

# 1 绪 论

资源与环境是可持续发展的关键问题。20世纪90年代形成的全球环境发展战略，提出建立与环境友好的清洁生产-生态经济新模式。绿色过程工程正是研究与自然环境友好的高效、洁净、合理利用资源的物质转化过程与工程的科学。它涵盖了对大规模资源加工、伴有化学和物理变化的过程工业的重新审视、提升和绿色化更新。

## 1.1 化学工程学科的历史沿革

“化工”一词有化学工程、化学工业、化学工艺等几个含义。20世纪是化学工业蓬勃发展的世纪。1913年合成氨的生产，1941年杀虫剂 DDT 进入市场，为粮食、蔬菜等食品的丰收起了重要作用，减轻了人口增长对食物需求的压力。化肥、农药成为化学工业的重要行业。1928年第一个抗生素——青霉素（penicillin）的发现，开创了抗生素类药物开发的先河。1953年发现了 DNA 的双螺旋结构（double-helix structure），为研制基因工程药物奠定了基础。这些成就在减轻人类病痛、预防疾病、保障健康、延长寿命方面起到了十分重要的作用，使美国人平均预期寿命从1900年的47岁增高到1990年的75岁。制药已成为化学工业的一个重要行业。1921年从天然气和轻烃蒸气裂解制造乙烯，奠定了石化工业发展的基础，1930年开始生产聚氯乙烯，1938年开始生产化纤尼龙，1939~1945年第二次世界大战期间，开始生产顺丁橡胶，这些都是化纤、塑料、橡胶开拓的先例。由于价廉的石油、天然气大量供应，导致石化工业的蓬勃发展，更多种类的合成纤维、合成橡胶、合成塑料、洗涤剂、涂料、粘合剂等产品渗透到人类生活的各个方面，遍及衣食住行，还包括电视机、计算机、电话机等许多部件。

20世纪初随着化学工业生产从小型间歇操作向大型连续操作过渡，迫切需要既懂工程又熟悉化学的技术人员，化学工程应运而生。即将工程和化学融合，形成化学工程概念，使化学工程成为继土木工程、机械工程、电气工程之后的第四门工程学科。化学工业是过程工业中十分重要的分支，早在20世纪初，英国 Davis 及美国 Walker、Lewis 等化工界的先驱就提出“化学工程学”（chemical engineering），从原理上研究各种化学工业生产中的物理变化过程，使化学工业得到不断飞跃发展。如果说单元操作概念的提出是化学工程发展过程中经历的第一个历程的话，那么在第二次世界大战后，化学工程又经历了其发展过程中的第二个历程，这就是“三传一反”。20世纪50年代，美国 Bird 教授等从动量、热量、质量的传递（三传）角度研究化学工业中的物理变化过程。荷兰的 van Krevelen 教授提出“化学反应工程学”（一反），来研究化工过程中带有化学反应时的变化过程，使化学工程学成为更全面的一门学科。1960年 Bird 等编写《传递现象》一书出版，成为化学工程发展进入“三传一反”新时期的标志。化学工程作为一种知识的推理概括而产生，首先是将化学工业生产中的物理过程分割为本质上是以设备为基础的单元操作。之后，由于包含化学过程，相应地产生了本质上以反应过程种类为基础的单元过程。由于对单元操作内在机理的深入理解的需要，导致了对动量、质量和热量传递的研究，这也就是通常所说的对传递现象的研究。化学工程现已发展成包括单元操作、化工热力学、化工传递过程、化学反应工程和化工系统工程等分支学科的相当完整而成熟的工程技术科学体系。

化学工程学在发展过程中不断向科学技术新领域渗透拓展，应用对象涵盖了所有物质的物理、化学加工过程，使化学工程学上升至过程工程学。同时，化学工程学也被石油炼制工业、能源工业、冶金工业、建材工业、核能工业以及航空、军事、医药、农业、环境、宇航、生物、制浆造纸、食品与饮料等等过程工业的研究及发展人员用于各种过程工业，使化学工程学事实上发展成为“过程工程学”（process engineering）。

## 1.2 绿色过程工程学科的兴起

工业种类繁多，有许多分类方法，如重工业与轻工业之分，又如机械、建筑、电子、航空、化学等工业的区分，还有一般与先进（advanced）工业的分别，以及绿色与非绿色工业的区分等等。如果比较科学地从生产方式、扩大生产的方法以及生产时物质（物料）所经受的主要变化来分类，则工业生产可以分为过程工业与产品（生产）工业两大类。

