

# 重型柴油机后处理电加热技术研究

耿宗起<sup>1,2</sup>, 白书战<sup>1\*</sup>, 仲昆<sup>2</sup>, 吕志华<sup>2</sup>

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为提高柴油机排气温度,缩短选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统起燃时间,降低重型柴油机冷态排放,在一台排量为13 L的重型柴油机后处理系统中增加电加热器,开展稳态工况和冷态全球统一瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)测温试验,并进行冷态 WHTC 下、电加热器功率分别为5.4、7.2 kW时的排放试验。结果表明:稳态工况下,电加热器功率稳定时,排气温度升高幅度和发动机排气流量成反比;冷态 WHTC 中,电加热功率越大,升温效果越好,SCR起燃时间越短,相应的能耗也越高;以SCR上游温度达到理想温度作为电加热器关闭的判断条件,与未加热相比,电加热功率分别为5.4、7.2 kW的两组冷态 WHTC 试验的循环NO<sub>x</sub>排放分别下降了49%和53%,油耗分别增加2.6%和3.6%。

**关键词:**柴油机;排放;电加热器;NO<sub>x</sub>;油耗

**中图分类号:**TK421.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2024)06-0076-07

**引用格式:**耿宗起,白书战,仲昆,等.重型柴油机后处理电加热技术研究[J].内燃机与动力装置,2024,41(6):76-82.

GENG Zongqi, BAI Shuzhan, ZHONG Kun, et al. Electric heating technology study on the after-treatment of a heavy-duty diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(6): 76-82.

## 0 引言

目前,各国对重型柴油机NO<sub>x</sub>排放的要求日益严格。欧七排放标准规定NO<sub>x</sub>的加权比排放限值为0.2 g/(kW·h)<sup>[1]</sup>,美国环境保护署(environmental protection agency, EPA)发布的EPA 2027排放标准要求NO<sub>x</sub>比排放低于0.047 g/(kW·h)<sup>[2]</sup>,加州排放标准规定2027年NO<sub>x</sub>比排放低于0.027 g/(kW·h)<sup>[3]</sup>,美国环境保护署和加州限值比我国国六NO<sub>x</sub>加权排放限值分别降低90%和94%。我国关于第七阶段排放标准的预研工作正在开展,拟采用冷、热态分开限制的方式对NO<sub>x</sub>排放进行管控,环保力度加大的同时,对柴油机排放控制技术的要求也逐渐提高。

重型柴油机冷态NO<sub>x</sub>排放较高的原因是选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)装置在冷启动后的一段时间内不能达到工作温度。降低冷态NO<sub>x</sub>排放,一条技术路线是缩短SCR系统起燃时间,通常采用热管理手段提高排气温度,如使用进气节流阀、缸内后喷技术等;另外一条技术路线是降低冷启动状态的原机排放,比如废气再循环技术。Sharp等<sup>[4]</sup>为了使柴油机达到超低NO<sub>x</sub>排放,系统研究了电加热器、柴油燃烧器等热管理技术,分析了多种技术组合的NO<sub>x</sub>排放控制效果和对应的能量消耗。Wang等<sup>[5]</sup>基于电加热和双喷技术路线,详细研究了钒基、铜基、铁基等不同催化剂组合的NO<sub>x</sub>转化效果和N<sub>2</sub>O

**收稿日期:**2024-10-28

**基金项目:**云南省重大科技专项(YPML-2023050203)

**第一作者简介:**耿宗起(1990—),男,济南人,山东大学硕士研究生,潍柴动力股份有限公司高级工程师,主要研究方向为柴油机排放控制,E-mail: gengzq@weichai.com。

**\*通信作者简介:**白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail: baishuzhan@sdu.edu.cn。

生成情况。李天羿<sup>[6]</sup>在某排量为 2.5 L 的柴油机上使用 3 种不同的技术方案对电加热器、低温 SCR 催化剂、SCR 双喷技术进行试验研究,结果表明,电加热器和单 SCR 技术可以将冷态全球统一瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)的  $\text{NO}_x$  排放降低到  $350 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  以下。谢昱卓等<sup>[7]</sup>基于重型柴油机自主设计了电加热系统,深入分析了单位电耗可以降低的  $\text{NO}_x$  排放质量,配合自主开发的控制策略使排放降低效果更佳。闫鹏勇等<sup>[8]</sup>通过试验验证了电加热器搭载陶瓷材料载体的后处理装置可以有效降低 THC、 $\text{NO}_x$ 、CO 等多种污染物排放。

