

国六柴油机排气热管理技术试验研究

孟令军,王月华,赵文辅,高宇航,张宝坤

中国第一汽车集团有限公司,吉林 长春 130011

摘要:进行柴油机稳态和瞬态循环台架试验,研究废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)、进气节流和燃油后喷 3 种热管理技术对柴油机排气温度的影响。研究表明:采用 EGR、进气节流阀和燃油后喷均可提高排气温度,其中进气节流阀的升温效果最好;综合使用 EGR、进气节流阀和燃油后喷技术可有效提高排气温度和选择性催化还原效率,降低 NO_x 和烟度排放,使柴油机排放达到国六标准要求。

关键词:柴油发动机;排气温度;进气节流阀;EGR;燃油后喷

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)02-0001-06

引用格式:孟令军,王月华,赵文辅,等. 国六柴油机排气热管理技术试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(2):1-6.

MENG Lingjun, WANG Yuehua, ZHAO Wenfu, et al. Experimental study on exhaust heat management technology of CHINA VI diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(2):1-6.

0 引言

随着国六标准^[1]的逐步实施,对排气污染物的要求更加严格,柴油机排气污染物主要是氮氧化物(NO_x)和颗粒物(particulate matter, PM),国六标准大幅加严了 NO_x 和 PM 排放的限值。为满足标准要求,进一步降低排放,柴油机普遍采用了选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)和柴油颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)等排气后处理系统。后处理系统对柴油机排气温度和排放物浓度非常敏感,排气温度直接影响 SCR 系统的效率。中、轻型柴油机排量小,排气温度较低,城市工况下 SCR 系统效率普遍较低,甚至可能失效。

柴油机采用排气热管理技术提升排气温度有利于提高 SCR 的效率和 DPF 的再生,但会增加燃油消耗和排放物中碳烟的含量,必须对发动机电控进行标定,优化和合理使用排气热管理技术。本文中主要研究进气节流、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)和燃油后喷 3 种发动机排气热管理技术,通过发动机台架试验,研究和分析柴油机低速、低负荷、低排温工况下 3 种技术最优的控制方式,在兼顾油耗和动力性的同时,有效提升排气温度。

1 试验设备及研究方案

1.1 样机和测试设备

试验样机为某国产 4 缸柴油机,在柴油机进气管路前端安装进气空调和空气滤清器,保证进气质量,控制进气温度、湿度恒定;柴油机进气管路外接中冷器,控制增压后的进气温度不超过 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$;在进气管安装节流阀和 EGR 系统;柴油机增压器出口连接后处理器总成,连接的排气管路按照整车应用的尺寸和形

收稿日期:2021-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51976077)

第一作者简介:孟令军(1986—),男,山东济宁人,工学硕士,主要研究方向为柴油机试验、电控标定,E-mail:menglingjun@rdc.faw.com.cn。

式安装。柴油机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 柴油机主要技术参数

形式	排量/L	着火顺序	额定功率/kW	供油方式
直列四缸、四冲程、水冷、增压	4	1-3-2-4	132	高压共轨

进行发动机台架试验,试验方法及测试设备严格按照国六标准要求。试验室环境采用标准状态:室温为 25 ℃,进气相对湿度为 50%,标准大气压力。发动机试验采用全套 AVL 控制台架和操作系统,测试设备符合国六标准要求,排放物测试设备采用 AVL 全流稀释采样系统,试验测试的边界条件参照文献[2]。试验主要测试设备型号如表 2 所示。

表 2 试验主要测试设备型号

燃油消耗测量仪	空气流量计	进气空调	冷却液恒温装置	增压中冷器	微碳烟计	全流稀释采样系统
AVL740	ABB	ROM 1500	AVL-CH12	CH12	AVL415	AVL-CVS-i60

1.2 试验研究方案

排气热管理技术主要针对发动机低负荷工况,发动机低负荷工况下排气温度相对较低,造成后处理系统载体温度下降,当 SCR 载体温度过低时,SCR 效率明显下降,导致排气污染物中的 NO_x 浓度增大^[3]。本文中选取发动机低负荷区的特征工况点进行试验研究,通过提高排气温度,提高 SCR 载体温度和 SCR 效率。

