

主编 金涌
执行主编 杨基础

探索

化学化工 未来世界

Chemistry and Chemical
Engineering:
A Career of Discovery

值得为之付出一生 1

1

清华大学出版社

主编 金涌
执行主编 杨基础

探索

化学化工 未来世界



Chemistry and Chemical
Engineering:
A Career of Discovery

值得为之付出一生 1

1

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是化学化工领域的专家学者为青年学生专门编写的一套科普书,反映了当今世界最前沿的化学化工科技成果。化学和化学工程在人类社会中一直起着重要作用,也对人类生活产生了重要影响。现代文明离不开化学与化学工程,同时,化学和化学工程一直在不断进步、推陈出新,为人们的想象力发展和创造力实践提供充分广阔的空间。这本书以及和它配合的视频短片,可以让读者从科学和工程前沿的全新视角,看到不一样的美丽化学和美丽化工。

本书是中国工程院化工、冶金与材料工程学部、中国科协青少年科技中心、中国科学技术协会科学普及部重点资助项目。其内容经过了几年时间的策划、创作和打磨,尽量做到前沿性、科学性、科普性、趣味性、艺术性、传播性的统一,力求深入浅出,图文并茂。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

探索化学化工未来世界:值得为之付出一生.1/金涌主编.一北京:清华大学出版社,2016(2017.7重印)

ISBN 978-7-302-43736-9

I. ①探… II. ①金… III. ①化学-青少年读物②化学工业-青少年读物
IV. ①O6-49②TQ-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第089088号

责任编辑:宋成斌

封面设计:岳小玲

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京亿浓世纪彩色印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:165mm×235mm 印 张:15.5 字 数:324千字

版 次:2016年5月第1版 印 次:2017年7月第3次印刷

印 数:13201~19200

定 价:60.00元

序

——化学与化学工程铸造未来世纪

回顾人类在这个星球上的发展历程，我们看到，人类文明已经极大地改变了这个星球的面貌和人类的生存状态，而人类文明的发展离不开科学与技术。本套化学化工前沿视频短片集和配套科普书要特别强调的是，现代文明离不开化学与化学工程，它们支撑着人们吃穿用度的日常生活，为眼花缭乱的高科技产品提供了各种先进材料，也在维护人类生命健康、应对全球气候变化等重大挑战方面发挥着重要作用。

现代社会的经济发展和全人类的衣、食、住、行，都离不开化学和化工产品。以中国为例，衣的方面，每年生产的合成纤维占世界份额的60%左右，可为世界上每个人制作4套衣服。食的方面，生产的农用化学品，例如化肥、薄膜、农药等，在大致相同的耕地面积上，使粮食产量从1亿t（1950年）提高到6.5亿t（2013年）。住的方面，每年新增建筑面积16~20亿m²，占世界每年新增建筑面积总量的一半，泛化学工业（也称流程工业，包括石油与化工、冶金、建材、轻工等）为此提供了大量的水泥、钢筋、涂料等各式建筑和装修材料。行的方面，中国已经是第一大汽车产销国，汽车生产和使用所需的汽油、柴油、电池、钢材、塑料、橡胶都来自泛化学工业。这些产品的生产过程，其核心离不开化学反应，化学对此提供了独特的分子层面的视角、思路和方法。

毫无疑问，化学与化学工程所支撑的泛化学工业，是国民经济的脊梁。离开了化学与化学工程，现代社会将有很多人衣不暖、食不饱、居无所、行不远，生活水平和质量大幅下降。本套化学化工前沿视频短片集和配套科普书，虽然对这些相对传统的内容并无太多着墨，但提请读者注意化学和化学工程被社会大众“日用而不知”的这一事实。

化学和化学工程更是高新科技的发端和支撑。先进制造业的发展需要各种高性能材料，包括高强度、高耐热、高耐寒、高耐磨、高气密封、高耐腐蚀、高催化活性、高纯度、高磁、超导、超细、超含能、超结构

