DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202501008

柴油机后处理系统不同基材紧耦合 SCR 性能研究

刘伟达[1,2]，王洪光[1,2]，陈　宁[1,2]，韩东岳[1,2]，李俊普[1,2]，郑碧莹[1,2]
（1. 内燃机可靠性国家重点实验室，潍坊 261061；2. 潍柴动力空气净化科技有限公司，潍坊 261061）

摘要：在稳态循环（WHSC）与瞬态循环（WHTC）工况条件下，基于选择性催化还原（SCR）反应机理设计了前、后级不同氨氮比（ANR）和排气温度，研究了不同基材紧耦合 SCR（cc-SCR）在不同 ANR 和温度下的性能表现. 结果表明：增压器后端增加 cc-SCR 可大幅提升后处理系统的 NO_x 转化效率；在进行紧耦合催化剂选型时，前级喷射的 ANR 不宜超过 0.8；相较于铜基 cc-SCR，钒基 cc-SCR 具有 N_2O 生成量较低的优势；在低温条件下，铜基 cc-SCR 的 NO_x 转化效率优于钒基 cc-SCR，300～450 ℃条件下，两种基材催化剂的 NO_x 转化效率相当；在稳态点排气温度为 180 ℃时，钒基＋铜基催化剂方案的 NO_x 总体转化效率随着 ANR 的增大而减小，铜基＋铜基催化剂方案的 NO_x 总体转化效率随着 ANR 的增加而增大，高温时，两种方案对 NO_x 的转化相当；在热态 WHTC 循环条件下，铜基＋铜基催化剂方案的 NO_x 总体转化效率随着 ANR 的增加而增大.

关键词：柴油机；紧耦合选择性催化还原；转化效率；铜基；钒基；氨氮比
中图分类号：TK427　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）01-0064-08

Performance study of closed coupled SCR with different substrates in diesel engine after-treatment system

Liu Weida[1,2]，Wang Hongguang[1,2]，Chen Ning[1,2]，Han Dongyue[1,2]，Li Junpu[1,2]，Zheng Biying[1,2]
（1. State Key Laboratory of Engine Reliability，Weifang 261061，China；
2. Weichai Power Emission Solutions Technology Company Limited，Weifang 261061，China）

Abstract：Under the engine testing conditions of world harmonized steady-state cycle（WHSC）and world harmonized transient cycle（WHTC），different ammonia nitrogen ratio（ANR）and exhaust temperature of the preceding stage and posterior stage were designed based on the selective catalytic reduction（SCR）reaction mechanism. The performance of the closed coupled SCR（cc-SCR）with different substrates at different ANR and exhaust temperatures was studied. The experiment result indicates that the addition of cc-SCR at the back of the supercharger can significantly improve the NO_x conversion efficiency of the after-treatment system. The ANR of the preceding stage injection should not exceed 0.8 when selecting cc-SCR. The advantage of the vanadium-based cc-SCR over copper-based cc-SCR is lower N_2O production. At low temperature，the NO_x conversion efficiency of the copper-based cc-SCR is superior to that of the vanadium-based cc-SCR. And at 300—450 ℃，the NO_x conversion efficiency of the two substrates catalysts is similar. At the steady-state operating point and exhaust temperature of 180 ℃，the overall NO_x conversion efficiency of the vanadium-based & copper-based catalyst program decreases as the ANR increases，while the overall NO_x conversion efficiency of the copper-based & copper-based catalyst program increases as the ANR increases. At high temperatures，the two scenarios convert NO_x equally. Under the hot cycle of WHTC，the overall NO_x conversion efficiency of the copper-based & copper-based catalyst program increases as the ANR increases.

Keywords：diesel engine；closed coupled selective catalytic reduction；conversion efficiency；copper-based；vanadium-based；ammonia nitrogen ratio

收稿日期：2024-04-11；**修回日期**：2024-09-19.
基金项目：山东省重点研发计划资助项目（2022CXGC020311）.
作者简介：刘伟达，硕士研究生，正高级工程师，liuwd@weichai.com.
通信作者：陈　宁，硕士研究生，工程师，chenning01@weichai.com.

随着中国对车辆交通运输领域的低能耗、少排放和低污染等绿色出行的环境要求的提升以及国家“碳达峰”发展目标的提出，新能源汽车的发展得到社会各界的大力支持，新势力快速渗透汽车市场[1]. 而在商用车市场，尤其是重型柴油机领域，因柴油机具有的动力性、可靠性和燃油经济性在未来还存在一定的优势. 但其排放的氮氧化物和颗粒物又是大气污染的主要来源之一[2]，为了降低柴油机的有害排放物，专家学者重点研究通过机内净化技术和机外净化技术达到排放要求. Joshi 等[3]通过机内净化的技术方式，优化发动机喷油相关参数，提高了后处理的低温转化能力. 楼狄明等[4]通过耦合废气再循环（EGR）与可变喷嘴涡轮增压/可变截面涡轮增压（VNT/VGT）增压器技术，降低了 NO_x 排放. Barbosa[5]论述了机外后处理技术，主要通过 EGR 技术和 SCR 技术降低 NO_x. Zhang[6]阐明了 SCR 与氧化型催化器（DOC）+柴油颗粒铺集器（DPF）耦合可以满足更严格的排放要求，SCR 技术的应用是降低 NO_x 的有效措施. Luján 等[7]基于 GT-Power 建立系统的热量传递模型，提出多种保温方案应用在发动机与后处理之间的排气管，结果表明：增加隔热层会减少热损失，对后处理进口温度影响较小. Ramesh 等[8]阐明了排气温度对后处理系统的转化效率有影响，指出热管理的重要性. 胡广地等[9]利用计算流体力学（CFD）仿真分析，优化后处理封装结构，降低系统压降和提高 SCR 入口界面的气体均匀性，提高了 NO_x 转化效率. 排放法规不断加严，排放技术控制技术再迎挑战，无论是后处理系统升级，还是发动机原机的排放控制，都需要提前进行技术储备. 因此，超低排放的控制措施及关键核心部件应用成为热门研究[10-12].

