

第16篇 目 录

一般参考文献	16-6	16.4 速率极限恒定图式波带	16-33
16.1 吸着材料和吸着过程的分析	16-7	16.4.1 优惠平衡的透过行为	16-33
16.1.1 引论	16-7	16.4.2 传质机制; 速率和传递单元	16-33
一、吸附	16-7	一、机制	16-33
二、离子交换	16-8	二、速率方程式的形式	16-34
三、其它吸着剂体系	16-9	三、恒定图式	16-35
16.1.2 固定床分离设计准则	16-9	四、每单位高度的NTU; 操作变量	16-35
一、指导原则	16-10	五、推动力, 速率和透过曲线	16-35
二、数学定义	16-12	16.4.3 流体侧传质	16-37
三、推理和设计	16-13	一、传递入或从颗粒表面传递出	16-37
16.1.3 吸着剂材料的物理性质	16-13	二、积分结果	16-37
16.2 流体-吸着剂平衡	16-17	三、预恒定图式性能	16-37
16.2.1 变度(自由度)	16-17	16.4.4 颗粒扩散	16-39
例1 变度的计算	16-17	一、颗粒和微孔扩散的比较	16-39
16.2.2 体系变量和波带变量	16-17	二、扩散系数	16-39
一、浓度	16-17	三、速率方程式的积分	16-40
二、其它参量	16-18	16.4.5 微孔扩散	16-41
16.2.3 单变量等温线	16-18	例3	16-42
一、方程式	16-20	16.4.6 反应动力学模型, 联合阻力	16-43
二、分离因子	16-21	一、反应-动力学处理	16-43
例2 等温线的应用	16-22	二、联合阻力	16-43
三、分配比	16-23	三、总阻力	16-44
16.2.4 多变量体系平衡	16-23	16.4.7 轴向弥散和沟流	16-46
一、离子交换	16-23	一、无其它阻力	16-47
二、吸附	16-25	二、不可逆平衡 ($R=0$ 或 $\beta=0$)	16-47
16.3 平衡极限波带	16-28	三、优惠平衡 ($0 < R < 0.7$)	16-48
16.3.1 非优惠平衡效应	16-28	四、沟流	16-48
16.3.2 物料衡算关系式: 透入比	16-28	16.5 线性平衡和其它极限速率波带	16-49
一、任一溶质的连续性方程	16-30	16.5.1 平方根增宽透过	16-49
二、组成速度	16-30	一、积分方程	16-49
三、波带速度	16-30	二、轴向弥散	16-50
16.3.3 局部平衡分析	16-31	三、J函数作图	16-50
一、渐变波带的性能	16-31	16.5.2 非线性平衡反应动力学解	16-51
二、从透过曲线估算等温线	16-31	一、恒定R透过方程的图解	16-51
三、优惠等温线的不连续性(冲击)	16-32	二、积分泄漏量和平均泄漏量	16-53
四、组成等温线和波带	16-32	三、实验数据的推理	16-53
		四、基于半高斜率的NRU值	16-54

五、径向流.....	16-54	计量比例.....	16-71
例4	16-55	二、非化学计量比例的树脂.....	16-71
例5	16-56	16.7.3 三组分(双变量)操作.....	16-71
16.5.3 经验放大.....	16-58	一、质量作用或其它平衡.....	16-71
16.5.4 数值法.....	16-59	二、恒定分离因子平衡.....	16-72
一、显式程序, 特征方法.....	16-59	三、图解计算.....	16-73
二、隐式程序, 正交配位.....	16-59	四、各自波带的参量.....	16-73
16.6 改变进料操作, 再生, 色层		16.7.4 复杂组分操作.....	16-74
.....	16-60	一、字母规则和斜率规则.....	16-74
16.6.1 进料浓度级段改变.....	16-60	二、前沿吸着和解吸.....	16-74
16.6.2 循环操作.....	16-60	三、基于 h 函数分析的恒定分离因子	
一、过程效率.....	16-60	(CSF)	16-75
二、不定向流.....	16-61	例7 h 函数分析.....	16-76
三、返流再生.....	16-62	16.8 釜式(间歇)和连续操作	16-78
四、层式及混合床层.....	16-62	16.8.1 单釜级段.....	16-78
16.6.3 变温和变压解吸.....	16-62	一、在恒定 R 值的双元组分平衡	
16.6.4 色层分离.....	16-64	极限.....	16-78
一、主体和痕量模型.....	16-64	二、反应动力学推动力的速率控制...	16-78
二、反应动力学恒定分离因子(CSF)		三、线性平衡.....	16-79
模型.....	16-65	四、复杂组分平衡.....	16-79
三、线性平衡和高斯关系式.....	16-66	16.8.2 半间歇级段.....	16-80
四、实验色层图.....	16-66	16.8.3 逆流多级段操作.....	16-80
五、矩量法.....	16-66	16.8.4 逆流连续微分操作.....	16-81
六、痕量溶质分离设计.....	16-67	一、移动床单元.....	16-81
16.7 多变量体系: 复式波带.....	16-68	二、反应动力学型.....	16-82
16.7.1 非等温(绝热)吸附.....	16-68	三、外传递型.....	16-82
例6 活性炭固定床内蒸气绝热吸附		四、其它场合.....	16-82
和热再生.....	16-69	五、再生移动床体系的最终吸着	
16.7.2 混合床脱离子.....	16-71	效率.....	16-82
一、阳离子和阴离子树脂的化学			

第16篇 吸附和离子交换

作者:

Theodore Vermeulen

M. Douglas Le Van

Nevin K. Hiester

Gerhard Klein

译者:

