

核电安全壳中主要有有机化学品 挥发特性影响因素研究

翁文庆¹, 杨鸿辉², 李剑波¹, 石博方², 姬亚军³, 胡程镇¹, 延卫²

(1. 中广核研究院有限公司, 518000, 广东深圳; 2. 西安交通大学环境科学与工程系, 710049, 西安;
3. 信阳师范学院地理科学学院, 464000, 河南信阳)

摘要: 针对核电安全壳检修期间挥发性有机化学品的挥发动力学特性影响因素不明确, 导致难以在确保无因挥发性有机物积累所导致的火灾风险的前提下进一步优化打压前的通风时间的问题, 通过模拟核电安全壳通风状态, 使用质量损失法测试了不同温度和空间气体速度下主要挥发性有机化学品的挥发特性及挥发时间。在温度分别为 30、35 和 40 °C, 空间气体速度分别为 1.0、2.0 和 3.3 h⁻¹ 的条件下, 在模拟通风系统中分别测试了使用量最大、挥发速率较低的威第尔清洗剂(达赛特)和螺栓清洗剂, 以及挥发速率较高的 NEOLUBE No. 2 核级润滑剂的挥发特性及挥发时间。研究表明: 3 种物质的挥发特性均符合 C_m-history 模型, 在较高温度下(40 °C), 空间气体速度对挥发速率的影响较小, 而较低温度下(≤35 °C), 空间气体速度对挥发速率的影响较大; 以厚度 0.50 mm 的液膜为例, 螺栓清洗剂挥发时间最长, 达到 134.56 h(30 °C, 空间气体速度为 1.0 h⁻¹), 显著小于常规的 10 d 通风时间。将检修时间安排在气温较高的时段, 可显著缩短通风时间, 进一步提高核电运行时效。

关键词: 挥发性有机化学品; 核电安全壳; 挥发速率; 挥发时间; 火灾风险

中图分类号: O643.32 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202010021 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0168-07



OSID 码

The Factors Affecting Volatilization Characteristics of Main Organic Chemicals in Nuclear Power Containment

WENG Wenqing¹, YANG Honghui², LI Jianbo¹, SHI Bofang², JI Yajun³,
HU Chengzhen¹, YAN Wei²

(1. China Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;
2. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: Due to the uncertainty of volatilization characteristics of the organic chemicals used during maintenance in nuclear power containment, it is difficult to optimize the ventilation time before pressurization in the condition of ensuring safety without fire disaster risk. To resolve this issue, the volatilization characteristics of the main volatile organic chemicals used during maintenance are tested in a system with simulated ventilation states. The most abundant chemicals with relatively low evaporation rates, including Weidil cleaner and screw cleaner, and the chemicals with relatively high evaporation rate, NEOLUBE No. 2 nuclear grade lubricant, are tested to obtain the volatilization curves and volatilization time at the temperature of 30, 35

and 40 °C, with the airspeed at 1.0, 2.0 and 3.3 h⁻¹, respectively. The results suggest that the volatilization curves of the three chemicals coincide well with the C_m-history model. At relatively high temperature (≥40 °C), the airspeed affects the volatilization rate slightly, but the effect of airspeed on the volatilization rate is clear at low temperature (≤35 °C). Taking a 0.50 mm liquid membrane for instance, the volatilization time of screw cleaner is the longest (134.56 h at airspeed of 1.0 h⁻¹), and is clearly shorter than the normally required 10 d of ventilation time before pressurization. The ventilation time can be shortened to increase the running efficiency of the nuclear power plant by scheduling the maintenance in the season with relatively higher temperature.

