

后喷时刻和 EGR 率对柴油低温燃烧和排放的影响

赵 伟,张全长,张春化

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了研究不同 EGR(废气再循环)率下后喷时刻对柴油机性能的影响,在一台改造的单缸柴油机上,总循环喷油量固定为每循环 50 mg,后喷油量为每循环 8 mg,通过改变 EGR 率大小和后喷时刻的方法开展了试验研究。研究表明:加了后喷之后,缸内峰值压力降低,燃烧相位后移,EGR 率较低时放热率峰值略有增高,而 EGR 率较高时放热率峰值逐渐降低;与无后喷相比,后喷时刻(上止点后)为 15 °CA 和 25 °CA 时,指示热效率降低;EGR 率较低,后喷时刻(上止点后)为 5 °CA 时 NO_x 排放有所升高,高 EGR 率时,后喷时刻对 NO_x 排放几乎没有影响;不同 EGR 率下,后喷时刻对 Soot(碳烟)排放影响不同,主要取决于后喷时的缸内温度;虽然后喷时刻对 CO 和 THC 排放影响较小,但在高 EGR 率下,随后喷时刻推迟, CH_4 所占比例降低。

关键词:汽车工程;后喷时刻;废气再循环;燃烧;排放

中图分类号:TK427

文献标志码:A

Effect of post-injection timing and EGR ratio on diesel low temperature combustion and emission

ZHAO Wei, ZHANG Quan-chang, ZHANG Chun-hua

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the effect of post-injection timing on diesel engine performance at different EGR rates, experimental study was carried out on a modified single diesel engine by changing EGR rate and post-injection timing. Total injection fuel mass was 50 mg/cyc and post-injection fuel mass was 8 mg/cyc. The results show that with post-injection, in-cylinder peak pressure decreases and combustion phase retards. At low EGR rate, peak heat release rate has a slight increase. While at high EGR rate, peak heat release rate decreases gradually. Compared with non post-injection, indicated thermal efficiency decreases at post-injection timing of 15 °CA and 25 °CA. Under low exhaust recirculation (EGR) rate, NO_x emission increases at post-injection timing of 5 °CA. And post-injection timing has almost no effect on NO_x emission under high EGR rate. Under different EGR rates, the effects of post-injection timing on soot emission are different, mainly depending on in-cylinder temperature at the timing of post-injection. Although post-injection timing has little effect on CO and THC emission, CH_4 proportion decreases under high EGR rate at delayed post-injection timing. 1 tab, 6 figs, 13 refs.

Key words: automobile engineering; post-injection timing; exhaust gas recirculation; combustion; emission

0 引言

未来严格的内燃机排放法规需要在显著改善有害排放的同时保持高的热效率,这对内燃机技术提出了严峻挑战。就柴油机而言,关键技术的不断发展使其得到更为广泛的应用,但传统燃烧方式存在着固有的排放难题(即 NO_x 和碳烟的 trade-off)^[1],而后处理技术会带来成本、复杂性、可靠性等多方面的问题,因此寻求新型高效清洁燃烧方式,即以机内净化为主将成为柴油机满足未来排放法规的关键技术途径^[2]。

低温燃烧(low temperature combustion, LTC)是一种新型的燃烧方式,近 10 年来,国内外都进行了广泛的研究。从广义上来讲,只要采取措施使燃烧路径避开 NO_x 和碳烟生成区,都属于低温燃烧范畴,如均质压燃(HCCI)、预混充量压燃(PCCI)等^[3-5];从狭义上来讲,其主要实现方式是通过大量废气再循环(EGR),降低缸内燃烧温度,从而同时实现极低的 NO_x 和碳烟排放^[6-8]。