叶振华

1-449-0204

1-449/0204

第16篇 目 录

一般参考文献	16-6	16.4 速率极限恒定图式波带	16-33
16.1 吸着材料和吸着过程的分析	16-7	16.4.1 优惠平衡的透过行为	16-33
16.1.1 引论	16-7	16.4.2 传质机制; 速率和传递单元	16-33
一、吸附	16-7	一、机制	16-33
二、离子交换	16-8	二、速率方程式的形式	16-34
三、其它吸着剂体系	16-9	三、恒定图式	16-35
16.1.2 固定床分离设计准则	16-9	四、每单位高度的NTU; 操作变量	16-35
一、指导原则	16-10	五、推动力, 速率和透过曲线	16-35
二、数学定义	16-12	16.4.3 流体侧传质	16-37
三、推理和设计	16-13	一、传递入或从颗粒表面传递出	16-37
16.1.3 吸着剂材料的物理性质	16-13	二、积分结果	16-37
16.2 流体-吸着剂平衡	16-17	三、预恒定图式性能	16-37
16.2.1 变度(自由度)	16-17	16.4.4 颗粒扩散	16-39
例1 变度的计算	16-17	一、颗粒和微孔扩散的比较	16-39
16.2.2 体系变量和波带变量	16-17	二、扩散系数	16-39
一、浓度	16-17	三、速率方程式的积分	16-40
二、其它参量	16-18	16.4.5 微孔扩散	16-41
16.2.3 单变量等温线	16-18	例3	16-42
一、方程式	16-20	16.4.6 反应动力学模型, 联合阻力	16-43
二、分离因子	16-21	一、反应-动力学处理	16-43
例2 等温线的应用	16-22	二、联合阻力	16-43
三、分配比	16-23	三、总阻力	16-44
16.2.4 多变量体系平衡	16-23	16.4.7 轴向弥散和沟流	16-46
一、离子交换	16-23	一、无其它阻力	16-47
二、吸附	16-25	二、不可逆平衡 ($R=0$ 或 $\beta=0$)	16-47
16.3 平衡极限波带	16-28	三、优惠平衡 ($0 < R < 0.7$)	16-48
16.3.1 非优惠平衡效应	16-28	四、沟流	16-48
16.3.2 物料衡算关系式: 透入比	16-28	16.5 线性平衡和其它极限速率波带	16-49
一、任一溶质的连续性方程	16-30	16.5.1 平方根增宽透过	16-49
二、组成速度	16-30	一、积分方程	16-49
三、波带速度	16-30	二、轴向弥散	16-50
16.3.3 局部平衡分析	16-31	三、J函数作图	16-50
一、渐变波带的性能	16-31	16.5.2 非线性平衡反应动力学解	16-51
二、从透过曲线估算等温线	16-31	一、恒定R透过方程的图解	16-51
三、优惠等温线的不连续性(冲击)	16-32	二、积分泄漏量和平均泄漏量	16-53
四、组成等温线和波带	16-32	三、实验数据的推理	16-53
		四、基于半高斜率的NRU值	16-54

五、径向流·····	16-54	计量比例·····	16-71
例4 ·····	16-55	二、非化学计量比例的树脂·····	16-71
例5 ·····	16-56	16.7.3 三组分(双变量)操作·····	16-71
16.5.3 经验放大·····	16-58	一、质量作用或其它平衡·····	16-71
16.5.4 数值法·····	16-59	二、恒定分离因子平衡·····	16-72
一、显式程序, 特征方法·····	16-59	三、图解计算·····	16-73
二、隐式程序, 正交配位·····	16-59	四、各自波带的参量·····	16-73
16.6 改变进料操作, 再生, 色层		16.7.4 复杂组分操作·····	16-74
·····	16-60	一、字母规则和斜率规则·····	16-74
16.6.1 进料浓度级段改变·····	16-60	二、前沿吸着和解吸·····	16-74
16.6.2 循环操作·····	16-60	三、基于 h 函数分析的恒定分离因子	
一、过程效率·····	16-60	(CSF) ·····	16-75
二、不定向流·····	16-61	例7 h 函数分析·····	16-76
三、返流再生·····	16-62	16.8 釜式(间歇)和连续操作 ···	16-78
四、层式及混合床层·····	16-62	16.8.1 单釜级段·····	16-78
16.6.3 变温和变压解吸·····	16-62	一、在恒定 R 值的双元组分平衡	
16.6.4 色层分离·····	16-64	极限·····	16-78
一、主体和痕量模型·····	16-64	二、反应动力学推动力的速率控制··	16-78
二、反应动力学恒定分离因子(CSF)		三、线性平衡·····	16-79
模型·····	16-65	四、复杂组分平衡·····	16-79
三、线性平衡和高斯关系式·····	16-66	16.8.2 半间歇级段·····	16-80
四、实验色层图·····	16-66	16.8.3 逆流多级段操作·····	16-80
五、矩量法·····	16-66	16.8.4 逆流连续微分操作·····	16-81
六、痕量溶质分离设计·····	16-67	一、移动床单元·····	16-81
16.7 多变量体系: 复式波带·····	16-68	二、反应动力学型·····	16-82
16.7.1 非等温(绝热)吸附·····	16-68	三、外传递型·····	16-82
例6 活性炭固定床内蒸气绝热吸附		四、其它场合·····	16-82
和热再生·····	16-69	五、再生移动床体系的最终吸着	
16.7.2 混合床脱离子·····	16-71	效率·····	16-82
一、阳离子和阴离子树脂的化学			

符号术语和单位

符号	定 义	SI 单位	美国惯用单位
A	表面积	km^2/kg	ft^2/lb
A_1	对参考吸附体系的重量因子; 以恒定分离因子处理的浓度		
a	在双线性处理 (表16-5) 中等温线的斜率; 式 (16-142) 中的指数; 式 (16-179) 中的一项		
a_p	每单位填充容积颗粒吸附剂的外表面积	mm^{-1}	in^{-1}
a_1, a_2	符合等温线三项式的系数		
B	恒定分离因子处理时每一吸附样品的参考 q 和 c 比值	g/kg	ft^3/lb
B	NTU比率指数, 由此可得 $(T-1)$ 对已知 κ 比值下, 透过曲线半高斜率的比率		
b	双线性处理下, 等温线的斜率, 也是参量变数		
b_1, b_p	非线性相加传质阻力的校正项, 式 (16-92)		
b_1, b_2	对等温线三项式系数		
c_0	离子交换中液体的总浓度	克离子当量/l	磅离子当量/ ft^3
c_t, c_p	对流体相每单位溶液容积的热量; 对颗粒相每单位填充容积的热量	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{l})$	$\text{Btu}/(^{\circ}\text{F} \cdot \text{ft}^3)$
$c_1 \cdots c_n$	局部测定常数		
c	对于离子交换或吸附, 流体相中吸着质的浓度	克离子当量/l 克分子数/l	磅离子当量/ ft^3 磅分子数/ ft^3
D	扩散系数	mm^2/s	ft^2/h
D	分配比 $\times$ 间隙率 Δe (用于第四版)		
d_c	晶体直径	mm	in
d_p	颗粒直径	mm	in
E_0	表观轴向弥散系数	mm^2/s	ft^2/h
E	再生系数, 式 (16-157)		
F	流体相容积流率		
F	积分泄漏量, 式 (16-134)		
f	总气相流对床层进口流的比率		
$(-\Delta H)$	在特定吸着剂的负荷下, 由于吸附释放的热量	$\text{kJ}/(\text{g} \cdot \text{mol})$	$\text{Btu}/(\text{lb} \cdot \text{mol})$
h	从进口端算起的柱长	m	ft
h	浓度路程参量, 式 (16-197)		
i, j	数值计算中的累计数		
J	贝塞尔函数积分, 跨度 0 至 1, 式 (16-124)		
K_{AB}, K_{AB}	质量作用平衡常数, 式 (16-13a)		
K_F	类似 K_t , 但无因次		
K_t	Freundlich吸附平衡常数	$(\text{g} \cdot \text{mol}^{1-\beta}) / (\text{kg}^{\beta} \cdot \text{mol}^{-1})$	$(\text{lb} \cdot \text{mol}^{1-\beta}) / (\text{ft}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$
K_L	Langmuir吸附平衡常数	$\text{bar}^{-1} \cdot (\text{g} \cdot \text{mol})$	$\text{atm}^{-1} \cdot \text{ft}^3 \cdot (\text{lb} \cdot \text{mol})$
K	传质系数	mm/s	ft/s
L	轴向混和长度	mm	ft
L, M, M', N	釜式吸着方程常数		
M	分子量	daltons	daltons
m	质量作用平衡中的指数, 式 (16-13a)		
N	传质单元数或反应单元数		
Pe	对轴向弥散的 Pe (Péclet) 数, 式 (16-105)		
p	分压	bar	atm