本文中以一台满足国六排放标准的量产的排量为 13 L 的重型柴油机为研究对象,在后处理系统中增加电加热器,基于稳态工况,分别测量关闭和开启电加热器时氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)前的排气温度,计算温差和加热功率,校验实际应用过程中的热力学公式准确度;用基于温度控制的电加热器进行 WHTC 的排放测试,测量升温以后每循环  $\text{NO}_x$  排放和  $\text{N}_2\text{O}$  排放,分析瞬态循环中的温度升高情况和 SCR 转化效率。

## 1 试验装置和试验方案

### 1.1 试验装置

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

排量/L	额定功率/kW	最大扭矩/(N·m)	排放标准	气缸数	气缸排列形式
13	412	2 600	国 VI	6	直列

试验使用的后处理系统是基于国六 DOC-颗粒捕集器(diesel particulate filter, DPF)-SCR-氨逃逸催化器(ammonia slip catalyst, ASC)架构的后处理装置改造而成,在 DOC 前增加电加热器,改造后的系统方案如图 1 所示,图中 EH 为电加热器。DOC、DPF、SCR、ASC 的体积分别为 7.4、14.8、22.7、5.7 L。电加热器的额定电压为 24 V,额定功率为 5.4 kW,可以短时以功率 7.2 kW 运行。



图 1 后处理系统结构图

### 1.2 试验方案与试验流程

试验方案包括稳态工况温升测试和 WHTC 温升及排放测试,主要试验项目如表 2 所示。

表 2 主要试验项目

编号	名称	试验工况	电加热器开关状态	电加热器功率/kW
A	稳定工况	低负荷稳态工况	关闭	0
B	温升测试	低负荷稳态工况	开启	5.4
C	WHTC 温升及排放测试	冷态 WHTC	关闭	0
D		冷态 WHTC	开启	5.4
E		冷态 WHTC	开启	7.2

1) 稳态工况温升测试。发动机在低负荷稳态工况下运行,在发动机全转速、负荷率(实际转矩与最大扭矩的比)小于 40% 的范围内,转速间隔  $100 \text{ r}/\text{min}$ ,负荷率间隔 8%,共计 64 个工况点进行测温。试验过程中先关闭电加热器进行 A 组试验,为使测量温度稳定,每个工况点持续运行 5 min,获取发动机基准

排温,分别测量涡轮后排温和DOC上游温度,这两个温度测点分别位于电加热器的上、下游;开启电加热器进行B组试验,电加热器以功率5.4 kW稳定运行,再次测量64个工况点的涡轮后排温和DOC上游温度;计算电加热器开、闭两个状态的排气温度差,分析电加热器稳态提温效果。

2) WHTC温升及排放测试。按照文献[9]的规定运行冷态WHTC,以C组试验作为基准,不开启电加热器,D组试验开启电加热以功率5.4 kW运行,至SCR上游温度首次达到250 °C时停止,E组试验电加热器以功率7.2 kW运行,关闭条件同上。3组试验过程中对SCR上游气体温度、尿素喷射量、排放进行测量。

### 1.3 电加热器控制策略

稳态试验过程中,手动控制电加热器的开启和关闭,不使用控制策略。WHTC中,基于SCR上游温度使用控制器控制电加热器的开启和关闭。原理为:通过对柴油机水温 and 机油温度的条件判断,限制电加热器只在冷启动状态开启,柴油机热机状态停机后再启动时,电加热器不再开启;当SCR入口温度传感器测量温度高于阈值(250 °C)时,认为加热过程结束,SCR转化效率可以满足性能需求,电加热器关闭。另外,为防止电加热器和后处理系统烧坏,当排气流量小于100 kg/h时电加热器不开启。

