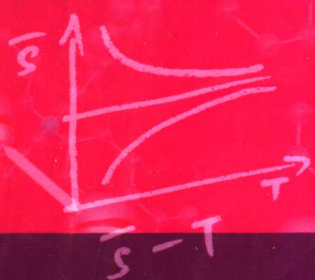


陈荣业 著

$$\bar{s} = \frac{r_p}{r_s} = \frac{\frac{dC_p}{dt}}{\frac{dC_s}{dt}} = \frac{k_{op}}{k_{os}} e^{\frac{E_{vs}-E_{vp}}{RT}} C_A^{a-a'} C_B^b C_C^{-c}$$



有机合成 工艺优化



化学工业出版社

有机合成工艺优化

陈荣业 著



化学工业出版社

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

有机合成工艺优化/陈荣业著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 9

ISBN 7-5025-7694-0

I. 有… II. 陈… III. 有机合成-工艺学 IV. TQ2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 114154 号

有机合成工艺优化

陈荣业 著

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 李 玥

责任校对: 于志岩

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 21¼ 字数 379 字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7694-0

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

有机合成反应历来与经济发展和人民生活息息相关，有机合成工艺优化也自然成为化学工作者关注的重点。

长期以来，化学工作者一直将有机合成工艺优化作为一种实验科学，对工艺条件逐一进行对比、筛选和验证，实践中总结出一些具体化学反应的特殊规律。依据这些特殊规律，作者用动力学理论对其进行抽象和归纳，得到了化学反应过程的一般规律，使有机合成工艺优化过程理论化和简单化了。

一般规律的掌握和运用，深化了人们对有机反应的理性认识。当用它重新审视具体化学反应工艺的时候，能发现很多实验科学所难以认识的规律；能对已有工艺进行准确评价并指出改进方向；能把握关键影响因素而推进研究开发进度和质量；能判断选择性随温度、浓度的变化趋势而简化了工艺优化过程。

有机合成工艺优化是物理化学与有机化学相结合的产物；是用化学动力学方法解决有机合成的实际问题；是将化学动力学的基本概念转化成有机合成的实用技术。

在传统的物理化学理论中，化学动力学是以研究化学反应速度（转化率）为目标的。因此转化率随时间的变化关系一直成为动力学研究的重点；反应速度方程式也习惯了用 $-r_A$ 来表示反应原料A组分浓度的降低速度；一些化学反应数学模型也是围绕主反应速度进行的，以求取反应级数和速度常数。

有机合成工艺优化是用动力学方法研究反应的选择性。因而思路有所不同。

转化率随时间的变化关系已不是研究的重点，代之以主反应与某一特定副反应的对比速度。

速度方程已不再以主原料的减少速度 $-r_A$ 表示，代之以主副反应产物的生成速度（ r_P 和 r_S ）。

某一组分的反应级数已不被关注，代之以主副反应对某一组分反应级数的相对大小。

速度函数也已不被关注，代之以主副反应活化能的相对高低。

正是基于上述差别，化学动力学基本概念转化成有机合成实用技术，有机合成由实验科学转化成理论方法，有机合成实验量也由复杂繁多转化为简单少量，人们对化学反应过程的理解也由感性认识转化成理性认识。

《有机合成工艺优化》共分19章：第1、2、18章为理论篇；第19章为工业化篇；第3~17章为应用篇。应用篇有四大特点：一是每章均以化学动力学理论

研究某一种化学反应，解析研究其主副反应的竞争规律；二是各章在应用化学动力学理论对具体化学反应的讨论中都有新的发现；三是每章均对所研究的反应类型给出建议的工艺框图和条件说明；四是每章都列举、评点了反应实例，指出利弊。通过对第3~17章的阅读可加深对化学动力学方法的理解和认识。各章内容有不同的特点。

迄今为止，作者对于用动力学方法研究反应选择性的认识仍是初步的，有待于进一步深化和提高，但愿本书能起到抛砖引玉的作用。若读者能从中受益或有所发展是作者最大的期望与欣慰。因作者水平与经验所限，错误难免，请读者批评指正。