载体催化剂作为发动机后处理系统的核心部件，对于尾气排放控制起关键作用. DOC 催化剂必须具备更好的燃油起燃能力、更高的氧化性能、更优的抗热老化及抗中毒能力[13-14]；DPF 颗粒捕集器须在任何工况下满足颗粒排放要求，且颗粒物粒径从 23 nm 降为 10 nm 监测范围，急需开发新型颗粒捕集器涂覆技术或新一代 DPF 载体材料[15-17]；SCR 催化剂必须有更高的转化效率同时兼顾 N_2O 排放[18]. 刘彪[19]和 Bendrich 等[20]对分子筛 SCR 催化剂 N_2O 生成机理和不同分子筛 SCR 子反应机理进行了深入研究. 对于 SCR 的性能优化仍然需要继续探索，经研究发现反应气中二氧化氮和水蒸汽含量、硫化物、催化剂中活性组分的含量及价态分布都会影响到 SCR 催化剂的低温活性[21-22].

1　催化剂化学反应原理

对不同基材的 SCR 催化剂技术及两级喷射系统进行探究，主要依据以下反应机理[23].

尿素水解为氨气：

$$(NH_2)_2CO+H_2O\rightarrow 2NH_3+CO_2 \quad (1)$$

标准 SCR 反应：

$$4NH_3+4NO+O_2\rightarrow 4N_2+6H_2O \quad (2)$$

快速 SCR 反应：

$$2NH_3+NO+NO_2\rightarrow 2N_2+3H_2O \quad (3)$$

慢速 SCR 反应：

$$4NH_3+3NO_2\rightarrow 3.5N_2+6H_2O \quad (4)$$

NH_4NO_3 生成：

$$2NH_3+2NO_2\rightarrow N_2+NH_4NO_3+H_2O \quad (5)$$

NH_4NO_3 分解生成 N_2O：

$$NH_4NO_3\rightarrow N_2O+2H_2O \quad (6)$$

NH_4NO_3 还原 NO：

$$NH_4NO_3+NO\rightarrow N_2+NO_2+2H_2O \quad (7)$$

NH_3 氧化生成 N_2O：

$$4NH_3+4O_2\rightarrow 2N_2O+6H_2O \quad (8)$$

NO 还原生成 N_2O：

$$4NH_3+4NO+3O_2\rightarrow 4N_2O+6H_2O \quad (9)$$

钒基催化剂是以 V_2O_5 作为活性组分，V_2O_5 通常与 WO_3 一起浸渍在锐钛矿型 TiO_2 载体上，以稳定 V_2O_5 并提高其热稳定性，钒基催化剂具有良好的中温活性，在 300 ~ 450 ℃温度范围内的 NO_x 转化效率达 90% 以上. 但钒基催化剂 NH_3-SCR 催化反应机理在反应温度和水存在对选择性仍有争议. 在 NO、NO_2、NH_3 和 O_2 存在下，V-W-Ti 催化剂的具体反应[24-25]有

$$2NH_3+2NO_2\rightarrow N_2+NH_4NO_3+H_2O \quad (10)$$

$$NH_4NO_3\rightarrow NH_3+HNO_3 \quad (11)$$

$$NH_4NO_3\rightarrow N_2O+2H_2O \quad (12)$$

$$NH_4NO_3+NO\rightarrow N_2+NO_2+2H_2O \quad (13)$$

上述反应中说明了低温 SCR 反应中快速 SCR 反应快于标准 SCR 反应的原因，当 NO_2 和 HNO_3 同时存在时，V 活性中心的重新氧化速率会得到快速提升，并且 NO_2 不能直接参与 V 活性中心的再氧化反应过程，而是形成 NH_4NO_2 的形式参与反应，最终被还原为 N_2 和 H_2O.

$$2NO_2\rightarrow N_2O_4 \quad (14)$$

$$N_2O_4+H_2O\rightarrow HONO+HNO_3 \quad (15)$$

$$HONO+NH_3\rightarrow NH_4NO_2 \quad (16)$$

$$HNO_3+HNO_3\rightarrow NH_4NO_3 \quad (17)$$

$$NH_4NO_2\rightarrow N_2+2H_2O \quad (18)$$

目前对于铜基分子筛(Cu-CHA)催化剂的活性中心仍然处于研究阶段,催化剂提供的酸中心和氧化还原中心在 NH_3-SCR 反应中起着重要作用. 在 NH_3-SCR 反应过程中,铜基分子筛催化剂有两个作用是:(1)吸附和活化 NH_3;(2)活性中心 Cu 催化 NO 氧化. 在 Cu-CHA 催化剂上的 NH_3-SCR 反应包括 4 个主要反应过程[26]:首先 NH_3 或 NO 在催化剂上吸附,然后是 NH_3/NO 在 Cu^{2+}上的活化,生成 NH_4NO_2 产物,最后 NH_4NO_2 产物分解,Cu^{2+} 恢复初始状态,这些反应不涉及铜基分子筛催化剂 NH_3-SCR 活性中心的变化. 铜基分子筛催化剂可以连续在 800 ℃高温下仍然可以保持较高的 NO_x 的还原性能,甚至可以短暂承受 900 ℃的高温,铜基分子筛催化剂减少 N_2O 的形成,改进了 N_2 的选择性,同时还具有较好的抗 HC 能力,因而在柴油机上广泛应用.

