

# 柴油机双 SCR 体积分配仿真分析

王加林<sup>1,2</sup>, 王琛<sup>1,2</sup>, 孙建颖<sup>1,2\*</sup>, 冯海娣<sup>1,2</sup>

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为满足不断升级的排放标准对柴油机污染物排放日趋严格的要求,采用 AVL Cruise M 软件建立双选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统仿真模型,基于全球统一瞬态测试循环(world harmonized transient cycle, WHTC)分析紧耦合 SCR 和后级 SCR 体积分配对  $\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放、尿素喷射的影响。结果表明:紧耦合 SCR 体积减小,其下游  $\text{NO}_x$  累计排放先减少后增多,  $\text{N}_2\text{O}$  累积排放逐渐减少,第二级尿素喷射提前;后级 SCR 体积增大,  $\text{NO}_x$  比排放减少但  $\text{N}_2\text{O}$  比排放增大,第二级尿素喷射延迟;最优紧耦合、后级 SCR 体积分别为  $1/3V$ 、 $V$  ( $V$  为现有某国六柴油机 SCR 的体积),此时对应的冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $\text{NO}_x$  比排放分别为  $0.609$ 、 $0.037$ 、 $0.119 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $\text{N}_2\text{O}$  比排放为  $0.222$ 、 $0.218$ 、 $0.219 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。双 SCR 系统体积优化分配后,  $\text{NO}_x$  与  $\text{N}_2\text{O}$  排放均较低。

**关键词:**双 SCR 系统;紧耦合 SCR;体积分配;  $\text{NO}_x$  排放;  $\text{N}_2\text{O}$  排放

**中图分类号:**TK421.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2025)05-0019-08

**引用格式:**王加林, 王琛, 孙建颖, 等. 柴油机双 SCR 体积分配仿真分析[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(5):19-26.

WANG Jialin, WANG Chen, SUN Jianying, et al. Volume allocation simulation analysis for dual SCR system in a diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5):19-26.

## 0 引言

随着我国国六排放标准的全面实施,环境质量已得到显著改善,但空气质量治理工作依然面临诸多挑战。陈婷等<sup>[1]</sup>总结了当前国六排放标准的实施成效,同时指出国七排放标准将更加严格。美国加利福尼亚州空气资源委员会发布的《重型发动机和车辆低氮氧化物排放标准》中规定,到2027年,在加州销售的新型重型柴油发动机的  $\text{NO}_x$  排放限值必须降至  $0.027 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;欧盟委员会于2022年发布的欧七标准初步提案中,计划将重型柴油车的  $\text{NO}_x$  排放限值降至  $0.2 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,并新增对  $\text{N}_2\text{O}$  的排放控制,规定其冷热态加权排放限值为  $0.2 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。未来我国国七排放标准对于  $\text{NO}_x$  与  $\text{N}_2\text{O}$  的排放控制要求将进一步提高。因此,研究满足下一代排放标准的技术路径与开发方法,提前进行技术布局,具有重要意义。

选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)是目前降低  $\text{NO}_x$  排放的主流技术之一。为实现  $\text{NO}_x$  超低排放目标,对 SCR 技术进行深化研究已成为国内外学术界与工业界共同关注的热点。双 SCR 技术方案是在现有国六后处理系统的基础上增加紧耦合 SCR,将其布置在涡轮增压器之后、氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)之前,以降低低温冷启动时的  $\text{NO}_x$  排放。双 SCR 技术成熟度高,是满足超低排放标准的有效技术之一。Liu 等<sup>[2]</sup>通过试验研究发现,在柴油机后处理系统内增加紧耦合 SCR 或开启电加热都

收稿日期:2025-07-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000302)

第一作者简介:王加林(1990—),男,山东潍坊人,工学硕士,工程师,主要研究方向为内燃机排放与后处理技术, E-mail: wangjialin@weichai.com。

\*通信作者简介:孙建颖(2000—),女,山东潍坊人,讲师,主要研究方向为内燃机排放控制与后处理技术, E-mail: sunjy@weichai.com。

可以实现 NO<sub>x</sub> 超低排放。帅石金<sup>[3]</sup>调研紧耦合 SCR 技术的应用情况,发现紧耦合 SCR 可以有效降低柴油机冷启动 NO<sub>x</sub> 排放,提高后处理系统整体的转化效率,且成本更低。Li 等<sup>[4]</sup>指出紧耦合 SCR 由于体积小、反应时间短,NO<sub>x</sub> 转化效率与后级 SCR 相比偏低。

双 SCR 系统中,紧耦合 SCR 被前置布置在发动机排气歧管附近,可利用排气温度快速升温,有利于降低冷态过程的 NO<sub>x</sub> 排放。但是,这一架构也引发了系统设计的核心难题,即前、后两级 SCR 催化剂体积的优化分配问题<sup>[5-6]</sup>。针对这一难题,本文中对双 SCR 系统中前、后 SCR 体积优化分配规律进行分析,并系统评估该技术对 NO<sub>x</sub> 与 N<sub>2</sub>O 排放的影响,为实际工程应用提供参考。

