

特约专栏

材料生命周期工程与材料生态设计的研究进展

聂祚仁, 刘 宇, 孙博学, 王志宏, 左铁镛

(北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘 要: 材料生命周期工程以生态设计为主导, 以满足性能需求、节约资源、保护环境为目标, 将毒害组分替代、绿色工艺规划、清洁生产、资源循环等诸多技术与理论应用到产业链的各个环节, 系统优化材料产品全生命周期的环境表现, 是由材料科学、制造科学和环境科学深层次交叉而形成的国际重要科学研究前沿领域。回顾了国内外材料生命周期工程的发展与应用现状, 通过分析其技术内涵, 解释了生命周期工程与生态设计等关键技术要素的科学关联, 并指明了生态设计是实现生命周期工程思想的关键技术问题。结合我国材料行业的发展现状, 提出了适用于材料产品的生态设计理论框架与实施步骤, 分别构建了基于性能-需求矩阵、焓资源耗竭模型、生命周期评价的材料性能、资源消耗与环境影响的量化分析方法, 形成了可综合统筹不同设计指标、面向材料产品的生态设计评价方法, 为生态环境材料的开发与应用提供了理论支撑。

关键词: 生命周期工程; 生态环境材料; 生态设计; 生命周期评价

中图分类号: TB30; X32; X820.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)03-0161-10

Research Progress of Life Cycle Engineering and Eco-Design in Materials Industry

NIE Zuoren, LIU Yu, SUN Boxue, WANG Zhihong, ZUO Tiejong

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Material life cycle engineering is a frontier interdisciplinary based on the infrastructure of materials science, manufacturing science and environment science. It is an eco-design oriented applied engineering, in the purpose of meeting performance requirement, saving resource and protecting environment by means of hazardous substance substitution, green process planning, cleaner production, resource recycle, *et al.* throughout the whole industrial supply chain to achieve a systematic optimization for material products during the whole life cycle. In this article, the author reviewed the development and application status of material life cycle engineering, performed a comprehensive analysis of the fundamental technology to explain the linkage among life cycle engineering, eco-design and other critical techniques, so as to point out that eco-design is the key element to deploy life cycle engineering theory. This article also proposed the framework and implementation procedure of eco-design for the specific situation of Chinese material industry. Moreover, the quantitative assessment methods for materials performance, resource consumption and environment impact have been established based on performance-requirement matrix, Exergy analysis model and life cycle assessment, respectively, which form a material product oriented eco-design methodology with a full metrics, and provide further theoretic foundation to the eco-material development and application.

Key words: life cycle engineering; eco-materials; eco-design; life cycle assessment

1 前 言

材料作为社会经济发展的物质基础, 在推动人类文明进步的同时, 又是自工业革命以来资源、能源消耗与

污染物排放的主要来源。据统计, 我国钢铁、建筑材料、化工材料和有色金属四大类材料生产能耗占全国总能耗的 30% 以上, 占工业总能耗的 50% 以上^[1]; 废水、废气和固体废弃物占全国工业排放总量的比重分别在 20%、40% 和 60% 左右^[2]。面对资源日渐匮乏、能源渐趋短缺、环境问题日趋严峻等全球普遍关注的热点问题, 强调材料与资源、环境协调统一, 大力推进材料的生态化进程已经成为未来发展的重中之重。

收稿日期: 2015-11-19

第一作者: 聂祚仁, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, Email: znie@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.03.01

“十二五”期间,随着社会与企业环保意识的不断提高,生态环境材料的制备技术与评价方法不断完善,环境问题已经成为产品开发与企业决策时考虑的主要因素之一。节能环保技术的大量应用不仅缓解了材料生产本身与资源环境的巨大矛盾,而且向下游行业辐射,通过材料的性能优化促进建筑、交通等部门的节能减排,取得了很好的成效^[3-5]。虽然可持续发展已经成为了产业界的广泛共识,但是经济效益依然是产业运行的主导因素,出于自身经济效益最大化的考虑,生态环境材料及相关环保技术的广泛应用仍存在较大阻力,导致技术水平与发达国家存在一定差距。总体来看,传统材料行业尚未完全脱离依靠投资增量扩张和以生产要素驱动的发展模式。因此,开发面向环境友好的材料设计新理论与新方法,通过材料的设计、制备、回收等一系列环节的技术革新,减低材料产品在整个生命周期中对环境的影响,是我国经济社会发展、提高产品国际竞争力的重要措施与内在需求^[6-7]。

生命周期工程(Life Cycle Engineering, LCE)以生态设计为主导,以满足使用性能、节约资源、保护环境为目标,将毒害替代、绿色工艺规划、清洁生产、资源循环等诸多技术与理论应用到材料与产品的生命周期中,系统优化全产业链条的性能、成本与环境表现,是由材料科学、制造科学和环境科学深层次交叉而形成的国际重要科学研究前沿领域^[8](图 1)。生态设计(Eco-design),又称生命周期设计,是生命周期工程理论的主导与核心,其主旨是指将环境因素纳入到产品设计中,在保证产品使用性能与经济可行性的同时,最大限度降低产品全生命周期对环境的影响的设计方法^[9-10](图 2)。研究表明,约 80%的资源消耗和环境影响均取决于产品设计阶段,在设计阶段充分考虑现有技术条件,优化解决各个环节的资源环境问题,可以最大限度实现资源节约,从源头上削减甚至避免环境污染。

