

# 离子交换纤维高纯电渗析的研究

骆大星 李恆勤 薛培法

本文讨论了离子交换纤维高纯电渗析的一些基本性能以及对放射性核素<sup>106</sup>Ru的净化能力,对实际放射性废水蒸发冷凝液的净化效果。实验证明:离子交换纤维高纯电渗析的无回路短流程装置能将蒸发冷凝液净化到 $1 \times 10^{-11}$ Ci/l左右,连续运行1100小时以上,未发现异常情况。该装置比填装离子交换树脂电渗析拆装方便,运行稳定,填装材料费用低。文章还评述了离子交换纤维高纯电渗析处理反应堆低放废水的可行性。

## 一、前 言

五十年代初期发展起来的电渗析分离技术,经过廿多年的研究和实践,已经发展成为一种新型化工单元操作,目前在咸水脱盐,海水制盐,工业给水,废水处理和化工、医药、冶金、电子、原子能工业的分离、提纯、合成等方面都有不同规模的研究和应用<sup>[1]</sup>。

随着我国原子能工业的发展,核电站的建造,放射性同位素的广泛应用和原子能领域科研事业的发展,要求提供的纯水、超纯水和需要处理的放射性废水日益增加,这为电渗析技术的应用开辟了广阔的前景。同时也要求尽快完善电渗析单元的工艺技术和设备。

高纯电渗析是在应用普通电渗析的基础上发展起来的。国内一些单位先后研究过高纯电渗析<sup>[2,3]</sup>。

电渗析过程的基本原理是:在直流电场的作用下,溶液中电解质离子受离子交换膜选择透过性的限制作定向迁移,达到淡化和浓缩的目的。当淡室进水中离子浓度极低时,单靠电场力作用迁移离子就困难了,故设想在淡室中填装能传递离子的物质,这就产生了填充床电渗析,因为它用于高纯分离时优点更多,所以国内称为高纯电渗析,国外称“Electrodeionisation”(电去离子)。国外关于填充离子交换树脂的电去离子法研究情况在文献<sup>[4—6]</sup>中已有介绍。但关于填充离子交换纤维的电去离子法的研究情况则很少见到,最近在美国托马斯(Thomas A.D.)的专利中报道了离子交换纤维高纯电渗析的处理效果,在原水和运行条件相同的情况下,填纤维比填树脂的电渗析脱盐效果好3—5倍<sup>[7]</sup>。高纯电渗析的工作原理:在图1所示的高纯电渗析中,主要有:①普通电渗析的脱盐作用;②离子交换材料对离子的传递作用,与此同时,离子交换作用、交换材料的电再生作用和“逆脱盐”作用也在进行。

我们曾研究了离子交换树脂高纯电渗析,并进行了“普通电渗析-填树脂高纯电渗析”处理反应堆废水试验。因为填充离子交换树脂电渗析操作不方便,尤其在长期运行时,树脂被冲积,使运行不稳定,拆装频繁,不利于放射性操作,所以要改变填充物的形状<sup>[6]</sup>。填充离子交换纤维电渗析可以克服上述缺点,而且离子交换纤维具有易编织成形的特点。

离子交换纤维高纯电渗析在制备高纯水和净化极低放废水方面,不仅技术可行,而

且设备简单，运行经济，在反应堆废水的闭路循环处理系统中，是一个很实用的工艺单元<sup>[8]</sup>。

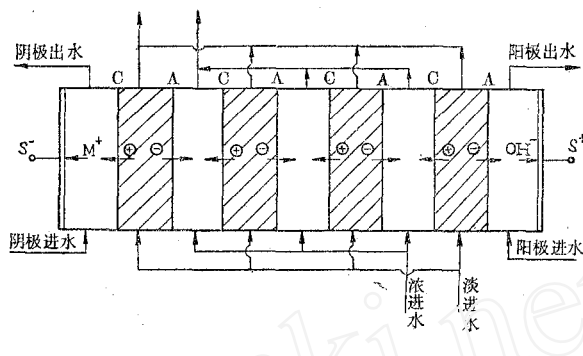


图 1 离子交换纤维高纯电渗析原理图

## 二、实 验

实验共分三部分：1. 离子交换纤维高纯电渗析的基本性能实验；2. 对<sup>106</sup>Ru 的净化实验；3. 对实际放射性废水蒸发冷凝液的净化实验。各部分实验的装置及条件分别叙述如下。

