

高等学校教材

# 材料生态设计

苏达根 钟明峰 编著



化学工业出版社

·北京·

本书分别介绍了无机材料、高分子材料、金属材料以及功能材料的环境负荷及评价方法，并重点论述了它们的生态设计方法，结合当前的实际情况，讨论了如何加强对各种材料的废弃物综合利用，以减少环境污染。

本书可作为材料科学与工程、环境以及相关专业的本科教材，也可供材料、环境以及相关领域的科研、管理、工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

材料生态设计/苏达根, 钟明峰编著. —北京: 化学工业出版社, 2006.10  
高等学校教材  
ISBN 978-7-5025-9546-3

I. 材… II. ①苏…②钟… III. 生态型-材料-设计-高等学校-教材 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124669 号

---

高等学校教材

### 材料生态设计

苏达根 钟明峰 编著

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 彭喜英

责任校对: 周梦华

封面设计: 史利平

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 11 字数 267 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9546-3

定 价: 22.00 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

# 前 言

本教材从产品的生态设计出发,论述材料的环境负荷及评价方法以及如何从材料设计的角度出发,消除或者减少材料对环境的负荷,从而使我国的材料产业实现与生态环境相协调的可持续发展。

本教材分别从无机材料、高分子材料、金属材料以及功能材料等方面,分析了上述各类材料的环境负荷,进而着重论述了上述材料的生态设计方法,教材中更是结合当前的实际情况,特别强调了如何加强对各种材料的废弃物综合利用,以减轻目前的环境污染。该教材既增强学生的环保意识和社会责任感,又培养了学生的生态自然观和科学发展观。

教材中列举了大量丰富而生动的实例,并特别设有“历史的启迪”和“创新漫谈”两个板块,着重培养学生在材料设计与生产中不仅要考虑其使用性能,更需重视材料的设计、生产、使用和废弃过程中对环境的影响,进而培养学生分析、解决问题的能力 and 创新能力。

培养学生把生态环境意识贯穿于产品的设计和生产工艺的设计之中。着眼于从设计阶段来消除材料的生产、使用和废弃整个生命周期内的环境问题,从根本上摒弃以过度消耗自然资源、污染环境为代价的发展,实现可持续发展。

书中内容还涉及编者主持的两项国家自然科学基金资助项目:“水泥窑有害气体逸放与防治基础研究”(编号 29777012)和“利用固体废弃物煅烧水泥过程中 Hg、Pb、Cd 的排放机理及防治基础研究”(编号 20377014)。

本书既可供材料科学与工程、环境以及相关专业的本科教学使用,也可供材料、环境以及相关领域的科研、管理、工程技术人员培训及参考使用。

本书第 1 章、第 2 章由苏达根编写,第 4 章、第 5 章由钟明峰编写,第 3 章由苏达根及钟明峰编写。本书的编写还得到了众多同行的支持和帮助。广州越堡水泥有限公司郑立强副总经理,广州市政工程维修处李萃斌、张有发、苏倩,广东工业大学张慧珍等为本书提供了相关资料。所指导的研究生也有多人参与了本书的相关工作,其中赵一翔、鲁建军、钟小敏、董桂洪、周杰、袁秀霞等完成了文字的录入、编排、修改以及有关图片的制作。此外,本书在编写过程中还得到华南理工大学张志杰、吴基球、周曦亚、苏雪筠、杨东生,广西大学曹德光,韩山师范学院林少敏等的帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中的不妥以及疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

(E-mail: [dgsu@scut.edu.cn](mailto:dgsu@scut.edu.cn))

2006 年 9 月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
【历史的启迪】 水保病与汞化合物 .....	1
【历史的启迪】 农药“滴滴涕”的除害与添害 .....	1
1.1 生态设计 .....	1
1.1.1 生态设计的发展概况 .....	1
1.1.2 生态设计的要素与特征 .....	4
1.1.3 生态设计策略与方法 .....	5
1.1.4 汽车滤清器的生态设计 .....	10
1.2 材料与生态设计 .....	11
1.2.1 材料与资源环境 .....	11
1.2.2 生态环境材料的概念与判据 .....	13
1.2.3 购物袋材料的生态设计 .....	14
创新漫谈 太阳能的综合利用 .....	16
参考文献 .....	18
第 2 章 无机非金属材料的生态设计 .....	20
【历史的启迪】 耐久性好的金字塔胶凝材料 .....	20
【历史的启迪】 温室效应与水泥生产 .....	20
2.1 水泥的生态设计 .....	21
2.1.1 水泥生产的环境负荷 .....	21
2.1.2 水泥清洁生产指标 .....	22
2.1.3 水泥生产节约资源能源及利用废弃物 .....	23
2.1.4 水泥生产的粉尘及有害气体污染防治 .....	25
2.1.5 水泥生产的重金属污染防治 .....	27
2.1.6 水泥装运储存的生态设计 .....	36
2.2 混凝土的生态设计 .....	37
2.2.1 水泥混凝土与生态环境 .....	37
2.2.2 混凝土的循环利用 .....	38
2.2.3 环保型混凝土的设计 .....	38
2.3 墙体材料的生态设计 .....	41
2.3.1 传统墙体材料的环境负荷 .....	41
2.3.2 新型墙体材料的生态设计 .....	42
2.4 建筑玻璃的生态设计 .....	43
2.4.1 建筑玻璃的环境负荷 .....	43

