

特约专栏

生态环境材料——材料及其产业 可持续发展的方向

王天民¹, 郝维昌¹, 王莹², 周和敏³

(1. 北京航空航天大学材料物理与化学研究中心, 北京 100091)

(2. Dairy Management Inc. USA 60018)

(3. 中国钢研科技集团公司 先进钢铁流程与材料国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 阐述了生态环境材料的概念与内涵, 发展的动向和取得的主要进展, 指出生态环境材料和传统材料的生态化改造是今后材料及其产业可持续发展的方向。材料是保证循环经济、低碳经济得以发展的物质基础, 而生态设计则是实现材料 and 产品生态化改造和持续发展的指导思想。LCA (Life Cycle Assessment) 是评价材料及其产业可持续发展进程的有力工具。生态环境材料是一种与原有的材料相比较而产生、相比较而发展的新型材料, 其判断和认知往往是相对的、动态的和不断发展的。当普遍地把环境协调性作为所有材料必须具备的属性之一时, 生态环境材料的提法也就失去了其单独存在的意义: 材料即为生态环境材料, 这正是材料所追求的长远目标。

关键词: 生态环境材料; 生态设计; 循环经济; 低碳经济; 生命周期评价

中图分类号: TB39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)08-0008-09

Eco-materials—Sustainable Development Trend of Materials and Materials Industries

WANG Tianmin¹, HAO Weichang¹, WANG Ying², ZHOU Hemin³

(1. Center of Material Physics and Chemistry, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100091, China)

(2. Dairy Management Inc. USA, 60018)

(3. State Key Laboratory of Advanced Steel Processing and Products, China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

Abstract: The definition, connotation, development trend, and main progress of eco-materials are introduced. Adding environmental component to conventional materials and continuous innovation of eco-materials will be the major sustainable research and development trends for materials industries and their key stakeholders. Eco-materials are the substantial foundation of circular economy and low-carbon economy. Eco-design is the guiding philosophy for sustainable materials development and innovation. Life Cycle Assessment is a powerful tool to measure the progress of sustainability of materials and their industries. The nomenclature of eco-materials has been continuously evolving; and it is always categorized to type of materials relevant to conventional ones. Once the eco-friendly character becomes a basic feature for materials, there will be no need to highlight the specific type of eco-materials. Materials will be the eco-materials that possess the eco-friendly feature; and that's exactly the long-term goal of materials research and development.

Key words: eco-material; eco-design; circular economy; low-carbon economy; life cycle assessment

1 前言

全球性生态环境的迅速恶化和资源面临枯竭的问题, 是 21 世纪人类生存和发展所面临的重大危机, 已成为国际社会普遍关注的焦点之一^[1-2]。继 1992 年里

约峰会联合国制定《21 世纪议程》^[1]以来, 持续发展的思想和具体行动计划已在全世界被普及和实施, 努力实现社会和经济可持续发展已成为世界各国共同追求的目标。发展是人类永恒的主题, 而如何解决发展进程中的资源与环境问题, 是人类生存的前提。

全球气候变化一直深受世人的广泛关注。在可预见的将来, 温室气体水平继续增高将会导致全球气候进一步变暖, 给人类生活与生存带来多方面的负面影响。据科学预测, 与工业化前相比, 如果地球平均气温增加量

收稿日期: 2011-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(50732004, 51072012)

通信作者: 王天民, 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师

超过“2℃”，地球上将会发生人类难以承受的气候变动，从而使社会和生态系统遭到毁灭性的破坏^[3]。因此，作为全球长期的气候目标，《哥本哈根协议》进一步确认了把全球气温的升幅控制在2℃以内。自从工业革命以来，随着全球工业化进程的推进，人类活动排放的各种温室气体的浓度不断增加。例如，二氧化碳浓度现已达到 368×10^{-6} ，是地球42万年历史以来的最大值^[4]。据预测，目前全球的温室气体排放约为470亿t的二氧化碳当量，如果不采取任何行动，到2020年这个数字将达550亿t以上^[5]。面对二氧化碳不断在大气层中聚集的现实，面对各种温室气体愈排愈多与全球气候变暖不断加剧的现状，国际社会给予了越来越多的关注^[6]。

人类开始反省自己，检讨自己的所作所为。作为对策，就是发展低碳经济，倡导节能减排，调节能源结构，开发清洁能源和可再生能源，进而对整个国民经济体系进行革新等。这是人类和社会经济持续发展的必然选择和重要举措^[7]。另一个方面，提高全社会资源和环境效率，建立循环型经济，涉及到一系列产品的升级改造和工业结构的调整，其中材料产业的环境协调化或者生态化技术进步则是重要的物质基础^[8]。无论何种形式和功能的物质产品，其所用材料的环境属性和特征，即从原料提取、生产、使用、废弃、回收到再生循环过程的资源效率和对环境的影响，决定了所有物质产品以及社会物质经济的整体环境效益。为此，改变以往资源—材料—产品—使用—废弃为主的线性物质流动模式，建立以循环回收和再生利用为主的循环型物质流动模式（如图1所示）便成为今后材料、产品及其产业的发展方向。