## 2 试验结果和分析

### 2.1 稳态工况升温效果和分析

A组试验的温度测量结果如图2所示,B组试验的温度测量结果如图3所示,电加热器上、下游温差(B组与A组的温度差)计算结果如图4所示。

由图4a)可知:电加热器开、闭时其上游排气温度的温差在 $\pm 3$  °C以内,入口温度偏差很小,说明A、B两组试验一致性较好。由图4b)可知:电加热器开、闭时,电加热器下游的最大温差为76.6 °C,且随转速、负荷率呈现良好温差梯度,表明电加热器开启后升温效果良好。

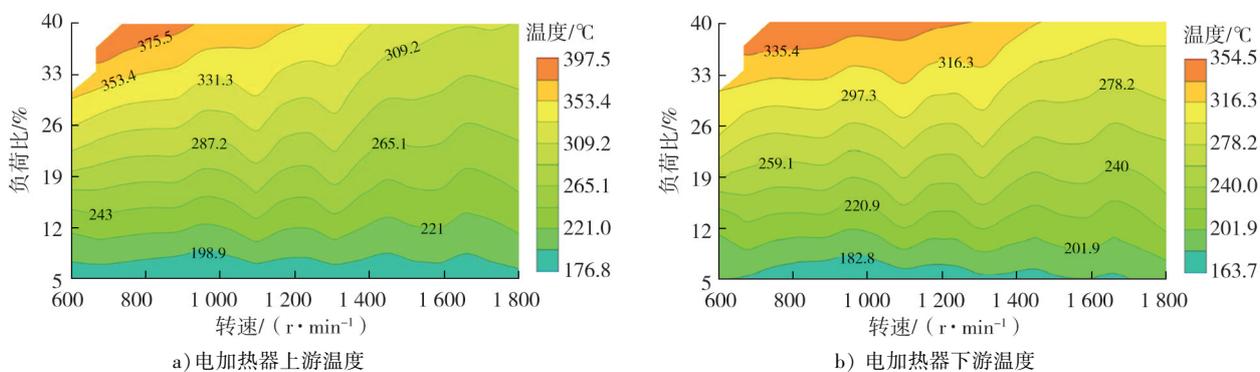


图2 关闭电加热时电加热器上、下游温度测量结果

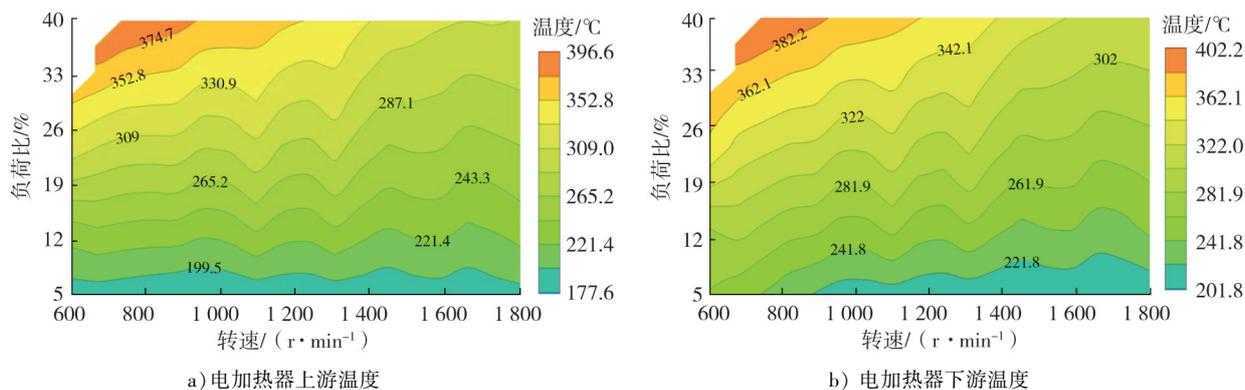


图3 开启电加热后电加热器上、下游温度测量结果

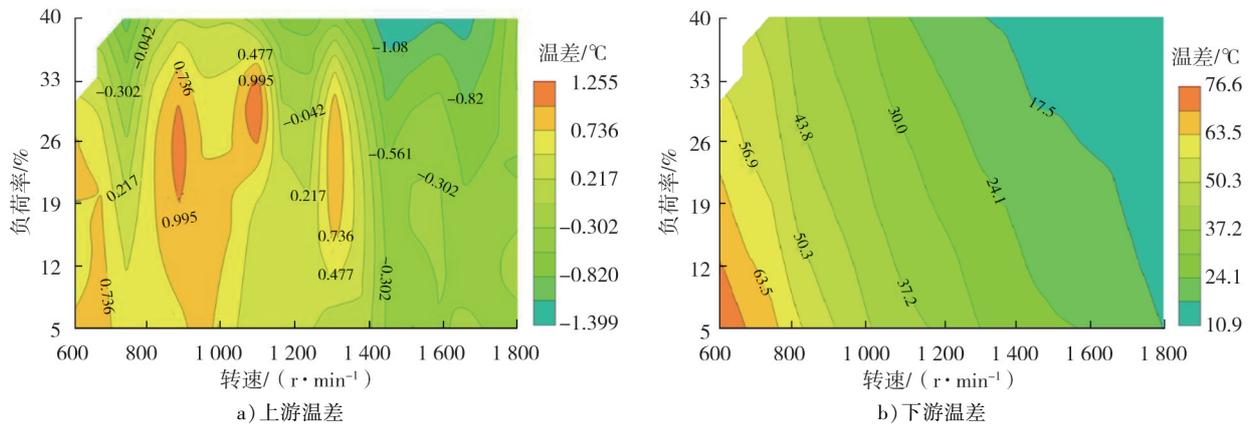


图4 电加热器的上、下游温差

电加热器的工作过程包括发热和两次传热:电热丝通电发热,将电能转化为热能,第一次传热是将热能由电热丝传递到排气,第二次传热是将热能由排气传递到 SCR 载体和催化剂。在稳态试验过程中,电加热器功率恒定,自身温度恒定,电加热器第一次传热效率<sup>[10]</sup>

$$\eta_{EH} = P_f / P_x, \tag{1}$$

式中: $P_f$  为电加热器放热功率, kW;  $P_x$  为排气吸热功率, kW。

