

基于欧 VI 排放标准的中型柴油机排气热管理试验研究

余永华^{1,2}, 陈永辉¹

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 尾气后处理的转化效率受排温影响, 而柴油机中低负荷下排温较低, 难以满足要求。以某中型柴油机为对象, 针对影响排温的进气节流阀 (IAT)、电控废气旁通阀 (EWG) 和排气背压阀 (EAT) 进行了中低负荷稳态点控制策略的试验研究。试验结果表明: 在满足低排放和低油耗的前提下, 仅靠单一排气热管理措施难以提高排温, 须两种或两种以上措施合理匹配, 共同作用。基于此, 提出了可行的排气热管理方案, 并在 WHTC 测试循环下验证了该方案可使试验柴油机在保证经济性和排放的变化在可接受范围内, 满足排温要求。

关键词: 中型柴油机; 排气热管理; WHTC 测试循环; 排温; 欧 VI 排放标准

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)05-0012-05

Experimental Study on Exhaust Gas Thermal Management Technology for Medium Diesel Engines Based on Euro VI Emission Standard

Yu Yonghua^{1,2}, Chen Yonghui¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063;

2. Key Laboratory of Marine Power Engineering Granted by Ministry of Transport,
Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: The conversion efficiency of exhaust gas after-treatment is influenced by exhaust temperatures. The low exhaust gas temperature at the working condition with low or medium load of diesel engine cannot meet the requirement of exhaust gas after-treatment. A medium diesel engine was chosen as the research object, some measures include intake air throttle (IAT), electronic waste gate (EWG), exhaust air throttle (EAT), which affect exhaust temperatures, have been taken to investigate thermal management control strategies on steady states with low and medium load. The experiment results show that in order to meet with low emissions and low fuel consumption, single measure of exhaust gas thermal management cannot increase the exhaust temperature, therefore, it is necessary to use two or more kinds of measures. Based on the above research, feasible solution of thermal management is put forward and successively verified by WHTC test cycle, which can make the test diesel engine meet the exhaust temperature requirement, and at the same time, keep the change of economy and emissions within acceptable range.

Key words: medium diesel engine; exhaust gas thermal management; WHTC test cycle; exhaust temperature; Euro VI emission standard

收稿日期: 2017-03-08; 修回日期: 2017-04-12

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAG16B00)。

作者简介: 余永华(1975-), 男, 教授, 主要研究方向为柴油机监测诊断与控制技术, E-mail: yyhua@whut.edu.cn。

0 引言

欧 VI 排放标准对柴油机颗粒物的排放提出了更严格的限制要求^[1]，如表 1 所示。如此，颗粒捕集器（diesel particulate filter，DPF）将会得到广泛应用。通常在 DPF 前加氧化型催化剂（diesel oxidation catalyst，DOC）使 DPF 捕集到的颗粒物快速氧化，实现 DPF 再生^[2]。而欧 VI 排放标准的测试循环（world harmonized transient cycle，WHTC）中低负荷工况点较多，排温较低，因此须通过排气热管理措施来提高排温，以满足 DPF 再生的温度需求^[3]。另外，SCR 转化效率也和排温密切相关^[4]。

表 1 欧 V 与欧 VI 排放标准对比

排放物	欧 V	欧 VI
CO/ (g · (kW · h) ⁻¹)	4.0	4.0
HC/ (g · (kW · h) ⁻¹)	0.55	0.16
NO _x / (g · (kW · h) ⁻¹)	4.20	0.46
PM/ (g · (kW · h) ⁻¹)	0.03	0.01
PN/ (# · (kW · h) ⁻¹)		6.0 × 10 ¹¹

排气热管理措施有很多，但是各有优缺点。例如增加喷油压力到一定程度后对排温的提高影响很小，且制造成本增加^[5]；增加后喷燃油量会使燃油经济性变差^[6]；改变喷油正时会影响燃烧的柔顺性^[7]。本文综合考虑经济性和排放要求，通过典型工况点 IAT（进气节流阀）、EAT（电控废气旁通阀）、EWG（排气背压阀）三种阀门的不同试验方案，确定提升排温的最佳热管理措施，最后在 WHTC 测试循环下验证所选方案的合理性。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

试验对象为某 6 缸直列高压共轨中冷柴油机，额定功率 240 kW，额定转速 2 400 (r · min⁻¹)。试验台架总体布置如图 1 所示，主要设备有：AVL 测功器、AVL 7351CST 油耗仪、AVL PUMA 数据采集系统、SESAM i60FT 排放分析系统等。