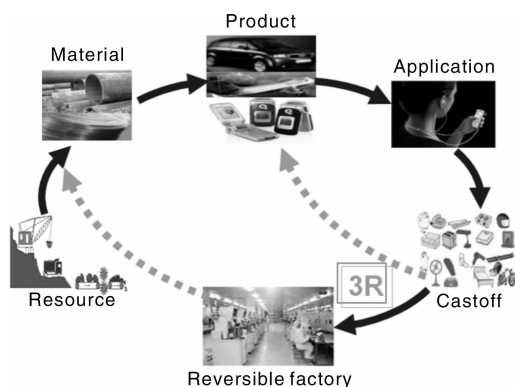


图1 资源、材料流动模式的转变

Fig. 1 Transformation for resources and materials flow

1.1 生态环境材料概念及其发展

日本东京大学的山本良一教授认为，生态环境材料应是将先进性、环境协调性和舒适性融为一体的新型材

料。其特征首先是节约资源和能源；其次是减少环境污染，避免温室效应与臭氧层破坏；第三是容易回收和循环再生利用^[9-10]。在此基础上，经过我国众多学者长时间的讨论，达成如下共识^[11-13]：“生态环境材料应是同时具有满意的使用性能和优良的环境协调性或者能够改善环境的材料。所谓环境协调性是指资源和能源消耗少，环境污染小和循环再生利用率高”。这里既包括按生态环境材料的基本思想和设计原则开发的新材料，也包括对传统材料的生态化改造，即在材料生命周期评价^[14]（Life Cycle Assessment, LCA，国内比较普遍的另一称谓是环境协调性评价）的基础上，通过对材料制造工艺的不断调整和改造，逐渐实现传统材料的生态环境材料化。但必须强调指出：生态环境材料是与原有的材料相比较而产生、相比较而发展的新型材料，其判断和认知往往是相对的、动态的和不断发展的^[15]。它是人类充分考虑材料在其整个生命周期中对生态环境影响的基础上，在生态设计思想和原则的指导下，采用革新的低环境负荷工艺（或者说绿色制造工艺）开发出来的新一代材料。它是各种高新技术在材料制备过程中科学、有效和经济、巧妙利用的产物。因此，生态环境材料符合人与自然和谐发展的基本要求，是人与自然协调发展的理性选择，也是材料产业可持续发展的必由之路。它不仅是从源头治理或减轻环境污染的实体材料，而且应当是新时代材料研制与生产的发展方向^[16]。在这里必须强调指出，LCA始终是评价材料及其产业可持续发展进程的有力工具。

近年来很多学者把LCA方法与材料（产品）的设计结合在一起，可以为材料选用，绿色产品的开发等提供科学依据，拓宽了LCA的应用范围^[17]。例如，钢铁材料是机械工业的主要原料，用于拖拉机曲轴生产的主要有3种原料：优质碳素钢、铸钢、球墨铸铁。3种材料都可以满足曲轴的性能要求，但是由于碳素钢、铸钢、球墨铸铁的生产工艺差别很大，因此这3种材料的环境负荷必然存在差异。为了实现产品的环境友好设计，使曲轴生产尽量减少对环境的危害，有必要对这种差异进行研究，以便更好地选用材料。表1是3种材料各生产1000kg毛坯环境负荷的LCA编目表。由LCA研究可以看到，如果用优质45#钢，由于铁矿石资源消耗量大，工艺复杂，其环境负荷明显比球墨铸铁和铸钢要高。环境负荷按由高到低排序为45#钢、球墨铸铁、铸钢，同时考虑材料的综合性能，尽管球墨铸铁的环境负荷稍高，但其耐磨性能、减震性能较好，这样可以延长机械的使用寿命（同时也降低了寿命周期中的环境负荷），因此在曲轴生产中建议选用铸钢和球墨铸铁^[18-19]。

表 1 3 种材料的环境负荷比较编目表
Table 1 Inventory table of environment load

Materials	Resource consumption/kg					Emissions/kg				
	Iron ore	Ferroalloy	Limestone	Scrap steel	Energy/ $\times 10^{10}$ J	CO ₂	SO _x	NO _x	Waste water	Solid castoff
45 [#] steel	2 400	17	18.5	129	4.78	12 129.77	75.014	0.008	70 218.88	14 723.93
ZG310-570	380	8	20	1 425	1.03	3 479.86	23.27	0.641	13 375.09	2 656.75
QT600-3A	1 235	22	60	877	2.34	3 592.48	17.238	0.608	20 865.88	7 924.94

资源和能源瓶颈要求资源和材料应用的高效率^[11], 废弃物的大量增加对再生循环技术的要求日趋紧迫, 环境净化与修复等新型环境功能材料是治理环境污染的保障, 用环保材料替代含有害物质的材料已是我们急需解决的技术课题。这些环境友好的新一代关键材料技术开发与相应的新型产业的建设与发展, 是建立循环经济、构筑和谐社会的物质基础。因此, 生态环境材料的研究开发及其产业化已经成为国家目标和社会发展的迫切需求, 而且随着绿色贸易壁垒的形成, 已成为材料高技术发展和应用的重要方向。

1.2 生态设计思想是基础^[20]

所谓生态设计是指材料和产品的设计中力求贯彻生态学的思想, 即从产品设计开发阶段就要求综合考虑与材料和产品相关的生态环境问题, 设计出对环境友好的, 又能满足人类需求的一种新的材料和产品。其理论基础是产业生态学中的工业代谢理论与生命周期评价。1997 年 4 月, 联合国环境规划署工业与环境中心出版的《生态设计——一种有希望的可持续生产与消费思路》一书为生态设计提供了指导准则、大量实例及实际的步骤计划。这本“生态设计”手册无疑会加快世界生态设计的进程, 使生态设计得到日益广泛的重视和研究。需要强调的是, 通过生态设计和技术革新使产品的资源与环境效率得到显著提高是生态设计的目的和本质所在。

从长远看, 为了避免现在地球所面临的危机, 无论是发达国家还是发展中国家, 都必须向非物质经济(或者服务型经济)转变。在这种转变中, 企业起着关键的作用。企业必须实施环境经营战略, 以生态设计思想为指导, 积极贯彻国际 ISO9001 和 ISO14001 质量和管理标准, 实现观念和生产模式的根本转变。显然, 只有以产业为主体, 产、学、研紧密结合, 政府、民间和企业形成有机、良性的互动机制时, 这种转变才能够真正得以实现。政府与社会通过强化有关法制, 实施财税制的生态改革, 鼓励绿色采购和绿色供应等措施, 并对那些竭尽全力实行环境技术革新与环境效率经营的企业给予全面的支持。

