

中华农业科教基金教材建设研究项目NKJ201203028

有机化学

YOUJI HUAXUE

张金艳 王亚飞 主编

 中国农业出版社

图书在版编目(CIP)

中华农业科教基金教材建设研究项目NKJ201203028

有机化学

张金艳 王亚飞 主编

中国农业出版社

(如有印装质量问题，请与本社发行部联系)

图书在版编目 (CIP) 数据

有机化学 / 张金艳, 王亚飞主编. —北京: 中国农业出版社, 2016. 2
ISBN 978-7-109-21217-6

I. ①有… II. ①张…②王… III. ①有机化学-高等学校-教材 IV. ①O62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 322394 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

责任编辑 曾丹霞

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2016 年 2 月第 1 版 2016 年 2 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.75

字数: 495 千字

定价: 39.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

有机化学是高等农林院校生物类各专业非常重要的基础课,本教材内容符合有机化学教学大纲的要求,适合于高等农、林、水产院校生物类各专业有机化学教学使用,也可作为各专业学生考研的重要参考书。本书共 17 章,包括有机化学的基本理论,有机化合物的类型、结构和异构、性质、反应及历程,重要代表物的制备和应用,波谱基础等内容。

本书在介绍有机化合物的基本理论、结构与性质的关系等方面基础上,注重有机化学在专业发展方面的应用和与后续课程内容的衔接,并将教材各章节的主要关键词采用中英文对照的形式表示,以及在附录中列出重要的知识点和历年诺贝尔化学奖获得者。同时,制作了与教材同步的多媒体课件。有利于学生对有机化学知识点的理解和掌握,并为提高学生的专业英语水平,了解有机化学的发展历程,激发学习兴趣,培养学生的科学素养、应用能力和创新能力奠定基础。

主 编 张金艳 王亚飞

副主编 张成林 高金玲 曲红杰 张丹凤

参 编 毕红梅 冯世德 罗云清 曲 斌

徐凤英 郑文凤

主 审 冯世德



前言

本教材是由中华农业科教基金教材建设研究项目支持的立项教材。本书是以高等农、林、水产院校有机化学教学大纲为依据，以高等院校应用型人才培养目标为核心，以有机化学服务垦区现代化大农业发展和农业生产为出发点，充分吸收国内外相关教材的精髓，结合有机化学在各领域发展中的重要作用，将编写人员长期教学及改革经验融入教材之中，并利用现代多媒体技术编写而成的一本立体化特色教材。

为了加强学生对有机化学重要知识点的理解和掌握，将重要的知识点总结后附在教材后面，并制作了与教材内容配套的多媒体课件，将重要有机物的结构用动画的形式在课堂教学中进行展示，使理论性较强的有机化学更加直观，有利于教师教学方法和手段改革，提高教学效果和人才培养质量。


本书的编写人员均具有丰富的教学经历和教材编写经验，在主编的精心组织下和主审的严格把关下，充分吸纳优秀资源，科学、系统地阐述了有机化学的知识，旨在为后续专业基础课和专业课的学习奠定坚实的基础。

本书由黑龙江八一农垦大学、东北农业大学和吉林农业大学三所高校的教师共同编写，黑龙江八一农垦大学张金艳(第六章第四节至习题、附录一)和王亚飞(第三章、第四章)担任主编，黑龙江八一农垦大学冯世德担任主审(第十二章、第十七章)。参编人员分别为黑龙江八一农垦大学张成林(第一章、第二章)、高金玲(第九章、第十五章)、曲红杰(第八章、第六章第一节至第三节)、张丹凤(第十章)、徐凤英(第五章)、毕红梅(第十一章、第十六章)、郑文凤(第七章、第十四章第四节至习题)，东北农业大学曲斌(第十三章)，吉林农业大学罗云清(第十四章第一节至第三节、附录二)。