2.4.2 建筑玻璃的生态化.....	43
2.5 无机固体废物的综合利用.....	47
2.5.1 粉煤灰的综合利用.....	48
2.5.2 脱硫灰的综合利用.....	61
2.5.3 矿山固体废物综合利用.....	70
2.5.4 冶金工业固体废物的综合利用.....	72
2.5.5 陶瓷废弃物的综合利用.....	73
创新漫谈 新型无机胶凝材料——土聚水泥 .....	77
参考文献 .....	77
<b>第3章 金属材料的生态设计 .....</b>	<b>79</b>
<b>【历史的启迪】 慎用不锈钢制品 .....</b>	<b>79</b>
3.1 金属材料的环境负荷.....	79
3.1.1 纯金属环境负荷的计算评价.....	79
3.1.2 铁合金的环境因子量.....	81
3.2 金属材料的生态设计.....	82
3.2.1 可循环再生设计.....	82
3.2.2 高性能长寿命金属材料.....	84
3.2.3 生产加工工艺的生态设计.....	86
3.3 金属材料废弃物的综合利用.....	89
3.3.1 废钢的回收与利用.....	90
3.3.2 废杂铜回收和再生.....	92
3.3.3 废杂铝回收和再生.....	92
3.3.4 锌的再生利用.....	93
3.3.5 铅的再生利用.....	94
3.3.6 钒渣的高附加值利用.....	94
3.3.7 金属基复合材料再生与回收.....	95
创新漫谈 钢结构建筑的防火防袭击 .....	95
参考文献 .....	96
<b>第4章 高分子材料的生态设计 .....</b>	<b>97</b>
<b>【历史的启迪】 农业生产的“白色革命”与“白色污染” .....</b>	<b>97</b>
<b>【历史的启迪】 黑色污染与废旧轮胎的综合利用 .....</b>	<b>98</b>
4.1 塑料生产中所用的主要树脂及添加剂.....	98
4.1.1 塑料材料的分类.....	98
4.1.2 塑料生产中所用的主要树脂及添加剂的理化性质与毒性.....	99
4.2 塑料的生态设计 .....	112
4.2.1 塑料材料的环境负荷 .....	112
4.2.2 生态可降解塑料 .....	113
4.2.3 塑料废弃物的综合利用 .....	117
4.3 橡胶的生态设计 .....	124
4.3.1 橡胶的特征与分类 .....	124

4.3.2 橡胶原材料的理化性质与毒性 .....	125
4.3.3 生产过程中的环境负荷 .....	131
4.3.4 橡胶材料的生态设计 .....	131
4.3.5 橡胶废弃物的综合利用 .....	134
创造性培养 快餐业呼吁绿色革命.....	137
参考文献.....	138
<b>第5章 功能材料的生态设计 .....</b>	<b>139</b>
【历史的启迪】“技术壁垒”与欧盟环保指令 .....	139
5.1 包装材料的生态设计 .....	139
5.1.1 包装材料的特点 .....	139
5.1.2 包装材料的环境影响 .....	140
5.1.3 包装材料的生态设计 .....	141
5.1.4 生态包装材料应用 .....	143
5.1.5 包装材料废弃物综合利用 .....	150
5.2 环境修复材料设计 .....	151
5.2.1 固沙材料及沙漠植被材料 .....	151
5.2.2 植物对环境的修复 .....	152
5.2.3 其他环境修复材料 .....	155
5.3 能源材料的生态设计 .....	157
5.3.1 全球能源可采资源评价 .....	157
5.3.2 太阳能电池材料 .....	157
5.3.3 燃料电池 .....	162
创新漫谈 食品包装的生态设计.....	165
创新漫谈 无铅焊料的发展.....	166
参考文献.....	166

# 第 1 章 绪 论

## 【历史的启迪】 水俣病与汞化合物

水俣是日本九州南部的一个小镇，全镇有 4 万多居民。小镇的西面有一个海湾，名为“水俣湾”。水俣湾风平浪静，一尘不染，渔产丰富，水俣镇人祖祖辈辈以打鱼为生。

但是，到了 20 世纪 50 年代初，却发生了震惊世界的“水俣病”。初时，在水俣湾附近的小渔村里，出现了一些莫名其妙的疯猫。这些猫步态不稳，抽筋麻痹，两眼惊恐，最后跳入海中溺水而死。人们开玩笑称这些猫为“自杀猫”。过了几年，当地 90% 以上的猫都自杀了，还出现了一些“自杀狗”。随后，当地医院收到了一些生怪病的居民。这些病人口齿不清，步态蹒跚，逐渐耳聋眼瞎，全身麻木，精神失常，时而酣睡，时而激动，最终狂吼而死。在调查怪病产生的原因时惊奇地发现，疯猫所具有的症状与人们所得的病是如此相似。

经进一步调查，终于发现罪魁祸首在于工业排放的污水。在水俣湾的氮肥厂和合成醋酸厂，为了降低成本，工厂采用了汞催化工艺，把含有大量甲基汞毒液的废水排放到水俣湾的海水中。于是，鱼虾体内富集了大量的毒素，喜爱鱼腥味的猫首先遭灾，然后是狗，最后是人类。据 1972 年日本环境厅公布，先后发生了三次“水俣病”，患者近千人，患者大都极度痛苦而死。受威胁的达 2 万余人。此震惊世界的“水俣病”实在令人反思。

## 【历史的启迪】 农药“滴滴涕”的除害与添害

农药的使用和普及是农业发展的重要里程碑，它象征着人类有了与自然界角力的新手段。这些人工化学物质扑灭了害虫，使农田增产，除害有功，但对人类自身也有着不可低估的危害。

大约 100 年前，瑞士人缀勒由于发明了“滴滴涕”而获得诺贝尔奖，而现在许多国家因“滴滴涕”对环境和人体造成危害，已将其列为禁用品。

“滴滴涕”对环境和人体的危害有一个发展过程，它是通过富集效应完成的。美国的科学家曾经做实验证明，人体对有毒物质的富集是惊人的。即使大气中含很低浓度的“滴滴涕”，但经过食物链放大，进入人体的“滴滴涕”浓度可达大气“滴滴涕”浓度的 1000 万倍以上：浮游生物富集大气“滴滴涕”1.3 万倍；小鱼吃浮游生物富集了 14.3 万倍；大鱼吃小鱼富集了 57.2 万倍；水鸟吃鱼富集了 85.8 万倍；人吃鱼及水鸟，“滴滴涕”以富集 1000 万倍进入人体。

农药，曾经是农业界的福音。如今随着人们的一步实践，进一步了解了其双刃剑的性质。农药不再是对抗自然的必胜法宝，如何使用好农药并同时消除其对自然界的负面影响，将是人类本世纪农业面临的最大挑战。