材料行业是生命周期工程与生态设计应用的重要领

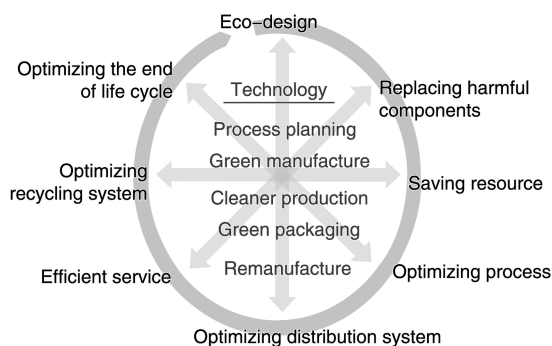


图 1 材料生命周期工程技术的核心研究内容

Fig. 1 Research contents of LCE

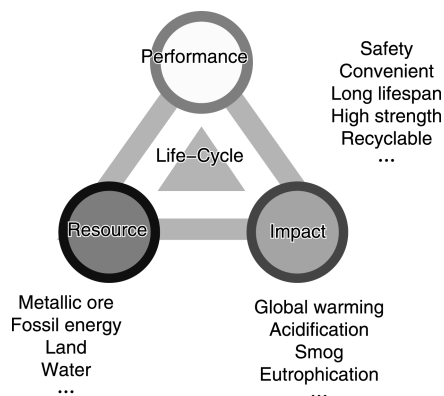


图 2 生态设计三要素

Fig. 2 Basic elements of eco-design

域之一,其直接关系到下游行业(如建筑、交通等部门)产品的性能与环境表现。传统的材料生产方式侧重于产品本身的属性和市场目标,把生产和消费造成的环境问题留待以后的末端治理;而生态设计从可持续发展的高度审视产品整个生命周期,在产品设计之初充分考虑资源和环境问题,从源头节能治污;生命周期工程则是在生态设计的基础上,进一步推行生产、使用、回收等过程的技术革新与管理升级,从全产业链条的各个环节降低甚至消除材料与产品对环境的负面影响。材料生命周期工程要求材料的设计面向生命周期全过程,在对材料的使用性能、资源消耗与环境性能进行量化分析的基础上,追求在环保性、经济性、技术性以及市场性等广域范围内的最优解,并通过在材料的制造、管理、回收等环节中持续的技术革新与工艺参数优化,有效降低材料产品全生命周期的环境影响。

2 材料生命周期工程的发展与应用现状

2.1 国外生命周期工程发展与应用现状

进入 21 世纪以来,生命周期工程研究在国际上迅速开展。在生命周期思想的指导下,建立了基于多因素、多目标优化的产品生命周期工程的理论框架及体系结构,以生态设计为核心,综合考虑产品性能、成本、社会、环境等多方面的要素,指导整个产业链的全面优化。目前国际上著名的研究机构与典型的研究案例如下:

国际生产工程科学院(CRIP)成立于 1951 年,是世界顶尖的产品工程研究组织,致力于流程、机械与系统的设计、优化与管理研究。该院于 1993 年国际生命周期工程大会正式提出了“生命周期工程”的概念,并将其英文缩写规定为 LCE。同年,该院成立了生命周期工程工作组,组织每年国际生命周期工程学术会议的召开;迄今为止,这一国际会议已成功举办了 20 余次,为相关领域的学者提供了大量指导思想与方法规范^[11]。

德国斯图加特大学生命周期工程中心 创立于1989年,前身为斯图加特大学聚合物测试与科学研究所,最初开展产品生命周期评价研究,后将研究领域拓展至产品生命周期工程。该中心一直致力于产品在全生命周期中环境、技术、成本与社会问题的综合分析,为企业提供全面的决策支持与解决方案,其研究领域涵盖:生命周期评价;生命周期工程;生命周期成本分析;生态设计;环境管理;产品的环境声明等。中心与Thinkstep公司(PE International公司前身)联合研发的Gabi软件系统及数据库已经成为生命周期评价领域应用最为广泛的软件之一,广泛应用于全球汽车、化学、金属、电子、能源等行业的生态设计与技术开发^[12]。

美国环保部支持的“战略环境研究及发展计划” 在该计划支持下,美国环保局在2001年发布的《产品生命周期工程指南》是生命周期工程领域早期较权威的指导书之一,其中结合大量的案例研究对产品生命周期工程相关内容与实施细则进行了详细的阐述,包括:产品生命周期工程的定义与技术框架;产品系统的建模与多目标优化方法;产品生命周期工程的多因素评价模型等^[13]。在此指南的指导下,美国多所研究机构分别开展了生命周期工程相关研究,如美国马里兰大学计算机辅助产品生命周期工程中心是失效物理(physics-of-failure, PoF)研究方法的创始机构之一,开发了众多基于生命周期工程理论的设计方法、数学模型以及应用软件工具,高效地辅助了电子产品的设计与分析,在加速破坏性试验、故障及失效分析、电子元器件的选择与管理等研究领域居于世界领先地位^[14-15]。

日本东京技术研究所的“生命周期工程技术架构发展”研究 该课题得到了日本IMS国家计划、日本化学技术战略推进机构、日本经济产业省资助,联合产业界三菱化学工业、住友电木有限公司等共同进行,以建立化学工业产品生命周期工程技术架构为目标,将研究内容分为产品生命周期工程和工厂生命周期工程两项。产品生命周期工程支持相关产品标准和新技术的开发,主要研究如何开展产品及其最终产物的环境影响评价,包括生产过程建模、环境影响分析、数据仓库、面向对象的分布式仿真等;工厂生命周期工程则侧重于改善生产过程的设计、操作以及最终处理等过程,研究内容包括集成生产制造、安全设计及运作、集成连续工艺运作等。

生命周期工程的学科建设与人才培养 生命周期工程是一门跨工程、社会、经济等领域的综合性研究学科,为了培养相关领域的研究者、实践者,革新传统的工程学科体系具有根本的意义。以日本、美国为首的发

达国家相继开展了产品生命周期工程学科建设活动。美国卡耐基梅隆大学、乔治亚工程大学、日本东京大学等国际知名高校均明确提出了建设生命周期工程交叉学科的教育理念,开设的相关课程包括:工程产品和过程的环境分析、生态设计、生命周期的运营和管理、回收学和逆向制造、环境政策分析等。