在本书编写过程中，得到了中国科学院大连化学物理研究所周业慎教授、陈惠麟教授的审阅和修正，特此表示感谢。

陈荣业

2005年6月5日

目 录

第 1 章 用动力学方法研究反应过程	1
1.1 动力学方法的基本概念、基本理论	1
1.1.1 转化率、选择性和收率	1
1.1.2 平行副反应与连串副反应、活化能与反应级数	3
1.1.3 主副反应的速度比-对比选择性	4
1.1.4 温度效应	6
1.1.5 浓度效应	8
1.2 动力学方法及其基本特征	10
1.2.1 首先定性反应产物	10
1.2.2 跟踪定量反应产物	11
1.2.3 分阶段研究反应过程和分离过程	12
1.2.4 程序升温法	13
1.2.5 调节加料法	14
1.3 动力学研究方法举例	15
1.4 新的化学反应过程研究	19
1.4.1 反应结果的温度效应分析	19
1.4.2 副产物 S 结构与浓度效应的关系	20
1.4.3 动力学方法的补充说明	21
1.4.4 按动力学方法的工艺优化次序	21
1.5 反应条件因果关系图解析	21
第 2 章 简单、实用的分离技巧	23
2.1 酸、碱性有机化合物的分离提纯	23
2.1.1 中和吸附法	24
2.1.2 中和萃取法	25
2.1.3 成盐洗涤法	25
2.2 利用平衡关系的分离提纯	26
2.2.1 共沸蒸馏与精馏的联用	26
2.2.2 同离子效应的应用	28
2.3 利用色谱分析谱图构思分离方法	30
2.3.1 利用 GC 谱图研究蒸馏、精馏过程	30
2.3.2 HPLC 谱图与重结晶、吸附工艺的关系	34

2.4	多步反应过程的分离方法简化	36
2.4.1	准一步反应	37
2.4.2	溶剂归一化	38
2.4.3	不提纯原则	39
第3章	芳烃的混酸硝化	41
3.1	混酸硝化反应的机理和特征	41
3.2	混酸硝化反应的主副反应和动力学分析	42
3.2.1	一硝化反应与二硝化副反应的动力学分析	43
3.2.2	一硝化反应与磺化副反应的动力学分析	44
3.2.3	动力学综合分析	44
3.2.4	有机溶剂的加入对选择性的影响	45
3.3	硝化反应条件的控制	45
3.3.1	硫酸浓度	45
3.3.2	反应温度	47
3.3.3	加料方式	47
3.3.4	产品分离	48
3.4	推荐的硝化工艺框图、工艺要点及讨论	49
3.5	硝化工艺实例评点	49
第4章	芳烃的磺化	59
4.1	芳烃磺化反应的反应机理及特征	59
4.2	磺化反应的主、副反应和反应动力学分析	60
4.2.1	一磺化反应对二磺化副反应的动力学分析	60
4.2.2	一磺化反应对砜生成副反应的动力学分析	61
4.2.3	综合动力学分析	62
4.2.4	加入有机溶剂对温度效应、浓度效应的影响	63
4.3	磺化反应异构现象解析	63
4.3.1	磺化与水解不属可逆反应	63
4.3.2	异构现象的动力学解释	64
4.4	磺化反应的主要影响因素	66
4.4.1	磺化剂浓度和用量	66
4.4.2	磺化剂的选择	67
4.4.3	反应温度的控制	68
4.4.4	加料方式的影响	68
4.4.5	有机溶剂的作用	69
4.4.6	添加剂	70
4.4.7	一磺化产物的分离	70

4.5 推荐的磺化工艺	70
4.5.1 磺化工艺框图与特点	70
4.5.2 磺化方法选择与评析	71
4.6 磺化工艺的常见问题	72
4.7 磺化反应实例及评点	73
第5章 芳烃的烷基化和酰基化	83
5.1 芳烃的烷基化和酰基化反应机理及特征	83
5.2 二烷基化异构组成的解析	85
5.3 酰基化反应的主副反应和动力学分析	86
5.3.1 平行副反应的动力学分析	87
5.3.2 连串副反应的动力学分析	90
5.3.3 主副反应的动力学综合分析	90
5.4 酰基化的工艺条件讨论	92
5.4.1 溶剂的选择	92
5.4.2 三氧化铝的质量与加入方式	92
5.4.3 加料方式	93
5.4.4 反应温度和时间	93
5.4.5 反应的终止与络合物的分解	93
5.4.6 产物的分离	93
5.5 推荐的酰基化反应工艺	94
5.6 酰基化工艺的常见问题	94
5.6.1 溶剂使用错误	94
5.6.2 分离方法不当	95
5.7 酰化反应的实例评点	95
第6章 芳环上的卤化	101
6.1 芳烃卤化反应机理和基本特征	101
6.2 卤化反应定位规律的影响因素	103
6.3 卤化反应的动力学分析	104
6.3.1 对平行副反应的动力学分析	105
6.3.2 对连串副反应的动力学分析	105
6.4 工艺路线的优化选择	107
6.4.1 以邻位卤代为目标产物的工艺路线选择	107
6.4.2 以对位卤代为目标产物的工艺路线选择	108
6.4.3 二卤化与第二个卤化反应工艺路线选择	109
6.5 卤化反应工艺条件优化要点	110
6.5.1 卤化剂	110

