

柴油机 WHTC 冷起动过程 SCR 温度热管理技术研究

刘光义, 孙德增, 邬斌扬, 苏万华

(天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Study on SCR Thermal Management for Diesel Engines during Cold-Start WHTC Process

LIU Guangyi, SUN Dezeng, WU Binyang, SU Wanhua

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

Abstract: The effects of variable geometry turbocharger (VGT) opening, retarded intake valve closing timing and post injection strategy on the promotion of SCR temperature were experimentally studied in detail, and the comparative analysis of the above approaches was made with regard to SCR temperature rise, emissions and engine operation economy. Experiment results show that using the post injection, increasing the VGT opening and taking the advantage of RIVCA (retarded intake valve closing auction) can effectively increase the SCR temperature. Compared with the post injection strategy, increasing the VGT opening and using the RIVCA make the engine have lower fuel consumption. Based on the above steady state test results, the post injection strategy and VGT-RIVCA strategy were selected and the further comparison was carried out by cold-start of WHTC test. Results show that both strategies can reduce the SCR light-off time to around the 600th second of the test cycle, and at this point the post injection strategy worsens the fuel economy by 3.5%, while the VGT-RIVCA strategy by only 1.1%. Through the contrast test of different VGT openings, an optimized VGT-RIVCA control strategy was obtained. With this strategy, the SCR temperature can reach 190 °C at the 540th second of the test cycle, NO_x emission is reduced to 0.929 g/(kW·h) from 1.78 g/(kW·h), and the engine fuel consumption increases by only 1.4%.

摘要: 研究了低速低负荷工况下可变几何截面增压器(variable geometry turbocharger, VGT)开度、进气门晚关机构(retard intake valve closing auction, RIVCA)和后喷技术对提升选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)后处理器温度的作用,并从温度提升幅度、发动机油耗率和排放等方面对各技术进行了分析比较。试验结果表明,采用后喷技术、增大 VGT 开度和利用进气门晚关可以有效提高 SCR 后处理器温度。但相比于后喷技术,增大 VGT 开度和运用进气门晚关技术造成的油耗损失较小。试验对后喷策略和 VGT-RIVCA 策略进行了全球统一瞬态试验循环(world harmonized transient cycle, WHTC)冷起动对比试验。试验结果显示,在使 SCR 后处理器的起燃时间缩减至循环第 600 s 附近时,后喷策略造成的油耗损失为 3.5%,而 VGT-RIVCA 策略造成的油耗损失仅为 1.1%。在验证了 VGT 控制策略的优越性后,通过设定不同 VGT 开度的对比试验,最终得到了一套优化的 VGT-RIVCA 控制策略,运用该策略可以使 SCR 后处理器的起燃时间由 1 300 s 缩减至 540 s,NO_x 排放量由 1.78 g/(kW·h)降低至 0.929 g/(kW·h),同时发动机油耗仅有 1.4%的恶化。

收稿日期: 2016-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51236005, 51506144)

Fund Project: National Natural Science Foundation of China(51236005, 51506144)

作者简介: 刘光义(1989—),男,硕士生,主要研究方向为超低排放柴油机系统, E-mail: liuguangyigq@163.com;

苏万华(联系人), E-mail: whsu@tju.edu.cn。

关键词：排气热管理；SCR 温度控制；SCR 转化效率；WHTC 测试循环；排放

Key words: exhaust temperature management; SCR temperature control; SCR efficiency; WHTC test cycle; emissions

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.06.023

中图分类号：TK427

文献标识码：A

0 概述

选择性催化还原技术作为降低柴油机氮氧化物(NO_x)排放的有效措施,其作用效果与 SCR 后处理器的温度密切相关。在发动机冷起动过程中,由于 SCR 后处理器温度长时间处于较低水平,其转化效率非常低,此时柴油机尾气中的大部分 NO_x 被直接排入大气而造成污染。为提高柴油机冷起动过程 SCR 系统的转化效率,需要对后处理系统进行热管理。有关这一问题的技术研究,国外已有大量报道:文献[1]在一台装备单级可变喷嘴涡轮增压器的 2 L 4 缸柴油机上,研究了进气节流和高温电加热塞对提升后处理器温度的作用,其结果显示进气节流配合使用电加热塞,可以有效提高排气温度,同时保持发动机的燃烧稳定性,但进气节流和加热塞的运用会造成油耗的恶化。文献[2]在一台两级增压的 2 L 4 缸柴油机上,研究了可变气门机构对排气温度的影响,发现在膨胀冲程中提前开启排气阀门,可以使低压级涡轮出口温度提高约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,但较大的膨胀损失会使油耗恶化 10% 以上。文献[3]在新欧洲行驶循环(NEDC)中,通过向柴油机氧化催化转化器(diesel oxidation catalyst, DOC)前喷射燃油的方法使后处理温度快速提升。文献[4]通过在 NEDC 循环前 400 s 内采用两次后喷的方法,使循环后处理系统平均温度提升约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而大幅缩短了 SCR 系统的起燃时间,但后喷的运用会造成发动机油耗的急剧恶化。

