

实用制药工业技术丛书

液-液萃取 在制药工业中的应用

YEYE CUIQU
ZAI ZHIYAO GONGYE ZHONG
DE YINGYONG

李 洲 编著

中国医药科技出版社

|| 实用制药工业技术丛书 ||

液-液萃取 在制药工业中的应用

李 洲 编著

中国医药科技出版社

内 容 提 要

本书结合制药工业生产,论述了制药流程中的液-液萃取过程的原理、萃取剂和萃取体系的选择、萃取的类型(单级萃取、逐级接触的多级错流和多级逆流萃取、连续接触的多级逆流萃取、分馏萃取)、萃取过程的实验室方法、萃取动力学、萃取过程的优化、萃取过程的乳化和破乳,并介绍了液-液萃取的设备(搅拌萃取槽、混合澄清槽、萃取柱、离心萃取器)及各种设备的选择与操作。还介绍了液-液萃取技术在制药工业中的新进展。全书以实例结合原理的方式叙述,言简意赅,内容翔实,突出了前沿性、实用性,是制药企业及相关科研人员必备的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

液-液萃取在制药工业中的应用/李洲编著. —北京:中国医药科技出版社, 2005. 8

(实用制药工业技术丛书)

ISBN 7-5067-3206-8

I. 液... II. 李... III. 药物—制造—萃取 IV. TQ460.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第059665号

美术编辑 陈君杞

责任校对 张学军

版式设计 郭小平

出版 中国医药科技出版社

地址 北京市海淀区文慧园北路甲22号

邮编 100088

电话 010-62244206

网址 www.mpsky.com.cn

规格 787×1092mm¹/₁₆

印张 17¹/₄

字数 368千字

印数 1—3000

版次 2005年10月第1版

印次 2005年10月第1次印刷

印刷 世界知识印刷厂

经销 全国各地新华书店

书号 ISBN 7-5067-3206-8/R·2666

定价 32.00元

本社图书如存在印装质量问题请与本社联系调换

前 言

长期的研究和生产实践表明，液-液萃取技术与已有的其他分离技术（如分步沉淀、分级结晶、离子交换和精馏等）比较，具有提取收率高，分离纯度好，可实现连续、快速、安全的生产和良好的经济性等一系列优点，因此，它在核燃料提取、水法冶金和石化工业中获得了广泛的应用。

在制药工业中液-液萃取技术亦多有应用，如早在四十多年以前即已用于青霉素的提取过程，如今，更是广泛应用于大环内酯类抗生素（红霉素、麦迪霉素、螺旋霉素、吉它霉素等），四环类抗生素（如四环素、土霉素、金霉素等），多烯类抗生素（如制霉菌素、两性霉素B），蒽环类抗生素（红比霉素），氨基糖苷类抗生素，碳青霉烯类和硫霉素类抗生素，头孢菌素C以及蛋白质类药物等的提取过程中（请参考：①顾觉奋. 抗生素. 上海：上海科学技术出版社，2001；②K. Ridgway and E. E. Thorpe, edited by Teh C. Lo, M. H. I. Baird, C. Hanson, Handbook of Solvent Extraction, 19. Use of Solvent Extraction in Pharmaceutical Manufacturing Processes, John Wiley & Sons, New York, 1983；③汪家鼎，陈家镛主编. 溶剂萃取手册. 第21章，制药工业中的萃取分离. 北京：化学工业出版社，2001）

相对而言，萃取技术在制药领域中的应用较之它在核工业、水法冶金工业中的应用在深度和广度上尚均有一定差距，这表现在萃取工艺、萃取方式和萃取设备等诸多方面。

作者长期从事液-液萃取工艺和设备的研究，近十几年来访问了几十个相关药厂，进行了大量的研究实践，部分研究成果已转化为生产力。在这一过程中，作者深感一方面是在制药工业中萃取技术的应用有待进一步的改进和深化，另一方面是萃取技术在制药工业中还大有扩展应用的余地。

目前，有关抗生素或制药的专著中虽然包含有溶剂萃取的内容，但是一般过于简略，而已有的有关液-液萃取的著述又均是侧重于论述金属元素的萃取，不完全适用于从事制药研究和生产的有关人员阅读，因此，有必要编写一本适用性更强的读物供在制药领域中工作的科技人员学习参考，以有助于他们开阔思路、提高水平。同时，此书也适宜作为医药大专院校在校学生的教学参考书。对于在其他领域从事萃取技术研究的人员也具有参考价值。

本书除了介绍有关液-液萃取的基本理论和计算方法之外，还引入了作者和其他研究人员近年来在制药领域取得的研究和实践的新成果，有很强的

针对性和实践性。

通过阅读本书，作者希望相关人员能够掌握萃取的基本理论、能在萃取体系的筛选、萃取工艺的研究、萃取方式的确定和萃取设备的选择、操作运行等方面提高分析水平和判断能力，以有助于进一步提高我国制药工业的科技水平和竞争力。

