科院士普系

汪家鼎　骆广生 编著

溶剂萃取

清华大学出版社　暨南大学出版社

(京)新登字 158 号

图书在版编目(CIP)数据

溶剂萃取/汪家鼎,骆广生编著. -北京:清华大学出版社;广州:暨南大学出版社,2002.4
(院士科普书系/路甬祥主编)
ISBN 7-302-05320-0

Ⅰ.溶… Ⅱ.①汪…②骆… Ⅲ 溶剂萃取-化工过程-普及读物 Ⅳ.TQ028-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 014515 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)
http://www.tup.tsinghua.edu.cn
暨南大学出版社(广州天河,邮编 510630)
http://www.jnu.edu.cn
责任编辑: 蔡鸿程
印 刷 者: 北京市清华园胶印厂
发 行 者: 新华书店总店北京发行所
开 本: 850×1168 1/32 **印张:** 4.5 **字数:** 88 千字
版 次: 2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 7-302-05320-0/G·254
印 数: 0001~5000
定 价: 12.00 元

《院士科普书系》编委会(第二届)

编委会名誉主任 周光召 宋 健 朱光亚

编 委 会 主 任 路甬祥

编 委 会 委 员 (两院各学部主任、副主任)

陈佳洱 杨 乐 闵乃本 陈建生 周 恒
王佛松 白春礼 刘元方 朱道本 何鸣元
梁栋材 卢永根 陈可冀 匡廷云 朱作言
孙 枢 安芷生 李廷栋 汪品先 陈 颙
王大中 戴汝为 周炳琨 刘广均 杨叔子
钟万勰 关 桥 吴有生 刘大响 顾国彪
陆建勋 龚惠兴 吴 澄 李大东 汪旭光
陆钟武 王思敬 朱建士 郑健超 胡见义
陈厚群 陈肇元 崔俊芝 张锦秋 刘鸿亮
方智远 旭日干 周国泰 王正国 赵 铠
钟南山 桑国卫

编委会执行委员 郭传杰 常 平 钱文藻 罗荣兴

编委会办公室主任 罗荣兴(科学时报社)

副主任 周先路(中国科学院学部联合办公室)
白玉良(中国工程院学部工作部)
蔡鸿程(清华大学出版社)
周继武(暨南大学出版社)

总 策 划 罗荣兴 周继武 蔡鸿程

总 责 任 编 辑 周继武 蔡鸿程 宋成斌

提高全民族的科学素质

——序《院士科普书系》

人类走到了又一个千年之交。

人类的文明进程至少已有6000余年。地球上各个民族共同创造了人类文明的灿烂之花。中华文明同古埃及文明、古巴比伦文明、古印度文明、古希腊文明等一起，是人类文明的发源地。

15世纪之前，以中华文明为代表的东方文明曾遥遥领先于当时的西方文明。从汉代到明代初期，中国的科学技术在世界上一直领先长达14个世纪以上。在那个时期，影响世界文明进程的重要发明中，相当部分是中华民族的贡献。

后来，中国逐渐落后了。中国为什么落后？近代从林则徐以来许多志士仁人就不断提出和思索这个历史课题。但都没有找到正确的答案。以毛泽东同志、邓小平同志为代表的中国共产党人作出了唯一正确的回答：中国落后，是由于生产力的落后和社会政治的腐朽。西方列强对中国的欺凌，更加剧了中国经济的落后和国家的衰败。而落后就要挨打。所以要进行革命，通过革命从根本上改变旧的生产关系和政

治上层建筑，为解放和发展生产力开辟道路。于是，就有了80多年前孙中山先生领导的辛亥革命，就有了50年前我们党领导的新民主主义革命的胜利，以及随后进行的社会主义革命的成功。无论是革命还是我们正在进行的社会主义改革，都是为了解放和发展生产力。

邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的著名论断，使我们对科学技术在经济和社会发展中的地位与作用的认识，有了新的飞跃。我们应该运用这一真理性的认识，深刻总结以往科学技术发展的历史经验，把我国科技事业更好地推向前进。中国古代科技有过辉煌的成果，但也有不足，主要是没有形成实验科学传统和完整的学科体系，科学技术没有取得应有的社会地位，更缺乏通过科技促进社会生产力发展的动力和机制。为什么近代科学技术首先在文艺复兴后的欧洲出现，而未能在中国出现，这可能是原因之一吧。而且，我国历史上虽然有着伟大而丰富的文明成果和优良的文化传统，但相对说来，全社会的科学精神不足也是一个缺陷。鉴往开来，继承以往的优秀文化，弥补历史的不足，是当代中国人的社会责任。