和自组装材料，等等，无一不需要化学与化学工程技术来发明和制造。高性能新材料是先进制造业的先导和根本，也是我国制造业落后的根源之一，需要奋起直追。

泛化学工业在食品、制药、医用材料等人类健康支撑产业方面发挥着重大作用。此外，环境和生态改善也是化学化工的重要领域。

化学和化学工程一直在不断进步、推陈出新，为人们的想像力发展和创造力实践提供着充分广阔的空间。

随着科学与技术的指数式演进，可以预期我们现代社会所处的“今天”，会被认为是属于人类历史上相当原始的时期。再设想 100 年、500 年、1000 年以后，现在地球上常用的矿产资源、化石能源可能已经所剩无几，只有依靠化学和化工过程对可再生资源和清洁能源进行转化利用，才能使社会经济循环和永续发展。所以，强大而先进的化学与化学工程也是人类未来的依托。

人类文明发展到今天，绝大多数的人绝不可能愿意去过那种原始的、生产力低下的“自然”生活，只有依靠先进的科学与技术，人类才能更健康、更长寿、更幸福。那种认为应该停止科技发展去过田园牧歌式生活的想法，只能是少数人的乌托邦，是一种回避现实的幼稚病。人们对科技给人类社会带来的负面影响已经有了深刻认识，也具有足够的智慧和手段来减少和避免这些负面影响，现在和未来都需要依靠科技自身的发展和进步，发挥科技的正能量。

月球行走第一人、美国工程院院士尼尔·阿姆斯特朗曾呼吁说：“美国有许多人不相信逻辑，对专家们的努力持批评态度，而且往往感情用事，这些人所记得的全是桥梁塌陷、储油罐泄漏、核辐射散发污染等的报道。工程师们其实能言善辩，之所以没有取信于人，是因为人们把工程师们看成技术的奴隶，看成丝毫不注意环境保护、不注重安全、不注重人生价值的技术老爷。”目前对化学和化学工业的报道又何尝不是如此呢？阿姆斯特朗接着说道：“我拒绝接受这些批评，工程师其实像社会上的其他人一样有爱心、同情心和责任感。事实上，将他们马失前蹄之例毫无保留地公诸于世，足以证明他们的卓越

不凡。”

坦言化学和化学工程还不完美，直面其所遭遇到的重大挑战，正是因为它们的无可替代，因为它们对人类已经做出的巨大贡献并且还将做出的更大贡献。我们呼唤年轻一代为此去建功立业，不为浮云遮望眼，去为人类追求更幸福的生活。

编辑出版这套化学化工前沿视频短片集和配套科普图书的目的，是把世界著名大学和研究机构近期进行的化学与化学工程方面的研究工作介绍给年轻朋友。出版物力求体现前沿性、科学性、科普性和趣味性，以飨读者，也希望吸引优秀的青年学生投身化学与化学工程事业中。出版物中肯定有局限和不足之处，望不吝指正。

金 涌

于清华园

2015年12月

前言

组织化学化工领域的专家学者为青年学生如高中生、大学一年级新生，专门编写一套化学化工视频短片集并配科普书的初衷，是为了反映现代化学化工科技进步在人类社会中的重要作用，以及对人类生活的重要影响。力求化学和化工的重大作用被社会公众公正认知，扭转公众尤其是青年学生对化学化工的恐惧和偏见，让他们从科学和工程前沿的全新视角，看到不一样的美丽化学和美丽化工，吸引更多的青年投身化学化工的学习和研究，并能立志终生从事化学化工事业。

在 43 位中国工程院和中国科学院院士的共同倡议下，这项工作于 2010 年在中国工程院化工、冶金与材料工程学部立项。2012 年此项目分别被列为中国工程院化工、冶金与材料工程学部、中国科协青少年科技中心、中国科学技术协会科学普及部重点资助项目。

中国工程院金涌院士担任总策划，多位院士和几十位目前在高校及研究机构一线从事教学和科研的专家，在繁重的教学和科研工作之余，担任顾问、参与选题策划、编写视频短片脚本、指导制作公司制作视频短片、撰写书稿等。