过程工业包括化学工业、石油炼制工业、石化工业、能源工业、冶金工业、建材工业、核能工业、生物技术工业以及医药工业等等，它包含了大部分重工业。这类工业的特点是：工业生产使用的原料，主要是自然资源；它的产品主要用作产品生产工业的原料；生产过程主要是连续生产；原料中的物质在生产过程中经过了許多化学变化和物理变化；产量的增加主要靠扩大工业生产规模来达到，或者说靠“放大生产规模”（scale-up）来达到；这类工业一般说来，污染比较严重，治理比较困难，据估计美国有约 75% 的固体废物来自过程工业。这类工业需要发展新的绿色生产过程，才能从根本上解决生产带来的污染问题。

产品生产工业，如生产电视机、汽车、飞机、冰箱、空调等的工业。这类工业的产品，大都可为人类直接使用。这类工业的特点是：使用的原料大部分为过程工业生产的产品；它的产品基本上是为人类直接使用；生产过程基本上是不连续的，是用装配一件又一件产品的方式而生产的；生产过程中主要对物料进行物理加工或机械加工，物料主要发生物理变化；产品的增加主要靠增建“生产线”或改进“生产线”来达到。生产主要是以“离散”方式进行。相对于过程工业，它的污染较轻，并经常可通过应用比较成熟的技术加以改善或治理。

过程工业称为 process industry，是一个国家的基础工业，对于发展国民经济及增强国防力量起着关键作用。每一种工业均须从原理上研究如何提高生产率，降低投资费用及操作成本等，需要从

原理上改进设备，提高生产能力，并从不断创新的角度，发展新的生产过程，使过程不产生污染，符合可持续发展的基本原则。这就是过程工程学的任务。

在过去的一个世纪中，仅从农业讲化学工业就产生着巨大的影响。从合成 DDT 开始的化学农药和从合成氨开始的化学肥料，把农业生产提到了前所未有的高度，以致人们把这个时期称为“化学农业时代”。但是，人工合成的化学物质多数都不具备环境相容性，地球缺乏对它们的“自净能力”，随着它们在环境中的残留物越来越多，危害着生物和人类以及人类赖以生存的生态环境。当代全球十大环境问题中至少有 7 项直接与化学物质污染有关。近年来，要求实施清洁生产呼声最高的是化学工业，据美国 toxics release inventory 在 1994 年发表的统计结果，世界上排放废弃物最多的十类工业中，化学工业名列榜首，而且化学工业每年排放的废弃物是其余九个工业行业的总和。

“人类征服自然”的传统工业化发展模式，使社会生产力迅速发展，人类生活水平不断提高，同时，传统工业的发展模式引发出一系列严重的全球性危机——人口激增、资源锐减、环境污染、生态破坏、两极分化……。工业污染与资源枯竭主要源自以不可再生矿物资源为原料、加工过程涉及化学与物理变化的过程工业，而化学反应处于这些传统工艺的核心地位。全球性环境污染影响因子的 80% 是化学性污染。但是化学工业又是与人类生活关系最密切的工业，已渗透到人类生活的各个方面，是国民经济的支柱产业，它的产品是人类衣、食、住、行赖以生存的原料，是制药、汽车、纺织、造纸、电子、建材、机械、农业和日用工业品等行业的重要基础，也是高新技术领域如计算机、通讯和生物技术不可缺少的产品。化学工业的总产值，一般占国民经济总产值的 10%~30%，对人类社会的进步与发展做出了巨大贡献，并且将永远伴随和推动人类社会的向前发展。因此，化学工业所表现出的“环境污染”和“特殊贡献”两重性，对人类和科技工作者提出了挑战。

最初的办法是对化工生产过程中产生的污染进行治理，发展了

水处理技术，大气污染治理技术，固体废弃物处理技术和噪声治理技术等环境保护手段，对环境生态的保护做出了重要贡献。但是人们发现，随着人类社会的不断进步和发展，生产规模的迅速增长，环境治理的速度远远落后于环境污染的速度，而且用于污染治理的费用不断上升。如美国在 1990 年，用于三废污染治理的费用达到 1200 亿美元，占 GNP 的 2.8%。地球的生态环境随着工业生产的不断进步而迅速恶化，已严重威胁着人类的生存，正如《全球科学家对人类的警告》中所指出的，目前世界上大部分重要的生态系统已处于崩溃状态，世界已进入一个危机四伏的新时期。因此，根本的解决办法只有一条，这就是彻底改变传统工业的生产模式，倡导绿色化生产，在污染源头防止污染的发生，走可持续发展道路。

