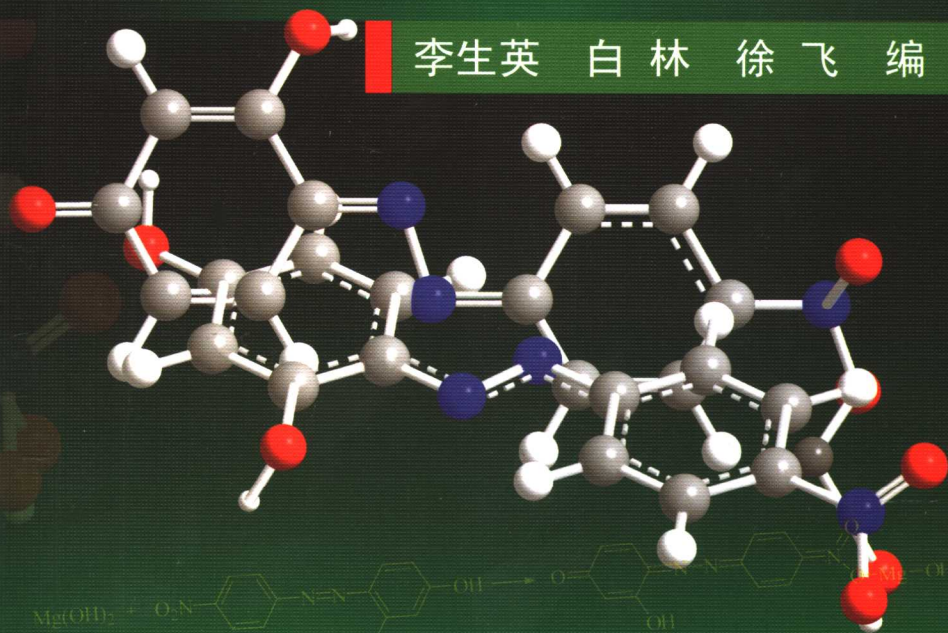


高等学校教材

无机化学实验

李生英 白林 徐飞 编



化学工业出版社

高等学校教材

无机化学实验

李生英 白 林 徐 飞 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以绿色化学为指导思想,采用小量-半微量化学实验体系,以实现无机实验绿色化和绿色化学实验为目标,建立绿色的化学理念,培养绿色化的意识。全书共编入 42 个实验,内容包括绪论、无机化学实验基础知识、基本操作、无机化学基本原理、元素及其化合物的性质、无机化合物的制备、综合及设计实验、附录八个部分。第一篇主要阐明绿色化学的理念和基本原理以及在实现化学实验绿色化中所运用的方法;第二篇~第五篇充分体现了无机化学实验的一些要求和特点,始终贯穿绿色化和小量-半微量化的原则;第六篇和第七篇则是要求学生在掌握无机化学实验基本技能和一些无机化合物制备知识的基础上,查阅文献,自己设计实验,有助于培养学生密切联系实际、解决问题的能力,综合表达能力和初步的科研能力。

本书可作为高等院校化学、化工及相关专业的无机化学实验教材,也可供有关化学专业的工作人员及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机化学实验/李生英,白林,徐飞编.——北京:化学工业出版社,2007.5
高等学校教材
ISBN 978-7-122-00261-7

I. 无… II. ①李…②白…③徐… III. 无机化学-
化学实验-高等学校-教材 IV. 061-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 054588 号

责任编辑: 窦 臻 冯国庆
责任校对: 宋 夏

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司
850mm×1168mm 1/32 印张 12 字数 310 千字
2007 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

无机化学实验随着科学技术的发展、实验仪器的不断改进和人们生态环境意识的提高而呈现出向绿色化转变的趋势。很多人都曾有过孜孜探索、改进无机化学实验课程,以期减少废物的排放量而使实验室对学生们更安全的经历。20 世纪 90 年代,绿色化学的兴起是对传统化学思维方式的更新和新发展,也为化学实验的改革奠定了理论和实践基础。探索绿色化学实验,实现化学实验的绿色化,是化学实验改革和发展的动力,是绿色化学思想在化学实验中的具体体现。

无机化学实验的绿色化是在绿色化学的思想指导下,用预防化学污染的新思想、新方法和新技术,采用小量-半微量化实验方法对常规实验进行改革而形成的实验新体系。兰州城市学院化学系于 20 世纪 90 年代中期开始探索无机化学实验的小量-半微量化(甘肃省高等学校教学改革计划项目),经多年教学实践逐步完善,建立起了独具特色且教学应用效果显著的小量-半微量化无机化学实验体系。