笔者对两级喷射系统中所使用的催化剂组合类型进行评估和性能摸底,变更不同催化剂组合具有不同的排放优势,其中热门的 SCR 催化剂类型有铁基、钒基与铜基[27]. 铁基催化剂在高温效果转化效率较高却不能兼顾低温转化效率,故采用钒基与铜基两种基材,以期在不同的组合、不同的氨氮比(ANR)喷射下,根据排放结果数据得到最佳前/后级氨氮比分配以及前/后级 SCR 降低 NO_x 的最优比例. 在策略上需要考虑整个系统的氨分配策略与被动再生能力. 若前级 ANR 过高,导致发动机尾排中的 NO_x 过量消耗,则会影响后续被动再生的能力和效率;此外,过高的 ANR 还会引发氨泄露,泄露的氨气在柴油机氧化型催化剂中被氧化,进而导致后处理系统中 N_2O 生成量偏高,并为满足柴油机超低排放的要求提供解决思路.

2　试验设备及方法

2.1　试验方法

由于不同基材的催化剂对柴油机排放性能的影响差异,调整不同基材 SCR 催化剂的组合、配比、空速以及尿素喷射量等,对排放结果进行验证. 试验共涉及 4 个氮氧化合物监测点与两个尿素喷射点,通过不同的测点间的数据差异分析催化剂的性能表现. 为了使排放结果具备更高参考价值,采取了常用的排放测试方法,即稳态单点与热态 WHTC 循环,按照图 1 流程进行方案设计.

根据控制变量原则,试验对除尿素喷射氨氮比等输入变量以外的参数进行控制,相关参数见表 1,试验在发动机台架上进行,采用简易样件封装.

试验测试工况:稳态单点与热态 WHTC 循环,由于尿素在常温下的熔点为 165 ℃,所以在后处理系统中对于 SCR 而言,并非是全温度范围都有尿素参与反应,所以对于 SCR 低温转化效率的研究具有重要意义[28]. 在系统中 SCR 的常用工况温度范围在 300 ~ 450 ℃,此温度区间范围内 SCR 可发挥最大的转化效率能力. 鉴于在后处理系统中的尿素起喷温度以及常用工况,选择 180、350 和 400 ℃ 3 个稳态测试温度. 图 2 为试验装置示意,对应 3 个测试温度,前级氨氮比 M_1 设置为 0.5、0.8 和 1.2 共 3 个喷射比,后级氨氮比 M_2 设置为 1.0、1.2、1.4 和 2.0 共 4 个量值,共计 72 组数据. 后级尿素喷射量取决于测点 3 测出的实时数据,保证后级催化剂的转化效率.

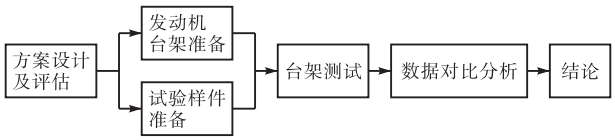


图 1　方案流程示意

Fig.1　Project procedures

表 1　控制变量参数

Tab.1　Control variable specifications

参数	数值
温度/℃	180，350，400
空速/h^{-1}	40 000
氨氮比	0.5，0.8，1.0，1.2，1.4，2.0

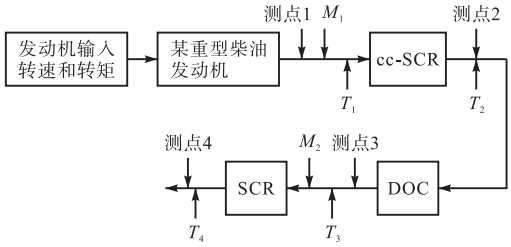


图 2　试验装置示意

Fig.2　Schematic of test device

WHTC 循环测试标准适用于总质量大于 3.5×10^3 kg 的道路车辆及其装用的柴油发动机,目的是用来进行生产一致性检查和在用符合性检查. WHTC 是 1 800 s 的瞬态循环,运行特性见图 3,通过不断地改变柴油发动机的转速和转矩模拟不同的行车运行工况,以期对整个柴油发动机与后处理系统而言,在全工况下满足排放法规. 由于此次研究做规律性探索,故以常用工况为准,不进行冷态 WHTC 循环的测试. 热态 WHTC 循环 M_1 设置为 0.5、0.8 和 1.2,M_2 设置为 1.0、1.2 和 1.4,共计 18 组数据.