分别进行稳态和瞬态循环工况试验,稳态试验选取稳态测试循环(world harmonized steady-state cycle, WHSC)中的 25%最大转矩工况点,瞬态试验主要考察瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)中的低负荷区域^[4]。在发动机稳定运转的前提下,通过调整进气节流阀、EGR 阀和燃油后喷油量,实现对排气温度的控制。进气节流阀不工作时开度为 0,进气管路完全封闭时进气节流阀开度为 100%;EGR 管路不工作时 EGR 阀开度为 0,EGR 管路完全打开时 EGR 阀开度为 100%。排气温度升高也会影响发动机的经济性、动力性和原机排放(发动机排出的未经后处理器处理的气体)水平,因此需要通过 WHTC、WHSC 和车载排放测试系统(portable emission measurement system, PEMS)循环验证,对发动机油耗、动力性、排气烟度和 NO_x 浓度等进行综合评价和对比分析,使柴油机采用排气热管理技术后,排放水平既符合国六标准要求,也尽可能地贴近和符合整车实际应用要求^[5]。

2 稳态试验分析

2.1 EGR、进气节流和燃油后喷对柴油机性能的影响

EGR、进气节流和燃油后喷 3 种排气热管理技术的本质都是降低空燃比,EGR 和进气节流是通过调整 EGR 阀和进气节流阀开度,控制和减少进入发动机气缸的新鲜空气量,燃油后喷的目的是增加参与燃烧的燃油量^[6]。单独使用 EGR、进气节流和燃油后喷 3 种排气热管理技术进行 WHSC 试验,测试 3 种技术单独作用时对 SCR 入口温度(即排气温度)、比油耗和排放烟度的影响。

2.1.1 EGR

WHSC 稳态工况试验选择 25%最大转矩工况点,发动机转速为 1463 r/min,SCR 入口温度、比油耗和烟度随 EGR 阀开度变化曲线如图 1 所示。

由图 1 可知:EGR 阀开度从 0 增大到 50%,SCR 入口温度、比油耗和排气烟度都随之平稳增大,其中 EGR 阀开度为 15%~30%时,SCR 入口温度增长速度最快,基本呈线性增长,比油耗也明显上升;EGR 阀开度大于 50%,SCR 入口温度、比油耗和排气烟度不再有明显变化,这是由于 EGR 阀开度大于 50%后,

EGR 管路基本为全开状态,EGR 进气量不再有明显变化,排气温度及性能也趋于稳定;EGR 阀开度为 50%时,SCR 入口温度、比油耗和烟度达到最高,与 EGR 阀开度为 0 时相比,SCR 入口温度提升 18 ℃,比油耗相对增加了 7.1 g/(kW·h),排气烟度 FSN 达到最高,为 0.62。

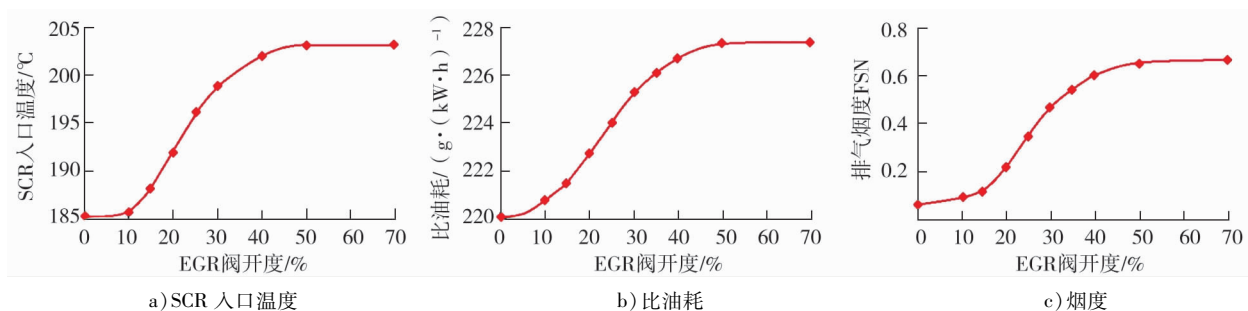


图1 SCR 入口温度、比油耗和烟度随 EGR 阀开度的变化曲线

2.1.2 进气节流

SCR 入口温度、比油耗和烟度随节流阀开度的变化曲线如图 2 所示(实际应用中发动机进气节流阀最大开度为 95%,进气节流阀开度大于 95%时,由于空燃比过低发动机不能稳定工作)。