在本教材的编写过程中，我们尽了最大努力，但限于水平和时间仓促，书中一定还存在不当之处，恳请本书读者谅解并批评指正。

编者

2015年9月



目录

前言

第一章 绪论	1
第一节 有机化学的产生和发展	1
第二节 有机化合物的特性	2
第三节 有机化合物中的化学键——共价键	3
第四节 原子轨道杂化理论	5
第五节 分子轨道理论	7
第六节 有机分子结构表示方法	9
第七节 有机化学反应的基本类型和试剂类型	12
第八节 有机化合物的分类	13
第九节 研究有机化合物的一般方法	15
第十节 有机化学的重要性及其与农业科学的关系	16
阅读材料 简明化学史	17
习题	19
第二章 饱和脂肪烃	20
第一节 烷烃概述	20
第二节 烷烃的结构和异构	21
第三节 烷烃的命名	24
第四节 烷烃的物理性质	26
第五节 烷烃的化学性质	28
第六节 烷烃的卤代反应历程	29
第七节 烷烃的制备	30
第八节 烷烃的来源及其主要用途	31
阅读材料 碳的四价学说	32
习题	32
第三章 不饱和脂肪烃	34
第一节 单烯烃	34

>> 有机化学

阅读材料 乙烯的发现与作用	44
第二节 炔烃	45
阅读材料 乔治·安德鲁·欧拉	50
第三节 二烯烃	51
阅读材料 奥托·狄尔斯	55
习题	56
第四章 脂环烃	58
第一节 脂环烃的分类和命名	58
第二节 环烷烃的物理性质	59
第三节 环烷烃的化学性质	60
第四节 环烷烃的分子结构	62
第五节 重要的环烷烃	65
阅读材料 奥德·哈塞尔	65
习题	66
第五章 芳香烃	67
第一节 苯的结构	67
第二节 芳香烃的分类	69
第三节 单环芳烃的命名和异构	69
第四节 单环芳烃的物理性质	71
第五节 单环芳烃的化学性质	72
第六节 芳烃的亲电取代反应历程	78
第七节 苯环亲电取代反应的定位规律	78
第八节 其他芳烃	85
第九节 非苯芳烃	88
阅读材料 富勒烯	90
习题	91
第六章 旋光异构	94
第一节 物质的旋光性	94
第二节 手性和分子结构	95
第三节 含有一个手性碳原子化合物的旋光异构	97
第四节 含有两个手性碳原子化合物的旋光异构	99
第五节 不含手性碳原子化合物的旋光异构	99
第六节 环状化合物的立体异构	100
第七节 手性与药物	101
阅读材料 普雷洛格	101

习题	102
第七章 卤代烃	104
第一节 卤代烃的分类、异构及命名	104
第二节 卤代烷烃的物理性质	106
第三节 卤代烃的结构与诱导效应	106
第四节 卤代烃的化学性质	108
第五节 亲核取代反应机理	111
第六节 消除反应机理	114
第七节 取代反应和消除反应的竞争	116
第八节 卤代烯烃和卤代芳烃	118
第九节 卤代烷的制备	120
第十节 重要的卤代烃化合物	121
阅读材料 格利雅	122
习题	122
第八章 醇、酚、醚	125
第一节 醇	125
第二节 酚	133
第三节 醚	139
阅读材料 查尔斯·佩德森	144
习题	144
第九章 醛、酮、醌	147
第一节 醛、酮概述	147
第二节 醛、酮的物理性质	148
第三节 醛、酮的化学性质	149
第四节 重要的醛和酮	159
第五节 醌类概述	159
第六节 醌类的物理性质	160
第七节 醌类的化学性质	160
第八节 重要的醌类化合物	161
阅读材料 布朗	162
习题	163
第十章 羧酸、羧酸衍生物和取代酸	165
第一节 羧酸	165
第二节 羧酸衍生物	175

>> 有机化学

第三节 取代酸	182
阅读材料 1 青霉素类抗生素	189
阅读材料 2 化学家——魏尔塔南	190
习题	190
第十一章 含氮有机化合物	193
第一节 胺	193
第二节 重氮盐和偶氮化合物	201
第三节 其他含氮化合物	203
阅读材料 霍夫曼	204
习题	205
第十二章 杂环化合物和生物碱	208
第一节 杂环化合物	208
第二节 重要的五元杂环化合物	215
第三节 重要的六元杂环化合物	216
第四节 生物碱	218
阅读材料 费希尔	220
习题	221
第十三章 碳水化合物	223
第一节 单糖	224
第二节 单糖的物理性质	228
第三节 单糖的化学性质	229
第四节 重要的单糖及其衍生物	232
第五节 二糖	233
第六节 多糖	234
阅读材料 哈沃斯	237
习题	237
第十四章 氨基酸、多肽、蛋白质和核酸	239
第一节 氨基酸	239
第二节 多肽	245
第三节 蛋白质	246
第四节 核酸	250
阅读材料 1 生物体中蛋白质和核酸的作用 ——生物体形成先有核酸还是先有蛋白质	255
阅读材料 2 桑格	256