## 1.1 生态设计

### 1.1.1 生态设计的发展概况

工业产品的生态设计源于人们对工业化过程中浪费资源、破坏环境的反思和对生态规律

的认识。在过去相当长的一段时间，工业生产主要关注产品本身的属性和市场目标，把生产和消费带来的资源和环境问题留待以后由政府和社会进行亡羊补牢式的“末端治理”。末端治理与任由自然界自身稀释、降解相比，是人类环保行为的一次进步，在一定程度上减缓了生产活动对资源和环境的破坏，但这种先污染、后治理的方式常常是被动的，虽然能使污染物减少，但需投入较大治理成本，事倍而功半，而且受到治理技术限制，如果处理不当，还容易造成二次污染，因此，无法从根本上解决工业生产与资源、环境的冲突。

另外，在传统的工业生产方式中，自然资源从开采到制成产品消费，无论产品使用寿命多长，使用寿命终结后就变成了“废弃物”。这种生产方式基础上的工业产品设计，只关心产品本身的属性，当产品达到应有的技术、功能、工艺和市场目标后，产品设计的任务就大功告成。至于产品使用后废弃物如何处理，则不在设计者的考虑范围。这样，产品生产过程会产生废物，产品经消费后，也变为废弃物，废弃物成为物质资源的最后归属，自然资源被一次性消费，从而引发环境和资源问题。无节制消费，形成大量生产、大量消费、大量废弃。产品生产总量越大，意味着资源消耗越大，垃圾产生越多，而资源存量和环境容量相对越小，造成对资源和环境的双重压力。资源存量和环境承载力的有限性决定这种增长方式是难以维系和不可持续的。

生态设计思想萌芽于 20 世纪 50 年代，在 60 年代得到发展。Victor Papanek 1977 年出版的《为了真实世界的设计——人类生态学和社会变化》认为，传统设计者过多考虑了美观和形式方面的内容，而忽视了功能、用途、可维修性以及产生的环境和社会影响。1995 年，Papanek 又出版了《绿色减命：设计和建筑中的生态学和道德规范》，强调了生态因素在产品设计中的重要性。Nigel Whitely 在其 1993 年出版的《为了社会的设计》一书中，也对传统设计提出了疑问和批评。

近十年，有关的设计组织及学者在工业生态设计方面有了很大的进展。逐步形成了生态设计的概念。生态设计（Eco design）是指产品在整个生命周期设计中充分考虑对资源和环境的影响，设法使性能，包括安全性、实用性、美观性和寿命等趋于最大；使成本和对生态环境的影响趋于最小，故又称为生命周期设计。

德国著名的 Wuppertal 研究所研究气候、能源、环境等问题，不仅进行研究活动，而且还向政府等提出建议，并实施咨询服务。该研究所致力于将单位服务的物质集约度（MIPS）概念应用于生态设计中，并得出了“MIPS 最小是生态设计的主要原则”的结论。

荷兰在 LCA，即产品服务全过程环境影响评价的研究中取得了许多成果，以研究中小企业生态设计而闻名，并总结出实际应用中最有效的 10 项原则。

1997 年，奥地利在 Klagenfurt 市成立了“Factor4+”协会，并建有生态设计专科学校。

澳大利亚墨尔本皇家理工学院的国家级设计中心通过示范项目与制造企业合作开展了生态再设计的基础研究。由于其生态设计为企业带来了良好的经济效益，悉尼生态设计基金会资助该设计中心在新南威尔士州进行了更多的理论探索，研究主要集中在建筑领域。

在英国，Michagn Chater 教授主持的“可持续性设计中心”闻名于世，积极开展有关生态设计的活动。

日本著名的山本良一教授于 1990 年首先提出了环境材料的概念；1999 年，在日本国内首次召开了生态设计国际会议“Ecodesign'99”。

著名的生态设计学家德国德尔夫特理工大学 Han Brezet 教授把生态设计区分为 4 种与

产品有关的生态设计类型：产品改进、产品再设计、功能创新、系统创新。

类型 1 是对现行产品改进。产品改进就是应用污染预防与清洁生产观念来调整和改进行有产品，而总的产品技术基本维持现状，例如组织轮胎回收系统，改变某产品零件的原材料等。

类型 2 是产品再设计，即产品概念将保持不变，但该产品的组成部分被进一步开发或用其他东西代替。从污染预防和清洁生产角度对现有产品结构和零部件重新设计，主要手段是增加无毒、无废材料的使用，增加零部件和原材料的复用程度等，现在很多公司的生态设计就属于这种产品再设计，如可重复使用的复印机墨盒等。

类型 3 是产品概念革新，改变满足产品功能的方式，例如用 E-mail 代替纸张传递信息等。

类型 4 是系统革新，出现了新的产品和服务，需要改变有关的基础设施和组织，系统创新涉及整个产品与服务的创新，要求相关的基础设施与社会观念发生变革，例如用生态建材取代传统建材等。

由于不同国家对产品生态设计的研究起点与研究水平有很大的差异，所以，国家之间在同一时期开展的生态设计类型就不同，实质上代表了在国家层面产品生态设计未来发展的方向及时序。总体来看，发展中国家在未来一定时期仍停留在对类型 1 即改善现行产品的研发，而发达国家则可能研发类型 2，类型 3，甚至是类型 4。

