

材料生命周期评价方法与应用进展

魏 薪¹, 董超芳¹, 肖 葵¹, 骆 鸿¹, 魏 丹², 李晓刚¹

1. 北京科技大学腐蚀与防护中心, 北京 100083

2. 中国科协学会服务中心, 北京 100081

摘要 近 20 年来, 生命周期评价 (LCA) 这一理念在工业、农业、建筑业等多种领域中得到了广泛的应用。LCA 以环境科学为主要研究重点, 评估产品对环境的影响, 以及二者间的相互作用。本文简要介绍了 LCA 的定义、框架、起源及发展, 重点介绍了生命周期的评价方法。对建筑材料、金属材料和节能装置等 LCA 应用领域进行了分别论述, 所介绍方法均为近几年来在以上 3 个领域中得到研究并应用于相关材料生命评价研究之中。文中所提到的方法均以所研究材料对环境的影响作用为主, 部分方法同时考虑了经济因素的影响, 即在生命周期评价之中引入了生命周期成本 (LCC) 评估概念, 这一做法更符合企业对生命周期评价的要求, 保证了企业利益的条件下最大限度地减少环境的影响。最后, 全面分析了文中涉及的评价方法, 发现其相同的缺陷, 即忽略了材料寿命这一关键因素在不同环境下的变动, 提出使用环境寿命代替设计寿命的想法, 进一步完善了生命周期评价过程, 使得其成为更有力的决策工具。

关键词 生命周期评价; 评价方法; 环境寿命

中图分类号 TG174.4

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.14.011

Methods of Material Life Cycle Assessment and Application

WEI Xin¹, DONG Chaofang¹, XIAO Kui¹, LUO Hong¹, WEI Dan², LI Xiaogang¹

1. Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Service Center for Scientists, China Association for Science and Technology, Beijing 100081, China

Abstract In recent 20 years, the concept of the Life Cycle Assessment (LCA) is widely used and related studies make a big progress in many fields such as industry, agriculture and construction industry. The LCA mainly focuses on the aspect of environmental science and evaluates the impact of products on the environment and the interaction between them. This paper reviews the definition, the framework, the origin and the development and mainly the evaluation methodology of LCA. The different methods used in different fields are analyzed. In almost all methods, the environment impact is the first important issue. Some of them consider the economic factors. The Life Cycle Costing (LCC) is introduced into LCA so that the method can consider environmental and economic factors at the same time. Although the evaluation methodology of LCA plays an important role in many fields, many problems remain to be solved. It is shown that almost all methods discussed in this paper ignore the environment life of materials, which limits the application range of LCA methods in different natural environments. It is proposed in this paper to use the environment life in the place of the design life so that the LCA process can be further improved.

Keywords life cycle assessment; evaluation methodology; environment life

1 生命周期评价概述

随着资源、能源的短缺, 人类、动植物生存环境不断恶化, 各行业均需“节能减排”, 进行清洁生产。因此, 对材料从开采、运输、加工生产、使用到废弃回收的全生命周期过程进

行环境影响评价十分必要, 是社会可持续发展的重中之重。

1.1 生命周期评价定义与框架

目前, 许多领域和机构对生命周期评价 (LCA) 进行了定义, 其中以国际环境毒理学和化学学会 (SETAC) 和国际标准

收稿日期: 2012-04-26; 修回日期: 2012-05-12

作者简介: 魏薪, 博士研究生, 研究方向为材料的腐蚀与防护, 电子信箱: ustbweixin@sina.cn; 董超芳 (通信作者), 教授, 研究方向为材料的腐蚀与防护, 电子信箱: cfdong@ustb.edu.cn

化组织(ISO)最具权威性。1993年,SETAC对LCA定义如下:通过确定和量化与评估对象相关的能源消耗、物质消耗和废弃物排放,评估某一产品、过程或事件的环境负荷;定量评价由于这些能源、物质消耗和废弃物排放所造成的环境影响;辨别和评估改善环境的机会。评价过程应包括该产品、过程或事件的寿命全过程,包括原材料的提取与加工、制造、运输和销售、使用、再使用、维持、循环回收,直到最终的废弃。1997年,ISO修订的标准(ISO 14040)中给出的LCA定义是:对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价;关于LCA的相关概念的详细描述可参考相关文献[1]—[5]。

生命周期技术通常以LCA为主,结合生命周期成本(LCC)、生命周期优化(LO)等方法。这些技术为产品制造者提供了新的机会,使他们不仅可以在技术方面而且能够在环境和经济方面优化产品的可持续性。