1.3 生态环境材料是低碳经济的必然要求

低碳经济到底具有什么涵义呢? 低碳经济是以低能

耗、低污染、低排放为基础的经济模式, 是人类社会继农业文明、工业文明之后的又一次重大进步^[7]。低碳经济的内涵很广, 涉及到社会政治经济层面的各个领域。低碳经济包括 3 个方面, 一个是提高能源效率, 一个是采用低碳能源或者是零碳能源, 还有一个是去碳技术, 这样才能保证减少二氧化碳的排放。其实质是能源高效利用、清洁能源开发、追求绿色 GDP 的问题, 是遏制地球生态环境恶化和全球气候变暖趋势, 建造人类与自然和谐共存的发展模式。其核心是能源技术和减排技术创新, 能源结构与产业结构创新以及人类生存发展观念的根本性转变, 是落实科学发展观, 实现社会经济可持续发展的重大举措, 并由此可以导致经济及其管理体制上的重大革新和社会进步。总之, 为适应发展低碳经济的发展, 材料研发与材料产业首当其冲的是两大材料领域^[6]: 一是新能源材料的研发与产业化, 包括直接用于产生能源或转化的材料以及为实现转化与输送的其他相关配套材料, 还有除天然碳汇之外能够实现 CO₂ 捕获或固化的技术所必需的新材料等; 二是生态环境材料的研发与产业化, 而其中的生态建筑材料则成了低碳经济热潮中比较引人注目的材料门类。这是由于建筑材料量大面广, 在生产与使用过程中都要耗费大量的能源与资源, 是贯彻低碳经济方针时必须重点抓的材料领域之一。

1.4 活跃的国际学术交流

在全球资源和环境问题所面临的大形势下, 1990 年代初生态环境材料(Ecomaterials)应运而生, 随之由日本、中国以及欧、美有关国家的学者发起, 并且逐渐形成了如下 3 个新的系列国际会议, 即: Ecomaterial(1993 年开始每隔一年举行一次)、EcoBalance(1994 年开始每隔一年举行一次)、Ecodesign(1999 年开始, 每年举行一次)国际学术研讨会, 并在 IUMRS 及其他有关的国际或地区性学术会议上也都新增加了与“Eco”相关的新内容和分会场。从此首先在材料领域出现了一组使用频度很高(在以往的英文词典中没有)的新的英文单词, 如: Ecomaterial, Ecoproduct, EcoBalance, Ecodesign, Eco-labeling, Ecomanagement, 以及象 Eco-town, Eco-industry, Eco-agriculture 等等这样一些涉及更广领域的词汇。

顺便述及,这里的词冠 Eco 是由 Environment Conscious (有环境意识的),或者 Ecological(生态学的),Economic(经济的)的词首复合而来的,其含意即具有环境意识的或者生态学的,也考虑到经济性和成本的意思。此外,以生态环境材料为基础的展示节能与环境效益的各种生态产品展览会(具体名称有所不同),近十多年来在世界各地也十分风行。各种类型的学术研讨会与推广应用的展览会密切结合,也是生态环境材料与能源材料领域的一个明显的特征。

2 材料和产品的生态化是当今产业发展的大趋势

欧、美、日等发达国家对资源与环境问题相当重视,对生态环境材料、生态产品及相关领域的研究与开发投入了大量的人力物力。许多国家通过立法和税收政策的调整促进提高资源与环境效率,推动本国生态环境材料和生态产品产业的发展。金融界在贷款等问题上也关注资源的效率和产业的环境问题。

2.1 以生态设计为指导改革产业发展模式

对于环境恶化、资源匮乏的关注,使得一些学者和产业界开始考虑改变资源流通模式。从传统资源-消费-垃圾场的线性流通模式,向资源-消费-再生利用的环形流通模式转变^[21]。也就是说,在当前资源库已经由传统意义上的一个资源库变成了2个资源库——即“天然资源库”和各种废弃物构成的“再生资源库”,而且前者在不断地减少或贫化,后者正在迅速地增长和扩大。当今人类社会所面临的挑战,就是如何将天然资源库与再生资源库通过产业有机地组合起来,形成和建立作为循环经济物质基础的新型循环产业^[19]。一些有关可持续发展和实施的概念与方法,例如生态设计、生态环境材料、生态产品、循环产业和循环经济以及工业生态学等等,其基本目标就是要在可持续发展的大前提下,寻求一个对社会、经济、生态环境都有利的生产发展模式。材料与产品的设计、企业的运营、行业的发展以及社会服务,都要尽可能地采用生态设计的原则与方法,也就是在整个生命周期里力求做到与生态环境的和谐共存。其中3R原则^[17](Reduce, Reuse, Recycle)是生态设计(或环境协调性设计)的核心和基本指导思想。产业发展侧重点必然向着附加值再生的方向和3R战略发展,它是经济发展的新动力和方向。

2.2 高新技术是发展循环型产业和低碳经济的基础

围绕着“人与自然的和谐共处与发展循环经济”这个大目标,从1999年开始,日本率先在他们国内每年举办一届 Ecoproduct 展览会^[22]。由于 Ecoproduct 展览会

对生态环境材料和生态产品强烈的示范、推动和宣传鼓动作用,其规模 and 影响也越来越大,并且有逐渐发展到地区(几个国家联合)和国际展览会的趋势。近年来,在欧^[23]、美^[24]以及亚洲的韩国^[25]、马来西亚^[26]、泰国^[27]等国以及我国也都已经举办或准备举办类似的生态产品展览会或者博览会。这些展会的共同特色都是全方位地展示一些改变现今人类生产和生活方式的令人激动的先进技术。例如防止地球温室效应的能源保障技术,尤其是在不破坏环境的前提下获取能源的未来循环型社会的能源模式;清洁生产和零排放,资源的高效利用新技术;可降解或可再生循环技术、无污染的材料、有害物质和稀有元素的替代技术;采用降低环境负荷的新型环境技术;3R技术;生物资源材料的高新技术利用;保护自然与再生技术;环境保护、污染治理技术;饮料与水资源的安全等。这些博览会或展览会也起到了沟通企业与消费者的关系,进一步宣传、促进和开发生态环境材料、生态产品的消费市场,提高社会民众资源环境意识的作用。

