

生态材料

● 洪紫萍 王贵公 编著

导论



化学工业出版社
环境科学与 Engineering 出版中心



生态材料导论

洪紫萍 王贵公 编著

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

生态材料导论/洪紫萍, 王贵公编著. —北京:
化学工业出版社, 2001.5
ISBN 7-5025-3206-4

I. 生… II. ①洪…②王… III. 生态型-材料
IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 17557 号

生态材料导论

洪紫萍 王贵公 编著

责任编辑: 侯玉周

责任校对: 顾淑云

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印刷厂印刷

北京市云浩印刷厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 217 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-3206-4/X·90

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

可持续发展是全球各国在发展中都面临的问题,我国在这方面所面临的挑战尤为严峻。在中国科学院和清华大学国情研究中心联合撰写的一篇题为“中国可持续发展面临严峻挑战”的文章中写道:“长期以来,中国主要沿用以大量消耗资源和粗放经营为特征的传统发展模式,重发展的速度和数量,轻发展的效益和质量,重外延扩大再生产,轻内涵扩大再生产,对自然资源重开发轻保护。这种‘高资本投入、高资源消耗、高污染排放’发展模式违背了经济规律和自然规律,造成了环境污染和生态破坏,成为制约经济、社会发展的重要因素”。这篇文章论述了我国建国以来生态环境所经历的三次大破坏以后,对我国生态环境现状的基本评价是:先天不足,并非优越;人为破坏,后天失调;退化污染,兼而有之;局部有改善,整体在恶化;治理能力远远赶不上破坏速度,环境质量每况愈下,形成了中国历史上规模最大、涉及面最广、后果最严重的生态破坏和环境污染。

正因为如此,我国一些学者提出了“天人合一”的主张。主张人类的文明建设发展要与自然界的生态、环境的发展和諧统一。这当然是很好的主张。但怎样才能的人口日益增多、经济建设快速发展中做到“天人合一”,却并非易事,有待于各方面的专家学者在这一共识下对于各种有关的具体问题的深入研究。这需要各个科技领域针对面临的问题和随着经济发展而将会发生的问题进行长期不断的努力。《生态材料导论》的编著出版,正是体现了材料科技领域的这种探索和努力。

材料科技领域的书籍汗牛充栋,在关于材料的成分、结构、性质、制备、加工、使用性能及其与环境之间的交互作用,乃至包括当前十分热门的纳米材料、仿生材料等等在内的各种新型的功能材料和结构材料的发展等方面,都可以找到好的论著。《生态材料导论》的特

点是以生态过程的视点来考察材料从产生到废弃处理的整个“生命过程”中各个环节对生态环境和社会经济的影响,既从生态环境的角度来讨论材料的设计、生产、使用、再生和新型材料的发展问题,又探讨材料生态化,着重介绍了材料“生命周期评估”的研究问题。这无论对于材料科技领域的科技工作者来说,还是对于关心生态环境的科技工作者来说,都是扩大了视野。因此我深信本书的出版有益于为实现可持续发展而进行的努力。

中国科学院院士
浙江大学环境与资源学院院长 曹楚南
化学系教授

前 言

在 21 世纪到来的历史性时刻，人们无不回顾着材料科学所取得的辉煌成就，材料与信息、能源已成为现代文明三大支柱，材料为 20 世纪的科学技术进步和世界经济的迅猛发展提供了坚实的物质基础。

但在 20 世纪中叶人类开始了一场新的觉醒，那就是对环境问题的认识。残酷的事实告诉人们，材料工业的发展，在很大程度上是以破坏环境和浪费资源为代价换取的。21 世纪的材料工业必须改变这种传统发展模式，将材料工业的发展与保护生态环境协调起来，走可持续发展的道路。

在这种背景下导致了一门新兴学科——生态材料学的产生。生态材料一词来自英文 Ecomaterials。Ecomaterials 国内并没有统一的译名。传统上对“材料与环境”的研究是指材料使用时由于环境（力学的、化学的、热学的等）的影响，性能随着时间而下降，终至达到寿命终结。生态材料也是研究材料与环境的关系，其区别是前者研究在严酷的环境中的抗受能力，例如耐高温、抗腐蚀、抗老化等，而 Ecomaterials 是以人类生物圈大环境为视角研究材料如何与其相适应，前者是研究环境对材料的影响，而 Ecomaterials 则相反，研究材料对环境的影响，前者是侧重于研究材料使用阶段产生的变化，而 Ecomaterials 是研究材料整个生命周期的行为。Ecomaterials 最初由日本学者山本良一教授提出，日文的词源是 Environment (ally) Conscious Material 和 Ecological Materials，日文有“环境”一词，与中文“环境”同义，并被广泛使用，例如“环境污染”，“环境保护”等，考虑到 Ecomaterials 研究的内涵及与传统上“材料与环境”的研究相区别，日文并没有直接沿用“环境材料”一词，而是采用音译“エコマテリアル”。Eco-materials 的前缀