根据SETAC和ISO 14000标准,LCA具有通用框架,即包含目标和范围定义(goal and scope definition)、编目分析(inventory analysis)、环境影响评价(impact assessment)和结果解释(interpretation)4个部分,如图1所示。

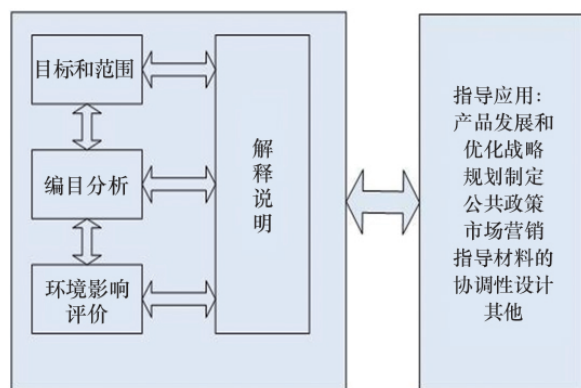


图1 生命周期评价框架

Fig. 1 The frame work of LCA

1.2 生命周期评价起源与发展

生命周期评价的概念起源于20世纪60年代末,可口可乐公司委托美国中西部研究所(Mid West Research Institute)对饮料容器进行评价。直到20世纪90年代,SETAC和ISO分别提出了LCA概念和理论及其他规范和规则等。

纵观生命周期评价近20年的发展,各个国家都经历了从个案研究到软件分析或模型模拟的过程,大大提高了生命周期评价的可行性和评估效率,本文主要针对模型模拟方法这一方向进行简要介绍。

2 典型模型概述

迄今,已有许多LCA评价模型^[6],虽然各模型都有其不可克服的缺陷,但在生命周期评价领域仍起着至关重要的作

用。模型的建立、发展、完善是生命周期评价的基础,也是生命周期评价软件开发的基础。下面主要综述针对应用于建筑材料,金属材料和节能减排装置3个领域的LCA方法。

2.1 建筑材料的生命周期评价

建筑材料在国民经济发展中占据十分重要的地位。建筑材料使用量大,涉及范围广,建筑材料生产与应用的各个过程与人类生活息息相关,建筑物所使用的每一种材料均影响建筑物的品质,因此对建筑材料进行全生命周期评价是十分必要的。就目前发展看,对建筑材料进行生命周期评价已成为LCA的重要部分,下面就近几年来LCA在建筑领域的应用状况进行简要介绍。

王新轲等^[7]基于生命周期理论对墙体材料进行多目标评价,提出了一种适合墙体材料评价的模型和方法。文中结合陕西区域发展情况,对10种典型墙体材料进行了评价,评价方法的思路为:(1)采用效用最大化标准^[8]统一经济性、环境性、能源性3个决策目标之间的度量指标;(2)采用层次分析法^[9]设定各目标权重,解决多目标之间的权重问题;(3)分别建立墙体材料生命周期环境影响评价模型、能源消耗评价模型、经济评价模型,然后将三者结合起来,根据效用和权重方法得出总的评价模型。将此模型分别应用于10种墙体材料,根据评价结果分别比较不同墙体材料的成本效用值、环境影响效用值和能耗效用值,得出各指标下较满意的墙体材料。根据上一级的权重,将以上3种效用值结合得出综合效用值,可得出在综合各指标条件下较高的墙体材料类别。

魏治文等^[10]利用模糊数学的方法对两种水泥的环境协调性进行了比较分析,直接利用模糊数学的隶属度函数计算各个因素的隶属度,并计算权重和建立模糊评价矩阵,评价结果为高贝利特水泥的环境影响等级为II级,普通硅酸盐水泥的环境影响等级为III级。由该文献给出的评价等级标准可知,与普通硅酸盐水泥相比,高贝利特水泥节能、环保,是一种绿色建筑材料。

高贝利特水泥(HBC)是中国建筑材料科学研究院开发的一种新型低热硅酸盐水泥,与通用硅酸盐水泥同属硅酸盐水泥体系,即熟料矿物由 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 和 C_4AF 组成,不同之处主要是高贝利特水泥是以贝利特矿物(C_2S)为主,含量约为50%,为此赋予高贝利特水泥和混凝土具有水化热低、最终强度高、耐久性好等一系列优异性能。此外, C_2S 的烧结温度较 C_3S 低,可以节约能源,同时降低优质石灰石资源消耗和温室气体和有毒气体的排放。这些特点支持了文献[10]对两种水泥评价结果的正确性,高贝利特水泥的生命周期明显优于普通硅酸盐水泥。

