



化学工程与工艺应用型本科建设系列教材

普通高等教育“十三五”规划教材

有机化学

YOUJI HUAXUE

肖繁花 主编



化学工业出版社



化学工程与工艺应用型本科建设系列教材

普通高等教育“十三五”规划教材

有机化学

YOUJI HUAXUE

肖繁花 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《有机化学》是化学工程与工艺应用型本科建设系列教材之一。本书采用脂肪族和芳香族混编的体系；在内容上将有机化学反应与工业生产实际相结合；在各类化合物的制备部分，列出了各类有机化合物的来源和工业制法，并在每一章增加了重要化合物的内容；将 β -二羰基化合物和有机合成基础的内容独立成章。全书内容包括绪论，烷烃和环烷烃，烯烃和炔烃，二烯烃，芳烃，光学异构，卤代烃，有机波谱，醇酚醚，醛酮醌，羧酸及其衍生物， β -二羰基化合物和有机合成基础，含氮化合物，杂环化合物，生命有机化学等。

《有机化学》既适用应用型高等学校化学化工类、应用化学类及相关专业的有机化学教材，也可以作为“中本贯通”教育本科阶段化学工程与工艺等专业的有机化学教材。

学 分 册 育

图书在版编目 (CIP) 数据

有机化学/肖繁花主编. —北京: 化学工业出版社, 2017. 11

化学工程与工艺应用型本科建设系列教材 普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-30703-3

I. ①有… II. ①肖… 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 (2017) 第 237997 号

责任编辑: 刘俊之

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 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 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 500 千字 2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

《有机化学》是化学工程与工艺应用型本科建设系列教材之一。同时也是上海应用技术大学“中本贯通”化学工程与工艺专业本科阶段的有机化学教材。与一般的有机化学教材相比较,教学学时数明显减少。为了能在较少的学时数完成教学大纲规定的要求,在内容选材上以基本理论和基础知识为主,力求将有机反应与工业生产相结合,在每类化合物的制备中增加各类化合物的来源和工业制法,并介绍了各类重要的、有代表性的化合物。本书的内容是根据工科有机化学的教学大纲要求编写的,各校教师可根据具体情况自行选择。

《有机化学》由上海应用技术大学肖繁花主编,卞明、杜葩、高永红、康丽琴、廖慧英、任玉杰等参加编写。全书由肖繁花统稿。此外在编写过程中,还得到上海应用技术大学有机化学教研室其他老师的协助。由于编者水平有限,不妥之处在所难免,敬请各位读者批评指正。

编者

2017年7月

目 录

第1章 绪论

1

1.1 有机化合物和有机化学	1
1.2 有机化合物的特点	1
1.2.1 有机化合物结构上的特点	2
1.2.2 有机化合物性质上的特点	2
1.3 有机化合物中的共价键	3
1.3.1 共价键的形成	3
1.3.2 价键理论	3
1.4 共价键的属性	6
1.4.1 键长	6
1.4.2 键能	6
1.4.3 键角	7
1.4.4 键的极性	7
1.5 有机化学中的酸碱理论	8
1.5.1 Brönsted 酸碱理论	9
1.5.2 Lewis 酸碱理论	9
1.6 有机化合物的分类	9
1.6.1 按碳骨架分类	9
1.6.2 按官能团分类	10
习题	11

第2章 烷烃和环烷烃

12

2.1 烷烃	12
2.1.1 烷烃的通式和构造异构	12
2.1.2 烷烃的命名	13
2.1.3 烷烃的结构	15
2.1.4 烷烃的物理性质	19
2.1.5 烷烃的化学性质	21
2.2 环烷烃	25
2.2.1 环烷烃的分类和命名	25

2.2.2	环烷烃的结构和构象	27
2.2.3	环烷烃的物理性质	31
2.2.4	环烷烃的化学性质	31
2.2.5	烷烃和环烷烃来源	32
2.2.6	重要的烷烃和环烷烃	33
	习题	33

第3章 烯烃和炔烃

36

3.1	烯烃	36
3.1.1	烯烃的结构	36
3.1.2	烯烃的同分异构和命名	37
3.1.3	烯烃的物理性质	40
3.1.4	烯烃的化学性质	41
3.1.5	烯烃的来源和制备	55
3.2	炔烃	56
3.2.1	炔烃的结构	56
3.2.2	炔烃的同分异构和命名	57
3.2.3	炔烃的物理性质	58
3.2.4	炔烃的化学性质	58
3.2.5	炔烃的来源及制备	64
3.2.6	重要的烯烃和炔烃	65
	习题	65