符号	定 义	SI单位	美国常用单位
Q	吸附中固相的最高浓度或离子交换中的总离子当量	克当量/kg或 (克分子)/kg	(lb·mol)/lb
q	固相相浓度	克当量/kg或 (g·mol)/kg	(lb·mol)/lb
R	对径向流场合, 床层中的径向距离		
R'	非平衡状态下, R 的经验置换		
R_F	色层峰速度和流体速度的比率		
R_g	气体常数	$\frac{\text{kJ}}{(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})}$ 或 $\frac{\text{kJ}}{(\text{g} \cdot \text{mol}) \cdot (\text{K})}$	Btu/(lb·mol)·°R
R	单波带的分离因子		
r	颗粒内的径向距离		
$\bar{r}$	颗粒内的平均毛细孔半径		
r	吸着体系的分离因子		
S	表面断面积		
s	在J自变量中的第一变量, 式 (16-124)		
T	基于总浓度的透入比		
$\bar{T}$	T 的平均值		
T	基于所指波带浓度改变的透入参量		
T_K	绝对温度	K	°R
t	时间, 同 t_a 视停留时间, 也是J自变量中的第二变量		
$\hat{t}$	流体前沿的到达时间, $t = (hsc/F)$	s	s
$\bar{t}$	在半釜式级段中的平均停留时间	s	s
U	无因次浓度速度; $1/T$		
u_0	波带速度, 式 (16-53)	m/s	ft/min
V	向柱送进的流体容积		
$\hat{V}$	通过指定点的流体容积, $V - ve$		
v	从柱进口端至指定点, 吸着剂的容积		
W	固体进料重量	kg	lb
X	颗粒微孔内的一点上无因次流体相浓度; 趋于平衡的范围; 溶质对载气的分子比率		
X'	相关于 X 的中间函数, 用于计算轴向弥散场合		
X	在0向下游和1上游之间的波带内, 无因次的流 体相浓度		
$\bar{X}$	平均泄漏量, 式 (16-135)		
x	对吸着或交换体系, 无因次的流体相浓度		
Y	在颗粒内一点上的固体相无因次浓度		
$\bar{Y}$	在波带内的固体相无因次浓度		
$\bar{Y}$	树脂利用率		
y	对于吸着或交换体系, 固体相的无因次浓度		
z	高聚物树脂的交联度		
Z	透入比, 用于第4版		
z	数目		

希腊符号

α	对指定溶质相对于第二种溶质的分离因子
β	Freundlich等温关系式中的指数
Γ	对于逆流操作柱, 冲洗剂在吸着剂相和流体相内的相 对浓度比率

符号	定 义	SI单位	美国常用单位
$\Gamma(i)$	渐变波带和相应的浓度路程; $i=1$ 对最远的下游(第一次出现)的波带		
γ	对釜式接触, 指定样品在固定相和流动相内的相对浓度比率		
Δ	从进口浓度至最后平衡, 在釜式接触中流体相相对浓度可能的总减少量; 在数值计算中 N 或 NT 的增量		
δ	恒定图式透过方程的积分常数		
ε	填充床的间隙率		
ξ	机制参量, 吸着相 NTU 对流体相 NTU 的比率		
η	机制参量, 传质单元数或反应单元数对轴向弥散单元数 N_d 的比率		
θ	温度变化	K	$^{\circ}\text{F}$
κ	一般速率系数	s^{-1}	s^{-1}
Λ	对于一个组分或总溶质的体系分配比, 式(16-6)		
Λ	在二元体系中波带的分配比		
Λ'	Λ 的局部值		
μ	粘度		
μ_i	溶质 i 的化学位	$\text{kJ}/(\text{g}\cdot\text{mol})$	$\text{Btu}/(\text{lb}\cdot\text{mol})$
ν	价		
ξ	“迁移”可变积分量, 式(16-124)		
π	分散压	MPa/m	atm/ft
ρ	密度		
$\Sigma(i)$	断裂波带		
σ	每单位重量干固体的表面积		
$\bar{r}$	曲折率		
α	吸着剂颗粒的内孔隙率		
ψ	用颗粒内线性推动力时的校正因子, 在 $R < 1$ 时和 R 值有关		

一般参考文献

Aris and Amundson, *Mathematical Methods in Chemical Engineering*, vol. 2: *First-Order Partial Differential Equations with Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1973. Barrer, *Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Sieves*, Academic, New York, 1978. Clazie, Klein, and Vermeulen, "Multicomponent Diffusion: Generalized Theory with Ion Exchange Applications," U.S. Off. Saline Water Res. Dev. Prog. Rep. 326, 1968. Gregg and Sing, *Adsorption, Surface Area, and Porosity*, Academic, New York, 1982. Hall, Eagleton, Acrivos, and Vermeulen, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 5, 212 (1966). Helfferich, *Ion Exchange*, McGraw-Hill, New York, 1962. Helfferich and Klein, *Multicomponent Chromatography*, Maurice Dekker, New York, 1970. Hiester and Vermeulen, *Chem. Eng. Prog.*, 48, 503 (1952); *Ind. Eng. Chem.*, 44, 636 (1952); *J. Chem. Phys.*, 22, 96 (1954);

Am. Inst. Chem. Eng. J., 2, 404 (1956). Holland and Liapis, *Computer Methods for Solving Dynamic Separation Problems*, McGraw-Hill, New York, 1982. Klein, Sinkovic, and Vermeulen, "Weak-Electrolyte Ion Exchange in Waste-Water Reuse," U.S. Interior Dept. Rep. OWRT 82/7, 1982. Kof and Riesenfeld, *Gas Purification*, 3d ed., Gulf, Houston, 1980. Liberti and Helfferich (eds.), *Mass Transfer and Kinetics in Ion Exchange*, Martinus Nijhoff, Boston, 1982. Rodrigues and Tondeur, *Percolation Processes: Theory and Applications*, Suthoff and Noordhoff, Rockville, Md., 1981. Sherwood, Pigford, and Wilke, *Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1975. Tondé and Klein, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 6, 339, 347 (1967). Weber, *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, Wiley, New York, 1972.