Yu等^[11]提出用竹子结构代替砖结构建筑的设想,将生命周期评价法分别用于评估竹子结构和传统砖结构建筑。首先比较了物化能^[12]和碳排放两个指标,其次对材料流动实施以技术潜力和当前LEED标准^[13]为基础,涉及关于可回收材料的使用和建造过程和废弃过程废弃物的回收的实际因素的

全生命周期评价。

Yu 等建立了在两层表面之中加入真空隔热板 (VIPs) 的类似三明治竹子结构, 其 LCA 分为以下部分。

(1) 材料的生产: 材料在一个建筑物中的使用量是由它的建筑类型和楼层面积决定的, 由于很难得到关于竹子的隐含能和碳排放量数据, 需要建立竹子的生物量流动图, 并参考木材的相关统计学数据得到竹子物化能和碳排放的数值并与传统砖结构建筑相比。

(2) 建筑物的建造: 主要涉及建造过程中废弃物的回收, 包括材料再使用, 材料循环, 生物量燃烧 3 个方面。回收的能量和可避免排放的碳量为

$$E_{\text{rec.con}} = E_{\text{rel.con}} + E_{\text{rec.con}} + E_{\text{bio.con}} - E_{\text{pm.con}}$$

$$C_{\text{a.con}} = C_{\text{rel.con}} + C_{\text{rec.con}} + C_{\text{bio.con}} - C_{\text{pm.con}}$$

其中, $E_{\text{rel.con}}(C_{\text{a.con}})$ 为总能量 (总避免的碳排放量); $E_{\text{rel.con}}(C_{\text{rel.con}})$, $E_{\text{rec.con}}(C_{\text{rec.con}})$, $E_{\text{bio.con}}(C_{\text{bio.con}})$ 分别为以上 3 部分回收的能量 (避免的碳排放量); $E_{\text{pm.con}}(C_{\text{pm.con}})$ 是整个回收过程消耗的能量 (总碳排放量)。

(3) 拆除过程: 拆除过程的废弃物产生量是建造过程的 10—20 倍^[14], 整个过程中回收的能量和避免的碳排量计算方法与建造过程类似, 可参照上一部分。

通过对以上 3 个部分的生命周期评价, 得到相同建筑结构和相同面积的竹子结构与砖结构的对比结果, 竹子结构的能量使用为 3003.4MJ/m², 碳排量为 168.8kg/m² 砖结构的能量使用值为 3532.9MJ/m², 碳排量为 326.1kg/m²。竹子的隔热性是砖结构的 6—10 倍。结果还显示, 砖结构建筑各个部分的碳排放量均高于竹子结构, 除屋顶外, 砖结构的各个部分物化能均高于竹子结构。对于竹子结构建筑来说, 不同的屋顶面积导致不同的物化能。为了确定是否有本质上的因素导致这种不同, 引入两个参数加以比较, 并得到竹子结构的性能由于砖结构。他们还进行了情景分析, 包括回收材料使用、建造过程废弃物和拆除过程废弃物的循环三个部分, 分析中设置高低不同标准代表当前的建筑业。

龚志起等^[15]选择水泥、钢材和平板玻璃 3 种建筑领域用量较大的材料, 研究了 3 种材料物化过程的环境影响。依据 ISO 和 SETAC 建立的框架以及丹麦工业产品环境设计 (EDIP) 方法^[16]进行物化环境影响评价, 建立了相应的评价模型。模型以物化环境影响负荷和资源耗竭系数作为衡量建筑材料的环境影响因子, 评价结果为: 钢材的物化环境影响最大, 平板玻璃次之, 水泥最小。

近几年, 新型建筑材料的应用范围逐渐加大, 生命周期评价方法被应用在新旧材料和相互可代替材料之间进行环境影响评估, 目的在于证明新型建筑材料在环境影响方面明显优于原始材料, 在相互可代替材料之间选择环境负荷最小的材料, 评价结果为建筑行业的工作者在设计和选材方面提供一定的依据, 同时促进新型建筑材料的开发和使用, 实现建筑物的可持续性发展。