6.5.2	反应温度	111
6.5.3	加料方式	111
6.5.4	溶剂的稀释作用	111
6.5.5	溶剂的极化作用	112
6.5.6	催化剂	112
6.5.7	分离与提纯	112
6.6	卤化反应的实例评点	113
第7章	芳醚的合成	123
7.1	卤代芳烃烷氧基化和芳氧基化的反应机理和特征	123
7.2	醚化过程的主副反应和动力学分析	124
7.2.1	单卤芳烃醇解反应与水解副反应的动力学分析	125
7.2.2	单卤芳烃芳氧基化与水解副反应的动力学分析及卤代芳烃重排的 讨论	126
7.2.3	多卤芳烃一烷氧基化与二烷氧基化的动力学分析	127
7.3	芳醚合成工艺的影响因素	128
7.3.1	卤代芳烃烷氧基化	128
7.3.2	多卤代芳烃的单烷氧基化	129
7.3.3	二芳醚的合成	129
7.4	推荐的二芳醚合成工艺	131
7.5	芳醚合成的常见问题	131
7.6	芳醚合成的实例评点	132
第8章	卤代芳烃的胺解	140
8.1	卤代芳烃胺解反应机理和特征	140
8.2	卤代芳烃胺解反应的主、副反应及动力学分析	141
8.2.1	温度效应	142
8.2.2	浓度效应	143
8.3	氨(胺)解反应的影响因素	143
8.3.1	氨(胺)的浓度	143
8.3.2	胺的用量与溶剂	144
8.3.3	原料的回收	144
8.3.4	反应温度与压力	144
8.3.5	加料方式	144
8.4	推荐的胺解反应工艺	145
8.5	卤化芳烃胺解的实例评点	145
第9章	卤代烃的腈化	153
9.1	卤代芳烃的腈化	153

9.1.1	卤代芳烃腈化的基本特征	153
9.1.2	卤代芳烃腈化反应的主、副反应和动力学分析	154
9.1.3	卤代芳烃腈化反应工艺要点	155
9.1.4	推荐的卤代芳烃腈化反应工艺	157
9.1.5	卤代芳烃腈化的实例评点	158
9.2	卤代烷烃的腈化	163
9.2.1	卤代烷烃腈化反应机理及基本特征	163
9.2.2	卤代烷烃腈化反应的主副反应	163
9.2.3	卤代烷烃腈化反应的动力学分析	164
9.2.4	工艺条件讨论	165
9.2.5	腈化反应实例评点	167
第10章	卤代芳烃的水解与分离	170
10.1	卤代芳烃水解反应机理和特征	170
10.2	副反应与动力学讨论	171
10.2.1	按 S_NAr 反应机理进行的水解反应	171
10.2.2	按苯炔反应机理进行的水解反应	171
10.3	卤代芳烃水解产物——酚的分离	172
10.3.1	利用羟基的酸性使非酸性物质除去	172
10.3.2	利用挥发酚与水共沸的原理减少水溶解损失	173
10.3.3	利用异构体氢键的差异,使异构体分开	174
10.3.4	利用对称结构熔点高的原理,去除不对称异构体	174
10.4	酚提纯过程的主要问题	175
10.5	酚合成与分离实例评点	175
第11章	芳烃重氮基水解	182
11.1	重氮基水解反应的机理和特征	182
11.2	重氮基水解的主副反应和动力学分析	182
11.2.1	温度效应	184
11.2.2	浓度效应	184
11.2.3	温度效应与浓度效应的作用比较	184
11.3	重氮盐水解反应的重要影响因素	185
11.3.1	反应温度	185
11.3.2	加料方式与分布	185
11.3.3	产物的移走	186
11.3.4	重氮盐水解的介质及催化剂	186
11.3.5	一步法及其应用范围	186
11.4	推荐的重氮盐水解工艺	187

