

放射性去污技术应用特点与发展方向

魏鑫, 张辉, 刘啸尘, 徐乐昌, 仇月双, 戴相南

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 放射性去污是保障核工业可持续发展的重要技术手段。放射性去污不仅关系到核电站和放射性矿产资源开发等设施运行管理过程的综合成本, 还关系到人员安全与社会环境安全, 应引起足够重视。在对国内外核设施退役与检修过程常用放射性污染清除技术总结的基础上, 分析了物理去污、化学去污、电氧化去污、微生物去污以及熔炼去污技术的使用条件和优缺点, 提出了放射性去污的技术痛点与发展方向。

关键词: 核设施; 辐射防护; 物理去污; 化学去污; 电氧化去污; 微生物去污; 熔炼去污

中图分类号: TL944 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0066-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.10.10

放射性去污是采用不同技术将放射性污染物从核设施表面、内部全部或部分去除的操作^[1-2]。其主要目的是使受污染设备与材料的放射性总量最小化或者降低放射性废物等级, 提高设备与材料的可重复利用率, 降低检修、退役等操作场所放射性水平与操作人员作业风险^[3-5]。放射性去污技术需求持续增长, 主要需求包括放射性矿产资源开发设备运维、相关设施退役阶段的放射性去污, 核电机组和核反应堆运维、相关设施退役放射性去污, 以及受污染固体废物清洁解控等。

1958年至今, 中国已建成了206座铀矿冶设施, 随着铀矿冶产业技术升级, 大部分铀矿冶设施处于停产、待退役阶段, 对低成本去污技术需求日趋旺盛^[6-7]。中国核设施每年产生约12 360 m³放射性固体废弃物, 其中30%可通过去污处理实现清洁解控^[8]。

由于放射性沾污的途径、形态、位置以及附着外在条件的不同, 形成了大量去污技术路线^[9], 包括物理去污、化学去污、电氧化去污、微生物去污与熔炼去污等。放射性去污并不是消除放射性核素, 而是通过一些方式转变放射性核素的存在形式, 以达到管理要求。笔者总结了放射性污染的来源与形态, 分析了去污技术类型、特点, 以及去污技术发展方向。

1 放射性热点来源与去污准则

1.1 放射性废物来源与种类

在天然放射性矿产资源开发和生产经营活动中, 会造成设施、设备的内外产生核素累积。在铀矿冶生产过程中, 采矿的掘进、装载、运输设备, 水冶的离子交换、淋洗、沉淀、压滤设施, 以及辐射防护的通风设备等, 由于与矿石接触会沾染天然放射性核素。在核燃料循环中, 水冶和铀矿开采过程中产生的放射性废物量最多。

1.2 表面放射性热点的形成特点

表面放射性热点的成因复杂, 其外在形态主要包括松散表面污染、氧化膜、腐蚀产物膜, 以及放射性浸润层等。材料本身的性质、运行过程中的压力和温度、介质的物化性质、停运时间的长短, 以及事故频次等都是影响表面污染物形成的重要因素。

材料表面与放射性核素结合形成热点, 有以下几种形式^[10]: 1) 依靠各类静电力, 如取向力、诱导力、色散力附着在表面, 从而形成非固定污染物; 2) 以化学吸附、离子交换或氢键形式而形成的固定性结构; 3) 核素扩散到材料内部或中子辐照内部元素, 从而活化形成的近表面层污染, 强结合态深层污染大多为该类型。

收稿日期: 2023-10-27

第一作者简介: 魏鑫(1996—), 男, 云南曲靖人, 硕士, 工程师, 主要从事环境工程领域相关工作。

通信作者简介: 徐乐昌(1964—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事环境工程与辐射防护领域相关工作。

附着在表层的污染可经过简单的物理方法清除,而氧化膜、腐蚀产物膜,特别是污染较深的表面热点很难除去。研究表明^[11-12],98%的放射性核素污染物存在于表面 10 μm 以内;不足 2%的放射性核素污染物存在于表面 10~40 μm 范围内,超过 40 μm 深度的放射性核素污染物不超过 0.1%。因此,应根据表污成因和对去污的预期效果,合理选择去污技术。

