

去污泡沫性能的影响因素初步研究

刘志辉¹, 张涛革², 魏方欣¹, 李小龙¹, 徐春艳^{1,*}

1. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082;

2. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

摘要: 泡沫去污是将含有去污成分的发泡剂与气相混合, 产生的泡沫作用于待去污表面, 从而实现将放射性污染物去除的目的。通过充泡或鼓泡法, 研究稳定剂和发泡剂浓度、气流量等对去污泡沫性能的影响。初步研究表明: 稳定剂浓度是泡沫持液性能的主要影响因素, 建议其加入量为 2 g/L 左右, 不宜超过 3 g/L; 发泡剂浓度和气流量是去污泡沫性能的次要影响因素, 推荐适宜的发泡剂质量浓度和气流量分别为 8 g/L 和 7.0 m³/h。建议优化设计, 以期获取最佳结果。

关键词: 去污泡沫; 性能; 影响因素

中图分类号: TL944 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)06-0374-05

doi: 10.7538/hhx.2014.36.06.0374

A Preliminary Study on Influence Factors for Property of Decontamination Foam

LIU Zhi-hui¹, ZHANG Tao-ge², WEI Fang-xin¹, LI Xiao-long¹, XU Chun-yan^{1,*}

1. Nuclear and Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China;

2. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China

Abstract: Decontamination using foam means mixing air and foaming agent containing decontamination agent to form foam, which can be applied to the contaminated surface, so that the radionuclides are eliminated. By spraying or bubbling, the experiment studied the influence of stability agent and foaming agent concentration and air flow rate, etc. on the property of decontamination foam. The preliminary results show, the stability agent concentration is the main factor influencing hold-up time of foam, so the added mass concentration is suggested to be about 2 g/L, less than 3 g/L. Foaming agent concentration and air flow are the secondary influence factors, so the foaming agent mass concentration and air flow rate are suggested to be 8 g/L and 7.0 m³/h respectively. Optimization design is recommended, in order to obtain the best results.

Key words: decontamination foam; property; influence factor

收稿日期: 2014-03-03; **修订日期:** 2014-04-22

作者简介: 刘志辉(1976—), 男, 河北蠡县人, 硕士, 副研究员, 主要从事放射性废物管理研究及审评工作

* **通信联系人:** 徐春艳(1980—), 女, 湖南长沙人, 硕士, 高级工程师, 主要从事放射性废物管理研究及审评工作, E-mail: flyaz@

泡沫去污是将去污剂和湿润剂加压喷涂在待去污物体的表面,形成泡沫层,使去污剂与污染表面维持一定的接触时间,后用水漂洗或喷淋,除去泡沫实现表面去污^[1]。由于泡沫中空气占有90%的体积,因此该技术用水量及去污剂用量很少,废物产量仅为一般化学去污的10%^[2]。针对核设施退役过程中产生的大体积空腔类和结构复杂部件的去污,该方法具有操作简便、去污效果较好、二次废物产生量少等优势^[3]。国际上,1960年Ayres首次将泡沫去污技术应用于HAPO水冷反应堆系统的去污^[4]。

近年来,美国能源部下属的萨凡纳河工厂采用硝酸泡沫清洗金属墙和阀门,并将该技术作为废物最小化手段,可减少多达70%的废物^[5];法国原子能委员会采用泡沫技术对污染面积为1000 m²的冷却器进行去污,主要污染物为⁶⁰Co、¹³⁷Cs,去污系数高达190,清洗后残余放射性核素量低于1 Bq/cm²^[6];罗克韦尔国际能源系统集团采用优选的泡沫系统对无孔表面的去污非常有效,清洗高放射性物质工作屏蔽室和手套操作箱的效率可达63%~92%,碳钢表面的去污效率可达75%~90%^[7]。泡沫去污技术经过近几十年的开发和研究,目前在工程上的应用已日渐成熟,最具代表性的是英、法联合研发的两步法泡沫去污技术^[3]。同时,Experowa等^[8]开发一种无水泡沫,可用于核工厂精密设备核沾染物的清除。Sphany等^[9]采用无水泡沫消除金属墙的放射性污染,并采用真空吸尘器吸收反应后的泡沫,将废物量降低到其它化学去污法的5%,提高了放射性核素的回收和富集。