由于作者水平有限，书中的论述和观点如有不妥或错误，敬请广大读者指正。

作 者

2004 年 12 月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 液-液萃取和萃取循环	(1)
一、液-液萃取的基本概念	(1)
二、液-液萃取循环	(2)
第二节 液-液萃取体系的分类	(3)
一、按萃取剂的结构类别分类	(3)
二、按有无化学反应分类	(8)
三、按萃取机制分类	(10)
第三节 液-液萃取研究的基本内容	(12)
一、萃取体系的选择	(12)
二、萃取平衡研究和萃取工艺及操作条件的确定	(12)
三、萃取动力学研究	(12)
四、萃取方式的确定和萃取流程的建立	(12)
五、萃取设备的选型和设计	(13)
第二章 萃取剂的选择和萃取体系的确定	(15)
第一节 萃取剂选择的基本原则	(15)
第二节 萃取体系的组成	(15)
一、萃取剂-稀释剂体系	(15)
二、混合萃取体系	(16)
第三节 萃取剂的选择示例	(16)
一、青霉素	(17)
二、大环内酯类抗生素	(22)
三、林可霉素	(26)
四、衣康酸	(28)
五、氨基酸	(30)
第三章 液-液萃取平衡和单级萃取过程	(34)
第一节 萃取平衡	(34)
一、萃取平衡的基本参数——分配常数和分配系数	(34)
二、分配平衡关系和分配系数的图示	(35)
三、萃取平衡模型	(43)
第二节 一次接触平衡——单级萃取过程	(46)

一、萃取过程中两相体积不变或变化很小时的物料衡算方法	(47)
二、萃取过程中两相体积有显著变化时的物料衡算方法	(48)
三、单级萃取过程中的极限溶剂/料液比	(51)
四、接近萃取平衡程度的表征——萃取级效率	(51)
第三节 表征萃取效果的主要指标——萃取率和分离系数	(53)
一、萃取率	(53)
二、分离系数	(55)
第四章 逐级接触的多级萃取过程	(58)
第一节 多级错流萃取过程	(58)
一、多级错流萃取过程的操作原理	(58)
二、多级错流萃取过程的计算法和图解法	(58)
第二节 多级逆流萃取过程	(62)
一、多级逆流萃取过程的操作原理	(62)
二、溶剂不互溶、各级萃取分配系数变化时的逐级算法	(62)
三、溶剂不互溶、萃取分配系数为常数时的公式算法	(64)
四、溶剂不互溶体系多级逆流萃取过程的图解法	(67)
五、溶剂部分互溶体系多级逆流萃取过程的图解法	(69)
六、萃取剂极限用量和极限流比的图解确定	(71)
七、多级逆流萃取过程与多级错流萃取过程的比较	(74)
第三节 分馏萃取过程	(75)
一、分馏萃取过程的操作原理	(76)
二、分馏萃取的过程参数——萃取率、萃余率和净化系数	(78)
三、溶剂不互溶体系分馏萃取过程的计算法	(78)
四、溶剂不互溶体系分馏萃取过程的图解法	(83)
五、溶剂部分互溶体系分馏萃取过程的图解法	(86)
六、分馏萃取过程中流比的选择和极限流比的确定	(87)
第五章 连续接触的多级逆流萃取过程	(94)
第一节 柱塞流模型	(94)
一、连续逆流传质过程的柱塞流模型	(94)
二、传质单元数和传质单元高度	(95)
三、溶剂不互溶体系传质单元数的计算	(96)
四、两相体积变化时传质单元数的计算	(100)
五、理论级和理论级当量高度	(103)
第二节 萃取柱内的纵向混合	(104)
一、萃取柱内的纵向混合现象	(104)
二、计入纵向混合的扩散模型	(105)

三、传质单元高度和柱高的计算	(106)
第六章 液-液萃取过程的实验方法	(110)
第一节 多级错流和多级逆流萃取过程的实验方法	(110)
一、多级错流萃取过程	(110)
二、多级逆流萃取过程的实验方法	(110)
三、分馏萃取过程	(115)
四、微分接触的多级逆流萃取过程	(120)
第二节 多级逆流萃取实验装置	(120)
一、连续操作的多级逆流液-液萃取器(台架规模)	(120)
二、微型混合澄清槽	(121)
三、微型环隙式离心萃取器	(121)
第七章 液-液萃取过程的动力学	(123)
第一节 萃取动力学的基本概念	(123)
第二节 萃取动力学过程的控制机制	(123)
一、传质方程	(123)
二、萃取过程动力学的控制(机制)类型	(125)
三、传质系数的计算	(127)
四、萃取过程动力学控制类型的判断	(127)
五、研究萃取过程动力学控制机制的意义	(127)
第三节 萃取动力学研究装置和实验方法	(128)
一、实验装置	(128)
二、实验研究方法	(129)
第四节 萃取动力学研究示例	(131)
一、萃取动力学过程机制的判定	(131)
二、萃取过程机制的判定	(134)
三、萃取速率数学模型的建立	(135)
第八章 液-液萃取过程的优化	(139)
第一节 液-液萃取过程优化目标函数的选择	(139)
第二节 萃取过程参数分析	(140)
一、萃取过程的优化	(140)
二、萃取-反萃取循环过程的优化	(144)
第三节 优化计算方法	(147)
第九章 液-液萃取过程中的乳化和破乳	(150)
第一节 液-液萃取过程中的乳化现象	(150)

