

# 核电站放射性废液处理过程采用机械蒸汽再压缩技术特性研究

侯超<sup>1,2</sup>, 张化福<sup>1</sup>, 张钰<sup>1,2</sup>, 张振涛<sup>1,2\*</sup>, 杨鲁伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为解决核电站放射性废液的处理问题,设计研究了一套高效、节能的机械蒸汽再压缩(MVR)热泵蒸发浓缩系统,并以含放射性同位素的硝酸锶和硝酸钴溶液来模拟实际含锶和钴元素放射性废液的蒸发浓缩过程。结果表明,系统蒸发量、换热系数、容积效率随蒸发温度变化明显;系统蒸发量、COP受压缩比影响较大;系统去污性能显著,去污因子达1 500。

**关键词:**蒸发; MVR; 热泵; 放射性废液; 去污因子

中图分类号: TQ51

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)02-0158-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.02.037

## Characteristics of mechanical vapor recompression technology for treatment of liquid radioactive wastes in nuclear power stations

HOU Chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua-fu<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhen-tao<sup>1,2\*</sup>, YANG Lu-wei<sup>1,2</sup>

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An efficient and energy-saving mechanical vapor recompression (MVR) heat pump evaporation and concentration system is designed to handle liquid radioactive wastes in nuclear power stations. The solution of strontium nitrate and cobalt nitrate is used to simulate the evaporation and concentration process of the actual liquid radioactive wastes which contain strontium and cobalt. The results show that the evaporation capacity, coefficient of heat transfer and volumetric efficiency of this system change significantly when the evaporating temperature changes. Both the evaporation capacity and coefficient of performance (COP) are influenced obviously by the compression ratio. The decontamination ability of this system is so strong that the decontamination factor reaches 1 500.

**Key words:** evaporation; MVR; heat pump; liquid radioactive waste; decontamination factor

随着世界经济的快速发展和人民生活水平不断提高,人类对能源的需求与日俱增。化石能源的过度使用使能源日渐枯竭,环境日益恶化,使得大规模发展核能成为必然。

核技术的发展势必会产生大量的放射性废液,因此对放射性废液的恰当处理是现在面临的重大问题。对于放射性水平不同的废液,一般将其进行浓缩处理,然后将浓缩产物与人类的生活环境长期安全隔离,任其自然衰变<sup>[1]</sup>。传统的蒸发浓缩过程采用单效或多效蒸发,能耗较高,设备体积庞大,对外界蒸汽比较依赖,并且对二次蒸汽无法回收,余热利用率较低<sup>[2-3]</sup>。由于多效蒸发的

蒸汽温度较高,放射性废液易于在换热管壁面结垢,使得放射性物质残留在管壁,增加潜在风险。采用MVR热泵蒸发浓缩技术,把从原料液蒸发出来的二次蒸汽通过压缩机压缩,提升热焓后通入蒸发器壳侧来加热原料液,这样不但可以回收余热、降低能耗,而且属于温和蒸发,不易结垢。目前国内外针对MVR热泵技术应用在化工、制药、食品、海水淡化、污水处理等领域的研究较多<sup>[4]</sup>,对于处理放射性废水的研究比较少见。因此,本文将针对机械蒸汽再压缩(MVR)技术处理放射性废液过程特性进行研究,为放射性废液的处理开辟新途径。

## 1 实验系统分析

### 1.1 系统工艺流程介绍

本实验采用的MVR热泵放射性废液蒸发浓缩系统工艺流程如图1所示,原料液通过进料泵打入系统,在预热器内与冷凝水换热,预热到蒸发温度后进入蒸发器;料液在蒸发器内受热沸腾后成为气液两相混合物进入分离器;蒸发出的二次蒸汽由分离器上方排出,先后经丝网分离器和玻璃纤维分离器除去夹带液滴后进入压缩机压缩,同时从冷凝水罐引部分冷凝水经水泵向压缩机内喷水,以降低压缩后蒸汽的过热度;压缩后的高焓值蒸汽进入蒸发器壳侧,释放潜热,对料液进行加热,使之沸腾蒸发;蒸汽换热后冷凝成水,流入冷凝水罐。冷凝水一部分作为压缩机喷水,另一部分进入预热器预热进料,经过换热的冷凝水流入储水罐以备用;当系统内料液满足要求浓度后,由排料泵将浓缩液排出进行后续处理。

