

基于氨均匀性对 SCR 系统性能影响的多通道一维仿真模型构建

田文龙, 罗峰, 郎俊宇, 马跃晋, 李国祥*

山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061

摘要:为提高全球统一稳态循环(world harmonized steady-state cycle, WHSC)工况中仿真计算的柴油机 NO_x 排放的准确性,分析造成仿真计算和试验测量的柴油机排放中 NO_x 差距过大的原因;提出一种多通道一维仿真模型,分析选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统中氨均匀性对 NO_x 排放的影响。结果表明:传统的一维仿真方法没有考虑氨均匀性对 SCR 性能的影响是造成仿真计算和试验测量的柴油机 NO_x 排放差距过大的原因;提出的多通道模型可以很好地预测氨均匀性对 SCR 性能的影响,当氨均匀性为 0.95 时,仿真计算的 NO_x 排放与试验的误差较小。考虑氨均匀性受工况变动的影响,提出的分段式氨均匀性方法可以进一步降低 NO_x 排放预测误差,将误差控制在 2% 以内。

关键词:尿素-SCR 系统;建模;多通道;氨均匀性

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)01-0024-08

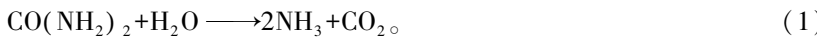
引用格式:田文龙,罗峰,郎俊宇,等. 基于氨均匀性对 SCR 系统性能影响的多通道一维仿真模型构建[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(1): 24-31.

TIAN Wenlong, LUO Feng, LANG Junyu, et al. Construction of a multi-channel 1-D simulation model based on the effect of ammonia uniformity on SCR system performance[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(1): 24-31.

0 引言

柴油机具有热效率高、碳排放较低、良好的燃油经济性和可靠性,在各个领域中得到广泛应用,但是柴油车排放的 NO_x 超过汽车总排放的 80%,是汽车 NO_x 排放的主要来源。为应对气候的变化和保护环境,国际监管机构正在制定和实施更加严格的排放标准。为满足日益严格的标准要求,各柴油机生产企业和研究机构开发了各种燃烧技术和排气后处理系统,选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术在 NO_x 转化方面表现出良好的性能,得到广泛采用^[1]。

柴油尾气处理液(diesel exhaust fluid, DEF)也称车用尿素,是一种尿素质量分数为 32.5%的尿素水溶液,尿素在 SCR 系统中经历一系列复杂的化学反应,其中的主要反应物是通过水解产生的氨气^[2]。考虑到操作安全,尿素溶液的催化水解通常发生在 SCR 系统上游的混合器中,反应式为:



影响尿素-SCR 系统性能的因素包括氨的均匀性、排气温度、排气质量流量、尿素转化率、催化剂活

收稿日期:2025-01-16

基金项目:山东省重点研发计划项目(2024TSGC0484);山东大学试验室重点项目(SY20232305);教育部产学研合作协同育人项目(SDUZJHJ[2024]2966号)

第一作者简介:田文龙(1999—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为内燃机排气净化,E-mail: 202214499@mail.sdu.edu.cn

***通信作者简介:**李国祥(1965—),男,山东蓬莱人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机排放控制与可靠性提升技术、混合动力新能源汽车技术,E-mail: liguox@sdu.edu.cn。

性等^[3-6]。在尿素-SCR 系统中,提高尿素分解效率以及氨均匀性是主要难题。后处理系统中,尿素水溶液通过水解和热解反应生成氨气的过程受到排气温度、流量、喷射装置和混合器结构的影响,SCR 入口截面上的氨浓度差异导致氨分布不均。

在一维仿真模型中,整个 SCR 被视为简单一维的均匀通道,即 SCR 中非轴向方向的气体浓度、流量和温度处处相同,不考虑由于气体分布不均匀带来的影响。但实际上由于停留时间不足、混合器效果较差、DEF 分解不完全以及 DEF 喷雾效果不佳等因素,实际的后处理系统中 SCR 入口处的氨在非轴向方向上分布不均匀,如果在 SCR 入口截面处部分氨氮比大于 1,出现氨过量,导致氨泄漏和尿素结晶;如果部分截面氨氮比小于 1,NO_x 不能充分反应,使得 NO_x 的转化率降低。对此大量学者通过试验和仿真方法研究氨不均匀分布对 SCR 系统的影响,以及有关氨分布的影响因素,并针对影响因素进行研究和优化,研究表明:催化剂入口处的氨分布显著影响 NO_x 转化效率,同时不同的尿素喷射装置和混合器结构极大地影响氨的均匀性,因此设计不同的混合器结构和喷射装置以提高氨均匀性是目前主要的研究方向之一^[6-12]。

