

DPF 主动再生过程中缸内远后喷策略对柴油机排放及 DOC 升温特性的影响

张鹏超, 宋崇林, 吴兆阳, 吕 刚

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Influence of Last-Post-Injection Strategy on Exhaust Emissions and Temperature Rise Behaviour of a DOC During DPF Active Regeneration

ZHANG Pengchao, SONG Chonglin, WU Zhaoyang, LÜ Gang

(State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The influence of the last-post-injection strategy on the exhaust emissions, brake specific fuel consumption and the temperature rise behaviour were investigated on a diesel engine. Results show that both HC and CO emissions increase with the rise of post injection quantity. With the delay of post-injection timing, the HC emissions reach stable condition after initial increase, and the CO emissions decrease after initial increase. While the emissions of NO_x and soot tend to decrease first and then increase moreover, the NO_x emissions decrease by 9.8% ~ 24.0% with last post injection and reduce with the increase of post injection quantity, while the soot emissions decrease with the delay of post-injection timing of less than 70° after TDC, but show an opposite trend with more than 70° after TDC. The temperature of exhaust gas after the DOC can reach over 600 °C for DPF active regeneration when the post injection quantity is 14 mg or 17 mg with the injection timing of 80 to 140° after TDC and the maximum temperature at 100° after TDC. The energy efficiency of the DOC increases with the rise of post-injection quantity, and reaches stable conditions after initial increase with the delay of post-injection timing. The energy utilization efficiency of DOC is within the range of 62.73% to 75.75% when the post-injection timing is 80° to 140° after TDC, thus leading to a maximum energy efficiency of DOC at 100° after TDC. The results provide a valuable information for the development of DPF regeneration and control strategy.

摘要: 在一台高压共轨柴油机上,研究了用于颗粒捕集器(DPF)再生的缸内远后喷策略对发动机排放、油耗率及柴油机氧化型催化器(DOC)升温特性的影响。结果表明,碳氢化合物(HC)和一氧化碳(CO)排放浓度均随后喷油量的增加而升高,HC排放浓度随着后喷定时的延迟先升高后稳定,而CO排放浓度则先升高后降低;氮氧化物(NO_x)和碳烟排放均随后喷定时的延迟呈现先降低后升高的趋势,远后喷的引入使 NO_x 排放降低了9.8%~24.0%, NO_x 排放浓度随后喷油量的增加而降低,而碳烟排放浓度在后喷定时小于70°时随后喷油量的增加而降低,在70°后则相反;后喷油量为14、17 mg,而后喷定时在上止点后80°~140°范围的远后喷工况下,DOC后排气温度均可达到DPF主动再生温度600 °C;DOC能量利用率随后喷油量的增加而升高,随后喷定时的延迟先升高后保持稳定,后喷定时在80°~140°范围内的

收稿日期: 2017-08-15

修回日期: 2017-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB228502)

Fund Project: Major State Basic Research Development Program of China(2013CB228502)

作者简介: 张鹏超(1992—),男,硕士生,主要研究方向为发动机排放及后处理,E-mail: tjuzhangpengchao@163.com;

宋崇林(通信作者),E-mail: songchonglin@tju.edu.cn。

DOC 能量利用率保持在 62.73%~75.75% 之间,且在上止点后 100° 时刻达到最大能量利用率。研究结果为缸内远后喷 DPF 再生及其控制策略的发展提供了有价值的理论依据。

关键词: 柴油机;远后喷;排放;柴油机氧化催化器

Key words: diesel engine; last-post-injection; emission; diesel oxidation catalyst

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2018.03.007

中图分类号: TK427

文献标识码: A

0 概述

柴油机因具有较高的热效率、良好可靠性和耐久性而越来越受到青睐^[1]。然而,柴油机的氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)排放较高^[2],其中 PM 排放对人类健康产生巨大威胁。目前,欧 VI 排放法规对 PM 质量排放、数量排放均加以严格限制^[3-4],越来越严格的排放法规迫使汽车制造商在柴油汽车上安装柴油机微粒捕集器(DPF)来降低 PM 排放^[5]。随着 DPF 对颗粒物的捕集累积,会导致发动机排气背压升高等问题,需要定期对 DPF 进行再生。目前 DPF 再生方法主要分为被动再生和主动再生。被动再生方法是依靠 NO₂ 对 DPF 中捕集的 PM 进行连续的氧化再生,但被动再生存在再生速度慢、再生效率低等缺点,因而主要应用在排气温度较高的长途卡车上;DPF 主动再生方法则通常需要采用缸内后喷或排气管喷油的方式来增加排气中未燃 HC 的含量,进而使其在柴油机氧化型催化器(DOC)内氧化放热,达到 DPF 再生温度 600 °C^[6-7],从而实现 DPF 再生。其中缸内后喷再生方法因具有无需额外喷油设备等优点而被广泛应用,然而实际缸内后喷实现 DPF 再生过程可能伴随着燃油经济性恶化、DOC 升温不足等问题。随着国家对节能减排问题的重视,如何高效利用缸内后喷实现 DPF 再生已成为研究热点,缸内喷油策略的选取至关重要。

