

电力行业节水

新技术新方法 with 资源控制

实务全书

主 编：李 明



中国电力科学出版社

离子交换器的反洗并不是每个周期都要进行的。反洗可以依据具体情况在运行几个周期后，定期进行。如果预处理系统出水的悬浮物很低，反洗间隔时间可长一些。表 3-12 为不同种类的树脂的反洗流速和反洗时间参考值。

表 3-12 不同树脂种类的反洗流速和反洗时间

设备类型	强酸阳离子交换器	强碱阴离子交换器	混合离子交换器	弱酸阳离子交换器	弱碱阴离子交换器
树脂型号或类型	001 × 7	201 × 7	001 × 7；201 × 7	D113	D301
反洗流速 (m/h)	15	6 ~ 10	10	15	5 ~ 8
反洗时间 (min)	10 ~ 15	5 ~ 10	5 ~ 10	10 ~ 15	5 ~ 10

152. 离子交换器再生时为什么需要置换？

答：当预计的再生液用完后，所有再生液都已经进入了交换器，但还有一部分还没有通过树脂层，因此这部分再生液还没有发挥再生作用。为此，需要用水将这部分再生液“顶”过树脂层，排出交换器，这个过程就是“置换”。置换用的水是再生液稀释水，流速和流程都与进再生液时的相同，它实际上是再生过程的继续。置换水量一般为树脂层体积的 1.5 ~ 2 倍，以排出废液中再生剂的浓度下降到一定范围为置换终点（一般小于再生液浓度的 10%），也可以控制置换时间，一般为 25 ~ 30min。

153. 为什么有时再生后正洗时间很长？

答：（1）再生不彻底。尤其是逆流再生设备，如果再生中发生了树脂乱层，容易出现再生失败的情况，导致正洗时间很长甚至正洗不合格。混床再生时如果分层不好、阴阳树脂交混层太厚、再生后混脂不好等，都可能使得正洗时间延长。

（2）出水被进水或者再生液污染。在有些设备再生后，因管道阀门隔离不严，导致进水、再生液等渗入出水管，使得正洗长时间不合格。

（3）对于有石英砂垫层的阳床和阴床，如果对石英砂垫层预处理不彻底，因石英砂中携带的杂质缓慢释放，也会造成正洗时间很长。

154. 阳离子交换器的运行流量能不能用进水阀门控制？

答：在电厂水处理系统运行中，经常可以看到一些运行人员利用阳床的进水阀调整运行流量，而将出口阀门全开，这是错误的；因为阳离子交换过程中，树脂交换下来的 H^+ 会与水中的 HCO_3^- 反应，产生大量的过饱和 CO_2 。如果交换器内保持着正压，则 CO_2 会溶入水中，不会对阳床的运行产生不利影响。如果用进水阀门限制流量，则交换器的运行压力会降低，过饱和的 CO_2 会从水中逸出，并在床层中产生大量的气泡。气泡会阻碍水的流动，破坏水流的均匀性。严重时，会因水中带气太多，设备产生强烈的震动。因此，阳床的流量不能用进水阀门调节，而应用出水阀门调节。

155. 阳床、阴床和混床的流量计的安装部位如何确定？

答：能够耐酸、碱腐蚀的流量计，应尽量装在各设备的进水管路上，这样既可以监测运行流量，也可以监测正洗流量和反洗流量。但对于不耐酸、碱腐蚀的流量计，则应分别装在阳床进水管、阴床出水管，因为这些管内的水呈中性。混床因进出水基本都是中性水，所以应该尽量装在进水管上。

156. 混床可以将阳、阴两种树脂装在一起，为什么阴床内不能混有阳树脂？

答：混床再生时，首先要将阳、阴两种树脂分层，然后分别通入各自的再生液，再生后的阳树脂和阴树脂分别保持 H 型和 OH 型，然后再将其混合均匀后投运制水。

阴床只有碱一种再生液，如果混有阳树脂，则再生后阳树脂转为 Na 型，在制水过程中会与水中的 H^+ 进行交换反应，释放出 Na^+ ；阴离子交换所产生的 OH^- 就不能完全与 H^+ 反应生成水，而是存在与 Na^+ 等量的游离 OH^- ，因此，阴床出水的电导率很高。

阴床出水电导率升高的幅度与混入的阳树脂的量有关：混入的阳树脂越多，阴床出水的电导率就越高。因此，在离子交换系统中，应特别注意不能使阳树脂混入阴床。

157. 树脂捕捉器应该如何使用？

答：离子交换系统设置的树脂捕捉器主要目的是阻止碎树脂进入后级设备或系统。因为树脂是有机物，如果碎树脂进入水汽系统，则会受热分解，不但严重影响蒸汽的品质，严重时树脂会黏结在水冷壁管内，造成传热不良而爆管。

混床是离子交换除盐系统的最后一级设备，而且，混床的出水装置一般使用水帽，容易产生树脂的泄漏。为了避免在运行过程中因水帽的破损、树脂的破碎等原因使碎树脂进入除盐水箱，应在混床的出水管道上装配树脂捕捉器。

如果阳床和阴床使用石英砂垫层，可以不装树脂捕捉器，因为石英砂垫层是很好的过滤器，可以有效地拦截碎树脂。如果使用水帽，则应该在阳床出水管上装树脂捕捉器，以避免阳树脂进入中间水箱和阴床。至于阴床出口，可以不装树脂捕捉器，因为即使阴树脂漏入后面的混床，也不会对水质有不利的影响。

使用树脂捕捉器时要注意滤元的精度。一般要求缝隙不大于 0.15mm（可以理解为最小的 0.3mm 树脂颗粒破碎成两半后，仍然能被拦截）；同时应注意安装的精度，避免滤元与外壳产生过大的缝隙而使树脂泄漏。

第二节 顺流再生离子交换器

158. 顺流再生离子交换器的特点是什么？

答：顺流再生离子交换器是离子交换装置中应用最早的床型。顺流是指该设备在运行时水的流向和再生时再生液的流向是相同的，都是自上而下通过树脂层。

顺流再生离子交换器的优点是再生操作简单，运行可靠；对进水悬浮物含量要求不高（浊度小于等于 5NTU）。缺点是由于强型树脂，出水端的树脂再生度较低，导致设备出水水质差，树脂的运行交换容量低；再生时上层再生废液中大量的失效离子将出水端未失效的树脂消耗掉，因此酸、碱耗较高。

