

中文引用格式:袁必和,张广毅,谈哲哲,等. 氨水泄漏的粉液共洗消试验研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2): 77-83.

英文引用格式:YUAN Bihe, ZHANG Guangyi, TAN Zhezhe, et al. Experimental study of powder-liquid co-decontamination for aqueous ammonia leak accident[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 77-83.

氨水泄漏的粉液共洗消试验研究^{*}

袁必和 教授, 张广毅, 谈哲哲, 雷春英^{**} 实验师
(武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号: X937 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0348

资助项目: 湖北安全生产专项资金科技项目(SJZX20230910)。

【摘要】 为解决化工行业氨水泄漏事故引发的安全与环境风险, 基于多孔材料丰富的孔隙结构和物化性质, 选用活性炭(AC)和沸石作为洗消剂的基本原料, 通过浸渍不同质量分数 AlCl_3 溶液, 制备粉体洗消剂 AC@AlCl_3 和 Zeolite@AlCl_3 。以氨水为洗消对象, 采用上述改性粉体洗消剂, 并结合多种表面活性剂, 系统开展单一洗消与粉液共洗消试验。通过考察洗消剂用量、挥发气体体积分数及洗消产物形态等指标, 对比单一洗消与共洗消的效果, 综合评价粉液协同洗消策略的实际表现。结果表明: 改性后粉体的洗消能力得到显著提升, 对氨水的洗消效率均超过 70%。其中, $\text{AC@20\% AlCl}_3$ 和 3% NaHCO_3 粉液组合在洗消过程中可形成较为完整的凝胶固化物, 洗消效率达到 80%, 可实现高效、经济且安全的氨水洗消目标。

【关键词】 氨水泄漏; 粉液共洗消; 洗消试验; 活性炭(AC); 沸石; 多孔材料

Experimental study of powder-liquid co-decontamination for aqueous ammonia leak accident

YUAN Bihe, ZHANG Guangyi, TAN Zhezhe, LEI Chunying

(School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology,
Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to address the safety and environmental risks associated with aqueous ammonia leakage accidents in the chemical industry, based on the rich pore structure and physicochemical properties of porous materials, AC and zeolite were selected as the basic raw materials for detergents. The powder detergents AC@AlCl_3 and Zeolite@AlCl_3 were prepared by impregnating with an AlCl_3 solution of varying mass fractions. Using aqueous ammonia as the target contaminant, systematic experiments were conducted involving both individual decontamination and combined powder-liquid decontamination, employing the aforementioned modified powdered decontaminants along with various surfactants. By evaluating indicators such as decontaminant dosage, volume fraction of volatile gas, and the morphology of decontamination products, the effectiveness of individual versus combined decontamination was compared, and the practical performance of the powder-liquid synergistic decontamination strategy was comprehensively assessed. The results demonstrate a significant enhancement in the decontamination

^{*} 文章编号: 1003-3033(2026)02-0077-07; 收稿日期: 2025-09-24; 修稿日期: 2025-12-09

^{**} 通信作者: 雷春英(1986—), 女, 广西南宁人, 硕士, 实验师, 主要从事实验室安全管理、工业安全技术等方面的研究。E-mail: ley_2014@whut.edu.cn。

capacity of the modified powders, with decontamination efficiencies for aqueous ammonia exceeding 70%. Among the samples, AC@ 20% AlCl_3 , combined with a 3% NaHCO_3 powder solution, forms a more complete gel-like solid during the decontamination process, and the decontamination efficiency reaches 80%. This approach successfully realizes the goals of high efficiency, cost-effectiveness, and safety in aqueous ammonia decontamination.

Keywords: aqueous ammonia leakage; powder-liquid co-decontamination; decontamination experiment; activated carbon (AC); zeolite; porous material

0 引言

氨水作为一种重要的化工原料,广泛应用于农业、制冷、清洁等多个领域^[1]。然而,氨水泄漏事故频发,给环境和人身安全带来了严重威胁。氨水不仅具有强烈的刺激性和腐蚀性,还能在空气中形成有毒气体,导致呼吸道和皮肤损伤,甚至引发火灾和爆炸等次生灾害^[2]。因此,及时有效的应急处置技术对于降低氨水泄漏事故的危害至关重要。

