

# 第 15 篇 萃取及浸取

主稿人 陈家镛 中国科学院化工冶金研究所 研究员 中国科学院 院士  
编写人 杨守志 中国科学院化工冶金研究所 研究员  
柯家骏 中国科学院化工冶金研究所 研究员  
刘会洲 中国科学院化工冶金研究所 研究员  
鲍晓军 石油大学 (北京) 教授

|       |                               |       |       |                  |       |
|-------|-------------------------------|-------|-------|------------------|-------|
| 1     | 概论                            | 15-4  | 2.2.3 | 三元体系平衡数据的预测      | 15-31 |
| 1.1   | 液-液萃取过程                       | 15-4  | 2.3   | 电解质溶液的活度系数       | 15-31 |
| 1.2   | 液-液萃取应用于有机物质的分离               | 15-4  | 2.3.1 | 单一电解质溶液的活度系数     | 15-31 |
| 1.3   | 液-液萃取应用于无机物质的分离               | 15-4  | 2.3.2 | 混合电解质溶液的活度系数     | 15-32 |
| 1.4   | 液-液萃取的常用术语                    | 15-6  | 符号说明  |                  | 15-32 |
| 1.4.1 | 分配比                           | 15-6  | 参考文献  |                  | 15-33 |
| 1.4.2 | 相比                            | 15-7  | 3     | 伴有化学反应的萃取        | 15-34 |
| 1.4.3 | 分配常数                          | 15-7  | 3.1   | 伴有化学反应萃取的相平衡     | 15-34 |
| 1.4.4 | 分离系数                          | 15-7  | 3.2   | 反应速率对过程速率的影响     | 15-35 |
| 1.4.5 | 萃合系数                          | 15-7  | (1)   | 极慢反应             | 15-35 |
| 1.4.6 | 萃取率                           | 15-7  | (2)   | 慢反应              | 15-35 |
| 1.4.7 | 饱和度                           | 15-8  | (3)   | 快反应              | 15-36 |
| 1.4.8 | 半萃取 pH 值                      | 15-8  | (4)   | 瞬间反应             | 15-36 |
| 1.5   | 萃取剂的选择                        | 15-8  | (5)   | 可逆反应             | 15-36 |
| 参考文献  |                               | 15-18 | 3.3   | 金属萃取             | 15-36 |
| 2     | 萃取相平衡                         | 15-18 | 3.3.1 | 酸性萃取剂            | 15-36 |
| 2.1   | 三元及多元体系液-液系统的相平衡              | 15-19 | 3.3.2 | 阴离子交换萃取剂         | 15-40 |
| 2.1.1 | 表示方法                          | 15-19 | 3.3.3 | 溶剂化萃取剂           | 15-41 |
| 2.1.2 | 测定方法                          | 15-22 | 3.3.4 | 协同萃取             | 15-44 |
| 2.1.3 | 相平衡数据的检索                      | 15-22 | 3.3.5 | 金属萃取的速率          | 15-46 |
| 2.2   | 非电解质溶液的活度系数                   | 15-22 | 符号说明  |                  | 15-47 |
| 2.2.1 | 常用的关联方法                       | 15-23 | 参考文献  |                  | 15-48 |
| (1)   | Margules 方程                   | 15-23 | 4     | 相间传质及相间接触模型      | 15-49 |
| (2)   | Van Laar 方程                   | 15-23 | 4.1   | 相间传质模型及界面现象      | 15-49 |
| (3)   | Scatchard-Hildebrand (S-H) 方程 | 15-24 | 4.1.1 | 传质系数             | 15-49 |
| (4)   | Wilson 方程                     | 15-25 | 4.1.2 | 相间传质模型           | 15-50 |
| (5)   | NRTL 方程                       | 15-26 | 4.1.3 | 界面现象及其对相间传质过程的影响 | 15-50 |
| (6)   | UNIQUAC 方程                    | 15-27 | (1)   | 相界面阻力            | 15-50 |
| (7)   | UNIFAC 方程                     | 15-28 | (2)   | 界面现象与界面不稳定性      | 15-50 |
| 2.2.2 | 参数估值方法                        | 15-31 |       |                  |       |

|                          |                         |       |                             |                           |       |
|--------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------|---------------------------|-------|
| (3)                      | 界面湍动对液-液萃取过程的影响 .....   | 15-52 | (3)                         | 矩阵解法 .....                | 15-77 |
| (4)                      | 表面活性剂的作用 .....          | 15-52 | 5.5                         | 带有回流的分馏萃取 .....           | 15-78 |
| 4.2                      | 液-液接触的流体力学 .....        | 15-52 | 5.5.1                       | 带有回流的分馏萃取流程 .....         | 15-78 |
| 4.2.1                    | 分散相、连续相、分散相滞留率 .....    | 15-52 | 5.5.2                       | 溶剂部分互溶的萃取体系的矩阵解法 .....    | 15-78 |
| 4.2.2                    | 通量与液泛 .....             | 15-53 | 5.5.3                       | 溶剂不互溶的萃取体系 .....          | 15-79 |
| 4.2.3                    | 液滴和液滴群运动 .....          | 15-53 | (1)                         | McCabe-Thiele 图解法 .....   | 15-79 |
| (1)                      | 液滴形状和液滴直径 .....         | 15-53 | (2)                         | 代数公式法 .....               | 15-79 |
| (2)                      | 液滴的形成 .....             | 15-57 | <b>符号说明</b> .....           | 15-80                     |       |
| (3)                      | 单液滴运动 .....             | 15-58 | <b>参考文献</b> .....           | 15-81                     |       |
| (4)                      | 液滴群运动 .....             | 15-58 | <b>6 微分逆流萃取及其计算</b> .....   | 15-81                     |       |
| 4.3                      | 单液滴及液滴群传质 .....         | 15-59 | 6.1                         | 理想的微分逆流萃取：活塞流模型 .....     | 15-81 |
| 4.3.1                    | 液滴形成阶段的传质 .....         | 15-59 | 6.1.1                       | 活塞流模型 .....               | 15-82 |
| 4.3.2                    | 液滴自由运动阶段的传质 .....       | 15-59 | 6.1.2                       | 传质单元数和传质单元高度 .....        | 15-82 |
| (1)                      | 液滴内的传质系数 .....          | 15-59 | 6.1.3                       | 单分子单向扩散时 $NTU$ 的近似表 ..... | 15-82 |
| (2)                      | 液滴外的传质系数 .....          | 15-60 | 达式 .....                    | 15-82                     |       |
| 4.3.3                    | 液滴凝聚阶段的传质 .....         | 15-60 | 6.2                         | 微分逆流接触中两相流动的非理想性 .....    | 15-83 |
| 4.4                      | 液滴的分散和凝聚 .....          | 15-60 | 6.3                         | 微分逆流接触萃取过程的计算：非相 .....    | 15-83 |
| 4.4.1                    | 液滴的分散和凝聚现象 .....        | 15-60 | 相互作用模型 .....                | 15-83                     |       |
| 4.4.2                    | 液-液分散动力学及其对传质的影响 .....  | 15-61 | 6.3.1                       | 返流模型 .....                | 15-83 |
| <b>符号说明</b> .....        | 15-62                   |       | 6.3.2                       | 轴向扩散模型 .....              | 15-84 |
| <b>参考文献</b> .....        | 15-64                   |       | (1)                         | 方程 .....                  | 15-84 |
| <b>5 逐级萃取过程及计算</b> ..... | 15-66                   |       | (2)                         | 扩散方程的近似解法 .....           | 15-85 |
| 5.1                      | 逐级萃取过程分析 .....          | 15-66 | 6.3.3                       | 组合模型 .....                | 15-88 |
| 5.1.1                    | 平衡级萃取 .....             | 15-66 | 6.3.4                       | 返流模型和扩散模型的一致性 .....       | 15-89 |
| 5.1.2                    | 单级萃取过程分析——逐级萃取计算 .....  | 15-66 | 6.4.                        | 相互作用模型 .....              | 15-89 |
| 方法简介 .....               | 15-66                   |       | 6.4.1                       | 相互作用模型概述 .....            | 15-89 |
| (1)                      | 三角形图解法 .....            | 15-66 | 6.4.2                       | 相互作用模型 .....              | 15-90 |
| (2)                      | Janecke 图解法 .....       | 15-66 | (1)                         | 群体平衡方程 .....              | 15-90 |
| (3)                      | McCabe-Thiele 图解法 ..... | 15-67 | (2)                         | Monte-Carlo 模拟方法 .....    | 15-90 |
| (4)                      | 代数公式法 .....             | 15-67 | <b>符号说明</b> .....           | 15-91                     |       |
| 5.2                      | 多级错流萃取 .....            | 15-68 | <b>参考文献</b> .....           | 15-92                     |       |
| 5.2.1                    | 多级错流萃取流程 .....          | 15-68 | <b>7 萃取设备及其设计计算方法</b> ..... | 15-93                     |       |
| 5.2.2                    | 溶剂部分互溶体系的矩阵解法 .....     | 15-68 | 7.1                         | 概论 .....                  | 15-93 |
| 5.2.3                    | 溶剂互不相溶的体系 .....         | 15-69 | 7.1.1                       | 液-液萃取设备的分类 .....          | 15-93 |
| 5.3                      | 多级逆流萃取 .....            | 15-70 | 7.1.2                       | 液-液萃取设备的评价与选择 .....       | 15-93 |
| 5.3.1                    | 多级逆流萃取流程 .....          | 15-70 | 7.2                         | 混合-澄清器 .....              | 15-94 |
| 5.3.2                    | 溶剂部分互溶体系的矩阵解法 .....     | 15-70 | 7.2.1                       | 混合-澄清器的特点 .....           | 15-94 |
| 5.3.3                    | 溶剂互不相溶的体系 .....         | 15-70 | 7.2.2                       | 几种典型的混合-澄清槽 .....         | 15-94 |
| (1)                      | McCabe-Thiele 图解法 ..... | 15-70 | (1)                         | 水平式的混合澄清槽 .....           | 15-94 |
| (2)                      | 代数公式法 .....             | 15-71 | (2)                         | 塔式混合澄清槽 .....             | 15-96 |
| (3)                      | 矩阵解法 .....              | 15-72 | (3)                         | 组合式混合澄清器 .....            | 15-96 |
| 5.4                      | 分馏萃取 .....              | 15-73 | 7.2.3                       | 混合澄清器的放大和设计 .....         | 15-97 |
| 5.4.1                    | 分馏萃取流程 .....            | 15-73 | (1)                         | 混合器的设计和放大 .....           | 15-97 |
| 5.4.2                    | 溶剂部分互溶体系的矩阵解法 .....     | 15-73 | (2)                         | 澄清器的设计和放大 .....           | 15-98 |
| 5.4.3                    | 溶剂互不相溶的萃取体系 .....       | 15-73 | 7.3                         | 无机械搅拌的萃取柱 .....           | 15-99 |
| (1)                      | McCabe-Thiele 图解法 ..... | 15-73 |                             |                           |       |
| (2)                      | 代数公式法 .....             | 15-77 |                             |                           |       |

