



高等教育医药类“十三五”创新型系列规划教材

供医学、药学类各专业使用

# 有机化学

姚刚 曾小华 主编



化学工业出版社



高等教育医药类“十三五”创新型系列规划教材

供医学、药学类各专业使用

# 有机化学

姚刚 曾小华 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《有机化学》共分十五章，包括绪论，立体化学基础，烷烃和环烷烃，烯烃和炔烃，芳香烃，卤代烃，醇、硫醇、酚和醚，醛和酮，羧酸和取代羧酸，羧酸衍生物，有机含氮化合物，杂环化合物，糖类，脂类和甾族化合物，氨基酸、多肽和核酸。按官能团从易到难展开，采用脂肪族和芳香族化合物混合编排的方式，在讲述立体化学后，将结构理论、电子效应、反应机制等融合于各章节。本书突出医学与有机化学的联系，强调有机化学对医学的基础作用。为更好地服务医学教育，培养高素质医学人才，根据医学专业的教学要求，本书编写力求做到：充实与本课程相关的化学和生命科学领域的重要进展，强调内容的系统性，注重培养学生的逻辑思维能力；提升教材内容、文字的表达水平，提高教材的可读性。

本书可供高等院校临床医学、口腔医学、医学影像学、预防医学、检验及麻醉等医学类专业使用，也可供生命科学其他各专业使用和参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

有机化学/姚刚,曾小华主编. —北京:化学工业出版社, 2019.9

高等教育医药类“十三五”创新型系列规划教材  
ISBN 978-7-122-34780-0

I. ①有… II. ①姚…②曾… 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 (2019) 第 133637 号

责任编辑:甘九林 闫敏 杨菁  
责任校对:王静

文字编辑:陈雨  
装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:三河市航远印刷有限公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张18 $\frac{3}{4}$  字数456千字 2020年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 52.00 元

版权所有 违者必究

## 《有机化学》编写人员

主 编 姚 刚 曾小华  
副主编 张海清 沈 琤 王红梅  
编写人员 (以姓氏笔画为序)  
马俊凯 (湖北医药学院)  
王红梅 (湖北医药学院)  
石从云 (武汉科技大学)  
沈 琤 (湖北中医药大学)  
张海清 (武汉科技大学)  
金小红 (湖北科技学院)  
姚 刚 (湖北科技学院)  
章佳安 (湖北科技学院)  
曾小华 (湖北医药学院)

## 前言

《有机化学》是为贯彻落实“5+3”（五年医学教育加三年住院医师规范化培训）为主体的医学教育综合改革方案，按照五年制医学类专业教学大纲、培养目标编写而成的。本书内容突出“基本理论、基础知识和基本技能”，以达到医学教育基本要求。

有机化学是医学专业的基础课，同时又是一门科学素质教育课程，它的中心任务是为后续医学课程打好基础。因此本书力求根据教学时数，精选教材内容，使学生易于理解并掌握有机化学的基本理论和基础知识。编写时注重内容的科学性和先进性，强调启发性与适应性，力求文字精练，易教易学。

本书在编写时注意突出以下特点：

1. 在内容上加强生命科学与有机化学的关系，为学生学习有机化学和后续的与有机化学有关的课程奠定必要的基础。
2. 强化有机化学的基础知识，培养学生的逻辑思维能力和自我学习能力，着重培养医学学生的化学思维能力。
3. 教材内容的深度和广度严格控制在医学专业五年制教学要求的范围内，使其更适合于“5+3”的培养体系。

中国化学会《有机化学命名原则》（2017）作为《有机化学命名原则》（1980）的增补修订版已经出版，可在中国化学会网站在线阅读。新版《有机化学命名原则》修订了部分有机化合物的中文系统命名原则，考虑到新的命名原则尚待推广，本书暂未调整相关有机化合物的命名。相关内容的教学可参阅《有机化学命名原则》（2017）。

本书由姚刚、曾小华担任主编，张海清、沈琤、王红梅担任副主编。编写人员有湖北科技学院姚刚（第一章、第十三章）、武汉科技大学张海清（第二章、第六章）、湖北中医药大学沈琤（第三章、第五章）、武汉科技大学石从云（第四章）、湖北医药学院马俊凯（第七章）、湖北医药学院王红梅（第八章、第十四章）、湖北科技学院章佳安（第九章）、湖北医药学院曾小华（第十章、第十一章）、湖北科技学院金小红（第十二章、第十五章）。

