



绿色化学科普系列读物

化学实验绿色化的 探索与实践

Green Chemical Experiment : Exploration and Practice

主编 刘树恒

河北大学出版社



绿色化学科普系列读物

化学实验绿色化的 探索与实践

Green Chemical Experiment : Exploration and Practice

主 编：刘树恒

副主编：崔维真 袁 华 张洪香

张文育 杨凤珍 王立霞



河北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化学实验绿色化的探索与实践 / 刘树恒主编. -- 保定 : 河北大学出版社, 2012
ISBN 978-7-5666-0156-8

I. ①化… II. ①刘… III. ①化学实验 - 无污染技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①O6-3

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第152096号

责任编辑：胡素杰

特约编辑：李丽华

封面设计：王占梅

责任印制：蔡进建

出版发行：河北大学出版社

地 址：河北省保定市五四东路180号

邮 编：071002

印 刷：河北天普润印刷厂

经 销：全国新华书店

开 本：1/16(787mm × 1092mm)

印 张：18.75

字 数：340千字

版 次：2012年8月第1版

印 次：2012年8月第1次

书 号：ISBN 978-7-5666-0156-8

定 价：42.00元

前言

绿色化学是 20 世纪末发展起来的一门新兴学科,又称环境无害化学、环境友好化学、清洁化学、原子经济学等。绿色化学即利用化学原理、技术和方法减少或消灭对人类健康、生态环境有害的原料、催化剂、溶剂、试剂、产物、副产物等的使用和产生,不再处理废物,最终实现废物零排放和零污染。绿色化学是一门从源头上阻止污染的化学。

化学工业的飞速发展,给人类带来丰富多彩的物质生活,对环境的污染也日益严重,当今社会的重大环境问题几乎都与化学品的生产有着一定的关系,人们迫切希望和提高生活水平、改善生活质量的同时不致危害健康,“绿色”生活成为人们的向往。1995 年美国设立“总统绿色化学挑战奖”之后,绿色化学得到各国政府、化学界和企业界的关注,成为可持续发展战略的重要组成部分。我国政府高度重视,将绿色 GDP 纳入到统计体系和干部考核体系,以中国科技大学为代表的部分高等院校率先开设绿色化学课程,从“绿色”的角度认识化学、理解化学、学习化学,为绿色理念普及起到引领示范作用。

从 1993 年,我系教师秉承绿色化学的理念,本着从源头上减少或消除化学污染的愿望出发,从实验微型化入手,在有机化学和无机化学实验绿色化方面进行不懈的研究、探索,本书即是用化学实验的形式对研究、实践成果进行的展现。本书分为化学实验绿色化的方法与原理简介;实验基本知识;基本操作实验;性质实验;基本合成实验;天然物提取;新技术合成实验;设计实验几部分。实验内容,一部分来自于通用、经典的实验,均对其进行了绿色化改造;另一部分源于绿色化学领域的新成果,进行适当修改,成为实验内容。比较系统的讲授绿色化学实验的基本知识、基本理论、基本技能。物质性质实验以减量实验为主,采用管道反应器、井穴板、点滴板作为反应器;合成实验采用

微量半微量合成,大大减少原料用量及废弃物的排放量;对反应催化剂、溶剂、副产物进行回收,设计系列实验,第一个实验的产品作为下一实验的原料,提高利用率;拒用有毒原料,大量使用可再生材料,为此专门设计了天然有机化合物的提取及改性,常见天然物的成分测定及分离等实验;尽可能采用微波、超声波、固体酸催化等新的合成技术,提高反应产率,节约时间,提高效率。学生在实验中即掌握基本原理与操作,又建立起绿色化学的理念,为今后工作中践行绿色化学打下理论基础。实验内容涵盖化学、化工、环境等专业对化学实验的基本要求。

本书由刘树恒主持编写,负责全稿的统筹与校对,参加编写的:崔维真(第三章第一、四、五部分),张洪香(第三章第二部分),袁华(第三章第三部分),杨凤珍(第四章第一、二部分),王立霞(第四章第三、四部分),张文育(第二章),刘树恒(第一章、第四章第五、六、七部分)。