Eco-通常译为“生态”“生态的”，基于以上原因本书采用“生态材料”一词。

本书共分为 11 章，第一章至第四章为生态材料学的基本概念和基础知识，第五章至第十一章是按材料类别划分的各论，其中包括天然材料——木材一章，以通常按化学组成划分类别的人造材料共五章，以应用划分类别的材料共二章。本书力求在内容上有一定的系统性和实用性，以适应材料、生态、环境以及相关领域的科研、教学、管理、工程技术人员、高等学校学生使用。

作者期望本书的出版能对推动生态材料学的理论研究和应用研究起到积极的作用，由于生态材料学的发展历史仅有十年左右，是一门发展中的多专业交叉学科，涉及的材料领域很宽，撰写本书对作者是一个全新的尝试，受理论水平和掌握资料限制，难免存在错误和缺欠，敬请专家和读者予以批评和斧正。

本书编写过程中得到刘南博导支持和刘文廷博士、朱丽丹、潘琼等硕士的具体协助，在此表示衷心的感谢。

作者

2001 年 3 月

内 容 提 要

生态材料学是 21 世纪材料科学的重要研究方向，也是一个多学科交叉的新领域。生态材料是人类保护生存环境，实现材料工业可持续发展的有效途径，并已成为当前国内外研究的热点。

本书共分 11 章，主要介绍了生态材料学的基本概念和理论，材料与生态环境，生态材料的评估、设计、生产、循环再生。并分类介绍了木材、金属、高分子材料、复合材料、陶瓷、包装材料、建筑材料等各类材料的生态化和新型生态材料的相关知识。

本书可作为材料、环境、生态等专业从事科研、教学、工程技术人员及相关专业的大学生和研究生的教学参考书或教材，也可作为材料、生态、环境保护工作者的培训、自学教材或参考书。

目 录

第一章 概论	1
第一节 生态材料学的产生和发展	2
第二节 生态材料学的研究对象和任务	5
第三节 生态材料学的主要理论基础	11
第四节 生态材料学涉及的基本概念	12
第二章 材料与生态系统	18
第一节 材料与自然生态系统	18
第二节 材料与当代资源问题	26
第三节 材料与当代环境问题	28
第三章 生态材料评估	43
第一节 生命周期评估	43
第二节 材料生命周期评估	58
第四章 生态材料设计、生产、循环再生	62
第一节 生态设计	62
第二节 清洁生产	71
第三节 材料的循环再生	80
第五章 木材	86
第一节 森林在陆地生态系统的地位	86
第二节 木材在材料中的地位	87
第三节 木材及其制品与生态环境	89
第四节 木材生命周期评估	93
第五节 木材及其制品生态化	98
第六节 木材及其制品循环再生	102
第六章 金属材料	104
第一节 金属材料与生态环境	105
第二节 金属材料生态设计	108
第三节 金属材料生命周期评估	112

第四节	金属材料生态化和新型材料	118
第五节	金属材料的循环再生	124
第七章	高分子材料	134
第一节	高分子材料与生态环境	134
第二节	高分子材料生命周期评估	135
第三节	生态型高分子材料	140
第四节	高分子材料的循环再生	151
第八章	复合材料	161
第一节	复合材料与生态环境	161
第二节	复合材料生态设计	164
第三节	复合材料生命周期评估	166
第四节	生态型复合材料	172
第五节	复合材料的循环再生	179
第九章	陶瓷	183
第一节	陶瓷与生态环境	183
第二节	陶瓷生命周期评估和生态设计	184
第三节	陶瓷生态化和生态型陶瓷材料	187
第四节	陶瓷的循环再生	196
第十章	包装材料	199
第一节	包装材料与生态环境	199
第二节	包装及其材料生态设计	202
第三节	包装材料生命周期评估	204
第四节	包装材料生态化	210
第五节	包装材料的循环再生	212
第十一章	建筑材料	218
第一节	建筑材料与生态环境	218
第二节	建筑材料生命周期评估	228
第三节	建筑材料生态设计	232
第四节	建筑材料生态化和生态建筑材料	235
第五节	建筑材料的循环再生	243
参考文献	246

