

# 车尾气排放选择性催化还原系统管道参数优化

李伯林<sup>1</sup>,李峰<sup>2</sup>,张国强<sup>3</sup>

(1. 济南市工业学校 智能汽车制造部,山东 济南 250400; 2. 齐鲁工业大学 机械工程学院,山东 济南 250400;  
3. 山东齐鲁汽车制造有限公司,山东 济南 250400)

**摘要:**为了提高汽车燃油的排放效率,设计一种通过控制单元将压缩空气与尿素溶液经喷嘴一起喷射至排气管的车尾气排放选择性催化还原系统。通过有限元方法研究喷射角度和偏置角度对车尾气排放 NO<sub>x</sub> 转化率的影响。研究表明:尿素液滴在排气过程基本保持原先的运动轨迹,有极少液滴会和管壁碰撞。NO<sub>x</sub> 转化率随喷射时间均表现出先增大后趋于平稳再降低的变化规律。随着喷射角度的增加,NO<sub>x</sub> 转化率呈现增大的变化规律;偏置角度 10° 时能获得较好的 NO<sub>x</sub> 转化率。

**关键词:**尾气排放;催化还原系统;管道;参数优化

**中图分类号:**TH137 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)06-0190-03

## Parameter Optimization of Selective Catalytic Reduction System for Vehicle Exhaust Emissions

LI Bolin<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, ZHANG Guoqiang<sup>3</sup>

(1. Automobile Manufacturing Department, Jinan Industrial School, Jinan 250400, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Qilu University of Technology, Jinan 250400, China;  
3. Shandong Qilu Automobile Manufacturing Co., Ltd., Jinan 250400, China)

**Abstract:** In order to improve the emission efficiency of automobile fuel, a selective catalytic reduction system for vehicle exhaust emissions was designed by means of compressed air and urea solution spraying, by a control unit, to the exhaust pipe via a nozzle. The effects of injection angle and offset angle on NO<sub>x</sub> conversion in vehicle exhaust were studied by finite element method. The results show that urea droplets basically keep their original trajectory during the exhaust process, while few droplets will collide with the tube wall. The NO<sub>x</sub> conversion rate increases first and stabilizes and decreases after along with the injection time. The NO<sub>x</sub> conversion rate increases with the increase of injection angle, and a better NO<sub>x</sub> conversion rate can be obtained when the bias angle is 10°.

**Keywords:** exhaust emission; catalytic reduction system; pipe; parameter optimization

## 0 引言

柴油机具有很高的输出转矩、良好的环境适应性及优异的经济性能等优势,目前已被大量应用于汽车动力系统中,但是柴油机存在尾气中的氮氧化物 NO<sub>x</sub> 排放含量较高以及颗粒物 PM 浓度较高的问题,对人类的生活环境造成了较大的污染<sup>[1-4]</sup>。选择性催化还原技术作为一项能够降低 NO<sub>x</sub> 排放含量的技术,获得了众多研究人员的关注,并开始在汽车与船舶等行业中的发动机领域进行了应用<sup>[5-6]</sup>。现阶段,对选择性催化还原技术进行研究的重点领域包括催化剂性能研究、还原剂的制备、催化效果的理论模拟与实验分析等<sup>[7-8]</sup>。当前,我国选择性催化还原市场基本以外国选择性催化还原供应商为主。其中,按照国 IV 排放标准设计的重卡、工程车等基本都选择安装博世选择性催化还原尿素喷射系统。对于机械车行业,选择性催

化还原系统则主要为格兰富尿素喷射系统<sup>[9-11]</sup>。

为了提高汽车燃油的排放效率,本文设计了车尾气排放选择性催化还原系统。通过有限元方法数值计算了尿素液滴分布,并研究了喷射角度和偏置角度对 NO<sub>x</sub> 转化率的影响。

## 1 车尾气排放选择性催化还原系统组成

选择性催化还原系统运行流程如图 1 所示。首先,该系统的电控单元对柴油机的喷油信号、转速信号、催化器与排气温度信号分别进行收集,之后将上述所得信号和尿素喷射的脉谱图匹配分析获得对应状态下应该喷射的尿素溶液体积。连通压缩空气管路,在排气温度与转速到达预定条件时,通过控制单元将压缩空气与尿素溶液经喷嘴一起喷射至排气管中,与排放尾气进行混合,并通过选择