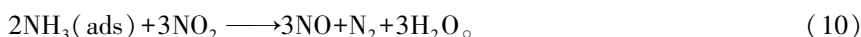
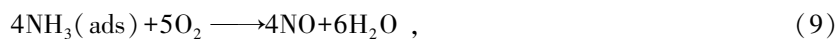
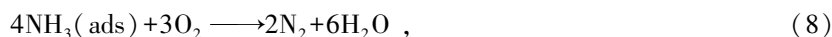
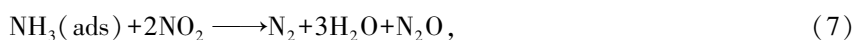
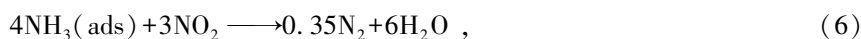
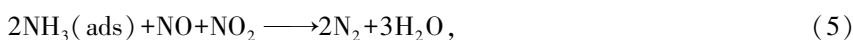
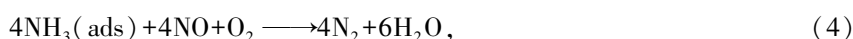
Waradana 等^[13]应用两种类型的尿素喷射装置研究了 SCR 系统中的氨均匀性,以及氨均匀性和尿素喷射时间的关系,预测 SCR 系统的 NO_x 转化效率变化趋势^[14-15]。Song 等^[16]采用一维模型模拟研究排气温度、排气流量的不均匀性以及氨不均匀分布对 Cu-SCR 系统性能的影响,在美国联邦排放测试工况循环(federal test procedure,FTP)中,SCR 入口氨的不均匀分布导致 NO_x 转化效率降低 3.5%。Mckinley 等^[17]通过仿真研究,发现提高流场和气相组分均匀性可以提高 NO_x 转化效率并减少氨泄漏。Dannalapati 等^[18]利用含有混合器的三维模型进行计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)仿真,研究了排气温度、排气流量、排气中 NO 和 NO₂ 物质的量的比对 SCR 系统催化转化性能的影响。

为更全面地了解排气温度、排气流量和氨均匀性对 SCR 性能的影响,缩短计算时间,提高计算精度,本文中提出一种多通道模型预测 SCR 性能,根据氨均匀性量化 SCR 入口尿素分布,基于在全球统一稳态循环(world harmonized steady-state cycle,WHSC)试验中测量的结果,建立相应的模拟条件;研究氨均匀性对于 SCR 系统性能的影响,为 SCR 建模和优化引入一种更好的工具,为高效尿素喷射 SCR 系统的设计和验证提供更准确的方法。

1 建模

1.1 建立一维模型

参照文献[19],采用计算机自适应仿真软件 CATSim 对 SCR 系统进行建模和计算。CATSim 涵盖了催化剂、管道、锥体、喷射器、连接件以及废气再循环(exhaust gas recirculation,EGR)阀的数值模型,考虑气相中的均相反应,忽略排气管沿线的非催化表面反应。SCR 反应遵循 Eley-Rideal 反应机理,即气态 NO_x 与强吸附的氨反应,考虑了氨的吸附和解吸过程。采用全局动力学形式为每个组分创建总体动力学模型,动力学形式表示为阿伦尼乌斯方程。Cu-SCR 模型的反应框架包括以下反应:



反应式(2)为尿素水解产生的氨气在催化剂载体上的吸附反应;反应式(3)为部分 NO 直接被氧化为

NO_2 ; 反应式(4)~(6)是 SCR 中的主要反应,吸附态的氨将 NO_x 催化转化氮气和 H_2O ,3 个反应分别为标准 SCR 反应、快速 SCR 反应和慢速 SCR 反应;其余反应为 SCR 中可能发生的副反应。

假设整体式催化剂模型中每个单独通道内的条件完全相同,在垂直于流动方向的法向截面上不存在径向流体流速和组分浓度梯度。SCR 模型是通过整体式催化剂中的一维单通道近似构建,是由各组分的反应过程、质量平衡方程、能量平衡方程和动量平衡方程以及涂层表面的动力学反应推导^[20],用于计算的 Cu-SCR 的 SCR 反应动力学使用台架反应器的测试数据开发和校准^[19]。