习题	256
第十五章 含硫和含磷有机化合物	258
第一节 含硫有机化合物	258
第二节 含磷有机化合物	261
阅读材料 贝泰罗	265
习题	266
第十六章 油脂和类脂化合物	268
第一节 油脂	268
第二节 类脂	274
阅读材料 1 合成洗涤剂	277
阅读材料 2 温道斯	277
习题	278
第十七章 波谱基础	279
第一节 紫外(UV)光谱	280
第二节 红外(IR)光谱	283
第三节 核磁共振(NMR)谱	285
第四节 质谱	288
阅读材料 恩斯特	290
习题	291
附录	292
附录一 诺贝尔化学奖获得者名单	292
附录二 有机化学常用知识点归纳	314
主要参考文献	317

第一章

绪 论

(Introduction)

本章主要内容：有机化学的发展史；有机化合物的特点(组成和结构方面、物理性质、化学性质)；共价键理论，共价键的重要参数(键能、键长、键角、键的极性，分子的极性)；杂化轨道理论；分子轨道理论；有机化合物的分子结构(分子结构式的表示方法，同分异构现象)；有机化学反应的基本类型和试剂类型；有机化合物的分类：开链化合物、碳环化合物、杂环化合物，烯烃、炔烃、卤代烃、醇、酚、醚、醛、酮、羧酸、胺、酯、硫醇；研究有机化合物的一般方法；有机化合物的物理性质与分子结构的关系。

重点：杂化轨道理论，有机化合物的物理性质与分子结构的关系。

难点：杂化轨道理论，有机化合物的物理性质与分子结构的关系。

第一节 有机化学的产生和发展

有机化学(organic chemistry)是一门非常重要的学科，它和人类生活有着极为密切的关系。人体本身的变化就是一连串非常复杂、彼此制约、彼此协调的有机物质的变化过程，人们对有机物(organic compound)的认识逐渐由浅入深，最终演变成一门重要的学科。

最初，有机物是指由动植物有机体中得到的物质，如糖、染料、酒和醋等。据我国《周礼》记载，当时已设专司管理染色、制酒和制醋工作；周王时代已知用胶；汉朝时代发明造纸。在《神农本草经》中载有几百种重要药物，其中大部分是植物，这是世界上最早的一部药典。人类使用有机物质虽已有很长的历史，但这些物质都是不纯的，对纯物质的认识和取得是比较近代的事。在1769—1785年，人类取得了许多有机酸，如从葡萄汁内取得酒石酸，从柠檬汁内取得柠檬酸，由尿内取得尿酸，从酸牛奶内取得乳酸。1773年从尿中提取了尿素，1805年从鸦片中取得了第一个生物碱——吗啡。虽然人们制得了不少纯的有机物质，但关于它们的内部组成及结构分析问题，却长期没有得到解决。这是由于一种错误的燃素学说统治了当时化学界的思想，该学说认为燃烧是由于物质中含有一种不可捉摸的燃素引起的。Lavoisier A. (拉瓦锡)首次弄清了燃烧的概念(1772—1777)，认识到燃烧时，物质和空气中的氧结合。他继而研究了分析有机物的方法，将有机物放在一个用水银密封的装有氧或空气的玻璃钟罩内进行燃烧，发现所有的有机物质燃烧后，都生成二氧化碳和水，说明它们必然都含有碳及氢；有些有机物在没有空气的情况下，也可进行燃烧，而产物也是水和二氧化碳，因此这些有机物含有碳、氢、氧；有些有机物燃烧时还产生氮。所以那时认为大部分有机物的组分是碳、氢、氧、氮等。

有机物和无机物除在组成上有区别外，在性质上也有很大差别。例如：有机物比较不稳定，加热后即行分解。这与矿物和动植物的区别相像。因此化学家把有机物与无机物决然地划分开。享有盛名的化学家 Berzelius J. (柏则里) 首先引用了有机化学这个名词(1806年)，以区别于其他矿物质的化学——无机化学。当时把这两门化学分开的另一个原因是：那时已知的有机物都是从生物体内分离出来的，尚未能从实验室内合成，因此 Berzelius 认为：有机物只能在生物的细胞中受一种特殊力量——生活力的作用才会产生出来，人工合成是不可能的。这种思想曾一度牢固地统治着有机化学界，阻碍了有机化学的发展。