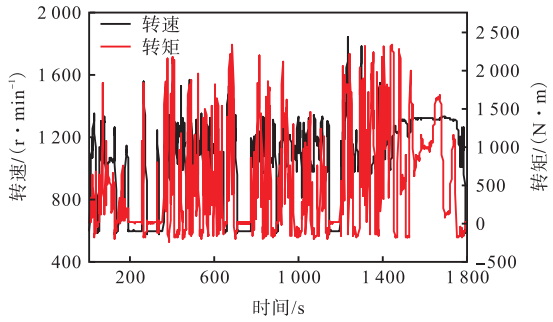


图 3　WHTC试验标准循环

Fig.3　WHTC test standard cycle

2.2　试验设备

试验所用发动机为多缸某重型柴油机，采用 AVL 测功机、Horiba 气体分析仪等测试设备，如表 2 所示，发动机采用高压共轨燃油系统，采用两级喷射系统，台架布置与后处理系统构成及尿素喷射点和测点布置如图 2 所示.

表 2　试验仪器参数

Tab.2　Specifications of testing equipments

设备名称	规格型号	生产厂商
电力测功机	AVL 660 kW/PUMA	AVL
油耗仪	AVL7351	AVL
进气流量计	AVL(0 ~ 1 200 kg/h)	AVL
颗粒排放设备	AVL472	AVL
烟度计	AVL415	AVL
气体排放设备	MEXA-7000	HORIBA

3　试验结果分析

3.1　稳态单点

3.1.1　前级转化效率

不同 ANR、不同排气温度的前级单点测试结果如图 4 所示，M_1 为 0.5 时，钒基和铜基 SCR 的转化效率均不超 50%，M_1 增加到 0.8 后，转化效率逐渐提升至 75% 左右. 180 ℃工况下紧耦合铜基比紧耦合钒基转化效率高出 20% 左右，350 ℃与 400 ℃工况下，铜基转化效率较钒基高 5% ~ 8%. 结果表明，钒基与铜基的转化效率随着温度的提高有明显提升，前级紧耦合铜基的转化效率高于紧耦合钒基.

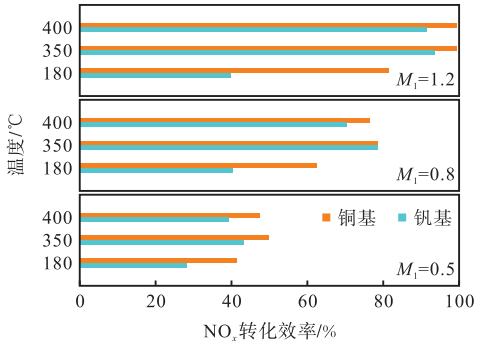


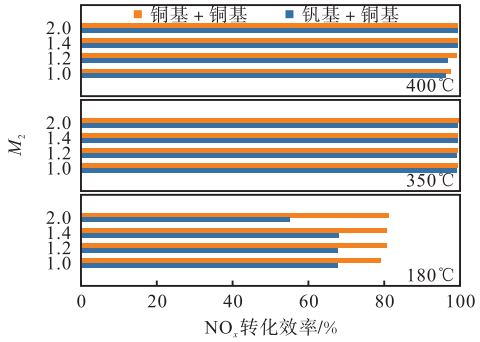
图 4　紧耦合 SCR 前级氮氧化合物转化效率

Fig.4　Conversion efficiency of nitrogen-oxygen compounds before tightly coupled SCR

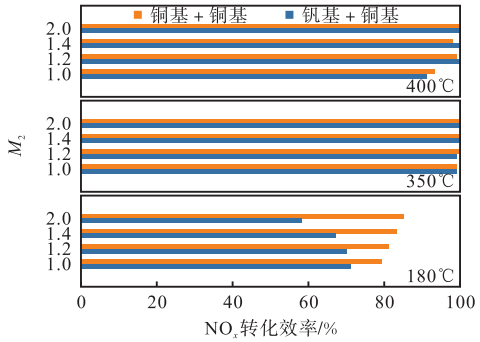
3.1.2　后级转化效率

后级的转化效率主要取决于前级氨泄漏、DOC 的过氧化和原排 NO_x 的转化效率等[29]. 图 5 为紧耦合后级 SCR 氮氧化合物转化效率. 在不同 ANR、不同排气温度条件下，钒基 + 铜基低温转化效率较差，铜基 + 铜基低温转化效率较高，在 180 ℃工况下，铜基 + 铜基的组合氮氧化合物转化效率较钒基 + 铜基高 10% 左右. 其主要原因是钒基 + 铜基组合前级的氮氧化合物转化效率较低，大量的氮氧化物泄漏到后级铜基 SCR，导致在相同的铜基配置下，钒基 + 铜基系统的后级转化效率较低.

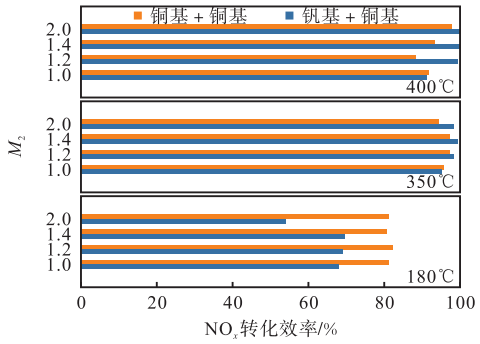
在 350 ℃和 400 ℃工况及两种基材组合下后级



（a）M_1 = 0.5



（b）M_1 = 0.8



（c）M_1 = 1.2

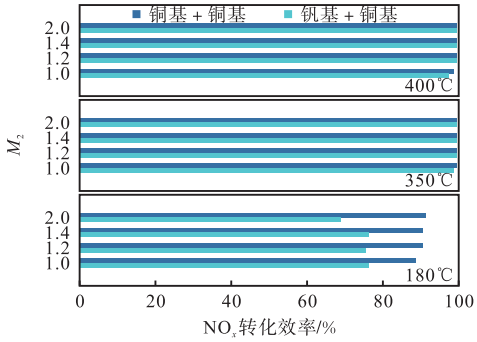
图 5　紧耦合后级 SCR 氮氧化合物转化效率

Fig.5　Conversion efficiency of nitrogen-oxygen compounds after tightly coupled SCR