本书的出版得到了湖北医药学院、武汉科技大学、湖北中医药大学、湖北科技学院的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者的学识水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者不吝指正。

编者

# 目录

## 第一章 绪论 / 1

第一节 有机化合物和有机化学	1
一、有机化合物和有机化学的由来及意义	1
二、有机化合物的结构式	2
第二节 有机化合物中的化学键	3
一、价键理论	3
二、杂化轨道理论	4
三、共价键的属性	6
四、分子间作用力	7
第三节 有机化合物的分类和有机反应类型	8
一、有机化合物的分类	8
二、有机反应类型	9
第四节 有机酸碱理论	9
一、酸碱质子理论	9
二、酸碱电子理论	10
第五节 分子轨道和共振理论	11
一、分子轨道	11
二、共振理论	11
第六节 研究有机化合物结构的一般方法	12
一、分离纯化	12
二、元素分析	12
三、测定分子量和确定分子式	12
四、确定结构式	13
本章小结	13
习题	13

## 第二章 立体化学基础 / 15

第一节 手性、手性分子和对映体	15
-----------------	----

一、手性 .....	15
二、手性分子和对映体 .....	16
三、平面偏振光和旋光性 .....	17
四、分子的对称性和手性 .....	18
第二节 费歇尔投影式 .....	19
第三节 对映异构体的构型标记法 .....	20
一、D/L 构型标记法 .....	20
二、R/S 构型标记法 .....	21
第四节 外消旋体、非对映体和内消旋体 .....	23
一、外消旋体 .....	23
二、非对映体 .....	23
三、内消旋体 .....	24
四、外消旋体的拆分 .....	24
第五节 不含手性碳原子的手性分子 .....	25
第六节 手性分子的来源及生理活性 .....	26
一、手性分子的来源 .....	26
二、手性分子的生理活性 .....	27
本章小结 .....	28
习题 .....	29

### 第三章 烷烃和环烷烃 / 31

第一节 烷烃 .....	31
一、烷烃的结构 .....	31
二、烷烃的异构和命名 .....	32
三、物理性质 .....	36
四、化学性质 .....	37
第二节 环烷烃 .....	40
一、环烷烃的命名 .....	40
二、环烷烃的结构和稳定性 .....	41
三、环烷烃的性质 .....	42
四、环己烷的构象 .....	44
本章小结 .....	47
习题 .....	48

### 第四章 烯烃和炔烃 / 50

第一节 烯烃 .....	50
一、烯烃的结构 .....	50

二、 烯烃的异构现象和命名 .....	51
三、 烯烃的物理性质 .....	53
四、 烯烃的化学性质 .....	54
五、 共轭烯烃 .....	61
<b>第二节 炔烃 .....</b>	<b>65</b>
一、 炔烃的结构 .....	65
二、 炔烃的同分异构和命名 .....	66
三、 炔烃的物理性质 .....	66
四、 炔烃的化学性质 .....	67
本章小结 .....	70
习题 .....	70

## 第五章 芳香烃 / 73

<b>第一节 苯及其同系物 .....</b>	<b>74</b>
一、 苯的结构 .....	74
二、 苯同系物的命名 .....	76
三、 苯及其同系物的物理性质 .....	77
四、 苯及其同系物的化学性质 .....	77
五、 苯亲电取代反应的定位效应 .....	82
<b>第二节 稠环芳香烃 .....</b>	<b>86</b>
一、 萘 .....	86
二、 蒽和菲 .....	90
三、 致癌稠环芳烃 .....	91
<b>第三节 Hückel 规则与非苯芳香烃 .....</b>	<b>92</b>
一、 Hückel 规则 .....	92
二、 非苯芳香烃 .....	92
本章小结 .....	96
习题 .....	96

## 第六章 卤代烃 / 99

<b>第一节 卤代烃的分类、结构和命名 .....</b>	<b>99</b>
一、 卤代烃的分类 .....	99
二、 卤代烃的结构 .....	100
三、 卤代烃的命名 .....	100
<b>第二节 卤代烃的性质 .....</b>	<b>101</b>

一、 卤代烃的物理性质 .....	101
二、 卤代烃的化学性质 .....	101
三、 不饱和卤代烃的取代反应 .....	110
四、 与金属的反应 .....	111
本章小结 .....	112
习题 .....	113