第一章 概 论

材料是社会进步的物质基础和先导，是人类进步的里程碑。材料科学的每一次重大突破都大大加速社会发展的进程，将人类物质文明推向前进。然而进入 20 世纪下半叶，现代社会的生产规模以空前速度扩张，人类需求与生态环境之间矛盾日趋尖锐。作为人类社会发展支柱的物质和材料必须改变其传统的发展模式，即实行材料的可持续发展，人们认识到现代高科技的发展有赖于材料科学的进步，而可持续发展又要求材料科学突破现有的思维。

传统材料所追求的是优异的物化性能和使用性能，而新世纪的材料科学的发展要求材料除具有优异的物化性能和使用性能外，还必须具有材料的第三属性即生态环境协调性，在材料的制造、流通、使用、废弃的整个生命周期都具有与生态环境的协调性。基于这种要求，科学界提出生态材料、环境材料、环境意识材料、绿色材料等概念，并开展了理论、技术研究，材料技术和企业界也推进了生态材料科学发展并获得实践成果。

生态材料学是一门生态学和材料学的交叉科学，也是面向 21 世纪发展中的学科，要不断地研究和总结其规律，以利于实际应用和普及推广。

在中国，20 世纪 90 年代是材料工业高速增长时期，但同时也带来能源、资源、环境污染的巨大压力，是一个充满挑战、希望和剧烈生态冲突的时代。新世纪，材料、生态环境工作者的任务是汲取国内外正反两方面经验教训，探讨一条适合中国国情的材料工业高效、和谐、持续发展之路。

第一节 生态材料学的产生和发展

一、生态材料发展时期

从生态学角度看，材料发展大体经历以下几个时期。

(一) 原始生态材料时期

原始社会是人类社会最漫长的时期，持续时间大约有 3×10^6 年，这一时期人口稀少，主要以天然资源为衣、食、住、行的使用材料，人类的行为是利用自然界的物质资源，以生活活动和生理代谢过程与生态环境进行物质和能量转换，很少有意识地改造自然，从获取资源的质量和数量角度看，属于原始生态模式，对自然生态系统基本不造成危害。

(二) 准原始生态材料时期

大约在 1×10^4 年前，人类开始进入农业时代，农业社会人口虽有增加，但使用材料依然以天然资源和人工栽培、饲养的生物为主要原料。人类逐步摆脱对自然界的依赖，利用和运用自然资源改善自己生存和生活水平的能力逐渐提高，出现了陶瓷、冶金业，人类只能制造与使用对自然资源进行粗浅加工的材料，以提高生活质量，并且总体来说生产规模也不大，虽然生态系统个别组元有短暂的扩张，但生态系统整体仍然可以长期维持。

(三) 非生态材料时期

18 世纪，人类进入工业文明时代，人与自然生态系统关系有了重大历史性转折，工业化社会随人口激增而迅速发展，现代物质文明提高，人类活动领域扩大到地球每一个角落，材料发展成大规模生产，大量开采地球上的各种资源，大量使用和消费，大量排放人类所不熟悉，难以降解、同化和忍受的“三废”。这个时期有明显的阶段性。20 世纪 50 年代，世界人口增加到 16 亿，世界能源消费量从世纪初 10 亿吨煤当量猛增到 25 亿吨煤当量，石油的消费量已增至 5 亿多吨，并在能源中所占比例加大，环境污染日趋严重，但主要出现在发达国家，资源、能源的流动只限于局部地区，污染的来源尚不复杂。进入 80 年代，资源、能源变成世界性大流

