

内部资料
注意保存

水的电渗析法脱盐

北 京 化 工 厂
北 京 电 力 局 设 计 所
北 京 市 建 筑 工 程 技 术 研 究 所

1972年3月 北 京

毛主席语录

社会的财富是工人、农民和劳动知识分子自己创造的。只要这些人掌握了自己的命运，又有一条马克思列宁主义的路线，不是迴避问题，而是用积极的态度去解决问题，任何人间的困难总是可以解决的。

一个正确的认识往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。

我们的方针要放在什么基点上？放在自己力量的基点上，叫做自力更生。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

前 言

伟大领袖毛主席教导我们，革命就是解放生产力，革命就是促进生产力的发展。在史无前例的无产阶级文化大革命运动中，我们几个单位联合起来，组成了以工人为主体的“三结合”试验小组。“打破洋框框，走自己工业发展的道路”，对水的电渗析法脱盐进行了反复的科学实验，经过三年多的努力，终于使电渗析技术成功地用于工业水的深度脱盐。北京化工厂于1969年建起一套生产设备，它具有成本低、组装简单、除盐效果好、水质纯度高等特点，因而能满足多方面工业用水的要求。

电渗析技术用于工业水脱盐的实践，是遵照毛主席“自力更生”、“艰苦奋斗”伟大方针进行的，从试验到生产，从设计到制造都靠自己动手和兄弟单位的支援协作。这一技术的成功，是毛主席革命路线的胜利，是毛泽东思想指引下广大群众解放思想，破除迷信，敢于创新，大胆实践的结果。

电渗析器用于工业用水的深度脱盐，经过几年的实践已证明是行之有效，经济、简单的好方法，其工艺参数的变化规律（例如：电压、电流、耗电量、电流效率、膜组电压、流速、出口含盐量之间的关系。）对于防止生水垢，选择最佳工况和工艺设计计算关系很大，这方面的资料国内外报导的甚少。有的国外文献报导了有关计算资料，但不适于我们的膜和隔板，不适用于我们的水质范围（国外将水的含盐量由几千毫克/升降至500毫克/升左右，而我们要降至几个毫克/升以下）。

遵照伟大领袖毛主席的教导：我们的方针要放在什么基点上，放在自己力量的基点上，叫作自力更生。为此，我们几个单位于1971年年初对中型设备（ 340×800 ）和大型设备（ 800×1600 ）进行了一些试验和测定，本文就是对这次试验情况的小结。此外，还介绍了一些电渗析器的工艺情况，系内部资料，仅供参考，错误之处欢迎兄弟单位批评指正。

参加试验工作的还有北京西郊电厂、北京工业大学等兄弟单位的同志。此外，在设备制造和各项试验工作中，还得到了上海化工厂、北京维尼纶厂、天津641厂、北京塑料二厂、沧州机务段、化工部第一设计院等兄弟单位的大力协作，来自全国各地的厂矿企业、研究设计、机关、学校单位的同志，来厂传经送宝，交流经验，给予我们工作以极大的支持。在此表示感谢！

目 录

前言

第一章 电渗析法脱盐	1
1-1 多层电渗析脱盐原理	2
1-2 电渗析器的构造——部件及组装	7
1-3 电渗析的安装、运行和运行注意事项	16
1-4 电渗析法脱盐的经济效果	19
第二章 电渗析的物理化学过程	21
2-1 电渗析过程的基本概念	21
2-2 几个迁移过程及对膜性能的要求	23
2-3 极化	24
2-4 电渗析时水的迁移和渗透	27
2-5 电流效率	28
2-6 电极过程	30
第三章 电渗析的工艺系统、防垢和运行条件	32
3-1 电渗析内部水力分配	32
3-2 运行方式及运行工况	33
3-3 防止水垢的形成和去垢方法	37
3-4 运行费用及最佳工况	38
第四章 电渗析器工艺参数试验	42
4-1 水质含盐量与导电度之间的关系	42
4-2 中型设备 (340×800 毫米) 试验。(极限电流试验、水力特性 K' 值统计, 电流效率、膜组电阻试验, 流速、流速与压差的关系)	46
4-3 大型设备 (800×1600 毫米) 试验	62
4-4 无网隔板试验	65
4-5 结论	65
第五章 电渗析器的工艺计算及设计	67
5-1 工艺计算方法	67
5-2 设计计算举例 (最佳电流密度法)	75
5-3 设计计算举例 (最大流速法)	80
5-4 电渗析和离子交换串联除盐	81
结束语	82

第一章 电 渗 析 法 脱 盐

在北京化工厂工业性供水电渗析器脱盐设备上，经过长期生产实践证实：电渗析比离子交换法脱盐经济，它可将工业用水深度脱盐，即将含盐量降至 0.8 毫克当量/升 以下或甚至达到一级蒸馏水水质（约 10 毫克/升以下）。应用简单易行的方法解决了运行结垢问题。和化学除盐相比，它具有运行费用低（成本可降低一半以至三分之二以上），并能节省大量酸碱，运行维护简单等优点。