### 1. 实 验 装 置

(1) 实验 I 的装置 采用一个三隔室电渗析器，中间为淡化室，内填离子交换纤维，两边是极室，也是浓缩室(图 2)。装置组件见表 1。电渗析隔板无迴路，一次通过，流道宽 30 mm，采用的离子交换膜性能列于表 2。电渗析器竖放，液流下进上出。

直流电源：市电经硅整流器(自制)整流后供电渗析器使用，额定电压 200 伏，额定电流 1 安培。

表 1 实验 I 的电渗析器组件

名 称	材 料	尺 寸, mm 长×宽×厚	数 量, 块
淡水隔板	硬聚氯乙烯	340×70×10	1
极(浓)室隔板(带鱼鳞网)	硬聚氯乙烯	340×70×10	2
阴、阳电极板	不 锈 钢	320×60×3	2

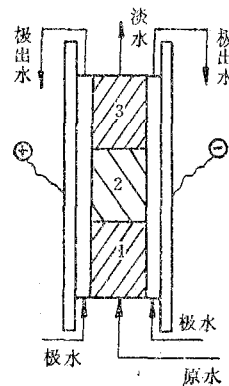


图 2 实验 I 的装置  
1——羧基型；2——胺基型；  
3——巯基型各 5 克。

表 2 离子交换膜的性能

种类	厚度, mm	含水率, %	交换容量, mg当量/kg	膜电阻, $\Omega\text{-cm}^2$	选择性, %	爆硬强度, kg/cm <sup>2</sup>	生产单位
均相(阳)	0.3	30~40	1.6~2.5	2~3	>90	4	上塑开厂
均相(阴)	0.3	17~24	1.6~2.7	5~6	>90	3	上塑开厂
异相(阳)	0.5~0.7	~40	~3	11			海风制药厂
异相(阴)	0.5~0.7	~40	~2.5	11			海风制药厂

(2) 实验 I 的装置 采用图 3 所示的七隔室电渗析器, 三个淡室串联, 两个浓室串联流动。电渗析组件与实验 I 一样, 浓室隔板流道内贴鱼鳞网。采用表 2 中的均相膜。阳极: 钛板涂钉, 阴极不锈钢板。电渗析器竖放, 液流下进上出, 按图 4 所示流程运行。

直流电源: 市电经硅整流器(自制)整流后供电渗析器使用。额定电压 500 伏, 额定电流 10 安培。

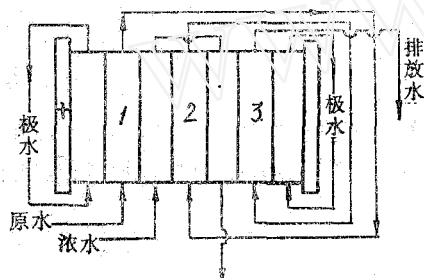


图 3 实验 II 装置示意图

1—羧基, 15克; 2—胺基, 15克; 3—巯基, 15克。

图上右侧为负极——校后注。

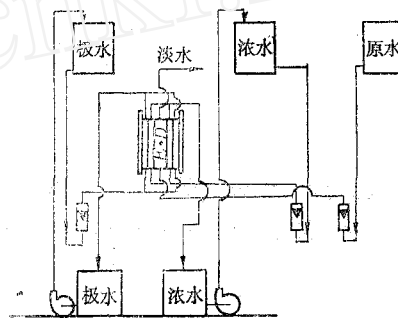


图 4 高纯电渗析运行流程图

(3) 实验 II 的装置 采用一个五隔室电渗析器连续运行, 流程与图 4 一样。以蒸发冷凝液作为淡进水, 极水和浓水。极水、浓水均用浓硝酸调节 pH=3~4, 循环使用。三股进水都经过泡沫塑料过滤, 去除机械杂质。

电渗析器的第一淡室装羧酸基纤维 15g, 第二淡室装胺基纤维 8g 和巯基纤维 7g。两个淡室串联流动。电渗析的组件与实验 I 一样。采用表 2 中的异相膜。阳极: 钛涂钉, 阴极: 不锈钢。电渗析器竖放, 液流下进上出。

直流电源: 市电经硅整流器(自制)整流后供电渗析器使用。额定电压 500 伏, 额定电流 10 安培。

## 2. 离子交换纤维

离子交换纤维不仅具有离子交换能力, 而且具有很大的表面积, 比一般凝胶型离子交换树脂大 500 倍, 所以交换速度特别快, 可大大提高设备效率, 同时它的表面空隙比交换树脂大 100 倍左右, 有利于离子自由进出, 便于交换反应, 填充在淡室内, 能更好地传递离子。此外, 离子交换纤维耐酸、耐碱、耐湿性能均良好。

