

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第32卷 第12期

Vol.32 No.12

2011

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

序 郝郑平(3461)

我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究 王海林,张国宁,聂磊,王宇飞,郝郑平(3462)

我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨 陈颖,李丽娜,杨常青,郝郑平,孙汉坤,李瑶(3469)

工业固定源 VOCs 治理技术分析评估 栾志强,郝郑平,王喜芹(3476)

工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究 江梅,张国宁,魏玉霞,邹兰,张明慧(3487)

台湾地区 VOCs 污染控制法规、政策和标准 栾志强,王喜芹,郑雅楠,刘平(3491)

国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究 张国宁,郝郑平,江梅,王海林(3501)

挥发性有机物税收政策对我国经济的影响分析 刘昌新,王宇飞,王海林,郝郑平,王铮(3509)

民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征 李兴华,王书肖,郝吉明(3515)

北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探 王琴,邵敏,魏强,陈文泰,陆思华,赵越(3522)

北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析 孙杰,王跃思,吴方莛(3531)

上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析 崔虎雄,吴迺名,高松,段玉森,王东方,张懿华,伏晴艳(3537)

长沙大气中 VOCs 研究 刘全,王跃思,吴方莛,孙杰(3543)

佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征 马永亮,谭吉华,贺克斌,程远,杨复沫,余永昌,谭赞华,王洁文(3549)

深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析
..... 黄爱葵,李楠,Alex Guenther,Jim Greenberg,Brad Baker,Michael Graessli,白建辉(3555)

北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析 周裕敏,郝郑平,王海林(3560)

北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价 周裕敏,郝郑平,王海林(3566)

城市污水处理厂恶臭挥发性羰基化合物的排放特征 周咪,王伯光,赵德骏,张春林,古颖纲(3571)

城市污水处理厂挥发性卤代有机物的排放特征及影响因素研究 何洁,王伯光,刘舒乐,赵德骏,唐小东,邹宇(3577)

城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究 刘舒乐,王伯光,何洁,唐小东,赵德骏,郭薇(3582)

植物释放挥发性有机物(BVOC)向二次有机气溶胶(SOA)转化机制研究 李莹莹,李想,陈建民(3588)

NO₃ 自由基与 3 种环醚的大气化学反应动力学研究 盖艳波,葛茂发,王炜罡(3593)

3-甲基-3-丁烯基-1-醇与硫酸/过氧化氢混合溶液的吸收反应研究 王天鹤,刘泽,葛茂发,王炜罡(3599)

水中挥发性有机物的分析方法综评 许秀艳,朱擎,谭丽,梁宵,张颖,滕恩江(3606)

新型动态针捕集阱技术分析大气中低浓度的 VOCs 李想,陈建民(3613)

大气中总挥发性有机硫化物检测方法的研究 王艳君,郑晓玲,何鹰,张栋,王保栋(3617)

全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物
..... 周庆华,仓怀文,鞠帮玉,李林,杜永斋,陈创,侯可勇,李京华,王卫国,李海洋(3623)

膜进样-单光子电离/化学电离-质谱仪在线检测水中 VOCs
..... 花磊,吴庆浩,侯可勇,崔华鹏,陈平,赵无垠,谢园园,李海洋(3628)

工业园区 TVOC 和恶臭的电子鼻检测技术研究 田秀英,蔡强,叶朝霞,郭威,卢岩文,张永明(3635)

电子鼻检测污染土壤中挥发性氯代烃的适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,蔡强,陈吕军,张永明(3641)

工业管道中丙烯酸酯类物质的监测与分析 吴彬,张红燕,陆林光(3647)

硅改性制备疏水性沸石分子筛蜂窝体 王喜芹,李凯,魏冰,栾志强(3653)

氧化锰八面体分子筛的合成及其对苯催化氧化性能 李东艳,刘海弟,陈运法(3657)

蜂窝状活性炭对 VOCs 的吸-脱附性能研究 韩忠娟,罗福坤,李泽清(3662)

混合气体直接吸附分离回收过程研究 王红玉,羌宁,胡瑕(3667)

生物滴滤降解氯苯废气的实验研究 周卿伟,朱润晔,胡俊,张丽丽,陈建孟(3673)

复合吸收技术净化复杂工业有机废气 陈定盛,岑超平,唐志雄,方平,陈志航(3680)

烘房 VOCs 废气治理技术路线探析 李泽清,罗福坤(3685)

Co₃O₄ 纳米棒的制备及其对气相甲苯的催化氧化 闫清云,李新勇,肇启东,曲振平(3689)

Si 掺杂 TiO₂ 纳米管阵列制备、表征及其光催化氧化降解室内典型 VOCs 邹学军,李新勇,曲振平,王疆疆(3694)

基于现场试验的石油类污染物自然衰减能力研究 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(3699)

膜分离法处理加油站油气研究 朱玲,陈家庆,张宝生,王建宏(3704)

机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟 陈家庆,张男,王金惠,朱玲,尚超(3710)

《环境科学》第 32 卷(2011 年)总目录 (3717)

《环境科学》征稿简则(3679) 《环境科学》征订启事(3684) 信息(3554, 3616, 3622, 3672)

机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟

陈家庆, 张男, 王金惠, 朱玲, 尚超

(北京石油化工学院环境工程系, 北京 102617)

摘要:随着环保法规的不断完善, 机动车加油过程中所产生的油气排放污染问题越来越受到重视. 国外自 20 世纪 90 年代中后期开始采用数值模拟手段对机动车的加油过程进行研究, 而国内迄今尚处于空白阶段. 对机动车加油过程所涉及的“加油枪喷嘴 + 加油管 + 油箱 + 回气管”物理体系进行适当简化, 采用商业计算流体动力学(CFD)软件 Fluent 中提供的 VOF 气液两相流模型和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 在基于 Gambit 软件确定网格划分方案和进行适当的边界条件设置后, 建立了合理可行的加油过程气液两相流动 CFD 数值模拟模型, 讨论了加油速度对油箱内气相空间静压力的影响, 揭示了汽油在加油管内的回流现象. 结果表明, 加油枪的流量越大, 油箱内气相空间的静压总体上也逐渐增大; 同时油箱内气相空间的静压总体上可以划分为 3 个较为明显的阶段. 而当加油流量较大时, 往往会引起汽油在加油管油帽段内回流, 从而使得加油枪过早跳枪. 本研究为国内自主开展机动车加油以及油气排放污染控制技术和设备方面的研究开发奠定了一定基础.

