



国防科工委“十五”规划教材·化学工程与技术

化工过程设计

黄 英 主编

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本教材较系统地阐述了现代化工过程工程学的核心内容——过程开发与设计,过程经济评价和化工厂整体设计的基本原理、基本程序与方法。书中全面地介绍了化工过程设计的基本原理、设计规范及设计计算的基本方法。教学内容以化工过程设计为主线,对化工项目建设的各个环节所涉及的原料、路线、设备等一系列问题进行了阐述,并力求反映时代的特色。全书内容层次分明、论述清晰,注重学生综合能力的培养与提高,并结合实例介绍了计算机辅助设计方法。

本书的内容选取接近于工程实际,具有很强的综合性和实践性,既可作为高等学校化学工程与工艺、应用化学等专业的教材和化工过程设计课与毕业设计的参考用书,又可供从事化工类专业的工程设计人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程设计/黄英主编.—西安:西北工业大学出版社,2005.4

国防科工委“十五”规划教材·化学工程与技术

ISBN 7-5612-1832-X

化... 黄... 化工过程—设计—高等学校—教材 . TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 082484 号

化工过程设计

黄英 主编

责任编辑 王夏林

责任校对 韩书琪

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:33.875 字数:713 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-1832-X 定价:45.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技



新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提



升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



序

人类社会已进入 21 世纪,科学技术的发展将更加迅猛,并已成为推动国家经济和社会发展的主要力量。在近代科学与技术快速发展的推动下,化学工程赖以发展的科学基础有了长足的进步,化学工程学科本身已经进入了崭新的阶段。人们对学科中原有问题的认识不断深入,更加接近本质。新技术、新工艺、新产品层出不穷,知识的更新速度比任何时候都快。化工学科的内容已从过去的宏观层次发展到介观至大宏观(环境、资源和能源等的全球性可持续发展)的多领域。目前的化学工程,所涉及的领域不断增加,与其他学科互相交叉、渗透,不断出现新的学科增长点,产生许多新的、交叉性综合学科,知识朝着综合化、多维化方向发展。特别是随着新能源、新材料、生物技术等新兴产业的出现,化学工程在这些新领域发挥巨大作用的同时也不断推动自身理论与技术水平的提高,孕育出材料化学工程、生物化学工程、能源化学工程、资源化学工程、环境化学工程等新的学科分支,为化学工程学科的发展带来了新的活力和发展空间。同时,化学工程学科从来没有像今天这样与环境资源、人类社会密切相关。

化学工程以其作为物质和能源生产的基础工程技术的属性决定了它在未来社会中不可动摇的重要地位。基础科学则是化学工程研究和工业进步的知识源泉。未来的化学工程师的成功与否将取决于他的综合素质与创新能力,而创新能力是建立在其自然科学功底和对现代高新技术的把握之上的。根据教育部 1998 年颁布的专业目录,化学工程与工艺专业覆盖了原先的化学工程、化学工艺、高分子化工、精细化工、生物化工(部分)、工业分析、电化学工程、工业催化、化学工程与工艺、高分子材料及化工(部分)和生物化学工程等专业,几乎包括化学工业的各个领域,涉及能源、环境、冶金、材料、轻工、卫生、信息等许多其他工业及技术部门。现今的化学工业已从传统的原料工业转变成一个以新材料、精细化学品、专用化学品、生物技术、催化技术、新能源、新资源开发为主的知识密集型工



业。在这样一个大背景下,化工本科教育就要扩大视野,化学工程与工艺专业的课程体系、教学内容、教学方法等必须随之做相应的改革,以适应国际市场经济下的人才需求。

教育的全球化及国际交流速度的加快给化工高等教育带来了新的机遇与挑战,这就要求教学改革与教材建设要面向未来,及时进行人才培养模式的调整与教学内容的精选、优化,使传统的化工学科始终保持永久的生命力。现在的化工过程设计教材内容必须紧密跟随化学工程学科飞速发展的步伐,急需进行调整与更新。本书根据 21 世纪专业人才的培养要求,结合化工过程设计的最新进展,其内容覆盖了化工过程设计中涉及的基本问题,对计算机在化工过程设计中的应用做了较详细的介绍。教材注重对学生创新能力的培养,贯彻执行国家标准,是值得化工过程设计领域相关人员一读的好教材。

