

# 聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)装料脱水工艺国内外应用研究现状

翟吉超, 李万利, 杨超, 耿忠林, 任力, 廖能斌

国电投核安科技有限公司, 重庆

收稿日期: 2024年5月14日; 录用日期: 2024年6月24日; 发布日期: 2024年8月8日

## 摘要

核电厂运行过程中产生了大量放射性废树脂, 放射性废树脂的高效减容和稳定化处理对国内核电发展至关重要。聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)装料脱水工艺具有工艺流程短, 系统简单、操作方便、系统投资较少、运行费用低等诸多优点, 有着广阔的应用前景。文章对国内外聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)装料脱水系统工艺研究现状进行调研分析, 以期对后续此工艺研究提供参考。

## 关键词

聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC), 废树脂装料脱水, 减容

## Current Status of Domestic and International Application of Polyethylene High Integrity Container (HDPE-HIC) Filling and Dewatering Processes

Jichao Zhai, Wanli Li, Chao Yang, Zhonglin Geng, Li Ren, Nengbin Liao

SPIC HE-AN Technology CO., LTD., Chongqing

Received: May 14<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 8<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A large amount of radioactive waste resin is generated during the operation of nuclear power plants, the efficient volume reduction and stable processing of radioactive waste resin is crucial for the development of nuclear power plants in China. The HIC filling and dewatering technique

文章引用: 翟吉超, 李万利, 杨超, 耿忠林, 任力, 廖能斌. 聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)装料脱水工艺国内外应用研究现状[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(4): 836-841. DOI: 10.12677/aep.2024.144111

has many advantages, such as short process flow, simple system, convenient operation, low system investment, and low operating costs. It has broad application prospects. This article conducts a review of the HIC filling and dewatering technique, in order to provide a reference for subsequent research on the waste resin loading and dewatering technique by polyethylene high integrity containers.

## Keywords

High Integrity Container (HDPE-HIC), Waste Resin Filling and Dewatering, Volume Reduction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

核电厂水处理系统中广泛应用交联度较高、化学性质稳定、吸附性较好的离子交换树脂，故会产生大量的放射性废树脂，核电废树脂主要特点是放射性水平较高、处理难度大、受热易分解、处理过程易产生放射性气溶胶，为世界公认较难处理的放射性废物。废树脂减容处理工艺分为无机化和非无机化工艺，其中非无机化处理工艺主要是废树脂脱水处理，目前国内外主要采用聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)装料脱水、热态超压、微波桶内干燥等技术，由于技术成熟度、技术经济性方面的差异，其应用程度各不相同。

废树脂的聚乙烯高整体容器装料脱水工艺主要通过脱水泵将 HDPE-HIC 容器内放射性废树脂所含游离水进行脱除，直至 HDPE-HIC 容器内游离水含量不超过废物体积的 1%。热态超压工艺首先将放射性废树脂通过热油进行真空干燥处理，然后通过超级压机将热态的废树脂进行超压减容，形成的废树脂压实饼经过水泥灌浆等处理后进行处置[1]。微波桶内干燥工艺是利用高频电磁波瞬间穿透废树脂溶液，把能量传播到废树脂溶液内部进行加热，最终减容比可达到 2 [2]。

聚乙烯高整体容器装料脱水、热态超压技术虽然综合减容有限，但技术成熟，已成功应用于国内核电站。微波桶内干燥技术综合减容比较高，目前处于研发阶段，尚未实际应用于工程项目中。经综合对比分析，HDPE-HIC 装料脱水工艺与其他工艺相比具有工艺流程短、系统简单、操作方便、系统投资较少等诸多优点。

鉴于 HDPE-HIC 装料脱水工艺的以上特点，以及国内放射性废树脂处理技术发展需求。本文对国内外 HDPE-HIC 装料脱水工艺技术研究应用现状进行调研分析，总结本技术目前的应用发展现状，以期对后续此工艺研究提供参考。

## 2. HDPE-HIC 装料脱水工艺总体工艺流程

HDPE-HIC 装料脱水工艺主要核心设备包括聚乙烯高整体容器(HDPE-HIC)、装料脱水装置、脱水专用工具(HDPE-HIC 抓具、HDPE-HIC 封盖工具)、厂房辅助吊装附件等，HDPE-HIC 预期使用寿命不低于 300 年。