在新的世纪中，中华民族将实现伟大的复兴。在一个占世界人口五分之一的发展中大国里，再用50年的时间基本实现现代化，这又是一项惊天动地的伟业。为实现这个光辉

的目标，我们应该充分发挥社会主义制度的优越性，坚持不懈地实施科教兴国战略。

科教兴国，全社会都要参与，科学家和教育家更应奋勇当先，在全社会带头弘扬科学精神，传播科学思想，倡导科学方法，普及科学知识。科教兴国也要抓好基本建设。编辑出版高质量的科普图书，就是一项基本建设，对于提高全民族的科学素质，是很有意义的。在《院士科普书系》出版之际，写了上面这些话，是为序。



1999 年 12 月 23 日

人民交给的课题

——写在《院士科普书系》出版之际

世界正在发生深刻的变化。这一变化是20世纪以来科学技术革命不断深入的必然结果。从马克思主义的观点看来，生产力的发展是人类社会发展与文明进步的根本动力；而“科学技术是第一生产力”，因此，科学技术是推动社会发展与文明进步的革命性力量。从生产力发展的阶段看，人类走过了农业经济时代、工业经济时代，正在进入知识经济时代。

知识经济时代，知识取代土地或资本成为生产力构成的第一要素。知识不同于土地或资本，不仅仅是一种物质的形态，知识同时还是一种精神的形态。知识，首先是科学技术知识，将不仅渗透到生产过程、流通过程等经济领域，同时还将渗透到政治、法律、外交、军事、教育、文化和社会生活等一切领域。可以说，在新的历史时期，一个国家、一个民族能否掌握当代最先进的科技知识以及这些科技知识在国民中普及的程度将决定其国力的强弱与社会文明程度的高低。科技创新与科普工作是关系到一个国家、一个民族兴衰

的大事。

对于我们科技工作者来说，我们的工作应当包含两个方面：发展科技与普及科技；或者说应当贯穿于知识的生产、传播及应用的全过程。我们所说的科普工作，不仅是普及科学知识，更应包括普及科学精神和科学方法。

我们的党和政府历来都十分重视科普工作。党的十五大更是把树立科学精神、掌握科学方法、普及科技知识作为实施科教兴国战略和社会主义文化建设的一项重要任务提到了全党、全国人民和全体科学工作者的面前。

正是在这样的背景下，1998 年春由科学时报社（当时叫“中国科学报社”）提出创意，暨南大学出版社和清华大学出版社积极筹划，会同中国科学院学部联合办公室和中国工程院学部工作部，共同发起《院士科普书系》这一重大科普工程。

1998 年 6 月，中国科学院与中国工程院“两院”院士大会改选各学部领导班子，《院士科普书系》编委会正式成立，各学部主任均为编委会委员。编委会办公室在广泛征求意见的基础上拟出 150 个“提议书目”，在“两院”院士大会上向 1000 多名院士发出题为《请科学家为 21 世纪写科普书》的“约稿信”，得到了院士们的热烈响应。在此后的半年多时间里，有 176 名院士同编委会办公室和出版社签订了 175 本书的写作出版协议，开始了《院士科普书系》艰辛的创作过程。

《院士科普书系》的定位是结合当代学科前沿和我国经济建设与社会发展的热点问题，普及科技知识、科学方法。科学性、知识性、实用性和趣味性是编写的总要求。

编写科普书对我国大多数院士来说是一个新课题。他们惯于撰写学术论文。如何把专业的知识和方法写成生动、有趣、有文采的科普读物，于科技知识中融入人文教育，不是一件容易的事。不少院士反映：写科普书比写学术专著还难。但院士们还是以感人的精神完成自己的书稿。在此过程中，科学时报社和中国科学院学部联合办公室、中国工程院学部工作部以及清华大学出版社、暨南大学出版社也付出了辛勤的劳动。

《院士科普书系》首辑终于出版了。这是人民交给科学家课题，科学家向人民交出答卷。江泽民总书记专门为《院士科普书系》撰写了序言，指出科普是科教兴国的基础工程，勉励科学家、教育家“在全社会带头弘扬科学精神，传播科学思想，倡导科学方法，普及科学知识”，充分表达了党的第三代领导集体对科普的重视，对提高全民族科技素质的殷殷期望。