目前国内外学者针对 DPF 被动再生策略已开展了广泛深入的研究,文献[8-9]分别探索了 DPF 被动再生过程中 NO_x 和碳烟的复杂反应和 DPF 被动再生特性。在 DPF 主动再生后喷策略方面,国内外学者也开展了一系列试验及数值模拟研究,文献[10]在单缸发动机上研究了 DPF 主动再生缸内后喷策略对 DOC 内部温度变化的影响规律,发现后喷定时大于上止点后 70° 时更适合 DPF 再生;文献[11]详细研究了 DPF 再生过程中后喷策略对发动机排放的影响,发现后喷的引入使 HC 和 CO 排放显著升高,后喷定时在上止点后 50°~80° 工况下的 NO_x 排放有明显下降;文献[12]提出了基于柴油机

机内控制技术的 DPF 再生控制技术方案,并设计了安全有效的 DPF 再生监控系统;文献[13]用仿真软件建立 DPF 再生控制模型,对 DPF 再生过程的二次污染问题进行了优化分析。总体上来说,目前针对远后喷 DPF 再生策略的研究主要集中在策略优化和 DPF 再生效率方面,专门针对发动机排放与 DOC 能量利用率方面的研究还未见报道,而该方面的系统研究对 DPF 主动再生远后喷控制策略的制定和优化具有重要指导作用。

本文在一台加装有后处理器的高压共轨直喷发动机上,全面研究了 DPF 再生过程中远后喷定时(上止点后 40°~140°)、远后喷油量(11、14、17 mg)对发动机排放特性、DOC 升温特性及能量利用率的影响规律,研究结果为缸内远后喷 DPF 再生方法及其控制策略的制定和优化提供了依据。

1 试验设备及试验方案

1.1 试验设备

试验采用 CY4102-CS5B 型电控高压共轨增压中冷柴油机,其主要技术参数如表 1 所示。本试验发动机为大连亿特科技有限公司与某柴油机厂商合作开发的专用试验机,用于缸内远后喷 DPF 再生项目试验研究,其喷油系统已完成喷油参数(喷油定时、喷油量、喷油压力)的标定,可实现不同工况下喷油量的精准控制。试验用油为标准国 V 柴油。试验台架如图 1 所示。本试验通过 ETAS 公司的 INCA6.2 标定软件对发动机喷油策略进行调节;通过杭州奕科机电技术有限公司生产的 WDFZ 型测功机控制发动机运行工况;通过上海同圆环保科技有限公司生产的 ToCeil-20N125 热式气体流量计测量发动机进气流量,其可实现高精度连续测量,测量误差小于 0.1%;试验中通过 HORIBA 公司生产的 MEXA-7100DEGR 型排放分析仪测量排气中的 HC、CO、NO_x 组分,分别用非加热式氢火焰离子检测器、不分光红外分析仪和加热式化学发光检测器进行检测,检测精度为 10⁻⁶;利用 AVL-415 烟度计测量排气烟度值,通过热电偶测量 DOC 前后排气温度;借助课

题组自主开发的发动机燃烧分析系统对缸内发动机燃烧状况进行监测分析,该系统由压电式缸压传感器、曲轴转角信号发生器、电荷放大器、高速 A/D 板、主机及显示器组成,得到的缸压数据用 Labview 软件编写的数据处理程序进行分析。由于试验重点主要集中在探究不同远后喷策略对发动机排放及 DOC 升温特性的影响上,因而试验过程中并未加装 DPF,试验采用的 DOC 具体参数见表 2。

表 1 发动机主要技术参数

项目	参数
发动机型号	CY4102-CS5B
发动机型式	直列,四冲程,涡轮增压
缸径/mm×行程/mm	102×118
压缩比	17:1
排量/L	3.856
标定功率/kW	103(2 800 r/min)
最大扭矩/(N·m)	425(1 300~1 500 r/min)

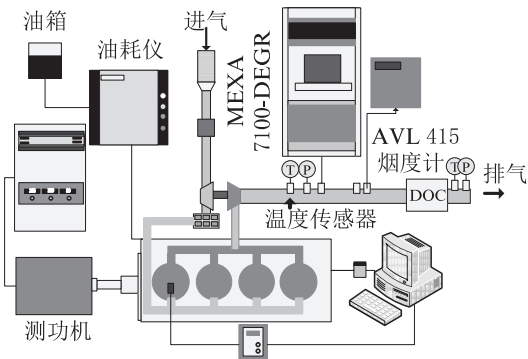


图 1 试验台架示意图

表 2 试验用 DOC 参数

项目	参数
载体材料	堇青石
直径 D /mm	190.5
高 H /mm	152.4
孔密度/ cm^{-2}	46.5(300 目)
催化剂	Pt
涂覆量/ $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	1.77

1.2 试验方案

考虑到在欧洲稳态循环(European steady state cycle, ESC)排放测试循环中,中、高转速及中、高负荷工况所占权重较大,且排温较高有利于 DPF 再生,因此试验选取中等转速 1 600 r/min、50% 负荷工况点为研究对象,探索不同远后喷油量和远后喷定时对发动机排放特性及 DOC 升温特性的影响规律。试验中的喷油策略如图 2 所示。单主喷工况只在上止点前喷入主喷燃油,远后喷工况除主喷外,还在上

