



### 第三代核电技术树脂取样装置研制

赵雨恒, 陈青, 周天, 王广金, 周缘, 郑兰疆, 邱新媛

#### Development of Resin Sampler for Generation Nuclear Power Plants

Zhao Yuheng, Chen Qing, Zhou Tian, Wang Guangjin, Zhou Yuan, Zheng Lanjiang, and Qiu Xinyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0250>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### [HTO被动式取样器的制备及其在密闭核动力装置中的应用](#)

Manufacturing of HTO Passive Sampler and Its Application in Closed Nuclear Power Plant

核动力工程. 2018, 39(5): 159–161

##### [基于三代核电技术的电气贯穿件导体组件研制](#)

Development of Feedthrough Assembly for Electrical Penetration Assembly Based on Third-Generation Nuclear Power Technology

核动力工程. 2019, 40(4): 153–156

##### [三代核电DBA环境试验装置改造设计研究](#)

Design Improvement of DBA Environmental Test Facility for Generation III Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(6): 95–99

##### [核电厂乏燃料贮存格架水下去污装置研制](#)

Development of Underwater Lifting Tool for Spent Fuel Storage Rack in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2021, 42(4): 182–185

##### [压水堆核电厂放射性源项的估算方法研究](#)

Research on Calculations of Radioactive Source Terms for PWR Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(1): 116–119

##### [核电厂乏燃料贮存格架水下去污装置研制](#)

Development of Underwater Decontamination Device for Spent Fuel Storage Rack in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(5): 146–149



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0250-04; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0250

## 第三代核电技术树脂取样装置研制

赵雨恒, 陈青, 周天, 王广金, 周缘, 郑兰疆, 邱新媛

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要:** 针对二代核电技术传统树脂取样方式存在的不足, 介绍一种新型的核电厂树脂取样装置的结构与技术特点。本装置利用气动活塞原理, 采用动密封技术, 实现了对放射性树脂的远程自动取样功能。试验结果表明, 该树脂取样装置取样精度高、重复性好, 可使核电厂放射性废物取样系统更加精确、高效和安全。

**关键词:** 核电厂; 树脂取样装置; 自动取样

**中图分类号:** TL941 **文献标志码:** A

## Development of Resin Sampler for Generation III Nuclear Power Plants

Zhao Yuheng, Chen Qing, Zhou Tian, Wang Guangjin,  
Zhou Yuan, Zheng Lanjiang, Qiu Xinyuan

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** In view of the defects in the traditional way of resin sample in the generation II nuclear power plants, this paper introduces a new type of nuclear power plant resin sampler structure and technical characteristics. The pneumatic piston and dynamic seal technology are used in the device, and the remote automatic sampling radioactive resin function is adopted. Test results show that the resin sampler is with high sampling accuracy and good repeatability, and can make the nuclear radioactive waste sampling system more accurate, efficient and safe.

**Key words:** Nuclear power plant, Resin sampler, Automatic collection

### 0 引言

“华龙一号”作为我国具有完整自主知识产权的第三代核电机组, 具有较高的安全设计标准。在辐照剂量的考虑上, 核电厂 60 a 正常运行寿期的累积辐照剂量最高可达 250 kGy<sup>[1]</sup>。为了避免运行人员受到严重的辐照危害, 针对核电厂三废处理系统中某些放射性物质的取样分析工作, 亟待以远程自动取样装置替代二代核电技术中的人工取样设备。

核电厂树脂取样装置作为核电厂三废处理设施的关键设备, 用于定量抽取具有代表性的放射

性树脂, 以便检验其放射性同位素成分及其剂量水平, 并作为是否进入废树脂固化系统进行后续处理的判断依据。目前二代核电厂采用的手套箱取样方式存在着很多不足, 主要表现在以下几个方面: ①传统手套箱取样是一种人工手动操作的取样方式, 在高放射性环境下, 难免会对采样人员造成辐射暴露的风险; ②人工取样方式难以保证样品的重复性精确计量, 尤其在手套箱取样条件下, 对工作人员的个人操作技能有更高的要求; ③树脂样本的铅屏蔽转运容器重量大, 操作人员难以在手套箱中实现安全的封装及转运工作, 增