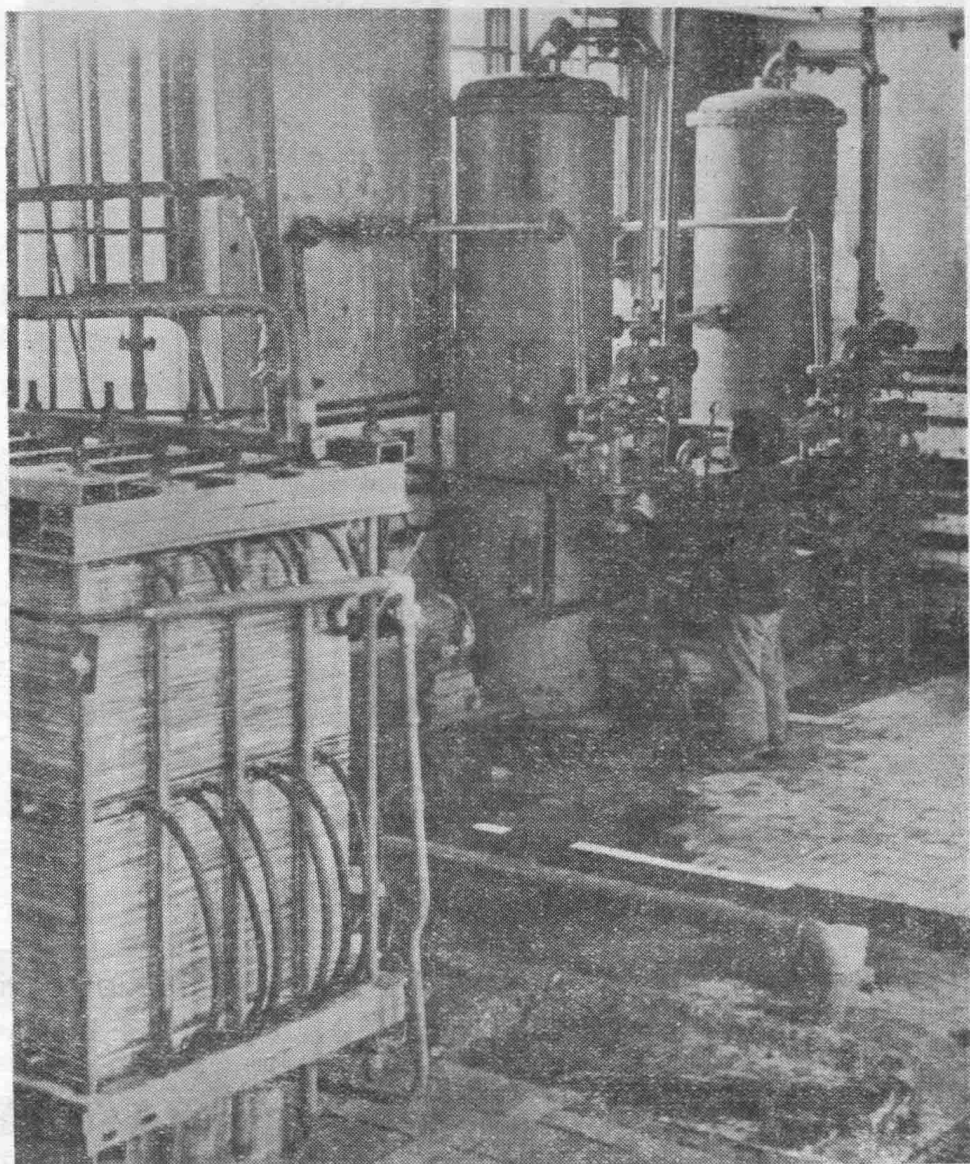


图 1-1 电渗析器和离子交换柱（混合床）串联运行生产高纯水
图为 8 吨/时电渗析器（800×1600 毫米 150 对组装）和 ϕ 700 毫米混合床交换柱

目前，电渗析器和离子交换器（混合床）串联生产高纯水，经过长期运行考验（已三年）证明效果良好，电渗析可将水中 85~99% 的盐除去，其余部分（包括硅酸根）由离子交换器去除。

图 1-1 为电渗析器与离子交换器串联运行供水情况。

图 1-2 为电渗析器本体（离子交换膜尺寸 800×1600 毫米）。这台大型设备产水量可达 8 吨/时。

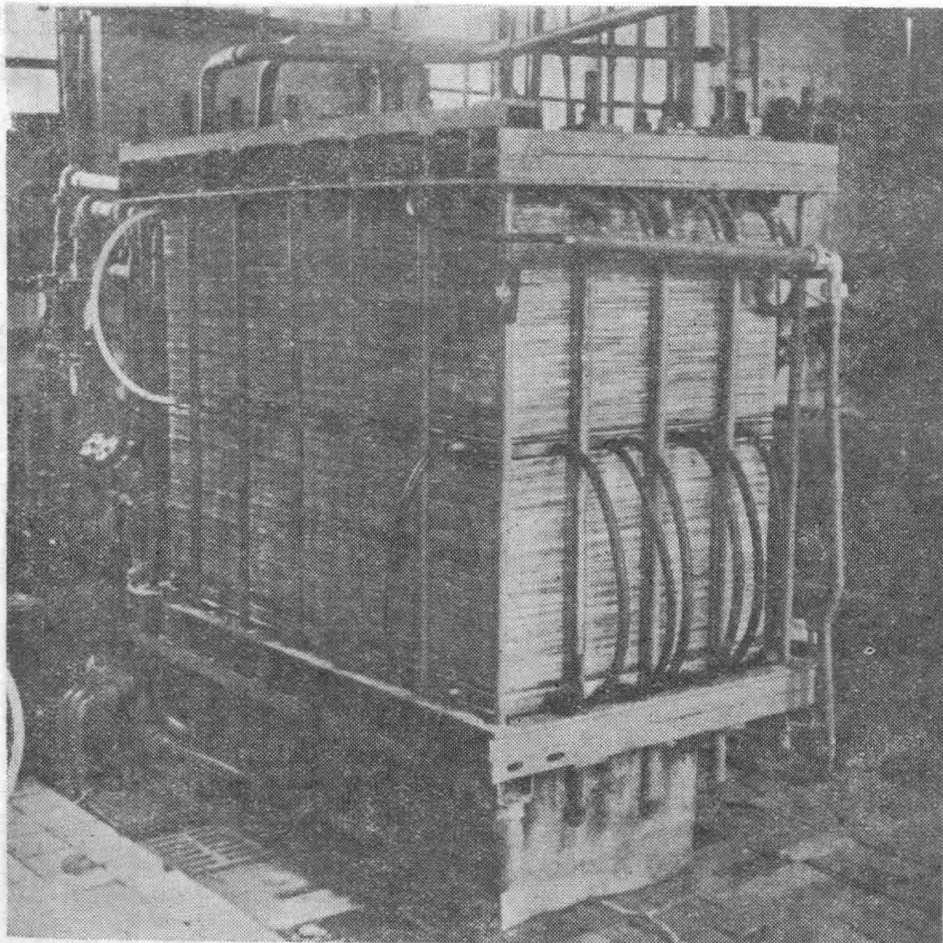


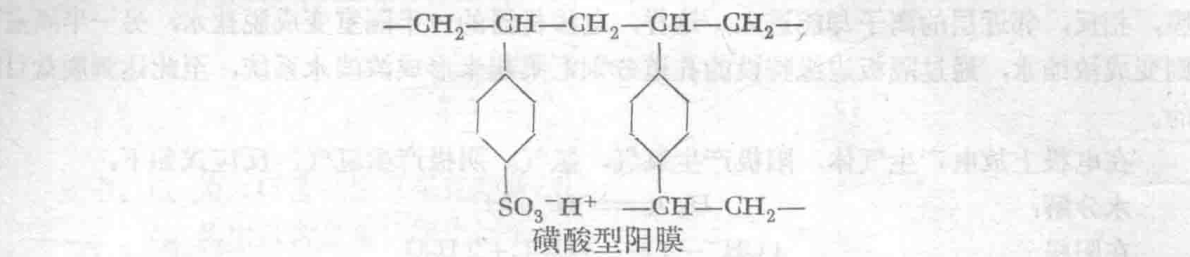
图 1-2 （隔板为 800×1600 毫米，厚 2 毫米 150 对组装）电渗析本体
（产水量 8 吨/时）