目前国产纤维品种不多, 所以只对五个品种进行了试验, 它们的性能见表 3。其中三种用以处理含汞废水, 效果良好<sup>[9,10]</sup>。

表 3 几种离子交换纤维的性能

种 类	粗 细 度, 袋*	长 度, mm	全 交 换 容 量, mg当量/g(干)	工 作 交 换 容 量, mg当量/g(干)
羧基(-COOH)型	1.4	~35	1.5~2	1
胺基(-NH <sub>2</sub> )型	1.0	~150	1	~0.4
巯基(-SH)型	1.0	~150	1	~0.4
纤-22(Cl <sup>-</sup> 型)	—	10~20	1.39(Cl <sup>-</sup> )	—
纤-23(Cl <sup>-</sup> 型)	—	10~20	0.97(Cl <sup>-</sup> )	—

\* 纤维的粗细度是用一定长度纤维的重量来表示的。袋定义为9000米长纤维的重量(g),重1g,称为1袋,重2g称2袋。

### 3. 原 水

(1) 实验 I 的原水 用自来水作为淡水、浓水、极水的进水。自来水水质见表 4。

表 4 实验 I 的原水(自来水)水质

电 阻 率, $\Omega\text{-cm}(16^\circ\text{C})$	pH	Ca <sup>2+</sup> , mg/l	Mg <sup>2+</sup> , mg/l	Na <sup>+</sup> , mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/l	Cl <sup>-</sup> , mg/l	备 注
$\sim 1.8 \times 10^5$	6.5	45.9	12.6	5.0	13.0	18.9	4.0	

(2) 实验 II 的原水 淡进水和浓进水: 蒸馏水加放射性钌指示剂(硝酸体系), 经 NaI (Tl) 多道  $\gamma$  谱仪测量的谱线只有 513 keV 和 624 keV 的 <sup>106</sup>Ru 全能峰, 所以证明原水是纯 <sup>106</sup>Ru 溶液。用浓硝酸和 4% 的 NaOH 调节 pH 值(表 5)。

极水: 蒸馏水加 KNO<sub>3</sub>(分析纯)试剂, 用浓 HNO<sub>3</sub> 调节 pH 值(表 5)。

表 5 实验 II 的原水水质

项 目	pH	电 阻 率, $\Omega\text{-cm}(16^\circ\text{C})$	<sup>106</sup> Ru, Ci/l
浓、淡进水	3	330	$8.9 \times 10^{-8}$
	4~5	600	$1.2 \times 10^{-7}$
	6~7	890	$8.4 \times 10^{-8}$
	8~9	760	$2.0 \times 10^{-7}$
极 水	3~4	~1000	—

(3) 实验 III 的原水 我所低放废水处理车间经过“凝聚沉淀——蒸发”二段净化后的放射性废水, 水质见表 6。由于生产设备是碳钢系统, 原水受锈蚀物的污染, 所以电渗析器的淡进水有时浊度较大。

表 6 实验 III 的原水水质

电 阻 率, $\Omega\text{-cm}(16^\circ\text{C})$	总 硬 度, mg/l	总 $\beta$ , Ci/l	<sup>137</sup> Cs		pH
			Ci/l	%	
$1.4 \times 10^4$	< 5	$\sim 1.8 \times 10^{-10}$	$\sim 1.7 \times 10^{-10}$	> 90	6

#### 4. 操作方法

实验 I、II 控制电流密度和流速在表 7、8、9、10 所列数值下连续运行 10 小时以上分别取样测量电阻率、pH 值。

实验 III 的装置昼夜连续运行 46 天共 1100 小时以上,控制电流在 35 mA (0.39 mA/cm<sup>2</sup>) 电压相应为 150~200 V, 每天定时取样测量各股流量、电阻、pH 值和温度, 用放化分析法测定样品的总 β 放射性浓度。

#### 5. 分析测量

(1) 电阻率 实验 I 采用 DDS-11 型电导仪(上海第二分析仪器厂)测量电阻率, 实验 II、III 采用雷磁 27 型电导仪(上海雷磁仪器厂)测量电阻率。然后进行温度校正。

