

放射性废物处理丛书(2)

放射性废液蒸发器的 设计与运行

原子能出版社

内 容 简 介

本书译自国际原子能机构出版的技术报告丛书第 87 号，是介绍放射性废液浓缩处理方法(离子交换法、蒸发法、化学处理法)的第二本。

全书共分五章，介绍了各种类型蒸发器的特点；讨论了各种蒸发器在处理放射性废液中的优缺点；探讨了操作中遇到的若干问题，并附有各种蒸发处理工艺的流程示意图等。

本书可供从事原子能事业的工厂、科研和设计等单位的工人、技术人员以及大专院校有关专业的工农兵学员参考。

放射性废液蒸发器的设计与运行

王宝贞 邵 刚 译

☆

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $4 \frac{1}{2}$ · 字数 98 千字

1976 年 9 月北京第一版，1976 年 9 月北京第一次印刷

印数 001—2800 · 定价: 0.38 元

统一书号: 15175 · 062

原 序

要确定用那种方法去除放射性废液中的放射性组分是最有效而又最经济的方法，这是经常遇到的一个难题。为了给一些国家提供某些参考，国际原子能机构出版了关于在浓缩放射性废液方面目前所采用的三种主要工艺（化学处理、蒸发和离子交换）的技术丛书。本书讨论的蒸发法，对于处理中放和高放废液较其他两种方法更为适宜。《放射性废液的离子交换处理》是国际原子能机构于1967年出版的技术报告丛书第78号。《放射性废液的化学处理》是这类技术报告丛书的第三本。

本书是在国际原子能机构工作人员弗兰克(Frank)和布劳德(N. Browder)指导下组织编写的。书中介绍了用蒸发法处理放射性废液的优缺点，论述了各种类型蒸发器的特性，并且指出了如何处理运行中可能遇到的问题。本书取材于许多核设施的实际运行经验。

目 录

第一章 绪论	1
一、去污系数	1
二、体积浓缩倍数	2
三、适合于蒸发处理的废液类型	3
四、腐蚀	4
五、起泡	4
六、结垢与盐析	4
七、蒸发法的一般局限性	5
第二章 各种类型蒸发器及其辅助设备的设计和说明	6
一、蒸发器的类型	6
1. 盘管式或釜式蒸发器	6
2. 自然循环式蒸发器	9
3. 强制循环式蒸发器	13
4. 蒸汽压缩式蒸发器	15
5. 多效蒸发器	18
6. 擦膜式蒸发器	19
7. 其它类型蒸发器	21
二、蒸发器中的传热	29
1. 传热面积	30
2. 温差 ΔT	30
3. 传热系数	31
三、蒸发器辅助设备的类型	32
1. 雾沫分离器	32
2. 冷凝器	32
3. 预热器	33
四、蒸发装置的仪表和控制	33

五、废液蒸发前的预处理及与其它处理方法的配合应用	34
1. pH 值的调节	34
2. 过滤	35
3. 活性炭处理法	36
4. 与其它方法的配合应用	36
第三章 蒸发器的操作程序	37
一、各种类型蒸发器的操作程序	37
1. 浸没式蒸发器	37
2. 薄膜式蒸发器	38
二、运行中的问题	39
1. 雾沫	39
2. 起泡	65
3. 结垢	70
4. 腐蚀	76
5. 含有机物或可爆物的问题	80
6. 总的安全性	81
三、维修	83
四、各种类型蒸发器所需的人力	85
五、各种类型蒸发器的优缺点	86
第四章 蒸发器冷凝液和浓缩液的处置	90
第五章 费用	92
一、投资费用	92
1. 某些现有放射性废液蒸发器的价格	92
2. 各种放射性废液蒸发设备出厂价格的计算	92
二、运行费用	95
1. 计算依据	95
2. 计算结果	99
3. 设备的工作时间	99
附录 I 在第五章表 V 中列出的蒸发器的流程图	

和数据	100
附录 II 各种类型蒸发装置流程示意图和出厂价 格	116
附录 III 处理放射性废液的各种类型蒸发器的运行 费用	129
参考文献	136

第一章 绪 论

随着核工业在世界各地的发展，放射性废液的数量亦在不断增加，因此如何处理这些废液并去除其中的放射性的问题日益重要。虽然放射性废液在放射性强度、组分和物理性质等方面的差别很大，但是在努力探索和发展既安全又经济合理的处理方法方面，还是取得了显著成绩。最常用的处理方法是化学处理法、离子交换法和蒸发法。虽然蒸发法对大多数放射性物质的分离效率很高，但因其费用很大，所以蒸发法一般仅限于处理中放或高放废液。

