



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Organic Synthesis Unit Reaction
有机合成单元反应

李晓芳 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

有机合成单元反应

李晓芳 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

有机合成单元反应 / 李晓芳编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2020. 12
ISBN 978 - 7 - 5682 - 9315 - 0

I. ①有… II. ①李… III. ①有机合成 IV. ①O621. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 244180 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 12.75

字 数 / 300 千字

版 次 / 2020 年 12 月第 1 版 2020 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 68.00 元

责任编辑 / 刘 派

文案编辑 / 李丁一

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前

言

有机合成单元反应是有机化学的核心，有机合成的基础需要各式各样的基元反应，因此，发展新反应，采用新试剂与新合成技术已成为发展有机合成的重要途径。

纵观有机化学近年来的发展，我们通过对相关文献及书籍的整理、归纳及总结，比较全面地编写了一本反映有机合成单元反应现状的新教材。

本书主要介绍了有机合成中自由基试剂、亲核试剂、亲电试剂等参与的有机合成的几个方面以及金属有机化学简史。第一章主要介绍了自由基试剂参与的有机反应，包括自由基试剂的分类及其参与的加成、取代、重排和氧化还原反应。第二章主要介绍了亲核试剂参与的有机反应，包括脂肪类碳原子参与的亲核反应、碳杂原子多重键参与的亲核反应及芳香亲核试剂参与的亲核反应。第三章主要介绍了亲电试剂参与的有机反应，包括烯烃、炔烃和共轭烯烃参与的亲电反应，芳香类亲电试剂参与的有机反应以及亲电试剂参与的重排反应。第四章主要介绍了金属有机试剂参与的有机反应，包括主族金属有机试剂和过渡金属有机试剂参与的有机反应。通过上述的编排有利于反映它们的共性以及特性，进而有利于我们了解、学习及掌握相关的内容。

本书在编写过程中得到了北京理工大学出版社策划编辑刘兴春及李丁一所给予的关心、支持和帮助，感谢他们对本书的顺利出版所做的大量工作。

参与本书编写的有宋闯、刘豪、徐欢、武晓林等，感谢他们为本书编写所做出的贡献，全书由李晓芳统稿和定稿。

本书在编写的过程中广泛阅读和参考了国内外有关的书籍、论文及研究成果，通过整体的归纳、总结、筛选和整理，使得本书更具系统性、实用性和先进性。整体连贯叙述性强，并且引用了部分原始的

论文、评论及专著，使学生开阔视野和更加深入的学习。这些参考在书中均有标注，在此向上述有关作者表示衷心的感谢。

由于有机合成单元反应的发展十分迅速，而且内容丰富具有多样性，加上作者水平有限，书中难免会有一些漏洞和疏忽，敬请批评指正。

目 录

CONTENTS

第一章 自由基参与的有机反应	(1)
1.1 自由基加成反应	(2)
1.1.1 烯烃的自由基加成	(3)
1.1.2 炔烃的自由基加成	(3)
1.1.3 自由基聚合	(4)
1.2 自由基取代反应	(5)
1.2.1 饱和烷烃的自由基取代	(5)
1.2.2 芳香族的自由基取代	(9)
1.3 自由基重排反应	(10)
1.3.1 桥式自由基	(10)
1.3.2 芳基的1,2-迁移	(12)
1.3.3 卤素迁移	(12)
1.3.4 高-烯丙基自由基重排	(14)
1.3.5 自由基链1,3-迁移	(14)
1.3.6 其他重排反应	(14)
1.4 自由基氧化	(15)
1.5 自由基还原	(16)
1.5.1 脱羧反应	(16)
1.5.2 单分子还原	(18)
1.5.3 双分子还原	(19)
1.5.4 其他还原反应	(20)
参考文献	(20)