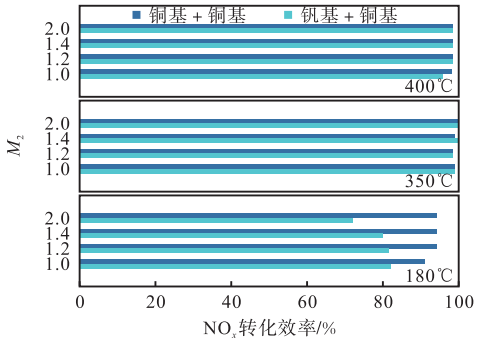
转化效率差异不明显，但在前级尿素过喷的情况下，铜基 + 铜基系统转化效率却略有降低，其主要原因是前级氨氮比高加上铜基较高的转化效率，导致原排中的 NO_x 绝大多数被消耗，后级需要处理的 NO_x 数量较低，铜基在较高的 NO_x 体积分数下具有高的转化效率，而在 NO_x 体积分数较低的情况下，由于化学平衡原理，被转化 NO_x 占比反而降低，故而前级为铜基时，ANR 控制在 0.8 以下为宜.

3.1.3 前/后级总体转化效率

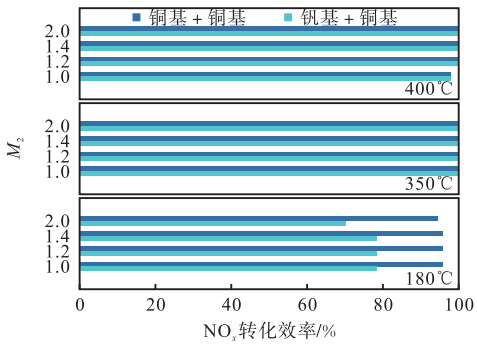
目前，通用的国Ⅵ柴油机后处理系统铜基 SCR 的 NO_x 转化效率在 180 ℃能达到 70% 左右，排温在 350 ℃和 400 ℃条件下，均能达到 99.9% 以上. 与图 6 中的数据进行对比，紧耦合钒基在 180 ℃工况下 NO_x



（a）$M_1 = 0.5$



（b）$M_1 = 0.8$



（c）$M_1 = 1.2$

图 6 稳态单点 SCR 前/后级总体氮氧化合物转化效率

Fig.6 Overall conversion efficiency of nitrogen-oxide compounds before/after steady-state single-point tightly coupled SCR

转化效率能提升 5% ~ 10%，紧耦合铜基能提升 16% ~ 22%，紧耦合方案能有效提升后处理系统中 NO_x 的转化效率. 中温段转化效率均在 99.9% 以上，与现有技术转化效率 99% 水平相当. 钒基 + 铜基组合在 M_1= 1.2 时，低温转化效率不升反降，其主要原因是前级尿素过喷再加上钒基的低温转化效率低，导致氨泄漏较大，如图 7 所示，大量的氨气经过 DOC 时被氧化成 NO_x，产生了一定的副产物，最终呈现在总体转化效率有所降低. 在尿素过喷情况下 DOC 中的氨气发生氧化反应为

$$2NH_3 + 2.5O_2 \rightarrow 2NO + 3H_2O \quad (19)$$

$$4NH_3 + 4O_2 \rightarrow 2N_2O + 6H_2O \quad (20)$$

由反应式(19)可知，在原有的废气组分中增加了额外的 NO_x 来源，导致后级的转化效率下降，因而整体转化效率下降.

在紧耦合后处理系统中，无论是钒基 + 铜基还是铜基 + 铜基的 SCR 技术方案，对于 NO_x 的转化效率都有明显的提升，钒基 + 铜基的 M_1 不宜过高，防止过量的氨涌入 DOC.

