

尿素喷射策略对柴油机排放性能影响的试验研究

彭滔¹, 余道广², 崔员萦³, 张革成¹, 孙柯¹, 白书战^{1*}

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学后勤保障部, 山东 济南 250061;

3. 山东财经大学工商管理学院, 山东 济南 250014

摘要:为提高 NO_x 转化效率、减少氨泄漏,对采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术的柴油机排气后处理系统开展试验,研究不同空速和温度下的尿素不均匀喷射对 NO_x 转换效率、氨储存和氨泄漏的影响。试验结果表明:在固定的空速下,氨泄漏的程度与温度的变化有关,温度升高,催化还原反应加快,氨泄漏减小;温度对催化还原反应速率的影响较大,当空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 时,高温工况下SCR内的反应速率远高于低温工况;空速对催化还原反应速率的影响较小,相同温度下,当空速由 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 增大为 $40\,000\text{ h}^{-1}$ 时,SCR内的平均反应速率基本不变;但提高空速加剧氨泄漏,抵消 NO_x 转化效率提高获得的效益。

关键词:柴油机;氨泄漏;转换效率;反应速率;空速

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0067-06

引用格式:彭滔,余道广,崔员萦,等.尿素喷射策略对柴油机排放性能影响的试验研究[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):67-72.

PENG Tao, YU Daoguang, CUI Yuanying, et al. Experimental study on the influence of urea injection strategy of the emission performance for diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2):67-72.

0 引言

相比汽油发动机,柴油发动机具有更高的热效率和更低的 CO_2 排放,广泛应用于重型运输领域。但柴油发动机排放的 NO_x 是造成大气污染的主要原因之一,随着排放标准越来越严格,越来越需要有效减少 NO_x 排放的技术。选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术是一种使用尿素作为还原剂减少 NO_x 排放的有效方法^[1],SCR技术将尿素热解产生的 NH_3 作为还原剂注入排气管,在催化剂作用下在管道中与 NO_x 反应生成 N_2 和 H_2O 。但该技术仍存在不足,如柴油发动机低速时 NO_x 的转化效率较低且存在氨泄漏的风险。因此,有必要开展试验,分析导致 NO_x 转化效率较低的因素,制定合理方案,使柴油发动机在任何工作条件下具有更低的氨泄漏和更高的 NO_x 转化效率。试验表明:吸附过程中,低温下氨对 NO_x 的转化效率较低,需要增大氨输入量,但在快速运行模式下需要控制尿素喷射量,因为随着尿素喷射量增加,催化剂载体中的氨储存量大大提高,一次分配超过最大储存量后易发生氨泄漏^[2-3]。因此,应准确预估氨的储存量,根据发动机的工作条件合理控制尿素喷射量,并尽量减少或避免氨泄漏。

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(SDUZJH[2024]2966号)

第一作者简介:彭滔(2000—),男,重庆涪陵人,硕士研究生,主要研究方向为柴油机后处理系统,E-mail:xxxt20210806@163.com。

***通信作者简介:**白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,博士生导师,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。

本文中基于某满足国六排放标准的柴油发动机,针对钒基 SCR 催化剂的氨储存和 NO_x 转化效率进行匹配研究,根据不同的运行条件,制定合理的尿素喷射策略,使整机具有更高的 NO_x 转化率和更低的氨泄漏。

1 试验设置

1.1 试验设备

发动机测试台架主要包括电力测功机、柴油发动机、排气分析仪和 SCR 后处理系统,发动机的主要参数如表 1 所示,测试台架如图 1 所示。

表 1 发动机主要参数

气缸数	缸径/ mm	行程/ mm	排量/ L	压缩比	进气形式	燃油供给	额定功率/ kW	额定转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	最大扭矩/ ($\text{N} \cdot \text{m}$)	最大扭矩转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
6	115	145	8.7	18	增压中冷	高压共轨	280	1 900	1 702	1 400~1 700

