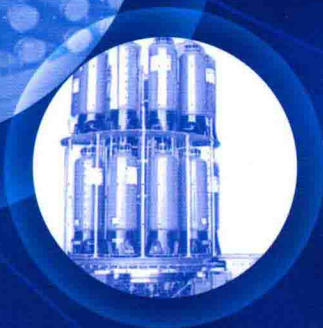


Multi-port Rotation Valve Continuous Countercurrent
Ion Exchange & Chromatographic Separation System

多槽口旋转阀连续逆流离子交换 和色谱分离系统

郝彤 编著



化学工业出版社

Multi-port Rotation Valve Continuous Countercurrent
Ion Exchange & Chromatographic Separation System

多槽口旋转阀连续逆流离子交换 和色谱分离系统

郝 彤 编著 <<<



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了近三十年来开发成功并获得广泛应用的多槽口旋转阀式连续逆流离子交换和色谱分离系统。书中结合作者多年来从事这一领域的技术开发和研究,广泛参考国内外相关研究成果,详细介绍了该系统的基本原理、技术特点、机械结构及在生物化工、制药、食品添加剂生产、水处理、湿法冶金、无机化工和石油化工中的应用,并且对其在我国的实际应用提出了有针对性的评述和建议。

本书适用于有机化学和无机化学、精细化工和石油化工(包括发酵、医药、淀粉糖、水处理、湿法冶金)等领域的研究开发人员、生产技术人员、行业管理人员及大专院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

多槽口旋转阀连续逆流离子交换和色谱分离系统/
郝彤编著. —北京:化学工业出版社, 2017.1
ISBN 978-7-122-28476-1

I. ①多… II. ①郝… III. ①离子交换技术-研究
IV. ①TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 268947 号

责任编辑:傅聪智
责任校对:边涛

文字编辑:王琪
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张17¼ 字数326千字 2017年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 80.00 元

版权所有 违者必究

前言

20 世纪 80 年代美国 AST 公司研制和开发了一种新型离子交换和色谱分离系统——多槽口旋转阀连续逆流离子交换和色谱分离系统 (ISEP 系统)。该系统由一个多槽口分配阀和机械转盘两大部分构成, 将传统固定床分为 20~30 个小树脂柱, 由转盘带动树脂柱旋转, 通过分配阀使液流和树脂柱形成逆向接触流动, 从而将传统的固定床转化为连续操作, 提高了树脂的利用率, 使分离效率大大提高。ISEP 在实践应用过程中, 先后经过两次重大革新。第一次改进是芬兰 Outotec 公司研发的 SepTor 系统。它将旋转阀和转盘连为一体, 使原来的两套机械和控制系统改为一套, 简化了设备 (称为第二代系统)。第三代系统是由美国 IXsep 公司和比利时 Puritech 公司相继独自开发的, 工业上称为 RDA 和 Ionex 系统, 第三代 RDA/Ionex 系统取消了带动树脂柱一起旋转的庞大的转盘系统, 实现了树脂柱的固定安装, 使设备结构进一步简化, 设备安装、维修和控制更加方便。目前全球已有数百套装置广泛应用于多种工业生产领域。三代系统 (ISEP、SepTor、RDA 和 Ionex) 的工艺技术原理是相同的, 通称为 CCIX 系统。

1995 年, 我国泉州大泉赖氨酸厂引进了第一套 ISEP 设备, 之后二十多年来迅速扩展到其他应用领域。目前三代设备在国内均有应用, 已有百余套装置在国内的生化、医药、发酵、淀粉糖、水处理以及其他化工领域中发挥着作用。随着第三代系统的出现, 多槽口旋转阀连续逆流离子交换和色谱分离系统定会引起业界新的兴趣和关注。

笔者在美国沃斯特理工学院 (WPI) 化学工程系学习期间即涉及过这一课题, 从参与我国引进第一套 ISEP 设备开始, 一直跟踪这一技术的发展, 在担任韩国东洲公司总工程师, 以及美国 Calgon 公司、荷兰 Outotec 公司和美国 IXsep 公司高级顾问期间, 亲自参与和见证了这一技术在我国从无到有、由小到大的发展历程, 业务涵盖 ISEP、SepTor 及 RDA/Ionex 系统。在引进技术的基础上, 我国高等院校、科研单位和生产企业的科技人员, 以及硕士、博士研究生以此作为选题, 做了大量有价值的应用开发研究工作, 使这