一、去污系数

使用单效蒸发器处理不挥发性放射性污染废液时，其总的去污系数一般可达 10^4 以上（在多数情况下大于 10^5 ）。去污系数是指蒸发浓缩液的放射性强度与冷凝液（馏出物）的放射性强度之比¹⁾。如果使用除雾沫装置，去污系数还可以提高。但是，当废液中含有如碘、钷、氡等挥发性放射性核素和挥发性放射性有机物时，其去污系数可能有所降低。当含碘的废液在酸性条件下蒸发时，大部分碘就会挥发出来²⁾。放射性碘常被用来作示踪研究，它在冷凝液中以碘化物的形式出现。以四氧化钷形式存在的钷是挥发性的。这种化合物如在沸腾的硝酸中和含有臭氧或高锰酸根离子等的强氧化条件下便会生成。还有一些情况表明，钷比较容易地从含有硫

1) 去污系数通常指进料液（即废液）的原始放射性强度与冷凝液放射性强度之比。——译者注

2) 加入络合剂可以防止碘的挥发。已知微量汞存在时形成 HgI_2^- 络合物会降低碘从废液中释出^[3]。

酸铁、硫酸和硝酸钠的稀酸溶液中蒸馏出来。氟如果是以氟水的形式存在时，就不可能比较经济地用蒸发法将其从废液中去除。幸而氟在废液中的浓度一般较低，可以允许排到环境中去，因为没有再浓集效应。如果由于存在挥发性放射性核素而使总去污系数有所降低时，那末将冷凝液通过离子交换柱后便能达到完全净化，但是氟水和非电解质有机物除外。

正如克莱兰 (Clelland)^[10]所指出的那样，需要达到的去污系数根据具体情况可能有很大的不同，它取决于放射性废液的排放量和排放到环境中所允许的放射性强度等各种因素。有时，必须保证很高的去污系数，否则就会带来危害。例如，当蒸馏液被排入饮用水源，而这种水源能产生食物链的生物浓集效应的情况就是这样。在环境中通常放射性的稀释系数可达 10^4 ，但是这一数值由于存在再浓集过程而被部分抵销，因而需要将去污系数提高 10 或 100 倍。另外考虑到需要附加的安全系数和当地排放的其它废水，需将总去污系数再增加 10 倍。当然，在比较有利的情况下，也可以允许采取较低的去污系数。

二、体积浓缩倍数

缩小体积是放射性废液处理中另一个重要问题。从经济观点看，为了最大限度地减小浓缩物贮存设备的规模和费用，希望达到高的体积浓缩倍数。废液体积能否达到最大浓缩程度，取决于废液中溶解固体的数量和性质。如果浓缩液中溶解固体的浓度超过排放管道较冷部分的结晶极限时，则在该段排放管道中将发生堵塞，排除堵塞物的工作是非常艰巨的，为了避免这种麻烦，应当很好地控制浓缩液的浓度，并且尽可能地将排放管设计得短一些直一些。根据一般的实

践，通常的做法是：当确定了周围温度下溶液出现结晶时的那个浓度极限以后，根据蒸发系统的运行参数，再加上安全系数。例如，当蒸发器的贮液容积很小时，那么就比较容易由于操作不熟练而造成过度浓缩的情况，因此就需要采用较大的安全系数^[10]。如果认为即使偶然地发生过度浓缩也是不可能的话，那么设计时可以采用更接近于结晶点的参数。

体积浓缩倍数一般不受少量固体悬浮物的影响。如果已知废液中含有固体悬浮物时，还可采取适当的措施加以去除，如在蒸发前进行一次过滤。废液的体积浓缩倍数越高，则浓缩液的放射性强度也越高，因而也就需要更可靠的生物屏蔽；同时又会导致蒸馏液中放射性强度的增高。而当废液的体积浓缩倍数在经济上达到最合理时，在蒸馏液中又将出现超过允许水平的放射性强度，在这种情况下，采用多效蒸发系统，是解决这个问题的一种办法。由于采用多效蒸发系统，又将引起设备的造价和运行费用的提高。因此要找出体积浓缩倍数的最佳值，就需要进行详细的经济学研究。