1 双 SCR 系统仿真方案

1.1 仿真模型

针对某排量为 13 L 的满足国六排放标准的大型柴油机,保持发动机本体不变,在涡后布置紧耦合 SCR。该柴油机后处理系统包括紧耦合 SCR、DOC、颗粒捕集器(diesel particulate filter,DPF)、后级 SCR、氨逃逸催化器( ammonia slip catalyst, ASC),如图 1 所示。紧耦合 SCR 主要用于降低低温冷启动的 NO<sub>x</sub> 排放和尿素结晶风险;后级 SCR 工作在较高的排温工况,满足高负荷工况对高 NO<sub>x</sub> 转化率的要求,两者相互配合,实现对 NO<sub>x</sub> 的全工况、高效率净化。

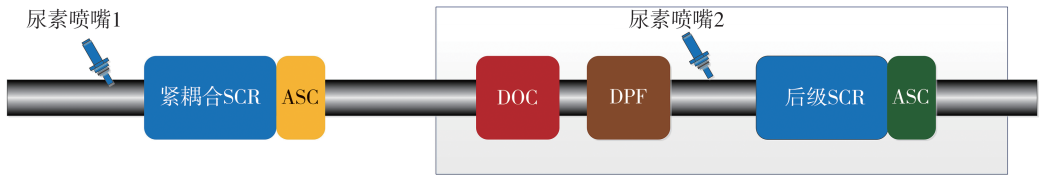


图 1 柴油机双 SCR 后处理系统

基于 AVL Cruise M 软件中的 MoBEO 半经验模型,将涡后排温、排气流量、气体物性参数、化学反应动力学数据输入 AVL Cruise M 的排气后处理系统(exhaust after-treatment system,EAS)模块,依据台架试验数据标定后处理系统各部件的热物性参数,优化尿素喷射策略,完成仿真模型搭建<sup>[7-10]</sup>。

基于 AVL Cruise M 软件建立不考虑尿素雾化和水解过程的 SCR 系统反应动力学简化模型。该模型采用 E-R 机理描述 SCR 反应过程,反应路径包括 NH<sub>3</sub> 的吸附和脱附、NH<sub>3</sub> 的氧化反应(涵盖 SCR 和 ASC)、NO 氧化反应、NO<sub>x</sub> 转化反应(慢反应中,增加 NH<sub>3</sub> 与 NO<sub>2</sub> 化学计量比为 1 的反应)以及 N<sub>2</sub>O 的生成反应。SCR 反应动力学模型如表 1 所示。

表 1 SCR 反应动力学模型

| 反应编号 | 名称                                           | 反应机理                                                                                                     |
|------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R1   | NH <sub>3</sub> 吸附                           | $\text{NH}_3(\text{脱附态}) \xrightarrow{\text{吸附}} \text{NH}_3(\text{吸附态})$                                |
| R2   | NH <sub>3</sub> 脱附                           | $\text{NH}_3(\text{吸附态}) \xrightarrow{\text{脱附}} \text{NH}_3(\text{脱附态})$                                |
| R3   | 标准 SCR 反应                                    | $4\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 4\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$   |
| R4   | 快速 SCR 反应                                    | $4\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 2\text{NO} + 2\text{NO}_2 \longrightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ |
| R5   | 慢速 SCR 反应                                    | $8\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 6\text{NO}_2 \longrightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$             |
| R6   | NH <sub>3</sub> 氧化生成 N <sub>2</sub> (SCR 体系) | $4\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$               |
| R7   | NO 氧化                                        | $\text{NO} + 1/2\text{O}_2 \longleftrightarrow \text{NO}_2$                                              |
| R8   | NH <sub>3</sub> 氧化生成 N <sub>2</sub> (PGM 体系) | $4\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$               |
| R9   | NH <sub>3</sub> 氧化生成 NO(PGM 体系)              | $4\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 5\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$                |
| R10  | NH <sub>3</sub> 氧化生成 N <sub>2</sub> O        | $2\text{NH}_3(\text{吸附态}) + 2\text{O}_2 \longrightarrow \text{N}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$        |

表 1(续)

| 反应编号 | 名称                                              | 反应机理                                                                                           |
|------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R11  | 由 NO <sub>2</sub> 生成 N <sub>2</sub> O           | 2NH <sub>3</sub> (吸附态)+2NO <sub>2</sub> →2N <sub>2</sub> O+N <sub>2</sub> +3H <sub>2</sub> O   |
| R12  | 由 NO 生成 N <sub>2</sub> O                        | 2NH <sub>3</sub> (吸附态)+2NO+O <sub>2</sub> →2N <sub>2</sub> O+N <sub>2</sub> +3H <sub>2</sub> O |
| R13  | 慢速 SCR(化学计量比为 1:1)                              | 4NH <sub>3</sub> (吸附态)+4NO <sub>2</sub> →4N <sub>2</sub> +4H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub>     |
| R14  | NH <sub>3</sub> 氧化生成 N <sub>2</sub> O(气相)       | 2NH <sub>3</sub> +2O <sub>2</sub> →N <sub>2</sub> O+3H <sub>2</sub> O                          |
| R15  | NH <sub>3</sub> 氧化生成 N <sub>2</sub> (气相,PGM 体系) | 4NH <sub>3</sub> +3O <sub>2</sub> →2N <sub>2</sub> +6H <sub>2</sub> O                          |
| R16  | NH <sub>3</sub> 氧化生成 NO(气相,PGM 体系)              | 4NH <sub>3</sub> +5O <sub>2</sub> →4NO+6H <sub>2</sub> O                                       |