止点后远离上止点时刻($\geq 40^\circ$)喷入后喷燃油。其中主喷定时和后喷定时分别用主喷、后喷开始时刻与上止点间的曲轴转角来表示,主喷定时为主喷时刻提前于上止点的曲轴转角,后喷定时为后喷迟后于上止点的曲轴转角,如主喷定时 7° 表示主喷时刻为上止点前 7° ,后喷定时 50° 表示后喷时刻为上止点后 50° 。

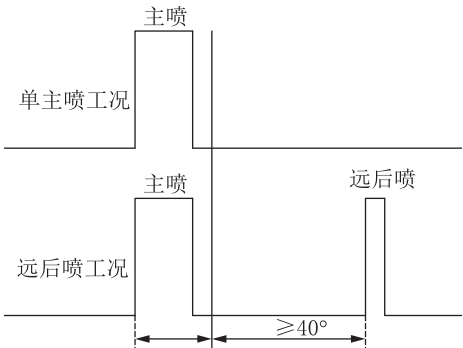


图 2 喷油策略示意图

各试验工况点的具体试验条件如表 3 所示。为了排除主喷参数变化对缸内燃烧、排放特性等的干扰,试验中的各远后喷工况均保持共轨压力(120 MPa)及主喷参数(主喷油量 35 mg,主喷定时为 7°)不变;而各远后喷工况点切换前,首先切换到单主喷工况运行 10 min 以上,用来排除上一工况点在排气管中残留的未燃 HC,降低其对试验结果的干扰。

表 3 试验工况

项目	数值
主喷油量/mg	35
主喷定时/ $^\circ$	7
共轨压力/MPa	120
后喷油量/mg	11、14、17
后喷定时/ $^\circ$	40、50、60、70、80、90、100、110、120、130、140

2 对原机排放特性和油耗率的影响

由于该试验的主要目的是在固定转速、中等负荷工况下,研究用于 DPF 主动再生的不同远后喷策略对发动机排放特性及 DOC 升温特性的影响规律,对排放结果的关注集中在总排放量而非比排放上,因此以下对排放结果的分析均采用总排放数据。

2.1 对 CO 和 HC 排放体积浓度的影响

图 3 所示为远后喷策略对 CO 排放体积浓度的影响。从图 3 中可以看出:单主喷工况下 CO 排放浓度为 102×10^{-6} ,远后喷的引入使 CO 排放浓度上升了 $127 \times 10^{-6} \sim 2\,954 \times 10^{-6}$;当后喷定时在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 范围时,增加后喷油量并未使 CO 排放量大幅上

升,这是由于 CO 作为烃基燃料不完全燃烧的产物,主要是在缺氧或低温燃烧环境下形成,而后喷油量的增加在一定程度上提升了排气温度,并通过促进涡轮做功增加缸内进气量,使缸内过量空气系数升高(图 4),从而在一定程度上抑制了 CO 的生成;而当后喷定时在 $60^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 范围时,CO 排放浓度随着后喷油量的增加明显升高。

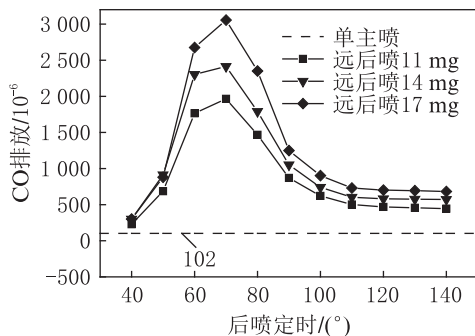


图 3 远后喷策略对 CO 排放体积浓度的影响

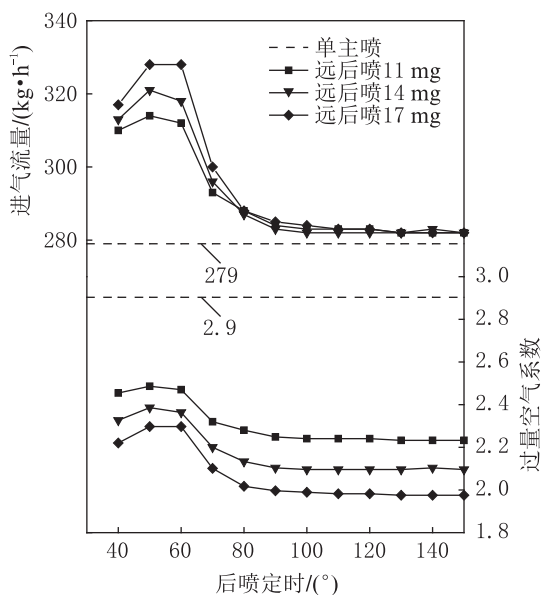


图 4 远后喷策略对进气流量和过量空气系数的影响

在相同后喷油量下,CO 排放浓度随着后喷定时的延迟呈现先升高后降低的趋势。随着后喷定时的延迟,缸内温度的降低造成后喷燃油不完全燃烧进一步加剧,CO 排放浓度明显升高并在后喷定时为 70° 时达到峰值;随着后喷定时进一步推迟,缸内温度和压力急剧下降(图 5),后喷燃油中能够参与燃烧过程的量越来越少,从而使 CO 排放浓度逐渐减少。总体上来看:后喷定时在 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内,CO 排放浓度对后喷定时的变化最为敏感;后喷定时在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 范围最容易产生高浓度 CO 排放。