关键词:加油排放; 油气回收; 计算流体动力学; 数值模拟; 气液两相流动

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3710-07

CFD Numerical Simulation onto the Gas-Liquid Two-Phase Flow Behavior During Vehicle Refueling Process

CHEN Jia-qing, ZHANG Nan, WANG Jin-hui, ZHU Ling, SHANG Chao

(Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: With the gradual improvement of environmental regulations, more and more attentions are attracted to the vapor emissions during the process of vehicle refueling. Research onto the vehicle refueling process by means of numerical simulation has been executed abroad since 1990s, while as it has never been involved so far domestically. Through reasonable simplification about the physical system of “Nozzle + filler pipe + gasoline storage tank + vent pipe” for vehicle refueling, and by means of volume of fluid (VOF) model for gas-liquid two-phase flow and Re-Normalization Group $k-\varepsilon$ turbulence flow model provided in commercial computational fluid dynamics(CFD) software Fluent, this paper determined the proper mesh discretization scheme and applied the proper boundary conditions based on the Gambit software, then established the reasonable numerical simulation model for the gas-liquid two-phase flow during the refueling process. Through discussing the influence of refueling velocity on the static pressure of vent space in gasoline tank, the back-flowing phenomenon has been revealed in this paper. It has been demonstrated that, the more the flow rate and the refueling velocity of refueling nozzle is, the higher the gross static pressure in the vent space of gasoline tank. In the meanwhile, the variation of static pressure in the vent space of gasoline tank can be categorized into three obvious stages. When the refueling flow rate becomes higher, the back-flowing phenomenon of liquid gasoline can sometimes be induced in the head section of filler pipe, thus making the gasoline nozzle pre-shut-off. Totally speaking, the theoretical work accomplished in this paper laid some solid foundation for self-researching and self-developing the technology and apparatus for the vehicle refueling and refueling emissions control domestically.

Key words: refueling emissions; gasoline vapor recovery; computational fluid dynamics(CFD); numerical simulation; gas-liquid two-phase flow

无论是从实施加油油气排放污染控制的角度来看, 还是为避免出现过早跳枪、保证加油过程正常进行的角度来看, 都会涉及汽油进入油箱后置换出油气这一复杂的多相流动过程^[1]. 为了揭示加油过程中所发生的复杂气液两相流动特性, 先后出现了实验测量、针对加油箱各个部件的计算流体动力学(CFD)数值模拟以及基于集总参数法的理论分析等研究方法, 其中采用 CFD 数值模拟研究的文献居多. 美国福特汽车公司开展得最早, 在将整个加油过程划分为许多单元子过程的基础上, 借助该公司自

己开发的隐式、Roe/TVD 逆风气液两相流场计算程序, 对“直线加油管 + 直线回气管 + 圆柱状油箱”简化模型中的流动问题进行了 CFD 数值模拟^[2,3]. 随后, 知名汽车配件商 Mark IV Automotive 委托美国 Missouri-Rolla 大学的研究人员, 利用商业 CFD 软件 Fluent 模拟了“加油管 + 油箱”体系内的两相流动问

收稿日期: 2011-06-05; 修订日期: 2011-07-28

基金项目: 北京市属高等学校人才强教计划项目 (PHR201107213, PHR201108365); 国家自然科学基金项目 (51079006)

作者简介: 陈家庆(1970~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油/气/水多相分离技术, E-mail: Jiaqing@bipt.edu.cn

题,并进行了相应的实验研究^[4~9].文献[10~13]建立了一种包含集总参数模型、一维可压缩流动模型和三维 CFD 模型的复合模型,通过分析油箱内气相空间的压力变化以及加油管内气-液界面的运动情况,预测了加油枪发生过早跳枪的可能性.2004年,Wiesche^[14]对“加油管+油箱”体系在加油过程中的动态行为进行了数值模拟,采用三维 VOF 模型来直接跟踪液体界面的变化,并开发了相应的低阶有限差分算法程序.2005年,Ding 等^[15]使用 MSC. Dytran 软件中的自适应多 Euler 域技术对机动车加油过程进行了数值模拟,但局限于展示软件自身求解该问题的可行性,所采用的分析模型与全尺寸真实体系略有出入.2010年,Hassanvand 等^[16]采用 CFD 数值模拟手段研究了汽油喷溅装车情况下的油气产生问题,讨论了装车速度、温度和初始油气质量分数等因素对汽油挥发损失的影响.本研究借助商业 CFD 软件 Fluent,首次在国内对“加油枪喷嘴+加油管+油箱+回气管”物理体系中的气液两相流动问题进行数值模拟,初步掌握速度场、压力场以及内部气液界面的变化规律,以期为进一步开展机动车加油系统结构合理化评估或优化设计、自主掌握车载加油油气回收(ORVR)技术奠定基础.

1 研究模型的确定与相关假设

1.1 研究模型的确定

将机动车加油过程所涉及的“加油枪喷嘴+加油管+油箱+回气管”物理体系简化成如图 1 所示

的形式,油箱部分依据某机动车油箱的实际容积建立.为了便于实施三维网格划分,降低计算规模,将车体内的加油管分为位于同一垂直平面内的 3 段:容纳加油枪的油帽段,采用柱形管状结构;过渡区域段,采用锥形管状结构;圆环段,采用等曲率弯曲管状结构.对于目前的多数非 ORVR 型机动车而言,回气管两端分别连接在油箱顶部和加油管油帽段.开始加油时,将加油枪喷嘴插入加油管油帽段,汽油自加油枪的喷嘴喷出,经加油管流入油箱;随着汽油的不断加入,油箱内的油气被迫经回气管导出到加油管的油帽段内,如果不加控制则直接排放到大气环境中(对基于加油站第二阶段油气回收的控制技术而言,则被油气回收型加油枪回收).研究模型与实际模型的最大区别在于将回气管简化切短成仅高于油箱少许,简化后模型的具体尺寸如表 1 所示.