1-1 多层电渗析脱盐原理

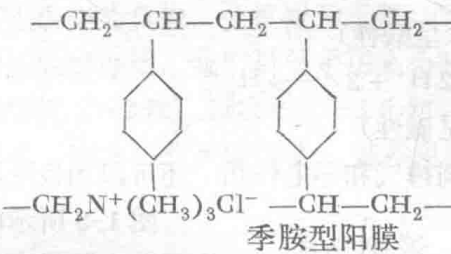
1. 电渗析器的脱盐，主要基于含盐水在阴阳离子交换膜和隔板结成的电渗析槽中流过时，在直流电场的作用下，发生离子迁移。阴阳离子分别通过阴阳离子交换膜，从而达到除盐的目的。

隔板与阴阳离子交换膜交错排列构成多层电渗析槽。离子交换膜具有离子选择透过性，起离子筛作用，阳离子交换膜只能让阳离子穿过，阴离子交换膜只能让阴离子通过。离子交换膜之所以具有选择透过性，是由于在膜上的离子交换树脂的高分子的分子键间有

足够大的孔隙，以容纳离子进出和通过。目前所采用的选择性较好的阳膜为聚苯乙烯磺酸型离子交换膜，阴膜为聚苯乙烯季胺型离子交换膜，结构式如下：



阴膜的结构式为：



阳膜带有负电荷的磺酸根，孔隙中构成负电场，这电场可以允许带正电荷的离子（如Na⁺）进入和穿过，而由于同性相斥的原理，则带有负电荷的离子（如Cl⁻）不能通过。阴离子交换膜带有正电荷的季胺基，在孔隙中构成正电场，排斥带有正电荷的离子（如Na⁺），而允许带负电荷的离子（如Cl⁻）透过。

这样，由具有选择性的离子交换膜及隔板交错排列构成如图 1-3 所示的多层式电渗析

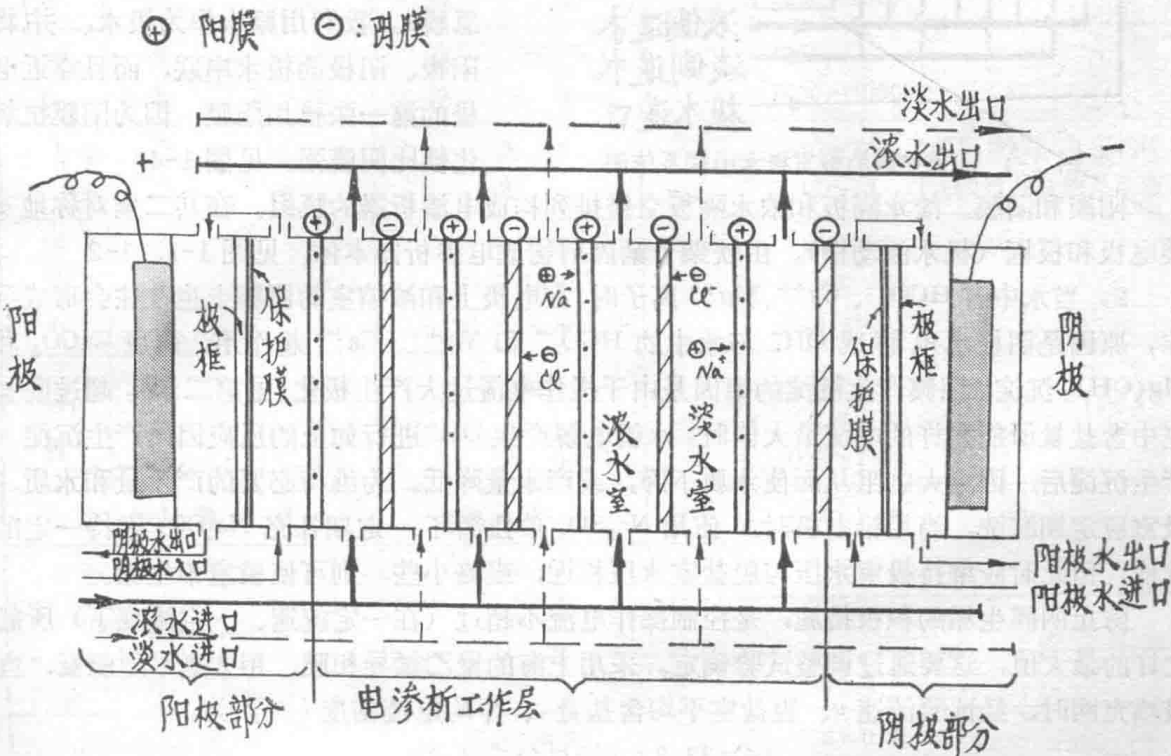


图 1-3 电渗析器示意图

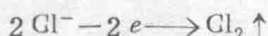
槽。在电场作用下，阳离子向阴极运动，阴离子向阳极运动，如果一个隔室，阳极的一侧为阳膜，阴极的一侧为阴膜，则阴阳离子受离子交换膜同电性基团的排斥，不能穿过交换膜，相反，邻近层的离子却能进入，这样，电渗析器的一半隔室变成脱盐水，另一半隔室则变成浓缩水，通过隔板边缘特设的孔道分别汇集起来形成浓淡水系统，至此达到脱盐目的。

在电极上放电产生气体，阳极产生氧气，氯气。阴极产生氢气，反应式如下：

水分解：

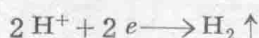


在阳极



(由于水电解的 OH^- 消失，故水呈酸性)

在阴极



(由于水电解的 H^+ 消失，故水呈碱性)

因此需要在极室通水，以便起到排气和导电作用，还可以用极水将沉淀物排走。

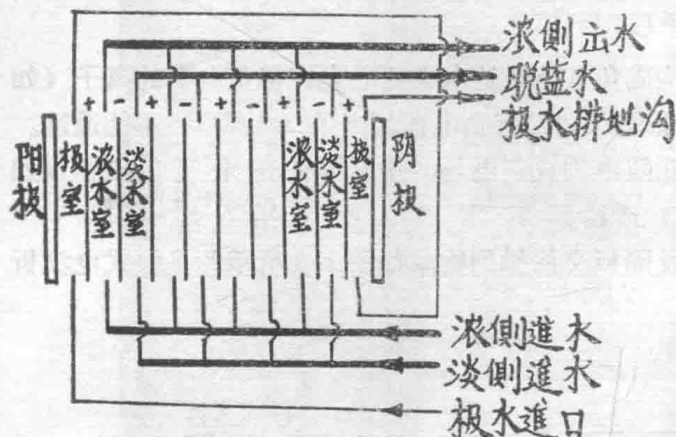


图 1-4 无保护膜的极室极水串联系统图

图 1-3 所示电极室的保护膜，是为了防止阳极产生的 O_2 、 Cl_2 对离子交换膜的氧化和极室膜破时极水跑进脱盐隔室。目前，我们为了简化系统没有采用图 1-3 的极水双冲洗间隔，也没有采用保护膜（它可用维尼纶、涤纶滤布或多孔聚氯乙烯膜、或用抗氯膜）。我们用原水作为极水，并将阳极、阴极的极水串联，而且靠近电极的第一张膜用阳膜，因为阳膜抗氧化性比阴膜强。见图 1-4