16.1 吸着材料和吸着过程的分析

16.1.1 引 论

吸着作用是单一或多种溶质从流体相向坚实颗粒团聚物的选择传递。溶质和载液或不同溶质与吸附剂之间一般选择性的差异,可以使一定的溶质从载液中或各溶质互相之间得到分离。类似的逆操作为解吸,常是指将固体中最初已含有的样品分离出来的过程。本篇讨论基于吸着和解吸现象之分离过程的设计和开发。

一般的吸附包括溶质分子在表面上的积累(包括气-液,如泡沫分离和液-液在内)。在此,仅着重于考虑气-固和液-固表面,溶质从流体相选择地依附于此固体上。每单位面积的积累量是小的,因此,每单位体积的巨大多孔固体物需要有非常大的内表面积。表面通常是不规则的,结合能(如在蒸气冷凝时,主要是范德华力)从一个活性点到另一点的变化范围是很大的。但是,“分子筛”吸附表面由大晶体结构内的孔道或孔穴提供,分子筛显示出高度均一的吸附剂表面,此表面在实际上具有恒定的结合能。

以典型颗粒吸附剂之内表面积的大小作简单的例子。设颗粒的间隙率为0.40,内空隙率亦为0.40,有效毛细孔直径10nm。表面对容积的比率则为 $0.1\text{km}^2/\text{l}$ (或 $1\text{mi}/\text{ft}$)填充床。如溶质形成完整的单分子层,设为0.5nm深,则占约20%的内孔道容积或约5%总填充床容积。

离子交换通常是全部透过聚合物固体的三维效应。固体成为“胶体”状态,意味着它能吸收(或溶解)一些流体相溶剂。离子交换时,某些情况下,正电荷的类分子样品(阳离子)和流体中(一般是水溶液)的其它负电荷(阴离子),置换最初在固体中同一电荷类型的不同离子。离子交换剂含有永久性结合的相反电荷类型的“共离子”基团。离子交换剂多数是有机聚合物,其它是分子筛型的。

从气相中吸附时,通常部分固体的表面是空缺的;而流体相的溶质浓度增加,空缺面积减少,固体的吸着量增加。从液体相进行离子交换或吸附时,吸着剂有固定的总容量,并仅与一种溶质互相交换。

吸着可认为包括气体吸收和液体萃取在内。对此类固状吸着,本文还包括毛细孔道内浸渍了持久性液体的多孔固体颗粒,当它接触气体或液体时,可从该气体吸收或从另一种液体进行萃取,均一“凝胶”高聚物亦起着类似的作用。因而,在本篇“分配吸收”和“分配萃取”亦为单元操作。

图16-1表示吸着剂颗粒的毛细孔内及其表面上,或在可渗透均一胶体状结构中,或在二者均存在的情况下,吸着剂吸着或使溶质贮积的方法。按照流体种类和吸着剂结构的不同,将吸着操作分类,并列于表16-1内。

一、吸附

各种吸附剂为无定形或微晶结构的天然或合成材料。大量使用的有活性炭、活性氧化铝、硅胶、漂白土及其它粘土,而在此优先叙述分子筛。

常温下,吸附一般由分子之间的力引起,而不形成新的化学键,称之为物理的吸附或物

理吸附；在较高的温度下（约高于200℃或400°F），活化能足以形成或断裂化学键，如果此

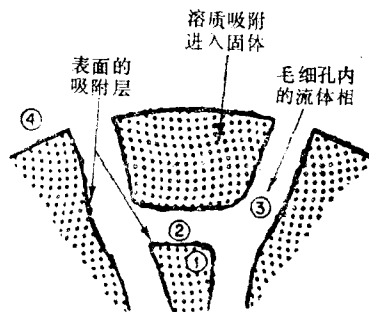


图 16-1 吸附剂或离子交换剂颗粒内吸着的模型。数字参见“传质机制”章

表 16-1 吸着操作的分类

被作用物 (流体相)	溶剂作用或穿透入吸着剂 (固定相)		
	进入均匀的固体	在结晶表面之间或在其上	进入固定保持于颗粒微孔内的液体
液体	离子交换 离子阻滞 渗透和萃取 离子排斥 凝胶透析 吸收	交换吸附 分子筛吸附	分配吸附
气体		物理吸附 分子筛吸附	分配吸收

机制占优势，则此吸附称为化学吸附或活性吸附。

液相吸附的主要用途有：

1. 燃料油和润滑油，有机溶剂，植物油和动物油的脱色干燥或脱除胶质；
2. 从发酵汁或植物萃取液中回收生物化学制品（抗生素，维生素，调味品）；
3. 食品和医药产物的净制；
4. 粗糖浆的脱色；
5. 污染控制，排出液的净化过程；
6. 给水处理，脱臭，脱味或改善色泽；
7. 芳香族化合物异构体或脂肪族碳氢化物的分离。

气相吸附的主要用途有：

1. 气体的干燥（特殊情况下在包装中干燥）；
2. 入口和循环空气或排出空气进行净化脱除有毒气体，臭味、气溶胶等；
3. 从离开蒸发室的空气中（喷雾油漆、纺织品的干洗，聚合过程）回收溶剂；
4. 气体包括低分子量的碳氢化物，稀有气体或工业气体的分馏。

解吸主要用在特殊固体原材料的干燥和浸出。

周期性再生的固定床是通常采用的，逆流、釜式和变压体系在个别情况下使用，吸附和离子交换体系使用的设备在19节中讨论。

二、离子交换

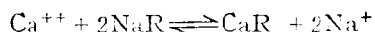
使用带有离子电荷（或正或负）结合基团的固体相，此离子电荷伴同着相反电荷的可置换离子（“反离子”）。大规模使用的多数离子交换树脂为合成树脂，使用中成为化学反应性的树脂，如聚苯乙烯，由活性单体（烯酸、胺或酚）制成。天然沸石（无机硅酸盐聚合物）为第一类离子交换剂，天然和合成沸石目前都在使用。离子交换剂的渗透性仅取决于分子尺寸的大小，除非交换剂颗粒由“大毛细孔”孔道的网络构成。树脂相内离子的扩散系数值与在中等粘度溶剂中的相接近，随离子价数和大小的增加而锐减。