一技术得到了创新和发展。

笔者根据多年来在该领域的工作经验，包括实验室、中试的试验研究和开发，将 CCIX 三代技术和设备的基本原理、运行机制、工艺特点以及工业应用归纳整理成书，愿与业界人士共同探讨，以促进这一技术的发展，使其在我国经济建设中进一步发挥作用。成书过程中，G. Rossiter 先生提供了主要文献资料，同时得到国内外专家的帮助，在此一并表示感谢。不足之处，请予指正。

著者

2016 年 12 月

目录

第一章 离子交换和色谱分离概述	1
第一节 离子交换和离子交换树脂	1
一、离子交换过程	1
二、离子交换树脂	4
第二节 离子交换设备及其发展	11
一、离子交换设备的类型	11
二、固定床离子交换设备	11
三、流化床离子交换设备	12
四、模拟移动床离子交换设备	16
第三节 色谱分离	19
一、色谱分离的发展历程	19
二、色谱分离法的分类和基本原理	21
三、移动床色谱技术	23
四、模拟移动床色谱分离	25
五、CCIX 模拟移动床色谱分离系统	27
参考文献	30
第二章 CCIX 的工艺开发和设计	33
第一节 CCIX 的基本原理和特性	33
一、固定床离子交换过程的缺陷	33
二、CCIX 系统的基本原理和结构	34
三、CCIX 系统的工艺特点	39
第二节 CCIX 工艺过程设计和开发	51
一、树脂的筛选和评估	51
二、CCIX 的工艺设计	58
三、中试验证试验	68
四、工业装置设计	73

五、生产装置的优化调整	75
参考文献	78
第三章 CCIX 的机械结构和控制系统	80
第一节 ISEP 系统	80
一、ISEP 系统的机械结构	80
二、ISEP 的控制系统	85
第二节 SepTor 系统	92
一、SepTor 系统的开发	92
二、SepTor 系统的运行原理	93
三、SepTor 系统的机械结构	94
四、SepTor 的控制系统	97
第三节 RDA/Ionex 系统	101
一、RDA 和 Ionex 系统的研发	101
二、RDA 旋转阀的工作原理	101
三、RDA 旋转阀结构	103
四、Ionex 分配阀结构	108
五、RDA/Ionex 系统的技术优势	110
参考文献	113
第四章 CCIX 的工业应用	115
第一节 在发酵产品和生物化工中的应用	115
一、从发酵液中提取赖氨酸	115
二、从发酵液中提取柠檬酸	124
三、柠檬酸脱盐精制	134
四、从发酵液中提取乳酸	141
五、从发酵液中提取苯丙氨酸	149
六、从发酵液中提取 L-谷氨酰胺	151
第二节 CCIX 在制药业中的应用	153
一、古龙酸钠酸化	153
二、维生素 C 钠的酸化	160
三、提取新霉素	166
四、从发酵液提取头孢菌素 C	168
五、分离维生素 C 和古龙酸	170

六、 抗生素分离和纯化	172
七、 红霉素提取和精制	174
第三节 CCIX 在淀粉糖和甜味剂生产中的应用	176
一、 果葡糖分离	176
二、 菊粉脱盐脱色	182
三、 甘蔗糖浆脱色	188
四、 从母液中回收木糖	197
五、 甜菜和玉米糖浆脱色	204
六、 功能性低聚糖脱灰精制	207
七、 山梨醇脱盐精制	210
八、 甜菊糖精制	213
九、 生产葡萄糖酸内酯	215
第四节 CCIX 在水处理中的应用	217
一、 饮用水脱除硝酸盐	217
二、 水杨酸生产废水处理	225
第五节 CCIX 在湿法冶金中的应用	229
一、 CCIX 用于湿法冶金述评	229
二、 镍/钴分离	238
三、 铀/钼分离	241
第六节 CCIX 在无机化工和石油化工中的应用	243
一、 从海水中提取钾	243
二、 生产 K_2CO_3	247
三、 生产 KNO_3	250
四、 生产 K_2SO_4	255
五、 PTA 生产废水的回收利用	259
参考文献	262