三、适合于蒸发处理的废液类型

正如已经指出的，蒸发法最适于处理以下几种废液：1) 总固体含量高的；2) 要求有高的去污系数的废液。这类废液的体积一般比那种低放废液的体积要小。如果低放废液也用蒸发法处理时，则其处理费用将很高，这是由于其方法固有费用高的缘故；尽管如此，甚至在处理低放废液时，如果废液体积不大，蒸发法有时也是颇为可取的，因其操作比其它方法简单。但是，当蒸发含有严重结垢、起泡或腐蚀性物质的废液时，需要对这种废液进行预处理，或者与其它处理方法配合使用，这样就必须仔细地 and 恰当地进行蒸发器的设

计。

四、腐 蚀

蒸发器的腐蚀和侵蚀一般要比其它类型的设备严重得多，这是因为需要的浓缩情况不同，经常存在悬浮固体，以及二次蒸汽和液体的流速很高所致。

腐蚀蒸发设备的因素很多，因此材料的合理选择应该是以待处理的液体样品进行蒸发的实际试验为根据。但是，并不能够经常这样做，而且也不能预料在蒸发设备的整个使用期间内料液可能有怎样的变化。因为对所要使用的材料必须早在设计时就做出决定，所以解决问题的办法是对于粗略估算的腐蚀速率加上适当的安全系数。在第三章第二节中列出了一些典型的结构材料。

五、起 泡

在废液处理中，由于其中含有不同浓度的肥皂和去污剂致使起泡经常成为一个主要的问题。起泡物质浓度太高的废液不适于蒸发处理，它跟废液分离后，如果放射性物质浓度不大，进行稀释排放，可能是最简单的处理方法。即使废液中起泡剂的含量很低，如在蒸发器中剧烈沸腾的情况下，也能严重地产生泡沫。这将会使实际工作流量大大低于设计值，因此必须采取如第三章第二节中所讲的那些适当的措施。

六、结垢和盐析

蒸发器的工作完全依赖于良好的热传导，而结垢将使传热的总效率越来越低。为了保持设计的生产能力，有时必须停工以进行去垢。去垢的方法简述于第三章第二节中。

七、蒸发法的一般局限性

如前所述，具有严重起泡、结垢或腐蚀性的废液，如果不进行预处理就不适于用蒸发法处理。含有可燃性物质的废液也不适于蒸发处理。由于这些原因，蒸发法就受到废液中所含物质的成分的限制。另外还有费用很高的缺陷。在设计废液处理设备时，必须知道各种废液的性质和放射性强度，并且应确定其中那些废液需要达到多大的去污系数。因为需要的去污系数根据具体情况可能有很大的差异，这具体取决于待处理废液的放射性数量和允许排入环境中的放射性数量。将处理后的废液排入具有生物再浓集机理的饮用水源时，必须保证排出废液中放射性物质的浓度很低。要求的最低去污系数，有时可根据国际辐射防护委员会（ICRP）制定的一般居民饮用水允许放射性剂量标准计算出来。

基于上述研究结果，如若能够采用蒸发法以外的其他处理方法时，则应当进行仔细的经济计算，以便选择最经济的处理方法。

第二章 各种类型蒸发器及其辅助设备的设计和说明

不能制定一种通则以供有效地指导选择最佳类型的蒸发器及其辅助设备。在选择处理放射性废液的最佳蒸发器的类型时，必须考虑如下一些因素：(1)废液的特性，诸如溶解物质的成分和含量（其中大部分是非放射性的），以及它们的盐析¹⁾、结垢、腐蚀和起泡的特性；(2)每小时处理废液的数量，它的波动范围以及每天的工作时数；(3)要求的体积浓缩倍数和去污系数；(4)易于维修；(5)场地的尺寸；(6)经济指标。

一、蒸发器的类型

1. 盘管式或釜式蒸发器

这种类型的蒸发器虽然现在在化学工业上已很少应用，但在处理放射性废液方面却常常使用，尤其适用于处理小型核设施中的少量放射性废液。甚至可用于如加拿大乔克河核研究所的大型研究单位。加拿大乔克河核研究所从1958年起就使用这种类型的蒸发器处理低放废液^[34]。图1表示加拿大乔克河核研究所用347号不锈钢制造的釜式蒸发器的流程示意图。该蒸发器有900升的有效容积，其料液通过速率为每小时900升，一个直径为91厘米的圆柱形双层去雾沫装置安装在蒸发器的顶部。第一层是一块挡板，而第二层是网

1) 在蒸发区的加热面和蒸发器壁上，正常溶解物（其溶解度随温度上升而增加）迅速积聚附着。运行条件的波动以及促进晶核形成的任何条件都会加剧这一现象，而在以前已形成的晶体上沉积的物质影响不大。