由于手头几乎没有可供借鉴的音像资料，制作团队耗时几年，仅召开的研讨会就有上百次之多，有关细节修改的会商更是不

计其数。在大家的共同努力下，从无到有，使这套凝聚了许多人的心血、得到众多专家学者的支持、反映化学化工前沿的视频短片集及配套的科普书终于面世，得以奉献给大家。

在 2015 年清华大学夏季中学生化学学科营上，这些视频短片曾经为全国 100 多所中学的高中学生做了试映，效果很好，学生在轻松愉快的氛围中接受了化学化工的前沿知识。现在看来，利用几年时间制作、打磨化学化工视频短片集和配套科普书，是值得的。当然，由于各方面条件的制约，也深感此项工作尚未做到完美，但愿我们未辱使命。

本套视频短片集及配套科普书编写的内容选题，力争以当今世界最前沿的化学化工科技成果为首选，尽量做到前沿性、科学性、科普性、趣味性、艺术性、传播性的统一。视频短片制作以小见大，力求准确、新奇、美观。配套科普书力求深入浅出，图文并茂。

短片和文章“桌面工厂”介绍了微化工系统的基本原理，涉及微小空间内多相体系的混合分散、传递过程强化以及微化工设备的制造与放大。通过实例，展示了微化工系统在精细化学品开发和制造中的应用潜力。微化工系统的出现变革了数百年来化工装置大型化的发展策略，微化工系统是化学工业未来的重要方向之一。

“电力银行”重点介绍了一种全新的大规模储能技术——全钒液流电池储能，内容涉及多价态金属元素钒和膜技术等储能领域的特殊应用，将储能设备建成储能工厂，为克服分布式能源密度低、随机、不连续的缺点，有效利用太阳能、风能等可再生清洁能源，提供了可调可控新手段。

“智能释药”重点介绍了如何应用化学和化学工程的基本原理，开发先进的药物递送技术，实现药物的定时、定量和定向释放，与靶向药物相协同，提高药物的生物利用度，使药物的使用更加精确和便利；通过实例展示化学与化学工程是如何在药物传输过程中发挥重要作用的。

“神奇的碳”以碳的三种同素异形体为主线，介绍了当今广受关注的碳材料，如石墨、金刚石、碳纤维、碳纳米管、石墨烯等的相互转化关系，展示了碳元素的神奇。并从碳的特殊原子结构、丰富的轨道杂化方式和卓越的成键能力等角度，揭示了碳元素神奇的原因之所在。旨在让读者与观众认识到，化学化工可以改造分子，更可以创造未来。

“分子机器”介绍了化学家如何颠覆传统制造行业“由上至下”的思路，提出了“由下至上”的制造新方法，从分子水平构建能行使某种功能的“分子机器”。通过介绍法国化学家研制的分子轮，日本东京大学教授制造的分子剪刀和其他研究者构建的分

子开关、分子马达、分子车、分子大脑等实例，向年轻学子展示未来化学制造复杂分子机器的无限可能，也提出了使这一可能成为现实所面临的挑战。

“OLED 之梦”首先介绍了用于制备新一代梦幻显示器——OLED（有机发光二极管）的有机材料，展示了化学化工在电子行业的重要作用。然后简单而形象地介绍了 OLED 发光与显示的原理，以及 OLED 在显示和照明领域的应用。最后简要介绍了有机电子学，包括有机太阳能电池、有机场效应晶体管、有机传感器、有机存储器等前沿的科学技术，以激发年轻学生的好奇心和探求欲。

“复合材料”介绍了什么是复合材料，复合材料的基本构成，重点介绍了材料为什么要复合、如何复合，以及如何模仿动植物伤口自愈功能，实现受损复合材料自愈。还介绍了复合材料在各个领域里丰富多彩的应用，并展望了 21 世纪亟待创新性开发和应用的新型复合材料。

“病毒制造”介绍了如何利用病毒的自我复制和自组装能力，通过基因改造，使得让人感到恐怖的纳米级病毒颗粒反过来为人所用。具体介绍了基因改造后的 M13 噬菌体病毒，用作电池材料可以提高锂电池电量和功率；用作生物模板制备纳米铁颗粒，可以处理重金属废水，还可以介导制备锌卟啉-