(2) pH 值 使用北京化工厂生产的广泛试纸(pH 1--12)测量 pH 值。

(3) 总 β 放射性浓度 用大体积蒸发浓缩法制样, 然后以 FJ-332 β 低本底测量仪(国营 262 厂)测量。

### 三、结果和讨论

如前所述, 高纯电渗析的淡化室存在着多种作用, 但主要是离子的电迁移作用, 而电迁移又有三个途径: 其一借助于离子交换材料的作用而迁移; 其二不经离子交换材料, 仅经溶液迁移; 其三是两者兼有的混合过程<sup>[1]</sup>。因为第二种迁移途径完全失去了采用离子交换填充物的意义, 所以高纯电渗析应该在第一迁移途径下工作, 而第一种迁移途径又存在交换、迁移和再生三个过程。影响这些过程的因素很多, 例如: 淡化室溶液中各种离子的浓度在变化, 温度和 pH 值也在变化。因此, 这是一个多变量的动力学体系。此外, 外界条件, 例如电渗析器的组装条件, 进水条件等都影响净化效果。所以研究其中一些变量时, 必须严格控制其它变量为定值。

1. 采用实验 I、III 测定几个基本关系 所有数据在设备稳定运行 10 小时以后获得。如上所述这些关系的影响因素很多, 在所有实验装置及实验条件下, 所得结果如下:

(1) 电流密度对淡出水电阻率的影响 在实验 III 中, 当淡进水的电阻率  $\rho_0 = 1.4 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  (20°C), pH=6, 空间流速 \* S.V. = 7~8 (1.26~1.44 l/h) 时, 得到图 5 所示的电流密度  $i$  与淡出水电阻率  $\rho_1$  (20°C) 的关系曲线。由图可见,  $i$  在 0.4 mA/cm<sup>2</sup> 左右时,  $\rho_1$  达到  $2.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  左右, 当  $i$  值从 0.1 mA/cm<sup>2</sup> 升高到 0.4 mA/cm<sup>2</sup> 时,  $\rho_1$  迅速上升, 此后,  $\rho_1$  仅随  $i$  值的升高而缓慢上升。因此, 实验 III 选用最佳电流密度  $i = 0.4 \text{ mA/cm}^2$  运行。

(2) 原水 pH 值对出水电阻率的影响 在实验 I 中, 当 S.V. = 6.5~7.0 (0.6~0.7 l/h),  $i = 1.5 \text{ mA/cm}^2$  时, 测得表 7 所列的原水 pH 值对出水电阻率  $\rho_1$  的影响, 当 pH=8.5~9.5 时, 升阻比\*\*较高。但原水 pH>7.0 时, 电渗析隔室内迅速形成结垢, 使电流效率降

\* 空间流速(S.V.)以每小时流过的床体积数表示。

\*\* 升阻比: 电渗析淡出水电阻率与进水电阻率之比。

低,脱盐效果变差,甚至造成机械堵塞,影响电渗析器的长期稳定运行。因此,除了特殊情况外,一般不希望在碱性条件下运行。实验Ⅲ中采用原水 pH=6。

表 7 原水 pH 值对出水电阻率的影响  
淡进水电阻率:  $\rho_0=1.8 \times 10^3 \Omega\text{-cm}(16^\circ\text{C})$ ; 空间流速 S. V.=6.5~7.8。

pH 值	3.0	7.0~7.5	8.5~9.5
电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	1.55	1.30	1.44
电压, V	25	60	50~53
$\rho_0, \Omega\text{-cm}(16^\circ\text{C})$	700	1250	800
$\rho_1, \Omega\text{-cm}(16^\circ\text{C})$	5000	25000	35000
升阻比	7	20	43

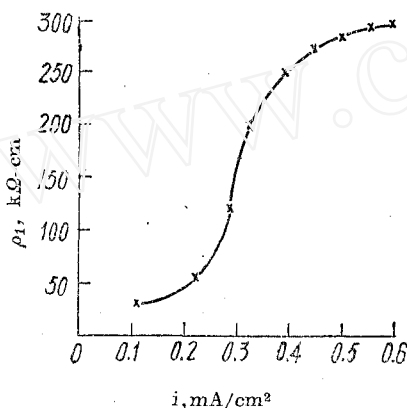


图 5 电流密度对出水电阻率的影响  
进水:  $\rho_0=1.4 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ ; pH=6;  
20°C; S.V.=7~8,

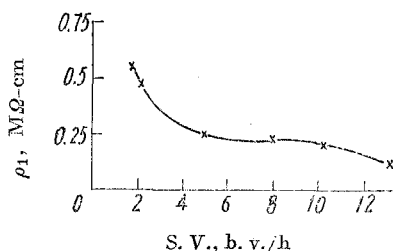


图 6 流速对出水电阻率的影响  
进水:  $1.4 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ ; 20°C; pH=6;  
电流密度, 0.39 mA/cm<sup>2</sup>.