第二章 亲电试剂参与的有机反应	(23)
2.1 亲电试剂	(23)
2.2 亲电加成反应	(23)
2.2.1 烯烃的亲电加成反应	(24)
2.2.2 炔烃的亲电加成	(31)
2.2.3 共轭烯烃的亲电加成	(33)
2.2.4 亲电环化反应	(33)
2.3 芳香亲电取代反应	(36)
2.3.1 芳香环亲电取代反应	(37)
2.3.2 芳香杂环亲电取代反应	(47)
2.3.3 其他亲电取代反应	(49)
2.4 重排反应	(53)
2.4.1 亲电重排反应	(54)
2.4.2 其他重排反应	(57)
参考文献	(58)
第三章 亲核试剂的亲核反应	(63)
3.1 脂肪碳原子的亲核取代反应	(63)
3.1.1 氧亲核试剂的反应	(63)
3.1.2 硫亲核试剂的反应	(66)
3.1.3 氮亲核试剂的反应	(68)
3.1.4 卤素亲核试剂的反应	(73)
3.1.5 碳亲核试剂的反应	(77)
3.2 芳香碳原子亲核取代反应	(83)
3.2.1 氧亲核试剂的反应	(83)
3.2.2 硫亲核试剂的反应	(86)
3.2.3 氮亲核试剂的反应	(87)
3.2.4 卤素亲核试剂的反应	(88)
3.2.5 碳亲核试剂的反应	(90)
3.3 碳氧双键的亲核加成反应	(91)
3.3.1 羰基的亲核加成反应	(91)
3.3.2 α , β -不饱和醛、酮的加成反应	(102)
3.3.3 醛、酮 α 活泼氢的反应	(107)
3.3.4 醛、酮的缩合反应	(109)

3.3.5 醛、酮的重排反应	(116)
3.4 碳-杂原子双键的亲核取代反应	(122)
3.4.1 羧酸的亲核取代反应	(122)
3.4.2 羧酸衍生物的亲核取代反应	(131)
3.4.3 碳氮双键的水解反应	(138)
参考文献	(140)
第四章 金属有机试剂参与的有机反应	(143)
4.1 金属有机试剂的发展史	(143)
4.2 金属有机试剂基本结构和性质	(144)
4.2.1 中心金属的氧化态及配位数	(144)
4.2.2 18 电子规则	(145)
4.3 金属有机试剂中的配体	(146)
4.3.1 有机配体的齿合度	(146)
4.3.2 配体的类型与电子数	(147)
4.4 金属有机试剂成键的基本性质	(148)
4.5 主族金属有机试剂参与的有机反应	(149)
4.5.1 格式试剂参与的有机反应	(149)
4.5.2 Wittig 试剂参与的有机反应	(151)
4.5.3 硼氢化试剂参与的有机反应	(152)
4.6 过渡金属有机试剂参与的有机反应	(153)
4.7 1963 年诺贝尔化学奖简介—齐格勒-纳塔型催化剂	(153)
4.7.1 1963 年齐格勒-纳塔催化剂	(153)
4.7.2 齐格勒纳塔催化剂的发展	(154)
4.8 1973 年诺贝尔化学奖简介—二茂铁	(155)
4.9 2000 年诺贝尔化学奖—导电高分子	(158)
4.9.1 导电聚乙炔	(158)
4.9.2 导电高分子发展历史	(159)
4.10 2001 年诺贝尔化学奖——不对称催化	(161)
4.10.1 手性催化氢化反应	(161)
4.10.2 手性催化氧化反应	(164)
4.11 2005 年诺贝尔化学奖——烯烃的复分解反应	(171)
4.11.1 金属卡宾和金属卡拜	(171)
4.11.2 烯烃复分解反应	(173)

4.12 2010 年诺贝尔化学奖—钯催化交叉偶联反应	(176)
4.12.1 过渡金属催化的碳碳键偶联反应	(176)
4.12.2 过渡金属催化的碳杂原子键偶联反应	(188)
4.12.3 钯催化偶联反应总结	(190)
参考文献	(191)

第一章 自由基参与的有机反应

自由基的生成

在一个化学反应中，或在外界（光、热、辐射等）影响下，分子中共价键断裂，使共用电子对变为一方所独占，则生成离子；若分裂的结果使共用电子对分属于两个原子（或基团），则生成自由基。自由基反应涉及具有未配对电子的分子。自由基可以是起始化合物或产物，但自由基通常是反应的中间产物。到目前为止讨论的大多数反应都是涉及极性中间产物以及过渡结构的杂化过程，其中所有电子在整个反应过程中保持成对。

