

# 应用焚烧技术处理核电厂放射性 固体废物的技术经济分析

刘 佩, 刘 昱

(中国广东核电工程设计有限公司, 上海 200030)

**摘 要** 介绍了中国改进型三环路压水堆(CPR1000)放射性固体废物的来源和当前放射性固体废物处理系统,并以含4台CPR1000机组的厂址为例,对当前废物处理工艺和使用焚烧技术的处理工艺进行了比较分析。结果表明,焚烧技术在核电厂低、中水平放射性固体废物减容和废物处理经济性方面具有明显的优势。

**关键词** 焚烧技术; CPR1000; 放射性固体废物

**中图分类号** TL94

**文献标识码** A

核电厂运行过程中所产生的放射性固体废物的处理与处置是核电发展中必须解决的重要问题之一。在国家大力发展核电的背景下,更多的核电厂在近几年将陆续建成,每年积累产生的放射性固体废物量也将成倍增加,如不加以严格控制和采取减容措施,势必造成放射性废物暂存压力、增加最终处置费用和电厂运行成本。随着核电厂群堆建设和运营模式的形成,在核电厂内选取合理的废物处理工艺,以满足废物最小化以及日益严格的包装废物总量控制要求日益急迫。目前放射性可燃废物焚烧技术在中国改进型三环路压水堆(CPR1000)废物处理工艺中的应用具有很大的潜力<sup>[1]</sup>。本文以含有4台CPR1000机组的厂址为例,假设使用焚烧技术处理放射性固体废物,从固体废物最小化和降低最终处置费用两方面与当前使用的处理技术进行了比较分析。

## 1 CPR1000 固体放射性废物处理系统介绍

CPR1000 固体废物处理<sup>[2-3]</sup>系统(TES)收集、暂存、固化(或固定)、压缩、包装和临时贮

存核电厂运行和维护时产生的放射性固体废物。放射性固体废物暂时在贮存库内进行放射性衰变后,或者在废物暂存库(或贮存厂房)贮存期满后,低、中水平放射性固体废物按照国家区域处置政策送国家区域处置场进行最终处置。

固体放射性废物处理系统一般位于核辅助厂房内的废物收集处理站,为2台机组共用。废物辅助厂房内的废物分拣、压缩、打包及贮存等工序和废物暂存库为全厂共用(一般为4台或6台机组)。

## 2 放射性固体废物的来源和分类

根据放射性固体废物的特点,将机组运行和维护过程中产生的固体废物分为4类:废离子交换树脂、浓缩液、废过滤器芯子和干固体废物,干固体废物也称技术废物(以下称技术废物)。各种放射性固体废物的设计年产生量及其放射性水平列于表1。

### 2.1 废离子交换树脂

废离子交换树脂来自核电厂化学和容积控制系统(RCV)、蒸汽发生器排污系统(APG)、

收稿日期 2010-03-15

作者简介:刘佩(1985—),男,2007年毕业于重庆大学热能工程专业,助理工程师。E-mail:liupeit@cgnpc.com.cn

表 1 CPR 1000 放射性固体废物年产生量<sup>1)</sup>及放射性水平

Tab.1 Annual Output and activity of CPR1000 solid radwaste

种类	设计年产生量	物理特性	备注
废离子交换树脂	34 m <sup>3</sup>	低水平 20.5 m <sup>3</sup>	低水平 <0.37 TBq/m <sup>3</sup>
		中水平 7.5 m <sup>3</sup>	中水平 0.37 TBq/m <sup>3</sup> ~3.7 TBq/m <sup>3</sup>
		高水平 6 m <sup>3</sup>	高水平 >3.7 TBq/m <sup>3</sup>
浓缩液	20 m <sup>3</sup>	放射性活度： 3.7 TBq/m <sup>3</sup>	
废过滤器芯子	218 个	外表面剂量率： <2 mSv/h :100 个	
		≥ 2 mSv/h :118 个	
技术废物	280 m <sup>3</sup>	85%为可压缩， 15%为不可压缩	布、纸、塑料及废的设备零部件等废物

1)参考 CPR1000 核电厂初步安全分析报告,数据为 2 台机组年设计固体废物产生量。下文中除特别说明外均表示 2 台机组的废物产生量 and 对应处理结果。

