

DOI: 10.7652/xjtub201912023

密闭空间内有机化学品挥发动力学在线检测系统

费瑞银¹, 翁文庆², 喻奇³, 孙江枫², 姬亚军³, 延卫³, 杨鸿辉³(1. 大亚湾核电运营管理有限公司中长期改造项目, 518124, 广东深圳; 2. 中广核研究院有限公司
系统工程与改造中心, 518000, 广东深圳; 3. 西安交通大学环境科学与工程系, 710049, 西安)

摘要: 针对核电安全壳检修实验期间难以动态定量测定多种挥发性有机化学品、进而难以评估其火灾风险的问题, 构建了一种密闭空间内有机化学品挥发动力学在线检测系统。采用密封腔体为化学品挥发腔、以气相色谱仪为气相中有机化学品浓度的在线检测仪、以气体循环泵为系统内气体循环的驱动单元、以质量流量计为气体循环流速的精确控制器来提供化学品挥发所需的气相对流条件; 通过在线的自动六通阀采集密封腔体内的气体样品并实现对气相色谱仪进行自动进样, 实现了气相中有机物浓度的在线定量测定; 整个样品挥发和循环管路系统置于恒温箱内, 可实现温度和气压的可调控制。测定了正丁醇和乙苯的挥发动力学特性及平衡蒸气压, 并将平衡蒸气压与理论值进行对比, 结果表明: 在 20~30℃ 的范围内, 气相中的正丁醇和乙苯挥发曲线遵循准一级挥发动力学方程, 且所测得的平衡蒸气压与理论值相近。该测试系统稳定性好、测试结果准确度高, 利用该系统测定的化学品挥发速率值可用于计算评估核电安全壳内挥发性化学品在打压期间的累积情况, 进而评估其火灾风险。

关键词: 挥发性有机化学品; 挥发动力学; 核电安全壳检修实验; 在线检测系统

中图分类号: O643.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0177-06

An Online System for Determining the Volatilization Kinetics of Organic Compounds in an Airtight Chamber

FEI Ruiyin¹, WENG Wenqing², YU Qi³, SUN Jiangfeng²,
JI Yajun³, YAN Wei³, YANG Honghui³

(1. Department of Medium and Long Term Reconstruction Project, Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China; 2. System Engineering and Renovation Center, Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An online system for determining the volatilization kinetics of volatile organic compounds (VOCs) is constructed to solve the problem that it is difficult to dynamically determine the concentrations of VOCs in the atmosphere of nuclear power containment and to evaluate the consequent fire disaster risk during pressure test. A seal cavity is used as the volatilization container, and a gas chromatograph is used to determine the gaseous concentrations of chemicals in the atmosphere. A gas pump is used to circulate the gas with the gas flow rate controlled by a mass flow controller to offer convection condition for chemical volatilization. The gas chromatograph samples gas via a six-way automatic injection valve to determine the

收稿日期: 2019-05-30。 作者简介: 费瑞银(1963—), 男, 高级工程师; 杨鸿辉(通信作者), 男, 博士, 副教授, 博士生导师。
基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2018SF-372)。

网络出版时间: 2019-10-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191012.1452.004.html>

concentrations of VOCs online. Components of the system except for gas chromatograph are placed in an incubator for temperature and pressure control. The stability and accuracy of the proposed system are tested based on the volatilization curves and equilibrium vapor pressure values using n-butanol and ethylbenzene as the model chemicals. The results show that the volatilization curves of n-butanol and ethylbenzene fit pseudo-first-order kinetics in the range of 20 °C-30 °C, and the equilibrium concentrations are close to the theoretical data. These results show that the online system is stable and accurate, and its resulting volatilization rates could be used to evaluate the VOCs accumulation and fire disaster risk.