1.3 去污效果评价与去污准则

通常采用去污因子(DF)与去污率来评价去污效果。DF 是去污前后物体放射性活度之比,去污率通常用去污后表面污染计数率与去污前表面污染计数率之比来表示。为比较不同类型结构件表面污染的去除难易程度,可采用标准化试验程序,在待测试表面以⁶⁰Co、¹³⁷Cs 为特征污染物进行清洗去污测试,以最终残留计数率(FRC)来表达不同结构件表面的去污难易程度^[13]。

放射性去污工作应遵守国家法律法规,遵循国际准则,并严格按照相关标准及规定执行,保证辐射防护最优化原则。《中华人民共和国放射性污染防治法》《中华人民共和国核安全法》对放射性污染去除做了规定,在中华人民共和国境内从事相关活动应该遵守相关规定。国际原子能机构安全丛书《No. WS-G-2.1 安全导则》强调了去污的关键任务,在采取决策或选择去污路线时,应根据导则评价技术有效性。国际放射防护委员会(ICRP)相关报告指出了去污相关准则,中国《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》规定了去污工作的基本要求和辐射安全原则。放射性去污工作应保证辐射实践正当化、辐射防护最优化和个人剂量控制。

2 放射性去污技术类型与特点

根据去污原理,广义上去污技术可分为物理去污和化学去污。在去污过程中常根据待处理设施部件表面结构的复杂程度,将一种或多种方法结合使用或交替使用,从而达到较好的去污效果。在发展过程中逐渐形成了物理、化学和电化学去污等技术体系,此外熔炼去污技术也是对退役去污技术的重要补充。

2.1 物理去污技术

物理去污适用于落灰、浅层污染的放射性物质表面。物理去污具有工艺简单、去污效率高、成

本低等优势;但也存在二次污染多且不易控制,难以在复杂条件下应用,对工件材料损坏高等劣势。目前典型的物理去污方法有高压流体射流、擦拭、抛丸、干冰、超声波、激光去污法等^[14]。

2.1.1 擦拭去污技术

擦拭法去污最简单,用水或特定的化学溶剂擦拭、冲洗,以去除材料表面的附着物。在强化条件下,采用高压水、高压蒸汽、真空系统开展去污都是有效的去污方式。喷砂抛丸应用较广、成本低,在高压下采用流体将分散固体颗粒喷射到去污表面,利用磨料与材料表面间的研磨作用去除表面污染物,调整流体压力及固体颗粒的粒度可实现对表面磨蚀程度的控制^[15]。

用可压缩聚氨酯对管道内刮擦去污是对管道去污的有效方法,由美国 Girard 公司和 Knapp 公司提出的 Polly-Pigs(PIG)去污技术^[16]是一种典型的管道去污技术,常用于核设施退役领域。PIG 由聚氨酯材料制成,一般呈子弹形,径向收缩性强,利用压缩流体驱动,通过 PIG 与管道壁面间强大摩擦力清除污垢,在管道变径、歧管、弯头、阀门等处通过性良好,可实现不拆解去污。在核设施管道中试验表明,PIG 对不同类型管道具有不同去污效果,对致密氧化物去污因子为 6~15,对松散污染物去污因子可达 225^[17]。

2.1.2 干冰喷射去污技术

干冰喷射去污技术是利用压缩空气将干冰颗粒喷射在部件表面,利用干冰升华后强烈的吸热作用使部件表面急剧冷冻、催化爆裂,利用干冰升华过程体积急剧膨胀的效果破坏污染层结构,达到去污效果^[18]。中国工程物理研究院自主设计的干冰去污装置每小时能制备 30 kg 以上的干冰颗粒,喷出颗粒的速度为 477~525 m/s,去污因子达到 25^[19]。韩国原子能研究所(KAERI)研发的干冰与全氟化碳(PFC)结合的新型去污技术,可用于后辐射试验厂房、辐照材料试验厂房热示范热室的日常维护和整修^[20-21]。日本核燃料研发公司(PNC)开发的干冰与碳酸氢钠结合喷射的工艺装备,在动力反应堆开展了应用^[22]。德国汉诺威大学发明的激光加热与干冰喷射技术相结合的去污方法,先采用激光加热待去污区域,增大区域热效应;再使用干冰喷射,从而使结合层的结构剧烈变化达到去污目的。该方法更适宜于硬质塑料涂层的去除^[23]。