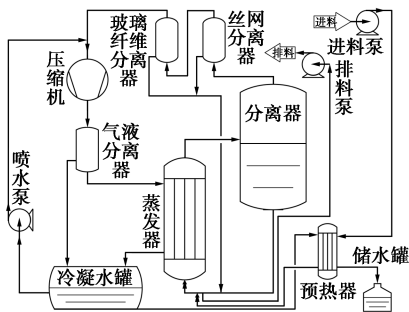


图1 系统工艺流程图

### 1.2 实验系统搭建

根据系统工艺流程及处理物料的特殊性,设计搭建针对放射性废液处理的单螺杆压缩机驱动自然循环式MVR热泵放射性废液蒸发浓缩系统,如图2所示。该系统具有良好的抗腐蚀性和较高的去污能力,适合处理不同放射水平的废水。为了缩短系统启动时间,维持系统稳定运行,外加6 kW电加热在系统启动时预热原料液,也可弥补系统运行过程中散失到外界的热量。



图2 MVR热泵放射性废液蒸发浓缩系统

实验时,为了更精确地模拟实际放射性废液,用含放射性同位素溶液代替实际放射性废液,配比一定浓度的硝酸铯和硝酸钴溶液作为处理原料液对系统性能进行测试。实验主要测量参数包括进料温度、预热后料液温度、蒸发温度及压力、蒸发器壳侧温度及压力、压缩机吸气流量、压缩机吸排气温度及压力、冷凝水流量、冷凝水罐液位、压缩机功率、系统耗电量、料液浓度等。实验采用的测量仪器仪表的技术参数如表1,实验数据采集由安捷伦数据采集仪完成。

表1 试验所用仪表技术参数表

| 传感器   | 测量参数  | 精度/% | 量程                       |
|-------|-------|------|--------------------------|
| 压力传感器 | 压力    | 0.25 | 0~400 kPa                |
| 温度传感器 | 温度    | 0.1  | 0~150℃                   |
| 转子流量计 | 喷水流量  | 1    | 0~500 L/h                |
| 漩涡流量计 | 蒸汽流量  | 1    | 0~1000 m <sup>3</sup> /h |
| 电磁流量计 | 浓缩液流量 | 1    | 0~10 m <sup>3</sup> /h   |

## 2 主要性能指标

MVR热泵蒸发浓缩系统主要性能指标包括系统单位时间蒸发量 $Q$ 、制热性能系数( $COP$ )、系统压缩比 $\varepsilon$ 、压缩机容积效率 $\eta$ 、蒸发器换热系数 $K$ 、系统去污因子 $D_f$ 等。

系统单位时间蒸发量:

$$Q = m/t \quad (1)$$

式中, $m$ 为一段时间系统总的蒸发水量; $t$ 为系统运行时间。该参数表征系统处理能力的大小,其值越大,表明系统处理量越大。

制热性能系数:

$$COP = (Q \cdot r)/(3\ 600 \cdot p) \quad (2)$$

式中, $r$ 为蒸发器壳侧蒸汽冷凝潜热; $p$ 为压缩机功率,kW; $COP$ 是MVR系统重要的能耗指标, $COP$ 越大,消耗单位电量得到的蒸发量越大,节能效果越明显。

系统压缩比:

$$\varepsilon = P_{out}/P_{in} \quad (3)$$

式中, $P_{out}$ 为压缩机排气压力, $P_{in}$ 为压缩机吸气压力。系统压缩比反映的是压缩机把水蒸汽能量提升的程度,压缩比越高,水蒸汽的温升越大,越适合那些沸点温升高的物料<sup>[5]</sup>。

压缩机容积效率:

$$\eta = (Q \cdot v)/(60 \cdot Q_{th}) \quad (4)$$

式中, $v$ 为工质气相比容; $Q_{th}$ 为压缩机理论风量。容

积效率是衡量压缩机性能好坏的重要参数,容积效率越大,说明压缩机在压缩过程中泄露量越少。

蒸发器换热系数:

$$K = (Q \cdot r) / (3\ 600 \cdot A \cdot \Delta t) \quad (5)$$

式中,  $A$  为蒸发器换热面积,  $\Delta t$  为蒸发器壳侧与管侧温差。换热系数是评价蒸发器传热性能优劣的重要指标,换热系数越大,传热效果越好。

去污因子:

$$D_f = D_y / D_1 \quad (6)$$

式中,  $D_y$  为原液中放射性核素含量;  $D_1$  为冷凝液中放射性核素含量。去污因子是去污前后污染物放射性活度之比,表征系统去污性能强弱。

### 3 实验数据处理与分析

图 3 所示为系统蒸发量随压缩比的变化。由图 3 可知,随着压缩比增加,系统蒸发量呈现增长趋势;压缩比越大,压缩机功率越高,单位时间内压缩机对二次蒸汽做功越多,因此蒸发量越大。

