

低放射性废水处理设施升级改造工程

王 帅¹, 秦 强¹, 钱正华¹, 邓 玥², 陈 堃¹, 乔延波¹, 何柳斌¹,
刘学阳¹, 马洪军¹

(1. 中国科学院上海应用物理研究所 核安全与工程研究部, 上海 201800; 2. 中国工程物理
研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了某低放射废水处理系统改造中的废水源项、处理目标、难度分析和措施, 以及工艺系统和配套设施的改造内容。在原有工艺设施基础上, 通过化学沉淀、蒸发和离子交换工艺的联合运用, 使处理后废水的总 $\alpha < 1$ Bq/L, 总 $\beta < 10$ Bq/L, 满足《污水综合排放标准》(DB 31/199—2009)。同时采用工艺自动化控制、辐射屏蔽和送排风等措施, 获得了满足国家相关法规规定的低放射性废水输送、暂存和处理等要求的工艺系统, 为低放射性废水处理提供了一种长期、有效的解决措施。

关键词: 放射性废水; 改造; 化学沉淀; 蒸发; 离子交换; 水泥固化

中图分类号: X789 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2015)08-0085-05

Upgrade of Low-level Radioactive Wastewater Treatment Facility

WANG Shuai¹, QIN Qiang¹, QIAN Zheng-hua¹, DENG Yue², CHEN Kun¹,
QIAO Yan-bo¹, HE Liu-bin¹, LIU Xue-yang¹, MA Hong-jun¹

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*
2. *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

Abstract: The pollution source, wastewater treatment targets, difficulty analysis and measures in the upgrade project of a low-level radioactive wastewater treatment system as well as the process system and auxiliary facilities were presented. Based on the existing process facilities, through the combined use of chemical precipitation, evaporation and ion-exchange processes, the specific activities of treated water were less than 1 Bq/L for alpha emitters and less than 10 Bq/L for beta emitters, which meet the *Integrated Wastewater Discharge Standard* (DB 31/199-2009). Automatic control system, radiation shielding and air ventilation system were designed for the transportation, interim storage and treatment of the low-level radioactive wastewater. Upgraded system provides a long-term and effective solution for the treatment of low-level radioactive wastewater.

Key words: radioactive wastewater; upgrade; chemical precipitation; evaporation; ion-exchange; cement solidification

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA02050000)

通信作者: 马洪军 E-mail: mahongjun@sinap.ac.cn

某低放射性废水处理设施建于1964年,原为单层局部两层的砌体结构。1981年加建一层,成为二层(局部三层)建筑。原设计及加层均未考虑抗震设防。建筑长为30.4 m,宽分别为10.0 m和6.0 m。一、二、三层层高为4.0 m,二、三层层高为3.7 m,总建筑面积约600 m²。20世纪70—90年代该设施正常使用,采用的处理工艺为化学沉淀和离子交换。1990年—2005年由安盛科兴药业有限公司(简称科兴公司)负责运行和维护,2002年科兴公司更换了新的离子交换系统,并于2005年使用过一次。从2005年起,该设施就处于闲置状态。由于长期搁置及风化侵蚀,设施内的电气线路、上下水管网严重老化,部分工艺设备已无法使用,控制系统失效,且通信、消防、安防等功能严重缺失。为满足本所钍基熔盐核能系统基础研究及科研生产需要,亟需对该低放射性废水处理系统和配套设施进行升级和改造。

根据本所低放射性废水产生的实际情况,决定采用国内科研院所和核电站广泛应用且比较成熟的化学沉淀、蒸发和离子交换组合工艺对原系统进行改造^[1]。化学沉淀法适用于处理含盐量较高的废水,去污因子在10左右。蒸发浓缩法适用于处理含有难挥发性放射性核素的废水,可以得到很高的去污系数和浓缩系数,其去污系数一般在10⁴~10⁶。离子交换法适用于处理溶解性无机污染物含量和放射性活度比较低的废水,一般单床对混合裂变产物废液的去污系数为10~10²,双床和混合床的去污系数为10²~10³^[2]。三种处理工艺的组合应用可以满足多种工况下放射性废水处理的需要^[3]。另外,全面改造了原设施内的水、电、风等配套设施,并新增了通信、消防和安防等功能。