2.1.3 超声波去污技术

超声波清洗法是利用“空穴效应”原理去除污染物,通常需将待去污物件浸泡在液体槽中,加入水或去污剂增强去污效果。宁德核电采用移动式超声清洗设备在核电站开展了实践工作,不同部件去污因子为 6~270^[24]。意大利研究人员将 4 个主槽拼接组成新的超声去污装置,将加里利亚诺给水预热器管束切割成小段进行去污,去污后表面污染降至 0.3 Bq/cm²^[25]。

2.1.4 激光去污技术

激光去污是将高能量的激光束照射至污染设备表面,通过选择性消融、气化、热弹力、冲击波等作用去除表面污染^[26]。法国 AREVA 公司研制了一种自动化光纤激光去污装置,采用 1 064 nm 波长 Nd:YAG 激光器,在 300 W 功率下对阿格后处理厂的金属进行了表面去污试验,对 α 污染的去污因子为 100,对 β 、 γ 污染的去污因子可达 50^[27]。采用波长 248 nm 的 KrF 深紫外激光器对污染的开放管道进行的激光去污热试验表明,污染样品经 2 J/cm² 的激光照射后,表面污染从 21.26 Bq/cm² 降至 0.35 Bq/cm²,去污因子约为 60^[28]。

2.2 化学去污技术

化学去污原理是污染器件表面与化学试剂发生溶解、氧化还原、配合、钝化等作用,使污染物从物件表面移除。常用的化学试剂有氧化还原剂、酸、碱、配合剂、表面活性剂等^[29],可单独使用或混合使用,还可将化学试剂制成发泡剂、乳胶、可剥离膜等形式使用。化学去污具有耗时短,可对复杂形貌表面进行去污,去污成本低和操作简便等优点;但也具有产生大量二次污染、处理成本高,去污损伤不易控制等缺点。化学去污方法包括有机或无机酸处理法、配合处理法、化学凝胶法、化学泡沫法和挥发/低温热解吸法等^[30]。

2.2.1 有机酸去污技术

美国萨凡纳河工厂用 2.6 g/L 的磷酸亚铁和 2% 的草酸混合在换热器中反应,再用浓碱中和并进行去污,去污系数为 3~20^[31]。美国橡树岭国家实验室采用草酸和过氧化氢混合体系,对于加热超过 200 °C 的钢材的去污系数高达 1 000。将硝酸与该体系混合可去除铯、锆污染物,去污系数达 1.3~4.5。试验还发现在碱性高锰酸钾预处理后,采用柠檬酸+草酸+缓蚀剂体系继续进行去

污,去污效果很好^[32]。

原子能院使用 H₃PO₄ + NP(HNO₃ + KMnO₄) + 草酸对 101 堆一回路进行去污处理,该去污法二次废物量较大^[33];使用 FL(NaF + HNO₃ + 缓蚀剂)-AP(碱性高锰酸钾)系列高效去污剂可对乏燃料溶解池有效去污^[34]。

核工业北京化工冶金研究院研制了一种高效无腐蚀、可重复利用、去污率高的氨基乙酸和膦类混合去污剂,并将其与超声波联用协同去污^[35],去污率约为 99%。

2.2.2 无机酸去污技术

无机酸与氧化还原法相结合的去污技术应用较广。氧化还原法主要使用一些氧化剂与金属表面发生氧化还原反应,从而对污染表面进行去污处理。美国汉福特实验室采用氧化还原处理法,对生产铀的污染设施用 1% H₃BO₃ + 57% HNO₃ 进行去污,去污系数可达 104^[36]。中辐院董瑞林等人^[37]使用硼氟酸对 U 和 Th 污染的不锈钢污染管道去污 30 min,去污率达 85%;用该方法对被天然铀污染的器件进行去污,2 h 后其去污率达 87%。