2.2 国内生命周期工程的发展与应用现状

近些年来我国多项国家、省部级文件中均明确提出了推行生命周期工程与生态设计应用。《国家中长期科学和技术发展规划纲要》将“材料设计与制备的新原理与新方法”列为我国面向重大战略需求的十项基础研究之一,并指出未来15年我国要突破现代材料设计、评价、表征与先进制备加工技术,新材料技术将向材料的结构功能复合化、功能材料智能化、材料与器件集成化、制备和使用过程绿色化发展;《纲要》还明确了我国科技发展的战略重点,其中“把发展能源、水资源和环境保护技术放在优先位置,下决心解决制约经济社会发展的重大瓶颈问题”位列首位^[16]。《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》^[17]和《国务院节能减排“十二五”规划》^[18]中明确提出推行工业产品生态设计的要求;工信部《工业清洁生产推行“十二五”规划》把推行产品生态设计作为“十二五”的三大重点任务之首,指出要引导企业开展产品生态设计,促进生产方式、消费模式向绿色低碳、清洁安全转变^[19]。在国家政策的大力支持下,我国的生命周期工程研究在很多基础领域取得了较大的进展,主要集中在以下几个方面:

材料生态设计理论与方法 研究低环境负荷材料设计理论、方法与原则,揭示材料制备流程的物质-能量-环境效应的关联机制、材料性能对产品服役过程环境影响的作用机理等^[20];研究资源循环工艺流程模型及循环模式的表征方法,探索资源循环与碳排放、资源耗竭等环境影响的关联性;开展材料生态设计多态数据模型、信息表示、多维分析与决策、关联规则、推理机制与流程化自动仿真的研究,开发集成材料环境负荷基础数据、特征化方法和环境影响指标的材料生态设计技术体系和基于人工智能的专家系统,实现生态设计的集成化与自动化^[21];构建典型大宗材料及稀缺材料的生态设计基本流程与指导原则,优化材料组分设计与制备工艺参数,从源头实现节约资源能源,减少环境污染^[22]。

材料生命周期评价理论与方法 生命周期评价方法作为生命周期工程最重要的支撑工具,已经成为目前国内生态环境材料领域最主要的研究方向之一^[23-25]。1998年起,国家“九五”高技术研究计划(“863”计划)支持了首项国家层面的生命周期评价专项研究——“材

料的生命周期评价研究”,由北京工业大学牵头,重庆大学、北京航空航天大学、清华大学等六所重点大学联合承担,对我国钢铁、水泥、铝、陶瓷等七类量大面广的典型材料进行了生命周期评价研究。同期,我国生命周期评价的国家标准亦制定完成(GB24040-24043)。在“十五”期间,北京工业大学等六所重点大学又承担了国家十五“863”计划的“材料生命周期评价技术及其应用”,对整体材料生命周期评价技术框架、动态环境负荷分析方法和环境负荷的层次理论进行了深入研究,并提供了几类代表性材料的生命周期评价及新材料与技术的应用示范。进入“十二五”以后,国家三大科技计划都分别对材料生命周期评价的基础理论研究和应用实践研究给予了大力的支持,相关的研究和应用在各领域均得到了进一步拓展和加强。当前研究涉及材料生产流程及复杂生产系统建模的集成化、可视化和形象化,基于单元过程的材料全生命周期清单建模方法,多层次嵌套和反馈式系统清单物质流计算的高效算法引擎^[26];研究材料生命周期环境负荷属性与材料性能的交互模式及其综合环境负荷-性能表征体系,材料环境影响评价模型及模型参数优化^[27-28];针对大数据时代的信息资源高效利用,开展面向生产过程的材料环境负荷元数据采集、规范化、标准化、异构数据集成与数据挖掘方法的研究,开发数据模型、数据处理模式、数据存储模式、数据表示、数据质量控制与定量化分析模型,实现数据在形式和内容上的统一^[29-30];开展基于互联网技术的动态数据交换、在线综合诊断与辨识模式、高效搜索引擎的研究,研究材料环境负荷知识发现、信息交换与协同处理技术^[31]。

材料生命周期系统优化技术 研究材料生产流程(资源、能源、工艺、设备)、运输、使用、循环利用与废弃处置全生命周期的物质流、能量流及其效率特征,研究材料生产、物流网络、环境影响的交互作用及响应机制,以及产品性能、经济性与环境影响的综合影响^[32-33];研究元素流、典型材料区域物质流及产业规划,研究材料产业链、供应链、物流链的结构优化及生命周期系统优化^[34];研究材料与下游目标应用行业(建筑业、交通业等)环境信息相衔接的材料生命周期综合环境性能表征,实现绿色产品选材优化、生态设计与技术体系的优化^[35]。

材料环境负荷评价数据库及分析软件开发 材料的环境负荷数据库是生命周期工程领域的共性关键基础。经过多年的探索与实践,我国已初步建立起具有自主知识产权的、代表性工程材料的环境负荷基础数据库和评价工具,有效地促进了传统材料产业的环境协调改造升

级^[36]。但材料/产品环境负荷数据尤其是国家经济建设需要的大宗基础材料产品的环境负荷数据及数据质量仍然是我国推行生命周期评价的瓶颈。随着国家对实施节能减排的强制要求,材料/产品的生态设计、碳排放分析与认证、生态城市建设等研究和应用需求的增加,在广泛适用的环境负荷数据支撑及开放性系统、可操作性强的环境负荷数据质量分析方法及分析工具、数据库和分析工具的系统集成性等关键基础方面仍需进行深入研究。

材料生命周期工程的工艺规划、绿色制造与清洁生产 研究基于环境意识的产品制造工艺规划方法、绿色工艺评价准则与选取方法、工艺规划中的物料选择问题,开发产品制造过程的节能减排技术、清洁生产技术、制造系统优化技术、制造过程物料优化控制技术,探索绿色制造的理论、技术、绿色设计的并行工程模式与运作管理模式,提高产品生产的资源能源利用效率,减少污染物排放。

材料生命周期工程中的再制造、重用及回收技术 开展废旧产品回收与工业废弃物回收关键技术的研究,开发工业废弃物的高效利用技术、废弃物再资源化技术(如废弃物降解、再生、加压、碎裂、浮选等技术)、产品零部件循环使用技术(如重用、整修等技术)和循环利用技术(如有关物理处理技术和化学处理技术)^[37-38]。

