

实验教学研究

汽车尾气排放检测与催化转化
教学实验建设

段凤魁,郝吉明,王书肖,段雷,张磊,王龙

(清华大学 环境学院,北京 100084)

摘要: 针对机动车污染这一典型大气污染源,结合我国当前大气污染现状以及环境学院近年来在大气污染控制方面的研究成果,采用当前国际上主流的选择性催化还原烟气脱硝技术,自主设计搭建了包括尾气检测与催化剂制备、温度控制、气体配制、催化转化、反应检测等模块在内的综合教学实验系统。采用真实机动车进行排放检测,使学生对机动车污染排放与工况的关系有更深体验。通过比较不同催化剂种类、程序升温过程(升温时间、始末温度、升温速度)、反应时间等参数对催化效果的影响,从而培养学生浓厚的科研兴趣,启发科学思维,推动大气实验课程建设和环境专业复合型拔尖创新人才的培养。

关键词: 大气污染控制工程实验; 实验课程建设; 汽车尾气检测; 催化转化

中图分类号: G642.0 **文献标志码:** B **文章编号:** 1002-4956(2014)9-0167-03

Integrated teaching experimental system of automobile
exhaust emissions test and catalytic convert

Duan Fengkui, Hao Jiming, Wang Shuxiao, Duan Lei, Zhang Lei, Wang Long

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to control the motor vehicle pollution, combined with the current status of China's air pollution and the research progress in recent years, the selective catalytic reduction technology was used and the integrated experimental system of automobile exhaust emissions test and catalytic conversion was designed independently, including vehicle emission detection, catalyst preparation, temperature control procedure, gas preparation and catalytic conversion reaction detection. In this system, using real motor vehicle to test the vehicle emissions is helpful for the students to understand the relationship between the working conditions and the pollution emission. By comparing the influence of the different types of catalyst, the temperature-programmed process (heating time, original temperature, and heating rate), the reaction time and other parameters on the catalytic effect, it is helpful to increase the students' scientific interest, inspire scientific thinking, and promote the atmospheric experiment course construction and further cultivate environmental professionals and top-notch innovative talents.

Key words: air pollution control engineering experiment; experimental course construction; vehicle exhaust test; catalytic convert

机动车尾气排放是我国大气复合污染的重要来源之一,其成分复杂,既包括 NO_x 、 CO 、 VOCs 、 CO_2 、 SO_2

等气态污染物,又包括 $\text{PM}_{2.5}$,甚至纳米粒子在内的颗粒态污染物^[1-2]。其中, NO_x 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要前体物之一,其在气候变化、酸雨的形成、雾霾的形成中都扮演着至关重要的角色。随着我国机动车保有量的迅速增加, NO_x 在富氧条件下的排放控制也变得越来趑紧趑^[3]。

“大气污染控制工程”是高校环境专业核心课程之一,通过该课程极大推动了我国高校环境专业实验与

收稿日期:2014-01-17 修改日期:2014-03-14

基金项目:2009 年国家实验教学示范中心建设项目(教高函[2009]28号)

作者简介:段凤魁(1973—),女,山东潍坊,博士,高级工程师。主要从事大气污染控制、环境分析化学科研及教学。

E-mail:duanfk@tsinghua.edu.cn

实践课程体系的建设,以及大气污染控制工程专业人才的培养^[4-5]。然而,很多高校在大气实验课程建设方面存在严重不足^[6-8]。我校大气污染控制工程课程起初是本科生限选课,于1999年被评为国家级精品课程。为了适应学科发展,于2010年改为本科生必修课。大气实验是“大气污染控制工程”的配套实验课程。然而,与理论课程的建设相比,实验课程的建设远远不足。多年来由于受场地及经费所限,大气污染控制工程实验课程仅开设了旋风—布袋除尘实验及脱硫实验。实验内容单一,且设备老化严重,实验效果不好。曾经借助环境学院有关课题组的科研平台,断续开展了几次汽车尾气中CH₄的净化实验,但由于时间冲突且设备无法为教学专用,实验效果不理想。因此,在本科实验教学中开设机动车污染排放与控制相关的实验内容,对于培养拔尖创新型和复合型人才,具有非常重要的意义。