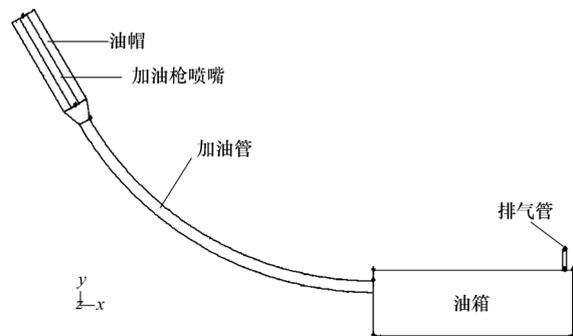


图 1 “加油枪喷嘴+加油管+油箱+回气管”加油过程物理体系示意

Fig. 1 Schematic graph of physical system during refueling process by “gas nozzle + filler pipe + fuel tank + vent pipe”

表 1 简化后的机动车加油系统模型尺寸参数

Table 1 Size parameters of vehicle refueling system after simplification

名称	几何形状	几何尺寸
加油枪喷嘴	圆柱体	直径 $\Phi 20$ mm, 长 250 mm
加油管油帽段	圆柱体	直径 $\Phi 62$ mm, 长 250 mm
加油管油帽段与圆环段连接处	圆锥台	长 45 mm, 两侧直径分别为 $\Phi 62$ mm 和 $\Phi 28$ mm
加油管圆环段	1/6 圆环	圆环大径 $\Phi 1600$ mm, 圆环小径 $\Phi 28$ mm
油箱	立方体	700 mm \times 500 mm \times 200 mm
回气管	圆柱体	直径 $\Phi 10$ mm, 长 50 mm

1.2 假设与控制方程

机动车的加油过程涉及到非稳态、多相流、湍流并伴随着气液传质等多种物理和化学现象,而空气的卷吸携带、气-液界面上的质量传递以及体系内不同部件在时空尺度上的较大差异使得 CFD 数值模拟工作更为复杂,很难将所有的因素都考虑进去.本研究基于如下假设:①整个体系等温,液态汽油与油

气之间不发生热量传递;②不考虑液态汽油与油气之间存在的传质问题;③只考虑强制对流,不考虑气相密度不同而带来的浮力的影响;④气相在整个体系内的扩散比较均匀,即气相的黏度和扩散特性不因体系内气相体积分数的不同而变化.

(1) 多相流模型的选择与控制方程

Fluent 求解器中的多相流模型主要包括 Mixture

(混合)模型、Eulerian(欧拉)模型、VOF(volume of fluid, 流体体积)模型, 鉴于 VOF 模型适用于分层流、自由面流动、灌注、晃动、液体中大气泡的流动、水坝决堤时的水流以及对喷射破碎(表面张力)的预测等场合, 能够求得任意液-气分界面的稳态或瞬时分界面, 因此本研究选择 VOF 模型^[17]. 在 VOF 模型中, 气、液两相共用压力和速度等体积平均变量. 描述 2 种互不相溶、不可压缩流体的体积平均质量和动量守恒方程分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j + f_\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

式中, f_σ 为由表面张力引起的体积力. 混合物的密度和动力黏度可以通过体积分数平均的方法来决定,

$$\rho = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_L, \mu = \alpha \mu_v + (1 - \alpha) \mu_L \quad (3)$$

在气液两相的分界面上, 因气、液表面张力的不同而产生了一个压力跳跃, 因此为了保持平衡, 压力跳跃的梯度必须等于动量方程中的额外体积力. 虽然动量方程针对整个求解域, 但通过给定气液过渡区一个有限厚度, 这个体积力仅仅在界面上较为显著. 该不连续的压力跳跃可以按式(4)计算:

$$f_\sigma = -\sigma \left(\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \right) (\nabla \alpha) \quad (4)$$

显然, 有必要知道在整个计算域中的气相体积分数, 气液两相分界面的跟踪通过针对体积分数求解下列连续性方程来实现,

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

当计算单元全部充满气相时, $\alpha = 1$; 否则 $\alpha = 0$. 气液两相的分界面可以通过寻找 $0 < \alpha < 1$ 的单元来得到.

(2) 湍流模型的选择与控制方程

GB 50156-2002《汽车加油站设计与施工规范》(2006 年版)中规定, 加油枪的流量不应大于 $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 计算表明, 即使当加油枪的流量不足 $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 加油管中汽油的流动 Re 数也大于 10 000 而呈强湍流状态, 因此必须选择适当的湍流模型. Fluent 求解器中提供的湍流模型包括 Spalart-Allmaras 模型、标准 $k-\varepsilon$ 模型、重正化群(RNG) $k-\varepsilon$ 模型、可实现(Realizable) $k-\varepsilon$ 模型、雷诺应力模型(reynolds stress model, RSM)和大涡模拟(large eddy simulation, LES)模型等, 鉴于 RNG $k-\varepsilon$ 模型与急弯度、高湍流度情况下的实验结果更一致, 因此本研究选择 RNG $k-\varepsilon$ 模型. 该模型的动能方程和能量耗散方程分别如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 0.77$;
 $\mu_{\text{eff}} = \mu \left(1 + \sqrt{\frac{C_\mu}{\nu} \frac{k}{\varepsilon}} \right)$, $C_\mu = 0.085$.

2 网格独立性验证与初步计算结果

2.1 网格划分和相关设置

因理想情况下可以认为“加油枪喷嘴 + 加油管 + 油箱 + 回气管”体系模型及其内部实际流场垂直于纸面前后对称, 故本研究中只选取模型的一半进行模拟, 以减少计算时间和工作量. 整个模型共分为 12 个部分, 除回气管周围部分采用正四面体网格外, 全部采用六面体网格, 共划分 66 047 个节点(具体如表 2 所示).