Keywords: volatile organic chemical; nuclear power containment; volatilization rate; volatilization time; fire disaster risk

核电站安全壳是核电厂防止放射性物质逸出、防止核污染扩散的最后一道安全屏障^[1-2]。核电安全壳及其内置设备需要进行定期检修以确保各设备设施安全可靠地运行,其中主要包括安全壳内设备的检修及安全壳气密性的打压测试^[3-6]。在定期的设备检修过程中需要用到较大的挥发性有机化学品,为确保后续打压过程的安全,特别是避免挥发性化学品在气相中的聚集造成的火灾风险^[7-11],国内核电安全壳检修工作流程中规定在使用挥发性有机化学品后需通风 10 d。如果能缩短检修工期,则能够提高核电厂的运行效率,提高经济效益^[12],而电厂对于能否优化缩短通风时间以提高生产效率缺乏理论与实验数据依据。

为探索优化通风时间的可行性,对安全壳检修期间所用的化学品进行了统计,结果表明,在核电安全壳检修期间用量最大的挥发性有机化学品是威第尔清洗剂(达赛特)(229.86 L)和螺栓清洗剂(200 L),其他化学品挥发速率较高但用量较小,可在较短的时间内通过通风操作排出安全壳^[13]。其中,威第尔清洗剂(达赛特)的主要成分为壬烷及其同分异构体、癸烷及其同分异构体;螺栓清洗剂的主要成分为异构链烷烃,初馏温度为 180 °C。此两种化学品挥发速率较低^[14],使用后需要较长时间才能通过通风操作将其从安全壳中排除,因此这两种化学品的挥发时间决定了通风时间。经过使用气相色谱进行定性分析,发现两种化学品的组分均超过 20 种,且难以实现各组分的有效分离,因此,难以使用课题组开发的在线测试系统对其挥发动力学进行测试^[15]。

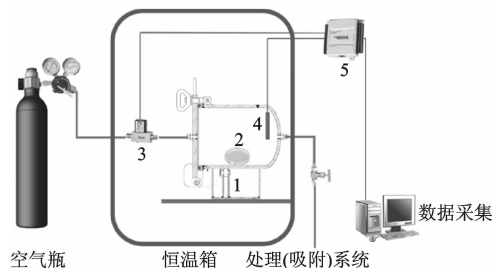
在前期工作中,本文课题组使用气相色谱仪测试了安全壳检修期间主要有机化学品在 40 °C 的挥发特性,并获得其挥发速率方程,然而仅能用所得挥发速率对相应挥发时间进行估算,且测试的温度单

一^[13]。为此,综合考虑使用时可能用到的液膜厚度(0.50 mm),拟通过质量损失测试法,测试模拟安全壳通风条件下待测化学品的挥发速率,研究主要有有机化学品挥发特性的影响因素(温度和通风空间气体速度),进而获得目标化学品的挥发时间^[16],为优化安全壳检修通风时间提供数据依据。为验证本测试方法的有效性及其可能产生的误差,选用挥发速率较高的 NEOLUBE No. 2 核级润滑剂对本方法所测数据进行验证。

1 实验部分

1.1 挥发测试系统

有机化学品挥发特性测试系统如图 1 所示。在该系统中,样品挥发皿直径为 65 mm,挥发面积为 3.32×10⁻³ m²,将其放置于体积为 8.93 L 的密封腔体中;挥发腔一端通过空气瓶及气体质量流量计对挥发腔进行供气,以提供所需的空間气体速度,另一端的排气口连接到活性炭吸附单元,以去除挥发的有机物;通过数据采集卡,将系统中气体质量流量计及温度传感器与计算机连接,实现气体流速的控制及温度的测定;挥发腔置于恒温箱中,设定测试所需的温度。