图 6 为远后喷策略对 HC 排放的影响。从图 6 中可以看出,单主喷工况下的 HC 排放浓度为 137×10^{-6} ,

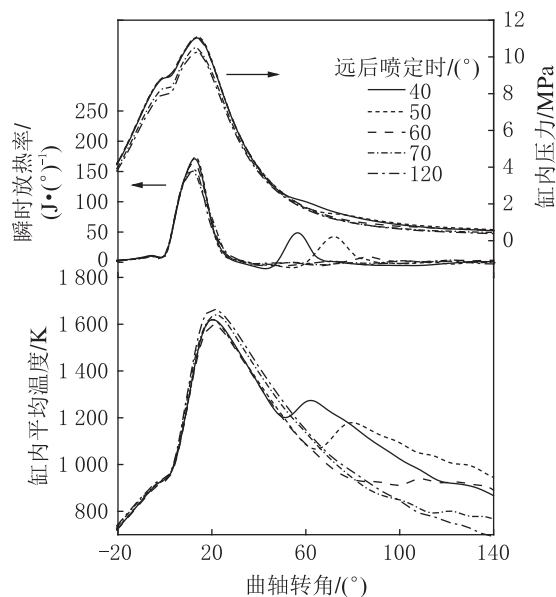


图 5 远后喷定时对缸压、瞬时放热率和缸内平均温度的影响(远后喷油量 14 mg)

10^{-6} ,后喷的引入使 HC 排放浓度上升了 $76\times 10^{-6}\sim 16\,733\times 10^{-6}$;在相同后喷定时下,HC 排放浓度随着后喷油量的增加而升高;在相同后喷油量下,HC 排放浓度随后喷定时的延迟呈现先升高后稳定的趋势。后喷定时在 60° 之前的 HC 排放浓度增长较缓慢(低于 $3\,000\times 10^{-6}$),在此阶段随着后喷时刻的延迟,缸内温度和压力仍较高,在图 5 的瞬时放热率曲线上可以明显观察到后喷形成的二次尖峰,这说明后喷燃油基本完成了整个雾化、蒸发、混合、自燃、燃烧过程,使后喷燃油在自燃阶段裂解产生的 HC 几乎被完全氧化^[14],所以此时的 HC 排放量较低;当后喷定时在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围时,HC 排放量急剧增加,这是由于缸内温度和压力随着后喷定时的延迟急剧下降,不利于后喷燃油着火,使大量自燃阶段裂解生成的短链烃无法进入到燃烧阶段,从而以 HC 形式排出缸外;随着后喷定时的进一步延迟,在 $80^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 范围时的 HC 排放量逐渐趋于饱和,并且在后喷定时大于 120° 时稍有下降,这是由于该时刻靠近排气门开启时刻(上止点后 121.8°),部分后喷燃油以液态形式直接进入排气管,无法被排气分析仪检测到造成的。

整体上来看:后喷定时在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 范围内,HC 排放浓度对后喷定时的变化最为敏感;后喷定时在 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 范围,HC 排放浓度基本保持稳定,且后喷定时在 100° 时 HC 排放最高。

2.2 对 NO_x 和碳烟排放的影响

远后喷策略对 NO_x 排放体积浓度的影响及远后喷工况 NO_x 排放相对于单主喷工况的增长率如图 7 所示。从图 7 中可以看出:单主喷工况下的

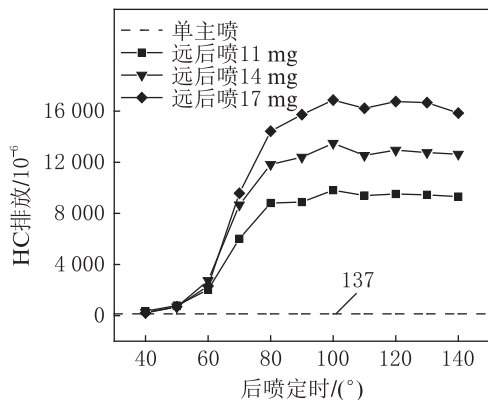


图6 远后喷策略对HC排放体积浓度的影响

NO_x 排放为 521×10^{-6} , 后喷的引入使 NO_x 排放相对于单主喷降低了 9.8%~24.0%; 在相同后喷定时下, NO_x 排放随着后喷油量的增加而降低。由于 NO_x 排放主要来源于主喷燃烧阶段, 后喷油量的增加提高了排气温度, 使涡轮做功增加, 缸内进气量增加, 增加的缸内进气量也会提高缸内工质总热容, 从而使主喷燃烧阶段缸内平均温度降低(图8), 从而使主喷燃烧阶段 NO_x 生成量降低; 另一方面, 燃油裂解产生的碳氢自由基可与 NO_x 反应生成硝基碳氢化合物^[15], 从而使 NO_x 排放浓度降低, 后喷油量的增加可能会使缸内后喷燃油裂解产生的碳氢自由基增加, 从而也在一定程度上降低了 NO_x 排放。

