

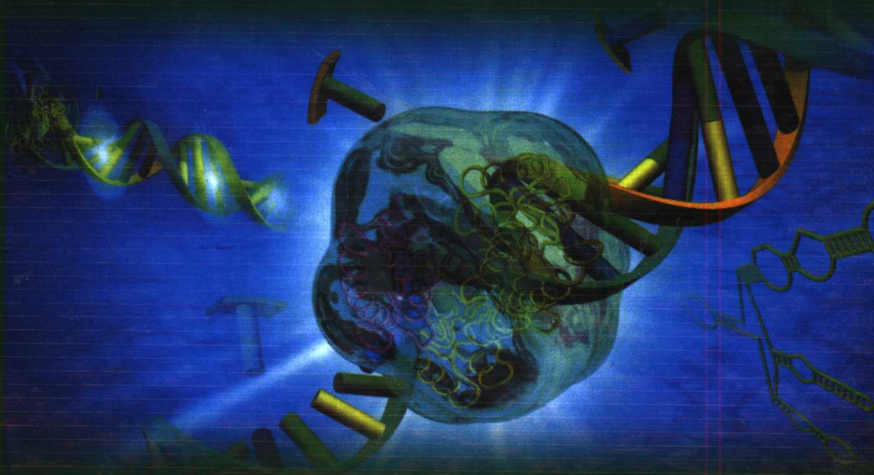
有机反应

——多氮化物的反应及若干理论问题

ORGANIC REACTIONS
—THE REACTIONS OF
POLYNITROGEN COMPOUNDS
AND SOME THEORETIC
QUESTIONS

王乃兴 著

第二版



化学工业出版社

有机反应

——多氮化物的反应及若干理论问题

ORGANIC REACTIONS—

THE REACTIONS OF POLYNITROGEN COMPOUNDS
AND SOME THEORETIC QUESTIONS

第 二 版

王乃兴 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

有机反应——多氮化物的反应及若干理论问题/王乃兴
著. —第二版. —北京: 化学工业出版社, 2004. 6
ISBN 7-5025-5666-4

I. 有… II. 王… III. 氮化物: 有机化合物-化
学反应 IV. 0622.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 062641 号

有机反应
——多氮化物的反应及若干理论问题
第二版

王乃兴 著
责任编辑: 戴燕红
责任校对: 王素芹
封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市东柳装订厂装订
开本 720 mm×1000 mm 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 字数 513 千字
2004 年 10 月第 2 版 2004 年 10 月北京第 2 次印刷
ISBN 7-5025-5666-4/TQ·2016
定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第二版前言

承蒙读者厚爱，本书得以再版。

我敬劝翻阅此书的读者，不妨选读本书的几节或几章，您一定有所受益。

大家知道，化学是一门核心科学。由美国 T. L. Brown. 等编著，Prentice Hall, Inc 出版公司出版的《化学——中心科学》(Chemistry—The Central Science) 已出到第八版。北京大学徐光宪院士在《化学通报》2003 年第一期上撰文提出，21 世纪是信息科学、合成化学和生命科学共同繁荣的世纪；指出 21 世纪化学面临的一些难题，如化学反应的问题，结构与性质的定量关系，以及生命化学难题等。作者认为，在 20 世纪，化学已经为人类作出了不可替代的巨大贡献，如果说没有化学家解决化肥的问题，不知有多少人将会挨饿；如果没有化学家解决抗生素的问题，一个腮腺炎就会夺去一条生命。更不用说，化学为人们提高生活品味，乃至延年益寿作出的巨大贡献。合成纤维、合成塑料、合成橡胶曾极大地促进了生产力的蓬勃发展。

人类要生存和发展就要不断创造新物质。化学特别是合成化学是直接创造新物质的科学，所以徐光宪院士将合成化学与分离技术排在第一位。作者认为，有机合成化学与纯化学研究、精细化工、农林、材料、制药、生物化学和生命科学、医学、地学等诸多学科和领域都有着密不可分的渊源，希望有志于投身有机化学事业的年轻一代，酷爱这门神奇而又有活力的基础学科。