假设电加热器放热功率恒定,第一次传热效率在稳态工况下也恒定,根据式(1),排气吸热功率也恒定。根据比热容公式<sup>[11]</sup>,排气吸热功率也可表示为:

$$P_x = q_m c \Delta_T, \tag{2}$$

式中: $q_m$  为排气质量流量, kg/s;  $c$  为排气比热容, kJ/(kg·K);  $\Delta_T$  为温差, K。

由式(2)可知,稳态工况下,温度升高幅度和发动机排气质量流量成反比。

试验过程中对每个工况的排气质量流量进行测量,排气比热容约为 1.088 kJ/(kg·K),计算排气吸热功率,结果如图 5 所示。由图 5 可知:排气平均吸热功率约为 5.4 kW,接近电加热器的放热功率,表明电加热器的第一次传热效率较高。但实际中,在无其他热源的情况下,排气吸热功率不可能大于放热功率,但计算使用的各参数的测量结果存在一定误差,使得个别工况出现吸热功率大于放热功率的现象。

### 2.2 冷态 WHTC 升温效果和分析

C、D、E 3 组试验的 SCR 上游温度对比如图 6 所示。由图 6 可知:开启电加热器后, D、E 组试验温度明显高于 C 组温度,表明电加热器的使用对于后处理系统温度升高作用明显;温度差异主要体现在 0~600 s 内,700 s 以后到循环结束温度几乎无差异;D 组试验中经过 441 s, SCR 上游温度首次达到 250 °C,电加热器关闭;E 组试验中由于电加热功率大,温升更快,经过 411 s,电加热器关闭。综上,在试验设计的功率范围以内,电加热器功率增大,SCR 上游温度升幅增大,完成加热所用时间缩短。