本书编写过程中,结合自己多年的研究及实践,并参阅有关著作、文献,吸取其中一些内容,在此向各位作者表示感谢。

由于编者水平所限,书中难免有不妥之处,恳请各位读者对书中疏漏、错误进行批评指正,以利于修改完善。

编者

2012年6月

目 录

前 言	(1)
第一章 绿色化学基础	(1)
第二章 化学实验的基本知识	(10)
第三章 无机化学实验部分	(49)
一、化学实验中的测量、数据的记录与实验结果的表达	(49)
二、基本操作、基础理论与常数测定实验	(54)
实验 1 仪器的认领、洗涤和干燥	(54)
实验 2 玻璃细工和塞子钻孔	(55)
实验 3 分析天平操作练习	(56)
实验 4 固体和液体密度的测定	(58)
实验 5 摩尔气体常数的测定	(60)
实验 6 二氧化碳相对分子质量的测定	(63)
实验 7 溶液的配制	(65)
实验 8 酸碱滴定	(67)
实验 9 水合硫酸铜结晶水的测定	(69)
实验 10 硫酸亚铁铵的制备	(70)
实验 11 醋酸解离度和解离常数的测定	(72)
实验 12 化学反应速率与活化能	(74)
实验 13 $I_3^- \rightleftharpoons I^- + I_2$ 平衡常数的测定	(78)
实验 14 银氨配离子配位数的测定	(81)

实验 15	电离平衡、盐类水解和沉淀反应	(83)
实验 16	氧化还原反应	(86)
实验 17	配合物的生成和性质	(90)
三、元素化学实验		(92)
实验 18	碱金属 碱土金属	(92)
实验 19	硼、铝和碳、硅	(95)
实验 20	氮、磷	(98)
实验 21	氧和硫	(101)
实验 22	卤素及其含氧酸盐	(103)
实验 23	铜、银、锌、汞	(106)
实验 24	铬、锰	(109)
实验 25	铁、钴、镍	(111)
实验 26	锡、铅、铋、铊	(114)
四、无机化合物的提纯和制备实验		(117)
实验 27	硝酸钾的制备	(117)
实验 28	四氯化锡的制备	(120)
实验 29	四碘化锡的制备及其最简式的确定	(121)
实验 30	六氯合铅(Ⅳ)酸铵的制备	(123)
实验 31	从“盐泥”中制取七水合硫酸镁	(126)
五、综合设计与开放实验		(129)
实验 32	硫酸铜的制备、分析与测试	(129)
实验 33	三草酸根合铁(Ⅲ)酸钾的合成及测定	(132)
实验 34	茶叶中一些元素的分离和鉴定	(136)
实验 35	紫菜中碘的提取及含量的测定	(137)
实验 36	一种钴(Ⅲ)配合物的制备及表征	(139)
实验 37	离子交换法制取碳酸氢钠	(142)
第四章 有机化学实验部分		(146)
一、有机化学基本操作实验		(146)
(一)物理常数测定		(146)
实验 1	有机化合物熔点的测定	(146)
实验 2	有机化合物沸点的测定(微量法)	(149)