材料生命周期工程相关学科建设 为了满足国家节能减排、低碳经济及循环经济等战略性新兴产业对高素质人才的迫切需求,我国在 2010 年设立新兴交叉学科专业——资源循环科学与工程,通过对循环经济工程技术相关理论知识的学习与工程实训锻炼,了解我国资源分布、产业布局、环境保护等方面的基本状况,掌握材料/产品的生态设计原理,具备从事循环资源科学与工程基础理论研究与工程技术开发、生态设计、环境管理等方面的工作的能力,主要课程包括:工业生态学、材料科学基础、循环经济概论、环境科学基础、工业废弃物处置与处理、循环经济理论与生态工业技术等。

3 材料生态设计理论框架与评价方法的构建

3.1 材料生态设计的发展现状

生态设计作为生命周期工程的基础与核心,自 20 世纪 90 年代被提出以来,受到发达国家政府和企业界的高度重视。荷兰的飞利浦公司、美国的 AT&T 公司、德国的奔驰汽车公司等先后进行有关产品生态设计的尝试,实践表明生态设计可减少产品 30%~50% 的环境负

荷。国际标准化组织于2002年发布了ISO/TR14062《环境管理-将环境因素引入产品的设计和开发》标准,将环境因素引入产品的设计和开发具有降低成本、促进革新、改进产品质量等实质效益,早期设计阶段的环境识别和策划有利于制定控制环境因素的有效决策^[9]。美国绿色电子委员会开发了基于生态设计的政府全球采购注册系统,帮助美国各级政府负责采购的官员在招标过程中评估竞标产品的环保性能;欧盟针对全球环境问题日趋严峻和剧烈的经济竞争,于2009年发布了《确立能源相关产品生态设计要求的框架》(ErP指令),其通过设定产品市场准入标准,促进产品生态设计水平的提高,未来产品生态设计的评估认证将拓展至更多领域,成为世界范围的贸易壁垒。

总体而言,在欧盟、美国、日本等发达国家,生态设计已在各行业广泛推行,其评价结果直接与政府采购挂钩,并用于指导公众的绿色消费。而近年来,我国多项国家、省部级文件中均指出,未来的工业领域要树立源头控制理念,以产品全生命周期资源科学利用和环境保护为目标,以技术进步和标准体系建设为支撑,逐步建立评价与监督相结合的产品生态设计推进机制,通过政策引导和市场推动,促进企业开展产品生态设计。虽然我国的生态设计标准体系正在逐步完善^[10,39],但仍缺乏针对材料行业的生态设计标准与评价准则,材料生态设计的关键指标也与国际先进水平存在较大差距。因此,开展材料生态设计研究,从源头优化解决各环节的资源与环境问题,指导材料组分设计、工艺优化与再生循环技术的开发,寻求材料性能、资源消耗与环境影响在整个生命周期中的最优解,是促进材料全生命周期整体节能减排的有效途径。

3.2 材料生态设计的理论框架

本文将材料生态设计的实施步骤归纳为策划、方案制定、方案验证、实施4个阶段,其中包含了将环境因素引入产品设计的主要实施过程。

策划阶段 确定设计目标与实施方案,分为以下4个步骤:(a)确定设计目的;(b)选择参照对象并确定其特征,通常考虑的材料特征包括其原料、工艺与性能等,参照对象需要能够体现特定的基础技术水平,通常选择某种材料的生产现状;(c)对参考对象的性能、资源消耗与环境影响给予量化的评价,分析影响产品资源与环境表现的主要因素,确定需要改变设计的领域;(d)根据评价结果,提出改进材料性能、资源与环境综合表现的建议。

方案制定 制定材料设计或改进方案,分为以下4个步骤:(a)确定材料设计目标的各项性能参数范围;

(b)根据现有材料成分、工艺和性能之间的联系,初步拟定多组目标材料的成分和工艺参数方案;(c)对照参考对象分析当前设计方案在达到设计目标的同时可能引发的其他问题;(d)对拟定方案进行多要素综合评价,不满足要求的方案被淘汰或者根据存在的问题重新设计;满足要求的方案则确定为原型方案。

方案验证 验证原型方案可行性并择优,分为以下4个步骤:(a)对原型方案进行实验室制备和测试,不能满足要求的方案返回到方案制定阶段重新进行设计;(b)根据实验数据更新方案的全生命周期模型参数,并重新对达标设计方案进行资源、环境影响与性能的综合评价,选择综合评价结果最好的方案进入小规模生产;(c)通过小规模生产搜集生产过程中的实际数据,并更新材料全生命周期模型参数并再次进行多要素的综合评价,进一步寻找改进空间,并与参考对象的综合评价结果比较,以确定是否达到目标;(d)如果认为达到目标,那么方案可以进入实施阶段,否则根据评价结果提供的信息,返回第二阶段重新设计方案。

实施阶段 方案验证完成后,可以进入实施阶段。但生态设计是一个反复的过程,在生产实践中可能发现之前没有考虑到的问题,需要对方案再次进行修改与评估。

3.3 材料生态设计的评价方法

在材料生态设计的实施过程中,如何对不同设计方案进行评判与择优是需要解决的关键问题之一,主要的技术难点在于如何科学量化材料的使用性能、资源与环境影响。本文建立了基于资源-环境-性能指标的多因素综合决策模型,通过集成生命周期评价等国际主流的可持续发展评估方法,实现对不同评估要素的量化分析,并通过多因素决策模型最终计算得到表征材料资源、环境和性能综合表现的生态设计综合指标,量化不同材料设计方案得到单位使用性能造成的资源消耗与环境影响,进而对设计方案进行比较与择优。综合决策模型分为材料性能评价方法、资源影响评价方法、环境影响评价方法与综合决策方法4部分。