|       |                         |        |
|-------|-------------------------|--------|
| 7.3.1 | 喷淋柱 .....               | 15-99  |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-99  |
| (2)   | 设计方法 .....              | 15-99  |
| 7.3.2 | 填料柱 .....               | 15-100 |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-100 |
| (2)   | 设计计算 .....              | 15-100 |
| (3)   | 填料柱的放大 .....            | 15-101 |
| 7.3.3 | 筛板柱 .....               | 15-101 |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-101 |
| (2)   | 筛板的设计 .....             | 15-101 |
| (3)   | 柱高计算 .....              | 15-102 |
| (4)   | 筛板柱的放大 .....            | 15-102 |
| 7.4   | 脉冲筛板萃取柱 .....           | 15-102 |
| 7.4.1 | 脉冲筛板萃取柱的结构及特点 .....     | 15-102 |
| 7.4.2 | 脉冲筛板萃取柱的设计计算 .....      | 15-103 |
| (1)   | 分散相滞留率和液泛 .....         | 15-103 |
| (2)   | 传质速率 .....              | 15-103 |
| (3)   | 轴向混合 .....              | 15-103 |
| 7.5   | 带有机搅拌的萃取柱 .....         | 15-104 |
| 7.5.1 | 往复振动筛板萃取柱 (RPC) .....   | 15-104 |
| (1)   | 结构和特点 .....             | 15-104 |
| (2)   | 设计 .....                | 15-104 |
| (3)   | 小试 .....                | 15-105 |
| (4)   | 放大方法 .....              | 15-106 |
| 7.5.2 | 转盘萃取柱 (RDC) .....       | 15-106 |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-106 |
| (2)   | 设计放大 .....              | 15-107 |
| 7.6   | 离心萃取器 .....             | 15-108 |
| 7.6.1 | 离心萃取器的特点和分类 .....       | 15-108 |
| 7.6.2 | 几种典型的离心萃取器 .....        | 15-108 |
| (1)   | Podbielniak 离心萃取器 ..... | 15-108 |
| (2)   | SRL 型单级离心萃取器 .....      | 15-109 |
| (3)   | Luwesta 离心萃取器 .....     | 15-109 |
| 7.7   | 静态混合器 .....             | 15-110 |
| 符号说明  | .....                   | 15-110 |
| 参考文献  | .....                   | 15-111 |
| 8     | 其他萃取技术 .....            | 15-113 |
| 8.1   | 液膜萃取 .....              | 15-113 |
| 8.1.1 | 乳状液型液膜 .....            | 15-113 |
| 8.1.2 | 支撑体型液膜 .....            | 15-114 |
| 8.1.3 | 液膜分离技术的应用 .....         | 15-115 |
| 8.2   | 超临界萃取 .....             | 15-116 |
| 8.3   | 反向胶团萃取 .....            | 15-119 |
| 8.4   | 其他萃取技术 .....            | 15-119 |
| 参考文献  | .....                   | 15-120 |
| 9     | 固-液浸取 .....             | 15-122 |
| 9.1   | 概论 .....                | 15-122 |

|        |                                   |        |
|--------|-----------------------------------|--------|
| 9.2    | 浸取前固体的预处理 .....                   | 15-123 |
| 9.2.1  | 物理预处理 .....                       | 15-123 |
| 9.2.2  | 化学预处理 .....                       | 15-123 |
| 9.3    | 溶剂的选择 .....                       | 15-123 |
| 参考文献   | .....                             | 15-123 |
| 10     | 浸取过程的速率分析 .....                   | 15-123 |
| 10.1   | 总论 .....                          | 15-123 |
| 10.2   | 颗粒外的液膜边界层及溶质在颗粒内的有效扩散系数 .....     | 15-124 |
| 10.2.1 | 颗粒外的液膜边界层及传质系数 .....              | 15-124 |
| 10.2.2 | 溶质在颗粒内的有效扩散系数 .....               | 15-124 |
| 10.2.3 | 溶质在颗粒表面上的吸附 .....                 | 15-124 |
| 10.3   | 化学反应对过程速率的影响 .....                | 15-124 |
| 10.3.1 | 收缩核心模型 .....                      | 15-125 |
| 10.3.2 | 均匀模型 .....                        | 15-126 |
| 10.3.3 | 浸取速度控制步骤的判别 .....                 | 15-128 |
| 参考文献   | .....                             | 15-129 |
| 11     | 固液浸取设备 .....                      | 15-129 |
| 11.1   | 固体处于静止状态的浸取设备<br>(喷淋及渗透型浸取) ..... | 15-129 |
| 11.1.1 | 堆浸 .....                          | 15-129 |
| 11.1.2 | 地下浸出 .....                        | 15-129 |
| 11.1.3 | 渗滤浸取器 .....                       | 15-131 |
| 11.1.4 | 油脂工业用连续渗滤浸取器 .....                | 15-131 |
| 11.2   | 固体颗粒处于悬浮状态 (浆料) 的浸取器 .....        | 15-133 |
| 11.2.1 | 机械搅拌浸取槽 .....                     | 15-133 |
| 11.2.2 | 气体提升式浸取器 (Pachuca 槽) .....        | 15-134 |
| 11.2.3 | 液-固流态化浸取器 .....                   | 15-136 |
| 11.2.4 | 管道式浸取器 .....                      | 15-136 |
| 11.2.5 | 其他类型的浸取器 .....                    | 15-137 |
| 参考文献   | .....                             | 15-138 |
| 12     | 浸取过程的设计及工艺计算 .....                | 15-138 |
| 12.1   | 浸取反应器的设计 .....                    | 15-138 |
| 12.1.1 | 浸取反应器的型式及操作状况 .....               | 15-138 |
| 12.1.2 | 液-固浸取反应器的设计模型 .....               | 15-139 |
| 12.2   | 浸取级数及工艺计算 .....                   | 15-141 |
| 12.2.1 | 工艺计算原理 .....                      | 15-141 |
| 12.2.2 | 多级连续逆流浸取、分离及洗涤 .....              | 15-141 |
| 12.2.3 | 代数法工艺计算 .....                     | 15-142 |
| 12.2.4 | 解析法工艺计算 .....                     | 15-142 |
| (1)    | 多级错流浸取 .....                      | 15-142 |
| (2)    | 多级逆流浸取 .....                      | 15-143 |
| 12.2.5 | 图解法工艺计算 .....                     | 15-148 |
| 符号说明   | .....                             | 15-151 |
| 参考文献   | .....                             | 15-152 |
| 一般参考文献 | .....                             | 15-152 |

# 第 15 篇 萃取及浸取

主稿人 陈家镛 中国科学院化工冶金研究所 研究员 中国科学院 院士  
编写人 杨守志 中国科学院化工冶金研究所 研究员  
柯家骏 中国科学院化工冶金研究所 研究员  
刘会洲 中国科学院化工冶金研究所 研究员  
鲍晓军 石油大学 (北京) 教授

|       |                               |       |       |                  |       |
|-------|-------------------------------|-------|-------|------------------|-------|
| 1     | 概论                            | 15-4  | 2.2.3 | 三元体系平衡数据的预测      | 15-31 |
| 1.1   | 液-液萃取过程                       | 15-4  | 2.3   | 电解质溶液的活度系数       | 15-31 |
| 1.2   | 液-液萃取应用于有机物质的分离               | 15-4  | 2.3.1 | 单一电解质溶液的活度系数     | 15-31 |
| 1.3   | 液-液萃取应用于无机物质的分离               | 15-4  | 2.3.2 | 混合电解质溶液的活度系数     | 15-32 |
| 1.4   | 液-液萃取的常用术语                    | 15-6  | 符号说明  |                  | 15-32 |
| 1.4.1 | 分配比                           | 15-6  | 参考文献  |                  | 15-33 |
| 1.4.2 | 相比                            | 15-7  | 3     | 伴有化学反应的萃取        | 15-34 |
| 1.4.3 | 分配常数                          | 15-7  | 3.1   | 伴有化学反应萃取的相平衡     | 15-34 |
| 1.4.4 | 分离系数                          | 15-7  | 3.2   | 反应速率对过程速率的影响     | 15-35 |
| 1.4.5 | 萃合系数                          | 15-7  | (1)   | 极慢反应             | 15-35 |
| 1.4.6 | 萃取率                           | 15-7  | (2)   | 慢反应              | 15-35 |
| 1.4.7 | 饱和度                           | 15-8  | (3)   | 快反应              | 15-36 |
| 1.4.8 | 半萃取 pH 值                      | 15-8  | (4)   | 瞬间反应             | 15-36 |
| 1.5   | 萃取剂的选择                        | 15-8  | (5)   | 可逆反应             | 15-36 |
| 参考文献  |                               | 15-18 | 3.3   | 金属萃取             | 15-36 |
| 2     | 萃取相平衡                         | 15-18 | 3.3.1 | 酸性萃取剂            | 15-36 |
| 2.1   | 三元及多元体系液-液系统的相平衡              | 15-19 | 3.3.2 | 阴离子交换萃取剂         | 15-40 |
| 2.1.1 | 表示方法                          | 15-19 | 3.3.3 | 溶剂化萃取剂           | 15-41 |
| 2.1.2 | 测定方法                          | 15-22 | 3.3.4 | 协同萃取             | 15-44 |
| 2.1.3 | 相平衡数据的检索                      | 15-22 | 3.3.5 | 金属萃取的速率          | 15-46 |
| 2.2   | 非电解质溶液的活度系数                   | 15-22 | 符号说明  |                  | 15-47 |
| 2.2.1 | 常用的关联方法                       | 15-23 | 参考文献  |                  | 15-48 |
| (1)   | Margules 方程                   | 15-23 | 4     | 相间传质及相间接触模型      | 15-49 |
| (2)   | Van Laar 方程                   | 15-23 | 4.1   | 相间传质模型及界面现象      | 15-49 |
| (3)   | Scatchard-Hildebrand (S-H) 方程 | 15-24 | 4.1.1 | 传质系数             | 15-49 |
| (4)   | Wilson 方程                     | 15-25 | 4.1.2 | 相间传质模型           | 15-50 |
| (5)   | NRTL 方程                       | 15-26 | 4.1.3 | 界面现象及其对相间传质过程的影响 | 15-50 |
| (6)   | UNIQUAC 方程                    | 15-27 | (1)   | 相界面阻力            | 15-50 |
| (7)   | UNIFAC 方程                     | 15-28 | (2)   | 界面现象与界面不稳定性      | 15-50 |
| 2.2.2 | 参数估值方法                        | 15-31 |       |                  |       |