第一章

离子交换和色谱分离概述

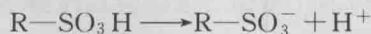
第一节 离子交换和离子交换树脂

一、离子交换过程^[1~5]

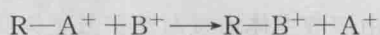
1. 离子交换的基本原理

离子交换现象的发现已有一百多年的历史。早在 20 世纪初人们已发现天然土壤具有离子交换能力。此后，1905 年合成了无机离子交换剂，1935 年合成了酚醛型高分子离子交换树脂，1945 年合成了苯乙烯系离子交换树脂，以及 1950 年问世的多孔型离子交换树脂，使离子交换这一科学领域获得了迅速的发展。目前，离子交换树脂已广泛地应用于化工、医药、食品、环保、生化、分析等各个领域，离子交换过程已成为重要的化工单元操作之一。

离子交换树脂是一类带有功能基团的不溶性固体高分子物质，它由网状骨架结构和连接在骨架上的功能基团所构成，功能基团上带有相反电荷的可解离子。因此，当树脂与溶液接触时，则和普通酸、碱一样发生电离，如带有磺酸基的阳离子交换树脂在与水接触时，其功能基团部分可发生如下电离，解离出 H^+ 。解离出的离子可在较大的范围内自由移动。



当树脂与含有某种同类型离子的溶液接触时，则发生离子交换反应，如下式所示：



(树脂相) (液相) (树脂相) (液相)

式中， R 表示树脂的骨架结构部分； A^+ 为树脂中的可交换离子，它与溶液中的 B^+ （也称反离子）进行交换， B^+ 进入树脂相，而 A^+ 则进入液相。当 B^+ 最大限度地置换 A^+ 时，树脂达到饱和状态。若溶液中的 B 是需要除去的杂质，则从

交换步骤的流出液直接得到产品；若 B 是所需要的产物组分，其后在解吸步骤需用洗脱剂将 B 从树脂上洗脱下来作为产品，同时树脂得到再生。通常，一个完整的离子交换过程包括交换—洗涤—洗脱（再生）—淋洗四个基本步骤。

离子交换技术（主要是连续逆流离子交换系统），在工业应用中有以下四个方面的作用和功能。

（1）提纯和精制产品 如粗产品的脱盐、脱色、去除杂质。

（2）提取和回收产品 如从发酵液中提取赖氨酸、湿法冶金中的金属回收。

（3）分离产品（用于色谱分离） 如葡萄糖/果糖的色谱分离、山梨醇/甘露醇的色谱分离。通常分离后同时得到两种产物。

（4）作为反应器直接制造产品 如 KCl 和 HNO_3 先后进入系统生产 KNO_3 ，相当于 KCl 和 HNO_3 发生置换反应。

2. 离子交换动力学

离子交换过程是发生在固-液两相之间的传质过程，交换离子在交换前和交换后都需经过从溶液到达树脂表面和在树脂内部的扩散过程，这些扩散步骤的总和决定了离子交换过程的速度。以溶液中的 Na^+ 和树脂中的 H^+ 交换为例，整个过程可分为以下七步，如图 1-1 所示。

