国家教材委员会专家委员会审核通过
2020

普通高中教科书

化学

HUA XUE

必修

第二册













上海科学技术出版社

普通高中教科书

化学

HUA XUE

必修

第二册

上海科学技术出版社

主　　编：麻生明　陈　寅
本册主编：麻生明　陈　寅
编写人员：（以姓氏笔画为序）
匡云艳　朱万森　刘永梅　孙兴文
余方喜　姚子鹏　姚秋平　唐增富

责任编辑：王美淞　张明睿　胡恺岩　孙　伟
美术设计：诸梦婷

普通高中教科书　化学　必修　第二册
上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

出　版　上海世纪出版（集团）有限公司　上海科学技术出版社
（上海市闵行区号景路 159 弄 A 座 9F－10F　邮政编码 201101）
发　行　上海新华书店
印　刷
版　次　2021 年 1 月第　版
印　次　2025 年 7 月第　次
开　本　890 毫米 ×1240 毫米　1/16
印　张　7.75
字　数　169 千字
书　号　ISBN 978－7－5478－5222－4/G・1027
定　价

版权所有・未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分・违者必究
如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025，邮箱：jc@sstp.cn
全国物价举报电话：12315

声明　按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定，我们已尽量寻找著作权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

目 录

第 5 章　金属及其化合物 …… 1

5.1 金属的性质 …… 3
5.2 重要的金属化合物 …… 12
5.3 化学变化中的能量变化 …… 24
本章复习 …… 31
项目学习活动　如何测定菠菜中铁元素的含量 …… 35

第 6 章　化学反应速率和化学平衡 …… 39

6.1 化学反应速率 …… 41
6.2 化学平衡 …… 50
6.3 化工生产 …… 56
本章复习 …… 64

第 7 章　常见的有机化合物 …… 69

7.1 饱和烃 …… 71
7.2 不饱和烃 …… 80
7.3 乙醇和乙酸 …… 91
7.4 糖、油脂和蛋白质 …… 98
本章复习 …… 105
项目学习活动　如何利用数据库探究有机分子的空间结构 …… 111

附　录 …… 114

I 化学词汇中英文对照表 …… 114

II 学生必做实验索引 …… 115

III 元素周期表 …… 116

第5章

金属及其化合物



大克鼎是西周晚期贵族用于祭祀的青铜器，含有铜、锡、铅等金属。现藏于上海博物馆。

5.1 金属的性质
5.2 重要的金属化合物
5.3 化学变化中的能量变化

元素周期表中大多数元素是金属元素。由金属元素或以金属元素为主制成的材料可应用于各个领域，小到日常民用，大到国防军工，都能看到金属材料的身影。可以说，金属及其材料在人类文明进步和社会发展中起着至关重要的作用。

金属元素在自然界中广泛存在。地球上绝大多数的金属资源存在于地壳和海洋之中，除少数不活泼的金属能以游离态存在之外，其他金属元素大多以化合态形式存在。通过本章学习，我们将了解人们是如何从自然资源中获取金属单质，认识钠、铁等金属及其重要化合物的主要性质和用途，了解化学变化中伴随的能量变化。



5.1 金属的性质

钠和铁都是自然界中储量比较丰富的元素，钠是一种性质非常活泼的金属，铁是人类冶炼和使用最多的金属。本节中我们将以钠、铁为代表，了解金属的主要性质，以及它们在生产、生活中的重要应用。

金属的物理性质

想一想

（1）打开元素周期表，标出金属元素的位置区域，估算它们在已发现元素中所占的比例。

（2）在日常生活中，你会用到哪些金属材料？这些材料分别有哪些理化性能？

金属表面一般都有光泽，黄金、白银、铂金等饰品就是利用了这一性质。金属具有良好的延展性，可将它们拉成细丝或锤击成薄片。金属既能导电，又有良好的导热性。银的导电性和导热性居金属首位，但由于价格等原因，一般的电线都是用铜制成的。除了这些共性以外，各种金属还具有不同的特性和用途。

合金是由两种或两种以上元素（其中至少一种是金属）组成的具有金属特性的物质。由于纯金属性能的局限性，实际中广泛应用的主要是合金。青铜主要是铜合金，钢铁属于铁碳合金。

金属元素的原子结构

想一想

（1）从原子结构的角度，分析碱金属等主族金属元素原子的核外电子排布与其化学性质的关联。

（2）比较金属活动性顺序表中不同位置金属还原性的相对强弱，以及这些金属所对应正离子氧化性的相对强弱。

学习聚焦

- 知道金属的通性
- 了解钠、铁及其重要化合物的主要性质
- 理解金属的还原性
- 了解金属冶炼的原理

知识回放

- 金属活动性顺序
- 氧化还原反应
- 同周期和同主族元素性质的递变规律

资料库

金属之最

锂——密度最小的金属

铝——地壳中含量最高的金属元素

钙——人体中含量最多的金属元素

铬——硬度最大的金属

钨——熔点最高的金属

汞——熔点最低的金属

金属元素的原子具有较为相似的电子结构，大多数金属元素原子的最外层电子数较少，原子半径较大，容易失去电子。主族金属元素原子在化学反应中失去最外层电子，呈现的最高正价等于原子的最外层电子数。副族金属元素原子的电子结构比较复杂，在化学反应中除能失去最外层的电子外，还能失去排布在内层上的电子，可显示出多种价态。

总之，由于金属元素原子的核外电子排布具有共性和个性，因此金属单质的化学性质既有相似的方面，又有差异的体现。

金属的化学性质

1. 金属与非金属单质的反应

我们知道许多金属与非金属单质在一定条件下能发生化合反应。同一种金属与不同种非金属单质反应时，可能得到不同价态的生成物。同一种金属与同种非金属单质反应时，如果反应条件不同，也可能得到不同价态的生成物。

书写表达

写出金属铁、铜分别与氯气和硫反应的化学方程式。

实验探究

不同条件下钠在空气中的反应

取一小块保存在煤油中的金属钠，用滤纸吸干表面的煤油后，用小刀切开一端的外皮，观察钠表面的光泽和颜色，放置一会儿后，再观察表面的变化（图5.1）。（金属钠使用时要小心，多余的钠要及时放回煤油中）



图5.1　金属钠易被空气中的氧气氧化

如图 5.2 所示，取绿豆大小的一块钠放在石英玻璃蒸发皿中，用小火加热片刻，待金属钠燃烧起来立即停止加热，观察并记录现象。

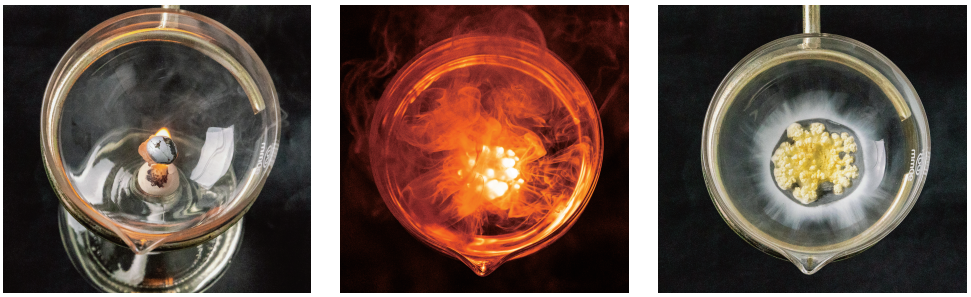


图 5.2　钠在空气中燃烧

现象记录：_____。

实验结论：_____。

问题：根据实验现象描述钠的物理性质。在常温或加热条件下，钠与氧气反应得到的生成物相同吗？

钠暴露在干燥的空气中，易与空气中的氧气反应，生成白色的氧化钠，失去金属光泽而变暗。常温下，钠在空气中就会迅速地被氧化，说明钠的化学性质活泼。

$$4Na+O_2 = 2Na_2O$$

钠在空气中受热后，先熔化成银色的小球，然后剧烈燃烧，发出黄色火焰，生成一种淡黄色的过氧化钠（Na_2O_2）固体。

$$2Na+O_2 \xlongequal{\triangle} Na_2O_2$$

钠具有很强的还原性，除了与氧气反应之外，还能与氯气、硫等非金属单质发生反应。

铁的化学性质也比较活泼，铁原子在化学反应中容易失去最外层的 2 个电子，变成 Fe^{2+}；若遇较强的氧化剂，铁原子能失去 3 个电子，变成 Fe^{3+}。因此，铁具有还原性，常见的价态为 +2、+3 价。

常温下，铁在干燥的空气中不易与氧气、氯气、硫等非金属单质发生反应。在潮湿的空气中，铁易被氧化生成铁锈（主要成分是 $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$）。高温时，铁与氧气、氯气、硫等非金属单质均能发生剧烈的反应。

资料库

钠

密度：0.968 g · cm^{-3}（293 K）

熔点：97.8 ℃

沸点：881.4 ℃

大多数金属跟钠、铁相似，能与氧气、氯气等非金属单质反应，但由于金属的还原性强弱不同，因此反应的难易和剧烈程度也是不同的。

2. 金属与水的反应

许多金属在一定条件下都能与水发生反应。

书写表达

写出金属钠与水反应的化学方程式，描述该反应的实验现象。

钠能在冷水中剧烈反应，可用作强除水剂。当钠着火时，不能用水或泡沫灭火剂扑灭，应选用干沙、石粉、专用灭火剂来扑灭。在实验室中，少量金属钠一般保存在煤油或石蜡油中，以隔绝水和空气。

日常生活中人们常用铁或铜制的水壶来盛水和烧水，说明这些金属与冷水或热水不发生反应。但在更高温度下，铁能与水蒸气发生反应，生成四氧化三铁和氢气。

$$3Fe + 4H_2O(g) \xlongequal{\text{高温}} Fe_3O_4 + 4H_2$$

金属铝很活泼，但在空气中易发生“钝化”，即在铝的表面生成一层致密的氧化膜，这层氧化膜起着保护内部金属的作用。这也正是化学性质活泼的铝能在空气中稳定存在，以及能用于制作炊具的原因。除去氧化膜后，铝能与热水反应生成氢氧化铝和氢气。

$$2Al + 6H_2O \xlongequal{\triangle} 2Al(OH)_3 + 3H_2\uparrow$$

3. 金属与酸、盐溶液的反应

比较活泼的金属如锌、铁，它们能与稀硫酸或盐酸等发生置换反应放出氢气。较活泼的金属也可以把相对不活泼的金属从其盐溶液中置换出来。

较不活泼的金属如铜、银，它们与稀硫酸或盐酸等不发生反应，但能与浓硫酸、硝酸等具有强氧化性的酸发生反应，生成二氧化硫、氮氧化物等。铁、铝等金属在室温下遇浓硫酸、浓硝酸会发生钝化。

想一想

实验室里用金属置换出某些盐溶液中的金属时，为何一般不会选择像钠、钾这样的活泼金属？

金属的冶炼

在自然界中，只有少数化学性质稳定的金属能以游离态存在，如金、铂以及少量的银、铜。大多数金属以化合态存在于矿石中，金属的冶炼就是将化合态的金属元素还原为金属单质的过程。在很多矿物中，金属元素一般以离子的形式存在，由于金属离子的氧化性强弱存在差异，使它们被还原为单质的难易程度不同，因此，金属的冶炼方法也就不同。

不活泼金属的硫化物或氧化物在焙烧或加热时就可分解，生成金属单质。例如，焙烧辰砂（HgS）或加热氧化汞都可以制取汞。

$$HgS + O_2 \xlongequal{\text{焙烧}} Hg + SO_2$$

$$2HgO \xlongequal{\triangle} 2Hg + O_2\uparrow$$

较活泼的金属可以采用热还原法来制得，常见的还原剂有氢气、焦炭、一氧化碳、活泼金属等。铁是现代生产和生活中使用量最大的金属，炼铁的过程就是加入还原剂将矿石中的铁元素还原成铁单质。

纯净的铁有银白色的金属光泽。铁元素在地壳中以化合态形式存在，含量约占 4.75%，仅次于氧、硅、铝（图 5.3）。用于炼铁的矿石主要有赤铁矿（主要成分是 Fe_2O_3）、磁铁矿（主要成分是 Fe_3O_4）和菱铁矿（主要成分是 $FeCO_3$）等（图 5.4）。

炼铁最主要的化学反应是（以赤铁矿石为例）：

$$Fe_2O_3 + 3CO \xlongequal{\text{高温}} 2Fe + 3CO_2$$

资料库

铁

密度：7.86 g · cm^{-3}

熔点：1 535 ℃

沸点：2 861 ℃

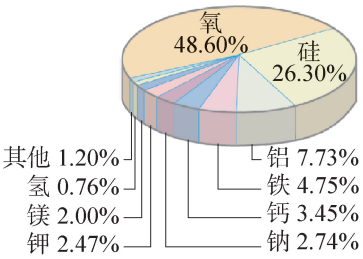


图 5.3　地壳中各种元素的含量



图 5.4 不同的铁矿石

在实际生产中，人们把铁矿石和焦炭等原料混合，在高温下炼制，这样炼出来的铁碳合金，称为生铁。为了提高性能和扩大用途，再除去生铁里的一部分碳和其他杂质，便炼制成了钢，也称为碳钢。在普通碳钢里添加适量的一种或多种合金元素，使钢具有一些特殊的性能，这种钢称为合金钢。

钢铁材料的品种繁多，广泛应用于建筑、家电、机械、造船、汽车、铁道、能源等领域（图 5.5），是许多基础建设的物质保障，也为国家持续快速的经济发展做出了重大贡献。

资料库

表 5.1 生铁和钢

铁合金	生铁	钢
含碳量	2% ～ 4.3%	0.03% ～ 2%
机械性能	硬而脆	硬而韧，有弹性
机械加工	可铸 不可锻	可铸 可锻

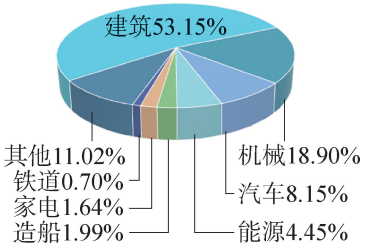


图 5.5 2017 年我国不同领域对钢铁需求的结构

书写表达

指出下列金属冶炼反应中的还原剂。

$$WO_3 + 3H_2 \xlongequal{\triangle} W + 3H_2O$$

$$ZnO + C \xlongequal{高温} Zn + CO\uparrow$$

$$Cr_2O_3 + 2Al \xlongequal{高温} 2Cr + Al_2O_3$$

活泼金属离子的氧化性很弱，用还原剂很难将它们从化合态还原成单质，一般采用电解法制得。金属钠就是用电解熔融的氯化钠来制取的。

$$2NaCl(熔融) \xlongequal{通直流电} 2Na + Cl_2\uparrow$$

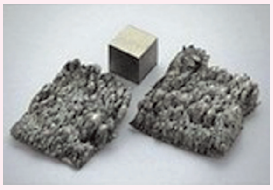
金属铝是用电解熔融氧化铝的方法制得的，但氧化铝熔点高，很难直接熔融电解。工业上用冰晶石（Na_3AlF_6）作为助熔剂，使氧化铝熔融的温度大大降低，然后通直流电制取。

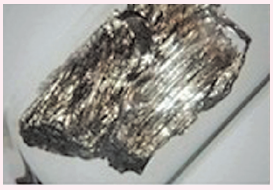
$$2Al_2O_3 \xlongequal[助熔剂]{通直流电} 4Al + 3O_2\uparrow$$

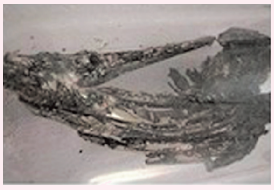
拓展视野

稀土金属

稀土金属是元素周期表中第 3 族的钪、钇和 15 种镧系元素的总称。稀土金属质地比较软，具有优良的光、电、磁等物理特性，它们的化学性质极为相似，都是很活泼的金属，常见化合价为 +3。这些稀土金属常被作为神奇的“调料”使用，只需极少量，就能显著改变材料的性能。


钪 ($_{21}$Sc)


钐 ($_{62}$Sm)


铕 ($_{63}$Eu)

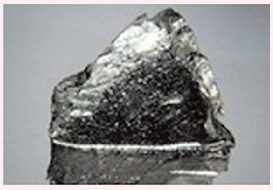

镥 ($_{71}$Lu)

图 5.6 稀土元素钪、钐、铕和镥

例如，在铝中加入千分之几的钪，就能明显提升铝合金在高温强度、结构稳定性、抗腐蚀等方面的性能。钪也是铁的有效改良剂，添加少量钪便可显著提高铸铁的强度和硬度。因钪具有较高熔点，且密度又跟铝接近，因此又可被应用于钪钛合金和钪镁合金等，这种高熔点轻质合金材料通常用在航天飞机和火箭上。

当然，钪只是稀土金属中的一员。稀土元素还可用于生产荧光、永磁、超导、储氢、磁光存储及光导纤维等材料中。这些稀土材料极具价值且有广泛的用途，在通信、电子计算机、航空航天、医药卫生、新能源等尖端科技领域都有应用。

中国化学家徐光宪（1920—2015）所创立的“串级萃取理论”在稀土工业得到了普遍应用，引导了我国稀土分离科技和产业的全面革新，为稀土功能材料和器件的发展提供了物质保证，使我国实现了从稀土资源大国到生产和应用大国的飞跃，极大地提升了我国稀土产业的国际竞争力。


图 5.7 国家最高科学技术奖获得者徐光宪

链接职业

特种钢炼制

特种钢的制造在军事、航空航天工业上起着关键性的作用。特种钢就是在碳素钢里适量地加入一种或几种其他元素，例如稀土元素，从而使钢具有各种特殊性能。从事特种钢炼制的科研人员，是国家急需的人才，主要的工作是研究元素添加对特种钢性质的影响和特种钢制备的化学工艺等。



图 5.8 炼钢

学习指南

例题导引

问题：

- 某种合金材料耐腐蚀、强度大。它和铁的部分物理常数如下表所示。

物质	熔点 / ℃	密度 / (g · cm^{-3})	硬度	导电性
合金	3 200	3.20	7.5	3.5
铁	1 535	7.86	4.5	17

注：硬度以金刚石的硬度 10 为标准，1 表示很软，10 表示很硬。导电性以银的导电性 100 为标准。

请根据表中数据对该合金材料的性能和用途做出基本评价。

分析：

- 物质的用途应该与其相应的理化性质或性能相匹配。从已知条件和表中信息可知，该合金材料具有高熔点、低密度、高硬度、耐腐蚀等优良性能。拥有这些性能的合金材料，适用于航天器的外壳、炉具、门窗框等。不足之处就是其导电性较差，不适合用作导线等。

练习巩固

1. 在冶金行业中通常把铁称为“黑色金属”，铁制品在生产、生活中有广泛用途。下列说法正确的是（　　）。

（A）铁是黑色的金属

（B）用作避雷针是利用铁的导电性

（C）铁制容器不能贮存浓硫酸

（D）生铁是铁矿石经热分解法冶炼而得的

2. 钠与水反应时的现象与其下列性质无关的是（　　）。

（A）熔点低　　（B）密度小

（C）导电性好　　（D）有强的还原性

3. 下列物质中，不能通过单质之间的化合直接制取的是（　　）。

（A）$FeCl_2$　　（B）Na_2O_2

（C）Fe_3O_4　　（D）Na_2O

4. 表中列出的是铁、铝、铜和钛这四种金属的相关性质。

金属	熔点 / ℃	密度 / (g · cm^{-3})	强度	硬度	每吨的价格 / 元
铁	1 535	7.86	20	4.5	4 000
铝	660	2.70	11	2.8	13 000
铜	1 085	8.96	33	3.0	48 000
钛	1 668	4.51	40	6.0	65 000

注：金属强度一般是指材料抵抗外力破坏作用的最大能力，数值越小表示能力越弱。

请回答下列问题。

（1）铝具有较好的耐腐蚀性，请解释铝耐腐蚀的原因。

（2）钛是制造飞机的材料之一。根据表中数据，解释为何用钛来制造飞机。

（3）钢是铁合金，汽车车身可以用钢或铝制造。根据表中数据，评述用铝来替代钢制造汽车车身的优缺点。

5.2 重要的金属化合物

学习聚焦

- 理解氧化钠与过氧化钠、碳酸钠与碳酸氢钠的化学性质
- 知道铁的氧化物的性质
- 理解铁的氢氧化物的制备
- 学会 Fe^{3+} 的检验
- 了解 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 的相互转化

知识回放

- 钠与氧气反应
- 盐酸除铁锈
- 离子反应



图 5.9　氧化钠



图 5.10　氧化铁可作建筑外墙的涂料

金属化合物的种类很多，主要有金属氧化物、氢氧化物和盐等。我们已经接触了一些含钠和含铁的化合物，如氢氧化钠、氯化钠、氧化铁等，不同的金属化合物拥有各自的性质和用途。本节我们将进一步学习钠、铁等的一些重要化合物及其应用。

氧化物

自然界中许多矿物的主要成分是以金属氧化物的形式存在的，如赤铁矿（主要成分是 Fe_2O_3）、铝土矿（主要成分是 Al_2O_3）等。

多数金属氧化物不溶于水，只有少数金属氧化物能与水反应，生成可溶或微溶的碱。

1. 氧化钠

氧化钠（图 5.9）是碱性氧化物，常温下，与水反应后生成氢氧化物，并放出热量。

$$Na_2O + H_2O = 2NaOH$$

氧化钠与二氧化碳反应，生成碳酸钠。氧化钠与酸反应，生成相应的钠盐和水。氧化钠在空气中加热会跟氧气反应生成过氧化钠。

$$Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3$$

$$Na_2O + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + H_2O$$

$$2Na_2O + O_2 \xlongequal{\triangle} 2Na_2O_2$$

2. 铁的氧化物

铁的氧化物主要有氧化亚铁、氧化铁、四氧化三铁等，它们既不溶于水，也不与水发生反应。氧化亚铁是黑色粉末，在空气中受热后会被氧化为氧化铁或四氧化三铁。氧化铁是一种红棕色粉末，俗称铁红，可作油漆和涂料的颜料（图 5.10）。四氧化三铁是一种复杂的氧化物，它是具有磁性的黑色晶体，俗称磁性氧化铁。

氧化亚铁和氧化铁都是碱性氧化物，都能与酸反应，生成亚铁盐和铁盐。离子方程式为：

$$FeO + 2H^+ = Fe^{2+} + H_2O$$
$$Fe_2O_3 + 6H^+ = 2Fe^{3+} + 3H_2O$$

拓展视野

氧化铝

氧化铝是一种白色且熔点较高的氧化物，常用于耐火材料的制造。新制的氧化铝除了能与酸反应外，还能与氢氧化钠溶液反应，生成四羟基合铝酸钠。因此，氧化铝是一种既能与强酸反应又能与强碱反应的两性氧化物。

$$Al_2O_3 + 6HCl = 2AlCl_3 + 3H_2O$$
$$Al_2O_3 + 2NaOH + 3H_2O = 2Na[Al(OH)_4]$$

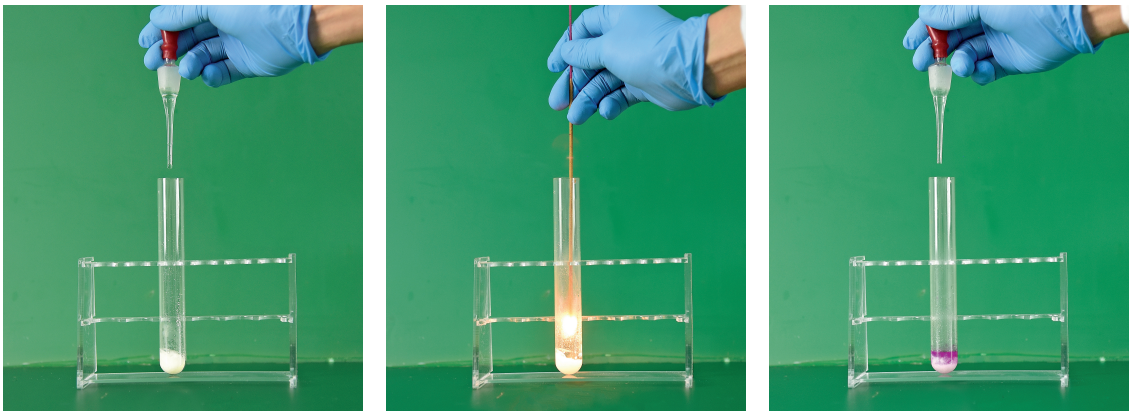
过氧化物

过氧化钠（Na_2O_2）是一种重要的过氧化物，具有强氧化性，易潮解，有腐蚀性，应密封保存。

实验探究

过氧化钠性质的探究

1. 如图 5.11 所示，取一小匙过氧化钠置于干燥的试管中，向试管里滴加 3 mL 水，用带火星的木条，检验生成的气体，用手触感试管底部的温度，然后滴入几滴酚酞试液，观察并记录现象。



（a）滴加 3 mL 水　（b）用带火星木条检验　（c）滴加酚酞试液

图 5.11　过氧化钠与水反应

2. 如图 5.12 所示，在长玻璃管中加入少量过氧化钠固体，用气袋（或气囊）向玻璃管内缓缓通入二氧化碳。将反应后的气体通入澄清石灰水中，用手小心触感玻璃管的温度，并用带火星的木条在试管液面上方检验产生的气体。

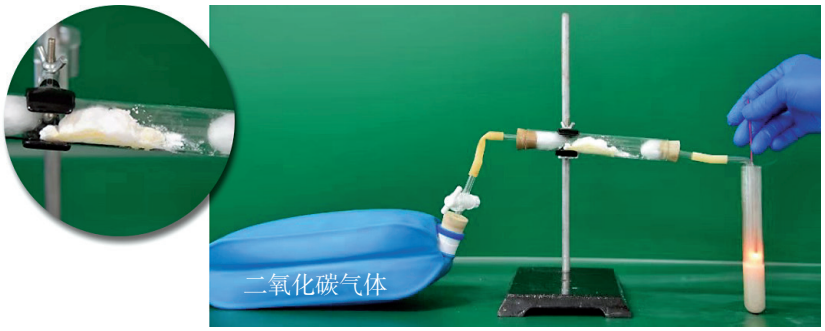


图 5.12　过氧化钠与二氧化碳反应

编号	现象记录	实验结论	化学方程式
1			
2			

问题：过氧化钠与二氧化碳反应后会生成哪些生成物？请设计实验探究该反应的生成物。

过氧化钠与水反应，生成氢氧化钠和氧气。过氧化钠还能与二氧化碳反应，生成碳酸钠和氧气。

$$2Na_2O_2 + 2H_2O = 4NaOH + O_2\uparrow$$
$$2Na_2O_2 + 2CO_2 = 2Na_2CO_3 + O_2$$

根据上述性质，可将过氧化钠用作漂白剂、消毒剂、氧化剂，以及潜水员或潜艇的供氧剂等。

资料库

氢氧化钠

密度：2.130 g · cm^{-3}

熔点：323 ℃

沸点：1 388 ℃

对皮肤、纸张、丝绵织物和玻璃等有腐蚀性。

氢氧化物

1. 氢氧化钠

氢氧化钠是一种白色固体，容易潮解，易溶于水并产生大量的热，水溶液呈强碱性。氢氧化钠能与氯气等一些非金属单质反应，那么它能与金属反应吗？

实验探究

氢氧化钠与铝的反应

如图 5.13 所示，取一段铝条，用砂纸去除铝条表面的氧化膜后放入试管，加入 3 mL 6 mol · L^{-1} NaOH 溶液，观察现象。用带导管的塞子塞住试管，将产生的气体导入盛有少量洗涤剂的玻璃蒸发皿中，待蒸发皿中产生较多气泡后，点燃气泡。



图 5.13　氢氧化钠与铝反应

现象记录：_____。

实验结论：_____。

问题：上述实验中氢氧化钠和铝分别表现出哪些化学性质？

2. 铁的氢氧化物

在常见的金属氢氧化物中，除了 NaOH、KOH、$Ba(OH)_2$ 等易溶于水，$Ca(OH)_2$ 微溶于水之外，$Fe(OH)_3$、$Al(OH)_3$ 等多数的金属氢氧化物都不溶于水，但可溶于酸。常见的铁的氢氧化物有氢氧化铁和氢氧化亚铁。

实验探究

氢氧化铁和氢氧化亚铁的制备

1. 氢氧化铁的制备

取一支试管加入 2 mL $FeCl_3$ 溶液，再用胶头滴管向其中加入 NaOH 溶液，观察并记录实验现象。

2. 氢氧化亚铁的制备

$Fe(OH)_2$ 是一种白色物质，易被氧气等氧化剂氧化，甚至溶解在溶液中的少量氧气也可氧化 $Fe(OH)_2$。请设计一个实验方案，从溶液配制直至生成 $Fe(OH)_2$ 沉淀，整个过程尽量隔绝氧气。在得到白色絮状沉淀后，进一步观察 $Fe(OH)_2$ 的氧化过程。你的实验方案是：

氢氧化亚铁的制备

实验目的：

实验原理：

实验用品：

实验步骤：

数据处理与实验结果：

问题与讨论：

编号	现象记录	化学方程式或离子方程式
1		
2		



图 5.14　氢氧化铁沉淀

铁盐溶液与碱溶液反应得到的氢氧化铁是一种不溶于水的红褐色沉淀（图 5.14）。氢氧化铁可用来制药、制颜料等。加热时，氢氧化铁分解为氧化铁和水。

$$2Fe(OH)_3 \xlongequal{\triangle} Fe_2O_3 + 3H_2O$$

$FeSO_4$ 与 NaOH 反应，生成的白色絮状沉淀暴露在空气中会迅速变为灰绿色，最后变成红褐色。因为不溶于水的白色 $Fe(OH)_2$ 被空气中的 O_2 氧化为红褐色的 $Fe(OH)_3$。

$$FeSO_4 + 2NaOH = Fe(OH)_2\downarrow + Na_2SO_4$$
$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O = 4Fe(OH)_3$$