我国也积极开展了相关研究，相当多的学者以论文、论著的方式宣传产品生态设计的理念。如杨建新介绍了产品生态设计的基本内涵；王毅、江心英等对基于产品生命周期的生态设计进行了探讨；苗泽华研究了在产品开发、研制、生产阶段的产品生态设计应遵循的原则；朱庆华、耿勇研究了生态设计与清洁生产、可持续发展之间的关系；陈士明、汤传毅等研究了材料购物袋的生命周期评价与比较；王天民、刘江龙等开展了生态环境材料的研究。上述研究为我国开展产品生态设计研究工作奠定了基础，但由于产品生态设计是一个全新的概念，有关产品设计的基本理论、方法、实施战略等仍在继续探索之中。自 1990 年以来，国家环保总局在联合国环境署的支持下，对重点流域、重点行业推行清洁生产审计工作，并建立了基于企业与公众直接对话的国家“环境友好企业”评价机制。2004 年有 8 家企业被评为环境友好企业。2005 年 5 月 24 日，宝山钢铁股份有限公司、福建雪津啤酒有限公司、富士施乐高科技（深圳）有限公司又被中国环境保护总局授予“环境友好企业”称号。在企业界，被评为“环境友好企业”的 11 家企业，各自以不同方式、不同程度地实践着产品生态设计的理念，并收到了良好的环境效益和经济效益。

产品生态设计的理论研究与实践探索都处于初期阶段，但作为实现可持续发展战略的重要技术手段，生态设计必将随着经济发展模式的转变而日益受到重视。产品的生态设计已被认为是 21 世纪经济增长的新动力。

工业产品的生态设计强调企业、设计师在保护环境中的良知与责任，运用生态系统理论，把节能治污从消费终端前移至产品的开发设计阶段，从源头开始考虑产品生命全周期可能给资源和环境带来的影响，趋利避害，减少负面影响。在产品生产之前就充分考虑产品制造的资源及能源消耗，对环境的影响，使用的性能，报废后的回收、再使用和处理等各个环节可能对环境造成的影响，对此整个生命周期进行系统、综合的评估。产品生态设计并不需要更多的成本投入就能实现少投入、高产出、低污染的生产目标。产品生态设计与末端治理的最大区别在于能使企业找到经济效益和环境效益的结合点，并从中直接受益，进而调动企

业的积极性。工业产品的生态设计改变传统设计中只强调技术性能、经济指标和审美因素的思路，将节约能源和保护环境的理念融入到设计开发之中。产品生态设计推动了经济社会与生态环境的和谐发展。

### 1.1.2 生态设计的要素与特征

#### 1.1.2.1 生态设计的要素

以产品的生命周期为中心，认识其三个要素：成本、生态环境影响及性能。

(1) 成本 成本包括原料成本、制造成本、运输成本和循环再生成本等生命周期全过程的费用。

(2) 生态环境影响 生态环境影响包括资源能源的消耗及对环境的影响。减量化 (Reduce)、再利用 (Reuse) 和再循环 (Recycle) 被看作是对生态环境产生影响的生态设计的三个基本思路。它们构成从高到低的优先级。减少资源消耗量优于再利用和再循环；再利用又优于再循环。

节省资源能源消耗包括节省材料、能源和人力资源，合理地利用资源，使用资源丰富的材料，尽可能利用可再生或易于再生的资源。资源节约不是不消耗资源，而是要提高自然资源生产率，使资源高效、循环使用。在工业产品的生态设计中，加强智力资源对物质资源的替代，实现产品生产的知识转向。这种理念有时可以从外观设计的一个简单的改动来实现。如某著名啤酒生产企业在设计易拉罐时，经过周密计算，在不影响容量的前提下，对外观重新造型，仅仅改变易拉罐一端的形态，一年就节省约 2100 万磅铝材的消耗。

再利用及再循环需要成本和科技支撑。目前，某些再循环的成本甚至比焚烧、填埋等传统处理方法的成本还要高。所以，减少资源使用是实现工业产品生态设计最经济和最有效的选择。与其在生产末端花人力、物力和财力来进行回收、处理和再利用，不如在生产的规划设计阶段就考虑减少不必要的资源消耗。

减少资源消耗显而易见优于再利用和再循环，再利用优于再循环也不难理解。如一个玻璃瓶使用后，清洗重新使用这种再利用比打碎它重新烧制一个新瓶更为有利。再生循环利用在本质上仍是一种不得已的事后解决方式，运用再生利用技术处理废弃物，既需耗费能源等，还存在二次污染的风险。如果再生利用中的资源含量太低，收集的成本就高，而且无利可图，因此，再循环利用只能是最后的选择。

回收再利用的目标是有效地回收资源，减少废物量及污染。Henshaw (1994) 论述再生设计 (DFR)，认为合理选择原材料可以使材料分离和回收过程更加有效。如用最少量原材料，延长产品生命周期，不同材料要容易分离，所用材料品种数尽可能少，增加容易被拆卸和无需翻新就可再用的部件数量，多物件尽可能采用相容的材料，减少废料、简化回收过程的二次操作等。

(3) 性能 产品的性能包括安全健康性、实用性、寿命、审美观、维修管理等。

产品的安全健康性是指其使用安全，对人健康无害，不污染环境。延长产品生命周期既是用户的需求，也是降低对环境影响的需要。在产品开发设计阶段就充分考虑其功能性和消费者的审美需要，尽量延长产品使用的实际寿命，这也是减少资源消耗的有效策略。延长产品生命周期可最终减少产品报废处理工作，从而提高资源利用率，减少对环境的负面影响。

#### 1.1.2.2 生态设计的特征

生态设计不应仅从产品的功能与目的出发，而应揭示生态设计的经济学内涵。从经济学

意义上讲，生态设计最终目的是实现产品生命周期内部成本与外部成本总和最小化。生态设计具有以下特征：从其目的来看，它有利于保护自然资源，力求在设计过程中考虑环境问题，使产品对生态环境损害最小；从成本来看，它指产品整个生命周期成本，既包括传统的内部成本，也包括外部成本，即环境代价；它既有经济效益，又有社会效益，是两者的有机统一。

生态设计区别于传统设计。传统设计仅关注原材料及制造内部成本，而生态设计关注产品全生命周期内所有内部与外部成本之和，使之最小化。

### 1.1.3 生态设计策略与方法

#### 1.1.3.1 生态设计的策略

根据生态设计原则，在综合考虑产品的整个生产周期的基础上，可以概括出 7 种生态设计策略。

(1) 选择对环境影响较低的原材料 材料不仅影响了产品的性能，还影响了生态环境。对同一种产品往往可以选择不同的材料。对产品设计师来说，不仅要考虑材料的物理化学性能及成本，还要考虑对环境的影响。