应急处置技术应根据事故现场具体情况和泄漏物质的物化特性选择,以阻断泄漏并防止扩散。常用方法包括工艺控制、外套包装、堵漏修补、倒罐、转移和围堵等。然而,由于事故现场环境往往复杂多变,常常无法第一时间实施上述技术,因此应急洗消成为重要手段^[3-4]。传统的洗消处理方法多依赖于稀释、吸附或中和等单一手段,往往难以应对氨水泄漏的复杂场景。近年来,活性炭 (Activated Carbon, AC) 和沸石 (Zeolite) 作为天然多孔材料,凭借其丰富的孔隙结构,广泛用于气体吸附和污水处理等领域^[4]。然而,未经改性的多孔材料吸附用量大、吸附效率低 (<35%)^[5],而通过对多孔材料进行物理、化学性质改性,如采用热处理法、微波法、过氧化改性和金属离子改性等方法增强材料吸附能力^[6],则能够有效改变吸附选择性,提升吸附性能。

常规的洗消方法往往侧重于单一的物理或化学吸附,难以快速高效地洗消氨水。因此,笔者拟以泄漏的氨水为洗消对象,设计并搭建洗消测试平台,开展单一、粉液共洗消试验研究,并结合洗消剂用量、挥发气体体积分数变化、洗消产物等情况,对比单一洗消剂,综合分析评价粉液共洗消在洗消测试过程中的实际表现。

1 多孔材料制备与测试方法

1.1 制备多孔材料的原料与测试设备

分析纯试剂包括氨水、 AlCl_3 、 NaHCO_3 、十二烷基苯磺酸钠 (Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate,

SDBS);工业级试剂包括 AC、Zeolite、辛基酚聚氧乙烯醚 (Octaphenyl Polyoxyethyene, Op-10)、凝胶固化剂 ($\text{C}_3\text{H}_3\text{NaO}_2$)_n。

测试仪器包括扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM)、X 射线衍射仪 (X-ray Diffraction, XRD)、傅里叶红外光谱仪 (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)、全自动比表面积及孔隙度分析仪 (Brunauer-Emmett-Teller, BET)。

1.2 改性多孔材料的制备

采用浸渍法对 AC、Zeolite 多孔原材料进行改性,制备过程如下:首先,分别配制质量分数为 10%、15%、20% 的 AlCl_3 溶液 (在预试验中, AlCl_3 质量分数大于 20% 会导致改性后的 AC 和 Zeolite 孔隙急剧减小,而 AlCl_3 质量分数小于 10%,其无法有效地附着在 AC 和 Zeolite 上,因此,后续试验选取 10%~20% 区间研究);再称取 50 g 的 AC 或 Zeolite 原料置于烧杯中;随后,将一定质量分数的 AlCl_3 溶液倒入烧杯中,搅拌 2 h,再将烧杯封口静置 12 h;然后,将混合物置于离心机中,转速为 2 000 r/min,时长为 10 min,将所得到的固体置于烘箱中,烘干温度为 80 °C,时长为 8 h;最后,得到不同比例的 AC@ AlCl_3 和 Zeolite@ AlCl_3 粉体洗消剂。

1.3 洗消测试平台

洗消试验测试平台 (图 1) 主要由模拟泄漏箱体、挥发气体监测装置、洗消剂喷洒装置 3 部分组成。模拟泄漏箱体结构主体为长方体,尺寸为 30 cm×40 cm×50 cm;右侧接口分别与气体检测仪、气泵探管、循环气管相连接;顶部接口分别为危化品释放口、粉体洗消剂喷洒口、液体洗消剂喷头接口。洗消剂喷洒装置主要包括粉体储罐、液体储罐、粉剂喷头、细水雾喷头等。