目前,中国应用较多的去污剂主要是氢氧化钠+高锰酸钾、EDTA、硝酸+高锰酸钾等^[38],这些去污剂通常需要在高温条件下才能发挥很好的去污功效,并且应采取多次浸泡模式。

2.2.3 泡沫去污技术

泡沫去污法是在施加压力条件下向物体表面喷试剂形成泡沫层,待试剂与污染表面接触并发生反应后,将泡沫冲洗除去,实现对污染表面的去污^[39]。该法二次废物产生量少,适用于竖立的墙壁和复杂结构工件的表面去污。该法早在 1960 年首次被 Ayres 用于放射性污染去污领域^[40]。管海洋等在压水堆核电站针对换料水池应用了泡沫去污技术;与传统去污技术相比,泡沫去污技术对换料水池的去污效果更优,泡沫去污二次废物产生量减少 50% 以上,缩短了工期,去污效率比高压水枪冲洗高,去污系数由原来的 30 提高到 83^[41]。

2.2.4 凝胶去污技术

凝胶去污法是将化学凝胶喷涂到污染表面,长时间接触后再用水进行冲洗以除去凝胶,从而实现对污染表面的去污^[42]。目前最常见的配方为硝酸+羧甲基纤维素+草酸+氢氟酸+硝酸铝

十非离子表面活性剂体系,凝胶去污法具有二次废物产生量少和去污效果好等优点,但该去污工艺流程比较复杂^[43]。

可剥离膜去污法是将各种润湿剂、乳化剂和配合剂混合制成一种聚合物膜,然后利用其良好的去污性能对物体表面去污。目前最常见的可剥离薄膜有聚醋酸乙烯酯系列、聚乙烯系列和聚丙烯酸酯系列。该法对于表面光滑的物体的去污效果良好,但对于一些多孔或者表面粗糙以及深度污染的物体去污效率一般。韩国原子能研究所杨熙曼^[44]采用含磁性吸附剂的可剥离膜,对¹³⁷Cs在不锈钢表面的去除效率达94.05%。核工业北京化工冶金研究院研发的聚乙烯醇基可剥离膜去污剂^[45]可用于去除放射性污染,其组分简单,成膜时间在18 h左右,该放射性去污膜的去污率在99.5%左右。

2.3 电化学去污技术

电化学去污法是以污染部件为阳极、电解槽为阴极,通过电解或电抛光使污染物外表面较均匀地溶解,进而使污染物质转移至电解液中,从而达到去污的技术手段。该法适用于核退役过程中一些污染较深的金属表面的去污,去污效果好。电化学去污具有去污深度大、去污效果好、去污速度快、成本可控、二次污染低、可应用于复杂结构部件,以及具有遥操作等优点;但该方法仅适用于金属件去污,要求去污操作场地具备良好的通风环境。该法具有一定的操作技术难度。

使用40%~85%的磷酸,在电极电压8~12 V、电流密度5~25 A/cm²下进行电化学去污,电解10 min后,受氧化严重污染部件的表面污染降到本底值^[46]。D. E. Wedman^[47]在碱性电解液中进行了电化学放射性去污研究,去污率达95%。沈阳中科腐蚀控制工程技术有限公司自主研发了一种去污装置^[48],兼备超声波去污和电化学去污的优点,在极间距30~50 mm、电流密度0.2~0.8 A/cm²条件下,对某核电厂一回路管道进行试验,去污因子达100。