本文针对不同的排气热管理技术措施,详细分析其各自的优缺点,在此基础上,最终选择 VGT-RIVCA 策略和后喷策略进行了 WHTC 冷起动对比试验,明确了运用 VGT-RIVCA 策略进行排气热管理的优势。

1 试验装置和研究方法

试验装置的布置如图 1 所示。发动机为改装后的 WP12 型重型柴油机,其参数如表 1 所示。发动机燃烧室带有 BUMP 环^[5],燃烧技术运用文献[6-7]提出的高密度低温燃烧策略,气路系统采用两级增压和低压废气再循环(EGR)技术,高压级增压器为可变几何截面增压器,同时发动机安装了进气门晚关机

构^[8],以降低发动机最高燃烧压力和提高热效率^[9-10]。燃油系统最高喷射压力为 180 MPa,电子控制单元由课题组自主开发设计,可以实现对发动机各控制参数的灵活调节。后处理系统采用 DOC+SCR+柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)的布置方式^[11-12],并对后处理系统做保温处理。SCR 载体为铜铁基,其有效体积为 26.1 L,最低尿素喷射温度为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验中用 HORIBA 7100 型常规气体分析仪对排气组分进行测定,并用 AVL 483 烟度计测试排气烟度, NH_3 泄漏量由 AVL FTIR 检测,发动机燃油消耗率由 AVL 435 瞬时油耗仪测定。

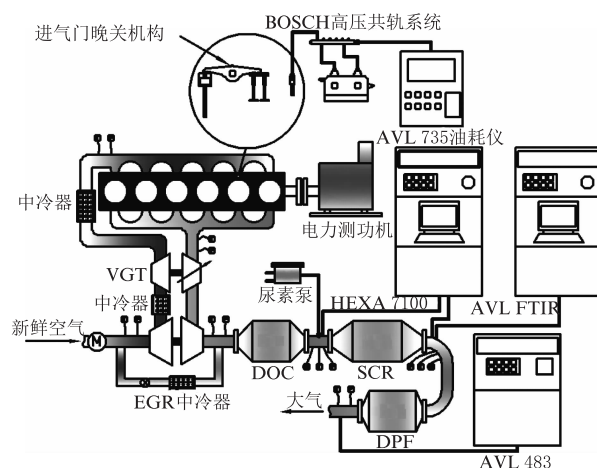


图 1 发动机试验系统结构示意图

表 1 发动机的主要参数

项目	参数
缸径/mm×行程/mm	126×155
排量/L	11.596
压缩比	17
燃烧室型式	敞口 ω 型(带 BUMP 环)
进气方式	增压中冷
喷油器孔数×孔径/mm×锥角/(°)	8×0.217×143
最高转速/(r·min ⁻¹)	2 200
最大功率/kW	353(2 100 r/min)
最大扭矩/(N·m)	1 970(1 200~1 500 r/min)
最高燃烧压力/MPa	16.5

采用热管理技术前 WHTC 冷起动测试循环中 SCR 催化器温度的变化如图 2 所示。在发动机冷起动过程中,循环前 500 s 内 SCR 催化器温度始终较

低,第 500 s 至第 600 s 内 SCR 催化剂温度的变化趋势最为显著,因而在循环第 600 s 附近实现 SCR 系统起燃具有较高的可行性。考虑到尿素的结晶和 SCR 系统转化效率两方面的限制条件,试验中设定尿素的起喷温度为 190 ℃。在 WHTC 测试循环中发动机转速主要集中在 1 000~1 500 r/min 之间,而在此转速区间内,除去倒拖工况点,发动机负荷率为 10%~30% 的工况点所占比例约为 30%;因此,试验主要选取 1 300 r/min 下低负荷工况(20%~25% 负荷率)进行稳态试验,并根据分析结果选取合适的策略进行 WHTC 冷起动试验。