第4章 二烯烃

69

4.1	二烯烃的分类和命名	69
4.1.1	二烯烃的分类	69
4.1.2	二烯烃的命名	69
4.2	二烯烃的结构	70
4.2.1	丙二烯的结构	70
4.2.2	共轭二烯烃的结构	70
4.3	共轭体系和共轭效应	71
4.3.1	共轭体系	71
4.3.2	共轭效应	73
4.4	共轭二烯烃的化学性质	75
4.4.1	共轭二烯烃的 1,4-加成	75
4.4.2	双烯合成	77
4.4.3	聚合反应和合成橡胶	78
4.5	离域体系的共振论表述法	79

4.5.1	共振论的基本概念	79
4.5.2	书写极限结构式的基本原则	80
4.5.3	极限结构式对共振杂化体的贡献大小	80
4.5.4	共振论的局限性	81
4.6	重要的共轭二烯烃	81
	习题	82

第5章 芳烃

84

5.1	芳烃的分类和命名	84
5.1.1	芳烃的分类	84
5.1.2	芳烃的命名	85
5.2	苯的结构	86
5.2.1	价键理论	86
5.2.2	苯的共振结构	86
5.3	芳烃的物理性质	87
5.4	芳烃的化学性质	87
5.4.1	芳环的亲电取代反应	87
5.4.2	芳环的氧化和还原反应	93
5.4.3	芳环侧链上的反应	93
5.5	苯环上取代反应的定位规则	95
5.5.1	定位基及定位规则	95
5.5.2	定位规则的解释	96
5.5.3	二取代苯的定位规则	98
5.5.4	定位规则在有机合成中的应用	99
5.6	稠环芳烃	99
5.6.1	萘	100
5.6.2	其他稠环芳烃	104
5.7	芳香性	105
5.7.1	Hückel 规则	105
5.7.2	芳香性的判断	105
5.8	重要的芳烃	107
	习题	107

第6章 光学异构

110

6.1	异构体的分类	110
6.2	分子的手性和旋光性	110
6.2.1	分子的手性	110
6.2.2	旋光性	111

6.3 构型的表示方法	112
6.3.1 构型的表示方法	112
6.3.2 构型的标记	113
6.4 含一个手性中心的对映异构	115
6.4.1 对映体	115
6.4.2 外消旋体	115
6.5 含两个手性中心的对映异构	116
6.5.1 含两个不相同手性中心的对映异构	116
6.5.2 含两个相同手性中心的对映异构体	116
6.6 不含手性中心化合物的对映异构	117
6.6.1 非碳原子为手性中心的光学活性化合物	117
6.6.2 含手性轴的化合物	117
习题	118

第7章 卤代烃

119

7.1 卤代烃的分类、命名	119
7.1.1 卤代烃的分类	119
7.1.2 卤代烃的命名	120
7.2 卤代烃的物理性质	121
7.3 卤代烃的化学性质	121
7.3.1 亲核取代反应	121
7.3.2 消除反应	123
7.3.3 与金属的反应	123
7.4 亲核取代反应机理	124
7.4.1 双分子亲核取代反应 (S_N2) 机理	124
7.4.2 单分子亲核取代反应 (S_N1) 机理	126
7.4.3 影响亲核取代反应活性的因素	127
7.5 消除反应机理	129
7.5.1 双分子消除反应 ($E2$) 机理	130
7.5.2 单分子消除反应 ($E1$) 机理	130
7.6 消除反应与亲核取代反应的竞争	131
7.7 卤代烯烃和卤代芳烃的化学性质	133
7.7.1 双键或苯基对卤原子活性的影响	133
7.7.2 卤代芳烃的化学性质	134
7.8 卤代烃的制备	136
7.8.1 烃的卤代	136
7.8.2 不饱和烃的加成	136
7.8.3 氯甲基化反应	137
7.8.4 醇的卤代	137

