

SCR 系统尿素水溶液喷雾分解影响因素数值模拟

王 军 王兴华 季 亮 董 彦 赵卫东
(江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为研究柴油机 SCR 系统的尿素水溶液喷雾分解规律,建立了 SCR 尿素水溶液喷射雾化模型,进行了尿素喷射及雾化过程的数值模拟,分析了排气温度、排气流量、喷射速率和喷嘴布置位置对尿素水溶液分解的影响。结果表明,随着排气温度的升高,排气管内壁尿素水溶液粒子密度逐渐降低,且排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置逐渐后移,NH₃体积分数随排气温度的升高呈先升高后降低的变化趋势,400℃时的 NH₃体积分数较高;随着排气流量的增大,排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置明显后移,NH₃体积分数降低;随着尿素水溶液喷射速率的增大,排气管内壁尿素水溶液粒子密度逐渐增大,NH₃体积分数呈近似线性增加,排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置基本不变;随着距离喷嘴布置位置的增大,尿素水溶液粒子的热解和水解反应进行更为充分,NH₃体积分数逐渐增大。

关键词: 柴油机; 选择性催化还原; 数值模拟; NH₃ 体积分数

中图分类号: TK423 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0372-04

Numerical Simulation of Influence Factors on Urea Solution Spray
and Decomposition of SCR System

Wang Jun Wang Xinghua Ji Liang Dong Yan Zhao Weidong
(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to investigate the spray dispersion regulation of urea solution of diesel engine SCR (selective catalytic reaction) system, a urea spray model was built up to simulate urea injection and atomization process. The correctness of the model was verified by comparing the simulation and experimental results, the influences of exhaust gas temperature, exhaust gas flow, injection rate and injector position on dispersion of urea spray were analyzed. The results indicated that with the increase of exhaust temperature, particle density of urea solution on the inner wall of exhaust pipe was gradually reduced and the volume fraction of NH₃ was increased, which tended to be stable at 400℃. But with the temperature further increased, NH₃ oxidation was enhanced in the exhaust pipe, so its volume fraction was decreased. With the increase of exhaust gas flow rate, the packing position of the urea solution particles on the inner wall was moved backward obviously and the volume fraction of NH₃ was decreased. Because with the increase of exhaust gas flow rate, the residence time of urea solution in the exhaust pipe was decreased, which was not benefit for the decomposition of urea. With the increase of injection rate of urea solution, the density of urea solution particles and the volume fraction of NH₃ were increased gradually, the packing position of the urea solution particles on the inner wall was almost unchanged. With the increase of distance between urea injector and catalyst, the thermal decomposition and hydrolysis reaction of urea became more complete and the volume fraction of NH₃ was increased accordingly.

Key words: diesel engine; selective catalytic reduction; numerical simulation; NH₃ volume fraction

收稿日期: 2016-01-31 修回日期: 2016-05-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(51306074)、江苏省普通高校研究生实践创新计划项目(SJLX15_0494)和江苏省大学生创新创业训练计划项目(201510299069X)
作者简介: 王军(1980—),男,副教授,主要从事发动机工作工程及排放污染物控制研究,E-mail: qcwjun@ujs.edu.cn

引言

柴油机主要排放污染物为氮氧化物 (Nitrogen oxides, NO_x) 和颗粒物 (Particulate matter, PM), 单独依靠机内净化措施已不能满足日益严格的排放法规要求, 后处理技术正逐渐成为满足国 IV 及以上排放法规的必要手段。其中, 降低柴油机 NO_x 排放的主流后处理技术为选择性催化还原 (Selective catalytic reduction, SCR) 技术, 尿素水溶液作为 SCR 的还原剂被喷射到排气管中, 在高温排气作用下发生热解和水解反应释放出 NH_3 , 与 NO_x 在催化剂中进行催化还原反应, 最终将其转化成 N_2 和 H_2O [1]。