低碳经济和循环型产业是建立在产品生态设计、节约能源、资源和废弃物有效的回收、再生利用基础上的。日本在推行清洁生产、综合利用资源、建设生态工业园区、开展再生资源回收利用、发展循环产业和促进绿色消费等方面下了很大的决心^[28]。因而,积极推行生态设计、实行企业环境经营和逐步向循环型产业的转变便成为今天日本产业发展的重要趋势。

2.3 企业发挥主体作用

欧、美、日等发达国家和地区在材料环境负荷的定量评价,材料的再生利用及再资源化,材料中有毒有害元素的消除及替代等方面的研究开发一直起着引领世界潮流的作用。一些国际知名的大企业如 IBM、西门子、三菱、佳能、东芝、日立、索尼等^[16],都从产品和技术开发的角度关注生态效率和资源环境效率,力求其开发的新产品兼具良好的经济效益和环境效益,以保持在未来市场中的竞争力。总之,废弃物的循环再生(再资源化)和环境友好材料的研究开发及其产业化,已经成为当前和今后国际材料产业领域的大趋势。

据统计,2004年绿色技术产品的全球销售额已超过6000亿美元,整个绿色消费的市场总量则更为广阔,随着 ISO14000 环境认证系统和环境标识制度的应用和普及,企业在生产时追求整个原材料供应-生产制造-产品销售链的绿色化。因此,作为社会经济物质基础的材料产业的可持续发展问题受到了更为广泛的重视,各国都在不断地加大生态环境材料及其相关领域的研究与开发的力度,从政策、资金等方面都给予了更大的支

持。环境产业已经成为许多国家新的经济增长点和 21 世纪世界性的主导产业之一^[29]。

2.4 立法与市场机制密切配合

1996 年 10 月德国《循环经济法》正式生效^[30-31]。该法明确规定,生产中必须首先避免产生废弃物,否则必须对材料和能源充分利用,只有在两者都难以实现的情况下才可以对废物进行环境能够承受的清除。此举要求工商业者“从摇篮到坟墓”照管其产(商)品,这意味着研制新产品时要考虑废物的回收利用,从而扩大了生产者的责任范围。

2003 年 2 月,欧盟议会及理事会通过两项被称为“双绿指令”的新环保指令^[32]:《关于报废电子电气设备指令》(WEEE)和《关于在电气电子设备中禁止使用某些有害物质指令》(ROHS)。前者要求,2005 年 8 月 13 日以后,欧盟市场上流通的电气电子设备的生产商(包括其进口商和经销商)必须在法律意义上承担支付自己报废产品回收费用的责任。后者要求,2006 年 7 月 1 日以后投放欧盟市场的电气和电子产品不得含有铅、汞、镉、六价铬、多溴联苯和多溴联苯醚等 6 种有害物质。显然,“双绿指令”不仅仅影响电子电器行业,也对其相关的整个产业链,特别对作为其上游的材料及其产业的绿色化或环境友好进程带来极大的推动作用。

美国政府为了阻止环境被进一步破坏,设置了一项特殊的税——绿色税(Green Fees),仅此一项,各州每年收缴 100~150 亿美金的税金,主要用于教育事业和环境保护。日本在 2001 年通过了家电回收法、食品回收法、包装材料回收法、绿色采购法等多项与资源和环境相关的法律。2006 年初日本经济产业省和环境省又提出了强化日本家电再利用对象的方针,在原来以冷藏冷冻箱、阴极射线管电视机、洗衣机、房间空调器等 4 种大家电为处理对象的基础上,将电视类拓展到液晶、等离子薄型电视机,并将微波炉、吸尘器、洗衣干衣机等纳入了处理对象。同时,把产品在废弃时由消费者承担的再资源化费用,改为在购买产品时预先支付。日本产业结构审议会(经产相的咨询机构)和中央环境审议会(环境相的咨询机构)开始对日本《家电再商品化法》进行讨论修订,赋予生产者有偿回收及再资源化旧家电产品的权力,并要求生产者开发易于再生利用的商品。这些法律的颁布实施,对生态环境材料的开发应用与普及推广起到了非常积极的作用。日本在废弃物的回收体系、绿色采购以及在大力推行生态设计、贯彻企业环境经营、实施循环产业等方面十分活跃而务实。公民普遍高涨的资源环境意识,以及产、学、研紧密结合的活跃的研究开发活动在国际上也属罕见,而且得到了政府与

民间社团在经费方面广泛而积极的支持和鼓励^[33]。

2.5 良性互动的产、学、研结合模式

日本企业普遍设立了环境技术与管理部门,主要致力于企业的环境经营和管理^[34]。自发成立了众多地区或跨地区的产、学、研相结合的生态设计与环境效率研究会,开展系统的学习与深入的研讨,且都由国内研讨为主逐步发展到国际、国内研讨紧密结合,活动十分频繁而有序。许多知名大学也都相继设立了国际产学研共同研究中心,大力吸引日本国内外学者尤其是产业界资深工程技术人员担任或兼任教授、研究员,并把循环产业和循环经济作为其主要的研究课题,特别提倡和鼓励跨学科跨领域的合作研究和团队模式。

近十多年以来,日本一直在逐步调整其治国方针,即由他们多年来遵循的“经济/技术立国”方针向“环境立国”的国策转变^[34-35]。在积极推进构筑低碳经济、循环型社会的基础上,力求创造出更多环境与经济 2 个方面都得到均衡发展的新型环境产业。甚至在国会和内阁会议上诸如 Eco-Japan(生态日本或者绿色日本)这样一些时尚词汇也频频出现。这一动向应该引起我们的深思与关注。

