

特约专栏

# 道路建筑材料的生态设计与实践

王宏涛<sup>1,2</sup>, 王志宏<sup>1</sup>, 刘宇<sup>1</sup>, 陈文娟<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124)

(2. 中国质量认证中心, 北京 100070)

**摘要:** 道路建筑材料的生态设计是将材料的环境负荷、使用性能和经济成本综合考虑到材料设计过程之中, 以生命周期评价(LCA, Life Cycle Assessment)思想为指导, 使用生态化改造设计开发与环境相协调的材料。本研究以天然石料沥青混凝土道路面层为参考基准, 通过确定产品设计目标, 需求分析, 实施设计以及评价等步骤进行钢渣沥青混凝土道路面层的生态设计。结果表明: 钢渣沥青混凝土的全生命周期环境负荷比天然石料沥青混凝土约低 14.17%, 使用性能比其高出 31.87%, 建设 1 km 道路所需经济成本比其低 8.37%, 且生态设计综合评价结果也优于天然石料沥青混凝土。因此, 钢渣沥青混凝土在环境负荷、使用性能、经济成本和综合表现上均要优于天然石料沥青混凝土, 即钢渣沥青混凝土路面比天然石料沥青混凝土路面更符合生态设计要求, 为道路建筑材料的绿色设计和选材提供了依据。

**关键词:** 道路建筑材料; 生态设计; 生命周期评价; 沥青混凝土

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)10-0776-07

## Eco-Design and Practice of Road Building Materials

WANG Hongtao<sup>1,2</sup>, WANG Zhihong<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, CHEN Wenjuan<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science & Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. China Quality Certification Center, Beijing 100070, China)

**Abstract:** The Eco-design of road building materials is that the environmental load, performance and economic cost of the material will be considered into the material design process, with the idea of life cycle assessment as a guide, through the ecological reconstruction can make the materials in harmony with the environment. This study conducted an Eco-design of steel slag asphalt concrete road surface through the steps including the determination of product design objectives, needs analysis, design implement and evaluation with the natural stone asphalt concrete as a reference. The results show that the life cycle environment load of the steel slag asphalt concrete is about 14.17% lower than natural stone asphalt concrete and 31.87% higher than their using performance, the economic cost of 1 km road construction is 8.37% lower than the steel slag asphalt concrete required, the Eco-design comprehensive evaluation result is greater than natural stone asphalt concrete, so the steel slag asphalt concrete are better than natural stone asphalt concrete in the environmental load, using performance, economic cost and overall performance, we can get a conclusion that the steel slag asphalt concrete pavement is more in line with the Eco-design requirements than natural stone asphalt concrete pavement, which provide the basis for the green design and selection of road building materials.

**Key words:** road building materials; eco-design; life cycle assessment; asphalt concrete

## 1 前言

道路建筑材料是道路、桥梁等交通基础设施建设的物质基础, 其品质和类型直接决定了道路工程的使用性能、服役寿命和结构形式<sup>[1]</sup>, 它为国民经济、国家工业建设和人民生活水平的提高做出了巨大的贡献, 同时也造成了大量的资源消耗与污染物排放。由于科学技术的发展和节能减排、环保的要求, 以及新型道路建筑材料、新兴路面结构、新规范、新工艺技术、新型施工设备的不断出现, 对

收稿日期: 2015-12-28

基金项目: 北京市青年基金项目(2164056); 北京市基金重点项目(2141001); 国家“863”计划(2013AA031602)

第一作者: 王宏涛, 男, 1986年生, 博士

通信作者: 王志宏, 男, 1959年生, 教授, 博士生导师,

Email: wangzhihong@bjut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.10.03

道路建筑材料提出了越来越高的要求,即材料既要达到节能减排、环保要求,又要避免路面过早出现损坏现象<sup>[2]</sup>。所以对道路建筑材料进行生态设计改造成为材料行业可持续发展的必然趋势,材料的生态设计是将环境因素纳入到材料设计过程之中,在材料生命周期的各个环节考虑其可能产生的环境负荷,通过改进设计将材料全生命周期的环境影响降到最小程度。