核岛设置有废树脂槽，废树脂槽的容量可保证有足够的贮存时间，以使短寿命的放射性核素能够充分地衰变。当核岛废树脂槽中的废树脂贮存一定时间且存储量达到一定值后，需将废树脂采用水力或泵输送至 HDPE-HIC，经脱水处理后进行放射性检测，运至指定区域进行厂内暂存[3]。废树脂暂存前需进

行脱水处理，主要处理步骤如下：

- 1) 采用起重机及 HDPE-HIC 抓具将 HIC 容器吊装至装料脱水工位；
- 2) 通过 HDPE-HIC 封盖工具将 HIC 容器螺纹顶盖[4]开启并转移；
- 3) 将装料脱水头与 HIC 容器对接；
- 4) 启动核岛废树脂转移设备，通过水力或泵输送方式将废树脂充填至 HIC 容器内；
- 5) HIC 容器内安装有脱水构件，用于截留废树脂。装料脱水装置由脱水头、气动隔膜泵、控制系统等组成，其中脱水头设置有摄像头和相应照明灯，控制系统具有进料流量监测、液位监测及高液位报警、液位控制、脱水流量监测等功能，经装料脱水装置脱水使 HDPE-HIC 容器内游离水含量不超过废物体积的 1% [3]；
- 6) 脱水完成后，将脱水头转移至指定工位；
- 7) 将 HDPE-HIC 封盖工具和抓取的 HDPE-HIC 螺纹顶盖转移至 HIC 容器上方，启动 HDPE-HIC 封盖工具将 HIC 容器上螺纹顶盖旋紧，整套脱水工序完成。

装料脱水装置的数量及脱水能力，根据核岛废树脂槽规模合理设置[3]。

其总体工艺流程见图 1：

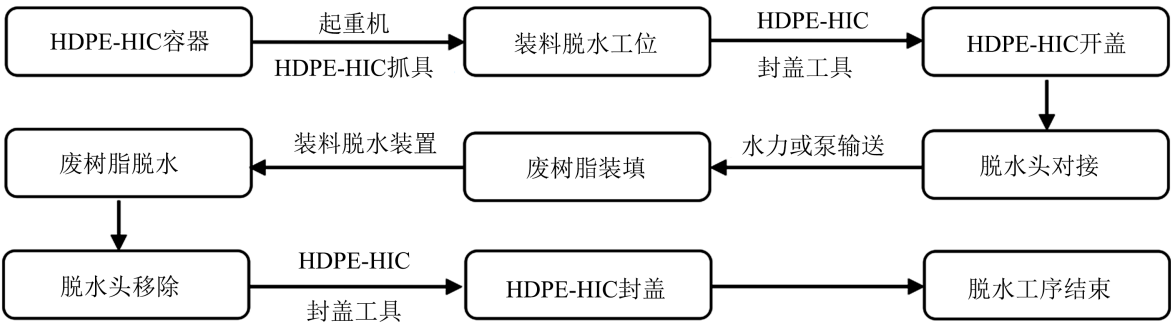


Figure 1. Overall flow chart of HDPE-HIC charging dehydration process  
图 1. HDPE-HIC 装料脱水工艺总体流程图

### 3. HDPE-HIC 装料脱水工艺装置应用现状

#### 3.1. 国外研究应用现状

聚乙烯高整体容器在美国于 1981 年被批准作为放射性废物处置容器使用，Energy solutions 公司每年制造并交付大约 500~600 个 HDPE-HIC，已有超过 15,000 个 HDPE-HIC 容器交付至美国 90% 的核电厂进行使用[5]，在墨西哥、加拿大、韩国及日本等国家也有使用。

在美国，对于核岛一回路所产生的放射性废树脂，有很多核电站均采用 HDPE-HIC 装料脱水工艺处理，将放射性废树脂转运至 HDPE-HIC 容器内，通过装料脱水装置进行废树脂脱水，经过脱水处理可使 HDPE-HIC 容器内游离水的体积不超过废物体积的 1%。在 HDPE-HIC 容器长期处置期间，通过控制处置环境的温度、容器所承受的载荷以及累积的受照剂量等因素，HDPE-HIC 容器理论上可维持 300 年的耐久性[6]。