1.2 计算边界

EAS 模块计算需要输入 DOC、DPF、SCR、ASC 的目数、壁厚、载体物性(密度、比热容)等参数,如表 2 所示。

表 2 部件参数

| 部件      | 目数  | 壁厚/<br>mm | 密度/<br>(g·L <sup>-1</sup> ) | 比热容/<br>[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ] | 部件     | 目数  | 壁厚/<br>mm | 密度/<br>(g·L <sup>-1</sup> ) | 比热容/<br>[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ] |
|---------|-----|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|--------|-----|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 紧耦合 SCR | 300 | 0.127     | 2.6                         | 2.8                               | DPF    | 300 | 0.229     | 2.6                         | 3.0                               |
| DOC     | 400 | 0.102     | 2.6                         | 2.5                               | 后级 SCR | 600 | 0.076     | 2.6                         | 2.8                               |

进口边界参数为全球统一瞬态测试循环(world harmonized transient cycle,WHTC)下的排气质量流量、涡轮后温、NO 和 NO<sub>2</sub> 的体积分数,如图 2 所示。

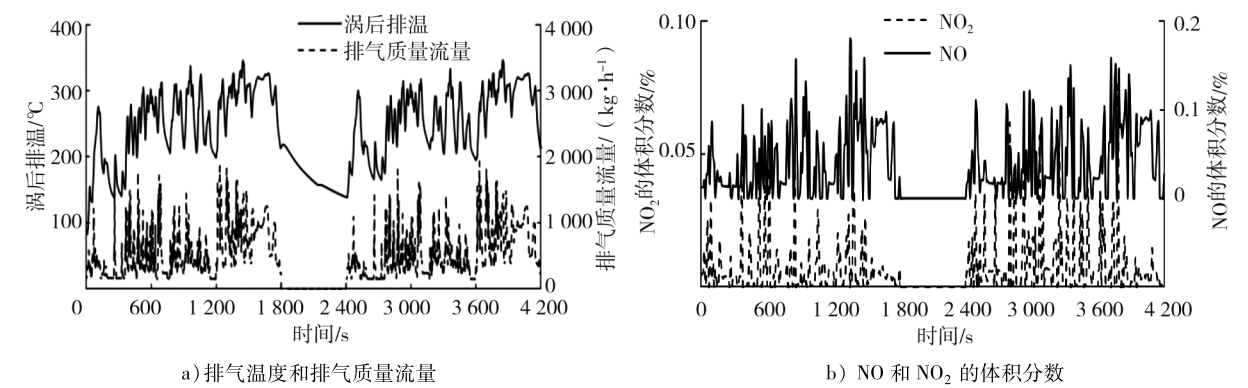


图 2 WHTC 下 SCR 系统进口边界参数

在后处理系统模型上增加紧耦合 SCR 并对两级尿素喷射进行协调控制,控制策略如图 3 所示。由图 3 可知:当紧耦合 SCR 载体温度达到 180 ℃时,第一级尿素喷嘴开始喷射;当后级 SCR 载体温度达到 180 ℃时,第二级尿素喷嘴开始喷射;当紧耦合 SCR 载体温度超过 180 ℃且后级 SCR 载体温度超过 210 ℃时,触发协同控制,即第一级尿素喷嘴减少喷射量,第二级尿素喷嘴维持原有喷射逻辑。

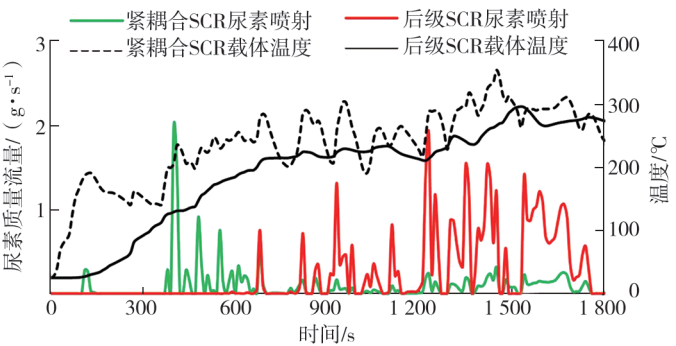


图 3 双 SCR 系统尿素喷射控制策略

## 2 紧耦合 SCR 体积分配仿真结果与讨论

以某现有国六柴油机 SCR 的体积为基准体积  $V$ , 在保持直径不变的情况下调整长度改变其体积, 使紧耦合 SCR 的体积在  $1/6V \sim V$  内变化。在不考虑水热老化和使用寿命影响的前提下, 分析紧耦合 SCR 体积对  $\text{NO}_x$  比排放、 $\text{NH}_3$  泄漏、 $\text{N}_2\text{O}$  比排放的影响。

### 2.1 紧耦合 SCR 体积对 $\text{NO}_x$ 排放和尿素起喷时刻的影响

#### 2.1.1 $\text{NO}_x$ 比排放

WHTC 下, 紧耦合 SCR 体积对  $\text{NO}_x$  比排放的影响如图 4 所示。由图 4 可知: 随着紧耦合 SCR 体积减小, 冷态 WHTC 的  $\text{NO}_x$  比排放逐渐降低, 热态 WHTC 的  $\text{NO}_x$  比排放小幅增大, 冷热态加权  $\text{NO}_x$  比排放先下降后升高; 紧耦合 SCR 体积为  $1/3V$  时, 加权  $\text{NO}_x$  比排放最低, 为  $0.116 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。主要原因为: 紧耦合 SCR 体积小则热容量小, 吸收同样的热量, 小体积紧耦合 SCR 可更快达到起燃温度。