(3) 流速对出水电阻率的影响 用实验Ⅲ的装置测定流速对出水电阻率的影响(图6)。从图可见,空间流速 S.V.=4~10 时,出水电阻率  $\rho_1$  只缓慢降低,直到 S.V.=10 时,  $\rho_1$  尚能维持在  $2 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$  左右。因此,实验Ⅲ中选用最佳流速 S.V.=10。

(4) 不同填充材料的电渗析的淡水电阻率 表 8、9 给出了实验 I 的淡水电阻率,从表看出,当进水中电解质离子含量较高时,高纯电渗析和普通电渗析的淡水电阻率差别不大。但当进水中电解质离子浓度低时,填充离子交换纤维高纯电渗析就可获得较高电阻率的淡水,而普通电渗析则效果较差。

表 9 说明高纯电渗析能获得  $1 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$  以上的淡水,而普通电渗析在同样条件下只能获得  $1 \sim 3 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$  的淡水。

纤维的填充量:填充量太多,影响长期间稳定运行;装量太少,不能发挥填充物传递离子的作用。根据北京化工厂装柱试验<sup>[10]</sup>及我们的实验结果,拟用 0.15~0.17 g/ml 的填充密度为宜。

2. 对放射性核素<sup>106</sup>Ru 的净化效果 表 10 给出了实验Ⅱ装置对放射性核素<sup>106</sup>Ru 的净化效果。从表中数据可见,进水 pH=4~5 和 8~9 时,对<sup>106</sup>Ru 的净化系数都超过 10, pH 8~9 比 pH 4~5 的净化效果更好。这与表 7 的结果一致,因此可根据工艺要求选择不

表 8 不同填充材料电渗析的出水电阻率

进水: 16°C;  $\rho_0=1.8 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ ; pH=6。

填充材料	实 验 数 据				
无填充物	空间流速	8.7	8.7	8.7	8.7
	电压, 伏	30	102	103	105
	电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	0.80	1.33	1.45	1.70
	$\rho_1, 16^\circ\text{C}, \Omega\text{-cm}$	$8.0 \times 10^3$	$9.0 \times 10^4$	$9.0 \times 10^4$	$9.0 \times 10^4$
填充羧酸基纤维 9g	空间流速	9.7	9.7	9.7	9.7
	电压, 伏	30	40	80	125
	电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	0.90	1.17	1.50	1.70
	$\rho_1, 16^\circ\text{C}, \Omega\text{-cm}$	$1.6 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	$8.0 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$
填充羧酸基纤维 27g	空间流速	9.0	9.0	9.0	9.0
	电压, 伏	70	105	135	150
	电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	0.8	1.17	1.50	1.67
	$\rho_1, 16^\circ\text{C}, \Omega\text{-cm}$	$3.3 \times 10^3$	$4.5 \times 10^4$	$5.0 \times 10^4$	$6.0 \times 10^4$
填充羧、胺、硫基纤维 (各 5g) 15g	空间流速	9~10	9~10	9~10	9~10
	电压, 伏	40	85	130	140
	电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	0.83	1.33	1.50	1.70
	$\rho_1, 16^\circ\text{C}, \Omega\text{-cm}$	$1.9 \times 10^4$	$2.0 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$

表 9 普通电渗析与高纯电渗析淡水电阻率比较

进水: 20°C;  $\rho_0=6\sim 10 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ ; pH=6。

填充材料	S. V.	淡 水 电 阻 率				
无填充物 (普通电渗析)	5~10	电压, 伏	145	150	153	153
		电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	0.17	0.33	0.33	0.17
		$\rho_1, 20^\circ\text{C}, \Omega\text{-cm}$	$1.0 \times 10^5$	$1.7 \times 10^5$	$2.8 \times 10^5$	$3.5 \times 10^5$
填充羧、胺、硫基纤维 (各 5g) 15g	18~25	电压, 伏	100	105	112	151
		电流密度, mA/cm <sup>2</sup>	0.11	0.11	0.11	0.11
		$\rho_1, 20^\circ\text{C}, \Omega\text{-cm}$	$1.0 \times 10^6$	$1.1 \times 10^6$	$1.2 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$