对于低温燃烧,目前主要存在的问题是较高的 CO、THC 排放及较低的热效率,且没有有效的方法从根本上解决上述问题。前期研究发现,与大 EGR 率相比,中等 EGR 率将是实现柴油机高效清洁燃烧的有效途径^[9]。采取中等 EGR 率,可以保证在 CO 和 THC 排放基本不升高的前提下,实现相对较低的 NO_x 和碳烟排放。国内外研究表明,合理的后喷策略可以改善 NO_x 和碳烟排放^[10-13]。Shayler 等对后喷间隔对 NO_x 和碳烟的影响进行了模拟研究,表明后喷间隔对碳烟影响较大^[10];刘忠长等研究表明,后喷油量越大,后期扰动越强烈,对 Soot 的氧化越有利^[12]。但目前后喷对柴油机性能影响的研究主要集中在传统燃烧(无 EGR),且在不同的进气压力下,中等 EGR 率对应的区间并不同,因此需要研究在不同 EGR 率下后喷对柴油机性能的影响。在后喷参数中,后喷时刻对柴油机燃烧和排放影响较大,本文主要研究后喷时刻对柴油机性能的影响。

1 试验装置及研究方法

试验在 1 台六缸增压、水冷柴油机上进行。对第六缸进行了改造,独立其进、排气系统和喷油系统,其余五缸保持不变。发动机主要参数见表 1。

图 1 是试验装置示意图,通过调节背压阀开度,可以改变 EGR 率。喷油由 1 套电控系统控制,可灵活调节喷油量、喷油时刻、轨压等参数。

试验中,发动机转速恒定为 1 400 r/min,进气

压力为 0.15 MPa,总循环喷油量为每循环 50 mg。没有后喷时,喷油时刻固定在 $-10\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 。加了后喷之后,主喷油量为每循环 42 mg,喷油时刻不变,后喷油量为每循环 8 mg,后喷时刻(上止点后)分别为 $5\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{CA}$ 。喷油量和喷油时刻确定之后,从无 EGR 开始,调节背压阀开度,EGR 率增大,直至发动机燃烧不稳定。然后改变后喷时刻,进行下一组试验。

表 1 发动机主要参数
Tab. 1 Main parameters of engine

项 目	参 数
缸径/mm	105
冲程/mm	125
连杆长度/mm	210
压缩比	16 : 1
排量/ cm^3	1 081.8
进气门关闭时刻/ $^{\circ}\text{CA}$	-137
喷孔数/个	7
喷孔直径/mm	0.17
喷束夹角/ $(^{\circ})$	155
喷射系统	共轨
轨压/ 10^5 Pa	1 600

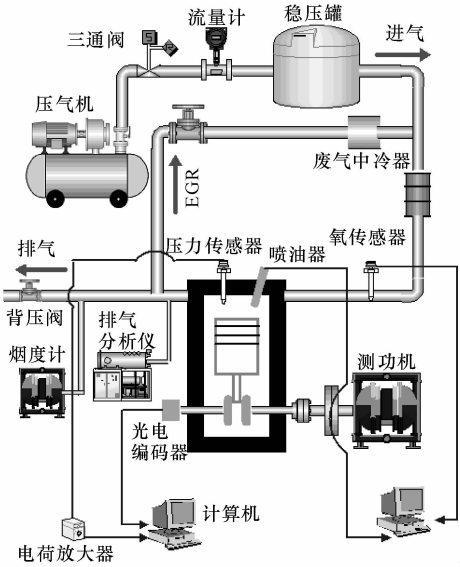


图 1 试验系统
Fig. 1 Test system

2 试验结果及分析

2.1 燃烧特性分析

下页图 2 是 EGR 率分别为 30% 和 60% 时,不同后喷时刻时缸内压力和瞬时放热率曲线。由图可以看出,加了后喷之后,由于主喷油量减少,最大缸内压力有所降低。没有后喷时,EGR 率为 30% 时燃烧出现双阶段放热,即预混燃烧和扩散燃烧;而