鉴于以上的特点，目前在火电厂，强酸或强碱型的顺流再生离子交换器应用极少。对于弱酸或弱碱离子交换树脂，因其容易再生，可以使用顺流床。

159. 顺流再生离子交换器的主要运行步骤有哪些？

答：顺流再生离子交换器的运行由反洗、进再生液、置换、正洗和制水五个步骤组成。其中，是否需要反洗是根据树脂层截留悬浮污染物和压实的情况来确定的，不一定每个周期都进行。再生是离子交换器运行操作中很重要的一环。影响再生效果的因素很多，如再生剂

的种类、纯度、用量、浓度、流速、温度等。一个完整的再生过程如下：

- (1) 反洗。清洁和松动床层，恢复床层的通水能力。
- (2) 进再生液。进再生液前，先将交换器内的水放至树脂层以上约 100 ~ 200mm 处，然后将一定浓度的再生液以一定的流速自上而下流过树脂层。先排水的目的是避免交换器上部的水过度稀释再生液。硫酸再生的过程比较复杂，这方面内容在后面专门讨论。
- (3) 置换。停止进再生剂，维持稀释水的流速即可。
- (4) 正洗。正洗又称为预投运。再生结束后，交换器内还残留一部分再生剂和废液，直接运行出水一般不合格，因此，使用进水按照制水的流程自上而下清洗树脂层，流速约 10 ~ 15m/h。正洗的终点是出水水质合格。
- 正洗水量一般为树脂层体积的 3 ~ 10 倍，因设备和树脂不同而有所差别。
- (5) 制水。正洗合格后即可投入制水。

第三节 对流再生离子交换器

160. 什么是对流再生？对流再生与逆流再生的概念相同吗？

答：为了克服顺流再生工艺出水端树脂再生度低、酸碱耗量大的缺点，现在广泛采用对流再生工艺。对流再生的特点是床层中水的流向和再生时再生液的流向相反。

目前采用对流再生的设备主要有逆流再生离子交换器和浮动床，因此，逆流再生是对流再生的一种形式。逆流再生离子交换器的特点是运行时水向下流动、再生时再生液向上流动。而浮动床则是运行时水向上流动、再生时再生液向下流动。逆流再生和浮动床设备示意图见图 3 - 1。

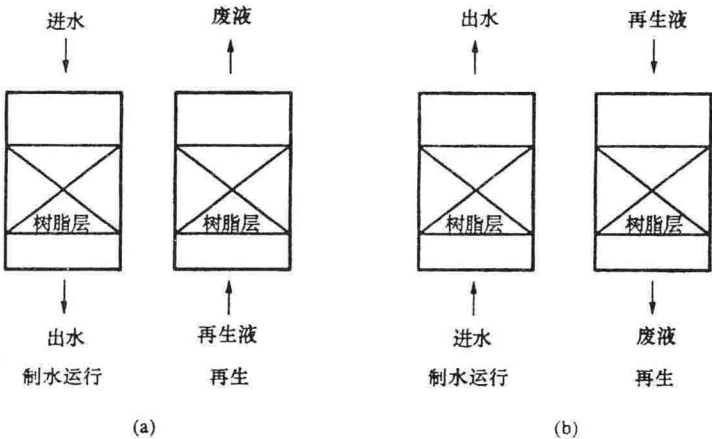


图 3 - 1 逆流再生和浮动床设备示意图
(a) 逆流再生设备；(b) 浮动床设备

逆流再生设备根据再生过程中顶压操作，又分为水顶压、空气顶压和无顶压逆流再生三种形式。

161. 对流再生离子交换设备的特点是什么？
- 答：与顺流再生工艺相比，对流再生工艺具有以下优点：
- (1) 出水水质好。对流再生时，新鲜的再生液总是先与出水端的树脂接触，因此，出水

端树脂的再生度极高，其出水水质明显优于顺流再生设备。由逆流再生离子交换组成的除盐系统，强酸 H 交换器出水的 Na^+ 含量可以小于 $100\mu\text{g/L}$ ，一般在 $20 \sim 30\mu\text{g/L}$ ；强碱 OH 交换器出水的 SiO_2 含量低于 $100\mu\text{g/L}$ ，一般在 $10 \sim 20\mu\text{g/L}$ ，电导率通常低于 $2\mu\text{S/cm}$ 。

(2) 酸、碱耗低。再生液通过树脂层时，依次通过钠型、镁型和钙型失效树脂层，难再生的镁型和钙型树脂在废液排出端，失效树脂的层态分布有利于树脂的再生，因此酸、碱耗较低，一般比耗为 1.5 左右。根据水质条件的不同，再生剂用量可比顺流再生设备节约 50% ~ 100%，因而排废酸、废碱量也少。

(3) 对水质适应性强。当进水含盐量较高或 Na^+ 比例较大时，顺流再生工艺有时出现水质达不到要求的情况。但对流再生的出水水质比较稳定。

(4) 自用水率低。一般比顺流的低 30% ~ 40%。

但对流再生设备和运行操作更复杂一些，再生过程控制不好，容易出现再生失败的情况。浮动床由设备的底部进水，因此对进水浊度要求也比较严格，一般要求浊度小于等于 2NTU，以减少大反洗次数。

162. 为什么弱型树脂不用逆流再生工艺？

答：逆流再生设备使用的树脂仅限于强型树脂，弱型树脂一般采用顺流设备，因为：

(1) 弱型树脂容易再生，再生度较好。即使采用顺流再生，出水端的树脂仍然能够获得较好的再生效果。

(2) 弱型树脂密度较小，如果采用逆流再生树脂容易上浮而乱层。

(3) 弱型树脂转型膨胀率很大。因失效后弱型树脂层收缩，进再生液后又会膨胀，如果采用逆流再生，容易乱层。

163. 逆流再生离子交换器容易出现哪些问题？如何解决？

答：逆流再生设备出现的问题一般集中在再生阶段。在再生时，逆流再生离子交换器容易出现以下问题：

(1) 乱层。再生时，再生液、置换水都是逆流（从下而上）通过树脂层的，流速过大或者过小对再生都不利。如流速过小，再生液在床层断面内有可能分配不均匀，影响再生效果；如果再生流速太大，向上流动的再生液就会扰动树脂层，或使部分树脂流化或者浮动，将失效树脂的层态分布打乱（通常称“乱层”），失去了对流再生工艺的优点。为此，在采用逆流再生工艺时，必须严格控制再生流速，以防止“乱层”的发生。同时应注意再生液中不能混有空气，以免扰动交换层。