化学实验课是实施全面的化学教育最有效的教学形式。无机化学实验是学生进入大学学习化学的第一门基础实验课,它是以实验为手段来研究无机化学中的重要理论和典型元素及其化合物的变化规律,以及相应的仪器、装置、基本操作和有关原理的一门课程。以绿色化学实验为目标,采用小量-半微量化实验进行教学,是培养学生创造性思维和创新能力的有效途径。小量-半微量化实验方法采用常规的实验仪器和设备,帮助学生建立严格而准确的“量”的概念,规范实验操作,强化技能训练,养成良好

的科学态度与习惯,增强效益观念和环境保护意识。实践证明,采用小量-半微量化的实验方法,提高了无机化学实验的严密性和科学性。在实验过程中,注意引导学生运用科学方法,按照认识过程进行学习,即在获得知识的同时,学会科学的方法和思维,从而具有自学能力和解决问题的能力,这也是适应当代科学技术进步的需求。小量-半微量化的实验方法具有以下显著特点。

① 实验仪器和设备常规化 运用绿色化学的方法加上标准的廉价玻璃仪器,克服了微型化学实验研究中暴露的一些问题,诸如放弃或忽视常规实验操作,普及面不广,耗费人力、财力等。我们认为仅仅依赖于微型实验方法并不能为学生提供足够的适应大规模的工业化或实验研究的工作能力。

② 药品用量微量化 在实验现象明显、效果显著的前提下,实验中试剂的浓度和用量降至最低限度。用尽可能少的试剂来进行实验,从而极大地减少了实验室的“三废”,大大地降低了污染的程度和造成的不必要的浪费。另一方面,对缓解实验教学经费拮据不失为一种行之有效的方法,既增强了效益观念,又使一些价格昂贵的实验也能向学生开出。绿色化学实验的概念对大学生环境保护意识的培养有着极其重要的意义,是可持续发展战略在化学实验中的具体体现。

③ 有利于学生综合素质的提高 小量-半微量化实验方法中各种溶液、试剂的用量少,实验设计精细,可以有效克服传统实验方法中容易出现的一方抓药的现象。这种实验方法能激发学生的学习兴趣,充分调动学生的主动性,重视创设条件,并贯穿“让实验本身多讲话”的原则。这种探索式的实验教学,有利于学生动手动脑能力、发明创新精神、严谨求实作风的培养。从思维科学的角度来说,有利于学生觉察能力、直觉思维能力、联想能力、分析能力、完成能力的培养。

本书由八个部分组成,内容包括无机化学实验绿色化研究(绪论)、无机化学实验基础知识、无机化学实验基本操作、无机化学

基本原理、元素及其化合物的性质、无机化合物的制备、综合及设计实验、附录。绪论和基础知识部分，主要是建立绿色化学理念，强调无机化学实验的学习方法及教与学的关系，特别重视实验的安全保障和环境意识教育。基本操作部分结合多媒体技术，在学习者的头脑中首先留下“做了一次实验”的印象。注重操作的重复性和连续性，如“分析天平的使用”编排了四次实验，以便巩固和掌握；“溶液的配制”实验中配制的溶液可供后面的实验使用，而不致浪费。第六篇和第七篇则是要求学生在掌握无机化学实验基本技能和一些无机化合物制备知识的基础上，针对给定的实验题目，自己查阅文献，设计实验方法，经教师审核同意后进行实验，记录并分析实验数据，最后以小论文的形式提交实验报告。实践证明，这种研究式实验可以极大地激发学生的求知欲，使学生尝试“像一个化学家”那样工作。同时有助于培养学生密切联系实际，独立工作、思考和解决问题的能力，综合表达能力和初步的科研能力。

在传统的大学化学教学中，阴、阳离子的定性分析属于分析化学的内容。近年来，随着化学学科的发展，在大多数高等院校的化学专业中，分析化学主要以定量分析为主，很多分析化学教科书中不再包含定性分析的内容，而目前大多数无机化学教科书中也没有编入定性分析的内容，这样就造成了这部分内容的缺失。为解决这一问题，本书在第四篇“元素及其化合物的性质”中增加了无机离子的定性分析内容。除了在每个实验中增加相关离子的检出方法外，还分三个实验进行混合离子的定性分析，其中一个为阴离子混合液的分析，两个为阳离子混合液的分析。