第二节 产生乳化的原因	(151)
一、萃取体系中含有呈胶粒状态和极细微的固体颗粒或杂质	(151)
二、在微生物制药的发酵液中有大量蛋白质存在	(151)
三、发酵液染菌	(153)
四、有机相的理化性质	(153)
五、过度的搅拌	(153)
第三节 乳化的防止和破乳	(153)
一、乳化的防止	(153)
二、破乳	(154)
第十章 液-液萃取设备——搅拌萃取槽和混合澄清槽	(159)
第一节 搅拌萃取槽	(160)
一、搅拌萃取槽的结构	(160)
二、机械搅拌器的类型和搅拌输入功率的计算	(160)
三、混合槽内的液流分散和传质	(170)
四、输入功率与传质速率的关系和混合槽的放大	(183)
五、输入能量参数的选择	(186)
六、搅拌萃取槽内的澄清分相	(187)
第二节 混合澄清槽	(187)
一、混合澄清槽简介	(187)
二、混合槽内的传质和混合槽的放大	(190)
三、澄清槽内的澄清分相和澄清槽的放大	(194)
第十一章 液-液萃取设备——液-液萃取柱	(208)
第一节 液-液萃取柱简介	(208)
一、填料柱和脉冲填料柱	(208)
二、筛板柱和脉冲筛板柱	(209)
三、往复振动筛板柱 (RPEC)	(210)
四、转盘柱 (RDC) 和不对称转盘柱 (ARD)	(211)
五、混合澄清型萃取柱	(213)
第二节 液-液萃取柱的计算	(216)
一、萃取柱柱高的计算	(216)
二、萃取柱柱径的计算	(216)
第十二章 液-液萃取设备——离心萃取器	(220)
第一节 离心萃取器的分类和主要型式	(220)
一、微分接触离心萃取器	(220)
二、逐级接触离心萃取器	(223)

三、逆流萃取倾析器	(226)
四、静态混合器-离心机组合	(227)
第二节 离心萃取器性能参数	(230)
一、离心分离因数	(230)
二、离心萃取器的压力平衡和界面控制	(230)
三、离心萃取器的操作特性	(234)
四、离心萃取器内分散相的滞留分率	(238)
五、离心萃取器内的返混	(238)
第十三章 液-液萃取设备的选择和操作	(241)
第一节 液-液萃取设备的选择及其在制药工业中的适用性	(241)
一、选择原则	(241)
二、萃取设备在制药工业中的适用性	(244)
第二节 液-液萃取操作过程中的若干问题	(244)
一、连续相和分散相的控制和反相	(244)
二、液泛和液泛流量	(247)
三、相夹带和萃取溶剂的损耗	(249)
第十四章 液-液萃取技术的新进展	(252)
第一节 新萃取体系的开发应用	(252)
一、“反应萃取”体系	(252)
二、双水相萃取体系	(252)
三、液-液-液三相萃取体系	(256)
第二节 萃取工艺过程的进展	(257)
一、全发酵液萃取	(257)
二、发酵-萃取耦合过程	(257)
第三节 液-液萃取技术的扩展应用	(258)
一、代替沉淀法进行产物的直接提取	(258)
二、代替蒸发法用于产物的浓缩	(260)
三、代替水蒸汽蒸馏用于产物的纯化	(261)
四、代替精馏方法用于相近产物的精细分离	(261)
五、用于产物的介质转换	(261)
六、发展溶剂萃取与其他分离手段相结合的组合技术	(261)

第一章 概 论

第一节 液 - 液萃取和萃取循环

一、液 - 液萃取的基本概念

无论是在科学实验还是在工业生产过程中，都经常碰到“萃取”这个词，顾名思义，“萃取”就是提取精华之意。

萃取的英文词 Extraction 还有提取、抽提、提炼等意，按这一广义的理解，萃取过程包括了从液相到液相（如碘在水和四氯化碳中的溶解），固相到液相（如用白酒浸泡中草药制取药酒），气相到液相（如用水吸收二氧化碳气体），固相到气相，液相到气相等多种情况的传质过程，但是在科学研究和生产实践中，人们所讲的“萃取”一词通常仅指液 - 液萃取过程，而把固 - 液传质过程称之为“浸取”，气 - 液传质过程称之为“吸收”，固 - 气和液 - 气传质过程称之为“超临界流体萃取”，本书所讨论的内容是液 - 液萃取过程。