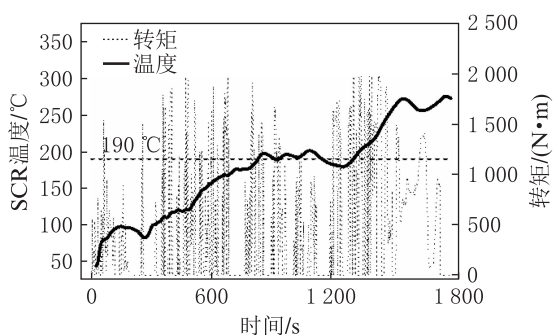


图2 原机 WHTC 冷起动过程 SCR 温度变化曲线图

2 结果与分析

2.1 稳态试验研究

2.1.1 后喷策略

后喷策略中试验选取 1 300 r/min、20% 负荷工况进行研究,试验中发动机的运行参数见表 2。试验中保持主喷油量为 65 mg,研究后喷油量和定时的作用,试验结果如图 3、图 4 所示。图中, $\Delta\varphi$ 为主后喷间的曲轴间隔角度。随着后喷油量的增加和后喷定时的推迟,SCR 催化剂温度逐渐上升。同时,发动机的油耗(BSFC)和 NO_x 排放逐渐升高,碳烟排放大幅降低。在后喷油量一定时,随着后喷定时的推迟,SCR 催化剂温度先是快速升高,当后喷定时达到上止点后 50° 曲轴转角后,SCR 催化剂温度上升的趋势逐渐减缓。这主要是因为在上止点后 50° 曲轴转角时,缸内的燃烧过程已基本结束,后喷的燃油只有少部分在缸内参与燃烧,大部分以未燃碳氢(HC)的形式进入 DOC 并经氧化放出热量,当后喷定时达到上止点后 50° 曲轴转角,进入 DOC 的未燃 HC 总量不再随后喷定时的推迟而显著增加。

从图 3、图 4 还可以看出,后喷油量为 6 mg 时,后喷定时为上止点后 50° 曲轴转角时,SCR 催化剂温度得到显著提高, NO_x 转化效率由 79% 提升至 83%,同时发动机油耗恶化幅度较小。后喷油量为

表 2 发动机运行参数表

项目	参数
油轨压力/MPa	110
主喷定时/(°)	0
VGT 开度/%	55
RIVCA 状态	关闭(OFF)
EGR 率/%	0

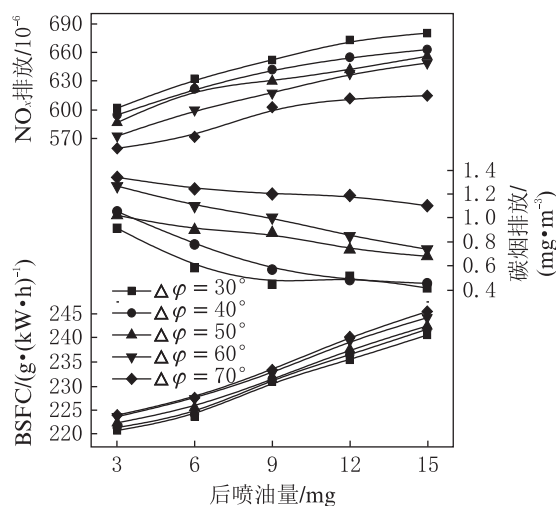


图3 25%负荷下后喷对发动机油耗和排放的影响(主喷油量 70 mg, 喷油定时 -0.5°, VGT 开度 50%, 无后喷时油耗为 217 g/(kW·h))

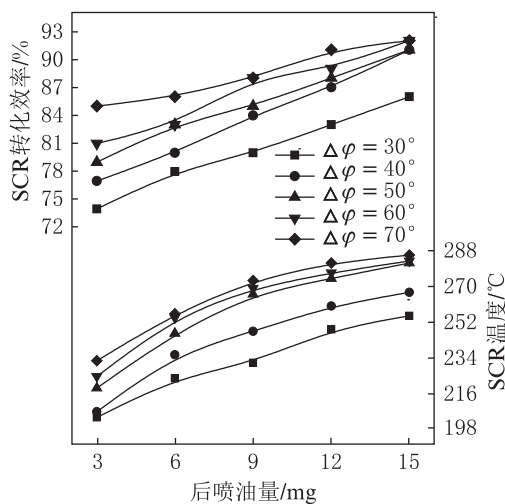


图4 25%负荷下后喷对 SCR 温度和 NO_x 转化效率的作用(氮氮比为 1:1, 无后喷时 SCR 温度为 193 ℃)

9 mg 时,SCR 催化剂温度、 NO_x 转化效率进一步提升,但油耗的恶化程度也随之加重。

2.1.2 VGT 开度

VGT 通过对发动机进气量的灵活调控,可以对缸内燃烧温度和排气温度产生重要影响。试验选取 1 300 r/min、25% 负荷工况点进行研究,试验中发动机的各项运行参数见表 3。图 5 为 25% 负荷工况 VGT 开度对进气量、SCR 催化剂载体空速的影响。