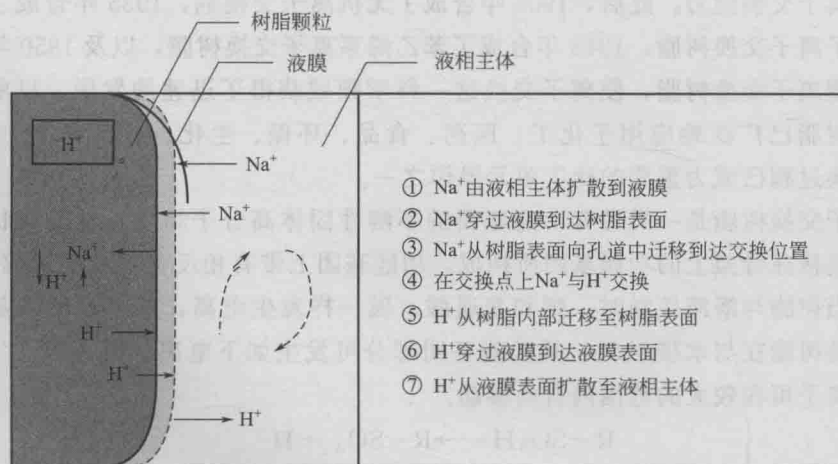


图 1-1 离子交换过程示意图

① 交换离子 (Na^+) 由溶液主体通过对流扩散至树脂颗粒表面液膜的边界。

② Na^+ 穿过液膜层，到达树脂表面。

③ Na^+ 从树脂表面向树脂孔道中迁移，到达有效交换位置。

④ 在有效交换位置点上， Na^+ 与 H^+ 进行交换反应。

⑤ 被交换的离子 (H^+) 通过树脂颗粒内部扩散，从树脂内迁移到树脂表面。

⑥ 被交换离子穿过液膜层, 到达液膜边界。

⑦ 被交换离子从液膜边界通过对流扩散到达主流液体。

以上七个步骤中, 第一步和第七步属于主流液体内的对流扩散, 在液体流动和搅拌的情况下, 这一步骤的速度是较快的 (通常条件下离子的对流速度约为 10^{-2} m/s)。第二步和第六步是液膜扩散, 离子在液膜中的扩散速度与对流速度相比则要慢得多 (一般条件下约为 10^{-6} m/s), 当溶液的流速增加, 或搅拌速度增加时, 液膜的厚度会减小, 从而使膜扩散的速度增加, 液膜的厚度与搅拌速度有关, 一般为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}$ 。第三步和第五步是颗粒内部的扩散, 称为颗粒扩散, 或孔扩散。离子的颗粒扩散速度与树脂的粒径和交联度有关, 也是一个慢过程。第四步在有效交换位置上, Na^+ 与 H^+ 进行交换是一个化学反应过程, 通常可以快速地完成。

由以上分析可知, 离子交换过程包括对流扩散、膜扩散、颗粒扩散与化学反应四个不同的步骤, 其中膜扩散和颗粒扩散是主要的控制因素。扩散速度表示为单位时间内通过单位面积的离子量:

$$\text{d}q/\text{d}t = D(C_1 - C_2)/\delta$$

式中, C_1 、 C_2 分别为扩散界面两侧的离子浓度 ($C_1 > C_2$); δ 为界面层厚度; D 为总扩散系数。

影响离子交换速度的主要因素有以下几个方面。

(1) 溶液浓度 当溶液中的离子浓度较低时 (小于 0.01 mol/L), 交换速度由膜扩散确定, 当溶液中的离子浓度较高时 (大于 1.0 mol/L), 树脂内扩散成为控制步骤。

(2) 溶液流速或搅拌速度 流速或搅拌速度增大, 可使液膜变薄, 加快膜扩散, 但树脂内扩散基本不受影响。

(3) 树脂粒度 粒度变小有利于同时增加膜扩散和孔扩散速度。小颗粒增大了树脂的比表面, 单位时间内有更多的离子到达树脂表面, 从而增大膜扩散速度。小颗粒使离子通过树脂内扩散的路程缩短, 加快了孔扩散速度。膜扩散速度与粒径成反比, 孔扩散速度与粒径的高次方成反比。

(4) 树脂交联度 交联度主要影响孔扩散速度, 交联度大的树脂溶胀性差, 从而影响离子在树脂内的扩散速度。

(5) 温度 提高温度有利于加快交换速度。

3. 离子交换平衡

对于以下交换反应, B^+ 对于 A^+ 的选择系数可用 K 值表示。



$$K_{A^+}^{B^+} = \frac{[RB][A^+]}{[RA][B^+]} = \frac{\frac{[RB]}{[A^+]}}{\frac{[RA]}{[B^+]}}$$