自由基的稳定性

自由基的稳定性，是指与它的母体化合物的稳定性相比较，比母体化合物能量高得多的较不稳定，高得少的相对较稳定。自由基的稳定性与相连的取代基有关，当吸电子取代基和给电子取代基同时存在于自由基位置时，自由基特别稳定，称为“*mero* 稳定”或“*captodative* 稳定”，是两个取代基效应相互加强的结果。烯丙基和苄基等不饱和基团的共轭会对自由基产生稳定作用。这些取代基效应有时会导致协同稳定，烯丙基和苄基自由基也受吸电子基和给电子基的影响，自由基通过共轭、吸电子和给电子基团而稳定。

离甲基越远的越稳定，因为甲基有推电子性，使自由基上电子云密度增大，靠双键越近的越稳定，因为双键电子离域，可以使自由基电子云密度下降，自由基电子云密度越低就越稳定。简单的有机自由基，如甲基自由基、乙基自由基，是在 20 年代通过气相反应证实的。有机自由基作为活泼中间体，是在 20 世纪 30 年代由 D. H. 海伊、W. A. 沃特斯和 M. S. 卡拉施等研究发现的。有机化合物发生化学反应时，总是伴随着一部分共价键的断裂和新的共价键的生成。当共价键发生均裂时，两个成键电子分离，所生成的碎片有一个未成对电子，如 $\text{H}\cdot$ ， $\text{CH}\cdot$ ， $\text{Cl}\cdot$ 等。因为存在未成对电子，自由基和自由原子非常活泼，通常无法分离得到。不过在许多反应中，自由基和自由原子以中间体的形式存在，尽管浓度很低，但停留时间很短。

空间位阻也会影响自由基反应，让我们先考虑一下，当一个自由基的中心连接一个吸电子基时会发生什么，像 $\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{C}\equiv\text{N}$ 这样的基团是吸电子的，因为它们有一个低空的 π^* 轨道。如图 1-1 所示，通过与含有自由基（SOMO）的（通常是 p）轨道重叠，产生两个新的分子轨道。一个电子（旧 SOMO 中的一个）可用于填充两个新的轨道 ALS。它进入了新的 SOMO，它比旧的 SOMO 低，因为电子处于低能量轨道上，自由基变得稳定。

我们可以以类似的方式分析富电子基团如—OR 基团所发生的情况。醚氧原子具有相对高能填充的 n 轨道，它们的孤对电子如图 1-2 与 SOMO 的相互作用又给出了两个新的分子

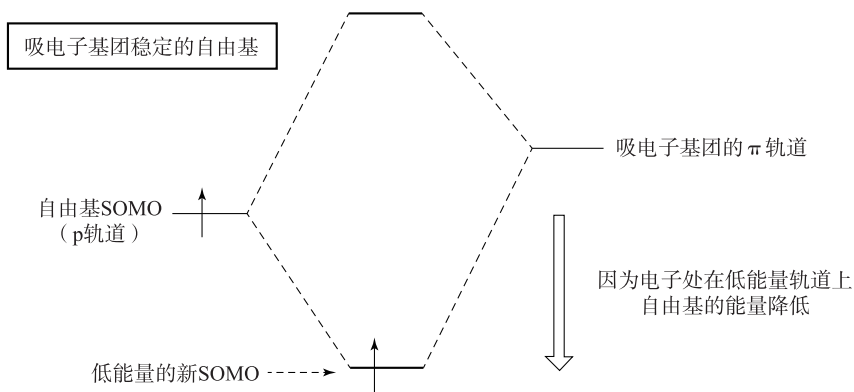


图 1-1 空间位阻对自由基反应影响

轨道。有三个电子可用来填充它们。SOMO 能级现在比开始时高，但是孤对电子能量较低。因为两个电子，虽然新的 SOMO 比旧 SOMO 具有更高的能量，但它的能量已经下降，只有一个上升，系统整体稳定。稍后我们将看到 SOMO 的能量对其反应活性的影响。