国内外学者对 SCR 技术均进行了深入研究, 帅石金等 [2] 重点研究了催化剂特性和还原剂喷射控制策略, 通过仿真与试验相结合的手段优化了还原剂的喷嘴位置和喷孔数目。吴小春等 [3] 对 SCR 系统的不同喷嘴形式进行了试验研究, 发现为提高雾化混合效果, 应尽量增加喷嘴数量, 同时减小喷嘴直径。CHO 等 [4] 对 SCR 系统进行了 CFD 分析, 得知催化器进口 NH_3 分布的均匀性对 NH_3 泄漏量和 NO_x 转化率均有较大影响。CHEN 等 [5] 对 SCR 后处理系统进行了模拟研究与结构优化, 对尿素水溶液雾化、蒸发特性及 SCR 催化器内部流动与催化反应进行了研究。

本文利用 AVL Fire 建立 SCR 系统尿素水溶液喷射雾化模型, 通过比对模拟与实验结果, 验证模型正确性, 在此基础上, 研究排气温度、排气流量、尿素水溶液喷射速率、喷嘴布置位置等因素对尿素水溶液喷雾分解的影响。

1 喷雾模型的建立

1.1 几何模型

依据文献 [6] 开展试验, 建立排气管三维模型如图 1a 所示, 其中排气管直径为 86 mm, 长度为 1 450 mm, 4 个测点距离喷嘴位置分别为 300、700、1 000、1 400 mm, 喷嘴型式采用径向均布 4 个直径为 0.5 mm 的喷孔, 插入深度为 43 mm。图 1b 为利用 Hypermesh 软件对几何模型进行的网格划分图, 将此网格模型导入 AVL Fire 中进行模拟计算。

1.2 计算模型及边界条件

尿素水溶液喷射过程模拟采用离散液滴模型 (Discrete droplet model, DDM), 利用拉格朗日方式跟踪离散液滴的运动, 湍流运动过程采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 湍流流动过程遵循能量守恒、动量守恒及质量守恒 [7-9]。

根据试验过程设定入口气体质量流量、温度及

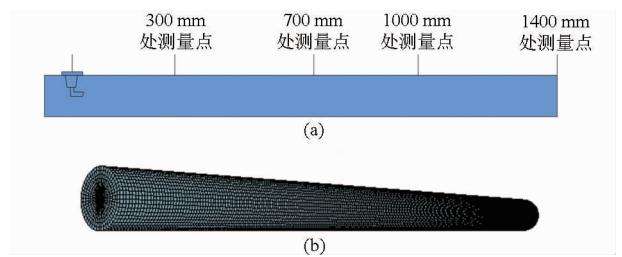


图 1 排气管结构示意图及计算网格

Fig. 1 Geometric model of exhaust pipe and mesh model

尿素水溶液喷射速率等参量, 湍动能设定为进口平均速度平方的 5%, 特征长度为进口直径的 10%, 出口设置为静压边界条件, 出口压为 0.1 MPa [10]。

2 试验模型验证试验

当排气流量为 300 kg/h, 尿素水溶液喷射速率为 20 g/min, 测点距离喷嘴 1 400 mm 时, NH_3 体积分数随排气温度变化的试验和模拟结果如图 2 所示。由图 2 可见, NH_3 体积分数的模拟值和试验值随排气温度的升高而增大, 模拟值高于试验值, 排气温度较低时相对误差较大, 最大相对误差约为 12%。这是由于模拟中未考虑尿素水解过程生成副产物的影响, 导致 NH_3 体积分数的模拟值较高 [11-13]。

