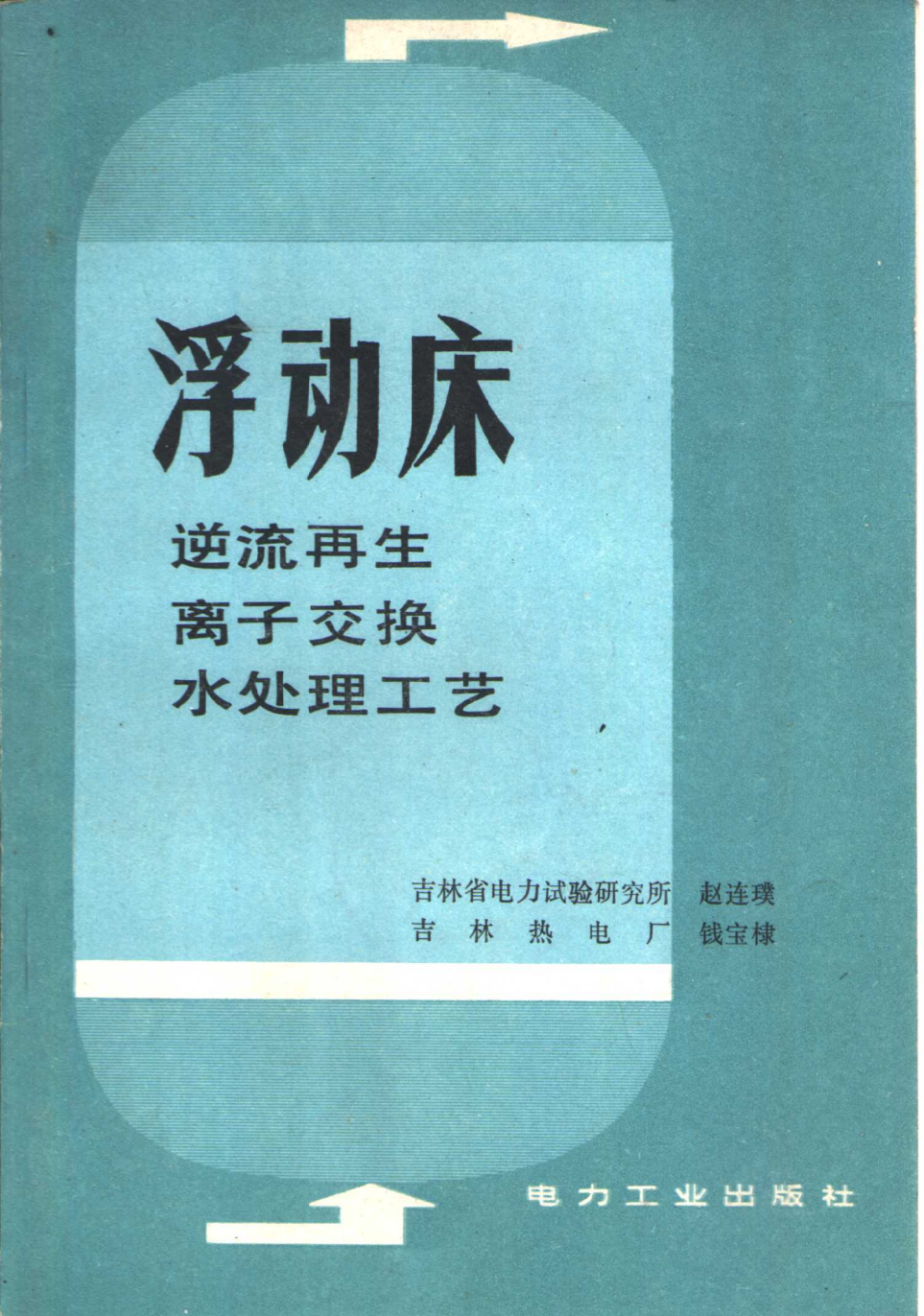




浮动床

逆流再生
离子交换
水处理工艺

吉林省电力试验研究所 赵连璞
吉 林 热 电 厂 钱宝棣

电力工业出版社

浮 动 床

逆流再生离子交换水处理工艺

吉林省电力试验研究所 赵连璞

吉 林 热 电 厂 钱宝楮

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书主要阐述浮动床离子交换水处理的工作原理、运行特性、设备结构、运行参数和操作方法，以及浮动床再生和运行工况的调整试验等。