1997 年美国成立了“绿色化学院”，“绿色化学研究所”等国家级研究机构，日本、欧洲和我国等许多国家和地区都开始将绿色化学与技术列入国家和地区科技发展重要议程。与纯基础研究不同，“绿色化学”的产生不是科学家自由思维的产物，而是在全球环境污染加剧和资源危机的震撼下，人类反思与重新选择的结果。企业需要用环境友好的绿色技术实现工业生产的源头污染控制与生产可持续发展。绿色化学一出现就带有强烈的应用技术与工程性，工程放大优化研究与系统集成、多学科交叉融合是过程工业绿色化过程中极其重要的瓶颈问题。推进我国的过程工业绿色化进程具有特别重要的意义和急迫性。从化工、冶金、能源、石化、轻工等典型过程工业来看，我国资源加工利用技术多是几十年前就形成的传统工艺，生产消耗指数高，资源利用率低，大量未被充分利用的资源变成废弃物排放到环境，造成效益低下和严重的环境污染。操作物质-能量流特别巨大的一些过程工业，资源利用率不足 10%，如我国特有的矿产资源钒钛磁铁矿的铁利用率仅为 4.9%。有色冶金为提取矿石中百分之几、千分之几的主金属所排放的冶炼废渣、尾矿、废石每年以亿吨计，综合利用很差，废弃物潜在资源利用价值常高于目标产品；化工行业生产 1t 铬盐要产生近 3t 毒性废渣；石油化工和大宗基本有机原料的生产，年产量也可达百万吨以上，由

于目标产物合成效率低、催化选择性差，导致资源的浪费和毒性有机物污染。我国有些过程工业的能耗是美国、日本的 2~4 倍，而我国煤开采和燃烧造成的污染和能源浪费更是量大面广。这使我国 2000 年工业废弃物产生量将达 10 亿吨，危险废弃物 95Mt，不仅流失了大量可用资源，也严重污染了水体、土壤和大气。

由上可见，工业废弃物的污染取决于生产工艺技术对资源的综合利用程度与过程优化集成水平。开发过程工业物质转化的高效-洁净-合理利用资源的绿色新过程与工程化实施是急切的社会需求。生产企业再难以承受投入巨大、收效甚微的末端治理重负，急需立足于发展增效、同时实现减污的清洁生产高新技术。绿色过程清洁生产技术的工程化将极大地提高我国工业的总体水平。

### 1.3 绿色过程工程科学内涵

绿色过程工程将涵盖绿色化学与化工，成为综合运用数学、物理、化学、化工、冶金、环境、医药、资源、能源、材料、生物、信息、人工智能等多学科知识与技术，研究物质转化过程绿色化的综合性科学与工程。是具有明确社会要求和科学目标的新兴交叉学科。