2.2 金属材料的生命周期评价

金属材料的全生命周期过程对环境产生的影响也是非常严重的, 对其进行 LCA 可以指导改进生产工艺, 优化管理体制, 注重回收利用, 从而减少资源、能源的浪费, 减少污染物的排放, 利于环境的可持续发展。

刘华^[17]将人工神经网络模型用于函数逼近, 指出人工神经网络以广泛应用于函数逼近方面且具有自适应的特点^[18-19], 通过收集某一时间和地域范围的相关数据, 训练人工神经网络, 获得以人工神经网络为形式的非线性评价函数的线性模型。使用偏好法、权重法和人工神经网络法同时对 7 种金属材料进行 LCA。人工神经网络模型计算利用 Matlab 3.0 实现, 建立了一个 3 层 BP 神经网络, 最终 3 种方法计算的偏好产品在总环境影响值的排列序是一致的, 偏好法和 BP 人工神经网络的结果没有差异, 说明 BP 人工神经网络法完全逼近了函数。

沈万霞等^[20]利用当量模型法定量评价了 2009 年中国原镁和镁合金生产过程的资源、能源消耗及其主要污染物的排放。他们按 LCA 基本框架进行评价, 采用国际上基本达成共识的影响类型、类型参数混合环境负荷方法将生命周期清单结果分配到不同的环境影响类型当中, 由 CML 修正模型的计算结果^[21]得到资源耗竭特征化因子, 污染物的排放均采用目前范围内广泛应用的环境影响特征化因子^[22]计算, 由相应的当量模型计算得到中国 2009 原镁生产特征化结果。与 2005 年直接燃煤型皮江法生产情况相比, 2009 年的资源、能源消耗均有显著下降, 温室效应、人体健康损害也有大幅度下降, 只有酸化效应相对变化较小, 原因是在原镁熔炼和浇铸过程中使用硫粉和溶剂的现状没有明显改观。根据以上计算结果和原铝生产的环境影响清单^[23], 最终计算得到气体保护法生产 1 吨 AM60 镁合金的环境负荷累积结果, 结果表明原镁生产过程的环境负荷在 AM60 镁合金生产的累积环境符合中起着决定性影响。由结果可知, 原镁生产在资源能源的使用以及废弃物排放的下降对镁合金的生产具有重大的意义, 相当于优化了镁合金的全生命周期过程。

张培等^[24]采用类似的方法评价了宝钢电镀锌产品, 结果发现资源消耗、气候变化、能源消耗、酸化是钢铁产品的主要影响类型, 动力、烧结、和炼铁工序是环境印象更最为重要的工序, 并计算出生产 1kg 电镀锌产品生命周期总的环境影响力为 3.1×10^{-14} a。

王智慧等^[25]同样利用模糊综合评价法对药芯焊丝进行 LCA, 与前两篇文献不同的是在计算权重的过程中, 未使用之前专家打分的层次分析法, 而是通过将评价对象的环境协调性分成优、良、中、差几个等级, 计算其隶属程度, 即用环境影响满意度比较评价对象的环境负荷^[26]。这种依靠特征化处理结果推算环境影响的方法在客观性上优于依靠专家意见的层次分析法。通过比较模糊评价法“量化”后得到的数值发现, 钢带在生产及焊接过程中对环境造成的负荷很大, 为环

境型药芯焊丝研制提供了参考。

邵新宇等^[27]提出基于矩阵的生命周期评价与生命成本评估的集成优化模型,在模型中考虑了时间因素,提出了基于矩阵的集成优化算法,基于集成评价结果,建立环境与成本优化模型,并基于并行子空间优化算法进行优化,使综合效益最大。以 4135G 型柴油发动机为研究对象,并以中国的环境影响数据和标准为依据,利用 LCA 和 LCC 集成评价方法进行环境与经济综合评价,验证了所提方法的有效性。

2.3 节能装置的生命周期评价

近年来大力倡导节能减排,许多装置不再能满足环境要求,需要改进。可以改进设备的能源来源,如利用清洁能源代替传统能源,也可以改进这个设备的运行机制,使其效率提高。设备装置改进是以材料发展为基础的,因此将新型节能材料应用于设备装置可以优化设备装置的全生命周期过程。

Salcedo 等^[28]将多目标混合整数非线性规划模型应用到结合反渗透、兰金循环和太阳能收集器的海水淡化装置设计,同时考虑消耗和环境负荷的最小,其中环境作用遵循 LCA 原则,以全球变暖指标表现。