1—挥发腔;2—挥发皿;3—气体质量流量计;
4—温度传感器;5—数据采集卡。

图 1 有机物挥发特性测试系统

1.2 挥发动力学特性测试方法

测定威第尔清洗剂(达赛特)、螺栓清洗剂、NEOLUBE No. 2 润滑剂样品挥发速率的具体实验步骤如下。挥发速率的测定在密封腔体(体积为 8.93 L)中进行,腔体置于恒温箱中进行温度的控制,以恒定流速从腔外输送气体到腔内,并以恒定流速排到腔体外,腔体气压为常压。设定恒温箱温度和质量流量计所控制的气体流速,待温度和流量稳定后,取 1.66 mL 待测样品放置于已知质量的挥发皿(面积为 $3.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,液体样品厚度为 0.50 mm)中,测定其质量后放置于密封腔中,然后每隔一定时间取出挥发皿,盖上挥发皿盖以防止挥发,迅速用万分之一天平称量并记录其质量。通过改变预设温度和流量,重复上述步骤,得到不同温度和气体流量条件下的挥发速率。其中,恒温箱温度设定值分别为 30、35、40 $^{\circ}\text{C}$,质量流量计流速分别为 150、300 和 500 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,对应的空间气体速度(指单位时间通过的气体体积与容器容积之比)分别为 1.0、2.0 和 3.3 h^{-1} 。

1.3 挥发动力学模型

根据挥发性有机物挥发方程推导^[15]及 C_m -history 模型方法^[17-19],化学品的挥发动力学方程为

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

式中: $C(t)$ 为腔体中挥发性化学品浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。将式(1)对时间 t 求导,可得其挥发速率方程如下

$$r_1(t) = \frac{a}{b} \exp\left(-\frac{t}{b}\right) \quad (2)$$

式中: $r_1(t)$ 为挥发率, $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$;方程两端乘以挥发腔体积后,式(2)可以表述为

$$r_2(t) = \frac{aV}{b} \exp\left(-\frac{t}{b}\right) \quad (3)$$

式中: $r_2(t)$ 的单位为 $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对于一定的温度和气流速度,气体的挥发速率 $r_2(t)$ 的表达式是恒定的。对其进行积分,并利用边界条件 $m(0)=0$,可以求得化学品质量挥发方程

$$m(t) = aV - aV \exp\left(-\frac{t}{b}\right) \quad (4)$$

式中: $m(t)$ 为 t 时间化学品的累积挥发量。由此可见,式(4)与式(1)表达式形式一致。对式(4)两边除以挥发皿中的初始样品质量再乘以 100% 后,可以得到样品挥发率与时间的关系方程

$$P = \frac{aV - aV \exp(-t/b)}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中: m_0 为挥发样品的初始质量; P 为样品的挥发

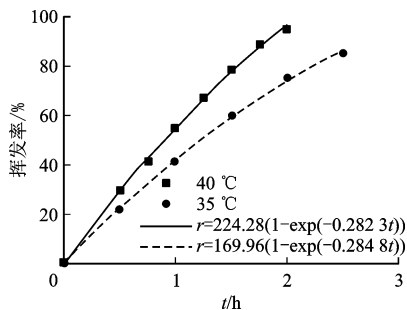
率。式(5)在形式上也与式(1)和式(4)一致。为便于计算样品挥发时间,本文后续拟合所用模型均基于该挥发率数据。

2 结果与讨论

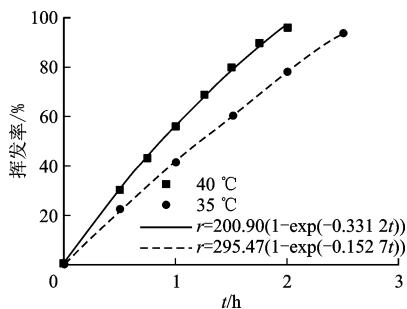
本文主要测试了温度和气体流速对威第尔清洗剂(达赛特)、螺栓清洗剂及 NEOLUBE No. 2 核级润滑剂的挥发速率的影响。由于在测试过程中需要将挥发皿从腔体中取出,操作过程可能会对测试造成一定的误差。因此,选用具有较高挥发速率的 NEOLUBE No. 2 核级润滑剂(主要成分为异丙醇和石墨粉)进行测试,如果其测试数据能够高相关性地拟合为式(1)的形式,则表明测试过程对挥发速率低于 NEOLUBE No. 2 的样品的影响可忽略。