1 实验设计与技术原理

1.1 设计思路

针对上述大气污染现状及我校实验教学现状,为了完善环境学院实验课程体系,使大气实验课程更好地与大气理论课程内容相衔接,并体现大气科学发展前沿,我们提出基于“大气污染控制工程”理论课程中的相关教学内容,设计研制了“汽车尾气排放检测与催化转化综合教学实验系统”,并以此开设新实验项目。通过该系统,可望能够显著提高学生的科研兴趣和科研能力,更好地适应建设世界一流的环境科学与工程学科人才培养的需要。

1.2 技术原理

“汽车尾气排放检测与催化转化综合教学实验系统”由5部分组成:尾气排放检测系统、催化剂制备系统、温度控制及反应系统、气体流量配气系统、反应测量系统(见图1)。尾气排放检测是机动车排放控制中非常重要的一环^[9-10]。机动车在怠速工况下,发动机气缸内通常处于不完全燃烧状况,此时尾气中CO和HC的排放相对较高,但NO_x排放则很低。由于怠速工况时机动车没有行驶负载,无需底盘测功机就可进行尾气排放检测,故虽然怠速法不能全部反映实际运行工况下的机动车排放,但仍是目前各国普遍采用的在用车排放检测方法之一。本系统采用尾气五气分析仪测定家用汽油车怠速(转速为0)与高怠速(例如0.5额定转速)等不同工况下HC、NO、CO、CO₂和O₂5种气体的浓度,比较不同工况下的尾气排放特征,并分析原因。根据上述不同工况下气体浓度变化情况,尤其是关键尾气成分的浓度水平,确定下一步催化转化模拟实验中配气气体的种类及各种气体的配气比例。

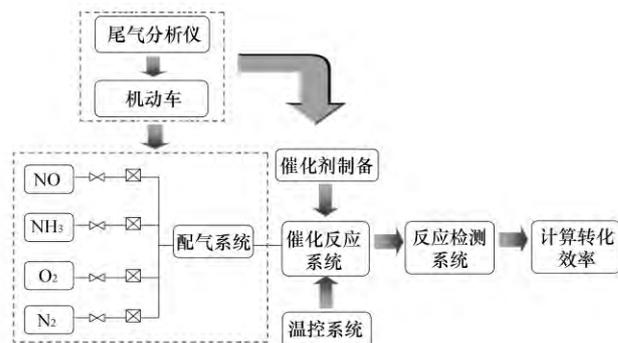


图1 汽车尾气排放检测与催化转化综合教学实验系统构成示意图

针对检测到的尾气中关键成分NO,采用选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)这一国际上先进的烟气脱硝技术进行实验^[11-13]。该方法主要采用氨(NH₃)作为还原剂,将NO选择性地还原成N₂。NH₃具有较高的选择性,在一定温度范围内,它主要与NO发生作用,而不被烟气中的氧所氧化;同时少量的NO₂也被还原成N₂。该方法比无选择性的还原剂脱硝效果好。NH₃-SCR的工作原理如下:



本实验中的温控系统、配气系统及反应系统均通过自主设计,并委托有资质的公司进行生产加工(见图2)。根据上述反应原理,通过比较选择平衡气,最终确定配气组成为NO、O₂、NH₃、N₂,其中N₂为平衡气体。实验气体经反应炉催化还原之后,剩余的NO可用高精度烟气分析仪进行检测,最终计算催化转化效率并探讨影响因素。



图2 实验系统中的温控、配气系统及反应炉实物图

2 实验过程及结果

自2010年,本科生应用该系统进行了机动车尾气

排放检测及氮氧化物催化转化效率测试。除规定的实验内容外,学生还可自行设计实验进行验证。例如,机动车排放测试主要是使学生探讨怠速、高怠速(0.5 额定转速)2 种工况下尾气成分排放特征。测试结果表明,怠速及高怠速下尾气主要成分为 NO、CO、CO₂、O₂、HC 化合物。怠速下尾气中 CO 和 HC 的排放相对较高,但 NO 排放则较低;高怠速下燃烧温度较高,CO 含量相对较低,而 NO 含量较高。可见 NO 是机动车尾气的重要成分。

此外,例如 NO 催化转化测试部分,配气量分别为 NO 30 ml/min, NH₃ 30 ml/min, O₂ 20 ml/min, N₂ 420 ml/min, 维持总气量为 500 ml/min。按照预设程序,将催化剂从常温按照 5 °C/min 的温度梯度升温至 200 °C,在 200 °C 稳定 10 min 后,将通气阀从“旁通”转换通向催化剂,从 200 °C 开始测量 NO 浓度至 450 °C 为止,升温梯度为 8.3 °C/min,每隔 2 min 在浓度分析仪上读取一次数据,测量 30 min,并记录催化剂温度和处理后气体 NO 浓度。催化曲线如图 3 所示。可见,在 343 °C 时 NO 催化净化效率最高,可达 92%。