表 2 模型网格种类及尺寸

Table 2 Mesh type and interval size in the simulation model

编号	网格种类	网格步长/mm	编号	网格种类	网格步长/mm
1	Hex/Wedge-cooper	8	7	Hex/Wedge-cooper	8
2	Hex/Wedge-cooper	8	8	Hex/Wedge-cooper	16
3	Hex/Wedge-cooper	8	9	Tet/Hybrid-TGrid	8
4	Hex/Wedge-cooper	8	10	Tet/Hybrid-TGrid	8
5	Hex/Wedge-cooper	8	11	Tet/Hybrid-TGrid	8
6	Hex/Wedge-cooper	16	12	Tet/Hybrid-TGrid	8

除施加对称边界条件之外,研究模型中将加油枪喷嘴段出口处设置为速度入口,汽油以一定的流量从加油枪喷出进入加油管;加油管油帽段上部管口和回气管管口设为压力出口,应注意相应的表压;容器的全部固体外壁面和加油枪喷嘴段的外壁作壁面(Wall)处理,接触壁面流体的相对速度均为零,而且与周边没有物质和能量交换.在使用VOF模型时,在边界上需要定义次要相的体积百分比,速度入口处液态汽油的体积百分比设为1.此外,对圆形管道的参数设置采用湍流强度和水利直径的定义方式,湍流强度都取为5%,水利直径取各自的管道直径.

在Fluent求解器中选择3ddp模式,压强-速度耦合算法格式采用“PISO”,压力方程的离散化采用“PRESTO!”,动量方程和湍流动能方程的离散都采用二阶迎风格式.模拟所用流体介质的密度和黏度根据Fluent数据库中的物性参数选取,其余设置保持默认值.将速度入口的初始值作为全局初始化的

依据,之后直接修改整个流场的初始时刻状态,认为其充满油气(气相分数为1),不再采用局部修补进行设置.

2.2 初步计算结果

首先通过一组两相流的模拟来验证本模型的可靠性,相关参数的具体设置为:加油速度为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应的流量为 $75.36\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$),加油管油帽段上部管口连通大气(相对压力为0)、回气管出口的相对压力为30 Pa(考虑油气在油气回收管中的流动阻力,下同);加油初始时刻,整个加油体系内部充满油气.图2给出了机动车加油过程中4个特定时刻油气体积分数的云图,油气体积分数均为质量加权平均分数.从图2中可见,Fluent软件完全能够模拟加油过程中油箱内液面上部油气的变化情况,液态汽油喷溅和液面逐渐波动上升的现象不仅符合流体动力学的规律,而且基本与机动车加油过程的部分特征相吻合,因此可以认为本模型是可靠的.

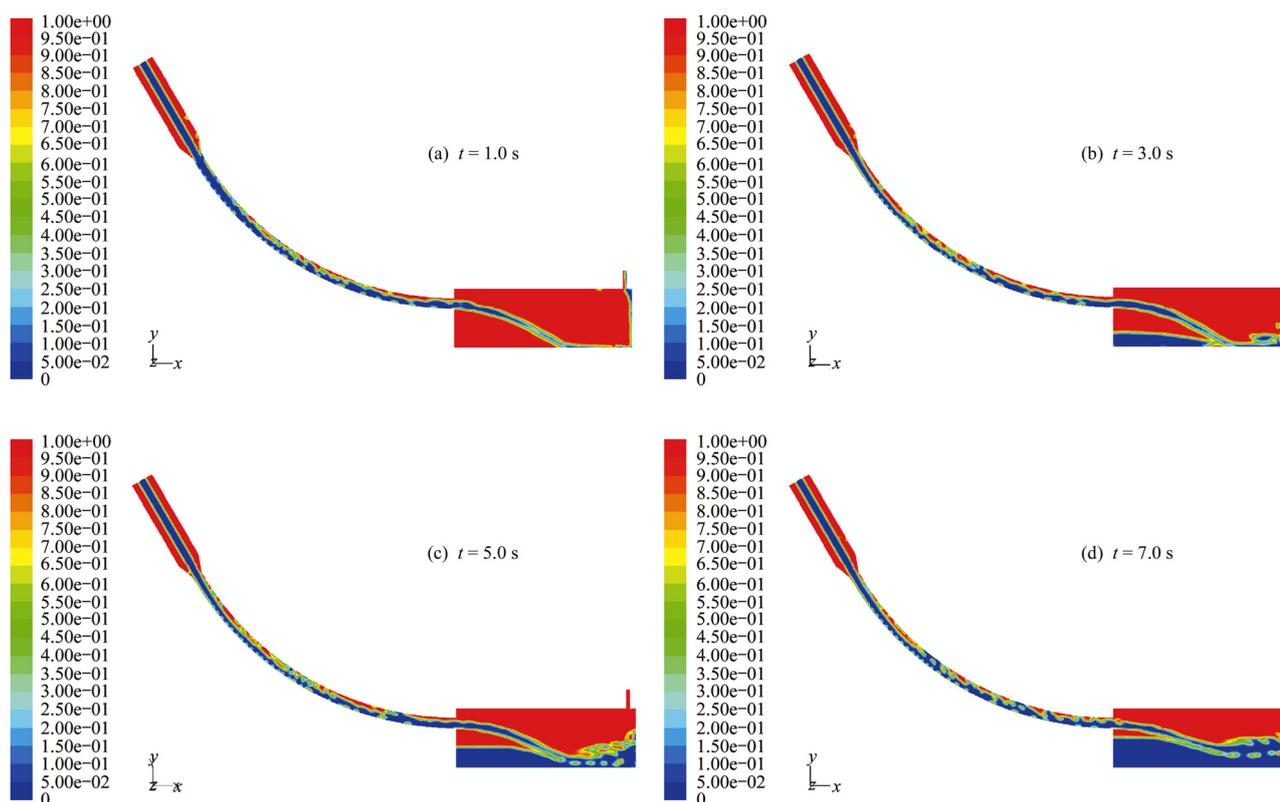


图2 机动车加油过程中不同时刻油气体积分数的云图

Fig. 2 Contour of oil vapor volume fraction at different time during vehicle refueling process