书写表达

氢氧化铁和氢氧化亚铁都是难溶的氢氧化物，请写出它们分别与盐酸反应的离子方程式。

盐

1. 碳酸钠和碳酸氢钠

碳酸钠和碳酸氢钠是常见的钠盐。

碳酸钠俗称苏打，又称纯碱，常温下为白色粉末，易溶于水，水溶液呈碱性。碳酸钠是一种重要的化工原料，广泛应用于石油、纺织、冶金、建筑等领域。

碳酸氢钠俗称小苏打，常温下为白色晶体，在水中的溶解度小于碳酸钠，水溶液呈弱碱性。在制药中用作制酸剂，在食品工业中用作酸度调节剂、膨松剂等。

书写表达

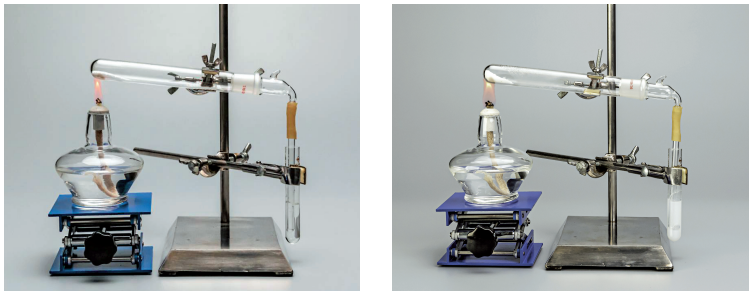
碳酸钠和碳酸氢钠都能与盐酸反应，请分别写出它们与盐酸反应的离子方程式。

实验探究

比较碳酸钠、碳酸氢钠的化学性质

1. 热稳定性

在两支大试管内分别放入少量碳酸钠和碳酸氢钠固体，按图 5.15 所示搭建装置，将导管分别伸入两支盛有澄清石灰水的小试管中。在大试管底部加热，观察现象，并尝试得出结论。



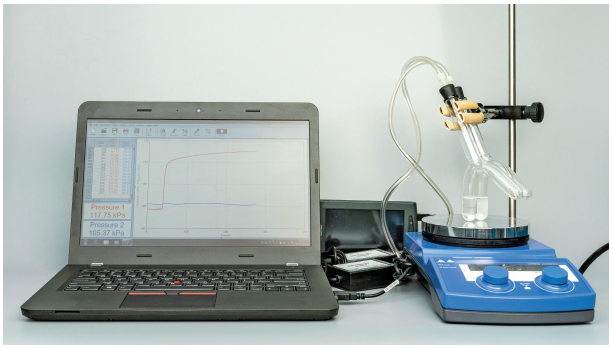
（a）加热碳酸钠固体　　（b）加热碳酸氢钠固体

图 5.15　加热碳酸钠和碳酸氢钠固体

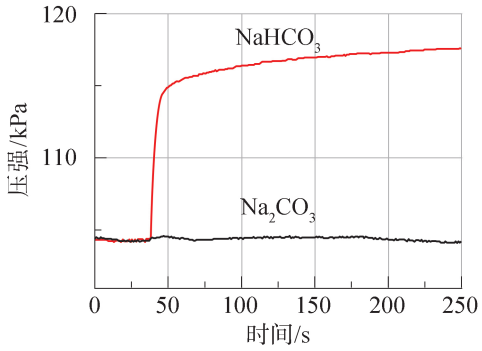
2. 与盐酸反应

如图 5.16（a）所示，在一支 Y 形试管的一侧支管中放小磁子和 1 g 碳酸钠，另一支 Y 形试管的一侧支管中放小磁子和 1 g 碳酸氢钠，在两支 Y 形管的另一

侧支管中都加入 10 mL 0.1 mol · L^{-1} 稀盐酸。在两支 Y 形试管上各连一个气体压强传感器，并与数据采集器和计算机连接并采集压强数据。将两支 Y 形管同时向一侧倾斜，使盐酸跟固体反应，同时将 Y 形管固定在磁力搅拌器上搅拌。观察试管中的现象和采集到的压强数据的变化，根据如图 5.16（b）所示的实验结果，得出结论。



（a）



（b）

图 5.16　碳酸钠、碳酸氢钠分别与盐酸反应

物质	热稳定性	化学方程式	与盐酸反应	化学方程式
Na_2CO_3				
$NaHCO_3$				

实验表明，碳酸氢钠比碳酸钠更易受热分解。碳酸氢钠在加热后迅速分解，产生二氧化碳气体。碳酸钠则很难受热分解。

$$2NaHCO_3 \xlongequal{\triangle} Na_2CO_3 + CO_2\uparrow + H_2O$$

碳酸钠与盐酸反应其实是分两步完成的。碳酸氢钠遇到稀盐酸放出二氧化碳，要比碳酸钠剧烈得多。

$$Na_2CO_3 + HCl = NaHCO_3 + NaCl$$
$$NaHCO_3 + HCl = NaCl + H_2O + CO_2\uparrow$$

想一想

根据碳酸钠、碳酸氢钠的性质，思考可以利用哪些方法来鉴别碳酸钠和碳酸氢钠。

碳酸钠粉末露置在潮湿的空气中会吸收水分，形成水合碳酸钠晶体（$Na_2CO_3 \cdot xH_2O$）。像石碱（$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$）这种碳酸钠晶体在干燥空气里容易逐渐失去结晶水变成碳酸钠粉末。向碳酸钠溶液中通入二氧化碳可生成碳酸氢钠。

化学史话

享誉世界的侯氏制碱法

碳酸钠俗称纯碱，是一种重要的化工原料，人们曾经从盐湖等天然资源中获得纯碱，但这远远不能满足工业生产的需要。为此，化学家从 18 世纪起就开始探索采用工业方法生产纯碱。

1861 年比利时化学家索尔维用食盐、氨水、二氧化碳为原料，于室温下从溶液中析出碳酸氢钠，将它煅烧，即分解为碳酸钠。此法称为索尔维法，并沿用至今。

$$NaCl + NH_3 + CO_2 + H_2O = NaHCO_3\downarrow + NH_4Cl$$

$$2NaHCO_3 \xlongequal{\triangle} Na_2CO_3 + CO_2\uparrow + H_2O$$

索尔维法生产出的纯碱产量高、质量好，多国采用索尔维法建立了大规模生产纯碱的工厂，并成立索尔维公会，对会员国以外的国家实施技术封锁。

第一次世界大战期间，欧亚交通壅阻，由于我国所需的纯碱是从英国进口的，一时间，纯碱非常匮乏，一些以纯碱为原料的企业难以维系。1917 年，中国化工实业家范旭东（1883—1945）在天津塘沽创办了永利制碱公司，决心打破外国的垄断，生产出中国的纯碱。1921 年，侯德榜（1890—1974）受邀担任永利碱厂的技师长，他全身心投入到制碱工艺和设备的改进上。1926 年，永利碱厂生产的“红三角”牌纯碱在万国博览会上获得金质奖章，产品不仅畅销国内，而且打入国际市场。1932 年，侯德榜将多年研究心得写成《纯碱制造》一书，将保密达 70 年之久的索尔维法制碱技术公之于世。

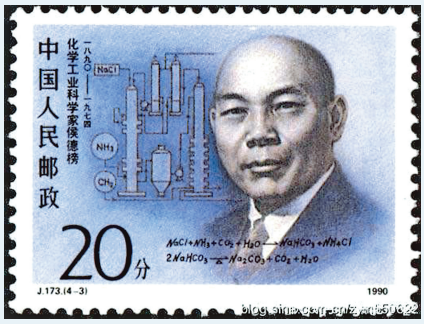


图 5.17　侯德榜

1938 年初，侯德榜决定在四川建立新碱厂，但他面临的困难有：中国内陆缺盐，而索尔维法食盐的转化率较低，制碱成本高，废液、废渣污染环境和难以处理等。因此，必须对制碱工艺进行改进创新。他提出将索尔维法制碱和合成氨两大工业联合，同时生产纯碱和化肥氯化铵。为此，侯德榜带领技术人员进行了 500

多次试验，分析了 2 000 多个样品，终于在 1943 年，侯德榜发明和创立了举世闻名的“联合制碱法”。

此法将氨与二氧化碳（合成氨工业的副产品）先后通入饱和食盐水中，析出碳酸氢钠，经过滤、洗涤、煅烧而得纯碱产品。在滤液中，通入氨、冷冻和添加食盐，使氯化铵析出，经过滤、洗涤、干燥而得氯化铵。此时，由食盐所饱和的滤液，可再通入氨和二氧化碳，循环利用。

联合制碱法大大地提高了食盐利用率，避免废液、废渣的产生，也节省了耗能的设备。由于侯德榜对制碱技术做出了重大贡献，人们把他所发明的联合制碱法称为“侯氏制碱法”。

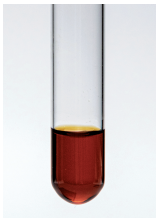


图 5.18　Fe^{3+} 遇 KSCN 溶液显血红色

2. 铁盐和亚铁盐

氯化铁、硫酸铁等含有 Fe^{3+} 的盐溶液遇到硫氰化钾（KSCN）溶液后变成血红色（图 5.18），我们可利用这一性质来检验 Fe^{3+} 的存在。

实验探究

Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 性质的探究

取一支试管加入 2 mL 0.1 mol · L^{-1} $FeCl_3$ 溶液，然后滴入 2 滴 0.1 mol · L^{-1} KSCN 溶液，观察并记录实验现象。向上述试管中加入过量铁粉，充分振荡后静置。再取上层清液，滴入几滴新制氯水，观察和记录实验过程中的现象。

现象记录：_____。

实验结论：_____。

问题：将实验中的铁粉换成铜粉，氯水换成其他氧化剂，能否产生同样效果？通过探究你能总结 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 之间相互转化的规律吗？

Fe^{3+} 具有氧化性，遇到金属铁、铜等时，会被还原为 Fe^{2+}。Fe^{2+} 既有氧化性，又有还原性，通常主要表现为还原性。

Fe^{2+} 遇到强氧化性的物质如氧气、氯水、硝酸等时，会被氧化为 Fe^{3+}。因此，Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 在一定条件下可以相互转化。

$$2Fe^{3+} + Fe = 3Fe^{2+}$$
$$2Fe^{2+} + Cl_2 = 2Fe^{3+} + 2Cl^-$$

想一想

请分析以下操作过程的化学原理：① 实验室配制 $FeSO_4$ 溶液时，常会添加铁粉；② 用 $FeCl_3$ 溶液作蚀刻剂制作简易的印制电路板（印制电路板可由绝缘材料和铜箔复合而成，为板上电子元器件的连接提供支撑体）。

拓展视野

金属和金属氧化物超导材料

1911 年荷兰物理学家昂内斯（Heike Kamerlingh Onnes, 1853—1926）首次发现当温度降到 4.3 K 附近时，汞的电阻突然消失。这就是某些材料在低温下的超导现象，能发生超导现象的物质叫做超导体，超导体由正常态转变为超导态的温度称为这种物质的转变温度。大多数金属元素及数以千计的合金、化合物均可在不同条件下显示出超导性，如钨的转变温度为 0.012 K，铝为 1.196 K 等。

没有电阻的金属具有巨大价值，但由于维持低温的液氦成本太大，从而限制了超导体的应用。科学家一直在探索高温超导体，高温超导体将超越常规材料而拥有广泛用途，如可制作磁体应用于电机、高能粒子加速器、磁悬浮运输，还可制作电缆用于大容量输电、通信等。

20 世纪 80 年代，掀起了以金属氧化物为对象，以寻找高温超导体为目标的研究热潮。1987 年中国科学院物理研究所赵忠贤研究团队和科学家朱经武分别发现 Y–Ba–Cu–O 体系中存在 100 K 和 92 K 的超导体。此后，更高温度的金属氧化物超导材料被陆续发现。

金属和金属氧化物超导现象的探索表明，种类繁多的金属及其化合物中拥有许多奇妙的性质，等待我们进一步去开拓和研究，使之为人类服务。

学习指南

例题导引

问题：

- 某学生在实验室用如图 5.19 所示的装置制备白色的 $Fe(OH)_2$。向装置Ⅰ中投入过量的纯铁粉和稀硫酸，装置Ⅱ中盛有 NaOH 溶液。

（1）该学生会用煮沸过的蒸馏水来配制 NaOH 溶液，为什么？

（2）待装置Ⅰ中的反应结束后，如何操作将会得到白色的 $Fe(OH)_2$ 沉淀？

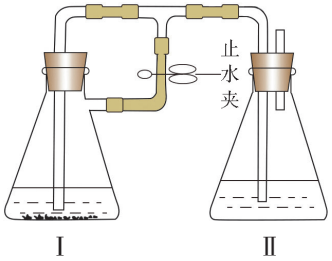


图 5.19

分析：

- （1）$Fe(OH)_2$ 易被空气中的氧气氧化，故制备时主要是避免氧气的介入。用煮沸过的蒸馏水来配制 NaOH 溶液就是避免溶入氧气。

（2）上述实验装置的主要目的是：装置Ⅰ在制备 $FeSO_4$ 的同时，生成的氢气通过带止水夹的导管进入装置Ⅱ，把装置Ⅱ中的空气全部排出。待一段时间后再夹紧止水夹，氢气无法排出致使装置Ⅰ内的压强增大，将反应后的 $FeSO_4$ 溶液通过导管被压入装置Ⅱ，并跟装置Ⅱ中的 NaOH 溶液反应，此时会观察到生成的白色 $Fe(OH)_2$ 沉淀。

练习巩固

1. 室温下金属钠长期露置在空气中，最终将变为（　　）。

（A）Na_2O　　（B）Na_2O_2　　（C）Na_2CO_3　　（D）NaOH

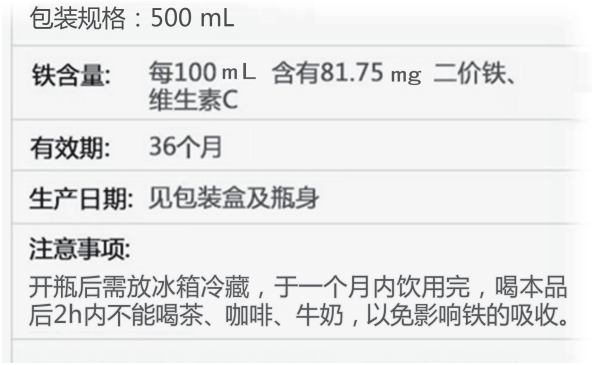
2. 为了检验 $FeCl_2$ 溶液是否被氧化，可向溶液中加入（　　）。

（A）新制氯水　　（B）铁片　　（C）KSCN 溶液　　（D）石蕊试液

3. 整理 Na_2CO_3 和 $NaHCO_3$ 的性质和用途，补全表格的内容。

名称（俗名）	碳酸钠（俗名：_____）	碳酸氢钠（俗名：_____）
物理性质		
化学性质		
用途		

4. 铁元素是人体必不可少的元素之一，若人体内铁的含量不能满足正常红细胞生成的需要而发生的贫血称为缺铁性贫血。下图为某品牌补血剂的说明书。阅读说明书并查阅相关资料，回答下列问题。


包装规格：500 mL

铁含量:	每100 mL 含有81.75 mg 二价铁、维生素C
有效期:	36个月
生产日期:	见包装盒及瓶身

注意事项:
开瓶后需放冰箱冷藏，于一个月内饮用完，喝本品后2h内不能喝茶、咖啡、牛奶，以免影响铁的吸收。

（第 4 题）

（1）铁元素在人体中存在的形式与作用是什么？

（2）补血剂成分中含有维生素 C 的理由。

（3）补血剂说明书中注明：“喝本品后 2 h 内不能喝茶、咖啡、牛奶，以免影响铁的吸收。”为何服用补血剂后立即饮茶会影响铁的吸收？根据 Fe^{2+} 的性质，请写出你的猜想，并设计实验来证明。

5.3 化学变化中的能量变化

学习聚焦

- 知道吸热反应和放热反应
- 了解化学反应体系能量改变与化学键的断裂和形成有关
- 知道化学反应可以实现化学能与其他形式能量的转化
- 知道化学能可以转化为电能
- 认识原电池的组成和工作原理

知识回放

- 燃烧反应
- 碳酸钙的分解反应
- 化学键
- 氧化还原反应

人类利用化学反应不仅可以创造新物质，还可以获取能量或实现不同形式能量之间的转化。用柴木可以生火取暖和照明，在这个过程中化学能转化成了热能、光能等。利用电池的化学反应可获取驱动汽车的电能，在该过程中实现了化学能与电能的相互转化。在本节中，我们将学习物质在发生化学变化的过程中能量是如何变化的。

吸热反应和放热反应

物质内部都储存着能量。化学能是在化学反应中表现出来的，与化学键等有关的能量。化学反应中的能量变化主要有热能、电能、光能等多种形式，一般人类利用较多的是反应产生的热能和电能。

实验探究 铝热反应

用硬纸片折成漏斗状，侧面用钉书钉钉上，底部剪一小孔，内放一用滤纸折成的漏斗，用少量水湿润使滤纸紧贴住硬纸片。将 5 g 氧化铁粉末和 2 g 铝粉混合均匀后，放在纸漏斗中。如图 5.20 所示，把纸漏斗架在铁圈上，将整套装置放置在一个盛砂的铁盘上。在固体混合物上平铺少量氯酸钾固体，混合物中间插上一根打磨过的镁条，用点火枪点燃镁条。



图 5.20　铝热反应

现象记录：_____。

实验结论：_____。

问题：查阅相关资料了解铝热反应有何实际应用。

化学中把有热量放出的化学反应叫做放热反应，把吸收热量的化学反应叫做吸热反应。

铁与盐酸的反应是放热反应，氢氧化钠与盐酸的中和反应也是放热反应，氢气、木炭、甲烷等在氧气中的燃烧反应都是放热反应。碳酸钙的分解是吸热反应，灼热的炭与二氧化碳的反应也是吸热反应。

$$CH_4 + 2O_2 \xlongequal{\text{点燃}} CO_2 + 2H_2O$$

$$CaCO_3 \xlongequal{\triangle} CaO + CO_2\uparrow$$

为什么有的化学反应会释放热量，而有的化学反应却需要吸收热量呢？这是由于物质在发生化学反应时，反应物中的化学键发生断裂，需要吸收能量；而生成物中新的化学键生成时，会放出能量。若化学键断裂需要吸收的总能量小于化学键生成时释放出的总能量，那么该化学反应就是放热反应，化学能转化为热能等释放出来。反之是吸热反应，热能会转化成化学能储存起来。

我们还可以从反应物总能量和生成物总能量的相对大小，来看化学反应是释放热量还是吸收热量。若反应物的总能量高于生成物的总能量，发生反应时会向周围环境释放能量；若反应物的总能量低于生成物的总能量，发生反应时需要从周围环境吸收能量（图 5.21）。

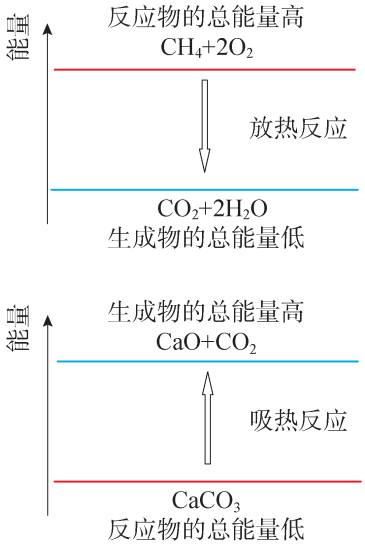


图 5.21 化学反应中的能量变化示意图

化石燃料在燃烧时为人类生产、生活提供了大量的热能。燃料燃烧效率的提高与热能的充分利用是提高燃料利用率的重要途径。化石燃料为不可再生资源，因此，世界各国科学家不断努力寻找化石燃料的可替代能源，开发新型的清洁能源。

化学能与电能的转化

化学能可以转化为热能，还可以转化为电能等其他形式的能量。我们把化学能转化为电能的装置，称为化学电源，习惯上叫做电池。电池大体上可分为原电池、蓄电池和燃料电池等。

在学习原电池的相关原理之前，让我们先来探究一个实验。

实验探究

铜-锌原电池

1. 把一块铜片和锌片并排插入盛有稀硫酸的容器里，观察实验现象。

2. 把铜片、锌片分别用导线连接，并接入灵敏电流计（图 5.22），观察和记录实验现象。

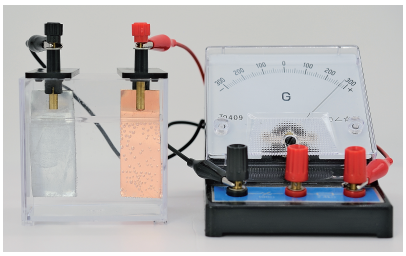


图 5.22　原电池实验装置

编号	现象记录	实验结论
1		
2		

问题：实验 2 中灵敏电流计的指针为何会发生偏转？

这是一个有趣的实验，我们知道铜与稀硫酸是不会发生化学反应的，但当用导线将铜片和锌片连接在一起，并同时插入稀硫酸中时，铜片的表面会出现气泡，接入导线中的灵敏电流计的指针发生了偏转。这说明在导线中有电流流过，该装置已构成一个原电池。

这是因为，浸在稀硫酸里的铜片和锌片用导线连接后，由于锌比铜活泼，容易失去电子，锌被氧化为 Zn^{2+} 而进入溶液，金属锌表面的电子通过导线流向铜片，溶液中的 H^+ 从铜片上获得电子，被还原为氢原子，进而结合成氢分子从铜片上放出。电子的定向流动产生了电流，使电流计的指针发生了偏转。这一过程的总反应可表示为：

$$Zn + 2H^+ = Zn^{2+} + H_2\uparrow$$

在原电池中，电子流出的电极是负极，如上述原电池中的锌片，电极材料失去电子被氧化，发生氧化反应；电子流入的电极是正极，如铜片，H^+ 在电极上得到电子，发生还原反应。人们就是利用原电池的原理制作了多种电池。

想一想

分析原电池主要由哪几部分组成，每一部分在电池反应中各起什么作用？

资料库

铜–锌原电池的电极反应式

锌片为负极，发生氧化反应：

$$Zn - 2e^- = Zn^{2+}$$

铜片为正极，发生还原反应：

$$2H^+ + 2e^- = H_2$$

化学史话

电池的发明

1780 年，意大利解剖学家伽伐尼（Luigi Galvani, 1737—1798）在进行青蛙解剖实验时，将已解剖的青蛙放在潮湿的铁盘中，当解剖刀无意中触及蛙腿上外露的神经时，蛙腿有抽搐的现象。伽伐尼重复进行这个实验，又观察到相同的现象。他认为这是动物体内存在着某种“动物电”。1791 年，他发表了《关于电对肌肉运动的作用》的论文。

1800 年，意大利物理学家伏打（Alessandro Volta, 1745—1827）受到伽伐尼实验的启发，他的注意点主要集中在金属的解剖刀和铁盘上，他认为这可能与电有关。通过反复试验，他在锌板和铜板之间隔以用盐酸或盐水浸过的硬纸、麻布等材料，并用导线连接两种金属板，发现有电流通过。于是，世界上第一个可提供持续、稳定电流的实用化学电池——伏打电池诞生了。

伏打电池说明了电并不是从蛙的组织中产生的，蛙腿只不过相当于一个非常灵敏的电流计而已。为了纪念伏打在电学上的成就，人们以他的姓氏将电位、电位差和电动势的单位命名为伏特（V）。

原电池又称一次电池，是指放电之后不可再充电的化学电池。日常使用的锌锰干电池、锌银纽扣电池等都属于一次电池。

蓄电池又称二次电池，是指放电之后可再充电反复使用的化学电池。如作为机动车电源的铅酸蓄电池、广泛使用的锂离子电池（图 5.23）等都属于二次电池。



图 5.23　锂离子电池

燃料电池是将氢气、甲醇等燃料的化学能直接转化成

电能的化学电池。其燃料可以从外部供给，从而可长期不间断地工作，大大提高了燃料的利用率。例如，氢燃料电池、甲醇燃料电池等就是一些高效、环境友好的燃料电池。

原电池是把化学能转变为电能的装置。反之，将电能转变为化学能的装置就是电解池。在第 2 章中，我们学过的通直流电来电解饱和食盐水的装置，就属于电解池。

链接学科

能源化学

能源化学是化学分支领域，为人类实现科学利用能源和可持续发展提供保障。它涵盖了化石燃料的综合利用、新能源及可再生资源的开发与利用等领域，利用化学化工理论、技术解决能源的转化、储存、传输和利用等问题。能源化学的有些研究领域是研究化学转化反应的，如电催化二氧化碳还原制造燃料等；有些则是研究与能源转化相关的，如煤、石油、天然气的综合利用中高效催化剂的研制，锂离子电池、燃料电池和太阳能电池中新材料的研发等。

开发新能源、优化能源结构是解决能源危机的重要途径。氢能、风能、核能、太阳能、生物质能是一些洁净、高效的新能源，其中氢能、生物质能可通过化学反应直接利用，而太阳能、核能需要开发特殊的光电、核反应材料，因此新能源的开发和利用都离不开化学学科。



图 5.24　利用风能和太阳能发电

学习指南

例题导引

问题：

• 某学生设计了如图 5.25 所示的实验装置，回答下列问题：

（1）上述装置若连通后，你能观察到哪些现象？写出所发生反应的离子方程式。

（2）若将醋（成分中含有乙酸 CH_3COOH）换成乙醇，是否还能获得电流？

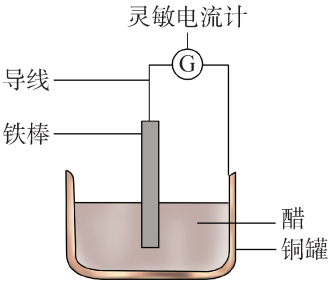


图 5.25

分析：

•（1）构成工作状态的原电池需要包括正极和负极在内的电极材料、电极反应、离子导体和电子导体等要素。上述装置符合这些条件可构成原电池，铁棒是负极，铁原子失去电子变为 Fe^{2+}；铜罐上发生还原反应，乙酸电离出的 H^+ 在电极上被还原成 H_2。因此，装置连通后，可观察到铁棒逐渐溶解，此外铜罐上也有气泡逸出，灵敏电流计的指针发生偏转等现象。

（2）醋的成分中有乙酸，乙酸是一种弱电解质，在离子方程式中仍以分子式表示，故反应的离子方程式为：

$$Fe + 2CH_3COOH = Fe^{2+} + 2CH_3COO^- + H_2\uparrow$$

而乙醇属于非电解质，无法导电，不能使包括溶液在内的各部分构成通路。因此若要从上述装置中获得电流，不能将醋换成乙醇。

练习巩固

1. 如图所示，下列有关柠檬水果电池的正确叙述是（　　）。

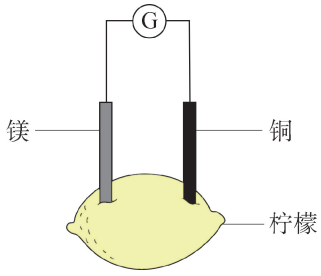
① 化学能转化为电能

② 电子由铜经外电路流向镁

③ 柠檬含有可作为电解质的酸

（A）①②　　（B）①③

（C）②③　　（D）①②③



（第 1 题）

2. 运用相关知识，揭示下列物质变化中的能量变化。

（1）冰，水为之，而寒于水：_____。

（2）蜡炬成灰：_____。

（3）千锤万凿出深山，烈火焚烧若等闲：_____。

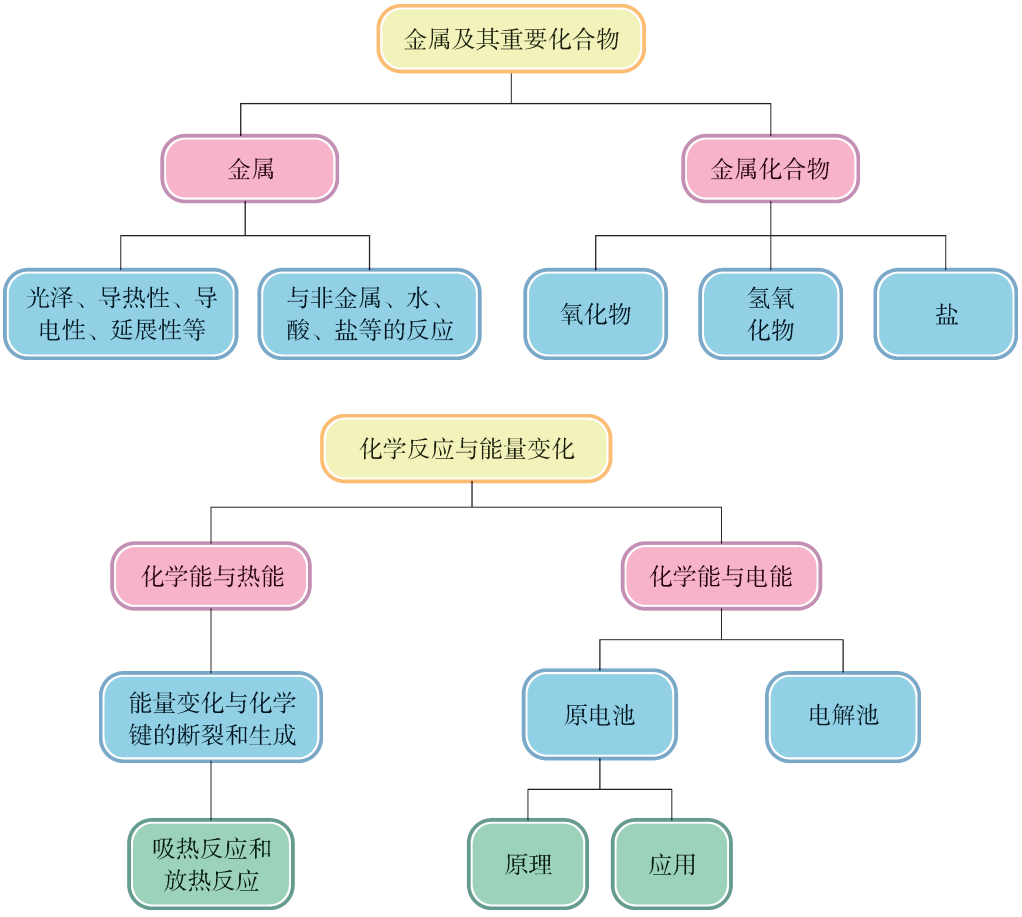
3. 列举常见的吸热反应和放热反应，并说出日常生活中应用放热反应和吸热反应的实例。

本章复习

素养提升

- 借助实验理解金属的主要性质及其变化，能对实验现象做出合理的解释，运用化学符号描述金属及其化合物的化学变化。
- 能根据钠、铁为代表的金属及其化合物的化学性质，理解同类物质的组成、结构、性质和变化，知道还原性是金属主要的化学性质；结合真实情境中的应用实例，认识金属及其化合物在促进社会文明、自然资源综合利用中的重要作用。
- 能理解化学变化中会伴随能量转化，能量转化跟化学键的断裂和生成之间的关系，会用图示等化学语言来表示吸热反应和放热反应；认识原电池、电解池可以实现化学能与电能之间的相互转化。
- 能理解化学、技术、社会和环境之间的相互关系，了解燃料电池等新能源的开发对实现简约适度、绿色低碳的生活方式的影响。

核心框图



练习巩固

1. 将铁片放入下列四种溶液中，铁片溶解且溶液质量增加的是（　　）。

（A）硫酸铜　　（B）氯化钠　　（C）氢氧化钠　　（D）硫酸铁

2. 下列各组中的两种物质反应时，若温度、反应物用量等反应条件改变，不会引起生成物种类改变的是（　　）。

（A）Na 和 O_2　　（B）NaOH 和 CO_2　　（C）Na_2O_2 和 CO_2　　（D）C 和 O_2

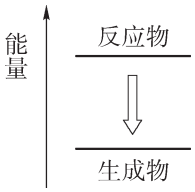
3. 下列化学反应中的能量变化与图中所示不符合的是（　　）。

（A）铝热反应

（B）生石灰与水反应

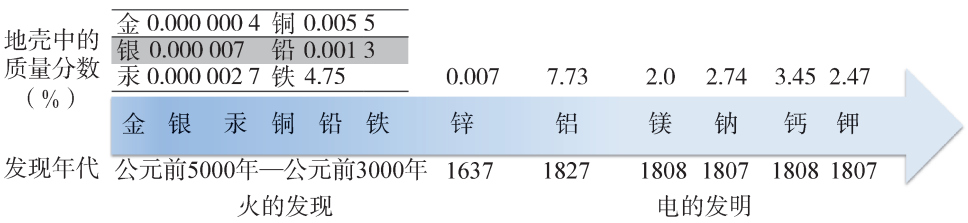
（C）铁粉与硫粉加热反应

（D）碳酸氢钠受热分解



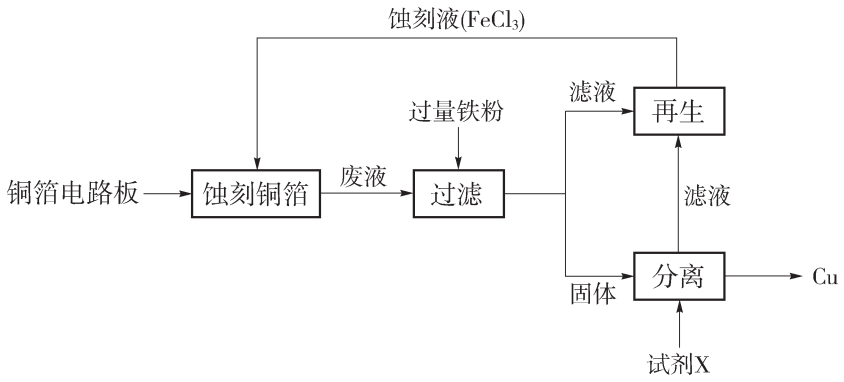
（第 3 题）

4. 下图是部分金属发现年代与其在地壳中的质量分数，指出有哪些因素影响了金属发现的时间。



（第 4 题）

5. $FeCl_3$ 溶液在工业上用于蚀刻铜箔电路板。从蚀刻后的废液中可回收铜并使蚀刻液再生，流程如图所示（省略部分物质）：



（第 5 题）

回答下列问题。

（1）写出 $FeCl_3$ 蚀刻铜箔的反应的离子方程式。

（2）从固体中分离出铜，试剂 X 是什么物质？

（3）若要使滤液再生为蚀刻液，可采用什么办法？

*6. 阅读短文，思考下列问题。

Invar, invented by Ch. Ed. Guillaume in 1896, has a small coefficient of thermal expansion, about 1.2×10^{-6}. Since then, no better invar has been obtained. I have, for the last six years, been engaging in the investigation of alloys having a small coefficient of expansion and obtained in June, 1929, an alloy containing about 63.5 percent iron, 31.5 percent nickel and 0.5 percent cobalt, which has a smaller coefficient of expansion than that of fused silica.