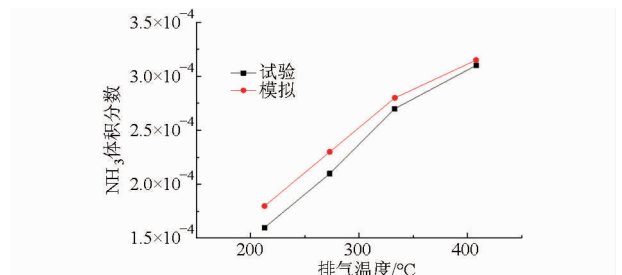


图 2 不同排气温度时 NH_3 体积分数变化

Fig. 2 NH_3 volume fraction at different exhaust temperatures

3 不同参数对尿素水溶液喷雾分解的影响

3.1 温度对尿素水溶液喷雾分解的影响

排气流量为 350 kg/h, 尿素水溶液喷射速率为 20 g/min, 测点距离喷嘴 1 400 mm 时, 尿素水溶液粒子分布和 NH_3 体积分数随排气温度的变化如图 3、4 所示。由图 3 可见, 由于喷嘴为 4 孔, 喷射角度为 90° , 使尿素开始喷射时一部分粘在距喷嘴较近的排气管内壁上, 大部分尿素水溶液粒子随排气顺向流动, 在排气管内水解和热解 [14-15]; 随着排气温度的提高, 尿素热解反应加快, 排气管内壁的尿素水溶液粒子密度降低, 且排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置逐渐后移。由图 4 的 NH_3 体积分数分布可见, 由于喷射的尿素水溶液方向垂直于壁面, 所以壁面的尿素水溶液较多, 故由热解和水解生成的

NH₃体积分数在壁面附近也较高,排气管中心位置NH₃体积分数较低。另外,通过提取距喷嘴1 400 mm处截面的NH₃平均体积分数可以发现,NH₃体积分数随排气温度的提高出现先增大后降低的变化趋势,当排气温度为408℃时,NH₃平均体积分数为 2.738×10^{-4} ,比温度为213℃时增加约2倍;当排气温度为450℃时,NH₃平均体积分数为 2.589×10^{-4} ,比408℃时NH₃平均体积分数略有下降,这是由于当温度上升到一定程度时,NH₃发生氧化反应的效应增强,导致NH₃体积分数略有下降^[16-18]。

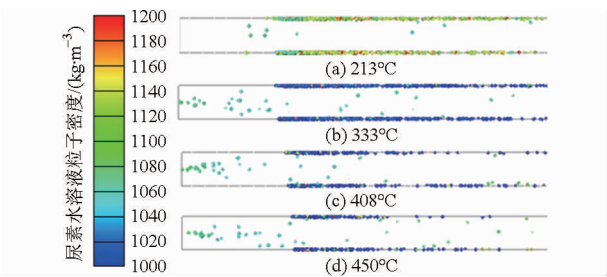


图3 不同排气温度时尿素水溶液粒子的分布
Fig. 3 Distribution of urea droplets at different exhaust temperatures

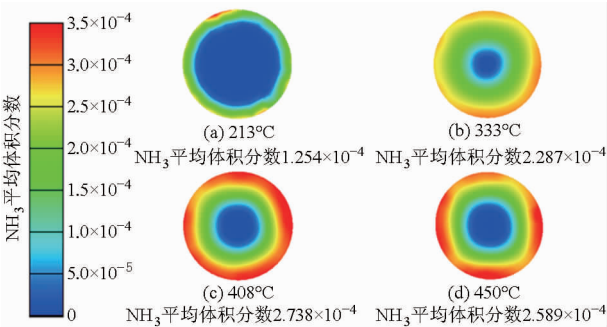


图4 不同排气温度时NH₃体积分数分布
Fig. 4 Distribution of NH₃ volume fraction at different exhaust temperatures