质量平衡方程为:

$$\varphi \rho \frac{d\mu_i}{dt} = - \frac{d(\dot{m}\mu_i)}{dx} - \varphi \sum_j M \omega_{i,j} R_{Hj} - k_{mi} S \rho (\mu_i - \mu_{si}), \quad (11)$$

式中: φ 为孔隙率; ρ 为气相的密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; μ_i 为组分 i 在气相中的质量分数; μ_{si} 为组分 i 在固相中的质量分数; x 为轴坐标水平方向, m ; $\dot{m}$ 是 SCR 入口处气体的质量流量, kg/s ; R_{Hj} 为气相中的反应速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; $\omega_{i,j}$ 为组分 i 在反应 j 中的化学计量比; k_{mi} 为组分 i 的扩散系数, m^2/s ; S 为固相比表面积, m^2 ; M 为气体摩尔质量, kg/mol 。

能量平衡方程为:

$$(1 - \varphi) \rho_s c_{ps} \frac{dT_s}{dt} = (1 - \varphi) \lambda_s \frac{d^2 T_s}{dx^2} - h S (T_s - T) + \sum \Delta(H_R) R_s, \quad (12)$$

式中: ρ_s 为涂层相的密度, kg/m^3 ; c_{ps} 为固相的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_s 为固相热力学温度, K ; λ_s 为固相的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为气相热力学温度, K ; h 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\Delta(H_R)$ 为反应焓, J ; R_s 为固相中的反应速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

动量平衡方程为:

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{d(\dot{m}v)}{dx} - A \varphi \frac{dp}{dx} - 2 \frac{f \dot{m} v}{d_h}, \quad (13)$$

式中: v 为流体的表观速度, m/s ; A 为 SCR 的开口面积, m^2 ; p 为压力, Pa ; f 为摩擦系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; d_h 为基底通道的水力直径, m 。

1.2 建立多通道模型

在进行大规模的参数模拟时,通常认为单通道模型中非轴向方向的氨均匀分布,忽略非均匀流动分布的影响,然而实际应用中由氨分布不均匀带来的影响不可忽视^[21]。通常可以通过试验测量氨不均匀分布,也可以借助 CFD 方法估算 SCR 入口处氨的空间分布。还可以采用更简便的方法,无需进行详细测试或建模,利用均匀性指数描述横截面上氨气分布的均匀程度^[22]。

均匀性指数

$$U_{\text{lvap}} = 1 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{|c_k - \bar{c}| A_k}{A \bar{c}}, \quad (14)$$

式中: c_k 为尿素、氨或异氰酸(HNCO)的浓度, mol/m^3 ,其中 k 为网格编号, $k=1, 2, \dots, n$, n 为模型中的网格数; A_k 为网格 k 的面积, m^2 ; $\bar{c}$ 为横截面上 c_k 的平均值。

根据均匀性指数的定义, $U_{\text{lvap}}=0 \sim 1$, U_{lvap} 越接近 1,说明分布均匀性指数越好。SCR 入口处的氨均匀性指数通常为 0.64~0.98。没有静态混合器的后处理系统,氨的均匀性指数约为 0.75;设计良好的混合器可使氨的均匀性指数为 0.85~0.90,部分混合器的氨均匀性指数可达 0.95 甚至更高。

本文中以局部尿素喷射量和平均喷射量的比表征局部氨的浓度与整个截面氨的平均浓度的比。将尿素局部喷射量和平均喷射量之比定义为喷射量因子,作为正态分布函数的自变量,表示不同通道的氨浓度。由于排气温度和排气流量处处均匀,所以每个通道的面积与整个界面的面积之比等于该通道的排气流量与整个截面的排气流量之比,将通道与截面的排气流量比定义为概率密度因子,作为正态分布函数的因变量。通过喷射量因子求得不同氨浓度对应通道的概率密度因子,然后将概率密度因子与总排气

不同尿素喷射量比的概率密度因子

$$P = \exp[-(r-1)^2/(2\sigma^2)]/\sqrt{2\pi\sigma} \quad (\sigma > 0), \quad (15)$$

式中: σ 为尿素喷射因子的标准差, r 为尿素喷射因子。

可以调整正态分布函数中的方差获得不同的氨均匀性下的概率密度因子分布,得到不同均匀性下的 NO_x 排放或氨泄漏。该模型中通道数越多,仿真计算的精度越高,但计算的时间越长。综合考虑计算的精度和时间成本,本文中采用 20 个通道进行仿真计算。具体的计算过程如图 1 所示。