阳离子交换树脂一般含有结合的磺酸基，比较少用的基团为羧酸基、膦酸基、磷基等，阴离子树脂包括季胺基（强碱性）或其它胺基（弱碱性）。

离子交换可写成化学当量的可逆反应，例如阳离子交换中熟知的水软化反应



或



式中 R 表示在交换剂相的高分子电解质网格中的固定单价阴离子活性点。几乎在所有吸着操作中, 固体吸着剂经使用后, 应该以吸着剂最初持有离子的溶液再生后贮藏。

强电解质之间的离子交换, 一般可以一直进行到交换剂的大部分化学计算容量均已耗尽为止, 吸着剂总容量实际上为定值, 而不考虑被处理溶液的组成。如树脂或溶液内 (或二者均存在) 有弱酸或弱碱, 则出现明显的例外, 树脂的视容量远比化学计算值为小。

整合离子交换树脂对某些阳离子有非常高的选择性。一种商业树脂 (Dewex-1) 含亚氨基二醋酸基结合于聚苯乙烯母体上, 对铜、镍、钴和铁 (离子) 呈现强大的亲和度。

对于离子阻滞, 阳离子单体在预先形成的阴离子交换树脂结构中聚合, 或反之, 最终的结构称为“空穴中蛇”形聚电解质。在再生型式中, 此母体的阳离子基成氢型, 而阴离子基成氢氧基型。加入强电解质将 H^+ 和 OH^- 置换, 并使之中和; 树脂为各离子样品饱和。再生时加水使树脂基团水解, 使离子游离并回收之。

三、其它吸着剂体系

电子转移 (氧化还原作用) 树脂能起氧化和还原作用, 使某些金属离子的价数改变或使溶解氧减少。某些此类树脂结合着氢醌基, 此基可逆地氧化成醌, 其它的树脂亦有含硫醇基的。

凝胶透析分离基于分子尺寸。对液体分离, 使用可渗透性颗粒及略为可成媒介物的物料, 如膜透析, 即使用纤维素。此颗粒可收容“晶体”溶质, 或为离子或为 $10 \sim 15 \text{ \AA}$ 直径的分子, 但完全拒绝大于极限尺寸的“胶体”物料。用没有溶质的液体再生时, 能使晶体脱离颗粒, 并在排出液内回收, 排出液脱除固体后, 可重复使用。

吸收和萃取类型分离, 是利用吸着剂固体与溶质溶解度之差异, 而不是因其分子尺寸不同进行的。溶质以分子形式发生真正的相变, 在固体中成“溶解”状态, 每个溶质分子在封闭状况为吸着剂材料的分子围绕。吸收和萃取的一般定义为: 吸收, 溶质的载荷相或作用物是气体, 萃取则为液体。无定形聚合物料的渗透为此效应的一例, 然而, 一般宁可使用膜而不用颗粒。例如, 固定气体或轻有机分子 (CH_4 、 CH_3Br) 穿过聚氯乙烯、乙基纤维素或硅橡胶以分离之。

吸着剂萃取的特例是离子排斥 (或电解质排斥), 它可在通常的离子交换树脂内进行。树脂用和溶液中相同的可移动离子 (阳离子或阴离子, 由树脂类型决定) 预先饱和。萃取中性非水溶液物料, 例如醇、羧酸或较低分子量的酮时, 该树脂则排斥溶液中之离子组分。

其它类型相变吸着, 广泛用于化学分析, 有潜在工业用途的是分配色层, 吸着剂为真正的液体, 涂积于通常为相对惰性的颗粒固体载体毛细孔内之固定液, 此固定液对被分离物为不溶解或不挥发性的。此类吸着剂成饱和涂层浸渍的形式操作, 此分离称为分配吸收和分配萃取。

16.1.2 固定床分离设计准则

颗粒状小珠或片状吸着剂固定床操作是吸着分离的最基本方法, 常采用向下流动, 但有时也使用向上流。虽然固定床方式非常有用, 但其分析却很复杂。因此, 无论从分析还是从叙述, 本章都首先注意固定床, 其它方式, 如釜式、浆液流、流态化和稳定逆流仅作简略地介绍。

承载溶质的气体或液相以活塞流穿过固定床或柱时, 流体和固体并存活塞流的组成高低

与流出时间及柱的轴向距离有关。此行为如图16-2所示，其中时间为横坐标，由进口算起的距离为纵坐标（向下计量）。床层状态以在开始（ t_0 ）和相邻时间（ t_1 ）及（ t_2 ）表示。溶剂由斜阴影线表示，而转移的溶质由水平阴影线表示。

在 t_0 处无溶剂及溶质进入床层。在 t_1 溶剂几乎已到达床层末端，溶质（因它为吸着剂吸取）则仅移动了很短的距离。在 t_2 床层间隙空间全为溶剂充满，而溶质“前沿”（如阴影密度稀疏部分）继续向前移动。在任意给定瞬间内，用此数据绘取的图线称为“浓度曲线”。

此前沿区亦称为“波带”、“吸着波”*或“吸着区”，此为基础概念。在柱上游之容积表示已和进料成平衡的固体，而远离下游的容积表示和预先充填固体成平衡的流出液体。化学计量确定的波带中心，由相应于前沿平均速度斜率的上倾斜线来确定。

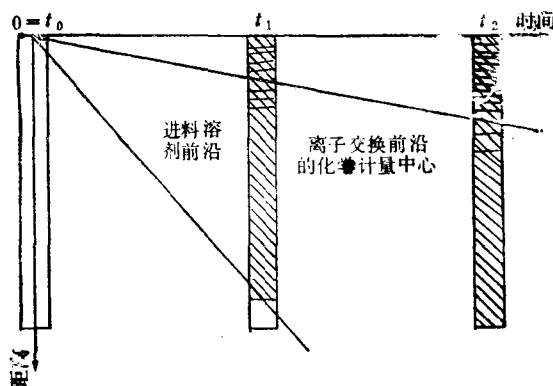


图 16-2 固定床柱内进料流体前沿和吸着区为流出时间的函数。对角线阴影表示载液，水平线阴影表示溶质

流出液浓度之“历程”或“透过曲线”随时间延续或接近于零（随时间延长或维持原来曲线的形状不变——译者注）。显然，前沿接近柱出口时，流出液浓度超过所允许的极限值。即为“透过点”（对时间或流体容积言），因此，到达“饱和”、“流干”或“负荷”点时，操作阶段停止，而“再生”、“冲洗”、“解吸”或“减负荷”开始。