1 放射性废水源项

1.1 放射性废水中的核素种类

调查结果表明,废水中的放射性核素主要来自提取²³³U(辐照²³²Th获得)实验中产生的不再被循环利用而进入废水中的铀系元素和裂片核素,主要有²³³Pa、⁸⁹Sr、⁹⁰Sr、⁹⁰Y、⁹¹Y、⁹⁵Zr、⁹⁵Nb、^{103/106}Ru、¹⁰⁶Rh和¹³⁴Cs等。

1.2 放射性废水的产量及活度

调查结果表明,放射性废水的产生量约为30 m³/a,放射性总活度≤2.0×10⁵ Bq/L,包括工艺排水、设备去污、防护用品和操作人员去污冲洗产生的废水等。

2 处理目标

放射性废水处理设施改造后,可对嘉定园区相关部门产生的低水平放射性废水(总活度≤4.0×10⁶ Bq/L)进行处理,蒸发工艺的处理能力为0.2 m³/h,离子交换工艺的处理能力为0.5 m³/h。处理后废水满足《污水综合排放标准》(DB 31/199—2009),即总α<1 Bq/L,总β<10 Bq/L,达标排放。

3 难度分析及措施

此次改造在建筑方面属于修缮,即不能改变建筑的结构和新增面积,只能在原有建筑的基础上进行少量改动,如门、窗的更换,地面、墙面和吊顶的改造。而该低放射性废水处理设施建造年代早,基础结构差,二楼的承重无法满足现有工艺的要求,这就对工艺设备的布局提出了挑战。经过反复讨论和多次修改,最后决定尽可能将重的设备布置在一楼,同时对部分系统进行简化,如水泥固化系统;对必须放置在二楼的部分设备所在房间进行局部加固,如蒸发工艺间和离子交换间(见图1)。另外,为了满足放射性物质操作和国家电离辐射防护有关标准和法规,采用了先进的工艺设备和仪表,并对主要工艺设备的操作采用远程控制。



图1 低放射性废水处理设施内的部分房间加固
Fig. 1 Reinforcement of low-level radioactive wastewater treatment facility

4 低放射性废水处理设施改造

低放射性废水处理设施改造主要有两部分:一是废水处理工艺系统改造;二是基建辅助系统改造。

4.1 低放射性废水处理工艺系统改造

4.1.1 工艺流程

根据未来科研、生产任务和原低放射性废水处理设施的实际情况,提出废水处理工艺设计方案。预计产生的放射性废水中含有少量的泥沙、悬浮颗粒和各种盐类等物质,放射性总活度≤2.0×10⁵ Bq/L,因此决定采用化学沉淀、蒸发和离子交换组

合工艺。

低放射性废水主要产生于 103 放化楼,103 放化楼内设置有 2 个 1 m³ 的废水暂存罐。当暂存罐内的水位达到设定高度时,用扬液器将废水通过特排管道抽送到 2 个 20 m³ 废水暂存罐中。当其中一个 20 m³ 的废水暂存罐储满后进行取样分析,分析其化学组成和放射性活度。根据分析结果调节 pH 值和确定下一步处理工艺。若废水中含有较多杂质颗粒物,则采用化学沉淀处理;若废水的放射性浓度 > 1.0 × 10³ Bq/L,则采用蒸发系统处理,其处理能

力为 0.2 m³/h,处理后经取样测定如放射性浓度仍未达到排放限值,可再经离子交换处理,离子交换系统的处理能力为 0.5 m³/h。若废水的放射性浓度 < 1.0 × 10³ Bq/L,则不经蒸发直接采用离子交换处理。离子交换柱出水流入缓冲水池,经取样检测合格的废水排入 150 m³ 的废水暂存池,经取样检测不合格的废水返回冷凝液罐,重复进行离子交换直至达标。处理过程中产生的化学沉淀泥浆和蒸残液送水泥固化系统进行固化,产生的废树脂不经水泥固化处理直接装桶,如图 2 所示。