7.8.5 卤原子交换	137
7.9 重要的含卤化合物	137
习题	138

第8章 有机波谱

141

8.1 分子吸收光谱和分子结构	141
8.2 红外吸收光谱	142
8.2.1 红外吸收光谱的定义	142
8.2.2 分子振动与红外光谱	142
8.2.3 有机化合物基团的特征光谱	144
8.2.4 有机化合物红外谱图解析	145
8.3 核磁共振谱	148
8.3.1 核磁共振的基本原理	148
8.3.2 化学位移	149
8.3.3 自旋偶合和自旋裂分	152
8.3.4 核磁共振谱图解析	154
8.4 紫外吸收光谱	156
8.4.1 紫外吸收光谱的基本原理	156
8.4.2 紫外吸收光谱图	156
8.4.3 紫外光谱图解析	157
习题	158

第9章 醇酚醚

160

9.1 醇	160
9.1.1 醇的结构、分类和命名	160
9.1.2 醇的物理性质和波谱性质	161
9.1.3 醇的化学性质	162
9.1.4 醇的来源及制法	169
9.2 酚	171
9.2.1 酚的分类、命名和结构	171
9.2.2 酚的物理性质和波谱性质	171
9.2.3 酚的化学性质	173
9.2.4 酚的来源及制法	176
9.3 醚	177
9.3.1 醚的分类和命名	177
9.3.2 醚的化学性质	177
9.3.3 醚的来源及工业制法	180
9.3.4 重要的醇酚醚	180

习题	181
----------	-----

第10章	醛酮醌	184
-------------	------------	------------

10.1 醛酮	184
10.1.1 醛酮的命名和结构	184
10.1.2 醛酮的物理性质和波谱性质	185
10.1.3 醛酮的化学性质	186
10.1.4 醛酮的制法	195
10.2 醌	197
10.2.1 醌的命名及结构	197
10.2.2 醌的化学性质	198
10.2.3 重要的醛和酮	198
习题	199

第11章	羧酸及其衍生物	201
-------------	----------------	------------

11.1 羧酸	201
11.1.1 羧酸的结构、分类和命名	201
11.1.2 羧酸的物理性质和波谱性质	202
11.1.3 羧酸的化学性质	205
11.1.4 羧酸的来源和制法	215
11.2 羧酸衍生物	216
11.2.1 羧酸衍生物的命名	216
11.2.2 羧酸衍生物的物理性质和波谱性质	217
11.2.3 羧酸衍生物的化学性质	218
11.2.4 重要的羧酸及衍生物	225
习题	226

第12章	β-二羰基化合物和有机合成基础	229
-------------	---	------------

12.1 烯醇式和酮式的互变异构	229
12.2 α -氢的酸性和烯醇负离子的稳定性	231
12.3 缩合反应	233
12.3.1 Claisen 酯缩合反应	233
12.3.2 交叉酯缩合反应	234
12.3.3 Dieckmann 缩合反应	234
12.3.4 酮酯缩合反应	235
12.3.5 其他缩合反应	235
12.4 乙酰乙酸乙酯合成法	236

12.4.1	乙酰乙酸乙酯的性质	236
12.4.2	乙酰乙酸乙酯在合成中的应用	237
12.5	丙二酸二乙酯合成法	238
12.5.1	丙二酸二乙酯的性质	238
12.5.2	丙二酸二乙酯在合成中的应用	238
12.6	有机合成基础	239
12.6.1	分子骨架的构建	239
12.6.2	官能团的引入和转换	241
12.6.3	官能团的保护	242
12.6.4	有机合成举例	242
	习题	243

第13章 含氮化合物

246

13.1	芳香硝基化合物	246
13.1.1	芳香硝基化合物的命名和结构	246
13.1.2	芳香硝基化合物的性质	247
13.2	胺	250
13.2.1	胺的分类、命名与结构	250
13.2.2	胺的物理性质和波谱性质	252
13.2.3	胺的化学性质	254
13.2.4	季铵盐和季铵碱	261
13.2.5	胺的来源与制法	263
13.3	重氮、偶氮和胍类化合物	265
13.3.1	重氮和偶氮化合物	265
13.3.2	胍	269
13.3.3	重要含氮化合物	270
	习题	271

第14章 杂环化合物

273

14.1	杂环化合物的分类和命名	273
14.2	五元杂环化合物	274
14.2.1	五元杂环化合物的结构	274
14.2.2	五元杂环化合物的物理性质	275
14.2.3	五元杂环化合物的化学性质	275
14.3	六元杂环化合物	278
14.3.1	吡啶的结构及碱性	278
14.3.2	吡啶的化学性质	278
14.3.3	嘧啶	280

