

文章编号: 0258-0926(2021)03-0193-04; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0193

# 面向强放热室退役的高效复合去污技术研究

贾昊鹏<sup>1</sup>, 滕磊<sup>1,2\*</sup>, 王帅<sup>1,2</sup>, 王小兵<sup>1</sup>

1. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213; 2. 四川省核设施退役及放射性废物治理工程实验室, 成都, 610213

**摘要:** 强放热室作为反应堆材料辐照检验的配套设施, 其辐射水平高、结构复杂、去污难度较大。针对强放热室退役不锈钢壳体去污的特殊性和复杂性, 开展了高压水射流去污、可剥离膜去污和机械打磨去污 3 个单项去污试验和去污工艺试验研究, 并创新性的提出了一种强放热室不锈钢壳体高效复合去污工艺。经工程去污实践验证, 去污后热室不锈钢覆面表面污染水平平均低于 40 Bq/cm<sup>2</sup>, 去污因子最高达 110 以上, 达到了国内先进水平。热室高效复合去污技术的研发解决了强放热室不锈钢壳体表面去污的技术难题, 降低了退役阶段工作人员的受照剂量, 保护了工作人员和环境的安全, 具有显著的经济、社会效益。

**关键词:** 热室; 不锈钢覆面; 复合去污

**中图分类号:** TL944 **文献标志码:** A

## Research on Efficient Compound Decontamination Technology for Decommissioning of Highly Radioactive Hot Cell

Jia Haopeng<sup>1</sup>, Teng Lei<sup>1,2\*</sup>, Wang Shuai<sup>1,2</sup>, Wang Xiaobing<sup>1</sup>

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;

2. Sichuan Engineering Laboratory for Nuclear Facilities Decommissioning and Radwaste Management, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** The highly radioactive hot cell is used as an auxiliary facility for the irradiation inspection of reactor materials, and the hot cells are with high radiation level, complicated structure and great difficulty in decontamination. In view of the particularity and complexity of the decontamination of the decommissioned stainless steel shell in the strong heat release chamber, this paper is carrying out three single-item decontamination tests and decontamination process test studies on the high-pressure water jet decontamination, the strippable film decontamination and the mechanical polishing decontamination. On the basis of this, an innovative composite decontamination process for stainless steel shells in a strong heat release chamber was innovatively proposed. The engineering decontamination practice verified that, the average level of contamination on the surface of the stainless steel cladding after the decontamination is below 40 Bq/cm<sup>2</sup>. The factor is as high as 110 or more, reaching the domestic advanced level. The research and development of the high-efficiency compound decontamination technology in the hot cell solves the technical problem of the decontamination of the stainless steel shell surface in the highly radioactive hot cell, reduces the exposure dose of workers in the decommissioning stage, protects the safety of workers and the environment, and has significant economic and social benefit.

**Key words:** Hot cell, Stainless steel coating, Compound decontamination

## 0 前言

强放热室作为反应堆材料辐照检验的配套设

施, 主要用于各种新型燃料元件和材料的辐照检验和各种热性能的测定、元件组件考验和各种辐

收稿日期: 2020-04-28; 修回日期: 2020-05-25

作者简介: 贾昊鹏 (1975—), 男, 副研究员, 现主要从事核设施退役及三废治理技术的研究, E-mail: 2984907468@qq.com

\*通讯作者: 滕磊, E-mail: tenglei0403@126.com

照装置的解体切割加工、高强度同位素分装等<sup>[1]</sup>。为避免在长期的使用过程中，放射性核素对建筑结构的渗透、污染，通常在热室内表面设计有一层不锈钢壳体作为覆面。随着反应堆接近其设计寿期，热室在完成其历史使命后也面临着退役，退役过程涉及到大量的放射性操作，因此需要可行的去污技术和一套良好的去污工艺有效保证退役活动的辐射安全。

由于强放热室具有辐射水平高、壳体表面污染严重、核素成分与结构复杂、空间狭小、限制因素较多等特点，其去污难度较大。目前国内尚未见针对热室不锈钢壳体去污技术的相关研究<sup>[2]</sup>。针对大面积不锈钢板的去污，主要采用泡沫去污、化学去污等<sup>[3-4]</sup>，这些去污方式的去污效率较好，但是去污装置较大，不适宜在热室这种狭小空间内展开；同时，去污后含有化学试剂的二次废液处理难度较大，无法依托热室配套的废液处理系统收集处理。