硼回收系统(TEP)、反应堆和乏燃料水池冷却及处理系统(PTR)、放射性废液处理系统(TEU)的离子交换器。

## 2.2 浓缩液

浓缩液主要来自 TEU 的蒸发装置产生的蒸残液,在特殊情况下,少量来自 TEP 系统蒸发器的废液和热车间疏水系统(SRE)的化学废水。

## 2.3 废过滤器芯子

废过滤器芯子同样来自 APG、PTR、RCV、TEP 和 TEU 的过滤器。通风过滤器不在 TES 系统中封装,如需要,可在废物辅助厂房对其进行压缩。

## 2.4 技术废物

技术废物来自核岛各工作现场,分为可压缩和不可压缩两类。其中,可压缩废物包括抹布、塑料布类、纸张、口罩、手套、防护鞋套、防护服等等;不可压缩废物包括金属零部件、管道、阀门、木材、混凝土等<sup>[4]</sup>。

# 3 放射性固体废物处理工艺及效果

## 3.1 传统处理工艺

CPR1000 根据放射性固体废物的来源、种类和性质,采用不同的处理手段和不同的废物桶封装。主要采用的处理手段有:(1)对工艺放射性固体废物(如浓缩液、废树脂和废过滤器芯子),采取桶内水泥固化(或混凝土固定)处理;(2)对可压缩技术废物,采取压缩打包封装;对不可压缩干固体废物,采用直接装桶封

装处理。放射性固体废物中的部分可燃废物,如部分废离子交换树脂和技术废物,在 CPR1000 废物处理工艺中按传统方法处理。

## 3.2 采用焚烧技术处理放射性固体废物

焚烧技术是被世界各国公认的能有效减少放射性废物体积的有效措施之一<sup>[5]</sup>。若将焚烧技术应用在放射性固体废物处理工艺中,可以对废树脂和可燃固体废物进行焚烧,并对焚烧灰固化处理,其他可压缩不可燃废物采取超压和水泥固定处理,不可压缩固体废物进行直接装桶处理。焚烧设备从对燃烧空气量的控制分为热解焚烧炉、过量空气焚烧炉、控制空气焚烧炉等<sup>[6-7]</sup>。早期焚烧炉一般采用过量空气焚烧炉,近年新建的焚烧炉多为热解焚烧炉。这些焚烧炉都可以焚烧一般的可燃废物,还可以焚烧可燃的液体废物(废油等)和低放射性废树脂。可燃放射性废物经燃烧处理后会最大程度的减容,一般废物减容系数可以达到 80~120(包括二次污染物的处理),可燃废物焚烧后由有机物转化为无机物(焚烧灰),这既可以大幅度减少放射性废物的贮存、运输和最终处置费用,又可以大大提高贮存、运输和最终处置的安全性。

在国外,焚烧炉技术已经运用了很多年,很多国家都使用焚烧技术处理可燃放射性固体废物,诸如比利时、法国、德国、日本、斯洛伐克、西班牙和美国等<sup>[6-7]</sup>,这些国家用于放射性废物处理的焚烧设备列于表 2。

### 3.3 放射性固体废物处理工艺比较

传统处理技术和焚烧技术都是目前国际上常见的核电厂低、中水平放射性固体废物处理工艺,相比而言,传统处理技术在国内应用广泛,并有多年成熟运行经验,如秦山一期、秦山二期、大亚湾核电厂。但缺点是废物减容效果差,核电厂废物暂存贮存压力大。

焚烧技术具有可处理废物类型广、减容效果明显等突出优点,目前在国外核电行业或放射性废物处理中应用较多,在国内核电厂中尚无应用先例,国内仅在城市生活垃圾、医疗废弃物等一般废物处理过程中使用,公民更多地关注焚烧技术造成的二次污染问题。随着科

技的发展和先进技术的应用,焚烧技术对二次污染物(如二噁英)的处理效果已日益提高,更加环保、经济、安全。

### 3.4 放射性固体废物处理效果

#### (1) CPR1000 放射性固体废物处理效果

采用传统技术处理放射性固体废物中的低、中水平放射性废离子交换树脂和部分干固体可燃废物,设计工况下, CPR1000 废离子交换树脂和技术废物处理结果(阳江核电有限公司. 阳江核电厂一、二、三、四号机组初步安全分析报告, 阳江核电工程文件内部资料, 2008)列于表 3。