有机化学门类繁多，传统的教科书按照烃、卤代烃、醇、醚、醛、酮、羧酸、酯、糖类、萜类、甾族等等来分类，显然这些庞杂的化合物是不含氮的。关于化合物的命名，人们多从其结构特征和性质入手，还有一些属于音译等。作者 1987 年从事研究工作以来，从合成氮杂环硝基衍生物开始，到合成一些辅酶 NADH 模型分子和一些手性分子，在研究相关的多氮化物反应方面用去了一定的时间，有了一定的积累。本书选取了一些较为前沿的工作，内容上新颖一些，形式上面广一些，因此不像教科书那样系统和易读。作者选用多氮化物仅仅是一条主线，是把书中的主要内容串起来，并没有罗列大量的多氮化物的性质用途等，也没有涉及庞杂的杂环化合物，而只是给出了一些典型的反应，并对机理作了说明。在第二版的增补方面也只是增加了四唑、四嗪、生物碱合成、新的卟啉

衍生物的合成等有特色的内容。

第二版的增补，首先是增加了全新的第7章“含氮化合物的手性合成有机反应”。手性合成代表了现代有机合成的前沿，作者目前也从事这方面的研究工作，由于本书涉及多氮化物，作者只能就含氮化合物在手性合成方面的相关内容给予概述。在新增的这一章最后，作者提出了一个观点，即手性只能靠引入和导入而来，只能由不对称中心转换而来，不能凭空产生。目前常用的四大类手性合成方法：天然手性源的手性合成，通过手性试剂的手性合成，通过手性助剂的手性合成，通过手性催化剂的手性合成。前两种靠引入，后两种靠导入。手性拆分常用结晶法，要用纯手性化合物来拆分，手性柱要有手性填料，酶法是因为酶本身有手性。对手性化合物认识的不断深入，表示人们已经进入了有机合成化学的一个新层次，向自然的本来面目逼近了一步。因为生命物质是有手性的，生命体对医药分子亦提出了手性的要求。

第二版增补了绪论部分，成为新的一章。系统地介绍了多氮化物在医药、功能材料、天然化合物方面的进展，重点介绍了其在医药方面如抗菌素、抗病毒药物及抗高血压药物的进展。多氮化物在药物方面的内容极其丰富，可以说没有多氮化物，医药则所剩无几。当然并不是说因为含氮才会有疗效，而是从所含元素的角度来看，氮元素对太多的医药和生命物质实在是不可缺少的。进一步从有机化学的角度提出一些新理论来说明，为什么在一百多种元素中，氮对医药分子和生命物质必不可缺，这是一个新问题。Kern 等用 NMR 观察了 Cyclophilin A 在催化过程中氨基酸骨架氮原子的运动，结果发现在酶骨架中有 9 个氮原子当酶与底物发生作用时会发生变化。DNA 双螺旋结构中碱基配对时的物质载体是氮原子，生物体系中的超分子组装中氢键的形成少不了含有孤对电子的氮原子，这就说明了多个氮原子存在的重要性。许多多氮杂环衍生物有抗菌活性，其特殊杂环结构与功能的深层原因还需要大家进一步从理论上探讨，以便对分子设计有所启示。氮原子的一个显著特征就是其孤对电子可以作为电子的给予体。

第二版对原书的第5章（本书第6章）NADH（NADPH）等生物活性分子及酶催化有机反应中，补充了不少新内容，主要是这方面发展太快了。第二版还增加了视觉光化学新的内容，因为生物光化学原本涉及光合作用、视觉光化学、游离基光化学等几个范畴。光合作用与 NADH 相关，视觉光化学也与 NADH 有关系，视觉光化学涉及到物质的立体化学和能量变化，涉及细胞信号传输等更复杂的问题。作者认为，回答和解决生物光化学中的问题，最终还得依靠化学手段。

第二版在酶催化一节最后补充了酶催化的手性合成，并对原书第6章有机反

应中的若干理论问题中的溶剂效应部分，补充了氟有机溶剂的专论，由于现代固相反应是利用载体进行相关的有机反应，这种新的反应方法使得反应中原料和副产物容易分离除去，是一门新的方法学，第二版做了专论。另外第二版增补了一些 C_{60} 含氮衍生物合成方面的新内容等。

徐光宪院士把合成化学与其他两门科学作为共同繁荣 21 世纪的科学，是非常精辟的。在长沙 2004 年 4 月中国化学会第 24 届年会上，唐有祺院士对合成化学也寄予厚望，他认为整理天然产物将对合成化学起到很重要的作用，在这方面，20 世纪最有影响的就是 R. B. Woodward，维生素 B_{12} 的合成正是其大手笔的写照，本书在绪论中作了介绍。哈佛大学的 Y. Kishi 于 1989 年在美国化学会志 (J. Am. Chem. Soc.) 发表了海葵毒素全合成的论文，美国 Chemical & Engineering News 给予了极高的评价。海葵毒素是一种结构十分复杂的天然产物，分子式 $C_{129}H_{223}N_3O_{54}$ ，有 64 个手性中心，可能的立体异构体是 2^{71} 个，立体专一地合成所需要的目标产物海葵毒素，其合成难度不言而喻。