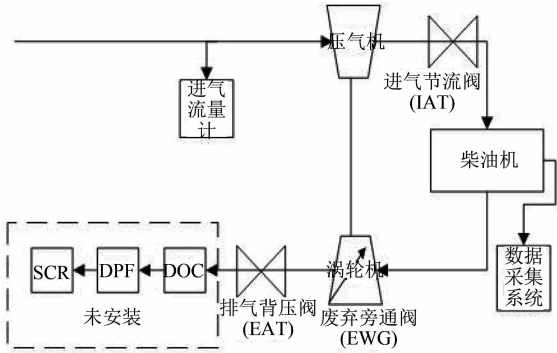


图 1 柴油机试验台架

1.2 试验方案

试验工况如表 2 所示，阀门开度调节范围如表 3 所示。试验的目标要求为：通过热管理措施，在尽可能控制燃油消耗和排放增加的条件下，低速低负荷工况提高排温 100 ℃，中速低负荷工况提高 70 ℃，中速中负荷工况提高 50 ℃，以满足排放后处理（DPF 和 SCR）温度的要求。

表 2 试验工况点

区域	转速/ (r · min ⁻¹)	扭矩/ (N · m)
低速低负荷	800	150
中速低负荷	1 300	190
	1 600	150
中速中负荷	1 600	300

表 3 阀门开度调节范围

阀门		IAT 开度（由开到关）/%	EAT 开度（由开到关）/%	EWG 开度（由关到开）/%
单因子		0, 20, 40, 60, 70, 75, 80, 85, 90, 92, 94, 96, 98	0, 20, 40, 60, 70, 75, 80, 85, 90, 92, 94, 96, 98	0, 20, 40, 60, 70, 80, 90, 100
双因子	IAT + EAT	60, 80, 87	0, 40, 60, 85, 90, 94, 96, 98	
	IAT + EWG	0, 60, 75, 80		0, 10, 30, 50
三因子		0, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80	40, 62. 5, 70, 77. 5, 85	0, 9, 15

2 单因子试验结果及分析

试验研究发现：排温对低速低负荷工况的 PM 排放影响较大，对 NO_x 排放影响较小；而对中速中低负荷工况的 NO_x 排放影响较大，PM 排

放影响较小。所以，下文只分析低速低负荷工况的 PM 排放及中速中低负荷工况的 NO_x 排放。单因子试验中低负荷结论相似，受文章篇幅限制，在此仅以中速低负荷和中速中负荷工况为例，分析其影响规律。其中，排温采用相同工况下排温

变化量分析, NO_x 、PM 和燃油消耗率均采用变化率分析。

(1) 中速低负荷 ($1\,300\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、 $190\ (\text{N} \cdot \text{m})$) 工况

中速低负荷试验结果如图2所示。可以看出: EWG 和 IAT 开度调节可以降低 NO_x 排放, 而 IAT 开度调节会使燃油消耗率变化率上升 9%, 只有 EWG 开度调节满足排放和经济双重要求, 但其只能使排温提高 $40\ ^\circ\text{C}$, 不能满足目标要求。