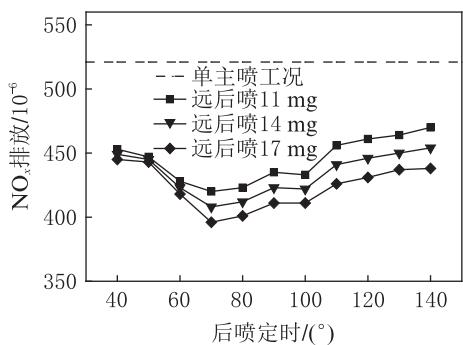
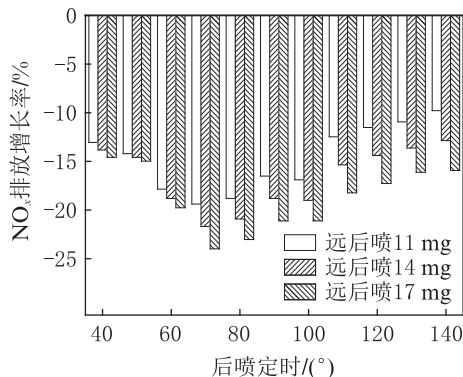
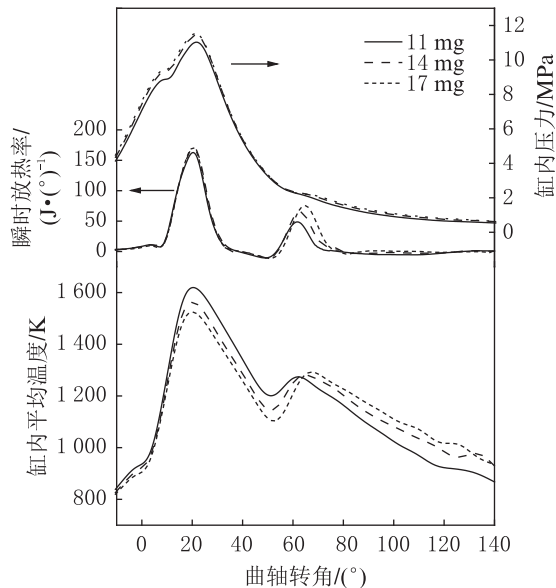
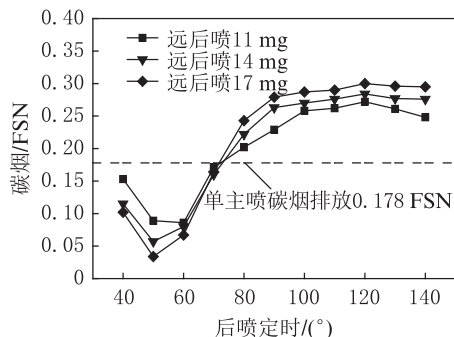
(a) 远后喷策略对 NO_x 排放体积浓度的影响(b) 远后喷策略对 NO_x 排放增长率的影响图7 远后喷策略对 NO_x 排放体积浓度的影响

图8 远后喷油量对缸压、瞬时放热率和缸内平均温度的影响(后喷定时 40°)

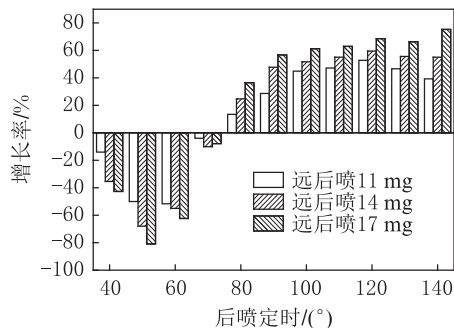
在相同后喷油量下, NO_x 排放随后喷时刻的延迟呈现先降低后升高的趋势。后喷定时在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 范围内时, NO_x 排放随后喷定时的延迟逐渐降低。这一方面受主喷燃烧阶段的缸内温度、缸内压力的影响; 另一方面, 随着后喷时刻的延迟, 后喷燃油裂解产生的可以与 NO_x 反应的碳氢自由基不断增多, 也在一定程度上降低了 NO_x 排放。当后喷定时大于 70° 时, NO_x 排放逐渐升高。这是由于随着后喷定时的延迟, 排气温度的降低不利于涡轮做功, 缸内进气量的降低使主喷燃烧阶段缸内平均温度逐渐升高, NO_x 生成量增加; 另一方面, 随着后喷定时的延迟, 后喷燃油裂解产生的中间物质可与 N_2 发生反应, 该反应产物又与 O_2 反应生成 NO_x ^[16], 从而造成 NO_x 排放浓度升高。