绿色过程的开发为过程工程学研究开辟了新的内涵，其层面关系示意图 1-1。

建立资源-环境保护新体系的思想方法论与实施策略，源头污染控制与资源-环境同一论的清洁生产策略与生态工业系统。

原子经济性化学反应处于绿色过程的核心地位，理想的绿色化学反应，即原料中的原子 100%地转变为产物，不产生副产物或废弃物，实现废弃物的零排放。

运用环境-经济综合评价体系，建立过程工业的物质流程-能量流程-信息流程综合优化与过程集成。

发展生物转化技术、洁净能源和可再生资源替代技术。

模拟自然界物种共生、互生、能量与元素传递循环网络，建立物质分层多级循环优化利用的生态化产业体系。

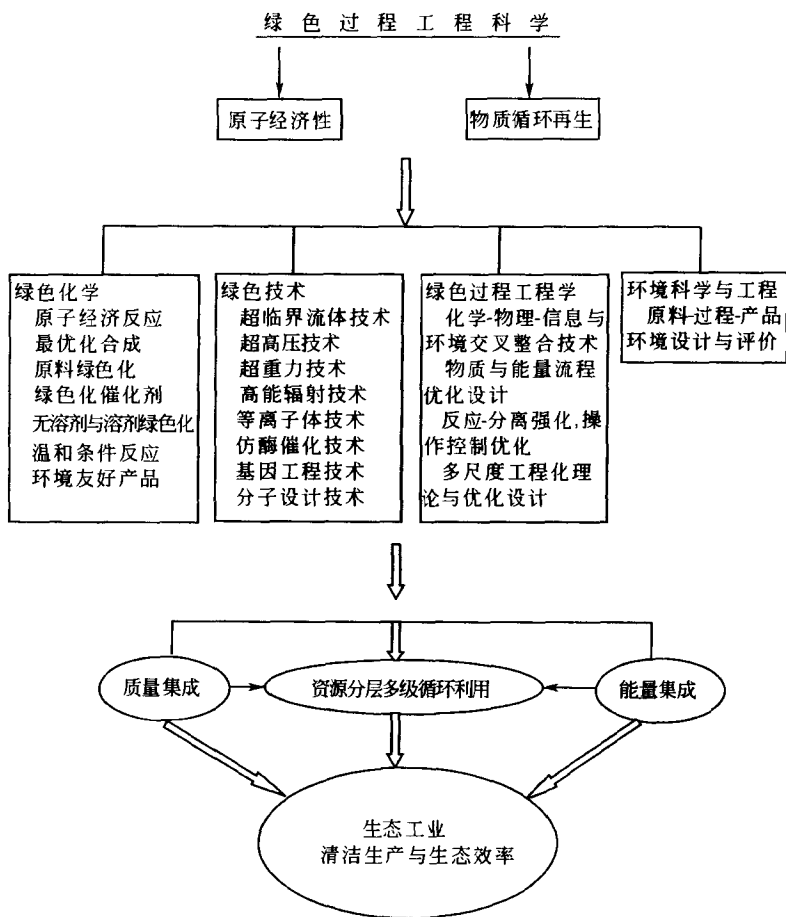


图 1-1 绿色过程工程科学内涵层面关系示意图

应指出的是“绿色”的提法是动态的概念，当一个相对于传统过程的绿色过程已被广泛接受，纳入正常生产的成熟阶段之后；就成为常规技术，又要去追求更理想的绿色新过程。

依据环境-经济两种尺度对过程进行综合优化，包括反应-分离等多序列的综合，物质集成与能量集成，通过质量、热量交换网络

等多种综合优化方法-环境影响最小化的模拟设计来实现。

过程工业的绿色化提升为多学科综合交叉和工程学的新发展开辟了广阔的空间。绿色过程工程的整体运行框架示意图 1-2。

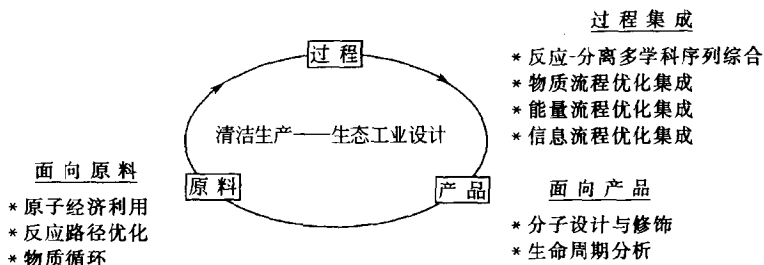


图 1-2 绿色过程工程整体运行框架示意图

#### 1.4 绿色过程工程学科的学术活动

早在 1994 年 8 月的第 208 届美国化学会年会上，就举办了“为环境而设计：21 世纪的新范例”的专题讨论会，讨论了环境无害化学、环境友好工艺或绿色技术等问题。而久负盛名的哥顿会议（Gordon conference）1996 年第一次以环境无害有机合成为主题召开，讨论了原子经济、环境无害溶剂等，则是在世界高学术水平的学术论坛上首次讨论绿色化学专题，这次会议与美国“总统绿色化学挑战奖”一起被 Brealow 在“化学的绿色化”的评论中称为 1996 年“两项重要的第一次”。次年 8 月在英国召开的 1997 年哥顿会议仍以绿色化学的有关内容为主题。

以美国化学会、美国化学工程师协会等多家单位发起的第一届“绿色化学与工程会议”于 1997 年 6 月在华盛顿国家科学院召开，主题为“2020 年的应用展望”（implementing vision 2020），此后每年举行一届会议，均包括一个绿色化学的主题内容。2000 年 6 月召开的第四届会议的主题是“可持续发展的技术：由研究到工业应用（sustainable technologies: from research to industrial implementation）”。

由美国环保署 Anastas 等编写的《绿色化学》丛书陆续出版，

1996年出版的第一辑副标题为“为环境设计化学”，1998年出版的第二辑副标题为“无害化学合成和工艺的前沿”。Anastas等在1998年出版的《绿色化学——理论与实践(Theory and Practice)》一书中详细阐述了绿色化学的定义、原则、评估方法及发展趋势，使之成为绿色化学的经典之作。

由英国皇家化学会主办的国际性杂志《绿色化学》于1999年1月创刊，其内容涉及清洁化工生产技术各方面的研究成果、综述和信息，并站在科学研究的前沿，涵盖了通过化学品的应用或加工来减轻对环境的所有研究活动。

