

小型放射性废水蒸发装置设计

王佑君¹, 杨庆¹, 侯立安²

1. 第二炮兵工程学院, 西安 710025

2. 第二炮兵工程设计研究院, 北京 100011

摘要 结合放射性废水处理的设计理论和方法, 自行设计了一种小型的放射性废水蒸发处理装置。对节能装置进行了物料衡算和热量衡算, 为节能换热器的具体设计选型提供了具体参数。设计了装置的具体结构并计算了保温结构的具体尺寸, 对设计有节能系统的装置节能效率进行理论验算。验算结果表明, 设计的节能系统节约了能耗和处理时间。实现了装置的连续蒸发运行, 为实现装置的连续控制运行、减少人为操作控制以及实现远距离控制提供了便利条件。

关键词 放射性废水; 废水处理; 蒸发装置; 节能换热器

中图分类号 TH122

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2008)05-0074-03

Design of the Small-scale Radioactive Liquid Evaporator

WANG Youjun¹, YANG Qing¹, HOU Li'an²

1. Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China

2. Engineering Design and Research Institute of the Second Artillery Corps, Beijing 100011, China

Abstract The paper presents methods and calculation processes of a small-scale evaporator design. The process flow chart is briefly described, and calculation is made on material weights and the amount of heat for the apparatus to provide the design parameters for energy saving heat exchanger, and the size of heat preservation structure in the device. Finally, the efficiency of the energy saving system is estimated by theoretical computations, which indicates that the system saves energy consumption, reduces process time, and may work continuously in evaporating and in the controlled mode without much manual operation control, making it easy for the realization of remote control.

Keywords radioactive liquid; waste water treatment; evaporator; saving energy heat exchanger

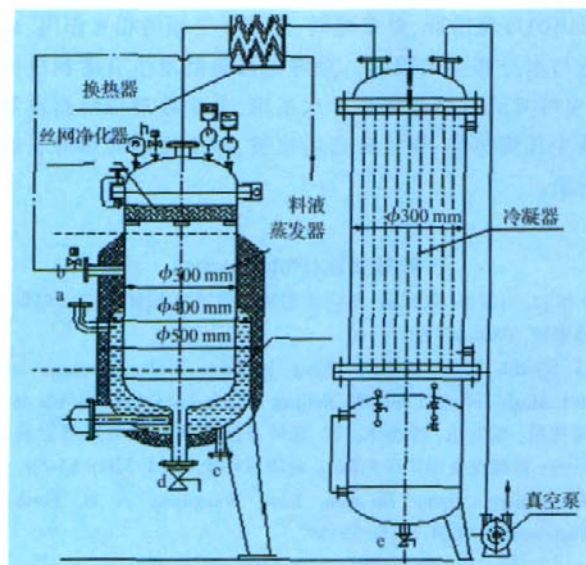
随着核能作为能源的应用, 其产生的放射性废水的处理成为了研究热点。由于蒸发法具有净化系数高、浓缩倍数大、灵活性大、技术理论较为成熟等特点而被广泛应用。但蒸发法存在消耗热能多、运行费用高等缺点, 因此蒸发器的节能问题成为了焦点。

放射性废水在蒸发处理时, 一般采用负压操作, 这有利

于放射性污染的控制, 即使设备元件出现密封失效, 也能确保放射性气、液体不会轻易向外泄漏。鉴于负压操作较常压操作能耗大, 本文根据蒸发处理放射性技术原理, 设计了一套小型化蒸发处理装置, 并设置了节能装置以期解决能耗增加问题^[1]。