HDPE-HIC 在美国已有超过 40 年的使用经验，美国南卡州 Barnwell 处置场和犹他州 Clive 处置场也有丰富的 HDPE-HIC 处置低、中放废物的运行实践经验。

美国南卡州 Barnwell 处置场所处地区湿润多雨，需避免 HIC 容器与水接触，建造有复杂的工程屏蔽，采用浅地表壕沟处置，这种处置方式建设和运行成本都相对较高。犹他州 Clive 处置场所处地区干燥少雨，

人烟稀少,聚乙烯 HIC 处置采用浅地表填埋处理,这种处置方式建设费用较低、运行简单。HIC 处置厂址的选择需充分考虑场址的地质、气象、水文、地震等重要因素,不同的厂址条件选择适合的处置方案[7]。

### 3.2. 国内应用现状

海阳核电放射性废树脂年预估产生量约为  $11.33 \text{ m}^3$ ,其处理工艺引进美国 Energy solutions 公司 HDPE-HIC 装料脱水工艺,废树脂装填选用 PL8-120 型 HIC,简要流程如下:

- 1) HIC 容器就位之后,对其进行取盖并开始装填废树脂;
- 2) 树脂装填完毕后,采用装料脱水系统装置对 HIC 进行脱水处理,使游离水含量不超过废物体积的 1%;
- 3) HIC 封盖,做完必要的监测之后转运至暂存库暂存[8]。

阳江核电 3、4 号机组放射性废树脂处理工艺同样引进美国 Energy solutions 公司的 HDPE-HIC 装料脱水工艺,废树脂装填选用 PL8-120 型 HIC。废树脂通过水力输送装填至 HIC 容器后,在设定的脱水时间(通常设定为 8 h,循环次数 3 次)内,气动隔膜泵将 HIC 容器内的废树脂混合液进行脱水,直至 HIC 容器内游离水含量低于废物体积的 1%。HIC 容器脱水结束之后,用 HIC 封盖装置对 HIC 容器进行封盖,然后将脱水后的 HIC 容器转运至 QT 厂房暂存。

该类型处理工艺与传统水泥固化工艺相比,HDPE-HIC 装料脱水工艺设备配置简单、操作方便、废物量少、运行费用低等优势[9]。

海阳核电和阳江核电两个核电厂产生的 HDPE-HIC 容器废物包目前均贮存在厂内废物暂存库中,由于多种原因尚未外送处置。

综上所述,目前我国国内应用 HDPE-HIC 装料脱水系统处理工艺处理放射性废树脂的核电站有海阳核电和阳江核电,其所应用的 HDPE-HIC 装料脱水系统装置均由美国 Energy Solutions 公司设计和供货,国内亟需开展 HDPE-HIC 容器、装料脱水装置、处置方案等国产化研究。

### 3.3. 国内研究情况

针对 HDPE-HIC 装料脱水工艺,国家和行业内制定发布了相关标准,相关单位逐步开展 HDPE-HIC 容器、装料脱水系统装置等设备的国产化研究。

#### 3.3.1. 国家、行业标准

2018 年,由中广核工程有限公司、中广核研究院有限公司、国家电投集团远达环保股份有限公司、国家电力投资集团有限公司联合起草编制的国家标准 GB 36900.3-2018《中、低水平高放射性废物高完整性容器-交联高密封聚乙烯容器》正式发布,该规范对聚乙烯高整体容器相关要求做了明确规定。

2021 年,由中国核电工程有限公司、中广核工程有限公司、华龙国家核电技术有限公司、上海核工程研究设计院有限公司联合起草编制的国家能源行业标准 NB/T 20621-2021《压水堆核电厂放射性固体废物处理系统设计准则》正式发布,对 HDPE-HIC 脱水装置进行了设计规定。

以上两项标准的发布,填补了我国 HDPE-HIC 装料脱水工艺在法规标准方面的空白,为 HDPE-HIC 容器及 HDPE-HIC 装料脱水系统在国内的推广应用奠定了良好基础。