在国内,泡沫去污技术研究始于20世纪90年代^[3],并于近年从法国引进了喷涂法泡沫去污技术^[10],在自主研发基础上,结合引进消化吸收再创新,取得了可喜的成果,如泡沫去污剂性能研究^[11]、挡板射流式泡沫发生装置的研制^[12]、模拟后处理厂污染样品的泡沫去污技术研究^[3]和去污废液的处理研究^[13]等工作。当前,期望在现有研究成果基础上,通过进一步的技术改进和完善,最终实现工程应用,为我国核设施退役工程的实施提供技术支持。本工作拟采用单因素法研究泡沫性能的影响因素,为泡沫去污技术的深入研究和应用奠定基础。

1 实验部分

1.1 仪器设备

泡沫容器:材质为有机玻璃,外形尺寸为800 mm×

600 mm×1400 mm,底端设两个手孔(接泡沫发生器)和一个排液孔,侧面距底边50 mm和100 mm处设有两个与曝气管连接供气管,自加工。

泡沫发生器:外形尺寸为 $\phi 65$ mm×500 mm,爆气管工作面积为0.8~1.5 m²/m,空气流量为3~10 m³/(m·h),山东依维优环境工程设备制造有限公司制造。

RS30180型空压机,压力范围为0.5~0.8 MPa,排气量为1.8 m³/min,厦门东亚机械有限公司制造。

HT50/R₁/M₂/JS/air型流量计,瞬时流量为0.01 m³/h,累积流量为1 m³/h,量程为5~100 m³/h,承德市汇通化工装备有限公司制造。

1.2 材料试剂

0810型发泡剂,分析纯,中国日用化学工业研究院;泡沫稳定剂,工业级,山东阜丰发酵有限公司;氢氧化钠,分析纯,山西华源电化有限责任公司;柠檬酸,工业级,山西省芮城黄河化工有限公司;草酸钠,工业级,山西原平市化工有限责任公司;去污用试片,材质为铝,规格为40 mm×70 mm,厚度为3 mm,自加工。

1.3 实验方法

泡沫性能的研究方法分为静态法和动态法。静态法,是先通过充泡或鼓泡装置将泡沫充满泡沫容器,观察研究泡沫的持液量、稳定性和泡沫粒径等。动态法,是在充泡或鼓泡过程中,分析研究泡沫的持液能力、发泡比、去污效果等。泡沫液配方和泡沫的基本性能研究中通常采用静态法;泡沫去污技术工程应用研究中多采用动态法,以更好反映泡沫的真实性能,为实际应用提供支持。

1.4 实验内容

去污泡沫的性能指标包括泡沫的持液能力、发泡比、去污效果等。持液能力和发泡比的影响因素包括稳定剂和发泡剂浓度、气流量等。采用单因素法,研究稳定剂和发泡剂浓度、气流量对泡沫持液能力和发泡比的影响,以确定主要影响因素和适宜的工艺参数。泡沫的去污能力影响因素,除稳定剂、发泡剂、气流量外,还包括挂片高度,为此,在上述实验基础上,进一步研究同一气流量条件下,挂片位置、稳定剂用量不同对去污效果的影响。

2 结果与讨论

2.1 泡沫持液性能影响因素研究

持液半衰期是表征泡沫持液能力的参数之

一,一定程度上反映出泡沫稳定性的优劣,指停止鼓气时泡沫携带的液体回流一半所用的时间。

2.1.1 稳定剂浓度的影响 在同一发泡剂浓度(如 8 g/L)情况下,实验研究不同气流量和稳定剂浓度变化对泡沫持液半衰期的影响。气流量分别为 7.0、10.0、13.0 m³/h,稳定剂质量浓度变化范围为 1~3 g/L,实验结果示于图 1。图 1 结果表明,泡沫持液半衰期随稳定剂浓度的增加而延长,稳定剂质量浓度由 2 g/L 提高至 3 g/L 时,持液半衰期(t)可达 380 min。实验中发现,稳定剂加入量超过 3 g/L 时,出现结块现象,导致稳定剂的溶解性能降低。安凯媛等^[11]的研究结果表明,持液半衰期一般控制在 40~60 min,持液半衰期太低不利于去污,太高又不利于操作。为此,推荐稳定剂的加入量为 2 g/L 左右,不宜超过 3 g/L。针对气流量为 7.0 m³/h、稳定剂质量浓度为 3 g/L 时,泡沫持液半衰期突然增大的原因以及实验中的结块现象有待深入研究。同时,从图 1 可以看出,气流量变化对持液半衰期的影响不明显。