一、指导原则

设计应在充分精炼原则下进行，更多地注意平衡和速率行为，而不仅作物料计算。从数学观点上看，实质上所有吸着操作处于相同特征性能之范围内。因此，此处略述一些几乎所有任意吸着分离体系的简单而统一的理论处理方法。

输入数据应是完整的透过曲线，而不仅为透过点。为了简化和通用化，计算参量合并成尤因次数群。此完整的方法可参见下列推荐的步骤：

1. 确定变度（自由度）。变度基本上等于波带数（即透过级段数），波带数指在预饱和状态和进料状态（本篇内用小字母表示）之间组成的变化数。一个 n 组分的离子交换或交换吸附系统有 $n-1$ 个变度， n 组分在等温空白活性点上吸附有变度 n 个。一个床层所有活性点最初是空白的，用仅含有一种吸附质的流体进料通过，成为单波带。在此，着重研究“单变量”的状况，而类似的平衡和速率的研究，可用于多波带操作之任一波带中。

*——波带 (transifion)，吸着波，浓度波，浓度曲线，透过曲线，历程和前沿都有相类似的意义，以流体相（或固定相）浓度为纵坐标，其它参量（如时间，流量）为横坐标所得的曲线，其吸着区在其它文献中亦称为传质区 (MTZ)，常用于简便的吸着操作设计中。——译者注

2. 确定物料衡算关系式 (化学计量)。指在给定床层容积下, 对每一相继出现波带的化学计算中心, 流体通过床层积累的流体容积量。床层通常为圆柱形, 从一端进料: 从轴向以径向进料, 成圆柱形空间, 从中心径向进料, 成球形空间, 一如地下水的水流。在大部分计算中, 床层容积对单一长度因次设是单调的。

在恒定流率下, 直至波带中心出现时, 通过流体的容积量和等价于时间变量值成比例; 类似的, 流体容积和相当于通过床层波带中心的速度成反比例。波带内相继的浓度可由时间、速度或波带中心测得的各无因次比率之参数值来确定。特别指透入比 (Throughput ratio) T 为特定组成下的时间比值或流体容积比值, 其倒数 u 为速度比值 (黑体字在本篇内表示无因次波带参量)。

要描述单变量系统中波带中心的位置, 必须从平衡 (对吸附), 从滴定或对比物料衡算 (对离子交换), 或从厂家数据和从假定或测定的溶液浓度, 以预先确定固体的吸附量。如果要完整地测定从 $X=0.02$ 至 $X=0.98$ 之流出液-浓度历程, $X=1$ 浓度线和 X 轴流体前沿出现处曲线之间的面积可直接得出在化学计算中心 (见图16-8) 的流体容积或时间。对多变体系, 波带中心的位置常基于平衡数据通过计算来确定。

透入比定义为

$$T = \frac{V - \epsilon v}{V_{\#}} = \frac{t - (\epsilon v / F)}{V_{\#}} \quad (16-1)$$

式中: v = 直至需要点 (常为床层之末端) 的床层填充容积, ϵ = 床层的间隙率, 而 ϵv = 床层间隙容积, F = 容积流率, V = 从开动起, 进入床层的流体容积; 及 $V - \epsilon v (= \hat{V})$ 为在相应时间 $t - (\epsilon v / F) (= \hat{t})$ 内到达指定点之流体容积。 $V_{\#}$ = 设所有的溶质都能转移入吸着剂时, 需完全饱和填充层容积 v 的溶液容积量 (内含有足够的溶质), $t_{\#}$ = 相应时间, $V_{\#}$ 和 v 之间的关系以分配比 (Partition ratio) A 表示,

$$V_{\#} = Av \quad (16-2)$$

(参见式16-6)。

3. 对每一波带, 考察流体-吸附剂平衡是否为优惠 (固体浓度对流体浓度为向上凸的函数) 或是非优惠 (向下凹的函数), 关系到进料和床层之间浓度变化的方向。对非优惠平衡, 局部平衡理论看来能很好地吻合或确定真正透过的性能。对优惠或似线性平衡, 必须用各自的速率极限波带处理。

适当简化的“等温线”函数通常已足以表达此平衡时, 恒定分离因子式 (常数 R 参见式16-17) 在此用作基本的模型, 相当于气体吸附的朗格美尔等温线, 类似于蒸馏中之恒定相对挥发度。

4. 认真考察过程的循环操作, 考虑过程排列的交替变量, 使之吸附和再生为最佳的结合方案。是否已正确选择吸着剂? 以及, 再生时, 向前流动或逆流, 那种更为经济?

在多变体系中, 外流液的不同部分可以分别收集, 在完全饱和前 (借用本体制备色谱的操作法), 停止流干。以循环操作安排 (见19节) 柱的各阶段常是有利的。如技术上和经济上没有一种吸着剂完全适用, 可考察使用浅床或两种互相补充的吸着剂之混合床, 熟知的应用有, 特殊情况下, 水脱离子用阳离子和阴离子交换树脂的混合物 (见19节)。最佳循环时间, 应是缩短循环周期, 可使投资费用减少 (降至“浅床”速率极限点), 但却使操作费用增大。

5. 以操作和设计条件中的变量效应分析速率极限波带, 用最常采用的“速度”法 (恒

定图式、线性平衡或比例图式)开始。最简单的方法为假设线性推动力,简单的控制阻力,恒定的扩散系数,活塞流和平行于流动之流体-固体边界。可能时,取用一经验合适的传质系数:对大多数吸附和对浓溶液离子交换取颗粒侧(“固体”或微孔),对大多数离子交换取流体侧传质系数。如多于一个阻力(或其它分散效应)并显著时,因为流体速度变化对不同的机制有不同的效应(见图16-12),其联合效果可用简单的视速率系数为体系的变量。对“深床”场合,因为平衡接近线性(R 在0.5和3之间),用恒定图式或比例图式处理都不合适,而非线性平衡反应动力解,可能得到最满意的结果。

计算程序一经建立,视速率系数应和假设机制或多种机制下的预测值比较,以期尽可能得到清晰的解释。计算机计算细致准确,但仅限于描述或设计的最后阶段有利,因为每一小时的半理论分析都远比几个小时计算机程序(或运转时间)有价值。

在床层出口(或其它地方)之组成计算基于两个微分方程式(式16-51和适当的速率方程)积分,以此说明整个通过床层上游的流体和固体相之早期状态。理论上不管是否活塞流,解可以延伸至无穷大的长度和时间,下游状态基本上不致影响上游的行为。在柱出口以外,每单元流体的浓度假设不再变化。