在讨论萃取过程时，经常用到“相”这个词，所谓“相”，就是体系中具有相同的物理性质和化学组成的均匀部分，相与相之间有界面，可以用机械的方法将两相分开。例如一杯水，各部分均具有相同的物理性质和化学组成，因此它是一相。若在水中放进一块冰，冰水共存，这时冰和水的化学组成虽然相同，但它们的物理性质不同，冰和水之间有界面，可以用机械的方法将它们分开，所以它们组成为两相。又若在水中加入四氯化碳，由于比重不同，且水与四氯化碳不互溶，则会分成明显的二个液层，此二液层的化学组成和物理性质均不相同，所以也组成为两相。而若在水中滴入乙醇则有不同的情况，虽然乙醇和水的物理性质和化学组成均不相同，但由于二者可以互溶，故不会形成界面，而是组成均匀的乙醇 - 水溶液，这时它仍然只是一相。

一般说来，要实现液 - 液萃取过程，进行接触的两种液体必须能够形成两相，即它们必须是互不相溶或只是部分互溶的（至少要存在足够范围的两相区），因此，可以进一步把液 - 液萃取过程定义为物质从一液相转入与其不互溶（或部分互溶）的另一液相的传质过程，两液相可以是水相，也可以是有机相，其中被传递的物质称之为被萃取组分。

液 - 液萃取过程通常是从水相到有机相的传质过程，相反的从有机相到水相的传质过程是为反萃取过程。在有机化学工业中，还广泛存在有从有机相到水相（如用水作溶剂分离甲醇和苯）和从有机相到有机相（如用环丁砜进行芳烃抽提以与烷烃和烯烃分离）的传质过程。

在生物制品的萃取过程中为了防止有机溶剂对于生物制品的破坏又发展了从水相传质到另一水相的“双水相萃取过程”。

综上所述，液-液萃取包括了两种不同液相（水相-有机相，有机相-有机相和水相-水相）之间的传质过程，它们适用于不同的场合和需求，本书着重讨论的是水相和有机相之间的传质过程。

二、液-液萃取循环

被萃取组分经萃取从水相转入有机相，再经反萃取又从有机相转入水相，从而构成了一个萃取循环。为了进行被萃取组分的纯化，在萃取和反萃取步骤之间通常引入一洗涤步骤，如此“萃取-洗涤-反萃取”即构成了一个萃取循环，此如图 1-1 (a) 所示。在此循环过程中，对被萃取组分而言并不是一个简单的从水相再回到水相的过程，而是一个被提取、分离纯化和浓缩的过程。