氧化铈光催化剂分解水制氢。

“生物炼制”介绍了以地球上可再生的生物质为资源，通过化工与生物技术相结合的加工过程，将其转变为能源、化学品、原材料等的基本概念、原理和典型过程，使读者和观众认识到，生物炼制能够部分或者全部替代石化炼制；生物炼制是一个可循环的生态工业过程，是解决能源与环境危机的重要发展方向。

“细胞工厂”介绍了如何依据合成生物学和代谢工程的原理，以工程设计的思路，改造并优化已存在的代谢通路，提高目标产品的产量，或者设计自然界不存在的、全新的生物合成途径，实现大宗化学品、精细化学品和药物化学品的合成，生动地揭示了细胞工厂技术将对解决人类面临的能源、资源和环境问题产生的深远影响。

倡议编写本套视频短片集及配套科普书的两院院士如下。

中国工程院院士(排名不分先后)：

曹湘洪、陈丙珍、高从堦、关兴亚、侯芙生、胡永康、金涌、李大东、李龙土、李正名、毛炳权、欧阳平凯、沈德忠、桑凤亭、沈寅初、舒兴田、汪燮卿、王静康、魏可镁、吴慰祖、谢克昌、徐承恩、杨启业、袁晴棠、袁渭康、朱永(贝睿)、薛群基。

中国科学院院士(排名不分先后)：

白春礼、陈凯先、费维扬、冯守华、高松、李灿、何鸣元、侯建国、洪茂椿、林国强、

万惠霖、杨玉良、张玉奎、赵玉芬、郑兰荪、周其凤。

另有许多两院院士通过不同途径，表达了对本项工作的支持。在此，谨对这些院士表示衷心的感谢！

本套化学化工前沿视频短片集由清华大学杨基础教授、张立平副教授担任全程策划，并会同孙海英秘书全程协调、运作；配套科普书的主编为中国工程院金涌院士，执行主编为清华大学杨基础教授。