速率计算用传递单元数(NTU) N 无因次床层长度表示。一个传递单元高度(HTU)为流体表观速度(空塔速度)与单元时间倒数表示的适当速率系数之比。总 HTU 值比任何单项阻力 HTU 值为大,除非是线性平衡,各单项值不能直接相加。不论流体侧还是颗粒侧阻力控制,因其流体流动仅以视停留时间(或“空间时间”)表示,故于此仅使用流体侧之 NTU。对线性平衡, N_f 和 N_p 的倒数可以直接相加,而不用“容积比”权重。

概念上,传递单元为一个距离,在此距离内每个溶质分子有“单元机会”传递到固体相,流体前沿“第一滴”行为,通常为流体侧传质所控制,由定义说明,其相对浓度在标尺上 1 为适当上游点,而 0 为适当下游点,得

$$X = \exp(-N_f) \quad (16-3)$$

式内之下标 f 表示流体侧 NTU。

为完善起见,用 N 成为有效距离,用 T 或 NT 积为通过之无因次的流体容积或流出时间以计算之。

二、数学定义

对单变量吸附,感兴趣的浓度变量为流体相中的溶质浓度 c 或分压 p 及吸着剂中的局部溶质浓度 q , 例如,各以每公升流体中或每公斤吸着剂中的克分子数(或克当量数)表示。

单变量离子交换有两个须关注的可交换离子样品。略去溶剂在液体和交换剂相之间的交换,无相变或化学反应,略去交换剂引起的电解质 Donnan 提取,交换容量恒定,则在液体相及交换剂相中两样品离子的总浓度均为定值。因而,设总量已知,足以用上述单位定出两相内任一样品离子的浓度。

流体相波带浓度用下列因次式表示,

$$X = (c - c') / (c'' - c') = (p - p') / (p'' - p') \quad (16-4a)$$

对吸附剂相取

$$Y = (q - q') / (q'' - q') \quad (16-4b)$$

在此关系式中,符号右上角的小撇表示可变的浓度, q' 为预先存在(下游极限)的样品浓度,选作参考态; c' 或 p' 为和 q' 成平衡的流体中样品的浓度或压力, c'' 或 p'' 为上游流体中样品的参考值,而 q 为和进料成平衡的吸着剂浓度。无因次浓度 X 和 Y 为波带内从 0 至 1 的范围。

围内之变动值。对复杂组分局部平衡 R 体系,所有组分的 X 和 Y 都恰为相同。其它性能的平衡体系,它们几乎亦相同。因而对所有溶质的单一的 X 或 Y 常用于描述波带的完整范围。

浓度变化的图式可用不同类型的关系式描述,例如

$$f_n(X) = f_n(Y, T, v) \quad f_n(Y) = f_n(X, T, v) \quad (16-5a)$$

在给定速率和平衡性能(不为常数的 R 函数表示)下,此类方程式之分析解或数字解,多数情况下以分析(有时是隐式)或列表解的方式表示

$$X = f_n(R, T, v) \quad Y = f_n(R, T, v) \quad (16-5b)$$

分配比按照任一样品的浓度定义为:

$$A = \frac{V_{st}}{v} = \frac{(q'' - q')\rho_b}{(c'' - c')} \quad (16-6)$$

具有恒定 R 或 a 值之单变量吸着或多变量吸着,用于所有双变量时,式16-6中的 A 值对所有的吸着溶质都相同。当不是所有的 R 值均为定值时,这些值将更为近似,可选取平均或有效值代替之。

三、推理和设计

基本的原则为,给定波带中的流出液浓度 c 或 X 值,此值从实验室或装置的运转数据(或从理论取得的数值)得到,浓度值在恒定 v (或 N)值下和 V (或 T)成函数。和无因次及因次变量相关联的物理常数有:颗粒直径 d_p ,分配比 A ,间隙率 ϵ ,横断面积 S ,体积流率 F 和扩散系数 D_i (及粘度 μ), D_p 及(或) D_p 或相应的传质系数。

为了解释,将实验点或者斜率偶合在一起,经理论推导得到图表或方程式,用以测取实用的 N 值,在某些场合,用 T 为刻度标绘之。关于设计,计算程序有赖于那些已知所选方案,以及有待确定事项。吸着剂利用(在透过点 X 的 T)所能得到的经济效果。

表16-2表示三种典型设计的计算程序。在大多数设计中,计划使用循环操作,而再生(经吸着饱和后)必须充分加以分析。对于评价每一个新的试验,可籍助于图16-12成比例地计算 N 值。详细的步骤由后续的章节可清楚地知道。

表 16-2 设计计算程序

给定:流率,透过极限,平衡参数,颗粒直径,扩散系数

列举的变量	透入比 T	NTU参量 N	视接触时间 hs/F	床层容积 v 或 hs	床层吸着量 $hSQ\rho_b$	流体溶质量 $T hSQ\rho_b$ 或 $(V-hS\epsilon)c_0$	流体的体积 $V-hS\epsilon$	运转时间 $\frac{V}{F}$
A. 树脂利用.....	1	2	3	4	5	6	7	8
B. 运转时间.....	4*(9)	8	7	6	5	3	2	1
C. 柱容积.....	4	3	2	1	5	6	7	8

* 假设。

16.1.3 吸着剂材料的物理性质

关于两种主要吸着操作在工业上常用材料的数据,列于表16-3及表16-4中。表16-3列出吸附剂,表16-4却包括阳离子和阴离子交换剂及其它极为相关的材料在内。此类表格的目的有二:协助工程师根据应用的需要,确定合适的材料,并补充一些典型的物理性质数据。