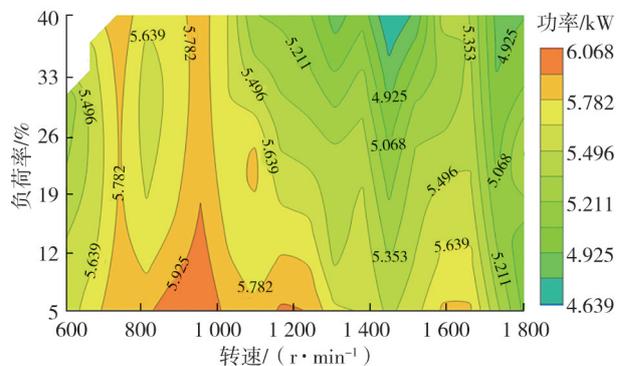


图5 以温度差计算的排气吸热功率

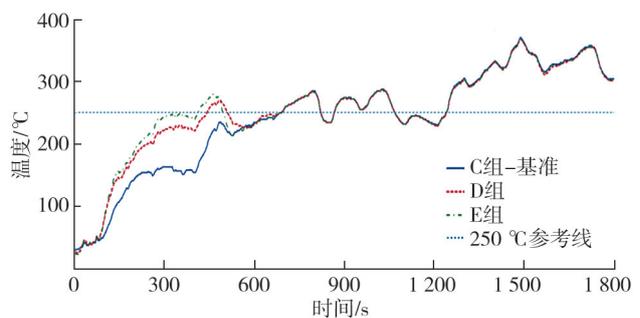


图6 冷态 WHTC SCR 上游温度对比

试验中,基于氨存储的闭环控制策略控制尿素喷射,当SCR温度达到阈值时开启喷射。C、D和E 3组试验的尿素瞬时喷射质量流量和循环内累积喷射质量如图7所示。

由图7可知:C、D和E 3组试验的尿素起喷时刻分别是第441秒、第256秒、第233秒,SCR温升越快,尿素起喷时刻越早,循环总喷射量分别为754、784、789 g,其中C组试验由于尿素起喷时刻较晚,循环总喷射量较其他两组少,D、E组试验的尿素喷射量相当。3组试验中,尿素喷射数据存在微小差异,是由计算逻辑中氨存储闭环控制引起的。

根据式(2)以及D、E组试验相对C组的温差,逐秒计算排气吸热功率,在时域上积分计算各组试验中排气吸收的热量 $Q_x$ ;根据设定的电加热功率和开启时间,计算放热量 $Q_f$ (假设电热丝电能到热能转换效率100%),计算结果如表3所示。由表3可知:由于加热功率较大,E组试验排气吸收的热量比D组试验吸收热量多;D、E组试验均出现吸热量大于放热量的现象,除去测量偏差的影响外,可能的原因包括未燃碳氢和部分CO在DOC中氧化放热,电加热的开启导致DOC升温较快,冷启动过程更早进入DOC工作的温度区间,开启状态的DOC氧化放热量比关闭时要多,但具体的放热量由于缺乏必要的数据无法进行定量计算。

### 2.3 冷态 WHTC 排放结果和分析

试验过程中测量发动机 $\text{NO}_x$ 原排和 $\text{NO}_x$ 尾排质量流量,据此计算每100 s的SCR平均转化效率<sup>[12]</sup>

$$\eta = 1 - q_{m,2}/q_{m,1}, \quad (3)$$

式中: $q_{m,1}$ 、 $q_{m,2}$ 分别为100 s内的 $\text{NO}_x$ 原排、尾排质量流量,g/s。

C、D、E 3组试验的SCR转化效率曲线如图8所示。由图8可知:D、E组试验SCR转化效率均高于C组,约180 s后,E组试验SCR转化效率最高,温升越快的试验SCR转化效率越高。

WHTC下,测量3组试验的 $\text{NO}_x$ 比排放及D、E组试验的 $\text{N}_2\text{O}$ 比排放,结果如表4所示。由表4可知:D组试验的 $\text{NO}_x$ 尾排比C组降低49%左右,电加热的使用可以明显改善降低 $\text{NO}_x$ 排放;E组试验的 $\text{NO}_x$ 尾排比D组更低,但降幅较小;当前国六排放阶段暂时不将 $\text{N}_2\text{O}$ 作为污染物进行监管,欧七排放标准中新增 $\text{N}_2\text{O}$ 限值要求,规定 $\text{N}_2\text{O}$ 的冷、热态循环加权排放限值为 $0.2 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,D、E组试验的冷态 $\text{N}_2\text{O}$ 比排放高于这一限值,根据试验经验, $\text{N}_2\text{O}$ 热态循环排放高于冷态循环,所以 $\text{N}_2\text{O}$ 的冷、热态循环加权排放更高,表明试验用催化剂的 $\text{N}_2\text{O}$ 选择性