3.2 排气流量对尿素水溶液分解的影响

排气温度为300℃,尿素水溶液喷射速率为20 g/min,测点距离喷嘴1 400 mm时,尿素水溶液粒子分布和NH₃体积分数随温度的变化如图5、6所示。由图5可见,当排气流量为202 kg/h时,在距离喷嘴326 mm处,尿素水溶液粒子出现堆砌,当排气流量为460 kg/h时,尿素水溶液粒子在距离喷嘴547 mm处出现堆砌,随着排气流量的增大,尿素水溶液发生水解和热解的时间变短,排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置明显后移。由图6的NH₃体积分数分布图可见,排气管内壁附近生成的NH₃体积分数较高,且随着排气流量的增大,截面各处的NH₃体积分数均有所降低,通过提取截面的NH₃平均体积分数可发现,当排气流量由202 kg/h增加到460 kg/h时,NH₃平均体积分数由 $3.217 \times$

10^{-4} 变为 1.256×10^{-4} ,这是由于尿素水溶液在排气管中的滞留时间减少,水解和热解反应不能充分进行,故NH₃体积分数降低^[19-20]。

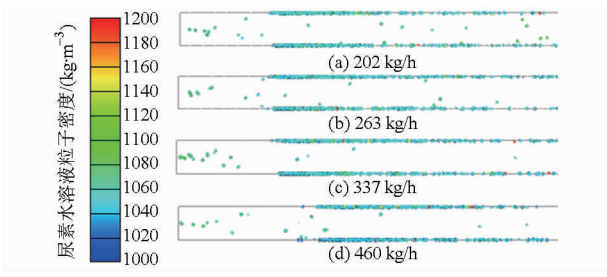


图5 不同排气流量时尿素水溶液粒子的分布
Fig. 5 Distribution of urea droplets at different exhaust flow rates

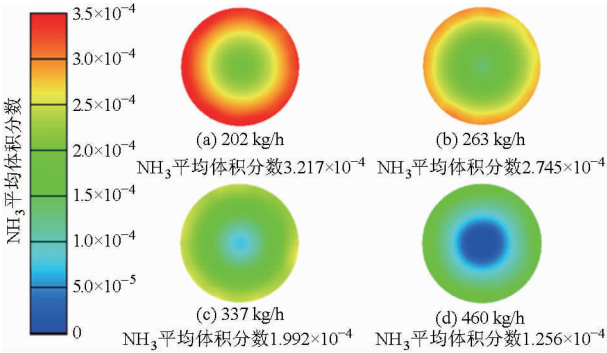


图6 不同排气流量时NH₃体积分数分布
Fig. 6 Distribution of NH₃ volume fraction at different exhaust flow rates

3.3 喷射速率对尿素水溶液喷雾分解的影响

排气温度为350℃,排气流量为270 kg/h,测点距离喷嘴1 400 mm时,尿素水溶液粒子分布和NH₃体积分数随尿素水溶液喷射速率的变化如图7、8所示。由图7可见,当排气流量和温度固定时,随着尿素水溶液喷射速率的增大,排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置基本不变,但排气管内壁的尿素水溶液粒子密度随之逐渐增大。由图8可见,NH₃体积分数随尿素水溶液喷射速率的增大近似呈线性增加,当尿素水溶液喷射速率由5 g/min增加到20 g/min时,NH₃平均体积分数由 9.11×10^{-5} 变为 3.417×10^{-4} 。

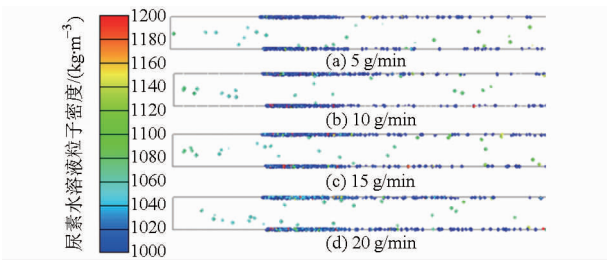


图7 不同喷射速率时尿素水溶液粒子的分布
Fig. 7 Distribution of urea droplets at different urea injection rates

