

# 中国先进研究堆重水浓缩系统设计

赵光辉, 石家娟, 庄毅, 姜百华, 李军德, 李彦水

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

**摘要:** 文章涉及中国先进研究堆重水浓缩系统的功能、工艺方案和流程设计及系统设计的特点。在系统布置设计中, 采用 PDSOFT piping 配管软件建立了该系统的三维模型, 提高了设计效率。

**关键词:** 中国先进研究堆; 重水浓缩系统; 建模; 系统设计

**中图分类号:** TL423      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2006)02-0150-04

## Design of Heavy Water Concentration System for China Advanced Research Reactor

ZHAO Guang-hui, SHI Jia-juan, ZHUANG Yi,  
JIANG Bai-hua, LI Jun-de, LI Yan-shui

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The function, the scheme and the flow design of heavy water concentration system and its characteristic for China Advanced Research Reactor are introduced in the paper. The three-dimensional system model is set up by using the PDSOFT piping software in the process of system layout, and the efficiency of design is improved.

**Key words:** China Advanced Research Reactor; heavy water concentration system; modelling; system design

随着反应堆的运行, 重水被不同程度地稀释, 原因为: 1) 破坏密封时空气中水气进入重水系统; 2) 设备检修时排出重水; 3) 重水净化系统氘化树脂造成部分重水稀释; 4) 由于设备故障重水漏出堆外等。在正常情况下, 堆内重水浓度(以摩尔分数计, 下同)平均每年约下降 0.02%。重水是中国先进研究堆(CARR)必不可少的慢化剂。为减少堆重水的损失, 提供一定数量的高浓度堆用重水, 保证堆的正常运行, 因此, 建立重水浓缩系统。

该系统的功能是将被稀释的反射层重水或其它重水(浓度约为 95.0%)用电解装置进行浓缩, 取得产品重水浓度达 99.80%以上, 经二次蒸馏纯化, 通过重水净化系统向堆内补水。

### 1 系统的设计指标

系统的处理能力为每年处理 5 t 浓度为 95%的原料重水。原料重水技术指标: 浓度约为 95%; 电导率(25 °C)  $\leq 6.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; 总固体物含量  $< 20 \text{ mg}/\text{L}$ ; 氯离子含量  $< 0.1 \text{ mg}/\text{L}$ 。产

品重水的技术指标:浓度  $\geq 99.8\%$ ;电导率 ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )  $\leq 4.0\text{ }\mu\text{s/cm}$ ;总固体物含量  $\leq 12.0\text{ mg/L}$ ;氯离子含量  $< 0.1\text{ mg/L}$ 。