3 讨论与分析

3.1 加油速度对油箱内气相空间静压力的影响

实际加油过程中油箱内气相空间的压力处于一个不断变化的动态过程之中,在系统结构尺寸一定的情况下,具体的变化情况与加速速度直接相关.为

此,选取加油速度为 2.5、3.0、4.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (分别对应加油枪流量为 47.10、56.52、75.36 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$),加油管油帽段上部管口连通大气(相对压力为 0)、回气管出口的相对压力为 30 Pa;初始时刻定义油箱内充满油气(相对压力为 0).取油箱内气相空间的静压为体积加权平均静压值,记录其随加油时间的变化情况如图 3 所示.从图 3 中可以看出:①在“加油枪喷嘴+加油管+油箱+回气管”体系结构尺寸保持不变的情况下,加油枪的流量越大,加油速度越大,油箱内气相空间的静压总体上也逐渐增大.②就某一特定的加油速度而言,油箱内气相空间的静压随着时间的变化关系基本上可分为 3 个主要阶段:油箱内压力突然上升,迅速达到峰值;油箱内压力波动不大,略呈升高趋势;油箱内压力再次大幅上升,二次达到峰值.

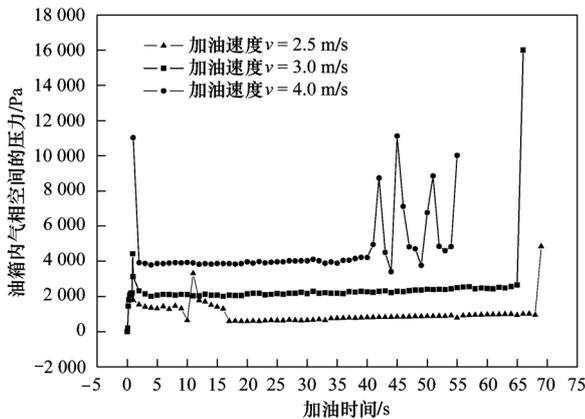


图 3 加油过程中油箱内气相空间内静压随时间的变化

Fig. 3 Variation of static pressure in the tank vent space vs time during refueling process

文献[3,13]对油箱内气相空间压力随加油时间变化情况进行定性描述,给出了如图 4 所示的 3 阶段变化关系曲线.在加油过程的第一阶段,一方面因液态汽油的进入而使气相空间开始急剧减小,另一方面因汽油与油箱底部的碰撞飞溅而挥发出更多的油气,使气相空间内的气体压力升高.第二阶段是加油过程的主要部分,油箱内气相空间的压力基本保持不变.加油过程的第三阶段,油箱内的汽油堵住了回气管的管口,油箱通气面积急剧减少,使得气相空间的压力突然再度升高.随着加油过程的中止,油气慢慢排除,油箱内气相空间的静压逐渐降低,直到与周围达到平衡状态.

应该指出的是,进行加油速度 $v = 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数值模拟时,选择从加油后第 1 s 开始纪录,除第 10

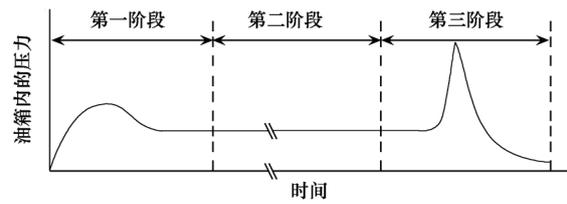


图 4 正常加油过程中油箱内的压力对时间的关系示意

Fig. 4 Schematic variation of static pressure in the tank vent space vs time during normal refueling process

s 时的静压值异常外,前期变化趋势与图 4 中第一阶段内出现的波峰相同,从第 11 s 时油箱内气相空间的静压已呈现下降趋势;第 17 s 开始保持平稳;在第 69 s 左右,油箱内气相空间的静压急剧上升.进行加油速度 $v = 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数值模拟时,选择从加油后第 0.1 s 开始纪录,前期变化趋势与图 4 中第一阶段内出现的波峰相同,从第 0.9 s 时油箱内气相空间的静压已呈现下降趋势;第 1.0 s 开始保持平稳;在第 66 s 左右,油箱内气相空间的静压急剧上升.进行加油速度 $v = 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数值模拟时,选择从加油后第 1 s 开始纪录,前期变化趋势只体现了图 4 中第一阶段内出现波峰的后半部分,可以认为静压波峰的峰值出现在 0~1 s 之间,且不低于 11 026.410 Pa;此后油箱内气相空间的静压已呈现平稳趋势;在第 40 s 左右,油箱内静压急剧上升.虽然文中没有模拟加油过程结束后油箱内气相空间压力逐步衰减的情况,但对比图 3、图 4 可见,数值模拟的结果与国外研究人员的定性描述较为吻合,从而再次证明了数值模拟模型的正确性.如果所建立的模型能够考虑实际机动车中加油管的空间扭曲布局,能够考虑液态汽油和油气之间存在的传热和传质问题,同时将计算过程中的时间步长选取得更为细密一些,那么得出的数值模拟结果将更加接近实际.当然,此时的计算规模和计算时间会急剧增加,对计算机硬件配置也提出了更高要求.