实验 3 折光率的测定	(150)
实验 4 旋光度的测定	(153)
(二)有机物的分离和提纯	(156)
实验 5 常压蒸馏	(156)
实验 6 水蒸汽蒸馏	(159)
实验 7 简单分馏	(162)
实验 8 减压蒸馏	(164)
实验 9 萃取	(168)
实验 10 重结晶提纯法	(172)
二、色谱分离技术	(177)
实验 11 薄层色谱	(178)
实验 12 柱色谱	(181)
三、有机化合物的性质	(182)
实验 13 甲烷的制备和烷烃的性质	(182)
实验 14 不饱和烃的制备和性质	(184)
实验 15 芳烃的性质	(187)
实验 16 卤代烃的性质	(190)
实验 17 醇和酚的性质	(191)
实验 18 醛和酮的性质	(194)
实验 19 羧酸及其衍生物的性质	(197)
实验 20 胺的性质	(200)
实验 21 杂环化合物和生物碱的性质	(202)
实验 22 糖类物质的性质	(203)
实验 23 氨基酸和蛋白质的性质	(207)
四、有机化合物的基本制备	(210)
实验 24 环己烯的制备	(210)
实验 25 正溴丁烷的制备	(212)
实验 26 环己醇氧化法制备环己酮	(214)
实验 27 乙酸异戊酯的制备	(215)
实验 28 乙酰乙酸乙酯的制备	(216)
实验 29 肉桂醛还原制备肉桂醇	(219)

实验 30	三苯甲醇的制备	(220)
实验 31	二苯甲醇的制备	(222)
实验 32	苯亚甲基苯乙酮的制备	(223)
实验 33	苯胺的制备	(225)
实验 34	氟化钾催化合成肉桂酸	(227)
实验 35	H ₂ O ₂ 氧化环己酮合成己二酸	(228)
实验 36	呋喃甲醇和呋喃甲酸的制取	(230)
实验 37	对位红的制备	(232)
实验 38	氯化三乙基苄基铵的制备	(233)
实验 39	Bekmann 重排制备己内酰胺	(234)
实验 40	十二烷基硫酸钠的制备	(236)
实验 41	8-羟基喹啉的制备	(237)
五、有机化合物的综合制备		(239)
实验 42	广灭灵的制备	(239)
实验 43	利多卡因的合成	(241)
实验 44	强酸型阳离子交换树脂的制备	(243)
实验 45	玉米芯制取糠醛	(246)
实验 46	植物油脂交换法制备生物柴油	(248)
实验 47	双乙酸钠的合成	(249)
六、天然有机化合物的提取及改性		(251)
实验 48	几种天然化合物的提取	(251)
实验 49	甲壳素的提取	(254)
实验 50	一锅连续法制备羧甲基壳聚糖	(255)
实验 51	头发中胱氨酸的提取	(258)
实验 52	柑橘皮中果胶的提取	(259)
实验 53	氧化淀粉的制取	(261)
实验 54	菠菜色素的提取和色素分离	(262)
七、微波 超声波 固体酸催化合成		(266)
实验 55	超声波辐射分子碘催化合成乙酰水杨酸	(266)
实验 56	超声波作用下己内酰胺的制备	(268)
实验 57	微波辐射合成乙酰苯胺	(269)

实验 58 微波辐射合成正溴丁烷·····	(270)
实验 59 微波辐射合成对氨基苯磺酸·····	(272)
实验 60 微波辐射合成乙酸乙酯·····	(273)
实验 61 杂多化合物催化合成乙酸异戊酯·····	(275)
附录·····	(277)
附录 1 常用酸、碱的密度和浓度·····	(277)
附录 2 弱酸、弱碱在水中的解离常数(离子强度等于零的稀溶液)·····	(278)
附录 3 一些难溶化合物的溶度积(K_{sp})·····	(280)
附录 4 某些试剂溶液的配制·····	(283)
参考资料·····	(287)

第一章 绿色化学基础

一、概论

(一)绿色化学的定义

绿色化学是 20 世纪末发展起来的一门新兴学科,又称环境无害化学、环境友好化学、清洁化学等。绿色化学即利用化学原理、技术和方法减少或消灭对人类健康、生态环境有害的原料、催化剂、溶剂、试剂、产物、副产物等的使用和产生,不再处理废物,最终实现零排放和零污染。绿色化学是一门从源头上阻止污染的化学。

(二)绿色化学的产生

化学在为人类创造财富的同时,给人类也带来了危难。而每一门科学的发展史上都充满着探索与进步,由于科学中的不确定性,化学家在研究过程中不可避免地会合成出未知性质的化合物,只有通过经过长期应用和研究才能熟知其性质,这时新物质可能已经对环境或人类生活造成了影响。