式中 $[RA]$, $[RB]$ ——离子交换平衡时树脂相中 A^+ 和 B^+ 的浓度；

$[A^+]$, $[B^+]$ ——溶液中 A^+ 和 B^+ 的浓度。

选择系数 K 大于 1, 说明该树脂对 B^+ 的亲合力大于对 A^+ 的亲合力, K 值越大, 离子交换树脂对 B^+ 的选择性越大, 越有利于进行 B^+ 对 A^+ 的交换反应。

选择系数用离子浓度分率表示:

$$C_0 = [A^+] + [B^+]$$

$$C = [B^+]$$

$$q_0 = [R^- A^+] + [R^- B^+]$$

$$q = [R^- B^+]$$

式中 C_0 ——溶液中两种交换离子的总浓度, mmol/L;

C ——溶液中 B^+ 的浓度, mmol/L;

q_0 ——树脂全交换容量, mmol/L;

q ——树脂中 B^+ 的浓度, mmol/L。

$$K_{A^+}^{B^+} = \frac{q(C_0 - C)}{(q_0 - q)C} \Rightarrow \frac{q/q_0}{1 - q/q_0} = K_{A^+}^{B^+} \frac{C/C_0}{1 - C/C_0}$$

式中 q/q_0 ——树脂中 B^+ 的浓度与其交换容量之比;

C/C_0 ——溶液中 B^+ 的浓度与其总离子浓度之比。

二价离子对一价离子的交换反应通式为:



$$K_{A^+}^{B^{2+}} = \frac{[R_2^- B^{2+}][A^+]^2}{[R^- A^+]^2[B^{2+}]}$$

$$\Rightarrow \frac{q/q_0}{(1 - q/q_0)^2} = \frac{K_{A^+}^{B^{2+}} q_0}{C_0} \times \frac{C/C_0}{(1 - C/C_0)^2}$$

式中 $\frac{K_{A^+}^{B^{2+}} q_0}{C_0}$ ——表观选择系数。

二、离子交换树脂^[6~12]

1. 离子交换树脂的结构

离子交换树脂由两大部分组成, 即三维空间结构的高分子网络骨架和骨架上连接的可离子化的功能基团。

以苯乙烯系强酸性阳离子交换树脂为例, 其化学结构如图 1-2 所示。聚合链为聚

苯乙烯，以二乙烯苯为交联剂，交联剂起着在聚合链之间搭桥的作用，使树脂中的高分子链连接成为一种三维网状结构。交联剂在单体总量中所占的质量分数称为交联度。改变交联度的大小，可以调节树脂的一些物理化学性质。连接在分子网络骨架上的功能基团为磺酸基—SO₃H，功能基团是固定在网络骨架上的，不能自由移动，但—SO₃H可解离出H⁺，解离出的H⁺却能自由移动，并与周围的其他离子互相交换。这种能自由移动的离子称为可交换离子。根据应用场合的需要，通过转型操作，将离子交换树脂中可交换离子转变为诸如Na⁺、Ca²⁺、NH₄⁺等离子形态。

树脂内互相交联的高分子链之间具有空隙。链间的空隙在充满水时成为离子或分子迁移的通道。这些空隙的孔径一般都小于5nm，称为化学孔。凝胶型树脂是只含有化学孔的一类树脂。如果在制备树脂高分子母体的聚合过程中加入致孔剂，则在高聚物结构形成时留下较大的空穴。这些形状各异、互相贯通的空穴，其直径在数十纳米至数千纳米，称为物理孔。具有这种网状物理孔的树脂即为通常所说的大孔树脂。大孔树脂的孔结构是永久性的，而凝胶型树脂的空隙只有在加水溶胀后才会出现。