针对反渗透、兰金循环和太阳能收集器,有 3 个部分的方程,约束条件主要针对质量和能量平衡与热力学方程。目标函数同样包含两部分:(1) 经济评价,特定的总消耗目标函数;(2) 环境影响目标函数,一个考虑天气数据的塔拉戈纳(西班牙)的案例为基准用于证明该模型的能力,结果显示与太阳能收集器相结合的海水淡化装置能在小数量消耗水平上产生重要的环境节约。Salcedo 等提出的方法体系在海水淡化方面为决策者对更多的技术中做出选择提供了依据。

韦玲^[29]提出利用太阳能替代电能的冷暖供应系统,利用生命周期综合评价模型和重庆地区太阳能冷暖供应系统生命周期的经济、能源、环境(EEE)分析方法进行综合分析评价。分析结果显示,太阳能空调的花费略高于电能空调,但从整体上看,太阳能的利用避免了发电过程产生的温室气体和有毒气体的排放且避免了空调使用过程中氟利昂的泄露。此外,太阳能供电普及将有效缓解夏季供电紧张和拉闸限电情况。从长远利益来看,太阳能空调比电能空调拥有明显优势,尤其是在对环境和能源的影响上。

从以上两个案例可以发现,材料的开发与应用是新技术得以实现的基础。例如,达到技术要求的太阳能电池板的出现保证了太阳能发电系统的实现,因此对整个节能减排装置的 LCA 是建立在对装置材料 LCA 基础之上的,可知材料的开发与完善具有重大的意义。

本文所提到的各种方法都在相应要求下将生命周期评价过程量化,但也存在很多问题。如利用专家打分的层次分析法在确定权重的过程中引入了人为因素,使得评价方法不够客观,若利用隶属度函数计算权重指标虽然消除了主观因素但使评价过程复杂化降低了评价效率;人工神经网络模型的建立过程比较深奥,对于一般的材料工作者来说有一定

的困难,且需要借助计算机软件实现,有其使用上的限制性;当量模型法在使用过程中缺乏相应的数据,为评价过程带来不便等。总之,很难找到一种既客观又简单,既符合精度要求有数据齐全的方法。

每种产品都有其自身的使用寿命,尤其像金属这样的材料的寿命容易受到外部环境的影响,称之为环境寿命。分析以上模型可以发现,在整个 LCA 评价过程中并未将产品的实际寿命引入模型,或是只是用设计寿命代替环境寿命,这使得 LCA 受地域和气候等外部环境的限制。

3 结论

LCA 的评价方法多种多样,近年来,LCA 的评价过程除遵循框架的要求外,形式更加多样化,很多方法引入了其他算法与 LCA 相结合,共同对材料或体系进行评价,如 Zhou 等^[30]将人工神经网络和遗传算法相结合用来完善材料的生命周期评价过程,评价结果用来指导决策者对材料进行选择,文中在保证力学性质,经济效益等多方因素的前提下,利用二者结合的网络模型找到环境负荷最小的方案。

文中提到的各种模型都有其优势也都有其难以克服的困难,当确定评价对象后要根据其全生命周期的特点及评价要求的精度选择合适的评价模型进行评价,扬长避短。

需将环境寿命引入模型之中,针对当地环境条件提出 LCA 评价,有利于资源能源的高效利用和环境的可持续发展。随着人们对环境问题的关注,LCA 方法将会逐渐趋于成熟,发挥更大的作用。

致谢 致谢中国科协第 239 次青年科学家论坛。

参考文献 (References)

- [1] Guinee J B, Gorree M, Heijungs R, et al. Handbook on life cycle assessment[C]. Operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer, 2002.
- [2] ISO 14040 Environmental management – Life cycle assessment–Principles and framework[S]. Geneva: International Standards for Business, Government and Society, 1997.
- [3] ISO 14041 Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis [S]. Geneva: International Standards for Business, Government and Society, 1998.
- [4] ISO 14042 Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment[S]. Geneva: International Standards for Business, Government and Society, 2000.
- [5] ISO 14043 Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation [S]. Geneva: International Standards for Business, Government and Society, 2000.
- [6] 宋丹娜, 柴立元, 何德文. 生命周期评价模型概述[J]. 工业安全与环保, 2006, 32(12): 38–40.
Song Danna, Chai Liyuan, He Dewen. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2006, 32(12): 38–40.
- [7] 王新柯, 姚建波, 张文, 等. 基于生命周期理论的墙体材料多目标评价[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(6): 742–751.