如果发生了乱层，则会出现以下现象：

1) 正洗时间延长。情况严重时，正洗出水长时间不合格，表示再生失败，需要重新再生。

2) 出水水质变差。如果是阳床，出水的含钠量比平时高得多；如果是阴床，出水电导率比正常情况高。

要使设备恢复正常，只有增加再生剂的用量，重新再生。一般乱层后的酸碱耗量要增加 50% ~ 100%。

(2) 中排受损。逆流再生设备的特点之一是在树脂层上部有中间排水装置，在中排上部有 100 ~ 200mm 厚的树脂层，这部分树脂接触不到再生液，因此永远处于失效状态，不起交换作用，称为“压脂层”。

该装置一般是一组母支管。当反洗时，容易出现树脂层“顶”坏中排装置，使树脂泄漏。对于逆流再生阳床，如果进水悬浮物较高，使树脂层结块，在制水运行过程中也会发生因压差过大损坏中排的情况。

164. 小反洗和小正洗的概念是什么？

答：小反洗和小正洗主要与压脂层有关，是逆流再生特有的步骤，与通常的反洗、正洗有不同的含义，其示意图见图 3-2。

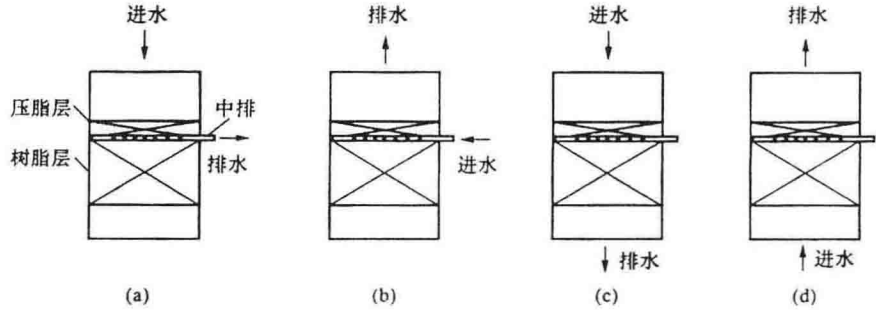


图 3-2 逆流再生设备反洗、正洗示意图
(a) 小正洗；(b) 小反洗；(c) 正洗；(d) 反洗

(1) 小反洗。只对压脂层进行反洗。为了保持有利于再生的失效树脂层态分布不乱，再生前不能像顺流再生那样对整个树脂层进行反洗，而只对中间排液管上面的压脂层进行反洗，以冲洗掉运行时积聚在压脂层中的污物。运行时污物一般主要截留在压脂层中。

(2) 小正洗。只对压脂层进行正洗。目的是将再生后压脂层中残留的再生废液清洗干净，以免影响水质。小正洗时，水从上部进入，从中间排液管排出。小正洗用水为该设备的进水。考虑到小正洗从交换器上部进水时，交换器还没有充满水，上部水垫层很浅，直接进水有可能形成高程较大的跌水而冲乱上部的树脂层，此时也可以通过小反洗管路进水，逆流冲洗压脂层中的再生残液。

(3) 大反洗。交换器经过多个周期运行后，树脂层因长期压实和一定的污染堵塞，使得运行压差增大，因此必须定期地对整个树脂层进行大反洗。通常称为反洗。

165. 逆流再生交换设备有哪几种形式？

答：逆流再生时最容易发生的问题是离子交换树脂乱层。防止树脂乱层的方法主要是在树脂层上部施加由上向下的压力，“压”住树脂层来防止乱层，俗称“顶压”。逆流再生交换设备再生时的顶压方法有空气顶压、水顶压和无顶压三种。

水顶压和空气顶压的原理完全相同。水顶压再生时，将一定压力的顶压水由交换器的上部引入，通过压脂层后由中排排出。由于压脂层中顶压水的流向与再生液的流向相反，从而使树脂层再生时不会发生浮动而乱层。这就是水顶压逆流再生的原理。

将顶压水换作压缩空气，就是空气顶压再生。空气顶压时，压脂层中流动的是空气，没有水。

采用气顶压或水顶压，不仅增加了一套顶压系统，而且操作也比较麻烦。无顶压逆流再生则是完全依靠压脂层的压力避免树脂乱层。其要点是将中排的排水小孔直径扩大，减小中排的阻力，确保在进再生液时，压脂层中没有向上流动的再生液，而且尽量处于“干层”状

态，避免压脂层内的树脂浮动。由于失去了水的浮力，压脂层可以提供足够的压力使下面的树脂层不会浮动而乱层。

166. 逆流再生设备在大反洗时应注意什么问题？

答：逆流再生设备在大反洗时，应注意：

(1) 由于大反洗扰乱了树脂层，所以每次大反洗后的再生剂用量应比平时增加 50% ~ 100%，否则可能导致再生失败。

(2) 大反洗的周期应视进水浊度而定，一般每运行 10 ~ 20 个周期大反洗一次；大反洗用水为该设备的进水。

(3) 大反洗时，由于树脂层经过长期压实，容易形成“树脂活塞流”而损坏中间排水装置，因此，大反洗前应首先进行小反洗，以松动压脂层并除去其中截留的污物；大反洗的流量应由小到大，逐步增加，以防树脂形成活塞流。

167. 如何进行顶压逆流再生？

答：(1) 小反洗。小反洗使用本级交换器的进水，流速按压脂层膨胀 50% ~ 60% 控制，反洗一直到排水澄清为止。小反洗的时间一般为 5 ~ 20min，其长短与设备在除盐系统的位置以及预处理系统出水的水质有关。对于第一级除盐设备，因为截留的悬浮杂质较多，反洗时间可能会比较长。

(2) 放水。小反洗后，待树脂沉降下来以后，打开中排放水门，放掉中间排水装置以上的水，使压脂层“干层”，以增加压脂层对下面树脂层的压力，同时增大压脂层向上移动的阻力。

(3) 顶压。从交换器顶部送入压缩空气，使气压维持在 0.03 ~ 0.05MPa 的范围内。用来顶压的空气应经除油净化。如果用水顶压，则将顶压水由交换器顶部引入，通过压脂层后，与再生废液一起由中间排液管排出。顶压水的流量一般为再生流量的 0.4 ~ 1 倍。