3 我国环境材料及其产业的发展情况

我国已将可持续发展作为国家的发展战略目标,政府十分重视和支持生态环境材料的研究与应用开发工作。国家“973”重大基础研究、国家科技支撑计划、“863”计划、国家自然科学基金、国家发展改革委员会新材料高技术产业化专项以及相关部委和地方政府的科技计划等,都将生态环境材料作为重要资助方向给予了大力支持^[36]。在各类基金的长期支持下,近 15 年以来,我国在生态环境材料及材料的环境协调性评价的研究方面取得了重要进展。

3.1 基础研究取得明显进展

3.1.1 材料的环境协调性评价

在材料的环境协调性评价及其方法论的研究方面,比较系统地开展了钢铁、铝、水泥、建筑材料、塑料、陶瓷、涂料等典型材料的环境负荷评价研究,探索了符合我国国情的材料环境负荷指标表征和计算方法,对典型材料进行了基础数据调研、汇总,初步建立了我国自己的 MLCA 数据库并开发了材料环境协调性评估软件。在材料环境负荷评价的基础理论和方法,相关数学模型的建立和适用的基础数据库方面都取得了进展^[35,37-38]。

3.1.2 环境净化与能源转化材料

我国在新型能源材料方面投入了大量的人力和物力。在光伏材料、光热转化材料、热电材料、锂离子电

池材料、储氢材料等方面均有大量的研究工作。尤其值得一提的是,我国在光解水制氢和环境净化的可见光活性的新型光催化材料研究开发方面取得了很有特色的研究成果。南京大学发展了具有可见光活性的 $\text{In}_{1-x}\text{Ni}_x\text{TaO}_4$ 催化剂并成功地应用于光解水制氢^[39]。在此基础上又成功开发出系列可见光活性的新型光催化材料,在环境净化和分解有害有毒物质方面取得了突破。福州大学与日本和德国的研究小组合作发展了第一个有机 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 可见光催化剂^[40]。中科院化学所研究小组在光催化选择合成方面也开展了大量有创新意义的研究工作^[41-42]。此外,在蓄能光催化复合材料的研究方面也取得了进展,这种材料在夜晚等黑暗条件下仍然具有相当好的环境净化和抗菌、杀菌作用^[43]。

3.1.3 信息材料

到目前为止,传统的微电子器件是通过对元件电流的控制实现其功能的。随着微电子器件工艺的发展,其性能已经接近其物理极限。以控制自旋流为目标的自旋电子学是当前国际前沿的科学问题。自旋电子学通过控制电流和自旋2个自由度,可开发更为高效、节能和具有记忆效应的微电子器件,将会给微电子领域带来突破性的革命^[44]。国内在巨磁阻材料、稀磁半导体、拓扑绝缘体等几个方面都开展了大量研究工作,取得了一些优秀的科研成果。室温稀磁半导体曾被认为是自旋电子学最有希望的材料体系之一,但目前其研究遇到了极大困难。我们小组的结果表明,过渡金属在半导体基质中往往形成不均匀掺杂^[45-47],这种掺杂不均匀性极大地限制了过金属元素的掺杂量及铁磁性能。拓扑绝缘体^[48-49]是一种新的量子物质态,完全不同于传统意义上的“金属”和“绝缘体”。这种物质态的体电子态是有能隙的绝缘体,而其表面则是无能隙的金属态。在拓扑绝缘体中,电子自转方向与电流方向之间存在着确定的关系。不同方向运动的电子像高速公路上相向行驶的汽车一样各行其道,互不干扰,从而使能量耗散很低。拓扑绝缘体的独特性质使其在低能耗电子器件和容错量子计算等领域具有潜在的重要应用价值,有可能对未来的信息技术产生革命性的影响。2009年,中科院物理所与斯坦福大学合作预言了 Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 2种材料都是强拓扑绝缘体^[50]。清华大学研究小组通过分子束外延的方法,生长出了高质量的 Bi_2Se_3 和 Bi_2Te_3 薄膜,并通过角分辨光电子谱实验验证了表面狄拉克谱的存在^[51-53]。他们还观察到了拓扑绝缘体薄膜2个表面上的拓扑态耦合导致的能隙,这对发展新的自旋电子器件具有指导意义。

3.1.4 仿生材料

仿生设计也是材料生态设计的发展方向之一。随着

现代科学技术的发展,对材料的性能要求越来越高,天然生物材料的一些应用领域被后来兴起的材料所替代。但天然生物材料在长期的进化过程中形成了自然界一些最合理的结构形态,这可为科技工作者所借鉴。向自然学习应该是生态设计的核心思想之一。中科院化学所研究小组在仿生材料的研究与开发方面做出一些创新的结果^[54]。2010年,该小组从微纳米层次上揭示了蜘蛛丝集水“多协同效应”机制^[55],并通过实验获得了人造蜘蛛丝,实现了小尺度液滴的方向性驱动。这项研究将启发科学家们设计微流体中的新型的微流控表面,设计大规模的人造纤维网以收集空气、雾气中的水,来供给水源缺乏地区人们的需求;设计智能的催化材料,促进快速而有效的反应;以及设计纤维网状材料,用于工业加工和生产过程中的浮质过滤等领域。

3.1.5 材料与资源的再生循环利用

为了改变人类社会目前面临的窘境,我们必须实现社会生活物质流动形势的由线性模式向循环模式的转变。最大限度地利用好各类资源,使物质在人类的生产活动中不断循环,这样不但可以减少对环境的排放,而且可以满足人类不断增长的物质需求,实现社会的可持续发展。到目前为止,冶金学的研究对象还集中在天然的矿石。下一个研究目标也许应该瞄准废弃物,研究如何从废弃物中提取有用的元素,这将会对冶金学产生深远的影响^[56-57]。