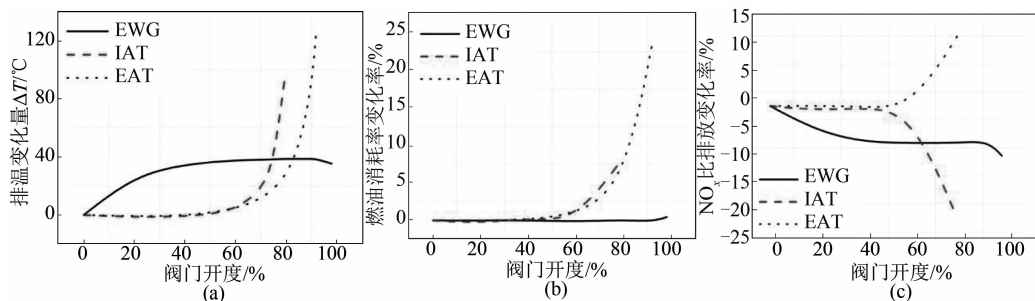


图2 中速低负荷下单因子热管理与柴油机性能参数的变化规律

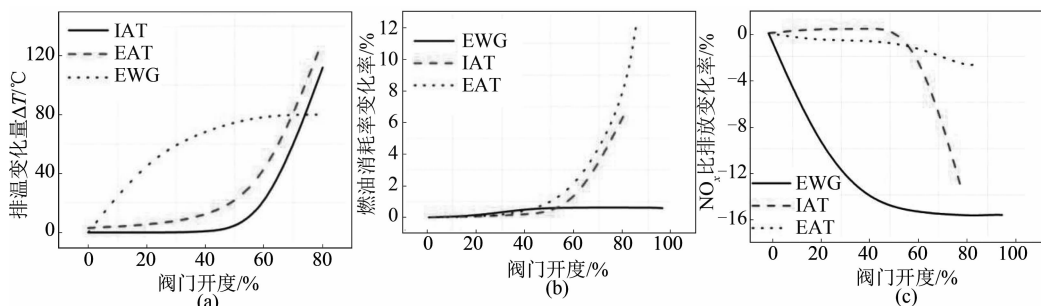


图3 中速中负荷下单因子热管理与柴油机性能参数的变化规律

综上所述, EWG 开度调节仅适用于中速中负荷工况, 不能满足低负荷工况需求, 因此须考虑多因子热管理措施。

3 多因子试验结果及分析

3.1 IAT + EAT 热管理措施

低速低负荷 ($800\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、 $150\ (\text{N} \cdot \text{m})$) 试验结果如图4所示。可以看出: IAT 开度在 $60\% \sim 80\%$, PM 比排放增加 0.25% 左右, 在可接受范围内; 而 EAT 开度在 $90\% \sim 96\%$ 才能满足排温提高 $100\ ^\circ\text{C}$ 的要求, 但燃油消耗率相应增加 35% 左右。因此, 该工况在牺牲燃油消耗的条件下, IAT 开度 $60\% \sim 80\%$, EAT 开度 $90\% \sim 96\%$ 时可满足排温要求。

3.2 IAT + EWG 热管理措施

中速低负荷 ($1\,600\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、 $150\ (\text{N} \cdot \text{m})$) 试验结果如图5所示。可以看出: 在此热管理措施下

(2) 中速中负荷 ($1\,600\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、 $300\ (\text{N} \cdot \text{m})$) 工况

中速中负荷试验结果如图3所示。可以看出: 三种阀门开度调节均可以降低 NO_x 排放, 而 EAT、IAT 开度调节会使燃油消耗率变化率分别上升 12% 、 6% , 只有 EWG 开度调节满足排放和经济双重要求, 且能使排温提高 $50\ ^\circ\text{C}$ 以上, 满足目标要求。从图3中还可以看出: EWG 开度范围选择 $20\% \sim 40\%$ 较为合适。

NO_x 排放均降低, 而 EWG 开度在 0% 和 10% 时燃油消耗率变化率分别上升 15% 和 12% , 只有 EWG 开度在 30% 和 50% 时满足排放和经济双重要求, 且能使排温提高 $70\ ^\circ\text{C}$ 以上, 满足目标要求。因此, 该热管理措施下 IAT 开度选择 $60\% \sim 80\%$, EWG 选择 $30\% \sim 50\%$ 较为合适。

3.3 IAT + EWG + EAT 热管理措施

中速低负荷 ($1\,300\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 、 $190\ (\text{N} \cdot \text{m})$) 试验结果如图6所示。从图6(d)、(e)、(f) 可以看出: EAT 开度 85% 时, 燃油消耗率增加 45% 左右, 不满足经济性要求, 其他 EAT 开度下的经济性和排放的变化均在可接受范围内, 且能使排温提高 $70\ ^\circ\text{C}$, 满足目标要求。

双因子与三因子热管理措施下燃油消耗和排放的变化如图7所示, 可以看出: 双因子的燃油消耗率和排放的变化率比三因子的要小, 所以综合考虑, 选择双因子的热管理措施比较合适。