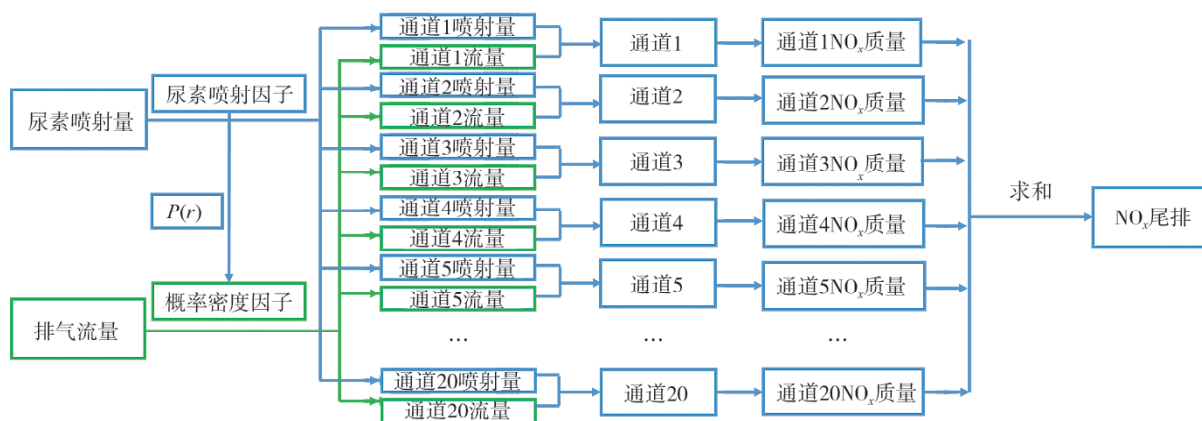


图 1 多通道建模方法

2 结果分析

2.1 一维模型校准

某排量为 8 L 的发动机,配备包含柴油机氧化催化剂(diesel oxidation catalyst,DOC)、催化型柴油颗粒捕集器(catalytic diesel particulate filter,CDPF)、选择性催化还原系统(SCR)以及氨氧化催化剂(ammonia slip catalyst,ASC)的综合后处理系统,对该发动机进行 WHSC 测试。试验期间,使用尿素质量分数为 32.5% 的标准尿素水溶液。排气中的 NO_x 由 AVL i60 排放分析仪测量,泄漏的氨由氨分析仪测量。整个试验程序符合文献[23]的规定。该模型基于 WHSC 测试的试验结果进行校准。以 SCR 的入口温度作为输入,通过调整一维模型热传递参数校准温度曲线。仿真和试验的 SCR 出口排气温度的对比如图 2 所示。由图 2 可知:仿真和试验测量的温度基本吻合,整体差异较小,表明该一维模型能够较好地反应 SCR 的反应过程。

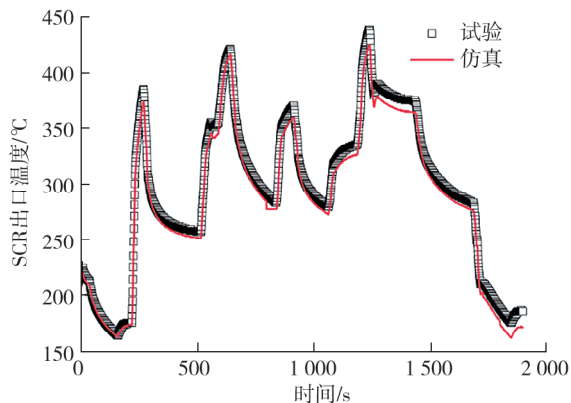


图2 仿真与试验的 SCR 出口排气温度对比

利用现有的一维模型,假设 SCR 入口处的氨完全均匀分布,以试验测得的尿素喷射量为 SCR 入口处的尿素喷射量进行模型验证,一维模型的仿真结果与试验结果的对比如图 3 所示。由图 3 可知:SCR 出口 NO

该误差可能由以下几个因素造成:1)SCR 中排气的温度和流速均匀性较差导致 NO_x 转化率较低,但

文献[9]研究表明排气流速和温度不均匀对 Cu-SCR 的 NO_x 转化性能影响不显著,且图 2 中仿真和试验的温度表现出良好的相关性,可排除温度和速度带来的偏差影响。2) 由于工况的变化和喷射装置能力的限制,尿素的实际喷射量与该工况下电子控制单元 (electronic control unit, ECU) 中计算的喷射量存在差异,此时的实际喷射量与 ECU 计算的尿素喷射量的比可能小于 1,从而导致实际喷射量不足。实际喷射量不足也可能导致 NO_x 转化能力不足,进而导致排放中的 NO_x 累积质量增加。