Several explanations of the small expansibility of invar have been proposed, but none can be considered to be satisfactory I also tried to explain this phenomenon and developed a new theory by which the small expansibility of invar can be satisfactorily explained from magnetic data. Following up this theory, I began to investigate the thermal expansion of the ternary alloys of iron-cobalt-chromium and found that an addition of a small quantity of chromium to iron-cobalt alloys containing more than 50 percent cobalt considerably reduces their expansibility. In July, 1931, I obtained an alloy having a much smaller coefficient of expansion than that of fused silica. For example, the coefficient of linear expansion at ordinary temperature of an alloy containing about 36.5 percent iron, 54.5 percent cobalt and 9 percent chromium is less than 10^{-7} in the annealed state, and that of another alloy having a very similar composition to the above has even a negative coefficient amounting to -1.2×10^{-6}. These alloys are so resistant to corrosion that polished surfaces can be left for several months in a moist atmosphere, water, sea water, etc., without showing any rust spots; they have been called “stainless-invar”.

（短文取自：Kôtarô Honda. A New Alloy, ‘Stainless-Invar’ [J]. Nature, 1933, 131: 587.）

（1）Do you know the use of invar alloy in daily life and industrial production?

（2）Why do alloys have some superior properties over pure metals?

体验 · 分享

在下列选题中，开展文献、调查、实验等研究，并将成果和体会制作成海报、演示文稿，进行分享和交流。

- 3D 打印是一种正在快速发展的先进制造技术。通过 3D 打印防风衣架等创新课题的产品设计和实践活动，了解三维建模、材料强度等知识，并体验工业产品的制作流程，感受 3D 打印技术的应用和发展，提升工程学的素养和能力。
- 银是一种银白色金属，但银器（图 5.26）用久了其表面就会发暗甚至变黑。运用氧化还原反应知识，解释银器失色的主要原因，以及银器保养的方法等，写成小论文并与班级同学分享。



图 5.26 明代银执壶（上海市闵行区朱行乡朱恩家族墓出土）

- 根据目前金属的消耗速度，一些金属资源面临枯竭。请以冶金工程师、金属回收人员、经济学者、环保组织发言人、居委会工作人员等角色开展角色扮演活动，结合“垃圾分类”措施，以“保护和回收金属资源”为主题进行辩论，并可用书面报告的形式呈现讨论结果。
- 你知道打印机墨盒中墨粉的成分是什么吗？墨粉的主要成分是一种铁的化合物，请利用废弃墨盒中残留的墨粉，设计实验方案，探究墨粉的主要成分。
- 尝试用以下物品制作几种原电池，测试电池效果并说明其工作原理。（可选用的物品有：食盐水、醋、金属汤匙、铜导线、发光二极管、铜片、铁片、橘子、西红柿等）
- 走访附近钢铁厂，认识现代钢铁的冶炼技术；结合多学科知识，分析铁矿石、焦炭、锰矿等资源的分布与钢铁生产的关系；关注和分析我国钢铁年产量的前景趋势。
- 废电池会给环境带来诸多影响。废电池中其实蕴藏了许多可以回收利用的资源，如金属资源等。请了解包括我国在内的世界各国对于废电池的回收和利用的现状与措施。

项目学习活动

如何测定菠菜中铁元素的含量

人类可以从食物中获得各种营养元素，比如从牛奶中获得钙元素，从菠菜、黑木耳中获得铁元素，从各类蔬果中获得维生素等。分析食品中各种元素的含量是化学工作者、食品检测人员的工作之一。食品中某些元素含量的分析从化学角度看属于微量分析，用一般化学分析方法比较困难，多用仪器分析，其中用分光光度法分析较常见。本项目活动尝试利用分光光度法测量菠菜中铁元素的含量。

➢ 活动目标

（1）了解分光光度法等分析方法的简单原理。

（2）学会使用移液管、分光光度计等仪器。

（3）知道标准曲线在定量分析中的简单应用。

（4）知道实验误差的形成和实验相对偏差的计算。

➢ 活动指导

（1）分光光度法基本原理

日常生活中我们会遇到许多有色的物质，例如高锰酸钾溶液是紫色的，这是因为它从日光中吸收了紫色光的互补色——黄绿色光，而使紫色光透过，溶液的浓度越大，紫色就越深。分光光度法就是利用物质对光的选择性吸收而进行分析的一种方法。

不同的物质，对某些波长的光有选择性吸收。利用某特定波长下测量该物质对光吸收的程度（用吸光度 A 表示）与物质浓度之间的关系，就可以进行定量分析。

在可见光的吸光度测量中，如果被测物质的溶液是有色的，就可以直接测试；如果被测物质本身无色，则需要用显色剂与被测物质反应生成有色物质后再测试。

（2）用分光光度法进行定量分析的步骤

① 确定被测物质的特征吸收波长。将被测物质的有色溶液在分光光度计上全波长扫描，常用吸光度最大的波长作为定量分析的入射波长。

② 绘制标准曲线。配制一系列已知浓度的标准溶液，测得它们在特定波长下的吸光度，绘制 $A-c$ 的关系曲线，也称工作曲线。

③ 测定试样的吸光度，并在标准曲线上找到与之相应的溶液浓度，或通过标准曲线的拟合方程计算，即可知道试样中该物质的含量。

（3）铁含量标准曲线的绘制

测定水溶液中微量的 Fe^{2+} 离子时，可以用邻二氮菲（1,10-菲啰啉，也称邻菲啰

啉）作为显色剂。邻二氮菲与 Fe^{2+} 生成稳定的橙红色的物质，即一种配位化合物，在 490 ～ 510 nm 区间有特征吸收峰。

① 标准系列溶液的配制。称取硫酸铁铵 [$NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$] 固体 8.634 g 置于烧杯中，加入 20 mL 6 mol · L^{-1} 盐酸，再加入少量蒸馏水溶解，转移至 1 L 容量瓶中定容至刻度。用移液管移取此溶液 10 mL，转移至 500 mL 容量瓶中并用蒸馏水稀释、定容得到浓度为 20 mg · L^{-1} 的铁标准溶液。

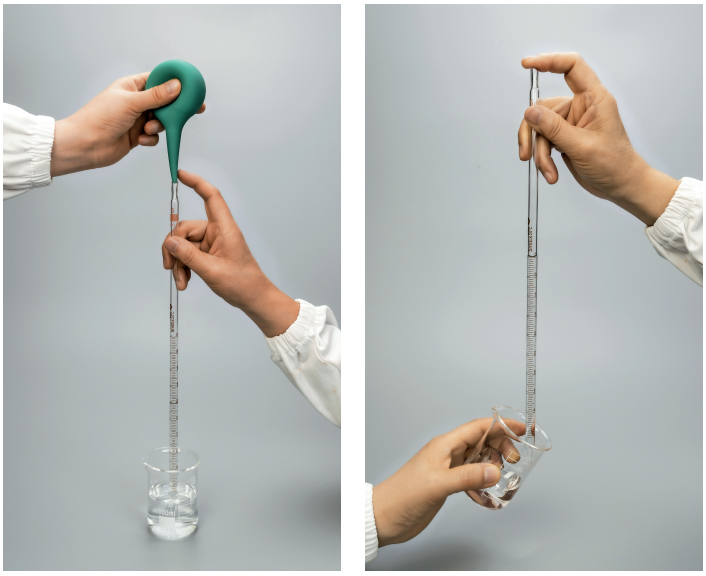


图 5.27　吸取液体

取 6 只 50 mL 容量瓶，分别移取 20 mg · L^{-1} 铁标准溶液 0 mL、1.00 mL、2.00 mL、3.00 mL、4.00 mL、5.00 mL，然后各加入 10% 盐酸羟胺溶液 1 mL、0.15% 邻二氮菲溶液 2 mL 和 1 mol · L^{-1} 醋酸钠溶液 5 mL，再各用蒸馏水定容至刻度，摇匀即得到一系列铁的有色配合物标准溶液（图 5.28）。



图 5.28　铁的有色配合物标准溶液

② 测定铁有色配合物溶液的可见光谱。取少量溶液润洗比色皿 2 ～ 3 次后，注入样品至比色皿约$\frac{2}{3}$容积，用分光光度传感器进行全光谱测定，找到最大的吸收波长。

实验可知，用邻二氮菲显色进行微量铁含量分析，适宜吸收波长在 490 ～ 510 nm 间。

③ 标准曲线的绘制。用分光光度传感器或可见分光光度计，设置吸收波长并进行实验。在最大吸收波长处，用空白溶液作参比，从低浓度到高浓度，依次测定 6 个标准溶液

的吸光度。以亚铁离子浓度为横坐标、以吸光度为纵坐标，并进行线性拟合得到标准曲线。图 5.31 就是用 505.3 nm 波长测定并绘制的标准曲线。



图 5.29　可见分光光度计



图 5.30　用分光光度传感器绘制吸收曲线

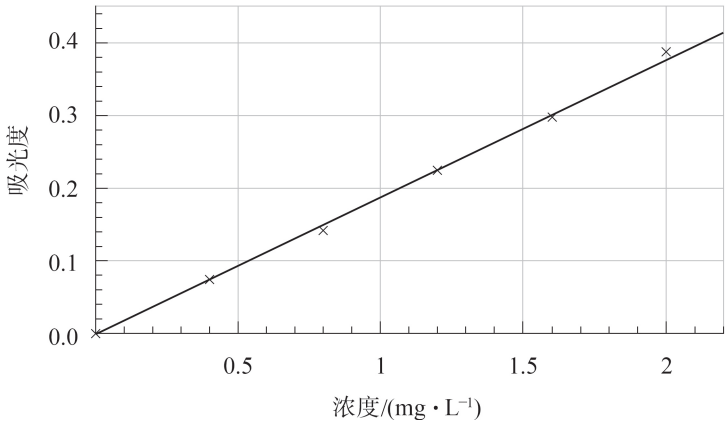


图 5.31　Fe^{2+} 的标准曲线

④ 处理菠菜样品，进行多次实验测定，并将每次实验的数据记录在下表中，并进行处理。

实验次数	菠菜质量 / g	待测液吸光度	待测液浓度 / (μg · L^{-1})	菠菜中铁元素含量 / [mg · (100 g)$^{-1}$]
1				
2				
3				

➢ 活动要求

完成你的项目并形成一份项目报告。在报告中介绍你是怎样处理菠菜样品及配制溶液的，详细描述你的操作步骤，记录并分析你的数据，比对你的数据与查得数据的偏差并分析原因。

➢ 活动反思

（1）分光光度法对配制标准溶液的浓度有什么要求？为什么？

（2）硫酸铜溶液是蓝色溶液，你能否运用分光光度法测定硫酸铜结晶水含量，并与其他项目学习活动进行比较？

（3）黑木耳、红枣等食品中也含有铁元素，你能否测定这些食品中铁元素的含量，并完成一份检测分析报告？

在项目活动后，请你汇总全班甚至年级学生的实验数据，建立能分享和查询的实验数据资源库。你可以对这些数据进行分析，从数据的分布中你能发现什么？

第6章

化学反应速率和化学平衡



入秋后，叶绿素合成的速率趋缓，并逐渐被破坏，而叶黄素等色素使树叶泛出金黄色。摄于上海市康平路。

6.1 化学反应速率

6.2 化学平衡

6.3 化工生产

化学反应往往需要在一定条件下进行。例如，工业合成氨就要在高温、高压、有催化剂存在的条件下进行。为什么需要这样的反应条件呢？至少可以从以下两个方面来认识：一是化学反应进行的快慢，即化学反应速率问题；二是化学反应进行的程度，也就是化学平衡问题。

上述两个视角是我们深入理解化学反应规律的基础。在本章中，我们将学习化学反应速率和化学平衡的相关知识，了解影响化学反应速率和化学平衡的主要因素，以及如何对化学反应进行综合调控，进一步认识化学反应原理对化工生产适宜条件选择的指导意义。



6.1 化学反应速率

我们知道各种化学反应进行得有快有慢。例如，酸碱中和反应瞬时就能完成，钢铁制品的生锈则是缓慢发生的，而石油更是需要历经上亿年才能形成。通过调控化学反应的快慢，可以减缓食物的腐败，可以提高化学工业的生产效率。因此，认识化学反应快慢的规律及影响因素，可以更好地满足工农业生产和日常生活的实际需要。

学习聚焦

- 认识化学反应的快慢
- 知道化学反应平均速率的表示方法
- 认识影响化学反应速率的因素

知识回放

- 速率
- 催化剂

化学反应速率

化学反应的“快”和“慢”是相对而言的，如何衡量化学反应进行的快慢？如何对化学反应的快慢做调控？在化学研究中，我们需要用一种定量的方法来描述化学反应的“快”和“慢”。下面，让我们从大理石与盐酸反应的快慢开始探究！

实验探究

大理石与盐酸反应的速率

（1）取一干燥的锥形瓶和棉花置于电子天平上称重，然后天平清零。

（2）量取适量的 1.0 mol · L^{-1} 稀盐酸置于锥形瓶中，读数记为 m_1（精确到 0.001 g）。

（3）将质量为 m_2 的块状大理石加入锥形瓶，瓶口塞上棉花，反应混合物总质量记为 $m_{总}$。

（4）从固液混合后开始计时，每隔 10 s 记录反应混合物的总质量，直至反应结束，将数据记录在下表中。

质量 /g	时间 /s						
	0	10	20	30	40	……	反应结束
$m_{总}$							

（5）请在坐标中画出反应混合物质量 $m_{总}$ 随着时间变化的图像。

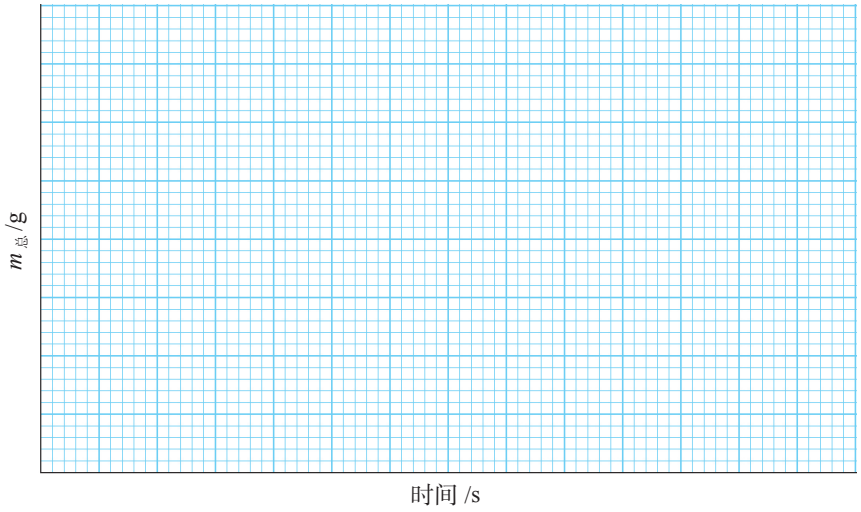


图 6.1　大理石与盐酸反应混合物质量随时间的变化

问题：在本实验中，你如何描述该化学反应的快慢？选用粉状大理石会对反应快慢产生怎样的影响？

化学中用化学反应速率来描述和表示反应的快慢。化学反应开始后，各种反应物的量不断地减少，生成物的量不断地增加，我们常用单位时间内反应物浓度的减少或生成物浓度的增加（均取正值）来定量地表示化学反应速率，其一般表达式为：

$$\upsilon = \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中：υ 表示化学反应速率，Δt 表示时间变化，Δc 表示在 Δt 这段时间某一反应物或生成物的物质的量浓度变化。浓度的单位一般用 mol · L^{-1}，时间的单位可选择 s、min 等。因此化学反应速率的单位通常是 mol · L^{-1} · s^{-1} 或 mol · L^{-1} · min^{-1} 等。式中 υ 表示 Δt 这段时间内化学反应的平均速率。

书写表达

反应 A + 2B ═══ 3C + 2D 在溶液中进行，反应物 A 的起始浓度是 1.0 mol · L^{-1}，经过 1 min 后，A 的浓度变成了 0.8 mol · L^{-1}，则在这 1 min 内 υ(A) 是多少？υ(A) 可以代表该化学反应全程的速率吗？

影响化学反应速率的因素

化学反应速率跟许多因素有关。如图 6.2 所示，在相同条件下，同时将锌片和铜片分别插入相同浓度的硝酸银溶液中，经过一段相同的时间后观察到：锌与硝酸银反应产生的银比铜与硝酸银反应产生的银更多，说明这两个化学反应的速率不同，表明化学反应速率与反应物自身的性质有关。

除此之外，相同的反应在不同的条件下也会有不同的反应速率，说明外界条件对化学反应速率会产生一定的影响。下面通过实验来探究影响化学反应速率的外界因素。

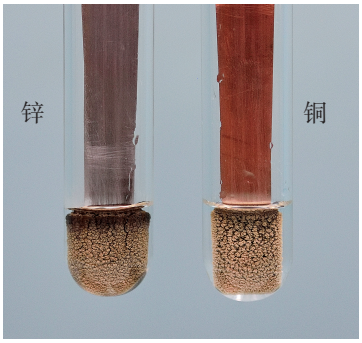


图 6.2　锌、铜分别与硝酸银溶液反应

实验探究

影响化学反应速率的因素

1. 浓度对化学反应速率的影响

取两支 Y 形试管，各在一侧支管中分别放入 1 根长约 2 cm 去除了氧化膜的镁带，然后在另一侧支管中分别加入 4 mL 0.1 mol · L^{-1}、4 mL 0.5 mol · L^{-1} 的盐酸，连上压强传感器，如图 6.3 所示。点击采集按钮后，将两支 Y 形试管同时倾斜，使盐酸接触镁带并使试管浸在水浴中，观察显示器上采集到的压强数据的变化。

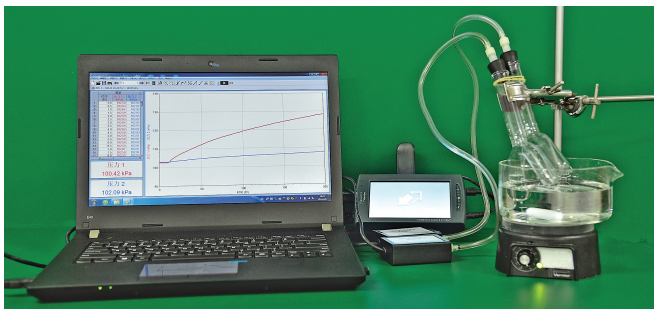


图 6.3　不同浓度盐酸与镁反应的实验装置

2. 温度对化学反应速率的影响

分别量取 30 mL 0.1 mol · L^{-1} $Na_2S_2O_3$ 溶液加入两支大试管，将一支浸入热水浴中，另一支浸入冰水浴中。再分别量取 15 mL 0.1 mol · L^{-1} 盐酸加入另外两支大试管，将两支大试管分别放入上述两个水浴中，如图 6.4（a）所示。静置达到水浴温度。

取两只烧杯，在杯侧面贴上写有“X”的纸，分别将上述同一温度下的两支试管中的溶液倒入烧杯并开始计时，直到杯侧面“X”看不清时，如图 6.4（b）所示。停止计时，记录时间。反应的化学方程式是：

$$Na_2S_2O_3 + 2HCl = S\downarrow + SO_2\uparrow + 2NaCl + H_2O$$



（a）混合前　　（b）混合后

图 6.4　不同温度下硫代硫酸钠与盐酸的反应

3. 催化剂对化学反应速率的影响

在两支试管中分别加入 3 mL 3% 的 H_2O_2 溶液，向其中一支试管加入少量固体二氧化锰，观察两支试管中产生氧气的情况。

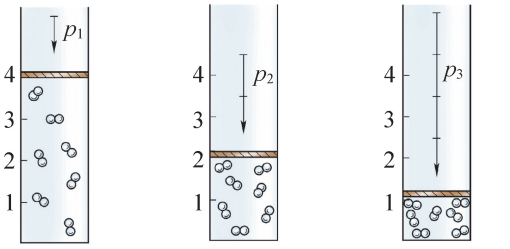
将上述实验现象和实验结论填入下表中。

影响化学反应速率的因素	现象记录	实验结论
浓度		
温度		
催化剂		

问题：上述实验是如何进行变量控制的？是如何反映速率大小的？如果要定量测定上述化学反应速率，你会怎样设计或改进实验？

想一想

对于有气态物质参加的反应，压强对反应速率有何影响？参考图 6.5 并联系浓度对反应速率的影响进行预测和解释。



（a）p_1　（b）$p_2=2p_1$　（c）$p_3=4p_1$

图 6.5　压强对气体浓度影响示意图

拓展视野

新型甲烷转化催化剂

天然气是一种重要的化石能源，随着探明储量和开采量的不断提升，天然气已成为极具经济价值的自然资源之一。如果能对天然气进行直接的化学转化，那么不仅可以实现天然气的高附加值利用，而且还能避免天然气运输带来的高额费用等问题。然而，对天然气进行直接转化并非易事。天然气中的主要成分是甲烷，而甲烷性质稳定很难被转化。科学家发现了成本低廉、转化高效的催化剂组合——铁硅催化剂，将甲烷转化成乙烯和芳香化合物。这一催化剂的开发和研制，为人类充分利用甲烷提供了解决方案，在医药、农业化学品和精细化工等行业中具有广泛应用前景。

对上述探究结论进行整理，归纳和总结外界因素对化学反应速率的影响，完成下表。

反应条件改变		反应速率的变化（在□内画“√”）
颗粒大小	反应物（固体）颗粒变大	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
	反应物（固体）颗粒变小	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
浓度	增大反应物浓度	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
	减小反应物浓度	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
温度	升高温度	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
	降低温度	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
压强（有气态物质参与的反应）	增大压强	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
	减小压强	□ 增大 □ 减小 □ 不影响
催化剂		□ 增大 □ 减小 □ 不影响

总之，反应物颗粒大小、浓度、温度、催化剂、压强等外界因素都可能对化学反应速率产生影响。现在，你能列举出调控大理石与盐酸反应速率的方法了吗？

想一想

还有一些条件也会影响化学反应速率，如光、超声波、激光、放射线、扩散速率和溶剂等。你能从学过的化学知识或相关资料中举出例子来吗？针对图 6.6 的实例，说明人们通常会如何调控相关反应速率。



硝酸银避光保存


食物腐败


岸边索链生锈

图 6.6　外界条件对化学反应速率的影响

链接学科

飞秒化学和超快化学反应动力学

在宏观层面上，化学反应速率表现得有快有慢。在微观层面上，反应中化学键的断裂与形成总是很快的，其时间大约在皮秒（ps, 1 ps=10^{-12} s）至飞秒（fs, 1 fs=10^{-15} s）量级。观察和研究如此快速的反应过程中分子内部状态和结构的变化，需要使用比化学键断裂、分子内部振动等更快速的探测工具。这些正是飞秒化学和超快化学反应动力学的基本研究内容。

光的传播速度是 3×10^{8} m·s^{-1}，在 1 fs 时间里，光只能走 0.3 μm。美国、埃及双重国籍物理化学家泽韦尔（Ahmed Zewail, 1946—2016）利用光程差来达到飞秒级的时间分辨，他用飞秒激光泵探测技术，观测了氰化碘的光分解反应。这是人们通过实验首次观察到了基元反应过程，大大推进了人类对化学反应微观过程的认识，泽韦尔也因此荣获了 1999 年诺贝尔化学奖。

学习指南

例题导引

问题：

- 在一定条件下，用 N_2、H_2 等原料来合成氨，测得不同时刻各物质的浓度见下表。

参加反应的物质	N_2	H_2	NH_3
起始浓度 /(mol · L^{-1})	1.00	1.00	0.00
5 min 时浓度 /(mol · L^{-1})	0.95	0.85	0.10

根据表中数据，算出：$v(N_2)=-\dfrac{(0.95-1.00)\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}}{5\ \text{min}}=0.01\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$

请根据 $v(N_2)$ 的计算示例，完成下列问题。

（1）计算 $v(H_2)$ 和 $v(NH_3)$ 的值。

（2）$v(N_2)$、$v(H_2)$ 和 $v(NH_3)$ 的数值是否相等？它们的比值等于多少？此比值与化学方程式中各物质的化学计量数之比有什么关系？

（3）若要加快该反应的速率，可以采取哪些措施？

分析：

- （1）根据化学反应平均速率的一般表达式 $v=\dfrac{\Delta c}{\Delta t}$，进行计算：

$$v(H_2)=-\frac{(0.85-1.00)\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}}{5\ \text{min}}=0.03\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$$

$$v(NH_3)=\frac{(0.10-0.00)\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}}{5\ \text{min}}=0.02\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$$

（2）$v(N_2)$、$v(H_2)$ 和 $v(NH_3)$ 的数值虽不相等，但 $v(N_2):v(H_2):v(NH_3)=1:3:2$，其比值等于化学方程式中各物质的化学计量数之比。

（3）这是一个有气态物质参与的反应，影响该反应速率的因素有浓度、温度、压强和催化剂等。增大反应物 N_2、H_2 的浓度，升高温度、增大压强或使用合适的催化剂，都能加快该反应的速率。

练习巩固

1. 决定化学反应速率的内在因素是（　　）。

（A）温度和压强　　（B）反应物浓度

（C）反应物自身的性质　　（D）催化剂

2. 下列过程中，需要加快反应速率的是（　　）。

（A）钢铁腐蚀　　（B）食物腐败

（C）炼钢　　（D）塑料老化

3. 对于反应：$CaCO_3 + 2HCl \xlongequal{} CaCl_2 + CO_2\uparrow + H_2O$，下列能用来衡量该化学反应快慢的物理量是（　　）。