11.5	重氮盐水解工艺的常见问题	188
11.6	重氮盐水解反应实例评点	188
第 12 章	重氮基的自由基取代	196
12.1	重氮基取代反应的反应机理与特征	196
12.2	取代反应的主副反应和动力学分析	196
12.2.1	卤代反应与水解副反应的动力学分析	197
12.2.2	卤代反应与偶合副反应的动力学分析	198
12.2.3	温度效应与浓度效应的交互作用	199
12.3	重氮基卤代反应的工艺条件	199
12.3.1	反应温度	199
12.3.2	卤化亚铜的用量	200
12.3.3	加料方式	200
12.3.4	有机溶剂的作用	201
12.3.5	产物的分离	201
12.4	推荐的重氮盐取代反应工艺	201
12.5	重氮基取代反应的常见问题	202
12.6	重氮基取代反应实例评点	203
第 13 章	氟代芳烃的合成	213
13.1	氟代重氮盐的热解	213
13.1.1	氟代重氮盐热解法制氟代芳烃的一般规律	213
13.1.2	氟代芳胺重氮盐热分解过程的主、副反应	213
13.1.3	芳胺重氮化氟代反应的工业化条件解析	214
13.1.4	重氮盐氟化工艺实例评点	216
13.1.5	重氮化、氟代反应的改进方向	217
13.2	氟硼酸重氮盐热解	219
13.2.1	氟硼酸重氮盐热解法(希曼法)	219
13.2.2	希曼反应的主、副反应	220
13.2.3	氟硼酸重氮盐制备工艺要点	221
13.2.4	希曼反应工艺的改进方向	222
13.2.5	希曼反应的工业实例评点	223
13.3	氟代芳烃氟代	226
13.3.1	芳烃氟氯交换反应的基本特征	226
13.3.2	氟代芳烃氟化的主、副反应	226
13.3.3	卤代芳烃氟代反应的工艺条件解析	228
13.3.4	氟氯交换反应的实例评点	229
第 14 章	芳烃侧链的卤化	232

14.1	芳烃侧链卤化的机理和特点	232
14.1.1	芳烃侧链卤化反应机理	232
14.1.2	芳烃侧链卤化反应特征	233
14.2	芳烃侧链卤化的主副反应与动力学分析	233
14.2.1	侧链卤化与芳环卤化的动力学分析	234
14.2.2	侧链卤化不同阶段的动力学分析	235
14.2.3	以一卤苕为目标化合物的动力学分析	236
14.2.4	以三卤苕为目标化合物的动力学分析	237
14.3	芳烃侧链卤化的工艺条件	237
14.3.1	溶剂的选择	238
14.3.2	卤素的选择	238
14.3.3	引发剂的选择	239
14.3.4	紫外光与添加剂	239
14.3.5	反应温度的选择	239
14.3.6	杂质的影响	239
14.3.7	加料方式	240
14.4	推荐的芳烃侧链氯化工艺	240
14.5	侧链卤化的常见问题	240
14.5.1	溶剂的选择不当	240
14.5.2	自由基的引发不利	241
14.5.3	卤化剂的选择不利	241
14.6	芳烃侧链卤化实例评点	241
第15章	格氏试剂的制备与反应	246
15.1	格氏试剂的一般概况	246
15.2	格氏试剂合成与反应的主副反应和动力学分析	246
15.2.1	格氏试剂合成的主副反应和动力学分析	246
15.2.2	格氏试剂亲核取代(亲核加成)反应的动力学分析	248
15.3	格氏反应的工业化条件讨论	250
15.3.1	无氧、无水、无锈的操作条件	250
15.3.2	溶剂的选择、用量和回收利用	250
15.3.3	反应设备要求	251
15.3.4	引发过程控制	252
15.3.5	反应温度及加料方式	252
15.3.6	格氏试剂亲核取代(亲核加成)反应的工艺要点	252
15.4	推荐的格氏反应工艺	253
15.5	格氏反应的常见问题	254