3.3.1 基于性能-需求矩阵的材料性能综合评价模型

材料生态设计中的性能评价旨在量化材料的性能表现对设计需求的满足程度。首先需要确定设计需求 R_i (如轻质、高强度、长寿命等),以及设计需求对于应用领域的相对重要程度 wR_i (需求权重)。材料满足设计需求的能力与其本身的性能有关,因此还需要量化材料的主要性能并通过矩阵表示性能与设计需求的关联,见表1所示,表中 W_{ij} 表示了性能 P_j 对完成需求 R_i 的贡献程度,如果某种性能对某种需求并无任何贡献,则 $W_{ij} = 0$ 。

表 1 需求-性能矩阵
Table 1 Requirement-performance matrix

Requirement weight factor		Performance 1 (P_1)	Performance 2 (P_2)	Performance 3 (P_3)	...	Performance $N(P_N)$
Requirement 1 (R_1)	wR_1	W_{11}	W_{12}	W_{13}	...	W_{1N}
Requirement 2 (R_2)	wR_2	W_{21}	W_{22}	W_{23}	...	W_{2N}
Requirement 3 (R_3)	wR_3	W_{31}	W_{32}	W_{33}	...	W_{3N}
...
Requirement $N(R_N)$	wR_N	W_{N1}	W_{N2}	W_{N3}	...	W_{NN}

以应用于道路的沥青混凝土材料为例，其需求-性能矩阵如表 2 所示。对于在道路的应用而言，需要材料具有抗水、抗滑、体积稳定等多项需求，而材料本身的各项性能指标，如残留稳定度、摆式摩擦系数等则会影

响材料满足这些需求的能力。通过性能-需求矩阵，可以清楚反映各项需求的相对重要程度以及材料性能指标与应用需求的关联。

表 2 沥青混凝土的需求-性能矩阵
Table 2 Requirement-performance matrix of asphalt concrete

Requirement	Weight factor	Pendulum type friction coefficient	Water immersion expansion ratio	Dynamic stability	Residual stability	Flexural-tensile strain	Freeze thaw splitting strength ratio	Four-point bending fatigue life
Anti-high temperature rut	20%	—	—	100%	—	—	—	—
Anti-water damage	20%	—	—	—	50%	—	50%	—
Anti-cracking in low temperature	20%	—	—	—	—	50%	—	50%
Volume stability	10%	—	100%	—	—	—	—	—
Anti-skating	15%	100%	—	—	—	—	—	—
Durability	15%	—	—	—	—	—	—	100%
Performance weight	100%	15%	10%	20%	10%	10%	10%	25%

通过需求-性能矩阵可以计算每一种材料性能对整体应用需求的重要程度，称为性能权重系数，计算公式如下：

$$aP_j = W_{1j} \times wR_1 + W_{2j} \times wR_2 + \cdots + W_{ij} \times wR_i \quad (1)$$

$$wP_j = \frac{aP_j}{aP_1 + aP_2 + \cdots + aP_j + \cdots + aP_m} \quad (2)$$

式中， wP_j 为第 j 类性能权重系数， aP_j 为第 j 类性能的相对权重值， wR_i 为第 i 种需求的权重值， W_{ij} 表示了第 j 种性能对完成第 i 种需求的贡献程度。例如表 2 中计算了沥青混凝土应用于道路的各项性能权重值。

利用材料各项性能权重系数与测试指标值，可以得到某种材料的单一化性能指标值，如公式 (3) 所示。

$$PI = \sum_{j=1}^n (wP_j \times \frac{P_j}{P'_j}) \quad (3)$$

式中， PI 为材料的单一化性能指标值， wP_j 为第 j 类性能权重系数， P_j 为研究对象第 j 类性能的测试指标值， P'_j 为参考对象第 j 类性能的测试指标值。

材料生态设计中涉及的性能指标涵盖材料物理性

能、力学性能与化学性能，在进行设计实践时通常并不需要涵盖所有的性能指标，仅需包含与资源、环境、产品需求相关的主要性能即可。因此，很难建立一种可以通用于所有材料的性能指标体系，需要针对不同应用领域与材料在生态设计的需求分析阶段予以确定。性能指标也可进一步细分达标指标与择优指标：达标指标仅需要达到一定的取值范围即可；而择优指标通常与产品的环境表现直接相关，如产品的寿命、保温材料的隔热系数等，这些指标的改变会显著降低产品的环境影响，故在设计中应该在不严重影响成本的前提下，持续改善此类指标。

3.3.2 基于烟的资源影响综合评价模型

充足的自然资源供给是保证材料工业永续发展的物质基础。自然界中资源的存在形式是多样的，材料生命周期过程对矿产资源、化石能源、水资源、土地资源等多种自然资源均有一定影响；为了科学客观地表征材料生产所造成的各类自然资源损失、确定材料生产的资源

依赖强度,有学者提出了基于热力学函数焓的资源耗竭特征化模型^[40]。该模型的应用一方面可以将材料生命周期过程所造成的矿产资源、化石能源、水资源以及土地资源的消耗与损害表征为统一指标(物理单位相同),另一方面还可以同时反映资源“量”与“质”在材料生产过程中的变化规律。在规定参考环境与元素化学焓计算模型的基础上,可对各类自然资源进行系统量化^[41]。

从自然界中开采的矿物其化学成分通常较为复杂,例如开采出的铁矿石并非单一的磁铁矿而是由多种纯矿物(磁铁矿、石英、长石、角闪石、透闪石等)组成的混合物;因此,仅以某种纯矿物的焓值表示矿石整体的资源属性不符合LCA的研究范围。如公式(4)所示,天然矿物化学焓的计算包括两部分,一是对不同纯矿物的焓值进行加和,二是计算纯矿物混合所造成的焓损失^[42]。

$$Ex_{Na} = \sum x_{Ai} Ex_{Ai} + RT_0 \sum n_{Ai} \ln m_{Ai} \quad (4)$$

式中, Ex_{Na} 为单位质量天然矿物的化学焓, Ex_{Ai} 为单位质量纯矿物的化学焓, x_{Ai} 为纯矿物在天然矿物中的质量百分比, R 为热力学常数, T_0 为常温, n_{Ai} 为纯矿物在单位质量天然矿物中的摩尔数, m_{Ai} 为纯矿物在天然矿物中的摩尔百分数。