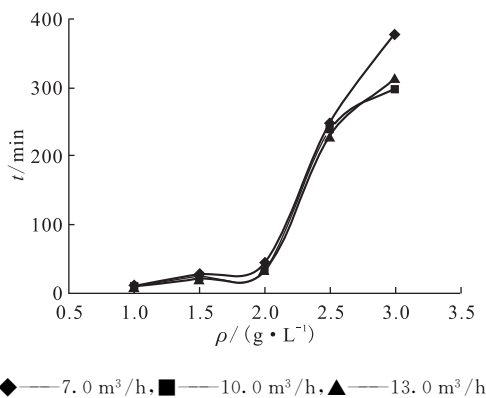


图 1 不同气流量下稳定剂质量浓度对持液半衰期的影响

Fig. 1 Influence of stability agent mass concentration on foam hold-up time under different air flow rate

2.1.2 发泡剂浓度的影响 在相同条件下,实验研究发泡剂浓度对持液半衰期的影响情况。稳定剂质量浓度为 2 g/L,气流量分别为 7.0、10.0、13.0 m³/h,发泡剂质量浓度为 6~15 g/L,实验结果示于图 2。图 2 结果表明:发泡剂浓度的增加对持液半衰期的影响不显著;不同气流量下,持液半衰期有一定的差别,气流量增大,泡沫持液时间呈现缩短的趋势。结合工程应用需要,去污泡沫的持液半衰期应大于 30 min,为此推荐发泡剂质量浓度为 8 g/L 左右。

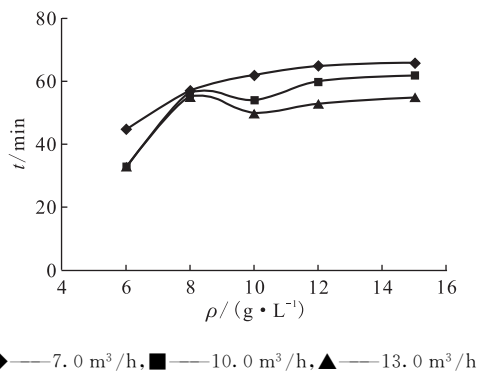


图 2 不同气流量下发泡剂质量浓度对持液半衰期的影响

Fig. 2 Influence of foaming agent mass concentration on foam hold-up time under different air flow rate

2.1.3 气流量的影响 气流量在一定范围内变化,是实验研究稳定剂和发泡剂浓度对持液半衰期影响的前提。前期实验研究中注意到,气流量变化范围较小(如 1.0 m³/h)时,其变化对持液半衰期的影响不显著,同时,受实验用流量计控制精度的影响,最终确定气流量的实验间隔为 3.0 m³/h。由图 1 得出,气流量由 7.0 m³/h 提高至 13.0 m³/h 时,不同浓度的稳定剂对持液半衰期影响较小;但是,图 2 的实验结果表明,发泡剂质量浓度在 6~15 g/L 之间变化时,高气流量条件下(如 13.0 m³/h),泡沫液的持液半衰期较低流量(如 7.0 m³/h)时缩短了 33 min。基于此,初步得出 7.0 m³/h 气流量较为适宜。

2.2 泡沫发泡性能影响因素研究

发泡比是表征泡沫液发泡能力的参数之一,是指停止鼓气时泡沫体积与所消耗液体的比值。

2.2.1 稳定剂浓度的影响 在上述研究推荐的发泡剂质量浓度(8 g/L)基础上,设定气流量分别为 7.0、10.0、13.0 m³/h,实验研究了稳定剂质量浓度为 1~3 g/L 时对泡沫液发泡能力的影响,实验结果示于图 3。图 3 结果表明,稳定剂浓度变化对发泡比的影响较小,质量浓度由 1 g/L 提高至 3 g/L 时,发泡比在 6~10 之间变化。基于安凯媛等^[11]的研究结果,发泡比是体现泡沫去污区别于其它化学去污方式(如酸、碱液去污)的重要方面,发泡比太大,泡沫含液量少去污力差。结合本研究的结果,如稳定剂质量浓度为 1 g/L 时,发泡比较大,但持液时间短(见图 1 结果,为 11 min),不利于实际应用;稳定剂为 3 g/L 时,虽然持液时间显著延长(380 min)、发泡比大,但泡沫的粒径较

大、泡沫分散,去污能力差^[11];而稳定剂质量浓度为 2 g/L 时,虽然泡沫液的发泡比最小,但持液时间适宜(50 min 左右),便于操作。基于此,推荐稳定剂的质量浓度为 2 g/L 左右。