(4) 进再生液。在顶压的情况下，将再生液送入交换器内，控制再生液浓度 3% ~ 5%。要注意再生流速不能太大，否则会发生树脂乱层；流速也不能太低，否则因分配不均而影响再生效果，一般为 4 ~ 5m/h。因为阴树脂的密度比阳树脂小，所以有时阴床的进碱流速低于阳床的进酸流速。

(5) 置换。当再生液进完后，关闭再生剂浓液出口阀，维持原有的再生流速，用水将管道、床层内的还未利用的再生液“顶”出树脂层，以充分利用这部分再生剂。置换时间一般为 30 ~ 40min，置换水量约为树脂体积的 1.5 ~ 2 倍。

为防止乱层，应注意：

1) 在进再生液和置换的过程中，应维持顶压空气的气压稳定。

2) 置换结束后，应先停止进水，然后再停止顶压。

(6) 小正洗。流速一般阳树脂为 10 ~ 15m/h，阴树脂为 7 ~ 10m/h，时间约 5 ~ 10min。

(7) 正洗。相当于预运行，进水自上而下通过树脂层，目的是使出水达到该设备的水质标准。正洗流速 10 ~ 15m/h，直到出水水质合格后，方可投入正式运行。

168. 无顶压逆流再生的技术要点是什么？

答：(1) 采用小阻力中间排水系统，将中间排液装置上（简称中排）的排液孔扩大，减小排液孔的水流阻力；对于阳离子交换器来说，只要将中排的排液孔流速控制在 0.1 ~ 0.15m/s 即可。

(2) 压脂层的厚度一般在 200mm 以上。

(3) 再生流速不能太高，一般控制在 4 ~ 5m/h。要确保至少有一部分压脂层处于“干层”状态。

研究结果表明，采取以上措施，就可以不需任何顶压措施而使树脂层保持稳定，并能达到逆流再生的效果。

与顶压再生相比，无顶压逆流再生的操作步骤除了没有顶压步骤外，其他完全相同。

第四节 浮 动 床

169. 浮动床的运行原理和优、缺点是什么？

答：浮床式离子交换器简称浮动床或浮床，其特点是运行时水由交换器底部引入，通过树脂层后由上部排出，树脂层被高速水流完整地托起并压实成床，离子交换反应是在水向上流动的过程中完成的。

树脂失效后，停止进水，使整个树脂层下落（称落床），然后自上而下通入再生液进行再生。

(1) 浮动床工艺的优点是：

1) 由于浮动床制水和再生两个过程的液流方向相反，因此，与逆流再生离子交换器一样，可以获得较好的再生效果。再生后的树脂形态分布，对保证运行时的出水水质非常有利。

2) 浮动床不但具有对流再生工艺的优点，而且还具有运行时床层压差小的特点。这是因为它的水流方向和重力方向相反，在相同流速条件下，与向下流相比，树脂层的压实程度较小，因而水流阻力也小。这也是浮动床可以以较高的流速运行，而且可以装填较高的树脂层的原因。

3) 为了使树脂层在启动时顺利成床，浮动床内的树脂基本是装满的，树脂层上部空间很小。因此，浮动床交换器空间的利用率达到了最大。

(2) 浮动床设备有以下缺点：

1) 不能频繁启停，尤其是在接近失效终点时。一旦在接近终点时停运，就需要再生；因为在停运落床时，保护层容易被扰乱。

2) 不能低速运行，否则会发生“落床”。

3) 没有反洗空间，所以一般浮动床配有体外清洗系统，增加了系统的复杂性。

4) 体外清洗时在树脂输出、输入过程中增加了树脂的磨损。

5) 对树脂粒度的均匀性要求较高；同时要求树脂具有较小的转型体积变化率以及较高的强度。

6) 为了不使体外清洗过于频繁，浮动床对进水浊度要求严格，一般要求进水浊度小于等于 2NTU。

170. 浮床的运行有哪些步骤？

答：一个完整的浮床运行周期包括停运落床、再生、置换、清洗、启动成床、上流清洗、运行制水等过程。

(1) 停运落床。当设备运行至失效时停止进水，悬浮的树脂靠自身重力逐层下落。在这

一过程中树脂得到了松动，同时还可以排除床层中的气泡。

(2) 进再生液和置换。进再生液和置换的方式与顺流再生工艺相同。

(3) 清洗树脂层。置换结束后，开清洗水门，由交换器的上部进水顺流清洗树脂层，清洗流速为 $10 \sim 15\text{m/h}$ ，一般需 $15 \sim 30\text{min}$ 。浮动床清洗树脂层的操作与其他床型是不同的。

(4) 启动成床。用 $20 \sim 30\text{m/h}$ 的较高流速进水将树脂层快速托起，形成压实的床层。

(5) 正洗。成床后，维持进水流速进行正洗（又称上流清洗），直至出水水质达到标准时，即可转入制水过程。

171. 浮动床树脂的体外清洗有哪些方法？

答：由于浮动床内树脂是基本装满的，没有反洗空间，故无法进行体内反洗。当需要反洗时，需将部分或全部树脂移至专用清洗装置内进行清洗。经清洗后的树脂送回交换器后再进行下一个周期的运行。清洗间隔取决于进水中悬浮物含量和浮床在系统中的位置，一般是 $10 \sim 20$ 个周期清洗一次。清洗方法有以下两种：

(1) 水力清洗法。它是将约一半的树脂输送到体外清洗罐中，给交换器腾出了清洗空间，然后将清洗罐和交换器串联进行水反洗，反洗时间通常为 $40 \sim 60\text{min}$ 。

(2) 气—水清洗法。它是将树脂全部送到体外清洗罐中，先用经净化的压缩空气擦洗 $5 \sim 10\text{min}$ ，然后再用水以 $7 \sim 10\text{m/h}$ 流速反洗至排水透明为止。该法清洗效果好，但清洗罐容积是交换器的一倍左右。

清洗后再生时，也同逆流再生一样，需要增加 $50\% \sim 100\%$ 的再生剂用量。

172. 浮动床运行中应注意的问题有哪些？

答：浮动床设备运行时需要注意的问题是：

(1) 在设备启动时，必须使树脂层整体快速上浮并压实（称为“成床”），因此启动时水流提速要快，以防树脂层发生扰动而影响成床的效果。

(2) 在制水过程中，应保持足够的水流速度，以免水流速过低而出现树脂层下落的现象。一般最低的运行流速为：阳床 10m/h ，阴床 7m/h 。为了防止低流速时树脂层下落，可在浮床出口设循环管，以满足系统低负荷的需要。