## 2 系统的流程设计

重水浓缩系统的流程图示于图 1。该系统由 5 部分组成:1) 电解浓缩系统;2) 催化合成系统;3) 除碱纯化系统;4) 仪表控制电气保护系统;5) 辅助系统。

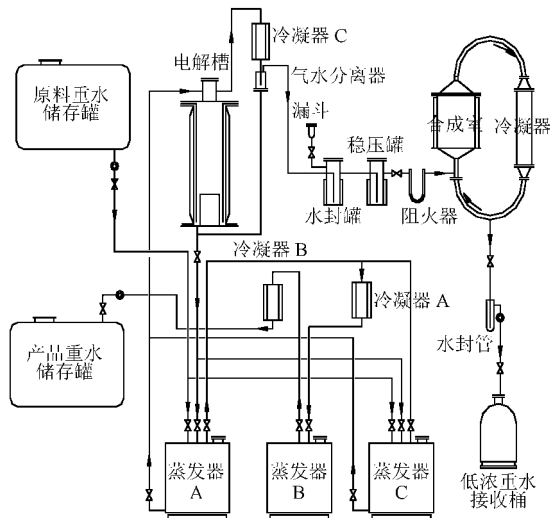


图 1 重水浓缩系统流程示意图

Fig. 1 Schematic flowsheet of heavy water concentration system

原料重水经重水净化系统净化后,流入原料重水贮存罐;打开阀门,原料重水进入蒸发器,测定原料重水的浓度和质量,加入无水  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,配成电解质溶液;以  $\text{N}_2$  气将溶液压入电解槽进行电解,电解过程中逸出的氢、氘、氧混合气体先后经冷凝器、气水分离器,冷凝液流入电解槽底部;除去水气的氢、氘、氧混合气体相继进入水封罐、稳压罐、阻火器,再由喷嘴 ( $\phi 2\text{ mm}$ ) 以流速  $55\text{ m/s}$  喷出,并与循环的氦气混合后进入装有钷催化剂的合成室底部,氢、氘、氧混合气体立即被催化合成为  $\text{D}_2\text{O}$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{D}_2\text{O}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  经上部环管流入低温区冷凝器被冷凝成稀重水,经水封管流入低浓重水接收桶,同时进行取样分析;根据分析结果,判断电解槽中残液的重水浓度,以此确定电解槽是否停止电解,如电解槽浓缩液(简称残液)的重水达到拟定标准,则电解槽停车,将残液流入蒸发

器,经过二次蒸发,再取样,测定浓度和电导,合格指标的重水流入产品贮存罐,供反应堆使用。

### 2.1 电解浓缩系统

#### 1) 基本原理

电解浓缩的原理是利用重水在电解时氢和氘离子在溶液中的迁移率不同而使重同位素氘在电解残液中浓缩。与此同时,轻同位素氢富集于电解逸出气中,从而达到氢、氘分离的目的。

#### 2) 瑞利(Reyleigh)公式<sup>[1]</sup>

电解法的瑞利公式为:

$$\left(\frac{V_0}{V_f}\right)^{(1-\theta)\frac{\alpha-1}{\alpha}} = \frac{x_f}{x_0} \left(\frac{1-x_0}{1-x_f}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

式中:  $V_0$  为重水的原始体积;  $V_f$  为重水的终止体积;  $x_0$  为重水的原始浓度;  $x_f$  为重水的终止浓度;  $\alpha$  为分离系数,  $\alpha = \frac{x}{y}$ ,  $x$  为液相中的氘浓度,  $y$  为气相中的氘浓度。

影响分离系数  $\alpha$  值的主要因素为槽温、极板材料和表面状态等。

根据瑞利公式可导出下式:

$$\frac{\alpha-1}{\alpha}(1-\theta)\ln\frac{V_0}{V_f} = \ln\frac{x_f}{x_0} + \frac{1}{\alpha}\ln\frac{1-x_0}{1-x_f} \quad (2)$$

其中:  $\theta$  为挟带水量。  $\theta, \alpha$  可由实验测定。由式(2)计算  $V_f$  以控制所需达到的  $x_f$ 。

#### 3) 电解槽

电解浓缩系统的主要设备是电解槽。电解槽的结构示于图 2。电极材料为 10 号钢,镀镍。外阴极为 Q235-B,阳、阴极间距离为  $6\text{ mm}$ ,用聚四氟乙烯塑料螺丝固定位置。外阴极外侧装一冷却水套,以将电解液温度控制在  $20\text{ }^\circ\text{C}$  以下。

### 2.2 催化合成系统

催化合成系统的基本功能是将电解槽逸出的氢、氘、氧混合气体随同载气 He 经过装有钷催化剂的合成室合成为  $\text{D}_2\text{O}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  蒸气,再经冷凝器冷凝成稀重水。

#### 1) 爆鸣气的特点及合成水的方法

电解槽放出的爆鸣气易爆,因此,要求合成方法必须安全可靠。爆鸣气中含有大量的氘,要求全部回收。气体中含有放射性氘,要求系统确保密封,并将合成后的水蒸气完全冷凝。

氢氧的燃烧反应为:

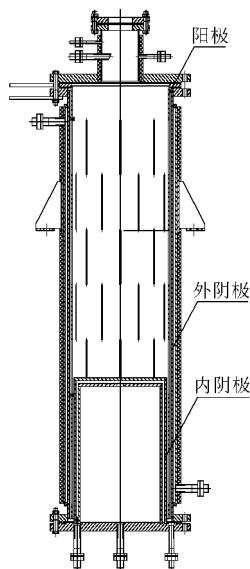


图2 电解槽结构示意图

Fig. 2 Scheme of electrolyzer



如图3所示,氢氧反应有一定的爆炸区。温度为 $560^\circ\text{C}$ 、压力处在 $5\sim 100\text{ mmHg}$ 柱范围内时,氢氧反应会发生爆炸;温度低于 $460^\circ\text{C}$ 时,不会发生爆炸;温度高于 $600^\circ\text{C}$ ,任何压力下均发生爆炸。因此,设计中需严格控制温度和压力,并用循环氦气进行稀释,以降低氢气浓度,避免氢氧混合气发生爆炸。为防万一,设计装有爆破膜,一旦发生爆炸,即可卸压,以保护整个系统。

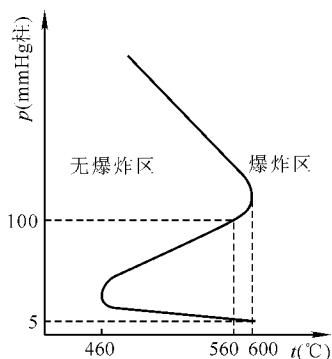


图3 爆炸反应与温度、压力的关系曲线

Fig. 3 Explosive reaction curve with relationship of temperature and pressure

## 2) 氢氧合成装置

氢氧合成装置的主要设备是合成室和列管式冷凝器,它们之间用不锈钢环管构成闭合环状回路,内充适量惰性气体氦。装置的外形结构示意图示于图4。合成装置分为热区和冷区。冷区是冷凝器,温度约为 $20^\circ\text{C}$ ;热区是合成室,温度为 $360\sim 390^\circ\text{C}$ ,压力稍高于常压。因冷热两区气体密度不同而造成自然循环,其速度主要决定于两区的温度差和系统的阻力。爆鸣气在合成室内合成为重水蒸气,重水蒸气在冷区冷凝,并从合成装置的底部排出。

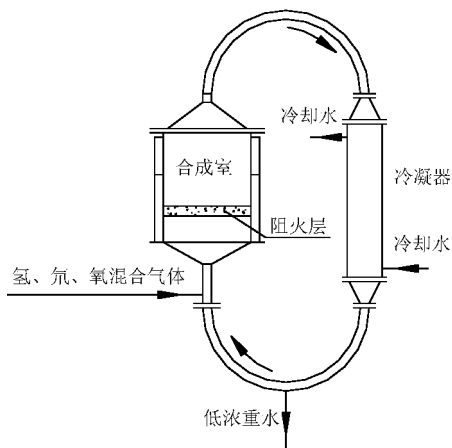


图4 氢氧合成装置结构示意图

Fig. 4 Scheme of  $\text{H}_2\text{-O}_2$  combination chamber

## 2.3 除碱纯化系统

除碱纯化系统的功能是将电解后残留在电解槽中含碱的浓缩产品重水进行二次蒸发,以除去产品重水中的电解质和其它杂质,经电导仪测量合格后,重水流入产品贮存罐。如堆用产品重水,须经离子交换器或堆重水净化系统处理满足反应堆运行水质要求后再进入反应堆。

## 2.4 仪表控制电气保护系统

仪表控制电气保护系统的功能是确保重水浓缩系统正常运行和出现异常时不致酿成事故。为此,设有自动调节装置,使系统的电流、温度、压力被控制在一定范围内。

## 2.5 辅助系统

辅助系统由3个部分组成。

1) 惰性气体补给和增压系统。该系统的作用是将电解过程中产生的氢氧混合气体与循环载气 He 混合进入合成室;利用 He、 $\text{N}_2$  气压

力输送重水;当整个系统停止运行时,以  $N_2$  或 He 气充入进行保护。

2) 真空系统。该系统用于减压蒸发和回收残存于电解质中的重水。

3) 冷却水系统。该系统提供电解槽、冷凝器等设备的液相冷却和气相冷凝。

### 3 系统的设计特点

#### 3.1 安全可靠

1) 催化合成系统高效、安全。为防止回火爆炸,使用喷嘴高速向合成室送气,合成室内有阻火层,防止燃烧发生回火。催化合成系统内充满氦气,氦气在系统内自然循环,可起到稀释爆鸣气浓度和控制反应速度的作用。