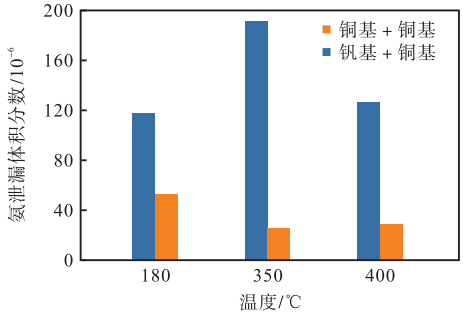


图 7 $M_1 = 1.2$ 时紧耦合 SCR 后氨泄露

Fig.7 Ammonia leakage after tightly coupled SCR at $M_1 = 1.2$

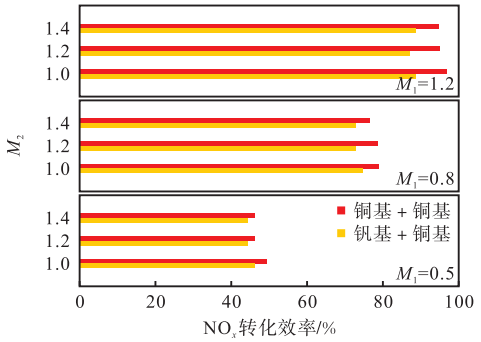
3.2 热态 WHTC

3.2.1 前级转化效率

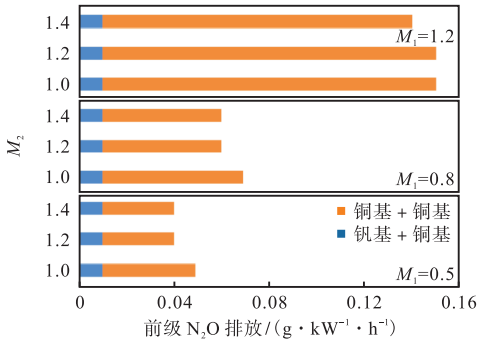
在热态 WHTC 循环下，重要的是考核不同工况下后处理系统的适应性. 图 8 为 WHTC 循环紧耦合 SCR 的 NO_x 转化效率和出口 N_2O 排放. 在 ANR 为 0.5 时，钒基和铜基的转化效率相当，ANR 提高后，铜基的优势体现了出来，依靠较强的 NO_x 转化能力，铜基的转化效率较钒基高 6% ~ 8%. Jung 等[30]研究发现催化产生 N_2O，铜基分子筛催化剂产生 N_2O 量比钒基催化剂多. 由图 8 可知，前级系统对于 N_2O 的生成结果是钒基要优于铜基；不同的氨氮比下，钒基 N_2O 生成均控制在 0.01 g/(kW · h)以下，铜基 N_2O 的生成量是随着 ANR 的升高而增加. 因此，降低 N_2O 生成量可以采用钒基催化剂.

图 9 所示前级出口 NO_x 与 PM 生成量的比值，

其主要意义在于反应后处理系统的催化再生能力，较高的比值代表系统有生成足够多的 NO_2 能力，这对于系统被动再生有较大优势，在 M_1=1.2 时，比值过小，不利于系统被动再生. 由此可见，对于两级喷射系统而言，M_1 选取较高数值利于主动再生为主的后处理系统，以被动再生为主的后处理系统，M_1 不宜超过 0.8.



（a）NO_x转化效率



（b）出口 N_2O 排放

图 8　WHTC 循环紧耦合 SCR 的 NO_x 转化效率和出口 N_2O 排放

Fig.8　Nitroxide conversion efficiency and outlet N_2O emissions at WHTC cycle tightly coupled SCR

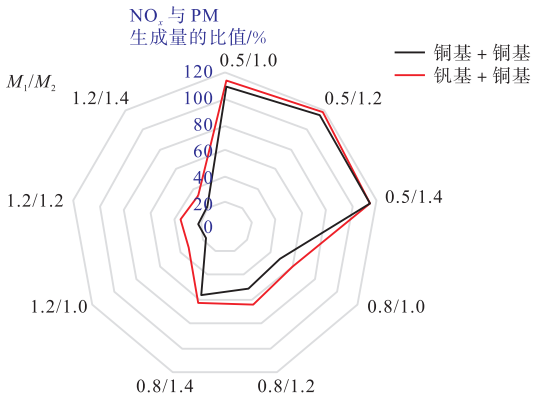


图 9　WHTC 循环紧耦合 SCR 出口 NO_x 与 PM 生成量的比值

Fig.9　Ratio of outlet NO_x to PM generation at WHTC cycle tightly coupled SCR

3.2.2　后级转化效率

钒基 + 铜基与铜基 + 铜基系统相比，低 ANR 下转换效率相当；高 ANR 下，钒基较铜基转换效率稍高，总体上两者的差异不超过 8%. 其中在高 ANR 下钒基 + 铜基后处理系统后级转化效率稍高，主要是由于过量的尿素喷射导致前级的氨泄漏较多，如图 10 所示，经过 DOC 处理后生成更高体积分数的 NO_x，所以后级铜基处理起来会更容易达到更高的转化效率见图 11，随着 M_2 升高 NO_x 转化效率相应升高.