本文经调研分析后选取了可剥离膜去污、高压水射流去污和机械打磨去污 3 种去污方式，从去污机理、去污因子影响参数、去污工艺等多方面针对热室不锈钢壳体去污开展研究。

## 1 去污技术

本文经调研分析后选取了高压水射流去污、可剥离膜去污和机械打磨去污 3 种去污技术。

### 1.1 高压水射流去污

高压水射流去污过程是一种能量相互转化过程，水通过增压器/增压泵后，机械能转化为高压水的压力势能<sup>[5]</sup>。高压水射流去污技术主要针对不锈钢壳体污染层表面松散污染或部分表面深度污染。

影响高压水射流去污效果的工艺参数包括压力、流量、去污时间、温度、喷射距离、喷射角度等<sup>[6-7]</sup>。本文针对压力、流量、去污时间、喷射距离这 4 项对于高压水射流去污效果的影响开展了试验研究，试验结果表明，随着喷射水射流压力的升高、去污时间的延长，去污因子逐渐变大，成近似正比关系；随着水流量的升高、喷射距离的增加，去污因子逐渐变小，成近似反比关系。

### 1.2 可剥离膜去污

可剥离膜去污的机理主要包括以下 3 个方

面：表面吸附作用，涂料被喷刷到设备表面后，其自身的表面吸附力将松散的污染物吸附到涂料中，并在成膜过程中将污染物结合在膜中；粘力作用，其主要是依靠涂料自身的黏度将设备表面的污染物粘住，最终把这些污染物质富集于膜上；化学结合，可剥离膜中的官能团与某些离子状态污染物发生化学结合<sup>[8-9]</sup>。影响可剥离膜去污效果的因素主要有污染层表面的酸度、可剥离膜溶液的涂布量、金属离子浓度、可剥离膜溶液的厚度以及可剥离膜溶液的配方组成等。

本文根据前期的调研结果，配比了 3 种可剥离膜溶液，分别为络合型、高黏型、高固含量型。采用这 3 种可剥离膜溶液，分别研究了不同因素对可剥离膜溶液去污效果的影响。试验结果表明，酸度、金属离子浓度对去污效果均无显著影响；适当的增加可剥离膜溶液的涂布量，可显著提高去污率，在此基础上，继续增加涂布质量，去污率则无明显变化；络合型的可剥离膜溶液形成的膜机械性能好，较柔韧，去污效果优异。

### 1.3 机械打磨去污

机械打磨去污是通过打磨片或打磨头与不锈钢壳体表面摩擦，将壳体污染层剥离的过程。机械打磨法主要用于局部热点的去污，比如焊缝、边角、受酸碱腐蚀的局部等。经过试验对比分析，BOS-100 型角向磨光机<sup>[10]</sup>更适合热室不锈钢覆面局部热点的机械打磨去污，平均打磨速率约为 1.95 mm/s。

## 2 去污试验

本文通过单项去污试验研究，已经获取了高压水射流去污、可剥离膜去污和机械打磨去污的关键参数，确定了热室内可用的单项去污工艺。在此基础上，针对热室内大面积不锈钢壳体去污需求，通过对不同去污技术进行组合研究，以获取在实际热室内可用的去污技术。

本文依托中国核动力研究设计院某强放热室开展复合去污试验。根据源项调查结果，选择污染水平相近的墙地面区域作为试验对象，并划分为 4 个区，分别为墙面 I 区、地面 I 区、墙面 II 区、地面 II 区，这 4 个区的初始  $\beta$  表面污染水平分别为 60.9、606.9、53.9、590.9 Bq/cm<sup>2</sup>。采用 2 种方案进行试验：

(1) 方案一。采用高压水射流去污+可剥离膜去污+机械打磨去污的复合去污工艺对热室不锈钢覆面的墙面区、地面区进行去污，分别记录高压水射流去污工艺、可剥离膜去污工艺去污后的污染水平。

(2) 方案二。采用可剥离膜去污+高压水射流去污+机械打磨去污的复合去污工艺对热室不锈钢覆面的墙面Ⅱ区、地面Ⅱ区进行去污，分别记录可剥离膜去污工艺、高压水射流去污工艺去污后的污染水平。