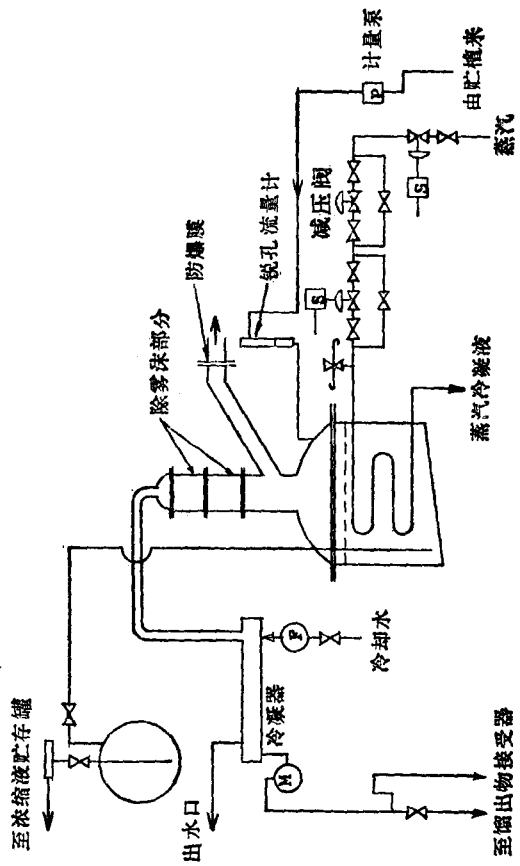


图 1 低放液蒸发器流程示意图^[81]

状去雾沫装置。

釜式蒸发器的结构简单，可用于简单的分批蒸发。在美国，甚至在较大的核电站^[53]，也使用这种蒸发器，其处理能力为 2.7—45.4 升/分钟，而蒸馏液与浓缩液的比为 10:1—

50:1。在热负荷小的小型装置中，可以使用套锅（最简单的釜式蒸发器），典型的套锅如图 2 所示。

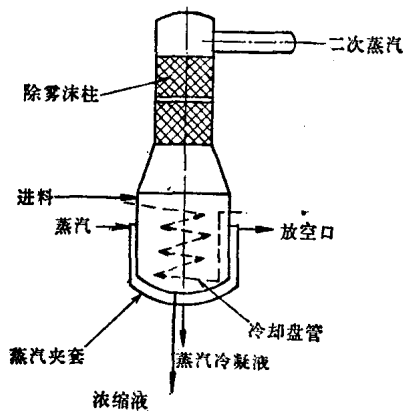


图 2 蒸汽套锅

的总传热系数可达 900—1200 千卡/米²·小时·°C。若蒸发少量的废液时，还可采取直接加热法或电加热法以代替蒸汽加热。

装有盘管、U 形管或其它形式蒸汽管的蒸发器，在处理废液中的应用也很普遍。这种类型的蒸发器，如果设计得可以用震动法，或者能从壳体中取出盘管进行除垢时，则特别适于处理容易产生结垢的废液。英国哈威尔原子能研究所^[6, 64]使用了一种简单的单级蒸发器，它是用装在釜内的蒸汽盘管（总长 113 米，直径 2.5 厘米）加热，通入蒸汽的压力约为 4.2 公斤/厘米²（图 3）。蒸汽盘管安装在一个吊具上，根据情况需要，可以将它取出来，以便进行检修或清洗。由于哈威尔原子能研究所对料液预先进行了化学处理^[7]，