① 考虑物质的丰度 元素的相对稀缺性可以全球使用量与储量的比率来粗略表示，其倒数称为供应指数。这里的储量是指已探明并能在现有技术经济条件下开采的资源量。除了铁和铝之外，在主要的工业金属中，所有金属的供应指数都小于 100，多数甚至小于 50。根据供应情况可将元素分为 5 组，优先选用无限供应类型的元素。元素供应类型见表 1-1。

表 1-1 元素供应类型

供应类型	所属元素
无限供应	Br, Ca, Kr, Cl, Mg, N, Na, Ne, O, Rn, Si, Xe
大量供应	Al, Ga, C, Fe, H, K, S, Ti
足够供应	I, Li, P, Rb, Sr
潜在限量供应	Co, Cr, Mo, Rh, Ni, Pb, As, Bi, Pt, Ir, Os, Pa, Rh, Zr, Hf
潜在高度限制供应	As, Au, Cu, As, Se, Te, He, Hg, Sn, Zn, Cd, Ge, In, Th

如有一种催化剂是以钯与铂、铑混合使用，后改为仅用便宜而丰富的钯。取得了保护资源及市场效益双赢的好效果。

② 使用能耗较低的材料 即使用在提炼和生产过程中耗能较少的原料，这要求尽量减少对铝等能源密集型金属的使用。

③ 使用清洁的材料 清洁的材料是指其在生产、运输、使用及处理过程中不产生或产生很少的有害物质。

首先要考虑材料的毒性。从历史上看，有毒物质或其前体的储存和运输是化学事故的主要来源。1984 年 12 月 3 日，有 2000 人在印度的 Bhopal 因为甲级异氰酸酯的运输事故而丧生。若这些剧毒物质通过无毒性的前体就地生产，就可以减少其运输风险。这是更好的设计方法。

清洁的材料还包括其在生产、运输、使用及处理过程中不污染环境。如避免使用会破坏臭氧层的氟里昂等材料。

④ 使用可再循环的材料 可再循环的材料即在产品使用过后可以被再次使用的材料，

这类材料的使用可以减少对初级原材料的使用，节省能源和资源，如水、钢铁、铜等。

(2) 节省原材料的使用 通过产品设计的改进尽可能减少原材料的使用，从而节约宝贵的资源，减少运输和储备的空间，减轻由于运输而带来的环境压力。如产品的折叠设计，以减少对包装物的使用和减少用于运输和储藏的空间。有时出于质量上的考虑，有的设计人员故意增加产品的尺寸和质量，以增加产品的安全感和稳定感。但通过设计人员的努力，可以通过技术上的改进达到保证质量及节省材料的目标。如建筑业中采用的新型结构梁不仅有利于增大刚度，而且大大减少了梁的尺寸和质量。

(3) 生产技术的最优化 生态设计要求生产技术的实施尽可能减少环境影响，包括减少辅助材料的使用和能源的消费，产生最小程度的废物。通过生产技术的最优化以实现清洁生产。

a. 选择替换技术，即选择需要较少有害添加剂和辅助原料的清洁技术。如以铆接代替焊接。

b. 减少生产步骤，即通过技术上的改进减少不必要的生产工序，如采用无需另行表面处理的材料和可以集成多种功能的元件等。

c. 选择能耗小和消费清洁能源的技术，如风能、太阳能和水电能源等。

d. 减少废物的生成。通过改进设计，使生产过程产生的废料最少并尽可能内部循环使用生产废物。

(4) 营销系统的优化

a. 采用更少的、更清洁的和可再使用的包装，以减少包装废物的生成，节约包装材料的使用和减轻运输的压力，如建立有效的包装回收机制和减少 PVC 包装物的使用以及在保证包装质量的同时尽可能减少包装物的质量和尺寸等。

b. 采用低能耗少污染的运输。水上运输与陆地运输比，能耗低、空气污染少；火车运输大气污染低于汽车运输；而飞机的环境影响是最大的，应尽可能避免。

c. 采用标准运输包装，提高运输效率。

(5) 降低消费过程的环境影响 产品最终是用来使用的，应该通过生态设计尽可能减少产品在使用过程中可能造成的环境影响。

① 降低产品使用过程的能源消费 使用耗能最低的元件，如设置自动关闭电源的装置，保证定时装置的稳定性，减轻需要移动产品的质量以减少能源消费。减少能源和资源的浪费，使产品设计成可鼓励用户更为有效地使用产品和减少废物，这包括通过清晰的指令说明和正确的设计避免客户对产品的误用，设计不需要使用辅助材料的产品，如数码相机代替传统相机等。

又如美国环境保护局实行的“能源之星”电脑计划。以往的计算机系统能耗占有商品能耗的 5% 以上。其中不少是由机器本身所消耗的，但由于机器每消耗 1W 的动力就需要 1.5W 来供其他如空调设备的使用。很大部分的电子办公机器都是整天开着，但实际使用的时间却不多。为了解决这个问题，美国环境保护局于 1992 年开始了“能源之星”计划。目标是鼓励制造那些在空闲时能自动转换到低能耗状态的计算机和配件。目前，这种技术已在多数手提电脑上运行，这将会减少电子办公机器 50%~75% 的能耗。个人电脑和其显示屏功率一般在 150W 左右。“能源之星”则要求在 30W 以下，同时，打印机也有类似要求。只有满足这三个条件，才能在产品上使用“能源之星”的标志。