本书可供从事水处理工作的科研、设计、运行的科技人员和大中专院校有关专业师生参考使用，也可作为化学水处理专业工人的培训教材。

浮 动 床

逆流再生离子交换水处理工艺

吉林省电力试验研究所赵连璞

吉林热电厂钱宝棣

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 2.625印张 57千字

1981年6月第一版 1981年6月北京第一次印刷

印数 0001—5000 册 定价 0.30 元

书号 15036·4212

前 言

离子交换法是水处理的主要方法之一。

离子交换法水处理具有出水质量好、生产成本低等一系列优点，在电力、铁道、化工、建筑、纺织、食品等工业部门和科研等单位都得到了广泛应用。

离子交换水处理设备的工艺种类繁多，在工业上用得最广泛的有固定床顺流再生工艺、逆流再生工艺和移动床工艺三种，其它的一些工艺可以看成是这三种工艺的派生产物。实践证明，离子交换水处理的工艺，对出水质量和运行经济性有很大影响。

在上述三种离子交换水处理设备工艺中，固定床顺流再生工艺的使用历史最长。它是一种运行时水流方向和再生时再生液流动方向相同的水处理工艺。它的优点是设备结构简单，操作方便等；缺点是出水质量较差，再生剂比耗较高，废液排放量较多，运行流速较低，离子交换树脂用量较多等。尽管它有这些缺点，但仍然是目前广泛应用的水处理工艺之一。

逆流再生工艺是运行时水流方向和再生时再生液流动方向相对进行的水处理工艺。逆流再生工艺根据工作方式的不同，又分为固定床逆流再生工艺和浮动床水处理工艺两种。

固定床逆流再生工艺，是在运行时水流自上向下流动，习惯上称为向下流或正流运行；在再生时再生液自下向上流动，习惯上称为向上流或逆流再生。由于在向上流再生时，

会引起树脂床的乱层现象，故于再生时，要在树脂层的上部用压缩空气或带压水顶压，所以这种工艺又称为反压法逆流再生工艺。这种工艺的优点是出水质量好，再生剂比耗低，废液排放量少等；缺点是运行流速低，树脂用量多，操作较为复杂等。

浮动床水处理工艺，除了有固定床顺流再生和反压法固定床逆流再生工艺的优点外，还有运行流速大，阻力损失小，操作方便，设备投资少等优点，但也还有树脂用量多，树脂体外清洗较为复杂等缺点。已经投入运行的浮动床，按其离子交换反应的种类来分，有氢型、羟基型、钠型等几种；按其工作方式来分，有运行式浮动床和再生式浮动床两种。浮动床的设备直径有0.2、0.5、1.0、1.5、1.8、2.0、2.5、3.0、3.5米等几种。

目前，浮动床水处理工艺在我国发展得很快，不仅新设计的离子交换水处理设备中，采用浮动床水处理工艺的比例很大，而一些老的生产厂也正在将顺流再生水处理设备改为浮动床设备。双室浮动床现已试制出来，处于试运阶段。估计将来浮动床水处理工艺将会用得更为广泛。

移动床是一种连续式的水处理工艺，它具有出力大、树脂用量少等优点，但目前还有对入口水质变化或者负荷变化的适应性差、出水质量不够稳定、再生剂比耗大等缺点。因这种水处理工艺问世较晚，还需要逐步加以完善。这种水处理工艺对大出力连续供水的水处理系统是一种有前途的工艺。

以上是这三种离子交换水处理设备工艺的大致情况，由于他们各有优缺点，所以使用单位要根据具体条件灵活地加以选用。

为了介绍浮动床水处理工艺，我们编写了这本小册子，供从事水处理工作的科研、设计和运行的工程技术人员以及大、中专院校的有关专业师生参考使用；此外也可作为培训从事水处理工作工人的教材。在编写过程中，得到了许多单位的支持和不少同志的帮助，特别是张行赫和陈寿南等同志对本稿进行了审阅，提出不少宝贵意见，在此表示衷心感谢。限于我们的水平，书中谬误之处在所难免，请读者批评指正。