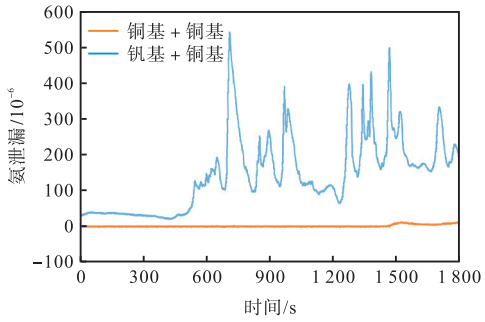


图 10　M_1 = 1.2 时 WHTC 循环紧耦合 SCR 后氨泄漏

Fig.10　Ammonia leakage of WHTC cycle after tightly coupled SCR at M_1 = 1.2

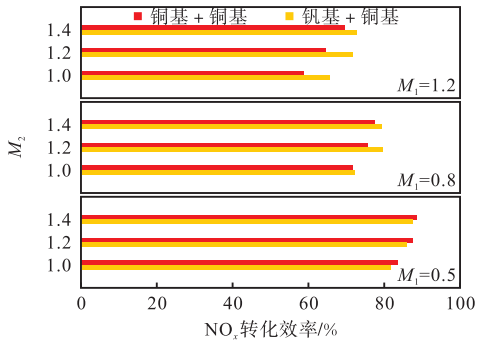


图 11　WHTC 循环后级 SCR NO_x 转化效率

Fig.11　Conversion efficiency of nitroxide compounds at WHTC post-cycle SCR

3.2.3　前/后级总体转化效率

图 12 所示铜基 + 铜基系统转化效率总体上较钒基 + 铜基系统高 3% 左右，现在通用的国Ⅵ后处理系

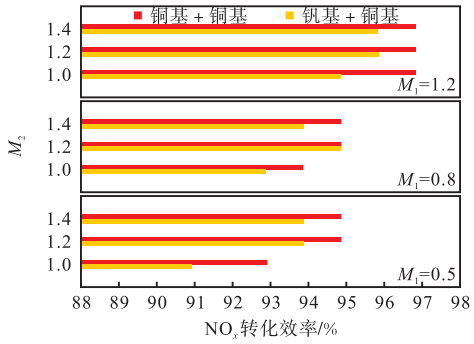


图 12　WHTC 循环前/后级总体 SCR 的 NO_x 转化效率

Fig.12　Total conversion efficiency of nitroxide in SCR before/after WHTC cycle

统 SCR 的 NO_x 转化效率在 95% 左右，在 ANR 为 0.8 以上均超过现有国Ⅵ后处理水平，ANR 为 0.5 时钒基 + 铜基系统具有较低的性能水平，相对来说铜基的转化效率比钒基高了一些，这与稳态单点的结论相符合，铜基具有更好的氨适应性，这与铜基采用的是分子筛结构有一定关系，分子筛结构可以进行储氨，相比钒基可以提前一定时间进行喷射尿素.

从 N_2O 生成结果来看，随着 M_1 的升高，N_2O 明显生成量变多，根据图 13 所示 WHTC 循环后级 SCR 出口 N_2O 排放及前级钒基 N_2O 生成量判断，N_2O 排放与前级 SCR 氨泄漏相关性极大，氨泄漏越高，N_2O 排放越高. 由此可见，DOC 的强氧化性对 N_2O 的生成具有重要意义，未来考虑低 N_2O 排放、DOC 的贵金属含量、配方构成以及催化选择性具有严格的挑战.

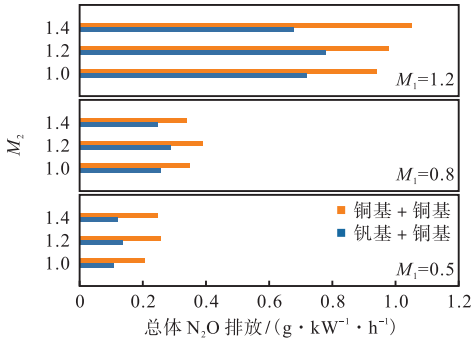


图 13 WHTC 循环后级 SCR 出口 N_2O 排放

Fig.13 N_2O emission at the outlet of WHTC post-cycle stage SCR

图 14 所示在低 ANR 下两套系统氨泄漏差异不大，高 ANR 下钒基 + 铜基较铜基 + 铜基氨泄漏偏高，虽然钒基对于 N_2O 的生成量较铜基有较大的优势，但在双级喷射系统下，ANR 的配置起到至关重要的因素，钒基低温转化效率低，这造成了大量的 NH_3 没有参与反应，一系列连锁影响导致最终的氨泄漏量

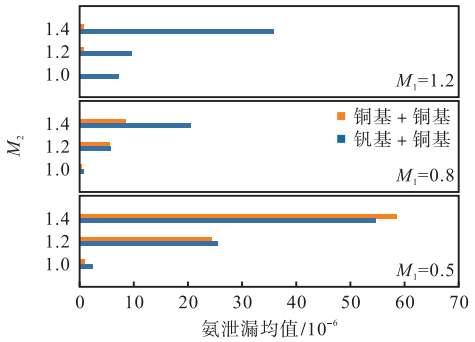


图 14 WHTC 循环后级 SCR 出口氨泄漏

Fig.14 Ammonia leakage at the outlet of WHTC post-cycle SCR

偏高，在高 ANR 下氨泄漏是铜基的 10 倍有余.

4 结 论

(1) 增压器后端增加紧耦合 SCR 有利于提高后处理系统 NO_x 转化效率，紧耦合铜基 SCR 在低温转化效率表现更优，相同工况下，铜基 cc-SCR + 铜基 SCR 系统对 NO_x 的转化效率优于钒基 cc-SCR + 铜基 SCR 系统，铜基 + 铜基催化剂组合可作推荐.

(2) 热态 WHTC 循环结果表明，钒基 SCR 的 N_2O 生成量较低，但前级氨氮比不易过高，以免造成氨泄漏过高生成大量 N_2O.

(3) 后级 SCR 转换效率随着前级 SCR 转化效率的提高而降低，前级 SCR 氨氮比过高，不利于后处理系统的 NO_x 排放控制及后级 SCR 催化剂性能的充分利用；紧耦合 SCR 对整个系统的被动再生影响较大，当 M_1 大于 0.8 后，导致前级出口 NO_x 与 PM 生成比值降低，不利于系统进行被动再生.

参考文献：

[1] 王喆. BYD 公司发展战略研究[D]. 沈阳：沈阳理工大学经济管理学院，2023.

[2] 帅石金，刘世宇，马骁，等. 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.

[3] Joshi M C，Gosala D B，Allen C M，et al. Reducing diesel engine drive cycle fuel consumption through use of cylinder deactivation to maintain aftertreatment component temperature during idle and low load operating conditions[J]. Frontiers in Mechanical Engineering，2017，3(8)：1-15.