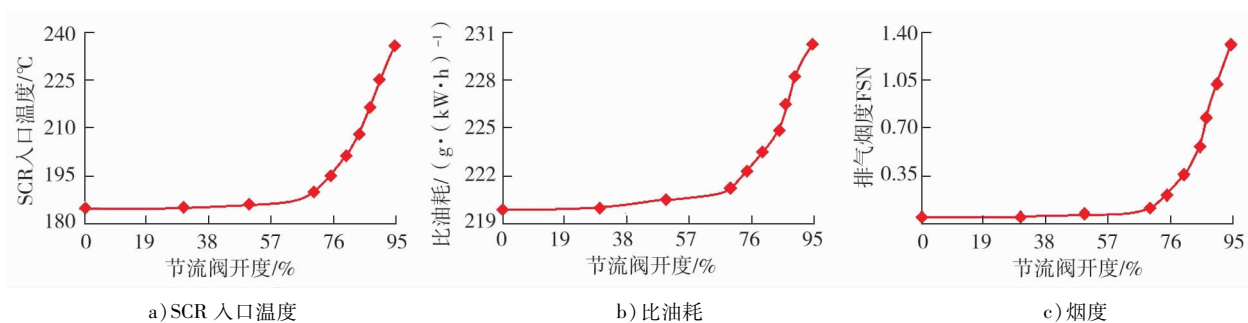


图2 SCR 入口温度、比油耗和烟度随节流阀开度的变化曲线

由图 2 可知:进气节流阀开度从 0 增大到 95%,SCR 入口温度、比油耗和排气烟度都随之增大;进气节流阀开度为 0~70%,温度、比油耗和排气烟度变化均不明显,这是由于低负荷工况的进气量较小,节流阀开度小幅度变化不会影响发动机进气流;节流阀开度达到 70%时,比油耗、排气烟度、排气温度开始明显增加;节流阀开度为 70%~95%是发动机低负荷工况进气节流阀有效工作区域,随着节流阀开度变大,SCR 入口温度、比油耗和排气烟度均显著提高;相对于初始状态(节流阀开度为 0),节流阀开度为 90%时 SCR 入口温度提升了 40 ℃,比油耗增大了 8 g/(kW·h),排气烟度 FSN 约增大 1;节流阀开度为 95%时,SCR 入口温度进一步提高,但此时的排气烟度 FSN 过高,超过 1.25,已不适合实际应用。

2.1.3 燃内后喷

固定后喷的喷油提前角对应的曲轴转角为上止点后 15°,控制每循环后喷油量从 0 增大至 30 mg,SCR 入口温度、比油耗和烟度随每循环后喷油量的变化曲线如图 3 所示。