从图 5 中可以发现,发动机的进气量和载体的空速随 VGT 开度的增大而快速降低。这是因为随着 VGT 开度的增大,高压级增压器压端的做功能力急剧降低。进气量的减少使得缸内的充量密度变小,热容量降低,当燃烧放出的总热量保持不变(循环油量不变)时,缸内平均温度得到显著提升。此外,随着进气量的减少,压缩终了时刻缸内充量的温度逐渐降低,燃油的滞燃期延长,预混燃烧比例增大,平均燃烧温度进一步提高。较高的缸内燃烧温度对提升后处理器温度有直接作用(图 6)。从图 6 还可以发现,当 VGT 开度大于 60% 后,SCR 催化器温度随 VGT 开度增大而上升的趋势逐渐减缓。这主要是因为 VGT 开度大于 60% 以后,发动机的进气量已基本减少到稳定值,缸内最高平均温度的变化已经非常小(图 5、图 6)。随着 VGT 开度的增大,SCR 催化器的温度逐渐升高,同时 SCR 催化器载体的空速大幅降低,两者的综合作用使得 VGT 开度对 SCR 催化器的转化效率产生重要影响,如图 7 所示。

表 3 发动机运行参数表

项目	参数
EGR 率/%	0
喷油压力/MPa	110
冷却液温度/℃	80
环境温度/℃	26.5
RIVCT 状态	关闭(OFF)

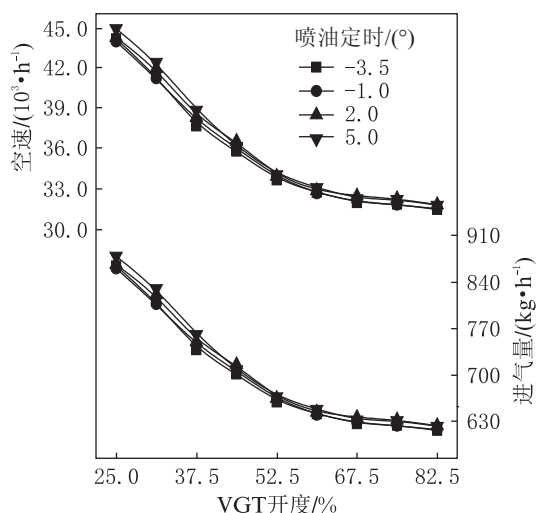


图 5 25%负荷下 VGT 开度对进气量、空速的影响

在 25% 负荷工况,随着 VGT 开度的增大,发动机油耗率逐渐得到改善,如图 8 所示。这是因为 VGT 开度增加后,增大的排气流通面积使得发动机的进排气压力差值减小,发动机泵气损失降低,因此随着 VGT 开度的增大,油耗将逐渐得到优化。在 VGT 开度大于 60% 以后,随着 VGT 开度的进一步

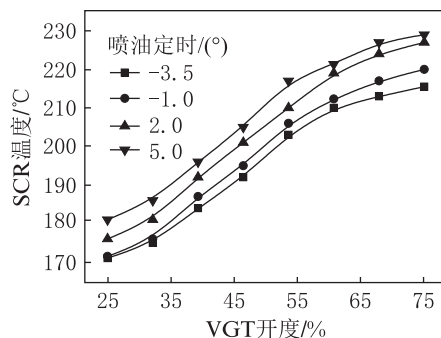


图 6 25%负荷下 VGT 开度对 SCR 催化器温度的影响

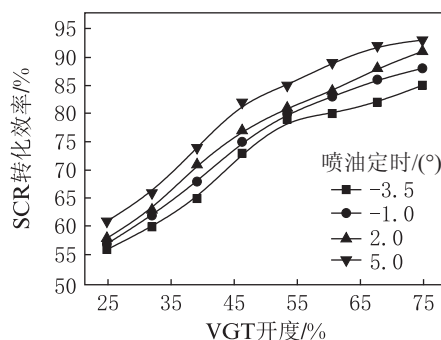


图 7 25%负荷下 VGT 开度对 SCR 催化器转化效率的影响 (氨氮比为 1:1)

增大,油耗维持在最低值而不会发生恶化。这是因为此工况发动机的循环油量少,对新鲜空气量的要求低,即使当 VGT 开度为 82.5% 时,也能保证过量空气系数在 3.5 以上,缸内燃烧不会发生恶化,因而油耗随 VGT 开度的增加单调递减。也正因为如此,随着 VGT 开度的增大,烟度值虽然会有小幅升高,但仍能维持在较低水平,如图 9 所示。