(3) 体外清洗输送树脂的过程中，要注意维持一定的流速，以免树脂在管内沉积而堵塞；树脂输送流速一般为 $1 \sim 2\text{m/s}$ 。

(4) 浮动床制水周期内不宜停床，尤其是后半周期，否则会扰乱保护层而使交换器提前失效。

(5) 浮动床在运行中，碎树脂容易堵塞出水装置的网孔或缝隙，所以需要装填一定高度的惰性树脂层。另外，尽量采用粒径均匀的树脂。如果运行中发现压差持续较高，则需要增大清洗树脂的比例，必要时分批将浮床内的树脂全部清洗。

第五节 分流再生工艺

173. 什么是分流再生离子交换工艺？

答：分流再生工艺又称双流再生工艺，其特点是再生时，将再生液分成两部分，分别由交换器上部和底部同时引入，再由中排装置一起排出。运行时水由上至下通过整个床层，其流程与逆流再生设备完全相同。

从原理上来讲，如果将无顶压逆流再生离子交换器的压脂层加厚并使其发挥离子交换作用，中间排液装置同时用作上部树脂层的反洗进水装置，树脂层上再增加一套再生液分配装置，就变成了分流再生设备。

174. 分流再生离子交换设备的工作过程是什么？

答：分流再生设备的运行作包括以下的过程：

(1) 树脂失效后，先对上部树脂层进行反洗。反洗水由中间排液装置进入，从交换器顶部排出。其流程与逆流再生设备的小反洗相同。下面的树脂层一般经过多个周期运行后再进行反洗。

(2) 再生。再生液分成两股，分别由上部和下部同时引入交换器。通过树脂层后，再生废液从中间排水装置排出。两部分再生液的比例不同，一般上部装填的树脂量比下面的少，因此上部的再生剂用量少于下面的。

(3) 置换。与进再生液的流程相同。

(4) 正洗和运行。与逆流再生设备的相同。

175. 分流再生工艺的特点是什么？

答：(1) 分流再生时，再生液分成流向相反的两部分，分别流过上、下两部分的树脂层。由上向下流动的那部分再生液相当于顶压介质，可以对下部树脂层起到顶压的作用，所以无需另外用水或空气顶压，也无需设置压脂层。交换器中所有的树脂都可以发挥交换作用，树脂的利用率比逆流再生工艺高。

(2) 尽管每周期需要对中排管以上部分的树脂进行反洗，但中排管以下的树脂层（出水区）仍保持着逆流再生的有利层态，所以可取得较好的再生效果。而且上部分的失效树脂主要为钙、镁型，反洗时其层态分布的改变对再生剂的耗量影响不大。

(3) 当用硫酸对阳床进行再生时，分流再生方式可以通过对上、下部树脂使用不同的酸浓度和流速，有效地防止硫酸钙沉淀在树脂层中析出。交换器上部的失效树脂主要是钙型，如果硫酸浓度过高或者流速过低，容易在床层中析出硫酸钙沉淀；为此通入交换器上部的硫酸可采用较低的浓度和较高的流速，可有效防止硫酸钙沉淀的析出。而通入交换器下部的硫酸则采用较高的浓度和较低的流速，以保证出水区的再生效果。

这种再生方式的缺点是再生系统复杂，需要设置两条独立的再生酸管道，在火电厂应用得不多。

第六节 强、弱型树脂联合应用设备

176. 双层床、双室双层床和双室浮床有什么差异？

答：双层床和双室床都属于强、弱型树脂联合应用的离子交换装置，是将强型和弱型两种离子交换树脂放在同一个交换器内的水处理设备。

双层床设备在强型和弱型树脂之间没有隔板分开，同处一室。装填弱酸型阳树脂和强酸型阳树脂的双层床称阳双层床，装填弱碱型阴树脂和强碱型阴树脂的双层床称阴双层床。

双室双层床则是将双层床的内部用隔板分为上、下两个室，分别装填两种不同的树脂，简称双室床。装填弱酸型阳树脂和强酸型阳树脂称阳双室床，装填弱碱型阴树脂和强碱型阴树脂的双室离子交换器称阴双室床。

双室浮床是双室床与浮动床的结合，与双室床的区别是：强型树脂在上，弱型树脂在下；运行时水的流向和再生时再生液的流向与双室床相反，与浮动床相同。

无论是双层床还是双室床，一般上层为弱型树脂，下层为强型树脂。

177. 双层床的运行特点是什么？

答：双层床是为了简化强弱树脂联合应用除盐系统而设计的一种床型，从离子交换原理来讲，它相当于一台顺流再生弱型床和一台逆流再生强型床的串联运行。

双层床式通常利用弱型树脂的密度比强型树脂小的特点，将弱型树脂装填在上层，强型树脂装填在下层。在运行制水时，水自上而下先通过弱型树脂层，后通过强型树脂层；而在再生时，再生液自下而上先通过强型树脂层，后通过弱型树脂层。所以，双层床离子交换器属于逆流再生设备，具备逆流再生工艺的特点。

双层床的特点：

(1) 双层床既发挥了弱型树脂工作交换容量高、再生比耗低的特点，又利用了强型树脂能确保出水质量的特点，对高含盐量水的脱盐处理具有独特的优势。

(2) 弱酸树脂层的工交高，失效树脂主要是钙型和镁型。当阳双层床再生时，废液中存在高浓度的钙离子。当用硫酸再生时，容易产生硫酸钙沉淀。为防止硫酸钙沉淀析出，必须采用分步再生。

(3) 阴双层床再生时，强碱树脂排出的废液中含有大量硅酸根。硅酸在浓度较高时可以聚合成胶体，也可以与钙离子、镁离子生成难溶的硅酸盐。为防止在此情况下，树脂层中产生硅胶团，应对再生碱进行加热（不超过 40℃），并采用先稀后浓、先高速后低速的再生方式，使硅酸缓慢排带，降低废液中硅酸浓度的峰值，并减少废液在交换床层的停留时间。一般碱液的浓度可以先用 1%，然后增加到 2% ~ 3%；再生流速可以先控制 5m/h，然后降低到 3m/h。