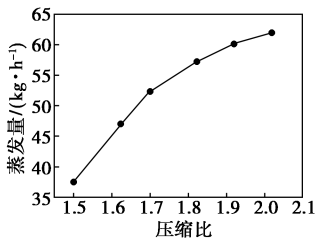


图 3 蒸发量随压缩比的变化

图 4 所示为系统蒸发量随蒸发温度的变化。由图 4 可知,系统蒸发量随着蒸发温度的增加而增大。蒸发温度越高,二次蒸汽比容越小,相同时间内压缩机吸、排气量增加,系统换热量增加,因此蒸发量增大。

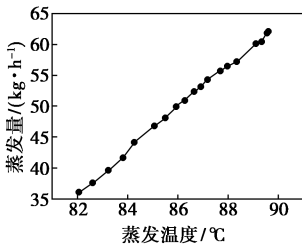


图 4 蒸发量随蒸发温度的变化

图 5 所示为系统蒸发量随进料温度的变化。由图 5 可知,系统蒸发量随着进料温度的增加而增大。进料温度越高,料液被加热至沸腾所需热量越少,压缩后的蒸汽则剩余更多的热量使料液气化,从而产生更多的二次蒸汽,增大了系统的蒸发量。

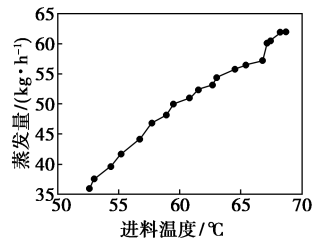


图 5 蒸发量随进料温度的变化

图 6 为实验过程中系统制热性能系数(COP)随压缩比的变化,随着压缩比的增加,系统 COP 逐渐减小;并且减小的速率随压缩比的增加而减小。这是由于当压缩比较小时,随着压缩比的增加,压缩机功率的增加速率远大于系统换热量的增加速率,导致 COP 迅速减小;当压缩比较大时,系统换热量显著增加,COP 下降速率减小。

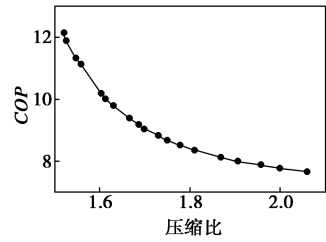


图 6 COP 随压缩比的变化

图 7 所示为蒸发器换热系数随蒸发温度的变化。蒸发温度越高,蒸发器换热系数越大。随着蒸发温度的逐渐升高,料液黏度降低,系统不凝性气体减少,换热系数增加。

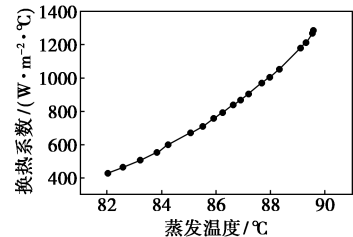


图 7 换热系数随蒸发温度的变化

图 8 所示为压缩机容积效率随蒸发温度的变化。由图 8 可知,压缩机容积效率随蒸发温度的升

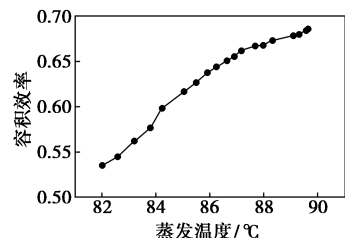


图 8 压缩机容积效率随蒸发温度的变化

高而增大。蒸发温度升高,蒸发量增大,压缩机喷水温度和吸气量增大,容积效率增大;当吸气量增加至接近理论值时,容积效率增加速率减小。

实验针对放射性同位素溶液——硝酸钴和硝酸铯进行性能测试。系统去污因子随运行时间变化趋势如图9所示。由图9可知,钴元素去污因子为 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ ,铯元素去污因子为 $1.5 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^3$ ,系统运行较为稳定,去污性能较强。