我国在绿色化学方面的活动也逐渐活跃。1995年，中国科学院化学部确定了《绿色化学与技术》的院士咨询课题。1996年，召开了“工业生产中绿色化学与技术”研讨会，出版了《绿色化学与技术研讨会学术报告汇编》。1997年，国家自然科学基金委员会与中国石油化工集团公司联合立项资助了“九五”重大基础研究项目“环境友好石油化工催化化学与化学反应工程”；中国科技大学绿色科技与开发中心在该校举行了专题讨论会，并出版了“当前绿色科技中的一些重大问题”论文集；香山科学会议以“可持续发展问题对科学的挑战——绿色化学”为主题召开了第72次学术讨论会。1998年，在合肥举办了第一届国际绿色化学高级研讨会；1999年在成都、2000年在广州、2001年在济南连续召开了第二、三、四届国际绿色化学高级研讨会。以后将每年召开一次，代表了我国在绿色化学研究领域的最新和最高水平。1999年12月，由国家自然科学基金委组织在北京举行了第16次九华科学论坛，从科学发展和国家需求的战略高度对“绿色化学的基本科学问题”等举行了充分的研讨，并提出了如何在“十五”期间优先安排和部署我国在该领域的研究工作的意见。

## 2 绿色过程工程与可持续发展

绿色过程工程是当今国际过程工程科学发展的前沿，它吸收了当代化学、物理、数学、生物、化工、材料、信息等科学的最新理论和高新技术，是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，它是过程工程内容的更新和提升；从环境观点看，它是从源头上消除污染，符合可持续发展的生态工业发展模式；从经济观点看，它合理利用资源、能源，降低成本，符合经济可持续发展的要求。

### 2.1 可持续发展的含义

可持续发展是 1992 年联合国环境与发展大会正式签署的“关于环境与发展的里约热内卢宣言”中正式提出的全球基本战略。有 183 个国家、102 位国家元首或政府首脑和 70 个国际组织出席，正式要求将可持续发展纳入各国的国家政策和具体的行动之中，中国也正式签署。可持续发展就是把生态、经济、社会统一为不可分离的整体，能动的调控自然-经济-社会复合系统，是人类在不超越资源与环境承载能力的前提下促进经济发展并提高生活质量。

可持续发展有如下三大宗旨。

(1) 可持续发展追求公平性：应该承认，在满足人类需求方面存在着种族、地域、经济、文化、贫富……很多不公平的因素，可持续发展则强调各类人都应满足其争取美好生活愿望的公平权利，不仅在同代人中应坚持公平性，还要实现后代公平，要给世代代以公平享用自然资源的权利。

(2) 可持续发展强调可持续性：自然界的很多资源是有限的，而人类却持续不断地在地球上生存繁衍，可持续发展的核心就是要要求人类经济和社会的发展不能超越环境与资源的承载力，只有不损

害支持地球生命的自然系统（大气、水、土壤、生物），发展才有可能持续永久。

(3) 可持续发展坚持共同性：地球是全人类的共同家园，可持续发展必须是全人类的共同行动。尽管世界各国还存在着发展水平、文化、历史的差异，各国实施可持续发展战略的步骤和政策不可能完全一样，但必须坚持共同的认识、共同的目标和共同的责任感。在此基础上加强合作，缓解矛盾，减少冲突，促进和平。由此可见，可持续发展是一个涵盖很宽的概念：是一个全球性的任务，超越国界和地区；包括生态环境、经济及社会三大方面，而不仅仅是环境和生产。

绿色化就是清洁生产。1989年联合国环境规划署首次提出清洁生产，其定义是对生产过程及产品采取整体预防性的环境策略，以减少对人类及环境的危害，包括节省原材料与能源，尽可能不采用有毒原材料，减少废弃物排放的数量和毒性，使生产过程对人类和环境的影响减少到最低程度。清洁生产是一个使工业实现可持续发展的战略。对政府部门来说，它是指导环境和经济发展政策制定的理论基点；对工业企业来说，它是一个实现经济效益和环境效益相统一的方针；对公众来说，它是一个衡量政府部门和工业企业的环境表现及可持续发展的尺度。

## 2.2 过程的可持续性参数

根据热力学第二定律，一般过程均产生熵，这意味着输入能量的质量降低。每一过程的不可逆性与能量的质量降级均同熵的减少有关，所以能流和物流均具有熵，所以，可用熵作为量化可持续性的基础。

熵 (availability 或 exergy) 的定义可以叙述为：系统在某一状态下与外围作用时所能得到的最大功等于系统在该状态下的熵与系统在外围状态下的熵之差，即最大功等于熵的减少。因此，对于一个流动系统，若系统的初始状态具有焓  $H$ ，位能  $X$  和动能  $\frac{u^2}{2g}$ ，系