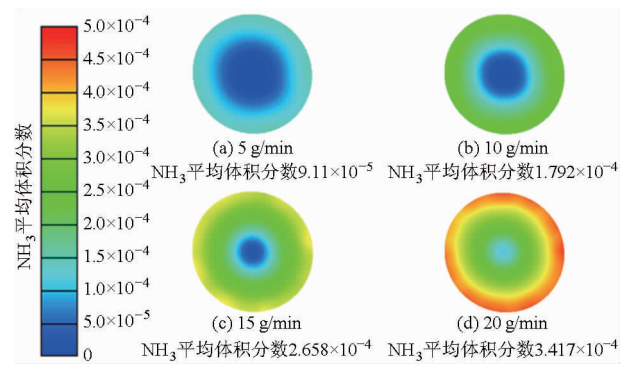


图 8 不同尿素水溶液喷射速率时 NH₃ 体积分数分布

Fig. 8 Distribution of NH₃ volume fraction at different urea injection rates

3.4 喷嘴布置位置对尿素水溶液喷雾分解的影响

排气温度为 320℃, 排气流量为 270 kg/h, 尿素水溶液喷射速率为 20 g/min 时, 尿素水溶液粒子分布和 NH₃ 体积分数随喷嘴布置位置的变化如图 9 所示, 由图 9 可见, 在距离喷嘴 300 mm 处, NH₃ 平均体积分数较低, 约为 1.769×10^{-4} , 且 NH₃ 分布较不均匀。这是由于尿素水溶液粒子在排气管内流动时间和空间较短, 发生热解和水解较不充分而造成的, 使得 NH₃ 体积分数较低, 分布较不均匀^[21]; 在距离喷嘴 700、1 000、1 400 mm 处, NH₃ 体积分数随距离增加只略有增加, NH₃ 分布更为均匀。综合考虑 NH₃ 体积分数、分布均匀度及 SCR 系统在整车的空间布置方案, 喷嘴应布置在 SCR 系统催化剂上游 700 ~ 1 000 mm 范围内较为合适。

4 结论

(1) 排气管内壁尿素水溶液粒子密度随温度的

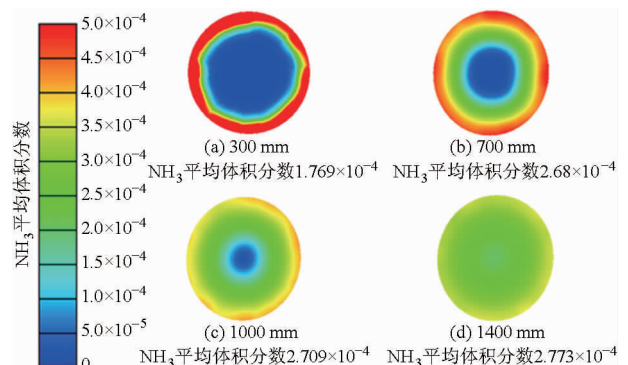


图 9 不同喷嘴布置位置时 NH₃ 体积分数分布

Fig. 9 Distribution of NH₃ volume fraction at different urea injector positions

上升逐渐降低, 排气温度升高使得尿素水溶液雾化效果增强, 生成的 NH₃ 体积分数较高, 但温度过高时会促进 NH₃ 的氧化反应, 从而使 NH₃ 体积分数降低, 排气温度为 400℃ 时 NH₃ 体积分数较高。

(2) 随着排气流量的增大, 排气管内壁出现尿素水溶液粒子堆砌的位置明显后移; 排气流量对 NH₃ 的体积分数有一定的影响, 排气流量越大, 尿素在排气管滞留时间越短, 越不利于尿素分解, 从而导致 NH₃ 体积分数降低。

(3) 随着尿素水溶液喷射速率的增大, 排气管内壁尿素水溶液粒子密度随之增大, 而尿素水溶液粒子出现堆砌的位置基本不变, NH₃ 体积分数随尿素水溶液喷射速率的增大近似呈线性增加。