测试中使用一体化尿素箱和质量分数为 32.5% 的标准尿素水溶液^[4],使用 AVL i60 排放测量仪测量 NO_x 等气体成分,使用氨分析仪测量氨泄漏(尾排中氨的体积分数),研究空速和排气温度对氨储存过程的影响,并分析氨储存对 NO_x 转化效率的影响。

1.2 试验过程

为控制空速和排气温度,测试中应保持转速和转矩恒定,并提供足够的氨以保证稳定地形成氨储^[5],试验中所有条件下喷射尿素时,氨氮体积比均为 1.2。在测试过程中,首先利用温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 的高温排气清除氨储,当 SCR 前后排气中 NO_x 体积分数的差约为 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ 、 NO_x 体积分数的峰值变化在 30×10^{-6} 以内且没有氨泄漏时,停止发动机;然后在低温下运行发动机,并调整发动机至所需的排气温度和空速,直到 SCR 前、后 NO_x 体积分数的差为 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$;当 SCR 前、后排气中 NO_x 体积分数的峰值变化在 30×10^{-6} 以内时,记录 1~2 min 的稳态数据(包括排气温度、空速、 NO_x 的体积分数、氨的体积分数等)。尿素喷射过程中保持氨氮体积比为 1.2,当氨泄漏为 10×10^{-6} 时停止喷射,当 SCR 前后排气中 NO_x 体积分数的差约为 $(20 \sim 30) \times 10^{-6}$ 、 NO_x 体积分数的峰值变化在 30×10^{-6} 以内时,再在排气温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 时清除氨储,并继续寻找下一个操作点。根据 NO_x 和氨的体积分数变化、尿素喷射速率和排气流量,推导出氨的储存速率,将氨的储存速率积分得到最大氨储存量。

持续测量并记录尿素喷射后一定时间内 SCR 前、后排气中 NO_x 和氨的体积分数,根据 NO_x 和氨的体积分数随时间变化的曲线和尿素喷射速率,计算每个工况下的氨储存量。



图 1 发动机测试台架

2 结果和讨论

2.1 温度对氨储存和 NO_x 转换效率的影响

从初始尿素喷射开始,直到氨泄漏达到 10×10^{-6} ,此时停止喷射尿素,此过程中催化剂载体中储存的氨质量即为氨饱和储存量 $m(\text{NH}_3)$ 。本文中分析和研究氨饱和储存量以及其在不同温度和空速下对 NO_x 转化效率的影响。

空速为 $20\,000\text{ h}^{-1}$,氨饱和储存量随温度的变化如图 2 所示。由图 2 可知:空速为 $20\,000\text{ h}^{-1}$ 、排气温

度低于 420 ℃ 时,氨饱和储存量随温度的升高呈线性下降趋势,温度为 180 ℃ 时,氨饱和储存量为 22.52 g;温度为 420 ℃ 时,氨饱和储存量为 4.09 g,表明温度对氨饱和储存量的影响较大。

温度为 300 ℃ 时,氨饱和储存量随空速的变化如图 3 所示。由图 3 可知:温度为 300 ℃ 时,随着空速增加,氨饱和储存量略微降低,这是因为增加空速更容易发生氨泄漏,从而降低氨储存量^[6]。空速由 10 000 h⁻¹ 增大到 40 000 h⁻¹,氨饱和储存量的变化仅在 1.5 g 以内,说明空速对氨饱和储存量几乎没有影响。

空速为 20 000 h⁻¹ 时,不同排气温度下的 NO_x 实时转换效率与氨储存量的关系如图 4 所示。由图 4 可知:温度为 180 ℃ 时,NO_x 的转化效率随氨储存量增加线性增大,这是由于排气温度较低时,催化剂活性较低,导致 SCR 的催化还原反应速率较慢,当氨储存量增加时,参加反应的氨增加,提高了反应速率^[7],因此低温下 NO_x 的转化效率受氨储存量的影响较大;随着温度升高,催化剂的活性增强,此时较大氨储存量导致 NO_x 的转化效率降低^[8]。试验过程中发现,当温度为 420 ℃ 时,尿素喷射 7 s 后,NO_x 的转化效率达到峰值,此时氨储存量仅约为 0.90 g,之后 NO_x 的转化效率基本没有变化,当氨储存量达到 1.59 g 时发生氨泄漏。