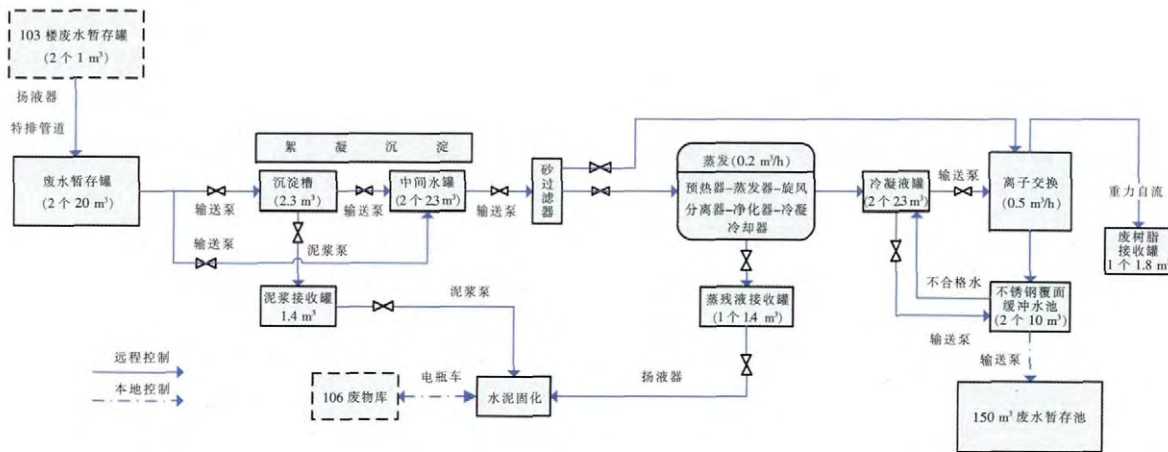


图 2 低放射性废水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of low-level radioactive wastewater treatment system

4.1.2 平面布局

低放射性废水处理设施为地上二层(局部三层)建筑,一、二层面积均为 288 m²,三层面积约为 24 m²。改造后一层布置卫生通道、控制室、空压机房、砂滤间、锅炉房、冷凝液间、蒸残液存放间、扬液器间、水泥固化间、配电间和排风机房;二层布置沉淀工艺间、取样间、蒸发工艺间、离子交换间、分析实验室、新工艺实验室和试剂添加间;三层布置送风机房。废水暂存罐布置在楼外西侧的地下,不锈钢缓冲水池布置在楼外北侧的地下,如图 3、4 所示。

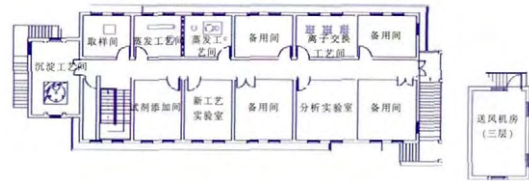


图 4 低放射性废水处理设施(二、三层)

Fig.4 Layout of second/third floor

- ① 人流。工作人员经卫生通道进入工作岗位。卫生通道包括家常服更衣柜、工作服更衣柜和污衣柜。工作人员应在卫生通道换好工作服并佩戴个人防护用品后进入不同的工作岗位;离开放射性工作区域时需进行放射性表面污染检测,如合格则更换家常服出来,如不合格应先将受污染的工作服脱到污衣柜,经淋浴并检测合格后换家常服出来。
- ② 物流。外运水泥、沙子等从水泥固化间的北门运入水泥固化间,固化好的包装桶再经北门运出,其他工具、材料等从一层东门进出。

4.1.3 室外特排水管道
室外特排水管道用于将 103 放化楼产生的低放

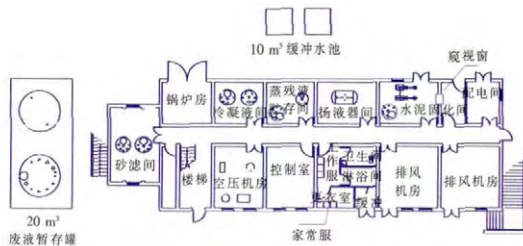


图 3 低放射性废水处理设施(一层)