对于化石能源,可采用“焓能比值法”对其资源属性进行估算。该计算模型通过估算有机燃料的化学焓值与其发热量的比值来确定各类燃料的焓值,如式(5)所示^[43]。以此为依据,可对不同燃料的化学焓值进行估算。

$$\beta = \frac{Ex_{org}}{H_i} \quad (5)$$

式中, β 为有机燃料的焓能比^[44], Ex_{org} 为有机燃料的焓

值, H_i 为有机燃料的低发热量。

对于水资源,应针对材料生产流程中水资源的不同消耗方式,即物理蒸发、化学固化、混合排污,分别进行资源损害表征^[45],相应计算如式(6)所示。

$$WRDI = \Delta Ex_1 \times \sum m_i + \Delta Ex_2 \times \sum m_j + \Delta Ex_3 \times \sum m_k \quad (6)$$

式中,WRDI为水资源耗竭指数, m_i 、 m_j 、 m_k 分别代表不同生产工序相应的废水量、蒸发量与固化量, ΔEx_1 、 ΔEx_2 、 ΔEx_3 分别为与三种消耗方式相对应的资源损失因子。

对于土地资源,首先应确定人类使用行为对土地固碳能力的影响,在此基础上,将人类使用行为所导致的土地固碳量的损失转化为土地固碳量的损失。国内已有学者^[28]对材料生产所引起的土地固碳能力变化进行了全面系统的研究,基于此项工作,可通过光合反应的能量变化将土地固碳能力转化为其固定化学焓的能力^[46],如公式(7)所示。

$$ExLF_{occ, res} = BL_{occ, res} \times CR_{C \rightarrow Ex} \quad (7)$$

式中, $ExLF_{occ, res}$ 表示土地资源在占用阶段和恢复阶段的资源损失因子, CR 为碳-焓转化系数, $BL_{occ, res}$ 表示土地占用阶段和恢复阶段的固碳量损失。

根据建立的资源影响综合评价模型,进一步构建材料生态设计的资源影响指标体系,见表3所示。指标体系将资源影响(一级指标)分为资源消耗指数与资源品质下降指数:其中资源消耗指数包含矿产资源消耗、化石能源消耗与可再生资源消耗3个三级指标;而资源品质下降指数包含水资源使用与土地资源使用2个三级指标。通过指标体系,可以全面、客观地对材料在全生命周期中对资源的影响进行综合表征。

表3 资源影响指标体系

Table 3 Index system of resource impact

First-level index	Second-level index	Third-level index	Index items
Resource impact index	Resource consumption index	Ores consumption	metallic ore, non-metallic ore, <i>et al.</i>
		Renewable resource consumption	solar energy, wind energy, wood, <i>et al.</i>
		Fossil energy consumption	coal, oil, natural gas, <i>et al.</i>
	Resource quality decline index	Water quality decline	surface water, underground water, <i>et al.</i>
		Land quality decline	land occupation, land transformation, <i>et al.</i>

3.3.3 基于生命周期评价的环境影响综合评价模型

生命周期评价是目前国际上分析产品环境问题的主流工具之一,该方法通过收集产品或材料在生命周期中

的主要输入与输出清单(包括资源消耗、能源消耗以及各类污染物排放),并将其与各类环境影响相关联,据此定量评价产品生命周期中造成的各类环境影响潜力

(如全球变暖、酸化、人体毒性等等)，最终将各类环境指标通过损害评估与加权步骤综合为单一指标来反映产品全生命周期的环境表现，该方法主要的评价流程见图 3 所示^[47-48]。

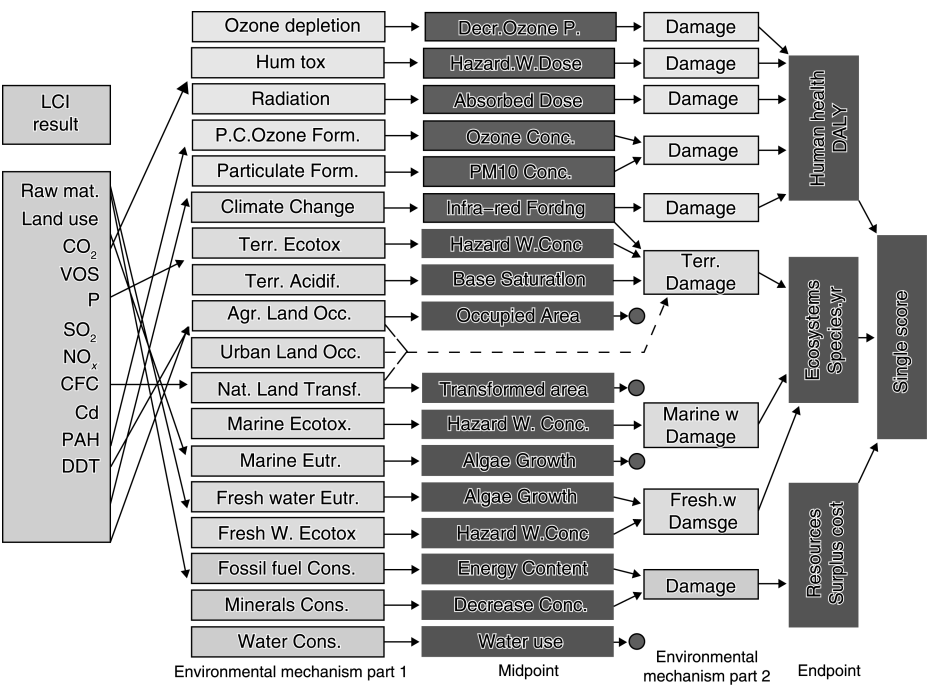


图 3 生命周期评价方法的计算流程

Fig. 3 Computation process of life cycle assessment

本文针对材料行业的特点，建立了基于生命周期评价的材料生态设计环境影响指标体系，见表 4 所示。指标体系中共涉及标准气态污染物指数、水环境污染指数、土壤污染指数、人体健康损害指数 4 大类二级指标，涵盖了人类行为对生态环境与人类自身健康的主要影响；每类二级指标下又可细分为三级指标与指标项