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51775157)

**第一作者简介:**李伯林(1974—),男,山东济南人,讲师,本科,研究方向为汽车设计。

性催化还原催化设备实现尾气的还原催化过程,达到尾气净化目的。

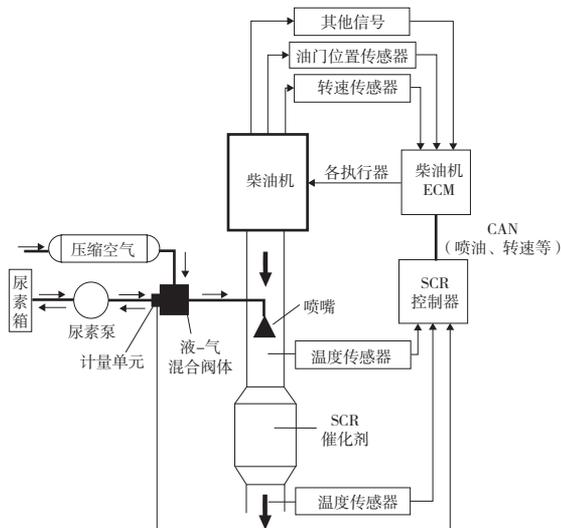


图1 选择性催化还原系统运行流程

在选择性催化还原系统中,尿素水溶液经过尿素喷嘴喷入排气管内后,将先完成汽化、水解、热分解等过程,最后生成相应的还原剂进入催化设备中参与催化还原反应,该过程包含多个复杂的反应机理<sup>[12-13]</sup>。可以将其分为3类基本反应过程,包含 $\text{NO}_x$ 催化还原、 $\text{NH}_3$ 生成反应与其他副反应过程。

## 2 车尾气排放选择性催化还原系统模型建立

选择某一桶式车尾气排放选择性催化还原催化器实施建模分析<sup>[14]</sup>,其结构如图2所示。该排气管的外径为100 mm,催化反应器外径250 mm、长度280 mm,并在其内部充满蜂窝状陶瓷介质。排气管壁厚0.1 mm,孔密度达到62孔/ $\text{cm}^2$ ,催化剂涂层厚0.01 mm。

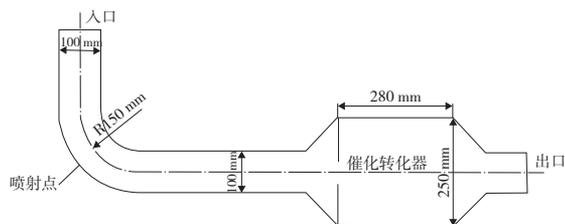


图2 选择性催化还原器模型结构

通过UG软件设计所需的三维模型,之后将其导入AVL Fire软件对其实施六面体结构网格划分处理。图3是最后形成的网格分析模型,根据反应过程的不同把催化器分为3个不同部分进行单独计算。其中,异氰酸水解段(H)的作用是催化异氰酸发生水解反应并转化为 $\text{NH}_3$ 产物;选择性催化还原反应段(S)的作用是催化 $\text{NO}_x$ 发生还原反应;氧化段(O)的作用是对尚未彻底完成反应的 $\text{NH}_3$ 进行氧化,避免发生泄漏。设定上述3个反应段的长

度比为1:2:1。

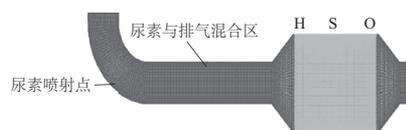


图3 选择性催化还原器网格模型

对于出口的计算按照静压边界条件进行,入口处则按照质量入口边界条件进行。在模拟计算时将 $\text{NH}_3/\text{NO}_x$ 比例设定为1:1。同时,将尿素水溶液的喷射时间区间设定在0.1~0.4 s之间,模拟时长总共为0.8 s。所建立模型的工况边界条件如表1所示。