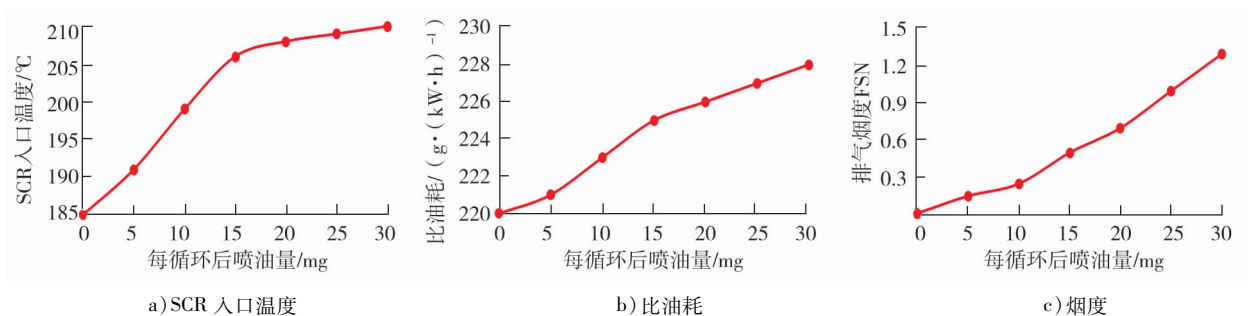


图3 SCR 入口温度、比油耗和烟度随每循环后喷油量的变化曲线

由图 3 可知:随着后喷油量的增加,比油耗和排气烟度基本呈线性增大,SCR 入口温度也平稳上升;每循环后喷油量为 15 mg 时,相对于初始状态(后喷油量为 0),SCR 入口温度提升了 21 ℃,比油耗增大了 5 g/(kW·h),排气烟度 FSN 增大 0.5;当每循环后喷油量大于 15 mg 后,SCR 入口温度不再明显上升,但烟度和油耗继续增加,这是主喷燃烧消耗了大部分新鲜空气,后喷燃烧可用的空气有限,每循环后喷油量为 15 mg 时就已处于低空燃比状态。

2.2 热管理技术提升排温效果

国六柴油发动机后处理系统普遍采用 DPF 和 SCR 的组合方式,既提高排气温度,同时控制排气烟度。排气烟度过大会造成 DPF 负荷过重,再生周期短。稳态工况不同排气烟度时 EGR、进气节流、燃油后喷 3 种技术对提高排温效果如表 3 所示。

由表 3 可知:同等排气烟度下,进气节流提升排气温度效果最好,能够达到的温度最高,为 225 ℃;EGR 提升温度效果有限,最大为 203 ℃;燃油后喷的提升温度效果介于两者之间,为 209 ℃。

稳态工况发动机试验表明,3 种热管理技术提升排气温度的高效区域分别是:EGR 阀开度为 20%~30%;节流阀开度为 70%~90%,每循环燃油后喷油量为 5~15 mg。

表 3 稳态工况不同烟度时 3 种技术提高排温效果

烟度 FSN	温度/℃		
	EGR	进气节流	燃油后喷
0.1	188	189	188
0.2	192	195	195
0.3	195	199	201
0.4	198	204	204
0.5	200	207	206
0.7	203	215	208
1.0	—	225	209

3 瞬态试验分析

3.1 EGR、进气节流和燃油后喷对排温和排放的影响

单独使用 EGR、进气节流和燃油后喷进行 WHTC 试验,测试使用 3 种排气热管理技术对 SCR 入口温度、发动机 NO_x 和 PM 排放的影响^[7]。EGR、节流阀、燃油后喷 3 种排气热管理技术的 WHTC 试验冷热态加权测试结果如表 4 所示。

由表 4 可知:单独使用进气节流阀时发动机 SCR 入口温度最高,为 243 ℃,排放物的控制效果较差(NO_x 和 PM 比排放最大);单独使用 EGR 时 NO_x 和 PM 比排放最小,但 SCR 入口温度提升效果一般,SCR 入口温度比进气节流阀低 21 ℃,差距明显;燃油后喷的发动机平均 SCR 入口温度提升效果一般,与 EGR 相比,燃油后喷 SCR 入口温度基本相同,但 NO_x 和 PM 比排放大幅增加。

表 4 3 种热管理技术的排温排放物 WHTC 测试结果

热管理技术	平均 SCR 入口温度/℃	NO _x 比排放/(mg·(kW·h) ⁻¹)	PM 比排放/(mg·(kW·h) ⁻¹)
EGR	222	5400	35
节流阀	243	8100	45
燃油后喷	224	6930	40

3.2 怠速和倒拖工况

瞬态工况发动机怠速和倒拖工况较多,与其它工况不同,此时喷油量很小,进入气缸的新鲜空气多,空燃比大,导致排气温度较低^[8],因此怠速和倒拖工况的热管理策略以保温为主。怠速和倒拖工况下,由于发动机喷油量少,燃烧能量和排气温度较低,后处理器载体温度和后处理效率降低^[9]。当发动机从怠速(或倒拖)工况快速提升至中、负荷时,排气污染物快速增加,但后处理载体的升温过程相对较慢,SCR 效率相对较低,NO_x 排放容易出现瞬态峰值,增加尿素结晶的风险^[10]。对于瞬态试验中排气温度较低的怠速和倒拖工况,应尽量减少排气流量,减缓后处理器载体的温度下降^[11]。