Fig.3 Layout of first floor

射性废水输送到2个20 m³的废水暂存罐中。为防止输送过程中发生意外渗漏,特排水管道设计为双层管,内管直径为38 mm,材料为不锈钢321,套管直径为58 mm,材料为不锈钢304。特排水管道放置在地沟内,采用碳钢托架固定,托架间距不超过3 m,管道与碳钢支架之间垫橡胶垫。地沟深为0.55 m,壁厚为0.2 m,沟宽为0.4 m,地沟覆土深为0.1~1 m,防水等级为一级。特排管道敷设时按0.005坡度坡向20 m³的废水暂存罐,并在沟底最低处设排水管接至就近雨水系统。

4.1.4 废水处理工艺控制系统

低放射性废水处理系统工艺流程较复杂,大量阀门需要频繁操作,大量工艺参数需要监视。本着减轻劳动强度、提高工作效率和改善工作环境的设计原则,设置了DCS系统,使本项目自动化水平达到较高水平。工艺控制系统具有远程控制、实时显示、安全联锁和视频监控等功能。通过DCS控制系统可以远程控制废水输送泵、控制阀、真空泵和空压机等的启动和停止,以及实时显示液位、流量、压力、pH值和各处理工序的状态等;当液位或压力超过设定值时安全联锁系统会自动开启并报警;视频监控主要是对一些比较重要的房间进行实时监控和录像,包括蒸残液贮存间(1台)、扬液器间(1台)、蒸发工艺间(2台)和水泥固化间(1台)。

4.1.5 水泥固化系统

根据《放射性废物安全管理条例》,核技术利用单位应当对其产生的不能净化排放的放射性废水进行处理,转变为放射性固体废物。低放射性废水处理设施中原水泥固化系统是一条较为完整、复杂的生产线,工艺自动化程度较高,但由于建筑条件的限制和每年的固化量比较少,后对其进行了简化(见图5)。

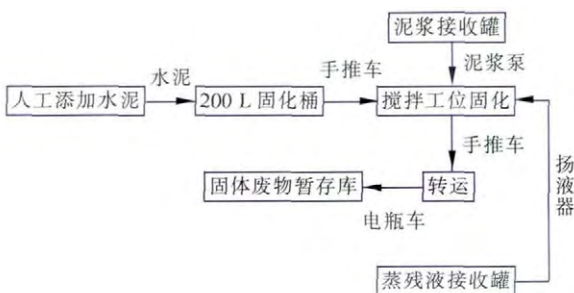


图5 水泥固化工艺流程

Fig. 5 Flow chart of cement solidification system

简化后只保留了水泥搅拌工位,升降支架和必要的电器附件;水泥称量、填装、固化桶的进出、取封盖等均为人工操作。

4.1.6 辐射屏蔽

该设施的处理对象是低放射性废水($<4 \times 10^6$ Bq/L),但在废水处理过程中会产生放射性浓度较高的蒸残液,这部分废液可能达到中放射性水平,因此需要对其进行辐射屏蔽^[4]。从蒸残液的产生、输送和处理流程可以看出,需要进行屏蔽的内容有蒸残液接收罐、扬液器和水泥固化桶。

根据处理对象的性质和处理工艺的去污系数,蒸残液接收罐和扬液器的屏蔽源项按照200 mCi计算,水泥固化桶的源项按照50 mCi计算,要求屏蔽后房间内的剂量当量率 $<10 \mu\text{SV/h}$ 。由于房间内的空间有限,最后决定采用铅砖进行屏蔽。

4.2 基建辅助系统改造

4.2.1 送、排风系统

为防止放射性污染气体向环境扩散,满足工作、生产需要,保证工作人员身体健康,保护环境,根据放射性生产厂房辐射防护分区的有关规定,低放射性废水处理设施内设置了一套全排系统,同时设置一套送风系统作为排风时的补风。排风经预过滤器和高效过滤器过滤后通过烟囱($H=20$ m)排至室外。送排风系统采用PLC控制器为核心的控制单元进行控制,以满足使用要求。

按照放射性区域分区管理规定,将低放射性废水处理设施划分为控制Ⅱ区、控制Ⅰ区和监督区,控制Ⅱ区的换气次数为12次/h,控制Ⅰ区的换气次数为5次/h,监督区采用自然通风。控制Ⅱ区有蒸残液贮存间、扬液器间和水泥固化间,监督区有锅炉房、配电间和备用间,其余房间为控制Ⅰ区。