15.5.1	溶剂的选择与回收问题	254
15.5.2	卤代烃的选择问题	254
15.5.3	加料方式问题	254
15.6	格氏反应的实例评点	254
第 16 章	羰基的加成缩合	260
16.1	羰基加成缩合反应的一般规律	260
16.2	醛-酮缩合	260
16.2.1	亚苄基丙酮合成过程的主副反应及动力学分析	261
16.2.2	亚苄基丙酮合成实例评点	263
16.2.3	其他醛酮缩合实例评点	265
16.3	酮-酯缩合	267
16.3.1	甲基酮与酯缩合的主副反应及动力学分析	267
16.3.2	茚满二酮合成实例评点	268
16.3.3	其他酮-酯缩合实例评点	269
16.4	酯-酯缩合	271
16.4.1	酯-酯缩合机理及一般规律	271
16.4.2	异酯缩合的主副反应和动力学分析	271
16.4.3	酯-酯缩合的工艺条件	273
16.4.4	酯-酯缩合实例评点	273
第 17 章	氮杂环化合物	276
17.1	氮杂环化合物的特征和合成机理	276
17.1.1	氮杂环化合物的特征	276
17.1.2	氮杂环化合物的合成机理	276
17.2	含氮杂环化合物合成的一般特点和主副反应	278
17.3	$E_{VP} > E_{VM}$ 时的动力学分析	280
17.3.1	平行副反应的动力学分析	280
17.3.2	中间体连串副反应的动力学分析	282
17.3.3	缩合、环合反应动力学综合分析	282
17.4	吡唑与嘧啶 (β -酮酸酯与脒类合成法) 的合成条件	283
17.4.1	反应温度	283
17.4.2	加料方式	283
17.4.3	溶剂的作用	284
17.5	推荐的吡唑、嘧啶 (β -酮酸酯与脒类合成法) 合成工艺	284
17.5.1	活化能差较大时的两步缩合反应工艺	284
17.5.2	活化能差较小时的两步缩合反应工艺	284
17.6	吡唑与嘧啶合成实例评点	285

17.7	$E_{VP} < E_{VM}$ 时的动力学分析	288
17.7.1	温度效应	290
17.7.2	浓度效应	290
17.8	推荐的咪唑和嘧啶(羧酸衍生物与丙二胺法)合成工艺	290
17.9	咪唑和嘧啶(羧酸衍生物与丙二胺法)合成工艺实例评点	291
17.10	杂环化合物的提纯	293
17.10.1	杂环化合物的一般特点	293
17.10.2	碱性杂环化合物提纯的一般步骤	293
17.10.3	氮杂环化合物提纯实例评点	293
第18章	进攻试剂的活性比较	296
18.1	芳烃的亲电取代	296
18.2	芳烃的亲核取代	298
18.2.1	S_NAr 机理(S_N2 机理)	298
18.2.2	S_N1 机理	299
18.2.3	苯炔机理	299
18.3	卤代脂肪烃的亲核取代	300
18.3.1	S_N2 机理	300
18.3.2	S_N1 机理	301
18.4	烯烃的亲电加成	302
18.5	羰基的亲核加成	303
18.6	自由基取代反应	304
18.6.1	自由基反应机理的三个阶段(自由基的引发、传递和终止)	304
18.6.2	自由基反应活性	304
18.6.3	自由基进攻的选择性	305
第19章	有机合成反应的工业化放大	307
19.1	釜式反应器的放大效应	307
19.1.1	温度梯度、浓度梯度不同	307
19.1.2	换热比表面积与反应周期不同	308
19.1.3	死区与设备清洗不同	309
19.1.4	温度指示的偏差不同	309
19.2	反应过程的重要影响因素	310
19.2.1	混合状态的影响	310
19.2.2	局部过热和局部过浓问题的解决(消除梯度)	312
19.2.3	吸热反应的温度控制	313
19.2.4	放热反应的温度控制	315
19.3	工业化放大的准备	319

19.3.1	原料、中间体的可用性评价	320
19.3.2	设备的可用性评价	321
19.3.3	工艺的准备及管理	322
19.3.4	安全准备	323
19.4	工业化放大的设计技巧	324
19.4.1	多功能反应单元的设计	325
19.4.2	分层罐的设计	326
19.4.3	公用工程的设计	326

