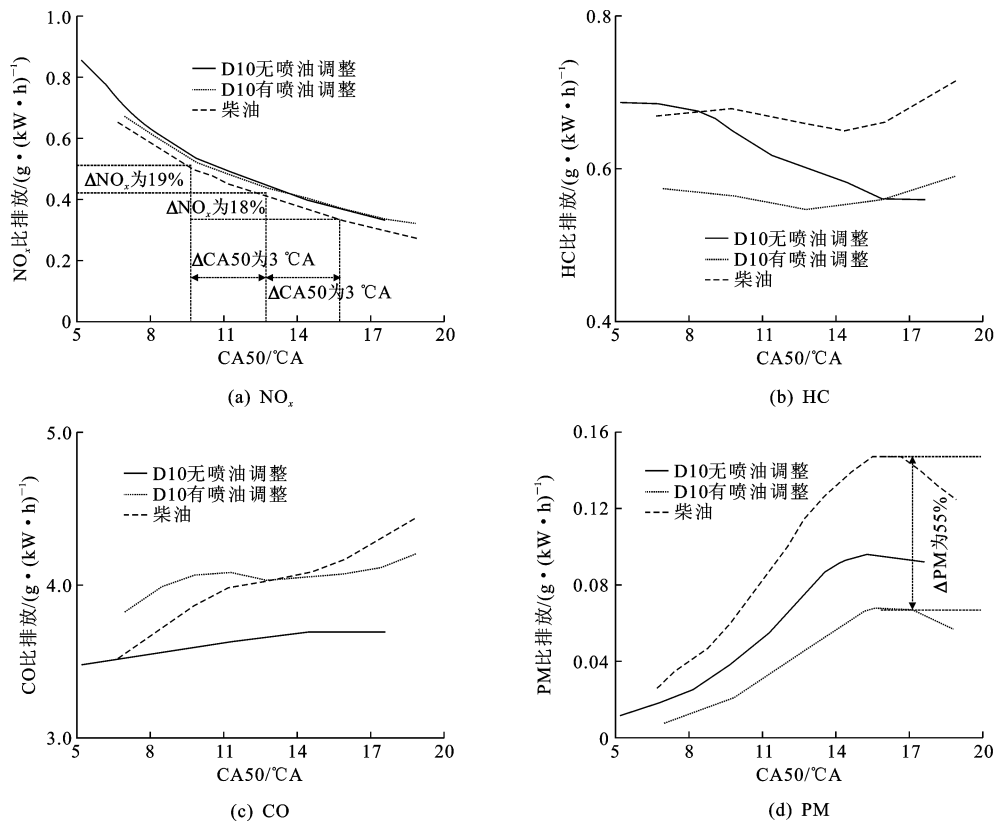


图 3 不同 CA50 下的排放特性 ($p_{mi}=0.80$ MPa, EGR 率 36%)

Fig. 3 Emissions features under different CA50 ($p_{mi}=0.80$ MPa, EGR rate 36%)

雾化;DMC 的含氧量提高了混合燃料的过量空气系数,并可减少 PM 前驱体的形成。

下页图 4 给出各主要排放物随 EGR 率的变化趋势。本文为实现 PCCI 燃烧,采用了较高的 EGR 率。较高的 EGR 率可以控制燃烧过程的着火相位,使预混合时间延长,既可以实现降低 NO_x 排放的目标,又可以在低氧浓度条件下减少浓混合气区域,达到降低 PM 排放的目标^[5]。如图 4(a)所示,随着 EGR 率的增加, NO_x 比排放呈显著降低趋势。当 EGR 率由 31%增加了 5%时, NO_x 比排放降低了 36%。EGR 率过大将导致燃烧恶化,因此必须考虑与之相匹配的喷油策略。由图 4(b)可见,随着 EGR 率的增加,HC 排放呈缓慢增加趋势。而在图 4(c)中,随 EGR 率增加,CO 排放则呈较大幅度的增长。HC 与 CO 排放产生机理不同,因而其随 EGR 率的增长幅度亦不同。其中,HC 的生成受着火延迟期内形成的着火稀限区域的影响较大,而 CO 则更多地与温度有关。如图 4(d)所示,PM 排放随 EGR 率的增加而上升,原因在于 EGR 率的增加导致单位体积内的氧含量减少,且废气中较多的 CO_2 与 H_2O 的比热容很高,致使缸内温度增加放缓,不利于 PM 的再氧化。由于 DMC 的含氧优势,