统的最终状态是处于与外围完全一致的“死状态”（此时系统的所有能量不能再利用来对外围做功），即系统处于外围温度  $T_0$ ，压力  $p_0$ ，其焓为  $H_0$ ，并且此时位能及动能均为零，则根据热力学定律，系统从初始到最终状态能作的最大功为

$$W_{\text{最大}} = - \left[ \left( H + X + \frac{\mu^2}{2g} \right) - T_0 S \right] + [H_0 - T_0 S_0] \quad (2-1)$$

式中， $S$  及  $S_0$  分别为系统在初始及“死状态”下的熵。显然，若令  $W_{\text{最大}} = -\Delta B = B - B_0$ ，其中  $B$  为焓，则对于流动系统，焓可表示为

$$B = (H - T_0 S) + X + \frac{\mu^2}{2g} = b + X + \frac{\mu^2}{2g} \quad (2-2)$$

式中， $b = H - T_0 S$  常被称为有用能或有效能（available energy）。若系统的位能及动能变化可以略而不计，则  $B = b = H - T_0 S$ ，即在此情况下，焓与有效能是相等的。对于非流动系统，则按类似推演，其焓  $B'$  可以表示为：

$$B' = (E + p_0 V - T_0 S) + X + \frac{\mu^2}{2g} = b' + X + \frac{\mu^2}{2g} \quad (2-3)$$

式中， $V$  为系统体积， $b'$  为非流动系统的有用能。由此可见，焓是系统的性质，其值决定于系统所处的状态及外围温度  $T_0$ ，压力  $p_0$  等。与其他热力学函数一样，焓的绝对值是无法确知的，但人们感兴趣的是两个状态间的焓差，即过程在两状态间所能作的最大功，因此，通常令在“死状态”（即系统处于  $T_0$ 、 $p_0$ 、 $H_0$ 、 $S_0$  以及  $X$ 、 $u$  均为零）的焓为零，即  $B_0 = b_0 = 0$ 。此外，对于任何可逆过程来说，系统对外围所作的功等于焓的减少；外围对系统所作的功等于系统焓的增加。但对于任何不可逆过程，则系统对外围所作的功小于焓的减少，外围对系统所作的功大于系统焓增加。因此，可以利用功与焓的增减之间的差别来衡量过程的不可逆性，这是采用焓的概念来对过程进行不可逆性分析的基本原理。

过程的可持续性常用可更新性参数、环境效率参数、生产效率参数、总体效率参数、总体可持续性参数定量表征。

### 2.2.1 可更新性参数

过程的可更新性参数  $\alpha$  定义为一个过程消耗的可更新焓  $B_{\text{renew}}$  占全部消耗焓  $B_{\text{cons}}$  的分数：

$$\alpha = \frac{B_{\text{renew}}}{B_{\text{cons}}} \quad (2-4)$$

式中  $B_{\text{cons}}$  按下式计算

$$B_{\text{cons}} = B_1 + B_2 + B_3 \quad (2-5)$$

式中， $B_1$  为处理过程排放物所消耗的焓； $B_2$  为实施过程所需要的焓； $B_3$  为产品使用后转化成无害物所需要消耗的焓。

### 2.2.2 环境效率参数

过程的环境效率参数  $\eta_1$  定义为：

$$\eta_1 = \frac{B_2}{B_{\text{cons}}} \quad (2-6)$$

对于一个实际过程  $0 \leq \eta_1 \leq 1$ 。

### 2.2.3 生产效率参数

过程的生产效率参数  $\eta_2$  定义为：

$$\eta_2 = \frac{B_b}{E + B_b + D} \quad (2-7)$$

式中， $B_b$  为有用产物物流的焓； $E$  为生产过程中的无用焓； $D$  为过程的不可逆性焓。

### 2.2.4 总体可持续性参数

过程的总体可持续性参数  $S$  定义为：

$$S = \frac{\alpha + \eta}{2} \quad (2-8)$$

式中  $\eta = \eta_1 \times \eta_2$ ，称为总体效率参数。

## 2.3 过程的可持续性分析与评估

对于一个过程进行可持续性分析与评估的基本步骤为：

- (1) 计算该过程中所有原料、中间体和产物的焓；
- (2) 计算生产过程中排放物处理所消耗的焓 ( $B_1$ )；
- (3) 计算产品使用后处理所消耗的焓 ( $B_3$ )；

(4) 计算描述可持续性的参数  $\alpha$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta$ 、 $S$ ;