目。在生态设计的数据收集过程主要针对指标项目进行数据的收集、计算与汇编，而后采用生命周期影响评价方法，将数据收集过程得到的各指标项目值进行逐级综合，最终形成评价对象的单一环境影响指标值，综合表征产品全生命周期中造成的各类环境影响。

表 4 环境影响指标体系
Table 4 Index system of environment impact

First-level index	Second-level index	Third-level index	Index items
Environment impact index	Air pollution index	Global warming	CO ₂ , NO ₂ , CH ₄ , CFCs, <i>et al.</i>
		Ozone layer destruction	CFCs, halon, CH ₃ Br, <i>et al.</i>
		Photo-chemical smog	ethylene, NMVOC, <i>et al.</i>
	Water pollution index	Aquatic toxicity	COD, BOD, NO ³⁻ , <i>et al.</i>
		Acidification	SO ₂ , NO _x , HCl, HF, NH ⁴⁺ , <i>et al.</i>
		Eutrophication	ammonia, PO ₄ ³⁻ , <i>et al.</i>
	Soil pollution index	Terrestrial toxicity	Cr, Ni, As, Hg, <i>et al.</i>
	Human health index	Human toxicity	Particulate, Dioxin, <i>et al.</i>

3.3.4 资源-环境-性能多因素综合决策方法
在获得资源影响、环境影响与材料性能 3 项单一指

标值后，可以将三者相综合得到生态设计综合指标值，如公式（8）所示：

$$EDI = a \times PI + b \times RI + c \times EI \quad (8)$$

式中, EDI 为综合生态设计指标, a , b , c 分别为性能、资源影响与环境影响的权重系数, PI 为性能指标值, RI 为资源影响指标值, EI 为环境影响指标值。

考虑到生态设计中通常会涉及多种方案的择优, 且需要尽可能避免权重系数选取的主观性, 本文建立了基于权重三角的方案择优模型, 如图 4a 所示。三角形中的每一点向三边做投影, 均可以得到一组权重的取值方案, 通过软件编程计算三角形内所有的权重取值后, 可以得到几种方案各自的最优权重因子集, 并表示于图中, 如图 4b 所示, ①、②与③区域分别表示 3 种方案为最佳方案时的权重取值。那么则可以认为所占面积最大的方案 (方案③) 为最优方案。

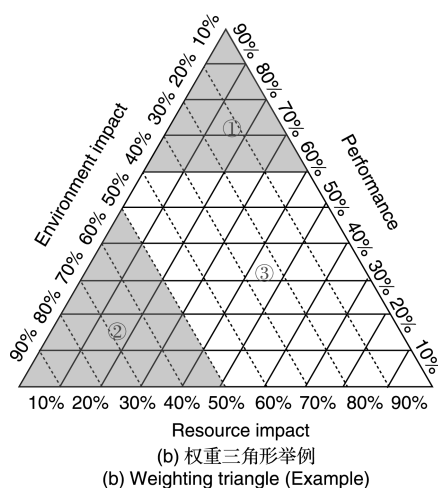
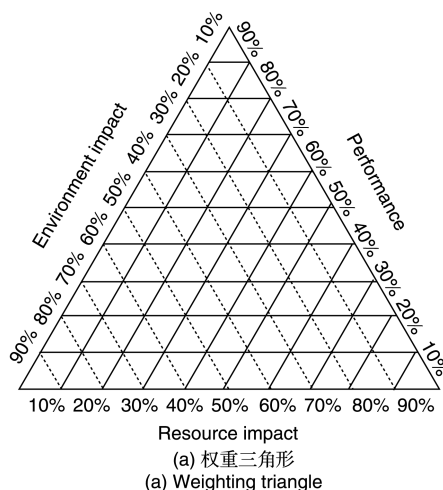


图4 基于综合决策三角的方案决策模型

Fig. 4 Decision-making model based on weighting triangle

4 结 语

依据国家中长期科技发展规划, 材料行业的发展应以提高自主创新能力、加快推动产业结构调整为主线,

以国家重大需求为导向, 围绕我国生态文明建设对材料领域的迫切需求, 树立材料工业领域的源头控制理念, 以产品全生命周期资源科学利用和环境保护为目标, 以技术进步和标准体系建设为支撑, 在材料领域大力开展生命周期工程相关研究, 主导材料与相关下游行业的绿色转型与升级, 促进生态设计理念、节能减排制造技术、清洁生产技术在材料生命周期各个环节中的推广与应用, 系统地、有效地、持续地改善材料全生命周期的环境表现, 最终彻底改变材料行业传统的经济利益导向与资源依赖型发展模式。

本文详细介绍了生命周期工程的技术内涵与国内外发展现状, 建立了适用于材料行业的生态设计理论框架与评价方法, 为生态环境材料的开发与应用提供了理论支撑。未来生命周期工程技术在材料领域的推广与应用急需突破并发展适用于我国材料行业的全生命周期设计、评价与优化技术, 建立以生态设计技术为指导、生命周期评价技术为标尺, 生命周期优化技术为工具的生态环境材料产业绿色化发展模式, 指导材料生产、产品制造、管理、维修、回收、再利用等一系列技术环节中持续的技术革新与工艺参数优化, 寻求材料成本、性能与环境影响在整个生命周期中的最优解, 逐渐缓和目前材料生产与资源环境间的巨大矛盾, 实现材料领域的可持续发展, 并辐射建筑、交通等相关下游行业, 全面满足我国生态文明建设对材料的需求。