根据以上分析可知:低温时,氨储存量对 NO_x 转化效率的影响较大,随着氨储存量增加,NO_x 的转化效率得到较大提高;随着温度升高,催化还原反应的速率加快,氨储存量对 NO_x 转化效率的影响逐渐减小,在 300 ℃ 时,氨储存量对 NO_x 转化效率的影响已经变得较小,在 420 ℃ 的高温时,氨储存量对 NO_x 的转化效率几乎不产生影响^[9-10]。

2.2 温度对反应速率的影响

在恒定的空速条件下,催化还原反应的平均速率及所需时间随温度的变化有所不同^[11]。从反应开始至总体达到稳定时间的前 95% 定义为下降时间,这期间完成了催化还原过程的主要部分。NO_x 的反应速率由其转化量与下降时间之比决定,整体下降时间指反应开始到 NO_x 体积分数达到稳定以及氨泄漏体积分数达到 10×10⁻⁶ 时两者之间的时间差。

空速为 30 000 h⁻¹,排气温度为 180、240、300、360、420 ℃ 时,自尿素喷射起至氨泄漏体积分数达到 10×10⁻⁶ 过程中 NO_x 体积分数如图 5 所示。由

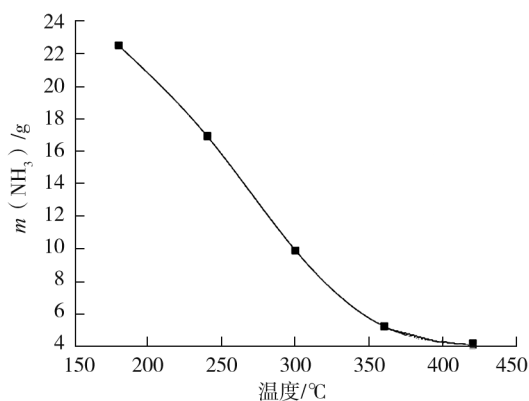


图2 空速为 20 000 h⁻¹ 时的氨气饱和储存量随温度的变化

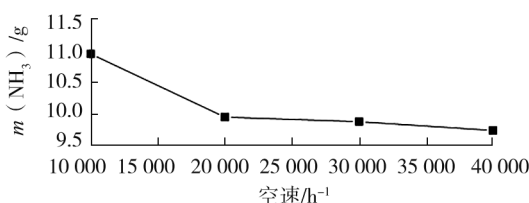


图3 温度为 300 ℃ 时氨饱和储存量随空速的变化

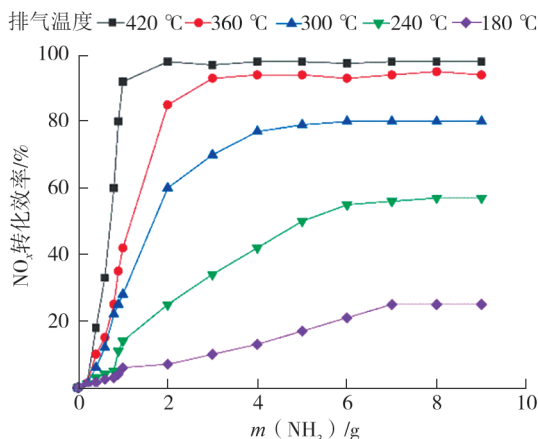


图4 空速为 20 000 h⁻¹ 时不同温度下的 NO_x 实时转换效率与氨储存量的关系

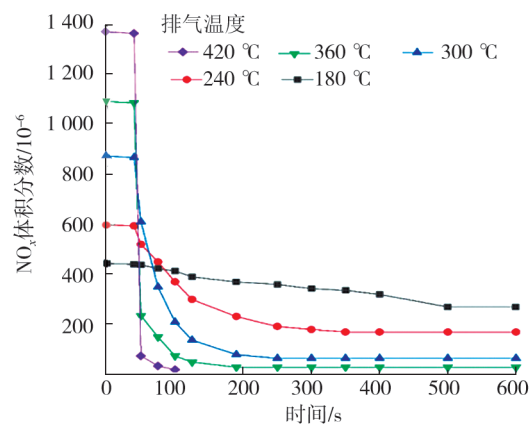


图5 空速为 30 000 h⁻¹ 时,SCR 后 NO_x 的体积分数随温度的变化

图 5 可知:温度为 180 ℃ 时,NO_x 体积分数变化极为缓慢,这是由于低温环境下催化还原反应速度较慢所致;随着温度升高,催化还原反应速率加快^[12],温度为 180、240、300、360、420 ℃ 时,下降时间分别为 450、259、197、80、48 s。