EGR 率为 60% 时,由于滞燃期较长,燃烧主要以预混燃烧为主,放热速率较快。加了后喷之后,主燃烧以预混燃烧为主,EGR 率为 60% 时放热峰值有所降低,但 EGR 率为 30% 时,在较晚后喷时刻放热率峰值略有升高。从图 2(a) 放热率曲线可以看出,着火前放热率曲线出现负值,这是由于燃油蒸发吸收了部分热量,加了后喷之后,主喷油量减少,吸收的热量相对较少,造成放热峰值略有升高。而在高 EGR 率时,滞燃期较长,燃烧具有均质压燃特性,放热率峰值取决于燃烧前形成的均匀混合气量。后喷时刻主要是对燃烧相位的影响,虽然不同后喷时刻缸内最大爆发压力差别较小,但在膨胀冲程缸压差别较大,即后喷时刻较晚时,会造成燃烧相位靠后,做功能力减弱。

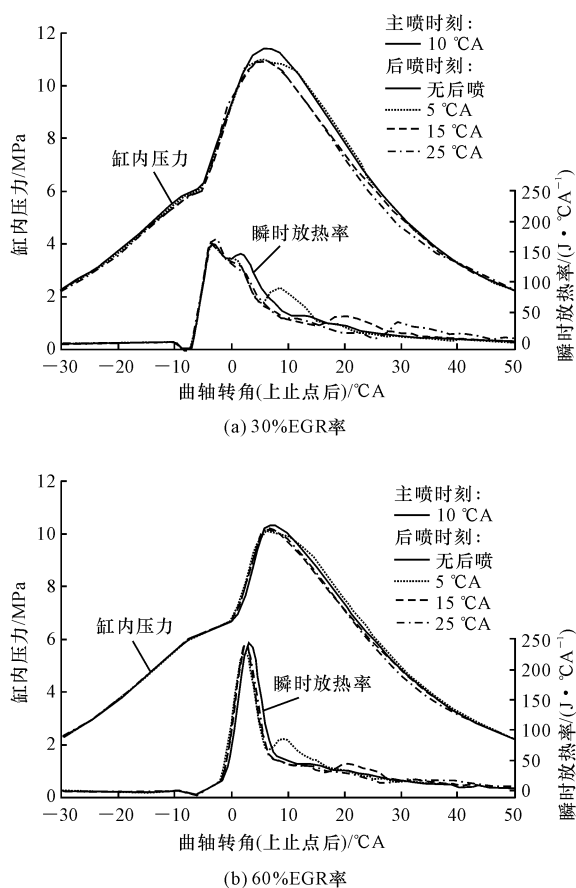


图2 缸内压力和瞬时放热率

Fig. 2 In-cylinder pressures and transient heat release rates

图3是在不同EGR率和后喷时刻下,指示热效率和排气温度的对比。由图3可知,与无后喷相比,后喷时刻为5 °CA时指示热效率差别较小,EGR率超过30%时还略有升高。而随着后喷时刻推迟,指示热效率则明显降低。这是由于随后喷时刻推迟,排气温度逐渐升高,从图3(b)也可看出,由于排气带走部分能量,较高的排气温度导致热效率降低。

而EGR率较高时,生成了较多的CO和THC排放,而适当的后喷时刻可以将CO和THC进一步氧化。即后喷提高了燃烧后期的缸内温度,较高的温度可将之前形成的CO和THC进一步氧化掉,对提高热效率有一定的意义,但过晚的后喷时刻会造成排气温度大幅增加。因此,从经济性方面考虑,后喷时刻不宜过迟。图3也表明,EGR率较大时,将导致热效率明显降低,这也是目前低温燃烧所面临的主要问题。