#### 2.1.2 尿素起喷时刻

紧耦合 SCR 载体温度和第一级尿素喷射曲线如图 5 所示。由图 5 可知: 相比紧耦合 SCR 体积为  $V$  的方案, 紧耦合 SCR 体积为  $1/6V$  时, 第一级尿素起喷时刻提前约  $300 \text{ s}$ ; 但是, 在完成冷态 WHTC 及  $10 \text{ min}$  热浸后, 3 种体积紧耦合 SCR 在热态 WHTC 下的尿素起喷时刻几乎无差别。大体积紧耦合 SCR 在热态下具有更高的  $\text{NO}_x$  转化效率, 这归因于其更好的保温性能、更多的氨吸附位点和更低的空速, 这些条件共同促进了氨的存储及其与  $\text{NO}_x$  的充分反应。

不同紧耦合 SCR 体积下, 后级 SCR 载体温度和二级尿素喷射曲线如图 6 所示。由图 6 可知: 相比紧耦合 SCR 体积为  $V$  的方案, 紧耦合 SCR 体积为  $1/6V$  时, 二级尿素喷射起始时刻提前约  $90 \text{ s}$ , 表明小体积紧耦合 SCR 可使后级 SCR 更快到达起燃温度。

综上, 紧耦合 SCR 体积存在一个最佳值, 该最佳体积能够在保证低温工况下紧耦合 SCR 的快速起燃、实现对  $\text{NO}_x$  部分转化的同时, 又可避免因体积过小、氨储率不足导致的高负荷下  $\text{NO}_x$  转化下降问题。

### 2.2 紧耦合 SCR 体积对 $\text{NH}_3$ 泄漏的影响

紧耦合 SCR 下游  $\text{NH}_3$  泄漏曲线如图 7 所示。由图 7 可知: 紧耦合 SCR 体积减小, 其下游  $\text{NH}_3$  泄漏不断增大; 紧耦合 SCR 体积为  $1/6V$  的方案, 在第  $400 \text{ s}$  时其下游出现  $\text{NH}_3$  泄漏峰值,  $\text{NH}_3$  体积分

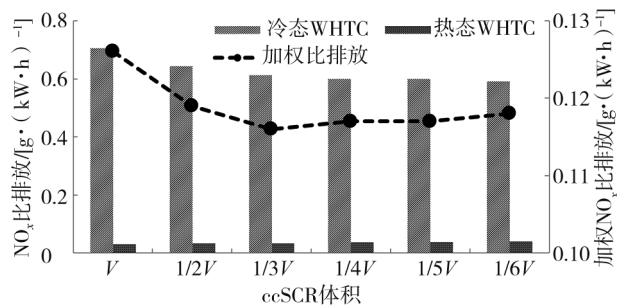


图 4 WHTC 下紧耦合 SCR 体积对  $\text{NO}_x$  比排放的影响

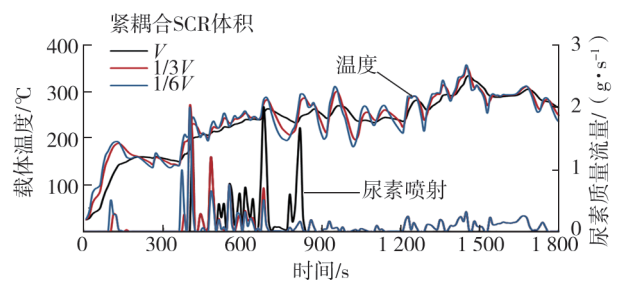


图 5 紧耦合 SCR 载体温度和第一级尿素喷射曲线

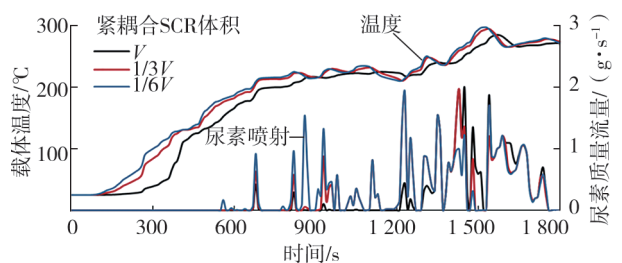


图 6 后级 SCR 载体温度和二级尿素喷射曲线

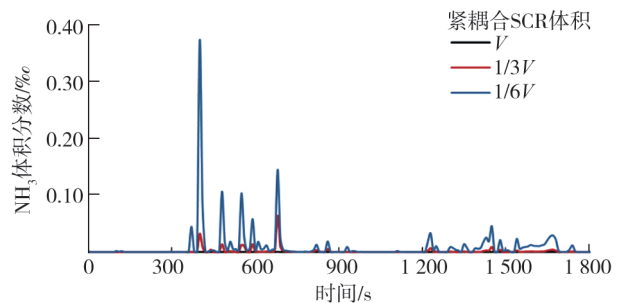


图 7 紧耦合 SCR 下游  $\text{NH}_3$  泄漏曲线

数约为 0.37‰;紧耦合 SCR 体积大于 1/3V 时,  $\text{NH}_3$  泄漏较少,  $\text{NH}_3$  体积分数均小于 0.05‰。

## 2.3 紧耦合 SCR 体积对 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响

### 2.3.1 紧耦合 SCR 下游 $\text{N}_2\text{O}$ 排放

紧耦合 SCR 体积对  $\text{N}_2\text{O}$  比排放的影响如图 8 所示。由图 8 可知:紧耦合 SCR 体积由  $V$  减小至 1/6V,冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $\text{N}_2\text{O}$  比排放分别由约 0.011、0.009、0.010  $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  下降至约 0.006、0.005、0.005  $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,降幅约为 50%。