## 第七章 醇、 硫醇、 酚和醚 / 115

第一节 醇 .....	115
一、 醇的分类、 命名和结构 .....	115
二、 醇的物理性质 .....	117
三、 醇的化学性质 .....	118
第二节 硫醇 .....	121
一、 硫醇的结构、 分类和命名 .....	121
二、 硫醇的物理性质 .....	122
三、 硫醇的化学性质 .....	122
第三节 酚 .....	124
一、 酚的分类和命名 .....	124
二、 苯酚的结构 .....	124
三、 酚的物理性质 .....	125
四、 酚的化学性质 .....	125
第四节 醚 .....	127
一、 醚的分类、 结构和命名 .....	127
二、 醚的物理性质 .....	128
三、 醚的化学性质 .....	129
四、 环醚 .....	130
本章小结 .....	134
习题 .....	134

## 第八章 醛和酮 / 136

第一节 醛、 酮的分类和命名 .....	136
一、 醛、 酮的分类 .....	136
二、 醛、 酮的命名 .....	137
第二节 醛、 酮的结构与性质 .....	138
一、 醛、 酮的结构 .....	138
二、 醛、 酮的物理性质 .....	138

三、醛、酮的化学性质 .....	139
本章小结 .....	148
习题 .....	148

## 第九章 羧酸和取代羧酸 / 150

第一节 羧酸 .....	150
一、羧酸的结构、分类和命名 .....	150
二、羧酸的物理性质 .....	152
三、羧酸的化学性质 .....	153
第二节 取代羧酸 .....	159
一、羟基酸 .....	159
二、酮酸 .....	163
三、重要的取代羧酸 .....	164
本章小结 .....	166
习题 .....	166

## 第十章 羧酸衍生物 / 168

第一节 羧酸衍生物的结构和命名 .....	168
一、羧酸衍生物的结构 .....	168
二、羧酸衍生物的命名 .....	169
第二节 羧酸衍生物的性质 .....	170
一、羧酸衍生物的物理性质 .....	170
二、羧酸衍生物的化学性质 .....	171
第三节 碳酸衍生物 .....	176
一、氨基甲酸酯 .....	177
二、尿素 .....	177
三、胍 .....	177
四、丙二酰脲 .....	178
本章小结 .....	179
习题 .....	179

## 第十一章 有机含氮化合物 / 181

第一节 胺 .....	181
-------------	-----

一、胺的分类和命名 .....	181
二、胺的结构 .....	182
三、胺的物理性质 .....	183
四、胺的化学性质 .....	184
五、胺的代表化合物 .....	189
<b>第二节 重氮盐和偶氮化合物</b> .....	190
一、重氮盐的结构及制备 .....	191
二、重氮盐的化学性质 .....	191
<b>第三节 生物碱</b> .....	194
一、生物碱概述 .....	194
二、生物碱的一般性质和提取方法 .....	195
三、常见生物碱 .....	195
本章小结 .....	196
习题 .....	197

## 第十二章 杂环化合物 / 199

<b>第一节 杂环化合物的分类和命名</b> .....	199
<b>第二节 五元杂环化合物</b> .....	201
一、吡咯、咪唑、噻吩的结构 .....	201
二、吡咯、咪唑、噻吩的化学性质 .....	201
三、重要的五元杂环化合物 .....	203
<b>第三节 六元杂环化合物</b> .....	205
一、吡啶的结构 .....	205
二、吡啶的化学性质 .....	205
三、重要的六元杂环化合物 .....	207
<b>第四节 稠杂环化合物</b> .....	208
一、吲哚和吲哚衍生物 .....	208
二、喹啉和异喹啉 .....	209
三、嘌呤和嘌呤衍生物 .....	210
本章小结 .....	214
习题 .....	215

## 第十三章 糖类 / 216

<b>第一节 单糖</b> .....	216
一、单糖的开链结构 .....	217

二、单糖的环状结构及 Haworth 结构式 .....	217
三、单糖的性质 .....	221
第二节 双糖、寡糖和多糖 .....	224
一、双糖 .....	224
二、寡糖 .....	226
三、多糖 .....	227
本章小结 .....	230
习题 .....	230

## 第十四章 脂类和甾族化合物 / 232

第一节 油脂 .....	232
一、油脂的组成与命名 .....	232
二、油脂的物理性质 .....	234
三、油脂的化学性质 .....	235
第二节 磷脂 .....	236
一、甘油磷脂 .....	236
二、神经磷脂 .....	237
三、磷脂与细胞膜 .....	238
第三节 甾族化合物 .....	239
一、甾族化合物的结构特征 .....	240
二、重要的甾族化合物 .....	240
本章小结 .....	245
习题 .....	245