生态设计的概念最早是由荷兰公共机关和联合国环境规划署(UNEP)最先提出的,联合国环境规划署工业与环境中心在 1997 年的出版物《生态设计:一种有希望的途径》中,将生态设计描述为一种环境概念,其中“环境”有助于界定产品生态设计决策的方向<sup>[3]</sup>。换言之,产品的环境影响变成在产品的设计开发阶段需要进行仔细考虑的重要组成部分,在这样的生态设计过程中,将环境影响置同于产品利润、功能、形象等设计要素的目的在于减少产品对环境的污染,提高产品的可再生利用率,以减少产品整个生命周期中产生的不利环境影响,开发更生态、更经济、可持续发展的产品系统<sup>[4]</sup>。材料行业的生态设计作为一种新的设计概念,则是以材料的环境特性作为目标,以生命周期评价方法为基础工具,综合考虑产品整个生命周期相关的生态环境问题,设计出对环境友好的、又能满足人的需求的新产品。

随着我国国民经济的快速发展,交通运输业日益繁荣,国内不断大规模兴建高速公路。我国公路路面经历了从低等级的砂石路面、渣油路面到高等级的沥青混凝土路面、水泥混凝土路面,其中沥青混凝土路面作为无缝、连续式路面结构,具有行车舒适、噪声较低、施工期短、养护维修简便、开放交通快、能适应各种行车荷载等优点,在国内外的高速公路建设中得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。从 20 世纪 50 年代以来,世界各国修建的沥青混凝土路面数量增长迅猛,在全世界范围内约 80% 的公路为沥青混凝土路面公路。而沥青混凝土路面在我国的应用也非常广泛,截止 2013 年底全国高速公路通车里程已突破 10 万公里,超过美国跃居世界第一位,在这些路面中大多数采用沥青路面<sup>[6]</sup>。这些传统沥青混凝土道路的建设消耗大量的自然资源,破坏生态环境,为了改善这种现状,需要寻找与生态环境更加协调的道路建筑材料,所以从全生命周期的角度采用生态设计方法,寻找和改进新型道路建设用生态材料势在必行。

## 2 钢渣沥青混凝土道路面层的生态设计

本研究以天然沥青混凝土道路面层为参考基准产品,进行钢渣沥青混凝土道路面层的道路建筑材料产品生态设计的探索。

### 2.1 沥青混凝土道路面层生态设计的需求分析与方案制定

沥青混凝土道路面层生态设计的需求分析与方案制定的具体实施步骤如下:

#### (1) 确定沥青混凝土道路面层的设计产品和目标

目标产品与传统的道路沥青混凝土面层产品相比,原材料更易获得、生产加工方便、产品性能优良、符合使用要求、环境负荷低和外表美观且行车舒适。

#### (2) 沥青混凝土道路面层产品的需求分析

从道路面层建设的原材料获取、加工制造、产品使用、废弃再利用整个全生命周期进行道路产品的环境、性能、经济等需求分析,确定原材料的选取和生产工艺等实施流程。

#### (3) 沥青混凝土道路面层产品设计的实施

钢渣是炼钢过程中为了去除钢中杂质而产生的副产物,大量的钢渣堆积如山,不仅占用了广阔的土地,而且还会对生态环境造成严重的破坏,对于它的管理也耗费了大量的人力和财力,因此对于钢渣的有效处理是一个十分棘手的问题<sup>[7]</sup>。钢渣具有坚硬耐磨、多孔,与沥青粘附性好,且蓄热易施工、成本低等特点,同时钢渣沥青混凝土路面耐水浸,低温延展性好,耐摩擦,是一种潜在的具有优良使用性能的公路建设材料,可在公路建设中充分发挥其优势。加速开展钢渣在沥青混凝土道路建设方面的研究,对于提高道路使用寿命,降低工程建设成本,减少道路建设生命周期中的环境污染,保护生态环境以及促进我国道路建设可持续发展具有极为重要的意义<sup>[8]</sup>。

选取工业废弃物钢渣作为道路沥青混凝土面层材料的主要成分,主要的生态设计要点包括,①原料替代、组份设计:使用钢渣替代天然石灰岩、玄武岩,从而削减资源耗竭、环境扰动和生态破坏;②过程优化设计:改进钢渣生产工艺,采用颚式破碎机与圆锥破碎机组合使用,可有效改善钢渣集料规格稳定性;使用自然陈化与热力激发结合的方式消解钢渣表面 f-CaO,能更经济的实现钢渣集料功能可控性;通过水洗,有效分离、分级、洁化集料,实现钢渣的最大化利用,发挥钢渣的最佳品质,平衡由于复杂工艺带来的环境负荷上升;③面向应用,性能选择设计:选择主要的需求性能参数(耐久性、低温弯拉应变等),使用模糊矩阵方法进行定量化计算,削弱消除人为主观的价值判断。