紧耦合 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  累计排放曲线如图 9 所示。由图 9 可知:随着紧耦合 SCR 体积增大,紧耦合 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  累计质量大幅提高,紧耦合 SCR 体积为 1/6V 时的  $\text{N}_2\text{O}$  累计排放约为体积为  $V$  的 50%。

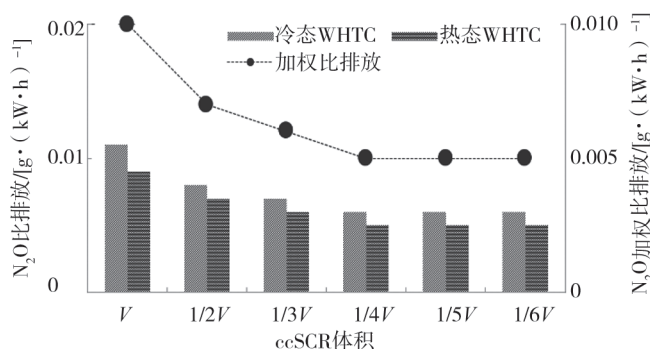


图8 紧耦合 SCR 体积对  $\text{N}_2\text{O}$  比排放的影响

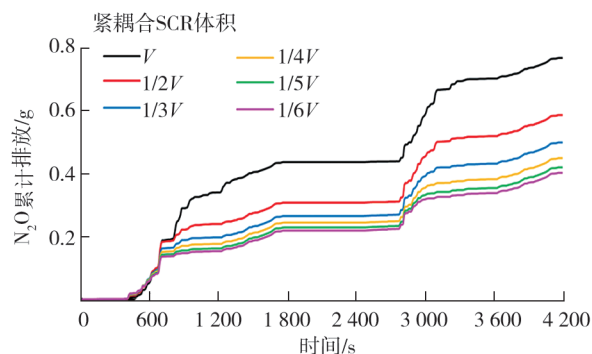


图9 紧耦合 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  累计排放曲线

相关研究表明,  $\text{N}_2\text{O}$  主要源自低温 SCR (低于  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 中  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的生成和分解。  $\text{NO}_2$  与  $\text{NH}_3$  反应生成  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  性质不稳定, 分解为  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{H}_2\text{O}$ , 当温度约为  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  时分解加剧, 出现  $\text{N}_2\text{O}$  排放峰值<sup>[11]</sup>。此外, 当  $\text{NO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的体积比大于 1/2 时也可加速  $\text{N}_2\text{O}$  的生成。紧耦合 SCR 体积对  $\text{N}_2\text{O}$  体积分数的影响如图 10 所示。由图 10 可知: 在第 500 ~ 1 000 秒时,  $\text{N}_2\text{O}$  体积分数随紧耦合 SCR 体积增大而增大。原因为: 不同体积的紧耦合 SCR 载体温度以及尿素喷射量不同, 紧耦合 SCR 体积越大提供的  $\text{NH}_3$  吸附位点越多, 在  $\text{NO}_2$  充足情况下, 形成的  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  更多, 分解产生的  $\text{N}_2\text{O}$  也更多。

### 2.3.2 后级 SCR 下游 $\text{N}_2\text{O}$ 排放

紧耦合 SCR 体积对  $\text{N}_2\text{O}$  累计尾排 (后级 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  排放) 的影响如图 11 所示。由图 11 可知: 后级 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  排放随紧耦合 SCR 体积增大而减小。由图 9、11 可知: 紧耦合 SCR 体积为 1/6V 时, 紧耦合 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  累计排放最少, 但对应的  $\text{N}_2\text{O}$  累计尾排却最高, 表明大部分  $\text{N}_2\text{O}$  由后级 SCR 产生。

紧耦合 SCR 体积越小, 消耗的排气热量小, 后级 SCR 可以更快达到起燃温度。不同紧耦合 SCR 体积对后级 SCR 载体温度和后级 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  体积分数的影响如图 12 所示。由图 12 可知: 后级 SCR 载体温度约为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时其下游

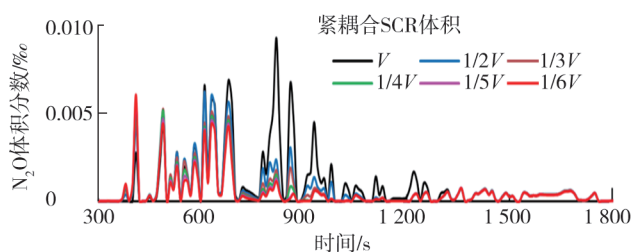


图10 紧耦合 SCR 体积对  $\text{N}_2\text{O}$  体积分数的影响

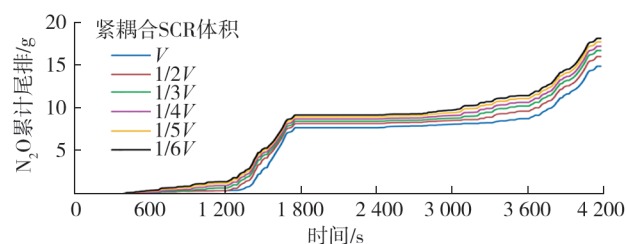


图11 紧耦合 SCR 体积对  $\text{N}_2\text{O}$  累计尾排的影响

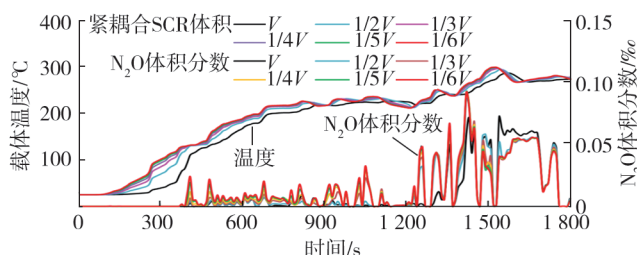


图12 不同紧耦合 SCR 体积对后级 SCR 载体温度和  
后级 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  体积分数的影响