|                              |       |                                 |       |
|------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| (3) 界面湍动对液-液萃取过程的影响 .....    | 15-52 | (3) 矩阵解法 .....                  | 15-77 |
| (4) 表面活性剂的作用 .....           | 15-52 | 5.5 带有回流的分馏萃取 .....             | 15-78 |
| 4.2 液-液接触的流体力学 .....         | 15-52 | 5.5.1 带有回流的分馏萃取流程 .....         | 15-78 |
| 4.2.1 分散相、连续相、分散相滞留率 .....   | 15-52 | 5.5.2 溶剂部分互溶的萃取体系的矩阵解法 .....    | 15-78 |
| 4.2.2 通量与液泛 .....            | 15-53 | 5.5.3 溶剂不互溶的萃取体系 .....          | 15-79 |
| 4.2.3 液滴和液滴群运动 .....         | 15-53 | (1) McCabe-Thiele 图解法 .....     | 15-79 |
| (1) 液滴形状和液滴直径 .....          | 15-53 | (2) 代数公式法 .....                 | 15-79 |
| (2) 液滴的形成 .....              | 15-57 | <b>符号说明</b> .....               | 15-80 |
| (3) 单液滴运动 .....              | 15-58 | <b>参考文献</b> .....               | 15-81 |
| (4) 液滴群运动 .....              | 15-58 | <b>6 微分逆流萃取及其计算</b> .....       | 15-81 |
| 4.3 单液滴及液滴群传质 .....          | 15-59 | 6.1 理想的微分逆流萃取：活塞流模型 .....       | 15-81 |
| 4.3.1 液滴形成阶段的传质 .....        | 15-59 | 6.1.1 活塞流模型 .....               | 15-82 |
| 4.3.2 液滴自由运动阶段的传质 .....      | 15-59 | 6.1.2 传质单元数和传质单元高度 .....        | 15-82 |
| (1) 液滴内的传质系数 .....           | 15-59 | 6.1.3 单分子单向扩散时 $NTU$ 的近似表 ..... | 15-82 |
| (2) 液滴外的传质系数 .....           | 15-60 | 6.2 微分逆流接触中两相流动的非理想性 .....      | 15-83 |
| 4.3.3 液滴凝聚阶段的传质 .....        | 15-60 | 6.3 微分逆流接触萃取过程的计算：非相 .....      | 15-83 |
| 4.4 液滴的分散和凝聚 .....           | 15-60 | 相互作用模型 .....                    | 15-83 |
| 4.4.1 液滴的分散和凝聚现象 .....       | 15-60 | 6.3.1 返流模型 .....                | 15-83 |
| 4.4.2 液-液分散动力学及其对传质的影响 ..... | 15-61 | 6.3.2 轴向扩散模型 .....              | 15-84 |
| <b>符号说明</b> .....            | 15-62 | (1) 方程 .....                    | 15-84 |
| <b>参考文献</b> .....            | 15-64 | (2) 扩散方程的近似解法 .....             | 15-85 |
| <b>5 逐级萃取过程及计算</b> .....     | 15-66 | 6.3.3 组合模型 .....                | 15-88 |
| 5.1 逐级萃取过程分析 .....           | 15-66 | 6.3.4 返流模型和扩散模型的一致性 .....       | 15-89 |
| 5.1.1 平衡级萃取 .....            | 15-66 | 6.4. 相互作用模型 .....               | 15-89 |
| 5.1.2 单级萃取过程分析——逐级萃取计算 ..... | 15-66 | 6.4.1 相互作用模型概述 .....            | 15-89 |
| 方法简介 .....                   | 15-66 | 6.4.2 相互作用模型 .....              | 15-90 |
| (1) 三角形图解法 .....             | 15-66 | (1) 群体平衡方程 .....                | 15-90 |
| (2) Janecke 图解法 .....        | 15-66 | (2) Monte-Carlo 模拟方法 .....      | 15-90 |
| (3) McCabe-Thiele 图解法 .....  | 15-67 | <b>符号说明</b> .....               | 15-91 |
| (4) 代数公式法 .....              | 15-67 | <b>参考文献</b> .....               | 15-92 |
| 5.2 多级错流萃取 .....             | 15-68 | <b>7 萃取设备及其设计计算方法</b> .....     | 15-93 |
| 5.2.1 多级错流萃取流程 .....         | 15-68 | 7.1 概论 .....                    | 15-93 |
| 5.2.2 溶剂部分互溶体系的矩阵解法 .....    | 15-68 | 7.1.1 液-液萃取设备的分类 .....          | 15-93 |
| 5.2.3 溶剂互不相溶的体系 .....        | 15-69 | 7.1.2 液-液萃取设备的评价与选择 .....       | 15-93 |
| 5.3 多级逆流萃取 .....             | 15-70 | 7.2 混合-澄清器 .....                | 15-94 |
| 5.3.1 多级逆流萃取流程 .....         | 15-70 | 7.2.1 混合-澄清器的特点 .....           | 15-94 |
| 5.3.2 溶剂部分互溶体系的矩阵解法 .....    | 15-70 | 7.2.2 几种典型的混合-澄清槽 .....         | 15-94 |
| 5.3.3 溶剂互不相溶的体系 .....        | 15-70 | (1) 水平式的混合澄清槽 .....             | 15-94 |
| (1) McCabe-Thiele 图解法 .....  | 15-70 | (2) 塔式混合澄清槽 .....               | 15-96 |
| (2) 代数公式法 .....              | 15-71 | (3) 组合式混合澄清器 .....              | 15-96 |
| (3) 矩阵解法 .....               | 15-72 | 7.2.3 混合澄清器的放大和设计 .....         | 15-97 |
| 5.4 分馏萃取 .....               | 15-73 | (1) 混合器的设计和放大 .....             | 15-97 |
| 5.4.1 分馏萃取流程 .....           | 15-73 | (2) 澄清器的设计和放大 .....             | 15-98 |
| 5.4.2 溶剂部分互溶体系的矩阵解法 .....    | 15-73 | 7.3 无机械搅拌的萃取柱 .....             | 15-99 |
| 5.4.3 溶剂互不相溶的萃取体系 .....      | 15-73 |                                 |       |
| (1) McCabe-Thiele 图解法 .....  | 15-73 |                                 |       |
| (2) 代数公式法 .....              | 15-77 |                                 |       |

|       |                         |        |
|-------|-------------------------|--------|
| 7.3.1 | 喷淋柱 .....               | 15-99  |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-99  |
| (2)   | 设计方法 .....              | 15-99  |
| 7.3.2 | 填料柱 .....               | 15-100 |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-100 |
| (2)   | 设计计算 .....              | 15-100 |
| (3)   | 填料柱的放大 .....            | 15-101 |
| 7.3.3 | 筛板柱 .....               | 15-101 |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-101 |
| (2)   | 筛板的设计 .....             | 15-101 |
| (3)   | 柱高计算 .....              | 15-102 |
| (4)   | 筛板柱的放大 .....            | 15-102 |
| 7.4   | 脉冲筛板萃取柱 .....           | 15-102 |
| 7.4.1 | 脉冲筛板萃取柱的结构及特点 .....     | 15-102 |
| 7.4.2 | 脉冲筛板萃取柱的设计计算 .....      | 15-103 |
| (1)   | 分散相滞留率和液泛 .....         | 15-103 |
| (2)   | 传质速率 .....              | 15-103 |
| (3)   | 轴向混合 .....              | 15-103 |
| 7.5   | 带有机搅拌的萃取柱 .....         | 15-104 |
| 7.5.1 | 往复振动筛板萃取柱 (RPC) .....   | 15-104 |
| (1)   | 结构和特点 .....             | 15-104 |
| (2)   | 设计 .....                | 15-104 |
| (3)   | 小试 .....                | 15-105 |
| (4)   | 放大方法 .....              | 15-106 |
| 7.5.2 | 转盘萃取柱 (RDC) .....       | 15-106 |
| (1)   | 结构及特点 .....             | 15-106 |
| (2)   | 设计放大 .....              | 15-107 |
| 7.6   | 离心萃取器 .....             | 15-108 |
| 7.6.1 | 离心萃取器的特点和分类 .....       | 15-108 |
| 7.6.2 | 几种典型的离心萃取器 .....        | 15-108 |
| (1)   | Podbielniak 离心萃取器 ..... | 15-108 |
| (2)   | SRL 型单级离心萃取器 .....      | 15-109 |
| (3)   | Luwesta 离心萃取器 .....     | 15-109 |
| 7.7   | 静态混合器 .....             | 15-110 |
| 符号说明  | .....                   | 15-110 |
| 参考文献  | .....                   | 15-111 |
| 8     | 其他萃取技术 .....            | 15-113 |
| 8.1   | 液膜萃取 .....              | 15-113 |
| 8.1.1 | 乳状液型液膜 .....            | 15-113 |
| 8.1.2 | 支撑体型液膜 .....            | 15-114 |
| 8.1.3 | 液膜分离技术的应用 .....         | 15-115 |
| 8.2   | 超临界萃取 .....             | 15-116 |
| 8.3   | 反向胶团萃取 .....            | 15-119 |
| 8.4   | 其他萃取技术 .....            | 15-119 |
| 参考文献  | .....                   | 15-120 |
| 9     | 固-液浸取 .....             | 15-122 |
| 9.1   | 概论 .....                | 15-122 |