2.4 其他去污技术

在放射性去污方面,针对特定的去污对象还开展了紫外/臭氧光活化、超临界萃取、微生物法和熔炼去污等去污技术研究。

紫外/臭氧去污技术主要用于油脂、溶剂清洁解控,或者用于氚污染器具去污。通过紫外光作

用,由氧气产生臭氧,臭氧的强氧化性可激活、分解污染物分子。中国工程物理研究院团队对氚污染不锈钢、铜和铝进行紫外线、臭氧、加热及联合(紫外线、臭氧与加热)去污的试验表明,500 ℃下采用172 nm的紫外线去污4 h,对不锈钢表面氚的去污率可达99.2%^[49]。

二氧化碳超临界萃取也是一种去除放射性有机废物的有效技术,以二氧化碳作为介质,在32.3 ℃下采用8 MPa压力一次性溶解有机污染物^[50],将放射性有机物有害组分从材料中提取出来;降低温度和压力,二氧化碳可将溶剂与有机污染物有效分离,且二氧化碳可循环使用。

微生物去污法是利用生物降解作用进行污染物去除的一种方法,一般应用于污泥池、船舱中矿物油、醇、酚等特定的去污场景^[51]。

熔炼去污是通过熔融金属来进行放射性去污的方法,将受污染的金属与助熔剂放在熔炉内一起熔炼,使污染金属中大量放射性核素聚集到滤尘和炉渣中;或采用有效的炉衬配方来吸附部分放射性核素,使受污染的金属废物达到净化处理,实现资源回收利用^[52]。美国田纳西州的SEG处理厂拥有1套7.2 MW的高效感应电炉,可以处理低放金属。使用油、橡胶、可燃物将废金属预热至1 182 ℃,再加热至1 565 ℃进行熔炼,可处理不锈钢、碳钢、镍、铬等熔点低于1 650 ℃的受污染金属,其产品将有限地用于核工业^[53]。湖南核工业宏华机械有限公司^[54]采用熔炼去污处理可使放射性污染金属达到解控水平,且证实了熔炼去污技术具有很好的应用价值。

3 放射性去污技术痛点与发展趋势

3.1 放射性去污技术痛点

目前还存在放射性污染形成和去除机理尚不完全清楚,技术装备集成度不高,成熟度不足,以及对设备所产生的损害难以控制等一系列问题。

1) 缺乏遥操作技术装备。在核设施放射性去污操作中,由于较高的放射性污染水平,以及松散的沾污状态,极易在扰动下形成无法控制的放射性气溶胶,进而对操作人员造成健康危害。

2) 缺乏原位在线无损去污技术装备。从核设施放射性去污操作实践来看,相关设施普遍存在结构复杂、拆解困难,特别是建构筑物、大型设备、大型容器等具有结构复杂、形貌多样、放射性污染

水平和污染深度不一等特点,这为去污退役处置带来困难。

3)专用于放射性去污技术集成度普遍不高。截至目前,对设备与设施放射性污染去除开展了广泛的实践工作,但未形成成熟完整的去污技术体系。由于去污对象材质、结构与形态复杂,污染机理尚不清晰,污染形成的形态多元,所以单一或者简单几类技术组合不能达到稳定高效的去污目的。一套技术方法在某一现场操作可行,而在另一现场却表现不佳。

4)去污成本普遍偏高。在去污实践过程中,通常是边研究边实践,造成去污成本较高。在具体工程实施过程中,一般需要针对性验证某组分化学去污剂的有效性、验证某强化设备的有效性并优化去污控制参数等,从而造成去污成本升高。

5)去污过程的二次污染物与次生危害。去污过程所伴随的二次污染与新增生产安全风险是放射性沾污设备和设施去污过程的难点。对弱结合态松散灰尘的去污过程会伴随放射性灰尘与气溶胶的二次扬尘;射流、干冰去污过程新增机械损伤与冻伤操作风险;激光去污过程对场所人员存在灼伤风险;酸性化学剂去污过程存在对结构件化学隐形损害以及携带有害离子进入系统的风险;机械刮擦去污过程等存在对结构件表面损伤深度控制不精准、造成结构件损伤的风险等;可剥离膜等存在揭膜不连续、残留损害系统内部、废弃膜的鉴别与处置等问题。