图9为远后喷策略对碳烟排放的影响及相对于单主喷碳烟排放的增长率。从图9中可以看出: 在后喷定时 70° 前, 碳烟排放随着后喷油量的增加而降低; 而当后喷定时大于 70° 时, 碳烟排放随着后喷油量的增加而升高。在相同后喷油量下, 碳烟排放浓度随后喷定时的延迟呈先下降后上升的趋势, 在 50° 处达到最低值。后喷定时在小于 70° 范围时, 碳烟排放量低于单主喷工况时的排放量, 可能是由于在此阶段缸内后喷对主喷燃烧阶段产生的碳烟具有一定的氧化作用。这一方面是由于后喷燃油喷入所形成的扰动使燃烧产物和空气的混合加强, 碳烟氧化速率也随之明显增强^[17]; 另一方面, 后喷定时在小于 70° 范围时后喷燃油燃烧放热量较高, 使涡轮做功增加, 缸内进气量升高, 过量空气系数的升高也在一定程度上促进了缸内碳烟的氧化。而当后喷定时大于

等于 70° 时,碳烟排放显著升高。这是由于后喷参与燃烧放热的燃油量减少,对主喷生成的碳烟的氧化能力下降,且后喷燃油不完全燃烧产生的碳烟量升高,导致总的碳烟排放随着后喷定时的延迟不断升高。



(a) 远后喷策略对碳烟排放的影响



(b) 远后喷策略对碳烟排放增长率的影响

图 9 远后喷策略对碳烟排放的影响

2.3 对燃油经济性的影响

图 10 为远后喷策略对试验发动机油耗率的影响规律。从图 10 中可以看出:单主喷工况下的发动机油耗率为 $203.6 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,不同后喷策略下的油耗率相比于单主喷工况增加了 $34.5 \sim 88.3 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;在相同后喷定时下,油耗率随着后喷油量的增加而升高,而在相同后喷油量下,油耗率随着后喷定时的延迟呈现先升高后稳定的趋势。这说明远后喷油量越大,燃油经济性恶化越严重,且后喷定时在 $70^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 范围时,远后喷定时对油耗率的影响不敏感。

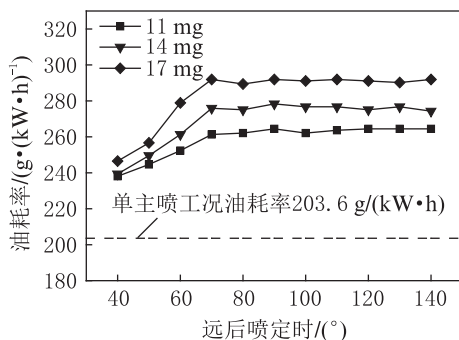
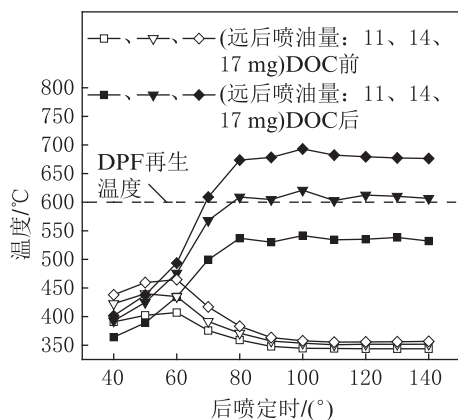


图 10 远后喷策略对油耗率的影响

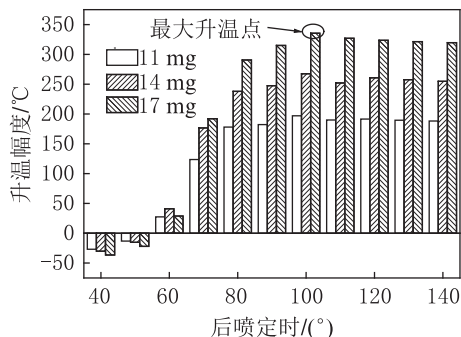
3 对 DOC 升温及能量利用率的影响

3.1 对 DOC 升温特性的影响

图 11 所示为远后喷策略对 DOC 升温特性的影响。从图 11 中可以看出,不同远后喷策略下的 DOC 前排气温度均已达到 DOC 起燃温度。在相同后喷定时下,排气温度随着后喷油量的增加而升高;在相同后喷油量下,DOC 前排气温度随着后喷定时的延迟呈现出先上升后下降最终保持稳定的趋势,而 DOC 后排气温度则呈现先上升后保持稳定的趋势。远后喷油量为 14 mg 、 17 mg 时,后喷定时在 $80^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 的 DOC 后排气温度均可达到 600°C ,均满足 DPF 再生要求。由于缸内远后喷会造成严重的机油稀释问题,从而降低发动机可靠性和使用寿命,为了减少机油稀释问题应尽量减小远后喷油量,因此远后喷 14 mg 为较好的油量选择。从各工况下的升温幅度柱形图中可以看出,在 100° 时刻的升温幅度最高,这主要是由于此定时下的 HC 排放浓度最高,DOC 氧化反应放热量最大引起的。