(4) 尿素水溶液粒子的热解和水解反应随着其在排气管内的运动而逐渐变得充分, 生成的 NH₃ 体积分数逐渐增大, 在本研究条件范围内, 当距离喷嘴布置位置大于 700 mm 时, NH₃ 体积分数基本趋于稳定。

参 考 文 献

- 辛喆, 张寅, 王顺喜, 等. 柴油机 Urea-SCR 催化剂转化效率影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 30-34. XIN Zhe, ZHANG Yin, WANG Shunxi, et al. Influence factors of DeNO_x behavior in urea-SCR catalytic converter of diesel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 30-34. (in Chinese)
- 帅石金, 张文娟, 董红义, 等. 柴油机尿素 SCR 催化剂优化设计[J]. 车用发动机, 2007(1): 44-47. SHUAI Shijin, ZHANG Wenjuan, DONG Hongyi, et al. Optimal design of diesel engine urea-SCR converter[J]. Vehicle Engine, 2007(1): 44-47. (in Chinese)
- 吴小春, 刘丙善. 船用发动机 Urea-SCR 系统中的喷嘴选取研究[J]. 船海工程, 2008, 37(5): 58-61. WU Xiaochun, LIU Bingshan. Nozzle selection study of urea-SCR system for marine engine[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(5): 58-61. (in Chinese)
- CHO J M, CHOI J W, HONG S H, et al. The methodology to improve the performance of a selective catalytic reduction system installed in HRSG using computational fluid dynamics analysis[J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(5): 863-873.
- CHEN Ming, WILL Shazan. Modelling and optimization of SCR-exhaust aftertreatment system[C]. SAE Paper 2005-01-0969, 2005.
- 唐韬, 赵彦光, 华伦, 等. 柴油机 SCR 系统尿素水溶液喷雾分解的试验研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(1): 1-5. TANG Tao, ZHAO Yanguang, HUA Lun, et al. Experimental study of urea solution spray and decomposition of SCR system for diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(1): 1-5. (in Chinese)
- DIETER H E Seher, MICHAEL Reichelt, STEFAN Wickert. Control strategy for NO_x-emission reduction with SCR[C]. SAE Paper 2003-01-3362, 2003.

- 15 王文杰,裴吉,袁寿其,等. 基于径向基神经网络的叶轮轴面投影图优化[J]. 农业机械学报,2015, 46(6):78–83.
WANG Wenjie, PEI Ji, YUAN Shouqi, et al. Optimization of impeller meridional shape based on radial basis neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):78–83. (in Chinese)
- 16 徐东辉,李岳林,解福泉,等. 基于混沌 RBF 神经网络的汽油机瞬态工况油膜参数辨识研究[J]. 内燃机工程,2015, 36(3):100–105.
XU Donghui, LI Yuelin, XIE Fuquan, et al. Study of oil film parameter identification in gasoline engine transient conditions based on chaos-RBF neural network[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(3): 100–105. (in Chinese)
- 17 Buhmann M. Radial basis function [J]. Acta Numerica, 2000, 9:1–38.
- 18 陈宁,赵丁选,张红彦,等. 基于径向基函数神经网络的工程车辆自动变速控制[J]. 农业机械学报,2005, 36(5):1–5.
CHEN Ning, ZHAO Dingxuan, ZHANG Hongyan, et al. Study on automatic transmission of a construction vehicle based on RBF neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5):1–5. (in Chinese)
- 19 许丽君. 基于神经网络的船舶柴油机故障诊断技术[D]. 镇江:江苏科技大学,2013:18.
XU Lijun. Fault diagnosis technology of marine diesel engine based on neural networks [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science of Technology, 2013:18. (in Chinese)
- 20 刘鹏,范立云,白云,等. 高速电磁阀电磁力近似模型的构建与分析[J]. 农业工程学报,2015, 31(16):96–101.
LIU Peng, FAN Liyun, BAI Yun, et al. Modeling analysis of electromagnetic force approximate model of high-speed solenoid valve[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):96–101. (in Chinese)