图 1-3 是电子显微镜下观察的离子交换树脂的结构。

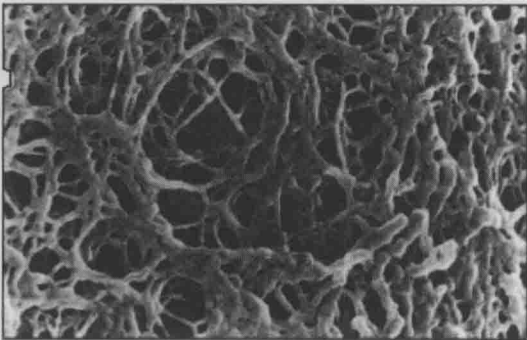


图 1-3 离子交换树脂的显微照片

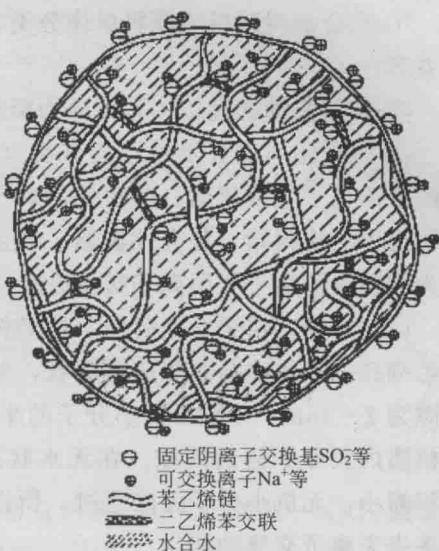


图 1-2 苯乙烯系强酸性阳离子交换树脂结构

2. 离子交换树脂的分类

离子交换树脂有多种不同的分类方法。

① 按合成树脂所用原料单体分类，可分为苯乙烯系、丙烯酸系、酚醛系、环氧系等。

② 按树脂的物理结构，可分为凝胶型、大孔型和载体型三类。

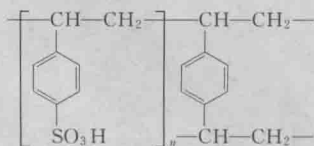
③ 按树脂功能基团的性质分类（最常用的分类方法），可分为以下七大类：强酸性阳离子交换树脂；弱酸性阳离子交换树脂；强碱性阴离子交换树脂；弱碱性阴离子交换树脂；螯合性树脂；氧化还原性树脂；两性树脂。其中最广泛使用的为前四类阳离子和阴离子交换树脂。

(1) 凝胶型离子交换树脂 这类树脂外观透明、表面光滑、球粒内部没有大的毛细孔。在水中会溶胀成凝胶状，并呈现大分子链的间隙孔。大分子链之间的间隙为 $2\sim 4\text{nm}$ 。一般无机小分子的半径在 1nm 以下，因此可自由地通过离子交换树脂内大分子链的间隙。在无水状态下，凝胶型离子交换树脂的分子链紧缩，体积缩小，无机小分子无法通过。所以，这类离子交换树脂在干燥条件下或油类中将丧失离子交换功能。

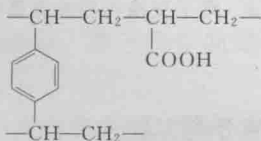
(2) 大孔型离子交换树脂 大孔型离子交换树脂外观不透明，表面粗糙，为非均相凝胶结构。即使在干燥状态，内部也存在不同尺寸的毛细孔，因此可在非水体系中起离子交换和吸附作用。大孔型离子交换树脂的孔径一般为几纳米至几百纳米，比表面积可达每克树脂几百平方米，因此其吸附功能十分显著。

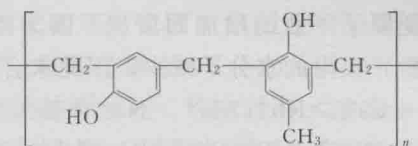
大孔型离子交换树脂的开发是离子交换树脂发展史上的一个重大成果。与凝胶型离子交换树脂相比，大孔型离子交换树脂具有机械强度高、交换速度快和抗有机污染的优点，因此很快得到广泛的应用。

(3) 强酸性阳离子交换树脂 是指功能基团为磺酸基 $-\text{SO}_3\text{H}$ 的一类树脂。以苯乙烯和二乙烯苯共聚体为基础的磺酸型树脂是最常用的强酸性阳离子交换树脂，其结构式为：