|        |                                   |        |
|--------|-----------------------------------|--------|
| 9.2    | 浸取前固体的预处理 .....                   | 15-123 |
| 9.2.1  | 物理预处理 .....                       | 15-123 |
| 9.2.2  | 化学预处理 .....                       | 15-123 |
| 9.3    | 溶剂的选择 .....                       | 15-123 |
| 参考文献   | .....                             | 15-123 |
| 10     | 浸取过程的速率分析 .....                   | 15-123 |
| 10.1   | 总论 .....                          | 15-123 |
| 10.2   | 颗粒外的液膜边界层及溶质在颗粒内的有效扩散系数 .....     | 15-124 |
| 10.2.1 | 颗粒外的液膜边界层及传质系数 .....              | 15-124 |
| 10.2.2 | 溶质在颗粒内的有效扩散系数 .....               | 15-124 |
| 10.2.3 | 溶质在颗粒表面上的吸附 .....                 | 15-124 |
| 10.3   | 化学应对过程速率的影响 .....                 | 15-124 |
| 10.3.1 | 收缩核心模型 .....                      | 15-125 |
| 10.3.2 | 均匀模型 .....                        | 15-126 |
| 10.3.3 | 浸取速度控制步骤的判别 .....                 | 15-128 |
| 参考文献   | .....                             | 15-129 |
| 11     | 固液浸取设备 .....                      | 15-129 |
| 11.1   | 固体处于静止状态的浸取设备<br>(喷淋及渗透型浸取) ..... | 15-129 |
| 11.1.1 | 堆浸 .....                          | 15-129 |
| 11.1.2 | 地下浸出 .....                        | 15-129 |
| 11.1.3 | 渗滤浸取器 .....                       | 15-131 |
| 11.1.4 | 油脂工业用连续渗滤浸取器 .....                | 15-131 |
| 11.2   | 固体颗粒处于悬浮状态 (浆料) 的浸取器 .....        | 15-133 |
| 11.2.1 | 机械搅拌浸取槽 .....                     | 15-133 |
| 11.2.2 | 气体提升式浸取器 (Pachuca 槽) .....        | 15-134 |
| 11.2.3 | 液-固流态化浸取器 .....                   | 15-136 |
| 11.2.4 | 管道式浸取器 .....                      | 15-136 |
| 11.2.5 | 其他类型的浸取器 .....                    | 15-137 |
| 参考文献   | .....                             | 15-138 |
| 12     | 浸取过程的设计及工艺计算 .....                | 15-138 |
| 12.1   | 浸取反应器的设计 .....                    | 15-138 |
| 12.1.1 | 浸取反应器的型式及操作状况 .....               | 15-138 |
| 12.1.2 | 液-固浸取反应器的设计模型 .....               | 15-139 |
| 12.2   | 浸取级数及工艺计算 .....                   | 15-141 |
| 12.2.1 | 工艺计算原理 .....                      | 15-141 |
| 12.2.2 | 多级连续逆流浸取、分离及洗涤 .....              | 15-141 |
| 12.2.3 | 代数法工艺计算 .....                     | 15-142 |
| 12.2.4 | 解析法工艺计算 .....                     | 15-142 |
| (1)    | 多级错流浸取 .....                      | 15-142 |
| (2)    | 多级逆流浸取 .....                      | 15-143 |
| 12.2.5 | 图解法工艺计算 .....                     | 15-148 |
| 符号说明   | .....                             | 15-151 |
| 参考文献   | .....                             | 15-152 |
| 一般参考文献 | .....                             | 15-152 |

# 1 概 论

## 1.1 液-液萃取过程

液-液萃取,也称溶剂萃取(Solvent Extraction),简称萃取(Extraction),是指两个完全或部分不相溶的液相或溶液接触后,一个液相中的溶质经过物理或化学作用转移到另一液相、或在两相中重新分配的过程,属于分离和提纯物质的重要单元操作之一。也就是说,萃取过程是利用溶液中各组分在两个液相之间的不同分配关系,通过相间传递达到分离、富集及提纯的目的<sup>[1~2]</sup>。萃取按性质分类,有物理萃取和化学萃取。物理萃取是不涉及化学反应的物理传递过程,在石油化工中获得广泛应用。化学萃取主要是应用于金属的提取与分离。如按萃取的对象分类,又可分为有机物萃取和无机物萃取<sup>[3~6]</sup>。

液-液萃取具有处理能力大、选择性好、操作方便、能耗较低和回收率高等优点,并易于连续操作和自动控制。随着一些高新技术发展的需要、以及新型萃取剂的不断出现,液-液萃取在湿法冶金、石油化工、原子能工业、医药和食品工业等部门的应用日益广泛<sup>[7~13]</sup>。

由于萃取技术的推广应用,从而推动了萃取化学的形成与发展。萃取化学是以无机化学、有机化学、物理化学、放射化学、分析与环境化学等学科为基础,主要研究萃取过程的反应机理及有关规律,包括萃取剂的结构与萃取性能的关系,利用紫外-可见光谱、红外光谱、核磁共振谱等现代分析技术研究确定萃合物结构及萃取特性,以及对萃取过程的热力学、各种因素对萃取平衡的影响、动力学和相间传递过程等进行研究<sup>[14~16]</sup>。

液-液萃取的应用与理论目前尚处于发展阶段。国际上已有专业性的溶剂萃取期刊定期出版,而且每2~3年有一次世界性的溶剂萃取国际学术会议在不同国家轮流举行,发表论文的数量和所涉及的应用领域不断扩展,一些新型萃取剂的合成、新萃取工艺的建立、萃取机理和萃取规律性的研究等日益丰富与完善<sup>[17~24]</sup>。

## 1.2 液-液萃取应用于有机物质的分离

液-液萃取过程在分离与提纯有机物质方面获得了广泛的应用。早在1883年就开始用乙酸乙酯之类的溶剂萃取来分离水溶液中的乙酸。1908年,开始将溶剂萃取用于石油工业,采用液态二氧化硫作为溶剂从煤油中除去芳香烃,并逐步推广到许多精制及分离过程<sup>[2]</sup>。今天,溶剂萃取在石油化工方面的应用已很广泛,处理量不断增加。其中,芳香烃与非芳香烃的分离最先是利用Udex流程,以二甘醇或聚乙二醇和水的混合物为溶剂。随后,又开发了用溶剂从石油轻馏分中提取苯-甲苯-二甲苯混合物的分离方法。先后有Shell流程、UOP公司的Udex法、IFP法、Arosolvan法、Formex法等;使用的溶剂分

别为环丁砜、二甘醇(或四甘醇)、二甲基亚砜(DMSO)、*N*-甲基吡咯烷酮(*N*-methyl pyrrolidone)、*N*-甲酰吗啉(*N*-formylmorpholine)等<sup>[25]</sup>。

一个液-液萃取有机物质的实例是:用二甲基亚砜作为溶剂,两段萃取分离芳香烃(见图1-1所示的流程图)。含有芳香烃和各种链烃的混合料液在第一萃取段与二甲基亚砜溶剂逆流接触,然后含芳香烃的萃取液在第二萃取段与轻的返回的碳氢化合物溶剂接触,再经水洗和蒸馏后,分离出芳烃产品。此方法的优点是可在室温下进行萃取操作,该溶剂的稳定性和选择性好、没有毒性和对碳钢设备的腐蚀性小<sup>[25]</sup>。

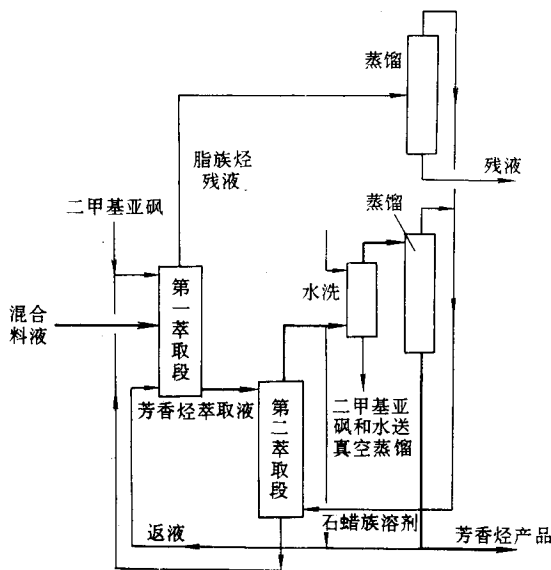


图 1-1 用二甲基亚砜作为溶剂两段萃取分离芳香烃的流程图

此外,溶剂萃取还应用于:在己内酰胺生产中从粗己内酰胺溶液中萃取己内酰胺<sup>[12]</sup>,在烯烃氧化制醋酸中从水溶液中萃取醋酸<sup>[26]</sup>,从 $C_6$ 芳烃异构体混合物中萃取间二甲苯<sup>[27]</sup>,在丙烯氧化制丙烯酸生产中从水溶液中萃取丙烯酸<sup>[28]</sup>,从废水中脱酚,从造纸废水氧化液中萃取香兰素,从分离丁二烯后的 $C_4$ 馏分中萃取异丁烯等<sup>[2]</sup>。

在医药工业中,是以醋酸丁酯为溶剂分三步萃取加工制得青霉素产品<sup>[25]</sup>。在食品工业中,有用磷酸三丁酯从发酵液中萃取柠檬酸<sup>[29]</sup>。

液-液萃取过程在有机化学工业中的应用实例,如表1-1所示。

## 1.3 液-液萃取应用于无机物质的分离

早在19世纪就已开始使用溶剂来萃取某些无机化合物,例如1842年首先用二乙醚萃取硝酸铀酰,1892年

表 1-1 液-液萃取在有机化学工业中的应用

| 料 液                          | 溶 剂                | 萃 取 物              | 方 法        | 参考文献 |
|------------------------------|--------------------|--------------------|------------|------|
| 石油工业：<br>煤油至润滑油沸程范围的石油<br>馏分 | 液体 SO <sub>2</sub> | 芳香族和含硫化合<br>物      | Edeleanu 法 | [32] |
| 石油原料(宽馏分)                    | 二甘醇和水的混合物          | 苯、甲苯和二甲苯           | Udex 法     | [33] |
| 汽油和煤油馏分                      | 环丁砜                | 芳香烃                |            | [34] |
| 催化重整物，直馏汽油或煤油                | 二甲亚砜               | 芳香烃                |            | [35] |
| 润滑油                          | 糠醛<br>N-甲基吡咯烷酮     | 芳香烃                |            | [36] |
| 含重渣油的石蜡                      | 丙烷                 | 石蜡及沥青质             |            | [32] |
| 低粘锭子油和高粘机器油                  | 二氯乙烷<br>二氯甲烷       | 石蜡                 | Di-Me 溶剂法  | [37] |
| 炼焦工业：<br>焦炉油                 | 二甘醇-水              | 芳香烃                | Udex 法     | [38] |
| 粗焦馏物                         | 甲醇水和己烷             | 焦油酸                | 分级萃取       | [39] |
| 商品焦油酸馏分                      | NaOH 液和甲苯          | 2,4-和 2,5-二甲苯<br>酚 | 解离萃取       | [40] |
| 煤气水洗液                        | 重苯溶剂油, N 503       | 酚                  |            | [41] |
| 油脂工业：<br>植物油和动物脂             | 丙烷                 | 不饱和甘油脂和维<br>生素     | Solexol 法  | [42] |
| 植物油                          | 糠醛                 | 不饱和甘油脂             |            | [43] |
| 医药工业：麻黄草浸液                   | 苯，二甲苯              | 麻黄素                |            | [44] |
| 含青霉素发酵液                      | 醋酸丁酯               | 青霉素                |            | [45] |
| 其他：醋酸稀溶液                     | 乙酸乙酯               | 醋酸                 |            | [46] |
| 造纸厂黑液                        | 甲基乙基酮              | 甲酸和乙酸              |            | [47] |
| 催化裂化石油厂废水                    | 轻催化油               | 酚                  | Phenex 法   | [48] |