2.1 温度和空间气体速度对 NEOLUBE No. 2 润滑剂挥发速率的影响

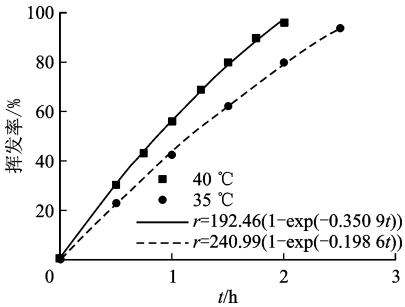
NEOLUBE No. 2 润滑剂在 35、40 $^{\circ}\text{C}$ 和空间气体速度分别为 1.0、2.0 和 3.3 h^{-1} 时,挥发曲线及根据拟合方程计算所得的挥发时间见图 2。图中的数据点为实验测试数据,图中曲线是使用式(5)模型拟合所得。由图中数据点及曲线可知,数据点与拟合曲线吻合度高,各拟合曲线方程与数据的相关度系数 R^2 不小于 0.998,可知 NEOLUBE No. 2 的挥发特性符合 C_m -history 模型^[20]。根据挥发率方程,可计算获得挥发率为 100% 时所需的时间,如图 2d 所示。在 40 $^{\circ}\text{C}$ 时,空间气体速度分别为 1.0、2.0 和



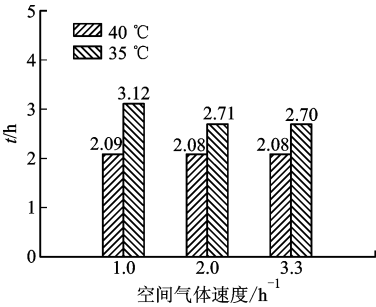
(a) 空间气体速度为 1.0 h^{-1} 时的挥发率



(b) 空间气体速度为 2.0 h^{-1} 时的挥发率



(c)空间气体速度为 3.3 h⁻¹时的挥发率



(d)0.50 mm 液膜的挥发时间

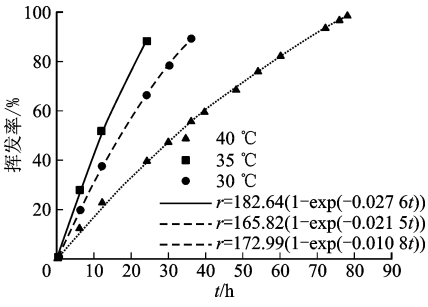
图 2 NEOLUBE No. 2 的挥发特性

3.3 h⁻¹时,0.50 mm 液膜的挥发时间相近,为 2.09~2.08 h,表明在此温度条件下,空间气体速度(1.0~3.3 h⁻¹)对挥发率影响有限,其限制性条件并非为表面气流速度。在 35 °C 时,随着空间气体速度的增加,其挥发时间从 3.12 h 缩短到 2.70 h,表明在较低温度条件下,表面气流速度对 NEOLBUE No. 2 具有相对较大的影响。

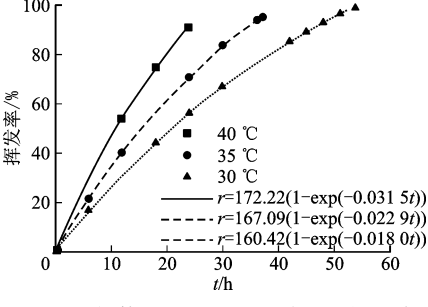
2.2 温度和空间气体速度对威第尔清洗剂挥发速率的影响

考虑到较低温度下空间气体速度可能对挥发速率影响较大^[21],且为了覆盖较大的温度区间,测试增加了温度点(30 °C)。图 3 为威第尔清洗剂(达赛特)分别在 30、35、40 °C 和空间气体速度分别为 1.0、2.0 和 3.3 h⁻¹时的挥发曲线,其中测试数据点与拟合曲线符合得较好,数据拟合相关系数接近 1。