EGR 和进气节流都可以有效减少排气流量:EGR 通过使部分排气回到进气管路,降低最终的排气流量;进气节流可直接减少进入发动机气缸的新鲜空气量,从而减少了排气流量^[12]。怠速和倒拖工况

WHTC 瞬态循环试验对比如图 4 所示(图中红色圆圈位置为怠速和倒拖工况影响区域),其中第一次试验不使用 EGR 和进气节流,第二次试验综合使用了 EGR 和进气节流。

由图 4 可知,怠速和倒拖工况 2 组试验的 SCR 入口温度有明显区别。使用 EGR 和进气节流可有效减少进气量和排气量,SCR 入口温度下降缓慢,保温效果明显。

3.3 中、低负荷工况

热管理提升排气温度的主要区域为发动机中、低负荷工况(低于 50% 标定负荷),综合使用 3 种排气热管理技术可有效提升排气温度。倒拖工况使用大 EGR 阀开度(40%)和大节流阀开度(90%),可有效减少新鲜空气进入气缸,起到保温效果;中、低负荷区域,应使用较小 EGR 阀开度(<15%),为节流阀的使用留出空燃比和烟度的裕度。节流阀是提升排气温度的主要方式,但受整车瞬态加速性限制,节流阀开度不能太大,随着负荷的提高,节流阀开度从 90% 逐渐减少至 75%。对因瞬态加速限制节流阀开度的工况,应使用燃油后喷补偿提升温度,循环后喷油量应控制为 15 mg,后喷油量过大将导致排气烟度明显增大。

WHSC、WHTC、发动机台架非标准循环(world not to exceed, WNTE)和 PEMS 为国六标准要求排放达标的 4 个试验项目,对未采用任何排气热管理技术的原机和综合采用 EGR、节流阀、燃油后喷 3 种热管理技术后的柴油机进行 WHSC、WHTC、WNTE、PEMS 试验,柴油机 NO_x 、PM 排放测试结果和排放限值如表 5 所示。

表 5 柴油机 NO_x 和 PM 排放限值及试验结果

试验项目	NO_x 比排放/ $(\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$			PM 比排放/ $(\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$		
	限值	原机	采用热管理技术	限值	原机	采用热管理技术
WHSC	400	946	128	10	2	1
WHTC	460	1164	164	10	2	2
WNTE	600	1320	342	16	3	2
PEMS	690	1288	410	—	—	—

由表 5 可知,采用热管理技术后的柴油机 NO_x 和 PM 比排放均不同程度降低,其中 NO_x 的降低幅度最大,原机的 NO_x 排放无法达到国六标准,综合采用 EGR、节流阀和燃油后喷 3 种方排气热管理技术后,由于 SCR 入口温度和效率提高, NO_x 比排放显著降低,柴油机排放满足国六标准要求,整车可顺利通过环境温度为 -7°C 的 PEMS 试验。

4 结论

在 4 缸柴油机上采用 EGR、进气节流和燃油后喷等排气热管理技术,分别对稳态小负荷工况、瞬态工况和怠速工况进行试验,对比分析热管理技术对 SCR 入口温度、油耗、烟度、 NO_x 及 PM 排放的影响,通过综合运用热管理技术,提升发动机排气温度,使 NO_x 排放达到国六标准要求。

1) 稳态工况下,采用 EGR、进气节流阀和燃油后喷都可提升排气温度,但比油耗和排气烟度升高;EGR 的合理使用范围是 20%~30%,进气节流阀的合理使用范围是 70%~90%,燃油后喷的合理使用范围是 5~15 mg;同等排气烟度时,进气节流阀提升排气温度效果最好,EGR 提升排气温度效果最差。