阳膜和阴膜、淡水隔板和浓水隔板交错排列构成电渗析器的膜组。在其二侧对称地安装电极和极框（极水流动槽），由铁架子紧固后构成电渗析器本体，见图 1-1、1-2

2. 当水中有 HCO_3^- 、 Ca^{++} 、 Mg^{++} 离子时，在电极上和浓缩室的阴膜上也往往会形成沉淀，原因是阴极水电解成 OH^- 与水中的 HCO_3^- 和 Mg^{++} 、 Ca^{++} 起作用，形成 CaCO_3 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀。阴膜产生沉淀的原因是由于操作电流过大产生极化（见第二章），超过脱盐室中含盐量所能允许的电流最大值时，水就电解产生 OH^- 进行如上的反应因而产生沉淀。产生沉淀后，因增大电阻从而使水质下降，或产水量降低。为维持必要的产水量和水质，极室应定期酸洗。当用铅电极时，使用 Na_2SO_4 单独循环，定期补充 Na_2SO_4 维持一定的浓度，但此时应维持极室水压与脱盐室水压相近，或略小些，则可使极室不生垢。

防止阴膜生垢的积极措施，是控制操作电流不超过（在一定流速、一定浓度下）所能允许的最大值，这要通过调整试验确定。采用上海的聚乙烯异相膜，用 2 毫米厚隔板，鱼鳞填充网时，经试验流速 v 、脱盐室平均含盐量 c 、平均电流密度 i 关系为：

$$vc = 33.3 i \quad (\text{详见公式 4-8})$$

式中： v 为流速（厘米/秒）

i 为平均电流密度 (毫安/厘米²)

c 为出入口对数平均含盐量

$$c = \frac{c_{\lambda} - c_{\text{出}}}{2.3 \lg \frac{c_{\lambda}}{c_{\text{出}}}} \quad (\text{毫克当量/升})$$

式中: c_{λ} 为入口含盐量 (毫克当量/升)

$c_{\text{出}}$ 为出口含盐量 (毫克当量/升)

只要能维持上述条件, 就能大大减慢或基本不生水垢。

定期倒换电极 (正极变为负极, 负极变为正极, 原浓水室变为脱盐室, 原脱盐室变为浓水室) 是个防垢除垢的好办法, 我们目前采用 8 小时倒换电极一次, 能维持水质基本不变, 每月用 1% 的盐酸洗 1~2 次, 每次约 1~2 小时, (此时设备断电、停止供水) 不拆膜清洗, 酸洗液用泵循环 (还有一些其他方法, 请参见第三章防垢一节)。多级串联工艺系统见图 1-5。

表 1-1 大型电渗析器 (1600×800) 生产运行数据:

项 目		单 位	数 据
膜 的 总 对 数		对	150 (分二组并联安装、每组 75 对)
原 水	含 盐 量	毫 克/升	350~500
	电 阻	欧 姆	1000~1500
淡 水	含 盐 量	毫 克/升	约 50
	电 阻	欧 姆	7000~10000
电 压		伏	230~280 (两组并联、电压相等)
电 流		安	11~13 (为两组并联的总电流)
进 口 压 力	淡 水	公斤/厘米	1.5~2.8
	浓 水	公斤/厘米	"
	极 水	公斤/厘米	0.8~1.4
流 量	淡 水	米 ³ /时	5~7
	浓 水		"
	极 水		0.7~1.0
淡 水 计 算 流 速		厘米/秒	6.8~9.5
直 流 单 位 耗 电 量		千瓦时/米 ³	0.5
倒 换 电 极 间 隔 时 间		时	4~8
两 次 酸 洗 间 隔 时 间		周	2~4
平 均 电 流 密 度		毫安/厘米 ²	0.6~0.75
流 程 长 度		米	13.3

3. 在脱盐过程中，也会产生盐由浓水室向脱盐室扩散和水由脱盐室向浓缩室渗透的现象，详见第二章。为防止浓差扩散，运行中浓缩室的水如循环使用时，不应浓度过大。深度脱盐时水流速度应尽量大。

4. 已经投产的大、中型设备，综合运行数据见表 1-1，表 1-2。

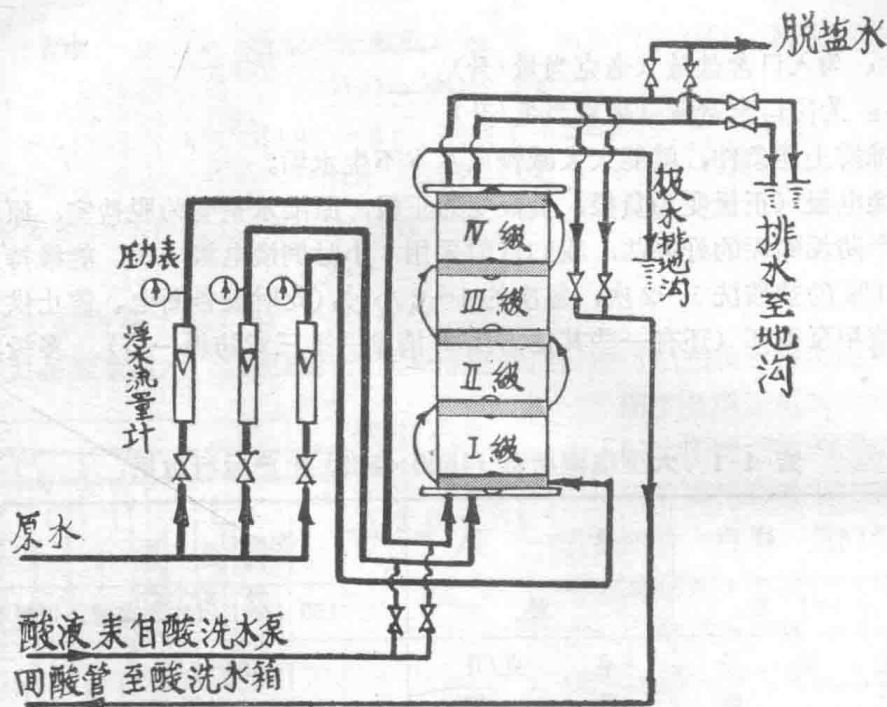


图 1-5 多级串联（定期切换电极）工艺系统图

表 1-2 电渗析制蒸馏水生产运行数据：

项 目	多级两串联次脱盐		综 合 数 据	备 注
	第 一 次	第 二 次	二 次	
膜的组装对数(对)	100	100		第一次设备 800×1600 毫米分两组并联组装
串 联 级 数	1 (大型)	3 (中型)		
流 程 总 长 度	13.3	8.1	21.4	
进 水 淡 水 电 阻	~1500	8~10 K	~1500	第二次设备 340×800 毫米三台并联运行
出 水 淡 水 电 阻	8~10 K	~100 K	~100 K	
电 压 (伏)	~210	~250		
电 流 (安)	10~12	~2.0		
电流密度毫安/厘米²	0.55~0.66	~0.38	0.46~0.52	
进水压力公斤/厘米²	1.6~2.0	1.5~2.0	1.5~2.0	
淡 水 流 量 米³/时	~5.0	1.5~2.0		
水 流 速 度 厘米/秒	10.5	10~11.5	10~11.5	
直流电耗千瓦时/米³	0.42~0.5	0.29~0.33	0.79~0.83	
备 注	每4~8小时倒电极一次	每8小时倒电极一次		