178. 双层床在运行中会出现哪些问题？如何解决？

答：(1) 双层床中的强、弱型树脂的比例是按照设计水质中某些离子的相对含量进行计算得出的。在设计水质运行时，其经济性是最好的。当原水水质变化时，强弱两种树脂的负担就会随之变化，一般会降低双层床的经济性，如周期制水量会降低，酸、碱比耗会增大等。如果进水水质发生了长期的、不可逆转的变化，需要对强弱树脂的比例作相应调整。

(2) 双层床中的弱、强两种树脂虽然因密度差能够通过反洗分层，但要做到完全分层是很困难的。两种树脂分层的好坏对双层床的运行有很大的影响，其原因是如果弱型树脂颗粒混入强型树脂层中，因水中反离子浓度很高而不能发挥交换作用；如果强型树脂混入弱型树脂层后，则因再生液浓度较低而得不到有效的再生。所以，如果强弱两种树脂再生后反洗分层不好，混层厚度大，会直接影响双层床的运行经济性 & 出水水质。

解决的方法是在配选树脂时，注意粒径的匹配，在允许的范围内，尽量选用大粒径的强型树脂和小粒径的弱型树脂。反洗时，注意流速的控制，使树脂层充分膨胀展开，有利于树脂分层。

179. 双室床的运行特点是什么？

答：为了解决双层床中强、弱两种树脂在再生时分层不好的问题，出现了双室床。双室床的结构可以认为是在双层床内增加了一块带水帽的隔板，将弱、强树脂隔开避免了混杂。强型树脂在下室，弱型树脂在上室，水可以上下流通。

在双室床中，下室中是装满树脂的（包括白球），这是因为强型树脂在失效后体积要缩小，因此再生时树脂层上面会出现水垫层，容易乱层。通过在下室中装填白球，抵消了树脂体积收缩对再生的影响。因为没有反洗空间，所以双室床需另设体外清洗装置。

上、下室的隔板上带有水帽，水帽的作用是沟通上、下室的水流，通常使用两端带有伞状分布缝隙的双头水帽。运行时应注意控制压差的变化，尤其是启动时注意水流提速不能过快，以免塑料水帽发生破裂，导致上下室树脂混合。在选用水帽时应注意质量的控制，必要时可使用不锈钢水帽。

双室床的运行和再生操作与双层床相同。

第七节 混合离子交换器

180. 混合离子交换器混床工作原理是什么？

答：混合离子交换器简称混床，它是将强型阳树脂和阴树脂按一定的比例混合后，装在同一交换器中，能够同时与水中的阳、阴离子进行离子交换反应的设备。常用在一级除盐系统或者反渗透设备之后，进一步除盐，使水的纯度能够达到高压以上等级锅炉补给水的水质标准。由于 EDI（电除盐）技术还不完善，混床目前还是火电厂锅炉补给水系统除盐系统中不可缺少的设备。

混床的工作原理是在运行前，先把阴树脂和阳树脂分别再生成 OH 型和 H 型，然后用压缩空气混合均匀，再运行制水。在制水运行时，混床中的阴、阳树脂颗粒互相接触，所以阴、阳离子交换反应几乎是同时进行的，阳离子交换所产生的氢离子和阴离子交换所产生的氢氧根离子不会积累起来，而是立即生成水，基本上消除了反离子的影响，所以混床内的离子交换反应能够彻底进行，出水可以达到很高的纯度。

混床失效后可采用体外再生法或体内再生法。

181. 混床的运行操作过程和注意事项有哪些？

答：混床失效后，需要再生。混床的一个完整运行周期由反洗分层、再生和置换、混脂、正洗和投运等过程组成。

（1）反洗分层。混床的反洗目的与阳床、阴床不同，主要是通过反洗，利用失效后阳阴树脂的密度差，使阳阴树脂分层，同时也可以清除碎树脂。其中，密度大的阳树脂在下面，密度小的阴树脂在上面，两种树脂的分界面刚好与中排装置的中心线重合。

反洗分层是影响再生效果的重要因素，树脂层应该充分膨胀展开；一般阳树脂的反洗膨胀率应达到 50% 以上，阴树脂层的反洗膨胀率应达到 70% 以上，这样经过 10 ~ 15min 的反洗，就可使阴、阳树脂分开。反洗结束后，应使树脂自由沉降，使阴、阳树脂明显分层。

反洗时要注意起始反洗流速不宜太大，以免树脂层形成活塞流，既不利于树脂展开，还有可能损坏中排、进碱装置等。一般待树脂层松动后，再逐步加大反洗流速，直至全部床层都膨胀、展开。尤其是采用程序控制的混床，因反洗流量无法改变，需要特别注意反洗时床层的形态。

（2）再生和置换。与无顶压逆流再生相似，进再生液前，先将混床内的水位降至阴树脂层表面上约 200mm 处。然后分别从混床的底部进酸、上部进碱，使酸碱分别通过阳树脂层、阴树脂层，废液汇集于中排后排出。

进完再生液后继续通水，进行置换。混床的置换必须彻底，否则残留酸中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 或碱中的 Na^+ 会使部分已再生好的阴树脂、阳树脂失效，影响再生效果。置换终点一般通过测定排水电导率判断（参考值：电导率 $< 10\mu\text{S}/\text{cm}$ ）。

(3) 混脂。混脂前，需要把交换器中的水面降到阴树脂层表面上 $100 \sim 150\text{mm}$ ，然后从设备下部通入经净化的压缩空气（进气压力为 $0.05 \sim 0.15\text{MPa}$ ），时间 $1 \sim 2\text{min}$ 。树脂层被搅匀后，快速排水，迫使树脂层迅速沉降，以免树脂重新分层。

(4) 正洗。正洗的过程与其他床型相同，当出水合格（电导率小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ ，二氧化硅小于 $20\mu\text{g}/\text{L}$ ）后，正洗结束。

(5) 运行。混床的运行流速较高，一般为 $40 \sim 60\text{m}/\text{h}$ 。运行周期较长，有时甚至达到一个月以上。运行终点为电导率达到 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)，二氧化硅 $20\mu\text{g}/\text{L}$ 。有时混床运行周期太长，为了避免床层过分压实、树脂结块，需要提前再生，这需要根据具体的情况来判断。