Keywords: volatile organic chemical; volatilization kinetics; pressure test of nuclear power containment; online testing system

挥发性有机物(VOCs)是除颗粒物外分布最为广泛的一大类空气污染物,对人体危害大且难以消除^[1-2]。近年来,中国几乎 2/3 的国土都爆发了持久的空气颗粒物严重超标事件,其中 VOCs 是促进颗粒物形成的重要因素之一^[3]。餐饮油烟、汽车尾气、化工厂排放以及建材家居等都是 VOCs 污染的主要来源^[4-5]。VOCs 的分布十分广泛,不同于颗粒物,室内的污染源也是非常重要的一个方面^[6-7]。随着生活水平日益提高,人们对自身生活环境更为关注,对室内 VOCs 污染情况及控制研究更为关注^[8-9]。除此之外,在工业生产中,特定条件下有机化学品的挥发是环境中 VOCs 的重要来源,在有限空间内积累可能产生安全隐患,例如人员中毒、火灾等^[10],所以对各类有机化学品的挥发动力学研究就显得尤为重要。

目前,国内外对于石油化工、有机化工、工业涂装、家具和包装印刷等行业 VOCs 污染的研究相对较多,且这些研究主要是以大气为环境条件进行的污染排放研究^[11]。工业上的主要研究方法为在恒温、恒压的大气环境条件下,通过测定溶液中 VOCs 浓度的变化来监测其释放速率。研究室内环境污染时主要通过测定室内大气中 VOCs 浓度分布及变化情况来推测 VOCs 在环境中的挥发情况^[12],但是大部分的研究集中于建材中甲醛及相关挥发性有机物的挥发特性研究^[13],对密闭系统中 VOCs 的挥发动力学研究较少。常见化学品在环境中的挥发积累可能导致较为严重的环境污染及在特定情况下的潜在火灾风险问题,因此测定特定环境条件下化学品的挥发动力学数据是评估相关化学品对特定工作环境影响的重要判定依据。

核电厂安全壳是核电机组运行的重要安全屏障,壳体的密封性能是安全壳的核辐射防护性能的重要参数,因此核电厂对安全壳的密封性能需进行

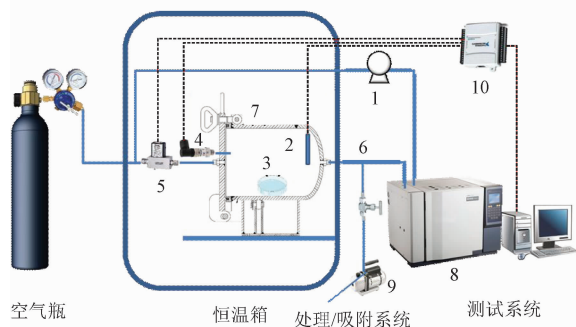
定期打压检查^[14],以确保其安全运行。在打压测试过程中,安全壳内设施检修所用的有机化学品随着打压时间的延长而在安全壳内聚集,可能造成火灾安全隐患。为此,需要对相关化学品在安全壳内的挥发特性及挥发动力学进行研究以获得化学品的挥发速率方程,为计算密闭空间内的有机化学品浓度提供基础数据。

为了测试化学品的挥发动力学特性,设计搭建了一套密闭系统内有机化学品气相浓度在线测试系统,以化学品中常见的溶剂乙苯和正丁醇为例,建立了有机物挥发性能的测定方法,该系统也能用于测定相关建筑材料中 VOCs 的释放动力学数据。

1 有机化学品挥发动力学测试系统与方法

1.1 测试系统

1.1.1 测试系统的构建 有机物挥发特性与动力学测试系统如图 1 所示,主要由空气瓶、密封腔和测试系统通过直径为 3 mm 的不锈钢管连接而成,其中密封腔放置于恒温箱中,便于设定样品的挥发温度,使样品在恒定温度下挥发。通过设定气体循环泵与质量流量计控制气体循环流量,使系统中的气体在设定流量下循环。系统中连接有气压传感器,可实时测定并记录密封系统的压强,当整个系统在恒定温度下充压至 0.5 MPa,并在 24 h 内气压下降幅度小于 5 kPa 时,气压泄漏对系统测试的结果影响将小于 1%,这是设定的系统密封性良好的判定条件。由于本系统使用金属卡套对管路进行连接,腔体门法兰采用氟橡胶 O 型圈密封,易于达到良好的密封效果。通过气动六通阀定时对气相色谱质谱联用仪进行自动进样,实时检测系统中有机物种类与浓度。整个系统可研究温度、气体循环速度、气压对有机化学品挥发特性及动力学的影响。