从以上分析可以看出,增大 VGT 开度是提高低负荷工况 SCR 催化器温度的有效途径。但是在瞬态过程中,低负荷工况过大的 VGT 开度会加剧突加负荷时气路的延迟作用,导致发动机的转矩响应特性变差,碳烟、HC 和一氧化碳(CO)排放恶化。因此,低负荷工况 VGT 的开度并不是越大越好。

2.1.3 RIVCA 状态

试验发动机安装的滑阀式两模式进气门晚关机构由课题组自行开发设计^[7]。两模式是指气门既可以按照原凸轮型线运行,也可以通过液压活塞产生一个附加升程,通过附加升程叠加在原凸轮升程上使进气门晚关。当 RIVCA 处于工作模式时,进气门关闭时刻推迟,部分进入气缸的空气被上行的活塞推出,使得参与燃烧的空气量减少。图 10 为不同转速下 25% 负荷工况 RIVCA 开启前后进气量的对比图。从图 10 中可以发现,RIVCA 开启后发动机进气量显著减少。

从有关 VGT 的技术分析可知,对于 1 300 r/min

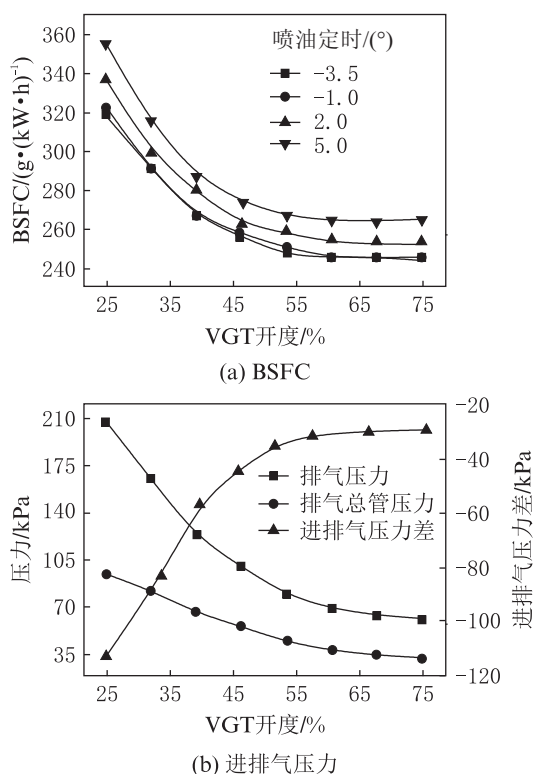


图8 25%负荷下 VGT 对油耗和进排气压力的影响

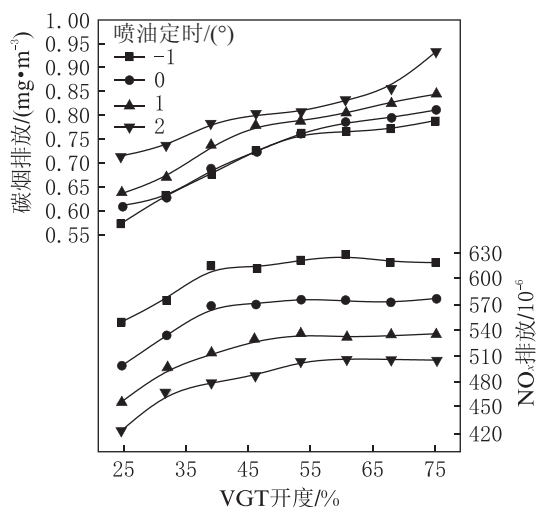


图9 25%负荷工况下 VGT 开度对排放的影响

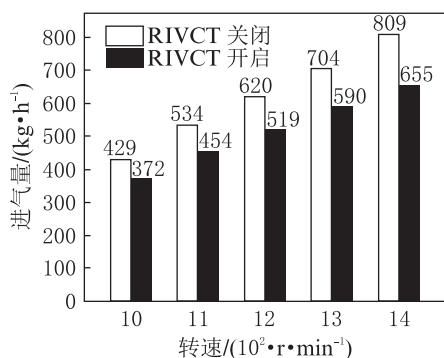


图10 25%负荷工况下 RIVCT 对进气量的影响

的低负荷工况点,当 VGT 开度大于 60%以后,VGT 对进气量的调节作用已经很小。此时为了进一步减少进气量以提高 SCR 催化器温度,可以将 RIVCA 开启。RIVCA 开启前后 VGT 对进气量和 SCR 催化器温度的影响如图 11 所示。从图 11 中可以看出,在 VGT 开度大于 60%的情况下,开启 RIVCA 可使进气量进一步减小,从而使 SCR 催化器温度进一步提升。在 1 300 r/min 低负荷工况,由于发动机气门关闭延迟小,米勒循环作用较弱,同时由于高压油泵的工作要消耗一部分机械功,故而开启 RIVCA 后发动机的热效率会有小幅降低^[9]。如表 4 中数据所示,随着发动机转速的升高,米勒循环作用逐渐加强,RIVCA 改善发动机油耗的作用逐渐显现。