- Wang Xinke, Yao Jianbo, Zhang Wen, *et al.* *Journal of Building Materials*, 2009, 12(6): 742-751.
- [8] Smith A. An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations [M]. Oxford: Clarendon Press, 1976.
- [9] Satty T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: Mcgraw-Hill, 1980.
- [10] 魏治文, 方坤河, 张凡. 基于生命周期评价的两种水泥环境协调性比较[J]. 水泥工程, 2007(1): 84-86.
Wei Zhiwen, Fang Kunhe, Zhang Fan. *Cement Engineering*, 2007(1): 84-86.
- [11] Yu D W, Tan H, Ruan Y. A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emission[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(10): 2638-2646.
- [12] 比尔·劳森. 建筑材料、能源与环境: 朝向生态可持续发展[M]. 张明顺, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
Lawson B. Building materials, energy and environment: Towards the sustainable development [M]. Zhang Mingshun, tran. Beijing: Environment Science Press of China, 2000.
- [13] US Green Build Council. LEED reference guide for green building design and Construction [M]. Washington, DC: US Green Build Council, 2009.
- [14] Poon C S, Yu A T W, Ng L H. On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2001, 32: 157-172.
- [15] 龚志起, 张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价[J]. 清华大学学报, 2004, 44(9): 1209-1213.
Gong Zhiqi, Zhang Zhihui. *Journal of Tsinghua University*, 2004, 44(9): 1209-1213.
- [16] Hauschid M, Wenzel H. Environment assessment of products, Volume 2: Scientific background[M]. London: Chapman and Hall, 1998.
- [17] 刘华. 生命周期影响评价概要量化方法的研究[C]. “绿色奥运 清洁发展”主题论坛, June 26, 2007: 178-186.
Liu Hua. Valuation model of life cycle impact assessment profile[C]. Green Olympics & Sustainable Development Forum, June 26, 2007: 178-186.
- [18] Li Z, Subbarayan G. An evaluation of back-propagation neural networks for the optimal design of structural systems: Part I. Training procedures [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2002, 191: 2873-2886.
- [19] Hou X, Hu Y, Li Y, *et al.* Rational structure multi-layer artificial neural network[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2003, 24(1): 35-38.
- [20] 沈万霞, 高峰, 王志宏, 等. 原镁及镁合金生产的环境影响分析[J]. 轻

- 金属, 2011(1): 43-47.
- Shen Wanxia, Gao Feng, Wang Zhihong, *et al.* *Light Metal*, 2011(1): 43-47.
- [21] Gao F, Nie Z R, Wang Z H, *et al.* Characterization and normalization factors of abiotic resource depletion for life cycle impact assessment in China [J]. *Science in China Series E: Technological Science*, 2009, 52(1): 215-222.
- [22] Guinée J B. Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [23] 高峰. 生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
Gao Feng. Life cycle assessment research and the application of magnesium industry in China [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008.
- [24] 张培, 田长生, 黄志甲. 钢铁产品生命周期影响评价方法 [J]. 安徽工业大学学报, 2007, 24(1): 84-88.
Zhang Pei, Tian Changsheng, Huang Zhijia. *Journal of Anhui University of Technology*, 2007, 24(1): 84-88.
- [25] 王智慧, 李强, 蒋建敏, 等. 药芯焊丝生命周期评价[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(11): 1212-1217.
Wang Zhihui, Li Qiang, Jiang Jianmin, *et al.* *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(11): 1212-1217.
- [26] 孙铁英. 材料环境负荷评价的方法研究及软件开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
Sun Tieying. Study on assessment methodology and software for materials environment loads[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [27] 邵新宇, 邓超, 吴军, 等. 产品设计中生命周期评价与生命周期成本的集成与优化[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 155-159.
Shao Xinyu, Deng Chao, Wu Jun, *et al.* *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 155-159.
- [28] Salcedo R, Antipova E, Boer D. Multi-objective optimization of solar Rankine cycles coupled with reverse osmosis desalination considering economic and life cycle environmental concerns [J]. *Desalination*, 2012, 286: 358-371.
- [29] 韦玲. 太阳能替代电能的冷暖供应系统方案研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
Wei Ling. The research of the changes in temperature supply system scheme in solar energy replacing electric energy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [30] Zhou C C, Yin G F, Hu X B. Multi-objective optimization of material selection for sustainable products: Artificial neural networks and genetic algorithm approach[J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 1209-1215.

(责任编辑 朱宇)



SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。