本书共有 42 个实验可供选择使用。书后选编 15 个附录，大多采用最新数据。书中的计量单位和符号一律采用中华人民共和国国家标准 GB 3100-3102—93。本书还在编排设计、文字叙述、插图选择、实验关键等方面都做了一些初步探讨。强调了实验的成败关键及实验中的注意事项，对有些实验中的反常现象也进行了合理的解释，可供研究参考。

本书以绿色化学为指导思想，采用小量-半微量实验体系，以实现无机实验绿色化和绿色化学实验为目标。虽然所选的某些经典实验不完全符合绿色化的要求，但我们仍然定名为《无机化学实验》，其目的主要是建立绿色化学理念，培养绿色化意识。

在本书的编写过程中，参阅了国内外有关文献，并从中汲取了某些内容，在此特致谢意。在教学实践过程中，从事无机化学实验教学的王永红、何丽君等老师提出了许多宝贵意见，在此我们表示衷心感谢。

无机化学实验的绿色化作为一种实验教学改革尝试，其内容本身还有待于完善，不妥和疏漏之处在所难免，恳切希望使用本书的师生们提出建议。

编 者

2007 年 3 月

目 录

第一篇 绪论	1
一、绿色化学与实验绿色化研究	1
二、实现化学实验绿色化的途径	12
三、小量-半微量实验体系的特点及教学应用效果	20
第二篇 无机化学实验基础知识	27
一、无机化学实验的目的和学习方法	27
二、学生实验室规则	33
三、实验室安全操作和事故处理	35
四、实验性环境污染和实验室污染防治	39
五、灭火的基本原理、方法和灭火器材的使用	42
六、水的纯度	48
第三篇 无机化学实验基本操作	51
实验 1 多媒体教学片：无机化学实验操作规范	51
实验 2 仪器的认领和洗涤	52
实验 3 灯的使用、简单玻璃加工技术和塞子的钻孔	69
实验 4 台秤和分析天平的使用	77
实验 5 试剂的取用和试管操作	96
实验 6 溶液的配制	103
实验 7 酸碱滴定	109
实验 8 氯化钠的提纯	116
第四篇 无机化学基本原理	129
实验 9 二氧化碳相对分子质量的测定	129
实验 10 乙酸电离度和电离常数的测定	141
实验 11 电离平衡和沉淀平衡	155

实验 12	化学反应速率与活化能	163
实验 13	原子结构和分子的性质	171
实验 14	氧化还原反应与电化学	176
实验 15	配合物的生成和性质	181
第五篇	元素及其化合物的性质	188
实验 16	p 区非金属元素 (一) (卤素、氧、硫)	188
实验 17	p 区非金属元素 (二) (氮、磷、碳、硼)	195
实验 18	常见非金属阴离子的分离与鉴定	205
实验 19	s 区金属元素 (碱金属、碱土金属)	209
实验 20	p 区金属元素 (铝、锡、铅、铋、铊)	217
实验 21	ds 区金属元素 (铜、银、锌、镉、汞)	224
实验 22	常见阳离子的分离与鉴定 (一)	232
实验 23	d 区金属元素 (一) (钛、钒、铬、锰)	242
实验 24	d 区金属元素 (二) (铁、钴、镍)	250
实验 25	常见阳离子的分离与鉴定 (二)	258
第六篇	无机化合物的制备	269
实验 26	硫酸铜晶体的制备	269
实验 27	硫代硫酸钠晶体的制备	272
实验 28	硫酸亚铁铵晶体的制备	276
实验 29	三草酸合铁 (Ⅲ) 酸钾的制备和性质	279
实验 30	硝酸钾的制备和提纯	284
实验 31	过氧化钙的合成及检验	288
实验 32	由铬铁矿制备重铬酸钾晶体	291
实验 33	由软锰矿制备高锰酸钾晶体	296
第七篇	综合及设计实验	301
实验 34	生物体中几种元素的定性鉴定	301
实验 35	无机固体试样的分析	303
实验 36	碱式碳酸铜的制备	305
实验 37	海带中提取碘	307
实验 38	由废铁屑制备氯化铁晶体	309
实验 39	以废铝为原料制备氢氧化铝	310