### 2.2 沥青混凝土道路面层生态设计的实施效果评价

对已经通过设计和生产得到的钢渣沥青混凝土道路面层进行生命周期环境影响评价、使用性能评价及成本核算来评估该设计产品的优劣及生态设计的最终实施效果。生态设计的实施效果可以通过定性和定量两方面进行评价判断,目前仍然缺乏适用于不同材料行业的生态

设计方法,所以在选用生态设计评价模型时,根据材料的自身特点并结合给定的使用条件来对生态设计进行综合评价。为了综合考虑材料设计时的多重因素,在设计层面更好地实现对材料的生态设计,使用模糊矩阵模型进行综合评价<sup>[9]</sup>。生态设计是一个持续改进的过程,对产品生态设计的过程须不断进行评价,及时发现问题,并不断予以改进,循环往复,以便为设计决策提供依据<sup>[4]</sup>。为了评估钢渣沥青混凝土道路面层产品的生态设计实施效果,下面主要介绍该产品的后续评价以验证是否符合产品的生态设计目标。

### 2.2.1 沥青混凝土道路面层的环境影响评价

在本生态设计案例中,功能单位确定为建设长度1 km的沥青混凝土道路面层,其结构为4 cm AC-13上面层+6 cm AC-20中面层+8 cm AC-25下面层,宽度为3.75 m的单车道。研究的系统边界定义为沥青混凝土的原料开采、运输、能源生产、制造加工、混合料拌和,直至沥青混凝土摊铺和碾压为止,不包括后期的道路维护、大修等阶段。按照生命周期评价方法(LCA)计算得到两种沥青

混凝土的环境影响归一化结果如表1所示,其主要包括不可再生资源消耗(ADP)、温室效应(GWP)、酸化效应(AP)、光化学烟雾(POCP)和人体健康损害(HT)5类环境影响,根据模糊矩阵和层次分析法所确定的ADP、GWP、AP、POCP、HT 5种环境影响类型的权重系数分别为0.052, 0.444, 0.262, 0.153, 0.089。经过加权计算以后得到天然石料沥青混凝土(参考基准产品)生命周期环境负荷为2.77E-09,钢渣沥青混凝土生命周期环境负荷为2.38E-09,如图1所示。

表1 天然石料沥青混凝土路面和钢渣沥青混凝土路面环境影响归一化结果

Table 1 Normalized environmental load results of natural stone asphalt concrete and slag asphalt concrete

Category	ADP	GWP	AP	POCP	HT
Natural stone asphalt concrete	2.26E-09	3.12E-09	3.00E-09	1.96E-09	2.08E-09
Slag asphalt concrete	1.93E-09	2.44E-09	2.71E-09	2.09E-09	1.88E-09