[4] 楼狄明，李响，郭石磊，等. 重型柴油机冷 EGR 与 VGT 耦合优化试验研究[J]. 车用发动机，2019(3)：69-74.

[5] Barbosa F C. Heavy duty emission standards assessment：An engine and aftertreatment technological approach[C]// SAE Paper. Sao Paulo，Brazil，2016，2016-36-0167.

[6] Zhang M. Particulate emissions from a china V heavy-duty diesel engine with ultra low sulfur diesel fuel and DOC + CDPF + SCR[C]// SAE Paper. Shanghai，China，2017，2017-01-0914.

[7] Luján J M，Serrano J R，Piqueras P，et al. Turbine and exhaust ports thermal insulation impact on the engine efficiency and aftertreatment inlet temperature[J]. Applied Energy，2019，240：409-423.

[8] Ramesh A K，Gosala D B，Allen C，et al. Cylinder

deactivation for increased engine efficiency and after-treatment thermal management in diesel engines[C]// SAE Paper. Detroit，MI，USA，2018，2018-01-0384.

[9] 胡广地，马卢平，刘丛志，等. 柴油机 DOC + SCR 系统数值仿真与结构优化[J]. 内燃机学报，2019，37(2)：155-163.

[10] 官志明，于晖. 一种可使柴油发动机 NO_x 排放达到国六标准的尾气后处理系统[J]. 内燃机与配件，2019(8)：189-190.

[11] 沓勇，王雅荟，孙旭升. 一种高压共轨柴油发动机喷油器驱动电路及控制方法[J]. 内燃机与配件，2022(9)：11-13.

[12] 陶汉国，徐富强，汪利峰，等. 柴油机超低排放后处理系统及催化剂的研发探讨[J]. 中国环保产业，2021，281(11)：52-57，62.

[13] Herreros J M，Gill S S，Lefort I，et al. Enhancing the low temperature oxidation performance over a Pt and a Pt-Pd diesel oxidation catalyst[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2014，147：835-841.

[14] Khosravi M，Sola C，Abedi A，et al. Oxidation and selective catalytic reduction of NO by propene over Pt and Pt：Pd diesel oxidation catalysts[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2014，147：264-274.

[15] Leonardo L，Stamatios S，Antoinette B，et al. Effect of diesel oxidation catalysts on the diesel particulate filter regeneration process[J]. Environmental Science & Technology，2011，45(24)：10591-10597.

[16] Guan B，Zhan R，Lin H，et al. Review of the state-of-the-art of exhaust particulate filter technology in internal combustion engines[J]. Journal of Environmental Management，2015，154：225-258.

[17] 钟玉伟，谢夏琳，魏超，等. 不同颗粒物分布对柴油机颗粒过滤器再生性能的影响[J]. 汽车与新动力，2022，5(4)：47-52.

[18] 陈梦阳. 金属离子改性 Cu-SSZ-13 分子筛及其 NH_3-SCR 催化性能研究[D]. 长春：吉林大学化学学院，2022.

[19] 刘彪. 柴油机 Cu-SSZ-13 分子筛 SCR 催化剂 N_2O 生成机理研究[D]. 杭州：浙江大学能源工程学院，2021.

[20] Bendrich M，Scheuer A，Hayes R E，et al. Unified mechanistic model for standard SCR，fast SCR，and NO_2 SCR over a copper chabazite catalyst[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2018，222：76-87.

[21] 汪朝强，于飞，常仕英，等. 柴油机 SCRF 催化剂研究现状及展望[J]. 无机盐工业，2021，53(2)：5-10.

[22] 于飞，赖慧龙，郭律，等. 钒基催化剂 NH_3-SCR 低温反应特性研究[J]. 内燃机学报，2021，39(1)：74-80.

[23] Guan B，Zhan R，Li H，et al. Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NO_x from diesel engine exhaust[J]. Applied Thermal Engineering，2014，66：395-414.

[24] Nova I，Ciardelli C，Tronconi E，et al. NH_3-NO/NO_2 chemistry over V-based catalysts and its role in the mechanism of the fast SCR reaction[J]. Catalysis Today，2006，114(1)：3-12.

[25] Ciardelli C，Nova I，Tronconi E，et al. Reactivity of NO/NO_2 NH_3-SCR system for diesel exhaust aftertreatment：Identification of the reaction network as a function of temperature and NO_2 feed content[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2007，70(1)：80-90.

[26] 陈耀强，王健礼. 柴油车尾气净化催化剂[M]. 北京：科学出版社，2021：80-87.

[27] 孟忠伟，晋兆祥，陈超，等. DOC/SCR 组合方式及关键参数对 NO_x 转化效率的影响[J]. 环境工程学报，2017，11(10)：5483-5489.

[28] 张腾，刘兴华，靳航，等. 燃气车 PEMS 排放测试与发动机台架 WHTC 测试对比分析[J]. 车用发动机，2022(3)：82-87.

[29] 徐金源. 车用 SCR 氨储存特性试验及仿真研究[D]. 西安：长安大学能源与电气工程学院，2020.

[30] Jung Y，Shin Y J，Pyo Y D，et al. NO_x and N_2O emissions over a urea-SCR system containing both V_2O_5-WO_3/TiO_2 and Cu-zeolite catalysts in a diesel engine[J]. Chemical Engineering Journal，2017，326：853-862.