182. 混床的结构对出水水质有何影响？

答：影响体内再生混床出水水质关键的因素是再生，而再生的关键有两点：①两种树脂应彻底分离；②阳阴树脂的分界面与中排装置的中心线偏差不能太大。

再生时容易发生的问题是：

(1) 阳、阴树脂的分层不彻底。阳、阴树脂分层的好坏是混床再生操作的关键。反洗和沉降是分层的两个重要步骤。分层不好的原因一般有反洗水流量不足、反洗时间过短、树脂结块等。也有阳阴树脂粒径选配不好，造成分层困难。对于新树脂，容易发生树脂结块的问题，此时可向树脂层中通入 5% 左右的氢氧化钠溶液，浸泡 10min 左右，再用水彻底反洗，即可顺利分层。

除操作的原因外，阳阴树脂的粒度选择不合理，树脂颗粒在使用中发生破碎，或者树脂因污染密度发生变化等也会造成分层不彻底。

(2) 在阳阴树脂的分界面处存在一定厚度的混合层，当酸碱废液汇聚于中排时，因阳阴树脂的混杂，会使部分树脂转化为失效的形态（阴树脂转为 Cl 型或 SO_4 型；阳树脂转为 Na 型）。失效树脂的数量越多，混床再生的效果越差，运行时出水水质也越差。失效树脂的数量除了与混合层的厚度有关外，还和阳阴树脂的分界面的位置有关；如果分界面与中排装置的中心线不重合，偏差太大，会造成阳树脂与碱接触，或阴树脂与酸接触，从而增加了失效树脂的量。

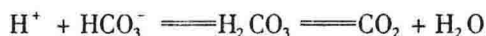
(3) 阳、阴树脂混合不均匀。若阳、阴树脂混合不均匀，混床在投运后出水水质就差，正洗时间很长甚至再生失败。要保证混脂效果，除了保证合适的混脂时间、空气的强度外，还要注意混脂后应快速排水。但混脂时间过长会增大树脂的磨损，混脂空气压力过大会损坏水帽等。

(4) 阳树脂和阴树脂装填的数量不匹配，这是造成两种树脂的树脂界面与中排位置不重合的重要原因之一。另外，即使新装树脂的比例正确，但在运行过程中也会因树脂的损失而使树脂分界面偏离中排，因此需要根据损耗情况定期补充新树脂。

第八节 除 碳 器

183. 除 CO_2 的原理是什么？除碳器有哪几种形式？

答：水中的碳酸、二氧化碳有以下的平衡关系：



由上式可知，水中 H^+ 浓度越大，平衡越易向右移动。经 H^+ 交换后的水呈酸性，因此水中碳酸化合物几乎全部以游离 CO_2 形式存在。

CO_2 气体在水中的溶解度服从于亨利定律，即在一定温度下气体在溶液中的溶解度与液面上该气体的分压成正比。所以，只要降低气相中 CO_2 的分压，溶解于水中的游离 CO_2 便会从水中逸出，从而将水中游离 CO_2 除去。除碳器就是根据这一原理设计的。

根据降低气体分压的办法不同，常用的除碳器有两种形式：一种是鼓风式，在除碳器中鼓入空气；另一种是真空式除碳，将除碳器抽真空。

184. 鼓风式除碳器的工作过程是什么？

答：电厂补给水处理系统常用鼓风式除碳器。水从除碳器上部通过布水装置喷淋到的填料层上，在填料层上喷淋下来的酸性水被分割成滴状、线状或膜状，增大了空气与水的接触面积。与此同时，从除碳器底部鼓入的空气流经填料层，与水对流接触后，从顶部排出。由于鼓入的空气中的 CO_2 分压很小（约为 0.03%），所以在对流的过程中，水中的 CO_2 便会从水中逸出进入空气，并被空气流带出。除碳后的水流入除碳器底部的中间水箱。

在正常情况下，阳床出水通过除碳器后，可将水中的 CO_2 含量降至 5mg/L 以下。

185. 影响除 CO_2 的因素是什么？

答：当处理水量、原水中碳酸化合物含量和出水中 CO_2 要求一定时，影响除碳效果的因素有：

(1) 水温。除 CO_2 效果与水温有关，水温越高， CO_2 在水中溶解度越小。所以， CO_2 的残留量就减少。表 3-13 为不同温度下水中残留的 CO_2 含量。

表 3-13 水中残留的二氧化碳与水温的关系

水温 (°C)	10	20	30	40	50
水中残留的 CO_2 含量 (mg/L)	14.5	7.7	3.5	1.5	0

(2) 水和空气的流动工况和接触面积。水和空气的逆向流动以及比表面积大的填料能有效地将水分散成线状、膜状或水滴状，从而增大了水和空气的接触面积，也缩短了 CO_2 从水中析出的路程并降低了阻力。

(3) 喷淋密度。维持合理的喷淋密度，是保证除碳效果的重要条件。喷淋密度过大，会造成气、液接触时间短、接触面积小而影响 CO_2 的析出。喷淋密度过小，可能会产生严重的偏流，使气体产生短路而影响 CO_2 的去除效果。

(4) 气水比和填料。风机的风量和风压是根据处理水量、填料类型等因素决定的。通常，当用 $\phi 25 \times 25\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的瓷环作填料、在淋水密度为 $60\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时，每处理 1m^3 水需空气量为 $30 \sim 50\text{m}^3$ 。当气水比（风水比）低于上述数值时，就有可能影响除碳的效果。

(5) 气路短路。鼓风式除碳器有时会发生鼓入的空气从底部的出水管排出，从而造成气短路。一般将除碳器底部的出水短管延长至中间水箱水面以下，或者将出水管加工成 U 形以形成水封，就可能解决此问题。

第九节 树脂的污染

186. 阳树脂被铁污染后如何复苏?

答: 阳树脂的铁污染是比较常见的现象。铁一般来自水中的腐蚀产物、地下水中携带的铁离子等。树脂被铁污染后, 常见的现象是树脂颗粒发黑、工交降低。

由于 Fe^{3+} 与阳树脂的结合能力大于 H^+ , 所以正常的再生程序对铁的洗脱率很低, 由此造成了铁在阳树脂中的积累。当铁污染比较严重时, 要复对阳树脂进行复苏处理。复苏处理有两个要点:

(1) 使用高浓度的盐酸, 进行循环处理。盐酸的浓度大约为 10%。

(2) 必要时, 对复苏酸液进行加热, 温度最好能到 40°C 左右, 可以大大提高复苏的效率。

187. 阴树脂被有机物污染后的特征有哪些?