(a) 远后喷策略对 DOC 升温特性的影响



(b) 远后喷策略对 DOC 升温幅度的影响

图 11 远后喷策略对 DOC 升温特性的影响

3.2 远后喷策略对 DOC 能量利用率的影响

通过远后喷策略实现 DPF 主动再生的过程中,远后喷的引入使得燃油经济性不断恶化,引入 DOC

能量利用率的概念对不同远后喷策略下的 DOC 升温效率进行评价。

图 12 为 DOC 能量流向示意图^[12]。由于试验过程中采用了石棉保温材料对排气管及 DOC 表面进行保温处理,通过热传导等损失的能量较小,因此计算 DOC 能量利用率时忽略不计。定义 $Q_{\Delta T}$ 与 Q_{fuel} 的比为 DOC 能量利用率 η :

$$\eta = \frac{Q_{\Delta T}}{Q_{\text{fuel}}} = \frac{\Delta T \cdot m_{\text{ex}} \cdot c_p \cdot t}{H_{\text{fuel}} \cdot q_{\text{post}}} \quad (1)$$

式中, η 为 DOC 能量利用率; $Q_{\Delta T}$ 为实现 DOC 前后升温 ΔT 所需要的能量, J; Q_{fuel} 为远后喷燃油所含的热量, J; ΔT 为 DOC 前后温差, K; m_{ex} 为排气质量流量, kg/s; c_p 为排气比定压热容, J/(kg · K); t 为所研究时间窗口, s; H_{fuel} 为燃油低热值, J/g; q_{post} 为 t 时间内累积喷射的远后喷燃油量, g。

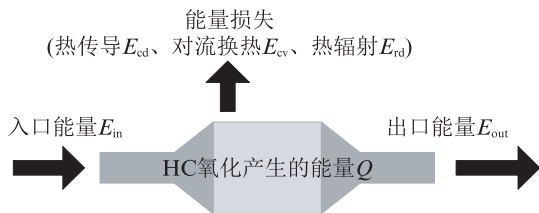


图 12 DOC 能量流向示意图

图 13 给出了不同远后喷策略下的 DOC 能量利用率变化趋势。可看出随着后喷定时的延迟, DOC 能量利用率均呈现先上升后保持平稳的趋势。较先后喷时刻的 DOC 能量利用率较低, 在 $60^\circ \sim 80^\circ$ 后喷定时范围内的 DOC 能量利用率显著上升, 在 $80^\circ \sim 140^\circ$ 范围内 DOC 能量利用率逐渐趋于稳定, 并保持在 $62.73\% \sim 75.75\%$ 之间。这是由于随着喷油的延迟, 远后喷燃油所处的缸内燃烧环境不断恶化, 缸内压力和缸内温度显著降低, 大部分后喷燃油并未做功, 其裂解产生的大量短链 HC 在 DOC 内催化氧化放热, 从而使 DOC 能量利用率逐渐上升; 而随着后喷定时进一步延迟, 远后喷燃油裂解产生的短链 HC 量达到最大值, DOC 氧化放热量趋于最大值, 从而使得各油量下的 DOC 能量利用率均达到峰值。

远后喷油量对 DOC 能量利用率也有显著影响, 尤其在较晚后喷定时范围, 不同后喷油量对 DOC 能量利用率的影响显著。随着后喷油量的升高, DOC 能量利用率明显升高, 这是由于随着后喷油量的增加, 发动机 HC 排放量升高, DOC 内部反应放热更集中, 且随着 DOC 温度的上升, DOC 对 HC 及 CO 转化效率也相应提升, 从而进一步提高 DOC 能量利用率。

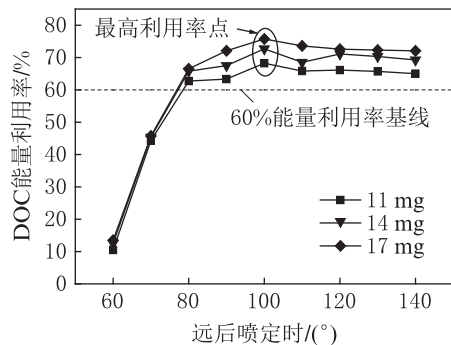


图 13 不同远后喷策略下的 DOC 能量利用率

从 DOC 能量利用率来看, 后喷定时在大于 80° 及采用较大远后喷油量时更有利于 DOC 高效升温, 进而实现 DPF 主动再生, 且后喷时刻为 100° 时的 DOC 能量利用率高达 75.75% , 为最佳远后喷时刻。

4 结论

(1) 发动机 CO 排放随远后喷定时的延迟呈现先上升后下降的趋势, 后喷定时在 $50^\circ \sim 90^\circ$ 范围内 CO 排放对后喷定时的变化最为敏感, 且在 70° 时刻达到峰值。HC 排放随后喷定时的延迟呈现先升高后稳定的趋势, 后喷定时为 $60^\circ \sim 80^\circ$ 范围内 HC 排放浓度对后喷定时的变化最为敏感, 且在 100° 时刻达到峰值。

(2) 远后喷策略下的 NO_x 和碳烟排放均随后喷定时的延迟呈现先降低后升高的趋势。其中 NO_x 排放随后喷油量的增加而降低, 远后喷的引入使 NO_x 排放降低了 $9.8\% \sim 24.0\%$, 且在后喷定时 70° 达到最低值。而碳烟排放浓度在后喷定时 70° 前随后喷油量的增加而降低, 在 70° 后则相反, 其排放浓度在后喷定时 50° 时刻达到最低值。