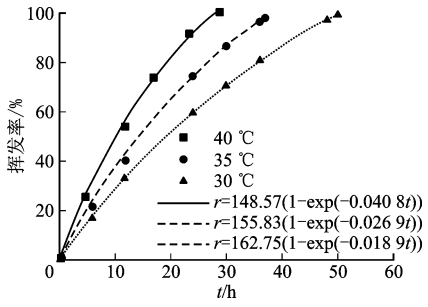
由威第尔清洗剂的化学品安全技术说明书(MSDS)可知,威第尔清洗剂(达赛特)的主要成分为壬烷和癸烷及其同分异构体,因此其饱和蒸气压较低,挥发速率较小,所需挥发时间较长。与 NEOLUBE No. 2 的挥发特性类似,在 40 °C 时,空间气体速度为 1.0~3.3 h⁻¹,对挥发时间(28.73~27.40 h)影响较小,表明该温度下,虽然威第尔清洗剂(达赛特)的挥发速率远小于 NEOLUBE No. 2 的挥发速率,但空间气体速度对其影响较小。与 NEOLUBE No. 2 的挥发特性类似,当温度为 30 °C 时,空



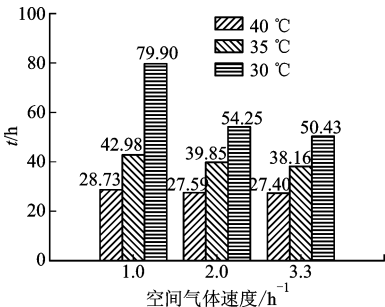
(a)空间气体速度为 1.0 h⁻¹时的挥发率



(b)空间气体速度为 2.0 h⁻¹时的挥发率



(c)空间气体速度为 3.3 h⁻¹时的挥发率



(d)0.50 mm 液膜的挥发时间

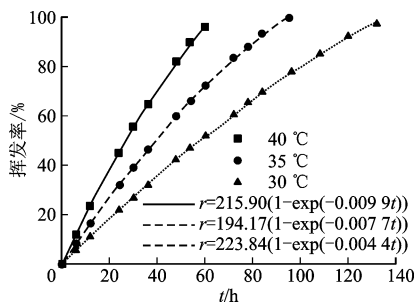
图 3 威第尔清洗剂的挥发特性

间气体速度增加可显著降低挥发时间。在空间气体速度为 1.0 h⁻¹条件下,挥发温度分别为 40、35 和 30 °C 时,0.50 mm 液膜的挥发时间分别为 28.73、39.85 和 79.90 h;在空间气体速度为 3.3 h⁻¹条件下,相同温度下威第尔清洗剂挥发时间分别为 27.40、38.16 和 50.43 h。由此可见,温度对威第尔清洗剂的挥发速率影响比实验范围内的空间气体速

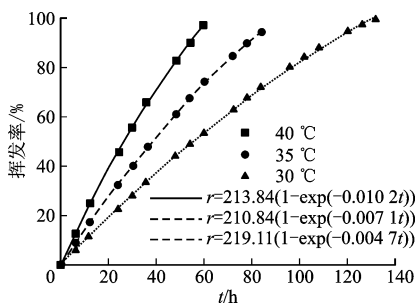
度对其的影响更大。

2.3 温度和空间气体速度对螺栓清洗剂挥发速率的影响

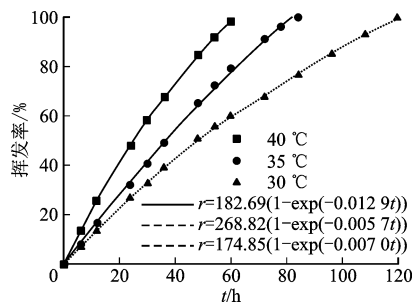
图4为螺栓清洗剂分别在30、35、40℃和空间气体速度为1.0、2.0和3.3 h⁻¹时的挥发曲线。根据化学品安全说明书可知,螺栓清洗剂为异构烷烃溶剂,其初馏温度为180℃,闪点为60℃。从图4