① 单位时间内碳酸钙的质量变化值

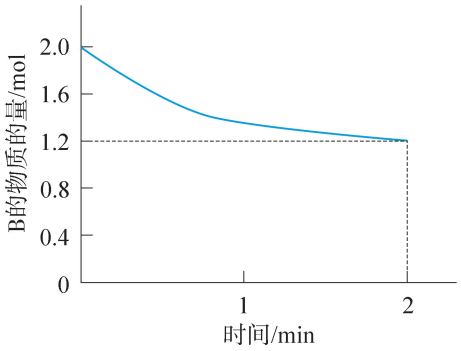
② 单位时间内产生二氧化碳体积的变化值

③ 单位时间内溶液 pH 的变化值

（A）只有①②　　（B）只有①③

（C）只有②③　　（D）①②③

4. 在 10 L 容器中进行反应：$A(g) + B(g) \xlongequal{} 3C(g)$。B 的物质的量变化如图所示，则 2 min 内用物质 C 表示的平均反应速率 $v(C)$ 是多少？



（第 4 题）

5. 用相同质量不同状态的锌跟相同浓度的足量稀盐酸反应，得到的实验数据如下表所示。

实验编号	锌的状态	反应温度 /℃	收集 100 mL 氢气所需时间 /s
①	薄片	15	200
②	薄片	25	90
③	粉末	25	10

（1）实验①和②表明：_____，化学反应速率越大。

（2）能比较固体颗粒大小对化学反应速率影响的实验编号是_____。

（3）该实验的目的是探究_____、_____等因素对锌跟稀盐酸反应速率的影响。

（4）请设计一个实验方案证明盐酸的浓度对该反应速率的影响：_____

_____。

6.2 化学平衡

学习聚焦

- 认识化学反应的限度
- 了解可逆反应的含义
- 描述化学平衡状态
- 判断化学反应是否达到平衡

知识回放

- 氯气与水反应
- 合成氨反应

在科学研究和化工生产中，只关注化学反应速率是不够的，还需要考虑化学反应进行的程度。化学反应中，反应物能否完全转化为生成物？为什么有的化学反应不能进行完全？化学反应的程度又跟什么因素有关？

可逆反应

在一定条件下，如果反应物能够完全转化为生成物，且只能向一个方向进行的反应，我们称之为不可逆反应。但是，在某些化学反应中，反应物不能完全转化，如在第 2 章学过的氯气与水的反应，Cl_2 和 H_2O 反应生成 HCl 和 HClO，同时 HCl 和 HClO 又会反应生成 Cl_2 和 H_2O。在相同条件下，正、逆两个方向均可进行的反应，我们称为可逆反应。可逆反应用“$\rightleftharpoons$”符号来表示双向的反应同时进行。通常我们认为向生成物方向进行的反应方向是正反应方向，另一个反应方向就是逆反应方向。

想一想

合成氨的化学方程式为：$N_2(g) + 3H_2(g) \underset{\text{催化剂}}{\overset{\text{高温、高压}}{\rightleftharpoons}} 2NH_3(g)$

正反应开始的标志是什么？在反应的起始阶段，正、逆反应速率的大小关系如何？当外界条件维持不变，正反应速率和逆反应速率最终会趋向什么结果？

化学平衡

在合成氨中，向反应容器内加入原料 N_2 和 H_2［图 6.7（a）］，开始反应。此时发生的化学反应为：$N_2(g) + 3H_2(g) \longrightarrow 2NH_3(g)$［图 6.7（b）］；随着反应进行，开始有 NH_3 生成，此时反应 $2NH_3(g) \longrightarrow N_2(g) + 3H_2(g)$ 发生，由于生成的 NH_3 浓度很小，所以该反应初始阶段的逆反应速率很小。随着反应进行，N_2 和 H_2 的浓度减小，NH_3 的浓度增大。因此正反应速率逐渐减小、逆反应速率逐渐增大。

当到达某一时刻，正反应速率与逆反应速率相等，此时 N_2、H_2 和 NH_3 的浓度不再随时间变化而变化［图 6.7（c）（d）］。

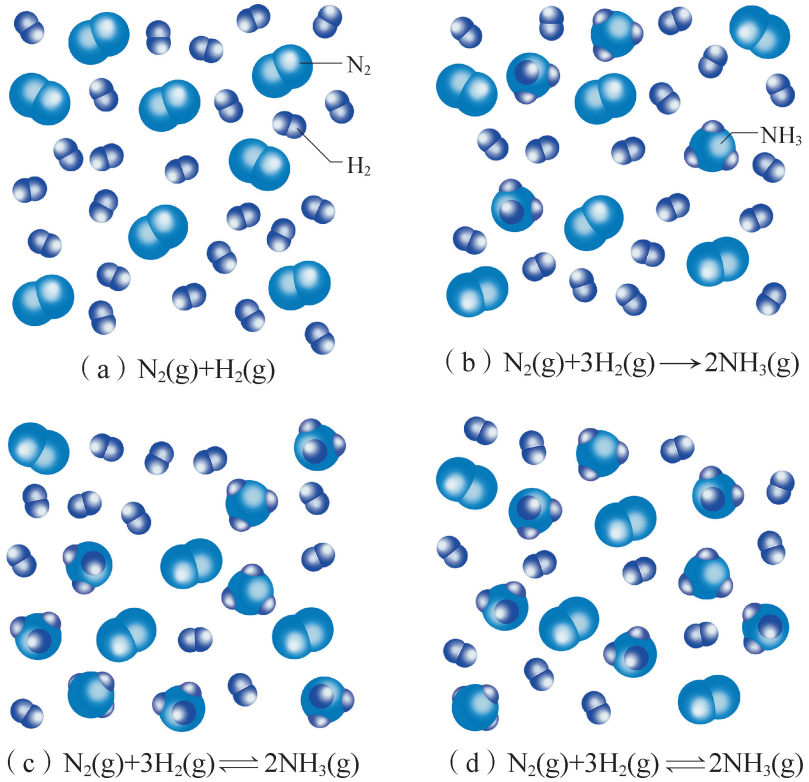


图 6.7 一定条件下 N_2 和 H_2 反应并逐渐达到化学平衡

如果外界条件不发生变化，任何可逆反应进行到一定程度时，正反应和逆反应的反应速率相等，这时反应混合物中各组分的含量保持不变，反应就达到化学平衡状态。化学平衡状态就是可逆反应在该条件下所能进行的最大程度。

当化学反应达到平衡时，反应混合物中各组分的含量不再随时间发生变化，但从微观看，正反应和逆反应都仍在继续进行，只是两者的速率相等，即某种物质的消耗速率和生成速率相等，因此，化学平衡是一种动态平衡。

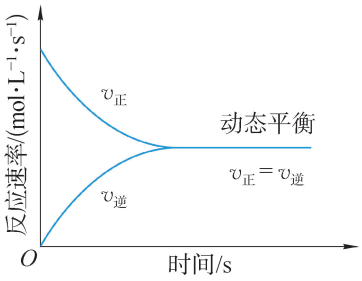


图 6.8 可逆反应速率随时间变化示意图

化学平衡的移动

当可逆反应达到化学平衡状态后，若反应条件（如浓度、温度等）改变了，原来的平衡状态就会被打破，正、逆反应的速率不再相等，平衡混合物里各组成物质的含量也就随之改变直至达到新的平衡状态，这个过程叫做化学平衡的移动。

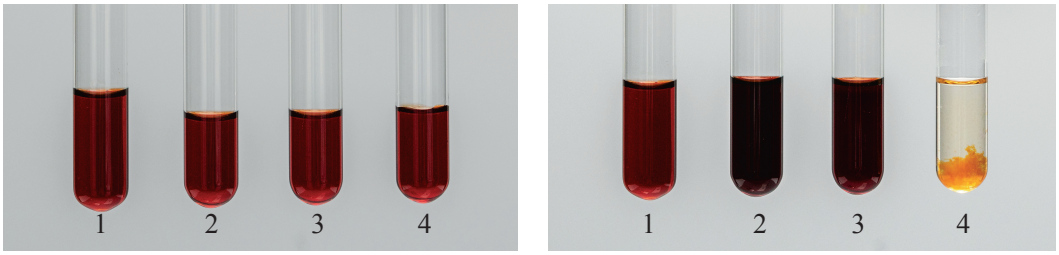
实验探究

化学平衡的移动

取一支大试管，加入 3 mL 0.02 mol · L^{-1} $FeCl_3$ 溶液，再加入 18 mL 0.01 mol · L^{-1} KSCN 溶液振荡均匀。发生反应的化学方程式为：

$$FeCl_3 + 3KSCN \rightleftharpoons \underset{\text{红色}}{Fe(SCN)_3} + 3KCl$$

另取 4 支试管，向 1 号试管中加入约 4 mL 上述混合液，向 2 号、3 号、4 号试管中加入约 3 mL 上述混合溶液［图 6.9（a）］。再向 2 号、3 号、4 号试管中分别加入 1 mol · L^{-1} KSCN 溶液、1 mol · L^{-1} $FeCl_3$ 溶液和 1 mol · L^{-1} NaOH 溶液各 1 mL，对比溶液颜色的变化，如图 6.9（b）所示。



（a）　　（b）

图 6.9　化学平衡的移动

现象记录：_____。

实验结论：_____。

问题：你能分析 4 号试管放置后上层液体颜色变浅的原因吗？

实验表明，该反应是可逆反应，存在化学平衡的移动。2 号试管中反应混合液的颜色加深了，说明 c(KSCN) 增大，KSCN 和 $FeCl_3$ 结合生成更多的 $Fe(SCN)_3$，平衡向正反应方向移动。在 3 号试管中加入 $FeCl_3$ 后使 $c(FeCl_3)$ 增大，反应混合液颜色加深，说明 c［$Fe(SCN)_3$］增大，$FeCl_3$ 和 KSCN 结合生成更多的 $Fe(SCN)_3$，平衡向正反应方向移动。

由此可见，由于反应物的浓度改变，原有的化学平衡被打破，并朝着减弱这种改变的方向移动，从而在新条件下建立起新的平衡。

想一想

在一个封闭的双球玻璃容器里盛有 NO_2 和 N_2O_4 混合气体。将玻璃容器一端的小球浸入热水中，另一端的小球浸入冰水中，如图 6.10 所示。

$$2NO_2 \rightleftharpoons N_2O_4 \quad \text{（放热反应）}$$
（红棕色）　（无色）

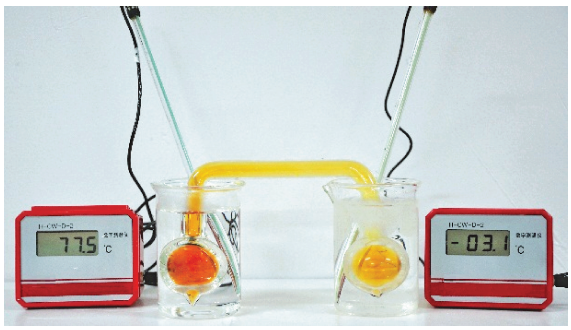


图 6.10　化学平衡的移动

实验发现，混合气体受热颜色变深，说明 NO_2 浓度增大；混合气体冷却后，颜色变浅，说明 NO_2 浓度减小。

升温后化学平衡向哪个方向移动？你能总结温度对化学平衡移动的影响吗？

总结和归纳浓度、温度对化学平衡移动的影响，完成下表。

反应条件改变		化学平衡移动方向
浓度	增大反应物浓度（或减小生成物浓度）	
	减小反应物浓度（或增大生成物浓度）	
温度	升高温度	
	降低温度	

人们通过大量的实验和研究，认识到化学平衡是在一定条件下才能保持暂时的、相对的平衡。浓度、温度等条件是影响化学平衡的因素，如果这些条件发生改变，化学平衡就会发生移动。

学习指南

例题导引

问题：

- 牙齿表面被一层坚硬的名叫羟基磷酸钙的物质保护着，该物质的组成为 $Ca_5(PO_4)_3OH$。它在唾液中存在下列平衡：

$$Ca_5(PO_4)_3OH(s) \rightleftharpoons 5Ca^{2+} + 3PO_4^{3-} + OH^-$$

口腔中的细菌和酶在消化分解食物时，会产生有机酸，从而使羟基磷酸钙溶解。若不及时处理，牙齿最终会因此产生蛀洞。试用化学平衡知识解释酸使羟基磷酸钙溶解的原因。

分析：

- 在上述平衡中，正反应会导致 $Ca_5(PO_4)_3OH$ 溶解，而逆反应却使 $Ca_5(PO_4)_3OH$ 生成。有机酸提供的 H^+ 会跟 OH^- 反应生成 H_2O，使 $c(OH^-)$ 减小，平衡向正反应方向移动，促进了羟基磷酸钙的溶解。在人体中还存在着许多化学平衡，我们可以借助化学平衡的原理和知识，理解如何促进自身的健康。

练习巩固

1. 下列不属于可逆反应的是（　　）。

（A）氯气和水反应生成盐酸和次氯酸

（B）N_2 与 H_2 在一定条件下，生成 NH_3，同时 NH_3 又可分解为 N_2 和 H_2

（C）电解水生成 H_2 和 O_2，H_2 和 O_2 反应生成水

（D）SO_2 溶于水

2. 对可逆反应 $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$ 已达平衡状态的描述中正确的是（　　）。

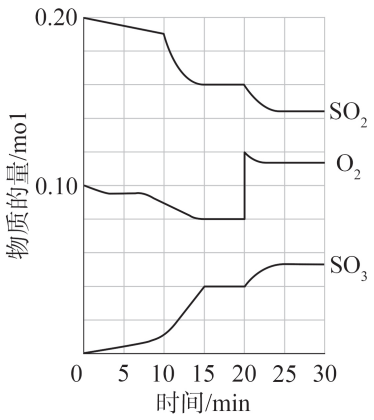
（A）平衡混合物中 N_2、H_2、NH_3 的分子数之比是 1∶3∶2

（B）反应速率 $\upsilon_{正}(N_2)=\upsilon_{正}(H_2)=\upsilon_{逆}(NH_3)$

（C）平衡混合物中 N_2、H_2、NH_3 浓度相等

（D）平衡混合物中 N_2、H_2、NH_3 浓度不随时间发生变化

3. 一定条件下，SO_2 和 O_2 在 2 L 密闭容器中发生如下反应：$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g)$，反应过程中 SO_2、O_2、SO_3 物质的量变化如下图所示。



（第 3 题）

（1）反应至 15 min 时，SO_2 的平均反应速率是多少？

（2）说出处于平衡状态的时间范围。

（3）20 min 时，O_2 物质的量增大后，判断各物质的物质的量浓度变化趋势。

4. 在恒容密闭容器中反应达到下列平衡：

$$PCl_5 \rightleftharpoons PCl_3 + Cl_2 \text{（吸热反应）}$$

请分析采取以下措施对平衡移动的影响。

（1）增加 PCl_5 气体的量。

（2）增加 Cl_2 气体的量。

（3）降低温度。

6.3 化工生产

学习聚焦

- 了解工业制硫酸
- 了解反应条件控制在生产中的应用
- 树立节约资源、保护环境的可持续发展意识

知识回放

- 放热反应
- 硫及其化合物的性质
- 化学反应速率
- 化学平衡

人类的生活离不开化工产品。化工产品的生产涉及反应原理、物料选择、能源消耗、工艺流程、环境保护等许多问题。本节我们主要以工业制硫酸为例，认识化工生产中的共性问题，进而感悟化学与技术、社会和环境之间的紧密联系。

工业制硫酸的反应原理和生产过程

硫酸是最重要的化工产品之一，2020 年我国硫酸的产量就高达 9.2×10^7 t[①]。硫酸主要用于化肥工业，用来制造过磷酸钙、硫酸铵和磷酸等。钢铁工业中需用硫酸进行酸洗。硫酸和氟化钙（CaF_2）反应生成的氟化氢，是现代氟工业的基础。总之，化工、石化、轻工、纺织、有色冶金、钢铁等行业都需要用到硫酸。

想一想

从 H_2SO_4 的组成、H_2SO_4 中 S 的化合价等角度分析，你会选择哪些原料，并通过怎样的反应步骤来得到 H_2SO_4？

1. 反应原理

工业上制硫酸的方法有多种，若以硫黄、硫铁矿为原料制硫酸，其反应原理是：燃烧硫黄或硫铁矿（主要成分为 FeS_2）等原料来制备二氧化硫，使二氧化硫在适当的温度和催化剂的作用下氧化生成三氧化硫，再使三氧化硫转化为硫酸。上述过程中涉及的三个主要反应均为放热反应。

$$S + O_2 \xlongequal{\text{燃烧}} SO_2$$

$$2SO_2 + O_2 \underset{\triangle}{\overset{\text{催化剂}}{\rightleftharpoons}} 2SO_3$$

$$SO_3 + H_2O = H_2SO_4$$



图 6.11　硫铁矿

① 数据来源：《2021 中国统计年鉴》（中华人民共和国国家统计局编）。

根据工业制硫酸的反应原理，生产过程通常可以分为造气、转化、吸收三个主要阶段。

书写表述

若以硫铁矿为原料制硫酸，你能用化学方程式表示制硫酸的反应原理吗？

2. 原料选择

工业制硫酸的主要原料有硫黄、硫铁矿、冶炼烟气、硫化氢以及工业废气等。在工业生产中，除根据反应原理选择原料外，还要综合考虑许多因素，如原料、能源、设备、工艺流程、储存运输、环境保护以及经济效益等。

以硫铁矿为原料制硫酸，生产中会产生“三废”（废气、废液、废渣），存在治理成本大、能耗高、硫资源利用率低等问题。近年来，我国以硫铁矿制硫酸的产量占硫酸总产量的比例不断下降。

硫黄是生产硫酸的优质原料。相较于硫铁矿制硫酸，硫黄制酸具有生产流程短、“三废”的治理量小等优势。我国的天然硫资源不多，可以通过回收石油炼制、天然气净化、高硫煤加工过程中的硫黄，提高硫资源的自给率和利用率。

冶炼烟气是冶炼有色金属时产生的，特别是冶炼金属硫化矿后烟气中含有二氧化硫，过去直接向大气中排放，既浪费资源又污染环境，现在用来生产硫酸，可以变废为宝。有色金属工业的发展也直接带动了冶炼烟气制酸的发展，目前我国冶炼烟气制酸的比例正稳步提高。

3. 生产过程

由于化学反应中原子守恒，这就形成了化工生产的物料平衡。使原料尽可能多地转化为产品，是生产中提高产量、控制成本、增加效益的关键。

与原料硫黄相比，冶炼烟气的组成比较复杂，含有矿尘、氟、砷、水分等有害成分，这些有害成分对制酸过程的转化、吸收等阶段会产生不利影响。因此，在进行转化（即催化氧化）之前，必须通过除尘、干燥等净化设备来除去这些物质，为后续生产提供洁净烟气。例如，矿尘、氟、

砷等都会使催化剂性能降低甚至失去催化作用，这种现象叫做催化剂中毒；水分对设备和生产也有不利影响。

拓展视野

沸腾炉

硫铁矿制硫酸的第一步反应是通过煅烧硫铁矿得到二氧化硫，矿石粉会被放在特殊设计的设备中进行煅烧。

矿石粉燃烧的时候，从炉底通入强大的空气流，使矿粉流态化而形成沸腾状，在这种沸腾状况下矿石粉跟空气充分接触，燃烧迅速且充分，提高了原料的利用率，因此人们把这种设备叫做沸腾炉（图 6.12）。

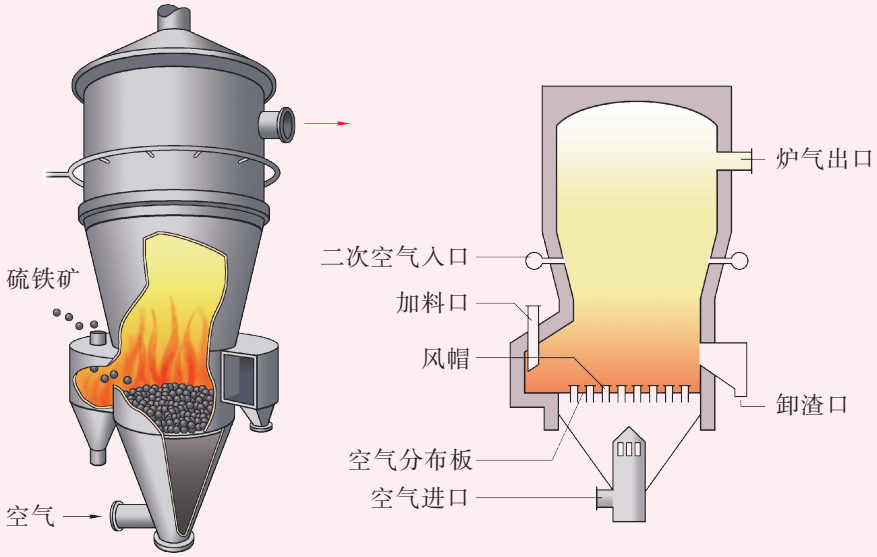


图 6.12　在沸腾炉中煅烧硫铁矿的示意图

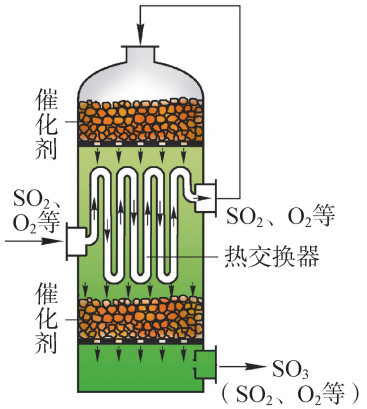


图 6.13　二氧化硫在转化器中的多段催化氧化示意图

转化阶段是硫酸生产的核心，转化率高，则硫的利用率高，对环境的影响小。经过净化处理的混合气体主要含有二氧化硫、氧气和氮气。二氧化硫氧化成三氧化硫是一个可逆反应，这步反应是在转化器里进行的（图 6.13）。反应时使用五氧化二钒作催化剂，在 475 ℃时的化学反应速率比不用催化剂时提高了 1.6×10^8 倍。

想一想

1. 在学习了化学反应速率和化学平衡知识后，你认为哪些反应条件可以促使二氧化硫既快又尽可能多地转化成三氧化硫？你的判断与实际生产是否一致？为什么？

2. 二氧化硫和空气进入转化器时（图 6.13），从转化器里的热交换器内管流过，再从塔顶进入催化剂层，而后从热交换器管外流出，进入下一层的催化剂，最后流出转化器，这样的设计有什么好处？

从转化器里出来的气体，主要是三氧化硫和氮气，以及剩余的未反应的氧气和二氧化硫。工业上用质量分数为 98.3% 的硫酸来吸收三氧化硫，之所以不直接用水或稀硫酸来吸收三氧化硫，是因为用水或稀硫酸作吸收剂时，容易形成酸雾，影响吸收速率。吸收阶段是在吸收塔里进行的，三氧化硫从塔的下部通入，98.3% 的硫酸从塔顶喷下，两者逆流接触。经过吸收可制得发烟硫酸、浓硫酸等不同产品。

化学史话

早期的硫酸制备

早在 1 000 多年前，就有制备硫酸的记载。最古老的方法源于炼金术，以绿矾（$FeSO_4 \cdot 7H_2O$）为原料进行煅烧，绿矾受热分解后放出 SO_2 和 SO_3，SO_3 与水蒸气同时冷凝，便得到硫酸，“绿矾油”也因此得名。我国唐代时辑纂的《黄帝九鼎神丹经诀》中也记载了“炼石胆取精华法”，即通过煅烧胆矾（$CuSO_4 \cdot 5H_2O$）而得到硫酸。

18 世纪人们开始利用硝化法制备硫酸，在玻璃器皿中燃烧硫黄和硝石的混合物，产生的二氧化硫被氮氧化物氧化为三氧化硫，再跟水反应生成硫酸。以硫铁矿为原料工业制硫酸则出现在 19 世纪后期。

硫酸工业中热能的合理利用

化工生产过程中往往需要消耗大量的能量。例如，工业制硫酸中使用的矿石粉碎机、鼓风机、电炉、泵等都需要电能；有的化工生产还须维持一定温度，那就需要热能。当然，加热会产生能耗使生产成本提高。如果生产中有放热过程，那么就可以利用放出的热量（化工生产中叫做“余热”或“废热”）对某些物料进行预热，这样既降低了能耗，又提高了生产的效能。

在生产硫酸的过程中，涉及的一些反应都是放热反应。因此，制酸厂采用了很多措施，如沸腾炉外设置废热锅炉回收高温废热，把热交换器和转化器合为一体，将 SO_2 转化为 SO_3 时产生的热量及时导出，促使化学平衡向生成 SO_3 的方向移动；导出的热量用来预热进入转化器的原料气，加快了反应的速率。如果生产中没有放热过程，必须要使用燃料加热时，也要设计出能充分燃烧和充分利用热量的工艺和设备。

硫酸工业中的三废处理

化工生产中产生的废气、废水、废渣若不做处理会影响人类的生存环境，所以必须对化工生产中排放的“三废”进行治理。在治理时不仅可以减少有害物质的排放，还可以生产出其他有用的产品。

硫酸工业的生产过程中会产生二氧化硫、硫酸雾、颗粒物等大气污染物，是我国二氧化硫污染控制和减排的重点。因此，我们必须提高二氧化硫的转化率和三氧化硫的吸收率，以减少尾气中二氧化硫的含量，对于尾气中还含有的少量二氧化硫也必须进行脱硫处理。氨酸法是一种硫酸尾气的脱硫工艺，它用氨水吸收尾气中的 SO_2，产物 NH_4HSO_3 再用硫酸处理，使之放出的 SO_2 又可返回制酸系统，实现循环利用，副产物 $(NH_4)_2SO_4$ 可作为化肥供农业生产使用。

$$SO_2 + 2NH_3 + H_2O = (NH_4)_2SO_3$$

$$SO_2 + (NH_4)_2SO_3 + H_2O = 2NH_4HSO_3$$

$$2NH_4HSO_3 + H_2SO_4 = (NH_4)_2SO_4 + 2SO_2\uparrow + 2H_2O$$

制酸厂排出的没有被污染的冷却水可以被循环利用；若排出的是酸性废水，一般可用石灰乳等中和处理。

书写表达

请用化学方程式表示用石灰乳处理含酸污水的反应原理。

以硫铁矿为原料生产硫酸，硫铁矿煅烧后废渣的主要成分是氧化铁、硫化亚铁及少量有害物质。若废渣含铁量高，可直接作为炼铁的原料。若含铁量低、有害物质含量较高，需要预处理后再用于炼铁。还可利用废渣制备铁的系列化工产品，如三氯化铁、硫酸亚铁、铁红等。

想一想

学习本节后，你能总结和归纳出一些化工生产的基本思想吗？

近年来，我国硫酸产能、产量稳步增长，产业集中度逐年提高，装置大型化、国产化趋势明显，节能减排效果显著，技术装备水平不断提高。化工生产只要逐步淘汰落后产能，推进资源和能源综合利用，坚持绿色环保的生产方式，就能实现可持续发展。

链接学科

绿色化学

绿色化学又称环境无害化学，是指从源头上做起，采用无毒无害的原料，在无害排放条件下进行高选择性的原子经济性的反应，获得对环境友好的产物的一门学科。绿色化学最大的特点是在生产始端就采用预防污染的手段，使过程和终端均为零排放或零污染，最终产品的原子利用率接近 100%。



学习指南

例题导引

问题：

- 转化是工业制硫酸的重要一步，即 SO_2 和空气的混合物通过转化器反应生成 SO_3，实际生产中，反应温度选定在 475 ℃左右。

（1）反应温度选在 475 ℃左右的依据是什么？

（2）工业上是如何加热原料气的？这样设计的好处是什么？

分析：

- （1）反应温度选在 475 ℃，主要有两方面的考虑：一是较高的温度有利于反应速率的加快；二是 475 ℃时催化剂 V_2O_5 具有最大活性。

（2）工业上在进行反应的转化器中设计有热交换器，热交换器利用 SO_2 转化为 SO_3 时放出的热量来预热 SO_2、O_2 等进入转化器的原料气。这样做的好处是在维持转化器反应温度的同时，实现能量的充分利用，起到节约能源的作用。

练习巩固

1. 工业制硫酸的工艺中，通常用来吸收尾气的物质是（　　）。

（A）氨水　　（B）硫酸

（C）氯化钙　　（D）氢硫酸

2. 下列说法错误的是（　　）。

（A）化学反应速率理论研究的是怎样在一定时间内加快产品的生产

（B）化学平衡理论研究的是怎样使用有限原料提高产品的产量

（C）化学反应速率理论研究的是怎样提高原料的转化率

（D）化工生产要坚持绿色环保的生产方式，实现可持续发展

3. 关于工业制硫酸的正确叙述是（　　）。

（A）工厂可以建在人口稠密的居民区

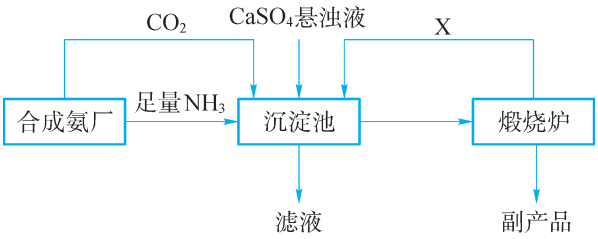
（B）靠近原料产地建厂比靠近消费地更为有利

（C）生产过程中的污水含有硫酸等杂质，可用石灰乳中和处理

（D）生产过程中产生的余热很难用于其他用途

4. 某化工厂为了综合利用生产过程中的副产品 $CaSO_4$，与邻近的合成氨厂联合设计了以下制备 $(NH_4)_2SO_4$ 的工艺流程。下图中，沉淀池里物质发生的主要化学反应为：

$$CO_2 + 2NH_3 + CaSO_4 + H_2O = CaCO_3\downarrow + (NH_4)_2SO_4$$



（第 4 题）

（1）该工艺流程中可循环利用的 X 是什么物质？生产的副产品是什么？

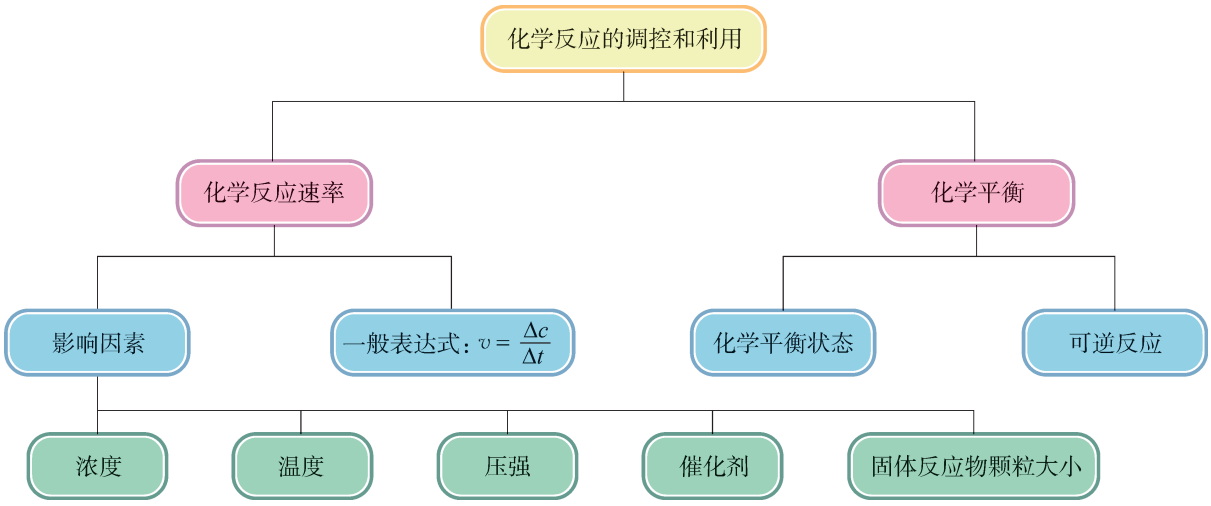
（2）从资源综合利用、工业生产实际、绿色化学思想等角度综合评价上述工艺流程的特点。