致使 D10 燃料的 PM 排放低于柴油。

如果将柴油机的 NO_x 和 PM 排放作为 2 个目标变量,有学者提出燃油路径(fuel path)和气体路径(air path)的控制方案^[16-17]。燃油路径指采用较高的喷射压力、调整喷油规律等实现对燃烧过程的调控,而气体路径指通过增压、中冷、EGR 等方式调节燃烧热效率与排放性能。作为控制 NO_x 排放的措施,采用气体路径的图 4(d)表现出 PM 排放随 EGR 率的增加急剧上升,而采用燃油路径的图 3(d)则表明 PM 排放随 CA50 后移而先上升后下降。这说明燃油路径和气体路径良好地匹配使用,可实现同时兼顾 NO_x 和 PM 这 2 个目标变量的控制。

4.2 低负荷工况

在 $p_{mi}=0.44$ MPa 工况下,各排放物随 CA50 的变化关系如图下页 5 所示。由图 5(a)可见,随着 CA50 的后移, NO_x 排放呈降低趋势。与大负荷工况相比,负荷更小且 EGR 率更高,因而缸内温度更低, NO_x 排放也将降低。

由图 5(b)可见,在小负荷工况,HC 排放随 CA50 后移而逐渐上升。这和大负荷工况下的趋势(见图 3(b))略有不同。由于小负荷工况缸内温度更低,且采用了更高的 EGR 率,使得着火延迟的效

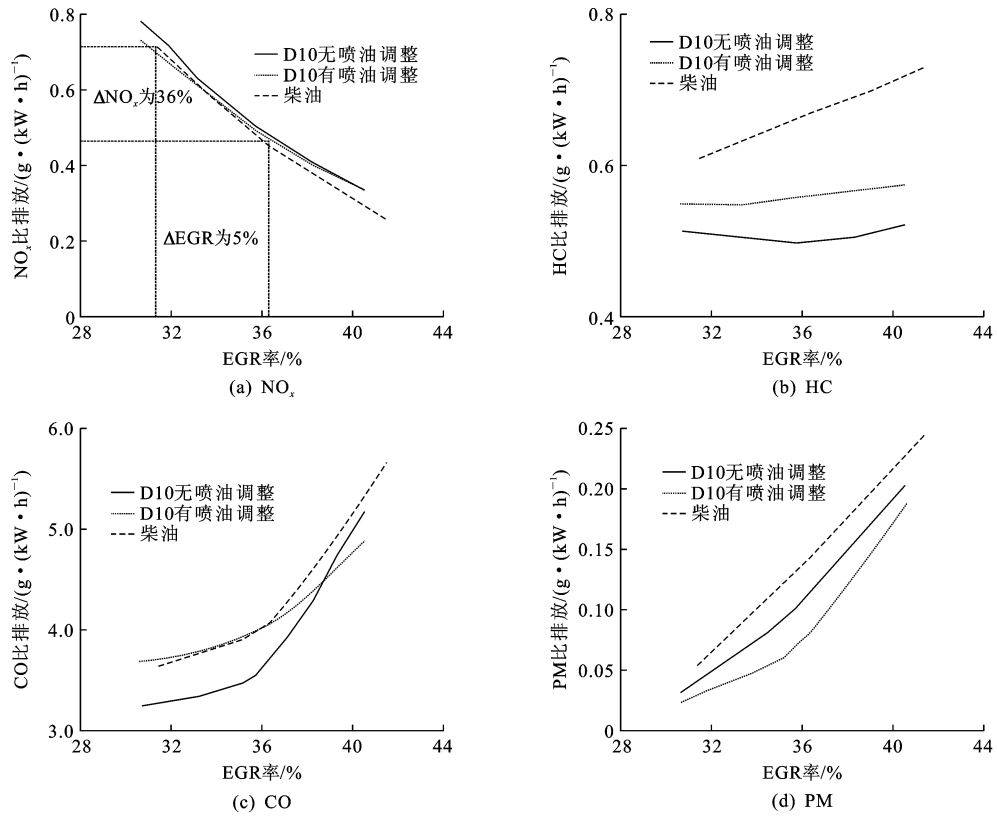


图 4 各排放物随 EGR 率的变化关系($p_{mi}=0.80 \text{ MPa}$, CA_{50} 为 16°CA)