开始产生  $\text{N}_2\text{O}$ , 体积分数约为  $0.03\%$ ; 载体温度约为  $250\text{ }^\circ\text{C}$  时出现  $\text{N}_2\text{O}$  体积分数峰值, 约为  $0.10\%$ 。

$\text{N}_2\text{O}$  的产生主要受温度、尿素喷射策略、 $\text{NO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的体积比的影响。进入后级 SCR 的  $\text{NO}_x$  主要由两部分组成: 一部分是未被紧耦合 SCR 转化的  $\text{NO}_2$ , 另一部分是未反应的  $\text{NO}$  经 DOC 转化而成的  $\text{NO}_2$ 。小体积紧耦合 SCR 对  $\text{NO}_x$  的转化效率较低, 导致流入后级 SCR 的  $\text{NO}_2$  体积分数相对较大, 因此, 后级 SCR 下游  $\text{N}_2\text{O}$  排放相应较高。

综合考虑  $\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放影响, 确定紧耦合 SCR 最优体积为  $1/3V$ 。

### 3 后级 SCR 体积分配仿真结果与讨论

在紧耦合 SCR 体积为  $1/3V$  的基础上, 同样采用仅调整 SCR 长度的方法使后级 SCR 体积在  $1/3V \sim 2V$  内变化, 进一步仿真研究后级 SCR 体积对  $\text{NO}_x$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放、尿素喷射、 $\text{NH}_3$  泄漏的影响。

#### 3.1 后级 SCR 体积对 $\text{NO}_x$ 排放和尿素喷射的影响

##### 3.1.1 $\text{NO}_x$ 比排放

后级 SCR 体积对  $\text{NO}_x$  比排放的影响如图 13 所示。由图 13 可知: 后级 SCR 体积由  $1/3V$  增大至  $2V$ , 冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $\text{NO}_x$  比排放分别由  $0.727$ 、 $0.236$ 、 $0.306\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$  逐渐降低至  $0.556$ 、 $0.010$ 、 $0.088\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ; 但当后级 SCR 体积超过  $V$  后,  $\text{NO}_x$  比排放下降不明显; 后级 SCR 体积为  $V$  时, 冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $\text{NO}_x$  比排放分别为  $0.609$ 、 $0.037$ 、 $0.119\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。后级 SCR 体积增大可提供更多  $\text{NH}_3$  吸附位点, 同时系统运行空速相对较低, 有利于  $\text{NO}_x$  充分反应。 $\text{NO}_x$  排放峰值通常出现在工况突变点。因此, 后级 SCR 体积越大, 对  $\text{NO}_x$  的转化效率越高,  $\text{NO}_x$  排放降低。

##### 3.1.2 尿素起喷时刻

不同体积后级 SCR 的载体温度和尿素喷射曲线如图 14 所示。由图 14 可知: 大体积后级 SCR 的比热容较大, 其起燃过程相对缓慢, 因此, 后级 SCR 体积为  $2V$  时的起燃时间相比体积为  $2/3V$  时延迟约  $90\text{ s}$ ; 然而, 大体积后级 SCR 的空速较低, 因此, 在运行  $1200\text{ s}$  后, 其尿素质量流量远大于小体积 SCR。大体积后级 SCR 的保温性能较好, 在完成冷态 WHTC 和  $10\text{ min}$  热浸后, 后级 SCR 的热态 WHTC 下的  $\text{NO}_x$  转化效率更高, 可弥补起燃时间延迟造成的不利影响。

#### 3.2 后级 SCR 体积对 $\text{NH}_3$ 泄漏的影响

后级 SCR 下游  $\text{NH}_3$  泄漏曲线如图 15 所示。由图 15 可知:  $\text{NH}_3$  的体积分数随后级 SCR 体积增大显著降低; 后级 SCR 体积为  $1/3V$ 、 $2/3V$  时,  $\text{NH}_3$  体积分数峰值分别约为  $0.045\%$ 、 $0.005\%$ , 后级 SCR 体积为  $2V$  时, 几乎检测不到  $\text{NH}_3$ 。但是, 不同体积后级 SCR 的  $\text{NH}_3$  泄漏均满足排放标准要求, 因此, 后级 SCR 体积选择对  $\text{NH}_3$  泄漏的影响较小。