所以在实际运行中没有出现结垢问题。

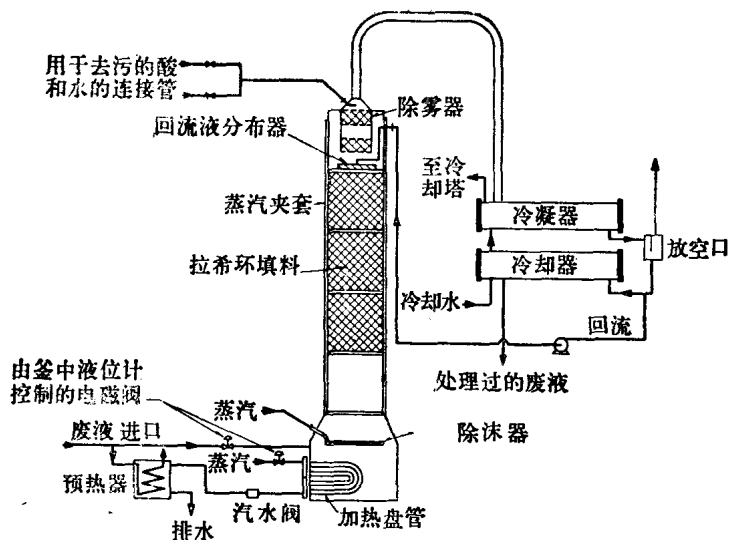


图 3 哈威尔原子能研究所的废液蒸发器

2. 自然循环式蒸发器

(1) 卧管蒸发器

这种类型的蒸发器在化学工业中虽然已经广泛地使用了五十多年，但是现在除了用于准备锅炉供水外，作其它用途却很少。然而在废水处理中，当厂房高度受到较大限制时，常常采用这种类型的蒸发器。图 4 给出了这种蒸发器的两种典型示例。蒸汽在管道内流动，而废液在管道外面流动。

这种类型的蒸发器大多数有卧式圆筒形外壳，因为它的汽-液分离表面与外壳直径的比值最大，所以产生雾沫很少。卧式直管蒸发器的造价相当低，但不适于处理易结垢的废

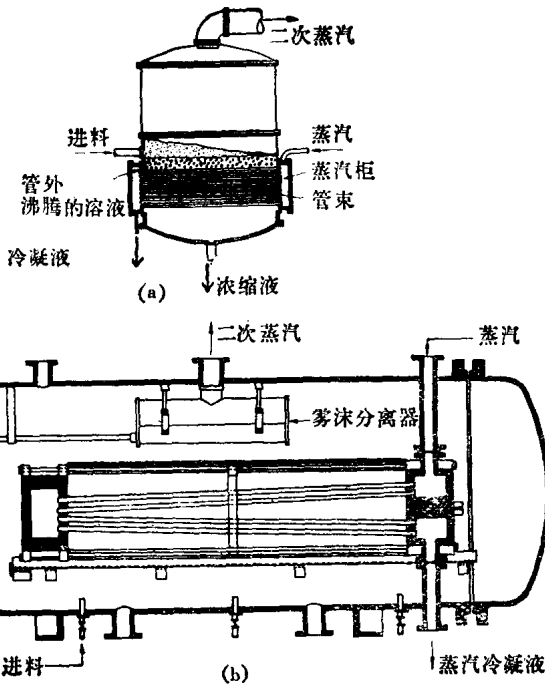


图 4 卧管蒸发器

(a) 斯温森(Swenson)蒸发器

(b) 引自美国化学工艺百科全书, 第5卷第937页。

液。可是, 如果把管子的间距设计得比竖管蒸发器管间距大, 而且使用变形管, 在壳体排出水后, 用冷水喷射冲洗加热管道就能去除结垢, 那么这种型式的蒸发器也适于处理严重结垢的液体。卧管蒸发器一般不适于处理起泡沫的液体, 因为没有破坏泡沫的设施, 所以也就无法破坏泡沫。根据佩里(Perry)手册^[37], 卧管蒸发器的优缺点如下:

优点:

- ① 厂房高度的要求很低；
- ② 汽-液分离表面大；
- ③ 生产能力不大的直管蒸发器的造价较低；
- ④ 传热系数高；
- ⑤ 在弯管蒸发器中容易进行半自动去垢。

缺点：

- ① 不适于处理起泡沫的废液；
- ② 不适于处理盐析的废液；
- ③ 直管蒸发器不适于处理易结垢的废液；
- ④ 弯管蒸发器造价较高。

卧管蒸发器的最好用途是：

- ① 厂房高度有限；
- ② 生产能力不大；
- ③ 直管蒸发器适于处理无结垢、无盐析的废液；
- ④ 弯管蒸发器适于处理严重结垢的废液。

(2) 竖管蒸发器

图 5 所示的竖管式或排管式蒸发器现已得到广泛应用。它的主体通常为一圆筒，在其底部的蒸汽箱中装有成排的短管（直径为 5—10 厘米），以供加热之用。这种类型的蒸发器在温差很大时，其传热系数很高。但是，随着温差的变小，其传热系数也就变得很低。液体通过加热面进行循环运动，是由于在管中形成水蒸汽的抽吸作用引起的。

从蒸汽箱上部返回底部空间的通路往往是一个圆筒形下导管。其横截面积应当与短排管的总横截面积相等。如此排列形式是最通用的标准竖管蒸发器，但是也有一种不带下导管的称为“篮式”的蒸发器。由于自然循环速率可以比供料速率大好多倍，所以在连续操作中，进入底部的液体与出料的