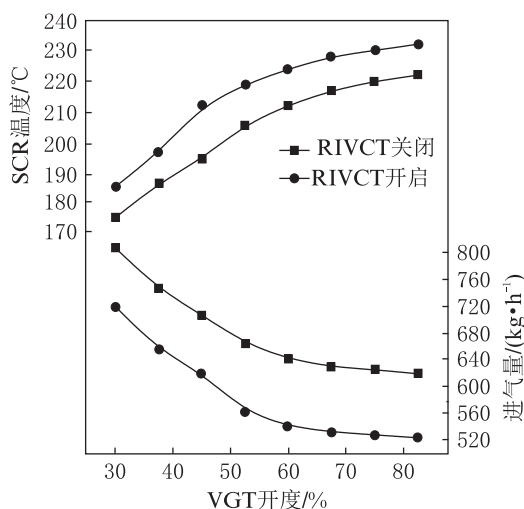
图11 RIVCT 对进气量和 SCR 催化器温度的影响 (喷油定时 -0.5°)

表4 25%负荷下 RIVCA 对发动机特性的影响

项目	参数					
转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 000		1 300		1 500	
RIVCA 状态	关闭	开启	关闭	开启	关闭	开启
BSFC/ $(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	225	231	238	243	252	250
NO_x 排放/ 10^{-6}	704	747	605	662	524	580
碳烟排放/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.70	0.76	0.63	0.71	0.55	0.59

RIVCA 虽然可以有效提高发动机排气温度,但是其工作效果受机油温度(黏度)的影响较大,当机油温度低于 30°C 时,RIVCA 液压机构的响应特性将变差,所以需要根据机油温度对 RIVCA 的工作状况进行修正。

2.2 WHTC 冷起动试验

2.2.1 后喷策略与 VGT-RIVCA 策略的比较

稳态试验结果显示,采用后喷技术和 VGT-RIVCA 策略可以有效提高低负荷工况后处理器的

温度。为了比较后喷策略和 VGT-RIVCA 策略,试验制订了不同的策略进行了 WHTC 冷起动试验。在后喷策略中,为了使后喷油量全部用来提高排气温度,后喷定时统一选取为至上止点后 60° 曲轴转角,后喷油量为 $3\sim 6\text{ mg}$ 和 $5\sim 10\text{ mg}$ 。 $3\sim 6\text{ mg}$ 后喷策略中后喷油量分布如表 5 数据所示。

表 5 $3\sim 6\text{ mg}$ 后喷策略后喷油量 MAP 图

负荷率/ %	后喷油量/mg					
	1 000 r/min	1 100 r/min	1 200 r/min	1 300 r/min	1 400 r/min	1 500 r/min
5	6	6	6	5	5	5
10	6	6	5	5	5	5
15	6	5	5	4	4	4
20	5	5	4	4	4	4
25	4	4	4	3	3	3
30	3	3	3	3	3	3
35	—	—	—	—	—	—

VGT-RIVCA 策略中,将 RIVCA 的开启工况向低速低负荷工况进行了拓展,拓展方式如表 6 所示。表 6 中,“○”表示 RIVCA 始终关闭;“⊕”表示 RIVCA 由关闭拓展为开启状态;“⊙”表示 RIVCA 始终开启。低负荷工况 VGT 开度分别加大 10% 和 20% 。试验结果如图 12、图 13 所示,采用 $3\sim 6\text{ mg}$ 后喷油量和增大 10% VGT 开度两种策略都可以使 SCR 催化器在循环第 600 s 附近起燃。后喷策略对 SCR 催化器温度的提升幅度较大,但造成的油耗损失也较大,在采取 $3\sim 6\text{ mg}$ 的后喷油量时,发动机油耗恶化了 3.5% , NO_x 排放量从 $1.78\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 降低至 $0.913\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。采取将 VGT 开度增大 10% 策略时,发动机油耗仅有约 1.1% 恶化, NO_x 排放量由 $1.78\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 减低至 $1.218\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。后喷油量增加至 $5\sim 10\text{ mg}$ 时,SCR 催化器温度进一步提高,SCR 催化器系统的起燃时间提前至 465 s, NO_x 排放量降至 $0.859\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,发动机油耗恶化 7.8% 。而采取 VGT 开度增大 20% 策略时,SCR 催化器温度达到 190°C 的时刻提前至第 485 s, NO_x 排放量降低为 $0.896\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,但油耗恶化也将加剧,恶化率为 2.7% 。