实验 40	利用废胶片制取硝酸银	311
实验 41	从废电池回收锌制备硫酸锌晶体	313
实验 42	从废电池回收氯化铵和二氧化锰	314
附录 1	相对原子质量表	317
附录 2	不同温度下水的饱和蒸汽压	319
附录 3	弱电解质的解离常数	322
附录 4	溶度积常数	325
附录 5	常见配离子的稳定常数	329
附录 6	常用酸、碱的浓度	330
附录 7	溶解性表	331
附录 8	常见沉淀物的 pH 值	335
附录 9	气体在水中的溶解度	337
附录 10	常见无机化合物的式量及在水中的溶解度	338
附录 11	标准电极电势表	343
附录 12	一些离子和化合物的颜色	351
附录 13	某些试剂溶液的配制	355
附录 14	常见无机阳离子的定性鉴定方法	359
附录 15	常见无机阴离子的定性鉴定方法	365
参考文献		368

第一篇 绪 论

一、绿色化学与实验绿色化研究

化学在人类社会发展的历史长河中起着十分重要而积极的作用，化学科学的研究成果和化学知识的应用，创造了无数的新产品进入每一个普通家庭的生活，使人们的衣食住行各个方面都受益匪浅。过去，化学科学更多的强调化合物的功能、化学反应的效率和传统经典的实验方法，较少研究不利的有害的作用。因此化学工作者也缺少这方面的知识和训练。随着化学品的大量生产和广泛使用，给人类本来绿色平和的生态环境带来有史以来最严重的危机，当代全球面临的十大环境问题直接或间接的与化学物质污染有关。绿色化学是最高层次的化学，由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。如何在化学教育中加入绿色化学的内容，是摆在 21 世纪化学工作者面前的首要课题，也是学习和研究的首要领域。重大的绿色化学研究成果不但是科学文献，也将进入教科书。化学教学中绿色化学实验的研究，就是把绿色化学的思想贯穿在化学教学的全过程中，一方面是培养学生具有强烈的环保意识；另一方面绿色化学实验本身就是化学教育中实施创新教育的重要内容。绿色化学实验和化学实验的绿色化，其目标、理念和方法与绿色化学完全一致，是 21 世纪化学工作者都应该掌握的一项技术。探索绿色化学实验，解放人们的思想，推动化学实验的不断更新，是化学实验改革和发展的动力，是绿色化学思

想在化学实验中的具体体现。

1. 什么是绿色化学

绿色化学 (green chemistry) 又称清洁化学 (clean chemistry)、环境无害化学 (environmentally benign chemistry)、环境友好化学 (environmentally friendly chemistry)、原子经济学 (atom economy)。绿色化学是指利用一系列原理来降低或消除在化工产品的设计、生产及应用中那些对人类健康、生态环境有害的化学物质的使用和产生。绿色化学的目标是不再使用有毒、有害的物质, 不再产生废物, 不再处理废物。它是一门从源头阻止污染的化学。20 世纪 90 年代, 美国政府颁布污染防治法案, 并确立其为国策, 率先推动了绿色化学在美国的迅速兴起和发展。绿色化学与技术现已成为世界各国政府关注的最重要的问题与任务之一, 政府直接参与以及产、学、研密切合作已成为国际上绿色化学研究与开发的显著特点, 已成为世界各国普遍接受和大力实施的可持续发展方针的重要组成部分。对于化学工作者来说, 绿色化学可以说是一种战略性的反思。

绿色化学是当今国际化学科学研究的前沿, 它是一门具有明确的社会需求和科学目标的新兴交叉学科。从科学观点认识, 绿色化学是对传统化学思维方式的更新和新发展; 从环境观点认识, 它是从源头上消除污染; 从经济观点认识, 它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。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”改变为“从源头上根除污染”。绿色化学的基本科学问题的研究应该注重利用当代最新科学技术的物理、化学、生物手段和方法, 从源头上根除污染, 实现化学与生态协调发展为宗旨来研究环境友好的新反应、新过程、新产品。

绿色化学与环境治理是完全不同的概念, 两者既相关又有区

别。环境治理是对已被污染的环境进行治理，使之恢复到被污染前的面目；而绿色化学则是从源头阻止污染物生成的新策略，即所谓污染预防。既然没有污染物的使用、生成和排放，也就没有环境被污染的问题。过去已发明了不少创新的方法去处理废物，治理污染点或减少有毒物暴露等，这些只是控制污染，而不是预防，所以不属于绿色化学。另外还有不少工程革新、管理改进等实现了污染预防，但它们不是化学。很显然，没有一种化学物质是完全良性的，或多或少的有副作用。绿色化学要求尽可能小的副作用，它是一个理想，一个目标。传统化学中也有许多环境友好的反应，绿色化学将继承它们，对于传统化学中那些破坏环境的反应，绿色化学将寻找新的环境友好反应来代替它们。