注：大型设备 800×1600 mm 隔板流程长度 13.3 米 中型设备 340×800 mm 隔板流程长度 2.7 米

1-2 电渗析器的构造——部件及组装

1. 部件构造:

(1) 隔板: 见图 1-6、图 1-7

作用: 放在阴阳膜之间, 作为水流通通道。隔板的流水槽中粘有填充网, 以搅拌水流便于离子扩散, 并使膜间隔保持均匀, 填充网可用鱼鳞状塑料网, 合成纤维网或塑料丝织的网或其他型式的网。

隔板上有进水孔、出水孔、布水槽、流水槽及过水槽。用布水槽 (进水孔和出水孔) 的位置不同将隔板分为脱盐室隔板和浓缩室隔板。

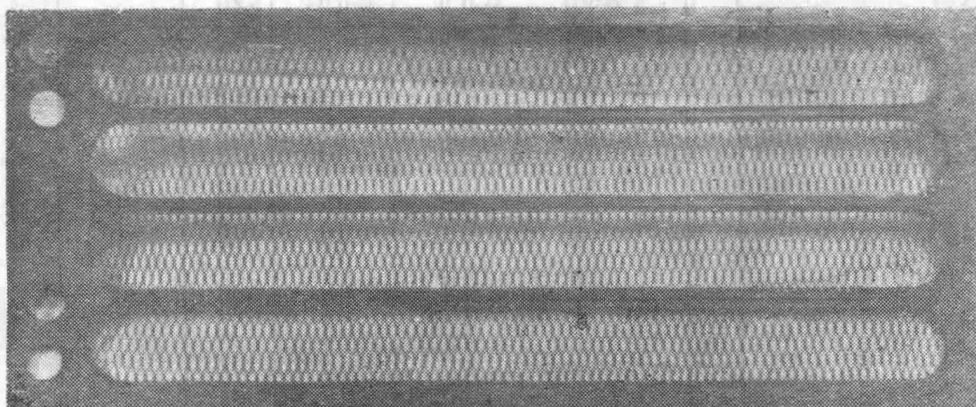


图 1-6 (340×800) 隔板外形

隔板的材料用聚氯乙烯硬板, 目前国内采用 2 毫米厚的板 (也有用 1.5 mm 的), 国外有采用橡胶板或软塑料板的。厚度在 3~0.5 mm。采用橡胶时, 氯丁橡胶比天然橡胶耐久〔1〕〔2〕〔3〕

隔板上布水槽的宽度过大过小都不好, 过大膜易发生下陷, 膜二侧的溶液就会混合起来, 影响脱盐水质量。为图 1-8 所示

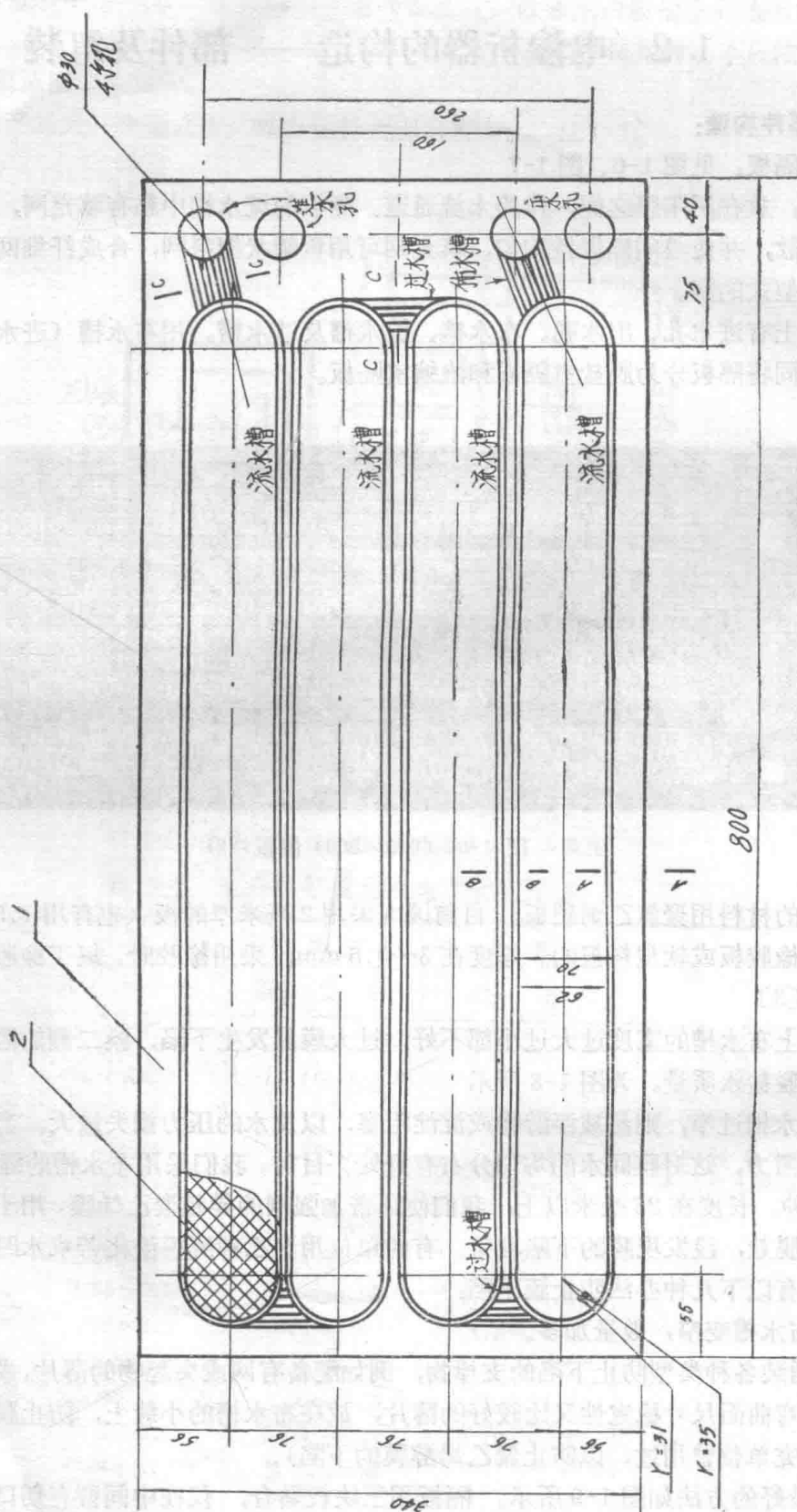
如布水槽过窄, 则易被浮游物或沉淀阻塞, 以及水的压力损失过大。当然, 它应保持有一定的阻力, 这对膜间水的均匀分布有好处。目前, 我们采用布水槽的缝宽为 1.5 mm、2 mm 二种。长度在 25 毫米以上, 我们使用带加强网的异相聚乙烯膜, 用于 1000 毫克/升以下的水脱盐, 没发现膜的下陷现象。有的单位用聚乙烯醇膜淡化苦咸水时却发现膜有下陷现象。有以下几种办法防止膜下陷:

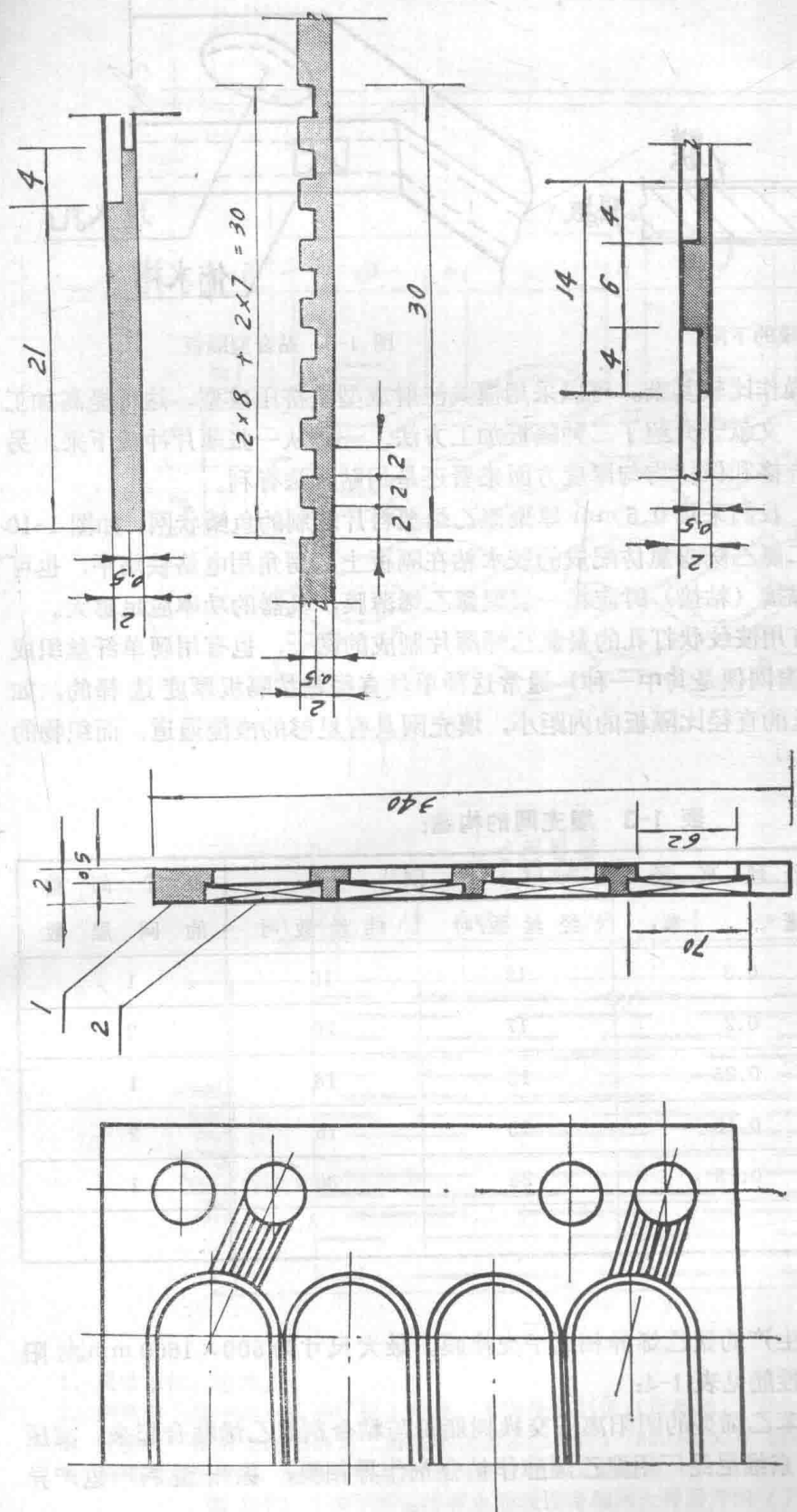
① 布水槽变窄, 数量加多。

② 插装各种类型防止下陷的支撑物, 例如配备有网或突起物的薄片, 或采用机械强度高, 不易弯曲而尺寸稳定性又比较好的薄片, 放在布水槽的小缝上, 防止膜下陷。(上海、北京等研究单位曾用过, 以防止聚乙烯醇膜的下陷)。

③ 最好的方法如图 1-9 所示。隔板用三块板贴合, 仅在中间留有切口作为进水槽, 但这加工复杂。

浓水隔板





说明: 1. 尺寸单位: 毫米。
2. 淡水隔板与浓水隔板相同, 仅进、出水流槽连接位置——即布水槽位置不同。
3. 凡流水部分及粘贴网格部分, 均须打掉毛刺, 用砂纸打光。
4. 网格按流水方向反向粘贴, 粘贴用过氯乙稀胶, 粘贴用电铬铁加热或用热风压粘, 使之平整, 粘接处不得高于隔板拉筋, 如高时则应用砂纸、小刀加工使之平整。
5. 隔板加工外形尺寸误差不应大于1毫米, 布水槽、过水槽、流水槽部分加工深度误差不大于0.2毫米。

件	号	浓	(淡)	水隔板	340 × 800, δ=2	数量	材料	单重kg	总重kg	备注
2					细网(0.5 × 8)宽 × 长=69 × 698	4	聚氯乙稀			
1					硬聚氯乙稀	1	材料			