1 总体结构的设计

蒸发处理装置设计如图 1 所示。装置主要由真空蒸发器、冷凝器、换热器和辅助处理系统组成。对放射性废水的蒸发处理采用负压操作时, 在蒸发过程中容易造成雾沫夹带问题,



a—导热油注入口, b—装置进液口, c—导热油排出口,
d—装置排出口, e—冷凝器排放口

图 1 真空蒸发废水处理装置

Fig. 1 Wastewater vacuum evaporator

收稿日期: 2007-10-29

作者简介: 王佑君, 西安市东郊洪庆区第二炮兵工程学院 204 教研室, 教授, E-mail: youjunwang@263.net

这极易造成装置出水水质下降。为提高净化效果,减少雾沫夹带,在蒸发器上端设置丝网净化器以去除蒸汽中夹带的放射性液滴。为了实现节能目的,在本装置的蒸发器出口设计了一个换热器,利用蒸汽的汽化潜热预热原始废液;冷凝器用来进一步冷凝经换热后的蒸汽。辅助系统包括液位仪、控制系统、管路设施、真空泵和流量计等。

蒸发处理装置的工艺流程是:原始废水经换热器预热后进入蒸发装置,经进一步加热后蒸发,水蒸气经过换热器换热后经过冷凝器冷凝成液态水;放射性物质等不被汽化而保留在溶液中,待浓缩到一定程度后将蒸残液转出进一步固化处理。

2 蒸发装置的设计计算

在工业换热工程中,一般采用中间传热介质作为媒介进行换热。间接换热的最大优点在于对被加热的工艺介质进行精确的温控。特别是对于放射性废水的处理,由于放射性废水的高危害性,对其处理时采用间接加热方式可使废水蒸发装置维修与保养更加安全^[4]。本蒸发装置采用间接加热方式加热废水,即通过电加热夹套中的导热油间接加热废水,系统真空度为-0.08 MPa,即装置蒸发温度为65℃,水的最大蒸发量为10 kg/h。

2.1 节能装置设计

为实现蒸发装置的节能,采用的设计方案是将二次蒸汽在冷凝之前与进入装置的废水进行热交换,可实现初步冷凝蒸汽减少冷凝水用量,并使原始废水在进入装置之前得到预热,使进入蒸发装置内的废水在极短加热时间内即达到蒸发温度。蒸发器产生蒸汽的温度为65℃左右,在本系统中配置一台高效热交换器,废水在进入蒸发器之前先通过热交换器将温度加热至60℃左右,之后进入蒸发器。

本装置的工艺流程图如图2所示。基本工作过程为:蒸发器蒸发出3 kg水(即液位下降43 mm左右)时,系统按照一定流量开始进液,待达到最高液位时关闭阀门;如此反复,待达到一定浓缩倍数后停止这一循环过程;蒸发到最低液位后,系统关闭运行,电控排放阀门打开,将浓缩废液排出系统。

2.2 节能装置设计计算

进行换热器设计与选型之前,需要确定进液过程中单位时间的进液量及整个进液过程所需的时间。装置进液过程

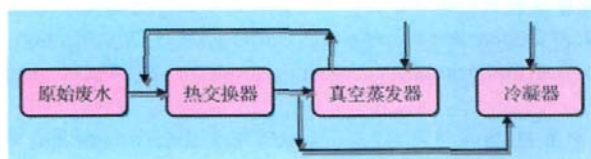


图2 节能预热系统工艺流程图

Fig. 2 System process flow chart for preheating and energy saving

中,蒸发器中的溶剂水在蒸发过程中不断被挥发,但进入蒸发器内的原始废水与预先设定的下降量及进液期间的蒸发量总和相等。蒸发器进液过程的物料衡算关系式为

$$Ft=Wt+M \quad (1)$$

式中F为单位时间进液量(kg/s),W为单位时间溶剂水蒸发量(kg/s),M为预先设定已蒸发量(kg),t为进液时间(s)。

进液过程不仅要满足物料衡算,还需满足热量衡算

$$CFt\Delta t=\eta Wtr \quad (2)$$

式中C为溶剂水比热(kJ/kg·℃),t为进液时间(s),η为蒸汽汽化热利用率(取80%),Δt为温度差(℃),r为蒸汽热焓(kJ/kg)。

通过上述计算,可得知冷、热流体的进出口温度及质量流量。要实现预先设定的预热原始废水目标,需要选择合适的换热器以实现冷热流体间的换热。本装置选用的钎焊板式换热器具体设计选型参照生产厂家提供的设计选型表,选用的钎焊板式换热器换热面积为0.28 m²,尺寸为314 mm×72 mm×50 mm,蒸汽进出口管径为20 mm,液体进出口管径为15 mm,设备材质SUS304。