2 材料表征及氨水泄漏洗消试验

2.1 多孔材料表征

2.1.1 多孔材料形貌与结构表征

AC、Zeolite 改性前后的 SEM 如图 2 所示,AC 改

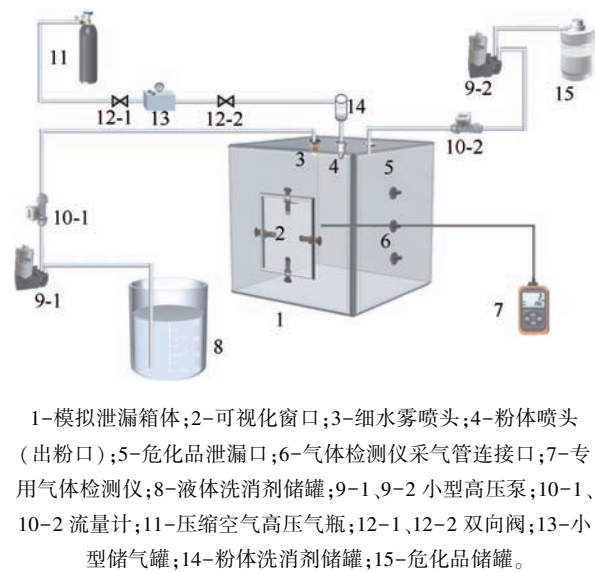


图 1 洗消测试平台
Fig. 1 Decontamination test platform

性前结构呈疏松、多孔状,而改性后,在其孔表面形成一层“膜”,孔的大小和排列较改性前较为规律。同时,在大孔内部孔壁上随机附着大量不规则突起,这将为后续吸附提供大量位点。

Zeolite 改性前表面微观结构较为粗糙,在其表面存在大量不规则突起,部分区域存在层状结构。经过改性的 Zeolite 表面形成一层致密的包裹层,整体结构平滑,并伴随着大小不一、随机分布的裂隙,这将为后续吸附提供吸附位点。

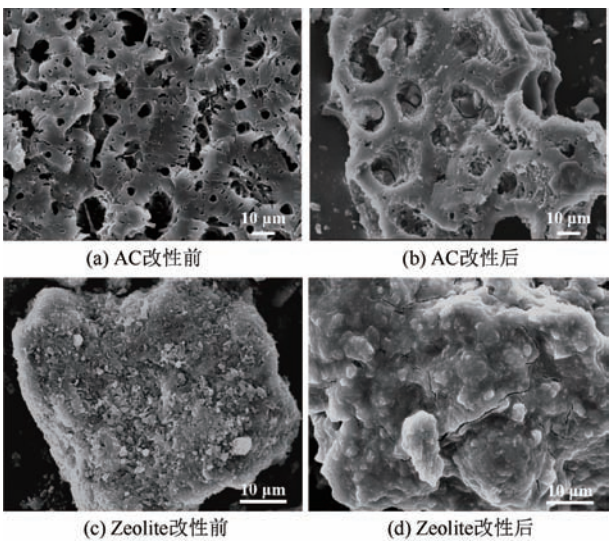


图 2 样品改性前后的 SEM 图
Fig. 2 SEM images of samples before and after modification

AC 改性前后的 XRD 图谱如图 3a 所示,在 2θ 为 $20\sim 25^\circ$ 、 $40\sim 45^\circ$ 处出现了较宽的炭的不规则特征衍射峰,这是由于 AC 中含有石墨晶体,结合衍射峰的面积大小和强弱可判断 AC 结晶度不高,存在着无定形炭。在衍射角 2θ 为 26.5° 处出现 AlCl_3 的特征衍射峰^[7],表明 AlCl_3 已成功附着到 AC 上。图 3b 为 AC 改性前后 FTIR 对比图, $3\,410\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰可能是由 O-H 键的伸缩振动引起的,