本章复习

素养提升

- 知道化学变化需要一定的条件，并遵循一定规律；认识化学反应有一定速率和限度，是可以调控的；能从化学反应速率、化学平衡等角度，动态地分析化学变化。
- 运用变量控制、定量实验等方法来研究化学反应，提出问题和假设、设计实验方案、组装实验仪器，与同伴合作完成实验操作，并客观地记录现象和数据，最终基于现象和数据分析得出结论。
- 运用化学反应原理来讨论和解决跟化工生产相关的实际问题，并具有节约资源、保护环境的可持续发展意识和观念。

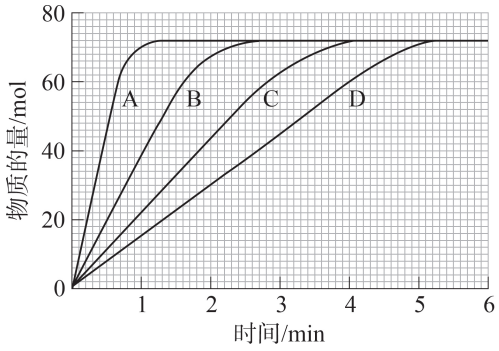
核心框图



练习巩固

1. 工业上用 Na_2SO_3 和硫黄在水溶液中加热反应制取 $Na_2S_2O_3$。但在混合前，一般会将硫黄粉用少许乙醇浸润。请结合硫的性质考虑这样做的原因是什么？

2. 某实验中，可通过测定碳酸钙与盐酸反应产生的二氧化碳气体的量来研究其反应速率。图中四条曲线显示了四次实验的结果。每次实验时只改变反应温度，而碳酸钙的颗粒大小和质量、盐酸的体积和浓度都保持不变。



（第 2 题）

（1）图中哪条曲线表示反应的温度最高？说出你的理由。

（2）曲线 B 中 1 ～ 2 min 的反应速率与 2 min 以后的反应速率相比有何变化？

（3）除了改变温度外，提出两种加快碳酸钙与盐酸反应速率的方法。

3. 下表中列出了 N_2 和 H_2 在不同温度和压强下，用铁催化剂反应达到平衡时 NH_3 的质量分数。

压强（$\times 10^5$ Pa）	平衡时氨的质量分数（%）				
	100 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃	500 ℃
10	88.2	50.7	14.7	3.9	1.2
25	91.7	63.6	27.4	8.7	2.9
50	94.5	74.0	39.5	15.3	5.6
100	96.7	81.7	52.5	25.2	10.6
200	98.4	89.0	66.7	38.8	18.3
400	99.4	94.6	79.7	55.4	31.9
1 000	99.9	98.3	92.6	79.8	57.5

$$N_2(g) + 3H_2(g) \underset{\text{催化剂}}{\overset{\text{高温、高压}}{\rightleftharpoons}} 2NH_3(g)$$

（1）生产中为何要使用铁催化剂？怎样理解“反应达到平衡”？

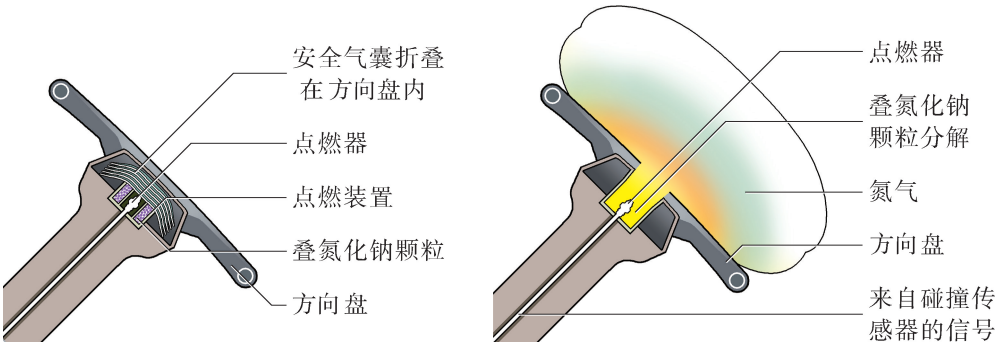
（2）在平衡混合气中还有哪些物质会跟 NH_3 共存？如何将 NH_3 从平衡混合气中分离出来？

*（3）结合表中数据说明，升高温度、增大压强对平衡时 NH_3 质量分数的影响。

*（4）表中显示 $1\,000 \times 10^5$ Pa，100 ℃时 NH_3 的产率最大，但工业上为何并不采用这样的反应条件？（产率是指在化学反应中某种生成物的实际产量与理论产量的比值）

4. 下图所示的安全气囊可在汽车发生碰撞的瞬间同时充气。在充气系统中，传感器接收到碰撞信息后，会向点燃器发出信号，点燃器触发叠氮化钠（NaN_3）颗粒迅速分解，产生的大量氮气立刻充满气囊。

$$2NaN_3 = 2Na + 3N_2\uparrow$$



（第 4 题）

若某种安全气囊的体积为 70 L，需要 130 g 叠氮化钠使气囊在 0.04 s 内完全充气，则计算充气过程中氮气的生成速率（用 $L \cdot s^{-1}$ 表示），以及叠氮化钠的分解速率（用 $g \cdot s^{-1}$ 表示）。

5. 人体中的血红蛋白（简写为 Hb）可以携带氧气变为氧合血红蛋白（简写为 $Hb \cdot O_2$），会达到下列平衡：

$$Hb + O_2 \rightleftharpoons Hb \cdot O_2$$

在海拔比较高的地方，氧气的浓度比较低，因此有人可能会患上高山症，而高山症就是由血液中氧合血红蛋白的浓度减少所致。

（1）为什么人处于高原时，体内生成的氧合血红蛋白较少？

（2）若要治疗患有高山症的病人，需要给他们吸氧，解释这种治疗方法的原理。

6. 催化在人类文明进步和经济发展中扮演着重要的角色，目前世界上约 90% 的化工生产都离不开催化剂。它以高效、绿色和经济的方式将原材料转变为具有高附加值的化工产品和燃料等，因此被广泛应用于能源、化工、医药、电子等领域。例如，1923 年德国化学家发明了一种使用催化剂 ZnO/Cr_2O_3，在 400 ℃、3×10^7 Pa 的条件下，将合成气（主要成分是 CO 和 H_2）转化为重要的有机原料——甲醇（CH_3OH）的方法。

（1）写出合成气转化为甲醇的化学方程式。

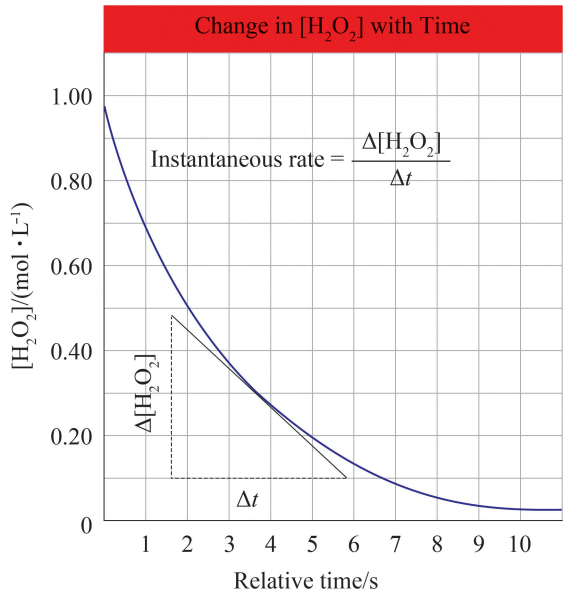
（2）1966 年有公司又改进了合成气制甲醇的反应条件：催化剂为 $Cu/ZnO/Al_2O_3$、250 ℃、$5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ Pa。试简要说明反应条件改进可能为化工生产带来的益处。

*7. 阅读短文，思考下列问题。

Chemists often need to know more than the average reaction rate. A pharmacist developing a new drug treatment might need to know the progress of a reaction at an exact instant. Consider the decomposition of hydrogen peroxide (H_2O_2), which is represented as follows.

$$2H_2O_2(aq) \longrightarrow 2H_2O(l) + O_2(g)$$

For this reaction, the decrease in H_2O_2 concentration over time is shown in Figure. The curved line shows how the reaction rate decreases as the reaction proceeds. The instantaneous rate is the reaction rate at a specific time. It is the slope of the straight line tangent to the curve at a specific time. The expression $\frac{\Delta[H_2O_2]}{\Delta t}$ is one way to express the reaction rate. In other words, the rate of change in H_2O_2 concentration relates to one specific point(or instant) on the graph.



$$\text{Slope of line} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$\text{Instantaneous rate} = \frac{\Delta[H_2O_2]}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta[H_2O_2]}{\Delta t}$$

You can determine the instantaneous rate for a reaction in another way if you are given the reactant concentrations at a given temperature and know the experimentally determined rate law and the specific rate constant at that temperature.

（短文取自：Thandi Buthelezi, Laurel Dingrando, Nicholas Hainen, *et al*. Chemistry: Matter and Change [M]. The McGraw-Hill Companies, 2017: 578.）

（1）Do you know the difference between the average reaction rate and the instantaneous rate?

（2）By what means can you get the instantaneous rate of a chemical reaction?

体验 · 分享

在下列选题中，开展文献、调查、实验等研究，并将成果和体会制作成海报、演示文稿，进行分享和交流。

∞ 北宋文学家欧阳修在《答杜密吴给事见寄》中有“老得闲来兴味长，问将何事送余光。春寒拥被三竿日，宴坐忘言一炷香”的句子，诗中作者用“一炷香”感叹时光的逝去。香一般是以木屑混合多种香料压制而成的，焚香其实是一种燃烧反应，有哪些因素会影响“一炷香”的时间长短呢？请以此为题，利用市面上常见的香，探究影响其燃烧时间的因素，撰写实验报告进行交流。



图 6.14　香

∞ “绿色化学”起源于 20 世纪 90 年代。结合资料，了解“绿色化学”的若干原则，以及它在我国的最新发展动态，并找一找符合“绿色化学”理念的化工生产、生活实践的案例。

∞ 许多物质如 SO_2、H_2SO_4 等，实验室里也能制取。学习本章后，你认为科学家和工程师在将实验室制备放大后实现工业化生产的过程中，会面临什么实际问题和困难？历史上，有哪些这方面的化工生产的成功案例？

∞ 推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节。我国正向绿色、循环、低碳发展迈出坚实步伐。讨论工业制硫酸、合成氨等化工生产对提高人类生活质量的影响；了解我国在实施大气污染和水污染防治、土壤污染管控和修复行动中的重要举措；查阅我国“循环经济”与“工业生态”的实施案例。

第 7 章

常见的有机化合物

鳞次栉比的管道是石油化工厂制备有机原料的装置，用这些有机原料生产的商品已走进千家万户。



7.1 饱和烃
7.2 不饱和烃
7.3 乙醇和乙酸
7.4 糖、油脂和蛋白质

有机化合物简称有机物，是指除一氧化碳、二氧化碳、碳酸及碳酸盐等少数简单含碳化合物以外的其他含碳化合物。迄今为止，从自然界中发现及人工合成的有机化合物已超过亿种，而且新的有机化合物每年仍以惊人的速度在增加。

有机化合物不仅与人类的衣、食、住、行密切相关，而且还是揭示生命现象及其规律的钥匙。在本章，我们将学习一些典型有机化合物的结构和性质，认识常见有机化合物的转化关系及合成应用。



7.1 饱和烃

天然气、石油和煤等是我们身边重要的矿物燃料和化工原料，蕴藏着许多不同种类的有机化合物。我们将通过探究这些有机化合物的结构、性质与应用，开启一段化学分支学科——有机化学的学习旅程。

学习聚焦

- 知道天然气的主要成分
- 理解甲烷的分子结构及化学性质
- 理解烷烃的同分异构现象，会书写丁烷、戊烷的同分异构体

知识回放

- 碳原子和氢原子的核外电子排布
- 共价键
- 电子式
- 结构式

天然气

天然气是一种高效、清洁的气体燃料，主要成分是甲烷。我国天然气矿藏主要分布在新疆、青海等地区，国家“西气东输”重大工程让中西部地区的天然气走进了东部地区的千家万户。



图 7.1　西气东输管道





图 7.2　家庭天然气的使用

拓展视野

可燃冰和页岩气

可燃冰是天然气水合物，是甲烷分子被包进了水分子组成的“笼”中，在海底低温和高压条件下形成的白色结晶体。我国海底可燃冰的储量丰富，科学家们正在努力使其成为一种新的高效清洁能源。



图 7.3　可燃冰的燃烧

页岩气是蕴藏于页岩层可供开采的天然气资源。页岩气往往分布在盆地内厚度较大、分布较广的烃源岩地层中。跟常规天然气相比，页岩气具有开采寿命长和生产周期长的特点。除我国外，北美、拉美、中亚等地区也拥有丰富的页岩气资源。

组成有机化合物的元素除碳、氢外，常有氧，还有氮、硫、卤素、磷等。其中仅含碳和氢两种元素的有机化合物称为碳氢化合物，也称为烃。甲烷是烃类中分子组成最简单的物质。

甲烷的分子结构和性质

甲烷的分子式为 CH_4，其中碳原子最外层的 4 个电子分别与 4 个氢原子的核外电子各自共用一对电子，形成 4 个共价单键。甲烷分子中的成键情况可用电子式和结构式来表示［图 7.4（a）（b）］。

甲烷分子中的 1 个碳原子和 4 个氢原子不在同一平面上，而是形成一个正四面体的立体结构。碳原子位于正四面体的中心，而 4 个氢原子分别位于正四面体的四个顶点上［图 7.4（c）］。甲烷分子的空间结构还可以分别用球棍模型和空间填充模型来表示［图 7.4（d）（e）］。

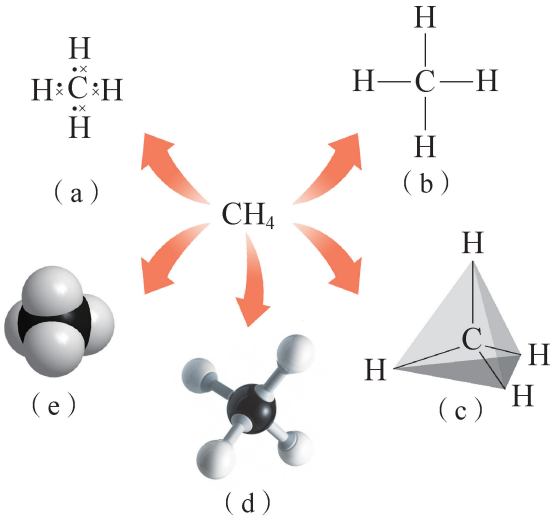


图 7.4　甲烷分子的电子式、结构式、正四面体结构示意图、球棍模型、空间填充模型

实验探究

制作甲烷等分子空间结构的模型

取一个信封直向平放，按图 7.5（a）（b）（c）所示进行折叠。

沿 *EC*、*CF* 将信封上部剪去，*C* 点在信封反面的对称点为 *C*′。将 *CD*、*CA*、*CB* 线前后反复折几下，形成折痕。撑开信封上端，使 *C* 与 *C*′ 远离，*D* 与 *E* 靠近，直至重合［图 7.5（d）］。以 *CC*′ 为折线，将 *CFC*′ 所在平面插入立体内与 *CBC*′ 所在平面重叠，即成一个正四面体［图 7.5（e）］。碳原子位于正四面体的中心，四个氢原子分别位于正四面体的四个顶点。

请你准备一盒分子模型，或利用身边适宜的材料，搭建甲烷分子的球棍模型。在本章后续的栏目中，还安排了搭建乙烯、乙炔、乙醇、乙酸等分子的球棍模型、空间填充模型等，这些活动将帮助你更直观地认识有机化合物分子结构的特点。

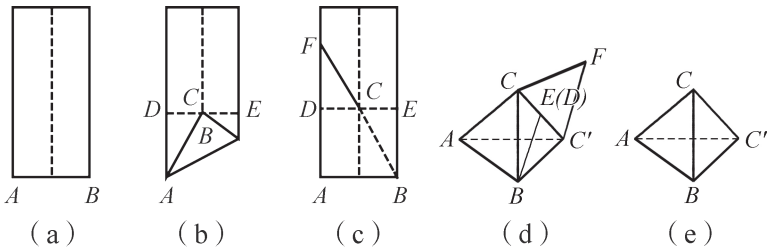


图 7.5　折叠甲烷分子空间结构的模型

甲烷是一种无色、无味的气体，难溶于水。在通常情况下，甲烷是比较稳定的，与强酸、强碱、强氧化剂（如高锰酸钾）等均不发生反应。

纯净的甲烷在空气中燃烧（图 7.6），生成二氧化碳和水。通常状况下，1 mol 甲烷与氧气完全燃烧，生成二氧化碳和液态水时，可以放出 890 kJ 的热量。

$$CH_4 + 2O_2 \xrightarrow{\text{点燃}} CO_2 + 2H_2O$$



图 7.6　甲烷燃烧

资料库

甲烷

密度：0.7168 g · L^{-1}（25 ℃）

熔点：−182.5 ℃

沸点：−161.5 ℃

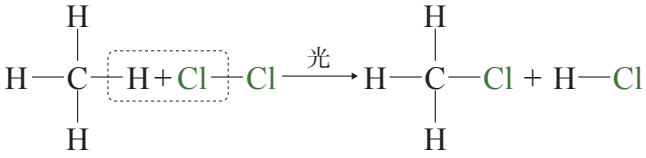
拓展视野

安全使用天然气

家用天然气中加入了少量有特殊气味的含硫或磷元素的物质，可以警示天然气的泄漏。若发生泄漏，人们会闻到这股特殊的气味。施救时，我们要注意不能采取开启金属门窗、开关电器设备、拨打电话等有可能产生火花的做法，应在避免产生火花的情况下，实施关气、通风、救人等应急措施。

除天然气外，沼气、煤坑气（俗称瓦斯）的主要成分也是甲烷，一般点燃甲烷前必须检验其纯度。当空气中甲烷的体积分数在 5% ～ 15% 之间，遇到火花就会发生爆炸。在煤矿的矿井里，要采取通风、严禁烟火等安全措施，避免发生爆炸事故。

在光照条件下，甲烷和氯气发生一系列的反应。首先，甲烷和氯气反应生成一氯甲烷（图 7.7）。



一氯甲烷

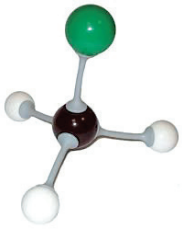


图 7.7　一氯甲烷分子的球棍模型（图中绿球代表氯原子）

一氯甲烷和氯气继续反应生成二氯甲烷，二氯甲烷和氯气反应生成三氯甲烷（也称氯仿），三氯甲烷和氯气再反应生成四氯甲烷（也称四氯化碳）。

$$CH_3Cl + Cl_2 \xrightarrow{光} CH_2Cl_2 + HCl$$

二氯甲烷

$$CH_2Cl_2 + Cl_2 \xrightarrow{光} CHCl_3 + HCl$$

三氯甲烷

$$CHCl_3 + Cl_2 \xrightarrow{光} CCl_4 + HCl$$

四氯甲烷

上述反应中，甲烷分子中的氢原子被氯原子逐一取代，生成了一系列取代产物和氯化氢。这种有机化合物分子中的原子或原子团被其他原子或原子团替代的反应称为取代反应。甲烷中氢原子被氯原子取代的反应也被称为氯代反应。

想一想

在氯代反应中，当氯原子取代一氯甲烷中的氢原子后，生成的二氯甲烷具有怎样的空间结构？

甲烷是一种基础有机化工原料。甲烷被隔绝空气加热到 1 000 ℃以上，可以分解成炭黑和氢气。炭黑可用于制造活性炭，也可用于制造石墨、石墨烯等材料；氢气则是重要的化工基本原料。

烷烃　同分异构现象

烃分子中的碳原子之间以碳碳单键结合成链状，其余价键均与氢原子相结合的烃称为烷烃。烷烃是一种饱和烃，甲烷是最简单的烷烃。

烷烃的名称可用“碳原子数 + 烷”来命名，当碳原子数为 1 ～ 10 时，依次用天干——甲、乙、丙、丁、戊、己、庚、辛、壬、癸表示；当碳原子数超过 10 时，可用中文数字表示。例如，C_6H_{14} 叫己烷，$C_{16}H_{34}$ 叫十六烷。

书写表达

请在甲烷分子球棍模型的基础上，搭建乙烷和丙烷分子的球棍模型，并写出它们的结构式。

烃分子失去 1 个氢原子后所剩余的部分叫做烃基。烃基一般用“—R”表示。如果这种烃是烷烃，那么烷烃失去 1 个氢原子后所剩余的原子团就叫做烷基。例如，$—CH_3$ 叫甲基，$—CH_2CH_3$（或$—C_2H_5$）叫乙基。

具有共同的化学通式，在组成上相差一个或几个碳原子基团，化学性质相似，物理性质随碳原子数的增加而规律性变化的化合物系列中的各化合物互为同系物。例如，甲烷、乙烷、丙烷……为烷烃系列的同系物，它们具有共同的化学通式 C_nH_{2n+2}，式中碳原子数为 n，氢原子数为 $2n+2$，相邻两个烷烃在组成上相差 1 个“CH_2”原子团。

想一想

1. 观察乙烷、丙烷、丁烷等烷烃分子的球棍模型，总结碳原子的成键特点；体会相邻的烷烃在分子组成上的差异。

2. 阅读表 7.1，讨论“烷烃随着碳原子数的增加，其物理性质呈现哪些变化趋势”，试阐述缘由。

表 7.1 一些烷烃的分子式和物理常数

名称	分子式	常温时的状态	熔点 /℃	沸点 /℃
甲烷	CH_4	气	−182.5	−161.5
乙烷	C_2H_6	气	−182.8	−88
丙烷	C_3H_8	气	−188	−42.1
丁烷	C_4H_{10}	气	−138.3	−0.50
戊烷	C_5H_{12}	液	−129.7	36.0
己烷	C_6H_{14}	液	−95.4	68.7
十六烷	$C_{16}H_{34}$	液	18.2	286.8
十七烷	$C_{17}H_{36}$	固	22.0	302.2
二十四烷	$C_{24}H_{50}$	固	51	391

烷烃的化学性质和甲烷类似，通常情况下都很稳定，但在空气中点燃后可以燃烧，在光照条件下能和氯气发生取代反应。

想一想

尝试搭建丁烷的球棍模型，你能得到几种不同的结构？丁烷分子中的碳链都是直线形的吗？

当我们用结构式表示丁烷（C_4H_{10}）时，会发现有两种不同的结构，一种是所有的碳原子呈直链［图 7.8（a）］，另一种带支链［图 7.8（b）］。为了区别，前者被称为正丁烷，后者被称为异丁烷。除了用结构式表示，我们还可分别用结构简式来表示。正丁烷和异丁烷的球棍模型如图 7.9 所示。

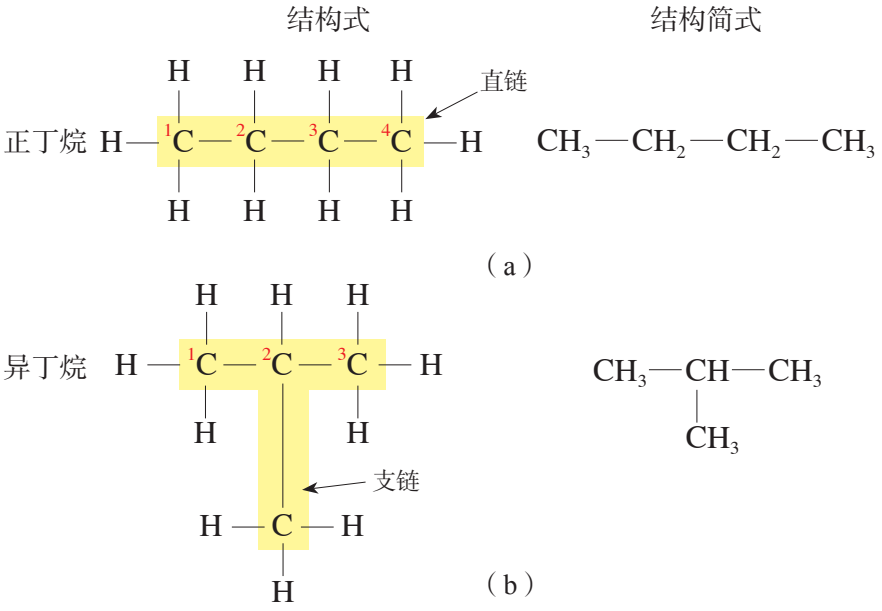


图 7.8　正丁烷和异丁烷的结构式和结构简式

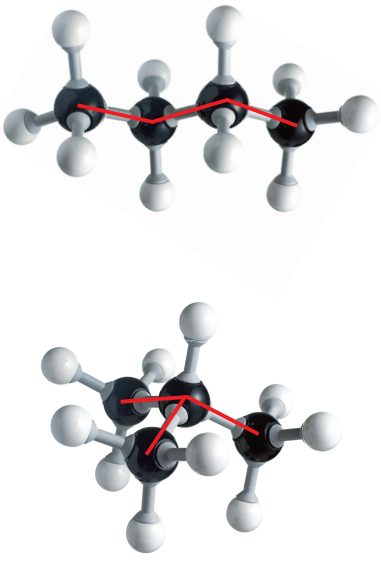


图 7.9　正丁烷和异丁烷分子的球棍模型

具有相同的分子式而结构和性质不同的化合物，互称为同分异构体，这种现象称为同分异构现象。例如，正丁烷和异丁烷就互为同分异构体，它们具有相同的分子式，但结构不同，物理性质也有所差异（表 7.2）。

表 7.2　正丁烷和异丁烷的物理常数

名称	熔点 /℃	沸点 /℃
正丁烷	−138.3	−0.50
异丁烷	−159.6	−11.7

书写表达

戊烷（C_5H_{12}）在工业上用途广泛，结合同分异构现象，请写出戊烷同分异构体的结构式和结构简式。

随着烷烃中碳原子数的增加，烷烃的同分异构体数目急剧增加。同分异构现象是有机化合物数量庞大的重要原因之一。

链接学科

有机化学

19 世纪初，许多化学家相信，在生物体内存在的所谓“生命力”，才能产生有机化合物，有机化合物不能由无机物在实验室里合成。1824 年，德国化学家维勒（Friedrich Wöhler, 1800 —1882）从无机物制得草酸，此后尿素、乙酸等有机化合物也相继由无机物合成，“生命力”学说才慢慢被打破。之后，有机化学逐渐兴起并蓬勃发展。

有机化学是研究有机化合物的来源、制备、结构、性质、应用以及有关理论的化学分支学科。有机化学之所以成为化学中的一门独立学科，是因为有机化合物有其内在的联系和特性。随着近代物理、数学的渗透，电子计算机、激光等技术的应用，以及维生素 B_{12}、牛胰岛素等重要生物活性物质的成功合成，又陆续形成了高分子化学、有机合成化学、金属有机化学、生物有机化学、理论有机化学等分支学科。

学习指南

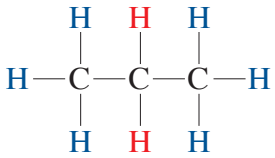
例题导引

问题：

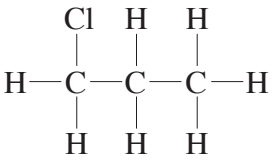
- 在光照条件下，丙烷能和氯气发生类似甲烷和氯气的取代反应，产物中一氯丙烷的同分异构体有多少种？

分析：

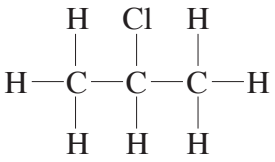
- 观察丙烷的分子模型，我们可以发现丙烷分子中碳原子连接的氢原子有两种：一种是连接在两端碳原子上的氢原子，如下式中用蓝色标记的六个氢原子；另一种是连接在中间碳原子上的氢原子，如下式中用红色标记的两个氢原子。