空速为 30 000 h⁻¹ 时,不同温度下 NO_x 的催化还原反应平均反应速率和 NO_x 转化效率如图 6 和表 2 所示。由图 6 和表 2 可知:1) 温度由 180 ℃ 升高到 420 ℃,下降时间由 450 s 降低为 8 s,NO_x 的平均反应速率由 0.000 4 mol/s 提高到 0.004 9 mol/s;排气温度对 NO_x 的反应速率的影响较大,温度越高,反应速率越快^[13]。2) 温度升高,NO_x 的转化效率增大;低温下,NO_x 的转化效率较低,温度由 180 ℃ 升高到 360 ℃,NO_x 的转化效率增长较快,之后增长趋于平缓。

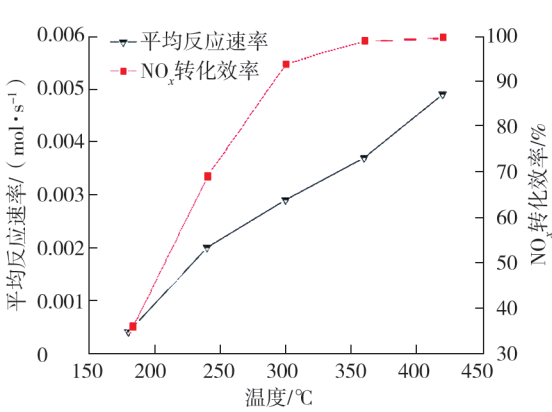


图 6 空速为 30 000 h⁻¹ 时不同温度下的平均反应速率和 NO_x 转化效率

表 2 空速为 30 000 h⁻¹ 时不同温度下的催化还原反应速率和 NO_x 转化效率

温度/℃	下降时间/s	NO _x 累积反应量/mol	平均反应速率/(mol·s ⁻¹)	NO _x 转化效率/%
180	450	0.134 5	0.000 4	34.1
240	259	0.311 2	0.002 0	69.0
300	137	0.379 1	0.002 9	93.8
360	29	0.127 3	0.003 7	98.9
420	8	0.041 5	0.004 9	99.4

2.3 空速对反应速率的影响

温度为 300 ℃,空速分别为 10 000、20 000、30 000、40 000 h⁻¹,从尿素喷射至氨泄漏的体积分数为 10×10⁻⁶ 时,NO_x 体积分数的变化趋势如图 7 所示。由图 7 可知:温度保持不变,空速增大,NO_x 体积分数未出现显著的降低趋势;试验中发现,氨泄漏的发生时间有所提前;当空速为 10 000 h⁻¹ 时,自尿素喷射起经过 210 s 后即可检测到氨泄漏的体积分数为 10×10⁻⁶;当空速增大至 40 000 h⁻¹ 时,这一现象仅需 60 s 即出现。当其他条件相同时,空速越大,氨泄漏就越容易发生^[14-15]。主要原因是:NH₃ 需吸附在催化剂的活性位点上发生反应,随着空速增大,大部分 NH₃ 在吸附之前便被排气气体带出,缩短氨泄漏发生的时间。