采用乙醚萃取盐酸中的铁。第二次世界大战期间,由于原子能工业对提取核燃料及分离核裂变产物的迫切需要,从而推动了萃取法的发展,合成了许多性能好的萃取剂,如磷酸三丁酯和各种胺类萃取剂等,主要集中于铀、钍、钷及有关金属的萃取<sup>[2,9]</sup>。

在工业上首先成功地使用萃取法提取及纯化的金属是铀,所用的萃取剂最先是磷酸三丁酯,随后开发出使用磷酸二-(2-乙基己基)酯作为萃取剂和用煤油为稀释剂的 Dapex 流程,以及使用胺类(如三辛胺)为萃取剂的 Amex 流程<sup>[7,8]</sup>。

随后,液-液萃取法广泛应用于提取稀有金属中的分离与富集过程,例如分离稀土以及回收铟、锗、镓、铊、铋、钨、钼、铌等。其中在锗、铋萃取分离中首先研究成功用甲基异丁基酮(MIBK)从含有硫氰酸盐的盐酸溶液中萃取铋,并在工业上应用。其次,使用磷酸三丁酯在硝酸及硝酸盐溶液中进行锗、铋萃取分离,也获得工业

应用。

进入 60 年代,液-液萃取法逐渐扩展应用于有色金属领域,主要由于对铜具有高选择性的羟基肟类萃取剂(如 LIX 系列)和其他新型螯合萃取剂(如 Kelex 系列)等的出现与应用,使萃取过程成为有色金属湿法冶金中一个重要的分离与富集方法<sup>[9]</sup>。只要价格与铜相当或超过铜价格的有色金属,都有可能采用液-液萃取法。图 1-2 所示是 1968 年美国第一个采用萃取-电积法生产铜的示意图。由露天铜矿来的堆浸液含铜 1.8~2.48g/L,除去悬浮物后,经过热交换器使溶液的温度达到 26℃,然后进入萃取槽。所用萃取槽为混合澄清器,有机相含 9.5%LIX-64N,三级萃取后萃余液约含铜 0.4g/L,经回收夹带的有机相后再返回堆浸使用。有机相载荷铜 1.37g/L,用含铜 30g/L 和硫酸 140g/L 的电积尾液进行二级反萃取,反萃取后得到含铜 34g/L 溶液送去电沉积铜,每年约生产出 6000t 阴极铜。



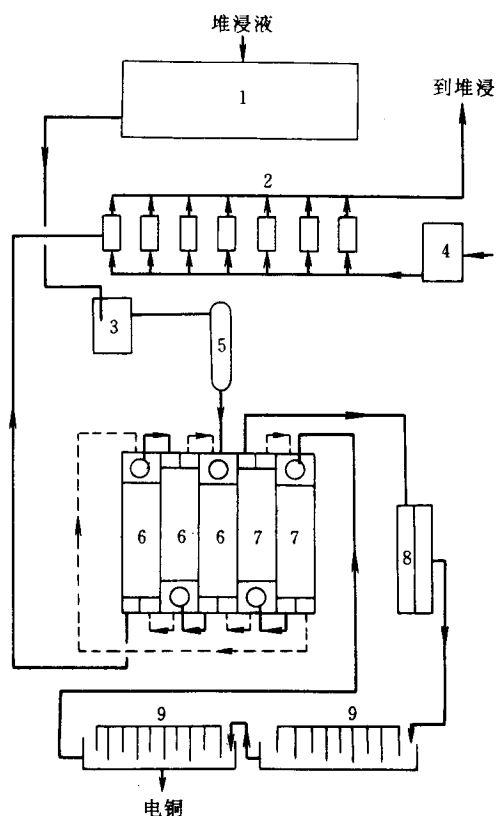


图 1-2 萃取-电积法生产铜的示意流程图

1—浸取液贮槽；2—泵；3—贮槽；4—酸贮槽；  
5—热交换器；6—萃取段；7—反萃取段；8—浮选有机相；  
9—铜电解槽

萃取法在湿法冶金中的另一应用，是开发出一种矿浆直接萃取法，即不用将浸取液与浸取渣分离，而用有机溶剂直接从矿浆中萃取有价金属的工艺。一个实例是：钽铌精矿用氢氟酸-硫酸进行分解后，所得矿浆直接采用仲辛醇矿浆萃取法来提取钽和铌，图 1-3 所示是其原则工艺流程图<sup>[31]</sup>。在箱式混合澄清槽中进行矿浆萃取 3~5 级，然后酸洗 10 级，反萃取铌 8 级，反萃取钽 10 级，矿浆萃取的残液含  $(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_5 < 0.1\text{g/L}$ 。上述矿浆萃取与常规清液萃取比较，可免除浸渣的洗涤和过滤过程、减少需用设备、缩短生产周期、并降低固-液分离时的金属损失，从而提高钽、铌回收率。但在矿浆萃取过程中，需要注意有机相乳化及矿浆夹带有机溶剂损失的问题。

另外，萃取法也应用于提取无机酸，例如从磷矿石浸取液中使用  $\text{C}_4 \sim \text{C}_5$  醇或其他溶剂萃取磷酸<sup>[53]</sup>，以及使用 2-乙基己醇、二元醇或多元醇从硼矿石浸取液中萃取硼<sup>[54]</sup>。

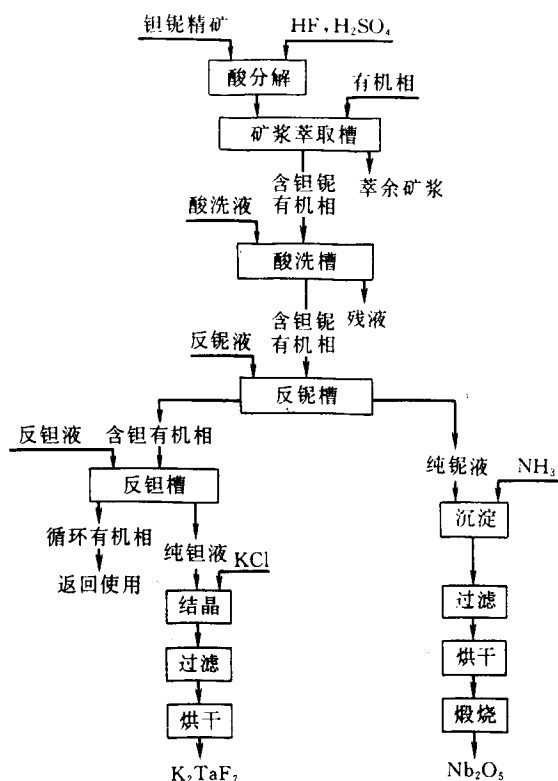


图 1-3 矿浆萃取钽和铌的原则工艺流程图

液-液萃取过程在无机化学工业中的应用实例，如表 1-2 所示。

## 1.4 液-液萃取的常用术语

### 1.4.1 分配比

当萃取体系达到平衡时，被萃取物在含萃取剂相中的总浓度与在原料液相中的总浓度之比称为分配比 (Distribution Ratio)，又称分配系数 (Distribution Coefficient)，用  $D$  表示：

$$D = \frac{(\sum A_1)}{(\sum A_2)} \quad (1-1)$$

分配比表示萃取体系达到平衡后被萃取物在两相的实际分配情况，也表示在一定条件下萃取剂的萃取能力。 $D$  值越大，萃取能力越强，即被萃取物越容易进入萃取剂相中。分配比由实验测定，它不是常数，是随被萃取物、萃取剂及盐析剂等的浓度、原料液相的酸度、稀释剂的性质和萃取温度等条件的改变而变化。

表 1-2 液-液萃取在无机化学工业中的应用

| 料 液                | 萃 取 剂                                           | 萃 取 物                                                                                      | 方 法     | 参考文献    |
|--------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| 低品位铀矿硫酸浸取液         | 仲胺和叔胺                                           | 铀 盐                                                                                        | Amex 法  | [9,50]  |
| 铀矿石浸取液             | 磷酸二(2-乙基己基)酯及磷酸三丁酯<br>煤油液                       | 铀 盐                                                                                        | Dapex 法 | [9,50]  |
| 铀的硝酸溶液             | 20%磷酸三丁酯                                        | UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>                                            | 提纯铀     | [9,50]  |
| 独居石矿浸取液            | TBP-煤油液<br>TBP-二甲苯液<br>二元(十三烷基)胺                | UO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub><br>Th(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub><br>稀土 |         | [49]    |
| 铈铈溶液               | TBP<br>MIBK<br>D2EHPA<br>N235                   | 铈                                                                                          |         | [9,50]  |
| 钽铌混合氟化物            | TBP<br>MIBK<br>三辛胺                              | 钽                                                                                          |         | [9,50]  |
| 氧化铝生产中含铍的碱性溶液      | Kelex-100                                       | 铍                                                                                          |         | [51]    |
| 铜矿石浸取液             | LIX-64N<br>Kelex-100 等                          | 铜                                                                                          |         | [9,25]  |
| 其他:<br>磷矿石分解后的粗磷酸液 | C <sub>4</sub> ~C <sub>5</sub> 醇<br>二丁基亚砷(DBSO) | 磷酸                                                                                         |         | [52,53] |
| 硼镁矿的盐酸浸取液          | 2-乙基己醇                                          | 硼酸                                                                                         |         | [54]    |
| 盐水中的溴盐             | 四溴代乙烷                                           | 溴                                                                                          |         | [53]    |