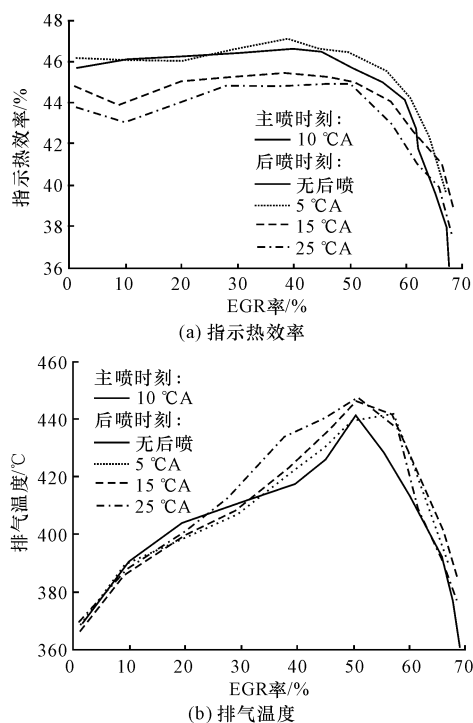


图3 指示热效率和排气温度

Fig. 3 Indicated thermal efficiency and exhaust temperature

2.2 排放特性分析

下页图4是不同后喷时刻、不同EGR率下的 NO_x 排放和EGR率为30%时的缸内平均温度曲线。由图4可知,与无后喷相比,EGR率在45%之前且后喷时刻为15 °CA ATDC和25 °CA ATDC时 NO_x 排放略有降低,而后喷时刻为5 °CA ATDC时, NO_x 排放略有升高。由于 NO_x 排放主要由缸内局部温度和氧浓度决定,在高EGR率时,缸内温度较低, NO_x 排放极低。缸内最高平均温度主要由主喷油量决定,从图4(b)可知,后喷时刻较晚时,缸内平均温度较低,后喷油量对缸内最高温度影响较小,造成较低的 NO_x 排放。而后喷时刻为5 °CA ATDC时,结合图2(b)瞬时放热率来看,此时主燃烧已进入末期,后喷会使缸内温度再次提升,如图4(b)所示,因此 NO_x 排放有所升高。由图4(b)也可看出,后喷时刻为15 °CA ATDC和25 °CA ATDC

时,缸内最高平均温度几乎没有差异,即较晚的后喷时刻对 NO_x 排放几乎没有影响。

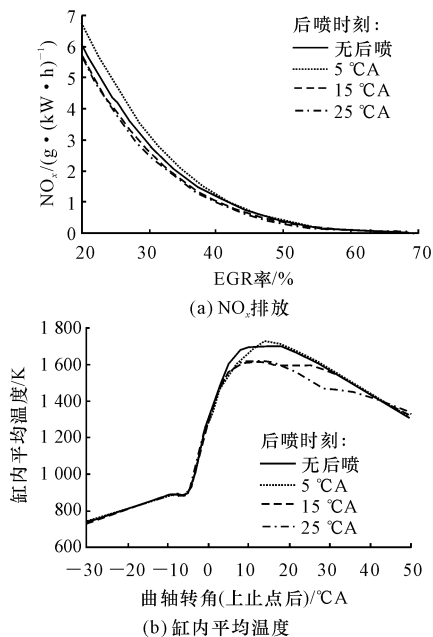


图4 NO_x 排放和缸内平均温度

Fig. 4 NO_x emission and in-cylinder average temperature

图5为不同EGR率下,后喷时刻对Soot(碳烟)排放的影响。虽然后喷的主要作用之一是进一步降低碳烟排放,即进一步将主燃烧期间生成的碳烟氧化掉,但从图5可知,后喷时刻对Soot排放影响较大。EGR率在40%之前,没有后喷时Soot排放一直较低,即EGR在这一区间对Soot排放影响较小,Soot还没进入Bump区。但加了后喷之后,随后喷时刻推迟,Soot排放逐渐升高,Soot-Bump区提前出现。而在较大EGR率时,后喷可降低Soot排放,且随后喷时刻推迟,降低幅度增加。因此,后喷对Soot的影响,主要取决于后喷时缸内气体的状态。后喷较早时,缸内温度较高,后喷油量滞燃期较短,生成了较多的Soot;而后喷较晚时,缸内温度较低,没有达到Soot的生成温度或Soot生成量较少,相比Soot生成温度,其氧化温度较低,因而降低了Soot排放。在不同的EGR率下,对应不同的最佳后喷时刻,后喷时刻也和负荷有关。