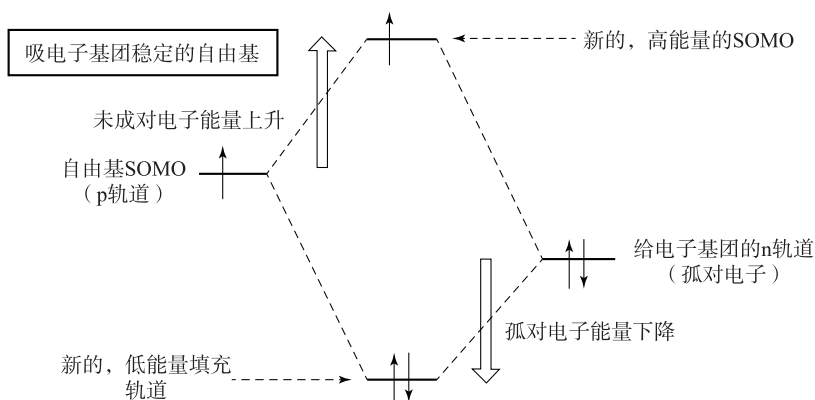


图 1-2 富电子基团对自由基反应影响

自由基的分类

自由基具有很高的活性，可进行多种类型的反应，常见反应类型有自由基取代反应、自由基加成反应、自由基氧化还原反应和自由基重排反应等。

1.1 自由基加成反应

自由基反应的关键步骤是通过自由基加成生成自由基。Br· 自由基是通过 RO· 从 HBr 中提取 H· 而生成的，加成到烯烃中，得到一个新的碳中心自由基，这就是自由基加成机理。值得注意的是，箭头用于指示单个电子的运动。

正如电荷必须通过化学反应守恒一样，所涉及的电子的自旋也必须守恒。如果一个反应物携带一个未配对的电子，那么一个产物也必须如此。加成对自旋配对分子来说，总是会产

生一个新的自由基。因此，自由基加成是一种生成自由基的反应。当将单个电子加入自旋配对分子中时，发生最简单的自由基加成反应。这个过程是还原过程。单电子还原的例子如 Birch 还原，第一主族金属（通常是钠）溶解在液氨时会通过失去一个 s 电子，生成稳定的 M^+ 离子。例如，酮可以与钠反应生成酮基自由基（图 1-3）。

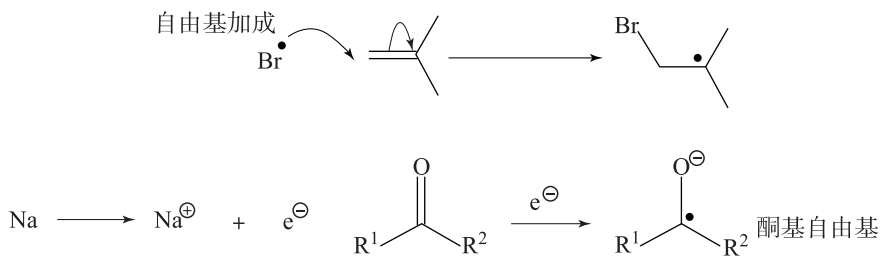
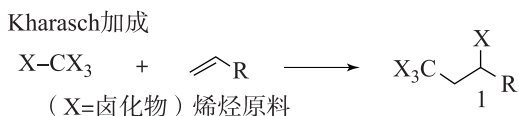


图 1-3 酮基自由基的生成

1.1.1 烯烃的自由基加成

简单烯烃的自由基加成反应可以有效增加分子的复杂度，1945 年，Kharasch 教授发展了多卤甲烷对末端烯烃的加成，该反应在构建新的 C—C 键和 C—X 键的同时可以引入一个 CX₃ 官能团。该反应作为最早发现的自由基反应之一，后来被命名为 Kharasch 加成反应，也称为原子自由基加成反应。多卤甲烷与烯烃的加成反应如下所示：



羰基发生单电子还原可生成羰基阴离子自由基，该物种在参与偶联反应构建 C—C 键时发生极性反转。产生羰基阴离子自由基通常需要使用化学计量的强还原剂（如 Na、K、Ti）来克服羰基化合物的高还原电势。David A. Nagib 等人基于原子转移自由基加成（ATRA）机理，发展了一种中性的氧化还原反应生成自由基的方法。反应中醛类化合物原位转化为 α -乙酰氧基碘，由此降低了其还原电势，能以更温和的条件得到乙酰基修饰的羰基自由基。产生的自由基物种能够与一系列炔类化合物偶联，高选择性地得到 Z 型乙烯基卤化物。