(上接第 375 页)

- 8 AVL List GmbH. FIRE v-2011-lagrangian multiphase module [M]. Graz:AVL List GmbH, 2011.
- 9 刘传宝,颜伏伍,胡杰,等. 柴油机 SCR 后处理系统控制策略[J]. 农业机械学报,2013,44(11):6–11.
LIU Chuanbao, YAN Fuwu, HU Jie, et al. SCR post-processing system control strategy of diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 6–11. (in Chinese)
- 10 ZUKERMANA R, VRADMANA L, HERSKOWITZA M, et al. Modeling and simulation of a smart catalytic converter combining NO_x storage ammonia production and SCR[J]. Chemical Engineering Journal, 2009,155(1):419–426.
- 11 马军彦,李君,曲大为,等. 柴油机 SCR 系统尿素分解效率研究[J]. 农业机械学报,2015,46(6):282–286,309.
MA Junyan, LI Jun, QU Dawei, et al. Urea decomposition efficiency of diesel engine SCR system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):282–286,309. (in Chinese)
- 12 STROTS V O, SANTHANAM S, ADELMAN B J, et al. Deposit formation in urea-SCR[C]. SAE Paper 2009–01–2780, 2009.
- 13 冯向宇,葛蕴珊,马朝臣,等. 柴油机尿素 SCR 沉积物成因研究[J]. 内燃机工程,2014,35(6):1–6.
FENG Xiangyu, GE Yunshan, MA Chaochen, et al. Study on deposit formation in urea-SCR system of diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, 35(6):1–6. (in Chinese)
- 14 ZHENG G, FILA A, KOTRBA A, et al. Investigation of urea deposits in urea SCR system for medium and heavy duty trucks [C]. SAE Paper 2010–01–1941,2010.
- 15 余皎,王军,佟德辉. 重型柴油机 SCR 系统布置优化设计[J]. 内燃机与动力装置,2010(4):25–29.
YU Jiao, WANG Jun, TONG Dehui, et al. Configuration optimization of the SCR system for a heavy duty diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Power Plant,2010(4):25–29. (in Chinese)
- 16 王谦,亓平,周明星,等. 车用柴油机选择性催化还原技术的试验研究 [J]. 小型内燃机与摩托车,2012(3):84–88.
WANG Qian, QI Ping, ZHOU Mingxing, et al. An experimental research on selective catalytic reduction technology for vehicular diesel engine[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2012(3):84–88. (in Chinese)
- 17 KOEBEL M, STRUTZ E O. Thermal and hydrolytic decomposition of urea for automotive selective catalytic reduction systems: thermo chemical and practical aspects[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003,42(12):2093–2100.
- 18 华伦,赵彦光,胡静,等. 空气辅助和无空气辅助 SCR 系统尿素喷雾特性的对比试验研究[J]. 汽车工程,2013,35(3):197–201.
HUA Lun, ZHAO Yanguang, HU Jing, et al. A comparative experimental study on the urea spray characteristics in SCR systems w/wo air assistance[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(3):197–201. (in Chinese)
- 19 龚金科,张福杰,鄂加强,等. 柴油机 SCR 催化剂载体结构参数优化[J]. 环境工程学报,2012,6(12):4573–4577.
GONG Jinke, ZHANG Fujie, E Jiaqiang, et al. Optimization structural parameters of diesel SCR catalytic reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012,6(12):4573–4577. (in Chinese)
- 20 BYUNG-CHUL Choi, YOUNG Kwon Kim, WOO-NAM Jhung, et al. Experimental investigation on melting characteristics of frozen urea-water-solutions of a diesel SCR de-NO_x-system[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1):1235–1245.
- 21 MASSIMO Colombo, ISABELLA Nova, ENRICO Tronconi, et al. Mathematical modeling of cold start effects over zeolite SCR catalysts for exhaust gas after treatment[J]. Catalysis Today, 2014,231:99–104.