图 1-1 (a) 所示的萃取循环方式可见于麦白霉素或螺旋霉素等的生产过程。

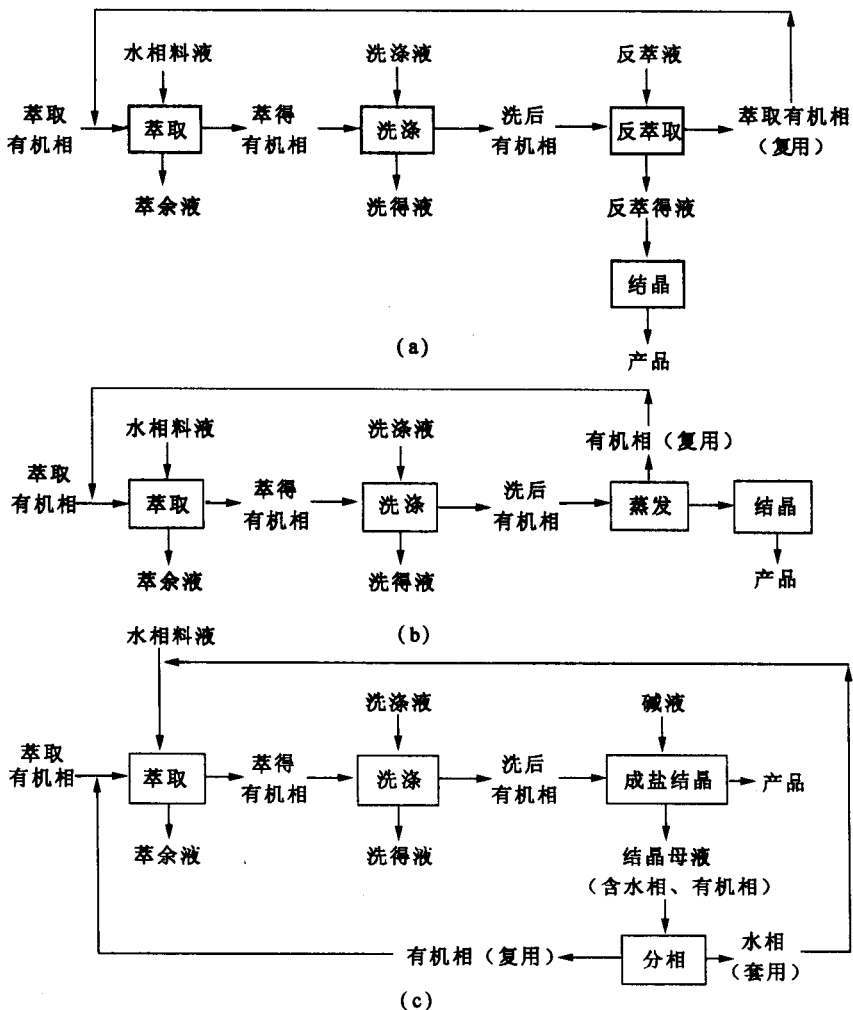


图 1-1 萃取循环方式

由图可见,所谓萃取循环也可理解为萃取有机相的循环,即新鲜萃取有机相→萃得有机相→反萃后萃取有机相循环复用。

在工业中通常还可看到其他的萃取循环方式,如图 1-1 (b)、(c) 所示。

图 1-1 (b) 可见于氢化可的松的生产过程。

图 1-1 (c) 可见于利福霉素钠盐的生产过程。

第二节 液-液萃取体系的分类

何谓液-液萃取体系?马荣骏^[1]指出:“溶剂萃取体系由水相和有机相组成,水相是指萃取原液、反萃取液和洗涤液,有机相是指萃取剂和稀释剂”,这一说法显然有其道理,因为萃取过程是两相间的传质过程;但本文所讨论的萃取体系仅局限于有机相体系,即溶剂体系。

萃取有机相可是单一萃取剂,也可由萃取剂和稀释剂组成,萃取剂的品种繁多,萃取的对象也各不相同,为了更好地对其进行研究,有必要按一定的方式对其进行科学的分类。对此,人们从不同角度提出了多种分类方法,归结起来,可有如下 3 种分类方法,即按萃取剂的结构类别,萃取过程有无化学反应和萃取机制分类。

一、按萃取剂的结构类别分类

目前萃取剂有很多品种,而且不断有新的萃取剂问世,通常可将其分为溶剂化萃取剂、阳离子萃取剂、阴离子萃取剂和螯合萃取剂^[1]。

1. 溶剂化萃取剂

这类萃取剂又可分为含氧、含硫和中性含磷等萃取剂。

含氧萃取剂主要指醚、醇、酯、酮、醛类等有机化合物。其中醋酸丁酯是在制药工业中应用最广泛的一种萃取剂。

中性含硫萃取剂的应用日益引起了人们的关注,如亚砷类萃取剂(如石油亚砷)已成为稀有金属的特效萃取剂,二异辛基亚砷亦应用于青霉素 G 的萃取^[2,3]中。

中性含磷萃取剂是在水法冶金中广为应用的一种萃取剂。根据分子中磷碳键数目的不同,可以分为磷酸酯 $[(RO)_3PO]$ 、麟酸酯 $[(RO)_2RPO]$ 、次麟酸酯 $[(RO)R_2PO]$ 和三烷基氧化磷 (R_3PO) 几种类型,其中,磷酸三丁酯(TBP)应用最为广泛,是铀、钚萃取分离的首选萃取剂,它亦被应用于制药工业的研究中,如杨智发曾将其用于青霉素 G 的萃取^[4]。

2. 阳离子萃取剂

这类萃取剂也称之为酸性萃取剂,其主要特点是在萃取过程中发生阳离子交换反应。属于这一类萃取剂的有羧酸、磺酸、酸性含磷萃取剂和羟肟类萃取剂。

羧酸是一弱酸,通式为 $RCOOH$,考虑到其水溶性,在工业生产中通常采用 7~9 个碳的脂肪酸作萃取剂,如环烷酸、叔碳羧酸(Versatic 9、Versatic 911)等。

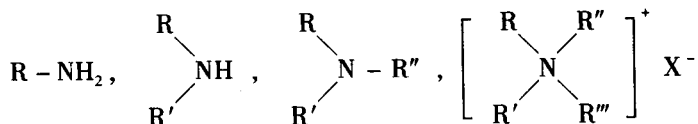
磺酸的通式为 RSO_3H ,是一种强酸性萃取剂。

酸性含磷萃取剂广泛应用于水法冶金工业中,如 P 204 [二(2-乙基己基)]磷酸,

P507 [2-乙基己基膦酸 (单2-乙基己基酯)], 但在制药工业中少见应用。

3. 阴离子萃取剂

这类萃取剂为胺类萃取剂, 主要是伯、仲、叔胺及季铵盐, 其分子式分别为:



前三者属于中等强度的碱性萃取剂, 后者属强碱性萃取剂。考虑到胺类化合物的水溶性, 用作萃取剂的有机胺的分子量通常在 250~600 之间。

这类萃取剂的基本反应有:

- (1) 中和反应: 有机酸与胺反应生成盐;
- (2) 化合反应: 酸与胺盐或季铵盐发生反应生成盐;
- (3) 阴离子交换反应: 被萃取酸的阴离子置换胺盐或季铵盐的阴离子。

胺类萃取剂在青霉素提取中多有研究^[5-7]。

4. 螯合萃取剂

这类萃取剂在萃取过程中生成具有螯环的萃合物, 即螯合物。

典型的螯合萃取剂为羟肟类、8-羟基喹啉衍生物和 β -双酮类。

有关上述若干萃取剂的结构和物理性质可参见有关资料^[1,8-11]。在已有资料^[9]的基础上经核对、补充后, 将部分可用作萃取剂的有机溶剂及其物性常数列于表 1-1 中。

表 1-1 萃取常用有机溶剂及其物理常数

分类	溶剂名称	分子式	分子量	密度 (g/ml)	沸点 (℃)	折射率 n_D	介电常数 ϵ	偶极矩 μ	黏度 η	表面张力 σ	在水中的溶解度
烷 烃	己烷	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	86.17	0.65937 (20℃)	68.7	1.37486 (20℃)	1.9 (20℃)	0.27	0.2923 (20℃)	18.94 (15℃)	0.138g/L (20℃)
	环己烷	C_6H_{12}	84.16	0.7831 (15℃)	80.7	1.42623 (20℃)	2.0 (20℃)	0	0.898 (25℃)	25.64 (15℃)	0.01g/100g (20℃)
	庚烷	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$	100.2	0.6879 (15℃)	98.4	1.38765 (20℃)	1.924 (25℃)	0.0	0.3903 (25℃)	20.85 (15℃)	0.005g/100g (15.5℃)
	辛烷	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$	114.23	0.69849 (25℃)	125.7	1.39742 (20℃)	1.948 (25℃)		0.5138 (25℃)	21.75 (20℃)	0.142g/100g (20℃)
芳 烃	苯	C_6H_6	78.11	0.87368 (25℃)	80.1	1.50110 (20℃)	2.3 (20℃)	0	0.6028 (25℃)	28.78 (20℃)	0.180g/100g (25℃)
	甲苯	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	92.13	0.86231 (25℃)	110.8	1.49693 (20℃)	2.3 (20℃)	1.23	0.5516 (25℃)	28.53 (20℃)	0.47g/L (20℃)
	邻二甲苯	邻- $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	106.16	0.8745 (20℃)	144	1.50543 (20℃)	2.6 (20℃)	1.47	0.756 (25℃)	30.03 (20℃)	不溶于水
	间二甲苯	间- $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	106.16	0.85990 (20℃)	138.8	1.49721 (20℃)	2.4 (20℃)	1.134	0.581 (25℃)	26.63 (20℃)	0.196g/L (25℃)