本文中通过仿真计算尿素喷射比分别为 85%、90%、95% 时排气中 NO_x 累积质量,与试验结果对比如图 4 所示。由图 4 可知:喷射比越小,尾排中 NO_x 的累积质量越大;尿素喷射比为 95% 时最终尾排中 NO_x 的累积质量与试验结果基本一致,但是整个 WHSC 中瞬态 NO_x 排放与试验结果不能很好地拟合。说明仿真与试验的差异并不是喷射比小于 1 导致的,排除排气温度和流量的影响,该差异可能是因为氨的不均匀分布导致的 NO_x 排放增加。

2.2 多通道模型验证和结果

NO_x 的转化效率与氨均匀性密切相关^[24],利用多通道模型模拟不同氨均匀性下的尿素分布,当氨均匀性指数分别为 0.95、0.90 和 0.85 时,对应的喷射量因子和概率密度因子的关系如图 5 所示。为保证尿素喷射量的质量守恒,喷射量因子的平均值应为 1。分别计算 20 个通道的尿素喷射量,从而得到每个通道对应的 NO_x 累积质量;将每个通道的 NO_x 累积质量进行求和,获得多通道模型最终的 NO_x 累积质量。

WHSC 中,SCR 出口处 NO_x 累积质量的仿真与试验结果对比如图 6 所示,其中氨均匀性指数为 1.00 等同于传统的单通道一维模型。由图 6 可知:随着氨均匀性指数降低,混合器或喷射装置性能下降, NO_x 累积质量不断增加;氨均匀性指数为 0.95 时,试验与仿真结果表现出良好的一致性,说明该后处理系统 SCR 入口处氨均匀性指数约为 0.95,此时的 NO_x 转化率(NO_x 原排与尾排的差与 NO_x 原排的比)为 97%;当氨均匀性指数降低到 0.90 时, NO_x 累积质量相比氨均匀性指数为 0.95 时增加一倍,约为 9.5 g;当氨均匀性指数进一步降低到 0.85 时, NO_x 累积质量进一步增大,约为 16.0 g,此时的 NO_x 转化率仅为 90%。上述结果表明,氨均匀性对于 NO_x 转化率的影响较大,改善氨均匀性可以有效提高 NO_x