有机化学制造新物质的方法就是有机合成。合成是要靠多步骤的有机反应来完成的，因此，有机反应是化学科学活的灵魂。有机反应中物质的组成、结构都在发生变化，有机反应又涉及到能量的变化、设备条件、反应介质、环境保护等一系列问题，手性合成反应还要考虑到 e. e. % 值的提高、手性保持、手性催化剂回收等新问题。特别是，有机反应中复杂的化学变化应该是可知的，一些活性中间体的捕获，一些反应机理的提出，一些结构学说的发展等理论问题应该层出不穷。人们对有机反应的研究进一步丰富了结构化学、物理化学和物理有机化学以及分析化学的内容。

有机反应到底是怎样进行的？我们的肉眼看不见微小的有机分子在反应中的变化过程，扫描电镜等延伸了人们的观察能力，但是人们对于处于活动状态的分子以及活生生的分子（如生物体系中鲜活的分子）运动规律的认知，还非常之肤浅。我们虽然在实验手段极其有限的条件下作了艰辛的探索，但科学实验的实践活动永远不会停止在原有的水平上，人的认识的深化永远没有穷尽。华裔科学家李远哲教授曾设计出交叉分子束的实验手段，对化学反应过程进行过深入的研究，于 1986 年荣获诺贝尔化学奖。然而，各种更新的实验手段还需要人们去设计，去创造。

作者认为，要提高主观见之于客观的理论和观点的正确性，就要站得高一些，就要靠不断学习和深入研究来提升自己。实验是化学研究的最基本的东西，应该通过实验来进一步研究反应、理解反应，分析和解决一些理论问题。

本书名为有机反应，是因为各章都涉及有机反应的命题。书名用小标题限制

到了一个侧面上来。应该说明,作者并不是专门从事多氮化物研究的,本书是在通过研究多氮化物这个侧面,有特色地论述相关的有机反应的新进展、反应中结构的问题等。书中提到的 Wittig 反应, Diels-Alder 反应, 维生素 B₁₂ 等复杂天然产物合成, 固氮, 酶, 酶催化, 叶绿素和血红素, 类胡萝卜素和维生素 A, 生物碱, 前线轨道理论, 化学反应中的电子转移理论, 相关化合物电子结构理论, Fullerene 烯 C₆₀, 辅酶如 NADH (NADPH), 光合作用、冠醚和超分子化学、催化不对称合成等内容都涉及到诺贝尔化学奖(见本书附录)。本书涉及到的相关生物医学活性分子、生物碱分子以及光合作用与视觉光化学等内容, 都比较新颖。另外作者在书中多次提到了有机反应中的能量问题, 多处对所提出的反应过渡态中间体的稳定性, 从能量角度加以分析, 因为有机反应能够发生的原因之一就是能量最低原理。书中大量内容是作者所从事过的研究工作, 但不仅限于个人的工作, 书中引用论述别人的工作都给出了文献出处, 读者如能细读, 能够得到一些裨益。另外, 结合作者给出的大量文献信息, 读者可以找到具体实验操作步骤和方法, 做进一步深入的专门的研究。2004 年 8 月, 在兰州大学召开了第三届全国有机化学学术会, 发表的论文涉及到手性化合物内容的最多。可以看出, 我国有机化学的国际水平在不断提高。

原书出版不到两年, 现出第二版, 虽增补了一些内容, 但时间毕竟太少, 能利用的时间也只有周末, 特别是春节和“五·一”。由于著者水平有限, 时间仓促, 书中有误之处敬请读者指正。在此感谢国家 863 项目 2003AA323030 对我们科研工作的资助。



于北京中关村新科祥园

第一版前言

本书对一些多氮化物的反应作了阐述,如一些多氮化物的缩合反应的历程,叠氮化物及其衍生物苯并氧化呋咱的主要反应,侧重介绍了一些多氮化物的重要反应;含氮化物与 Fullerene[60]的化学反应涉及一些新方法,本书也作了介绍。多氮化物不仅涉及前景广阔的杂环化合物和一些新试剂、新反应、新方法,而且在生命科学领域占有重要位置。本书对 NADH (NADPH) 等生物活性分子及其模型分子的合成, NADPH 与生物光化学等内容作了较为深入的描述,并概述了酶催化的有机反应。相信这些生物活性分子的有机反应会引起读者的兴趣。