(5) 分析与评估。

现以天然气发电和太阳能电池发电两个过程为例进行过程的可持续性分析与评估。

天然气发电过程中，输入的天然气和水的焓分别为 84.99MW 和 0.06MW 该过程的两个有用输出为 30.00MW 净电力和焓为 12.81MW 的水蒸气。另外还产生焓为 2.77MW 的烟道气。为了降低排放物对环境的影响，烟道气中的  $\text{CO}_2$  必须除去。 $\text{CO}_2$  的排放速度为 0.577kg/s，其需要的焓为 5.862MJ/kg $\text{CO}_2$ ，因此需要 3.38MW 的处理焓。基于这些数据可计算出各个可持续性参数，见表 2-1。

表 2-1 发电过程的可持续性参数

生产方法	$\alpha$	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta$	$S$
天然气发电	0.0007	0.9617	0.5033	0.4841	0.242
太阳能电池发电	0.9676	0.9932	0.1247	0.1238	0.546

太阳能电池发电可产生 4285 GJ/(ha·a) 的净电。建造太阳能电池所需的不可更新资源的焓为 885GJ/(ha·a)，产生 40360 kg  $\text{CO}_2$ /(ha·a) 所需的处理焓为 236.6 GJ/(ha·a)。该过程的各个可持续性参数示于表 2-1 中。

显然，在可更新资源使用方面，太阳能电池发电明显优于天然气发电过程，其可更新性参数分别为 0.9676 和 0.0007。天然气发电过程由于使用了大量的不可更新资源，导致其需要很大的处理焓，其环境效率参数劣于太阳能发电过程。但在生产效率方面，天然气发电过程优于太阳能电池发电过程，其效率参数分别为 0.5033 和 0.1247。综合考虑，太阳能电池发电的可持续性优于天然气发电过程，其总体可持续性参数分别为 0.546 和 0.242。

## 2.4 世界各国有关可持续发展的策略

可持续发展受到国际普遍关注。1995 年 3 月 16 日，美国总统

克林顿宣布设立“总统绿色化学挑战奖”(the presidential green chemistry challenge awards),并于1996年7月在华盛顿国家科学院颁发了第一届奖项。此后每年颁发一次,由华盛顿国家科学院颁奖,详见表2-2。这是世界上首次由一个国家的政府出台对绿色化学的奖励政策,其目的是通过将美国环保署与化学工业部门作为环境保护的合作伙伴的新模式来促进污染的防止和建立工业生态的平衡,更确切地说,设立该奖是为了重视和支持那些具有基础性和创

表 2-2 美国“总统绿色化学挑战奖”1996~2001 年获奖项目

年份	学术奖	小企业奖	变更合成路线奖	变更溶剂/反应条件奖	设计更安全化学品奖
1996	将废生物质转化为动物饲料、化学品和燃料	替代聚丙烯酸的可降解性热聚天冬氨酸的生产和使用	由乙二醇胺催化脱氢取代氢氰酸路线合成氨基二乙酸钠	100% CO <sub>2</sub> 用作聚苯乙烯发泡剂的开发和应用	一种对环境安全的船舶生物防垢剂
1997	可使 CO <sub>2</sub> 用作溶剂的表面活性剂的设计和应用	一种革命性的脱除光阻性有机物的清洁技术	环境友好的布洛芬生产新工艺	不产生显影、定影废液的干法感光成像系统	一种全新的低毒能快速降解的杀菌剂
1998	“原子经济性”概念的发展;微生物作为环境友好催化剂的应用	环境友好的灭火剂和冷却剂的开发和初步应用	在芳烃的亲核取代反应中消除使用氯的新工艺	用于生产替代含卤素溶剂的乳酸酯的高效膜	安全高效、选择性杀虫剂家族的发明和应用
1999	在绿色化学中用作氧化剂及漂白剂的双氧水的活化	将廉价生物质转化为乙酰丙酸及其衍生物	制药工业中一种生物催化剂的应用	在水基分散体系中生产聚合物以避免使用有机溶剂	一种新型天然杀虫剂产品
2000	酶催化剂在大规模有机合成中的应用	玻璃和陶瓷器皿用的耐辐射环保型油墨涂装技术	有效抗病毒剂的高效生产工艺	双组分水性聚氨酯甲酸酯涂料	高效安全的白蚁群诱杀剂
2001	在水和空气中进行的过渡金属催化过程开发	引起种植业绿色化学革命的 Harpin 技术	环境友好的易生物降解的螯合剂亚氨基丁二酸氢钠的合成	棉纤维的生物化处理系统	钇替代铅的阳离子电沉积涂层