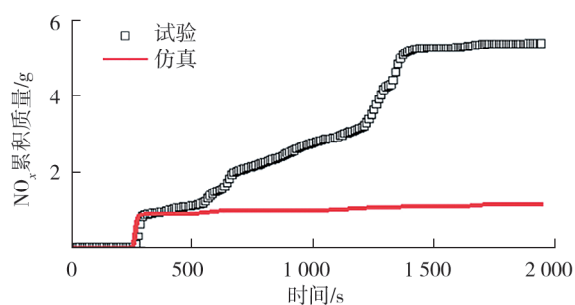


图3 具有均匀空间尿素分布的一维模型的模拟结果

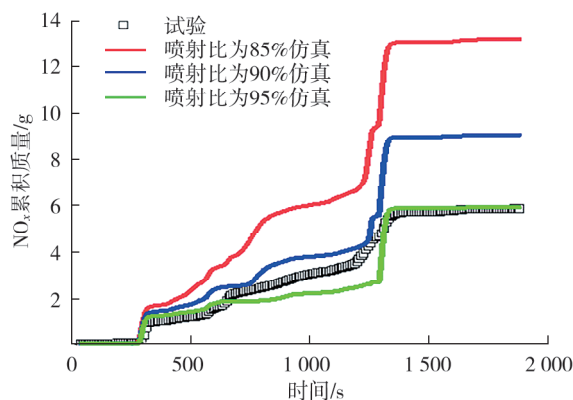


图4 不同尿素喷射比的一维模型的模拟结果

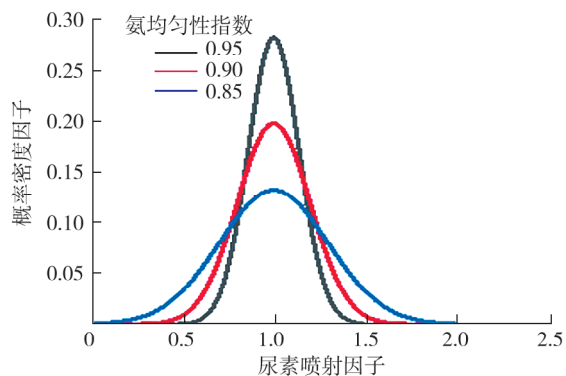


图5 不同氨均匀性下的多通道尿素喷射分布

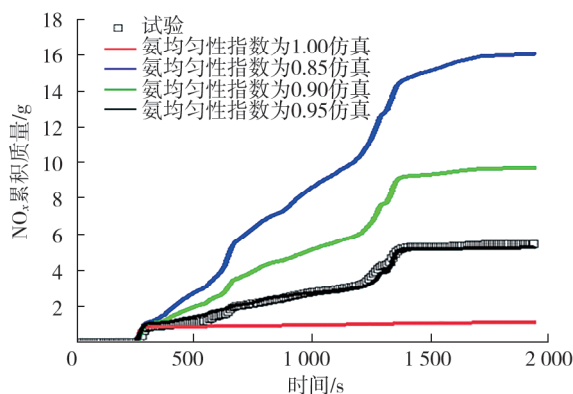


图6 不同氨均匀性下的多通道模型仿真计算的 NO_x 累积质量与试验结果对比

的转化率。

氨均匀性指数为 0.95 时仿真和试验得到的 NO_x 累积质量仍存在一定差距,这可能是由于随着循环的进行,工况不断变化,氨均匀性也随之波动导致的。因此,本文中进一步采用分段式氨均匀性指数描述整个循环的氨均匀性。在平均氨均匀性指数为 0.95 的基础上,当温度较高、流量较大时,适当增大氨均匀性指数,设置氨均匀性指数为 0.97;当温度较低、流量较小时,适当减小氨均匀性指数,设置氨均匀性指数为 0.92。使用分段式氨均匀性指数的多通道 NO_x 累积质量仿真和试验结果对比如图 7 所示。由图 7 可知:仿真计算的 NO_x 累积质量与试验结果吻合良好,仿真计算的 NO_x 转化率与试验结果的相对误差小于 2%,与文献[16,25-26]中研究的情况类似。这些结果证实,与氨均匀性指数为 1.00 的理想混合效果相比,氨均匀性指数应大于 0.95 才能使 NO_x 转化效率损失最小,这与 Thomas 的建议类似。由此可以看出,相比传统的一维模型,多通道模型考虑了氨均匀性指数这一关键影响因素,一方面,可以研究不同的氨均匀性对于 SCR 系统性能的影响,相比传统的试验和三维仿真可以节省大量的时间和成本;另一方面,分段式氨均匀性计算的 NO_x 转化率与试验测得的误差不超过 2%,说明多通道模型可以有效模拟试验结果,提高一维仿真的计算精度。

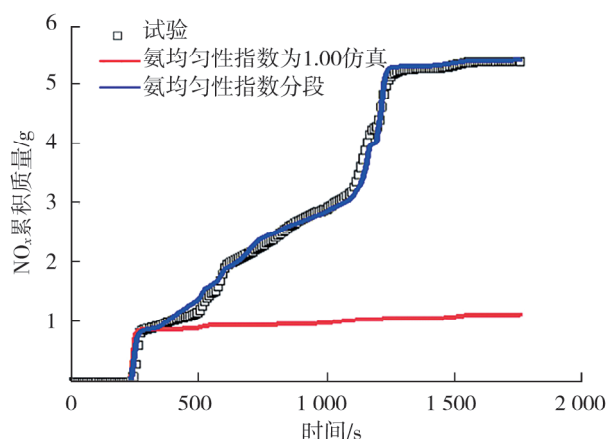


图7 分段式氨均匀性的多通道仿真与试验结果对比

3 结论

1)提出了一种多通道的一维动力学模型,以预测 WHSC 中 SCR 瞬态性能。基于氨均匀性对 SCR 入口处的氨气分布进行量化,确定每个通道的尿素输入,并根据对应的概率密度因子求解 NO_x 累积质量,仿真与试验结果的吻合良好。

2)将 SCR 入口处的氨均匀性指数从 0.85 提高到 1.00,可使 NO_x 转化效率由 90% 提高到 97%;考虑到氨均匀随工况变动的特点,提出分段式氨均匀性,计算的 NO_x 转化率与试验测得的误差不超过 2%,提高了计算精度。