1:气体泵;2:温度传感器;3:样品皿;4:压力传感器;
5:质量流量计;6:保温管;7:密封腔;8:气相色谱
质谱联用仪;9:真空泵;10:数据采集卡

图1 有机物挥发性能测试系统

1.1.2 有机化学品挥发动力学测试系统体积的标定 采用 N_2 对系统体积进行标定。通过 N_2 质量流量计对通入系统内的气体体积进行累积,同时,通过气压传感器测定气体气压数值,并利用理想气体状态方程测算出系统的体积 V 为 8.93 L。

1.2 样品测试方法

气态有机物的浓度采用配备 FID 检测器和 HP-5MS 毛细管柱的安捷伦 7890B 气相色谱仪进行测定。进样方式为阀进样,阀的定量环体积为 250 μL 。测试条件是进样口温度为 200 $^{\circ}\text{C}$;分流比为 50:1;检测器温度为 250 $^{\circ}\text{C}$;载气为氦气,初始温度为 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,然后以 5 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 速率升至 65 $^{\circ}\text{C}$,以 35 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 150 $^{\circ}\text{C}$,再以 20 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 速率降至 40 $^{\circ}\text{C}$,运行 14.57 min,因此加上从测试结束到下一次进样需要的 0.5 min,每次测试共计 30 min。

1.3 有机化学品挥发动力学测试

将温控系统设定到测试温度点;采用直径为 65 mm、表面积为 33.17 cm^2 的样品皿,加入约 30 g 正丁醇或乙苯后放置于密封腔内,开启气体泵,流速为 500 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,每隔 30~60 min 通过气相色谱的气动六通阀自动进样分析。对正丁醇测试的挥发温度分别为 20、25 和 30 $^{\circ}\text{C}$,对乙苯测试的挥发温度分别为 20、25.9 和 30 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.4 测试数据分析方法

通过配制不同浓度的正丁醇和乙苯标准液进行测试,进样量为 1 μL ,分流比为 50:1,其他色谱条件与 1.2 节所述相同。通过测试,可得正丁醇和乙苯的质量浓度与峰面积的关系式分别如下

$$y = 2.05 \times 10^6 x \quad (1)$$

$$y = 2.87 \times 10^6 x \quad (2)$$

式中: y 为峰面积; x 为样品的质量浓度。

在常温常压附近,正丁醇和乙苯的饱和蒸气压比较小,根据理想气体状态方程 $PV=nRT$,可推导出正丁醇和乙苯的蒸气压与峰面积之间关系分别如下

$$P_i = 2.64 \times 10^{-8} y(T + 273.15)R \quad (3)$$

$$P_i = 1.37 \times 10^{-8} y(T + 273.15)R \quad (4)$$

式中: P_i 为测试点对应的蒸气压, t 为 VOCs 样品放入容器时间; R 为气体常数, $R=8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为温度。

通过将所得样品峰面积代入式(1)(2)中,可计算得到相应进样的正丁醇和乙苯的进样量,并根据已知的进样体积(250 μL)计算得到气体进样中正丁醇和乙苯的物质的量浓度。

1.5 挥发动力学模型

C_m -History 方法被成功地应用于快速测定密闭空间建筑材料内挥发释放的化学品的浓度^[15-17]。该方法涉及的模型可应用于拟合有机化学品的挥发动力学曲线。对于放置在密闭腔体中的有机化学品的挥发,由质量守恒定律可得

$$V \frac{dC(t)}{dt} = AE \quad (5)$$

$$E = h_m [C_{as} - C(t)] \quad (6)$$

$$C_{ms} = KC_{as} \quad (7)$$

式中: V 为密闭小室体积; $C(t)$ 为瞬时 VOCs 的体积浓度; A 为 VOCs 样品挥发表面积; E 为单位面积 VOCs 瞬时挥发量; h_m 为对流传质系数; C_{as} 为 VOCs 样品表面的空气中 VOCs 的体积浓度; C_{ms} 为 VOCs 样品表面处 VOCs 的体积浓度; K 为分离因数。由上述公式可解得 $C(t)$ 的表达式如下

$$C(t) = \left(C_0 - \frac{C_{ms}}{K} \right) \exp \left(-\frac{h_m A}{V} t \right) + \frac{C_{ms}}{K} = a \exp \left(-\frac{t}{b} \right) + c \quad (8)$$