表 10 对放射性核素 <sup>106</sup>Ru 的净化效果

原 水			净 化 效 果							
pH	电阻率, 16°C, $\Omega\text{-cm}$	<sup>106</sup> Ru, Ci/l	电压, V	电 流 密 度, mA/cm <sup>2</sup>	空 间 流 速	淡水电阻率, 16°C, $\Omega\text{-cm}$	淡水 pH	<sup>106</sup> Ru 浓度, Ci/l	升阻比	净 化 系 数
3	330	$8.9 \times 10^{-8}$	63	2.6	~12.0	$1.3 \times 10^3$	3~4	$1.0 \times 10^{-8}$	3.9	8.9
4~5	600	$1.2 \times 10^{-7}$	200	1.3	6.0	$1.2 \times 10^4$	~6	$5.8 \times 10^{-9}$	20	20.6
			215	1.0	11.0	$3.0 \times 10^3$	~6	$1.1 \times 10^{-8}$	50	11.0
5~6	890	$8.4 \times 10^{-8}$	110	0.7	8.5	$4.7 \times 10^3$	~5	—	6	—
8~9	760	$2.0 \times 10^{-7}$	290	0.54	6.0	$3.8 \times 10^5$	5~6	$4.8 \times 10^{-9}$	500	41.6
			150	0.67	6.0	$7.0 \times 10^4$	5~6	$4.3 \times 10^{-9}$	92	46.5
			230	1.1	10.0	$4.2 \times 10^4$	5~6	$7.3 \times 10^{-9}$	62	27.4

同的原水 pH 值运行。

3. 对蒸发冷凝液的净化效果:

(1) 除盐效果 连续运行 1100 小时, 进水电阻率为  $1.4 \times 10^4 \Omega\text{-cm}(20^\circ\text{C})$ , 淡水电阻率始终保持  $3 \times 10^5 \Omega\text{-cm}(20^\circ\text{C})$  (图 7)。