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-12-13

基金项目: 核电厂树脂取样装置四川省青年科技创新研究 (2016TD0025)

作者简介: 赵雨恒 (1991—), 男, 工程师, 现主要从事反应堆关键设备设计, E-mail: 947568746@qq.com

加了采样过程的操作难度和危险系数。

为了解决以上问题，克服传统取样防辐射效果差、取样精度低以及存在因操作困难而导致的安全隐患等缺点，研制了针对第三代核电技术的树脂取样装置。该设备具有极高的防辐射效果、重复性好的定量取样精度以及可靠的远程自动取样操作方式。

## 1 结构设计

### 1.1 总体结构设计

核电厂树脂取样装置采用模块化的设计思路（图1），分为取样组件、抬升组件、箱体组件、屏蔽组件、取样瓶组件、控制器组件等6个部分，6个部分分别安置在立式不锈钢箱体内部及周围，并通过配套的辅助回路系统提供取样时所需的厂用压缩空气及除盐水。

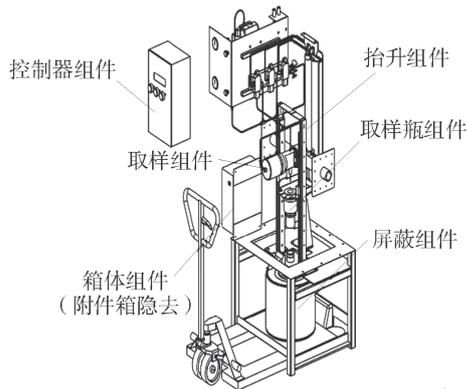


图1 核电厂树脂取样装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Resin Sampler for Nuclear Power Plant

### 1.2 取样组件结构设计

取样组件由活塞缸、活塞、取样杆、柱塞杆、取样槽和导流管等零件组成。取样组件在可编程逻辑控制器（PLC）的远程控制下，向取样器组件一前一后2个进气口交替充入压缩空气，带动取样杆的前进和后退，完成树脂样本的采集；随后除盐水由取样槽吹扫口进入取样槽，完成残余样本的冲刷，从而实现树脂样本的远程采集，冲刷和储存功能。

### 1.3 屏蔽组件结构设计

屏蔽组件由铅屏蔽罐和转运手推车组成（图2）。铅屏蔽罐上方安装了带1块注钨屏蔽塞的屏蔽盖。

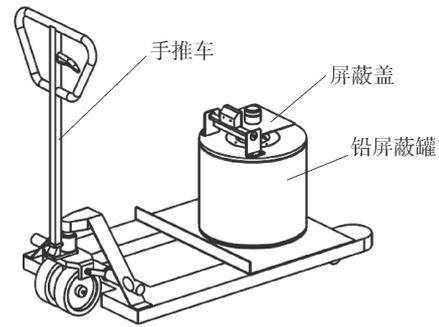


图2 屏蔽组件结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Shielded Component Structure

### 1.4 取样瓶组件结构设计

取样瓶组件由上端的金属固定装置和下端的聚丙烯取样杯组成。

金属固定装置依据其自动翻转瓶盖的功能专门设计，上端开凹槽，用于与抬升组件的取样瓶抓手对接。下部设计为斜坡形式，在上升和下降时有利于对中和挤压瓶盖翻转装置。

## 2 控制流程设计

取样装置控制流程如图3所示。控制器组件设计了手动控制和自动控制2种方式。手动控制可实现自动取样过程的分步操作，主要针对设备取样过程中各分步动作的性能检查和取样精度检查的功能需求而设置；自动控制为核电厂树脂取样装置取样的基本功能，可实现操作员远程控制、设备自动取样的功能，有效保护操作人员免受取样过程中的放射性辐照。同时，控制器组件设置有紧急制动功能，在出现紧急情况时可使取样系统直接回复到初始位置。

## 3 取样装置性能

树脂取样装置是用于高放射性树脂浆液废物的专用取样装置，针对介质的高放射性和固液混合物特性特点，本文将从取样装置的材料特性和取样特点进行分析，并通过样机试验验证树脂取样装置的取样精度和可重复性。