Fig. 4 Emissions features under different EGR rates ($p_{mi}=0.80 \text{ MPa}$, $\text{CA}_{50}=16^\circ \text{CA}$)

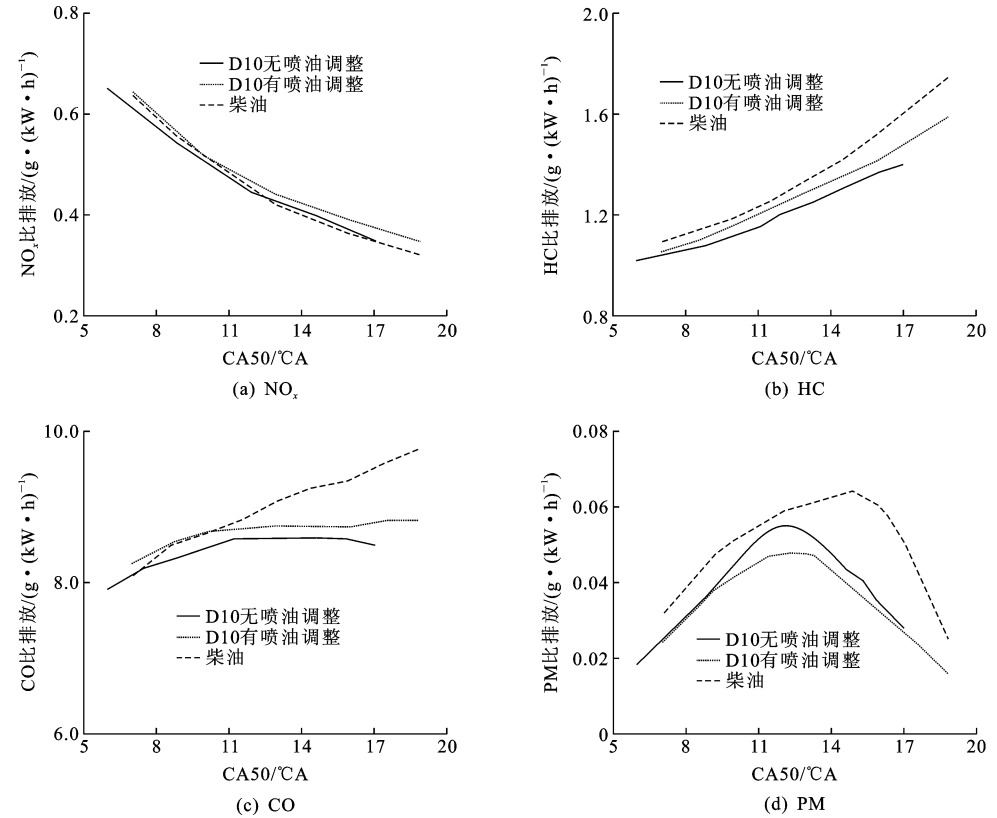


图 5 不同 CA_{50} 下的排放特性($p_{mi}=0.44 \text{ MPa}$, EGR 率 44%)

Fig. 5 Emissions features under different CA_{50} ($p_{mi}=0.44 \text{ MPa}$, EGR rate 44%)

应更明显,因而形成了更多的着火稀限区域,致使HC排放增加。

如图5(c)所示,和大负荷下的CO排放(见图3)趋势一致,CO排放随CA50后移呈增长趋势,但小负荷下的比排放数值更高。图5(b)、图5(c)中,D10和柴油在HC和CO排放上的差异主要是由DMC的含氧率造成的。