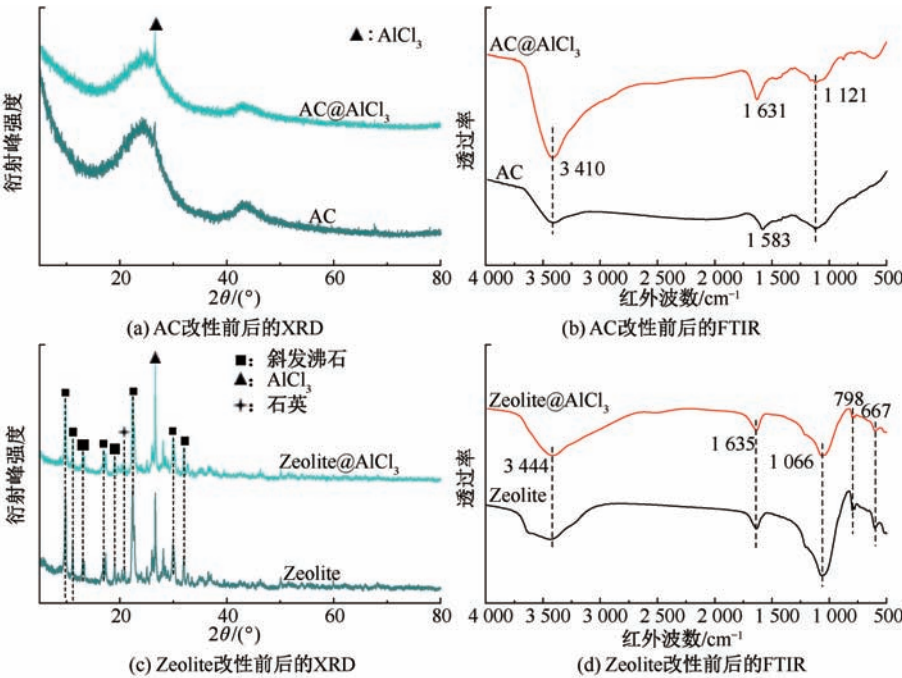


图 3 样品改性前后的 XRD 和 FTIR
Fig. 3 XRD and FTIR of samples before and after modification

1 631 cm^{-1} 处出现的峰可能是由于在改性过程中吸附水的变形振动引起的,在 1 583 cm^{-1} 处的峰代表着 C=C 的伸缩振动,1 121 cm^{-1} 处可能为 C-H 的伸缩振动^[8]。AC 改性前后具有较强的相似性,这从侧面反映出改性并未对 AC 结构造成本质性破坏,保留着原有的结构功能。Zeolite 改性前后的 XRD 图谱如图 3c 所示, Zeolite 的主要成分为斜发 Zeolite、石英,对比 Zeolite 改性前后的图谱发现,特征峰并无明显变化,说明改性未对 Zeolite 原有结构造成破坏。其中在 2θ 为 26.5°左右处出现 AlCl_3 的特征衍射峰^[7],表明 AlCl_3 已成功附着到 Zeolite 上。图 3d 为 Zeolite 改性前后 FTIR 对比图,3 444 与 1 635 cm^{-1} 处的峰为 Zeolite 表面 O-H 伸缩振动峰,1 066 cm^{-1} 处的峰是由 SiO_4 四面体的非对称伸缩振动引起^[9-10]。

2.1.2 多孔材料 BET 表征

AC、Zeolite 改性前后孔隙结构参数详见表 1,氮气吸附脱附等温线如图 4 所示。AC 和 Zeolite 改性后比表面积、总孔容相对减小,这是由于 AlCl_3 附着,占据一定孔隙。而 Zeolite 平均孔径略微增加,可能是因为在 AlCl_3 附着的过程中造成一定的团聚,从而形成大孔结构。

表 1 AC 和 Zeolite 的比表面积及孔隙结构参数

Table 1 Specific surface area and pore structure parameters of AC and Zeolite

样品	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/nm
AC	525.9	0.292	22.2
AC@ AlCl_3	355.0	0.178	20.0
Zeolite	19.6	0.084	172.0
Zeolite@ AlCl_3	12.5	0.073	233.8