续表

分类	溶剂名称	分子式	分子量	密度 (g/ml)	沸点 (°C)	折射率 n_D	介电常数 ϵ	偶极矩 μ	黏度 η	表面张力 σ	在水中的 溶解度
芳 烃	对二甲苯	对-C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.18	0.8611 (20°C)	138.5	1.49581 (20°C)	2.3 (20°C)	0.00	0.605 (25°C)	28.31 (20°C)	0.19g/L (25°C)
	混合二甲苯	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	106.16								
取 代 烃	氯仿	CHCl ₃	119.39	1.4892 (20°C)	61.3	1.44858 (20°C)	4.806 (20°C)	3.84	0.514 (30°C)	27.16 (20°C)	0.822g/100g (20°C)
	甲基氯仿	CH ₃ CCl ₃	133.42	1.3249 (26°C)	74.1		7.5 (20°C)				0.132g/100g (20°C)
	四氯化碳	CCl ₄	153.84	1.595 (20°C)	76.3	1.46030 (20°C)	2.238 (20°C)	0.00	1.45759 (25°C)	26.75 (20°C)	0.077g/100ml (25°C)
	1,1-二 氯乙烷	CH ₃ CHCl ₂	98.97	1.18350 (15°C)	57.31	1.41715 (20°C)	10.0 (20°C)	6.60	0.730 (25°C)	24.75 (20°C)	0.505g/100g (25°C)
	1,2-二 氯乙烷	CH ₂ Cl—CH ₂ Cl	98.97	1.26000 (15°C)	83.5	1.41460 (20°C)	10.36 (20°C)	6.20	0.730 (30°C)	32.23 (20°C)	0.81% (质量)
	三氯乙烯	CHCl=CCl ₂	131.39	1.4556 (25°C)	87.2	1.4777 (20°C)	3.4 (20°C)	3.0	0.532 (25°C)	28.8 (25°C)	0.07% (体 积)(20°C)
	氯苯	C ₆ H ₅ Cl	112.56	1.10630 (20°C)	131.68	1.52481 (20°C)	5.621 (20°C)	5.14	0.715 (30°C)	33.28 (20°C)	0.488g/1000g (30°C)
	硝基甲烷	CH ₃ NO ₂	61.04	1.14476 (15°C)	101.25	1.38189 (20°C)	35.87 (30°C)	11.54	0.595 (30°C)	36.98 (20°C)	9.5ml/100ml (20°C)
	硝基乙烷	C ₂ H ₅ NO ₂	75.07	1.0528 (20°C)	114.0	1.3920 (20°C)	28.06 (30°C)	3.70	0.661 (25°C)	31.31 (25°C)	4.5ml/100ml (20°C)
醇 类	硝基苯	C ₆ H ₅ NO ₂	123.11	1.20824 (15°C)	210.8	1.5525 (20°C)	34.82 (25°C)	14.04	0.634 (30°C)	43.35 (20°C)	0.206g/100g (30°C)
	异丙醇	异-C ₃ H ₇ OH	60.9	0.78512 (20°C)	82.4	1.3747 (25°C)	18.3 (25°C)	5.60 (气)	1.765 (30°C)	21.79 (15°C)	7.45% (质 量)(25°C)
	丁醇	C ₄ H ₉ OH	74.12	0.81337 (15°C)	117.7	1.39922 (20°C)	17.1 (25°C)	5.60	2.271 (30°C)	24.57 (20°C)	7.8% (质量) (20°C)
	异丁醇	(CH ₃) ₂ CH CH ₂ OH	74.12	0.8169 (20°C)	107.9	1.3939 (20°C)	17.7 (20°C)	5.7	3.91 (25°C)	22.98 (20°C)	8.5% (质量) (20°C)
	戊醇	C ₅ H ₁₁ OH	88.15	0.8144 (20°C)	138.1	1.40999 (20°C)	13.9 (25°C)	1.8	3.347 (25°C)	25.60 (20°C)	2.19% (质 量)(25°C)
	异戊醇	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH ₂ OH	88.15	0.81289 (15°C)	130.5	1.40658 (20°C)	14.7 (25°C)	1.82	2.96 (30°C)	24.77 (15°C)	2.67% (质 量)(25°C)

续表

分 类	溶剂 名称	分子式	分子量	密度 (g/ml)	沸点 (℃)	折射率 n_D	介电常 数 ϵ	偶极矩 μ	黏度 η	表面张力 σ	在水中的 溶解度
醇 类	己醇	$C_6H_{13}OH$	102.18	0.82239 (15℃)	157.5	1.41816 (20℃)	13.3 (25℃)		5.2 (20℃)	24.48 (20℃)	0.706% (质 量)(20℃)
	环己醇	$C_6H_{11}OH$	100.16	0.9684 (25℃)	161.1	1.4629 (25℃)	15.0 (25℃)	1.9	4.6 (25℃)	33.91 (25℃)	3.75% (质 量)(20℃)
	甲基异丁 基甲醇	$CH_3CH(OH)$ $CH_2CH(CH_3)_2$	102.16	0.80247 (25℃)	131.8	1.4089 (25℃)					1.64% (质 量)(25℃)
	辛醇	$C_8H_{17}OH$	130.23	0.82555 (20℃)	155.28	1.42913 (20℃)	10.34 (20℃)	5.60	6.125 (30℃)	26.06 (20℃)	0.0538% (质 量)(25℃)
	2-辛醇	$CH_3(CH_2)_5CH$ $(OH)CH_3$	130.23	0.8193 (20℃)	178.5	1.4260 (20℃)	8.2				不溶
	2-乙基 己醇	$C_4H_9CH(C_2H_5)$ CH_2OH	130.23	0.8340 (20℃)	183.5	1.4300 (20℃)				30 (22℃)	0.10g/100mg 水(25℃)
	壬醇	$CH_3(CH_2)_7$ CH_2OH	144.25	0.8269 (20℃)	214	1.4311 (20℃)			14.3 (20℃)		0.06% (质 量)(20℃)
酚 类	癸醇	$CH_3(CH_2)_8$ CH_2OH	158.28	0.8310 (20℃)	231	1.4368 (20℃)			13.83 (20℃)		0.02% (质 量)(20℃)
	苄醇	$C_6H_5CH_2OH$	108.14	1.04127 (25℃)	205.5	1.5371 (25℃)	13.1 (20℃)	5.54	4.650 (30℃)	38.94 (30℃)	3.8% (质量) (20℃)
	苯酚	C_6H_5OH	94.11	1.05760 (41℃)	181.8	1.54178 (41℃)	9.78	5.77	4.076 (45℃)	37.77 (50℃)	8.66% (质 量)(25℃)
醚 类	间甲酚	间- $CH_3C_6H_4OH$	108.13	1.0380 (20℃)	202.7	1.5438 (20℃)	11.8	5.15	9.807 (30℃)	36.54 (30℃)	2.4% (体积) (20℃)
	乙醚	$(C_2H_5)_2O$	74.12	0.71925 (15℃)	34.5	1.35272 (20℃)	4.335 (26.9℃)	3.74	0.242 (20℃)	17.06 (20℃)	7.24% (质 量)(20℃)
	丙醚	$(C_3H_7)_2O$	102.17	0.75178 (20℃)	90.1	1.3803 (20℃)	3.39 (26℃)	3.78	0.376 (30℃)	20.53 (20℃)	0.25% (质量)
	异丙醚	$(CH_3)_2CHOCH$ $(CH_3)_2$	102.17	0.72813 (20℃)	68.27	1.36888 (20℃)	3.88 (25℃)	4.0	0.379 (25℃)	17.34 (24.5℃)	0.65% (体积)
	丁醚	$(C_4H_9)_2O$	130.22	0.76889 (20℃)	141.97	1.39925 (20℃)	3.06 (25℃)	4.07	0.602 (30℃)	23.40 (15℃)	实际不溶
醚 类	β, β -二 氯乙醚	$(ClCH_2CH_2)_2O$	143	1.2192 (20℃)	178.75	1.45750 (20℃)	21.2	1.47	2.14 (25℃)	37.6 (20℃)	1.02%