当发生一元取代时，氯原子能够取代一个蓝色或红色位置的氢原子，因此生成的一氯丙烷也有如下两种同分异构体：



1–氯丙烷



2–氯丙烷

练习巩固

1. 下列物质中，属于烃类的是（　　）。

（A）CH_3Cl　　（B）$C_6H_5NO_2$　　（C）C_9H_{20}　　（D）C_2H_5OH

2. 下列有机化合物中，不能和氯气发生取代反应的是（　　）。

（A）CH_4　　（B）CCl_4　　（C）CH_2Cl_2　　（D）CH_3Cl

3. 互为同分异构体的烷烃不可能具有相同的（　　）。

（A）分子式　　（B）通式

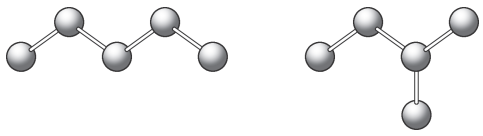
（C）相对分子质量　　（D）结构式

4. 某直链烷烃分子中有 22 个氢原子，它的分子式是 _____，名称是 _____。

5. 烷烃完全燃烧生成二氧化碳和水。若以 C_nH_{2n+2} 表示任意烷烃，试写出其完全燃烧的化学方程式。

6. 某气体含碳 82.76%，含氢 17.24%，在标准状况下的密度是 2.59 g · L^{-1}，求该气体的分子式。

7. 我们知道由碳原子形成的有机分子骨架有直链和支链，分子中含碳原子数越多，结合方式的变化也越多。若你手上有 5 个碳原子，能否再搭出 1 个与图中碳原子相互结合方式不同的连接方式？



（第 7 题）

8. 比较有机化合物和无机化合物的异同，将相关内容填入下表。

内容	物质			
	有机化合物	实例：C_2H_6	无机化合物	实例：NaCl
元素组成				
化合物中原子间的化学键				
熔点				
沸点				
在水中的溶解性				
可燃性				

7.2 不饱和烃

学习聚焦

- 知道石油的分馏、裂化和裂解
- 知道煤化工的主要方法
- 理解乙烯的分子结构及化学性质
- 认识乙炔、苯的结构特点
- 知道聚合反应和塑料的主要组分

知识回放

- 蒸馏
- 甲烷的电子式和结构式
- 烷烃的分子结构
- 取代反应



图 7.10　采油



图 7.11　液体石油

石油和煤不仅是人类使用的主要能源，也是重要的化工原料和宝贵的资源，其中石油被称为“工业的血液”。通过石油化工不仅能够获得各种烷烃，还会产生乙烯、丙烯等物质。经过煤化工可以得到乙炔、苯等重要的化工产品。我们将了解乙烯、乙炔及苯等物质，进一步丰富对烃类物质的认识。

石油化工

石油是含有杂质的各种烃的混合物，燃烧的热值高，运输和储存方便。自 20 世纪 50 年代以来，在世界能源消费结构中，石油位居首位。

以石油或天然气为原料生产化工产品的工业，称为石油化学工业（简称石油化工）。其产品多达数千种，既包括医药、农药、炸药、染料等，也包括塑料、合成纤维、合成橡胶等。所以，石油化工在工业、农业、国防和人民生活等方面用途极广。

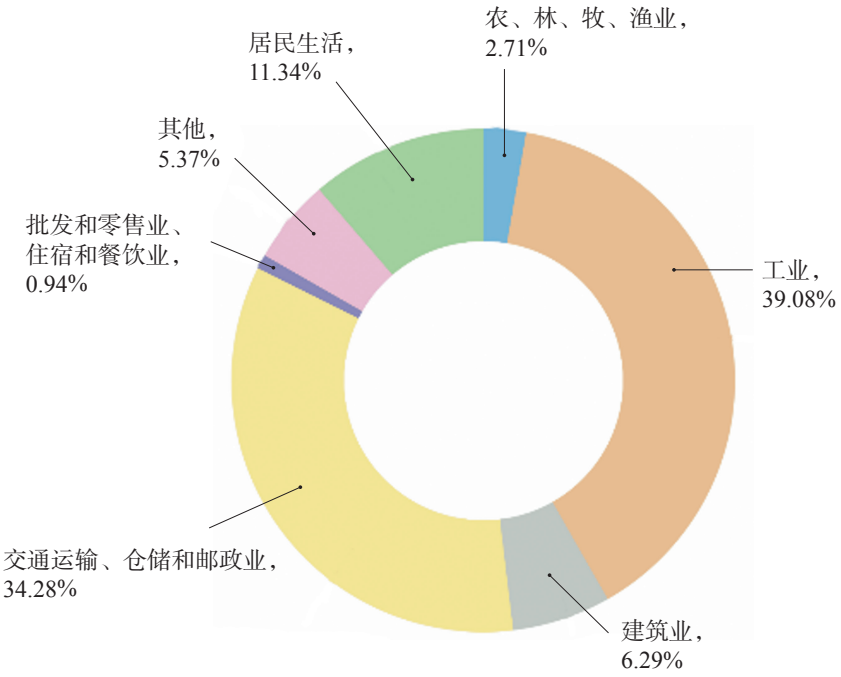


图 7.12　2019 年我国石油消费量中各领域所占比例[①]

① 资料来源：《2021 中国统计年鉴》（中华人民共和国国家统计局编）。

化学史话

石油的早期利用

在伊拉克幼发拉底河两岸具有六千多年的古建筑中，存有使用沥青砂浆的迹象，这是人类最早利用石油的佐证。我国东汉史学家班固（32—92）在《汉书·地理志》中记载“高奴，有洧水，可燃”。“石油”一词始见于北宋科学家沈括（1031—1095）所著《梦溪笔谈》卷二十四“鄜县境内有石油”。



图 7.13 《梦溪笔谈》[①]

［注释］

高奴：今陕西省延安市延长县；洧水：今延河支流；可燃：可以燃烧的石油。

开采出来未经处理的石油称为原油。经过脱水、脱盐等处理后的石油仍是由各种烃组成的混合物。其中含碳原子数少的烃沸点低，含碳原子数多的烃沸点高。因此将石油加热至沸腾，通过分馏塔，可以把石油分成不同沸点范围的蒸馏产物，这个过程称为石油的分馏。分馏出来的各种成分叫做馏分，每一种馏分仍然是多种烃的混合物。

石油经过分馏以后得到的主要产物有石油气、汽油、煤油、柴油、润滑油、石蜡及沥青等，它们被广泛应用于人类生产和衣食住行等生活的各个领域。



图 7.14 工业石油分馏

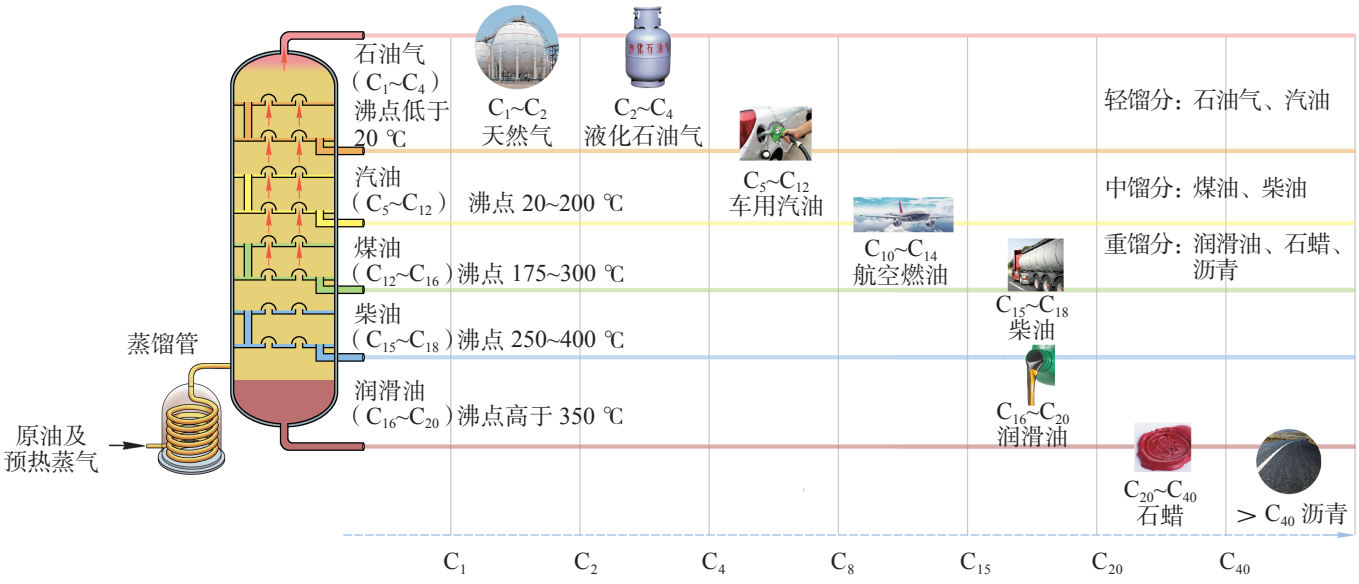


图 7.15 石油分馏产品及其用途

① 上海图书馆藏古书流通处印民国影宋刻本。

石油分馏获得汽油、煤油和柴油等轻质液体燃料的产量不够高。为了提高轻质液体燃料的产量，特别是提高汽油的产量和质量，工业上在一定条件下（加热或使用催化剂并加热），把相对分子质量大、沸点较高的烃断裂为相对分子质量较小、沸点较低的烃，这种方法称为裂化。例如：

$$\underset{\text{十六烷}}{C_{16}H_{34}} \xrightarrow[\triangle]{\text{催化剂}} \underset{\text{辛烷}}{C_8H_{18}} + \underset{\text{辛烯}}{C_8H_{16}}$$

石油化工生产中，常把石油分馏产品（包括石油气）作原料，采用比裂化更高的温度，使具有长链分子的烃断裂成乙烯、丙烯等短链的小分子烃，作为有机化工原料。工业上将这种方法称为石油的裂解。

煤化工

煤是由有机化合物和无机物组成的复杂的混合物。煤化工是指经化学方法将煤炭转换为气体、液体和固体产品，而后进一步加工成一系列化工产品的工业。煤的液化、气化、干馏等是煤化工及其综合利用的重要方法。



图 7.16　煤化工生产装置

煤的液化一般是将煤磨成粉后和一些燃料油混合，在催化剂作用下加氢的加工方法，得到的液体称为人造石油，可以代替石油使用。

煤的气化是煤在氧气不足的情况下部分氧化，产生一氧化碳、氢气、甲烷等可燃性混合气体的加工方法，所得

气体可作为城市管道煤气，提纯后亦可作为工业原料。

煤的干馏是把煤隔绝空气加强热使它分解，生成焦炭、煤焦油、粗氨水、焦炉气等的过程，其中焦炭主要用于冶金工业和生产电石；煤焦油通过分馏可以得到如苯、苯酚、沥青等化工原料；焦炉气的主要成分是氢气、甲烷等，可作为燃料和化工原料；得到的粗氨水可用来制造氮肥。

煤化工的一个重要产物是碳化钙（俗称电石），它是把焦炭和生石灰置于高温电炉内加热得到的。

$$CaO + 3C \xrightarrow[\text{电炉}]{2\,500 \sim 3\,000\ ℃} CaC_2 + CO\uparrow$$

将碳化钙与水反应即得到乙炔。

$$\underset{\text{乙炔}}{C_2H_2\uparrow} + Ca(OH)_2$$



图 7.17　电石

不饱和烃中碳原子的成键特点

石油裂解气里含量较高的就有乙烯。乙烯的分子式为 C_2H_4，和乙烷比较，乙烯分子中少了两个氢原子，乙烯分子里的碳原子所结合的氢原子数少于饱和烃里的氢原子数。像乙烯这类化合物跟某些物质发生反应，它们分子里的这种碳原子还可以结合其他的原子或原子团。通常把这些烃称为不饱和烃，乙烯就是一种不饱和烃。

书写表达



图 7.18　乙烯分子的球棍模型和空间填充模型

若乙烯分子中碳、氢原子成键时都要达到稳定，那么它们之间应当如何连接呢？尝试写出乙烯分子的电子式和结构式，并动手搭建乙烯分子的球棍模型，观察碳、氢原子的成键情况。

乙烯分子中两个碳原子之间共用两对电子而形成的共价键习惯上称为碳碳双键（$\diagdown C{=}C \diagup$）。碳碳双键是一种不饱和键，形成不饱和键的碳原子称为不饱和碳原子。

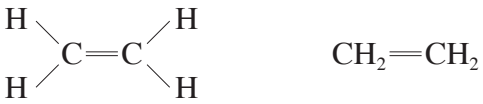


图 7.19　乙烯分子的结构式和结构简式

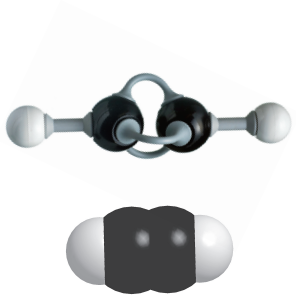


图 7.20　乙炔分子的球棍模型和空间填充模型

乙炔俗称电石气，分子式为 C_2H_2，与乙烯相比，乙炔分子中少了 2 个氢原子。你认为乙炔分子中两个碳原子之间的共价键会有怎样的特点？

书写表达

尝试写出乙炔分子的电子式和结构式。观察乙炔分子的球棍模型，说出其分子的空间结构。

乙炔分子中两个碳原子之间共用三对电子而形成的共价键称为碳碳三键（—C≡C—），碳碳三键也是一种不饱和键。



图 7.21　乙炔分子的结构式和结构简式

苯是从煤焦油分馏中得到的一种重要化工原料，由英国物理学家和化学家法拉第（Michael Faraday, 1791—1867）在 1825 年首次发现并确定其分子式为 C_6H_6。现代研究表明，苯分子具有平面正六边形结构，其中六个碳原子相互之间的键完全相同，既不同于典型的碳碳单键，也不同于典型的碳碳双键。现在，我们一般把苯的结构简式表示为或。苯也是一种不饱和烃。

化学史话

苯的结构之谜

苯的结构之谜曾长期困扰着化学家。1861 年捷克的中学教师洛希米德（Joseph Lochmidt，1821—1895）提出了苯具有环状结构。1865 年德国化学家凯库勒（Friedrich August Kekulé，1829—1896）提出了以短线价键方式画出的苯的单双键交替的平面环状结构，即苯的凯库勒式（图 7.22）。

由于苯的凯库勒式无法解释苯的有些化学性质，所以它并不能完全反映苯真正的结构。但是，苯的凯库勒式至今仍常被人们使用。

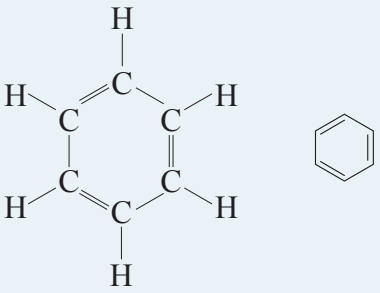


图 7.22　苯的结构式和凯库勒式

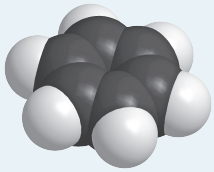


图 7.23　苯分子的空间填充模型

乙烯的性质

乙烯为无色，稍有气味的易燃气体，几乎不溶于水。乙烯分子的结构特点决定了乙烯具有跟乙烷不同的性质。

资料库

乙烯

密度：1.147 g·L^{-1}（25 ℃）

熔点：−169.4 ℃

沸点：−104 ℃

实验探究

乙烯的性质

1. 将乙烯通入盛有高锰酸钾的酸性溶液的试管里，观察试管内溶液颜色的变化。

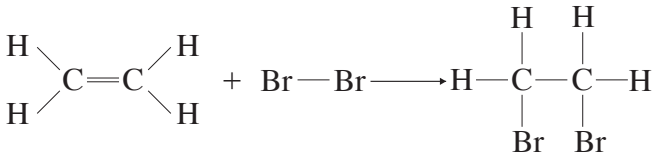
2. 将乙烯通入盛有溴的四氯化碳溶液的试管里，观察试管内溶液颜色的变化。在反应后的溶液中滴加 2 ～ 3 滴酸化的硝酸银溶液，并观察现象。

编号	现象记录	实验结论
1		
2		

由于分子中存在碳碳双键，乙烯能被高锰酸钾氧化，使紫色高锰酸钾的酸性溶液褪色，利用该反应可以鉴别乙烷和乙烯。除了与高锰酸钾发生氧化反应外，乙烯在氧气中的燃烧，也是一种氧化反应，燃烧时放出大量的热，火焰比乙烷燃烧更加明亮。

$$C_2H_4 + 3O_2 \xrightarrow{\text{点燃}} 2CO_2 + 2H_2O$$

乙烯能与溴单质反应使溴的四氯化碳溶液褪色，但该反应中并未生成 HBr，说明乙烯和溴单质的反应不是取代反应。研究表明，该反应中乙烯分子的碳碳双键中有一个键断裂，两个溴原子分别加在断键的两个碳原子上，生成无色的 1,2－二溴乙烷液体。



1,2−二溴乙烷

有机化合物分子中双键两端的碳原子跟其他原子或原子团直接结合生成新的化合物的反应属于加成反应。上述乙烯和溴的反应就是加成反应。

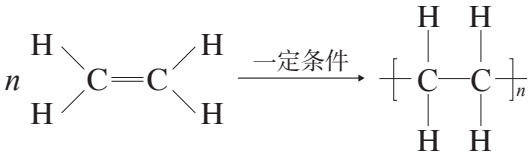
书写表达

一定条件下，乙烯能和 H_2、HCl、H_2O 等物质发生加成反应，请写出这些加成产物的结构简式。

乙烯是一种植物生长调节剂，可用作水果的催熟剂。乙烯还是用来制造塑料、合成纤维、有机溶剂等的重要基础原料。

一种有机高分子材料——塑料

在适当温度、压强和催化剂存在的条件下，许多乙烯分子之间还可以通过断裂碳碳双键然后连接起来生成聚乙烯。



聚乙烯

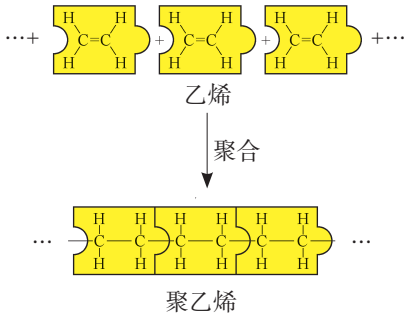


图 7.24 乙烯聚合反应的示意图

由相对分子质量小的化合物相互结合成相对分子质量很大的聚合物的反应，称为聚合反应。上述化学方程式中，$CH_2{=}CH_2$ 为单体，$-CH_2-CH_2-$ 为链节，下标 n 为聚合度，$\left[CH_2-CH_2\right]_n$ 为聚合物，也称高分子化合物。由于乙烯聚合成聚乙烯的反应也可看作加成反应，因此这种小分子通过加成聚合生成聚合物的反应也称为加聚反应。

书写表述

如果把乙烯中的一个氢原子换成其他原子或原子团 G，你能写出这种单体 $HC(G){=}CH_2$ 发生聚合反应后的产物吗？（假设反应过程中 G 不发生变化）

链接学科

高分子化学

高分子化学学科的开拓者施陶丁格（Hermann Staudinger，1881—1965）是德国有机化学家、高分子化学家。20 世纪 20 年代，他将天然橡胶氢化，得到了氢化天然橡胶，证明了天然橡胶不是小分子缔合的结果，而是相对分子质量较大的化合物，正式提出了“高分子化合物”的概念，并提出了高分子化合物的黏度性质与相对分子质量的关系，从而建立了高分子化学这一分支学科，施陶丁格因此获得了 1953 年诺贝尔化学奖。

有机高分子材料在生活和生产的各领域中都有广泛的应用，塑料就是一种有机高分子材料，它们都是以聚合物为主要组分，加入适当添加剂（如增塑剂、填料、稳定剂、阻燃剂、着色剂等），经加工成型的塑性材料或固化交联形成的刚性材料。塑料的分类如图 7.25 所示。

聚乙烯广泛地用于制作农用薄膜和与食品有关的各种塑料制品，如食品袋、水杯等。用丙烯、氯乙烯、苯乙烯作为原料，通过聚合反应分别得到聚丙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯，可用于制作多种结构与性能不同的塑料。

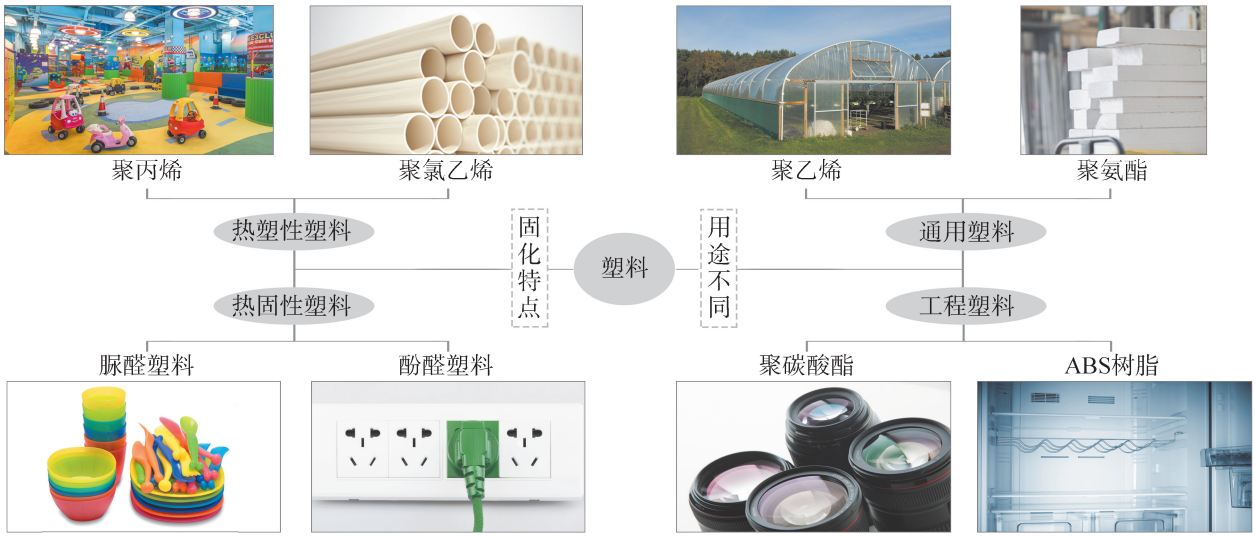
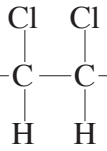


图 7.25　塑料的分类

学习指南

例题导引

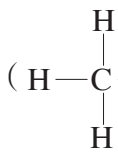
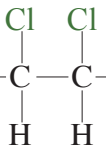
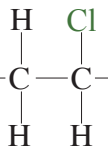
问题：

- 若用下列两组方案来制取纯净的 1,2–二氯乙烷（），采用哪组方案更为合理？

（甲）使用乙烷和氯气为主要原料，在取代反应条件下进行

（乙）使用乙烯和氯气为主要原料，在加成反应条件下进行

分析：

- 若采用甲组方案。乙烷和氯气发生取代反应，生成一氯乙烷（），一氯乙烷再和氯气反应，可以生成目标分子 1,2–二氯乙烷（），但此时还会生成另一种同分异构体 1,1–二氯乙烷（）。实际上还不止于此，生成的二氯代烷还有可能继续跟氯气发生取代反应，生成三氯代烷、四氯代烷……因此，用甲组方案，1,2–二氯乙烷的纯度会偏低。

若采用乙组方案，适量的氯气能够和乙烯分子中的碳碳双键发生加成反应，生成目标分子 1,2–二氯乙烷。因此，采用乙组方案，1,2–二氯乙烷的纯度会较高。

练习巩固

1. 下列石油分馏产品中，沸点范围最低的是（　　）。

（A）沥青　　（B）润滑油

（C）汽油　　（D）柴油

2. 下列关于乙烯和乙烷相比较的各种表述中，错误的是（　　）。

（A）乙烯是不饱和烃，乙烷是饱和烃

（B）乙烯分子为“平面形”结构，乙烷分子为立体结构

（C）乙烯能从石油化工中获取，乙烷则不能

（D）乙烯能使高锰酸钾的酸性溶液和溴的四氯化碳溶液褪色，乙烷则不能

3. 下列乙烯和其他物质的反应中，属于氧化反应的是（　　）。

（A）和氢气反应生成乙烷　　（B）使高锰酸钾的酸性溶液褪色

（C）和氯化氢反应生成氯乙烷　　（D）和水反应生成乙醇

4. 等质量下列气体，完全燃烧时消耗氧气最多的是（　　）。

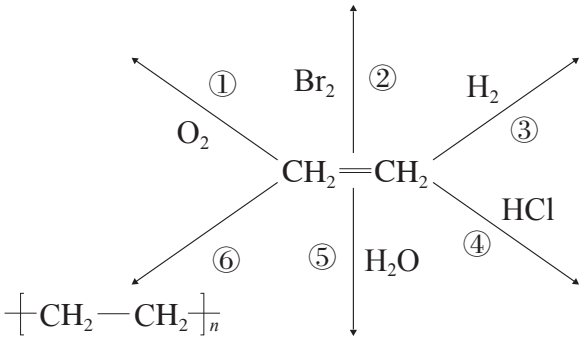
（A）CH_4　　（B）C_2H_6　　（C）C_2H_4　　（D）C_3H_8

5. 下列分子中，所有原子一定不在同一平面上的是（　　）。

（A）$CH_3—CH_3$　　（B）$CH_2═CH_2$

（C）$CH{\equiv}CH$　　（D）

6. 写出乙烯和下列物质在一定条件下发生反应的化学方程式，并标明反应类型。



编号	化学方程式	反应类型
①		
②		
③		
④		
⑤		
⑥		

7. 归纳和整理不同烃分子的结构和化学性质，填写下表。

名称（分子式）	甲烷（CH_4）	乙烯（C_2H_4）
结构式和结构简式		
分子的空间结构		
在氧气中燃烧的反应		
能否使 $KMnO_4$ 的酸性溶液褪色		
能否发生取代反应		
能否发生加成反应		

7.3 乙醇和乙酸

在有机化合物中，除了我们已经学过的由碳、氢两种元素组成的烃类外，还包括由碳、氢及氧、氮、硫等其他元素所组成的有机化合物。乙醇、乙酸是我们身边最常见的含氧有机化合物，我们通过学习它们的结构、性质以及用途，进而认识有机反应的特点，为进一步深入学习有机化学打下基础。

学习聚焦

- 了解乙醇的分子结构，理解其化学性质
- 了解乙酸的分子结构，理解其化学性质
- 知道官能团的概念，了解羟基、羧基等官能团与性质的关系

知识回放

- 酒精燃烧
- 钠和水的反应
- 酸的通性
- 烃的性质

乙醇

我国早在四千多年前就用粮食发酵酿酒，杜康酿酒的传说流传久远。粮食中的淀粉在酒曲作用和加热的条件下，水解成为葡萄糖，葡萄糖再进一步在酶的作用下生成乙醇。

乙醇（俗称酒精）是酒的有效成分。不同饮用酒中乙醇的含量各不相同。酿造酒的酒精含量较低，可用蒸馏法得到酒精含量较高的烈性酒。



图 7.26　工人在酿酒车间工作

乙醇是无色透明且具有特殊香味的液体，易挥发，能溶解多种无机物和有机化合物，能与水以任意比例互溶。医疗中常用体积分数为 70% ～ 75% 的乙醇溶液进行杀菌消毒。

乙醇易在空气中燃烧，产生淡蓝色的火焰（图 7.27），同时放出大量的热。

$$CH_3CH_2OH + 3O_2 \xrightarrow{\text{点燃}} 2CO_2 + 3H_2O$$

将玉米、木薯以及秸秆等原料进行发酵，可得到廉价的酒精，将其添加到汽油中可混合成乙醇汽油，乙醇汽油既能节省石油资源，又能减少汽车尾气中硫的氧化物、氮氧化物的污染，已被许多国家所采用。

资料库

乙醇

密度：0.789 4（20 ℃时相对于水在 4 ℃下的密度）

熔点：−114 ℃

沸点：78.3 ℃



图 7.27　乙醇燃烧

书写表达

推测乙醇的分子结构。

（1）猜测结构。

对比乙烷的分子式，乙醇的分子式为 C_2H_6O。通过球棍模型的搭建，推测乙醇分子可能存在的结构式：_____。

（2）分析数据。

实验表明，1.15 g 乙醇与足量金属钠反应，可产生标准状况下的氢气 0.28 L。

推知：

① 1 mol 乙醇与钠完全反应，生成 _____ mol 氢气，即相当于 _____ mol 氢原子。

② 1 mol 乙醇分子中存在不同于乙烷分子里的活泼氢原子为 _____ mol。

（3）推测结论。

乙醇分子的结构式为：_____。

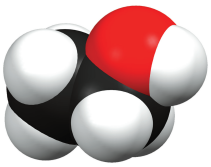


图 7.28　乙醇分子的空间填充模型（图中红球代表氧原子）

乙醇分子中由氧原子和氢原子组成的原子团，被称为羟基（—OH），乙醇羟基上的氢原子相对比较活泼。因此乙醇和乙烷具有不同的化学性质，可以和金属钠发生反应，反应中钠原子置换了羟基中的氢原子，生成氢气和乙醇钠。

$$2CH_3CH_2OH + 2Na \longrightarrow \underset{\text{乙醇钠}}{2CH_3CH_2ONa} + H_2\uparrow$$

实验探究

乙醇、水与钠反应的实验对比

1. 在大试管中加入 3 mL 无水乙醇，加入一块绿豆大小的金属钠，塞上导管并将导管的一端放入盛有少量水（滴加洗涤剂）的玻璃蒸发皿中（图 7.29）。待蒸发皿内出现大量气泡后，用点火枪点燃气泡。

2. 取一培养皿注入约一半容积的水，投入一块绿豆粒大小的金属钠，观察现象。

请比较乙醇与钠、水与钠反应现象的差异，分析原因。

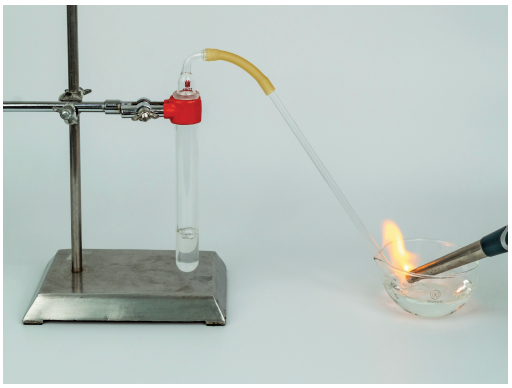
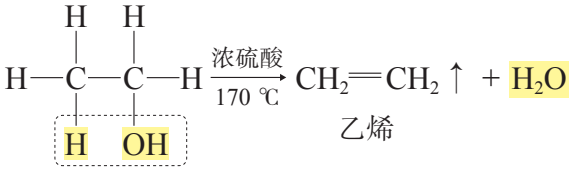