式中: C_0 为初始 VOCs 的体积浓度; $a = C_0 - \frac{C_{ms}}{K}$,
 $b = \frac{h_m A}{V}$, $c = \frac{C_{ms}}{K}$ 。按 $t=0$ 时 $C_0=0$,式(8)简化为^[16]

$$C(t) = -a \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{b} \right) \right) \quad (9)$$

通过测定密封腔体内 VOCs 的体积浓度随时间变化的数据,就能拟合出系数 a 、 b 和 c ,拟合得到挥发曲线方程、分离因数 K 和对流传质系数 h_m 。

乙苯的理论饱和蒸气压根据 Antoine 方程计算得到。Antoine 方程是计算气体饱和蒸气压应用最广

泛的基本方程^[18-19],其计算结果也较为准确,如下式

$$\lg P = A - B/(T + C) \tag{10}$$

式中: P 为理论饱和蒸气压; A 、 B 及 C 为气体常数。其中乙苯的气体常数 A 为 6.957 19, B 为1 424. 255, C 为 213. 206。

2 结果与讨论

2.1 测试系统结构及功能

系统中密封腔(样品挥发腔)采用便于放置和取出样品的快开门结构。腔体由体积为 8.93 L 的抛光 SUS304 不锈钢制成。密封腔分别由位于门侧和另一端中央位置的一个 G1/8 卡套螺纹接头与测试系统通过 3 mm 不锈钢气路管进行连接并形成回型气路。压力传感器通过另一个卡套螺纹接头与腔体相连。温度传感器通过密封插头接入密封腔体内。压力传感器及温度传感器信号由数据采集卡采集后输入计算机中进行采集。气路管中间接入气体循环泵驱动气体循环,使得系统中的各部分气体组成均匀,减小挥发性有机物浓度测量的系统误差。系统中同时接入质量流量计,通过质量流量计控制气体循环泵的流速,使得测试的气流条件一致。

2.2 正丁醇的挥发动力学曲线

图 2 给出了温控系统设定为 20、25 和 30 ℃时,分别测试得到的气相中正丁醇浓度随挥发时间的变化情况。通过拟合,分别获得了 3 个温度条件下气相中正丁醇浓度随挥发时间变化的挥发速率方程,见表 1。从图 2 拟合曲线可知,拟合曲线与实验数据具有较高的吻合度,其线性相关系数 R^2 值达到 0.96~0.98,该结果的线性相关度高于 Xiong 等的研究结果 0.92~0.97^[16,20]。

根据式(7)(8)可计算得到正丁醇的对流传质系数。对流传质系数主要与腔体内气流速度相关,本文中 3 个温度条件下的气流速度均为 500 mL·min⁻¹,所得的对流传质系数相近。对正丁醇的挥发方程进行求导,还可获得其挥发速率方程。25 ℃时正丁醇的理论饱和蒸气压为 820.0 Pa,而通过本文实验测得的数据拟合所得的饱和蒸气压为 818.0 Pa,与理论值相近,说明本文所开发的测试方法具有

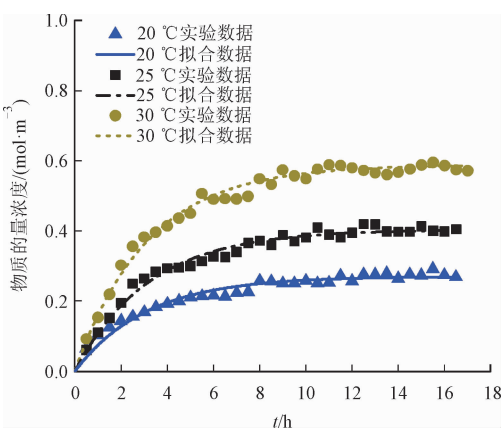


图 2 不同温度下正丁醇的物质的量浓度随挥发时间的变化

较高的精确度与可靠性。此外,由于正丁醇的 Antoine 公式仅适用于 75~117 ℃时的饱和蒸气压计算,因此尚无法对 20 和 30 ℃时的正丁醇理论饱和蒸气压数据与实验值进行对比。