参考文献 References

- [1] National Bureau of Statistics of China (国家统计局). *China Energy Statistical Yearbook 2013* (中国能源统计年鉴 2013) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [2] National Bureau of Statistics of China (国家统计局). *China Statistical Yearbook on Environment* (中国环境统计年鉴 2013) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [3] Nie Zuoren, Zuo Tiejong. *Current Opinion in Solid State & Materials Science* [J], 2003, 7 (3): 217-223.
- [4] Zuo Tiejong, Wang Tianmin, Nie Zuoren. *Materials & Design* [J], 2001, 22 (2): 107-110.
- [5] Nie Zuoren (聂祚仁). *Advanced Materials Industry* (新材料产业) [J], 2001, 10: 12-15.
- [6] Wang Tianmin (王天民), Hao Weichang (郝维昌). *Materials China* (中国材料进展) [J], 2011, 8: 8-16.
- [7] Zuo Tiejong (左铁镛). *Advanced Materials Industry* (新材料产业) [J], 2004, 10: 72-78.
- [8] David E L, Michel A M. Issues in Product Life Cycle Engineering Analysis [C] // *Proceedings of ASME Design Automation Conference*. 1993.
- [9] ISO/TR 14062. *Environmental Management-Integrating Environ-*

- mental Aspects into Product Design and Development [S]. 2002.
- [10] GB/T 24256-2009. *General Principle and Requirements of Eco-design for Products* (产品生态设计通则) [S]. 2009.
- [11] The International Academy for Production Engineering. CIRP Encyclopedia of Production Engineering [R].
- [12] Thinkstep Co., Ltd. Gabi 6.0 Software [EB/OL]. 2014. <http://www.gabi-software.com/china/index/>
- [13] Joyce Smith A Cooper, Bruce Vigon. *Life Cycle Engineering Guidelines* [M]. United States Environmental Protection Agency, 2001.
- [14] Hyunseok O, Bongtae H, Patrick M C, et al. *IEEE Transactions of Power Electronics* [J], 2015, 30 (5).
- [15] Center for Advanced Life Cycle Engineering [EB/OL]. <http://www.calce.umd.edu/chinese.htm>
- [16] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要 [R]. 2006.
- [17] 中华人民共和国国务院. 国务院关于加强环境保护重点工作的意见 (国发 [2011] 35 号) [R]. 2011.
- [18] 中华人民共和国国务院. 国务院节能减排“十二五”规划 (国发 [2012] 40 号) [R]. 2012.
- [19] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业清洁生产推行“十二五”规划 (工信部联规 [2012] 29 号) [R]. 2012.
- [20] Anna L, Przemyslaw K. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2010, 15: 769-776.
- [21] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Hongzhi (王志宏). *Journal of Wuhan University of Technology* (武汉理工大学学报) [J], 2004, 26 (3): 12-14.
- [22] Przemyslaw K, Anna L. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2010, 15: 777-784.
- [23] ISO 14044. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines* [S]. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2006.
- [24] Zuo Tieyong (左铁镛), Nie Zuoren (聂祚仁), Di Xianghua (狄向华), et al. *Materials Review* (材料导报) [J], 2001, 15 (06): 1-3.
- [25] Nie Z R, Gao F, Gong X Z, et al. *Progress in Natural Science-Materials International* [J], 2011, 21 (1): 1-11.
- [26] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Hongzhi (王志宏), et al. *Journal of Beijing University of Technology* (北京工业大学学报) [J], 2009, 35 (12): 1 685-1 689.
- [27] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, et al. *Science in China Series E-Technological Sciences* [J], 2009, 52 (1): 215-222.
- [28] Liu Y, Nie Z R, Sun B X, et al. *Science China-Technological Sciences* [J], 2010, 53 (6): 1 483-1 488.
- [29] Gong Xianzheng (龚先政), Nie Zuoren (聂祚仁), Wang Hongzhi (王志宏), et al. *Materials China* (中国材料进展) [J], 2011, 8: 1-7.
- [30] Nie Zuoren (聂祚仁), Gao Feng (高峰), Chen Wenjuan (陈文娟), et al. *Materials Review* (材料导报) [J], 2009, 13: 1-6.
- [31] Gong Xianzheng (龚先政), Zhang Qun (张群), Liu Yu (刘宇), et al. *Journal of Beijing University of Technology* (北京工业大学学报) [J], 2009, 35 (07): 997-1 001.
- [32] Gao F, Nie Z R, Wang Z H. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2009, 14 (5): 480-489.
- [33] Li C, Nie Z R, Cui S P, et al. *Journal of Cleaner Production* [J], 2014, 72: 204-211.
- [34] Nie Z R. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2013, 18 (8): 1 435-1 439.
- [35] Gong X Z, Nie Z R, Wang Z H, et al. *Journal of Industrial Ecology* [J], 2012, 16 (4): 576-587.
- [36] 北京工业大学. 材料环境负荷基础数据库—Sinocenter [EB/OL]. <http://cnmlca.bjtu.edu.cn>
- [37] Nie Z R, Ma L W, Xi X L. *Rare Metals* [J], 2014, 33 (4): 369-378.
- [38] Xi X L, Nie Z R, Xu K H. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* [J], 2013, 41: 90-93.
- [39] GB/T 24062-2009. 环境管理—将环境因素引入产品的设计和开发 [S]. 中国标准出版社, 2009.
- [40] Dewulf J, Bosch M E, Meester B D, et al. *Environmental Science and Technology* [J], 2007, 41 (24): 8 477-8 483.
- [41] Szargut J, Morris D R. *Energy Research* [J], 1987, 11 (11): 245-261.
- [42] Sun B X, Nie Z R, Gao F, et al. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2015, 20: 1 048-1 060.
- [43] Sun B X, Nie Z R, Gao F. *International Journal of Exergy* [J], 2014, 15 (2): 196-213.
- [44] Szargut J. *Exergy Method; Technical and Ecological Application* [M]. WIT Press, 2005.
- [45] Wang H T, Sun B X, Liu Y, et al. *Materials Research Innovations* [J], 2014, 18 (S4): 67-71.
- [46] Sun B X, Liu Y, Nie Z R, et al. *International Journal of Exergy* [J], 2014, 15 (4): 429-446.
- [47] GB/T 24040-2008. 环境管理—生命周期评价—原则与框架 [S]. 中国标准出版社, 2008.
- [48] GB/T 24044-2008. 环境管理—生命周期评价—要求与指南 [S]. 中国标准出版社, 2008.