与稳态过程不同,瞬态过程中增大低负荷工况 VGT 开度将导致发动机油耗恶化,这主要是因为低负荷工况较大的 VGT 开度会加剧气路的延迟作用,造成突加负荷工况缸内燃烧恶化。

2.2.2 VGT-RIVCA 策略的优化标定试验

WHTC 测试循环中,发动机转速主要集中在 $1\,000\sim 1\,500\text{ r/min}$ 之间。在此转速区间内,当发动机负荷低于 20% 时,开启 RIVCA 会造成严重的失火现象,因此 RIVCA 的运用主要集中在负荷大于

表 6 RIVCA 工作区域拓展示意图

负荷率/ %	RIVCA 状态					
	1 000 r/min	1 100 r/min	1 200 r/min	1 300 r/min	1 400 r/min	1 500 r/min
10	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	⊙
30	○	○	⊕	⊕	⊙	⊙
40	○	⊕	⊕	⊕	⊙	⊙
50	⊕	⊕	⊕	⊙	⊙	⊙
60	⊕	⊕	⊙	⊙	⊙	⊙
70	⊕	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

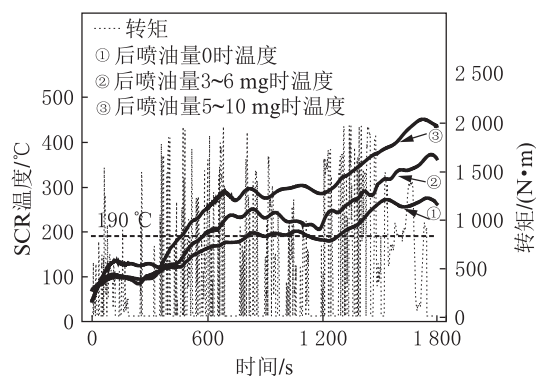


图 12 WHTC 冷起动过程 SCR 催化器温度随后喷油量的变化

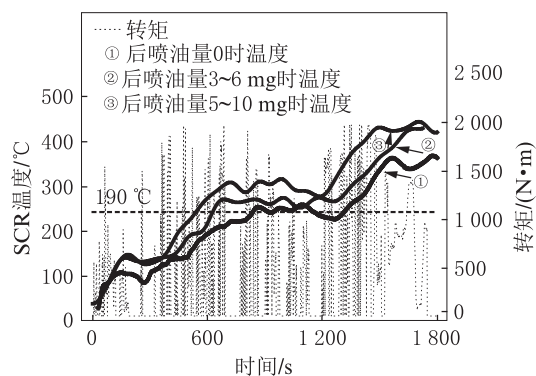


图 13 WHTC 冷起动过程 SCR 催化器温度随 VGT 开度的变化

20% 的区域,如表 7 所示。此外,由于开启 RIVCA 和增大 VGT 开度都是通过减少进气量来提高排气温度,所以 VGT-RIVCA 策略的优化主要集中在 VGT 开度的标定。

试验中设定 VGT 开度不变和分别加大 $5\%\sim 10\%$ 、 $10\%\sim 15\%$ 和 $15\%\sim 20\%$ 三种标定策略,依次计为策略 1~策略 4 分别进行 WHTC 冷起动测试循环试验,试验结果如图 14 所示。低负荷工况 VGT 开度增大 $5\%\sim 10\%$ 后,SCR 催化器温度得到小幅提升,SCR 催化器系统的起燃时间提前至 610 s, NO_x 排放量由 $1.78\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 减低至 $1.208\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,同时发动机油耗恶化 1.1% 。将低负荷工况 VGT 开度加

大10%~15%,SCR催化剂温度达到190℃的时间进一步提前至540 s,NO_x排放减低为0.929 g/(kW·h),发动机油耗恶化1.4%。低负荷工况VGT开度增大15%~20%时,SCR催化剂温度得到显著提高,达到190℃的时刻提前至485 s,NO_x排放量降低为0.896 g/(kW·h),但油耗恶化加剧,恶化率为2.7%。通过三种VGT开度的对比试验可以确定,VGT开度增大10%~15%较为适宜。