图6为不同EGR率下,后喷时刻对CO和THC排放的影响。可以看出,后喷对CO和THC影响较小,EGR率较低时,在不同后喷时刻下CO和THC排放与无后喷时几乎没有差别,在高EGR率时,加了后喷之后CO和THC排放略有降低。温度对这2种排放影响较大,高EGR率时,缸内温度较低,加了后喷之后,可进一步氧化CO和THC,因此排放有所降低。但与传统燃烧相比,高EGR

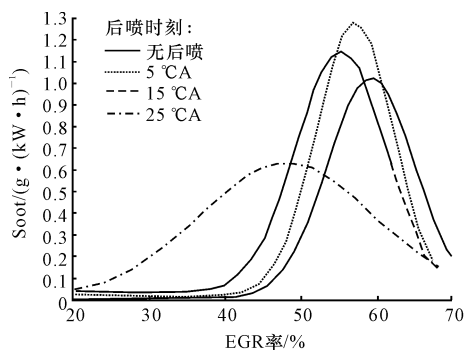
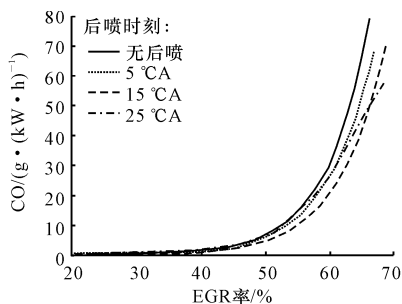
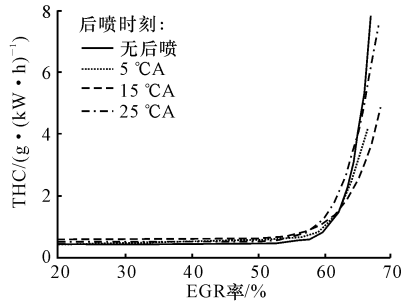


图5 Soot排放

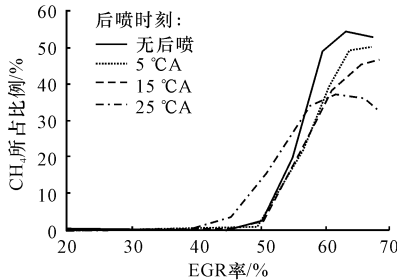
Fig. 5 Soot emission



(a) CO排放



(b) THC排放



(c) CH_4 排放

图6 CO、THC排放和 CH_4 所占比例

Fig. 6 CO and THC emission and CH_4 proportion

率时CO和THC排放大幅升高。

图6(c)为 CH_4 所占比例,定义为 CH_4 排放与THC排放的百分比。一般把THC排放分为 CH_4 和NMHC(非甲烷)2种, CH_4 作为痕量气体,也是温室气体,在天然气发动机中,其排量有具体限制。虽然柴油发动机没对其排放做具体规定,但由于其温室效应较高,其排放量也逐渐引起了人们的重视。图6(c)表明,EGR率在55%之前,后喷时刻对 CH_4

比例影响较小,只是后喷时刻为 25 °C A 时 CH_4 比例有所升高。而在高 EGR 率下,随后喷时刻推迟, CH_4 比例逐渐降低,且在整个 EGR 率区间,随 EGR 率变大, CH_4 比例呈先升高后降低的趋势。 CH_4 作为 THC 成分的一种,最终排放量受温度影响较大,在大 EGR 率下,缸内温度较低,而后喷的加入可提高膨胀后期的温度,将较多的 CH_4 进一步氧化,造成大 EGR 率,随后喷时刻推迟 CH_4 排量降低。