2.3 蒸发器功耗计算

装置在稳定运行后,通过蒸发出来的蒸汽预热进入蒸发装置的原水,使得本装置只需将达到沸点的水汽化成水蒸气,故每小时蒸发10 kg水装置所需要传递的热量Q₂为

$$Q_2=\eta Wr \quad (3)$$

其中W为单位时间水分蒸发量(即10 kg/h),r为系统真空度对应下水蒸发汽化热(2343.1 kJ/kg),η为能量利用率(85%)。计算得Q₂=27565.9 kJ,转换为功率为7.66 kW,取整即电加热元件功耗为8 kW。

2.4 保温结构设计

蒸发装置夹套中的导热油工作温度为300℃,由于与外界温度存在较大温差,必须进行保温结构设计,最大可能减少热量损失。保温层材料的选择主要遵循以下原则:具有良好的防水性能;耐腐蚀性较强;在温度变化和有振动的工作环境下,不易开裂;化学稳定性好,不易燃烧;

安装方便,外表整洁美观,使用寿命较长;价格合适,性价比较高。目前常用绝热材料主要有硅酸铝纤维制品、超细玻璃棉制品、硅酸钙制品、岩棉及矿渣制品、泡沫塑料类、泡沫玻璃等,本研究选择毡棉。毡棉具有容积密度小、热导率小、耐高温、来源广、价廉、宜填充结构以及机械强度好等特点,初选厚度为50 mm,要求热量损失小于500 W/m²。

蒸发器由圆筒状零部件组成,对于通过圆筒形零部件的壁厚所进行的热传导,由于圆筒体每一层截面的面积都随半径不同而不同,因此传热计算式与平壁传热不同。假设有一圆筒,内半径为r₁,外半径为r₂。在半径为r处,取厚度为dr的一薄壁圆筒,按傅里叶定律,该薄壁圆筒的传热式为

$$Q=-\lambda A \frac{dt}{dr}=-\lambda \cdot 2\pi r l \frac{dt}{dr} \quad (4)$$

从筒体内壁到外壁进行积分,即

$$Q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = Q \ln \frac{r_2}{r_1} = -\lambda \cdot 2\pi l \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (5)$$

整理简化为

$$Q = \frac{\lambda A_m (t_1 - t_2)}{\delta} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda A_{m1}} + \frac{\delta}{\lambda A_{m2}} + \dots + \frac{\delta}{\lambda A_{mn}}} \quad (6)$$

式中, δ 为圆筒体厚度, A_m 为对数平均面积

$$A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{A_2}{A_1}} \quad (7)$$

式中 Q 为单位长度热损失 (W/m), λ 为导热系数 ($W/(m \cdot K)$); l 为薄壁圆筒长度 (m), A 为薄壁圆筒表面积 (m^2), σ 为圆筒体厚度 (m), A_m 为对数平均面积 (m^2), t 为保温层内外壁温度差 ($^\circ C$)。

初选设计厚度为 50 mm 时, 管长热损失为 495.75 W/m, 小于设定值 500 W/m, 表明初选保温结构厚度满足设计要求。

2.5 节能效率验算

本装置中设计节能换热系统的目的是节能、减少操作时间、保证系统运行的连续性。下面通过将 100 L 废水浓缩为 10 L 浓缩液, 以有、无该系统的 2 个实验为例, 进行具体验算。