#### 3.3.2. 设备的国产化研发进展

HDPE-HIC 容器在我国低、中放废物的处理、处置中的应用起步较晚,HDPE-HIC 装料脱水装置整套设备均引进自美国。其中 HDPE-HIC 容器为运行耗材,为更好的满足核电日常运行需求,目前国内中广核集团已于 2013 年开展 HDPE-HIC 容器研发工作,并申请了相关发明专利,HDPE-HIC 容器外形图见图 2。

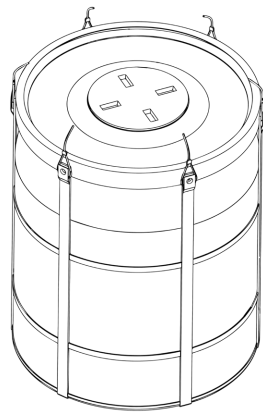


Figure 2. HDPE-HIC container outline [10]  
图 2. HDPE-HIC 容器外形图[10]

2014 年，中广核集团开展了核设施放射性湿固体废物(含废树脂)处理方法的研究，放射性废树脂处理流程如图 3 所示。其采用装料脱水工艺，废树脂填充装置安装在 HDPE-HIC 容器上方后，开展废树脂装填 HIC 工作，容器内废树脂达到预定体积后，利用脱水装置对 HIC 容器进行数个脱水循环。脱水基本完成后，将最后一次从 HIC 容器中脱出的水排入脱水检测槽，经判断 HIC 容器中游离水体积小于 HIC 容器中废物体积的 1%时，停止脱水。采用封盖装置对脱水后的 HIC 容器进行封盖，之后转运至废物暂存库暂存。



Figure 3. Flow chart of radioactive waste resin treatment [11]  
图 3. 放射性废树脂处理流程图[11]

2015 年，中广核集团开展了核电厂 HDPE-HIC 脱水装置及方法研究，脱水装置由脱水管、脱水泵、脱水检测槽、阀门组件等组成，可对 HIC 容器内废树脂进行脱水，判断 HIC 中游离水含量是否达标，脱水装置工艺流程图见图 4。

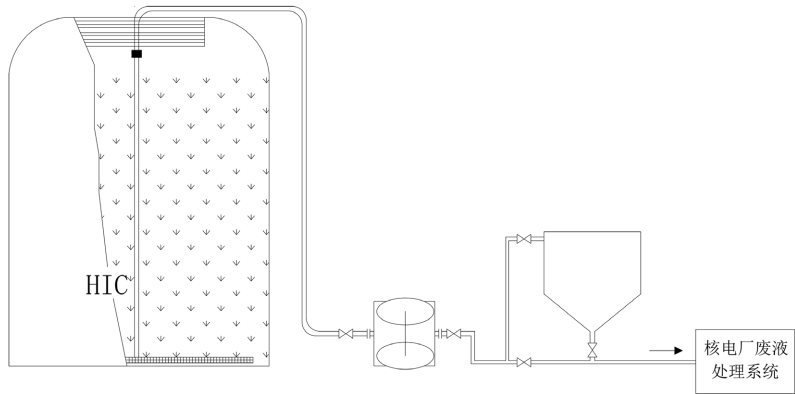


Figure 4. HIC dehydration process flow chart [12]  
图 4. HIC 脱水装置工艺流程图[12]

HDPE-HIC 装料脱水工艺的应用, 必将引出 HDPE-HIC 容器处置的问题。HDPE-HIC 容器在美国处置场已有多年的处置经验, 但是目前我国已经建成且投运的共 4 个低中放固体废物处置场, 包括 1998 年建设的甘肃西北中低放固体废物处置场、2000 年建设的广东北龙中低放固体废物处置场、2015 年在四川建设的飞凤山中低放固体废物处置场、2022 年建成的龙和处置场, 均未设计考虑聚乙烯高整体容器 (HDPE-HIC) 的处置。