2.3 乙苯的挥发动力学曲线

乙苯是二甲苯的同分异构体及同系物,是常用溶剂,也是核电安全壳中常见的挥发性有机物,对其进行定量测定对评估安全壳内的火灾风险具有重要的意义。图 3 给出了乙苯分别在 20 ℃、25.9 ℃和 30 ℃时物质的量浓度与挥发时间的变化情况。从图 3 可以看出,基于测试数据拟合的挥发动力学曲线与测试数据具有较好的拟合度,其相关系数 R^2 值达到 0.95~0.98。通过挥发曲线方程,可求得扩散系数和平衡蒸气压,见表 2。根据理想气态方程,可以求得 20 ℃、25.9 ℃和 30 ℃时乙苯挥发平衡后所对应的蒸气压分别为 911.5、1 292.9 和1 592.9 Pa。根据 Antoine 方程及乙苯的 Antoine 方程常数 A 、 B 、 C ,可以计算获得其理论饱和蒸气压分别为 941、1 330 和 1 678 Pa,分别比测试值高 29.5、37 和 85 Pa。测试结果与理论计算数值接近,最大偏差仅为 5%。考虑到测试系统所用管路较多,且腔体表面对被测试剂分子存在一定的吸附作用,故测试结果较理论值偏低。在实际工程应用中,安全壳内吸附面众多,挥发性有机物与安全壳内固体表面存在吸附平衡,因此,与理论饱和蒸气压相比,本文测试结果与实际结果更为接近,具有较高的参考价值。

表 1 不同温度条件下正丁醇挥发动力学参数

温度/℃	$a/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	b/h^{-1}	$h_m/(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	平衡蒸气压/Pa	理论饱和蒸气压/Pa	挥发速率方程
20	0.221	3.106	8.362	538.6		$y=0.193\text{exp}(-0.322t)$
25	0.330	3.205	8.628	818.0	820.0	$y=0.279\text{exp}(-0.312t)$
30	0.478	3.067	8.257	1 204.7		$y=0.423\text{exp}(-0.326t)$

表 2 不同温度条件下乙苯的挥发动力学参数

温度/℃	$a/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	b/h^{-1}	$h_{\text{m}}/(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$	平衡蒸气压/Pa	理论饱和蒸气压/Pa	挥发速率方程
20.0	0.374	3.401	9.156	911.5	941	$y=0.298\exp(-0.294t)$
25.9	0.520	3.195	8.602	1 292.9	1 330	$y=0.442\exp(-0.313t)$
30.0	0.632	2.959	7.966	1 592.9	1 678	$y=0.580\exp(-0.338t)$

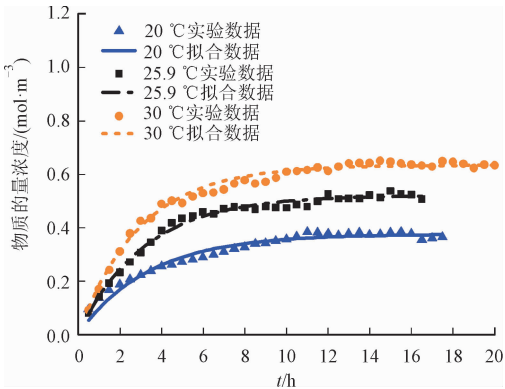


图 3 不同温度下乙苯的物质的量浓度随挥发时间的变化曲线

该系统还可以通过改变气体流速和气压,从而模拟并测定不同对流和气压条件下的挥发性化学品的挥发动力学参数,包括对流扩散系数、动力学挥发方程与挥发速率方程,并根据挥发速率方程计算获得特定化学品在不同气相初始浓度条件下的挥发速率,进而根据该数据推算在相应条件下特定空间的化学品的挥发速率。对于混合化学品,也可以使用本系统进行测定,获得各组分的挥发特性曲线,并通过计算获得相应的挥发速率,为密闭空间内气相中挥发性有机物的累积情况的预测提供基础性的挥发动力学数据。