1.1.2 炔烃的自由基加成

炔烃的自由基加成反应在有机合成中有着广泛的应用。加成过程中因为 Kharasch 效应的影响，往往只会得到反马氏的加成产物 [图 1-4 (a)]。如何调节自由基加成位点，实现自由基的马氏选择性加成是一个具有很大挑战的科学问题。

炔烃的自由基加成反应会倾向于生成稳定的自由基中间体，因此优先发生反马氏加成得到更加稳定的 α -烯基碳自由基（相比于 β -烯基碳自由基）。雷爱文课题组利用光氧化还原催化剂催化的方式通过单电子转移生成 α -烯基碳自由基，接着由体系中产生的磺酰自由基与 α -烯基碳自由基交叉偶联得到马氏选择性产物。为了验证反应机理，作者设计了多个控制实验，并使用在线仪器设备监测反应历程。首先，向反应体系中添加自由基抑制剂（TEMPO

及 BHT)，反应过程受到抑制。这一结果说明反应可能经历了自由基过程 [图 1-4 (a)]。此外，加入亚磷酸三乙酯捕获得到 α -烯基碳自由基，进一步验证了对反应的猜想，即体系中可能存在 α -烯基碳自由基 [图 1-4 (b)]。

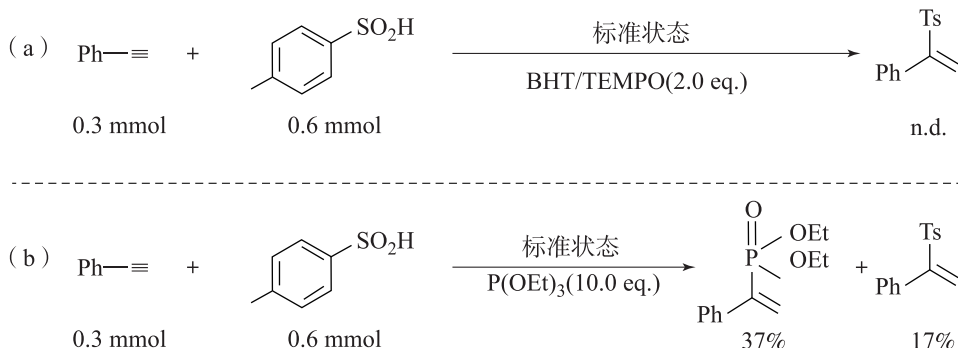


图 1-4 控制实验

有过氧化物存在时，炔烃和一分子溴化氢发生自由基加成反应，得到反马氏规则的产物 (图 1-5)。

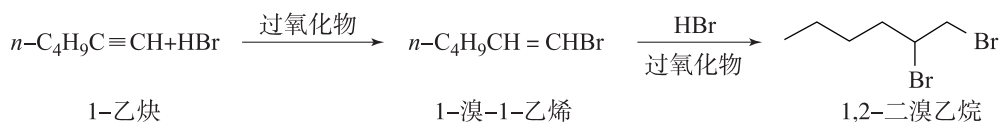


图 1-5 反马氏规则产物的生成

在 $n\text{-C}_4\text{H}_9\text{CH}=\text{CHBr}$ 进一步与 HBr 进行自由基加成时，由于 $n\text{-C}_4\text{H}_9\text{CHBrCHBr}$ 较 $n\text{-C}_4\text{H}_9\text{CHCHBr}_2$ 稳定，故得到 1,2-二溴己烷。

1.1.3 自由基聚合

原子转移自由基聚合 (Atom Transfer Radical Polymerization, ATRP) 是以简单的有机卤化物作为引发剂、过渡金属配合物作为催化剂，通过原子转移机理，在活性种与休眠种之间建立可逆的动态平衡，通过快引发、慢增长，降低自由基浓度，从而实现了对自由基聚合反应的可控调节。这一概念最早于 1995 年由 Matyjaszewski 教授提出，在短短二十几年的时间里，原子转移自由基聚合迅速成为高分子合成领域的研究前沿。