表1 工况边界条件设置

废气流量/(kg/h)	速度/(m/s)	废气温度/ $^{\circ}\text{C}$
380	22	275

## 3 模拟计算结果与分析

### 3.1 尿素液滴分布

尿素水溶液在喷射后以及和尾气的混合过程需要经历众多的复杂反应阶段,并且随着溶液液滴的尺寸大小不同,所经历的变化过程也存在明显区别,其中小液滴溶液将快速汽化消失,大尺寸液滴则在彻底蒸发分解前遇到管壁时发生沉积,并不断积累形成液膜结构。同时,当液滴与管壁接触后,随着管壁自身的热散失以及液滴的汽化吸热作用导致壁面温度快速降低,并在达到一定温度时发生液滴沉积现象,从而引起管道内壁的腐蚀甚至堵塞问题,最终降低了发动机的运行性能<sup>[15]</sup>。可以利用尿素喷嘴的角度与位置变化以及安装选择性催化还原混合器等方法来促进 $\text{NO}_x$ 转化率的提升,并减少尿素液滴与管壁相撞的概率。

图4为尿素液滴及催化转换器前端 $\text{NO}_x$ 浓度分布。排气过程对尿素液滴的运动状态影响不大,尿素液滴基本都是保持原先的运动轨迹,极少液滴会和管壁碰撞。 $\text{NH}_3$ 大部分都分布于催化器的下部区域。氨气在催化器入口部位的分布状态对于 $\text{NO}_x$ 转化率存在明显作用。当氨气分布的均匀性较差时,会导致部分区域出现还原剂不够的问题,从而降低了 $\text{NO}_x$ 转化率,同时还有部分区域因为氨气量过多导致泄漏问题发生。本文的喷嘴结构是4孔喷嘴,因此不会对尿素液滴状态造成太大的影响,其分布状态基本为四角分布形态,因为受排气拖拽的影响,下部区域的氨气浓度明显高于上部区域以及左右两侧区域。

### 3.2 尿素喷孔喷射角度参数优化

本文对喷嘴的4个喷射角度进行了研究,即角度分别为 $0^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 和 $60^{\circ}$ 。图5给出了不同喷射角度的 $\text{NO}_x$ 转化率随喷射时间的变化规律。由图5可知,无论在何种喷射角度下, $\text{NO}_x$ 转化率随喷射时间均表现出先增大后趋于平稳再降低的变化规律。 $0^{\circ}$ 喷射角度下的 $\text{NO}_x$ 转化率整体约为30%。随着喷射角度由 $0^{\circ}$ 逐渐增加至 $20^{\circ}$ 时,排

气管内的液滴均匀性获得了显著提升,NO<sub>x</sub>转化率也由原先的30%增加至48%。当喷射角进一步增加至40°及60°时,因为喷嘴所在的圆管弯曲部位空间较为狭窄,因此下

部与两侧喷孔处喷出的尿素存在明显的撞壁现象,并且此时还原剂基本存在于内壁附近区域。在上述不同喷射角度下的排气管内液滴分布状态也基本相同。

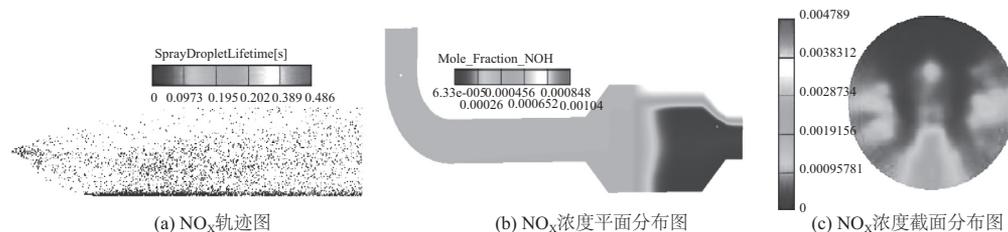


图4 系统内部NO<sub>x</sub>浓度分布

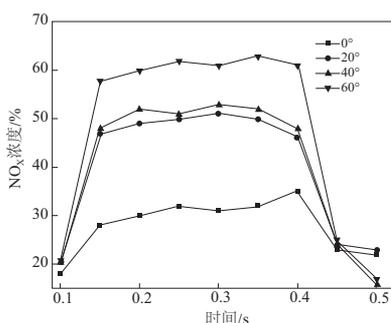


图5 不同喷射角度的NO<sub>x</sub>转化率随喷射时间的变化规律

### 3.3 喷嘴偏置角度参数优化

本文对喷嘴的3个喷射偏置角度进行了研究,即角度分别为0°、10°和20°。图6给出了不同偏置角度的NO<sub>x</sub>转化率随喷射时间的变化规律。由图6可知,无论在何种偏置角度下,NO<sub>x</sub>转化率随喷射时间均表现出先增大后趋于平稳再降低的变化规律。随着偏置角从0°逐渐增加至10°时,排气管下部区域的尿溶液滴撞壁量不断下降,而排气管内的液滴量开始增加。随着夹角的进一步增大达到20°时,液滴在排气管下部的撞壁程度进一步降低,此时液滴开始往排气管上部转移,部分喷雾和对侧管壁相撞,根据图中所示,在偏置角等于20°时,喷射液滴主要富集于排气管上部,整体均匀性发生降低。