6)去污过程复杂,耗时长。去除放射性污染通常耗时较长,去污时间不可控。通常情况下,需要权衡去污效果与去污时间,有时考虑去污时间需要降低对去污效果的预期。为了尽可能降低检修人员剂量,并对尽可能多的沾污设备提前去污,不得不对系统进行深度分隔和离散,寻求更大去污操作空间,系统的拆散与再组装消耗更多时间。可剥离膜在喷涂后通常需要4 h以上才能干化成膜,通常还需要十几个小时将污染物转移到可剥离膜上;在未达到预期效果情况下需要重复上述操作,去污时间更长。化学去污、或者气相脱附去污等操作都需要较长的系统时间,去污时间与效果基本是线性相关,想要达到更好的去污效果不得不投入更长的去污时间。

7)去污过程对系统结构件损害程度不可控。去污操作时,在尽量降低操作人员剂量的前提下,

除最终退役处置外,要求尽量降低去污实践对系统结构件的损害。

3.2 放射性污染表面去污技术发展趋势

放射性去污技术发展方向易受到政策规范影响,因此应该加强核设施运维、清洁解控配套政策研究。放射性去污技术应立足国内差异化需求,与各类遥操作技术集成,降低操作人员的受照射风险。

主要技术发展趋势有:1)将原位在线去污技术与装备研发作为重要突破方向,特别是适用于核电厂一回路检修去污的专业化装备;2)通过技术集成开发稳定高效、适用性强的通用去污技术与装备;3)加强专用去污剂的研究,以温和、高效、低成本去污剂作为研究方向,进一步控制去污成本;4)同步开发去污过程所产生的液态、固态与气态二次污染物控制与处置技术装备;5)针对去污应用场景,结合去污与生产检修、退役工程实施等需求,压缩去污操作时间;6)为了降低去污对非退役目的设备、结构件等造成的不确定性损害,应逐步将在线抑制污染形成的“抗污”技术作为去污技术的重要补充。

4 结语

放射性去污是天然放射性矿产资源开发利用、核电机组与核反应堆运维与退役,以及受污染固体废物清洁解控过程不可缺少的环节。尽管目前国内外已经研究和实践了众多物理、化学、电化学去污技术,以及辅助性去污技术,但仍存在遥操作装备不足、去污耗材装备成本高、去污效果不稳定、二次污染大等问题。与遥操作技术相结合的干冰去污、电化学去污、多技术要素集成的在线去污技术将是放射性去污技术的主要发展方向。

参考文献:

- [1] 李江波,李鸿展,谢凌,等.核设施化学去污技术的研究现状[J].铀矿冶,2010,29(1):41-44.
- [2] XU L J, MENG X, LI M, et al. Dissolution and degradation of nuclear grade cationic exchange resin by Fenton oxidation combining experimental results and DFT calculations [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361: 1511-1523.
- [3] 艾立梅,徐飞.放射性污染修复技术的伦理挑战与应对[J].科技导报,2022,40(19):117-128.
- [4] 李焯,孙宇,张东,等.核设施通风管道干冰喷射去