绿色化学是更高层次的化学，它的主要特点是原子经济性，即在获取新物质的化学过程中充分利用每个原料原子，实现“零排放”，既充分利用资源，又不产生污染。因此，绿色化学的根本目的是从节约资源和防止污染的观点来重新审视和改革传统化学，从而使人们对环境的治理从治标转向治本。

2. 绿色化学的研究内容

1998 年，Anastas 和 Warner 在《绿色化学：理论和实践》一书中提出了绿色化学的 12 条原则，这些原则可作为化学工作者开发和评价一条化学合成路线、一个生产流程、一个化合物是否符合绿色化学的指导方针和标准。

(1) 预防

最好是防止废物的产生而不是产生后再来处理。化学品的制造者往往不考虑防止有害物质的产生，其理由是虽然有些废物是有害的，但化学家知道如何处理它们。这种想法显然不对，一般来说，一种化学物质的毒性越大，其处理费用也越大。在美国，许多大的化学公司在环境卫生与安全方面的支出，同它用在研究与开发方面

的支出几乎相等。可见，废物处理与处置的费用在化学工业中占了相当大的比例，而污染治理所消耗的费用一般要比污染防治得多。解决这一问题的唯一办法就是利用绿色化学技术来防止或减少毒物的使用与产生。

(2) 原子经济

即设计的合成方法应能使生产过程中所有起始物的原子进入产物之中。对于一个化学反应，若使用的所有材料均转化为最终目标产物，则该反应就没有废物或副产物排放。这种反应的效率最高，最节约能源和资源，同时也避免了废物或副产物的分离与处理等过程，是化学反应的理想目标。在这种反应中，所有反应原料中的原子均得到了充分的利用，因而被称为原子经济反应。在设计实验或化学合成反应方法时，应尽量达到或接近原子经济反应这一理想的目标。例如，用酶法水解代替酸法水解淀粉制备葡萄糖，不仅能大大缩短反应时间、节约能源、减少副反应的产生、提高资源的利用率，而且还能避免制备过程所导致的环境污染。

(3) 无危害化学合成

只要可能，设计合成方法时反应物和生成物应对人类健康和环境无毒或毒性很小。在进行化学设计时必须考虑危害性，最大限度地使用或生产无毒或毒性小的物质，不论原料、中间产物和最终产品，均应对人体健康和环境无毒、无害。有两种方法可降低化学过程的危险性，其一是降低暴露性，如穿防护服、使用防毒面具等；其二是在化学设计中充分考虑危害性，采用各种手段将其内在的危害性降至最低。前者需要投入较大的费用，而且危险依然存在；后者可从根本上消除或减小危险，且可大大降低费用，是最佳的污染防治方法。例如许多原来以苯或二甲苯等毒性有机溶剂作为介质进行的化学反应，目前已改在水溶液中进行，其结果不仅避免了制备过程对操作者所产生的危害，而且避免了制备过程及其产品对环境的污染。

(4) 设计更安全的化学品

设计的化学产品应在保持原有功效的同时, 尽量减少其毒性。随着化学科学的进步, 分子结构和性能的关系逐渐清楚, 由于化学毒性机理、分子结构表征与控制方面的巨大进步, 化学家有可能通过改变结构降低化学品的危害性, 同时确保分子的功效不变。

(5) 使用更安全的溶剂和辅助剂

应尽可能避免使用溶剂、分离试剂等辅助剂, 如不可避免, 也要选用无毒无害的辅助剂。在化学品的制造、加工和使用过程中, 几乎处处都在使用溶剂、分离剂等辅助剂, 这些辅助剂可能会对人类和环境产生负面影响。例如, 使用卤代烃作溶剂提取天然香料, 操作过程及回收溶剂时会有部分溶剂挥发进入环境, 不仅会导致中毒事故的发生, 而且还会破坏大气臭氧层从而导致地球生态环境的破坏。如果改用超临界二氧化碳气体代替卤代烃来完成天然香料的提取分离过程, 则可避免卤代烃对实验者和生态环境的伤害。想办法不用或少用辅助剂以及寻找无害的物质来代替有害的辅助剂, 是绿色化学的研究方向之一。

(6) 能耗效率设计

合成方法必须考虑过程中能耗对成本与环境的影响, 应设法降低能耗, 最好采用在常温常压下的合成方法。化学工业是能源消耗大户, 以前化学家在设计化学过程时往往不考虑能量, 认为这是工程师的事情。绿色化学认为最优的化学转化应是最节能的。因为生产和使用能量的过程往往也会造成污染, 如用燃煤锅炉提供热能, 显然, 多用一份能量就多一份污染。