3)与传统的一维模型不同,该多通道模型将氨均匀性纳入建模,提供了更加精准的一维模型,可以为催化剂技术、混合器设计优化、发动机校准和排放测试循环提供更好的工具和更精确的预测。

4)该多通道模型可以与精密监测设备结合以获得更加精准的 SCR 入口处的氨均匀性,进一步提高计算的准确度;同时可以与 CFD 仿真结合已获得氨均匀性的云图分布,测得不同工况下不同氨气浓度占比,从而优化概率密度因子函数。同时,考虑到不同循环中氨均匀性可能随循环而波动,本文中采用的简单分段式氨均匀性仍然存在进一步优化空间。

参考文献:

- [1] LAMBERT C, HAMMERLE R, MCGILL R, et al. Technical advantages of urea SCR for light-duty and heavy-duty diesel vehicle applications [C]//Proceedings of SAE 2004 World Congress & Exhibition. Warrendale, USA: SAE International, 2004.
- [2] LI D, ZHU S P, ZHANG G D, et al. Comprehensive experimental and numerical optimization of diesel engine thermal management strategy for emission clarification and carbon dioxide control[J]. Processes, 2023, 11(4): 1252.
- [3] MEHDI G, ZHOU S, ZHU Y Q, et al. Numerical investigation of SCR mixer design optimization for improved performance [J]. Processes, 2019, 7(3): 168.
- [4] PARAMADAVAN T, PANT A. Selective catalytic reduction converter design: the effect of ammonia nonuniformity at inlet

- [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, 30(12): 2170–2177.
- [5] SAMPATH M K, LACIN F. CFD study of sensitivity parameters in SCR NO_x reduction modeling[C]//Proceedings of SAE 2014 Commercial Vehicle Engineering Congress. Detroit, USA; SAE International, 2014.
- [6] JANG J, NA S, ROH H, et al. Spraying and mixing characteristics of urea in a static mixer applied marine SCR system[J]. Energies, 2021, 14(18): 1–12.
- [7] ZHANG X G, ROMZEK M. 3-D numerical study of flow mixing in front of SCR for different injection systems[C]//Proceedings of SAE World Congress & Exhibition. Detroit, USA; SAE International, 2007.
- [8] CHO I, LEE S, KANG H, et al. A study on the NO_x reduction of urea-selective catalytic reduction (SCR) system in a heavy duty diesel engine [C]//Proceedings of Asia Pacific Automotive Engineering Conference 2007. Detroit, USA; SAE International, 2007.
- [9] JEONG S J, LEE S J, KIM W S, et al. Simulation on the optimum shape and location of urea injector for urea-SCR system of heavy-duty diesel engine to prevent NH_3 slip[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(12): 1824–1828.
- [10] HELDEN R, VERBEEK R, WILLEMS F, et al. Optimization of urea SCR DeNO_x systems for HD diesel engines[C]//Proceedings of 2004 SAE World Congress & Exhibition. Detroit, USA; SAE International, 2004.
- [11] KUTERNOWSKI F, STASZAK M, STASZAK K. Modeling of urea decomposition in selective catalytic reduction (SCR) for systems of diesel exhaust gases aftertreatment by finite volume method[J]. Catalysts, 2020, 10(7): 749.
- [12] LI L, LIN W, ZHANG Y T. A new dynamic injection system of urea-water solution for a vehicular select catalyst reduction system[J]. Energies, 2017, 10(1): 12.
- [13] WARADANA M K A, OH K, LIM O. Investigation of urea uniformity with different types of urea injectors in an SCR system[J]. Catalysts, 2020, 10(11): 1269.
- [14] WARADANA M K A, SHANHARIAR G M H, OH K, et al. Ammonia uniformity to predict NO_x reduction efficiency in an SCR system[J]. Nature Review Neuro Science, 2019, 20(2): 313–325.
- [15] WARADANA M K A, OH K, LEE Y J, et al. Effects of urea injection timing on predicting NO_x conversion in SCR systems [J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(1): 137–145.
- [16] SONG X B, NABER J, JOHNSON J H. Nonuniformity and NO_2/NO_x ratio effects on the SCR performance under transient engine conditions[C]//Proceedings of SAE 2014 World Congress & Exhibition. Detroit, USA; SAE International, 2014.
- [17] MCKINLEY T L, ALLEYNE A G, LEE C F. Mixture non-uniformity in SCR systems: modeling and uniformity index requirements for steady-state and transient operation [C]//Proceedings of SAE 2010 World Congress & Exhibition. Detroit, USA; SAE International, 2010.
- [18] DANNALAPATI S, AGHALAYAM P, KAISARE N. Modeling the effect of nonuniformities from urea injection on SCR performance using CFD[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58: 20247–20258.
- [19] WU Y J, WANG F S, TANG W Y, et al. Urea decomposition and implication for NO_x reduction with Cu-Zeolite and vanadia-selective catalytic reduction[J]. Chemical Engineering & Technology, 2020, 43(9): 1758–1764.
- [20] BETTONI F, ROHR P R. SCR de NO_x process for real diesel exhaust gas under steady-state and transient conditions[J]. Chemical Engineering & Technology, 1998, 21(10): 800–804.
- [21] LIU J, XU M Y, GUO W J, et al. Flow and heat transfer mechanism of a regenerative cooling channel mounted with pin-fins using supercritical CO_2 as coolant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208: 109425.
- [22] 马卢平. 柴油机后处理装置的流场仿真分析与优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [23] 环境保护部. 柴油发动机氮氧化物还原剂尿素水溶液 (AUS 32): GB 29518—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [24] KU K W, HONG J G, PARK C W, et al. Effects of various factors on the conversion efficiency of urea solution in a urea selective catalytic reduction system[J]. Energy Fuels, 2014, 28(9): 5959–5967.
- [25] KALYANKAR A, MUNNANNUR A, LIU Z G. Predictive modeling of impact of ANR non-uniformity on transient SCR system DeNO_x performance[C]//Proceedings of SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit, USA; SAE International, 2015.
- [26] JOHANSSON A, WALLIN U, KARLSSON M, et al. Investigation on uniformity indices used for diesel exhaust after-treatment systems[C]//Proceedings of SAE World Congress & Exhibition. Detroit, USA; SAE International, 2008.