动，生态环境破坏扩展到全球，例如“温室效应”、臭氧层破坏和酸雨，污染源分布广、来源复杂，生态环境的破坏已经威胁到全人类的生存和发展。人类利用和改造自然的形式空前地复杂和多样化，大肆改造自然，生态系统主要是产业活动，使总体流动增大。社会的增长方式呈指数规律，其数学表达式如下。

$$A = A_0 e^{-rt} \quad (1-1)$$

式中 A ——增长值；
 A_0 ——初始值；
 r ——增长率；
 t ——时间。

若增长率为7%，则倍增期为10年。地球所能提供的能源和资源、所能容纳的环境污染物及所能供养的人口都是有限的，无限的增长方式将导致自然生态系统崩溃。

材料的大量生产、消费、废弃与自然生态系统出现了尖锐的矛盾，按生态学法则，这些因人为而引起的变化都对“社会-经济-自然复合生态系统”造成破坏。

(四) 生态材料时期

经过工业化社会，尤其后工业化社会的发展，人类对人与自然关系进行重新认识思考。以史为鉴，认识到材料持续发展的出路在于材料应以“社会经济自然生态效益”的统一为着眼点，人类不能无视客观的自然规律随意地处理自然。人类社会是整个自然生态系统中的一个子系统，其活动应当（包含材料生命周期的活动）参与自然生态的动态运动，一方面破坏大自然中旧的平衡，另一方面又建立有益于人类的新的平衡，应当使对生态系统的冲击和干扰限制在其再生循环能力和自净能力的合理限度内。随着材料的使用范围和生产规模不断扩大，生态环境依然得到保护，并追求人类与生态系统的长远效益。面向新世纪，在生态系统内部，材料的循环将进化成一种更有效的运转模式，对外部支持系统有较小的破坏作用，使传统的材料工业转变成生态材料工业，进入材料工业可持续发展

时勤。

二、生态材料概念的产生和研究进展

20 世纪, 社会生产力有了极大的提高, 经济规模也不断扩大, 人类前所未有的巨大社会财富加速了世界文明的演化进程。同时人类对发展的内涵却步入了认识的误区, 使地球资源过度消耗, 生态急剧恶化, 人与自然的的关系达到了空前紧张的程度。可以说 20 世纪是大规模生态赤字的世纪, 而 21 世纪庞大的人口压力仍然持续, 放弃经济增长和社会发展也是行不通的, 所以 20 世纪 80 年代以来国际社会关注的热点从单纯注重环境问题逐步转移到环境与发展二者的关系上来。材料从来是与环境和发展密切相关, 材料自身的发展也需要建立与可持续发展相适应的、新的思路和概念。正是在这种背景下, 科学工作者探讨了各种材料与环境相协调理论和方法。1990 年在日本“科技”上山本良一教授提出“环境意识材料”(environmental conscious materials) 概念, 认为 21 世纪材料应具有综合性能, 即人类活动领域的可扩展性 (Expandability of human's frontier); 环境调和性 (Coexistability with ecosphere); 舒适性 (Optimizability for amenities)。其可扩展性延伸到宏观的宇宙、深海, 微观的纳米空间、超洁净空间等。之后被更为广泛采用的是生态材料 (ecomaterials) 概念。1993 年日本科技厅开始历时五年的材料生态化研究发展计划。同时, 美国和欧洲学者也提出绿色材料 (Green Materials)、生态友好材料 (Eco-Friendly Materials), 生态工艺、产品、标记 (Ecoprocessing、Ecoproducts、Ecomark), 有益于健康环境材料和工艺 (Environmentally Benign Materials and Processes) 等概念, 但均处于发展阶段, 缺乏准确概念。ISO 14021—99 环境标志和环境宣言中指出“模糊的或不具体的, 或泛泛表明产品是对环境有利或环境无危险的环境声明不应使用, 因而, 类似“环境安全的”、“绿色的”、“环境友好的”、“无污染的”、“自然之友”、“土地友好的”和“臭氧友好的”等环境声明不应使用, 但这不妨碍科学工作者进一步深化和规范化的研究。

第二节 生态材料学的研究对象和任务

一、生态材料学的定义

材料的定义为“自然界中的物质，可为人类用于制造有用物品的，叫做材料。”随着私有制的出现，材料工业的发达，人们认识到资源和能源是有限的，而人源却随着时间推进在增加，因而现代修改定义为：“可为人类接受的，经济地制造有用器件的物质，叫做材料”，所以材料的属性应当有如下几点。

- ①具有传统材料的四大要素，即成分、结构、工艺和性能；
- ②可使用性，可用于社会经济的各种需求；
- ③经济性，传统上是人们可以承受的价格来衡量的。

生态材料还没有统一的定义，对“可为人类社会接受的”概念扩大其内涵，定义为“与生态环境相适应的材料叫生态材料。”无疑增加了新的属性即材料的整个生命周期环境负载低，可再循环、资源利用效率高的涵义。而“研究生态材料的科学叫生态材料学。”