温度为 300 ℃ 时,SCR 的平均反应速率、NO_x 的累计反应量和 NO_x 转化效率如表 3 所示。由表 3 可知:在所有空速下,平均反应速率均约为 0.003 mol/s,表明空速不是影响反应速率的主要因素^[16];随着空速增大,NO_x 的累计反应量略有下降;当空速由 10 000 h⁻¹ 增大到 40 000 h⁻¹ 时,对应氨泄漏体积分数达到 10×10⁻⁶ 时 NO_x 的转化效率下降约 21 百分点。这是因为较大的空速减少了 NH₃ 和 NO_x 在催化剂中的反应时间,同时还导致尿素蒸发生成的氨减少,从而导致 NO_x 的转化效率明显降低^[17]。

温度为 420 ℃ 时,不同空速下下降时间、NO_x 累计反应量、平均反应速率和 NO_x 转化效率等参数如表

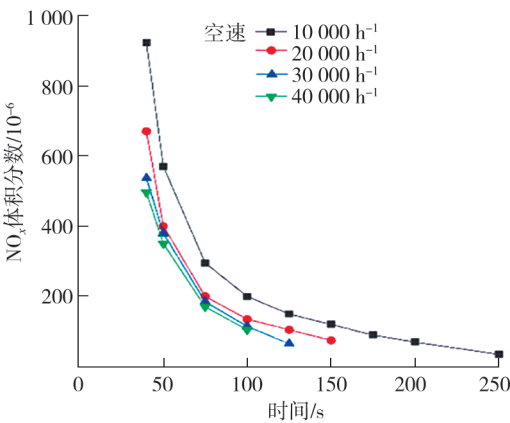


图 7 空速为 20 000 h⁻¹ 时不同温度下的 NO_x 实时转换效率与氨储存量的关系

4所示, NO_x 的体积分数变化如图8所示。

表3 温度为300℃时不同空速下的 NO_x 累计反应量、催化还原反应速率和 NO_x 转化效率

空速/ h^{-1}	下降时间/s	NO_x 累计反应量/mol	平均反应速率/ $(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	NO_x 转化效率/%
10 000	128	0.391 0	0.003 1	93.5
20 000	95	0.280 7	0.002 8	89.9
30 000	71	0.182 3	0.003 4	77.8
40 000	53	0.166 1	0.002 7	72.5

表4 温度为420℃时不同空速下的 NO_x 累计反应量、催化还原反应速率和 NO_x 转化效率

空速/ h^{-1}	下降时间/s	NO_x 累计反应量/mol	平均反应速率/ $(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$	NO_x 转化效率/%
10 000	8	0.038 2	0.004 4	99.6
20 000	9	0.042 3	0.0047	99.1
30 000	8	0.040 1	0.004 5	98.4
40 000	8	0.039 7	0.004 4	97.2

由表4和图8可知:空速增加使氨泄漏更早发生,原因与300℃下的分析相同;在温度为420℃时增加空速,尽管催化剂和还原剂的接触时间更短,但平均反应速率仍保持在0.004 5 mol/s左右,表明空速对高温下 NO_x 的平均反应速率影响不大,温度是控制反应速率的主要因素^[18-19]。空速越大, NH_3 在催化剂上的反应时间越短, NO_x 的转化效率越低,由于催化剂在高温下具有很强的活性, NO_x 始终保持着较高的转化效率。综上所述,空速对氨泄漏有很大影响,但对反应速率影响不大。