图 7.29　乙醇与钠反应

编号	现象记录	实验结论
1		
2		

将无水乙醇和浓硫酸的混合物快速加热到 170 ℃，乙醇分子脱去一个水分子生成乙烯。



实验探究

乙醇的催化氧化

如图 7.30 所示，在一大玻璃管内放入浸有酒精的棉球，在棉球旁放一浸有希夫试剂[①]的滤纸，玻璃管的一端塞入一根绕有粗铜丝的低压发热器，另一端用玻璃管接入双连球，并将尾气通入一盛水的烧杯。接通电源，待铜丝发热后，用双连球轻轻鼓气并切断电源。

现象记录：_____。

实验结论：_____。

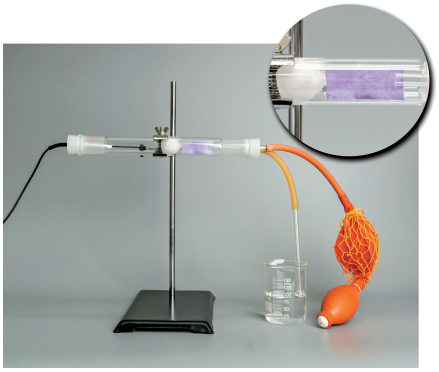


图 7.30　空气氧化乙醇的实验装置

乙醇在加热和催化剂（Cu 或 Ag）存在的情况下，能够被空气中的氧气氧化，生成乙醛。

$$2CH_3CH_2OH + O_2 \xrightarrow[\triangle]{\text{催化剂}} 2CH_3CHO + 2H_2O$$

乙醛

① 希夫试剂可用来检验乙醛。若遇到乙醛，无色的希夫试剂会变成紫红色。

拓展视野

乙醇对人体的作用和行为的影响

人饮酒以后，乙醇随血液进入肝脏，在乙醇脱氢酶的作用下，乙醇被转化成为乙醛，乙醛再在乙醛脱氢酶的作用下成为乙酸。过量饮酒后，过多的乙醇及其转化产物，特别是乙醛会刺激脑细胞的类脂物质发生化学变化，导致脑细胞膜硬化，产生一系列的不良反应（表 7.3）。尤其是驾驶员酒后由于反应明显迟缓，常会因此而造成危及人身和财产安全的严重交通事故，因此严禁酒后驾车。

表 7.3　人体血液中乙醇含量对行为的影响

血液中乙醇的质量分数（%）	人的行为
0.05	清醒程度降低，协调性减弱，反应时间迟缓 15% ～ 25%
0.10	视觉敏感度降到 32%
0.25	协调性严重障碍，眩晕，摇晃，感觉损伤
0.35	外部感觉麻木，体温下降
0.40	半数的人死于酒精中毒

乙酸

资料库

乙酸

密度：1.049（20 ℃时相对于水在 4 ℃下的密度）

熔点：16.7 ℃

沸点：118 ℃

乙酸，又名醋酸，分子式为 $C_2H_4O_2$，是食用醋的有效成分。

酿造的酒中常含有一些金属离子，它们会催化乙醇和空气中的氧气发生缓慢的氧化反应，并生成乙醛，然后乙醛被进一步氧化成为乙酸。

乙酸是具有强烈刺激性气味的无色液体，易溶于乙醇和水。当温度低于 16.7 ℃时，乙酸会凝结成冰状晶体，所以无水乙酸又称冰醋酸。

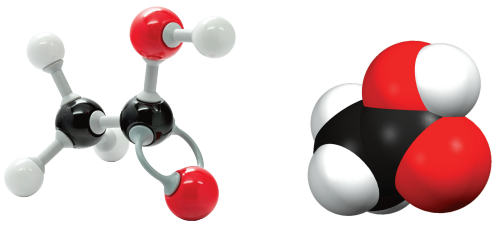


图 7.31　乙酸分子的球棍模型和空间填充模型

乙酸的分子结构如图 7.31 所示，分子中存在一种重要的基团—COOH（图 7.32），称为羧基。在分子中烃基（或氢原子）跟羧基直接相连的有机化合物叫做羧酸。由于乙酸含有羧基，在水溶液里能部分电离出氢离子，因此乙酸具有弱酸性。

乙酸在有浓硫酸存在并加热的条件下，可以和乙醇反应生成乙酸乙酯和水。

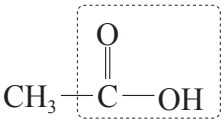
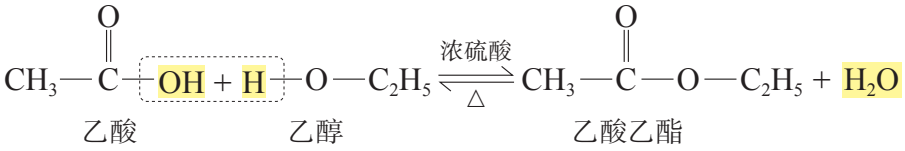


图 7.32　乙酸分子中的羧基



这种酸和醇作用生成酯[①]和水的反应，属于酯化反应。

实验探究

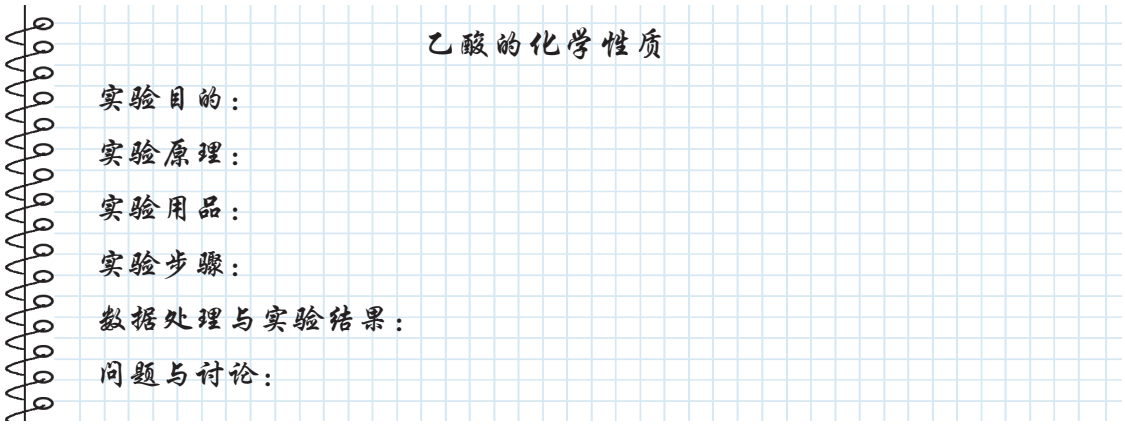


乙酸的化学性质



结合乙酸中羧基的结构特点，思考以下哪些物质能与乙酸发生反应。请根据思考结果，利用以下提供的药品和合理的仪器，设计出实验方案，探究乙酸的化学性质。

提供下列药品：石蕊试液、Mg、CaO、NaOH、$NaHCO_3$、$CaCO_3$、乙醇、浓硫酸等。



乙醇、乙酸、乙酸乙酯这些有机化合物，从结构上来说，都可以看作是由乙烷中的氢原子被其他基团取代后衍变而来的，所以也可叫做烃的衍生物。

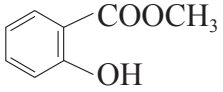
烃的衍生物具有跟相应烃不同的化学特性，这是因为取代氢原子的其他原子或原子团对于这些烃的衍生物的性质起着重要作用。这种决定有机化合物化学特性的原子或原子团叫做官能团。羟基（—OH）、羧基（—COOH）、酯基（—C(=O)—OR）等是官能团，碳碳双键（>C=C<）、碳碳三键（—C≡C—）也是官能团。

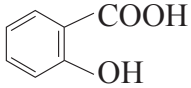
① 酯是由醇与含氧酸（无机酸或羧酸）反应失去水后生成的有机化合物。

学习指南

例题导引

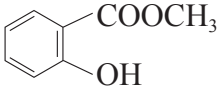
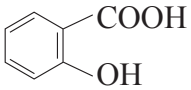
问题：

- 水杨酸甲酯（）俗称冬青油，具有消肿、消炎和镇痛的作用，可用于一些皮肤疾病的治疗，也常用作牙膏、化妆品中的香料。它可由冬青叶蒸馏或由水杨酸为原料而制得。

（1）根据学过的知识，你认为由水杨酸（）（甲）来制备冬青油还需要哪种必需的原料（乙），并书写该合成反应的化学方程式。

（2）有学生取 2.00 g 的水杨酸（相对分子质量为 138）与过量的原料乙，在浓硫酸的催化下反应，所得产物经过水洗、蒸馏，得到 1.52 g 的冬青油（相对分子质量为 152）。试问该学生在本实验所得冬青油的产率为多少？（产率是指在化学反应中某种生成物的实际产量与理论产量的比值）

分析：

- （1）通过观察可发现目标分子与原料甲在结构上的差异为羧基（$-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-OH$）转变为酯基（$-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-O-CH_3$）。由此推知，若水杨酸分子中的羧基与甲醇（$CH_3OH$）发生酯化反应，便可引入甲基，故可用水杨酸与甲醇的反应来制备冬青油。合成反应的化学方程式为：



水杨酸　　甲醇　　水杨酸甲酯（冬青油）

（2）设：反应后冬青油的理论产量为 x g。



138　　152

2.00 g　　x g

$$\frac{138}{152}=\frac{2.00}{x}$$

$$x \approx 2.20$$

$$\text{冬青油的产率} = \frac{\text{实际产量}}{\text{理论产量}} \times 100\% = \frac{1.52\ \text{g}}{2.20\ \text{g}} \times 100\% \approx 69\%$$

练习巩固

1. 下列有机化合物中，含有羟基的是（　　）。

（A）$CH_3CH_2CH_2—OH$　　（B）$CH_3—O—CH_3$

（C）$CH_3—\overset{\overset{O}{\|}}{C}—H$　　（D）$CH_3—\overset{\overset{O}{\|}}{C}—OCH_3$

2. 甲醇（CH_3OH）是乙醇的同系物，两者化学性质相似。甲醇不能发生的反应是（　　）。

（A）取代反应　　（B）酯化反应

（C）氧化反应　　（D）加成反应

3. 下列物质中，能与乙酸发生反应的是（　　）。

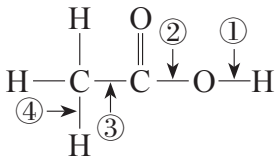
① 石蕊　② 乙醇　③ 金属铝　④ 氧化镁　⑤ 碳酸钙　⑥ 氢氧化钠

（A）全部　　（B）仅②③④

（C）仅②③⑥　　（D）仅①④⑤

4. 根据乙酸分子的化学键可能断键位置的示意图，回答下列问题。

（1）乙酸与乙醇生成$CH_3COOC_2H_5$时断键的位置是_____；当乙酸表现出酸的通性时，断键的位置是_____。



（第 4 题）

（2）请用化学方程式和必要的文字来说明乙酸的酸性。

（3）写出乙酸和甲醇（CH_3OH）发生酯化反应的化学方程式。

7.4 糖、油脂和蛋白质

学习聚焦

- 了解糖类、油脂和蛋白质的组成和结构特征
- 了解糖类、油脂和蛋白质的特征反应
- 认识糖类、油脂和蛋白质在生产、生活中的重要应用

知识回放

- 人体重要的营养素
- 营养素的主要功能和来源

人们为了维持生命和健康，保证正常的生长发育和从事各种体力、脑力活动，每天必须从食物中摄取一定的营养素。重要的营养素有糖类、油脂、蛋白质、维生素、无机盐和水等，除了无机盐和水以外，其他的都是有机化合物。

糖

糖类[①]是许多生命体维持生命活动所需能量的主要来源。我们通常遇到的糖类有葡萄糖、蔗糖、淀粉和纤维素（图 7.33）等。



图 7.33　富含糖类的物质

想一想

阅读表 7.4，讨论下列问题。

表 7.4　葡萄糖、蔗糖、淀粉和纤维素的组成与自然界中的存在

糖的种类	化学式	自然界中的存在
葡萄糖	$C_6H_{12}O_6$	葡萄等水果中
蔗糖	$C_{12}H_{22}O_{11}$	甘蔗、甜菜等植物中
淀粉	$(C_6H_{10}O_5)_n$	大米、小麦等各种谷物中及甘薯、土豆等块茎内
纤维素	$(C_6H_{10}O_5)_n$	蔬菜、木材、棉花等富含植物纤维的植物中

（1）试从葡萄糖的分子组成解释为什么它们曾经被称为“碳水化合物”。

（2）淀粉与纤维素的化学式都可用 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 表示。在一定条件下，两者皆可水解生成葡萄糖，那么它们是同一种物质吗？为什么？

① 从结构上看，糖类一般是多羟基醛或多羟基酮，以及能水解生成多羟基醛或多羟基酮的物质。

葡萄糖是一种最基本的糖类。动物食用淀粉和纤维素后在体内会转化成葡萄糖，葡萄糖的氧化可以放出热量，能为生命活动提供能量。

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

人体内各组织细胞活动所需的能量大部分来自葡萄糖，所以人体血液中的葡萄糖含量必须保持一定的水平才能维持体内各器官和组织的需要，但血液中葡萄糖的浓度不宜过高或过低。测量血糖，绝大多数情况下测量的就是葡萄糖含量。

实验探究 葡萄糖的检验

取两张葡萄糖检测试纸（图 7.34），分别放在两只洁净的表面皿上。再往检测试纸的纸条上分别滴蒸馏水和 2% 的葡萄糖溶液，待纸条全部浸湿后将多余溶液擦去，静置 30 ～ 60 s 后观察纸条颜色的变化。

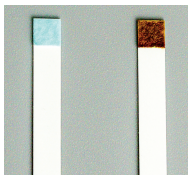


图 7.34　滴加蒸馏水（左）和 2% 葡萄糖溶液（右）的检测试纸

现象记录：_____

_____。

实验结论：_____

_____。

资料库

葡萄糖检测试纸

葡萄糖检测试纸主要含有葡萄糖氧化酶、过氧化氢酶和显示剂等物质。这种浅蓝色的试纸遇到含葡萄糖的溶液时会发生颜色变化。

油脂

油脂（图 7.35）是油和脂肪的统称。室温下呈液态者称为油（一般从植物种子中得到的大多为油），呈固态的称为脂肪（一般来自动物的大多为脂肪）。油脂在人体生命活动中发挥重要的作用，不仅能供给能量、保持体温和保护内脏器官，也能帮助人体对脂溶性维生素的吸收与消化。油脂在代谢中可提供的能量比糖类和蛋白质约高一倍。

在人体中，油脂主要在小肠中由胰腺和肠腺分泌出的脂



图 7.35　各种含有油脂的食品

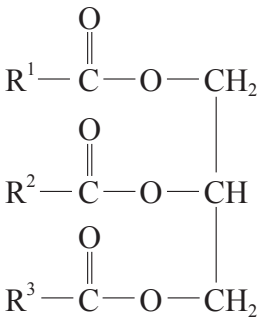
肪酶水解，并被吸收。当生命体能量供应不足或对能量有特殊需求时，储存在体内的油脂将被动用，例如在肝细胞和脂肪细胞等组织内发生水解反应，并进行氧化，释放能量。

油脂是由高级脂肪酸与丙三醇形成的酯，结构上和乙酸乙酯类似，只是组成油脂的羧酸和醇不同于乙酸乙酯（表 7.5）。

表 7.5　形成油脂、乙酸乙酯的羧酸和醇

物质	油脂	乙酸乙酯
羧酸	长链的脂肪酸（RCOOH）	乙酸（CH_3COOH）
醇	丙三醇，俗称甘油［$HOCH_2CH(OH)CH_2OH$］	乙醇（CH_3CH_2OH）

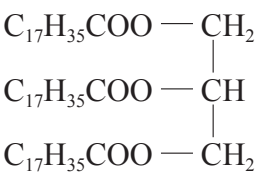
可以把油脂写成如下通式：



结构式里的 R^1、R^2、R^3 代表饱和烃基或不饱和烃基，它们可以相同也可以不相同。如果烃基是饱和的，那就是饱和脂肪酸；如果烃基中含有不饱和键，那就是不饱和脂肪酸。高级脂肪酸的碳原子数一般在几个到二十几个。

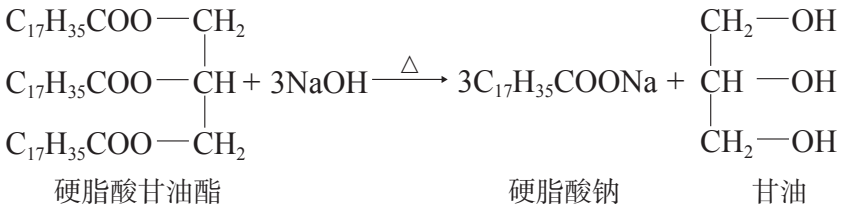
书写表达

硬脂酸甘油酯的结构简式如下：



请跟其他同学合作完成其球棍模型或空间填充模型的搭建，观察其分子的空间结构。

在有酸存在的条件下，酯类和水发生水解反应，生成相应的酸和醇，酯的水解反应是酯化反应的逆反应。当有碱存在时，碱跟水解生成的酸发生中和反应，此时水解程度更加完全。油脂在碱性条件下的水解反应也叫皂化反应，反应后得到高级脂肪酸钠和甘油，前者是肥皂的主要成分，后者是重要的化工原料。



蛋白质

蛋白质是生物体内组织的基本组成部分，动物组织的蛋白质含量可达有机化合物总量的 80% 以上。我们每天饮食中的蛋白质主要存在于瘦肉、蛋类、豆类及鱼类中（图 7.36）。



图 7.36　富含蛋白质的食物

许多重要的生命和生理现象都和蛋白质密切相关。不同的蛋白质具有不同的生理作用。例如，大多数酶是蛋白质，酶是许多生命活动过程中重要的催化剂。

蛋白质是以氨基酸（图 7.37）为基本结构单元构成的生物大分子。蛋白质水解最终的产物就是氨基酸①，成千上万种蛋白质都是由二十几种氨基酸组成的。

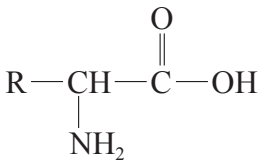
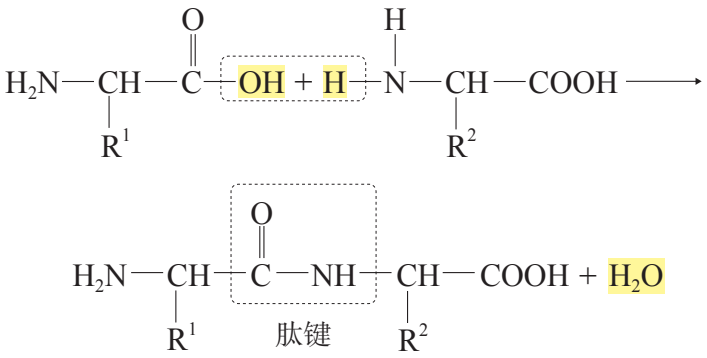


图 7.37　氨基酸的结构简式



在生命体细胞质中的核糖体上，氨基酸分子通过脱水

① 指 α-氨基酸，图 7.37 即 α-氨基酸的结构简式。

互相连接成肽链。两个氨基酸连接生成的产物叫二肽，几十肽就可叫蛋白质。蛋白质含有多肽链，多肽链的氨基酸种类、数目及排列顺序，以及形成的立体结构导致了蛋白质的多样性。

化学史话

蛋白质的人工合成



图 7.38 “人工全合成结晶牛胰岛素五十周年”纪念邮票

20 世纪 50 年代，通过化学家的努力，构成蛋白质的氨基酸的结合方式已经被确定。对蛋白质结构的深入认识，激励着各国科学家展开对人工合成蛋白质的研究。蛋白质的人工合成将使人类在揭示生命奥秘的历程中向前又迈进一大步，同时也体现出一个国家的科学技术研究水平。由于胰岛素是当时已知的最小的蛋白质分子（只含 51 个氨基酸），所以各国化学家着手人工合成胰岛素。我国科学家在 1958 年底首先进行了天然胰岛素的拆合工作，从 1959 年开始，由中国科学院生物化学研究所、中国科学院上海有机化学研究所和北京大学化学系等科研单位联合“作战”，把人工合成胰岛素的工作简化到分别合成二十一肽和三十肽，最后通过 200 多步的合成工作，参照天然牛胰岛素的结构，终于在 1965 年 9 月首次人工合成了在结构、生物活性、理化性质、结晶形态等方面都和天然牛胰岛素完全一样的结晶牛胰岛素。

人工合成蛋白质的成功，标志着人类在探索生命奥秘的征途中有了突破性的进展。这一成就震惊了世界，表明当时我国在多肽蛋白质合成方面的科学技术水平已居世界先进地位，体现了我国在现代科学技术研究中的实力。

蛋白质中加入浓的盐溶液，能使蛋白质溶解度降低并析出，这种现象称为盐析。蛋白质在热、酸、碱、重金属盐、紫外线等作用下，会变性而凝结，失去生物活性，例如鸡蛋清加热烧熟变成固体。蛋白质和许多试剂反应会发生颜色反应，例如与浓硝酸反应会变黄。

想一想

高温、紫外线、75% 的酒精都能杀菌消毒的原因分别是什么？

糖类、油脂、蛋白质都是人类必需的营养素，但是要注意均衡营养，摄入过量或不足都会影响人体健康。

链接职业

膳食营养平衡

人类必须不断从外界获取各种营养素，以维持正常的生命活动。膳食营养的供给、摄入要符合人体的生理需求，即建立膳食营养平衡，对于保持人体的健康至关重要。

应社会、市场的需要，产生了一种较新型的职业——公共营养师，他们具备针对食物的丰富的各类化学知识，了解食物对人体营养的影响，进而对膳食营养进行评价、管理和指导，对人体的营养摄入进行干预。公共营养师针对健康和亚健康人群做营养咨询，还可以为企业员工、运动员、家庭提供教育、辅导、指导等服务。

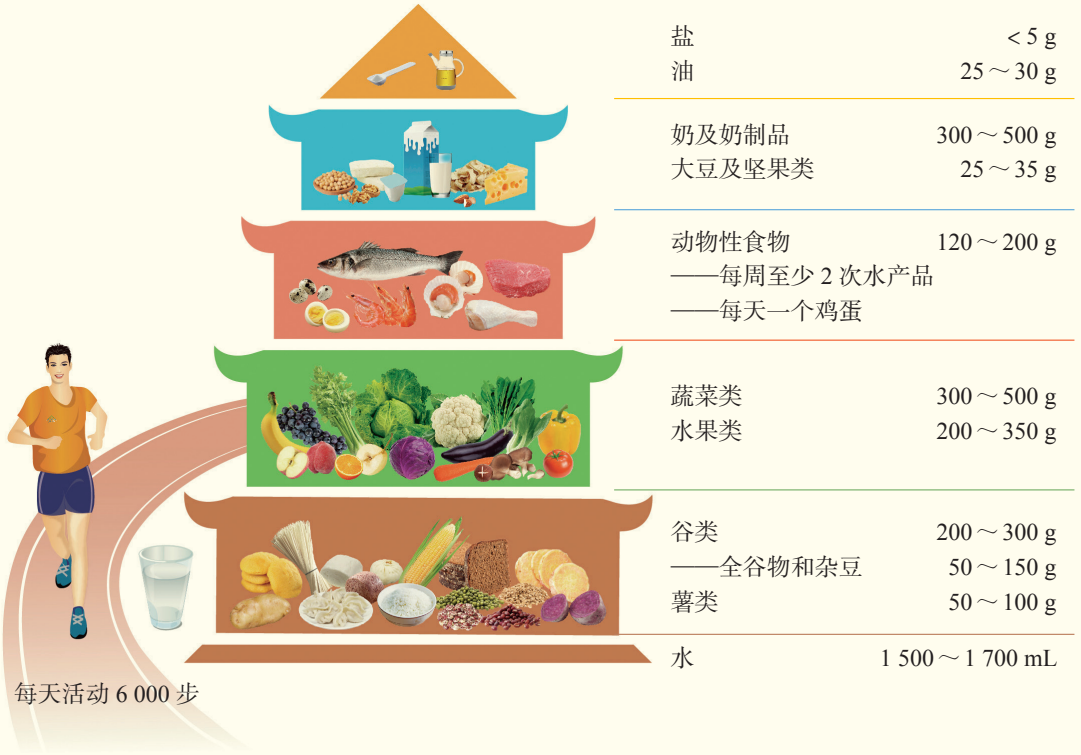


图 7.39　中国居民平衡膳食宝塔（2022）[①]

① 资料来源：中国营养学会。



学习指南

练习巩固

1. 下列说法中，正确的是（　　）。

（A）油和脂肪是同系物

（B）油和脂肪同属于酯类物质

（C）油和脂肪都具有烯烃的一些化学性质

（D）相同碳原子数的油和脂肪是同分异构体

2. 某有机化合物燃烧后，产物中有 CO_2、H_2O、SO_2，由此可以推断该有机化合物中一定含有的元素有（　　）。

（A）H、C、O　　（B）H、C、S

（C）C、O、S　　（D）H、C、O、S

3. 将尿糖试纸浸入人的尿液中，若发现试纸呈棕红色，说明尿液中含有（　　）。

（A）食盐　　（B）酒精　　（C）尿素　　（D）葡萄糖

4. 欲将蛋白质从水溶液中析出而又不改变它的性质应加入（　　）。

（A）烧碱溶液　　（B）$CuSO_4$ 溶液

（C）饱和 Na_2SO_4 溶液　　（D）浓硫酸

5. 葡萄糖在人体组织中进行氧化反应，放出热量，以供应人体所需要的能量。

$$C_6H_{12}O_6\,(s) + 6O_2\,(g) \longrightarrow 6CO_2\,(g) + 6H_2O\,(l)$$

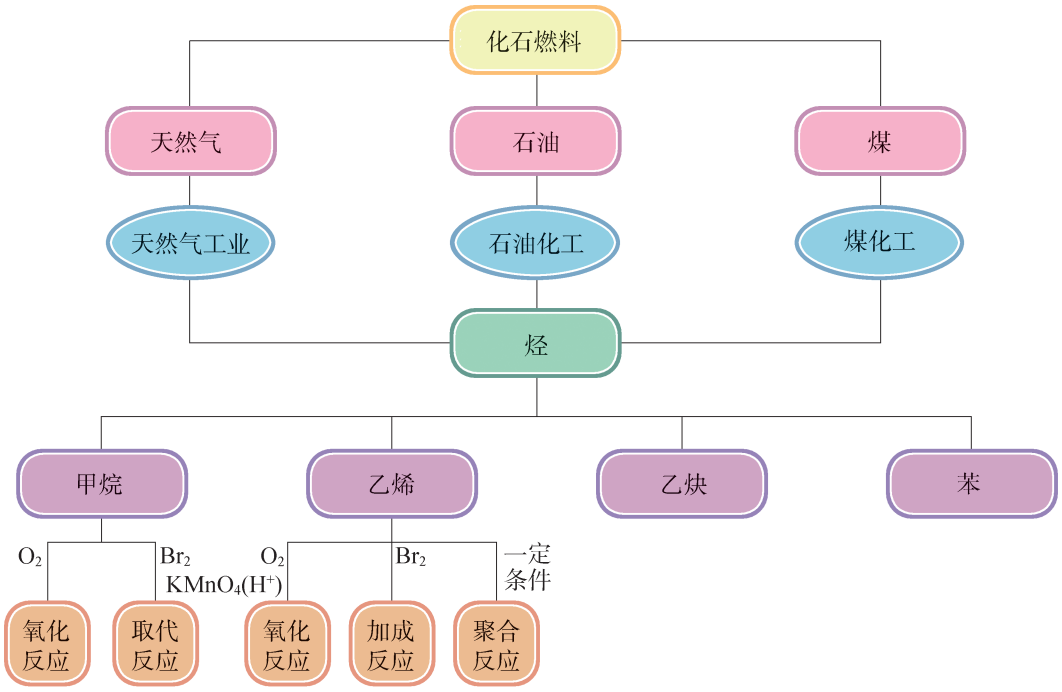
1 mol 葡萄糖完全氧化，放出约 2 804 kJ 的热量。有一瓶 500 mL 溶质质量分数为 5% 的葡萄糖注射液，其中的葡萄糖完全氧化后能为人体带来多少千焦的热量？（所需的数据可由你自行假设或测量）