### 3 数据分析

采用上述试验方法，获得试验过程中墙、地面的表面污染水平，如表1所示。

从表1中可看出：

(1) 4个区经高压水射流去污后的去污因子的平均值为8.86，小于经可剥离膜去污后的去污因子的平均值(43.55)，因此可剥离膜去污能力优于高压水射流去污能力。

(2) 采用方案一对墙面Ⅰ区、地面Ⅰ区去污后的 $\beta$ 表面污染水平分别为0.51、2.84 Bq/cm<sup>2</sup>，采用方案二对墙面Ⅱ区、地面Ⅱ区去污后的 $\beta$ 表面污染水平分别为0.30、0.76 Bq/cm<sup>2</sup>（机械打磨去污是作为备用的一种去污手段，不论是方案一还是方案二，在去污后的表面污染水平满足要求后，就不再使用机械打磨去污），综合看，方案二去污后的表面污染水平略低，但相差不大。

(3) 对于墙面Ⅰ区、地面Ⅰ区，直接采用高压水射流去污后的 $\beta$ 表面污染水平分别为3.82、89.5 Bq/cm<sup>2</sup>，再采用可剥离膜去污后的 $\beta$ 表面污染水平分别为0.51、2.84 Bq/cm<sup>2</sup>，可以看出，使用高压水射流可以去除墙面的大部分污染，但对地面的去污效果较差。

(4) 对于墙面Ⅱ区、地面Ⅱ区，直接采用可剥离膜去污后的 $\beta$ 表面污染水平分别为1.40、6.11 Bq/cm<sup>2</sup>，再采用高压水射流去污后的 $\beta$ 表面污染水平分别为0.30、0.76 Bq/cm<sup>2</sup>，可以看出，可剥离膜去污已将墙地面大部分的表面污染去除，可剥离膜去污法的去污效果较好；在使用高压水射流后其表面污染水平再次降低，可能是可剥离膜剥离不全面，使用高压水射流可去除残留物。

综合2种方案的去污效果，同时考虑到可剥离膜喷涂装置无法对热室不锈钢壳体顶面进行远距离喷涂，且热室内0.5 m以上的墙面涂刷有防腐漆（漆面和不锈钢面的可剥离膜配方不同）。此外，使用高压水射流对顶面去污会对地面造成交叉污染。因此，在2种复合去污工艺去污结果相差不大的情况下，确定了最终的复合去污技术方案为：首先使用机器人辅助高压水清洗装置对热室不锈钢覆面远距离整体喷射去污，去除表面松散污染；然后使用热室机械手辅助可剥离膜喷涂装置对墙面一定高度以下及地面污染较严重的区域进行大面积去污，去除表面深度污染；最后使用角磨机对污染较严重的点进行机械打磨去污，去除不锈钢壳体深层污染。

### 4 工程验证

将高放设备移除后，采用最终确定的复合去污技术方案对强放热室进行大面积的工程去污验证。首先分别采用高压水射流去污法和可剥离膜去污法去污，然后对热室内不锈钢壳体的表面污染进行普查，最后根据普查结果进行了机械打磨去污。去污前后热室不锈钢壳体表面污染水平如表2所示。

从表2中可以看出，经过高压水射流去污、

表1 去污前、后墙地面的 $\beta$ 表面污染水平

Tab. 1 Surface Contamination Level of Pre-Decontamination and Decontaminated Walls and Floors

方案一			方案二		
去污参数	墙面区	地面区	去污参数	墙面区	地面区
高压水去污前污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	60.90	606.90	可剥离膜去污前污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	53.90	590.90
高压水去污后污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	3.82	89.50	可剥离膜去污后污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	1.40	6.11
高压水去污因子	15.94	6.78	可剥离膜去污因子	38.50	96.71
可剥离膜去污前污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	3.82	89.50	高压水去污前污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	1.40	6.11
可剥离膜去污后污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	0.51	2.84	高压水去污后污染水平/(Bq·cm <sup>2</sup> )	0.30	0.76
可剥离膜去污因子	7.49	31.51	高压水去污因子	4.67	8.04

表2 去污前、后热室不锈钢壳体 $\beta$ 表面污染水平  
Tab. 2 Surface Contamination Level of Hot Cell of Stainless Steel before and after Decontamination