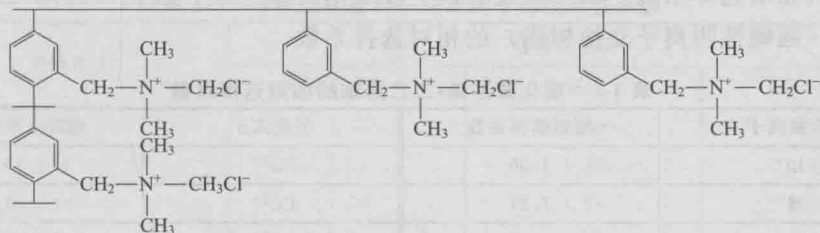


(4) 弱酸性阳离子交换树脂 这类树脂以含羧酸基 $-\text{COOH}$ 的为多，也有含磷酸基 $-\text{PO}_3\text{H}_2$ 和酚基等。母体有芳香族和脂肪族两类。用二乙烯苯交联的聚丙烯酸可以作为代表。酚醛型树脂也属于弱酸性阳离子交换树脂。其结构式为：

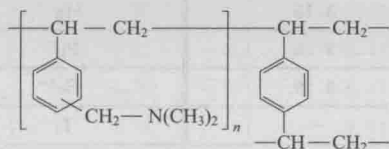




(5) 强碱性阴离子交换树脂 这类树脂的功能基团为季铵基，其母体多为交联聚苯乙烯，结构式为：



(6) 弱碱性阴离子交换树脂 这是一类含有伯胺—NH₂、仲胺—NRH 或叔胺—NR₂ 功能基团的树脂。基本骨架也是交联聚苯乙烯。经过氯甲基化后，用不同的胺化试剂处理。与六亚甲基四胺反应可得伯胺树脂，与伯胺反应可得仲胺树脂，与仲胺反应可得叔胺树脂。叔胺型结构式如下：



3. 离子交换树脂的基本性能和选用

(1) 交换容量 离子交换树脂的交换容量用单位质量（或单位体积）的树脂所交换的离子的当量数表示。交换容量可分为理论交换容量和工作交换容量等。理论交换容量也称总交换容量，是指单位质量或体积的树脂中可以交换的化学基团的总数。理论交换容量对于每种树脂来说都有确定的数值。例如，苯乙烯磺酸型树脂，近似分子量 184，其中有一个可交换 H，据此可计算出理论交换容量为 5.43mmol/g。离子交换树脂在使用条件下，树脂上的可交换离子不能完全被溶液中的反离子所取代，故工作交换容量小于理论交换容量。工作交换容量的大小依赖于实际应用条件，如溶液的离子成分、树脂对被交换离子的选择性、再生效果、树脂粒度、液体流速以及泄漏点的控制水平等。

(2) 选择性 选择性是离子交换树脂对不同反离子亲和力强弱的反映。与树脂亲和力强的离子选择性高，可取代树脂上亲和力弱的离子。影响选择性的主要因素是离子价数、树脂的交联度以及水合离子半径的大小等。在通常情况下，高价离子比低价离子优先交换到树脂上，其选择性顺序是：



等价离子的选择性随原子序数的增加而增加。因为当原子序数增加时，离子表面的电荷密度相对减少，吸附的水分子减少，因此水合离子的半径减小。

$$\begin{aligned} \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+ \\ \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \end{aligned}$$

表 1-1 表示以锂作为基准，磺化苯乙烯-二乙烯苯共聚物（强酸性阳离子交换树脂）的相对选择系数。表 1-2 表示以—OH 作为参考点，胺化苯乙烯-二乙烯苯共聚物（强碱性阴离子交换树脂）的相对选择系数。