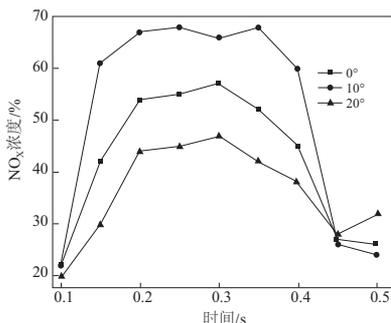


图6 不同偏置角度的NO<sub>x</sub>转化率随喷射时间的变化规律

## 4 结语

1)尿溶液滴在排气过程基本是保持原先的运动轨

迹,极少液滴会和管壁碰撞。NH<sub>3</sub>大部分分布于催化器的下部区域。

2)NO<sub>x</sub>转化率随喷射时间均表现出先增大后趋于平稳再降低的变化规律。随着喷射角度的增加,NO<sub>x</sub>转化率增大;偏置角度10°时能获得较好的NO<sub>x</sub>转化率。

### 参考文献:

- [1] 杨建军,栗国,马杰,等. 钒基SCR后处理技术在柴油机上的应用进展[J]. 科技导报,2011,29(34):73-79.
- [2] SPITERI A, DIMOPOULOS E, GEGENSCHWILER P. Experimental fluid dynamic investigation of urea - water sprays for diesel selective catalytic reduction - DeNO<sub>x</sub> applications[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(8):3047-3055.
- [3] BALETA J, VUJANOVIĆ M, PACHLER K, et al. Numerical modeling of urea water based selective catalytic reduction for mitigation of NO<sub>x</sub> from transport sector[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 88:280-288.
- [4] 赵思博,孙平,胡俊,等. DOC+POC对柴油机尾气排放的影响研究[J]. 机械设计与制造,2014(10):246-249,253.
- [5] 苏庆运,王伟,王建昕,等. 径向变孔密度载体对汽车催化转化器反应流动的影响[J]. 内燃机学报,2013,31(5):436-441.
- [6] 宋鑫. 基于多因素角度分析喷射结构对船机SCR的影响[J]. 舰船科学技术,2014,36(11):172-175.
- [7] 刘文坤,张翠平,王鹏,等. 紧凑型DOC-混合器-SCR后处理系统数值模拟[J]. 车用发动机,2015(5):57-62.
- [8] 李晓晓,王忠,赵洋,等. 汽车尾气净化器内部流动特征仿真与分析[J]. 机械设计与制造,2015(9):240-242,246.
- [9] 辛喆,王顺喜,张寅,等. Urea-SCR催化剂压力损失及其对柴油机能的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(8):169-173.
- [10] 赵思博,孙平,胡俊,等. DOC+POC对柴油机尾气排放的影响研究[J]. 机械设计与制造,2014(10):246-249,253.
- [11] 殷子渊,张凯山. 典型城市轻型汽油车尾气排放模式分析[J]. 环境工程,2021,39(4):64-71.
- [12] 吕玲玲,胡京南,何立强,等. 汽油车技术发展对尾气排放影响研究进展[J]. 环境科学研究,2021,34(2):286-293.
- [13] 孙龙林,张妮娜,黄文伟,等. 国V重型货车尾气中颗粒物数量排放特性实验研究[J]. 安全与环境工程,2020,27(5):77-84.
- [14] 黄亮,黄弘逊,周春辉,等. 港口船舶尾气排放时空分析与可视化系统[J]. 大连海事大学学报,2019,45(4):146-152.
- [15] 谭宇,严余松,孙湛博,等. 考虑车辆尾气污染暴露的系统网络优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息,2018,18(6):133-139.

收稿日期:2021-07-27