在图5(d)中,随着CA50后移,PM排放呈现出与图3(d)相似的先升后降的特点。相比 $p_{mi}=0.80$ MPa工况,考虑到循环供油量的减少,致使PM排放维持在较低水平。由大小2个负荷工况PM排放随CA50的变化特性可知,当CA50晚于 16°CA 时,更利于对 NO_x 和PM排放的兼顾控制。

5 结 语

(1)在高EGR率条件下,通过多段燃油喷射策略使燃烧放热中心CA50较晚出现,实现低温预混燃烧模式。随着CA50出现位置后移, NO_x 排放显著降低,HC及CO排放的变化则相对平缓,PM排放则呈现出先增加后降低的趋势。对于 $p_{mi}=0.80$ MPa工况,当CA50从 10°CA 逐步推迟到 13°CA 、 16°CA 时, NO_x 比排放逐阶下降19%和18%。较晚的CA50有利于兼顾控制 NO_x 与PM排放。

(2)通过燃油喷射系统参数调控放热中心CA50(燃油路径)及采用EGR(气体路径)均可实现对 NO_x 的控制,但对其他排放物的作用效果却各不相同。燃油路径(fuel path)和气体路径(air path)二者良好的匹配使用,可实现 NO_x 和PM这2个目标变量的兼顾控制。

(3)与柴油相比,使用含氧燃料D10后,不同CA50下的HC和CO均略有下降, NO_x 排放略有上升,但在PM排放方面可以获得大幅度的降低。说明D10燃料对 NO_x 和PM这2种排放物之间的再平衡具有更大的优势。

(4)在低温预混燃烧模式下,添加部分比例的DMC至柴油中可有效改善柴油机的排放性能,但对于DMC未来在柴油机中的应用还需做进一步的探讨。

参考文献:

References:

[1] 方成,杨福源,欧阳明高,等.融合低温预混合燃烧和ISG的混合发动机技术[J].内燃机学报,2013,31

(3):208-214.

FANG Cheng, YANG Fu-yuan, OUYANG Ming-gao, et al. A hybrid engine technology combined PCCI and ISG motor[J]. Transactions of Csice, 2013, 31(3): 208-214. (in Chinese)

[2] Kanda T, Hakozaiki T, Uchimoto T, et al. PCCI operation with fuel injection timing set close to TDC[J]. SAE Paper 2006-01-0920.

[3] Raouf M, Peng Z J, Seyed M M. Analysis the effect of advanced injection strategies on engine performance and pollutant emissions in a heavy duty DI-diesel engine by CFD modeling[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 33(1): 59-69.

[4] Yao Z, Wei H, Perugu H, et al. Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 81-96.

[5] Yoshihiro H, Minaji I, Kiyomi N. Achieving lower exhaust emissions and better performance in an HSDI diesel engine with multiple injection[J]. SAE Paper 2005-01-0928.

[6] Alessia A, Alessandro M, Giovanni D N. Emissions from ethers and organic carbonate fuel additives: A Review[J]. Water Air Soil Pollution, 2011, 221(1/4): 405-423.

[7] 李仁春,王忠,袁银男,等.柴油/甲醇不同掺烧方式燃烧过程和排放对比分析[J].兵工学报,2014,35(3):403-408.

LI Ren-chun, WANG Zhong, YUAN Yin-nan, et al. Comparative analysis of combustion and emissions of dI engine operating on diesel/methanol by different methods[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(3): 403-408. (in Chinese)

[8] 姚波,潘克煜,石科峰,等.柴油与碳酸二甲酯混合燃料的燃烧与排放特性研究[J].内燃机学报,2003,21(2):101-105.

YAO Bo, PAN Ke-yu, SHI Ke-feng, et al. Investigation on combustion and emissions characteristics of diesel fuel and dimethyl carbonate blend fuel[J]. Transactions of Csice, 2003, 21(2): 101-105. (in Chinese)

[9] Puschmann H, Diezemann M, Mueller S. Influence of innovative diesel-ethanol blend on combustion, emission and fuel-carrying components[J]. SAE Paper 2013-01-2696.