新性、并对工业界有实用价值的化学工艺新方法，以通过减少资源的消耗来实现对污染的防止。美国“总统绿色化学挑战奖”设有变更合成路线奖、变更溶剂/反应条件奖、设计更安全化学品奖、小企业奖以及学术奖五个奖项，个人、团体和组织可以通过竞争总统奖来获取对某些基础性突破的支持，这些突破可使化学变得更为清洁、更为经济、更为美好；该奖还体现了国家对将绿色化学原理应用到化学的设计、加工和应用过程而产生的技术的重视。

日本是一个风景绮丽、环境优美的太平洋岛国，而发生于 20 世纪中叶的东京光化学烟雾、水俣病、痛骨病等事件却闻名于全球，引起了当时日本政府的高度重视。同时，日本是一个资源匮乏但经济发达的工业强国，为保持其稳定发展，在 20 世纪 70 年代发生了世界能源危机后即启动了一批诸如研究开发新能源技术的“阳光项目”、研究开发节能技术的“月光项目”和其他环境保护技术开发项目。进入 20 世纪 90 年代，一个由政府规划，旨在防止全球气候变暖、在 21 世纪重建绿色地球的“新阳光计划”开始实施，其主要内容为能源和环境技术的研究开发，该计划提出了“简单化学”（simple chemistry）的概念，即采用最大程度节约能源、资源和减少排放的简化生产工艺过程来实现未来的化学工业，为了地球环境而变革现有技术。该计划还指出绿色化学就是化学与可持续发展相结合，其方向是化学的发展适应于改善人们健康和保护环境的要求。最近又提出“第三冲击波”是以环境产业为龙头带动国民经济发展的战略，与他们 50 年代以钢铁工业为龙头的“第一冲击波”、70 年代以电子工业为龙头的“第二冲击波”相比拟。

1990 年 7 月 27 日日本成立了由工业界、学术界和政府联合组织的为地球而创新技术的研究院 RITE（research institute of innovative technology for the earth），来承担促进重建“21 世纪新地球”活动的最重要角色之一；还成立了日本化学创新研究院 JCII（japan chemical innovation institute），其目标是通过工业界、学术界和政府的共同努力来实现社会的可持续发展，把学术界和工业界的不同知识结合在一起，以发展创新并开创新的工业领域。

德国是一个非常重视环境保护的国家，其优美的环境蜚声世界，令慕名前往的游人流连忘返。然而，德国在环境保护中所取得的显著成绩，也并非一帆风顺，而是在挫折与教训中获得的结果。曾几何时，战后的联邦德国为迅速发展经济而一度忽视环境的保护与治理，许多企业反将其视为“额外负担”，一些化工厂将污水排入莱茵河，使河水有毒物质的含量接近或超过正常值的 200 倍，导致大量鱼虾死亡；有毒气体直接排放，不仅使空气受到严重污染，森林亦大面积受到损害。正是这些严重的危害使政府认识到环境与经济发展是相辅相成的，从 20 世纪 80 年代中期开始实施了一系列环境保护措施。1997 年底联邦政府正式通过了一个名为“为环境而研究”的计划，主要包括三个主题：区域性和全球性环境工程、实施可持续发展的经济及进行环境教育，计划年度预算达 6 亿美元，其中将实施可持续发展经济的部分内容交给了化学工业。此外，德国联邦教育科学研究和技术部还与化学工业在研究、技术开发、教育和创新等方面建立了正常的对话，可持续发展的化学被确定为这一对话固定的主题之一。

在英国，一项由 RSC、Salters' Company、Jerwood Charitable Foundation、DTI 和 DETR 等资助的英国绿色化学奖于 2000 年开始颁发，该奖分为三类：一是被称作“Jerwood-Salters 环境奖”，的年度学术奖，奖金额为 10000 英镑，由 Salters' Company 和 Jerwood Charitable Foundation 共同资助，用于奖励那些与工业界密切合作而卓有成就的年轻学者。Jerwood Salter 青年科学家环境奖的获奖者为伦敦帝国学院的 Chris Braddock。他研制成一种可回收的硝化催化剂，此催化剂只用一当量的硝酸就能达到所需的性能，并可完全回收重用。这一催化系统不用硫酸，惟一的副产物是水。另二项年度奖用于奖励在技术、产品或服务方面作出成绩的英国公司，其中至少有一家为中小型企业，这两项奖励为奖品和证书。巴斯公司因发明一种棉染料而获工业奖。这类牌号为 ProcionXL<sub>r</sub> 的染料是用细心设计的带有一氯三嗪反应基的发色团制成的。这类染料带来的环境效益是原料用量即染料、水、盐和助剂的