14.4	稠杂环化合物	280
14.4.1	吡啶及其衍生物	281
14.4.2	喹啉及其衍生物	281
14.5	重要杂环化合物	282
	习题	283

第15章	生命有机化学	284
-------------	---------------	------------

15.1	碳水化合物	284
15.1.1	单糖	284
15.1.2	二糖	287
15.1.3	多糖	288
15.2	氨基酸与蛋白质	289
15.2.1	氨基酸	289
15.2.2	蛋白质	291
15.3	核酸	294
15.3.1	核酸的组成和结构	294
15.3.2	核糖核酸和脱氧核糖核酸	296
	习题	296

	参考文献	298
--	-------------	------------

第1章 绪论

1.1 有机化合物和有机化学

有机化合物与人类的生活密切相关，人们的衣食住行都离不开它，在很早以前人们就开始应用有机化合物。古代人们就会用粮食发酵酿酒、酿醋，从甘蔗里制糖。18世纪，人们从尿中分离出尿素，从葡萄汁中分离出酒石酸，从酸牛奶中分离出乳酸等，但这些有机物质都来源于生物体内。因此，当时人们根据化合物的来源把从有生命的动物和植物中提取的物质叫做有机化合物，而把从无生命的矿物中得到的物质叫做无机化合物。但同时化学家们认为有机物只能由生物细胞受一种特殊力量“生命力”的作用才会产生出来，人工是不能合成有机化合物的，这一思想曾一度统治了有机化学界，阻碍了有机化学的发展。

直到1828年F. Wohler（魏勒）发现无机物氰胺酸很容易转变成尿素，第一次人工合成有机化合物，这对“生命力”学说是一个有力的冲击。1845年H. Kolb（柯尔伯）合成了乙酸，1854年Berthelot（贝特罗）合成了油脂，1856年Perkin（普尔金）合成了苯胺紫，接着更多有机化合物在实验室被成功合成，“生命力”学说才彻底被否认，开始了有机合成的新时代。

尽管如此，历史遗留下来的有机化合物这个名字现仍使用，但含义发生了变化。大量研究表明，大部分有机化合物都含有元素碳，所以人们就把含碳的化合物称作有机化合物。然而，除了碳以外，绝大多数的有机化合物还含有氢，有的也含有氧、硫、氮和卤素等。因此，有机化合物更确切地说是烃及其衍生物。烃是指仅由碳、氢两种元素组成的化合物，烃的衍生物是指碳氢化合物上的氢被其他原子或基团取代了的化合物。此外，含碳的化合物不一定是有机化合物，如一氧化碳、二氧化碳、碳酸盐及金属氰化物等，由于它们的性质与无机化合物相似，因此仍属于无机化合物。

有机化学是研究有机化合物的组成、结构、性质及其变化规律的一门学科，研究内容比较广泛，包括天然产物，有机化合物的性质及应用，有机反应机理，有机合成及有机化合物结构测定。

1.2 有机化合物的特点

有机化学作为一门独立的学科，其研究的对象——有机化合物与无机化合物在结构和性

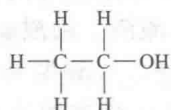
质上存在着一定的差异。

1.2.1 有机化合物结构上的特点

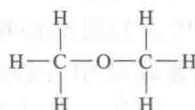
从组成上来讲,组成有机化合物的元素甚少,除碳以外,还有氢、氧、氮、硫、磷和卤素等元素。但有机化合物的数目却极为庞大,迄今已逾 1000 万种,而且新合成或新分离和鉴定的有机化合物还在与日俱增。由碳以外的其他 100 多种元素组成的无机化合物的总数,还不到有机化合物的十分之一。有机化合物之所以数目众多,主要原因是:

① 有机化合物的分子量可大可小,原子个数可以从几个到几十个到几千个,每个有机化合物都有其独特的结构。不少有机分子的结构较为复杂,如维生素 B₁₂ 分子式为 C₆₃H₉₀N₁₄O₁₄PCo,有 183 个原子。

② 分子式相同而构造和性质不同的化合物叫同分异构体,这种现象叫同分异构现象。有机化合物中普遍存在着多种异构现象,如构造异构、顺反异构、对映异构、构象异构等。例如,乙醇和甲醚,分子式均为 C₂H₆O,但它们的结构不同,因而物理和化学性质也不相同。乙醇和甲醚互为同分异构体。