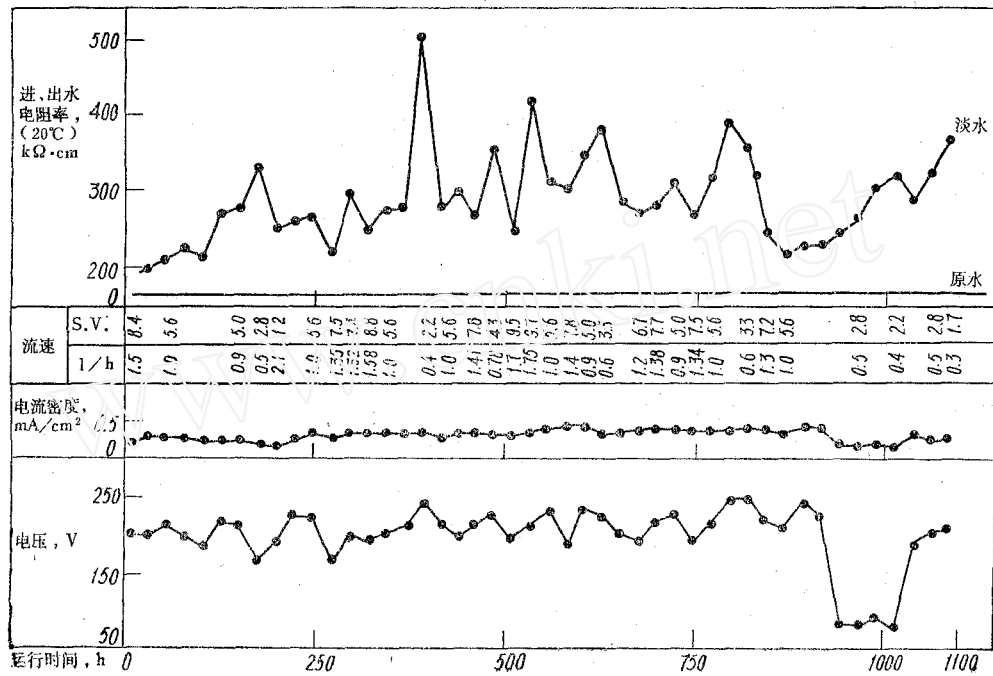


图 7 实验Ⅲ的运行综合图表 A

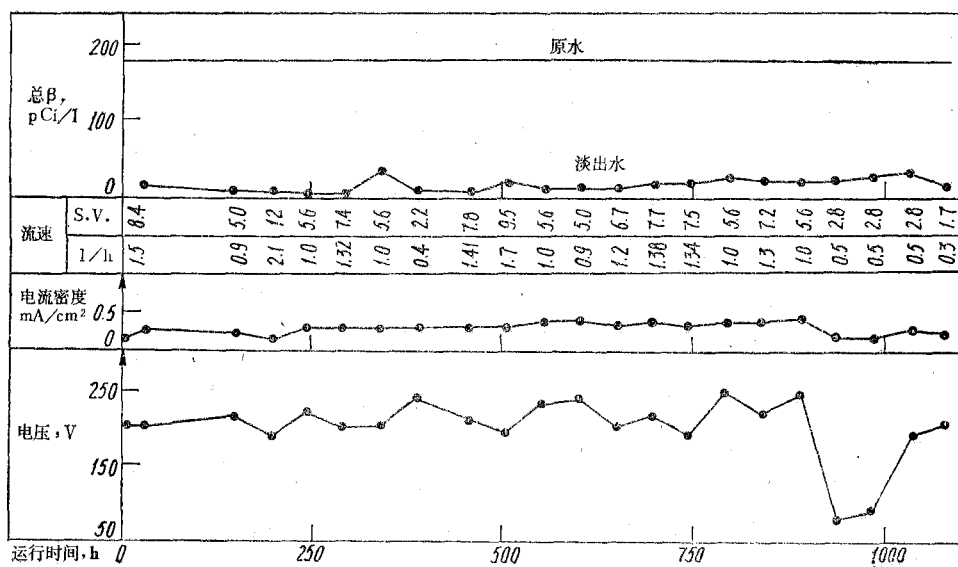


图 8 实验Ⅲ的运行综合图表 B



(2) 对放射性核素的净化效果 在 1100 小时的运行中, 进水总  $\beta$  放射性  $1.8 \times 10^{-10}$  Gi/l 左右, 淡出水总  $\beta$  放射性始终为  $5 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-11}$  Gi/l (图 8)。放化分析结果表明, 进水中  $^{137}\text{Cs}$  占总  $\beta$  放射性的 90% 以上。根据高纯电渗析的工作原理, 可以认为它对 Sr、Ru、Zr、Nb、RE 等核素也会有类似的效果。关于这一点, 以前的填树脂电渗析中有过一些数据<sup>[4,12]</sup>。

图 7、图 8 中 940~1020 小时之间的运行表明; 低流速、低电流密度也可获得同样的淡水电阻率和总  $\beta$  放射性净化率, 但流速高, 在低电流密度下运行, 淡水电阻率则下降。

(3) 浓缩倍数 在 1100 小时运行中, 浓水、极水一直循环使用, 没有补充和更换。浓水 50 升, 电阻率由  $1.46 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$  降低到  $500 \Omega\text{-cm}$  左右, 总  $\beta$  放射性由  $1.8 \times 10^{-10}$  Gi/l 上升到  $1.1 \times 10^{-9}$  Gi/l, 极水 80 升, 电阻率由  $1.8 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$  降低到  $600 \Omega\text{-cm}$  左右, 总  $\beta$  放射性从  $1.8 \times 10^{-10}$  Gi/l 上升到  $1.6 \times 10^{-9}$  Gi/l。运行期间共处理淡水 1300 升以上, 约为浓、极水总量的 10 倍以上。直至运行结束, 浓、极水的循环使用不影响电渗析的正常运行, 仍可继续循环使用, 体积浓缩倍数肯定会更高。

(4) 与离子交换纤维柱比较 一个  $\phi 35$  mm 玻璃交换柱装 12 g 羧基型、4 g 胺基型、4 g 巯基型纤维, 共 20 g, 总体积 15 ml, 装柱高度约 15 cm。以电渗析的原水作为进水, 空间流速 1.0。50 床体积以前, 出水总  $\beta$  放射性平均为  $8 \times 10^{-11}$  Gi/l, 50~80 床体积, 出水总  $\beta$  平均为  $2.1 \times 10^{-10}$  Gi/l 已经穿透。但是, 填充在电渗析淡室里的纤维, 处理蒸发冷凝液 6000 床体积 (1300 升) 以上, 仍然可以继续使用。

(5) 物料衡算 见表 11。

(6) 羧-胺基纤维与其它纤维的净化效果比较 从表 12 可见纤-22( $\text{Cl}^-$ 型)的效果稍好些。

表 11 物 料 衡 算

项 目	总水量, 升	总 $\beta$ 放射性, Gi/l	衡 算, Ci	备 注
处理淡水	1300	$\sim 1.0 \times 10^{-11}$	$-18.7 \times 10^{-8}$	
浓水	50	$\sim 1.1 \times 10^{-9}$	$+5.5 \times 10^{-8}$	
极水	80	$\sim 1.6 \times 10^{-9}$	$+1.3 \times 10^{-7}$	
原水	1430	$\sim 1.8 \times 10^{-10}$	衡算 $-2.0 \times 10^{-9}$	吸附于膜, 纤维上