② 使用清洁能源 这包括设计出可以使用清洁能源的产品，如通过风能、太阳能、地

热能和水力发电等而产生的能量来驱动，使产品可以通过可充电电池驱动。

③ 减少易耗品的使用 许多产品的使用过程需消耗大量的易耗品，应该通过设计上的改进减少这类易耗品的消耗，如节省洗衣粉的新型洗衣机等。

④ 使用清洁的易耗品 通过设计上的改进使消费清洁的易耗品成为可能，并确保这类易耗品的可能环境影响尽量小。

(6) 延长产品生命周期 通过延长产品生命周期，可避免产品过早地进入处置阶段，提高产品的利用效率。

a. 提高产品的可靠性和耐久性。这可以通过完美的设计、高质量材料的选择和生产过程的严格控制的一体化实现。

b. 便于修复和维护。可以通过设计和生产工艺上的改进减少维护及使维护及维修更容易实现，此外，完善的售后服务体系和对易损部件的清晰标注也是必须的。

c. 采用标准的模式化产品结构。应通过设计的努力使产品的标准化程度增加，在部分部件被淘汰时，可以通过即时更新而延长整个产品的生命周期，如计算机主机板的插槽结构设计使计算机的升级换代成为可能。

d. 采用第一流的设计指的是通过采用经典的设计方法使产品不至于在短期内过时而使客户失去兴趣，确保产品的外观寿命不小于其技术寿命。

(7) 优化产品处置 产品在被客户消费使用后，就会进入处置阶段。

① 产品的再利用 这要求产品作为一个整体尽可能保持原有性能，并建立相应的回收和再循环系统，以发挥产品的功能或为产品找到新的用途。

② 再制造和再更新 通过再制造和再更新可以使这些元部件继续发挥原有的功能或为其找到新的用途，这要求设计过程中注意应用标准元部件和易拆卸的连接方式。

③ 材料的再循环 改进设计，增加可再循环材料的使用比例，从而减少最终进入废物处置阶段材料的数量，节省废物处置成本。

④ 正确的废物处理 在无法循环使用的情况下，才采用填埋等处理。应避免有害废物的渗透以威胁地下水和土壤，产生二次污染。

### 1.1.3.2 生态设计的方法

主要的生态设计的方法有生命周期评价法（LCA法）、检查清单法、矩阵法、MIPS最小化法、回顾法和宏观法等。

#### (1) 生命周期评价法

① 生命周期评价方法的起源 生命周期评价方法也被称为 LCA (Life Circle Assessment) 法。其基本思想源于 20 世纪 60 年代化学工程中应用的“物质-能量流平衡方法”，其基本理论依据是，利用能量守恒和物质不灭定律，对产品生产和使用过程中的物质和能量的使用和消耗进行计算。目前，对 LCA 方法有许多通俗的定义与理解，国际标准化组织 (ISO) 和国际环境毒物学和化学学会 (SETAC) 的定义最具有权威性。ISO 的定义是：LCA 方法是汇总和评估一个产品（或服务）体系在其整个寿命周期内的所有投入及产品对环境造成的和潜在的影响方法。ISO 不仅规范了所有产品和服务的技术标准，随着环境保护的需要，也在尝试对环境问题的分析方法进行标准化。

国际标准化组织环境管理技术委员会即 ISO/TC207 在 ISO 14000 系列标准中为生命周期评价 (LCA) 预留了 10 个标准号，即 ISO 14040~ISO 14049 还成立了 ISO/TC207/SC5 分委员来负责完善生命周期评价相关的国际标准。

② LCA 法在生态设计中的应用 生命周期评价法在生态设计中占有很重要的位置。生命周期评价的目的是了解产品整个生命周期的过程中的环境影响，从而通过提高生产效率和替代材料等，保护资源和环境。除了分析产品整个生命周期的过程中的环境影响外，还要分析产品的性能及成本，从而做出最终的判断。

生命周期评价是对一种产品的整个生命周期过程有一个全面的环境认识。它可以帮助企业在生态设计时，确定使用哪些原材料和能源来减少废物排放；在生产中如何开发能源消耗和环境影响小的生产过程。LCA 法是环境影响评价方法，它作为一种方法在生态设计中占有很重要的位置。它包括目标范围的确定、清查分析、影响分析以及结果评价几个阶段。

a. 目标范围的确定。这是 LCA 的准备阶段，它是整个 LCA 的最重要的环节，其任务是设定评价的目标和范围并及时修订，是整个评价工作的起点。

需要评价的目标主要包括界定评价对象，实施 LCA 评价的原因以及评价结果的输出方式；评价的范围包括评价功能单元定义、评价边界定义、系统的输入与输出分配方法、环境影响评价的模型及其解释方法、数据要求、审核方法及评价报告的类型及其格式等。

在进行评价时要涉及大量数据，这些数据可能通过直接实测而得到，也可能是一些中间处理数据，在处理这些数据时，一定要说明数据是如何获得的，它的精度、完整性如何，是否具有代表性等，显然数据的质量是进行 LCA 方法评价的关键所在。需要注意的是，当从系统中得到多个产品或某一过程同时处理来自多系统的废弃物，就涉及输入、输出数据如何分配的问题。

b. 清查分析。它的目的是将环境负荷定量化，即对一个产品从生产、使用到废弃整个生命过程中所投入的所有原材料和能源作为输入逐一列出，而在这个过程中排出的所有影响环境的物质（包括副产品），作为输出也逐一列出，对输入和输出进行以数据为基础的客观量化过程，该分析贯穿于产品的整个生命周期，即原材料的提取、加工、制造和使用、废弃物处理等几个阶段。

LCA 的清单分析是一项很费力、很费事的工作。不仅要分析其材料阶段，还要分析其产品阶段。产品是由许多零部件和装置构成的，如汽车上有 1 万多个零件。对每个零件都要进行清单分析，将全部数据进行清单分类综合，这是一项无法想像的繁杂工作。而且清单数据是随工厂、企业和时期的不同而变化的，这些都是复杂的问题。

既然 LCA 清单分析是一项非常艰难的工作，因此需要研讨各种间接的方法。一种间接的方法是采用五年编制一次的“产业关联表”。产业关联表是把某国一年内生产消耗的所有产品和服务的交易量用市场价格的金额统计而得出的表。这个表积累了四五百个部门间经济贸易的数据，以这些经济数据作为依据。比如能够间接地估算出一辆汽车在制作阶段排放出来的二氧化碳量。