中国工程院院士、西北工业大学教授

2004 年 12 月于西安



前 言

《化工过程设计》为高等学校化工专业的专业课教材。主要内容是介绍化工过程设计与化工厂设计。

从目前的科技发展可知,化工过程涉及在非常广阔的时间和空间范围内发生的物理、化学现象。从分子振动的纳秒级到环境科学中污染物破坏的世纪级,从微反应中的原子、分子尺度到大气中物质发射分散的数百万米级,它不再仅局限于研究以米和小时为单位的工业工程操作。化工过程的飞速发展使化学工程学的发展经历了三个主要阶段,即 20 世纪 40 年代以前的“单元操作阶段”,60 年代以来的“三传一反”阶段,1996 年提出的“多尺度、多目标”研究发展新阶段。目前,为了满足可持续发展和实现环境、经济和社会决策总体优化的要求,原来很多成熟的工艺在新的技术竞争之下将会遭到淘汰,新的“三废”排放标准和新的能源政策也促使老工艺的改造和更新。因此,现代的化工专业人才不仅应具备扎实的基础知识,良好的自学能力及分析、解决问题的能力,还应具备很强的综合能力和创新能力。未来的化工过程工程师的知识结构不应局限于科学与技术本身,他们应采用前瞻性的思维方式,以一种多尺度、多目标的途径,瞄准生产过程的总体优化。在解决具体工程问题时,要思考某一新的合成反应所获得的产品如何实现工业化,从最初的设计概念开始,应当采用哪一种或哪几种原料、选择哪些途径来提纯原料和反应物,以及工厂设备的设计、布置,开发能否获得合理的经济效益,对环境和今后的发展将产生什么影响等。这就意味着要全面综合地考虑经济、政治、资源、环境等多方面的因素,这就是新的化工过程学。根据这一新的界定,化工过程应成为一种有待开拓的新领域。如何在化工过程设计中通过不断的比



较、决策,从中找出最优方案,未来的化工过程工程师、广大科技人员迫切需要一本结合当今科技发展实际、对化工过程设计有益的参考书。本教材就是基于以上目的而编写的。

在编写中,本教材着重体现下面几方面的内容。

(1)随着可持续发展、环境保护、安全生产等要求的日益提高,化学工程学与经济学、社会学、法学等社会科学学科不断综合,化学工程学事实上已发展为“过程工程学”。在教材中,结合实际,突出这部分内容,这是21世纪教材应具有的特色。

(2)随着计算机科学和人工智能等新知识在化学工程领域内的应用与普及,更多的化工设计、控制问题将通过建立数学模型、设计标准模块来处理;新型的化工专家系统还能将那些难以用理论公式描述的经验知识建成高级程序,并用于解决实际问题。在教材的相关章节中充实上述内容,对学生了解并掌握新知识,以及对科技人员在生产实际中和科学研究中从事化工过程开发与设计具有重要意义。

(3)随着各种广义化工过程为人们所认识、理解和开发,以及系统科学的不断发展,过程开发方法论和过程综合与集成也可能是未来化工过程发展的另一个基点。这将吸引人们系统地总结这方面的一般性工具知识,建立优化设计的化工系统工程。在教材的相关章节中力求对这一部分内容有所体现,这是现代化工发展的需要。

本教材较系统地阐述了现代化工过程工程学的核心内容——过程开发与设计,过程经济评价和化工厂整体设计的基本原理、基本程序与方法。

全书内容共分10章。第1章概述化工工艺开发与工艺设计基本内容和程序,并结合最新资料介绍了21世纪化工过程开发与工艺设计的发展趋势,讨论了如何采用方法论来进行化工过程的整合;第2章和第3章介绍了化工设计的基本运算——物料衡算与能量衡算——的各种方法,讨论了夹点技术和换热网络的设计计算,对现代计算机辅助运算方法做



了较详细的论述;第4章为工艺流程设计,说明了化工工艺流程的基本特征和基本要素,并介绍了计算机辅助流程设计;第5章化工设备的工艺设计与选择,对反应器的选型,换热器的选型,计算机辅助设计,分离过程的优化,分离设备及其有关内容进行了讨论;第6章化工车间管路布置设计,介绍管路的设计和布置;第7章车间布置设计,着重提高学生的实际设计能力;第8章工程经济,讨论了优化设计方案所需的经济分析与评价、设计概算问题;第9章安全与环保,简要地介绍了安全和环保等方面的知识;第10章计算机辅助化工过程设计,对计算机在化工过程设计中的应用与发展进行了介绍。

本书由西北工业大学黄英主编。西北工业大学黄英(前言,绪论,第1,2,4,5,8,9章,附录和全书的统稿)、苏力宏(第7章),哈尔滨工程大学郭亚军(第3章)、王军(第6,10章)参加了编写工作。西北工业大学王艳丽参加了许多资料的收集与整理工作。

本书的编写得到了西北工业大学教务处李辉老师、西北大学教授李宝璋和西北工业大学出版社的大力支持和热情的帮助;同时,在编写过程中,引用了许多专家、学者的文献资料,特向他们致以最诚挚的谢意!