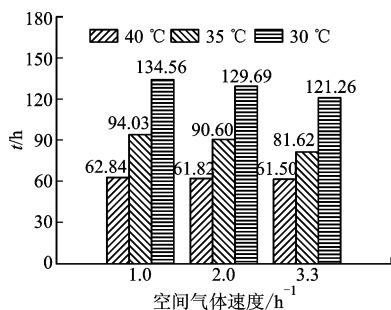
(a)空间气体速度为1.0 h⁻¹时的挥发率



(b)空间气体速度为2.0 h⁻¹时的挥发率



(c)空间气体速度为3.3 h⁻¹时的挥发率



(d)0.50 mm液膜的挥发时间

图4 螺栓清洗剂的挥发特性

数据可知,螺栓清洗剂的挥发特性也完全符合 C_m -history 模型^[20],根据该模型拟合所得曲线与实测数据点的相关系数 R^2 为0.999。通过使用拟合方程计算其0.50 mm液膜的挥发时间可知,在40℃时,其挥发时间达到61.50~62.84 h,其中空间气体速度(1.0~3.3 h⁻¹)对挥发时间影响较小。与前述两种溶剂类似,当温度为35℃和30℃时,空间气体速度对挥发时间的影响较大,分别为94.03~81.62 h和134.56~121.26 h。在相同的空间气体速度条件下,室温从30℃升高到40℃,挥发时间可以缩短50%左右。这表明,为了提高打压前化学品的挥发速率、缩短挥发时间,尽量应该安排检修时段为电厂当地气温较高的时期,有利于显著缩短化学品挥发所需的时间。

从上述两种用量最大的化学品的挥发特性可知,挥发时间最长的螺栓清洗剂在环境温度为30℃、通风空间气体速度为1.0 h⁻¹的条件下,0.50 mm液膜所需的挥发时间为134.56 h(近6 d),在实际使用化学品时,其液膜厚度远小于0.50 mm。因此,使用螺栓清洗剂后,按照0.50 mm液膜测得的挥发时间应大于实际使用该化学品所需的挥发时间。由此可见,安全壳内使用化学品后所需的通风时间应显著小于现行规定的10 d。根据保守性需求及在线监控数据,适当优化缩短通风时间,可提高核电运行效率。

3 结 论

通过模拟核电安全壳通风条件,测试了安全壳内用量最大、挥发速率相对较小的两种化学品威第尔清洗剂(达赛特)和螺栓清洗剂的挥发特性及其挥发时间。在温度为30~40℃、空间气体速度为1.0~3.3 h⁻¹的条件下,以液膜厚度0.50 mm为例,螺栓清洗剂的挥发时间为134.56 h(30℃,1.0 h⁻¹),显著少于现行规定的10 d通风时间。核电安全壳的检修适宜于安排在水温较高的季节,如若气温较低,可适当提高空间气体速度,以缩短通风时间。

核电安全壳各个区域内的化学品使用量不尽相同,且各区间物理空间结构不一致也可能导致其通风空间气体速度不均匀。因此,可在进一步模拟计算安全壳内各个区间的气体流场及分区统计化学品使用情况的基础上,通过评估,确定安全壳内残留挥发性有机化学品的安全浓度,适当缩短通风时间,提高核电的运行效率。

参考文献:

- [1] 李建伟. 核电站安全壳性能试验设计 [J]. 机电信息, 2011(6): 20-22.
LI Jianwei. Design on the performance test of nuclear safety shell [J]. Mechanical and Electrical Information, 2011(6): 20-22.
- [2] 张朝弼, 林静, 徐浩. CPR1000 核电安全壳结构抗震安全分析 [J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(2): 1-6, 26.
ZHANG Chaobi, LIN Jing, XU Hao. Seismic safety of containment vessel structures for CPR1000 nuclear power plant [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2019, 28(2): 1-6, 26.
- [3] 石亮, 刘建忠, 刘加平, 等. 核电安全壳混凝土气密性研究 [J]. 混凝土, 2018(8): 144-148.
SHI Liang, LIU Jianzhong, LIU Jiaping, et al. Study on air tightness of nuclear safety shell concrete [J]. Concrete, 2018(8): 144-148.
- [4] 王志永. 核电厂安全壳密封性监测分析及优化 [J]. 电工技术, 2018, 10: 83-84, 87.
WANG Zhiyong. Analysis and optimization of containment vessel sealability monitoring [J]. Electric Engineering, 2018, 10: 83-84, 87.
- [5] 宋永军, 梁招瑞. 浅谈安全壳整体试验管理实践 [J]. 中小企业管理与科技, 2018(9): 180-181.
SONG Yongjun, LIANG Zhaorui. Discussion on the management practice of containment integral testing [J]. Management & Technology of SME, 2018(9): 180-181.
- [6] 贡金鑫, 万广泽, 郭俊营, 等. 核电站安全壳老化研究状况及进展 [J]. 工业建筑, 2017, 47(1): 1-9, 32.
GONG Jinxin, WAN Guangze, GUO Junying, et al. State of the art studies of containment ageing of NPP [J]. Industrial Construction, 2017, 47(1): 1-9, 32.
- [7] 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.
ZHAO Jian, LI Shaochun, ZHANG Bo. Research and application of containment fire monitoring system [J]. He Biao Zhun Jiliang Yu Zhiliang, 2017(1): 47-50.
- [8] 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 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 176-182.
WENG Wenqing, ZHANG Ke, WANG Dingyi, et al. Experimental research on lower flammability limits of the combustible vapors in containment test [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 176-182.
- [9] BARBONI T, CANNAC M, LEONI E, et al. Emission of biogenic volatile organic compounds involved in eruptive fire: implications for the safety of firefighters [J]. International Journal of Wildland Fire, 2011, 20: 152-161.
- [10] RENANE R, CHETEHOUNA K, SÉRO-GUILLAUME O, et al. Numerical simulations of laminar burning velocities of a major volatile organic compound involved in accelerating forest fires [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51: 670-676.
- [11] CHETEHOUNA K, COURTY L, GARO J P, et al. Flammability limits of biogenic volatile organic compounds emitted by fire-heated vegetation (rosmarinus officinalis) and their potential link with accelerating forest fires in canyons: a Froude-scaling approach [J]. Journal of Fire Sciences, 2014, 32: 316-327.
- [12] 韩正, 王雷, 梁斌. 浅谈缩短核电站安全壳打压试验时间的可行性 [J]. 科技视界, 2016, 10: 254-255.
HAN Zheng, WANG Lei, LIANG Bin. Discussion on the feasibility of shortening the time of containment test in nuclear power plant [J]. Science & Technology Vision, 2016, 10: 254-255.
- [13] 翁文庆, 杨鸿辉, 李剑波, 等. 检修期间核电安全壳内挥发性有机化学品挥发特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 53(8): 157-162.
WENG Wenqing, YANG Honghui, LI Jianbo, et al. Determination and evaluation of volatilization rate and time of organic compounds in nuclear power containment during maintainance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 53(8): 157-162.
- [14] 马骁, 何旭, 王建昕, 等. 内燃机 LIF 测试用多组分燃油设计与研究 [J]. 内燃机学报, 2011, 29(1): 43-48.
MA Xiao, HE Xu, WANG Jianxin, et al. Design and study of multi-component fuel for tracer LIF in engine basing on thermal gravity analysis and VLE calculation [J]. Transactions of CSICE, 2011, 29(1): 43-48.
- [15] 费瑞银, 翁文庆, 喻奇, 等. 密闭空间内有机化学品挥发动力学在线检测系统 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 177-182.
FEI Ruiyin, WENG Wenqing, YU Qi, et al. An on-line system for determining the volatilization kinetics of organic compounds in an airtight chamber [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(12): 177-182.
- [16] HEYMES F, APRIN L, BONY A, et al. An experimental investigation of evaporation rates for different volatile organic compounds [J]. Process Safety Progress, 2013, 32: 193-198.