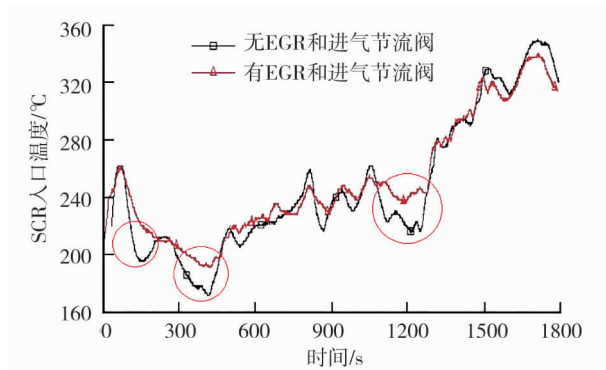


图 4 怠速和倒拖工况 WHTC 瞬态循环试验对比

2)瞬态工况下,采用进气节流的升温效果最好,但 NO_x 比排放最高;采用EGR的发动机 NO_x 和PM排放最低,但升温效果最差;燃油后喷的升温效果与EGR接近, NO_x 和PM比排放略高于EGR,适用于瞬态加速节流阀使用受限的工况。

3)怠速和倒拖工况下,采用节流阀和EGR技术可减少排气流量,保温效果明显。

应根据发动机工况综合使用排气热管理技术,使柴油机瞬态工况的平均排温高于SCR系统最低使用温度,控制 NO_x 及PM比排放达到国六排放的要求。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
- [2] 东风汽车工程研究院. 汽车发动机性能试验方法:GB/T 18297—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [3] 刘悦锋,臧硕勋,孟令军,等. 柴油机 WHTC 循环 NO_x 控制和热管理技术研究[J]. 内燃机与动力装置,2017,34(4):9-16.
- [4] 郑贵聪,颜传武,陆胜旗,等. 发动机排气热管理试验研究[J]. 内燃机工程,2017,38(4):57-62.
- [5] 刘悦锋,臧硕勋,孟令军,等. 柴油机 WHTC 循环排气热管理之后处理技术研究[J]. 汽车科技,2017(4):66-70.
- [6] 唐蛟. 基于热管理的柴油机微粒及 NO_x 排放控制技术研究[D]. 济南:山东大学,2015.
- [7] 田茂军,黄德军,谷雨. 重型车用发动机 WHTC 与 ETC 瞬态测试循环试验对比研究[J]. 内燃机与配件,2015(1):1-4.
- [8] 周大权,李吉爽,林树军,等. 柴油机国六排放控制技术[J]. 汽车零部件,2020(6):106-109.
- [9] 周鹏,杨荣彬,侣庆涛,等. 柴油机热管理策略研究与优化[C]//中国汽车工程学会. 2020 中国汽车工程学会年会论文集(3). 北京:机械工业出版社,2020:192-196.
- [10] 李海庆,陈娟,刘新玲,等. 针对重型柴油机低温工况下的热管理技术[J]. 装备制造技术,2019(10):201-204.
- [11] 刘光义,孙德增,邬斌扬,等. 柴油机 WHTC 冷起动过程 SCR 温度热管理技术研究[J]. 内燃机工程,2017,38(6):145-151.
- [12] 余永华,陈永辉. 基于欧VI排放标准的中型柴油机排气热管理试验研究[J]. 柴油机,2017,39(5):12-16.

Experimental study on exhaust heat management technology of CHINA VI diesel engine

MENG Lingjun, WANG Yuehua, ZHAO Wenfu, GAO Yuhang, ZHANG Baokun

China FAW Group Corporation, Changchun 130011, China

Abstract: The effects of exhaust gas recirculation (EGR), intake throttling valve and fuel late injection on exhaust temperature of diesel engine are studied by engine bench test. The results show that the exhaust temperature can be increased by the above three methods, and the intake throttling valve is the best. The comprehensive use of the three methods in different engine conditions can effectively improve the exhaust temperature and SCR efficiency, reduce NO_x and smoke emissions, and make the engine exhaust pollutants reach the CHINA VI standard.

Keywords: diesel engine; exhaust temperature; intake throttling valve; EGR; fuel late injection

(责任编辑:张啸虎)