按21世纪人才培养的综合要求,本书力争在内容上有所创新、注重拓宽基础与学生能力的培养。由于教学改革是一项长期的任务,同时作者对一些问题的认识水平有限,书中存在不妥之处,请广大读者予以指正。

编者

2004年5月于西北工业大学

目 录

| | |
|-------------------------------|-----|
| 绪 论 | 1 |
| 第 1 章 化工工艺开发与工艺设计概述 | |
| 1.1 工艺过程开发及工艺路线选择 | 11 |
| 1.2 化工工艺设计 | 28 |
| 1.3 21 世纪化工过程开发与设计的创新发展 | 37 |
| 1.4 化工过程的整合与优化 | 49 |
| 1.5 工艺设计中的全局性问题 | 61 |
| 习 题 | 72 |
| 第 2 章 物料衡算 | |
| 2.1 物料衡算的基本概念 | 74 |
| 2.2 不同过程的物料衡算 | 84 |
| 2.3 化工过程的物料衡算 | 126 |
| 2.4 计算机辅助计算方法在物料衡算中的应用 | 131 |
| 习 题 | 141 |
| 第 3 章 能量衡算 | |
| 3.1 能量衡算的意义 | 146 |
| 3.2 能量衡算可以解决的问题 | 146 |
| 3.3 能量衡算的方法和步骤 | 147 |
| 3.4 能量衡算 | 148 |
| 3.5 热量平衡方程式 | 155 |
| 3.6 热量衡算实例 | 165 |
| 3.7 换热网络设计 | 172 |
| 3.8 计算机辅助化工流程中的能量衡算 | 192 |
| 习 题 | 195 |
| 第 4 章 工艺流程设计 | |
| 4.1 概 述 | 197 |
| 4.2 工艺流程设计的分类 | 197 |
| 4.3 工艺流程设计 | 198 |
| 4.4 计算机辅助流程设计 | 236 |



| | |
|---------------------------------|-----|
| 习 题 | 256 |
| 第 5 章 化工设备的工艺设计与选择 | |
| 5.1 概 论 | 257 |
| 5.2 定型设备的选择 | 259 |
| 5.3 换热器 | 271 |
| 5.4 塔设备 | 303 |
| 5.5 反应器的设计 | 321 |
| 5.6 储 罐 | 335 |
| 习 题 | 339 |
| 第 6 章 化工车间管路布置设计 | |
| 6.1 管道、管件及管架 | 341 |
| 6.2 管路布置设计应考虑的问题 | 361 |
| 6.3 管路布置图 | 363 |
| 习 题 | 367 |
| 第 7 章 车间布置设计 | |
| 7.1 概 述 | 368 |
| 7.2 厂房的整体布置和厂房轮廓设计 | 370 |
| 7.3 车间设备布置设计 | 373 |
| 7.4 典型设备布置原则 | 379 |
| 7.5 车间设备布置的方法和步骤 | 382 |
| 7.6 施工图深度与绘制方法 | 383 |
| 习 题 | 391 |
| 第 8 章 工程经济 | |
| 8.1 投资估算 | 392 |
| 8.2 经济评价 | 404 |
| 8.3 设计概算 | 417 |
| 习 题 | 425 |
| 第 9 章 安全与环保 | |
| 9.1 化工安全生产 | 426 |
| 9.2 环境保护 | 447 |
| 习 题 | 457 |
| 第 10 章 计算机辅助化工过程设计 | |
| 10.1 CAD 技术在化工行业中的应用与发展方向 | 458 |
| 10.2 分子模拟 | 467 |



| | | |
|------------|--------------------|-----|
| 10.3 | 过程合成 | 471 |
| 10.4 | 流程模拟 | 473 |
| 10.5 | 实用化工软件 | 483 |
| | 习 题 | 510 |
| 附 录 | | |
| 附录 1 | 建设工程常用规范 | 511 |
| 附录 2 | 工厂防火规定 | 514 |
| 附录 3 | 储存物品的火灾危险性分类 | 518 |
| 附录 4 | 部分物质的燃爆性质 | 519 |
| | 参考文献 | 521 |