(3) 远后喷策略会导致燃油经济性恶化, 发动机油耗率随着后喷油量的增加而升高, 随远后喷定时的延迟呈现先升高后稳定的趋势, 且后喷时刻在上止点后 $70^\circ \sim 140^\circ$ 范围时远后喷定时对油耗率的影响不敏感。

(4) DOC 前排气温度随着后喷定时的延迟呈现先上升后下降最终保持稳定的趋势, 而 DOC 后排气温度则呈现先上升后保持稳定的趋势。远后喷油量为 14 mg、17 mg 工况时, 后喷定时在 $80^\circ \sim 140^\circ$ 工况的 DOC 后排气温度均可达到 DPF 主动再生温度 600°C , 且在 100° 时刻的升温幅度最高。DOC 能量利用率在较先后喷定时较低, 在 $80^\circ \sim 140^\circ$ 范围内 DOC 能量利用率较高且保持在 $62.73\% \sim 75.75\%$ 之间, 三种不同后喷油量下均在后喷时刻为上止点后 100° 时达到最大 DOC 能量利用率。

参考文献:

- [1] IBRAHIM A R, ALTINISIK K, KESKIN A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2015, 17(1):15-27.
- [2] 贺泓, 翁端, 资新运. 柴油车尾气排放污染控制技术综述[J]. 环境科学, 2007, 28(6):1169-1177.
- HE H, WONG D, ZI X Y. Diesel emission control technologies: a review[J]. Environmental Science, 2007, 28(6):1169-1177.
- [3] BIN G, REGGIE Z, HE L, et al. Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 225-258.
- [4] YOON S, QUIROS D C, DWYER H A, et al. Characteristics of particle number and mass emissions during heavy-duty diesel truck parked active DPF regeneration in an ambient air dilution tunnel[J]. Atmospheric Environment, 2015, 122:58-64.
- [5] JOHNSON T V. Vehicular emissions in review [J]. SAE International Journal of Engines, 2014, 7(3):1207-1227.
- [6] FENG X Y, GE Y S, MA C C, et al. Experimental study on the nitrogen dioxide and particulate matter emissions from diesel engine retrofitted with particulate oxidation catalyst[J]. Science of the Total Environment, 2014, 472:56-62.
- [7] KUWAHARA T, NISHII S, KUROKI T, et al. Complete regeneration characteristics of diesel particulate filter using ozone injection[J]. Applied Energy, 2013, 111(11):652-656.
- [8] JIAO P H, LI Z J, SHEN B X, et al. Research of DPF regeneration with NO_x -PM coupled chemical reaction [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110:737-745.
- [9] 班智博, 张扬, 黄豪中, 等. 大型柴油机 DPF 被动再生特性的试验研究[J]. 国外内燃机, 2017, 49(1):53-57.
- [10] YOON S, KIM H, KIM D, et al. Effect of the fuel injection strategy on DPF regeneration in a single cylinder diesel engine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2016, 138(10):1-6.
- [11] CHEN P, IBRAHIM U, WANG J. Experimental investigation of diesel and biodiesel post injections during active diesel particulate filter regenerations[J]. Fuel, 2014, 130(7):286-295.
- [12] 韦雄, 冒晓建, 祝轲卿, 等. 基于机内技术的 DPF 再生控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11):1-5.
- WEI X, MAO X J, ZHU K Q, et al. Control strategy of DPF regeneration based on machine technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 1-5.
- [13] 李顶根, 朱红雨, 成晓北. 柴油机 DOC 辅助 DPF 再生燃油喷射规律的优化[J]. 车用发动机, 2015(1):49-53.
- LI D G, ZHU H Y, CHENG X B. Optimization of fuel injection law for DPF regeneration aided with DOC[J]. Vehicle Engine, 2015(1):49-53.
- [14] PULKRABEK W W. Engineering fundamentals of the internal combustion engine[M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [15] YAMAMOTO K, TAKADA K, KUSAKA J, et al. Influence of diesel post injection timing on HC emissions and catalytic oxidation performance [J]. SAE International Journal of Engines, 2006, 7(3):85-85.
- [16] HOEKMAN S K, ROBBINS C. Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 96(4):237-249.
- [17] 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 Z C, JIN H Y, LI K. 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.
- [18] 张德满. DOC 辅助 DPF 再生方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.

诚邀参加首届世界内燃机大会

首届世界内燃机大会将于 2018 年 11 月 8 日—11 日在江苏无锡太湖国际博览中心举办,大会主题为“绿色、高效,创新、发展”。这是国际内燃机界最高水平、最全领域的学术盛会之一,诚邀国内外嘉宾和专业人员参会。

大会同期还将举办国际内燃机及制造装备展览会,展示行业先进的技术研发能力、先进的内燃机产品、智能化制造装备技术、绿色再制造及现代化服务技术。

请访问 <http://engine-china.cn/> 获得更多信息。