### 3.1 关键材料选择

取样装置中橡胶密封圈作为有机高分子材料是受辐照损伤机理最显著的元件，根据工程经验，核环境用的耐辐照橡胶有三元乙丙橡胶（EPDM）、丁腈橡胶（NBR）以及氟橡胶（FKM）等，其耐辐照性能见表1<sup>[2]</sup>。

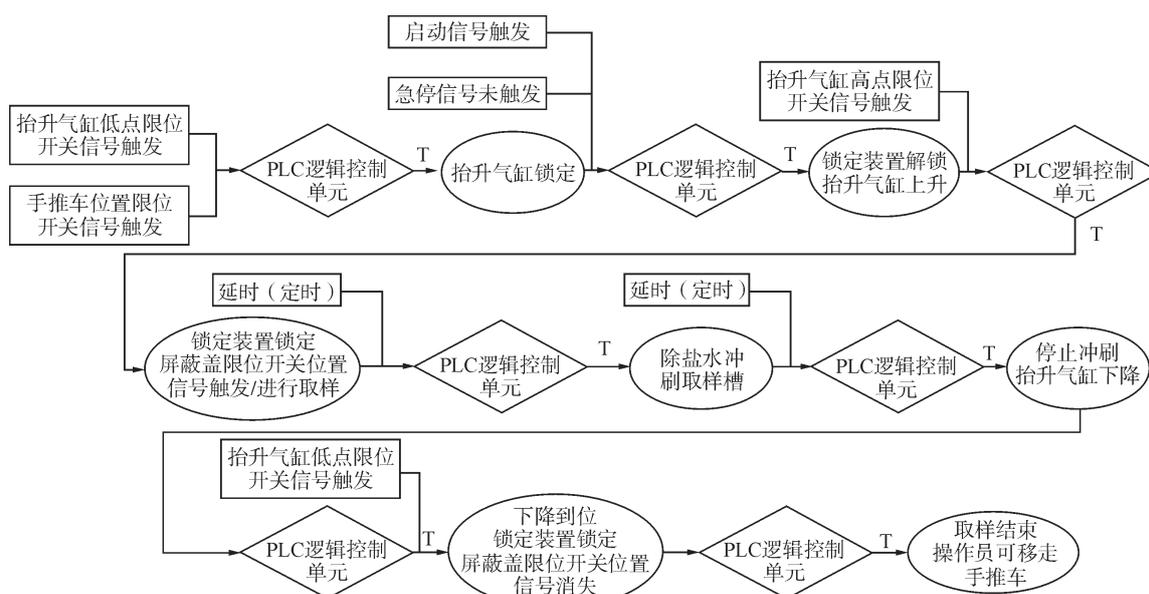


图3 核电厂树脂取样装置控制流程图

Fig. 3 Control Flow Chart of Resin Sampler for Nuclear Power Plant

T—信号正确触发

表1 辐照后橡胶机械性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Rubber after Irradiation

材料	辐照剂量/kGy	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	50%弹性模量	凝胶分率
EPDM	0	2	1700	0.43	0.88
	250	1.5	177	0.67	0.90
	500	1.1	105	0.70	0.93
	1500	1.0	66	0.86	0.95
NBR	0	1.1	101	0.73	0.85
	250	1.8	102	1.14	0.90
	500	2.1	91	1.37	0.92
FKM	1500	4.2	56	3.74	0.95
	0	3.6	513	0.73	0.90
	250	3.2	108	1.26	0.92
	500	2.3	81	1.32	0.94
	750	1.8	50	1.60	0.95
	1000	3.3	38		0.96
	1500	4.3	23		0.97