## 第十五章 氨基酸、多肽和核酸 / 247

第一节 氨基酸 .....	247
一、氨基酸的结构、分类和命名 .....	247
二、氨基酸的性质 .....	250
第二节 多肽 .....	252
一、多肽的结构和命名 .....	252
二、肽键平面 .....	252
三、多肽结构测定和端基分析 .....	253
四、生物活性肽 .....	254
第三节 核酸 .....	256
一、核酸的分类 .....	256

二、核酸、核苷和核苷酸 .....	256
三、核酸的结构和理化性质 .....	259
本章小结 .....	261
习题 .....	262

## 附录 / 263

附录一 习题参考答案 .....	263
附录二 部分鉴别反应 .....	281
附录三 部分元素的共价半径和电负性 .....	282
附录四 有机化学文献和手册中常见的英文缩写 .....	283

## 参考文献 / 285

# 第一章

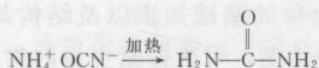
## 绪 论

### 第一节 有机化合物和有机化学

#### 一、有机化合物和有机化学的由来及意义

“有机化学”(Organic Chemistry)这一名词于1806年首次由瑞典化学家 J. Berzelius 提出,当时是相对于“无机化学”而提出的。由于科学条件限制,有机化学研究的对象只局限于从天然动植物有机体中提取的有机物。因而许多化学家认为,在生物体内由于存在所谓的“生命力”,才能产生有机化合物,而在实验室里是不能由无机化合物合成的。

J. Berzelius 定义有机化合物是“生物体中的物质”;把从地球上的矿物、空气和海洋中得到的物质定义为无机物。1828年德国一位青年化学家 F. Wöhler 在实验室里浓缩氰酸铵时,制得了有机物尿素。



这是一个具有划时代意义的发现,它为近代有机化合物概念的确立奠定了基础。可是按照 J. Berzelius 对有机化合物的定义,尿素是不可能实验室里制备出来的,所以这个实验结果在当时并不被化学家所认同。随着合成方法的改进和发展,越来越多的有机化合物不断地在实验室中合成出来。如1845年德国化学家 H. Kolber 合成了乙酸,1854年法国化学家 M. Berthelot 合成了油脂等。从此人们才冲破了传统的有机物来自“生命力”的束缚,有机化学进入了有机合成时代,1850~1900年的50年时间里,数百万种有机化合物被合成出来。如今,许多生命物质,如蛋白质(我国科学家于1965年首次合成了分子量较小的蛋白质——胰岛素)、核酸和激素等也都成功地合成出来。1848年 L. Gmelin 根据 F. Wöhler 的实验和越来越多的有机合成事实,确立了有机化合物的新概念,即有机化合物是含碳化合物。有机化学是研究含碳化合物的化学。由于历史的沿用,现在人们仍然使用“有机”两字来描述有机化合物和有机化学,不过它的含义与早期 J. Berzelius “有机”的含义有本质的差别。

当代对有机化合物(organic compounds)和有机化学的定义是:有机化合物即含碳的

化合物 (CO、CO<sub>2</sub>、碳酸盐、氰化物、硫氰化物、氰酸盐、金属碳化物等少数与无机化合物相同的化合物除外)；有机化学是研究有机化合物的结构、性质及变化规律的科学。

有机化学最初的意义就是生物物质的化学，即以生物体中物质为研究对象。可见“有机”二字是同生命现象紧密相连而产生的，是历史的遗留。近 200 年来，有机化学已经发展成一门庞大的学科，仅 1995 年一年化学家就创造了 100 万个以上的新化合物。现在，从结构复杂多样的生物大分子的合成，到模拟生物过程模型的确立，标志着有机合成技术已达到了相当高的水平。