《院士科普书系》将采取滚动出版的模式。一方面随着院士们的创作进程，成熟一批出版一批；另一方面随着科学技术的进步和创新，不断有新的题材由新的院士作者撰写。因此，《院士科普书系》将是一个长期的、系统的科普工程。

这一庞大的工程，不但需要院士们积极投入，还需要各界人士和广大读者的支持——对我们的选题和内容提出修订、完善的建议，帮助我们不断提高《院士科普书系》的水平与质量，使之成为国民科技素质教育的系统而经典的读本。在科学家群体撰写科普书方面，我们也要以此为起点为开端，参与国际竞争与合作，勇攀世界科普创作的高峰。

中国科学院院长
《院士科普书系》编委会主任

路甬祥

2000 年 1 月 8 日

本书前言

科学技术发展史是人类认识自然、改造自然的历史，也是人类文明史的重要组成部分。今天，当人类豪迈地飞往宇宙空间，当机器人问世，当高清晰度数字化彩电进入日常家庭生活，当克隆羊多利诞生惊动整个世界，当人们在为现代科学技术的神奇功能而叹为观止的时候，你是否了解化学工程的一个分支学科——分离科学——的优异功效在现代科学技术发展中的贡献与地位呢？

信息科学、材料科学和生物工程被誉为当今三大前沿科学，新材料还被誉为现代文明的支柱之一。这是因为没有花样繁多、品种齐全、功能奇特、高纯度的新材料，所有的高新技术只能是空中楼阁，电脑、机器人、宇宙飞船等都只能是天方夜谭，所以不管怎么样的高新技术，都是要以开发和利用自然资源，进而分离或合成出高纯的材料为基础的。化工分离纯化技术作为科学技术的一个组成部分，为人类的各种需求变成现实提供了可靠的保证。现代分离技术已经可以使产品的杂质含量低于十亿分之一，被誉为现代分离能手的溶剂萃取(液-液萃取)就是现代分离技术中的一种。例如在核燃料的后处理中，用萃取分离技术对被辐照过的核燃料进行处理，提取人工核素钚-239，其中铀和钚的收率均可以达到99.9%。去除强放射性物质的效果(去污系数)可以达到$10^6 \sim 10^8$。

“溶剂萃取”作为一个名词，也许很多人不太熟悉，但作

为一种实用的分离方法，却早已被人们应用于实践中。溶剂萃取用于无机化合物分离的历史是有案可查的。1842 年皮尔哥德(Peligot)首先发现用二乙醚可以从硝酸溶液中萃取硝酸铀酰。随后人们又在实践中发现了其他一些无机物也能被某些有机物所萃取，并据此初步建立了半经验的液-液平衡的定量关系。到 19 世纪末，能斯特(Nernst)利用热力学基本原理对液-液平衡关系进行了进一步阐述，提出了著名的能斯特分配定律，该定律为萃取化学和化工的发展奠定了早期的理论基础。19 世纪末到 20 世纪初，人们开始将萃取分离技术应用于有机化工和石油化工领域中，如用酯类萃取剂萃取醋酸，用液态二氧化硫作为萃取剂从煤油中去除芳烃。20 世纪 30 年代，人们试图将萃取分离技术应用于稀土元素的分离，但由于当时条件的限制，没有取得实质性的进展。40 年代，原子能工业在战火中诞生，基于生产核燃料的需要，萃取分离技术无论在理论上还是在实际应用中均得到了迅速的发展，特别是磷酸三丁酯作为核燃料的萃取剂得到应用后，萃取分离技术进入了一个崭新的阶段。随后，萃取分离技术在稀土的分离、湿法冶金、无机化工、有机化工、医药、食品、环境等领域不断得到应用，并取得了很好的效果。到现在，萃取分离技术几乎可以涉及元素周期表中的所有元素，已成为分离技术中的主要成员之一。因此，只要你认真了解一下萃取分离技术的辉煌历史，就会被其优异的功能所吸引。