3.1.6 其他材料

在有毒、有害和稀贵元素的替代,天然可再生资源(木质陶瓷农作物秸秆等农业废弃物、竹子、天然石材等)的有效利用等方面的研究开发也都取得了很好的进展^[57]。例如从2006年开始,我国电子电器行业在欧盟“双绿指令”的“压力”和激发之下,企业与有关大学、科研院所相结合,围绕高端绿色与环保材料,在开展电子电器产品急需的替代有毒、有害元素的材料研究开发方面取得了明显进展。比如,在环境友好的封装材料、涂料、阻燃剂及无铅焊料等方面,国内很多企业都已成功地研发出了具有自主知识产权的新品种。此外在可生物降解材料方面、木质陶瓷研究方面也取得了重要的进展,限于篇幅在此不做一一阐述。

3.2 以提升材料产业和应用为目标

自“十五”以来,国家“863”计划中,设立了生态环境材料专题。体现国家需求目标,围绕“西部大开发”发展战略和“科技、人文、绿色”奥运,重点突破固沙植被材料和应用技术,研制适应我国高效农业技术的环境友好、可完全降解地膜材料,在废弃物治理、可再生资源的综合利用及清洁制备新技术方面都取得了有自主

知识产权的新技术。研究和建设材料环境协调性评价技术体系,发展设计方法,研制和开发几类环境协调材料,包括纳米环境材料与技术、生态建筑材料,促进了传统材料产业的环境协调改造升级。在“十五”期间安排的固沙植被用新材料及其低成本制备技术,二氧化碳共聚物的工业化合成及其在医学领域的应用,光催化自洁净玻璃在线制造方法,环境功能型建筑材料,材料环境协调性评价技术及其应用,环境协调材料(无铅焊料、环境友好涂料等)及清洁制备技术(高效清洁催化剂),低成本全降解农用地膜,以及降低废弃物排放及综合利用的新型功能材料与技术方面的 20 多个研究项目,绝大部分都已经取得了一批具有自主知识产权的新技术。

3.3 企业是材料和产品生态化改造的主体

需要特别指出的是,近年来在我国有关环境政策的引导和国家相关重大计划和专项以及各地方政府的支持下,国内许多企业已开始重视并积极进行生态环境材料及生态产品的研究与开发。比如在生态建筑材料、冶金矿渣等各种废弃物再资源化,粉煤灰的综合利用,吸波材料、环境净化材料及产品等方面,一些企业已实现产业化并形成了相当的生产规模。在加入 WTO 后,关于环境经营、绿色生产、绿色采购、绿色标识、材料和产品的环境特性以及生态设计等新概念正在被明智的企业领导人思考或接受。总体而言,尽管我们的企业领导人与发达国家的相比,对于企业环境经营、循环产业等方面的认识在程度上和具体行动上,尤其在经费与人员的投入方面尚有较大差距,但企业是材料和产品的生态化改造、实现循环型产业的主体。企业对于生态环境材料及生态设计其产品的认知、支持和积极主动的实践与实施定将对此领域今后的研究与开发起到极其重要的促进作用。

3.4 加强环境意识教育,培养研究队伍

通过这些年的生态环境材料的研究开发实践,培养了一批有特色的生态环境材料研究力量,也使广大材料科技人员的观念发生了明显变化,资源环境意识普遍得到了提高。在教育方面,国内的许多大学都面向大学生、研究生开设了生态环境材料和生态设计的专门课程。一批生态环境材料的专著在国内出版,对宣传生态环境材料新学科,推动生态环境材料在中国的应用发展及教育等方面起到了积极的作用。由于中国经济持续高速发展和加入 WTO 后经济全球化进程的加速,中国生态环境材料与制品的研究开发,如同中国经济对世界的影响一样,已引起全球的广泛关注,世界许多相关科技活动逐步吸纳中国有关方面的研究力量共同研究、发展全球环境事业。

4 结 语

(1)面向 21 世纪,我们必须认真对待资源、能源和环境问题,寻求材料可持续发展的有效途径。只有政府、企业、消费者在资源与环境等方面通力合作,以及产、学、研密切结合与真诚协作,才能推动生态环境材料研究持续深入的开展。在这里,企业的主动精神,积极进取和必要的经费投入是非常必要的。

(2)推进生态环境材料的研究与开发过程中,加强材料工作者的环境观念,普及全民的环境意识教育是十分重要的。随着全民环境意识的增强和国际上环境标识、绿色采购的逐步强化与推广,生态设计及生态环境材料和生态产品必将得到更为广泛的认同、应用与发展。

(3)我国已经有了自己的战略部署和时间表。但是,目前欧、美、日等工业发达国家关于积极引导和鼓励企业普及生态设计、推行环境战略经营,使之逐步由传统的资源消耗、环境污染型产业,向资源节约和循环利用、清洁生产和零排放为特征的资源循环型产业转变,这个发展趋势和动向我们应该予以密切关注。

(4)生态环境材料是与原有的材料相比较而产生、相比较而发展的新型材料,其判断和认知往往是相对的、动态的和不断发展的。生态环境材料或材料的生态化改造符合人与自然和谐发展的基本要求,是人与自然协调发展的理性选择,也是材料产业可持续发展的必由之路。当普遍地把环境协调性作为所有材料必须具备的属性之一时,生态环境材料的提法也就失去了其单独存在的意义:材料即为生态环境材料,这正是材料所追求的长远目标。

参考文献 References

- [1] The United Nations. *Agenda 21* [EB/OL]. 2008. http://www.un.org/esa/dsd/agenda21/res_agenda21_00.shtml.
- [2] Zhang Kunmin(张坤民). *Introduction to Sustainable Development* (可持续发展论) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [3] Yamamoto R. *Climate Change + 2 Degree* (2℃改变世界) [M]. Translated by Wang Tianmin(王天民译). Beijing: Science Press, 2008.
- [4] Yamamoto R. *Global Change in One Second* (一秒钟的世界) [M]. Translated by Wang Ying(王莹译). Beijing: Science and Technology Press of Beijing Publication Group, 2005.
- [5] Nicholas Stern. *Action and Ambition for a Global Deal in Copenhagen* [EB/OL]. (2009-12-06). <http://www.unep1.org/pdf/climatechange/ActionAndAmbitionForGlobalDealInCopenhagen1.pdf>.
- [6] Wang Tianmin(王天民), Wang Ying(王莹). 低碳经济及