3 结 论

本文构建的化学品挥发动力学在线测试系统实现了在温度、气体流速、气压可控条件下,通过在线气相色谱测定获得气相中挥发性有机物的浓度,测定结果较为准确可靠,测试便捷,可获得待测样品的对流传质系数、挥发动力学方程及挥发速率方程等数据。

通过调查,核电安全壳检修过程中所用挥发性的化学品主要为有机溶剂,以乙苯、甲苯、二甲苯、丁醇、乙醇等为主,因此本文选择丁醇作为含氧类有机溶剂的代表,乙苯为烃类溶剂的代表。通过测定这两种化学品的挥发动力学,可以检验本系统的稳定性与可行性,而对于整体安全壳内其他化学品的分析测试及其交互影响,还需进行进一步的测试与分析。

在安全壳等密闭空间化学品的测试过程中,尚需测定混合化学品的挥发动力学曲线。可使用质谱检测器对相应样品组分进行定性和定量测定,获得各组分的挥发动力学曲线,进而可计算获得空间内挥发性有机物浓度随时间的变化关系,为评估化学品挥发的潜在火灾风险,并据此建立规范的安全壳实验期间的有机化学品使用规范提供基础数据。

参考文献:

[1] HUI Lirong, LIU Xingang, TAN Qinwen, et al. VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 2624-2639.

[2] HUI Lirong, LIU Xingang, TAN Qinwen, et al. Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China [J]. Atmospheric Environment, 2018, 192: 55-71.

[3] LING Yan, WANG Yanyu, DUAN Junyan, et al. Long-term aerosol size distributions and the potential role of volatile organic compounds (VOCs) in new particle formation events in Shanghai [J]. Atmospheric Environment, 2019, 202: 345-356.

[4] 曾海东, 张寅平, 王庆苑, 等. 用密闭小室测定建材 VOC 散发特性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 778-781.

ZENG Haidong, ZHANG Yinping, WANG Qingyuan, et al. Measuring VOC emission characteristics of building materials in an airtight chamber [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2004, 44(6): 778-781.

[5] BARI M A, KINDZIERSKI W B. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: sources and screening health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 627-640.

[6] SONG S K, SHON Z H, KANG Y H, et al. Source apportionment of VOCs and their impact on air quality and health in the megacity of Seoul [J]. Environmental Pollution, 2019, 247: 763-774.