汪家鼎

2001 年 12 月

目　录

1　基本概念及原理 …… 1

1.1　基本概念 …… 1

1.2　溶剂萃取的基本参数及其定义 …… 9

1.3　萃取平衡及影响因素 …… 11

1.4　单级萃取及多级萃取 …… 13

1.5　萃取分离过程的设备 …… 17

2　溶剂萃取的工业应用 …… 40

2.1　炼油和石油化工中的应用 …… 40

2.2　湿法冶金中的应用 …… 54

2.3　医药化工中的应用 …… 70

2.4　食品化工中的应用 …… 75

2.5　无机酸生产及净化中的应用 …… 79

2.6　环境保护中的应用 …… 84

3　萃取分离的进展及有关新技术 …… 88

3.1　乳化液膜分离技术 …… 89

3.2　膜萃取技术 …… 99

3.3　超临界流体萃取技术 …… 104

3.4 双水相萃取技术 …… 112
3.5 电萃取技术及其他外场强化萃取过程 …… 116

参考文献 …… 122

1 基本概念及原理

萃取分离技术在工业生产中的广泛应用，为萃取分离的研究提供了良好的背景，同时，萃取分离技术的基础研究成果反过来又促进了萃取分离技术在工业应用中的发展。要想很好地应用这种分离技术，还必须从萃取分离技术的基本理论出发了解萃取分离技术的理论基础。

1.1 基本概念

首先让我们来做两个有趣的实验，以便能直观地了解萃取和萃取分离技术。

第一个实验　将两杯液体放在你的面

用有机溶剂对某种混合物液体进行处理、最终分离得到纯化产品的方法，称为萃取分离技术。

前，一杯是颜色为黄褐色的含碘的水溶液（水相），一杯是无色透明的四氯化碳有机液体（有机相）。四氯化碳液体的密度比水溶液大，且两种液体互不溶解。现在将两杯液体倒入一个大的杯子中，然后用玻璃棒充分搅拌。在停止搅拌静置到两种液体分层以后，可以看到：上层水溶液变成了无色透明的液体，而下层的四氯化碳却变成了红色液体。这是因为，在两种液体的充分混合过程中，水溶液中的碘转移到四氯化碳液体中去了。这样的过程我们称之为萃取过程。

第二个实验　向一杯含锆、铪等金属离子的水溶液（水相）中按一定体积比加入某一种有机溶剂（有机相），两种液体充分混合后再静置分层，取出上层的有机溶剂。然后，重新向杯中加入新鲜的等体积的有机溶剂，混合、分层、取出上层有机溶剂。如此重复几次后，将多次取出的上层的有机溶剂合并，对其进行处理后，可以得到二氧化锆产品，对杯中残存的水溶液进行处理，可以得到二氧化铪产品。这种用有机溶剂对某种混合物液体进行处理、最终分离得到纯化产品的方法，称为萃取分离技术。

以上实验仅仅是为了使大家直观地了解萃取和萃取分离技术，在具体研究和应用中，还应科学地定义萃取与萃取分离技术。

什么是相

在讨论萃取过程时，经常会用到“相”这个词。所谓“相”是指体系中具有相同的物理性质和化学组成的均匀部分。

萃取过程主要是从一个液相到另一个液相的质量传递过程。

相与相之间有界面，可以用机械的方法将两相分开。如前述的实验中那样，将四氯化碳加入到水中，由于这两种物质互不相溶而且密度不同，因而会产生明显的两层，这两层化学和物理性质均不相同的物质就是共存的两相。前者称为有机相(油相)，后者称为水相，溶剂萃取过程就是在这两相之间进行的。随着应用的需要，液液两相也可以是两个互不相溶或部分相溶的有机相或水相，例如在石油化工中用环丁砜萃取芳烃就是在两个有机相之间的萃取过程，而在生物化工中常用的双水相萃取，则是两个水相之间的萃取过程。

萃取和萃取分离技术

有了相的定义后，就可以理解萃取过程主要是从一个液相到另一个液相的质量传递过程。是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。

萃取分离技术是指利用溶剂萃取的特性，在萃取设备内，通过多次(多级)混合接触，将混合物中的有用组分分别提取出来，或将其中的杂质去除的分离过程。如乙烯生产中重要的配套生产过程芳烃抽提(萃取)。所谓芳烃是含有苯环的烃类化合物，主要有苯、甲苯和二甲苯等。它是重要的化工原料。芳烃抽提就是指用萃取分离技术将油料中的芳烃萃取出来。油料中的组成少则几十种，多则上百种，其中芳烃的含量从百分之几至百分之几十不等，因此可以想象从这种复杂的多组分体系中分离出芳烃的难度。根据烃类物