据统计,化学工业的绝大多数工艺都是 20 多年前开发的,人们普遍认为只要把废水、废渣和废气“稀释排放就可以无害,这时期的环保对策可以称为稀释废物来防治环境污染”。由于化学工业向大气、水和土壤等排放了大量有毒、有害的物质,巨量的“三废”排放,造成了地球上多起环保事件,当代全球十大环境问题是(大气污染、臭氧层破坏、全球变暖、海洋污染、淡水资源紧张和污染、土地退化和沙漠化、森林锐减、生物多样性减少、环境公害、有毒化学品和危险废物)中至少有 7 个直接与化学和化工产品的化学物质污染有关。当人类开始觉醒时,才发现地球环境已经糟糕透了。严峻的现实使得各国必须寻找一条不破坏环境,不危害人类生存的可持续发展的道路。1991 年,“绿

色化学”由美国化学会(ACS)提出并成为美国环保署(EPA)的中心口号,并立即得到了全世界的积极响应。

1990年,美国通过了一个“防止污染行动”的法令。将污染防治确立为美国的国策。所谓污染防治就是使得废物不再产生,不再有废物处理的问题。绿色化学正是实现污染防治的基础和重要工具。1995年4月美国副总统戈尔宣布了国家环境技术战略,其目标为:至2020年地球日时,将废弃物减少40%—50%,每套装置消耗原材料减少20%—25%。1995年美国设立了“总统绿色化学挑战奖”,以推动社会各界进行化学污染预防和工业生态学研究,鼓励支持重大的创造性的科学技术突破,从根本上减少乃至杜绝化学污染源,这项在化学化工领域内唯一的总统奖使得“绿色化学”这个名称广为传播。

(三)绿色化学的重要特点

和传统意义上的化学相比,绿色化学是更高层次的化学,它的主要特点是“原子经济性”。即在获取新物质的转化过程中充分利用每个原料原子,实现“零排放”,因此既可以充分利用资源,又不产生污染。传统化学向绿色化学的转变可以看作是化学从“粗放型”向“集约型”的转变。绿色化学是一门具有明确的社会需求和科学目标的新兴交叉学科。从科学观点看,绿色化学是对传统化学思维方式的更新和发展;从环境观点看,绿色化学是从源头消除污染;从经济观点看,绿色化学合理利用资源和能源、降低生产成本,符合经济可持续发展的要求。因此绿色化学的目的是把现有化学和化工生产的技术路线从“先污染、后治理”改为“从源头上根除污染”。

总之,绿色化学以体现当代最新科学技术的物理学、化学、生物学手段和方法,突出从源头上根除污染,实现化学与生态协调发展的宗旨,研究环境友好的新反应、新过程、新产品。

(四)绿色化学的核心

绿色化学的核心是“原子经济性”(Atom economy),原子经济性是指在化学合成过程中,合成方法和工艺应被设计成能把反应过程中所用的所有原料尽可能的转化到最终产物中。这一概念最早是1991年美国Stanford大学的著名有机化学家B. M. Trost(为此他曾获得了1998年度的“总统绿色化学挑战奖”的学术奖)提出的,即原料分子中究竟有百分之几的原子转化成了产物。理想的原子经济反应是原料分子中的原子百分之百地转变成产物,不产生副产物或废物,实现废物的“零排放”。他用原子利用率衡量反应的原子经济性,认为高效的有机合成应最大限度地利用原料分子的每一个原子,使之结合到目标分子中(如完全的加成反应: $A+B\longrightarrow C$),达到零排放。

在一般的有机合成反应中： $A+B\longrightarrow C+D$

主产物 副产物

反应产生的副产物 D 往往是废物，因此可成为环境的污染源。

传统的有机合成反应以产率来衡量反应的效率，有些反应尽管产率高但原子利用率很低，这和绿色化学的原子经济性有本质区别。绿色化学的原子经济性的反应有两个显著优点：一是最大限度地利用了原料，二是最大限度地减少了废物的排放。