研究有机化学中的一些理论问题,一直是化学科学的重要内容,涉及到的范围很广。本书主要有有机反应中的溶剂效应,如溶剂对反应的定量理论,新的反应介质、离子液体、固相反应等作了说明;本书对有机反应中的相转移催化作用作了阐述,并对相转移催化的新进展如三相相转移催化、温控相转移催化、手性相转移催化剂等作了描述;本书对有机反应中的极性转换作用作了介绍,给出了一些新例证说明了其在有机反应中的应用。最后,运用前线轨道理论,对环加成反应的择向效应作了总结,介绍了微扰分子轨道法在有机反应中的应用。本书在各大节后均给出了主要参考文献,有利于读者进一步探讨。书中的主要内容是作者近几年来在国内外刊物上发表过的研究工作,较为新颖和前沿,本书作了修改和补充。

笔者长期从事有机化学的研究工作,已在国内外核心期刊发表论文百余篇。本书结合作者多年来在国内和在美国的一些研究工作,主要筛选了作者在多氮化物的反应等方面的积累,整理出版本书,抛砖引玉,以期扩大读者的知识面,同时对有机理论的学习有所帮助,并在培养正确的思考方法上有所裨益。为便于读者阅读,作者对有关反应机理均加了箭头。由于水平有限,时间不多,书中难免有误,敬请多加指正为盼。在此,感谢国家自然科学基金(50272069)的资助。

王乃兴

2002 年 10 月

内 容 提 要

本书概述了多氮化物的研究进展,论述了相关多氮化物的反应问题。书中对叠氮化物及其衍生物苯并氧化呋咱的主要反应、叠氮化物在氮杂 Wittig 反应中的应用和机理,三唑、苯并三唑、咪唑环番、卟啉衍生物,吲哚生物碱等均作了较为详尽的阐述,并对含氮化合物与 Fullerene [60] 的有机反应及其进展作了论述。对 NADH (NADPH) 等生物活性分子及其模型分子的结构特征和相关反应作了深入的描述,对 NADPH 与光合作用以及视觉光化学等生物光化学内容作了介绍。手性合成涉及有机反应的前沿,本书详细论述了相关含氮化物手性合成及不对称合成反应中的重要方法等。

本书对有机反应中的溶剂效应和各种新反应介质、相转移催化及其新方法以及极性转换的作用等重要理论问题作了阐述。

本书可供有机化学、生物化学、药物化学、材料化学、精细化工和生物工程等专业的高年级学生、研究生、教师及科研人员学习参考。

作者简介

王乃兴 1993 年入中国科学院化学所做博士后，1995 年完成博士后研究，留所任副研究员。1996 年 10 月自瑞典赴美国从事博士后研究，在美国 Rice 大学获 Robert Welch 博士后奖学金和 Extraordinary Ability Individuals (O-1-VISA) 等。2000 年从美国休斯顿回到北京，入选中国科学院“百人计划”。已在国外和国内核心科技刊物上发表论文百余篇（多数为 SCI 论文），回国后数次为美国权威杂志 J. Org. Chem. 审稿。现任中国科学院理化所研究员、博士生导师。并担任国家一个“863”项目首席科学家。目前主要从事功能分子和手性化合物的合成研究。

目 录

第 1 章 绪论	1
医药研究方面	1
1.1 多氮化物作为抗菌素	1
1.2 多氮化物作为降压药	6
1.2.1 多氮化物作为中枢降压药	6
1.2.2 多氮化物作用于离子通道的药物	7
1.2.3 多氮化物作为利尿降压药	9
1.2.4 影响 RAAS 系统的药物	9
1.2.5 多氮化物作为 α 受体阻断剂	12
1.2.6 β 受体阻滞剂	13
1.2.7 多氮化物作为其他几种重要的心血管药	16
1.3 多氮化物作为抗病毒药物	24
1.4 其他药物	31
功能材料方面	39
1.5 合成染料类	39
1.6 新型非线性光学材料	41
1.7 新型含能材料	42
1.8 电化学传感器	43
1.9 多氮化物作为新催化剂	44
天然化合物	45
1.10 简介	45
1.11 维生素 B ₁₂	46
1.12 天然生物活性分子	49
1.12.1 生物碱	49
1.12.2 辅酶 NAD(P)H	59