(下转第 184 页)

- technology [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2001, 37(7): 583-667.
- [6] BARBARINO S, BILGEN O, AJAJ R M. A review of morphing aircraft [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(9): 823-877.
- [7] STANEWSKY E. Aerodynamic benefits of adaptive wing technology [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2000, 4(7): 439-452.
- [8] ÖZGEN S, YAMAN Y, SAHIN M, et al. Morphing air vehicle concepts [EB/OL]. [2020-01-20]. <https://www.researchgate.net/publication/228889328>.
- [9] RODRIGUEZ A. Morphing aircraft technology survey [C]// The 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. New York, USA: AIAA, 2007: 1258.
- [10] GOMEZ J C, GARCIA E. Morphing unmanned aerial vehicles [J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(10): 103001.
- [11] MOHOLT M, BENAFAN O. Spanwise adaptive wing [EB/OL]. [2020-02-02]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170009544.pdf>.
- [12] LÓPEZ I. Convergent aeronautics solutions (CAS) project overview [EB/OL]. [2020-02-02]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170006909.pdf>.
- [13] THILL C, ETCHES J, BOND I, et al. Morphing skins [J]. *The Aeronautical Journal*, 2008, 112(1129): 117-139.
- [14] HENRY J, PINES D. A mathematical model for roll dynamics by use of a morphing-span wing [C]// The 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. New York, USA: AIAA, 2007: 1708.
- [15] ZHANG Qing, HUA Ruhao, YE Zhengyin. Experimental and computational investigation of novel vertical tail buffet suppression method for high sweep delta wing [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2015, 58(1): 147-157.
- [16] ZHANG Qing, YE Zhengyin. Novel method based on inflatable bump for vertical tail buffeting suppression [J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(1): 367-371.
- [17] 张庆, 叶正寅. 一种基于充气气囊的垂尾抖振抑制新方法研究 [J]. *工程力学*, 2014, 31(12): 234-240.
- ZHANG Qing, YE Zhengyin. Study on a new method for suppression of vertical tail buffeting using inflatable bumps [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(12): 234-240.
- [18] 张庆. 高速再入飞行器动力学问题研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018: 17-34.
- [19] 华如豪, 叶正寅. 排式充气机翼的高效气动布局研究 [J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(2): 184-191.
- HUA Ruhao, YE Zhengyin. Research on effective aerodynamic configuration of row inflatable wings [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012, 30(2): 184-191.
- [20] 张庆, 叶正寅. 排式双翼布局低雷诺数气动特性计算研究 [J]. *工程力学*, 2019, 36(10): 244-256.
- ZHANG Qing, YE Zhengyin. Computational investigations for aerodynamic characteristic analysis of low Reynolds number doubly-tandem wing configurations [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(10): 244-256.
- [21] 杨磊. 空中发射分离过程的动力学问题研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018: 21-30.
- [22] ZHANG Qing, YE Kun, YE Zhengyin, et al. Aerodynamic optimization for hypersonic wing design based on local piston theory [J]. *Journal of Aircraft*, 2016, 53(4): 1065-1072.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 173 页)

- [17] XIONG J, CAO J, ZHANG Y. 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.
- [18] 沈隽, 曹连英, 黄占华. 密闭小室测定建材有机挥发物散发特性的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(3): 111-114.
- SHEN Jun, CAO Lianying, HUANG Zhanhua. Emission characteristics of volatile organic compounds of building materials in small airtight chamber [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(3): 111-114.
- [19] YAO Y, XIONG J, LIU W, et al. Determination of the equivalent emission parameters of wood-based furniture by applying C-history method [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 5602-5611.
- [20] CAO J, WESCHLER C J, LUO J, 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(2): 825-834.
- [21] 杨昉明. 液体危化品挥发过程中团簇结构计算及抑制机理研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 65.

(编辑 杜秀杰)