活性/可控自由基聚合是目前制备复杂聚合物以及聚合物分子刷的重要途径。由于在铜单质存在的条件下，聚合反应具有极高的反应速率、单体转化率以及末端活性，因此铜单质催化可控自由基聚合近年来格外受到关注。尽管该聚合反应机理仍在原子转移自由基聚合 (SARA-ATRP) 和单电子转移活性聚合 (SET-LRP) 之间备受热议，但是该方法已经被广泛应用于各种乙烯基功能聚合物的制备。

2015 年，Rainer Jordan 等成功地 将铜 (0) 单质催化的可控自由基聚合应用于表面引发聚合制备聚合物分子刷 (图 1-6)，并命名为 SI-Cu(0)CRP，在室温下从各种乙烯基单体中制备聚合物刷。表面引发的可控自由基聚合是迄今为止报道最多的一次。为了展示这种方法的通用性，作者还展示了嵌段共聚物刷的简易制备以及在有限的反应体积中制备的刷、刷梯度和刷阵列。

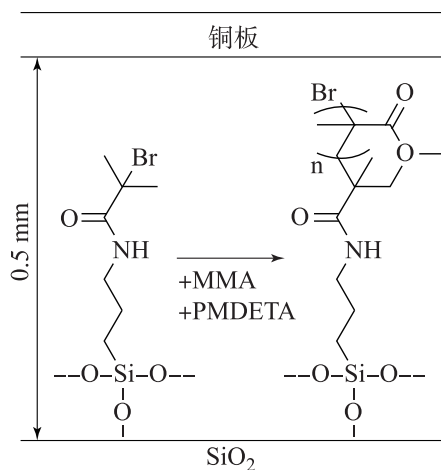


图 1-6 表面引发聚合制备聚合物分子刷

在自由基聚合反应中，氧气是一种有效的自由基淬灭物种，因而自由基聚合反应需要在无氧条件下进行。目前除氧的方法主要有：向体系中通入氮气、冷冻抽排或使用化学试剂将氧气消耗或进行转化，这些瓶颈限制了可控自由基聚合反应在各领域的发展和工业上的大规模应用。

潘翔城等提出使用氧气引发并调控自由基反应，以烷基硼试剂在氧气下自氧化产生乙基自由基为核心机理，使用 RAFT 链转移试剂（CTA）实现活性自由基的聚合，无须任何脱氧工艺，可在室温并完全暴露在空气的环境下，短时间（15 min）内完成聚合反应完成，得到的聚合物与理论分子量吻合，并具有较窄的分子量分布：



1.2 自由基取代反应

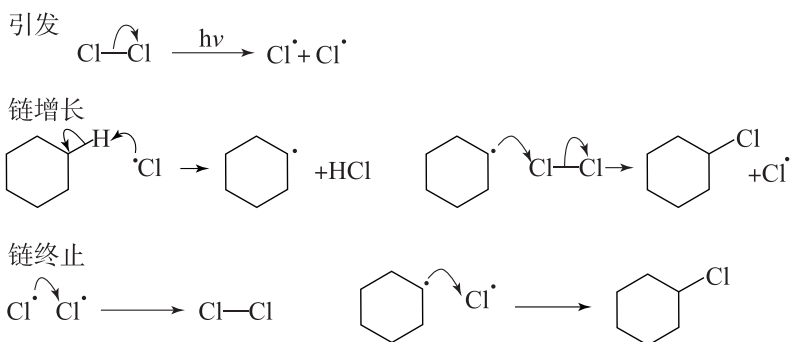
1.2.1 饱和烷烃的自由基取代

1.2.1.1 烷烃的卤化

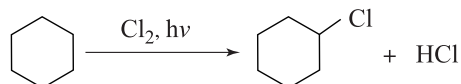
烷烃中的氢原子被卤原子取代的反应称为卤化反应（halogenating reaction）。卤化反应包括氟化（fluorinate）、氯化（chlorizate）、溴化（brominate）和碘化（iodinate），其中有实用意义的卤化反应是氯化 and 溴化。