3.2 加油管内汽油回流现象分析

众所周知,油箱内汽油的回流会导致加油过程中发生“跳枪”现象.究其原因在于加油枪喷嘴段处有 1 个“跳枪”感应孔,如果加油管内出现汽油回流,感应孔接触到液体后,就会认定油箱已经被加满,从而停止正常的加油过程.显然,如果能够借助 CFD 数值模拟手段捕捉油箱内汽油的回流,进而观察到汽油在加油管上部油帽段与加油枪喷嘴之间环形空间内的回流现象,就能够从加油管的结构设计

和空间布局等方面予以改进,并最终避免“跳枪”现象的发生,甚至有可能突破对加油枪正常工作时最大加油流量的限制。

当加油速度为 $4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应加油枪流量为 $75.36 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$),加油管油帽段上部管口连通大气(相对压力为 0)、回气管出口的相对压力为 30 Pa,实验模拟出加油过程中汽油在油箱内的液面波动情况。图 5 为第 23 s 加油过程处于中前期时油箱内汽油的体积分数云图;图 6 为第 41 s 油箱内出现汽油回溅时刻汽油的体积分数云图;图 7 为加油过程进行到第 42 s 时,加油管上部油帽段与加油枪喷嘴之间环形空间内已经出现了汽油回流现象;图 8 为加油过程进行到第 44 s 时,加油管上部油帽段与加油枪喷嘴之间环形空间内已经基本充满了汽油。从中可以看出,汽油液面在油箱内的波动会导致汽油在接触到油箱壁面后出现回溅;由于油箱上的回气管与壁面距离较近,回溅的汽油会进入回气管,阻碍油气的排出,油箱气相空间内的压力大幅升高,使得汽油在加油管内回流。只有待回气管内液体排出,油箱内气相空间内的压力下降到正常后,回流现象才会结束。上述实验现象与文献[3]中所描述的“跳枪”发生的原理基本相同,再次证明了数值模拟结果的正确性。

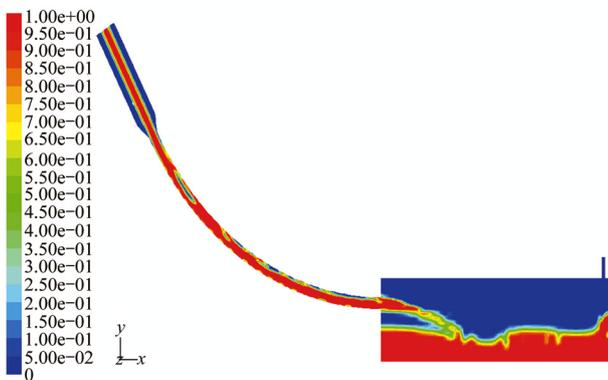


图 5 加油过程中油箱内汽油液面波动情况 ($t = 23 \text{ s}$)

Fig. 5 Gasoline surface wavy condition in tank during refueling process ($t = 23 \text{ s}$)

对基于加油站第二阶段油气回收的加油油气排放污染控制技术而言,目前大多基于真空辅助式 (assist type) 技术方案,在采用油气回收型加油枪加注液态汽油的同时,以一定的真空度抽吸经过回气管导回至加油管油帽段与加油枪喷嘴之间环形空间内的油气。由于加油管油帽段管口处为负压,因此当加油速度较大时更容易出现加油管内汽油的回流甚至过早跳枪现象,必须更加严格控制加油枪的最大

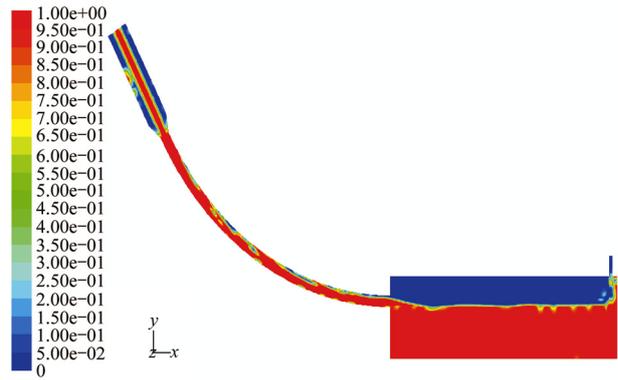


图 6 加油过程中油箱内出现汽油回溅现象 ($t = 41 \text{ s}$)

Fig. 6 Phenomenon of gasoline spill-back in tank during refueling process ($t = 41 \text{ s}$)

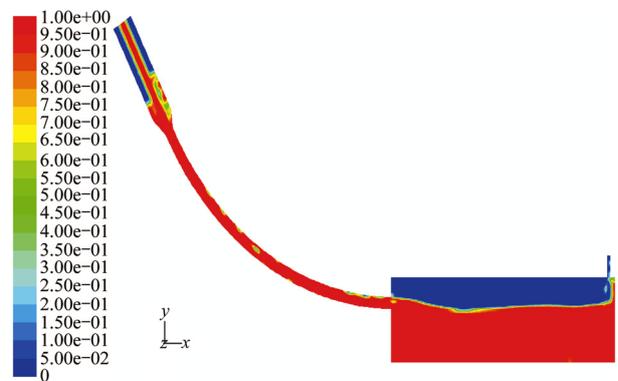


图 7 加油管油帽段环形空间出现汽油回流现象 ($t = 42 \text{ s}$)

Fig. 7 Phenomenon of gasoline flow-back in cap section of filler pipe during refueling process ($t = 42 \text{ s}$)

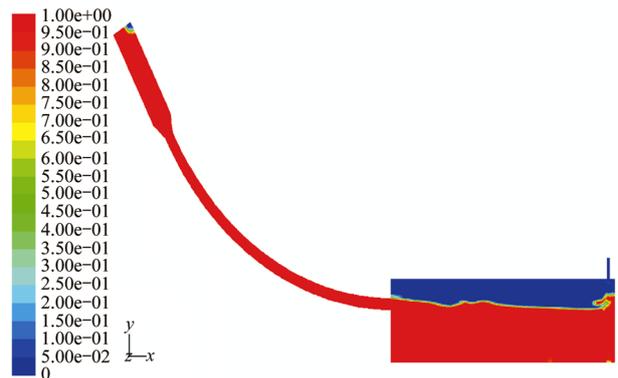


图 8 加油管油帽段环形空间充满汽油 ($t = 44 \text{ s}$)

Fig. 8 Cap section of filler pipe filled with gasoline during refueling process ($t = 44 \text{ s}$)

加油流量。

4 展望

本研究为国内自主开展机动车加油及其油气排

放污染控制技术和设备方面的研究开发奠定了一定基础. 如果进一步提高计算机硬件能力, 考虑实际机动车中加油管的弯曲空间扭曲布局模式, 在湍流流态表现最为强烈的加油管区域施加边界层, 同时考虑液态汽油和油气之间存在的传热和传质问题, 相关的数值模拟结果将更加接近实际、更能在计算机上再现加油过程中的气液两相流动特性, 所建立的分析方法也完全可以推广应用于各类挥发性有机液体在各种装卸过程中存在的 VOCs 排放污染控制问题^[18].