1828年 Wöhler F. (韦勒) 发现无机物氰酸铵很容易转变为有机化合物尿素：



此后，以无机物为原料陆续合成了一系列有机化合物，如 1815 年 Kolbe H. (柯尔柏) 合成了醋酸，1854 年 Berthelot M. (柏赛罗) 合成了油脂等。从此有机物的研究才逐步摆脱了“生命力”学说的束缚，开始得到迅速的发展。

1850 年前后，根据当时对大量有机物成分的分析结果，德国化学家(Gmelin L.) 格美林指出：“一切有机物均含有碳”。德国化学家(Kekule P. A.) 凯库勒也指出：“我们把有机化学定为碳化合物的化学”。所以现在认为：有机化合物是指含碳元素的化合物，研究碳化合物(carbon compounds)的化学叫有机化学。有些简单的碳化合物，如二氧化碳、碳酸盐等，同典型的无机化合物性质相似，一般把它们看作是无机化合物。应当指出，有机化合物不再与“生命力”学说有任何联系。现在保留“有机”二字，只不过是历史的遗留，当然也反映了有机化合物确实与生物体有很密切的联系。

第二节 有机化合物的特性

一、组成简单、数目众多、结构复杂

有机化合物元素组成除碳外，常常还有氢、氧、氮、硫、磷、卤素等。有机物元素组成虽然简单，数目却非常多，据统计，美国《化学文摘》于 2004 年 4 月前收录的有机化合物数目已经超过 3 700 万种，且新的有机化合物以每年 30 万种的惊人数量快速递增。

有机化合物组成简单、数目众多的主要原因就是它的结构复杂。碳(carbon)位于元素周期表第二周期第四主族，它最外层有 4 个电子，既不容易得到也不容易失去电子，而易与其他原子靠共价键形成化合物。硅虽然也在第四主族，也有 4 个价电子，但是因为它的原子半径较大，所形成的共价化合物不如碳的化合物稳定。此外，碳原子间有很强的成键能力，可以形成稳定的共价键；以它们为骨架可以形成链状化合物，也可以形成环状化合物；碳原子间可以形成单键(single bond)，也可以形成双键(double bond)或叁键(triple bond)。这种结构的多样化，使异构现象成为有机化合物中的一种极其普遍的现象。所谓异构现象就是指化学组成相同，但是结构不同，因而形成了不同化合物的现象。如一种从海洋生物中得到的沙海葵毒素的分子式为 $\text{C}_{129}\text{H}_{221}\text{O}_{53}\text{N}_3$ ，这个分子式有可能形成 2×10^{71} 种立体异构体，在如此庞大数目的立体异构体中，仅有一种结构是沙海葵毒素。所以有机化合物一般元素组成比较简单，但结构复杂，使得有机化合物的总数非常多，已远远超过无机化合物的数目。

二、有机化合物的理化特性

1. 易燃烧 有机化合物一般都含有碳和氢，完全燃烧后能生成内能较低的 CO_2 和 H_2O ，所以多数有机化合物较易燃烧。

2. 熔点和沸点较低 很多有机化合物分子间的排列，决定于微弱静电吸引的范德华力，所以它们的熔、沸点都较低。

3. 易溶于有机溶剂而不易溶于水 水是一种极性很强、介电常数很大的液体，所以对极性很强的物质是一种很理想的溶剂。有机化合物一般极性较弱，或者完全没有极性，所以很多有机化合物都不易溶解于极性很强的水里，而易溶解在苯、乙醚等极性很弱的有机溶剂里。

4. 反应速度慢，常伴随有副反应发生 有机化合物的化学反应，多涉及旧共价键的断裂和新共价键的形成，反应的活化能较高；且在同一条件下，共价键断裂的部位可能不同。所以与无机化合物相比，它的反应速度慢，而且除主产物以外，常伴有副产物出现。

以上所列仅是多数有机化合物的共性，例外还是很多的，如有机炸药的爆炸反应，其速度是极快的。因此在学习的时候还是要注意某些有机化合物在理化性质上的独特性，不能一概而论、以偏概全。