#### 1.4.2 相 比

在一个萃取体系中，一个液相和另一个液相体积之比称为相比 (Phase Ratio)，用  $R$  表示：

$$R = \frac{V_1}{V_2} \quad (1-2)$$

#### 1.4.3 分配常数

在原料液与萃取剂相两者之间物质的重新分配服从能斯特 (Nernst) 分配定律，即同一物质在两相之间的能斯特分配平衡常数称为分配常数 (Partition Equilibrium Constant 或 Nernst Partition Constant)。例如，整合萃取剂 HA 和萃合物 MAn 的分配系数分别用  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  表示：

$$\lambda_1 = (HA)_1 / (HA)_2; \lambda_2 = (MAn)_1 / (MAn)_2 \quad (1-3)$$

#### 1.4.4 分离系数

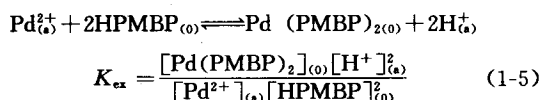
为了定量表示某种萃取剂分离原料液中两种物质的难易程度，对两种被分离的物质在同一萃取体系内和同一条件下分配比的比值，称为分离系数 (Separation Coefficient)，也称为分离因子 (Separation Factor)，常用  $\beta$  表示。令  $A$  和  $B$  分别表示两种物质，则：

$$\beta = \frac{D_A}{D_B} = \frac{[\sum A]_1 [\sum B]_2}{[\sum A]_2 [\sum B]_1} \quad (1-4)$$

$\beta$  值大小表示  $A$ 、 $B$  两物质分离效果的好坏。 $\beta$  值越大，分离效果越好，即萃取剂对某物质的选择性越高。若  $D_A = D_B$ ，即  $\beta = 1$ ，表明用该萃取剂不能把  $A$ 、 $B$  两物质分离开。

#### 1.4.5 萃合常数

将萃取化学反应的平衡常数称为萃合常数 (Extraction Equilibrium Constant)，常以  $K_{ex}$  表示，是两相反应的平衡常数。例如，对下面萃取反应：



式中， $[ ]$  表示平衡浓度。

#### 1.4.6 萃取率

萃取的完全程度用萃取率 (%)  $E$  来表示，即被萃取物质在萃取剂相中的量与在原料液相中的总量的百分比，其计算公式为：

$$E = \frac{[\sum W]_1}{[\sum W]_1 + [\sum W]_2} \times 100\% \quad (1-6)$$

当相比  $R=1$  时,

$$E = \frac{D}{D+1} \times 100\% \quad (1-7)$$

#### 1.4.7 饱和度

在确定的萃取条件下,单位体积含一定浓度萃取剂的有机相所能萃取某物质的极限量,称为实际饱和容量(Practical Saturation Capacity),用 g/L 表示。根据萃取化学反应式计算得到或从萃取平衡曲线求得的容量,称为理论饱和容量(Theoretical Saturation Capacity)。实际饱和容量与理论饱和容量的比值,就称为饱和度(Saturation),用%表示。

在萃取时,希望饱和度尽可能大,使萃取剂得到充分利用,以减少萃取剂的消耗。一般说来,萃取剂越饱和,萃取进入萃取剂相的杂质越少,分离效果越好。所以,饱和度也是表示萃取剂获得充分利用的程度。

#### 1.4.8 半萃取 pH 值

在相比  $R=1$  的条件下,萃取一半(萃取率  $E=50\%$  或分配比  $D=1$ ) 时的 pH 值,称为半萃取 pH 值(pH of Semiextraction),常用  $\text{pH}_{1/2}$  或  $\text{pH}_{0.5}$  表示。

#### 1.5 萃取剂的选择<sup>[30]</sup>

萃取剂通常是有机试剂,其品种繁多,而且不断出现新的品种。用来作为萃取剂的有机试剂,必须具备两个条件。

(1) 萃取剂分子中至少有一个萃取功能基,通过它与被萃取物结合形成萃合物。常见的萃取功能基是 O、N、P、S 等原子,它们一般都有孤对电子,是电子对给体,为配位原子。以氧原子为功能基的萃取剂是最多,可分为磷氧萃取剂 ( $-\text{P}=\ddot{\text{O}}:$ )、碳氧萃取剂 ( $\text{C}=\ddot{\text{O}}:$ )

和  $-\text{C}-\ddot{\text{O}}:-$ 、硫氧萃取剂 ( $-\text{S}=\ddot{\text{O}}:$ ) 等。以氮原子为功能基的萃取剂主要是胺型萃取剂,如伯胺

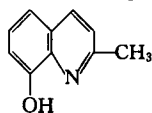
( $\text{R}-\text{N}:$ )、仲胺 ( $\text{R}-\text{N}(\text{R}):$ )、叔胺 ( $\text{R}-\text{N}(\text{R})_2:$ ) 和季胺

盐 ( $\text{R}-\text{N}^+(\text{R})_3\text{X}^-$ )。以硫为功能基的萃取剂,如乙基黄

原酸钾  $[\text{C}_2\text{H}_5-\text{O}-\text{C}(\text{S})_2] \text{K}^+$  等。对于酸性萃取剂,通

常是有机弱酸,具有能与金属离子发生交换的  $\text{H}^+$ ,例如二-2-乙基己基磷酸、环烷酸、三壬基苯磺酸、8-羟基喹啉及其衍生物等,其萃取过程是阳离子交换。此外,还有不少含有两个或两个以上功能基的萃取剂,如噻吩甲酰

三氟丙酮  $\text{C}_6\text{H}_5-\text{C}(=\text{O})-\text{CH}_2-\text{C}(=\text{O})-\text{CF}_3$  和 2-甲基-8-羟基喹啉



, 其中 O 和 N 都是萃取功能基。

(2) 萃取剂分子中必须有相当长的烃链或芳环,其目的是使萃取剂及萃合物易溶于有机相,而难溶于水相。萃取剂的碳链增长,油溶性增大,与被萃取物形成难溶于水而易溶于有机相的萃合物。但如果碳链过长、碳原子数过多、分子量太大,则也不宜用作萃取剂,这是因为它们可能是固体,使用不便,同时萃取容量降低。因此,一般萃取剂的分子量界于 350~500 之间为宜。

工业上选择一种较理想的萃取剂,除具备上述两个必要条件外,还应该满足以下要求。

(1) 选择性好。对要分离的一对或几种物质,其分离系数  $\beta_{A/B}$  或  $\beta_{C/B}$  要大。

(2) 萃取容量大。单位体积或单位重量的萃取剂所能萃取物质的饱和容量要大,这就要求萃取剂具有较多的功能基和适宜的分子量,否则萃取容量就会降低,试剂单耗和成本就会增加。

(3) 化学稳定性强。要求萃取剂不易水解,加热时不易分解,能耐酸、碱、盐、氧化剂或还原剂的作用,对设备的腐蚀性要小,在原子能工业中还要求萃取剂具有较高的抗辐射能力。

(4) 易与原料液相分层,不产生第三相和不发生乳化现象。要求萃取剂在原料液相的溶解度要小,与原料液相的比重差别要大,粘度小和表面张力要大,以便于容易分相和能保证萃取过程正常运行。

(5) 易于反萃取或分离。要求萃取时对被萃取物的结合能力适当,当改变萃取条件时能较容易地将被萃取物从萃取剂相中反萃取到另一液相内,或易于用蒸馏或蒸发等方法将萃取剂相与被萃取物分开。

(6) 操作安全。要求萃取剂无毒性或毒性小,无刺激性,不易燃(闪点要高),难挥发(沸点要高和蒸气压要小)。

(7) 经济性。要求萃取剂的原料来源丰富,最好利用本国原料,合成制备方法容易,价格便宜,在循环使用中损耗要尽量少。

在具体选择萃取剂时,应根据实际情况,综合考虑以上诸因素。

萃取剂按其组成和结构特征,可以分为中性络合萃取剂、酸性萃取剂、离子对(如胺类)萃取剂和螯合萃取

剂。表 1-3 列出各类常用萃取剂，更详细的汇总表可参阅文献[30]。

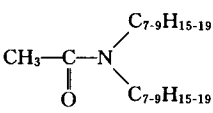
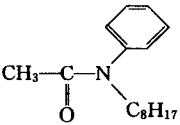
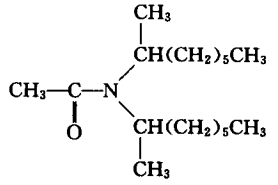
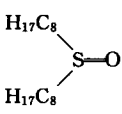
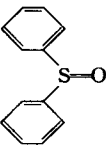
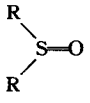
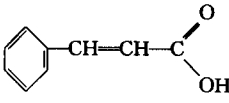
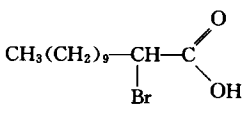
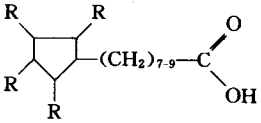
表 1-3 常用萃取剂汇总表

| 类 型                             | 名 称              | 商品名<br>或缩写        | 结 构 式             | 应用实例                                                            |
|---------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 中<br>性<br>含<br>氧<br>萃<br>取<br>剂 | 醇<br>类           | 异戊醇*              | $\text{iAmA}$     | 萃取 $\text{Re(V)}$                                               |
|                                 |                  | 仲辛醇*              | octanol-2         | 分离 $\text{Ta(V)}$ 、 $\text{Nb(V)}$ 萃取、 $\text{Au(III)}$         |
|                                 |                  | $\beta$ -取代伯醇*    | $\text{A}_{1416}$ | 萃取 $\text{Tl(III)}$ 、 $\text{Fe(III)}$                          |
|                                 | 醚<br>类           | 二异丙醚              | $\text{DiPE}$     | 分离 $\text{Fe(III)}$ 、 $\text{Ga(III)}$<br>萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ |
|                                 |                  | (2-乙基己基)<br>(乙基)醚 | $\text{2EHEE}$    | 萃取 $\text{Au}$ 、 $\text{Pt}$                                    |
|                                 | 酮<br>类           | 甲基异丁基酮*           | $\text{MIBK}$     | 分离 $\text{Zr}$ 、 $\text{Hf(V)}$                                 |
|                                 |                  | 环己酮               | $\text{CHD}$      | 分离 $\text{Ta(V)}$ 、 $\text{Nb(V)}$                              |
|                                 | 酯<br>类           | 乙酸乙酯              |                   | 萃取 $\text{Ce(V)}$ 、 $\text{Zr(V)}$                              |
|                                 |                  | 乙酸戊酯              |                   | 分离 $\text{Ti(V)}$ 、 $\text{Zr(V)}$                              |
| 中<br>性<br>含<br>磷<br>萃<br>取<br>剂 | 磷<br>酸<br>酯<br>类 | 甲基膦酸<br>二异戊酯      | $\text{DAMP}$     | 萃取分离稀土(III)                                                     |
|                                 |                  | 甲基膦酸<br>二甲庚酯      | $\text{P350}$     | 分离铜(II)                                                         |