- 污实验研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(S1): 164-167.
- [5] 赵世信. 反应堆工程退役去污[J]. 化学清洗, 1994, 10(1):12-16
- [6] 程琦福,徐乐昌,颜秀灵,等. 铀矿采冶设施退役治理标准探讨[J]. 铀矿冶, 2018, 37(2):130-134.
- [7] 刘宇. 铀矿冶设备不同材质表面放射性污染规律及去污工艺研究[D]. 衡阳:南华大学, 2019.
- [8] 蒋磊,王昭,罗劲松. 某核电厂放射性固体废物处理最小化实践[J]. 辐射防护通讯, 2020, 40(2):35-39.
- [9] 董瑞林,王丽红. 低水平放射性废物和混合废物的商用处理技术(四)[J]. 辐射防护通讯, 1999, 19(5): 35-42.
- [10] 罗上庚,张振涛,张华. 核设施与辐射设施的退役[M]. 北京:中国环境出版社, 2010:75-91.
- [11] LIU Y D. Event and community development: Planning legacy for the 2008 european capital of culture, liverpool[J]. Urban Science, 2017, 1(4): 39-45.
- [12] RAMESH C, MURUGESAN N, GANESAN V, et al. Studies on dissolution behavior of the surface layer of sodium-exposed SS 316LN in decontaminating formulation using PEMHS[J]. Nuclear Technology, 2017, 197(1):99-109.
- [13] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 放射性污染表面去污第 1 部分: 试验与评价去污难易程度的方法: GB/T 14057.1—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [14] 邹树梁,徐守龙,杨雯,等. 核设施退役去污技术的现状及发展[J]. 中国核电, 2017, 10(2):279-285.
- [15] MATTEUCCI P, CEPOLINA F. A robotic cutting tool for contaminated structure maintenance and decommissioning[J]. Automation in Construction, 2015, 58:109-117.
- [16] 章琴. 石油化工管道 PIG 清洗技术及运用研究[J]. 云南化工, 2021, 48(7):154-156.
- [17] 王东海. PIG 清洗技术在反应堆退役管道中的应用研究[J]. 清洗世界, 2005(1):7-10.
- [18] TANG S, ZHOU P, WANG X, et al. Design and experiment of dry ice cleaning mechanical arm for insulators in substation [J]. Applied Sciences, 2020, 10(7):2461.
- [19] 李焯,谭昭怡,张东,等. 干冰喷射去除表面放射性污染技术研究[J]. 辐射防护, 2018, 38(2): 142-147.
- [20] KIM G N, PARK U R, KIM S S, et al. Precipitation-filtering technology for uranium waste solution generated on washing-electrokinetic decontamination[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 286:27-35.
- [21] LONG Y, BAI F, ZHANG Y, et al. Impacts of ultrasound on oxide removal-an attempt towards acid-free cleaning[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 57:1-11.
- [22] 陈平,张瑞谦,段振刚,等. 面向不同先进反应堆应用的新型不锈钢包壳研发进展[J]. 中国基础科学, 2021, 23(4):1-8.
- [23] KAISER S, COUSSEAU F, BRAUN J, et al. Selective removal of radioactive decontaminated highly reinforced concrete in the deconstruction of nuclear power plants[J]. Bautechnik (Berlin), 2018, 95(6):420-425.
- [24] 陈坚. 移动式超声波去污装置在核电站的应用实践[J]. 辐射防护通讯, 2011, 31(4):40-42.
- [25] PILO F, FONTANI E, AQUARO D. Clearance of BWR steam piping by off line chemical decontamination[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 269:317-322.
- [26] ZHANG B C, JIA X J, LI F Y, et al. Research on the effect of molten salt ultrasonic composite cleaning for paint removal[J]. ACS Omega, 2019, 4(16):17072-17082.
- [27] MOGGIA F, LECARDONNEL X, DAMERVAL F. Surface decontamination using laser ablation process-12032[C]//Waste Management 2012 Conference. US:Phoenix, 2012.
- [28] 高智星,李静,马梅花,等. 放射性污染金属表面的激光去污[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会 2017 年学术年会论文集:第 8 册. 北京:中国原子能出版社, 2017: 232-240.
- [29] 冯立,金永东,夏传琴,等. 铀污染的不锈钢表面去污方法研究[J]. 化学研究与应用, 2001, 13(6): 703-705.
- [30] MA L, WANG J, HAN L, et al. Research progress of chemical decontamination technology in the decommissioning of nuclear facilities[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(10): 57-61.
- [31] LEE J, KIM K, KIM Y S. A study on the NF_3 plasma etching reaction with cobalt oxide grown on inconel base metal surface[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39:1145-1159.
- [32] KORYAKOVSKIY Y S, DOILNITSYN V A,