烷基的氯化

烷烃与氯反应生成烷基氯化物。例如，环己烷加氯气，在光的存在下，会产生环己基氯化物和氯化氢：



这类反应在工业上是很重要的，因为它是少数几种允许由烷烃生成含有官能团的化合物的反应之一。该方法是自由基链反应的另一个实例。就像在烷烃中加入 HBr 一样，我们可以识别出机理中的引发、增长和终止步骤：

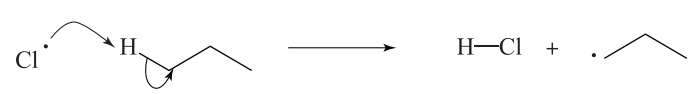


在这种情况下，终止步骤远不如我们所看到的最后一种情况重要，并且通常链式反应对于每个起始事件（氯的光解）可以持续 10^6 个步骤。需要注意的是，这样的反应在阳光下会发生爆炸。

当氯基团从环己烷中提取氢原子时，只生成一种产物，因为所有 12 个氢原子是相等的。对于其他烷烃，可能不是这种情况，可能有烷基氯化物的混合物产生。例如，丙烷被氯化，得到含有 45% 1-氯丙烷和 55% 2-氯丙烷的烷基氯化物的混合物；异丁烷被氯化，则得到 63% 的异丁基氯和 37% 的叔丁基氯。

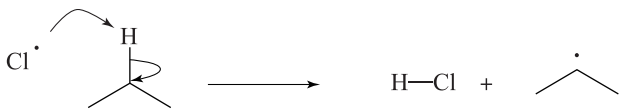
我们如何解释所生成产物的比率？关键是看反应中所涉及的自由基的相对稳定性，以及所生成和破坏的键的强度。丙烷的氯化，通过光解产生的氯自由基，可以从分子末端提取一个初级氢原子，也可以从中间提取一个次级氢原子。对于第一个过程，能量的增加和损耗如表 1-1 所示。

表 1-1 丙烷的氯化一次 C—H 键断裂能量的变化

第一个进程	
	$\Delta H, \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
一个 H—Cl 键的生成	-431
一次 H—Cl 键的断裂	+423
总计	-8

对于第二个过程，表 1-2 给出了能量变化。

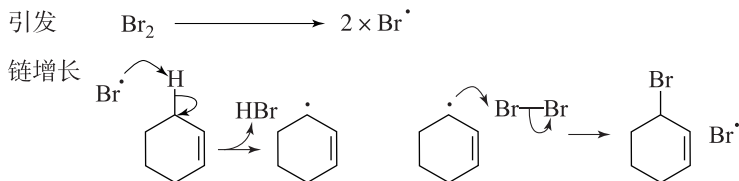
表 1-2 丙烷氯化二次 C—H 键断裂能量变化

第二个过程	
	$\Delta H, \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
一个 H—Cl 键的生成	-431
二次 H—Cl 键的断裂	+410
总计	-21

二次氢原子的抽提比一次氢原子的抽提更具有放热性，其原因有：①二次 C—H 键比初级氢原子弱；②二次 C—H 键弱。二次自由基比初级自由基更稳定。因此，相比 1-氯丙烷，可以得到更多的 2-氯丙烷。但在这种情况下，这并不是唯一的影响因素：有六个一级氢原子和两个二级氢原子，所以一级和二级氢原子的相对反应性甚至比反应产物的简单比例要大得多。这些反应说明了自由基反应的一个关键点——影响选择性的一个非常重要的因素是键的生成和断裂的强度。

烷烃的溴化

因为自由基溴化是选择性的，所以它们可以成功用于实验室制备烷基溴化物。非功能化中心的功能化方法相对较少，但自由基烯丙基溴化反应就是其中之一。就像三级自由基比初级自由基更稳定一样，烯丙基甚至比三级自由基更稳定。因此，在合适的引发剂的存在下，溴将选择性地抽提烯丙基氢原子以得到烯丙基自由基，该烯丙基然后可以被溴的分子捕获到再生成溴自由基（链传播）并产生烯丙基溴。