乙醇 沸点 78.5℃



甲醚 沸点 -25℃

由于在有机化学中普遍存在同分异构现象,故在有机化学中不能只用分子式来表示某一有机化合物,必须使用构造式或构型式。

③ 碳有四个价电子,能形成四个共价键,碳与碳之间及碳与其他原子之间形成稳定的共价键,并可通过单键、双键、三键连接成链状或环状化合物。

1.2.2 有机化合物性质上的特点

由于有机化合物结构上的特点,使得它在性质上与无机化合物,特别是与无机盐类有较明显的差别。

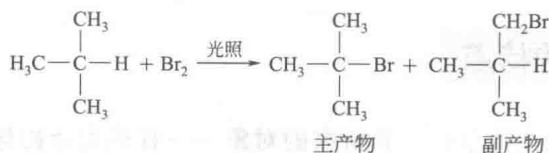
① 可燃性 大多数有机化合物都含有碳和氢两种元素,因此容易燃烧,而大多数无机化合物不燃烧。

② 熔点低 有机化合物在室温下常为气体、液体或低熔点固体,一般固体化合物熔点不超过 400℃。

③ 难溶于水 多数有机化合物,易溶于有机溶剂而难溶于水。但是当有机化合物分子中含有能够同水形成氢键的羟基、羧基等基团时,该有机化合物也有可能溶于水中。

④ 反应速率慢 很多有机反应,一般都是反应速率缓慢的分子间的反应,往往需要加热或使用催化剂,而瞬间进行的离子反应很少。

⑤ 副反应多 有机化合物结构复杂,在反应时有多个反应部位,因此,常有副反应发生,产率低,如:



1.3 有机化合物中的共价键

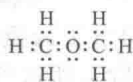
将分子中的原子结合在一起的力叫化学键。常见的化学键有共价键、离子键和金属键。有机化合物中最常见的是共价键。

1.3.1 共价键的形成

共价键是指成键的两个原子通过共用电子对结合在一起的一种化学键。

1916年 G. N. Lewis (路易斯) 提出了原子的价电子可以配对共用形成共价键, 使每个原子达到“八隅体”电子构型的学说。“八隅体”规则是指当各电子层轨道内充满电子, 原子的电子构型才是稳定的, 电子不充满的构型是不稳定的。因此原子必须进行反应使电子充满轨道, 使电子配对成键, 以达到稳定的构型, 使原子结合成稳定的分子, 原子的价电子层达到与同周期惰性元素原子相同的稳定结构。

有机化合物是含碳的化合物, 碳原子最外层有四个价电子, 要想达到“八隅体”结构既难失去四个电子成为 C^{4+} , 也难得到四个电子成为 C^{4-} , 它只能与其他的原子共享四对电子, 达到外层八电子的稳定结构。如:



1.3.2 价键理论

共价键的形成是成键原子的原子轨道相互交盖的结果。氢分子的形成如图 1-1 所示。

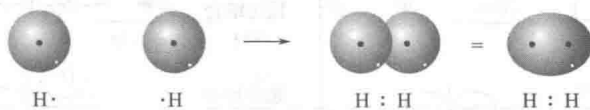


图 1-1 氢分子形成示意图

H 原子的电子结构是 $1s^1$, s 轨道是球形的。当两个氢原子相接近时, H_2 分子体系能量降低, 也可以说是两个原子轨道发生了重叠, 而在重叠的轨道上有两个自旋方向相反的电子, 随着两氢原子核间距离的减小, 两核之间的电子云密度增大, 体系能量降低。当两个原子核间距 r 为 $0.74\text{\AA}$ ($1\text{\AA}=0.1\text{nm}$) 时, 能量为最低值, r 更小时, 则因两核之间库仑斥力增大, 能量反而升高, 氢分子形成的能量变化如图 1-2 所示, 即两核间距离为 $0.74\text{\AA}$ 时, 形成了稳定的 H_2 分子, 这和实验测定值相符。价键理论继承了 Lewis 共用电子对的概念, 但从量子力学的角度指出成键电子必须自旋相反, 并且认为共价键的本质是两个原子有自旋方向相反的未成对电子, 它们的原子轨道发生了重叠, 使体系能量降低而成键。