近年来，开发新的原子经济反应已成为绿色化学研究的热点之一。

(五)绿色化学的 12 项原则和 5R 理论

1. 绿色化学的 12 项原则

1998 年, P. T. Anastas 和 J. C. Waner 从源头上减少或消除化学污染的角度出发, 提出了绿色化学的 12 项原则, 这 12 项原则简述了绿色化学的主要观点, 对我们今后从事绿色化学的研究具有一定的指导作用。

防止——防止产生废弃物要比产生后再去处理和净化好得多。

原子经济——设计的合成程序, 使反应过程中所用的物料能最大限度地进到终极产物中。

较少有危害性的合成反应出现——无论如何要使用可以行得通的方法, 使得设计合成程序只选用或产出对人体或环境毒性很小最好无毒的物质。

设计要使所生成的化学产品是安全的——设计化学反应的生成物不仅具有所需的性能, 还应具有最小的毒性。

溶剂和助剂是较安全的——尽量不用辅料(如溶剂或析出剂)当不得已使用时, 尽可能是无害的。

设计中能量的使用要讲效率——尽可能降低化学过程所需能量, 还应考虑环境和经济的效益。合成程序尽可能在大气环境的温度和压强下进行。

用可以再生的原料——使用可再生资源作为原料, 在技术与经济上尽可能使用可再生原料代替消耗性原料。

尽量减少衍生物——应尽可能避免或减少多余的衍生反应(用于保护基团或取消保护和短暂改变物理、化学过程), 因为进行这些步骤需添加一些反应物同时也会产生废弃物。

催化作用——催化剂(尽可能是具选择性的)比符合化学计量数的反应物更占优势。

设计可降解产物——按设计生产的生成物, 当其有效作用完成后, 可以分解为无害

的降解产物,在环境中不继续存在。

防止污染进程能进行实时分析——需要不断发展分析方法,在实时分析、进程中监测,特别是对形成危害物质的控制上。

特别是从化学反应的安全上防止事故发生——在化学过程中,反应物(包括其特定形态)的选择应着眼于使包括释放、爆炸、着火等化学事故的可能性降至最低。

从上述 12 项原则可以看出在选择化学合成途径时,除了考虑理论产率外,还应考虑和比较不同途径的原子利用率。在化工生产中要尽量减少化学反应的步骤,从原料到产品尽可能做到直达,在生产过程中尽可能不采用那些对产品的化学组成来说没有必要的原料。

2. 5R 理论——绿色化学的现代内涵

减量(Reduction)是从节省资源减少污染角度提出的。①减少用量、在保护产量的情况下如何减少用量,有效途径之一是提高转化率、减少损失率。②减少“三废”排放量。主要是减少废气、废水及废弃物(副产物)排放量,必须在排放标准以下。

重复使用(Reuse)这是降低成本和减废的需要。诸如化学工业过程中的催化剂、载体等,从一开始就应考虑有重复使用的设计。

回收(Recycling)回收未反应的原料、副产物、助溶剂、催化剂、稳定剂等非反应试剂。

再生(Regeneration)是变废为宝,节省资源、能源,减少污染的有效途径。它要求化工产品生产在工艺设计中应考虑到有关原材料的再生利用。

拒用(Rejection)是杜绝污染的最根本办法,它是指对一些无法替代,又无法回收、再生和重复使用的毒副作用、污染作用明显的原料,拒绝在化学过程中使用。

二、化学实验绿色化的途径

绿色化学对化学反应的基本要求是:

1. 淘汰有毒原材料,尽量使用可再生材料,从源头上杜绝污染,逐渐摆脱对石油、煤等矿产资源的依赖。

2. 尽可能使参加反应的原子都进入终端产物,这不但防止了污染,而且也提高了经济效益和原利用率。

$$\text{原子利用率} = \frac{\text{期望产品的摩尔质量}}{\text{化学方程式中按计量所得物质的摩尔质量}} \times 100\%$$