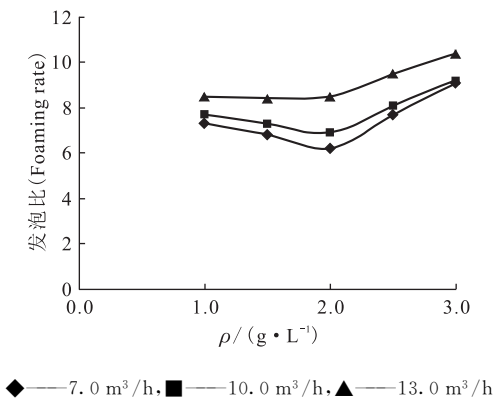


图 3 不同气流量下稳定剂质量浓度对发泡比的影响

Fig. 3 Influence of stability agent mass concentration on foaming rate under different air flow rate

2.2.2 发泡剂浓度的影响 在稳定剂浓度对发泡能力影响的研究基础上,实验研究发泡剂浓度变化对泡沫液发泡能力的影响。气流量分别为 7.0、10.0、13.0 m³/h,发泡剂质量浓度变化范围为 6~15 g/L,实验结果示于图 4。图 4 结果表明,发泡剂浓度变化对发泡比影响不显著,发泡剂质量浓度由 6 g/L 提高至 15 g/L 时,发泡比在 6~9 之间变化。为此,工程应用时,可依据实际去污需求,在保持一定发泡比的情况下,尽量降低发泡剂的加入量,以减少二次废物的产生量。由图 4 得

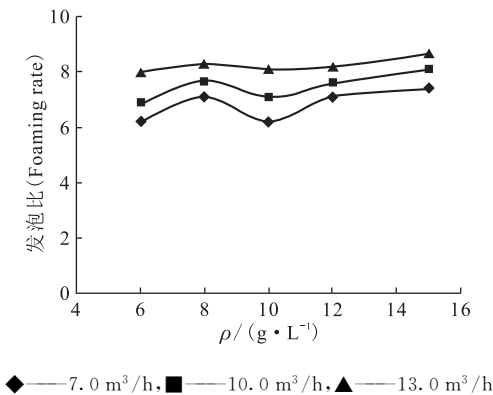


图 4 不同气流量下发泡剂质量浓度对发泡比的影响

Fig. 4 Influence of foaming agent mass concentration on foaming rate under different air flow rate

出,不同气流量下,泡沫液的发泡比有一定的差别,呈现气流量增大、发泡比增加的趋势。

2.2.3 气流量的影响 分析图 3 和图 4 的结果得出,气量流变化对发泡比有一定的影响,发泡比随气流量的增加呈现增大的趋势,气流量为 7.0 m³/h 和 13.0 m³/h 时,发泡比分别为 6 和 10 左右;该结果与气流量对持液半衰期影响结果(图 1 和图 2)相反。鉴于发泡比大,可导致泡沫去污能力降低,低气流量可提高泡沫的持液能力,进而增加泡沫与待去污表面的接触时间,提高去污效果,基于此,推荐工程应用时气流量为 7.0 m³/h 左右。

2.3 泡沫去污性能的影响因素研究

腐蚀深度是泡沫去污性能的代表参数之一。采用差量法计算试片的腐蚀失重量,即利用天平称量金属试片腐蚀前后的质量差,进而通过试片的表面积和密度常数计算得到平均腐蚀深度。平均腐蚀深度 $d(\mu\text{m})$ 的计算公式^[10]如下:

$$d = \Delta m / \rho \cdot S$$

其中: Δm 为试片的腐蚀失重量, g; ρ 为密度, g/cm³; S 为试片表面积, cm²。

综合稳定剂和发泡剂浓度变化对泡沫持液能力和发泡性能的研究结果得出,稳定剂浓度对持液半衰期的影响显著,是泡沫持液能力和发泡比的主要影响因素。基于此,实验研究稳定剂浓度变化和铝试片挂放位置不同对泡沫去污性能的影响情况,发泡剂质量浓度为 8 g/L,气流量为 7.0 m³/h,稳定剂质量浓度变化范围为 1~3 g/L,铝试片挂放位置距泡沫容器底部的高度(挂片高度)(h)范围为 30~120 cm,实验结果示于图 5。图 5 结果表明,挂片高度是影响腐蚀深度的主要影响因素,稳定剂浓度对泡沫去污性能的影响不显著。腐蚀深度随挂片高度的增加而降低,30 cm 时,最大腐蚀深度可达 9.3 μm 。经分析,其可能原因是底部挂片与泡沫接触时间长,该现象有待深入研究接触时间与腐蚀深度的关系加以证实。由图 5 得出,稳定剂浓度为 2 g/L 时,腐蚀深度为 6.9 μm ;稳定剂质量浓度由 1 g/L 增大至 3 g/L 时,30 cm 处挂片的腐蚀深度由 6.2 μm 增加为 9.3 μm ,均值约为 7.5 μm 。为此,结合稳定剂浓度对泡沫持液性能和发泡能力的影响结果,建议稳定剂加入量为 2 g/L 左右,不宜超过 3 g/L。

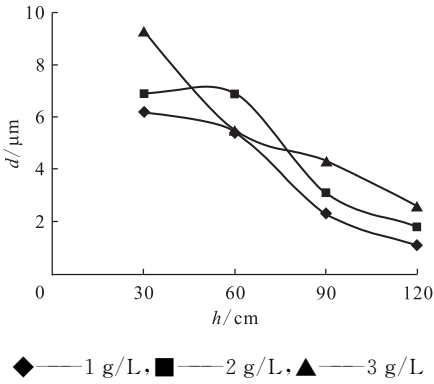


图 5 不同稳定剂质量浓度和挂片高度对腐蚀深度的影响情况

Fig. 5 Influence of corrosion depth of aluminum plate under different stability agent mass concentration and hanging height

3 结 论

影响去污泡沫性能的因素包括稳定剂浓度、发泡剂浓度、气流量和挂片高度。初步研究结果表明,稳定剂浓度是泡沫持液性能的主要影响因素,建议其加入量为 2 g/L 左右,不宜超过 3 g/L,但有待优化设计深入研究,以获取最佳加入量;发泡剂浓度和气流量是去污泡沫性能的次要影响因素,综合其对持液半衰期和发泡比的影响,推荐适宜的发泡剂浓度和气流量分别为 8 g/L 和 7.0 m³/h,在保证一定发泡比的情况下,尽量减少发泡剂的加入量和降低气流量,以减少二次废物的产生量和降低能耗;挂片高度是泡沫去污性能的主要影响因素,其机理有待深入研究证实。

参考文献:

[1] 罗上庚,张振涛,张华. 核设施与辐射设施的退役[M].

北京:中国环境科学出版社,2010:87.

[2] 唐金库,李军,吴文宏,等. 泡沫清洗在核设备去污中的应用[J]. 舰船防化,2011(3):16-19.

[3] 郭强,任宪文,谢建勋,等. 模拟后处理厂污染样品的泡沫去污技术研究[J]. 辐射防护,2001,21(4):250-254.

[4] Milind S P, Kartic C K. Stability of aqueous foams with poly additives [J]. J Colloid Interface Sci, 1994, 168: 333.

[5] Guthrie W S. Foam technology as a decontamination/waste minimization tool[C]. Augusta, GA(United States): Department of Energy Environmental Remediation Conference, 1993.

[6] Boissonnet G, Faury M, Fournel B. Decontamination of nuclear components through the use of foams[J]. Foams and Emulsions, 1995, 21: 323.

[7] Harris J M, Miller J R, Frazier R S, et al. A foam process for application of decontamination agents[C]. Niagara Falls, Canada: Decontamination of Nuclear Facilities; International Joint Topical Meeting ANS-CAN, 1982.

[8] Experowa D, Kolarov T. Interaction forces in thin liquid films stabilized by hydrophobically modified insulin polymeric surfactant[J]. Langmuir, 2006, 22: 5013.

[9] Sphany T, Dallas K. High stability foams for long time suppression of hydrocarbon vapors: US 5296164[P]. 1994.

[10] 刘志辉,王永仙,蒋婧. 凝胶去污实验[J]. 核化学与放射化学,2013,35(5):317-320.

[11] 安凯媛,游国强,梁宇. 去污泡沫粒径分析[J]. 辐射防护通讯,2013,33(2):18-22.

[12] 梁宇,程理,王旭东. 挡板射流式泡沫发生装置的研制[J]. 辐射防护通讯,2010,30(4):31-33.

[13] 郭强,冯声涛,崔慧玲,等. 泡沫去污废液水泥固化研究[J]. 辐射防护通讯,2001,21(5):31-34.