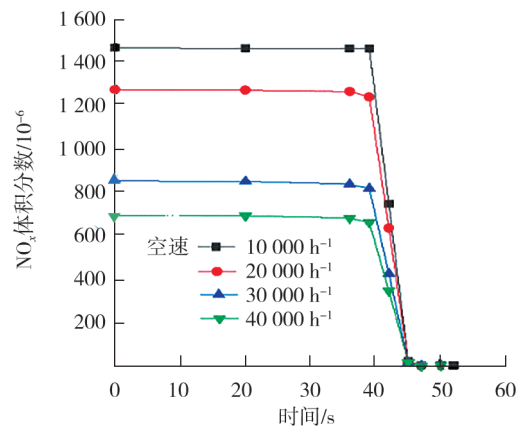


图8 温度为420℃时不同空速下SCR下游 NO_x 的体积分数变化

3 结论

1)饱和氨储量受温度的影响较大,当空速恒定时,随着温度的升高,饱和氨储量急剧下降;空速对饱和氨储量影响不大,当温度恒定时,随着空速的增加,饱和氨储量仅略有减少。

2)基于氨储量与 NO_x 转化效率之间的关联,可通过增加氨储量以增强低温条件下 NO_x 的转化效果;但应谨慎调控氨储量,以免在发动机负荷加大、催化器温度上升时,过量未被及时利用的氨从催化剂载体中逸出,造成氨泄漏问题。

3)研究氨在催化剂中的储存能力和释放行为以及这些特性如何影响 NO_x 的转化效率,对优化尿素喷射策略至关重要。为了实现对尿素喷射量的精确调控,有必要深入探究催化剂的动力学响应机制,并构建相应的数学模型。

参考文献:

- [1] JOHNSON T, JOSHI A. Review of vehicle engine efficiency and emissions[J]. SAE International Journal of Engines, 2018, 11(6): 1307-1330.
- [2] MERA Z, MATZER C, HAUSBERGER S, et al. Performance of selective catalytic reduction(SCR) system in a diesel passenger car under real-world conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115983.

- [3] LIN Q H, CHEN P. Model-based diagnostics of ammonia storage non-uniformity for a selective catalytic reduction system [C]// Proceedings of 2017 American Control Conference (ACC). Seattle, USA;IEEE,2017:2594–2599.
- [4] 环境保护局. 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.
- [5] SHARP C, WEBB C C, NEELY G, et al. Achieving ultra low NO_x 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.
- [6] BRACK W, HEINE B, BIRKHOFF F, et al. Kinetic modeling of urea decomposition based on systematic thermogravimetric analyses of urea and its most important by-products[J]. Chemical Engineering Science, 2014,106:1–8.
- [7] 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.
- [8] GONG J, NARAYANASWAMY K, RUTLAND C J. Heterogeneous ammonia storage model for NH_3 -SCR modeling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2016,55(20):5874–5884.
- [9] NING J B, YAN F J. Robust nonlinear disturbance observer design for estimation of ammonia storage ratio in selective catalytic reduction systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2015,137(12):121012.
- [10] FENG T, LÜ L. The characteristics of ammonia storage and the development of model-based control for diesel engine urea-SCR system[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2015,28:97–109.
- [11] 刘彪,姚栋伟,吴锋,等. 柴油机 Cu-SSZ-13 分子筛 SCR 催化剂储氨机理研究[J]. 高校化学工程学报,2019,33(1):103–109.
- [12] HU X Y, WANG Y, LI S Y, et al. Assessment of the application of subcooled fluid boiling to diesel engines for heat transfer enhancement[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing,2021,7(6):1049–1066.
- [13] BRACK W, HEINE B, BIRKHOFF F, et al. Formation of urea-based deposits in an exhaust system: numerical predictions and experimental observations on a hot gas test bench[J]. Emission Control Science and Technology,2016,2:115–123.
- [14] SKAF Z, ALIYEV T, SHEAD L, et al. The state of the art in selective catalytic reduction control [C]//Proceedings of SAE 2014 World Congress & Exhibition. Detroit, USA;SAE International,2014.
- [15] CHEN P, WANG J M. Nonlinear model predictive control of integrated diesel engine and selective catalytic reduction system for simultaneous fuel economy improvement and emissions reduction[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2015,137(8):081008.
- [16] LIN Q H, CHEN P. Estimation of ammonia storage nonuniformity for urea-based selective catalytic reduction systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2019,141(4):041014.
- [17] TAN L G, FENG P F, YANG S B, et al. CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent[J]. Chemical Engineering and Processing,2018,23:82–88.
- [18] SUN K, LI D, LIU H, et al. Influence of diesel engine intake throttle and late post injection process on the rise of temperature in the diesel oxidation catalyst[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing,2020,16(3):573–584.
- [19] ZHU J L, WANG X L, WANG G H, et al. Experimental analysis of the influence of exhaust thermal management on engine NO_x emission[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing,2022,18(3):701–711.