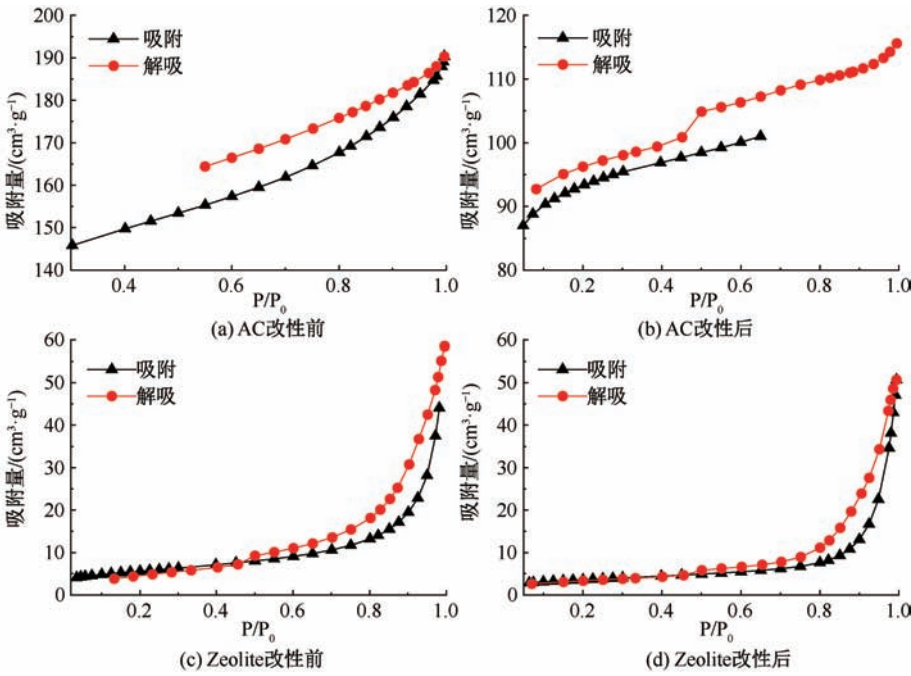


图 4 样品改性前后的氮气吸附脱附等温线

Fig. 4 N_2 adsorption-desorption isotherms of samples before and after modification

2.2 粉体洗消试验

2.2.1 粉体洗消试验方法和步骤

试验共分为 6 组,分别是质量分数为 10%、15%、20% AlCl_3 溶液改性的 AC 和 Zeolite。具体试验步骤如下:

1) 称取 10 g 氨水施加到箱体中,静置 2 min 后,开启气体采样泵对箱体内气体浓度进行抽集检测,时长为 14 min,抽取的气体经软管进入氨气气体检测仪中。少量氨水泄漏测试是为了在安全、可控的条件下快速评估洗消材料在较低浓度环境中的

性能。

2) 空白组。依照步骤 1) 中的操作,将 10 g 氨水施加到箱体中,静置 2 min 后,按照 1 : 1 的比例将未改性的 AC 和 Zeolite 分别均匀喷洒到泄漏氨水表面,再静置 2 min 后,开启气体采样泵对箱体内气体浓度进行抽集检测,时长同样为 14 min。

3) AC 组。对照空白组的试验步骤,按照 1 : 1 的比例,以质量分数为 10%、15%、20% AlCl_3 溶液改性后的 3 组 AC 为粉体洗消剂,分别开展洗消试验。

4) Zeolite 组。同样是 1 : 1 的比例,以质量分

数为 10%、15%、20% AlCl_3 溶液改性后的 3 组 Zeolite 为粉体洗消剂,分别开展洗消试验。

5) 每组试验重复 3 次,最后将洗消产物收集,利用酸碱计测定 pH 值后统一处理。

2.2.2 粉体洗消效率

单一粉体洗消效率如图 5 所示,与未改性的 AC 和 Zeolite 相比,AC@ AlCl_3 和 Zeolite@ AlCl_3 洗消效率均有较大提升。同时,AC 组洗消效率相对高于 Zeolite 组。在考虑改性前 AC 洗消性能就优于 Zeolite 的前提下,结合 2.1.1、2.1.2 节中的形貌结构和 BET 表征分析可知:改性后与 Zeolite 相比,AC 拥有着更为疏松多孔的结构,比表面积、总孔容均高于 Zeolite,因此,在洗消试验中,AC 的综合洗消性能较优。

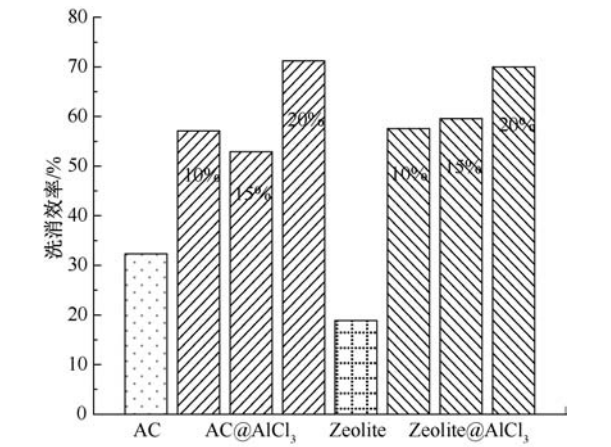


图 5 单一粉体洗消效率

4) 参照步骤 3) 开展质量分数为 3% 的 SDBS 和 NaHCO_3 溶液,质量分数为 5% 和 10% 的 Op-10 溶液的洗消试验。

5) 每组试验重复 3 次,最后将洗消产物收集,利用酸碱计测定 pH 值后统一处理。

2.3.2 液体洗消效率

为研究单一液体对氨气的洗消效果,以去离子水为对照组开展洗消试验,各试验组具体洗消效率如图 6 所示。洗消效率和洗消剂的用量并非呈同步变化,如 10% Op-10 试验组中,随着洗消剂用量的增加,洗消效率只有小幅变化。同时,当洗消比为 1 : 3 时,3% NaHCO_3 和 3% SDBS 试验组洗消效率较高,分别为 58.4%、58.7%。