Construction of a multi-channel 1-D simulation model based on the effect of ammonia uniformity on SCR system performance

TIAN Wenlong, LUO Feng, LANG Junyu, MA Yuejin, LI Guoxiang^{*}

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

Abstract: To enhance the accuracy of NO_x emission simulation for diesel engines under the world harmonized steady-state cycle (WHSC), the causes of the significant discrepancy between simulated and experimentally measured NO_x emissions in diesel engine exhaust are analyzed. On this basis, a multi-channel one-dimensional simulation model is proposed to investigate the influence of ammonia uniformity on NO_x emissions in the selective catalytic reduction (SCR) system. The results demonstrate that the traditional one-dimensional simulation method, which neglects the impact of ammonia uniformity on SCR performance, is the primary reason for the large deviation between simulated and experimentally measured NO_x emissions. The multi-channel model proposed in this study effectively predicts the effect of ammonia uniformity on SCR performance. When the ammonia uniformity index reaches 0.95, the error between the simulated NO_x emissions and experimental result is significantly reduced. Considering the influence of operating conditions on ammonia uniformity, a segmented ammonia uniformity model is introduced. This approach further reduces the prediction error of NO_x emissions, maintaining the error within 2%.

Keywords: urea-SCR system; modelling; multi-channel; ammonia uniformity

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第8页)

The influence of exhaust catalytic converter on the evolution of engine exhaust particulate matter

CHEN Zhengguo¹, YANG Xiaodong², LIU Qingyang¹, LIU Haoye^{1*}

1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Wuxi Weifu Lida Catalytic Purifier Co., Ltd., Wuxi 214177, China

Abstract: To investigate the impact of the exhaust catalytic converter on the evolution of exhaust particles, the non-volatile particles and semi-volatile particles in the upstream and downstream of the exhaust catalytic converter of a direct injection gasoline engine are measured and analyzed. The results show that the influence of exhaust catalytic converter on exhaust particles includes two aspects: direct filtration and removal of nucleation precursors. Exhaust catalytic converter can directly filter non-volatile particles in high-temperature exhaust with a filtration efficiency of 20%–35%, and the filtration process includes the capture and oxidation of particles. Exhaust catalytic converter can also remove semi-volatile polycyclic aromatic hydrocarbons from the exhaust, thereby inhibiting the conversion of these components into semi-volatile particulate matter during the exhaust temperature reduction process in the exhaust.

Keywords: particulate matter; exhaust catalytic converter; gasoline engine

(责任编辑:刘丽君)