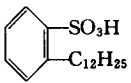
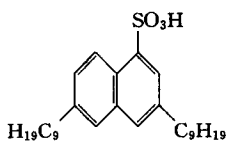
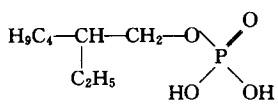
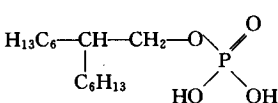
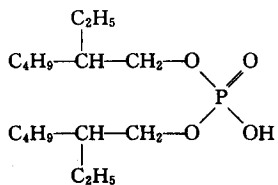
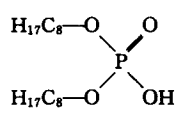
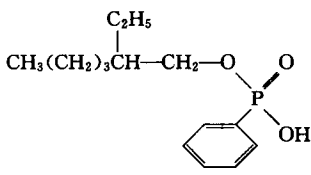
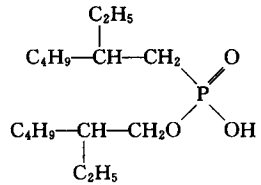
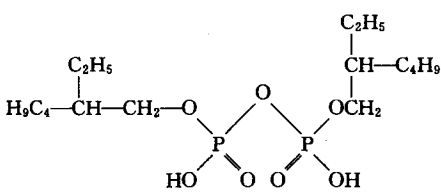
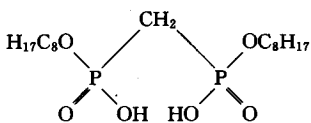
续表

| 类 型                             | 名 称                   | 商品名<br>或缩写                  | 结 构 式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 应用实例                                                                                                               |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 中<br>性<br>含<br>磷<br>萃<br>取<br>剂 | 磷<br>酸<br>酯<br>类      | 甲基膦酸二(2-乙基己基)酯<br>MDEP      | $  \begin{array}{c}  \text{C}_2\text{H}_5 \\    \\  \text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{P}(=\text{O}) \\    \\  \text{C}_2\text{H}_5  \end{array}  $ $  \begin{array}{c}  \text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{P}(=\text{O})-\text{CH}_3 \\    \\  \text{C}_2\text{H}_5  \end{array}  $      | 分离稀土(Ⅱ)                                                                                                            |
|                                 |                       | 二辛基膦酸辛酯<br>ODO'P            | $  \begin{array}{c}  \text{H}_{17}\text{C}_8-\text{O}-\text{P}(=\text{O}) \\    \quad \quad   \\  \text{H}_{17}\text{C}_8 \quad \text{C}_8\text{H}_{17}  \end{array}  $                                                                                                                                                                                             | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ [9]                                                                                          |
|                                 |                       | 磷酸三丁酯<br>TBP                | $  \begin{array}{c}  \text{H}_9\text{C}_4-\text{O}-\text{P}(=\text{O}) \\    \quad \quad   \\  \text{H}_9\text{C}_4-\text{O} \quad \text{O}-\text{C}_4\text{H}_9  \end{array}  $                                                                                                                                                                                    | 分离 $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{RE}^{3+}$ 、 $\text{Ta}^{5+}$ 、 $\text{Nb}^{5+}$ 、 $\text{Zr}^{4+}$ 、 $\text{Hf}^{4+}$ |
|                                 |                       | 磷酸三辛酯<br>TOP                | $  \begin{array}{c}  \text{H}_{17}\text{C}_8-\text{O}-\text{P}(=\text{O}) \\    \quad \quad   \\  \text{H}_{17}\text{C}_8-\text{O} \quad \text{O}-\text{C}_8\text{H}_{17}  \end{array}  $                                                                                                                                                                           | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ [11]                                                                                         |
|                                 | 膦<br>氧<br>化<br>物      | 氧化三丁膦<br>TBPO               | $  \begin{array}{c}  \text{H}_9\text{C}_4-\text{P}(=\text{O}) \\    \quad \quad   \\  \text{H}_9\text{C}_4 \quad \text{C}_4\text{H}_9  \end{array}  $                                                                                                                                                                                                               | 萃取 $\text{RE}^{3+}$ 、 $\text{ReO}_4^-$                                                                             |
|                                 |                       | 氧化三辛膦<br>TOPO               | $  \begin{array}{c}  \text{H}_{17}\text{C}_8-\text{P}(=\text{O}) \\    \quad \quad   \\  \text{H}_{17}\text{C}_8 \quad \text{C}_8\text{H}_{17}  \end{array}  $                                                                                                                                                                                                      | 萃 取 $\text{RE}^{3+}$ 、 $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{Hf}^{4+}$                                                         |
|                                 |                       | 氧化三烷基膦<br>$\text{P}_{6602}$ | $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{7-9}]_3\text{P}=\text{O}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 萃取 $\text{RE}^{3+}$                                                                                                |
|                                 | 双<br>膦<br>氧<br>化<br>物 | 亚甲双氧化二己膦<br>THMDPO          | $  \begin{array}{c}  \text{H}_{13}\text{C}_6 \quad \text{CH}_2 \quad \text{C}_6\text{H}_{13} \\  \diagdown \quad \diagup \quad \diagdown \quad \diagup \\  \text{P} \quad \quad \text{P} \\  \diagup \quad \diagdown \quad \diagup \quad \diagdown \\  \text{H}_{13}\text{C}_6 \quad \text{O} \quad \text{O} \quad \text{C}_6\text{H}_{13}  \end{array}  $          | 萃取 $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$                                                                           |
|                                 |                       | 亚乙双氧化二辛膦<br>TOEDPO          | $  \begin{array}{c}  \text{H}_{17}\text{C}_8 \quad \text{C}_2\text{H}_4 \quad \text{C}_8\text{H}_{17} \\  \diagdown \quad \diagup \quad \diagdown \quad \diagup \\  \text{P} \quad \quad \text{P} \\  \diagup \quad \diagdown \quad \diagup \quad \diagdown \\  \text{H}_{17}\text{C}_8 \quad \text{O} \quad \text{O} \quad \text{C}_8\text{H}_{17}  \end{array}  $ | 萃取 $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$ 、 $\text{Y}^{3+}$                                                           |
| 中<br>性<br>含<br>氮<br>萃<br>取<br>剂 | 取<br>代<br>酰<br>胺<br>类 | 二辛基乙酰胺<br>DOAA              | $  \begin{array}{c}  \text{CH}_3-\text{C}(=\text{O})-\text{N}(\text{C}_8\text{H}_{17})_2  \end{array}  $                                                                                                                                                                                                                                                            | 萃取 $\text{Pd}^{2+}$                                                                                                |

续表

| 类 型                             | 名 称                           | 商品名<br>或缩写       | 结 构 式                                                                                  | 应用实例                                                                                                            |
|---------------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 中<br>性<br>含<br>氮<br>萃<br>取<br>剂 | 取代酰胺类                         |                  |                                                                                        |                                                                                                                 |
|                                 | <i>N,N</i> -二正烷基乙酰胺           | A101             |       | 分离 Ta <sup>5+</sup> 、Nb <sup>5+</sup>                                                                           |
|                                 | <i>N</i> -苯基- <i>N</i> -辛基乙酰胺 | A404             |       | 萃取 Ga <sup>3+</sup> 、In <sup>3+</sup> 、Tl <sup>3+</sup>                                                         |
|                                 | <i>N,N</i> -二(甲庚基)乙酰胺         | N503             |       | 分离 Ta <sup>5+</sup> 、Nb <sup>5+</sup> 、萃取 Li <sup>+</sup> 、Pd <sup>2+</sup> 、Ga <sup>3+</sup> 、In <sup>3+</sup> |
| 中<br>性<br>含<br>硫<br>萃<br>取<br>剂 | 硫醚类                           |                  |                                                                                        |                                                                                                                 |
|                                 | 二辛基硫醚                         | DOS              | $\text{H}_{17}\text{C}_8-\text{S}-\text{C}_8\text{H}_{17}$                             | 萃取 UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup>                                                                                |
|                                 | 亚砷类                           |                  |                                                                                        |                                                                                                                 |
|                                 | 二辛基亚砷                         | DOSO             |       | 萃取 Y <sup>3+</sup> 、RE <sup>3+</sup>                                                                            |
|                                 | 二苯基亚砷                         | DPhSO            |      | 萃取 RE <sup>3+</sup>                                                                                             |
|                                 | 烃基亚砷                          | PSO              |     | 萃取 Pd <sup>2+</sup>                                                                                             |
| 酸<br>性<br>萃<br>取<br>剂           | 羧酸类                           |                  |                                                                                        |                                                                                                                 |
|                                 | 肉桂酸                           | HSt              |     | 萃取 Y <sup>3+</sup>                                                                                              |
|                                 | 合成脂肪酸                         |                  | $\text{H}_{15}\text{C}_7 \sim \text{C}_{16}\text{H}_{33}-\text{C}(=\text{O})\text{OH}$ | 萃取 RE <sup>3+</sup>                                                                                             |
|                                 | $\alpha$ -溴代月桂酸               | $\alpha$ -BrHLau |     | 分离 Co <sup>2+</sup> 、Ni <sup>2+</sup>                                                                           |
|                                 | 环烷酸                           | HNaph            |     | 萃取 RE <sup>3+</sup> 、Y <sup>3+</sup>                                                                            |