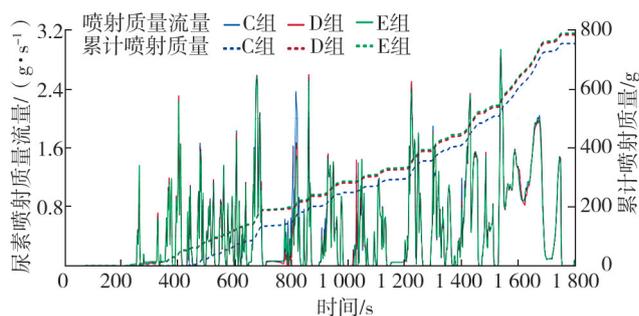


图7 冷态 WHTC 循环尿素喷射质量流量和累积喷射量对比

表3 C、D、E组试验放热量和排气吸热量 单位:kJ

试验编号	循环0~700 s 排气吸热量	电加热器放热量
C	0	0
D	2 663	2 381
E	3 096	2 959

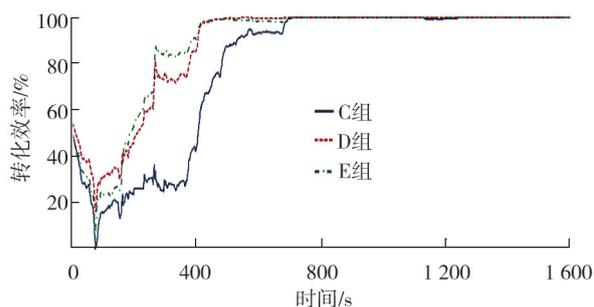


图8 SCR转化效率对比

表4 3组试验 $\text{NO}_x$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 比排放结果

试验编号	$\text{NO}_x$ 比排放/ [ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ ]	$\text{N}_2\text{O}$ 比排放/ [ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ ]
C	0.926	
D	0.469	0.241
E	0.439	0.246

尚无法满足欧七排放标准的要求。

### 3 电加热开启对油耗的影响

电加热器对油耗的影响包括两个方面:1)后处理系统排气背压增加使发动机油耗增加;2)电加热器在使用过程中的电量消耗,这部分电能间接来自燃油能量。

试验过程中对电加热器开启导致的背压增幅进行了测试,测试结果显示:在发动机额定工况运行时,电加热器导致的背压增幅小于1 kPa,油耗增加不大,不再做深入分析。电加热器开启时的电量消耗是造成油耗增加的主要原因,试验过程中对供电电压和电流进行实时测量,结合 WHTC 内电加热器开启时间,计算 D 组和 E 组试验的用电量。综合考虑发动机热效率、传动效率和发电机功率等参数,电能 1 kW·h 相当于燃油 0.33 L 的能量。折算结果显示,相比 C 组,D 组和 E 组试验每循环油耗分别增加 2.6%和 3.6%。

后续如果考虑能耗优化,可将电加热器的工作方式由固定功率加热改为可变功率加热。参考图 6 中 E 组试验的 400~600 s 温升曲线,虽然在第 400 秒左右电加热器已关闭,但受发动机工况变化引起的排气热量变化以及 DOC、DPF 等前置部件的热容效应影响,SCR 上游温度仍然持续上升,如果使用可变功率的电加热装置,配合更加智能的控制策略,可以达到优化能耗的效果。

### 4 结论

1) 稳态工况下,电加热器开、闭时,电加热器下游的最大温差为 76.6 °C,且随转速、负荷率呈现良好温差梯度,表明电加热器开启后升温效果良好。

2) 电加热器的使用提高了排气温度,缩短冷起动阶段 SCR 系统的起燃时间,提高了冷态 SCR 系统的转化效率,加热器功率分别为 5.4、7.2 kW 时,冷态 WHTC 时 NO<sub>x</sub> 排放分别降低了 49%和 53%,电加热器是有效的冷态排放控制手段。