作 者

1980年12月

目 录

前 言

第一章 工 作 原 理	1
第一节 工作过程	1
第二节 工作机理	4
第三节 工作特性	14
第二章 设 备 结 构	16
第一节 本体设备	16
第二节 附属设备	29
第三章 操 作 方 法	33
第一节 运行操作	33
第二节 床层的体外清洗	39
第四章 调 整 试 验	43
第一节 钠离子浮动床调整试验	44
第二节 强酸性氢离子浮动床调整试验	48
第三节 强碱性氢氧离子浮动床调整试验	54
第四节 床层的浮动试验	64
第五章 浮动床运行周期终点的对比试验及其测试方法	69

第一章 工 作 原 理

离子交换设备的种类很多，在工业生产中，一般按离子交换器内离子交换树脂层（简称床或床层）的工况进行分类。交换器在工作时，床层固定不变的，称为固定床；床层处于密实浮动状态的，称为浮动床；床层处于密实的浮动状态，并定期将部分树脂移到交换器外部进行再生的，称为移动床。因此，可以将浮动床看作移动床的体内再生设备，但它又有别于移动床，它具有独特的工作过程、工作机理和运行特性。

第一节 工 作 过 程

浮动床的工作过程，是床层的运行和再生两种工况交替循环的过程。浮动床由于床层工况的不同，可分为两种型式：在运行状态时，床层处于密实浮动状态的，称为运行式浮动床；在再生状态时，床层处于密实浮动状态的，称为再生式浮动床。这两种浮动床的工作原理一样，设备结构也几乎相同。它们的结构是由离子交换器、床层、上下部分配装置和一些附属设备组成。运行式浮动床工作示意，见图1。这两种浮动床的工作过程和应用范围是各不相同的，现在分别叙述如下。

一、运行式浮动床

在运行状态时，入口水由交换器底部进入浮动床，经下部分配装置配匀后，进入床层，利用水流的动能，使树脂以

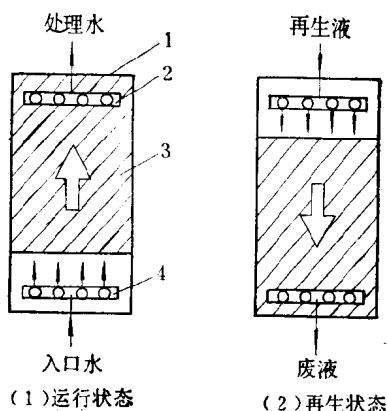


图 1 运行式浮动床工作示意

1—离子交换器；2—上部分配装置；3—床层；4—下部分配装置

密实的状态向上浮动（称为成床），水流自下向上流过床层时，完成离子交换反应，处理好的水经上部分配装置引到体外。当床层失效后停床，利用出口水的反压或者床层的重力使床层下落（称为落床），于是浮动床由运行状态转入停运状态。

在再生状态时，再生液由交换器上部进入浮动床，经上部分配装置配匀后，由上向下流过床层时完成再生反应，再生废液由底部排出；然后，用合格的水经向下流和向上流清洗，直至出水质量合格后，便可再投入运行。

二、再生式浮动床

在再生状态时，再生液由交换器底部进入浮动床，经下部分配装置配匀后，进入床层，利用再生液的动能（或先以水的动能），使树脂以密实的状态向上浮动（成床），再生液自下向上流过床层时，完成再生反应，再生废液经上部分

配装置引至体外；经向上流清洗后，利用入口水的压力或者床层的重力使床层落床，再经向下流清洗，至水质合格后，浮动床由再生状态转入运行状态。

在运行状态时，入口水由上部进入浮动床，经上部分配装置配匀后，由上向下流过浮动床时完成离子交换反应，处理水经下部分配装置引出，运行至失效后停床，处于停用或转入再生状态。再生式浮动床工作示意图 2。

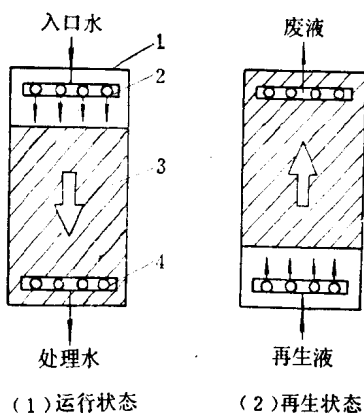


图 2 再生式浮动床工艺示意

1—离子交换器；2—上部分配装置；3—床层；4—下部分配装置

运行式浮动床的工作过程，可以概括为水向上流运行，再生液向下流再生；再生式浮动床的工作过程，则可概括为水向下流运行，再生液向上流再生。由于这两种浮动床工作过程的不同，因此，它们的工作特性和使用范围也有所区别。