1.13 多氮天然产物的手性合成	61
第2章 多氮化物的缩合反应	73
2.1 多氮化物二氨基吡啶的缩合反应	73
2.1.1 二氨基吡啶与几种多硝基卤代苯的反应	75
2.1.2 溶剂效应	77
2.1.3 NaF 的促进作用	77
2.1.4 紫外光谱吸收	78
2.1.5 小结	78
2.2 二氨基吡啶缩合反应动力学	79
2.3 二氨基吡啶衍生物的性能与结构理论	82
2.4 相关有机功能材料的性能与结构	87
第3章 叠氮衍生物的有机反应	90
3.1 叠氮化物的结构理论	90
3.2 苯并氧化呋咱的结构和反应	95
3.2.1 苯并氧化呋咱的结构	95
3.2.2 苯并氧化呋咱的合成方法	97
3.2.3 苯并氧化呋咱的主要反应	98
3.2.4 苯并氧化呋咱衍生物的合成新进展	100
第4章 多氮化物的有机反应	104
4.1 有机合成中的氮杂 Wittig 反应	104
4.1.1 亚胺基磷的制备和应用	104
4.1.2 分子内氮杂 Wittig 反应在杂环合成中的应用	106
4.1.3 串联氮杂 Wittig 反应的杂环合成	109
4.1.4 氮杂 Wittig 反应的进展	113
4.2 三唑化合物的合成反应	122
4.2.1 叠氨基与重键的作用	123
4.2.2 氨基缩合和氨基与异硫氰酸酯加成	124
4.2.3 Hoffmann 重排反应	125
4.2.4 其他反应类型	126
4.3 三唑衍生物的合成	129
4.4 多氮咪唑衍生物及咪唑环番	132

4.5 苯并三唑的有机反应	135
4.5.1 苯并三唑作为好的离去基团	135
4.5.2 促使质子离去	136
4.5.3 好的电子给体	136
4.6 多氮新试剂——DBU	137
4.7 氮宾及其单线态与三线态	141
4.7.1 氮宾的结构	141
4.7.2 氮宾的生成	143
4.7.3 氮宾的反应	144
4.8 荧光与磷光现象	146
4.8.1 结构特征	146
4.8.2 荧光与磷光	147
4.9 有机硝化反应中的单电子转移机理	150
4.9.1 概念	151
4.9.2 研究概况	152
4.9.3 球层机理	153
4.10 叠氮化物的分解反应	155
4.11 重氮化物的结构和反应	159
4.12 四唑和四嗪的有机反应	161
4.12.1 四唑及其有机反应	161
4.12.2 四嗪及其反应	164
4.13 相关天然吡啶生物碱的合成反应及吡啶合成	165
4.13.1 Suzuki 反应合成吡啶生物碱	165
4.13.2 Negishi 反应合成吡啶生物碱	168
4.13.3 Stille 反应合成吡啶生物碱	170
4.13.4 Heck 反应合成吡啶生物碱	171
4.13.5 Tsuji-Trost 反应合成吡啶生物碱	172
4.13.6 吡啶骨架的合成	173
4.14 卟啉衍生物的合成反应	179
4.14.1 卟啉衍生物的生物合成	179
4.14.2 卟啉衍生物的化学合成	181

4.14.3 聚卟啉的合成反应	184
4.15 生物圈和植物中的氮素	192
第5章 含氮化物与 Fullerene[60] 的有机反应	199
5.1 Fullerene[60] 的有机反应	199
5.1.1 加成反应——Fullerene[60] 的主要反应方式	199
5.1.2 其他几种有机反应类型	200
5.2 Fullerene[60] 与含氮化合物反应	204
5.2.1 与叠氮化物的反应	204
5.2.2 与重氮化物的反应	206
5.2.3 与生物活性含氮化物的反应	207
5.2.4 与多氮化物的光化学反应	208
5.2.5 与小分子含氮化物的反应	211
5.3 Fullerene[60] 含氮化物的研究进展	217
5.4 ^{13}C NMR 谱和 Fullerene[60] 的衍生物	223
5.4.1 6,6 加成和 6,5 加成	223
5.4.2 五元环和六元环的磁异性	227
5.5 Fullerene[60] 功能材料的潜在应用前景	231
5.5.1 Fullerene[60] 多氢化物及其他氢能源材料	231
5.5.2 Fullerene[60] 多硝基化合物	235
5.5.3 组合光子晶体的应用前景	236
第6章 NADH (NADPH) 等生物活性分子及酶催化有机反应	237
6.1 NADH 模型分子的合成	237
6.1.1 概述	237
6.1.2 一些 C_2 对称的 NADH 模型分子的合成	238
6.1.3 NAD^+ 模型分子的还原研究	241
6.1.4 同位素效应和空间效应	243
6.1.5 线粒体呼吸和生物电子传递中的 NADH	246
6.1.6 NAD(P)H 及其模型分子的研究进展	249
6.2 NADPH 与生物光化学	256
6.2.1 概念	257
6.2.2 光合作用中的 NADPH	258