续表

| 类 型                   | 名 称                | 商品名<br>或缩写    | 结 构 式                                                                               | 应用实例                                                                                                                   |
|-----------------------|--------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 酸<br>性<br>萃<br>取<br>剂 | 十二烷基苯磺酸            |               |    | 分离 RE <sup>3+</sup>                                                                                                    |
|                       | 二壬基萘磺酸             | HDNNSul       |    | 萃取 Rh <sup>2+</sup> 、Ni <sup>2+</sup>                                                                                  |
|                       | 磷酸单(2-乙基己基)酯       | H2MEHP        |    | 萃取 Sc <sup>3+</sup> 、La <sup>3+</sup> 、Y <sup>3+</sup>                                                                 |
|                       | 磷酸单(2-己基辛基)酯       | P 538         |    | 萃取 Ga <sup>3+</sup>                                                                                                    |
|                       | 磷酸二(2-乙基己基)酯       | P204 或 D2EHPA |    | 分 离 RE <sup>3+</sup> 、Co <sup>2+</sup> 、<br>Ni <sup>2+</sup> 、Ge <sup>4+</sup> 、Ga <sup>3+</sup> 、<br>In <sup>3+</sup> |
|                       | 磷酸二辛酯              | HDOP          |   | 萃取 RE <sup>3+</sup> 、UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup>                                                                     |
|                       | 苯基膦酸(2-乙基己基)酯      | P509 或 HEHPP  |  | 萃取 Co <sup>2+</sup> 、Ni <sup>2+</sup>                                                                                  |
|                       | 2-乙基己基膦酸单(2-乙基己基)酯 | P507          |  | 分 离 轻 重 RE <sup>3+</sup> 、<br>Co <sup>2+</sup> 、Ni <sup>2+</sup> 、Ga <sup>3+</sup> 、<br>In <sup>3+</sup>               |
|                       | 焦磷酸二(2-乙基己基)酯      | P2EHPA        |  | 萃取 Ga <sup>3+</sup>                                                                                                    |
|                       | 亚甲基辛基膦酸            | MODPA         |  | 萃取 Ge <sup>4+</sup>                                                                                                    |

续表

| 类 型                   | 名 称                  | 商品名<br>或缩写       | 结 构 式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 应用实例                                                                                            |
|-----------------------|----------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 胺<br>类<br>萃<br>取<br>剂 | 伯<br>胺<br>类          |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                 |
|                       | 1(3-乙基戊基)-<br>4-乙基辛胺 | Amine<br>21F811  | $\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}(\text{CH}_2)_2-\text{CH}(\text{CH}_2)_3-\text{CH}_3 \\   \qquad \qquad   \\ (\text{CH}_2)_2 \qquad \text{C}_2\text{H}_5 \\   \\ \text{HC}-\text{C}_2\text{H}_5 \\   \\ \text{C}_2\text{H}_5 \end{array}$                                                                                                      | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{Gd}^{3+}$                                     |
|                       | 多支链二十烷基<br>伯胺        | Primene<br>JMT   | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{CH}_3 \\   \qquad \qquad   \\ \text{H}_2\text{N}-(\text{C}-\text{CH}_2)_4-\text{C}-\text{CH}_3 \\   \qquad \qquad   \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{CH}_3 \end{array}$                                                                                                                                  | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{Be}^{2+}$                                     |
|                       | 三烷基甲胺                | Primene<br>81-R  | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{CH}_3 \\   \qquad \qquad   \\ \text{H}_2\text{N}-\text{C}-(\text{CH}_2-\text{C})_{3\sim5}-\text{CH}_3 \\   \qquad \qquad   \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{CH}_3 \end{array}$                                                                                                                           | 萃取 $\text{Th}^{4+}$                                                                             |
|                       | 仲碳伯胺*                | N 1923           | $\begin{array}{c} \text{C}_9\text{H}_{19} \sim \text{C}_{11}\text{H}_{23} \\   \\ \text{H}_2\text{N}-\text{CH} \\   \\ \text{C}_9\text{H}_{19} \sim \text{C}_{11}\text{H}_{23} \end{array}$                                                                                                                                                                  | 萃取 $\text{ReO}_4^-$ 、 $\text{Th}^{4+}$ 、 $\text{Ga}^{3+}$ 、 $\text{In}^{3+}$ 、 $\text{Tl}^{3+}$ |
|                       | 仲<br>胺<br>类          |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                 |
|                       | N-十二烯(三<br>烷基甲基)胺*   | Amberite<br>LA-1 | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2-\text{C})_2-\text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 \\ \text{HN} \begin{array}{l} \diagup \text{R} \\ \diagdown \text{C}-\text{R}' \\ \diagup \text{R}'' \end{array} \end{array}$                                                                                                 | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$                                                                           |
|                       | N-月桂(三<br>烷基甲基)胺     | Amberite<br>LA-2 | $(R+R'+R''=11\sim14 \text{ 个碳原子})$ $\begin{array}{c} \text{C}_{12}\text{H}_{25} \\   \\ \text{HN} \begin{array}{l} \diagup \text{R} \\ \diagdown \text{C}-\text{R}' \\ \diagup \text{R}'' \end{array} \end{array}$                                                                                                                                           | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Pt}^{4+}$                                                        |
|                       | 二混合烷基胺*              | 7201             | $(R+R'+R''=12 \text{ 个碳原子})$ $\text{HN}(\text{CH} \begin{array}{l} \diagup \text{R} \\ \diagdown \text{R} \end{array})_2 (R=\text{C}_6-\text{C}_9)$                                                                                                                                                                                                          | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Nb}^{5+}$ 、 $\text{Pd}^{2+}$ 、 $\text{Pt}^{4+}$                  |
| 胺<br>类<br>萃<br>取<br>剂 | 二癸胺                  | DDA              | $\begin{array}{c} \text{R}_1 \\   \\ \text{CH} \\   \qquad \diagdown \text{R}_2 \\ \text{HN} \begin{array}{l} \diagup \text{R}_3 \\ \diagdown \text{CH} \\ \diagup \text{R}_4 \end{array} \end{array} \quad (R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4)$ $\begin{array}{c} \text{C}_{10}\text{H}_{21} \\   \\ \text{HN} \\   \\ \text{C}_{10}\text{H}_{21} \end{array}$ | $\text{Pt}^{4+}$<br><br>萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Pd}^{4+}$                                |



续表

| 类 型                   | 名 称                | 商品名<br>或缩写                     | 结 构 式                                                                                                                                                                                                                                                      | 应用实例                                                                                                                          |
|-----------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 胺<br>类<br>萃<br>取<br>剂 | 三辛胺                | TOA 或<br>N 204                 | $\text{N}-[\text{CH}_2(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3]_3$                                                                                                                                                                                                       | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{ReO}_4^-$                                                                                      |
|                       | 三异辛胺               | TiOA                           | $\text{N}-[\text{CH}_2(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_2\text{CH}_3]_3$                                                                                                                                                                     | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、<br>分离 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$                                          |
|                       | 三壬胺                | TNA                            | $\text{N}-[\text{CH}_2(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3]_3$                                                                                                                                                                                                       | 萃取 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{ReO}_4^-$                                                                                        |
|                       | 三癸胺                | TDA                            | $\text{N}-[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{CH}_3]_3$                                                                                                                                                                                                       | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Pu}^{4+}$                                                                                      |
|                       | 叔<br>胺             | Alamine<br>336, N235<br>或 7301 | $\text{N}[\text{C}_n\text{H}_{2n+1}]_3$<br>( $n=8\sim 10$ )                                                                                                                                                                                                | 萃取 $\text{ReO}_4^-$ 、 $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Pd}^{2+}$ 、 $\text{Mo}^{6+}$                                                |
|                       | 三苯胺                | TBzA                           | $\text{N}-\left[\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_5\right]_3$                                                                                                                                                                                                 | 萃 取 $\text{Nb}^{5+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Ta}^{5+}$                                                                    |
|                       | 二(甲基庚基)<br>乙醇胺     | TAB-182                        | $\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{HO}(\text{CH}_2)_2\text{N}-\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_{13} \\   \\ \text{CH}-\text{C}_6\text{H}_{13} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$                                                                        | 萃取 $\text{Tl}^{3+}$                                                                                                           |
|                       | N-(1-庚基辛基)<br>二乙醇胺 | TAB-194                        | $\begin{array}{c} (\text{CH}_2)_2\text{OH} \\   \\ \text{H}_{15}\text{C}_7-\text{CH}-\text{N} \\   \quad \quad   \\ \text{C}_2\text{H}_5 \quad (\text{CH}_2)_2\text{OH} \end{array}$                                                                       | 萃取 $\text{Ga}^{3+}$                                                                                                           |
|                       | 季<br>铵<br>盐<br>类   | Aliquat<br>336<br>或 N263       | $[\text{CH}_3-\text{N}-(\text{C}_{8-10}\text{H}_{17-21})_3]^+ \text{Cl}^-$                                                                                                                                                                                 | 分离 $\text{RE}^{3+}$ 与 $\text{Y}^{3+}$ 、 $\text{ReO}_4^-$ 与 $\text{MoO}_4^{2-}$ 、<br>分离 $\text{ReO}_4^-$ 、 $\text{MoO}_4^{2-}$ |
|                       | 氯化三烷基甲<br>基铵       | 7407                           | $\left[\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_2-\text{N}(\text{C}_{8-10}\text{H}_{17-21})_3\right]^+ \text{Cl}^-$                                                                                                                                                  | 萃取 $\text{Pt}^{4+}$ 、 $\text{Pd}^{2+}$                                                                                        |
| 季<br>铵<br>盐<br>类      | 氯化三(十二烷<br>基)甲基铵   | TLMA                           | $[(\text{CH}_3-\text{N}(\text{C}_{12}\text{H}_{25})_3)^+ \text{Cl}^-]$                                                                                                                                                                                     | 萃取 $\text{ReO}_4^-$                                                                                                           |
|                       | 氯化十六烷基<br>二甲基苄铵    | CMMBA                          | $\left[\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \quad \text{CH}_2(\text{CH}_2)_{14}\text{CH}_3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{N} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_5 \end{array}\right]^+ \text{Cl}^-$ | 萃取 $\text{ReO}_4^-$ 、 $\text{Pd}^{2+}$                                                                                        |
|                       | 硝酸二(十六烷<br>基)二甲胺   | B 104                          | $\left[\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \quad \text{C}_{16}\text{H}_{33} \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{N} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{C}_{16}\text{H}_{33} \end{array}\right]^+ \text{NO}_3^-$                   | 萃取 $\text{UO}_2^{2+}$                                                                                                         |