表 12 几种纤维高纯电渗析的净化效果

原水:  $20^\circ\text{C}$ ;  $1.4 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$ ;  $\text{pH}=6$ ; 总  $\beta$ :  $1.8 \times 10^{-10}$  Gi/l。

纤维种类	电压, V	电流密度, $\text{mA}/\text{cm}^2$	空间流速	淡水电阻率, $20^\circ\text{C}$ , $\Omega\text{-cm}$	淡水总 $\beta$ , Gi/l
羧-胺基型	200	0.22	10~11	$2.1 \times 10^5$	$\sim 2 \times 10^{-11}$
纤-22( $\text{Cl}^-$ 型)	120	0.5	11~12	$4.1 \times 10^5$	$\sim 2 \times 10^{-11}$
纤-23( $\text{Cl}^-$ 型)	182	0.58	~10	$1.4 \times 10^5$	—

(7) 拆框情况 高纯电渗析器经 1100 小时运行后, 拆框情况: ① 电极: 阴阳电极均没有被腐蚀的痕迹, 仅不锈钢电极板 (阴极) 的颜色略深些。② 极室: 进水口处有些疏松状积存物, 但未发现结垢物。③ 极室膜: 靠极室的膜完整无损, 但靠浓水面个别地方

有斑垢点。④ 淡室：进水口端纤维的颜色变深、膜的颜色也变深，但用自来水洗涤后，纤维恢复原色，而膜不能复原色。

## 四、结 论

本实验装置，在电流密度  $i=0.4 \text{ mA/cm}^2$ ，空间流速为 10 时，能将蒸发冷凝液从  $1.8 \times 10^{-10} \text{ Ci/l}$  净化到  $1 \times 10^{-11} \text{ Ci/l}$  左右，净化系数大于 10，升阻比 30~50，稳定运行 1100 小时以上，未更换浓、极水。

装置的特点 无迴路、短流程(0.3~0.6 米)，电压高，电流低，比填装离子交换树脂方便，运行稳定，不会被冲积而阻塞流道，还可避免填装操作所致的设备漏水和内部水流短路，而且填装纤维比填装树脂的成本低四倍以上。

本实验限于国内仅有的几种纤维，虽然几种纤维都有一定效果，但效果不算最好，尤其要根据原水组成选用不同类型的纤维，比如在实验Ⅲ的原水条件下，主要组份是<sup>137</sup>Cs，这时主要靠羧酸基纤维发挥作用。因此，如若研制出更多的交换纤维，尤其是高交换容量的交换纤维，以便选择作为填充材料，可望获得更高的脱盐率和净化系数，进一步降低电耗。如果将纤维编织成形作为填充材料，将更加有利于工业应用。

由于原水贮槽及管道系统有锈蚀物，所以原水虽经泡沫塑料过滤再进入电渗析器，然而经过 1100 小时运行后，其淡室内仍有疏松状积存物。因此，电渗析器进水的预处理对长时间稳定运行是必不可少的。

这些实验结果表明：离子交换纤维高纯电渗析可用于处理与此类似的低放废水，根据反应堆废水的水质和净化要求，该法适宜于作为处理反应堆低放废水的操作单元。

实验分析工作由秦人伟、刘美君、张玉华同志完成，特此致谢。本工作曾获于承泽付总工程师、金兰瑞工程师的指导，并得贾雅傲同志、梁宝庭、李成春工程师的支持，在此一併表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 李基森等编译，离子交换膜及其应用，科学出版社，1977 年。
- [2] 北京市半导体器件三厂，高纯水制取新工艺生产性试验的研究，内部资料，1973，7。
- [3] 第四机械工业部第十设计院等，高纯电渗析试验总结，内部资料，1975，12。
- [4] 中国科学院原子能研究所，电渗析法处理弱放废水实验报告，内部资料，1975，8。
- [5] AERE-R 3137 (1960)
- [6] U. S. patent 3,869,376 (1975)
- [7] U. S. patent 4,032,452 (1977)
- [8] 骆大星，低中水平放射性废水处理处置的发展概况，内部资料，1976，4。
- [9] 北京维尼纶厂，离子交换纤维的用途和制造，内部资料，1977，6。
- [10] 北京化工厂三车间，环境保护，5 (1974)
- [11] K. M. Салдазе, Ионобменные мембраны в электролизе, Издательство «Химия», Ленинградское отделение, 1970.
- [12] Sen-ichi Sugimoto, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 15, 753 (1978).