图 1-7 1 M³/时电渗析水处理设备, 浓淡水隔板大样图

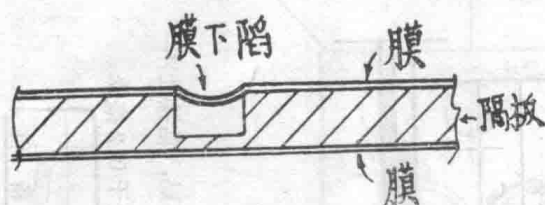


图 1-8 膜的下陷

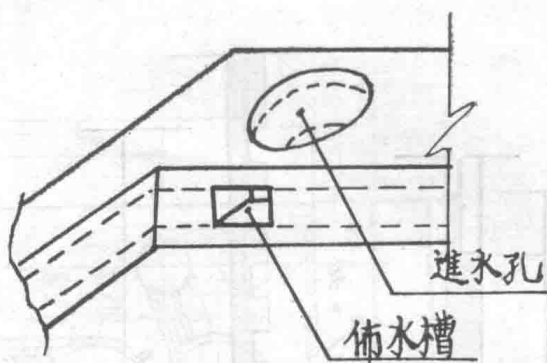


图 1-9 贴合型隔板

隔板的加工用手工操作比较复杂。可以采用模具注射成型或挤压成型。这可提高加工质量和速度，降低成本。文献^[3]介绍了二种隔板加工方法。一是从一张薄片冲裁下来，另一种是薄片贴合法，从价格和保持均匀厚度方面来看还是用贴合法有利。

流水槽中的填充网，我们采用 0.5 mm 厚聚氯乙烯塑料片轧制的鱼鳞状网，如图 1-10 所示，用过氯乙烯粉与二氯乙烷或氯仿配成的胶水粘在隔板上，楞角用电烙铁烙平，也可用高频焊接机焊接，但焊接（粘接）时应粘一层聚氯乙烯薄膜，机器的功率应足够大。

在国外，填充网还有用波纹状打孔的聚氯乙烯薄片制成的网^[1]，也有用硬单纤丝织成的填充网，（例如塑料纱窗网便是其中一种）通常这种单丝直径是按隔板厚度选择的，如表 1-3 所示。由于单纤丝的直径比隔板的内距小，填充网具有足够的液流通道，而织物的纤丝会使液体发生紊流。^[2]

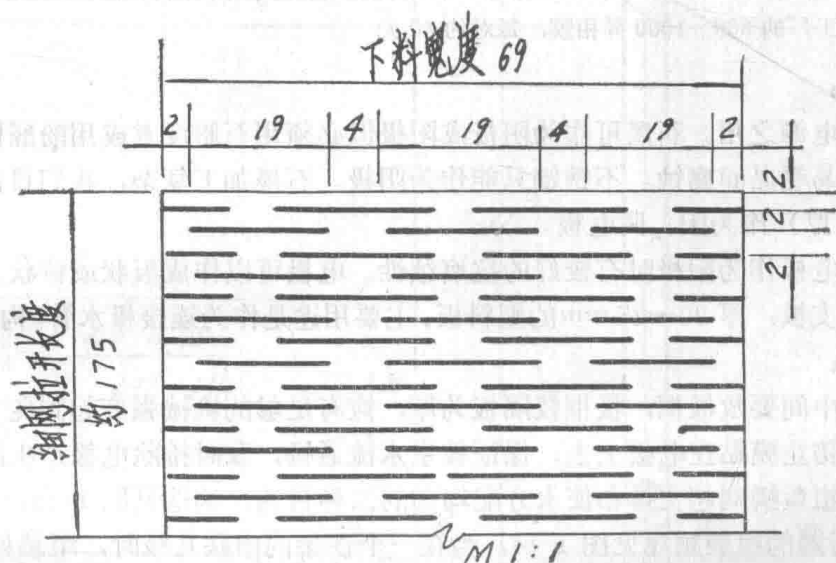
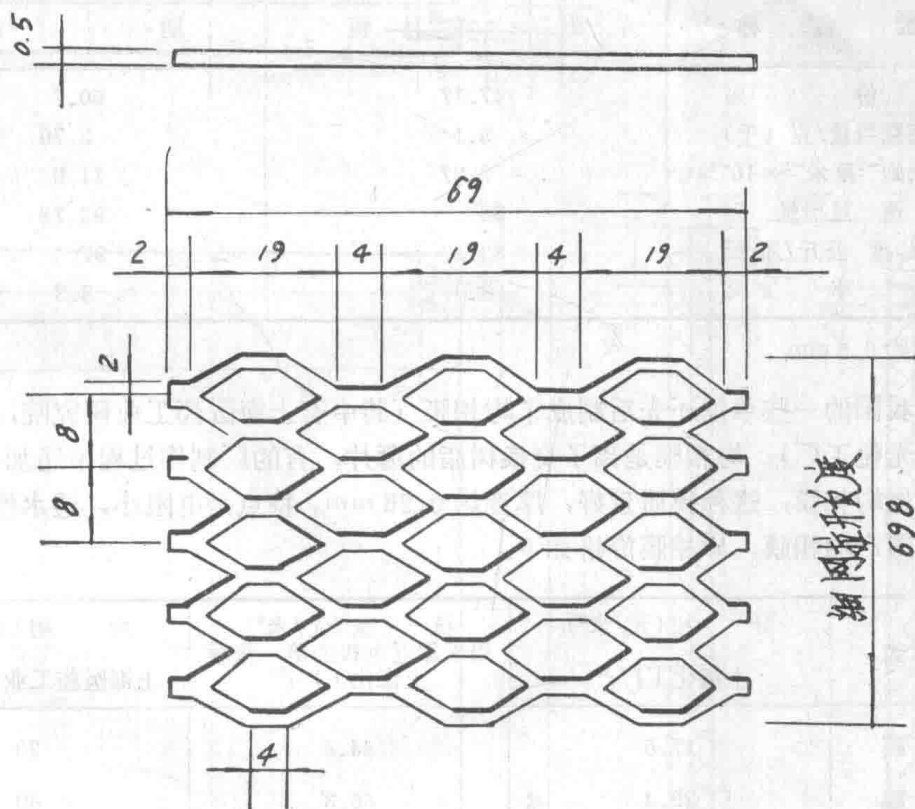
表 1-3 填充网的构造：

隔板厚度 毫米	纤丝直径 毫米	网		每个间隔 的网层数
		经丝数/吋	纬丝数/吋	
1	0.3	12	15	1
	0.2	17	20	2
0.75	0.25	15	18	1
	0.18	15	16	2
0.5	0.13	25	30	1

(2) 离子交换膜：

我们采用上海化工厂生产的聚乙烯异相离子交换膜。最大尺寸为 800×1600 mm。阳膜为黄色，阴膜为兰色，性能见表 1-4：

这种异相膜，是用聚苯乙烯型的阴阳离子交换树脂粉与粘合剂聚乙烯粘合起来，滚压在纤维网上作成的膜。北京维尼纶厂用聚乙烯醇作粘合剂作异相膜，徐州塑料厂也产异相膜。



注:

1. 尺寸单位: 毫米。
2. 细网向上海中国钢板网厂加工订货, 本图规格可供订货参考。
3. 订货时一张网之规格约为 (指自然状态未拉开时) 1800×2000 , 根据现场使用情况剪裁使用。
4. 细网厚度为 0.5, 材料为聚氯乙烯代硬板冲压拉制成网。