Experimental study on the influence of urea injection strategy of the emission performance for diesel engine

PENG Tao¹, YU Daoguang², CUI Yuanying³, ZHANG Gecheng¹, SUN Ke¹, BAI Shuzhan^{1*}

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

2. Logistics Support Department, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China

Abstract : To improve NO_x conversion efficiency and reduce ammonia leakage , the influence of heterogeneous

(下转第 85 页)

acceleration and VSP. Based on the power based window method, among 32 vehicles with normal reactant consumption, there is a significant difference in NO_x specific emissions, with 40.6% of heavy-duty diesel vehicles meeting the standard limit of $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ for specific emissions. 10 vehicles with fixed reactant consumption have NO_x specific emissions exceeding the standard limit, with the maximum NO_x specific emission being 3.4 times the standard limit. The analysis of the specific emissions of vehicles traveling on different roads shows significant differences in emissions among urban, suburban, and highway conditions, with average NO_x specific emissions of $6.08 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $8.06 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, and $3.43 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, respectively.

Keywords: heavy-duty diesel vehicle; micro driving condition; VSP; power based window method; emission rate; specific emission

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 72 页)

flow injection of urea at different space velocity and temperatures on NO_x conversion efficiency, ammonia storage and ammonia leakage are investigated experimentally. The diesel engine used in the experiment employed an exhaust aftertreatment system with selective catalytic reduction (SCR) technology. The experimental results show that for a fixed air flow, the extent of ammonia leakage is related to changes in temperature. As the temperature increases, the catalytic reduction reaction accelerates and the ammonia leakage decreases. The temperature has a great influence on the catalytic reduction reaction rate. At a flow velocity of $10\,000 \text{ h}^{-1}$, the reaction rate of SCR at high temperature is much higher than that at low temperature. The flow velocity has a weak influence on the reaction rate. When the flow velocity changes from $10\,000 \text{ h}^{-1}$ to $40\,000 \text{ h}^{-1}$ at the same temperature, the average reaction rate within the SCR remained largely unchanged. However, increasing the flow velocity can accelerate the leakage of ammonia, thereby mitigating the benefits associated with the NO_x conversion.

Keywords: diesel engine; ammonia leak; conversion efficiency; reaction rate; flow velocity

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第 77 页)

and the influence of the vehicle exhaust temperature and driving habits on the engine thermal load is determined. The cause of the fault is that the engine is prone to intense working conditions such as sudden acceleration and deceleration during operation, which lasts for a long time. The thermal load of the valve guide is increased, and the clearance of the valve guide is decreased, causing the valve to jam and impact the piston, resulting in engine misfire. The optimization is carried out by increasing the wrapping area of the valve guide. The simulation results show that the maximum temperature of the optimized guide is decreased from $245.3 \text{ }^\circ\text{C}$ to $208.5 \text{ }^\circ\text{C}$, and the maximum contraction of the valve guide is decreased from 0.0261 mm to 0.0143 mm . At the same time, the lower end diameter of the valve guide is reduced from 5.948 mm to 5.943 mm . A 300 hour rapid acceleration and deceleration test is conducted on the optimized engine, and no valve impact piston failure occurs, indicating normal engine operation.

Keywords: gasoline engine; exhaust valve; heat load; valve guide; piston

(责任编辑:胡晓燕)