表 1-1 磺化苯乙烯-二乙烯苯的相对选择系数

平衡离子	相对选择系数	平衡离子	相对选择系数
Li ⁺	1.00	Co ²⁺	3.74
H ⁺	1.27	Cu ²⁺	3.85
Na ⁺	1.98	Cd ²⁺	3.88
UO ₂ ²⁺	2.45	Ni ²⁺	3.93
NH ₄ ⁺	2.55	Ca ²⁺	5.16
Mn ²⁺	2.75	Sr ²⁺	6.51
K ⁺	2.90	Ag ⁺	8.51
Rb ⁺	3.16	Hg ²⁺	9.31
Cs ⁺	3.25	Pb ²⁺	9.91
Mg ²⁺	3.29	Ba ²⁺	11.55
Fe ²⁺	—	Tl ⁺	12.40
Zn ²⁺	3.47		

表 1-2 胺化苯乙烯-二乙烯苯共聚物的相对选择系数

种类	相对选择系数		种类	相对选择系数	
	类型 I	类型 II		类型 I	类型 II
羟基	1.0	1.0	二硫化物	27	3
苯磺酸	7500	75	溴酸盐	27	3
水杨酸盐	450	65	亚硝酸盐	24	3
柠檬酸盐	220	23	氯化物	22	2.3
碘化物	175	17	碳酸氢盐	6.0	1.2
苯酚盐	110	27	碘酸盐	5.5	0.5
硫酸氢盐	85	15	甲酸盐	4.6	0.5
氯酸盐	74	12	乙酸盐	3.2	0.5
硝酸盐	65	8	丙酸盐	2.6	0.3
溴化物	50	6	氟化物	1.6	0.3
氰化物	28	3			

(3) 交联度 离子交换树脂是具有立体交联结构的高分子电解质，交联结构

由树脂合成时加入交联剂来实现，交联剂的用量用质量分数表示，称为交联度。常用的交联剂为二乙烯苯，使用范围在4%~20%。交联度直接影响树脂的物化性能，如交联度大时，树脂的结构紧密、稳定性好、溶胀小、选择性高。但交联度过高时会影响树脂内的扩散速度。以强酸性阳离子交换树脂为例，表1-3表示不同交联度时一些阳离子的选择性系数。

表 1-3 不同交联度时一些阳离子的选择性系数

交换离子	选择性系数 ^①		
	交联度 4	交联度 8	交联度 16
Li ⁺	1.00	1.00	1.00
H ⁺	1.32	1.27	1.47
Na ⁺	1.58	1.98	2.37
K ⁺	2.27	2.90	4.50
Rb ⁺	2.46	3.16	4.62
Cs ⁺	2.67	3.25	4.66
Ag ⁺	4.73	8.51	22.9
Tl ⁺	6.71	12.4	28.5
Mg ²⁺	2.95	3.29	3.51
Ca ²⁺	4.15	5.16	7.27
Sr ²⁺	4.70	6.51	10.1
Pb ²⁺	6.56	9.91	18.0
Ba ²⁺	7.47	11.5	20.8

① 温度为25℃。

(4) 稳定性 树脂的稳定性包括机械稳定性、热稳定性和化学稳定性。机械稳定性是指树脂在各种机械力的作用下抗破损的能力，其表征方法有树脂单个球体的耐压强度和在与特定的滚球磨损装置内测定树脂的耐磨率。热稳定性表明树脂可使用的最高温度。在通常情况下，凝胶强酸树脂和大孔树脂的使用温度上限可达120~150℃，而季铵型强碱性树脂的最高使用温度为50~60℃。化学稳定性是指树脂承受化学药品（包括酸、碱）和氧化剂作用的能力。

(5) 溶胀性 离子交换树脂和水溶液接触后，由于溶剂化作用体积增大而发生溶胀。树脂的溶胀程度与其交联度、活性基团和反离子种类有关。一般弱型树脂溶胀程度较大。如弱酸性阳离子交换树脂体积溶胀约100%，弱碱性阴离子交换树脂体积溶胀30%，而强酸性阳离子交换树脂和强碱性阴离子交换树脂的溶胀体积在5%~10%。树脂的溶胀特性在离子交换工业应用设计中需加以考虑。

(6) 含水率 离子交换树脂具有亲水性。树脂的含水量是指在水中吸收平衡时树脂所含水量的百分数。含水量与树脂的交联度和功能基的性质有关，其值相应地反映了树脂网架中的孔隙率。树脂的含水量一般为40%~50%，高时可达