3 结 语

(1)加了后喷之后,缸内最高峰值压力降低,但在不同的后喷时刻下缸内峰值压力差别较小,后喷时刻主要影响燃烧相位。

(2)后喷时刻与主喷时刻间隔较小时,指示热效率变化较小,在高 EGR 率区还有所增加。但随后喷时刻推迟,指示热效率逐渐降低。

(3)后喷时刻对 NO_x 排放影响较小,但对 Soot 排放影响较大。在不同 EGR 率下,后喷时刻对 Soot 排放有不同的影响,主要取决于后喷时刻缸内气体状态。

(4)在整个 EGR 率区间,后喷时刻对 CO 和 THC 排放影响较小,但在高 EGR 率下,随后喷时刻推迟, CH_4 所占比例降低。同时,高的 CO 和 THC 排放是低温燃烧面临的主要问题。

(5)后喷参数主要包括后喷油量和后喷时刻,本文只在固定转速和总的循环喷油量下研究了后喷时刻对柴油机燃烧和排放特性的影响,下一步需研究整个工况范围内后喷参数对柴油机性能的影响。后喷时刻对碳烟排放影响较大,而在低温燃烧模式下,碳烟生成机理目前尚不清晰,因此需进一步研究加了 EGR 后喷参数对碳烟生成机理的影响。

参考文献:

References:

[1] 王贺武,刘浩学,王生昌.公路隧道环境对车用柴油机排放影响研究[J].中国公路学报,2003,16(4):98-100.
WANG He-wu,LIU Hao-xue,WNAG Sheng-chang. Research on effect of environment in highway tunnel on emission of diesel engine[J]. China Journal of Highway and Transport,2003,16(4):98-100. (in Chinese)

[2] 赵伟,张春化,佟娟娟,等. EGR 对甲醇 HCCI 发动机燃烧与排放的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2012,32(4):88-92.
ZHAO Wei,ZHANG Chun-hua,TONG Juan-juan,et al. Effect of EGR on combustion and emission of

methanol HCCI engine[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2012,32(4):88-92. (in Chinese)

[3] Su W H,Lin T J,Pei Y Q. A compound technology for HCCI combustion in a DI diesel engine based on the multi-pulse injection and the BUMP combustion chamber[J]. SAE Paper 2003-01-0741.

[4] Zheng Z Q,Yao M F,Chen Z,et al. Experimental study on HCCI combustion of dimethyl-ether (DME)/methanol dual fuel[J]. SAE Paper 2004-01-2993.

[5] Hardy W L,Reitz R D. A study of the effects of high EGR,high equivalence ratio, and mixing time on emissions levels in a heavy-duty diesel engine for PCCI combustion[J]. SAE Paper 2006-01-0026.

[6] Yun H,Sellnau M,Milovanovi N,et al. Development of premixed low temperature diesel combustion in a HSDI diesel engine[J]. SAE Paper 2008-01-0639.

[7] Weall A,Collings N. Gasoline fuelled partially premixed compression ignition in a light duty multi cylinder engine;a study of low load and low speed operation[J]. SAE Paper 2009-01-1791.

[8] Kalghatgi G,Hildingsson L,Johansson B. Low NO_x and low smoke operation of a diesel engine using gasoline-like fuels[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Transactions of the ASME,2010,32(9):110-115.

[9] Yao M F,Zhang Q C,Liu H F,et al. Diesel engine combustion control: medium or heavy EGR[J]. SAE Paper 2010-01-1125.

[10] Shayler P J,Ng H K. Simulation studies of the effect of fuel injection pattern on NO and soot formation in diesel engines[J]. SAE Paper 2004-01-0116.

[11] Sanghoon K,Choongsik B. The influence of charge dilution and injection timing on low temperature diesel combustion and emissions [J]. SAE Paper 2005-01-3837.

[12] 刘忠长,金华玉,李康. 高压共轨喷射柴油机采用燃料主喷和后喷的燃烧模拟[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(6):1274-1280.
LIU Zhong-chang,JIN Hua-yu,LI Kang. Combustion simulation on common rail injection diesel engine with main and post fuel injection mode[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2008,38(6):1274-1280. (in Chinese)

[13] 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.