由表 3 知忽略包装桶外形外包装的体积,

表 2 一些国家核设施的焚烧设备<sup>[6,7]</sup>

Tab.2 Incinerator of some countries

国家	设备 / 场地	开始运行时间	焚烧能力	废物性质
比利时	Goprocess, CILVA	1995 年	固体 79 kg/h 液体 61 kg/h	固体、液体和离子交换树脂
法国	Cadarache	1988 年	20 kg/h	商业低放废物处理设备
	Socodei	1998 年	固体 3500 t/a	
	Melox	1994 年	20 kg/h	用于 a 污染的固体废物
	格雷诺布尔		20 kg/h	
德国	卡尔斯鲁厄	1980 年	固体 50 kg/h 液体 40 L/h	固体废物包括织物、塑料、橡胶, 液体包括油、溶剂等
日本	东海村, PNC	1991 年	固体 50 kg/h	
斯洛伐克	Jaslovske Bohunice 废液处理设施(BSC)	2001 年	液体 10 kg/h 固体 50 kg/h	用于处理低放废物
西班牙	ENRESA- EI Cabril	1992 年	固体、液体 50 kg/h	位于低放废物处置厂
美国	橡树岭, 洛斯阿拉莫斯, TSCA 焚烧炉	1991 年	700 kg/h 固体与有机液体	处理混合化学 / 放射性废物
	萨凡纳河, 改进型焚烧设备	1997 年	400 kg/h 固体和 450 kg/h 液体	处理 PUREX 后处理溶剂, 低放与混合废物
	Duratek 橡树岭	1989 年	两个焚烧炉, 每个大约 200 kg/h	商业低放废物处理设施

表 3 CPR1000 放射性固体废物处理结果

Tab.3 Result of CPR1000 and radwaste treatment

		废物装桶产量(个)		
	种类	处理方法		
			200 L 金属桶	400 L 金属桶
技术 废物	废树脂	水泥固化	60	172
	不可压缩废物 15%	直接装桶	210	
	可压缩杂项废物 85%	超压、水泥固定	396 <sup>1)</sup>	132
	合计		270	304
	体积(m³)		54	121.6
总体积(m³)		175.6 <sup>2)</sup>		

1) 396 个 200 L 金属桶压缩后装入 400 L 桶内水泥固定, 减容系数为 0.67 2) 金属桶的外包装所占体积份额很小, 忽略不计<sup>⑧</sup>。

合计总体积 175.6 m<sup>3</sup>。废物在处理前后体积的变化用废物的减容系数( $F$ )来表示:

$$F = V_B / V_A \quad (1)$$

式(1)中, $V_A$ 为废物处理前体积(m<sup>3</sup>), $V_B$ 为废物处理后体积(m<sup>3</sup>)。

根据上述数据可以计算出以下减容系数:

废离子交换树脂水泥固化减容系数: $F_1 = (60 \times 0.2 + 172 \times 0.4) / 34 = 2.38$ ;不可压缩固体废物减容系数: $F_2 = 210 \times 0.2 / (280 \times 15\%) = 1$ 。

(2) 焚烧技术处理放射性固体废物效果

在相同废物源项(见表1)的情况下,若采用焚烧技术处理放射性固体废物,焚烧炉减容系数保守设定焚烧固体废物的减容系数为80,技术废物中85%为可燃废物<sup>[4,5]</sup>,15%为不可燃废物,低、中水平放射性废离子交换树脂可作为焚烧废物,焚烧后的焚烧灰采用水泥固化处理。焚烧灰水泥固化减容系数与废离子交换树脂直接水泥固化减容系数 $F_1$ 相同,放射性固体废物处理列于表4。

## 4 废物处理效果经济性分析

### 4.1 废物最小化比较

按照以上 CPR1000 传统处理工艺和焚烧技术处理工艺对废树脂和干固体废物的处理效果,可以得出采用焚烧技术处理后2台机组废物体积减容量每年为:

$$V_{\Delta} = 175.6 - 64.6 = 111 \text{ (m}^3\text{)}$$

设计工况下,对于核电厂址内的4台机组,则每年废物减容量为 $2 \times V_{\Delta} = 222 \text{ m}^3$ 。其中对于焚烧处理的减容系数、焚烧灰的直接水泥固化减容系数采用了保守选取方法,对于焚烧

灰考虑了水泥固化,未考虑焚烧灰压缩处理手段,如果焚烧灰采用压缩处理手段,还可以使采用焚烧技术后最终产生的废物量更小。

另外,结合大亚湾核电厂实际运行情况,电厂运行过程中还会产生一定量放射性污染废油,核电厂目前还没有处理手段,若采用焚烧技术处理这些废油,对废物最小化更具意义<sup>[4]</sup>。

### 4.2 处置费用分析

国际上对核电厂产生的低、中水平放射性固体一般都采用有偿处置。核电厂产生的这些废物在送往废物处置场进行最终处置时,需要支付一定的处置费用<sup>[9]</sup>。参考目前国际上已运营废物处置场的收费标准和行业指导价,按人民币4万元/m<sup>3</sup>计算(不含运输费用),则4台 CPR1000 机组采用焚烧技术后,废物减容每年节省的处置费用为 $2 \times 111(\text{m}^3) \times 4(\text{万元}/\text{m}^3) = 888(\text{万元})$ 。