6.2.3	光合作用与 NADPH 小结	263
6.2.4	其他光合作用及其模拟	265
6.2.5	光合作用的进一步探讨	267
6.2.6	视觉光化学	273
6.3	卟啉衍生物和类胡萝卜素衍生的大分子	280
6.3.1	卟啉衍生物	280
6.3.2	类胡萝卜素衍生物	282
6.4	有机反应中的酶催化	285
6.4.1	介绍	285
6.4.2	酶催化与有机反应	286
6.4.3	手性合成中的酶催化	294
6.4.4	小结	298
第 7 章	含氮化合物的手性合成有机反应	301
7.1	概述	301
7.2	氮丙啶的结构特征	304
7.3	氮丙啶作为手性底物	305
7.3.1	简介	305
7.3.2	氮丙啶的合成	307
7.3.3	氮丙啶的亲核开环	308
7.3.4	小结	310
7.4	氮丙啶作为手性助剂	311
7.4.1	概况	311
7.4.2	作为手性助剂的 C_2 对称氮杂环	313
7.4.3	氮丙啶的合成	316
7.4.4	氮丙啶的烷基化反应	318
7.4.5	氮丙啶辅助的醛醇缩合反应	321
7.4.6	Michael 反应和氮丙啶的移除	328
7.4.7	小结	329
7.5	手性合成之我见	332
7.5.1	手性合成的几种方法	332
7.5.2	手性拆分的几种方法	336

7.5.3 小结	339
第8章 有机反应中的若干理论问题	341
8.1 有机反应中的溶剂效应	341
8.1.1 概述	341
8.1.2 溶剂对反应的定性理论	341
8.1.3 溶剂对反应的定量理论	343
8.1.4 溶剂的疏水性尺度和溶剂化作用	345
8.1.5 溶剂效应的新探讨	347
8.1.6 水及其混合物作为反应介质	348
8.1.7 液体二氧化碳作为反应溶剂	349
8.1.8 离子液体作为反应介质	349
8.1.9 传统的固相有机反应	350
8.2 固相合成反应进展	353
8.2.1 传统固相反应的新进展	353
8.2.2 载体固相反应简介	354
8.2.3 载体固相反应进展	355
8.3 水和全氟溶剂的溶剂效应	361
8.3.1 水溶液独特的性质	361
8.3.2 水在有机反应中的溶剂效应	363
8.3.3 全氟溶剂的溶剂效应	367
8.4 有机反应中的相转移催化作用	376
8.4.1 引言	376
8.4.2 机理	377
8.4.3 应用	378
8.4.4 三相相转移催化剂	381
8.4.5 温控相转移催化剂	383
8.4.6 手性相转移催化剂	384
8.5 有机反应中的极性转换作用	389
8.5.1 极性转换的概念	389
8.5.2 极性转换在有机反应中的应用	390
8.6 环加成反应的择向效应	397

8.6.1	影响环加成择向效应的因素	398
8.6.2	1-4; 2-1 规则及其应用	399
8.6.3	1-4; 2-1 规则运用举例	400
8.7	微扰分子轨道法的应用	403
8.7.1	共轭烃的芳香性	404
8.7.2	化学反应的 Dewar 活性指数	405
8.7.3	离域能对亲核反应的作用	407
8.7.4	π 电子密度对亲电取代反应的作用	409
8.7.5	NBMO 系数激发能的贡献	410
8.7.6	杂原子取代奇交替烃总 π 能对性能的关系	412
8.7.7	杂原子取代奇交替烃的电荷分布	415
8.7.8	共振结构的计数	417
8.7.9	非键轨道系数对键参数的作用	418
8.7.10	共振结构数对反应性能的定量探讨	419
附录	历届诺贝尔化学奖得主	421