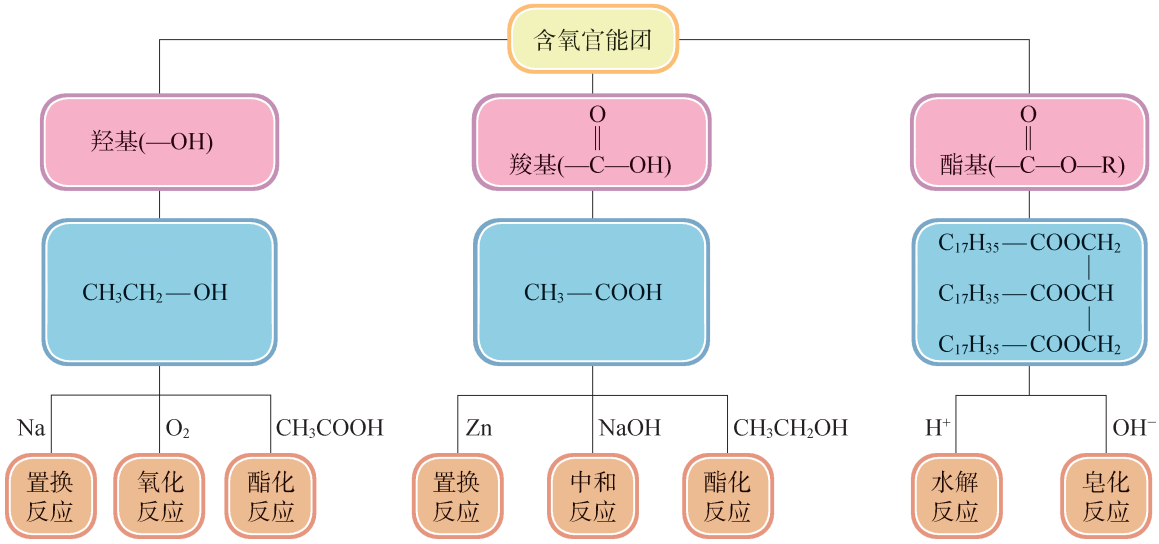
本章复习

素养提升

- 从分子水平认识烷烃、乙烯、乙炔、苯等有机化合物中碳原子的成键特点，以乙醇、乙酸、乙酸乙酯为例认识有机化合物中的官能团，以及官能团与性质的关系；能对有机化合物进行简单的分类；从微观角度理解同分异构现象是造成有机化合物数量庞大的重要原因之一。
- 能从有机反应的特征来了解其副反应较多的原因，知道有机反应需要在一定的条件下进行，有机化合物之间可以相互转化；会运用立体模型、结构式等化学语言来表示有机化合物及其化学变化。
- 建立对有机分子结构的一些基本认识，包括：符合碳四价原则，多种成键类型，成键原子可以是碳原子之间、碳氢原子之间以及碳杂原子之间，碳骨架可以是链状也可以是环状，有机分子是有立体结构的等。
- 能根据糖类、油脂、蛋白质等有机化合物的主要性质，分析糖类、油脂、蛋白质等有机化合物在生产、生活中的重要应用；通过天然气、石油、煤等自然资源的综合利用，形成保护环境、合理利用自然资源和可持续发展的观念。

核心框图


化石燃料
天然气
石油
煤
天然气工业
石油化工
煤化工
烃
甲烷
乙烯
乙炔
苯
O_2
Br_2
$KMnO_4(H^+)$
O_2
Br_2
一定条件
氧化反应
取代反应
氧化反应
加成反应
聚合反应


含氧官能团
羟基(—OH)
羧基(—C(=O)—OH)
酯基(—C(=O)—O—R)
$CH_3CH_2—OH$
$CH_3—COOH$
$C_{17}H_{35}—COOCH_2$
$C_{17}H_{35}—COOCH$
$C_{17}H_{35}—COOCH_2$
Na
O_2
CH_3COOH
Zn
NaOH
CH_3CH_2OH
H^+
OH^-
置换反应
氧化反应
酯化反应
置换反应
中和反应
酯化反应
水解反应
皂化反应

练习巩固

1. 下列物质互为同系物的是（　　）。

（A）C_5H_{12} 和 C_3H_8　　（B）C_2H_4 和 C_3H_8

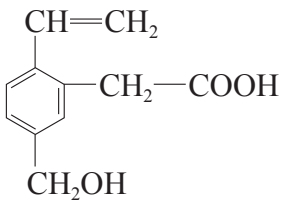
（C）C_2H_2 和 C_6H_6　　（D）C_2H_6O 和 $C_2H_4O_2$

2. 下列物质中，不能使高锰酸钾的酸性溶液褪色的是（　　）。

（A）乙炔　　（B）乙烯

（C）乙酸　　（D）亚硫酸钠溶液

3. 某有机化合物的结构如图所示。官能团会决定有机化合物的化学特性，这种有机化合物中含有多种官能团，其不可能具有的性质是（　　）。



（第 3 题）

（A）能使 $KMnO_4$ 的酸性溶液褪色

（B）能发生酯化反应

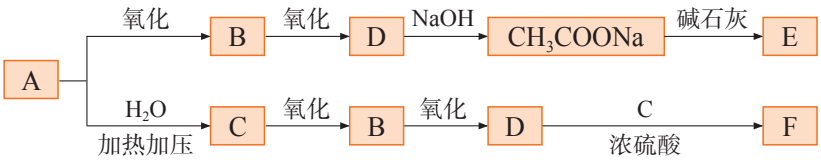
（C）能和 NaOH 溶液反应

（D）能发生水解反应

4. 氨基酸分子形成的肽键中含有的共价单键是（　　）。

（A）碳碳键　　（B）碳氧键　　（C）碳氮键　　（D）碳氢键

5. 烃 A 是丁烷裂解后得到的一种产物，能发生如图所示的化学变化。



（第 5 题）

已知 E 是有机化合物中含氢量最大的烃，F 是一种有香味的液体。

试推断各物质的结构简式。

A：_____；B：_____；C：_____；

D：_____；E：_____；F：_____。

*6. 乙烯是石油化工最重要的基础原料，其产量是衡量国家石油化工发展水平的标志。

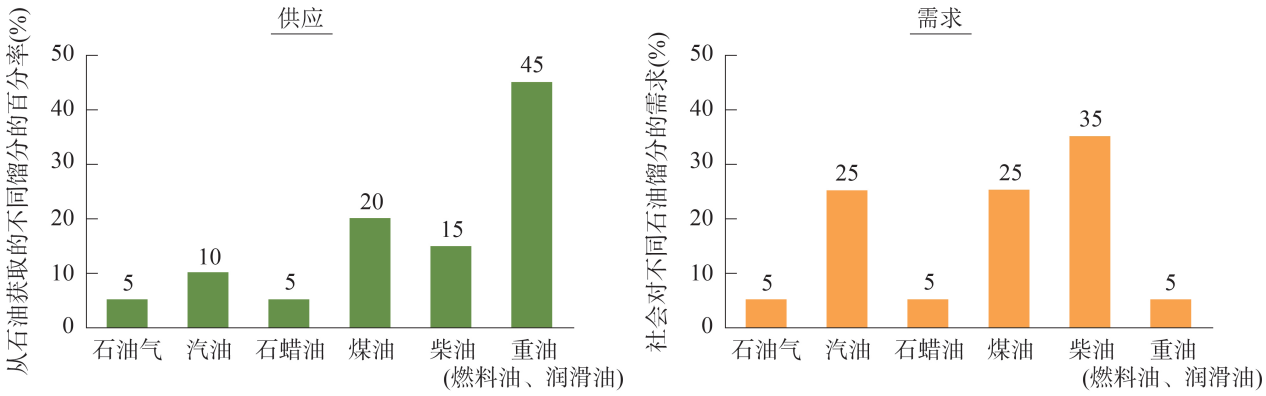
（1）查阅资料了解键能的概念，归纳键能的大小与键的牢固程度、分子稳定性之间的关系。比较下表中的数据，说明乙烯的结构与其化学特性的关系。

物质	乙烷	乙烯
碳碳键的类型	碳碳单键	碳碳双键
键能/（$kJ \cdot mol^{-1}$）	368	682

（2）氯乙烷具有冷冻麻醉作用，从而使局部产生快速镇痛效果。请从下列试剂中选择制备氯乙烷的途径，并说明理由。（可选择的试剂：乙烷、乙烯、氯气、氯化氢）

（3）在水果箱中放入一些用 0.2% 的高锰酸钾溶液浸泡过的纸，封严水果箱，能延长水果的保质期。查阅资料，并说明其中的化学原理。

7. 下图分别反映了一些石油馏分在当今社会的供应和需求状况。读图后回答下列问题。



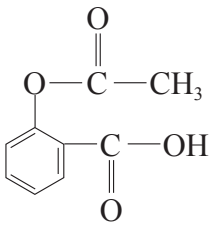
（第 7 题）

（1）简述石油分馏的主要原理。

（2）哪些馏分的需求明显大于供给？哪些馏分的供给远超过需求？并解释。若供给与需求不一致怎么办呢？

（3）汽油和柴油相比，哪一馏分的沸点范围更高？为什么？

8. 阿司匹林是医药史上的经典药物，发明至今已有百年历史，它的结构如图所示。



（第 8 题）

（1）写出阿司匹林的分子式。

（2）圈画出阿司匹林分子中的官能团。

（3）若阿司匹林是制备的目标分子，你会选择哪些有机原料来合成？

9. 工业上可用苹果酒或葡萄酒混合谷物、麦芽、米或马铃薯，捣碎后发酵生产乙酸。涉及的主要反应是：

$$C_2H_5OH + O_2 \xrightarrow{\text{细菌}} CH_3COOH + H_2O$$

（1）除制乙酸外，再列举出乙醇的不同用途。

（2）从绿色化学角度，写出上述过程的一个不足之处。

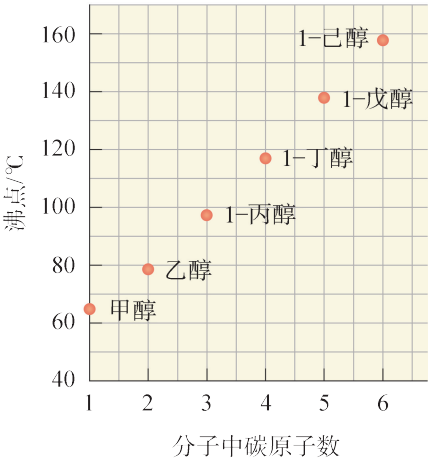
（3）虽然上述过程存在不足，但仍是最常用于生产乙酸的方法，请说明原因。

*10. 阅读图，回答下列问题。

（1）图中的各种醇互为什么关系？它们是否具有相同的化学通式？

（2）醇分子中的碳原子数是如何影响其沸点的？

（3）1-丁醇（$CH_3—CH_2—CH_2—CH_2OH$）有一种同分异构体2-甲基-1-丙醇（$CH_3—\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}—CH_2OH$）的沸点是108 ℃，醇分子中的支链与其沸点是否存在联系？若存在，是什么联系？如何证实？



（第10题）

*11. 阅读短文，思考下列问题。

Halogenated aliphatic hydrocarbons have been added to the natural environment in steadily increasing amounts over several decades as a consequence of their growing use, chiefly as aerosol propellants and as refrigerants. Two chlorofluoromethanes, CF_2Cl_2 and $CFCl_3$, have been detected throughout the troposphere in amounts (about 10 and 6 parts per 10^{11} by volume, respectively) roughly corresponding to the integrated world industrial production to date. The most important sink for atmospheric $CFCl_3$ and CF_2Cl_2 seems to be stratospheric photolytic dissociation to $CFCl_2$+Cl and to CF_2Cl+Cl, respectively, at altitudes of 20−40 km. Each of the reactions creates two odd-electron species-one Cl atom and one free radical. The dissociated chlorofluoromethanes can be traced to their ultimate sinks. An extensive catalytic chain reaction leading to the net destruction of O_3 and O occurs in the stratosphere:

$$Cl + O_3 \longrightarrow ClO + O_2 \qquad ①$$

$$ClO + O \longrightarrow Cl + O_2 \qquad ②$$

This has important chemical consequences. Under most conditions in the Earth's atmospheric ozone layer, ② is the slower of the reactions because there is a much lower concentration of O than of O_3.

（短文取自：Mario J. Molina, F. S. Rowland. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone [J]. Nature, 1974, 249: 810 ～ 812.）

（1）How many ways do you think can the substances such as CF_2Cl_2 and CH_3CHF_2 be obtained among the organic reactions which you have learnt?

（2）What do Ozone Depleting Substances (ODS) mainly consist of and what are the main causes of ozone-depletion?

（3）In your opinion, what measures have been or being adopted by people to reduce the depletion of ozone layer?

体验 · 分享

在下列选题中，开展文献、调查、实验等研究，并将成果和体会制作成海报、演示文稿，进行分享和交流。

- 常见的酒、醋、酱油等通常是用粮食发酵酿制而成的。《齐民要术》是我国完整保存至今的最早一部农书，对传统的酿造方法有较详细的叙述。我国古人在认识与分离物质、合成物质、制造材料等方面的探索成果，为人类的科技进步和文明发展做出了重要贡献。试分析古人在酿酒的过程中，有机化合物的转化路径是怎样的。请查阅我国酿酒工艺的相关资料，回顾我国食品酿造的悠久历史，了解传统文化和科学技术的联系。
- 我们身边有各种烷烃及其制品。例如，打火机里燃油的主要成分是丁烷，加油站里汽油、柴油等油品是烷烃等的混合物。在 2 mL 汽油、2 mL 煤油中分别加入 1 mL 植物油，振荡后观察现象，汽油、煤油跟植物油互溶了吗？汽油和煤油还能溶解哪些物质？试解释汽油为什么能去除衣物上的油渍。
- 收集保鲜膜、塑料袋、饮料瓶等身边的塑料制品，列表记录和整理这些塑料的标识和特性（包括颜色、透明度、弹性、硬度等）。你知道这些标识吗？你能识别不同塑料吗？你能设计实验来比较不同塑料遇热软化的难易程度吗？
- 我们正在推进美丽中国建设，统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。查询历史上因燃烧化石燃料引起的重大环境污染事件；关注清洁能源（如氢能源）的最新研究进展；展开垃圾焚烧、PX（对二甲苯）事件等社会性议题的讨论；了解我国在防治大气污染方面所采取的举措。
- 尝试用 Chemsketch 等计算机软件来制作烃类、乙醇、乙酸、硬脂酸甘油酯等分子的立体模型。
- 目前，我国是石油消耗大国。了解我国主要油田的分布及其类型；了解现代石油开采技术；走访位于上海市金山区的上海石油化工股份有限公司厂区，认识现代炼油技术。历史上，我国被认为是贫油国家，李四光是我国著名的地质学家，为中国石油的勘探和开发做出重大贡献，被评为“100 位新中国成立以来感动中国人物”，学习李四光的生平事迹。
- 有人说：塑料是人类社会最伟大的发明之一。也有人说：塑料是一项糟糕的发明。为什么会有这两种截然不同的论点？对此你怎么看？你能收集足够的证据来佐证你的观点吗？

项目学习活动

如何利用数据库探究有机分子的空间结构

我们知道，甲烷分子的空间结构是正四面体，其中任意两个 C—H 键的夹角为 109°28′（约 109.5°）。当 CH_4 分子中的氢原子被卤原子（F、Cl、Br 或 I）取代后，其分子的空间结构会发生改变吗？我们如何利用数据库来探究有机分子的空间结构呢？

➢ 活动目标

（1）了解通过数据库获取有机化合物各种性质数据的方法。

（2）学会运用数据来分析卤原子对有机分子结构的影响。

（3）学会用控制变量法来分析和比较所获取的数据。

➢ 活动指导

（1）化学化工数据库

化学化工数据库是指与化学、化工有关且经常需要检索、运算和利用的信息，按一定方式组织成有序的计算机可读文件，可分为文献数据库和事实数据库。

文献数据库将期刊、论文、报告、专利、图书等各种原始文献经过分析整理、存入计算机，包括书目数据、文摘数据和原始文献数据等，用户通过检索可获所需的情报信息及其来源。

事实数据库中使用较多的是数值数据库和图像数据库。例如，通过物质的化学、物理化学和安全毒性性能数据库，可获取某一物质的各种性质数据，也可从性质数据来判定化学物质；通过化学工程和化工材料数据库，可查取有关化工参数和材料性能等信息；通过化学结构等图像数据库，可根据化学结构或其分子结构来检索有关数据。

（2）查阅数据库获得键角数据

分子中键和键之间的夹角称为键角，键角是反映分子空间几何结构的重要参数。目前，有许多数据库可以查阅键角数据，但对于同一参数，不同数据库给出的数据可能略有不同，我们在选择数据时应注意数据的发表时间，作者或组织的权威性，获得数据的方法，以及是否经过引证等问题。

我们可以在数据库的众多参数中选择键角的链接，再选择键角中涉及的相关原子，就可找到目标分子中该键角的相关数据。例如，在某数据库里查找 CH_3F 分子中 H—C—F 键角，在界面中依次选择几何构型→键角→ HCF，便可找到目标分子 CH_3F 中 H—C—F 键角为 108.73°。

aHCF	$C_2H_4F_2$	1,2-difluoroethane	108.20	
aHCF	CH_3CHF_2	Ethane, 1,1-difluoro-	108.50	
aHCF	CH_3F	Methyl fluoride	108.73	From symmetry
aHCF	CHFClBr	fluorochlorobromomethane	108.80	fixed
aHCF	CH_2F_2	Methane, difluoro-	108.87	by symmetry

图 7.40　CH_3F 中 H—C—F 的键角

（3）利用模拟软件获取键角

通过模拟软件研究者可搭建目标分子的球棍模型，直观地观察到分子的空间结构，同时可以检索出目标分子的各种物理参数。例如，测定 CH_3F 分子中 H—C—F 键角，在模拟软件中先搭建出 CH_3F 分子的球棍模型，然后选择键角数据，软件会自动获取该结构中各个键角的数据，并将结果呈现出来。

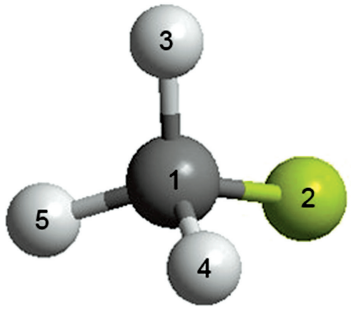


图 7.41　CH_3F 分子的球棍模型

	Display	Atoms	Actual (° / ?)	Optimal (° / ?)
1	☐	H(5)-C(1)-H(4)	109.520	109.000
2	☐	H(5)-C(1)-H(3)	109.462	109.000
3	☐	H(5)-C(1)-F(2)	109.462	
4	☐	H(4)-C(1)-H(3)	109.442	109.000
5	☐	H(4)-C(1)-F(2)	109.442	
6	☐	H(3)-C(1)-F(2)	109.500	

图 7.42　CH_3F 分子中的各种键角

（4）探究 CH_4 分子被卤代后分子中键角的变化

通过数据库和模拟软件，分别获取甲烷的一卤代物：CH_3X（X=F、Cl、Br 和 I）、二卤代物 CH_2X_2（X=F、Cl、Br 和 I）、三卤代物 CHX_3（X=F、Cl、Br 和 I）和四卤代物 CX_4（X=F、Cl、Br 和 I）中所有的键角，并设计表格记录数据。

（5）在数据处理中注意控制变量

在科学研究中，通过实验或理论计算会获得大量数据，如何将这些数据进行科学的处理？对于多变量的问题，常常采用控制变量的方法，即每次只改变其中的某一个变量，而控制其余变量不变，从而研究被改变的那个因素对事物的影响。控制变量是科学探究中的重要方法，被广泛地运用于各种科学研究之中。

你的探究课题的结果如何？通过数据库和模拟软件所得数据是否一致？是否可利用控制变量法来比较所检索的数据？

➢ 活动要求

完成你的项目活动，并形成一份项目报告。在报告中介绍你获得键角的方法，简单的活动流程，记录和分析数据，并总结归纳卤原子对键角的影响规律，最终总结项目学习活动的心得。

➢ 活动反思

（1）通过查阅数据库，运用物质结构的相关知识，解释卤原子为何会对有机分子的结构产生影响，并尝试探究影响有机分子空间结构的因素。

（2）很多数据库都能查询有关物质的理化参数，因此选择合适的数据库显得尤为重要，那么我们应该如何科学地衡量各种数据库的优缺点呢？（建议从数据的时效性、原创性、可靠性、精准性、目的性等方面来衡量）

（3）除了研究键角之外，还有哪些研究项目可以通过查阅数据库或模拟软件的方式来进行？请思考一个利用数据库或模拟软件开展研究的项目，以“探究 ××× 对 ××× 的影响”为题展开研究，并完成一份项目报告。（项目报告建议包括：获得数据的方法、简单的操作流程、数据记录与处理等）

附　录

Ⅰ　化学词汇中英文对照表

中文	英文	中文	英文
苯	benzene	糖类	saccharide
催化剂	catalyst	铁	ferrum
蛋白质	protein	烃	hydrocarbon
放热反应	exothermic reaction	烃的衍生物	hydrocarbon derivative
官能团	functional group	同分异构体	isomer
过氧化钠	sodium peroxide	同分异构现象	isomerism
化学反应速率	chemical reaction rate	同系物	homolog
化学平衡	chemical equilibrium	烷烃	alkane
加成	addition	吸热反应	endothermic reaction
甲烷	methane	蓄电池	storage battery
接触法	contact process	氧化钠	sodium oxide
聚合	polymerization	氧化铁	ferric oxide
可逆反应	reversible reaction	乙醇	ethanol
绿色化学	green chemistry	乙炔	acetylene
钠	sodium	乙酸	acetic acid
能源化学	energy chemistry	乙烯	ethylene
氢氧化铁	ferric hydroxide	油脂	oil and fat
氢氧化亚铁	ferrous hydroxide	有机化合物	organic compound
取代	substitution	有机化学	organic chemistry
燃料电池	fuel cell	原电池	primary battery
碳酸钠	sodium carbonate	酯化	esterification
碳酸氢钠	sodium bicarbonate		

Ⅱ　学生必做实验索引

学生必做实验	实验名称	页码
铁及其化合物的性质	氢氧化铁和氢氧化亚铁的制备	15
	Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 性质的探究	20
化学能转化为电能	铜–锌原电池	26
化学反应速率的影响因素	影响化学反应速率的因素	43
搭建球棍模型认识有机化合物分子结构的特点	制作甲烷等分子空间结构的模型	72
乙醇、乙酸的主要性质	乙醇、水与钠反应的实验对比	92
	乙醇的催化氧化	93
	乙酸的化学性质	95

Ⅲ 元素周期表

族 / 周期	ⅠA 1	ⅡA 2	ⅢB 3	ⅣB 4	ⅤB 5	ⅥB 6	ⅦB 7	Ⅷ 8	Ⅷ 9	Ⅷ 10	ⅠB 11	ⅡB 12	ⅢA 13	ⅣA 14	ⅤA 15	ⅥA 16	ⅦA 17	0 18	电子层	0族电子数
1	1 H 氢 $1s^1$ 1.008																	2 He 氦 $1s^2$ 4.003	K	2
2	3 Li 锂 $2s^1$ 6.94	4 Be 铍 $2s^2$ 9.012											5 B 硼 $2s^22p^1$ 10.81	6 C 碳 $2s^22p^2$ 12.01	7 N 氮 $2s^22p^3$ 14.01	8 O 氧 $2s^22p^4$ 16.00	9 F 氟 $2s^22p^5$ 19.00	10 Ne 氖 $2s^22p^6$ 20.18	L K	8 2
3	11 Na 钠 $3s^1$ 22.99	12 Mg 镁 $3s^2$ 24.31											13 Al 铝 $3s^23p^1$ 26.98	14 Si 硅 $3s^23p^2$ 28.09	15 P 磷 $3s^23p^3$ 30.97	16 S 硫 $3s^23p^4$ 32.06	17 Cl 氯 $3s^23p^5$ 35.45	18 Ar 氩 $3s^23p^6$ 39.95	M L K	8 8 2
4	19 K 钾 $4s^1$ 39.10	20 Ca 钙 $4s^2$ 40.08	21 Sc 钪 $3d^14s^2$ 44.96	22 Ti 钛 $3d^24s^2$ 47.87	23 V 钒 $3d^34s^2$ 50.94	24 Cr 铬 $3d^54s^1$ 52.00	25 Mn 锰 $3d^54s^2$ 54.94	26 Fe 铁 $3d^64s^2$ 55.85	27 Co 钴 $3d^74s^2$ 58.93	28 Ni 镍 $3d^84s^2$ 58.69	29 Cu 铜 $3d^{10}4s^1$ 63.55	30 Zn 锌 $3d^{10}4s^2$ 65.38	31 Ga 镓 $4s^24p^1$ 69.72	32 Ge 锗 $4s^24p^2$ 72.63	33 As 砷 $4s^24p^3$ 74.92	34 Se 硒 $4s^24p^4$ 78.97	35 Br 溴 $4s^24p^5$ 79.90	36 Kr 氪 $4s^24p^6$ 83.80	N M L K	8 18 8 2
5	37 Rb 铷 $5s^1$ 85.47	38 Sr 锶 $5s^2$ 87.62	39 Y 钇 $4d^15s^2$ 88.91	40 Zr 锆 $4d^25s^2$ 91.22	41 Nb 铌 $4d^45s^1$ 92.91	42 Mo 钼 $4d^55s^1$ 95.95	43 Tc 锝 $4d^55s^2$ 〔97〕	44 Ru 钌 $4d^75s^1$ 101.1	45 Rh 铑 $4d^85s^1$ 102.9	46 Pd 钯 $4d^{10}$ 106.4	47 Ag 银 $4d^{10}5s^1$ 107.9	48 Cd 镉 $4d^{10}5s^2$ 112.4	49 In 铟 $5s^25p^1$ 114.8	50 Sn 锡 $5s^25p^2$ 118.7	51 Sb 锑 $5s^25p^3$ 121.8	52 Te 碲 $5s^25p^4$ 127.6	53 I 碘 $5s^25p^5$ 126.9	54 Xe 氙 $5s^25p^6$ 131.3	O N M L K	8 18 18 8 2
6	55 Cs 铯 $6s^1$ 132.9	56 Ba 钡 $6s^2$ 137.3	57~71 La~Lu 镧系	72 Hf 铪 $5d^26s^2$ 178.5	73 Ta 钽 $5d^36s^2$ 181.0	74 W 钨 $5d^46s^2$ 183.8	75 Re 铼 $5d^56s^2$ 186.2	76 Os 锇 $5d^66s^2$ 190.2	77 Ir 铱 $5d^76s^2$ 192.2	78 Pt 铂 $5d^96s^1$ 195.1	79 Au 金 $5d^{10}6s^1$ 197.0	80 Hg 汞 $5d^{10}6s^2$ 200.6	81 Tl 铊 $6s^26p^1$ 204.4	82 Pb 铅 $6s^26p^2$ 207.2	83 Bi 铋 $6s^26p^3$ 209.0	84 Po 钋 $6s^26p^4$ 〔209〕	85 At 砹 $6s^26p^5$ 〔210〕	86 Rn 氡 $6s^26p^6$ 〔222〕	P O N M L K	8 18 32 18 8 2
7	87 Fr 钫 $7s^1$ 〔223〕	88 Ra 镭 $7s^2$ 〔226〕	89~103 Ac~Lr 锕系	104 Rf 𬬭* $(6d^27s^2)$ 〔267〕	105 Db 𬭊* $(6d^37s^2)$ 〔268〕	106 Sg 𬭳* 〔269〕	107 Bh 𬭛* 〔270〕	108 Hs 𬭶* 〔269〕	109 Mt 鿏* 〔277〕	110 Ds 𫟼* 〔281〕	111 Rg 𬬭* 〔282〕	112 Cn 鿔* 〔285〕	113 Nh 鉨* 〔286〕	114 Fl 𫓧* 〔290〕	115 Mc 镆* 〔290〕	116 Lv 𫟷* 〔293〕	117 Ts 𫓬* 〔294〕	118 Og 𫟪* 〔294〕	Q P O N M L K	8 18 32 32 18 8 2

原子序数 — 92 U — 元素符号，红色指放射性元素

元素名称，注 * 的是人造元素 — 铀

价层电子排布，括号指可能的电子排布 — $5f^36d^17s^2$

相对原子质量（加括号的数据为该放射性元素半衰期最长同位素的质量数） — 238.0

过渡元素

镧系	57 La 镧 $5d^16s^2$ 138.9	58 Ce 铈 $4f^15d^16s^2$ 140.1	59 Pr 镨 $4f^36s^2$ 140.9	60 Nd 钕 $4f^46s^2$ 144.2	61 Pm 钷 $4f^56s^2$ 〔145〕	62 Sm 钐 $4f^66s^2$ 150.4	63 Eu 铕 $4f^76s^2$ 152.0	64 Gd 钆 $4f^75d^16s^2$ 157.3	65 Tb 铽 $4f^96s^2$ 158.9	66 Dy 镝 $4f^{10}6s^2$ 162.5	67 Ho 钬 $4f^{11}6s^2$ 164.9	68 Er 铒 $4f^{12}6s^2$ 167.3	69 Tm 铥 $4f^{13}6s^2$ 168.9	70 Yb 镱 $4f^{14}6s^2$ 173.1	71 Lu 镥 $4f^{14}5d^16s^2$ 175.0
锕系	89 Ac 锕 $6d^17s^2$ 〔227〕	90 Th 钍 $6d^27s^2$ 232.0	91 Pa 镤 $5f^26d^17s^2$ 231.0	92 U 铀 $5f^36d^17s^2$ 238.0	93 Np 镎 $5f^46d^17s^2$ 〔237〕	94 Pu 钚 $5f^67s^2$ 〔244〕	95 Am 镅* $5f^77s^2$ 〔243〕	96 Cm 锔* $5f^76d^17s^2$ 〔247〕	97 Bk 锫* $5f^97s^2$ 〔247〕	98 Cf 锎* $5f^{10}7s^2$ 〔251〕	99 Es 锿* $5f^{11}7s^2$ 〔252〕	100 Fm 镄* $5f^{12}7s^2$ 〔257〕	101 Md 钔* $(5f^{13}7s^2)$ 〔258〕	102 No 锘* $(5f^{14}7s^2)$ 〔259〕	103 Lr 铹* $(5f^{14}6d^17s^2)$ 〔262〕

后　记

本册教材根据教育部颁布的《普通高中化学课程标准（2017 年版 2020 年修订）》编写并经国家教材委员会专家委员会审核通过。

编写过程中，上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会专家工作委员会，上海市教育委员会教学研究室，上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地及基地所在单位华东师范大学，上海市化学教育教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。复旦大学化学实验教学示范中心为本册教材中化学实验的验证和拍摄提供支持。许多专家和社会各界朋友十分关心并提出很多意见和建议。在此一并表示诚挚的敬意！

本册教材出版之前，我们就教材中使用的照片、图片等选用作品，通过多种途径与作者进行了联系，得到了他们的大力支持，在此表示衷心的感谢！对于未联系到的作者，我们也希望作者能及时联系出版社，以便出版社支付相应的稿酬。

欢迎广大师生来电来函指出教材的差错和不足，提出宝贵意见，我们将不断修订，使教材趋于完善。

2020 年 5 月

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由视觉中国、IC photo、中国全球图片总汇［第 6 章章首图（反面）、图 7.16、图 7.26］、郑宪章（第 6 章章首图）等提供。

化学

HUA XUE

必修

第二册

ISBN 978-7-5478-5222-4

绿色印刷产品