与间接法不同，累计法是将构成零部件的全部材料分类综合进行计算的方法。对于简单的物品使用累计法，其可靠性较高。

c. 影响分析。影响分析是在完成目标界定清查分析后进行的，其目的是根据清查分析后所提供的物料、能源消耗数据以及各种排放数据对产品造成的环境影响进行评估，即采用定量调查所得的环境负荷数据定量分析对人体健康、生态环境、自然环境的影响及其相互关系。影响分析是 LCA 的核心内容。它包括资源消耗、水污染、大气污染、固体废物、土壤污染及环境增值。

影响分析的综合环境影响值计算还存在着一些困难，如虽然知道了造成地球温室效应的

气体的排放量，但对于它怎样在全球扩散的，使整个地球的平均气温上升了多少度，目前尚难以进行有效的精确计算。

d. 结果评价。对列出的清单和环境影响进行分析，以指导产品开发和应用，降低清单值与影响值。在某产品性能相同的情况下，其资源能源消耗量下降，产品的清单数据减少，环境影响值就会下降，即对环境有利。如冰箱的生态设计是不使用特定的氟里昂，而用其替代品。但是使用替代品时，能量的消耗将会增加，二氧化碳和二氧化硫的排放量也增加了。这样一来，虽说对臭氧层的破坏得以减少，但是对温室效应方面的影响却增加了。清单数据并不是全部减少，只是一部分增加，另一部分减少。故需综合评价。

③ LCA 评价方法的局限性 LCA 在环境评价中发挥主要作用，但也存在一些不足与局限性。LCA 评价方法考虑了产品对生态环境、人体健康等方面的影响，但对产品性能及成本考虑不足，从而限制了其应用。孙胜龙等对其局限性进行了研究。

a. 评价范围的局限性。LCA 只考虑了已经发生了或一定会发生的环境影响因素，没有考虑可能发生的环境风险突发事件所造成的危害及采取必要的预防应急措施。在评估时，LCA 也没有考虑与有关环境的法律规定和限制是否有冲突。但对企业来说，这些环境政策和法规都是十分重要的问题。

b. 评估方法的局限性。LCA 的评估方法既包括了客观成分，也包括了主观成分，假设和价值判断涉及多个方面，如系统边界设定、数据来源的选择、环境损害种类的选择、计算方法的选择以及环境影响评估中的评价过程等。无论其评估的范围和详尽程度如何，所有 LCA 都包含了假设、价值判断和折中这样的主观因素，所以，LCA 的结论需要完整的解释说明，以区别由测量或自然知识得到的信息和基于假设和主观判断得出的结论。

c. 时间和地域的局限性。无论 LCA 中的原始数据还是评估结果，都存在着时间和地域上的限制。在不同的时间和地域范围内，会有不同的环境编目数据，相应的评估结果也只适合于某个时间段和某个区域，这是由产品系统的时间性和地域性所决定的。

(2) 检查清单法和矩阵法 检查清单法 (Checklist 法) 和矩阵法 (Matrix 法) 根据检查清单的方法对产品的环境侧面进行评估，因而也叫做产品评价法。这方法是 1990 年初才开发的。矩阵法和检查清单法是类似的方法，它是采用矩阵对产品进行评价的方法。提出工业生态学的 Graedel 和 Allenby 提倡矩阵法。

(3) MIPS 最小化法 物质集约度 (MI) 除以服务，用来计算每单位服务的物质集约度就是 MIPS 法。MIPS 越小，则资源效率就越大。MIPS 最小化思考方法的优点在于能够进行宏观的讨论，而且因为是累算生命周期中隐性的物质流，因而指标简单明了。

如德国住宅过去一直大量使用水泥，经过反省，打算积极采用较低 MIPS 的钢铁和木材等材料取代。对 MIPS 最小化法也有不同意见。认为 MIPS 最小化法所把握的只是物质流，但是对于物质流的质量却没有评价。即使物质流相同，其温室效应、酸雨和毒性等内涵也还是不同的。在某些情况下，有必要将 MIPS 与其他方法一起使用。

(4) 回顾法与宏观法 回顾法是由瑞典环境非政府组织 (NGO) 的自然步骤所提倡的生态设计方法。回顾是与预测相对的提法。预测指的是从现在展望将来。而与此相反，回顾是从现在看过去。

回顾法列举了使用绿色电力或改换为具有环境标识的塑料等方面的对策方案，还综合考虑了从现在起 1 年、2 年、3 年后的计划，最终做到满足自然步骤组织提出的 4 个条件。

第 1 个条件是“不要在生命圈内继续系统地增加从地壳中开采出的物质。”即不能对石

油、金属和矿石等的挖掘速度快于这些物质在地壳的形成速度，也不能将其随便扔弃。

第 2 个条件是“不能在生物圈内继续系统地增加人工生产的物质（如化学物质）。”

第 3 个条件是“不要破坏维持自然循环和多样性的物理基础！”

第 4 个条件是“进行有效的资源利用和公正的资源分配。”即资源的分配和利用对所有国家的条件都是相同的，不要浪费，必须高效利用。

由于这 4 个条件遵守起来是非常严格的，难以完全达到这些条件，例如，广泛使用的玻璃钢是经玻璃纤维强化的塑料，美国波音 747 飞机上以玻璃钢制造的零件达一万多种，但复合材料对再生循环造成了困难。

LCA、检查清单法、回顾法都是微观法。其目标是改善公司和工厂产品的环境性能，可以说是从微观的角度考虑有关环境问题。但是，在进行产品环境改善的同时，怎样推动整个社会的可持续发展是一个重要的目标。为了这样的目标，必须从宏观的观点出发进行环境改善，这就是宏观法。

世界上进行了各种各样宏观法的尝试。通过将所有的废弃物作为原材料进行再利用，使废弃物为零。当某一个企业不能够对所有的东西完成再利用时，则建立综合利用的产业链，以实现零排放。