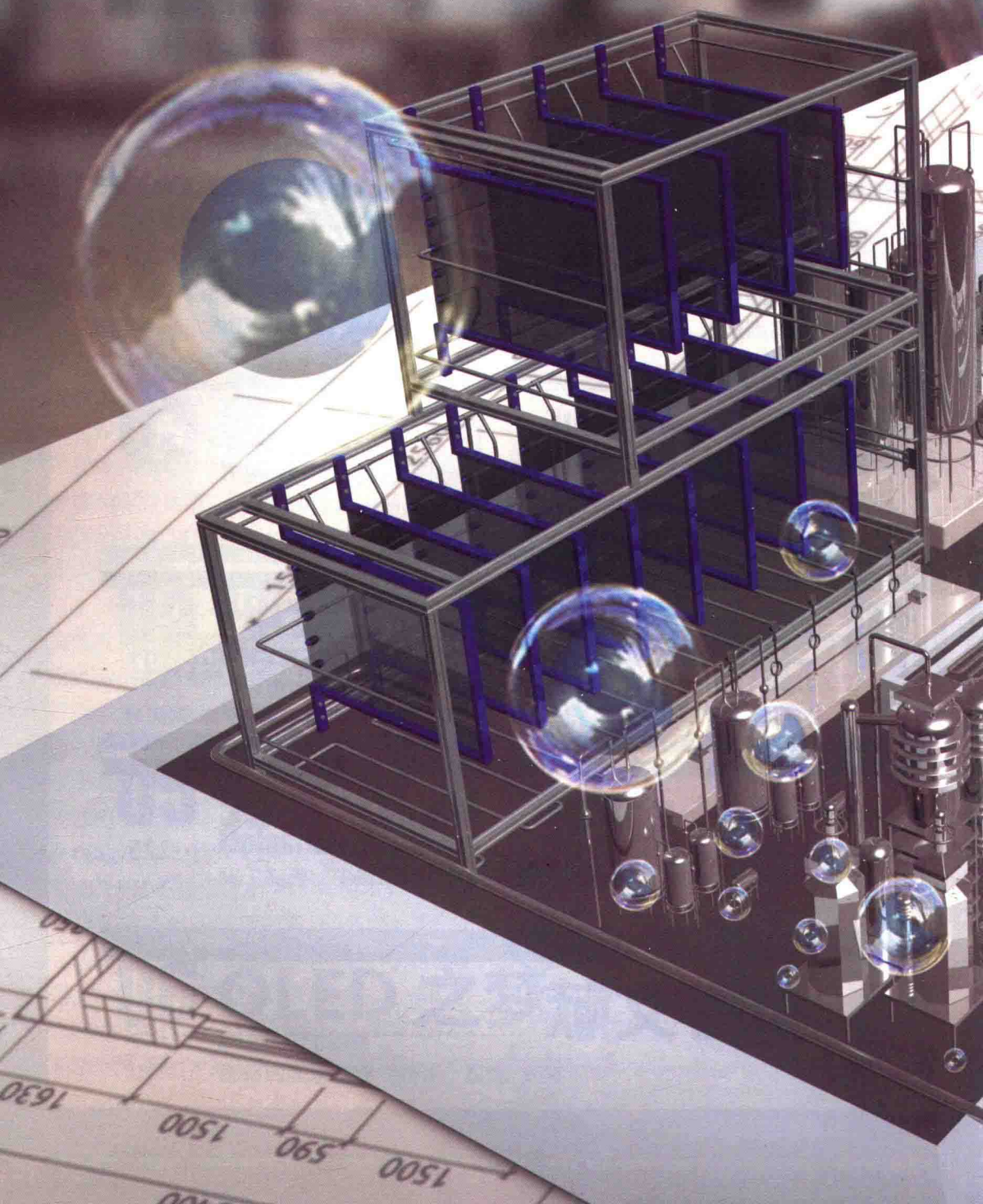
谨对参与第1册制作的清华大学、华东理工大学、南京工业大学、太原理工大学有关人员及其他为视频短片集和配套科普书出版付出努力的全体有关人员、制作公司和清华大学出版社表示衷心的感谢。

本套视频短片集和配套科普书可用于高中生课内外观看和阅读，扩大眼界，拓展知识，也可用于大学一年级新生的化学化工前沿研讨课，还可用于对大众进行化学化工科普教育。

化学化工前沿科普视频短片集
及配套科普书编制组

2016年3月

北京静远嘲风动漫传媒科技中心创作



目录

01 桌面工厂1

Desktop Factory

通向未来化工世界桥梁的微化工系统 / 王凯 吕阳成 骆广生

02 电力银行25

Electricity Bank

电化学能量转化与储能 / 王保国

03 智能释药49

Smart Drug Delivery

让药物的使用更加精确、安全和方便 / 蒋国强

04 神奇的碳71

Miraculous Carbon

需要重新认识的元素 / 庞先勇

05 分子机器97

Molecular Machines

化工制造业中越来越清晰的一场革命 / 沈旋

06 OLED 之梦113

OLED Dream

奇幻的显示及照明技术 / 段炼 刘嵩

07	复合材料 Composite Materials	139
	把优点发挥到极致 / 倪礼忠	

08	病毒制造 Virus Manufacturing	157
	从负到正的大变革 / 于慧敏 张帅 杨继	

09	生物炼制 Biorefinery	177
	解决资源和环境问题的金钥匙 / 陈振	

10	细胞工厂 Cell Factory	197
	化学品绿色制造的生力军 / 张翀 王天民 李刚 吴亦楠 郑翔 季洋 刘树德	

	图片来源	225
--	-------------	-----

	参考文献	228
--	-------------	-----

01 桌面工厂 Desktop Factory

通向未来化工世界桥梁的微化工系统

王凯 吕阳成 骆广生

宽阔的厂房，高耸的烟囱，巨大的储罐，轰鸣的机器；化工厂在人们心目中总是与这些场景分不开，但科学家除了在建设这样的庞然大物上下功夫之外，其实还为化工过程打造了一个袖珍王国。