二、材料的生态适应性判据

1. 材料对生态环境的压力

- ①直接对人类、生物造成危害，例如影响健康、中毒、产生疾病等；
- ②生活环境受到压力，例如景观、垃圾等；
- ③破坏可再生资源的循环系统；
- ④对不可再生资源的大量消耗。

2. 判断材料生态适应性的必要条件

- ①材料生产所需能耗低；
- ②材料生产过程无污染；
- ③原材料可再资源化；
- ④不过度消耗资源；
- ⑤使用后或解体后可再利用；
- ⑥可保证原料的持续生产；
- ⑦废材的最终处理不污染环境；

⑧对使用人的健康无危害。

三、生态材料学的研究任务

生态材料学的研究任务应当是研究材料系统对生态环境的影响，研究材料-生态环境系统之间的协调关系，并通过调控物质和能量交换过程，以改善生态环境，促进材料工业的可持续发展，最终促进人类与生态环境之间协调发展，所以生态材料学的主要研究任务应当包括如下三个方面。

(一) 探索材料系统和自然-经济-社会生态系统的相互关系

生态材料学是一种系统观，从有了人类的经济活动以来，也就有了对材料需求的无限性和生态系统资源供给的有限性，所以不能孤立地研究材料、资源、能源、经济和生态环境问题，而是从整体上研究其内在联系，寻求对系统的调节控制，以达到整体协调。

传统上材料的开发是高投入、高消费、高污染以换取高速度发展的模式，与自然-经济-社会生态系统产生越来越大的冲突，影响人类生存和可持续发展，材料自身发展也受到制约，所以研究材料系统和自然系统、经济社会系统的协调发展成为必要。

生态材料不仅要研究材料科学全部内容，而且涉及生态学和许多社会科学，探讨多学科的交叉、渗透的内在关系，以解决材料工业的可持续发展问题。

(二) 材料整个生命周期对生态系统包括地球生态系统、广域生态系统、地区生态系统的影响尤其是未来的潜在影响

传统上材料工业注重生产、使用阶段，目的是获取经济效益。人类认识到传统模式造成了全球性生态环境破坏，促使必须建立新的模式，这种模式应当考虑如下三点。

①材料整个生命周期对生态系统的影响，而不是某个阶段和几个阶段的影响。

②20世纪末开始的经济全球化，带来资源、能源、商品和环境污染全球化，例如温室效应、臭氧层破坏、热带雨林砍伐等已经突破材料工业仅仅对地域生态系统影响，而扩展到广域和全球生态系统。

③从生态学和可持续发展角度考虑,所有对资源、能源和环境污染的对策不仅仅针对目前已经激化了的矛盾,而应当全面考虑包括将来的潜在影响。

(三)传统材料的生态化和新型生态材料和生态材料设计、生产的规律

①传统材料,尤其是大规模生产、大规模使用的材料已经构筑了现代材料工业的基础,研究其生态化无疑是生态材料研究的重要任务。应当研究材料与环境负载的内在联系,例如复合材料、合金是不可替代的优秀材料,由于其多成分或多相结构造成难以再循环的矛盾,科学工作者从研究结构与环境负载的关系取得了进展。

②21世纪将会快速、大量涌现新型材料,材料的开发应当从研究和概念设计阶段就考虑与生态环境的适应性,不能重复传统的新材料开发模式,应当变高熵值开发为低熵值开发,要求科学工作者以新的观点研究材料开发和设计的理论和方法。

四、生态材料学的研究内容

(一)生态材料研究内容的发展过程

20世纪90年代初提出生态材料概念,对其所研究的内容并没有明晰的范围。例如,1993年8月东京第三届IUMRSX先进材料国际会议生态材料研讨会中,研究论文分类为循环再生和生命周期评估;再生和废弃物;二氧化碳、二氧化硫、氯氟烃(包括消除污染的技术、材料、代用品);汽车用材料;生物工程和材料;新材料;以持续发展为前提的未来材料技术。以传统材料生态化为基础研究论文可分为:再生、再利用型;代用材料型、不使用有害成分材料型;采用绿色能源型;自然分解型;环境净化、防止污染型;利用天然材料型;标准规格统一型。日本科学技术厅从1993年开始的“材料生态化研究”五年计划研究,主要研究内容包括生态平衡解析评估;可循环再生材料设计技术;与自然相融合物质(材料)的技术。生态材料的研究历史虽然很短,但已覆盖材料研究的各个领域。

经过近10年的研究实践和学者的讨论,基本从狭义的生态材