测点序号	$\beta$ 表面污染水平/(Bq·cm <sup>-2</sup> )		去污因子	区域
	去污前	去污后		
1#	1458	25.6	56.9	—
2#	110.2	24.8	4.44	—
3#	1460.8	20.2	72.3	—
4#	606.9	38.4	15.8	地面 区
5#	266.7	8.26	32.3	—
6#	590.9	12.3	48.0	地面 区
7#	585.9	15.1	38.8	—
8#	1184.6	18.1	65.4	—
9#	1039.1	239	46.6	—
10#	7.41	4.04	1.83	—
11#	13.3	0.715	18.6	—
12#	16.9	3.90	4.33	—
13#	10.3	1.15	8.96	—
14#	273	122	110.1	—
15#	53.9	20.0	2.70	墙面 区
16#	15.9	0.851	18.7	—
17#	180.3	24.0	7.51	—
18#	193.4	6.59	29.3	—
19#	60.9	1.40	43.5	墙面 区
20#	7.17	1.18	6.08	—
21#	13.1	2.22	5.90	—
22#	4.40	2.95	1.49	—
23#	13.2	4.08	3.24	—

“—”——其余区域

可剥离膜去污之后,热室内的 $\beta$ 表面污染水平为0.715~239 Bq/cm<sup>2</sup>。其中,9#和14#区域 $\beta$ 表面污染水平分别为239 Bq/cm<sup>2</sup>和122 Bq/cm<sup>2</sup>,高于电离辐射防护与辐射源安全基本标准(GB18871—2002)的要求(40 Bq/cm<sup>2</sup>)。

在去除这2个区域的数据后, $\beta$ 表面污染水平最大值为38.4 Bq/cm<sup>2</sup>;热室后区工作人员在辐射监测人员的指导下,使用BOS-100角向磨光机对9#和14#区域进行机械打磨去污,去污后其 $\beta$ 表面污染水平分别为22.3 Bq/cm<sup>2</sup>和2.48 Bq/cm<sup>2</sup>,均小于40 Bq/cm<sup>2</sup>。

此外,从表2还可以看出,对于开展复合去污试验所选定的4个去污区域(墙面I区、地面I区、墙面II区、地面II区),在工程去污后,其表面污染水平较试验后的数值均有所提高,这是由于采用高压水射流进行大面积的去污,存在较普遍的交叉污染的现象,但整体来看,工程去污效果良好。

## 5 结 论

本文提出了一种热室不锈钢壳体复合去污工

艺,可以完成强放热室不锈钢壳体的去污。采用上述复合去污工艺,开展工艺试验研究及工程验证试验研究,得到以下结论:

(1)对于单一去污工艺,剥离膜去污能力优于高压水射流去污能力;此外,试验研究发现2种复合去污工艺去污结果相差不大。

(2)本文确定了最终复合去污技术方案:先采用高压水射流去污工艺对热室不锈钢覆面进行远距离整体去污,再采用剥离膜去污工艺对墙面一定高度以下及地面污染严重区进行大面积去污,最后采用角磨机对污染严重的点进行机械打磨去污。

(3)采用确定的复合去污技术方案对强放热室进行大面积的工程去污后,强放热室内 $\beta$ 表面污染水平均小于40 Bq/cm<sup>2</sup>,满足GB18871中的相关要求。

该研究为强放热室退役不锈钢壳体去污提供了有效依据和途径,对于去污拆除技术在强放热室退役中的应用和推广具有参考价值。

## 参考文献:

- [1] 刘晓松. 破损燃料组件热室检查技术研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(4): 71-74.
- [2] 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.
- [3] 白晓峰, 陈云明. 一种用于放射性去污的高效泡沫去污剂的研制[J]. 化工管理, 2018(9): 35.
- [4] 张凯瑞. 核用不锈钢的化学去污及其废液吸附研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [5] 韩建平, 侯永明, 付云杉. 高压水清洗技术在反应堆退役工程中的验证试验[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(4): 373-378.
- [6] 邹强. 高压水射流技术在反应堆水池去污中的应用[J]. 辐射防护通讯, 2004, 24(5): 32-34.
- [7] 郭琦, 李方义, 李硕, 等. 高压水射流清洗对基体去污效果及损伤的研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(6): 817-820.
- [8] 谭昭怡, 田军华, 张子骞, 等. 可剥离膜的研制和去污实验验证[J]. 原子能科学技术, 2004, 38(4): 379-381.
- [9] WANG J, LIU G Q, ZHAO L, et al. Research on nuclear emergency decontamination technology based on strippable coating[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, 322(2): 1049-1054.
- [10] 陈彩梅. 角向磨光机在机械加工中的运用[J]. 科技创新与应用, 2012, 8(31): 72.

(责任编辑:周 茂)