5 结论

(1) 基于 Fluent 软件中所提供的气液两相流模型和湍流模型, 通过数值模拟手段可以有效获取机动车加油过程中油箱内液面的波动情况、油箱内气相空间压力的变化情况. 鉴于油箱内气相空间的压力值对加油站第二阶段油气回收技术中油气回收型加油枪的选型、对车载加油油气回收 (ORVR) 系统中“油箱→活性罐”油气管线的设计和布局至关重要, 因此 CFD 数值模拟技术理应在研究机动车加油油气排放污染控制中扮演重要角色.

(2) 加油枪的加油流量越大, 加油管管口的速度就越高, 油箱内气相空间的静压总体上也逐渐增大; 同时油箱内气相空间的静压可以划分为 3 个较为明显的阶段. 当加油速度较大时, 往往会因汽油在油箱内回溅堵塞回气管, 引起汽油在加油管油帽段的回流, 从而使得加油枪过早跳枪、终止加油过程, 这验证了当前对加油枪最大加油流量进行限定的合理性.

参考文献:

- [1] 陈家庆, 朱玲. 油气回收与排放控制技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.
- [2] Stoneman S. On the design of automotive fuel filler pipes[J]. *Automotive Engineer*, 1997, **22**(1): 32-36.
- [3] Sinha N, Thompson R, Harrigan M. Computational Simulation of fuel shut-off during refueling[J]. SAE Paper Number: 981377.
- [4] Banerjee R, Isaac K M, Oliver L, *et al.* A numerical study of automotive gas tank filler pipe two phase flow[J]. SAE Paper Number: 2001-01-0732.
- [5] Banerjee R, Isaac K M, Oliver L, *et al.* Features of automotive gas tank filler pipe two-phase flow: experiments and computational fluid dynamics simulations[J]. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, **124**(2): 412-420.
- [6] Banerjee R, Bai X, Pugh D, *et al.* CFD simulations of critical components in fuel filling systems[J]. SAE Paper Number: 2002-01-0573.
- [7] Banerjee R, Klein D L. Fuel fill system with fuel vapor recirculation[P]. United States Patent No. 7243678 B2, July 17, 2007.
- [8] Banerjee R, Isaac K M. An algorithm to determine the mass transfer rate from a pure liquid surface using the volume of fluid multiphase model[J]. *International Journal of Engine Research*, 2004, **5**(1): 23-37.
- [9] Banerjee R, Isaac K M. A Study to determine vapor generation from the surface of gasoline flowing in an inclined channel using a continuous thermodynamics approach [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 2006, **50**(8): 705-729.
- [10] Zhao A G, Mastroianni M, Savoni L, *et al.* Automotive fuel tank filling: preliminary CFD investigation [A]. In: *Proceedings of 9th annual conference of the CFD society of Canada at Waterloo, Ontario*[C]. May 27-29, 2000.
- [11] Fackrell S A, Mastroianni M, Savoni G, *et al.* Modeling of automotive fuel tanking filling [A]. *Proceedings of the 20th southeastern conference on theoretical and applied mechanics* [C]. April 16-18, 2000.
- [12] Zhao A G, Mastroianni M, Savoni L, *et al.* Automotive fuel tank filling: a hybrid numerical study [A]. In: *10th annual conference of the CFD society of Canada*[C]. 2002.
- [13] Fackrell S, Mastroianni M, Rankin G W, *et al.* Model of the filling of an automotive fuel tank [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2003, **38**(5-6): 519-532.
- [14] Aus der Wiesche S. Simulation of automotive fuel tank filler pipe flows[J]. *Forschung in Ingenieurwesen*, 2004, **68**(3): 139-149.
- [15] Ding P, Buijk A J, Fackrell S A, *et al.* Simulation of fuel tank filling using a multi-material Euler solver with multiple adaptive domains[J]. SAE Paper Number: 2005-01-1915.
- [16] Hassanvand A, Hashemabadi S H, Bayat M. Evaluation of gasoline evaporation during the tank splash loading by CFD techniques[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010, **37**(7): 907-913.
- [17] 朱红均, 林元华, 谢龙汉. Fluent 12 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [18] 游秋雯, 葛蕴珊, 尤可为, 等. 汽油车非常规污染物排放特性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 335-341.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping(3461)
Study on Control and Management for Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) in China	
.....	WANG Hai-lin, ZHANG Guo-ning, NEI Lei, <i>et al.</i> (3462)
Countermeasures for Priority Control of Toxic VOC Pollution	CHEN Ying, LI Li-na, YANG Chang-qing, <i>et al.</i> (3469)
Evaluation of Treatment Technology of Volatile Organic Compounds for Fixed Industrial Resources	LUAN Zhi-qiang, HAO Zheng-ping, WANG Xi-qin(3476)
Emission Control Way of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, WEI Yu-xia, <i>et al.</i> (3487)
Regulations and Policies for Control of Volatile Organic Compounds and the Emission Standards in Taiwan	
.....	LUAN Zhi-qiang, WANG Xi-qin, ZHENG Ya-nan, <i>et al.</i> (3491)
Study on Foreign Regulations and Standards of Stationary Sources VOCs Emission Control	ZHANG Guo-ning, HAO Zheng-ping, JIANG Mei, <i>et al.</i> (3501)
VOCs Tax Policy on China's Economy Development	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, WANG Hai-lin, <i>et al.</i> (3509)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Biofuel Combustion in China	LI Xing-hua, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming(3515)
Spatial and Temporal Variations of Ambient Carbonyl Compounds in Beijing and Its Surrounding Areas	
.....	WANG Qin, SHAO Min, WEI Qiang, <i>et al.</i> (3522)
Analysis on Status Pollution and Variation of BTEX in Beijing	SUN Jie, WANG Yue-si, WU Fang-kun(3531)