3. 合成中尽量不使用和产生有毒有害物质。

4. 寻找最佳转换反应和良性循环,使用高选择性催化剂,实现“零排放”,降低副产物,使整个过程只有原料和能量的输出,而产出只有产品。

5. 设计对人类健康无害,对环境无污染的产品。

目前世界上化学家主要从化学反应原料、催化剂、溶剂三个方面对绿色化学进行研究。

1. 原料

今天有机合成所用的原料,95%以上的有机化学品来自石油,但是,地球上的煤和石油是有限的和不可再生的。因此,如何利用生物质为原料生产人类需要的化学品就成为绿色有机合成的战略任务。反应原料的绿色化包括两方面:

(1) 采用无毒、无害原料

我国已研制出由甲醇氧化法合成碳酸二甲酯以代替剧毒光气为原料的合成法;Noyo 等在超临界 CO_2 中,从 CO_2 和 H_2 合成了甲酸被认为是最理想的反应之一。我国科学家利用自行设计的催化剂,在过氧化氢的作用下,直接从丙烯制备环氧丙烷被认为“具有环境最友好的体系”。

(2) 用可再生资源为原料

利用可再生的生物资源代替当前广泛使用的石油原料是化学工业可持续发展的方向之一。中国科技大学关于木质素结构和以木质纤维为原料的绿色合成研究已取得阶段性成果。

2. 溶剂

现在实验室及化工厂使用的大多数有机溶剂易燃易爆并有一定的毒性。绿色化学中人们用超临界流体、离子液体、水等绿色溶剂代替有机溶剂来充当化学反应的介质。

(1) 超临界流体

超临界流体是温度和压力处于临界条件以上的流体,它的密度接近液体而黏度却接近气体,扩散系数比液体大 100 倍左右。超临界流体在萃取、色谱、重结晶以及有机反应中表现出特有的优越性。特别是二氧化碳等小分子化合物,因为它们的临界温度和压力都不是很高,并且来源广,价廉无毒,所以在有机合成和分析等方面应用极广。例如,杜邦公司已将超临界二氧化碳用于聚四氟乙烯工业生产,超临界二氧化碳还可以用来净化半导体芯片,提取咖啡中的咖啡因,可以用于制备超细微粒。

(2) 离子液体

离子液体是指没有电中心分子,且完全由阳离子和阴离子组成的液态物质,它的熔点通常低于 $100-150^\circ\text{C}$,它的热稳定性和化学稳定性相对很高,蒸气压、黏度很低,导电

性很好,离子迁移和扩散速率均很高,极性极强,配位能力低以及溶解有机无机材料的能力强等。同时离子液体与非极性有机溶剂互不相溶,因而可以为两相体系提供一种非水的极性替代物,一些离子液体也不溶于水,也可用作难溶于水的极性相。此外,与超临界流体不同,离子液体对温度和压力没有要求,可以在低温、常压下进行。所以现在关于离子液体制备和应用的研究成为人们研究的热点之一。例如,中科院兰州化物所通过对比实验,发现使用 $\text{Pd}-(\text{phen})_2(\text{PF}_6)_2$ 为催化剂,离子液体 MeBulmBF_4 为反应介质,制备苯氨基甲酸甲酯,产量很高,与不使用离子液体相比产量提高了 57 倍,与使用氯苯为溶剂的实验结果相比,产量提高了 2 倍;最近还有人用脉冲微波将高分子纤维素直接溶于离子液体中,然后进行反应,得到性能良好的新型纤维素。

(3) 水溶剂

水中特有的疏水效应对一些有机反应是有益的,有时还可以提高反应速率和选择性。因为超临界水的温度对很多反应来说太高了,所以在低温下的水溶液中进行有机反应是近年来研究的热点。有人用亲水性试剂比如二甲苯磺酸钠,环糊精等使有机物质的水溶液稳定,有些人则用表面活性剂使有机物在水中形成乳浊液,在水中一些 Knoevena Sel 反应不用催化剂就可以反应。