表 16-3 吸附剂的物理性质

物料和应用	颗粒形状*	尺寸范围美 国标准目**	内孔隙率 X%	干填充密度 kg/l	平均孔径直径 nm	表面积 km ² /kg	吸附容量 kg/kg(干)
氧化铝							
低孔隙率(氟化物吸 着剂)	G,S	8~14等	40	0.70	~7	0.32	0.20
高孔隙率(干燥、分 离)	G	各种	57	0.85	4~14	0.25~0.36	0.25~0.33
干燥剂,包裹CaCl ₂	G	3~8等	30	0.91	4.5	0.2	0.22
活性矾土矿	G	8~20等	35	0.85	5		0.1~0.2
色层氧化铝	G,P,S	80~200等	30	0.93			~0.14
硅酸盐和硅酸铝							
分子筛	S,C,P	各种					
3A型(脱水)			~30	0.62~0.68	0.3	0.7	0.21~0.23
4A型(脱水)			~32	0.61~0.67	0.4	~0.7	0.22~0.26
5A型(分离)			~34	0.60~0.66	0.5	~0.7	0.23~0.28
13X型(净化)			~38	0.58~0.64	1.0	~0.6	0.25~0.36
丝光沸石(酸干燥)				0.88	0.3~0.8		0.12
菱沸石(酸干燥)				0.72	0.4~0.5		0.20
硅胶(干燥、分离)	C,P	各种	38~48	0.70~0.82	2~5	0.6~0.8	0.35~0.50
硅酸镁(脱色)	G,P	各种	~33	~0.50		0.18~0.30	
硅酸钙(脱脂肪酸)	P		75~80	~0.20		~0.1	
酸处理粘土(石油、 食品精制)	G	4~8		0.85			
漂白土(同上)	G,P	<200		0.80			
硅藻土	G	各种		0.44~0.50		~0.002	
炭							
壳基	G	各种	60	0.45~0.55	2	0.8~1.6	0.40
木基	G	各种	~80	0.25~0.30		0.8~1.8	~0.70
石油基	G,C	各种	~80	0.45~0.55	2	0.9~1.3	0.3~0.4
泥炭基	G,C,P	各种	~55	0.30~0.50	1~4	0.8~1.6	0.5
褐煤基	G,P	各种	70~85	0.40~0.70	3	0.4~0.7	0.3
烟煤基	G,P	8~30, 12~40	60~80	0.40~0.60	2~4	0.9~1.2	0.4
有机聚合物							
聚苯乙烯(脱除有 机质,即,酚抗 生素的回收)	S	20~60	40~50	0.64	4~9	0.3~0.7	
聚丙烯酯(纸浆污 水净化抗生素回 收)	G,S	20~60	50~55	0.65~0.70	10~25	0.15~0.4	
酚(又酚胺)树脂(脱 色及溶液脱臭)	G	16~50	45	0.42		0.08~0.12	0.45~0.55

* 形状: C 圆柱形, F 纤维薄片, G 颗粒, P 粉, S 球形。

** 美国标准筛尺寸(见括号内), 相应于下列直径mm: (3) 6.73 (4) 4.76 (8) 2.98 (12) 1.68 (14) 1.41 (16) 1.19 (20) 0.841 (30) 0.595 (40) 0.420 (50) 0.297 (60) 0.250 (80) 0.177 (200) 0.074。

注意: 由kg/l转换成lb/ft³乘以6.238×10⁻³; 从km²/kg转换成ft²/lb乘以4.886×10⁻³; 从kg/kg转换成lb/lb乘以1。

对于吸附剂, 密度常以填充密度 ρ_b 或以填充在柱内每单位填充容积内干物料的重量表示。干颗粒密度 ρ_p 对 ρ_b 和填充床外观孔隙率 ϵ 的关系如下式

$$\rho_p(1 - \epsilon) = \rho_b \quad (16-7a)$$

固体的结晶密度 ρ_c 一般在纯化学化合物的特性表中列出。结晶密度对 ρ_p 和颗粒内孔隙率 X 的关系式为

$$\rho_c(1 - X) = \rho_p \quad (16-7b)$$

表 16-4 离子交换材料的物理性质

材 料	颗粒形状*	湿填充密度 (滴干) kg/l	水分含量 (滴干) wt%	因交换的 溶胀率%	最高操作 温度**℃	操作pH值 范围	离子交换容量	
							干当量/kg	湿当量/l
阳离子交换剂: 强酸性								
聚苯乙烯磺酸盐								
均一(凝胶)树脂	S				120~150	0~14		
4%交联度		0.75~0.85	64~70	10~12			5.0~5.5	1.2~1.6
6%交联度		0.76~0.86	58~65	8~10			4.8~5.3	1.3~1.5
8~10%交联度		0.77~0.87	48~60	6~8			4.6~5.1	1.4~1.6
12%交联度		0.78~0.88	44~48	5			4.4~4.9	1.5~2.0
16%交联度		0.79~0.89	42~46	4			4.2~4.6	1.7~2.1
20%交联度		0.80~0.90	40~45	3			3.9~4.2	1.8~2.0
大孔结构								
10~12%交联度	S	0.81	50~55	4~6	120~150	0~14	4.5~5.0	1.5~1.9
磺酸盐酚醛树脂	G	0.74~0.85	50~60	7	50~90	0~14	2.0~2.5	0.7~0.9
磺酸盐煤	G							
阳离子交换剂: 弱酸性								
丙烯酸的(PK5)或甲基 丙烯酸的(PK6)								
均一(凝胶)树脂	S	0.70~0.75	45~50	420~80	120	4~14	8.3~10	3.3~4.0
大孔树脂	S	0.67~0.74	50~55	10~100	120		~8.0	2.5~3.5
酚醛树脂	G	0.70~0.80	~50	10~25	45~65	0~14	2.5	1.0~1.4
聚苯乙烯磷酸盐	G, S	0.74	50~70	<40	120	3~14	6.6	3.0
聚苯乙烯氨基二醋酸盐	S	0.75	68~75	<100	75	3~14	2.9	0.7
聚苯乙烯氨基胍	S	~0.75	58	10	50	1~11	2.8	0.8~0.9
聚苯乙烯硫醇	S	~0.75	40~50		60	1~13	~5	2.0
纤维素								
磷酸盐	F						~7.0	
亚甲基羧酸盐	F, D, G						~7.0	
绿砂(硅酸铁盐)	G	1.3	1~5	0	60	6~8	0.14	0.18
沸石(硅酸铝)	G	0.85~0.95	40~45	0	60	6~8	0.14	0.75
钨酸钙	G	1.15~1.25	~5	0	>150	2~10	1.2	1.0
阴离子交换剂: 强碱性								
聚苯乙烯基								
三甲基苯基铵(类型 I)								
均一的8%Cl	S	0.70	46~50	~20	60~80	0~14	3.4~3.8	1.3~1.5
大孔的, 11%Cl	S	0.67	57~60	15~20	60~80	0~14	3.4	1.0
二甲基羧基乙基铵(类型 II)								
均一的, 8%Cl	S	0.71	~42	15~20	40~80	0~14	3.8~4.0	1.2
大孔的, 10%Cl	S	0.67	~55	12~15	40~80	0~14	3.8	1.1
丙烯酸基								
均一的(凝胶)	S	0.72	~70	~15	40~80	0~14	~5.0	1.0~1.2
大孔的	S	0.67	~60	~12	40~80	0~14	3.0~3.3	0.8~0.9
纤维素基								
乙基三甲基铵	F				100	4~10	0.62	
三乙基羧基丙基铵					100	4~10	0.57	
阴离子交换树脂(中等碱 度)(PK11)								
聚苯乙烯基	S	0.75	~50	15~25	65	0~10	4.8	1.8