有机化学理论和实验上的成就，为现代分子生物学的诞生和发展打下了坚实的基础，是生命科学的有力支柱。生命科学也为有机化学的发展充实了丰富的内容，生命科学问题永远赋予有机化学家启示。从 20 世纪后半期诺贝尔奖的授予对象也反映了学科之间的交叉和融合的力量。J. Watson 和 F. Crick 的 DNA 双螺旋结构分子模型的提出是分子生物学发展史上划时代的结果。这一发现是基于对 DNA 分子内各种化学键的本质，特别是对氢键配对的充分了解的结果。T. Cech 和 S. Altman 对核酶的发现，改变了酶就是蛋白质的传统观念。2015 年诺贝尔生理学或医学奖获得者屠呦呦受中国典籍《肘后备急方》启发，成功提取出的青蒿素，创造性地研制出抗疟新药——青蒿素和双氢青蒿素，获得对疟原虫 100% 的抑制率，被誉为“拯救 2 亿人口”的发现。美国医学家，诺贝尔奖获得者 A. Kornberg 认为：“人类的形态和行为，都是由一系列各负其责的化学反应来决定的”“生命的许多方面都可用化学语言来表达，这是一个真正的世界语”“把生命理解成化学”。实践表明，几乎所有生命科学中的问题都必将接受化学的挑战。20 世纪 90 年代后期兴起的化学生物学是一门用化学理论、研究方法和手段在分子水平上探索生命科学问题的学科，这是化学自觉进入生命科学领域的标志。

有机化学与生命科学广泛地相互渗透，相互融合，二者的学科界限越来越模糊，使人们看到了有机化学在研究生物体本义上的回归。药理学关于药物的构效关系研究、中草药成分提取、分离以及病因的探索等，无一不是以有机化学知识为基础。治疗疾病所用的药物绝大部分是有机化合物。有机化学是生命学科不可缺少的基础学科，也是医学教育的一门重要基础课。人体组成成分除水分子和无机离子外，几乎都是有机分子，机体代谢过程同样遵循有机化学反应的规律。掌握有机化合物的基础知识以及结构与性质的关系，有助于认识蛋白质、核酸和糖等生命物质的结构和功能，可为探索生命的奥妙奠定基础。有机化合物、有机反应数目众多，学习有机化学除了掌握本学科的相关知识外，更重要的是学习有机化学家思考和分析问题及解决问题的方法。

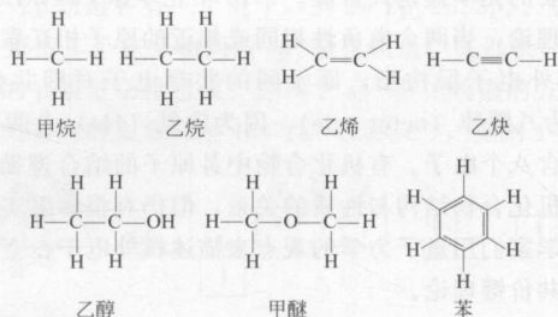
## 二、有机化合物的结构式

了解和掌握有机化合物的分子结构是学习有机化学的关键，是研究有机物分子行为，掌握有机物性质、反应、制备和生物活性的基础。

在 1857 年德国化学家 F. A. Kekulé 和英国化学家 A. S. Couper 就分别提出了碳为 4 价的概念，并已经清楚地指出了碳原子与碳原子、碳原子与其他原子之间，可以用单键、双键和三键相互连接成碳链、碳环或杂环。接着在 1874 年，荷兰化学家 J. H. van't Hoff 提出了碳原子的正四面体学说，法国化学家 J. A. Le Bel 提出了不对称碳原子的概念，从而为有机化合物的研究开辟了立体化学 (stereochemistry) 的内容。

## (一) 凯库勒结构式

在有机化合物中，原子的化合价用短线“—”将各原子连接在一起表示结构的化学式称为凯库勒 (Kekulé) 结构式。例如：



其中，短线表示成键的电子对。

从立体的角度来观察甲烷分子，碳原子位于正四面体的中心，四个氢原子则在正四面体的四个顶点，如图 1-1 所示。

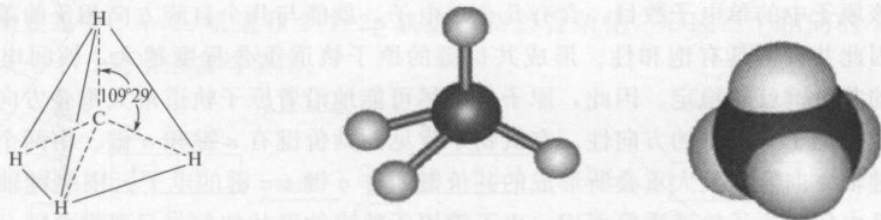
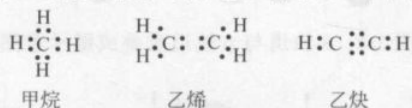