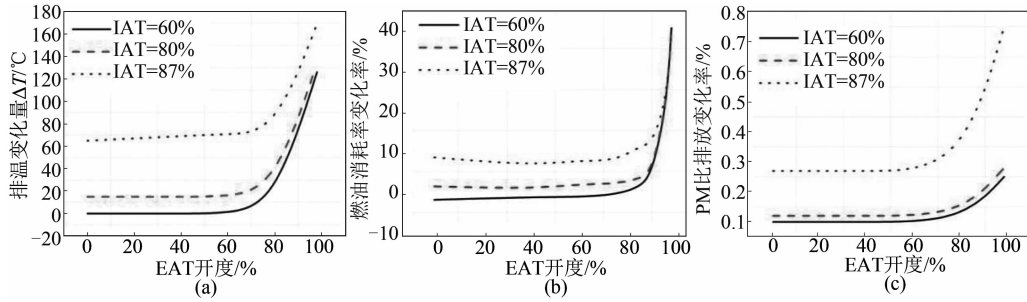


图 4 IAT + EAT 阀门开度调节与柴油机性能参数的变化规律

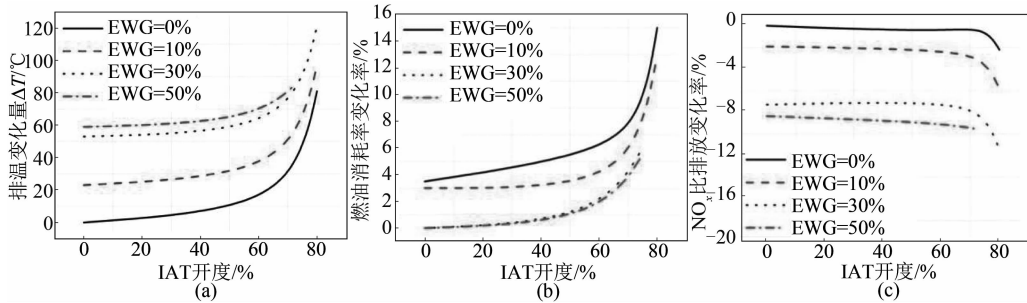


图 5 IAT + EWG 阀门开度调节与柴油机性能参数的变化规律

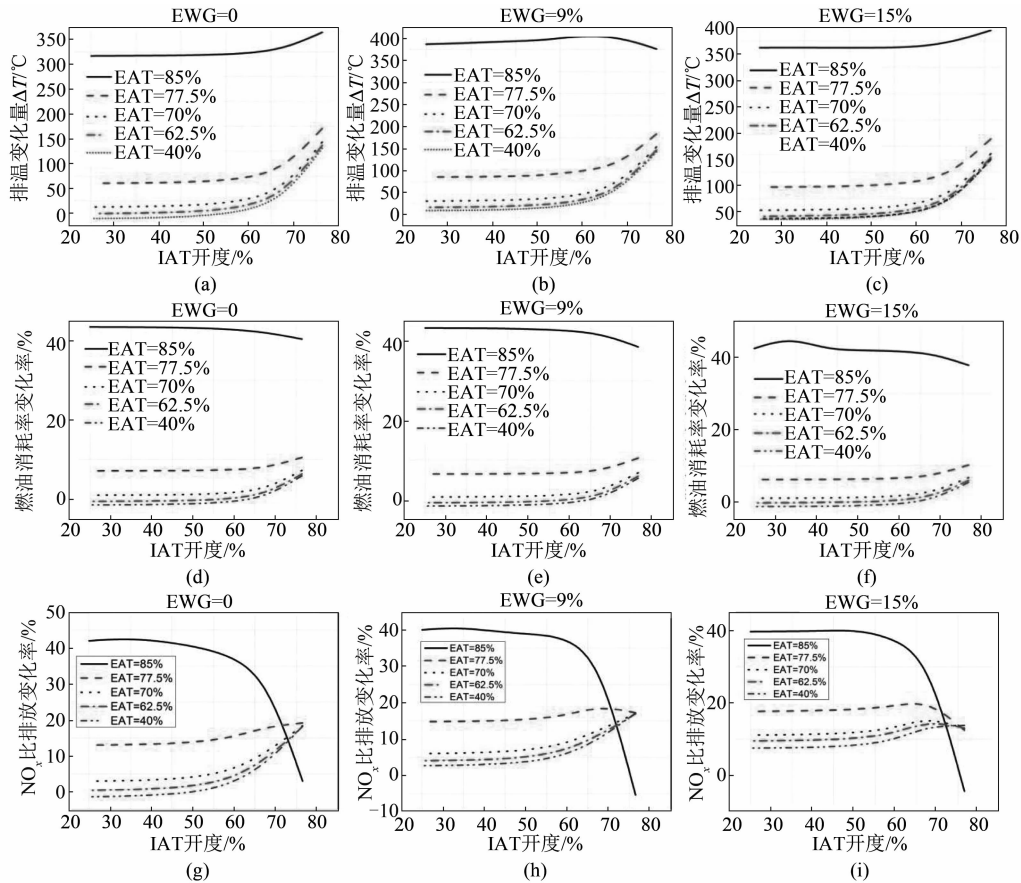


图 6 IAT + EWG + EAT 阀门开度调节与柴油机性能参数的变化规律

4 WHTC 试验验证

通过稳态试验分析得出：低速低负荷时，仅靠

单因子措施不能满足排温要求。因此，总的管理方案为：低速低负荷采用 IAT + EAT，其中 IAT 开度为 60% ~ 80%，EAT 开度为 90% ~ 96%；中速低

负荷时采用 IAT + EWG, 其中 IAT 开度为 60% ~ 80%; EWG 开度为 30% ~ 50%; 中速中负荷时仅用 EWG, 其开度为 20% ~ 40%。