(4) 固定化溶剂

固定化溶剂是另一种很有前景的绿色溶剂,它也就是用聚合物充当溶剂,这类聚合物与常规用于化学合成、分离和清除等过程中的溶剂有类似的溶剂化性能。由于是高分子化合物,因此这种溶剂既可以保持溶解性,又不挥发,避免了溶剂的挥发性对人和环境的影响。例如,有人将溶剂分子束缚在固定载体上,或者直接将溶剂分子键在聚合物链上作固体化溶剂。

3. 催化剂

追求高效能的催化剂无疑是绿色化学发展的重要环节。当今化学家研究的主要方向有生物催化剂和固体酸碱催化剂。

(1) 生物催化剂

运用生物酶催化反应来生成有机产品成为现在研究较多的催化方式之一。酶催化反应具有高度的化学区域和对映体选择性,这一特征适用于医药食品和农业等化学品的制备。酶在手性化合物制备中的应用,酶在非水溶剂中的催化性能研究受到生物化学家、化学家们的关注。据研究分析,不仅酶可催化反应,微生物、植物细胞、动物细胞等也有类似的作用。与酶的催化作用相比,由于它们具有不需要酶的分离纯化和辅酶的再生等优点,因此目前微生物生产的方法已经广泛地用于一些有机酸、氨基酸、核苷

酸、抗生素和甾体激素等化合物的工业化生产。

(2) 固体酸碱催化剂

固体酸碱催化剂可以有效地减少甚至避免对环境的污染,同时也容易回收,可以多次使用。异戊酸异戊酯的生产就是一个很好的例子。传统的生产方法是在浓硫酸催化下由异戊酸和异戊醇直接酯化合成的。但是这个反应的副反应很多,同时由于浓硫酸的碳化作用使产品的色泽很深。后来又有人采用异戊醇一步法合成,它的收率同样不是很理想。仅为 58%—70%,最近我国有人用 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体超强酸为催化剂合成,使收率达到 83%,并且产品质量完全达到了要求。

另外,绿色化学的实现是建立在各个学科的综合交叉上的,运用生物技术、物理技术、计算机技术等都将对绿色化学的进展具有深远的影响。总之化学反应将会沿着无害原料,绿色反应条件,环境友好产品的方向发展。光化学、电化学、非有机溶剂反应等将受到人们的关注。此外,生物技术与新型溶剂以及微波、超声波等技术联用将是推动绿色化学发展的重要手段。

三、绿色化学的发展

(一) 绿色化学的发展历程

1995 年 4 月美国副总统戈尔宣布国家环境技术战略,其目标为:至 2020 年地球日时,将废弃物减少 45%—50%,每套装置消耗原材料减少 20%—25%。1995 年,美国设立了“总统绿色化学挑战奖”,奖励在利用化学原理从根本上减少化学污染方面卓有成就的个人或企业。所设奖项包括变更合成路线奖、改变溶剂/反应条件奖、设计更安全化学品奖、小企业和学术奖,以表彰他们在绿色化学领域中的杰出成就。这些政府行为都极大地促进了绿色化学的蓬勃发展。

1997 年由美国国家实验室、大学和企业联合成立了绿色化学学院;美国化学会成立了“绿色化学研究所”。日本也制定了以环境无害制造技术等绿色化学为内容的“新阳光计划”。欧洲、拉美地区也纷纷制定了绿色化学与技术的科研计划。总之,绿色化学与技术研究已成为国外企业、政府和学术界的重要研究与发展方向。

在 1993 年世界环境与发展大会之后,编制了《中国 21 世纪议程》政府白皮书,郑重声明我国走经济与社会协调发展道路的决心。面对国际上风起云涌的绿色化学浪潮,我国在绿色化学领域的活动也逐渐活跃起来。

1995 年中国科学院化学部组织了《绿色化学与技术——推进化工生产可持续发展的途径》的院士咨询活动,对国内外绿色化学的现状与发展趋势进行了大量调研,结合