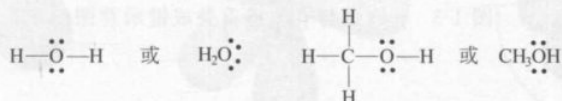
图 1-1 甲烷的正四面体模型、球棒模型、比例模型

## (二) 路易斯结构式

将凯库勒结构式中各原子之间成键的短线改为电子对表示即为路易斯 (Lewis) 结构式，但在书写路易斯结构式时必须把所有的价电子都表示出来。如：



路易斯结构式反映了键的饱和性，其简化式的表示方式为：标出或省略分子中的孤对电子 (未共享电子对)，成键电子对 (共价键) 用短直线表示 (或省略短直线)。如水分子、甲醇分子的 Lewis 简化式为：



## 第二节 有机化合物中的化学键

### 一、价键理论

碳原子的电子排布式为  $1s^2 2s^2 2p^2$ 。碳原子为四价，通常通过其外层四个电子与其他原

子的外层电子共享电子对，形成稀有气体的外层电子构型，生成稳定的分子。碳原子能够与其他碳原子通过单键、双键或三键相互结合形成各种链状或环状结构，碳原子还能与氢、氧、硫、氮、磷、卤素等许多其他元素的原子通过化学键相结合。

构成有机分子最主要的化学键是共价键。1916年化学家 G. N. Lewis 提出了经典共价键理论，即 Lewis 共价键理论：当两个电负性相同或相近的原子相互靠近时，原子通过共享电子形成稳定的稀有气体外电子层构型，原子间的共享电子对即共价键 (covalent bond)。Lewis 共价键理论又称为八隅律 (octet rule)，因为除氦 (He) 含两个价电子外，大多数稀有气体原子的外电子层含八个电子。有机化合物中各原子的结合遵循八隅律。Lewis 共价键理论虽然有助于理解有机化合物结构与性质的关系，但仍有很多事实不能用此理论解释。随着量子力学的建立，化学家们用量子力学的观点来描述核外电子在空间的运动状态和处理化学键问题，建立了现代共价键理论。

现代共价键理论的基本要点是：当成键的两个原子互相接近到一定距离时，两个自旋方向相反的单电子相互配对，电子云密集于两核之间，降低了两核间正电荷的排斥力，使体系能量降低，并分别对两原子核产生引力，形成稳定的共价键。每个原子所能形成共价键的数目取决于该原子中的单电子数目，含有几个单电子，就能与几个自旋方向相反的单电子形成共价键，因此共价键具有饱和性。形成共价键的原子轨道重叠程度越大，核间电子云越密集，形成的共价键就越稳定。因此，原子总是尽可能地沿着原子轨道最大重叠方向形成共价键，该性质决定了共价键的方向性。有机物中常见的共价键有  $\sigma$  键和  $\pi$  键。由两个成键原子轨道沿着键轴方向发生最大重叠所形成的共价键叫作  $\sigma$  键。 $\sigma$  键的电子云围绕键轴呈对称分布。不管是由何种原子轨道重叠而成，也不管原子轨道的形状如何，只要重叠部分成轴对称分布的都是  $\sigma$  键， $\sigma$  键成键两原子可以沿键轴自由旋转，如图 1-2 所示，有机物中的单键都是  $\sigma$  键。由两个互相平行的 p 轨道侧面互相重叠而成的键叫作  $\pi$  键，与  $\sigma$  键不同，其电子云分布在两原子键轴的上方和下方，成键的两原子不能自由旋转，如图 1-3 所示。

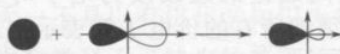


图 1-2 s 轨道与 p 轨道重叠成键示意图

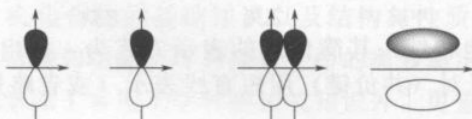


图 1-3 p 轨道与 p 轨道重叠成键示意图

## 二、杂化轨道理论

碳原子基态电子构型为  $1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^0$ ，其外层只有 2 个单电子，按价键理论只能形成 2 个共价键，与有机化合物中碳原子为四价和甲烷分子呈正四面体构型等事实不符。1931 年美国化学家鲍林 (Pauling) 提出了杂化轨道理论：原子在形成分子时，形成分子的各原子相互影响，使得同一个原子内不同类型能量相近的原子轨道重新组合，形成能量、形状和空间方向与原轨道不同的新轨道。这种原子轨道重新组合的过程称为杂化，所形成的新原子轨道称为杂化轨道 (hybrid orbital)。有机化合物中，碳原子有  $sp^3$ 、 $sp^2$  和  $sp$  三种杂化