4台 CPR1000 核电机组在设计寿命40年内运行,可节约的固体废物处置费用为 $888(\text{万元}) \times 40(\text{a}) = 35\,520(\text{万元})$ 。

上述计算结果未考虑随着全民环保意识的增强,核电厂低、中水平放射性固体废物处置费用的上涨,CPR1000 核电机组延寿期运行以及焚烧设备在多于4台机组的厂址共用等因素。

### 4.3 焚烧装置投资回收期

根据相关资料显示,采用国外技术满足4~6台机组使用的一套焚烧装置(配套废气、废水等2次污染物的处理设施以及安装调试)总费用约为人民币8000万元人民币<sup>[5,7]</sup>(视具体工程和应用炉型确定实际费用),装置设计

表4 焚烧技术处理固体废物情况表

Tab.4 Result of incineration solid radwaste treatment

	种类	处理方法	废物产量	
			体积(m <sup>3</sup> )	200 L金属桶(个)
废树脂	低、中水平 28 m <sup>3</sup>	焚烧、水泥固化	28/80 × $F_1=0.83$	5 <sup>1)</sup>
	高水平 6 m <sup>3</sup>	水泥固化	6 × $F_1=14.26$	72
技术体废物	可燃固体废物 85%	焚烧、水泥固化	280 × 85% × $F_1/80=7.07$	36 <sup>2)</sup>
	不可燃废物 15% <sup>3)</sup>	直接装桶	280 × 15% × $F_2=42.0$	210
合计				323
总体积(m <sup>3</sup> )			64.06	

1)低、中水平放射性废离子交换树脂的比活度比设计值更低,满足焚烧炉的设计要求;2)采用水泥固化属于保守估算,若焚烧灰继续进行压缩处理,体积将会进一步减小;3)包含少量可压缩不可燃废物。



寿命一般为 40~50 年。假设焚烧装置采购、安装、调试时间为 1 年,厂址内 4 台机组每 2 台之间的投产时间差为 2 年,则焚烧装置投资回收期为<sup>[10]</sup>:

#### (1) 静态投资回收期

静态投资期主要为技术方案经济性评价或比较提供直观参考。

$$\sum_{T=1}^{T_1} (C_i - C_0)_T = 0 \quad (2)$$

式(2)中  $T_1$  为静态投资回收期(年),  $(C_i - C_0)_T$  为第  $T$  年现金流入量  $C_i$  与现金流出量  $C_0$  之差(万元),不考虑资金的时间价值。

$$T_1 = (8000 - 888/2 \times 2) / 888 + 2 + 1 = 11(\text{年})$$

理想状况下 4 台机组同时运行并不考虑采购、安装、调试时间,用同样的方法计算,得出焚烧炉静态投资回收期为 9 年。

#### (2) 动态投资回收期

若采购焚烧装置使用银行贷款,按目前 6 年以上贷款利率为 6.12% 考虑,则动态投资回收期为(按照静现值法计算公式):

$$NPV = \sum_{T=1}^{T_d} (C_i - C_0)_T (1+i)^{-T} \quad (3)$$

式(3)中  $T_d$  为动态投资回收期(年),  $(C_i - C_0)_T$  为第  $T$  年现金流入量  $C_i$  与现金流出量  $C_0$  之差(万元),  $i$  为贷款利率,  $NPV$  为静现值。计算得出  $T_d = 18.25(\text{年}) \approx 19(\text{年})$ 。

动态投资回收期 19 年包括采购、安装、调试时间 1 年,厂址内 4 台机组每 2 台的投产时间差为 2 年。若 4 台机组同时运行并不考虑采购、安装、调试时间,用同样的方法计算,得出焚烧炉动态投资回收期为 14 年。

以上计算得到的静态投资回收期 and 动态投资回收期均小于焚烧装置的设计寿命,并具有很大裕量。这说明即使投资焚烧装置投资总费用适量增加,也可在使用寿期内使核电厂受益,投资焚烧装置在经济上是可取的。

## 5 结论

随着核电和核技术的发展应用,低、中放固体废物量日益增多,废物的减容问题越来越受到人们的重视。本文在设计工况下,对采用

焚烧技术与传统应用技术在处理 CPR1000 核电厂放射性固体废物方面进行了分析比较,分析结果表明:

(1) 焚烧技术在放射性固体废物减容处理方面具有明显的优势。对于 4 台 CPR1000 机组的厂址,焚烧炉每年减少容积保守估计约 222 m<sup>3</sup>,且减容量随着厂址内机组数量的增加而增加。

(2) 核电厂废物包装体体积的减少会为后期废物的最终处置带来可观的经济效益。在 4 台 CPR1000 机组的厂址内投资一套焚烧装置,动态投资回收期约为 19 年,在电厂设计寿期内,节省处置费用约为 35 520 万元人民币。

(3) 随着核电厂群堆建设和专业化运营模式的形成,放射性固体废物焚烧技术在 CPR1000 核电厂废物处理工艺中具有很大的应用潜力。在后续核电项目中可将放射性固体废物固化和焚烧处理工艺进行对比,综合考虑废物最终处置问题。

## 参考文献:

- [1] 景顺平. 可燃废物焚烧技术在 CPR1000 中应用的探讨[J]. 核电(中广核集团内部期刊), 2008, 6: 26—31.
- [2] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 249—252.
- [3] 吕殿全. 广东大亚湾核电站放射性固体废物处理及暂存措施[J]. 辐射防护, 1996, 7(4): 304—308.
- [4] 赵剑刚. 核电厂放射性固体废物减容处理[J]. 核电(中广核集团内部期刊), 2008, 6: 32—36.
- [5] 郭志敏. 放射性固体废物处理技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 9: 22—109.
- [6] 罗上庚. 放射性废物处理与处置[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 80—101.
- [7] Nukem. Incineration of radioactive waste [R/OL]. <http://www.nukemgroup.com>, 2007.
- [8] 中国核工业总公司. EJ 1024—1996 低、中水平放射性固体废物包装容器——钢桶[S]. 1996—10—24.
- [9] IAEA. IAEA-TECDOC-1552 Cost considerations and financing mechanisms for the disposal of low and intermediate level radioactive waste [S]. Austria: 2007.
- [10] 张淮建. 动静态分析法在评价节能改造方案经济性中的应用[J]. 江西能源, 2009, (2): 51—53.

## Technical and Economic Analysis of Incineration in Nuclear Power Plant Solid Radioactive Waste Treatment

Liu Pei , Liu Yu

(China Nuclear Power Design Company ,Shanghai 200030)

**Abstract :** The source and current treatment system of solid radioactive waste in CPR1000 was introduced. Adoption of incineration technology in solid waste treatment was compared with current process at a typical NPP site with 4 reactors. Conclusions showed that both in NPP's low and intermediate level solid waste minimization and in disposal cost saving, incineration technology has significant advantages.

**Key words :** Incineration ; CPR1000 ; Solid Radioactive Waste

(上接第 108 页 ,Continued from page 108)

- coefficients of  $^{222}\text{Rn}$  on activated charcoal determined by adsorption-desorption method[J]. Physics , 2001 80(2) :175—176.
- [11] El Samman H , Ucegyptedu , Arafa W , et al. Temperature and humidity consideration for calculating airborne  $^{222}\text{Rn}$  using activated charcoal canisters[J]. Health Physics 2002 83(1) :97—104.
- [12] Von O Gubeli Stori M. Zur Mischadsorption von Radon an Aktivkohle mit verschiedenen Tragergasen[J]. Helv Chim Acta ,1955 37 2224.
- [13] 郭亮天 ,史英霞 ,王瑞云 ,等. 用于核电站放射性气体处理的常温活性炭滞留床研究[J]. 辐射防护 , 1994 ,14(1) :15—24.
- [14] Moeller D W ,Underhill D W. Review and evaluation of factors affecting noble gas adsorption on activated carbon[J]. Nuclear Safety ,1981 22(5) 599.
- [15] 施荫锐 ,姜兆熊 ,吴铁玲 ,等. 活性炭的吸湿性能研究[J]. 林业化学与工业 ,1982 4 :1—11.

## Factors Influencing Dynamic Absorption of Noble Gases by Activated Carbon

Xie Defu , Xiao Detao , Qiu Shoukang

(Nuclear Science and Technology College , University of South China ,Hunan Hengyang 421001)

**Abstract :** The influence factors of dynamic absorption of noble gases in activated carbon is discussed in this paper. The influence of flow rate in a certain range and of  $\text{CO}_2$  concentration in normal environment may be ignored. Dynamic absorption coefficient increases with the increase in system pressure and decreases with the increase in temperature and relative humidity. Water content in activated carbon is practically used as an influence factor instead of relative humidity in the condition of unbalanced absorption.

**Key words :** Activated Carbon ; Noble Gases ; Dynamic Absorption