[7] HICKLIN W, FARRUGIA P S, SINAGRA E. Inves-

- tigations of VOCs in and around buildings close to service stations [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 172: 93-101.
- [8] RAYSONI A U, STOCK T H, SARNAT J A, et al. Evaluation of VOC concentrations in indoor and outdoor microenvironments at near-road schools [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 681-693.
- [9] YANG Tao, ZHANG Pianpian, XU Baoping, et al. Predicting VOC emissions from materials in vehicle cabins: determination of the key parameters and the influence of environmental factors [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 110: 671-679.
- [10] OSMONT A, CHETEHOUNA K, CHAUMEIX N, et al. Thermodynamic data of known volatile organic compounds (VOCs) in *Rosmarinus officinalis*: implications for forest fire modeling [J]. *Computational and Theoretical Chemistry*, 2015, 1073: 27-33.
- [11] 余妹洁, 李明, 甘慧慧. 珠江三角洲地区家具行业 VOCs 控制技术的评估与选择 [J]. *广东化工*, 2016, 43(13): 196-198.
- YU Shujie, LI Ming, GAN Huihui. Evaluation and selection of VOCs treatment technologies in the furniture manufacturing operations in the Pearl River Delta [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(13): 196-198.
- [12] 吴亮东, 冷文军, 赵俊涛, 等. 密闭空间非金属材料 VOC 散发特性研究进展 [J]. *洁净与空调技术*, 2010, 43(13): 8-12.
- WU Liangdong, LENG Wenjun, ZHAO Juntao, et al. Literature review of nonmetallic materials VOC emission in airtight container [J]. *Contamination Control Air-Conditioning Technology*, 2010, 43(13): 8-12.
- [13] ZHANG Yan, JIANG Jinxia, BAI Yu, et al. A fractional mass transfer model for simulating VOC emissions from porous, dry building material [J]. *Building and Environment*, 2019, 152: 182-191.
- [14] 赵健, 李少纯, 张波. 安全壳火灾监测系统研究与应用 [J]. *核标准计量与质量*, 2017(1): 47-50.
- [15] CAO Jianping, WESCHLER C J, LUO Jiajun, et al. C_m -history method, a novel approach to simultaneously measure source and sink parameters important for estimating indoor exposures to phthalates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 825-834.
- [16] XIONG Jianyin, CAO Jianping, ZHANG Yinping. Early stage C-history method: rapid and accurate determination of the key SVOC emission or sorption parameters of indoor materials [J]. *Building and Environment*, 2016, 95: 314-321.
- [17] ZHANG Xu, CAO Jianping, WEI Jingya, et al. Improved C-history method for rapidly and accurately measuring the characteristic parameters of formaldehyde/VOCs emitted from building materials [J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 570-578.
- [18] CHATTERJEE K, DOLLIMORE D, ALEXANDER K. A new application for the Antoine equation in formulation development [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2001, 213(1/2): 31-44.
- [19] SENOL A. Solvation-based vapour pressure model for (solvent + salt) systems in conjunction with the Antoine equation [J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2013, 67(5): 28-39.
- [20] PINTO M I, SALGADO R, COTTRELL B A, et al. Influence of dissolved organic matter on the photodegradation and volatilization kinetics of chlorpyrifos in coastal waters [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology: A Chemistry*, 2015, 310: 189-196.

[本刊相关文献链接]

- 翁文庆, 张可, 王定义, 等. 核电站安全壳打压试验中可燃物爆炸下限的实验研究. 2019, 53(9): 176-182. [doi: 10.7652/xjtuxb201909023]
- 要雅姝, 温渡, 周屈兰, 等. 高温水蒸气氛围中煤燃烧特性研究. 2018, 52(12): 84-92. [doi: 10.7652/xjtuxb201812013]
- 顾林波, 蔡忆昔, 施蕴曦, 等. 间接低温等离子体对柴油机颗粒物成分及官能团的影响. 2018, 52(3): 63-68. [doi: 10.7652/xjtuxb201803009]
- 付子文, 王长安, 翁青松, 等. 水洗对准东煤煤质特性影响的实验研究. 2014, 48(3): 54-60. [doi: 10.7652/xjtuxb201403011]
- 侯璐达, 周立辉, 郑伟, 等. 氧化铁脱除 H_2S 的固定床反应器研究. 2010, 44(5): 91-96. [doi: 10.7652/xjtuxb201005019]
- 李晓良, 徐浩, 延卫. 十二烷基二甲基甜菜碱对 Ti/PbO_2 电极的改性研究. 2017, 51(5): 142-148. [doi: 10.7652/xjtuxb201705020]
- 徐浩, 李晓良, 张林, 等. 钛基体 PbO_2 电极对脱附浓缩液的电催化降解. 2017, 51(3): 92-97. [doi: 10.7652/xjtuxb201703016]
- 张林, 徐浩, 冯江涛. 钛基体 PbO_2 电极对靛蓝盐的电催化去除研究. 2016, 50(5): 134-139. [doi: 10.7652/xjtuxb201605020]
- 徐浩, 郭午琪, 王晓璇, 等. 超声对二氧化铅电极性质的影响. 2015, 49(7): 82-87. [doi: 10.7652/xjtuxb201507014]
- 俞英, 黄海燕. 铂碳电极苯/水体系阴极反应规律的研究. 2008, 42(3): 1040-1043. [doi: 10.7652/xjtuxb200808024]

(编辑 武红江)