第 1 章 用动力学方法研究反应过程

本章介绍一种新的有机化学反应过程研究方法——动力学方法。该方法是在有机反应的过程中运用宏观动力学概念，研究反应过程的影响因素，使工艺优化过程理论化的方法。而在应用动力学概念优化工艺时不要求取动力学数据，因而又使反应过程研究简单化了。恰恰是这种既理论化又简单化的方法才具有实用性。

1.1 动力学方法的基本概念、基本理论

1.1.1 转化率、选择性和收率

1.1.1.1 转化率

转化率的定义为：每摩尔反应物 A 所反应掉的分数。其数学方程式为：

$$\text{转化率} = \frac{\text{反应消耗原料 A 的物质的量}}{\text{反应加入原料 A 的物质的量}}$$

这里，设定 C_{A0} 为未反应前 A 组分的浓度， C_A 为反应到某一时刻 A 组分的浓度， C_P 为主产物浓度， C_{Si} 为副产物 i 组分的浓度， $\sum_{i=1}^n C_{Si}$ 为所有副产物浓度之和， X 为转化率。则

$$X = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \quad (1-1)$$

$$C_A = C_{A0}(1 - X) \quad (1-2)$$

$$X = 1 - C_A / C_{A0} \quad (1-3)$$

这里 $(1 - X)$ 的概念为未转化率。显然， $C_A = 0$ 时， $X = 1$ ； $C_A = C_{A0}$ 时， $X = 0$ 。由质量守恒的概念，无论反应进行到什么程度，总有 $C_{A0} = C_A + C_P + \sum_{i=1}^n C_{Si}$ （设定 C_P 与 C_{Si} 的浓度与生成这些化合物所消耗的 C_{A0} 的浓度等值），则 X 可以这样表述：

$$X = \frac{C_P + \sum_{i=1}^n C_{Si}}{C_{A0}} \quad (1-4)$$

1.1.1.2 选择性

选择性定义为反应掉的原料中, 生成目的产物所占的分数。

其数学方程式为:

$$\text{选择性} = \frac{\text{反应生成主产物所消耗原料 A 的物质的量}}{\text{反应消耗原料 A 的物质的量}}$$

这里, 设定 S 为选择性, 则

$$S = \frac{C_P}{C_{A0} - C_A} = \frac{C_P}{C_P + \sum_{i=1}^n C_{Si}} \quad (1-5)$$

在式 (1-5) 中, 若 $\sum_{i=1}^n C_{Si} = 0$ 时, $S=1$; 若 $C_P=0$ 时, $S=0$ 。

1.1.1.3 收率

收率概念定义为: 加入的反应原料中, 生成目的产物所占的比例。

其数学方程式为:

$$\text{收率} = \frac{\text{反应生成主产物所消耗原料 A 的物质的量}}{\text{反应加入原料 A 的物质的量}}$$

设 Y 代表收率。则

$$Y = \frac{C_P}{C_{A0}} \quad (1-6)$$

显然,

$$Y = X \times S \quad (1-7)$$

即收率为转化率与选择性的乘积, 收率为转化率与选择性的综合函数。

若以转化率为横坐标, 以与之相对应的选择性为纵坐标, 则 $S=f(X)$ 与横轴间围成的面积即为收率 (由图 1-1 所示, X_f 代表反应终了时的转化率)。

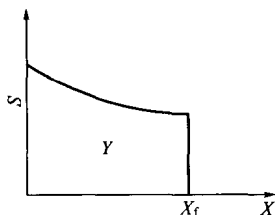


图 1-1 收率与选择性、
转化率之间的关系

$$Y = \int_0^{X_f} S(X) dX \quad (1-8)$$

反应的目标是提高反应的收率, 之所以引进转化率和选择性的概念, 是因为收率是选择性和转化率的乘积, 见式 (1-7)。相对比较收率更抽象, 而转化率和选择性更具体。容易理解, 研究的对象越抽象, 则影响因素越多, 因果关系越复杂, 分析起来越难; 而研究的对象越具体, 其影响因素越少, 越容易找到解决问题的手段。用具体的概念代替抽象的概念, 才能使复杂的问题简单化。