绪 论

科学技术发展史表明,对每一个历史时期的社会、经济发展具有深远影响的,对生产力的发展起带动作用的,主要是当时的能源、材料和制造技术。在这三大类技术中,有相当一部分属于化学加工技术(Chemical Processing Technology,简称过程技术),即通过一系列物理化学分离和化学反应(包括催化、电化与生化反应)改变原料的状态、微观结构和(或)化学组成的加工技术。以过程技术为基础建立的工业部门通称为化学加工工业或过程工业(Processing Industries)。

化学工程(简称化工)学是化学加工技术的科学基础。它以不同规模物质和能量转化与传递过程的共性规律作为主要研究内容;它是将物质和能量转化与传递过程的实验室研究成果转化为现实生产力的强有力工具和杠杆。

一、过程工程的基本概念

过程工程是指化工、炼油、冶金、能源、建材、医药、日化等多种工艺过程中有共性的工程技术。它包括了每个国家的大部分重工业。这类工业有下列特点:

- (1)工业生产使用的原料基本上为自然资源;
- (2)其产品主要用做其他产品生产工业的原料;
- (3)生产过程基本为连续化的生产操作;
- (4)在生产过程中,原料发生了物理变化、化学变化;
- (5)产量的增加依据生产规模的扩大来实现;
- (6)对环境易产生较严重的污染,要发展绿色的生产过程来解决污染问题。

过程工业依据生产方式、扩大生产的方法及生产时物质所经受的主要变化来分类。它是一个国家发展生产、增强国防力量的基础。过程工业的发展需要现代技术和大量资金的支持。

过程工业中进行的各种化学、物理过程往往在密闭状态下连续进行,它遍及几乎所有现代工业生产领域。每一过程工业需从原理上研究如何提高效率,降低投资费用和操作成本等。需要从原理上改进设备,提高生产力,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,同时使其符合可持续发展的基本原则。过程工程的学科理论基础是共同的泛化学工业,是在化学和物理学基本原理指导下高度交叉发展而形成的产业。它们共同的研究核心内容是:

- (1)物质流的传递与转化过程;
- (2)能量流的传递与转化过程;



(3) 信息流的传递与集成过程。

以上三者之间的交互作用促进了过程工程的发展,也进一步说明了在过程工程中技术是相通的和可共享的。

与过程工业相对应的为产品(生产)工业,产品工业是设计或革新人们所需要的有用产品的过程。其主要步骤包括定位产品的功能、确认产品功能与其化学组成或空间构成的内在关系、设计或改进产品,如生产电视机、汽车、飞机、空调等的工业。这类工业的产品,大都可为人类直接使用,关系到人民生活水平的高低。该类工业的特点是:

- (1)使用的原料基本上为过程工业的相关产品;
- (2)产品可直接为人们所使用;
- (3)生产过程基本上是非连续化过程;
- (4)生产过程主要为物理加工和机械加工过程;
- (5)以增建生产线或改进生产线来增加产品产量;
- (6)污染较过程工业轻,一般可采用较成熟的技术来改善和治理污染。

二、过程工程的发展

1. 计算过程工程学迅速发展

近 20 多年来,计算技术及其他一些相关学科和技术的发展为利用计算机来处理、解决各种类型的科学与工程问题创造了先决条件,使计算过程工程学也得到高速发展,过程科学方法论发生了显著的转变。如计算多相流动及反应过程,过程的分析、模拟、优化及集成等,这些都使过程工程学得到更为迅速的发展。

2. 过程工业绿色化

资源与环境问题为密切相关的可持续发展的两大基本问题。20 世纪 90 年代形成的全球环境发展战略,即把环境问题的解决与资源利用——经济生产模式的优化关联——统一起来,提出建立与环境相容的清洁生产——生态经济新模式。过程工程绿色化正是研究与自然环境相容的资源高效—洁净—合理利用的物质转化过程的工程科学,它涵盖了进行大规模资源加工,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。