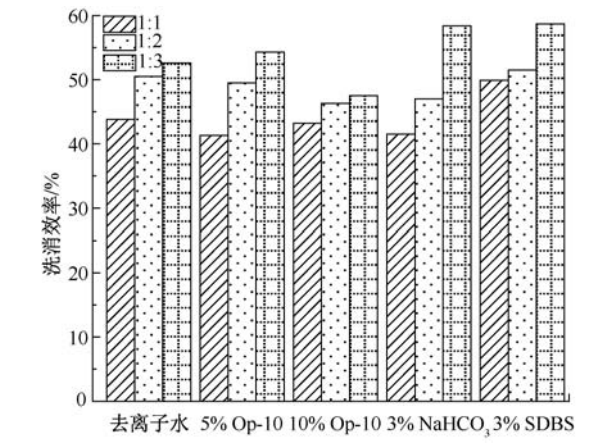


图 6 单一液体洗消效率

Fig. 5 Decontamination efficiency of single powder

Fig. 6 Decontamination efficiency of single liquid

2.3 液体洗消试验

2.3.1 液体洗消试验方法和步骤

液体洗消试验以去离子水为溶剂,以 SDBS、Op-10、 NaHCO_3 为添加剂,配制不同质量分数的液体洗消剂,研究不同洗消剂的洗消效果,并探究洗消效果与洗消剂用量之间的关系。具体试验方法及步骤如下:

1) 分别配制质量分数为 3% 的 SDBS 溶液和 NaHCO_3 溶液,质量分数为 5% 和 10% 的 Op-10 溶液。

2) 取 10 g 氨水施加到箱体中,静置 2 min 后,开启气体采样泵对箱体内气体浓度进行抽集检测,时长为 14 min。

3) 将 10 g 氨水施加到箱体中,静置 2 min 后,按照 1 : 1、1 : 2、1 : 3 比例,通过小型水泵将去离子水以细水雾的形式喷洒到箱体中,静置 2 min,开启气体采样泵对箱体内气体浓度进行抽集检测,时长同样为 14 min。

2.4 粉液共洗消试验

2.4.1 粉液共洗消试验方法和步骤

在 2.2 和 2.3 节试验基础上进行粉液共洗消氨水试验,具体试验方法和步骤如下:

1) 在 2.2 节各试验组中选取洗消效率较高的粉体洗消剂 Zeolite@ 20% AlCl_3 和 AC@ 20% AlCl_3 ,并选定氨水与粉体洗消剂的质量比为 2 : 1,凝胶固化剂($\text{C}_3\text{H}_3\text{NaO}_2$)_n 用量为粉体洗消剂质量分数的 30%。

2) 取 10 g 氨水施加到箱体中,静置 2 min 后,将粉体洗消剂喷洒到箱体中,再静置 2 min 后按照 1 : 3 的比例喷洒液体洗消剂,待箱体中细水雾凝结成小水滴时,开启氨气检测仪进行浓度检测。(由于先喷洒液体洗消剂将会进一步加速氨水扩散,不利于后续粉体洗消剂洗消,故舍弃该方案)。

3) 每组试验重复 3 次,最后将洗消产物收集,利用酸碱计测定 pH 值后统一处理。

2.4.2 粉液共洗消效率

粉液共洗消效率如图 7 所示,以不同质量分数的 Op-10 液体洗消剂搭配 Zeolite@ 20% AlCl_3 粉体洗消剂时,洗消效率在 80% 左右。当采用 AC@ 20% AlCl_3 粉体和 5% Op-10 液体共同消剂时,洗消效率可达 90%。对比去离子水洗消的试验结果,可知添加适量的表面活性剂和 NaHCO_3 有助于提高氨水洗消效率。一方面是由于 AlCl_3 的改性强化了粉体的洗消效果。同时,液体洗消剂的加入可形成良好的凝胶固化产物,抑制了泄漏氨水的流淌和挥发。