再生式浮动床的工作特性：第一，由于它是一种逆流再生设备，因此有出水质量好、再生剂单耗低的优点；第二，

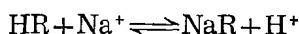
在运行状态时，它和顺流再生固定床工况相同，因此可以多次间断运行；第三，再生时，不需要用压缩空气或压力水顶压，操作比较方便；第四，在再生时，由于再生液需要比较大的上升流速才能将床层托起成床，所以，一般在再生流速比较高时（如用硫酸再生的阳离子交换），采用这种型式的浮动床。

运行式浮动床是目前应用最广的一种工艺，本书将着重介绍（以后凡运行式浮动床均简称为浮动床），而再生式浮动床由于目前应用得不广，本书不作详细介绍。

第二节 工 作 机 理

一、离子交换反应的可逆性

离子交换反应是一种可逆反应，例如氢型阳离子交换树脂与水中的钠离子进行交换反应，或者用酸进行再生时，其反应见下式：



式中 HR——氢型离子交换树脂；

Na⁺——水中的钠离子；

R——离子交换树脂的母体；

NaR——钠型离子交换树脂；

H⁺——水中的氢离子。

在运行状态时，应尽量使上述平衡向右移动，以获得较好的出水质量；在再生状态时，应尽量使平衡向左移动，使树脂得到较高的再生度。因此，离子交换水处理技术，实际上是在安全经济的前提下，控制离子交换反应平衡的技术。

二、影响离子交换反应的因素

在氢离子浮动床工作时，Na⁺和HR的离子交换反应见

下式:



反应的平衡常数 K 为:

$$K = \frac{[\text{NaR}][\text{H}^+]}{[\text{HR}][\text{Na}^+]} \quad (1)$$

设溶液中一价阳离子的总量为 S , 则:

$$S = [\text{H}^+] + [\text{Na}^+] \quad (2)$$

式中 $[\text{Na}^+]$ ——出口水中 Na^+ 的浓度, 也就是浮动床的漏钠量;

$[\text{H}^+]$ ——出口水中 H^+ 的浓度。

又设树脂中一价阳离子总量为 C , 则:

$$C = [\text{HR}] + [\text{NaR}] \quad (3)$$

离子交换树脂中含 HR 的总量除以 C , 称为再生度, 以 T 表示, 则:

$$T = \frac{[\text{HR}]}{C}$$

$$\therefore [\text{HR}] = T \cdot C \quad (4)$$

离子交换树脂中含 NaR 的总量除以 C , 称为饱和度, 其值等于 $(1 - T)$ 。

$$\therefore [\text{NaR}] = C(1 - T) \quad (5)$$

式 (2) 代入式 (1) 中

$$[\text{Na}^+][\text{HR}]K = [\text{NaR}](S - [\text{Na}^+]) = [\text{NaR}]S - [\text{NaR}][\text{Na}^+]$$

$$[\text{Na}^+][\text{HR}]K + [\text{NaR}][\text{Na}^+] = [\text{NaR}]S$$

$$[\text{Na}^+]\{[\text{HR}]K + [\text{NaR}]\} = [\text{NaR}]S$$

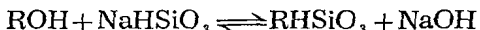
$$[\text{Na}^+] = \frac{S}{\frac{[\text{HR}]K + [\text{NaR}]}{[\text{NaR}]}} = \frac{S}{\frac{[\text{HR}]K}{[\text{NaR}] + 1}} \quad (6)$$

将(4)和(5)代入(6)

$$[\text{Na}^+] = \frac{S}{\frac{T \cdot C \cdot K}{C(1-T)} + 1} = \frac{S}{\frac{T \cdot K}{1-T} + 1} \quad (7)$$

从式(7)可以相对地说明氢离子浮动床在工作时,漏钠量和入口水中阳离子的总浓度与树脂的再生度等因素有关。漏钠量与入口水中总阳离子浓度(S 值)成正比,当 S 值大时漏钠量也大; S 值小时,漏钠量就小。当树脂的再生度低时,漏钠量大;反之当树脂的再生度高时,漏钠量小,当再生度接近1时,漏钠量可以降到相当低的水平。