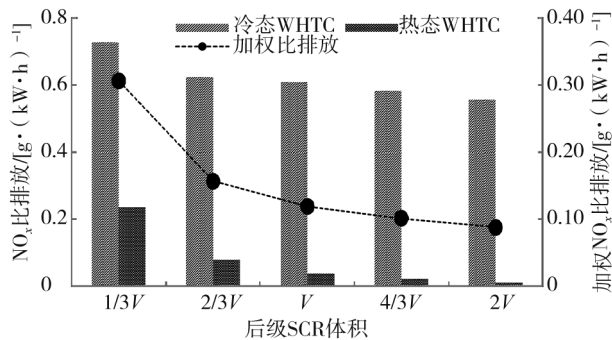


图 13 后级 SCR 体积对  $\text{NO}_x$  比排放的影响

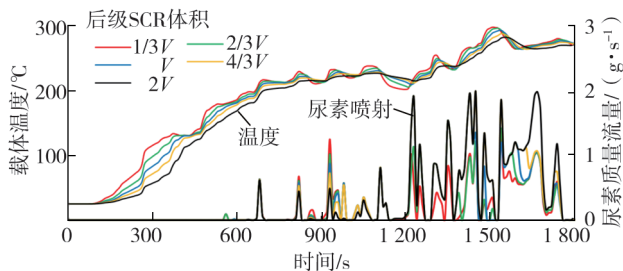


图 14 不同体积后级 SCR 的载体温度和尿素喷射曲线

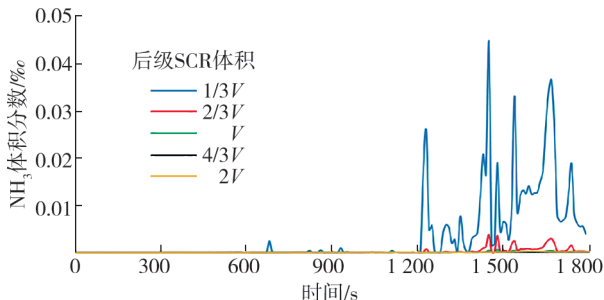


图 15 后级 SCR 下游  $\text{NH}_3$  泄漏曲线

### 3.3 后级 SCR 体积对 $N_2O$ 排放的影响

WHTC 下后级 SCR 体积对  $N_2O$  比排放的影响如图 16 所示。由图 16 可知:随后级 SCR 体积增大,其下游  $N_2O$  比排放逐渐增大;后级 SCR 体积由  $1/3V$  增大至  $2V$ ,冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $N_2O$  比排放分别由 0.170、0.187、0.185  $g/(kW \cdot h)$  逐渐增大至 0.253、0.244、0.245  $g/(kW \cdot h)$ ,后级 SCR 体积为  $V$  时,冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $N_2O$  比排放,分别为 0.222、0.218、0.219  $g/(kW \cdot h)$ 。

后级 SCR 体积对  $N_2O$  尾排的影响如图 17 所示。由图 17 可知:后级 SCR 下游的  $N_2O$  体积分数随后级 SCR 体积增大而减小,且  $N_2O$  排放主要集中在 1 400~1 800 s。该时间段内,紧耦合 SCR 减喷,主要由后级 SCR 对  $NO_x$  进行转化。后级 SCR 在高温条件下,  $N_2O$  主要来源于  $NO_x$  氧化还原过程的副反应。后级 SCR 体积减小,尿素喷射量相应减小,产生的  $NO_x$  较少,生成的  $N_2O$  亦随之减少。

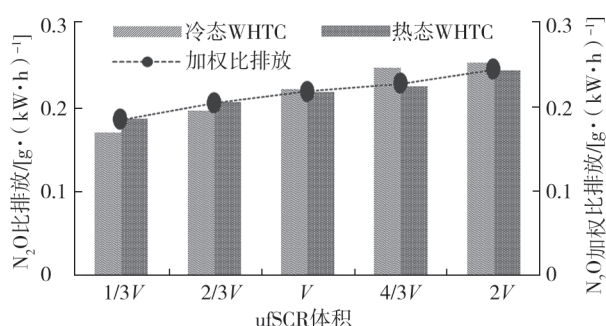


图 16 WHTC 下后级 SCR 体积对  $N_2O$  比排放的影响

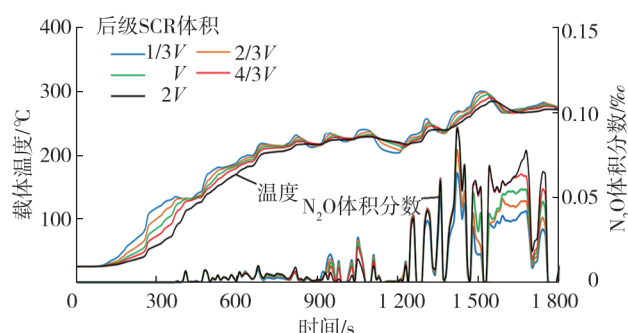


图 17 后级 SCR 体积对  $N_2O$  尾排的影响

综上所述,后级 SCR 体积增大,其下游  $NO_x$  比排放下降,但当后级 SCR 体积大于  $V$  时,  $NO_x$  比排放降幅不明显;后级 SCR 体积选择对  $NH_3$  泄漏的影响较小;  $N_2O$  比排放随后级 SCR 体积增大近似线性增大。因此,在双 SCR 系统中,最优后级 SCR 体积为  $V$ 。

## 4 结论

分析双 SCR 系统中紧耦合 SCR 与后级 SCR 体积分配对  $NO_x$  与  $N_2O$  排放、尿素喷射、 $NH_3$  泄漏的影响,得到以下结论。