第三节 有机化合物中的化学键——共价键

共价键(covalent bond)是有机化合物中典型的、重要的化学键。

一、共价键的形成

价键理论(valence bond theory, VB)认为：当成键的两原子互相接近到一定距离时，两原子的两个未成对的，并且自旋方向相反的电子可以通过原子轨道的重叠而形成共价键。形成共价键的电子的运动状态不再是局限于原来的原子核周围，而是扩大到两个成键原子的原子核周围，两原子核间的电子云密度增加，致使体系能量降低，更趋于稳定。

共价键的饱和性：一个未成对电子既经配对成键，就不再与其他未成对电子配对，这就是共价键的饱和性。

共价键的方向性：由于原子轨道(除 s 轨道外)在空间有一定的取向，所以在形成共价键时，要使原子轨道达到最大重叠，只有沿着一定方向才有利于成键，达到重叠程度最大，体系能量最低，这样才能形成稳定的共价键。

二、共价键的类型

根据原子轨道最大重叠原理，两个原子要形成一个稳定的共价键，必须使用相对于两核连线方向(即键轴方向)具有相同对称性的原子轨道。两个原子轨道重叠组合，形成的共价键有两种类型。

1. σ 键 成键轨道沿着两核连线方向，以“头碰头”方式重叠所形成的共价键称为 σ 键，如图 1-1a 所示。如 H_2 分子中的 s-s 重叠、 HCl 分子中的 s-p 重叠等。一般来说，分子中的所有共价单键都是 σ 键。 σ 键的键能较大，稳定性较高。

2. π 键 成键轨道沿两核连线方向靠拢, 以“肩并肩”方式重叠所形成的共价键称为 π 键, 如图 1-1b 所示。由于形成 π 键的原子轨道重叠部分, 不像 σ 键那样集中在两核的连线上, 原子核对 π 电子的束缚力较小, 电子流动性较大, 所以通常 π 键没有 σ 键牢固, 较易断裂。

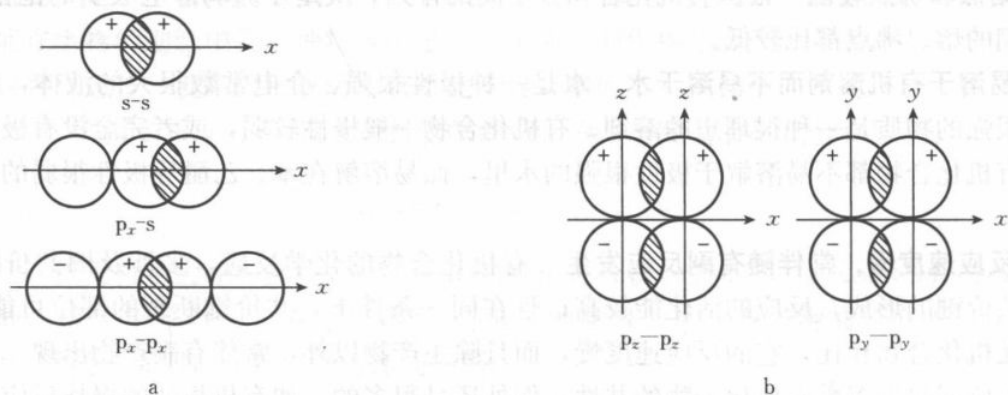


图 1-1 σ 键和 π 键重叠示意图

a. σ 键 b. π 键

三、共价键的性质

共价键的性质主要指键能、键长、键角及键的极性 etc 物理量, 又称键的参数。

1. 键能(bond energy) 键能是共价键断裂或形成时所吸收或放出的能量。双原子分子离解时所吸收的能量叫离解能, 即键能。但对于多原子分子, 其离解能并不等于键能, 即使同一类型的共价键的离解能也不相同。如甲烷分子中有四个 C—H 键, 第一个 C—H 键的离解能为 $435.1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 而第二、第三、第四个 C—H 键的离解能分别为 443.5 、 443.5 和 $338.9 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。实际上, 在多原子分子中, 键能一般是指同类型键离解能的平均值。C—H 键的键能为 $415.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。一些常见共价键的键能列于表 1-1 中。

2. 键长(bond distance) 键长是指形成化学键的两原子间的距离。不同类型的共价键键长不同, 在不同化合物中, 同一类型的共价键的键长也略有不同。例如, $\text{CH}_3\text{—Cl}$ 键长为 0.178 nm , 而 $\text{CCl}_3\text{—Cl}$ 为 0.176 nm 。一些常见共价键的键长列于表 1-1 中。