在一级化学除盐系统中,氢氧型阴离子交换器的入口水为氢离子交换器的出口水,氢氧型离子交换树脂和 HSiO_3^- 等的离子交换反应产物是 H_2O ,由于 H_2O 的解离系数很小,因此,从理论上讲,阴离子交换器工作时,几乎不存在 HSiO_3^- 的漏泄问题。但是,由于氢离子交换器工作时,总是有微量的钠离子漏泄到水中,故当此钠离子进入氢氧型阴离子交换器时, Na^+ 、 HSiO_3^- 与氢氧型阴离子交换树脂起下述反应:



反应产生的 OH^- 使平衡向左移动,增加出水中的 HSiO_3^- 含量。提高阴离子树脂的再生度,减少氢离子交换器的漏钠量;有利于平衡向右移动,从而减少阴离子交换器的漏硅量。运行经验表明,保护层树脂的再生度很高,故入口水质量对处理水质量的影响很小。这种现象是浮动床、固定床等逆流再生水处理工艺所共有的特点。

三、水中常见离子在树脂中的分层现象

离子交换器在工作时,由于水和床层的接触有先有后,因此,它和床层不同高度处的反应也不同,因此出现了分层

现象。为了便于说明问题，先假设在水中阳离子仅有钠离子时，它与氢型离子交换树脂反应时的工况。

当含有钠离子水由浮动床底部进入树脂层后，钠离子先与下层的树脂进行反应，生成钠型树脂和氢离子，使下层树脂失效。再继续通水时，交换反应进入上一层的床层中进行。这样，床层便大致分为三层（如图3所示）：下部为失效层（NaR），水流通过失效层时，不起离子交换反应；中部为工作层（NaR和HR的混合层），水流在这一层中进行离子交换反应，直至达到平衡；上部则为尚未参加离子交换反应的原型层（HR）。这说明浮动床的工作过程是工作层从下向上不断移动的过程。当工作层处于床层的中下部时，由于离子交换反应比较完全，出水质量是好的。当工作层上表面（或最早穿过点）和床层的上表面重合时，如再继续通水，则由于离子交换反应不完全，出水含钠离子量急剧增加，即到达浮动床的失效点。因此，浮动床最上部的这一层树脂，其工作交换容量不能充分利用，这层树脂主要起保护出水质量的作用，故称为保护层树脂。当交换器失效停床后，用酸进行再生。再生过程和运行过程相反，它的工作层是自上向下移动的，反应产物和废液随清洗水排到体外。

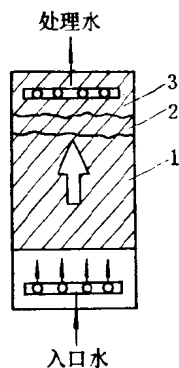
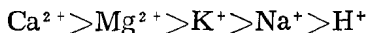


图3 浮动床工作时床层的分布情况
1—失效层(NaR),
2—工作层(NaR + HR),
3—原型层(HR)

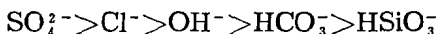
在工业生产中，水源中含有许多种离子。树脂对各种离子的吸着能力是不同的，有些离子容易被树脂吸着，但将其置换下来则比较困难；有些离子不容易

被树脂吸着，但将其置换下来则比较容易，这种性能称为离子交换的选择性。

在含盐量不高的水溶液中，强酸性阳离子交换树脂，对几种常见离子的选择性次序为：



强碱性阴离子交换树脂对几种常见离子的选择性次序为：



由于离子交换反应的这种选择性，使树脂吸着的各种离子在床层中出现分层现象。当用强酸性氢离子浮动床处理含有钙、镁、钠三种阳离子的水时，根据树脂吸着这三种离子能力的大小不同，在床层中自下向上依次分为 Ca^{2+} 层、 Mg^{2+} 层、 Na^{+} 层和 H^{+} 层。吸着能力大的在下部，吸着能力小的在上部，最上层为未失效的 H^{+} 层（见图4）。当用强碱性阴离