1) 双 SCR 系统中,两个 SCR 的体积分配影响载体温度及尿素喷射策略。紧耦合 SCR 体积减小时,其下游  $NO_x$  累计排放先减少后增多,  $N_2O$  累积排放逐渐减少,第二级尿素喷射时刻提前,  $NH_3$  泄漏不断增大;后级 SCR 体积增大,  $NO_x$  比排放减少但  $N_2O$  比排放增大,第二级尿素喷射时刻推迟,但后级 SCR 体积对  $NH_3$  泄漏的影响较小。综合考虑  $NO_x$  和  $N_2O$  排放,最优紧耦合 SCR、后级 SCR 体积分别为  $1/3V$ 、 $V$ 。

2) 当紧耦合 SCR、后级 SCR 体积分别为  $1/3V$ 、 $V$  时,冷态 WHTC、热态 WHTC、 $NO_x$  加权比排放分别为 0.609、0.037、0.119  $g/(kW \cdot h)$ ;冷态 WHTC、热态 WHTC、加权  $N_2O$  比排放分别为 0.222、0.218、0.219  $g/(kW \cdot h)$ ,  $NO_x$  与  $N_2O$  排放均较低。双 SCR 系统中,通过增加紧耦合 SCR 可有效解决低温冷启动时  $NO_x$  排放较高的问题,发展前景广阔,是未来柴油车节能减排的主流方案之一。

### 参考文献:

- [1] 陈婷,倪红,谷雪景,等. 中国移动源下阶段排放法规综述和分析[J]. 内燃机工程,2018,39(6):24-30.
- [2] LIU S Y, WANG B Y, GUO Z X, et al. Experimental investigation of urea injection strategy for close-coupled SCR aftertreatment system to meet ultra-low  $NO_x$  emission regulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 205: 117994.
- [3] 帅石金. 重型柴油车满足近零排放法规的技术分析[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(1):16-31.
- [4] LI Y X, LIAO J X, XU H M, et al. Comprehensive experimental analysis of a diesel engine with an electrically heated catalyst and close-coupled SCR during cold/hot WHTC[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 262: 125277.
- [5] ZAVALA B, SHARP C, NEELY G, et al. CARB low  $NO_x$  stage 3 program: aftertreatment evaluation and down selection[J].

- SAE Mobilus, 2020(1):1402.
- [6] ADELMAN B, SINGH N, CHARINTRANOND P, et al. Achieving ultra-low  $\text{NO}_x$  tailpipe emissions with a high efficiency engine[C]//Proceedings of WCX SAE World Congress Experience. Detroit, USA: SAE International, 2020.
- [7] SUPRIYANT O, WIJAYANTI K, KUMA R, et al. Global kinetic modeling of hydrothermal aging of  $\text{NH}_3$ -SCR over Cu-zeolites[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, 163:382–392.
- [8] BAGAVATHY S S, RAMESH A, KRISHNASAMY A, et al. Parametric investigations on the performance of diesel oxidation catalyst in a light duty diesel engine-an experimental and modelling study[C]//Proceedings of Symposium on International Automotive Technology 2019. Detroit, USA: SAE International, 2019.
- [9] KRISHNA K V, CHAUHAN N, P PATEL B, et al. Chemical kinetics modelling of exhaust after-treatment system: a one dimensional simulation approach[C]//Proceedings of Symposium on International Automotive Technology 2019. Detroit, USA: SAE International, 2019.
- [10] GAO Z M, PIHL J, LACLAIR T, et al. Global kinetic modeling of  $\text{NH}_3$ -SCR with two sites of  $\text{NH}_3$  storage on Cu-SSZ-13 [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 406:127120.
- [11] BOZBAG S E. Kinetic model comparison and elucidation of mass transfer limitations in  $\text{NH}_3$ -SCR reactors using Vanadia based washcoats with different thicknesses[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 246:116892.

## Volume allocation simulation analysis for dual SCR system in a diesel engine

WANG Jialin<sup>1,2</sup>, WANG Chen<sup>1,2</sup>, SUN Jianying<sup>1,2\*</sup>, FENG Haidi<sup>1,2</sup>

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to meet the increasingly stringent requirements for diesel engine pollutant emissions from constantly upgrading emission standards, AVL Cruise M software is used to establish a simulation model of a dual selective catalytic reduction (SCR) system. Based on the world harmonized transient cycle (WHTC), the impact of close-coupled SCR and under flow SCR volume allocation on  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, as well as urea injection, is analyzed. The results show that as the volume of close-coupled SCR decreases, the downstream cumulative  $\text{NO}_x$  emissions first decrease and then increase, the cumulative  $\text{N}_2\text{O}$  emissions gradually decrease, and the second stage urea injection advances. The volume of the under flow SCR increases, the  $\text{NO}_x$  specific emissions decrease but the  $\text{N}_2\text{O}$  specific emissions increase, and the second stage urea injection is delayed. The optimal volumes of close-coupled SCR and under flow SCR are  $1/3V$  and  $V$  ( $V$  is the current volume of SCR in a China VI engine), respectively. At this time, the corresponding cold WHTC, hot WHTC, and weighted  $\text{NO}_x$  specific emissions are 0.609, 0.037, and 0.119 g/(kW·h), respectively; the cold WHTC, hot WHTC, and weighted  $\text{N}_2\text{O}$  specific emissions are 0.222, 0.218, and 0.219 g/(kW·h), respectively. After optimizing the volume allocation of the dual SCR system, both  $\text{NO}_x$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions are lower.

**Keywords:** dual SCR system; close-coupled SCR; volume matching;  $\text{NO}_x$  emission;  $\text{N}_2\text{O}$  emission

(责任编辑:臧发业)