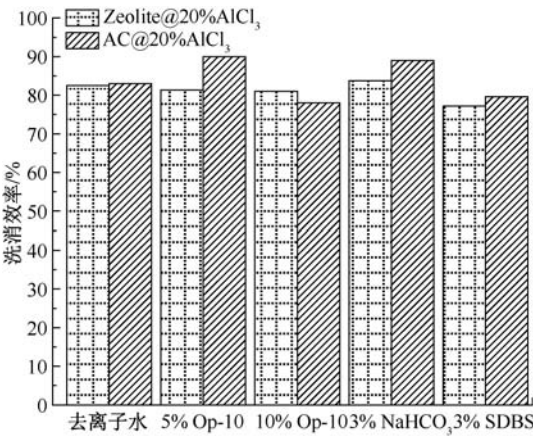


图 7 粉液共洗消效率

Fig. 7 Powder-liquid co-decontamination efficiency

洗消速率是评估洗消材料性能的重要指标,粉液共洗消效率随时间变化如图 8 所示,AC@ 20% AlCl_3 和 Zeolite@ 20% AlCl_3 分别与 3% NaHCO_3 粉液共洗消,在 4 min 内洗消率均达到 80% 以上,展现出快速且高效的洗消性能。

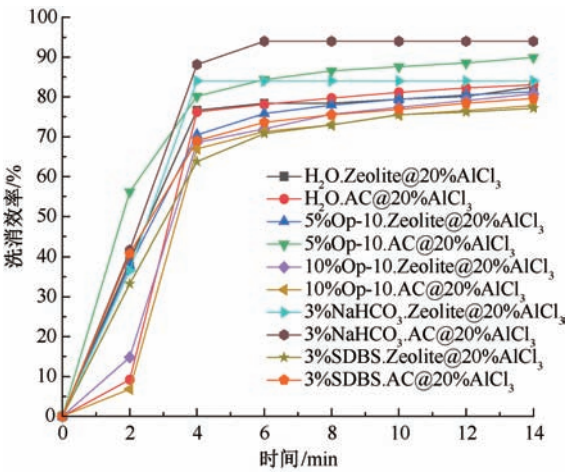


图 8 粉液共洗消效率随时间变化曲线

Fig. 8 Powder-liquid co-decontamination efficiency over time

2.4.3 粉液共洗消试验产物分析

部分粉液共洗消试验所生成的洗消产物如图 9 所示,以 Zeolite@ AlCl_3 、AC@ 20% AlCl_3 为粉体洗消剂的试验组,洗消产物为普通固液混合物,并未能形成凝胶固化物。而粉液共洗消试验中,5% Op-10 和 3% NaHCO_3 搭配 AC@ 20% AlCl_3 所生成的洗消产物,能够形成较为完整的凝胶固化物。同时,凝胶固化物经过 7 天持续监测,依然维持着原有的固体形态,具有良好的长期稳定性。相反,以 Zeolite@ AlCl_3 为粉体洗消剂时,固化效果较差。综合考量,AC@ 20% AlCl_3 的洗消性能较为全面,能够在高效洗消的前提下,快速凝胶固化氨水,防止其进一步流淌扩散,说明其能够对泄漏的氨水进行高效的应急洗消处置。