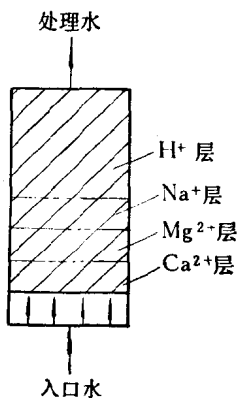


图4 强酸性氢离子浮动床工作时，离子的分层情况示意

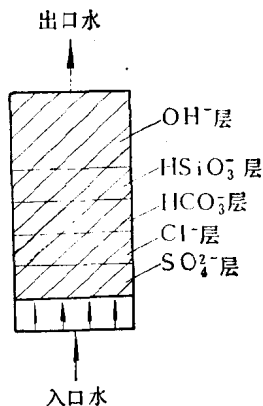


图5 氢氧型阴离子浮动床工作时离子的分层情况示意

子浮动床处理含有 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 和 HSiO_3^- 四种阴离子的水时，根据树脂对这几种离子吸着能力的大小，在床层中自下向上依次分为 SO_4^{2-} 层、 Cl^- 层、 HCO_3^- 层、 HSiO_3^- 层和 OH^- 层。吸着能力大的在下部，吸着能力小的在上部，最上部为未失效的 OH^- 层（见图5）。

浮动床在运行过程中，各型树脂层在不断地扩展，它们之间的高度比例，大致和入口水中所含各种离子的浓度比例相符。图4和图5所给出的分层是理想的分层情况，实际上由于水流或者再生液的分配不匀、树脂粒度不匀以及壁效应等许多原因，会使树脂层的分布不这样整齐，甚至当有些离子被树脂吸着能力差别小时，会出现混层现象，但大体上符合图4和图5所示的分层规律。

如上所述，离子交换反应的可逆性和选择性，以及离子交换器工作时各种离子的分层规律，是浮动床离子交换法水处理过程的一些基本规律，充分利用这些规律，设计出合乎客观规律的水处理设备，可以获得优质低耗的效果。

四、顺流再生工况的分析

固定床顺流再生工艺是运行和再生都是向下流的水处理工艺。以强酸性氢离子固定床为例，当它运行到周期终点时，床层中各种离子的分布如图6（1）所示。在反洗后，床层中各种离子的分布要乱一些，但在上层树脂中，相对来说 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 型的树脂多一些，在下层中 Na^+ 、 H^+ 型的树脂多一些。在向下流再生时，新鲜的再生液首先与上部树脂反应，因此这部分树脂再生度就比较高；当再生液进入下部树脂时，由于再生液被上层树脂中置换出来的反离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 所污染，以及再生液浓度下降等原因，影响了再生效果。因此，愈往下部树脂的再生度愈低，床层中残留了部分 Ca^{2+} 、

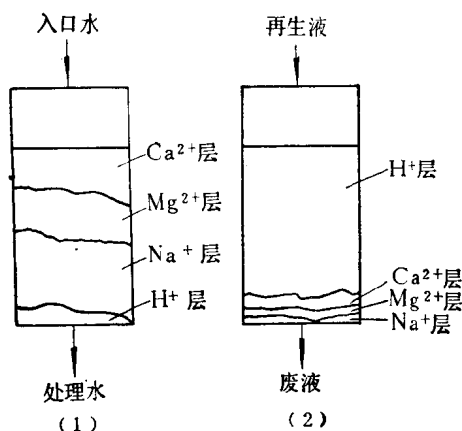


图 6 强酸氢离子固定床顺流再生工艺
各种离子层的分布情况
(1)运行终点时;(2)再生完毕时

Mg^{2+} 和 Na^{+} 等离子见图 6 (2), 对运行时的出水质量有影响。为了提高下层树脂的再生度, 只好提高再生剂的用量, 这就增加了再生剂的比耗, 降低了运行的经济性, 这种情况已为大量的实践所证明。试验表明, 在固定床的再生过程中, 被置换出来的各种离子之间还存在着置换反应。在氢离子固定床顺流再生时, 再生液首先置换出位于上部钙型树脂层中的 Ca^{2+} , 再生液继续往下流时, Ca^{2+} 再置换出镁型树脂层中的 Mg^{2+} , Mg^{2+} 又置换出钠型树脂层中的 Na^{+} , Na^{+} 又置换出氢型树脂层中的 H^{+} 。因此, 在再生流出液中, 首先出现 H^{+} , 然后相继出现 Na^{+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等离子, 最后出现的是过剩量酸中的 H^{+} 。在再生过程中这几种离子漏入废液中的次序和运行时树脂吸着离子的选择性次序恰好相反。说明阳离子固定床顺流再生的离子交换反应, 受 H^{+} 和 CaR_2 之间