3) 在后处理系统稳态工况下,固定功率的电加热器的提温幅度和发动机排气流量成反比。由电加热器到排气的第一次传热过程,传热效率极高,几乎可以忽略传热损失。

4) 使用电加热器造成发动机或整车的能耗增加,加热器功率分别为 5.4、7.2 kW 时,每 WHTC 油耗分别增加 2.6%和 3.6%。后续如果继续优化能耗,应该将电加热器的工作方式由固定功率加热改为可变功率加热。

#### 参考文献:

- [1] European Union. Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council. On type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7), amending Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EU) No 582/2011, Commission Regulation (EU) 2017/1151, Commission Regulation (EU) 2017/2400 and Commission Implementing Regulation (EU) 2022/1362[S]. Brussels, Belgium: Official Journal of the European Union, 2024.
- [2] The U. S. Environmental Protection Agency. Control of air pollution from new motor vehicles: heavy duty engine and vehicle standards[S]. Washington D C, USA: The U. S. Environment Protection Agency, 2022.
- [3] The California Air Resources Board. California exhaust emission standards and test procedures for 2004 and subsequent model heavy-duty diesel engines and vehicles[S]. Sacramento, USA: California Air Resources Board, 2020.
- [4] SHARP C, WEBB C C, NEELY G, et al. Achieving ultra low NO<sub>x</sub> emissions levels with a 2017 heavy-duty on-highway TC diesel engine and an advanced technology emissions system-thermal management strategies[J]. SAE International Journal of

- Engines, 2017, 10(4): 1697–1712.
- [5] WANG Y, CHEN S Y, ZHANG J, et al. Advanced aftertreatment system meeting future HD CNVII legislation [C]// Proceedings of WCX SAE World Congress Experience. Detroit, USA: SAE International, 2024.
- [6] 李天羿. 重型柴油机超低排放后处理系统的试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
- [7] 谢昱卓, 刘庚非, 邬斌扬, 等. 重型柴油机排气电加热  $\text{NO}_x$  排放控制技术研究 [J]. 内燃机学报, 2024, 42(4): 289–298.
- [8] 闫鹏勇, 王振宇, 汪晓伟, 等. 电加热后处理对某 48V 混动轻型车排放影响研究 [C]// 中国汽车工程学会. 2022 中国汽车工程学会年会论文集(4). 北京: 机械工业出版社, 2022: 664–668.
- [9] 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: 中国环境出版社, 2019.
- [10] 马文蔚, 周雨青, 解希顺. 物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [11] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [12] 刘世宇. 压燃发动机超低  $\text{NO}_x$  后处理系统性能优化与控制策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2023.

## Electric heating technology study on the after-treatment of a heavy-duty diesel engine

GENG Zongqi<sup>1,2</sup>, BAI Shuzhan<sup>1\*</sup>, ZHONG Kun<sup>2</sup>, LÜ Zhihua<sup>2</sup>

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to increase exhaust temperature, shorten the ignition time of selective catalytic reduction (SCR) system, and reduce cold emissions of heavy-duty diesel engines, an electric heater is added to the after-treatment system of heavy-duty diesel engine with a displacement of 13 L. Temperature measurement tests are conducted under steady-state and cold world harmonized transient cycle (WHTC), and emission tests are conducted under cold-state WHTC with electric heater power of 5.4 and 7.2 kW respectively. The results show that under steady-state conditions, when the power of the electric heater is stable, the increase in exhaust temperature is inversely proportional to the engine exhaust flow rate. In the cold-state WHTC cycle, the greater the electric heating power, the better the heating effect, the shorter the ignition time of the SCR, and correspondingly, the higher the energy consumption. The judgment condition for turning off the electric heater is that the upstream temperature of the SCR reaches the ideal temperature. Compared with the unheated state, the  $\text{NO}_x$  emissions of the two cold-state WHTC tests with electric heater power of 5.4 kW and 7.2 kW decreased by 49% and 52% respectively, and the fuel consumption increased by 2.6% and 3.6% respectively.

**Keywords:** diesel engine; emission; electric heater;  $\text{NO}_x$ ; fuel consumption

(责任编辑: 臧发业)