由此可知价键理论原则如下:

① 如果两个原子各有一个未成对电子, 且自旋方向相反, 则配对形成一个共价键, 如两原子各含有两个或三个未成对原子, 则两两配对形成双键或三键。

② 共价键的饱和性 一个原子的未成对电子配对后, 就不能再与其他原子的未成对电子配对, 即原子中有几个未成对电子就只能与几个其他原子未成对电子配对。各原子都有确定的未成对电子, 所以它的共价键数是一定的。如 H 和 Cl 都是 1 价, O 和 S 是 2 价, N 是 3 价, C 是 4 价等。以此推理, 不同原子形成共价化合物时均有确定的原子比, 如可以有



HCl, H_2S , NH_3 和 CH_4 等共价化合物, 但不可能有 HCl_2 或 H_4S 分子, 这就是共价键的饱和性。

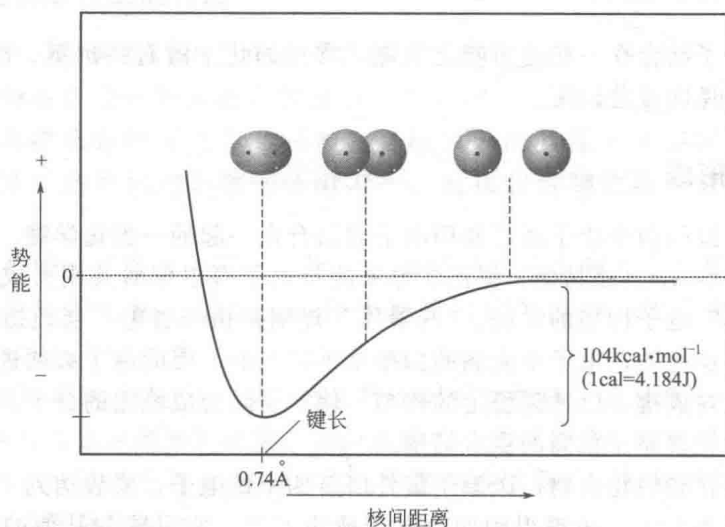


图 1-2 氢分子形成能量图

③ 共价键的方向性 两个成键原子的电子云重叠越多, 形成的共价键越强。因此要尽可能在电子云密度最大的地方重叠。由于除 s 轨道外, 其他成键的原子轨道都不是球形对称的, 所以有明显的方向性。以 $\text{H}-\text{Cl}$ 的形成为例, 如图 1-3 所示, H 的 1s 轨道和 Cl 的 3p 轨道按方式 (1) 重叠, 才能形成稳定的化学键。

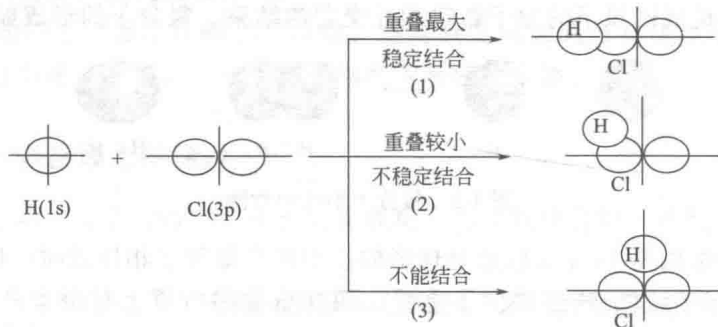


图 1-3 s 和 p 电子原子轨道的三种重叠情况

碳原子在基态时, 只有两个未成对电子。根据价键理论碳原子应是二价的。但大量事实都证实, 在有机化合物中碳原子都是四价的, 而且在饱和化合物中, 碳的四价都是等同的。1931 年 Pauling L 提出了原子轨道杂化理论。杂化轨道理论认为: 碳原子在成键的过程中首先要吸收一定的能量, 使 2s 轨道的一个电子跃迁到 2p 空轨道中, 形成碳原子的激发态, 然后外层能量相近的 2s 轨道和 2p 轨道进行杂化, 可以“混合起来”进行“重新组合”形成几个能量等同的新轨道, 称为杂化轨道。杂化轨道的能量稍高于 2s 轨道的能量, 稍低于 2p 轨道的能量。这种由不同类型的轨道混合起来重新组合成新轨道的过程, 叫做轨道的杂化。杂化轨道的数目等于参加组合的原子轨道的数目。碳原子轨道的杂化有 sp^3 杂化、 sp^2 杂化和 sp 杂化。