- 其对新材料研究开发的挑战[J]. *Materials China* (中国材料进展), 2010, 29(1): 60–64.
- [7] Zhang Kunmin (张坤民), Pan Jiahua (潘家华), Cui Dapeng (崔大鹏). *Introduction to Low Carbon Economy* (低碳经济论) [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2008.
- [8] Zhou Hongchun (周宏春), Liu Yanhua (刘燕华). *The Circular Economy* (循环经济学) [M]. Beijing: China Development Press, 2005.
- [9] Yamamoto R (山本良一). *Ecomaterials* (环境材料) [M]. Translated by Wang T M. Beijing: Chinese Chemical Industry Press, 1996.
- [10] Wang Tianmin (王天民主编). *Ecomaterials* (生态环境材料) [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
- [11] Wang Tianmin (王天民), Zhou Hemin (周和敏), Hao Weichang (郝维昌). *Progress Report on Materials Science and Technology-Ecomaterials* (《材料科学学科发展报告》专题报告—生态环境材料) [M]. Beijing: Science and Technology Press of China, 2007.
- [12] Wang Tianmin (王天民), Hao Weichang (郝维昌). 生态环境材料—社会可持续发展的物质基础[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* (航空学报), 2002, 23(5): 459–466.
- [13] Wang Tianmin (王天民), Hao Weichang (郝维昌). 生态环境材料的哲学基础[J]. *Materials Review* (材料导报), 2001, 15(10): 6–8.
- [14] ISO. ISO/CD/14040: *Life Cycle Assessment-Principles and Guidelines* [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [15] Wang T M, Hao W C. *Ecomaterials and Its Progress in China* [R]. Tokyo: International Workshop on Ecomaterials, 2002.
- [16] Zou Tieyong (左铁镭), Nie Zouren (聂祚仁). *Introduction for Ecomaterials* (环境材料基础) [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [17] Chedkoop M. Tools for Life Cycle Assessment and Ecodesign [J]. *Trans Mat Res Jpn*, 1994, 18A: 81–84.
- [18] Wang Tianmin (王天民), Hao Weichang (郝维昌). 生态环境材料——社会可持续发展的物质基础[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* (航空学报), 2002, 23(5): 459–466.
- [19] Hao Weichang (郝维昌), Xu Jincheng (徐金城), Wang Tianmin (王天民), et al. *The New Progress on Material Science and Engineering 2000* (2000 中国材料科学与工程新进展(上)) [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 478–482.
- [20] Yamamoto R (山本良一). *Ecodesign* (生态设计) [M]. Translated by Wang Tianmin (王天民). Beijing: Chinese Chemical Industry Press, 2003.
- [21] Hao Weichang (郝维昌), Wang Tianmin (王天民). 资源、环境与材料的可持续发展[J]. *Materials Review* (材料导报), 2006, 20(1): 1–3.
- [22] Japan Environmental Management Association for Industry. *Eco-Products Exhibition in Japan* [EB/OL]. 2011. <http://www.eco-pro.com/> or <http://www.nikkei.co.jp/events/eco/>.
- [23] European Richard Martin Trail. *Green by Design Exhibition for Automobile* [EB/OL]. 2011. <http://www.greenbydesign.info/>.
- [24] Green America. *Green Festival in America* [EB/OL]. 2011. <http://www.greenfestivals.com/>.
- [25] AKEI. *International EcoProducts Exhibition in Korea* [EB/OL]. 2011. <http://a.kei.or.kr/eng/index.jsp>.
- [26] APO and NPC. *Eco-Products International Fair 2004* [EB/OL]. 2004. <http://www.apo-tokyo.org/ecoproducts/>.
- [27] APO and NPC. *Eco-Products International Fair 2005* [EB/OL]. 2005. <http://www.apo-tokyo.org/announce/ecoproducts2005.htm>.
- [28] Japan Environmental Management Association for Industry. *Eco-Efficiency* [EB/OL]. 2001. <http://www.jemai.or.jp/JEMAI-DY-NAMIC/index.cfm>.
- [29] Xu Bo (徐波). *Study on Development Patterns of Environmental Industry in China* (中国环境产业发展模式研究) [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [30] Wan Qiushan (万秋山). 德国的《循环经济法》简析[J]. *Environment Herald* (环境导报), 2005(8): 77–79.
- [31] Ma Rong (马荣). 德国循环经济的发展概况[J]. *China Environmental Protection Industry* (中国环保产业), 2005(5): 43–46.
- [32] European Commission Environment. *Recast of the WEEE Directive* [EB/OL]. 2001. http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm.
- [33] Wang Jin (汪劲). 21 世纪日本环境立法与环境政策的新动向[J]. *Environmental Protection* (环境保护), 2006(12B): 68–71.
- [34] Chen Hong (陈红), Hao Weichang (郝维昌), Wang Tianmin (王天民). 日本生态经济发展现状的启示[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)* (北京航空航天大学(社会科学版)), 2005, 18(1): 1–5.
- [35] Zuo Tieyong (左铁镭). *Material Recycling and Environmental Impact Assessment of Cyclic Society* (循环型社会材料循环与环境影响评价) [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [36] Zou T Y, Wang T M, Nie Z R. Ecomaterials Research in China [J]. *Materials and Design*, 2001, 22: 107–110.
- [37] Hao W C, Wang T M. *General Activity of Life Cycle Assessment in China* [R]. Tsukuba: The AIST Workshop, 2002.
- [38] Gong X Z, Nie Z R, Wang Z H, et al. Research and Development of Chinese LCA Database and LCA Software [J]. *Rare Metals*, 2006, 25, Sp: 101–110.
- [39] Zou Z G, Ye J H, Sayama K, et al. Direct Splitting of Water under Visible Light Irradiation with an Oxide Semiconductor Photocatalyst [J]. *Nature*, 2001, 414: 625–627.
- [40] Wang X C, Maeda K, Thomas A, et al. A Metal-Free Polymeric Photocatalyst for Hydrogen Production from Water under Visible Light [J]. *Nature Materials*, 2009, 8: 76–80.
- [41] Wang Q, Zhang M, Chen C C, et al. Photocatalytic Aerobic