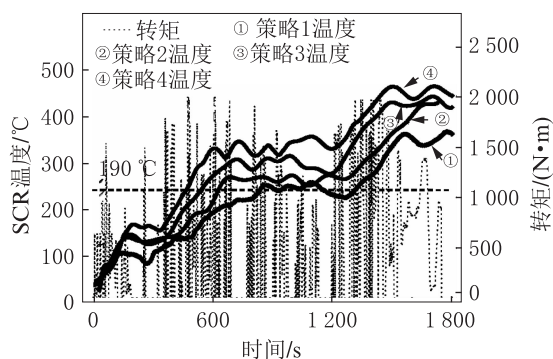


图14 WHTC冷起动过程SCR催化剂温度随VGT开度的变化

3 结论

(1) 利用燃油后喷、增大VGT开度和进气门晚关技术可以有效提高低负荷工况后处理器的温度。其中,后喷技术对提高SCR催化剂温度的作用最为显著,但是造成的油耗损失也较大。相比较而言,增大VGT开度可以在改善发动机油耗的同时提高排气温度,是具有突出优势的热管理技术措施。

(2) 随着VGT开度的增大,其对发动机进气量和排气温度的调节作用逐渐减弱,并且随着VGT开度的增大,气路的延迟作用也逐渐加剧。在增大VGT开度的基础上配合使用进气门晚关技术,可以有效减少进气量,提高SCR催化剂温度,缓解气路的延迟作用。

(3) 在WHTC冷起动过程中,后喷策略和VGT-RIVCA策略都可以使SCR催化剂系统的起燃时间缩减至循环第600 s以内。在达到相似的SCR催化剂起燃效果时,后喷技术造成的油耗损失比VGT-RIVCA策略高2%以上。

(4) SCR催化剂的起燃时间越短,所需付出的油耗损失也越大。通过采用适当的VGT-RIVCA策略,可以使SCR催化剂的起燃时间缩减至540 s,NO_x的排放量由1.78 g/(kW·h)降低为0.929 g/(kW·h),同时发动机的油耗仅有1.4%的恶化。

参考文献:

[1] GARY D, JAYANT V. Diesel cold-start emission control

research for 2015-2025 LEV III emissions[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2013, 2013-01-1301.

- [2] HARTWING B, THORSTEN S, CHRISTOPHER S. Exhaust temperature management for diesel engines assessment of engine concepts and calibration strategies with regard to fuel penalty[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2011, 2011-24-0176.
- [3] MATTEO D C, FEDERICO S. Fuel economy optimization of Euro 6 compliant light commercial vehicles equipped with SCR [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2014, 2014-01-1356.
- [4] BAUDER R, EIGLMEIER C, EISER A, et al. The new high-performance diesel engine from Audi, the 3.0 L V6 TDI with dual-stage turbocharging[R]. 2011 International Vienna Motor Symposium, 2011.
- [5] 裴毅强, 苏万华, 林铁坚. 一种基于稀扩散燃烧的BUMP燃烧室及其对柴油机碳烟和NO_x排放影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2002, 20(5): 381-386.
PEI Y Q, SU W H, LIN T J. The BUMP combustion chamber presented based on the concept of lean diffusion combustion in a D. I. diesel engine with common rail fuel injector [J]. Transaction of CSICE, 2002, 20(5): 381-386.
- [6] 苏万华. 高密度-低温柴油机燃烧理论与技术的研究与进展[J]. 内燃机学报, 2008, 26(S1): 1-9.
SU W H. Advanced high density-low temperature combustion theory and technology[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(S1): 1-9.
- [7] YU W B, LIU B, LI Y, et al. A hybrid combustion control strategy for heavy duty diesel engines based on the technologies of multi-pulse injections, variable boost pressure and retarded intake valve closing timing [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2014, 2014-01-1356.
- [8] 战强. 重载柴油机可变气门系统的开发及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [9] 郭斌扬, 朴有哲, 苏万华. 基于两级增压与进气门晚关协同作用对柴油机热效率和排放的影响[J]. 内燃机学报, 2013, 31(6): 481-488.
WU B Y, PU Y Z, SU W H. Effect of two stage turbocharging system and retard intake valve closing timing on thermal efficiency and emissions in a partially premixed combustion diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(6): 481-488.
- [10] 战强, 韩志强, 苏万华. 两模式进气门晚关系统对柴油机燃烧及排放特性的影响[J]. 内燃机学报, 2013, 31(1): 1-8.
ZHAN Q, HAN Z Q, SU W H. Effects of two-mode late intake valve closing system on diesel engine combustion and emissions[J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(1): 1-8.
- [11] SCHAEFER M, HOFMANN L, GIROT P, et al. Investigation of NO_x and PM reduction by a combination of SCR-catalyst and diesel particulate filter for heavy-duty diesel engine [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2009, 2009-01-0912.
- [12] VRESSNER A, GABRIELSSON P, GEKAS I, et al. Meeting the Euro VI NO_x emission legislation using a Euro IV base engine and a SCR/ASC/DOC/DPF configuration in the world harmonized transient cycle [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2010, 2010-01-1216.