(7) 利用可再生原料

在技术可行和经济合理的前提下, 使用的原料应该是能再生的。能够在有限的时间内再生的物质称为可再生原料。煤、石油和天然气等化石燃料的形成需要几百万年时间, 是不可再生的。而水能、太阳能、风能、生物质能等被认为是可再生能源。绿色化学就是要最大限度地使用可再生原料, 采用可再生资源代替消耗性

资源。

(8) 减少衍生过程

在可能的条件下，应尽量避免不必要的衍生过程（如限制性基团、保护/去保护基团、临时调变物理/化学过程等），因为这些衍生过程需加另外的试剂且产生废物。化学合成日益精细复杂，有时需要进行分子修饰或产生所需物质的衍生物来实现合成目标。一个典型的例子是，通过产生二苄醚来保护醇，以使分子的另一部分发生氧化反应而不影响醇，氧化反应完成后，通过二苄醚的解离重新生成醇。这种形式的衍生在精细化学品、制药、农药及染料的合成中被广泛地使用，被称为保护基团法。此外还有暂时改性法、加入功能团法等。在上述例子中，要使用氯苄来生成衍生物，而它在解保护时成为毒性很大的废物，需要进行处理。该类方法都要消耗额外的试剂，都会产生需要处理的废物。绿色化学要求，在达到相同目标的前提下，尽量避免使用这类方法。

(9) 催化

采用高选择性的催化剂比使用化学计量助剂更优越。选择性催化剂可以提高原料的利用率和降低废物的生成率，是绿色化学的重要工具和重点研究方向。

(10) 降解设计

化工产品要设计成在其使用功能完成后，不再滞留于环境中，而要降解为无毒的产物。以往化学品的的设计很少考虑其使用后的处理及其对人类健康与环境可能造成的影响，许多化学品在环境中根本无法降解，从而成为主要的化学污染源之一。绿色化学要求设计化学产品时，除了所设计的化学物质具有所需的功能与性质外，还应包括易降解性，即必须考虑化学品寿命终结后被废弃时所导致的环境问题。例如，一种塑料是用来做垃圾袋的，那么，它就应在使用后易降解（否则就是白色污染），而且，降解生成的物质不能具有相近的或更大的危害性，否则，降解的目的就没有达到。在改良型发泡塑料中加入淀粉基等混合物，其制成物可以被土壤中的细菌

降解，也能被低等动物、昆虫等吞食，可以用作包装材料。

(11) 污染预防的实时监测

进一步研究和发展分析方法，在污染物形成前能做到实时、在线监测和控制。绿色化学认为“人们无法控制其不能测定的性质”。必须开发出精确可靠的传感器、监视器及分析技术来检测化学中微量有害物质的产生，通过调节过程参数来降低或消除这些有害物质。若传感器与控制系统相连，则有可能实现有害物质生成的自动控制，使其生成量降至最低。

(12) 意外事故的预防

选择化学生产过程的物质，使潜在的化学意外事故的危险性降低到最小程度，如气体释放、爆炸和着火等。绿色化学的目标是消除或减少所有的危害而不仅仅是污染与毒性。在化学品及化学过程的设计中应充分考虑由毒性、易燃性、易爆性等带来的危害。如溶剂循环使用可减少废物的产生，但这也可能增加化学事故或火灾的隐患。因此，过程的设计者必须在防止污染和防止事故之间平衡。

从以上 12 条原则可以看出，绿色化学涉及化学反应的全过程，它不仅要求从末端控制污染，而且要求一体化预防污染，它第一次着眼于防止污染物的形成，聚焦于最终使污染物处理成为不必要的措施，从而从源头上控制了污染。

这 12 条原则目前为国际化学界所公认，它也反映了近年来在绿色化学领域中所开展的多方面的研究工作内容，同时也指明了未来绿色化学的发展方向。

绿色化学的研究主要是围绕化学反应、原料、催化剂、溶剂和产品的绿色化开展的，包括化学反应（化工生产）过程的四个基本要素：淘汰有毒的反应原料，采用无毒、无害的原料；选择最佳的反应（生产）条件，包括温度、压力、时间、介质、物料平衡等，以实现最大限度的节能和零排放；研究最佳的转换反应和良性循环（含催化剂），使反应在无毒、无害的条件下进行；设计对人类健康和环境更安全的目标化合物（最终产品）。