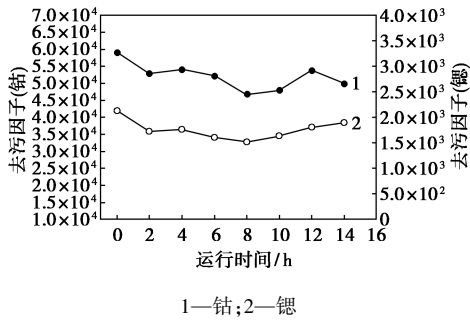


图9 去污因子变化趋势

表2为系统处理前后核素浓度变化。实验时,分别配置3组浓度约为 $10^5 \mu\text{g/L}$ 硝酸铯、硝酸钴原液。经系统浓缩处理后,冷凝水放射性核素浓度减小至 $1 \sim 100 \mu\text{g/L}$ ,浓缩液放射性核素浓度增至 $10^6 \sim 10^7 \mu\text{g/L}$ ,浓缩效果显著。

表2 系统处理前后核素浓度变化  $\mu\text{g/L}$

|     |   | 样本1                | 样本2                | 样本3                |
|-----|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| 原液  | 钴 | $10^5$             | $10^5$             | $10^5$             |
|     | 铯 | $10^5$             | $8.6 \times 10^4$  | $9 \times 10^4$    |
| 冷凝液 | 钴 | 2.89               | 10.89              | 1.95               |
|     | 铯 | 96.5               | 75.3               | 84.3               |
| 浓缩液 | 钴 | $5.13 \times 10^6$ | $7.23 \times 10^6$ | $6.85 \times 10^6$ |
|     | 铯 | $4.89 \times 10^6$ | $6.03 \times 10^6$ | $4.34 \times 10^6$ |

## 4 结论

为了探究MVR热泵蒸发浓缩系统处理放射性废液的可行性,搭建实际系统,以含放射性同位素溶液为原料进行实验,得到下列结论。

(1)系统蒸发量受压缩比、进料温度、蒸发温度影响较大,蒸发量随着压缩比、进料温度、蒸发温度的增加而增大。

(2)*COP*随压缩比的变化较为明显,随着压缩比的增加*COP*呈减小趋势。

(3)蒸发器换热系数、压缩机容积效率随蒸发温度的升高而增大;因此,在工艺允许范围内,增加料液蒸发温度有利于系统高效运行。

(4)系统运行稳定、去污能力较强,对于放射性核素铯元素与钴元素,去污因子分别达到 $10^3$ 和 $10^4$ 数量级;同时系统具有较好的浓缩性能,处理前后浓缩比达 $10^2$ 数量级。

## 参考文献

- [1] 王建龙,刘海洋.放射性废水的膜处理技术研究进展[J].环境科学学报,2013,(10):2639-2656.
- [2] 高丽丽,张琳,杜明照.MVR蒸发与多效蒸发技术的能效对比分析研究[J].现代化工,2012,32(10):84-86.
- [3] 刘军,张冲,杨鲁伟,等.夹套式MVR热泵蒸发浓缩系统性能分析[J].化工学报,2015,(5):1904-1911.
- [4] 庞卫科,林文野,戴群特,等.机械蒸汽再压缩热泵技术研究进展[J].节能技术,2012,(4):312-315.
- [5] 张化福,杨鲁伟,张振涛,等.罗茨风机驱动机械蒸汽再压缩热泵蒸发器系统运行特性的试验研究[J].节能技术,2015,(2):113-117. ■

## 我国成功攻克伴生萤石世界选矿难题

日前,由中国五矿集团公司所属长沙矿冶院研发的“伴生萤石资源综合回收技术”在湖南郴州成功完成工业试验并通过专家组的验收。新技术成功解决了世界选矿难题——难选氧化物矿物类伴生萤石资源综合回收存在的瓶颈问题,整体技术达到国际领先水平。

郴州柿竹园是世界罕见的多种有色金属富集地,被誉为“世界有色金属博物馆”,其中伴生萤石资源储量近1亿t,占全国伴生萤石总量的70%,潜在价值高达200亿元以上。该地区矿石经过前期多金属选矿后,尾矿含有大量未回收萤石资源,但存在主品位低、杂质含量高、多金属选矿残余药剂干扰大这“一低一高一”大的特性

和缺陷,其提纯回收成为业内公认难题,曾多次列入国家科技攻关“五年计划”。

为充分利用柿竹园尾矿萤石资源,中国五矿组建了湖南有色郴州氟化学有限公司,首次采用“多元投入、风险共担、效益共享”的内部协同创新模式,由长沙矿冶院成立以朱超英教授为首的专门团队,经过5年攻关研发了复杂伴生萤石高效回收成套技术。应用该项技术展开的工业试验数据显示,回收后的萤石精矿品位达93%以上,回收率达70%以上,其产业化应用可为郴氟公司年新增直接经济效益达4000万元以上,间接效益更是显著。(中化新网)