① sp^3 杂化 由一个 2s 轨道和三个 2p 轨道杂化形成四个能量相等的新轨道, 叫做 sp^3 杂化轨道, 这种杂化方式叫做 sp^3 杂化, 其杂化过程如图 1-4 所示。

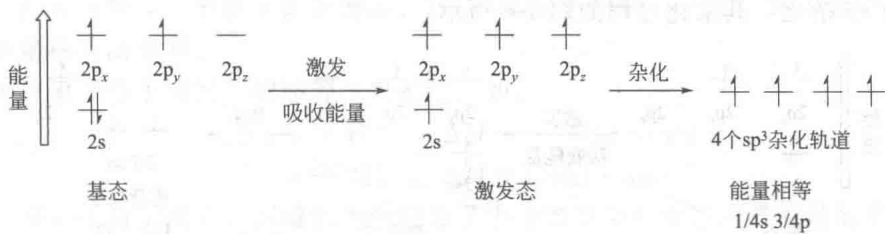


图 1-4 碳原子的 sp^3 杂化

sp^3 杂化轨道的形状及能量既不同于 $2s$ 轨道，又不同于 $2p$ 轨道，它含有 $1/4$ 的 s 成分和 $3/4$ 的 p 成分。 sp^3 杂化轨道是有方向性的，即在对称轴的一个方向上集中，四个 sp^3 杂化轨道呈四面体分布，轨道对称轴之间的夹角均为 109.5° ，其形状如图 1-5 所示，这使得成键电子之间的排斥力最小，结构最稳定。

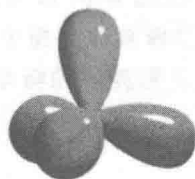


图 1-5 碳原子 sp^3 杂化轨道

② sp^2 杂化 由一个 $2s$ 轨道和两个 $2p$ 轨道重新组合成三个能量等同的杂化轨道，称为 sp^2 杂化，其杂化过程如图 1-6 所示。

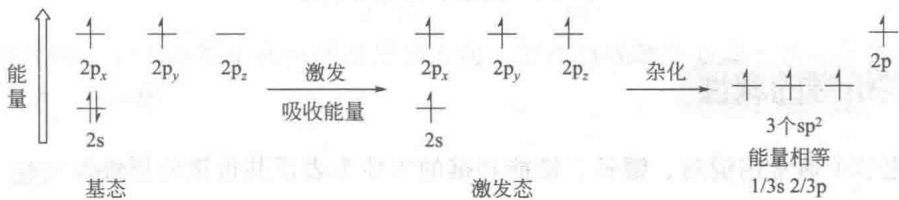


图 1-6 碳原子的 sp^2 杂化

sp^2 杂化轨道的形状与 sp^3 杂化轨道相似， sp^2 杂化轨道含有 $1/3$ 的 s 成分和 $2/3$ 的 p 成分，这三个 sp^2 杂化轨道的对称轴在同一平面上，并以碳原子核为中心，分别指向正三角形的三个顶点，对称轴的夹角为 120° ，其形状如图 1-7(a) 所示。碳原子还余下一个未参与杂化的 $2p$ 轨道，仍保持原来的形状，它的对称轴垂直于三个 sp^2 杂化轨道对称轴所在的平面，其形状如图 1-7(b) 所示。

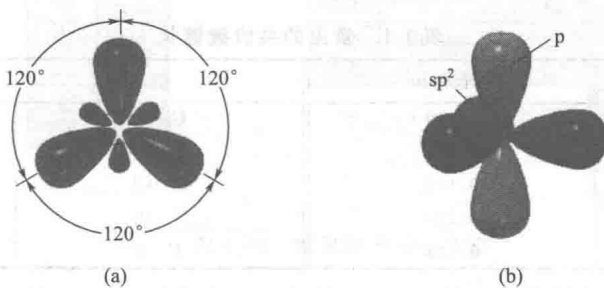


图 1-7 碳原子 sp^2 杂化轨道

③ sp 杂化 由一个 $2s$ 轨道和一个 $2p$ 轨道重新组合成两个能量等同、方向相反的杂化