2) 电解浓缩系统和催化合成系统多处设有防爆装置。设有防爆装置的设备有电解槽、水封罐、稳压罐、合成室等。系统运行时,一旦发生爆炸,只能发生在设备爆炸点,不会危及整个系统和主要设备安全。

3) 为防止爆鸣气泄漏,电解浓缩和氢氧合成系统工艺间加大了机械排风量,房间每小时换气次数达 10 次,能保证将爆鸣气迅速排出室外。

4) 为防止重水泄漏,除碱纯化系统采用密闭自循环流动运行方式,防止了高浓重水的稀释,并避免了氚的泄漏。

5) 本系统设有自动调节电流、温度、压力的保护系统,可确保重水浓缩系统的正常运行。当出现异常时自动切断电源,停止电解,不致酿成事故。

#### 3.2 经济性

1) 被稀释的反应堆重水含有放射性,浓缩前需净化。本系统与重水净化系统相连,省去了该系统的净化设备。

2) 为减少设备、节约成本,本系统使用蒸发器进行配料,省去了专用配料槽。

3) 本系统的设备、管道及阀门连接件具有较高的密封性,可防止重水泄漏和被稀释。

#### 3.3 布置的合理性

1) 本系统设备多(近 20 台),阀门多(60 多台)。设备管道采用了分隔布置,布局合理。

2) 系统靠设备位差实现流体输送,设计中综合考虑了各设备的标高。

3) 为原料重水贮存罐和产品重水贮存罐、电解槽、氢氧合成装置设计了专用台架,便于维修操作,并节省了布置空间。

4) 本系统设计中采用了最优化的设计方案,并使用了 PDSOFT piping 配管软件,建立了形象、直观的三维模型,极大地提高了工作效率。

### 4 运行特性

#### 1) 正常运行

在正常运行状态下,系统应达到以下工艺参数:电解电流,  $(1\ 000 \pm 20)$  A;电解槽电压,  $(3.0 \pm 0.3)$  V;分离系数  $\geq 8$ ;电解槽温度  $\leq 27$  °C;电解槽压力,  $8 \sim 15$  kPa;电解槽内、外阴极冷却水流量,  $2.5$  t/h;合成室温度  $< 390$  °C;合成室上部压力,约  $1.0$  kPa;稳压罐前压力,  $10 \sim 12$  kPa。

#### 2) 正常启动和停止

系统启动满足下列条件,即电气、仪表控制处于系统启动状态,设备供冷却水,合成室控制温度已达  $100$  °C 以上,并充入 He 气,合成低浓重水接收器就位,电解合成工艺间通风启动。

当合成低浓重水浓度约达  $98.5\%$  时,按瑞利公式计算,电解槽中重水浓度已达产品重水技术指标 ( $\geq 99.80\%$ ),即可按正常操作程序,停止系统运行。

#### 3) 其它运行

系统停止后,电解槽中产品重水放入蒸发器除碱纯化,蒸发量  $1 \sim 2$  kg/h,达到堆用重水水质要求。除碱纯化系统可与电解浓缩系统同时工作,也可单独运行。

### 5 结语

本工作确定了中国先进研究堆重水浓缩系统的工艺。系统的设计符合中国先进研究堆系统设计的相关规定,为研究堆重水浓缩系统的设计积累了经验。

感谢柯国土、袁履正和夏延龄老师对本工作的指导,及回路组全体同志对本工作的支持。

#### 参考文献:

- [1] 仲言. 重水研究堆[M]. 北京:原子能出版社, 1988:485-489.