续表

分类	溶剂名称	分子式	分子量	密度 (g/ml)	沸点 (℃)	折射率 n_D	介电常数 ϵ	偶极矩 μ	黏度 η	表面张力 σ	在水中的溶解度
酮类	甲乙酮	$\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$	72	0.80473 (20℃)	79.50	1.37850 (20℃)	18.51	9.26	0.423 (15℃)	23.97 (24.8℃)	26.3% (质量) (22℃)
	甲丙酮	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{CH}_2)_2\text{CH}_3$	86.14	0.8089 (20℃)	101.7	1.3902 (20℃)	15.4 (20℃)	/	/	/	微溶
	甲戊酮	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	114.18	0.817 (20℃)	150	/	11.9 (20℃)	/	/	/	0.4g/100g (20℃)
	甲基异丁基酮	$\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	86.13	0.8006 (20℃)	115.8	1.3958 (20℃)	18.3	9.45	1.803 (30℃)	35.12 (15℃)	2% (体积) (20℃)
	2-庚酮	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$	86.13	0.822 (15℃)	150	1.4110	9.77 (22℃)	9.01	0.766 (25℃)		5.9% (质量) (20℃)
	环己酮	$\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_2$	98.15	0.95099 (15℃)	155.65	1.45097 (20℃)	18.3 (20℃)	10.0	2.453 (15℃)	35.12 (15℃)	2.3% (质量) (20℃)
酯类	醋酸乙酯	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	88.10	0.90063 (20℃)	77.114	1.37239 (20℃)	6.02 (20℃)	6.27	0.4263 (25℃)	23.75 (20℃)	8.08g/100g (25℃)
	醋酸丙酯	$\text{CH}_3\text{COOC}_3\text{H}_7$	102.13	0.8867 (20℃)	101.548	1.38442 (20℃)	5.69 (20℃)		0.585 (20℃)	24.28 (20℃)	1.89g/100ml
	醋酸异丙酯	$\text{CH}_3\text{COOCH}(\text{CH}_3)_2$	102.13	0.869 (20℃)	89	1.37730 (20℃)			0.569 (20℃)	22.10 (22℃)	3.09% (20℃)
	醋酸丁酯	$\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$	116.16	0.8813 (20℃)	126.114	1.39406 (20℃)	5.01 (19℃)	6.14	0.688 (25℃)	25.2 (20℃)	1.0% (质量) (20℃)
	醋酸异丁酯	$\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	116.16	0.8745 (20℃)	118.0	1.39018 (20℃)	5.29 (20℃)	6.24	0.734 (20℃)	25.09 (20℃)	0.67% (质量) (20℃)
	醋酸戊酯	$\text{CH}_3\text{COOC}_5\text{H}_{11}$	130.18	0.8753 (20℃)	149.2	1.40228 (20℃)	4.63 (30℃)	6.37	0.862 (20℃)	25.8 (20℃)	0.2% (体积) (20℃)
	醋酸异戊酯	$\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)_2$	130.18	0.8719 (20℃)	142	1.4067 (20℃)	4.75 (20℃)	6.07	0.872 (20℃)	24.62 (20℃)	2% (质量) (25℃)
	苯甲酸甲酯	$\text{C}_6\text{H}_5\text{COOCH}_3$	136.14	1.09334 (15℃)	199.50	1.51701 (20℃)	6.59 (20℃)	1.86	2.298 (15℃)	38.14 (20℃)	0.21% (质量) (20℃)
	磷酸三丁酯	$(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3\text{PO}$	230.16	0.9727 (27℃)	154 (1.33kPa)	1.4226 (20℃)	8.0	2.57	3.32 (25℃)	27.79 (20℃)	0.6% (体积)