[10] 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 Jing-ping,XIA Xiao-lang,ZHAO Zhi-chao,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)
- [11] 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 De-qing,REN Hua,JIANG Shi-yang,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)
- [12] Leermakers C A J,Berge B V D,Luijten C C M,et al. Gasoline-diesel dual fuel:effect of injection timing and fuel balance[J]. SAE Paper 2011-01-2437.
- [13] Puschmann H,Brauer M,Brinkmann P,et al. Emission and ignition effects of alternative fuels at conventional and premixed diesel combustion[J]. SAE Paper 2010-01-0870.
- [14] 尧命发,庞 阔,谷静波,等. 正丁醇/生物柴油高预混压燃燃烧及排放特性的试验[J]. 内燃机学报,2013,31(3):193-199.
- YAO Ming-fa,PANG Kuo,GU Jing-bo,et al. Experiment on combustion and emission characteristics of n-butanol/biodiesel dual fuel HPCC[J]. Transactions of Csice,2013,31(3):193-199. (in Chinese)
- [15] 郑朝蕾,尧命发. 正庚烷均质压燃燃烧反应化学动力学数值模拟研究[J]. 内燃机学报,2004,22(3):227-234.
- ZHENG Zhao-lei,YAO Ming-fa. Numerical study on the chemical reaction kinetics of n-Heptane for HCCI combustion process[J]. Transactions of Csice,2004,22(3):227-234. (in Chinese)
- [16] Hillion M,Buhlback H,Chauvin J,et al. Combustion control of diesel engines using injection timing[J]. SAE Paper 2009-09-0507.
- [17] Stölting E,Seebode J,Gratzke R,et al. Emission-based engine management for heavy-duty applications[J]. MTZ Worldwide,2008,69(12):30-35.
- (上接第 121 页)
- YUAN Chang-wei,YU Xin-xin,LU Hua-pu,et al. Road network equilibrium traffic assignment method based on Stackelberg game [J]. China Journal of Highway and Transport,2009,22(5):89-93. (in Chinese)
- [14] Zhou J,Lam W H K,Heydecker B G. The generalized Nash equilibrium model for oligopolistic transit market with elastic demand[J]. Transportation Research Part B:Methodological,2005,39(6):519-544.
- [15] 卢晓珊,黄海军,刘天亮,等. 考虑早晚高峰出行链的出行方式选择均衡与定价机制[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(1):167-174.
- LU Xiao-shan,HUANG Hai-jun,LIU Tian-liang,et al. Mode choice equilibrium and pricing mechanisms considering peak trip chain[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2013,33(1):167-174. (in Chinese)
- [16] 彭 辉,续宗芳,韩永启,等. 城市群城际运输结构配置客流分担率模型[J]. 长安大学学报:自然科学版,2012,32(2):91-95.
- PENG Hui,XU Zong-fang,HAN Yong-qi,et al. Sharing ratios model of passenger flows in intercity transportation structure configuration among urban agglomeration[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2012,32(2):91-95. (in Chinese)
- [17] 何宇强,毛保华,陈团生,等. 高速客运专线客流分担率模型及其应用研究[J]. 铁道学报,2006,28(3):18-21.
- HE Yu-qiang,MAO Bao-hua,CHEN Tuan-sheng,et al. The mode share model of the high-speed passenger railway line and its application[J]. Journal of the China Railway Society,2006,28(3):18-21. (in Chinese)
- [18] Song H,Liu C C,Lawarrée J. Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(1):73-79.
- [19] Adler N,Pels E,Nash C. High-speed rail and air transport competition:game engineering as tool for cost-benefit analysis [J]. Transportation Research Part B:Methodological,2010,44(7):812-833.
- [20] 傅白白,刘法胜. 管理中的 Nash 平衡与 Braess 悖论现象[J]. 运筹与管理,2004,13(1):150-155.
- FU Bai-bai,LIU Fa-sheng. Nash equilibrium and Braess' paradox phenomena in management[J]. Operations Research and Management Science,2004,13(1):150-155. (in Chinese)