- Oxidation of Alcohols on TiO_2 : The Acceleration Effect of a Bronsted Acid [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2010, 49: 7 976 – 7 979.
- [42] Zhang Miao, Chen Chuncheng, Ma Wanhong, *et al.* Visible-Light-Induced Aerobic Oxidation of Alcohols in a Coupled Photocatalytic System of Dye-Sensitized TiO_2 and TEMPO [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2008, 47: 9 730 – 9 733.
- [43] Zhang J Y, Pan F, Hao W C, *et al.* Light-Storing Photocatalyst [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85: 5 778 – 5 780.
- [44] Zutic I, Fabian J, Sarma S D. Spintronics: Fundamentals and Applications [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76: 323 – 410.
- [45] Hao W C, Li J J, Xu H Z, *et al.* Evidence of Surface-Preferential Co Distribution in ZnO Nanocrystal and Its Effects on the Ferromagnetic Property [J]. *ACS Applied Materials & Interface*, 2010, 2(7): 2 053 – 2 059.
- [46] Li J J, Hao W C, Xu H Z, *et al.* Variation of Structural and Magnetic Properties with Co Doping in $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ Nanocrystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 053 907.
- [47] Ma J, Hao W C, Luo R Y, *et al.* Effect of Crystallization Quality on Ferromagnetism in $\text{Zn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}$ Nanopowders [J]. *Materials Letters*, 2008, 62(3): 403 – 406.
- [48] Brumfiel G. Topological Insulators: Star Material [J]. *Nature*, 2010, 466: 310 – 311.
- [49] Qi X L, Zhang S C, The Quantum Spin Hall Effect and Topological Insulators [J]. *Physics Today*, 2010, 63: 33 – 40.
- [50] Zhang H J, Liu C X, Qi X L, *et al.* Topological Insulators in Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 with a Single Dirac Cone on the Surface [J]. *Nature Physics*, 2009, 5: 438 – 442.
- [51] Li Y Y, Wang G, Zhu X G, *et al.* Intrinsic Topological Insulator Bi_2Te_3 Thin Films on Si and Their Thickness Limit [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22: 4 002 – 4 007.
- [52] Cheng P, Song C L, Zhang T, *et al.*, Landau Quantization of Topological Surface States in Bi_2Se_3 [J]. *Physics Review Letters*, 2010, 105: 076 801.
- [53] Zhang Y, He K, Chang C Z, *et al.*, Crossover of the Three-Dimensional Topological Insulator Bi_2Se_3 to the Two-Dimensional Limit [J]. *Nature Physics*, 2010, 6: 584 – 588.
- [54] Jiang Lei(江 雷), Feng Lin(冯 琳). *Bionic smart nano-structure interface Materials*(仿生智能纳米界面材料) [M]. Beijing: Chinese Chemical Industry Press, 2007.
- [55] Zheng Y M, Bai H, Huang Z B, *et al.* Directional Water Collection on Wetted Spider Silk [J]. *Nature*, 2010, 463: 640 – 643.
- [56] The Materials and Engineering Division of Nature Science Foundation of China. *Inorganic Non-Metallic Material* (学科发展战略研究报告系列: 无机非金属材料科学(分册)(2006 – 2010)) [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [57] Shenzhen GEM High-Tech Co., Ltd. (深圳格林美高新技术股份有限公司). *Resource Exploitation System of Recycling Industry “City Mine”* (循环产业“城市矿山”资源开采体系) [EB/OL]. 2011. <http://www.gemhi-tech.com>.

日本开发出“超离子”固态锂电池

据美国物理学家组织网 8 月 4 日(北京时间)报道,一日本研究小组开发出一种能像电解液一样产生电流的固态电介质,并用其制造出了固态锂电池,其导电性可达到现有液态锂离子电池的水平。研究人员表示,由于固体更紧密坚固,这种高导电性的固态锂电池能在更宽的温度范围下供电,抵抗物理损伤和高温的能力更强。相关研究发表在《自然·材料学》上。

锂离子电池由于能效密度高、再充性能好、使用损耗小等优点,普遍用于消费电子领域和电动汽车。目前高效、高密度的化学电池只能靠液态电介质才能实现,而液态介质比较脆弱,需要给电池附加多重安全防护措施,这就使得大型电池系统既复杂又昂贵。而现有的固体电介质实际电导率很低,只能达到液态电解液的 10% 左右,对温度变化较敏感,工作温度限制在了 50 ~ 80 °C 范围。

研究小组开发的称为锂超离子导体($\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$)的新材料,仍然用锂作离子导体,但给它们涂了一层晶体结构层,天然晶格就成了允许离子通过的小孔,外层结构生成了让离子能够运动的通道。他们对这种固态锂电池进行了测试,发现其在导电性能上达到了现有液态锂离子电池的水平,而且新电池能在 -100 ~ 100 °C 之间的温度范围内工作。

研究人员指出,这种固态电介质电池在制造上易于成型、模压和组装,制造工艺更加简单而廉价,稳定性好不挥发。如果大量生产有望降低消费型电子设备的价格,尤其是在电池就占了近一半成本的电动汽车领域。

(来源:科学时报)