#### 1.1.4 汽车滤清器的生态设计

##### 1.1.4.1 废弃机油滤清器对环境的影响

汽车的各种零部件都有相应的使用年限。如制动片每行驶 1 万公里检查更换 1 次；轮胎每次保养时换位 1 次；自动变速器应每行驶 1.5 万~2 万公里更换 1 次。汽车行驶 7500 公里，其机油滤清器就需要更换，在恶劣条件下，如经常行驶在多尘的道路上，每行驶 5000 公里就应该更换。

这些更换下来的汽车零部件，如果对它们置之不理，不但会污染环境，同时也是资源的极大浪费。如机油滤清器传统的处理方法是进行土地填埋，这样不但会占用大量的土地，还会对地下水造成污染。在美国，每年被废弃的机油滤清器中约含有 68000 立方米机油和 146500t 钢材。美国 UMR 大学最近的调查显示，大约只有 15% 的机油滤清器被回收利用。美国学者对车辆发动机废旧机油滤清器实现再利用进行了一系列分析研究，发现影响机油滤清器回收的最主要因素就是它的设计。

##### 1.1.4.2 机油滤清器设计与生态环境

机油滤清器的主要作用是清洁发动机机油，而发动机机油是为了最大程度地减少各部件在运行过程中产生的摩擦，以降低能量损耗和零件磨损，机油滤清器能去除机油中的灰尘、金属颗粒、碳沉淀物和煤烟颗粒等杂质，以保护发动机。

机油滤清器对滤纸的要求比空气滤清器的更高，因其使用温度从 0℃ 到 300℃ 不等，在剧烈的温度变化下，机油的浓度也会发生相应的变化，这将影响到机油的过滤流量。优质机油滤清器的滤纸能够在剧烈的温度变化下，在有效过滤杂质的同时还能保证足够的流量。优质机油的滤清器密封圈是用特殊橡胶合成的，能保证 100% 不漏油。另外，在优质的机油滤清器中还装有回流抑制阀和溢流阀。当发动机熄火时，回流抑制阀能防止机油滤清器变干，而且在发动机重新点火时，能立即产生压力，供给机油润滑发动机。当外部温度降低到某一特定值或当机油滤清器超出正常使用期限时，溢流阀会在特殊压力作用下打开，让未经过滤的机油直接流进发动机，虽然这时机油中的杂质会进入发动机，但比发动机中没有机油而造

成的磨损要小得多，因此溢流阀是在紧急情况下保护发动机的关键。

一般乘用车和商用车的机油滤清器每半年更换一次。有些制造商为了节约成本，增加产品的市场竞争力，把机油滤清器设计成一次性使用的结构。这种不可拆洗的一次性机油滤清器，是用纸将杂质隔离在滤清器内，但因发动机内压力极大，纸张易变形破裂而失去过滤功效，当更换润滑油时必须同时更换机油滤清器，否则会影响润滑油的质量，使机油逐渐产生胶质，使机械杂质与胶质混合形成油泥，加速零件的磨损，并且造成油路堵塞。正是由于这种设计结构的变化导致了机油滤清器所用生产材质的变化，以致给回收再利用造成了相当大的难度。因为一般的滤清器中含有 70%~90% 的钢和 6%~28% 的过滤介质，而一次性机油滤清器用过滤纸代替钢来做上夹板和下夹板，这样就可以少用 50% 的过滤纤维，并且使滤清器用钢量降低 10%，另外还有一些制造商使用无铁过滤板来代替上、下盖板，也降低了滤油器用钢量。这些设计都降低了滤油器回收的可能性。

Kent D. 等通过对目前市场上的机油滤清器的研究比较分析发现，有两项设计指标在滤清器回收中起决定作用：一是滤清器的高径比（高/直径）；二是制造商制造机油滤清器的原料。机油滤清器的高径比（高/直径）与其含钢量直接相关，而机油滤清器的含钢量又与它能否再回收利用直接相关；含钢量随着高径比的缩小而下降，过滤介质（主要是过滤纸）用量却随着高径比的缩小而上升。它们之间之所以有这种关系是因为大多数滤清器采用多层滤纸层叠环绕中心套管，当滤清器的直径不变而高度增加时，层叠的过滤纸的长度和质量与滤清器的长度成正比。相比之下，钢质外壳的密度是比较小的，约占整个滤清器含钢量的 1/3，当然增加滤清器的高度会使过滤纸的用量大大增加，而用钢量却基本保持不变。中心套管采用圆柱体状设计，既能在过滤的同时缓慢释放，又可以保持在线机油不老化、不变质，延长机油使用寿命，不仅能节约 90% 的机油，同时能减少造纸对生态环境所带来的破坏和污染。

## 1.2 材料与生态设计

在产品生态设计中，选择环保材料是保护环境的关键和前提。原材料处在产品生命周期的前端，材料的选择是实现产品全生命周期设计的基础，不仅直接影响产品的制造，还会影响产品的销售、使用、维修、回收和处理等。

### 1.2.1 材料与资源环境

#### 1.2.1.1 材料生产与资源

(1) 资源的类别 材料生产过程涉及大量资源消耗。资源可分为三大类：可更新资源；能重复利用的可更新资源；不能重复利用的不可更新资源。

可更新资源是参与自然循环的物质，并可以通过循环使其在较短的时间内再生。自然界中的氧气和水都属于可更新资源。

能重复利用的可更新资源常指各类非能源矿物，如金、银、铜、铁等，它们的形成周期很长，被认为是不可再生的，但人们在一定程度上能对其进行回收再利用。

不能重复利用的不可更新资源也就是各种矿物型能源，它们的形成周期很长，而且一经利用就变为低能量形态无法进行重复使用。煤炭和石油是典型的不能重复利用的不可更新资源。

(2) 资源对材料生产的影响 据美国《油气杂志》2005 年 12 月 19 日公布的世界石油产量和油气储量年终统计，全球原油及凝析油产量估算为 35.90 亿吨，比 2004 年的实际产量 35.62 亿吨增长近 1%。截至 2006 年 1 月 1 日，全球石油估算探明储量为 1770.62 亿吨，