桌面工厂

Desktop Factory

通向未来化工世界桥梁的微化工系统

Bridge to the Future of the
World of Chemical Engineering:
Microstructured Chemical
System

王凯 副教授，吕阳成 副教授，骆广生 教授（清华大学）

微化工系统是由小型化的、高度集成化的化工装置构成的系统，它的出现变革了数百年来化工装置大型化发展的策略，展示了化学工业的未来。微化工系统是基于化工最基本的传递强化原理，在精密加工技术的促进下发展而成。在实验室里，利用微化工器件可以组装“桌面上的化工厂”，在工业化的发展道路上微化工系统已经开展了初步的尝试。本文将介绍微化工系统的基本原理、制造方法、内部奇特的物理化学现象和几个典型的应用实例，展示微化工系统在精细化学品开发和生产中的应用潜力，指出其未来的发展方向。

11

引言

世界是由物质组成的。为了满足生产生活的需要，人类祖先从自然界直接获取各种天然物质。随着社会的发展，特别是现代文明的出现，人类对物质的需求量越来越大，对于物质的性质和功能也提出了越来越高的要求，这种社会需求极大地推动了加工技术的不断创新与发展，化学工业就是其中的典型代表。化学工业通过对自然资源进行一系列物理和化学转化，实现各种功能和规格的化学产品的大规模生产，在现代社会中具有举足轻重的地位。从化纤到轮胎，从水泥到涂料，从汽柴油到化学药物，从宇宙飞船到超级集成电路，我们身边到处都有化学产品的身影，可以毫不夸张地说：没有化学工业就没有现代文明。

当我们在日常生活中享受化工产品给我们的生活带来便利的时候，也不禁要问这些产品是如何生产出来的？我们都知道，若仅需要少量的化学品，化学家们在实验室就可以完成，他们使用试管、烧杯、量筒、水浴等仪器，经过一系列反应和纯化操作，就可以合成出所需要的化学品。但若产品的需求

量巨大，如几万吨甚至上百万吨的产品，就需要建设专门的化工厂。这些化工厂与实验室的显著差异在于生产工具发生了巨大的变化，在实验室用于化学反应的试管、烧瓶变成了以立方米来计量的搅拌釜，提纯用的分液漏斗、蒸馏烧瓶变成了数十立方米的塔设备，储存化学品的试剂瓶变成了数百至数千立方米的储槽，用于计量的量筒、天平变成了数字化的仪表，用于加热的水浴变成了兆瓦级换热器，步骤繁琐的人工操作被自动化的连续生产线所代替。可以说，化学工业是将化学带出实验室，将分子转化为“钱”，不断创新经济和社会效益的产业。

古代的酿造业可以说是化学工业的雏形，酿酒用的发酵釜和酒精的蒸馏过程就是原始的化工反应和分离过程。现代化学工业起源于工业革命时期，随着机械加工、自动控制以及信息化技术的发展，上百年来无数的化工科学家将化学家在实验室的成果通过工程科学的运用实现了产业化。时至今日，化学工业的发展已经相当迅速，现代化工装备已经实现高度的精细化和自动化，很多技