表中空白项表示没有数据

实际应用中橡胶材料还会受到机械应力、压力、温度以及流体介质等因素的综合影响,除考虑耐辐照性外,还需要考虑橡胶材料的使用特性。

EPDM 具备优秀的耐热性、耐候性、稳定性和抗臭氧性,适用于 150℃ 以下的动植物油、热水和硅油密封,但不适用于矿物油、油脂等

环境。

NBR 具有优异的耐油性和耐非极性溶剂性能,同时具备较佳的机械性能和气密性,适用于植物油、动物油、硅油和硅脂等介质中,但对强酸强碱的抗耐性较差。

FKM 具有优异的阻燃性、气密性、耐臭氧性、耐候性和抗老化性,但强度和抗撕裂性较低。

参照“华龙一号”堆型 60 a 正常运行工况时的最大辐照累积剂量为 250 kGy,对应表 1 中的数据可知,在 250 kGy 的辐照条件下,3 种橡胶材料抗拉强度由高到低依次为:FKM>NBR>EPDM;断裂伸长率由高到低依次为:EPDM>FKM>NBR;50%拉伸模量由高到低依次为:FKM>NBR>EPDM,且 EPDM 的拉伸模量辐照前后的变化较小。由此可知,在经受 60 a 正常运行工况时的辐照累积剂量后,EPDM 的弹性优于 FKM 和 NBR。

基于上述 3 种橡胶材料在累积辐照剂量限值条件下的性能评估,并结合取样回路介质的温度及压力要求,同时考虑到取样过程中取样杆往复运动时与柱塞缸内壁发生摩擦和挤压的运行工况对橡胶材料机械性能的要求,优选 EPDM 作为取样设备橡胶密封圈的材料。

### 3.2 取样精度与可重复性

为了验证核电厂树脂取样装置取样精度和可重复性,开展了取样精度、极限压力条件下的精度、手动控制、取样寿命等性能试验。取样装置的取样条件为:试验压力 0.69 MPa;试验温度 66℃;允许误差范围  $35\pm 0.5$  mL。第 1~10 次的取样结果分别为:35.0、35.2、35.2、34.8、34.7、35.0、35.1、34.9、34.8、35.3 mL。

在试验中对核电厂树脂取样装置进行了取样精度和可重复性的分析与评价,树脂取样装置采集到的样本容量均在误差允许范围之内,同时随着取样次数的增多,树脂取样器依然可以保持很高的精确性,整个取样过程不受人为因素的影响。传统的手套箱取样方式受限于人为因素误差,导致单次取样时间长以及多次取样重复性精度差。综上可知,相比传统的手套箱取样,核电厂树脂取样装置具备更高的取样精度、更好的可重复性、更高的取样效率以及显著的防辐射效果,可通过远程操作、自动控制且精确计量的功能设置,满足核电厂树脂取样装置性能更优、安全可靠的要求。

### 3.3 取样装置特点

对树脂取样装置工程样机试验情况的分析表明,本取样装置具有较高的取样代表性和可靠性。

(1) 利用压缩空气驱动取样杆进行活塞式往复运动,将树脂样本由介质循环管道转移至取样瓶并完成取样,可实现高放射性树脂样本的远程自动取样功能。

(2) 取样装置为纯机械结构,仅通过压缩空气提供动力,大大减少了电气设备之间的电磁干

扰,提高了取样设备的稳定性。

(3) 屏蔽盖的特殊设计,可以通过抬升组件抓取取样瓶组件上下运动并自动翻转屏蔽盖,同步实现取样后取样瓶装入铅屏蔽罐和屏蔽盖自动复位遮挡射线的功能,避免操作人员转运样品时遭受辐射剂量,在简化结构设计的同时提高了装置的可靠性和安全性。

树脂取样装置主体采用不锈钢,密封圈采用密封性能可靠、耐机械磨损和耐辐照的橡胶,结构简单,易于拆装和去污,使用寿命长。

## 4 结束语

为了克服二代核电厂采用的手套箱取样方式存在的缺陷,研制了针对第三代核电技术的树脂取样装置,为核电厂三废处理系统提供了性能可靠、操作安全的远程自动取样能力。在核电等清洁能源大发展的背景下,该装置有着很好的市场前景。以核电厂树脂取样装置研制的技术为基础,后期可对取样装置的取样杆进行结构再设计,研制出可应用在诸如黏液、粉体以及固体颗粒等其他物相的有毒有害介质的远程取样装置。目前,针对该系列取样设备的拓展研究工作正在有序进行中。

#### 参考文献:

- [1] 张天坤,王慧中. 浅谈核电空调箱中的耐辐照非金属材料[J]. *新材料产业*, 2017(6): 57-60.
- [2] BANIK I, BHOWMICK A K. Effect of electron beam irradiation on the properties of crosslinked rubbers[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2000, 58(3): 293-298.

(责任编辑:孙 凯)