4.2.2 电气

电气方面改造主要包括工艺设备配电系统、空调及送排风系统配电系统、照明系统、消防设备配电和防雷接地系统等。低放射性废水处理设施内的二级负荷容量为40 kW,三级负荷容量为396 kW,其中电加热锅炉的功率最大(280 kW)。

4.2.3 弱电

弱电方面改造包括安全防范系统、综合布线系统和火灾自动报警系统。

安全防范系统由入侵报警、视频监视系统和门禁控制系统组成。在低放废水处理设施一、二层的

走廊两侧设置视频监控及入侵报警系统,包括红外双鉴探测器和彩色半球摄像机各 4 套。当系统探测到非法入侵,探测器报警并联动报警区域附近的摄像机,后台自动弹出报警画面。在各进出设施的大门口设置门禁控制系统,授权人员通过刷卡可进出,并储存人员通行记录,定期核查。设施一、二层东侧的大门采用防盗门,安装电锁控,平时关闭不使用,设置紧急出门按钮,在发生突发应急事件时能够顺利打开。

设施内的计算机网络(数据)和电话(语音)系统采用综合布线系统。在控制室、实验室设置数据及语音信息点,数据及语音信息点均为 3 个。

低放射性废水处理设施采用二级火灾自动报警系统。在设施的走廊、各个工艺间及实验室等房间内设置感烟火灾探测器,并在相邻部位设置带电话插孔的手动报警按钮,声光报警器。当任意层发出火灾报警信号时,系统火灾报警控制器报警并显示着火区域。当火灾确认后,系统联动控制模块自动切除报警层的非消防电源,强制接通本层应急照明。

4.2.4 给排水

给排水改造主要包括室内生活、生产给排水系统和生活热水系统等。低放射性废水处理设施的生活给水由室外给水网直接供给,生活给水在室外设置水井表。本设施的总人数按照 40 人设计,生活用水量标准按 50 L/人,最高日生活用水量约为 2 m³/d,生产用水量约 4 m³/d。

4.2.5 门、窗、墙面和地面

低放射性废水处理设施的外门均采用钢制防盗门,内门除蒸残液贮存间、扬液器间和水泥固化间采用钢制密封门外,其余均采用成品模压门。除水泥固化间窥视窗采用 70 mm 的铅玻璃外,其余窗户均采用铝合金双层玻璃窗。配电间、锅炉房和备用间的墙面采用普通乳胶漆粉刷,卫生通道的墙面张贴瓷砖,其余房间、走廊和楼梯间的墙面均采用磁性油漆粉刷。地面除卫生通道和锅炉房外,均采用环氧自流平地坪。

5 结论

低放射性废水处理设施的改造是一项涉及多学科

的系统工程,在设计时需熟悉国家相关法规标准,并充分调查和研究本单位的实际情况和各处理工艺的优缺点,选择有资质、有经验和口碑良好的设计单位和施工单位。

此次低放射性废水处理设施改造包括工艺系统改造和配套设施改造两部分。改造后系统运行稳定可靠,操作安全便捷,处理能力为 0.2 m³/h,处理后废水的放射性活度浓度满足《污水综合排放标准》(DB 31/199—2009)。此次改造工程既满足了国家相关法规对低放废水输送、暂存和处理的要求,又能为解决本单位低放射性废水的处理提供出路。但是,由于此次改造是在原有建筑基础上进行的,原建筑的结构基础差、面积小,这对废水处理工艺设计和设备的合理布置都造成了一定影响。

参考文献:

- [1] 侯若梦,贾瑛. 放射性废水处理技术研究进展[J]. 环境工程, 2014, (S1): 57-60, 84.
- [2] 杨庆,侯立安,王佑君. 中低水平放射性废水处理技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 103-117.
- [3] 中国大百科全书环境科学编委会. 中国大百科全书·环境科学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2002.
- [4] 贾晓鸿. 田湾核电站降低放射性废物蒸残液的研究与实践[J]. 硅谷, 2014, (13): 155-159.



作者简介: 王帅(1980—), 男, 内蒙古化德人, 博士, 主要研究领域为放射性“三废”处理和工程。

E-mail: wangshuai@sinap.ac.cn

收稿日期: 2014-11-12