从化工、冶金、能源、石化、轻工等典型过程工业来看,我国资源加工技术已不能再延续十几年前形成的传统工艺,以免造成生产消耗指数高,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中,效益低下和严重的环境污染等严重后果。能量流特别巨大的一些过程工业,资源利用率低,如有色冶金为回收矿石中百分之几、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子目标产品;化工行业生产 1 吨铬盐要产生近 3 吨毒性废渣;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达 10 亿吨,危险废弃物 9 500 万吨,不仅流失了大量可用资源,也严重污染了水体、土壤和大气。

由上述可见,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。

过程工业绿色化是综合利用环境与资源、材料、能源、生化工程与计算信息学等多学科的知识,它是研究物质转化过程绿色化的综合性科学与工程。过程工业绿色化的内涵可用图 0.1 表示。其主要内容包括:

(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。

(2) 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。

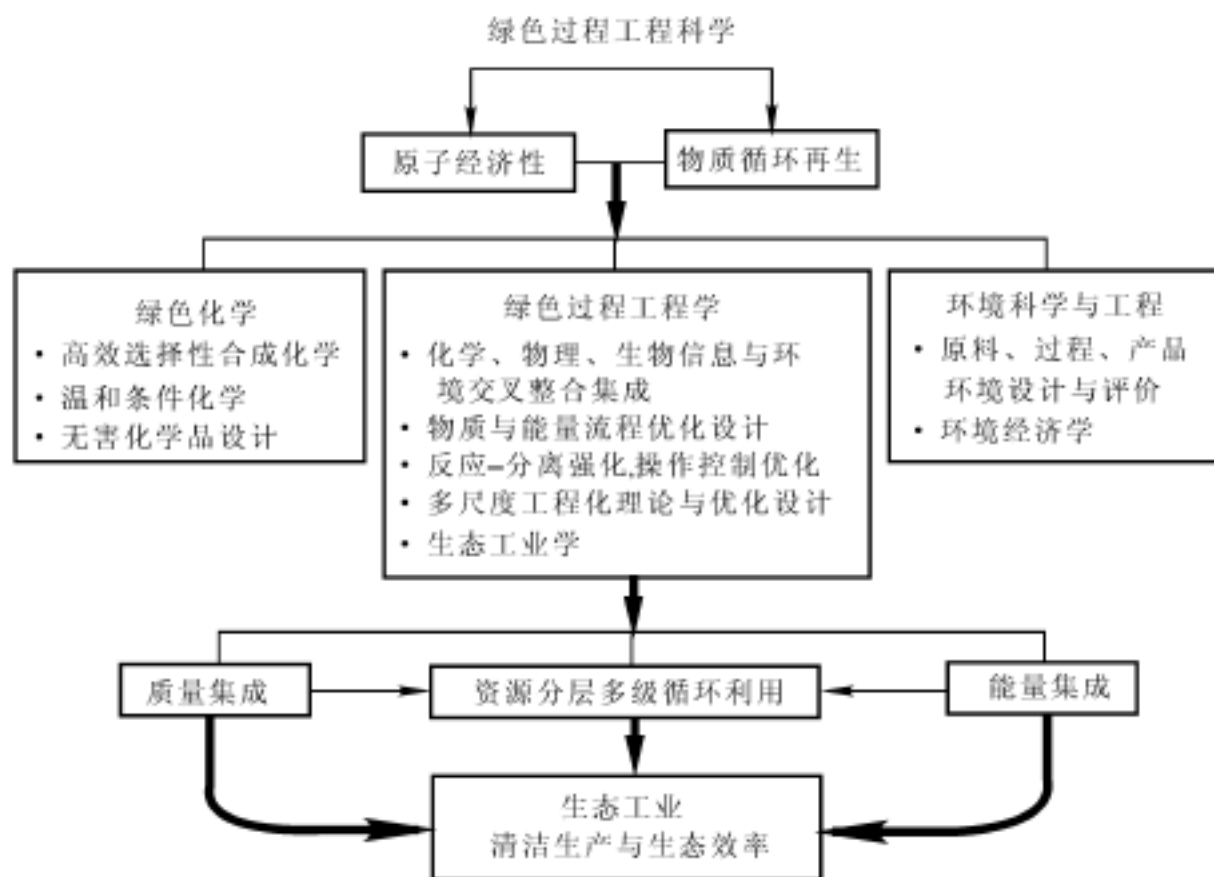


图 0.1 过程工业绿色化的内涵层面图

(3) 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。