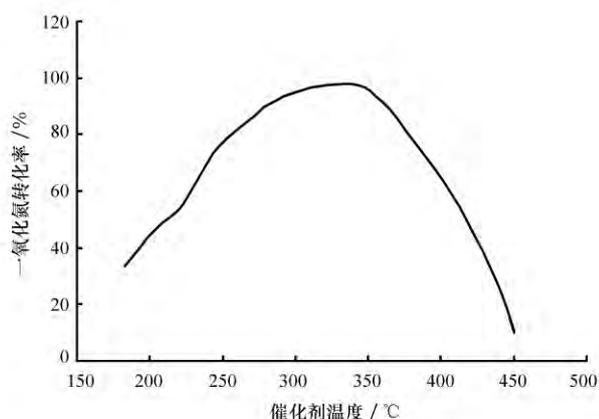


图 3 NO 转化率与温度的关系曲线

3 结束语

本综合实验系统针对机动车污染这一典型大气污染源,采用当前国际上主流的 SCR 烟气脱硝技术,结合我国当前大气污染现状以及环境学院近年来在大气污染控制方面的研究成果,覆盖了从污染源排放到控制在内的核心知识点与技术点,是将科研转化为实验教学的典型案例。主要特色及创新性如下:

(1) 本成果以研究型实验为出发点,以流动源污染控制研究项目中的有关研究内容及过程为基础,通过高度提炼与总结,设计成涵盖排放检测、催化剂制

备、大气污染物控制关键技术在内的、可为本科生进行实际操作的实验系统与实验项目,在设计思路上有创新。

(2) 尾气排放的测定采用真实机动车进行,且由学生来操控机动车的不同转速。在完成规定实验内容后,学生还可进一步设计不同工况进行验证。教学实践证明,该成果使实验教学变得不再枯燥,引起了本科生浓厚的实验与科研兴趣,提高了本科生自主学习的兴趣和科研能力。与传统实验教学相比,在教学设备与教学方法上有一定特色。

(3) 本实验中的温控系统、配气系统及反应系统均通过自主设计,并委托有资质的公司进行生产加工。学生可自行组成研究小组,自行设计实验,分别考察升温程序(升温时间、升温速度)、配气比例、催化剂种类等关键参数对催化转化效率的影响,并探讨原因,进一步改进实验,充分激发了学生的参与意识,锻炼了学生的动脑、动手能力,在实验设备、内容及实验方法上具有明显的研究特色。

参考文献(References)

- [1] He KB, Yang FM, Ma YL, et al. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2001 (35): 4959-4970.
- [2] 贺克斌,杨复沫,段凤魁,等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [3] 刘志明,郝吉明,朱天乐,等. 富氧条件下 NO_x 催化净化的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002,3(8):41-47.
- [4] 段凤魁,胡洪营,杨宏伟,等. 环境技术实验与实践教学中心的建设与探讨[J]. 实验技术与管理,2008,25(10):104-107.
- [5] 段凤魁,胡洪营,杨宏伟,等. 环境学科新型实验实践教学体系的建设进展[J]. 实验技术与管理,2010,27(7):142-158.
- [6] 闫金鑫,董韶峰. 大气污染控制工程课程教学改革探讨[J]. 广东化工,2012(3):134,91.
- [7] 赵兵涛. 能源与环境类专业“大气污染控制工程”课程建设与探索[J]. 中国电力教育,2013(16):74-75.
- [8] 叶菊娣. 大气污染控制工程实验教学研究[J]. 化工时刊,2012,26(9):62-63.
- [9] 贺克斌,霍红,王岐东,等. 城市轻型车实际道路瞬态排放的特征[J]. 中国环境科学 2006,26(4):390-394.
- [10] 王岐东. 基于工况的城市机动车排放因子研究[D]. 北京:清华大学,2005.
- [11] 高岩. 选择性催化还原脱硝催化剂的实验与机理研究[D]. 济南:山东大学,2013.
- [12] 孙克勤. 选择性催化还原脱硝的理论及实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.
- [13] 管斌. 低温选择性催化还原氮氧化物的基础研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.