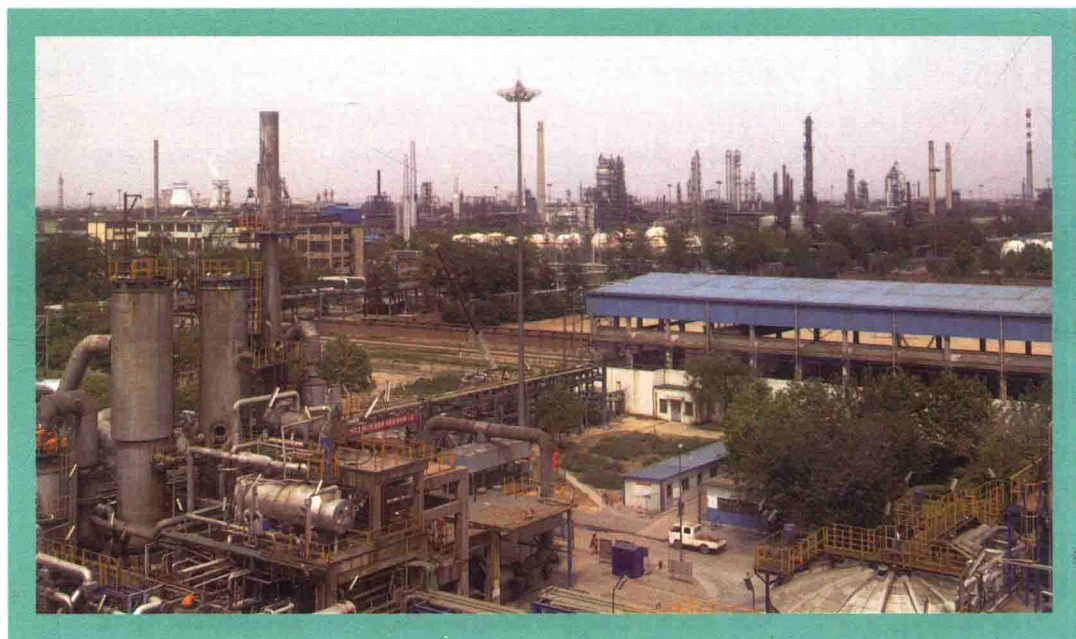
4 01 桌面工厂

术工艺也逐渐趋于成熟，可是数百年来化工装备大型化的发展理念却几乎一成不变。为了不断扩大产量，化工装备逐渐向着大型化发展，化工设备的体积越来越大，化工厂的规模、占地面积也越来越大，高耸林立的塔设备、密密麻麻的物料管线、如繁星般灯火密布的生产车间……在我们为这些伟大的生产建设而感到兴奋的时候，也会发现化工似乎又常与污染、危险等关键词联系在一起。因此，人们不禁要问：化学工业能否找到收获福音的可持续发展模式呢？

现代文明不可能离开化学工业，而且

随着人口的增加，资源、能源以及环境压力的增大，社会的发展对于化学产品的依赖也在不断增加，图 1.1 就是现代大型化工企业的一个场景。早在上个世纪，科学家们就已经意识到单一大型化的发展模式已严重制约了化工技术的创新，化学品产量和品质的提高应该源于生产效率和产品收率的提高。为了达到这一目标，化工专家们指出，新的发展模式和不断深入的化工基本规律认识，是化工设备和工艺创新发展的重要基础。微结构化工系统就是这种模式的代表之一。

图 1.1 大型化工生产企业



1.2

无处不在的传递现象

“天之道，损有余而补不足”这句话出自老子的《道德经》，意思是大自然的规律，遵循的是减少多余的，补给不足的。事实上，我们的先贤早在 2500 年前就道出了自然界一个普遍真理，也就是传递现象遵循的基本原则。

简单来讲，传递现象是指某物理量从高强度区域自动地向低强度区域转移的过程，这是自然界和工业生产过程中普遍存在的物理现象。例如，气球中的高压气体向周边低压环境的释放；烧开水时高温的火焰会向低温的水提供热量；水中的糖分会从较甜的高浓度区域扩散到较淡的低浓度区域，等等。发生这些传递现象的根本原因是物理量的空间位置存在差异，造成了物质或者能量沿着一定的方向发生迁移，即传递过程。物质或能量的传递速率主要取决于相应物理量（比如温度、浓度）差异的大小以及这种差异存在的空间距离（比如高浓度或高温区域与低浓度或低温区域之间的距离）。试想，烧开水时火焰温度越高，加热的速率就越快，水开得也越快；火焰离水的距离越远，加热的速率就越慢，水开得也越慢。物理量的差异与空间距离的比值，即所谓的“梯度”，它会直接决定传递速率的大小。



传递一词源于对英文单词 transport 的翻译，主要指物质和能量在空间和时间上的迁移，故名传递，有关传递科学的经典著作是 R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot 编写的 *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons 出版。



梯度是一个矢量，它的方向指物理量增长最快的方向，大小是其单位距离上的最大变化量。物理量梯度是引发物理量传递的“推动力”。