- AKATOV A A. Improving the efficiency of fixed radionuclides' removal by chemical decontamination of surfaces in situ[J]. Nuclear Energy and Technology, 2019, 5(2):155-161.
- [33] GURAU D, DEJU R. Radioactive decontamination technique used in decommissioning of nuclear facilities[J]. Romanian Journal of Physics, 2014, 59(9/10):912-919.
- [34] 何佳恒, 钟文彬, 罗顺忠, 等. 核设施用去污技术[J]. 辐射防护通讯, 2007, 27(5):24-27.
- [35] 仇月双, 魏鑫, 徐乐昌. 一种铀放射性去污剂、一种含铀器件的除铀方法:202110992257. X[P]. 2021-10-29.
- [36] CHOI W S, CHO S H, LEE Y J, et al. Separation behavior of nickel and cobalt in a LiCl-KCl-NiCl₂ molten salt by electrorefining process [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2020, 866:114-175.
- [37] 董瑞林, 张渊, 丘丹圭, 等. 硼氟酸用于污染不锈钢去污的可行性研究[J]. 辐射防护, 2002(3):182-187.
- [38] 陆春海, 孙颖. 化学去污技术的发展及其在核设施退役中应用[J]. 环境技术, 2002, 20(1):25-32.
- [39] YOON I H, YOON S B, SIHN Y, et al. Stabilizing decontamination foam using surface-modified silica nanoparticles containing chemical reagent; foam stability, structures, and dispersion properties [J]. RSC ADVANCES, 2021, 11(3):1841-1849.
- [40] 徐乐瑾, 沈慧怡, 杨军. 核设施退役现状及技术研究展望[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(10):65-76.
- [41] 管海洋, 陈健波, 王小平, 等. 泡沫去污技术在反应堆水池去污中的应用[J]. 辐射防护通讯, 2018, 38(1):19-23.
- [42] JUNG C H, CHOI W K, MOON J K. Effect of chemical formulations for uranium decontamination by chemical gels [J]. Asian Journal of Chemistry, 2016, 28(6):12-18.
- [43] 刘星浩. 铁基材料表层腐蚀性自脆型去污剂制备及性能研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2019.
- [44] YANG H M, PARK C W, LEE K W. Enhanced surface decontamination of radioactive cs by self-generated, strippable hydrogels based on reversible cross-linking[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 362:72-81.
- [45] 仇月双, 魏鑫, 徐乐昌. 一种聚乙烯醇可剥离膜放射性去污剂及其使用方法:202110992492. 7[P]. 2021-10-08.
- [46] PURKIS J M, WARWICK P E, GRAHAM J, et al. Towards the application of electrokinetic remediation for nuclear site decommissioning[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413:125-131.
- [47] WEDMAN D E, LUGO J L. Electrochemical decontamination of metallic wastes[J]. Los Alamos Science, 2000, 26:453-453.
- [48] 臧哈宇, 陈博, 金伟, 等. 一种可移动式电化学去污设备和去污工艺:201910090061. 4[P]. 2019-05-03.
- [49] 谢云, 石正坤, 吴涛. 氟污染不锈钢、铜、铝金属干法去污研究[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(10):1746-1750.
- [50] 王昕彤, 代洪静, 王四芳. 可燃放射性废物超临界水氧化处理技术[J]. 一重技术, 2021(2):8-13.
- [51] ELKHATAT A M. Recent trends of microbial decontamination for occupational, industrial and domestic applications[J]. Bulletin of the National Research Centre, 2022, 46(1).
- [52] 张根, 周进, 李利, 等. 放射性污染金属再循环、再利用处理工艺研究[J]. 新型工业化, 2022, 12(8):230-234.
- [53] 杨洁, 杨彪, 赵杨军, 等. 放射性废金属熔炼去污分配系数研究[J]. 四川环境, 2019, 38(1):125-131.
- [54] 陈安全. 铀矿冶放射性污染金属熔炼去污及再生利用[J]. 铀矿冶, 2011, 30(2):95-99.

(下转第79页)