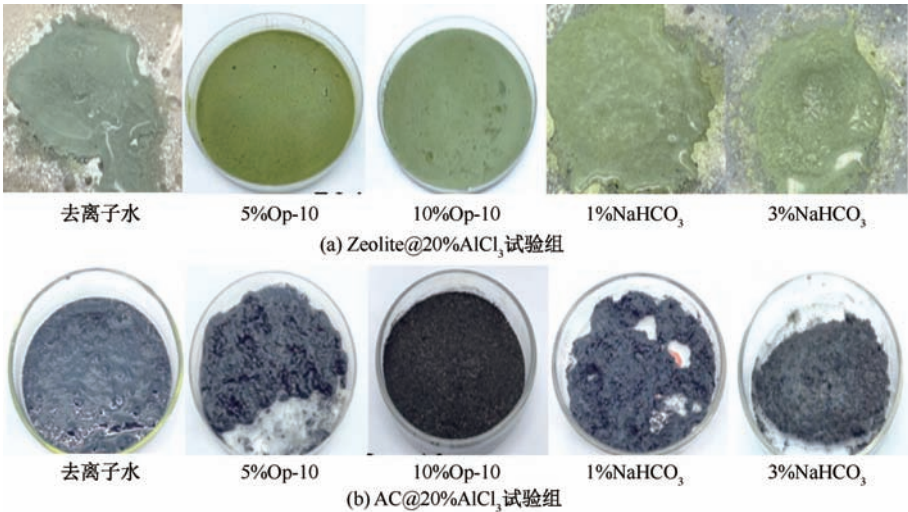


图 9 粉液共洗消产物

Fig. 9 Powder-liquid co-decontamination product

3 结 论

1) 对比未改性的 AC 和 Zeolite, 改性后的 AC@20%AlCl₃ 和 Zeolite@20%AlCl₃ 粉体洗消试验效率均大于70%, 洗消效率得到明显提升。

2) 在液体洗消剂中质量分数为3%的 NaHCO₃ 溶液和 SDBS 溶液试验组洗消效率较高, 分别为

58.4%、58.7%。

3) 选定 Zeolite@20%AlCl₃ 和 AC@20%AlCl₃ 为粉体洗消剂, 按照1:3比例搭配不同液体洗消剂开展粉液共洗消试验, 在以去离子水、5% Op-10、3% NaHCO₃ 为液体洗消剂时, 洗消效率均大于80%, 能够实现高效洗消的目标。

参 考 文 献

- [1] 卢林刚, 战世翠, 李焕群. 几种不同试剂洗消氨水的实验[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(7): 884-887.
LU Lin'gang, ZHAN Shicui, LI Huanqun. Experimental on decontaminating ammonia water by several different reagents[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(7): 884-887.
- [2] BUNIAZET Z, COUBLE J, MAURY S, et al. Acidity of SiO₂-supported metal oxides in the presence of H₂O using the AEIR method: 2. adsorption and coadsorption of NH₃ and H₂O on TiO₂/SiO₂ catalysts[J]. Langmuir, 2020, 36(45): 13 383-13 395.
- [3] 纪国峰, 张嘉亮, 郭帅. 危化品安全生产科技支撑能力建设的思考与建议[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增2): 100-104.
JI Guofeng, ZHANG Jialiang, GUO Shuai. Thoughts and suggestions on construction of technological support capacity for work safety of hazardous chemicals[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S2): 100-104.
- [4] 姜子建, 周荣义, 石云霄, 等. 基于贝叶斯网络的危化品爆炸事故隐患关联与溯源分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 173-180.
JIANG Zijian, ZHOU Rongyi, SHI Yunxiao. Correlation and traceability analysis of hazardous chemical explosion accidents based on Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 173-180.
- [5] WANG Huan, LIU Quantao, WU Shaopeng, et al. Study of synergistic effect of diatomite and modified attapulgite on reducing asphalt volatile organic compounds emission[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132827.
- [6] WANG Huifeng, LI Zichao, YAHYAOU S, et al. Effective adsorption of dyes on an activated carbon prepared from carboxymethyl cellulose: experiments, characterization and advanced modelling[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 417: DOI: 10.1016/j.cej.2020.128116.
- [7] LI Zhiyong, FU Yibo, ZHAI Liyong, et al. Efficient ammonia capture via reversible single crystal structural transformation of a simple Ni metal-organic framework[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 362: DOI: 10.1016/j.seppur.2025.131743.
- [8] JIANG Guangzhong, KITANI S, KAWAJI H. Synthesis and characterization of Na-containing amorphous and nanocrystalline Si from the reaction of NaSi with AlCl₃[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 464: 92-95.
- [9] DAI Jiqiang, ZHAO Cheng, HU Xiaomei, et al. One-pot synthesis of meso-microporous ZSM-5 and its excellent performance in VOCs adsorption/desorption[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2021, 96(1): 78-87.
- [10] LUO Hao, FU Fenglian, TANG Bing. Ferrous sulfide supported on modified diatomite for the removal of Cr(VI): performance and mechanism[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 670: DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131538.

作者简介: 袁必和 (1988—), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 主要从事燃烧与阻燃机制、新能源热安全与风险防控、工业热安全与防火防爆技术、聚合物基复合材料、安全智能传感与监测预警技术等方面的研究。
E-mail: yuanbh@whut.edu.cn。