然而，如果使用溴本身，这个反应就会出现竞争，因为另一种自由基加成反应可以与自由基抽提物竞争，如图 1-7 所示。

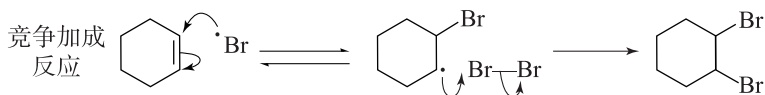
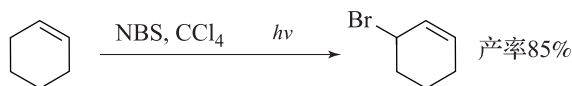
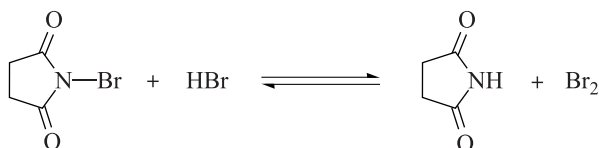


图 1-7 竞争反应

这种相互竞争的加成反应的第一步实际上是可逆的；该反应是由第二分子溴的参与驱动的，该分子捕获了产物烷基自由基。如果反应中 Br_2 的浓度保持非常低，则可以防止这种副反应。一种可能是向反应混合物中缓慢加入 Br_2 ，最好不要使用溴本身，但在反应过程中可以缓慢释放分子溴的化合物。该化合物是 N-溴琥珀亚胺或 NBS。



在取代反应中产生的 HBr 与 NBS 反应, 以保持低浓度的溴。

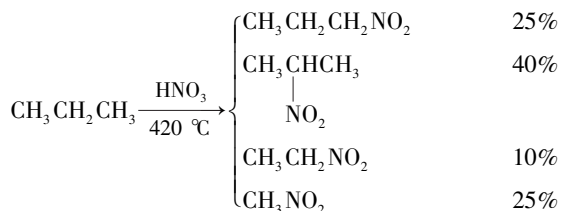


虽然烷烃的自由基卤化在实验室中很少使用, 但烯烃的自由基烯基溴化是一种通用和常用的制备烯丙基溴化物的方法。亲核取代反应可用于将溴化物转化为其他官能团, 例如, 英国曼彻斯特的一些化学家制造了 5-叔丁基环己-2-烯-1-醇的两个非对映异构体, 以研究它们与四氧化锇的反应。叔丁基环己烯是现成的, 因此他们使用自由基烯基溴化引入烯丙基的位置, 利用水转化为羟基。空间效应在反应的区域选择性中起着一定的作用, 只有较少阻碍的烯丙基氢原子被移除。

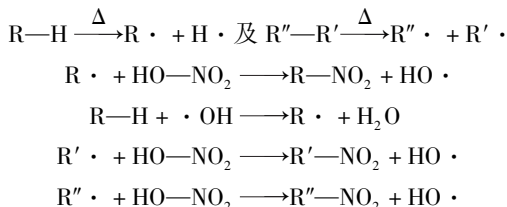
1.2.1.2 烷烃的硝化

烷烃与硝酸或四氧化二氮 (N_2O_4) 进行气相 (400 ~ 450 °C) 反应, 生成硝基化合物 (RNO_2)。这种直接生成硝基化合物的反应叫做硝化 (nitration), 它在工业上是一个很重要的反应。在实验室中采用气相硝化法有很大的局限性, 所以实验室内主要通过间接方法制备硝基烷烃。

气相硝化法制备硝基烷烃, 常得到多种硝基化合物的混合物, 反应如下:



这种气相硝化反应的机理与上述硝化反应的机理大体相同, 也是通过自由基进行反应的。即烷烃在气相发生热裂解, 生成自由基, 它再和硝酸进行链反应:



与卤化反应不同的是, 在此反应中发生 C—C 键的断裂, 因而生成小分子的硝基化合物。这种小分子的硝基烷烃在工业上是很有用的溶剂, 例如用来溶解醋酸纤维、假漆、合成橡胶以及其他有机化合物。低级硝基烷烃都是可燃的, 而且毒性很大。

1.2.1.3 烷烃的磺化及氯磺化

烷烃在高温下与硫酸反应 (和与硝酸反应相似), 生成烷基磺酸, 这种反应叫做磺化。