答: 有机物对树脂的污染主要发生在强碱阴树脂上, 至于发生的机理一般认为是疏水性的树脂骨架强烈的吸附疏水性的有机分子所致。对于弱碱树脂, 尽管也吸附有机分子, 但再生时有机物的洗脱率较高, 因此, 不存在严重的有机物污染, 反而有时在强碱阴床前设置弱碱离子交换器, 利用弱碱树脂来去除水中的有机分子, 保护强碱阴树脂不受污染。强碱阴树脂被有机物污染后, 有以下的现象:

(1) 阴树脂的颜色变深, 由浅黄色变为深棕色、褐色甚至黑色。

(2) 工作交换容量降低, 阴床的周期制水量明显下降。

(3) 即使完全再生, 阴床或混床出水的电导率仍然比较高。

(4) 出水中 SiO_2 的含量增加, 因为树脂上附着的有机物分子干扰 HSiO_3^- 的离子交换反应。

(5) 再生后正洗水量增加。

(6) 出水的 pH 值可能降低。正常运行时, 阴床出水的 pH 值一般为 7~8, 树脂被有机物污染后, pH 值可能会降低, 严重时会低于 6。

需要说明的是, 上述特征也有可能是其他原因造成的, 因此, 是否是有机物污染, 需要根据进水的水质条件综合分析判断。

188. 被有机物污染的树脂如何进行复苏处理?

答: 有机物会对离子交换阴树脂造成污染, 这是许多采用地表水的火电厂经常遇到的问题。尤其是在东北地区的许多电厂, 阴树脂被有机物污染, 引起除盐水电导率高、周期制水量下降等诸多问题。

有机物污染阴树脂的机理一般认为是有机分子吸附到树脂骨架中的微孔内, 阻碍了正常的离子交换反应所致。根据这一理论, 树脂的复苏处理采用了氯化钠加氢氧化钠处理的方法: 利用阴树脂在氯型和氢氧型两种形态下的体积膨胀率不同, 通入氯化钠与氢氧化钠的混合溶液, 使得树脂不断处于氯型→氢氧型→氯型的转型之中, 相应的微孔不断处于收缩→扩大→收缩的循环之中, 将微孔中的有机分子释放出来, 从而达到复苏的目的。

189. 除盐水的水质污染有哪些特点?

答: 二级除盐水由于纯度很高, 缓冲性很差, 在贮存过程中, 容易受到接触的空气、管

道等的污染。其中，空气中的 CO_2 对水质的污染最为迅速。被 CO_2 污染后，最主要的现象是电导率升高，pH 值降低。一般电导率可以由小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ 升高至 $0.3\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上，甚至可以大于 $1\mu\text{S}/\text{cm}$ ；pH 值由 6~7 左右降低至 6 以下。近年来火电厂配备的除盐水箱越来越大，除盐水的贮存时间有时大于 24h，水质的污染更为严重。

为了防止 CO_2 对除盐水的污染，在除盐水箱中，有多种与大气隔离的装置。目前常见的有浮顶、密封球、密封膜、碱性呼吸器等装置。其中，浮顶密封装置应用得比较早，但使用过程中容易发生卡塞等故障；密封球能够随水面自由起伏，不会发生故障，但密封效果不如浮顶式的；在除盐水箱低水位或排空时，会发生浮球逸漏。密封膜和碱性 CO_2 呼吸器的密封效果比密封球好，结构较为简单，目前正在推广应用之中。

第四章 反 渗 透

第一节 基本概念

190. 什么是半透膜？什么是渗透？什么是渗透压？什么是反渗透？

答：(1) 半透膜。有许多天然或人造的薄膜对于物质的透过有选择性。例如血球的膜允许 Na^+ 透过，但不允许 K^+ 透过；铁氰化铜的膜允许水透过，但不允许水中的糖透过。这种对于物质的透过有选择性的膜称为半透膜。

(2) 渗透。当纯水与含有盐分的水（盐水）用半透膜隔开，膜两侧的水分子都会穿过膜渗透到另一侧。但纯水侧向盐水侧的渗透量较大，所以实际的效果是纯水侧的水分子不断向盐水侧渗透，并使盐水侧的水位逐渐升高，这个过程称为渗透。

(3) 渗透压。随着盐水侧的水位逐渐升高，水分子的渗透量也逐渐减小；当盐水侧的水位升高一定值后，渗透停止（实质上是两侧的渗透达到了平衡），此时盐水侧因水位升高增加的压力就是渗透压。

实质上，渗透压是溶液的一种热力学性质（依数性），其根本原因是水中含有杂质时，与纯水相比，水的蒸汽分压要降低，从而引起了水的沸点升高、凝固点下降和产生渗透压力。

(4) 反渗透。反渗透实质是渗透的逆过程。当在盐水侧施加大于渗透压的压力后，水分子的渗透平衡将改变：水分子由盐水侧向纯水侧渗透量加大，实际效果是盐水侧的水分子向纯水侧渗透。这个过程就是反渗透。

191. 什么是反渗透膜？其除盐原理是什么？

答：反渗透膜是用高分子材料制成的、具有选择性半透性质的薄膜。用于水处理的反渗透膜可以允许水分子透过膜，但水中所含的离子、有机物分子等不能透过。

反渗透的除盐原理是水在外加压力的作用下，水分子克服反渗透膜两侧的渗透压，透过膜到达膜的另一侧（称为淡水侧）；而水中的盐分、有机物分子等杂质则被膜拦截住，留在膜上，从而达到水质净化的目的。

192. 火电厂用于水处理的反渗透膜有哪些类型？各有什么特点？

答：按照处理水的类型不同，反渗透膜分为苦咸水膜和海水膜两大类。苦咸水膜并不是只适用于苦咸水的处理，对于中等含盐量的天然水，也使用苦咸水膜。近年来，随着反渗透应用范围的不断扩大，也出现了针对低含盐量水的低压反渗透膜。

按照材料来分，用于水处理的反渗透膜主要有两种类型：一种是醋酸纤维膜，另一种是用聚酰胺类材料制成的复合膜。醋酸纤维膜是最早在水处理领域使用的反渗透膜，在反渗透除盐的发展历史中，占有重要的位置，但近年来已经被复合膜所取代。复合膜的特征是用两种以上膜材料复合而成，是一种非对称膜。它的制法是将极薄的、有除盐作用的皮层均匀地涂刮在一种预先制好的微细多孔支撑层上。

醋酸纤维膜和复合膜的性质有以下的不同：