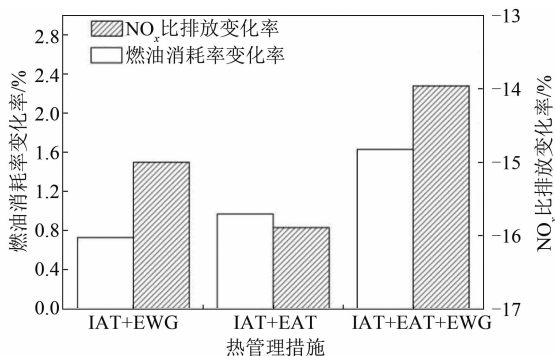


图7 燃油消耗率和排放变化率对比

WHTC 测试循环由一个冷启动和一个热启动组成。测试程序：先进行一个完整的冷启动测试，然后热浸 10 min，发动机熄火后再进行热启动。最终的排放值由冷启动和热启动试验值加权计算得到。

4.1 排温对比

WHTC 测试循环下的排温结果如图 8 所示。可见：通过采用热管理措施，整个测试循环内的排温均得到提高，满足要求。

4.2 排放和油耗对比

WHTC 测试循环下的排放及油耗结果如图 9 所示。可见：采用该排气热管理措施后，NO_x 排放基本不变，PM 增加了 8% ~ 10%，在可接受范围内；而燃油消耗率增加了 3% ~ 5%，亦在可接受范围内。因此，采用该热管理措施能满足排放后处理温度要求。

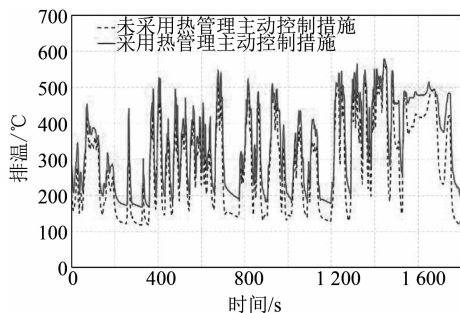


图8 WHTC 测试循环下排温对比

5 结 论

(1) 中低负荷稳态工况试验结果表明：合理

控制 IAT、EAT、EWG 三种阀门的开度可有效提高排温，但仅靠单因子措施很难满足要求，须双因子措施共同调节。也即：低速低负荷时，IAT 开度选择 60% ~ 80%，EAT 开度 90% ~ 96%；中速低负荷时，IAT 开度 60% ~ 80%，EWG 开度 30% ~ 50%；中速中负荷时，仅用 EWG 就能满足排温要求，开度 20% ~ 40%。

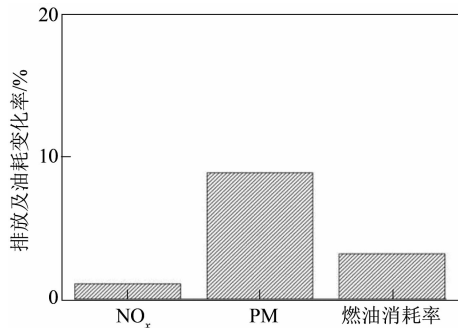


图9 WHTC 测试循环下排放及油耗的变化

(2) WHTC 测试循环结果表明：在保证经济性和排放变化在可接受范围内，所采用的热管理措施可有效提高排温，满足 DOC 前端温度及 SCR 温度要求。

参考文献

- [1] 唐蛟. 基于热管理的柴油机微粒及 NO_x 排放控制技术 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [2] 田径, 程义琳, 刘忠长, 等. 柴油机微粒捕集器怠速再生过程载体温度的控制 [J]. 内燃机学报, 2013, 31 (2): 6-9.
- [3] Stephan Stadlbauer. DOC Temperature Control for Low Temperature Operating Ranges with Post and Main Injection Actuation [C]. SAE 2013-01-0517.
- [4] 刘洋. 基于 POC 和 SCR 技术降低车用柴油机颗粒物和氮氧化物排放的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [5] 唐蛟, 李国祥, 孙少军, 等. 基于欧 VI 柴油机排气热量管理主动控制措施研究 [J]. 内燃机工程, 2015, 36 (2): 120-125.
- [6] HIRACH N R, MEKARI M H. Advanced diesel engine 42% brake thermal efficiency technology demonstrators [C]. SAE, Paper 2011-01-0121.
- [7] BAARAN H U. Modelling the effect of exhaust valve timing on exhaust thermal management of a diesel engine system [C]. IMAM, 2015, 09: 569-576.