随着核电厂废物的逐年产生及暂存库库容的逐渐减少, HDPE-HIC 容器的处置应用的研究迫在眉睫。中国辐射防护研究院开展了高密度聚乙烯高整体容器的模拟容器的研究, 以在 HIC 处置放射性废物之前, 评价 HIC 及其内装填的模拟废物在辐照和热条件下的安全性[13]。同时, 中国辐射防护研究院开展了模拟研究放射性固体废物处置过程中氢气产生的方法研究, 能够模拟研究放射性固体废物处置过程中氢气的产生, 为 HDPE-HIC 处置的理论计算提供输入, 避免可燃气体在 HDPE-HIC 处置环境中浓度过高引起爆炸[14]。HDPE-HIC 容器处置的研究进展将进一步推进 HDPE-HIC 装料脱水系统在国内的推广应用。

#### 4. 结论

HDPE-HIC 装料脱水技术在国外已发展成熟, 有稳定运行多年的工程实例。国内对于 HDPE-HIC 装料脱水技术研究起步较晚, 目前处于自主研发阶段。结合此工艺的良好运行实践, 在国产化研发中应与安全处置相结合, 从处理工艺、暂存、运输和安全处置各环节综合考虑, 最终实现此技术在核电放射性废物处理处置领域的推广应用。

#### 参考文献

- [1] 方祥洪, 马若霞, 杨彬, 任力, 华伟. 放射性废树脂处理方法研究[J]. 广州化工, 2015, 43(3): 6-7.
- [2] 高超, 贾梅兰, 高帅. 200 L 规模废树脂微波桶内干燥装置设计验证[J]. 辐射防护通讯, 2016, 36(4): 23-26.
- [3] 中国核电工程有限公司, 中广核工程有限公司, 华龙国际核电技术有限公司, 上海核工程研究设计院有限公司. NB/T 20621-2021 压水堆核电厂放射性固体废物处理系统设计标准[S]. 北京: 原子能出版社, 2021.
- [4] 中广核工程有限公司, 中广核研究院有限公司, 国家电投集团远达环保股份有限公司, 国家电力投资集团有限公司. GB 36900.3-2018 低、中水平放射性废物高完整性容器-交联高密度聚乙烯容器[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [5] 李洪辉, 郭喜良, 范智文, 杨卫兵, 冯文东. 高整体性能容器介绍与检测方法[C]//中国核学会. 中国核学会核化工分会放射性三废处理、处置专业委员会学术交流会, 工程科技II辑. 哈尔滨: 中国核学会核化工分会, 2011: 191-198.
- [6] 严勇, 温宁华, 潘跃龙, 李超, 黄来喜. 高密度聚乙烯高整体容器耐久性能研究[C]//第十三届全国核化学与放射化学学术研讨会, 工程科技I辑. 大理: 中国核学会核化学与放射化学分会, 2014: 217.
- [7] 姚勇, 王彩霞, 万皓宇, 周若凡, 陈勇. 交联聚乙烯 HIC 在美国处置场应用实践及对我国的启示[J]. 辐射防护, 2021, 41(5): 453-458.
- [8] 马小强, 王棋赞, 龚学余. AP1000 放射性废树脂处理处置中的优化分析[J]. 辐射防护通讯, 2015, 35(6): 29-32.
- [9] 姚志猛, 朱剑锐, 冯金才, 邹晓炜, 刘资平, 李新贤. 阳江核电厂放射性固体废物最小化实践和探索[J]. 辐射防护, 2021, 41(2): 151-156.
- [10] 刘峰, 等. 中、低放射性核废料处理装置[P]. 中国专利, CN105551557A. 2016-05-04.
- [11] 严勇, 等. 核设施放射性湿固体废物处理方法[P]. 中国专利, CN103985426B. 2017-03-15.
- [12] 严勇, 等. 一种核电厂废物包脱水装置及方法[P]. 中国专利, CN105280262A. 2016-01-27.
- [13] 赵帅维, 等. 一种高密度聚乙烯高整体容器的模拟容器[P]. 中国专利, CN110097990A. 2019-08-06.
- [14] 赵帅维, 等. 一种模拟研究放射性固体废物处置过程中氢气产生的方法[P]. 中国专利, CN110095802A. 2022-07-29.