Characteristics of Ambient VOCs and Their Role in O ₃ Formation; A Typical Air Pollution Episode in Shanghai Urban Area	
.....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, GAO Song, <i>et al.</i> (3537)
Observation and Study on Atmospheric VOCs in Changsha City	LIU Quan, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (3543)
Characteristics of Volatile Organic Compounds During Haze Episode in Foshan City	
.....	MA Yong-liang, TAN Ji-hua, HE Ke-bin, <i>et al.</i> (3549)
Investigation on Emission Properties of Biogenic VOCs of Landscape Plants in Shenzhen	
.....	HUANG Ai-kui, LI Nan, Alex Guenther, <i>et al.</i> (3555)
Pollution and Source of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area in Beijing	
.....	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3560)
Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3566)
Source Emission Characteristics of Malodorous Volatile Organic Carbonyls from a Municipal Sewage Treatment Plant	
.....	ZHOU Mi, WANG Bo-guang, ZHAO De-jun, <i>et al.</i> (3571)
Source Emission Characteristics and Impact Factors of Volatile Halogenated Organic Compounds from Wastewater Treatment Plant	
.....	HE Jie, WANG Bo-guang, LIU Shu-le, <i>et al.</i> (3577)
Quantification Assessment of the Relationship Between Chemical and Olfactory Concentrations for Malodorous Volatile Organic Compounds	
.....	LIU Shu-le, WANG Bo-guang, HE Jie, <i>et al.</i> (3582)
Study on Transformation Mechanism of SOA from Biogenic VOC Under UV-B Condition	LI Ying-ying, LI Xiang, CHEN Jian-min(3588)
Kinetic Studies on the Gas-phase Reactions of NO ₃ Radicals with Three Cyclic Ethers	GAI Yan-bo, GE Mao-fa, WANG Wei-gang(3593)
Uptake of 3-methyl-3-buten-1-ol into Aqueous Mixed Solution of Sulfuric Acid and Hydrogen Peroxide	WANG Tian-he, LIU Ze, GE Mao-fa, <i>et al.</i> (3599)
An Overview on Analytical Method of Volatile Organic Compounds in Water	XU Xiu-yan, ZHU Qing, TAN Li, <i>et al.</i> (3606)
Determination of Low Concentration VOCs in Air by a Newly Designed Needle Trap Device	LI Xiang, CHEN Jian-min (3613)
Research on Determination of Total Volatile Organic Sulfur Compounds in the Atmosphere	
.....	WANG Yan-jun, ZHENG Xiao-ling, HE Ying, <i>et al.</i> (3617)
Automatic Continuous Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Ion Mobility Spectrometer Array	
.....	ZHOU Qing-hua, CANG Huai-wen, JU Bang-yu, <i>et al.</i> (3623)
Development of a Membrane Inlet-Single Photon Ionization/Chemical Ionization-Mass Spectrometer for Online Analysis of VOCs in Water	
.....	HUA Lei, WU Qing-hao, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (3628)
Detection of TVOC and Odor in Industrial Park Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, YE Zhao-xia, <i>et al.</i> (3635)
Applicability of an Electronic Nose for Detection of Volatile Chlorinated Hydrocarbons in Soil	
.....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (3641)
Test and Analysis of Acrylic Acid Ester in Industry Pipelines	WU Bin, ZHANG Hong-yan, LU Lin-guang(3647)
Preparation of Honeycombed Monolithic Zeolite and Hydrophobic Modification with SiCl ₄	WANG Xi-qin, LI Kai, WEI Bing, <i>et al.</i> (3653)
Synthesis of Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieve and Their Application in Catalytic Oxidation of Benzene	LI Dong-yan, LIU Hai-di, CHEN Yun-fa(3657)
Adsorption-Desorption Performance of Honeycomb-Shaped Activated Carbon	HAN Zhong-juan, LUO Fu-kun, LI Ze-qing(3662)
Process of Adsorption and Separating Recovery Solvents from Vapor Mixture Directly	WANG Hong-yu, QIANG Ning, HU Xia(3667)
BTF Performance Treating a Chlorobenzene-Contaminated Gas Stream	ZHOU Qing-wei, ZHU Run-ye, HU Jun, <i>et al.</i> (3673)
Purification of Complicated Industrial Organic Waste Gas by Complex Absorption	CHEN Ding-sheng, CEN Chao-ping, TANG Zhi-xiong, <i>et al.</i> (3680)
Analysis of the Treatment Technology Pathway of VOCs Released from Oven	LI Ze-qing, LUO Fu-kun(3685)
Fabrication of Co ₃ O ₄ Nanorods and Its Catalytic Oxidation of Gaseous Toluene	YAN Qing-yun, LI Xin-yong, ZHAO Qi-dong, <i>et al.</i> (3689)
Preparation, Characterization of Si Doped TiO ₂ Nanotubes and Its Application in Photocatalytic Oxidation of VOCs	
.....	ZOU Xue-jun, LI Xin-yong, QU Zhen-ping, <i>et al.</i> (3694)
Research of the Natural Attenuation Capacity of Oil Pollutants Based on <i>in-situ</i> Experiment	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (3699)
Experimental Research of Oil Vapor Pollution Control for Gas Station with Membrane Separation Technology	
.....	ZHU Ling, CHEN Jia-qing, ZHANG Bao-sheng, <i>et al.</i> (3704)
CFD Numerical Simulation onto the Gas-Liquid Two-Phase Flow Behavior During Vehicle Refueling Process	
.....	CHEN Jia-qing, ZHANG Nan, WANG Jin-hui, <i>et al.</i> (3710)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2011年12月15日 32卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Founded in 1976)

Vol. 32 No. 12 Dec. 15, 2011

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行