图 1-10 $1 \text{ M}^3/\text{时}$ 电渗析水处理设备细网大样参考图 (又名鱼鳞网)

表 1-4 上海化工厂异相膜性能:

参 数 名 称	阳 膜	阴 膜
水 份 %	47.17	50.7
交换量毫克当量/克 (千)	3.1	2.76
比电导欧姆 ⁻¹ 厘米 ⁻¹ ×10 ⁻³	7.97	11.6
选 择 透 过 性 %	98	93.78
抗 拉 强 度 公斤/厘米 ²	83.5	97
伸 长 率 %	3.3	3.3

注: 厚度约 0.5 mm

此外, 我国的一些单位还先后制成了均相膜 (其中有上海医药工业研究院, 上海树脂厂, 四川晨光化工厂)。均相膜是离子交换树脂的薄片, 有的厂制作过程中还加有加强网, 国外商品多属均相膜, 这种膜质量好, 厚度约 0.25 mm, 特点是电阻小, 透水性小:

目前, 国产均相膜, 异相膜价格如下:

膜 类	异 相 (元/米 ²) 上海化工厂产	抗 氯 (元/米 ²) 用于靠近电极的第一张膜 上海化工厂产	均 相 (元/米 ²) 上海医药工业研究院产
阳 膜	17.5	44.4	20
阴 膜	29.4	56.3	60

注: 上海化工厂的 800×1600 异相膜, 每对约 60 元

(3) 电极:

作为连接电源之用。石墨可作为阴极或阳极但必须用石腊浸煮或用酚醛树脂处理后才能使用, 否则易受晶间腐蚀。不锈钢只能作为阴极。石墨加工复杂, 我们目前采用工业铅板 (4~5 mm 厚) 作为阳、阴电极。

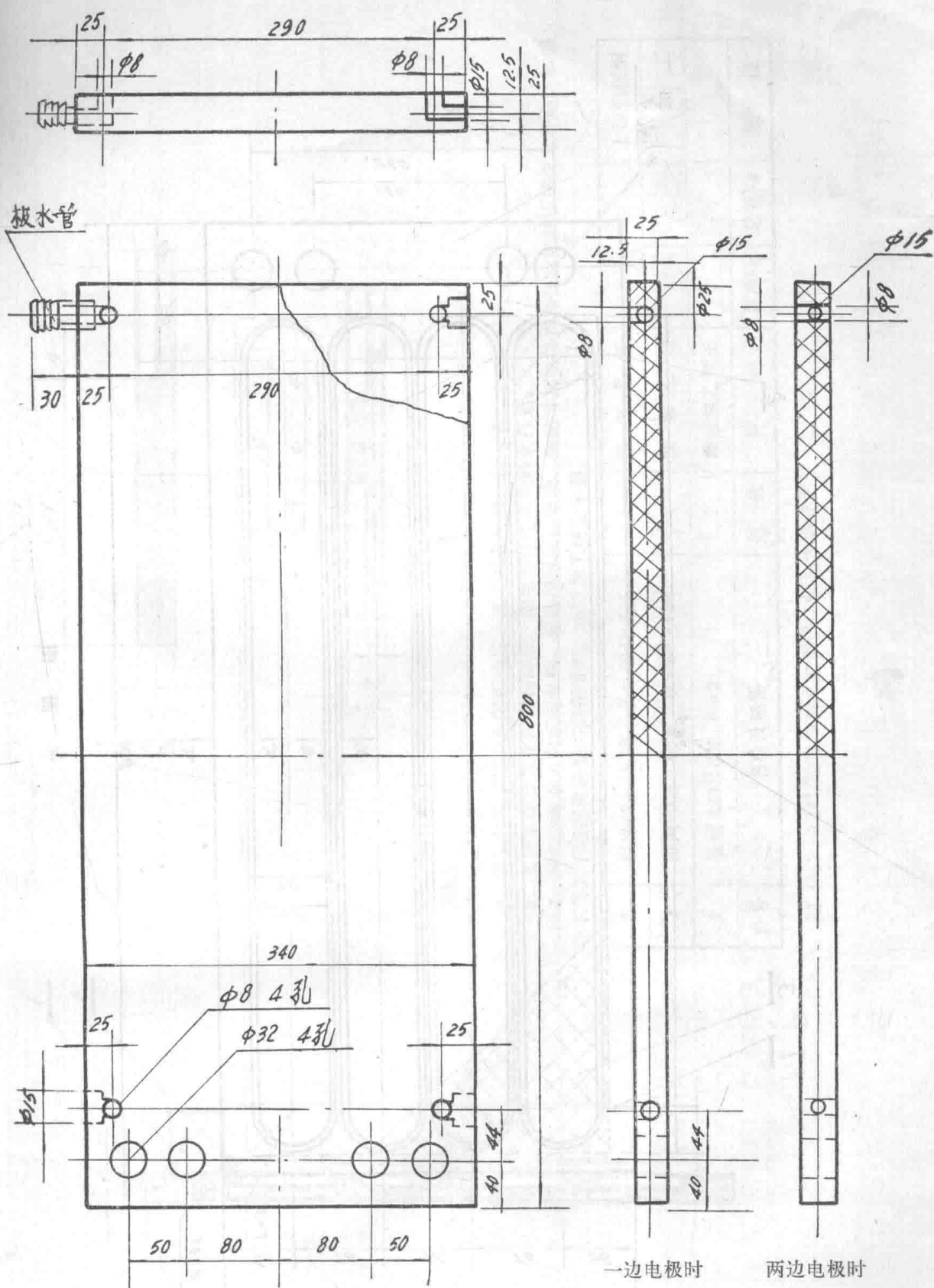
二氧化铅电极作为阳极时有较好的抗腐蚀性。电极可以作成板状或棒状。

(4) 电极支板: 厚 20~25 mm 的塑料板, 主要用途是作为连接极水管。构造见图 1-11。

(5) 极框:

电极和膜中间要放极框, 极框较隔板为厚, 应有足够的机械强度起到良好的支撑作用。极框用来防止膜贴在电极上去, 保证极室水流通畅, 及时排除电极产生的气体和沉淀物。极框上的粗鱼鳞网起支撑和使水分配均匀的二种目的。构造见图 1-12, 1-13。

2. 电渗析器的组装顺序见图 1-14, 当在一个铁架内串联几级时, 组装见图 1-15。当处理水量、水质不同时, 所须流程也不同, 工艺系统选择见第三章。



注:

1. 尺寸单位: 毫米。

2. 每台中两端之边电极支板为2块, 按装为四级时, 共电极板为3块。

3. 电极支板材质为硬聚氯乙烯板。

图 1-11 1 M³/时电渗析水处理设备电极支板大样图