1) 不设置节能预热真空蒸发系统

将 100 L 废水浓缩为 10 L 浓缩液所需能量为: 将 100 L 废水从 15 加热到 60 以及将 90 L 的 60 水汽化为 60 , 水蒸气所需的能量总和, 总耗能 Q_1 为

$$Q_1 = C m \Delta t + m_1 r_1 \quad (8)$$

式中 C 为溶剂水比热 ($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$), m 为总废水量 (kg), m_1 为需蒸发水量 (kg), Δt 为温度差 ($^\circ C$), r_1 表示水蒸汽热焓 (kJ/kg)。

2) 设置节能预热真空蒸发系统

将 100 L 废水浓缩为 10 L 浓缩液所需能量为: 将 30 L 废水 (第一次装置进水量) 从 15 加热到 60 , 以及将 90 L 的 60 水汽化为 60 水蒸气所需的能量总和, 总耗能 Q_2 为

$$Q_2 = C m_2 \Delta t + m_2 r_1 \quad (9)$$

式中 C 为溶剂水比热 ($kJ/(kg \cdot ^\circ C)$), m_2 为第一次进液废水量 (kg), m_3 为需蒸发水量 (kg), Δt 为温度差 ($^\circ C$), r_1 为水蒸气热焓 (kJ/kg)。

根据计算得出, 将 100 L 废水浓缩为 10 L 浓缩液时, 所需能量分别是: 不设置预热系统的真空蒸发为 230 859 J, 设置预热系统的真空蒸发为 217 629 J, 换算为功耗分别是 64.13 kW·h, 60.45 kW·h。设置有节能预热系统的较不设置有节能预热系统的真空蒸发节能 6%。这表明, 节能预热系统的设计节约了能耗和处理时间, 同时实现了装置的连续蒸发运行, 为实现装置的连续控制运行、减少人为操作控制以及实现远距离控制提供了便利条件。

3 结论

本文设计的小型放射性废水蒸发装置实现负压条件下对放射性废水的蒸发浓缩处理, 提高了装置运行的安全性和可靠性。针对装置的特点设计的节能系统, 解决了负压操作带来的能耗增加问题, 同时具有对二次蒸汽初步冷凝, 减少冷凝水的用量功能。实验证明, 设计的蒸发装置对小规模放射性废水具有较高的净化处理能力。

参考文献 (References)

- [1] 姜圣阶, 任凤仪. 核燃料后处理工学[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
Jiang Shenjie, Ren Fengyi. Nuclear fuel reprocessing [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1995.
- [2] 陈南岭. 导热油在工业换热过程中的应用 [J]. 石油和化工节能, 2006 (1): 8.
Chen Nanling. Petroleum and Chemical Industry Save Energy, 2006(1): 8.
- [3] 娄爱娟, 吴志泉, 等. 化工设计[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002.
Lou Ai'juan, Wu Zhiqun, et al. Chemical industry design[M]. East China University Science and Technology Press, 2002.
- [4] 秦叔经, 叶文邦, 等. 换热器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Qin Shujing, Ye Wenbang, et al. Heat exchanger [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.

(责任编辑 岳臣)

· 学术动态 ·

第四届上海国际分析化学研讨会

(Analytica China 2008) 正在征文

由中国化学会、德国慕尼黑国际博览集团联合主办的第四届上海国际分析化学研讨会将于 2008 年 9 月 23-25 日在上海举行。会议设邀请报告、分组报告、墙报展讲等形式, 分为 7 个组: Analytical Quality Assurance; Lab Strategy and Organization; Environmental Analysis; Mass Spectrometry; Proteomics/Metabonomics; Electroanalysis/Sensors; Analysis of Food and TCM。

请从中国化学会会议管理网上报名系统报名参会, 论文投稿截止日期为 2008 年 7 月 31 日。会议详情见 www.ccs.ac.cn; 博览会信息见 www.a-c.cn。

联系人: 张灿

电话: 010-62568157

电子信箱: zcc@ccas.ac.cn