表 1-1 一些常见共价键的键能和键长

键的类型	键能/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	键长/ nm	键的类型	键能/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	键长/ nm
C—H	415.3	0.109	C=C	610.0	0.134
C—C	345.6	0.154	C≡C	835.1	0.120
C—O	357.7	0.143	C—O (醛)	736.4	0.120
C—N	304.6	0.147	H—O	462.8	0.096
C—Cl	338.9	0.178	H—N	390.8	0.103

3. 键角(bond angle) 键角是指两共价键之间的夹角。由于分子中各原子间的相互影响, 致使不同分子中同一类型键的键角也不尽相同。例如甲烷分子中 H—C—H 键角为 109.5° , 而乙烷中 H—C—H 键角则为 107.9° 。键角对研究有机化合物分子的立体构型和某

些性质有十分重要的意义。

4. 键的极性和极化(bond polarity and polarizability) 当两个相同原子成键时,其电子云对称分布于两原子之间,如 H_2 分子中的 $H-H$ 键、乙烷分子中的 $C-C$ 键,这种键没有极性,称非极性共价键(nonpolar bond)。当两个不相同原子形成共价键时,由于各原子的电负性不同,电子云偏向电负性较大的原子,使一个原子带部分负电荷(用 δ^- 表示),而另一个原子带部分正电荷(用 δ^+ 表示)。这种由于电子云分布不完全对称而呈极性的共价键称为极性共价键(polar bond)。例如:

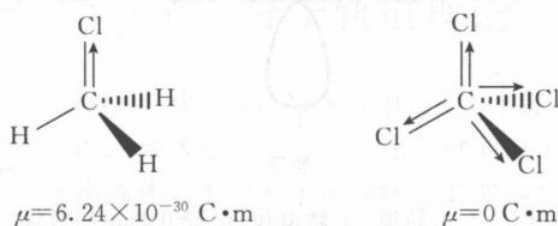


键的极性大小决定于成键两原子的电负性之差,电负性之差越大,键的极性越大。反之,键的极性则越小。键的极性一般用偶极矩表示。偶极矩(μ , dipole moment)等于电荷 q 与正负电荷之间距离 d 的乘积:

$$\mu = q \cdot d$$

偶极矩的单位是库·米($C \cdot m$)。如 HCl 的 $\mu = 3.44 \times 10^{-30} C \cdot m$ 。

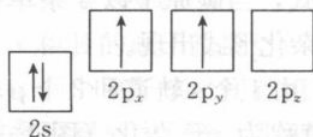
偶极矩有方向性,一般用箭头指向带负电荷的原子一端。多原子分子的偶极矩是分子中各共价键偶极矩的向量和。例如,一氯甲烷是极性分子,它的偶极矩为 $6.24 \times 10^{-30} C \cdot m$ 。而四氯化碳分子中各键的偶极矩互相抵消,所以它的偶极矩为零,属于非极性分子。



如果极性分子(polar molecule)或非极性分子(non-polar molecule)受外电场影响,共价键的电子云密度会重新分配,使正、负电荷中心发生移位,这样会使极性分子的极性增强;会使非极性分子变为极性分子。这种因外电场作用而引起共价键的极性改变的现象称为键的极化。由于分子中成键原子的不同以及原子连接的方式不同,其极化难易程度也不同。外电场可以是离子、极性分子等。键的极化是外电场作用的结果,当外电场离去时,这种极化就消失。键的极化对化学反应有重要作用。

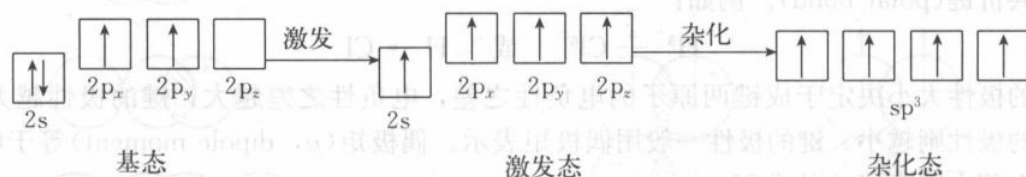
第四节 原子轨道杂化理论

有机化学的原子轨道杂化(atomic orbital hybridization)主要研究碳原子的轨道杂化,碳原子核外共有 6 个电子,其电子排布式为 $1s^2 2s^2 2p^2$ 。其价层电子为 $2s^2 2p^2$,电子排布图示如下:



显然，碳原子的价电子中只有 2 个单电子，只能形成 2 个共价键。但在有机化合物中，碳是 4 价。这可以利用杂化轨道理论(atomic orbital hybridization theory)得到满意的解释。

在碳原子中，2s 和 2p 电子属于同一能级，能量相近，因此，成键时 2s 轨道中的 1 个电子容易被激发而转移到 2p 空轨道中去，致使碳原子具有 4 个单电子。碳原子以 1 个 s 轨道和 3 个 p 轨道重新组合(杂化)形成 4 个能量完全相同的新成键轨道——杂化轨道(hybridized orbital)，杂化过程可以用下图(方框表示原子轨道，箭头表示电子及其自旋方向)来描述：



由 1 个 s 轨道和 3 个 p 轨道所形成的杂化轨道，称为 sp^3 杂化轨道。 sp^3 杂化轨道的形状不同于原有的 s、p 轨道的形状，既不是球形，也不是哑铃形，而是类似于梨形(图 1-2)。

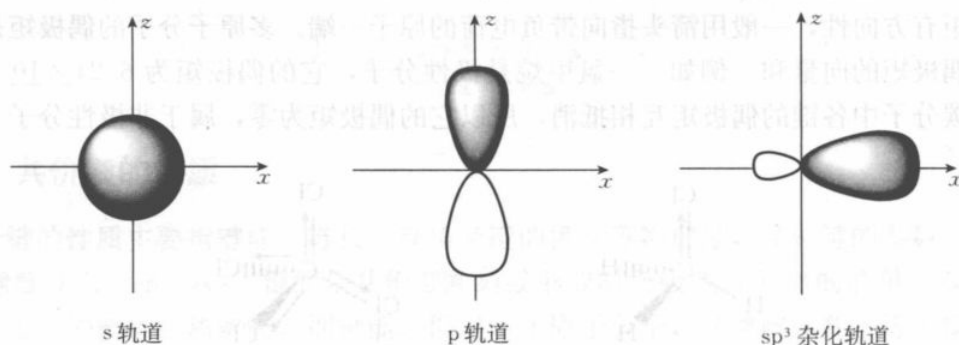


图 1-2 s 轨道、p 轨道和 sp^3 杂化轨道的形状

杂化轨道理论认为：杂化是成键的必然结果，杂化和成键是同步进行的，不同的成键情况一定会造成不同的杂化情况，在有机化合物中，碳原子有 sp^3 、 sp^2 和 sp 杂化形式，也可以说，每种不同的杂化形式也必然与不同的键型相适应。同时，杂化也更有利于原子间的成键。共价键的形成，其实质是原子轨道的相互重叠，原子轨道的重叠程度越大，共价键也就越牢固。杂化轨道的电子云分布是一头大一头小，杂化轨道用大头参与成键，可有效增加原子轨道间的重叠程度，这就增大了它与其他原子轨道重叠成键的能力。

1. sp^3 杂化(sp^3 hybridization) 由 1 个 s 轨道和所有 3 个 p 轨道共同参与杂化，形成 4 个能量相等的新轨道称为 sp^3 杂化(图 1-3)。每个 sp^3 杂化轨道含有 1/4 的 s 成分和 3/4 的 p 成分。4 个 sp^3 杂化轨道的空间分布是轨道轴指向正四面体的 4 个顶点，轨道轴间的夹角为 109.5° ，其几何构型为正四面体。 sp^3 杂化是碳原子最主要的杂化形式，当碳原子以 4 条单键和其他原子成键时，碳原子都以 sp^3 杂化形式出现。

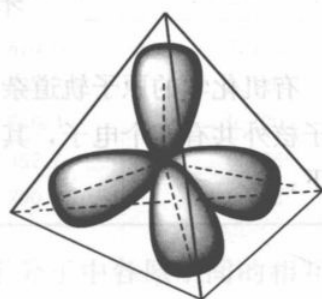


图 1-3 sp^3 杂化轨道

2. sp^2 杂化(sp^2 hybridization) 由 1 个 s 轨道和 2 个 p 轨道杂化，形成 3 个能量相等的新轨道称为 sp^2 杂化(图 1-4)。