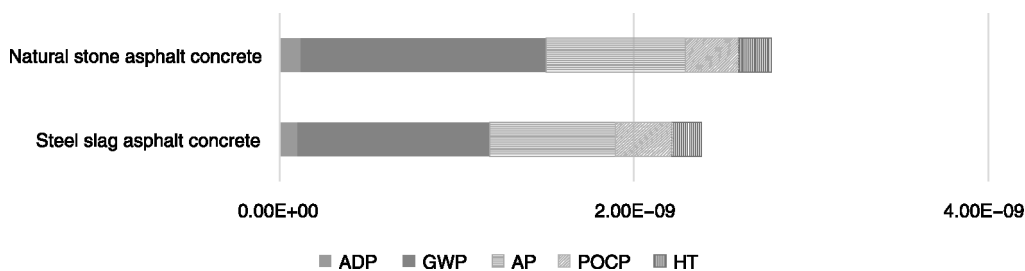


图1 两种沥青混凝土生命周期环境负荷对比

Fig. 1 Life cycle environmental load comparison of two asphalt concrete

从图1中可以看出,在几种环境影响类型中,占比例最大的环境影响类型是GWP,其次是AP、POCP和HT,环境影响较小的是ADP。在这几种环境影响类型中,钢渣沥青混凝土除过POCP比天然石料沥青混凝土约高6.63%,其他环境影响负荷值均要小于天然石料沥青混凝土,其中GWP比天然石料沥青混凝土约低21.79%,ADP比天然石料沥青混凝土约低14.6%,AP比天然石料沥青混凝土约低9.67%,HT比天然石料沥青混凝土约低9.62%,造成这种结果的主要原因是由于传统的石料沥青混凝土建设模式大量开山采石,对自然环境造成了掠夺式的破坏,并且在制造加工、混合料拌和等阶段也消耗了更多的不可再生资源 and 能源,给生态环境带来了巨大压力。总体来看,在道路建设过程中,钢渣沥青混凝土的生命周期环境负荷要明显低于天然石料沥青混凝土,约比天然石料沥青混凝土低14.17%。

### 2.2.2 沥青混凝土道路面层的使用性能评价

在沥青混凝土道路面层的建设过程中,需要考虑其

能够应对严寒酷暑等极端气候条件,不同地区的土壤、地质状况以及不同吨位的车辆行驶,所以沥青混凝土道路面层的综合性能优劣取决于动稳定度、残留稳定度、弯拉应变、冻融劈裂强度比等多项性能指标,这些性能指标从不同方面体现了沥青混凝土材料对道路应用的满足程度,故在此采用基于模糊矩阵的综合评价法对两种沥青混凝土路面材料的综合性能进行评估。模糊综合评价法运用模糊变换原理对某一对象进行全面评价,优势在于可以解决传统综合评价方法难以解决的“模糊性”评价与决策问题<sup>[10]</sup>,是一种有效的决策辅助方法。该方法通过将评价对象中各个单因素模糊化,确定各个单因素相对于参考因素的重要程度,使得各项评价因素可以在同一基准下进行“合一运算”,最终得到以单一指标值形式表征的综合性能评价结果<sup>[11,12]</sup>。

在对沥青混凝土道路材料性能进行综合评价时,根据道路施工规范<sup>[13]</sup>,确定了道路建设、使用的不同需求以及它们在生态设计中的相对重要程度。在沥青混凝土

道路建设中，为了应对不同气候、不同地质、不同车辆行驶的情况，建设的路面需要具有良好的抗高温车辙、抗水损害、抗低温开裂、抗滑、体积稳定等要求，而这些路面建设要求又与沥青混凝土自身的动稳定度、残留稳定度、弯拉应变等属性直接相关<sup>[14]</sup>，所以通过建立性能-需求矩阵可以量化沥青混凝土的各项性能测试指标对各项道路建设需求的满足程度，在此基础上通过性能-需

求矩阵表示二者的关联程度，如表 2 所示。通过计算最终确定了各项性能指标对总体道路建设应用需求的重要程度（性能权重），分别为（摆式摩擦系数，浸水膨胀率，动稳定度，残留稳定度，低温弯拉应变，冻融劈裂强度比，四点弯曲疲劳寿命）=（0.15，0.1，0.2，0.1，0.1，0.1，0.25）。

表 2 沥青混凝土需求与材料性能的对应权重

Table 2 The weight between requirement and material performance for asphalt concrete

Requirements	Weight	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%

经过多次反复试验，得到两种沥青混凝土在道路应用中主要性能指标的测试结果，见表 3。在两种沥青混凝土的性能对比时，选取多次测试结果的平均值作为沥

青混凝土某项性能指标，选取两种沥青混凝土测试结果的最优值作为参照性能指标值。

表 3 两类沥青混凝土的性能测试结果

Table 3 Performance test results of two asphalt concrete

Performance index	Steel slag asphalt concrete	Stone asphalt concrete	Reference value
Dynamic stability (times per mm)	3800 ~ 4500	1800 ~ 2300	4500
Residual stability( % )	91.6 ~ 94.8	86.6 ~ 90.2	94.8
Freeze thaw splitting strength ratio( % )	88.6 ~ 90.2	80.3 ~ 83.6	90.2
Flexural-tensile strain( $\mu\epsilon$ )	2800 ~ 3000	2500 ~ 2600	3000
Four-point bending fatigue life( times )	40000 ~ 45000	29000 ~ 32000	45000
Pendulum type friction coefficient( BPN )	68 ~ 73	58 ~ 62	73
Water immersion expansion ratio( % )	0.1 ~ 0.2	0.01 ~ 0.1	0.01

根据建立的性能综合评估方法，对两种沥青混凝土的各项性能指标进行模糊化，得到各项性能指标值对参照值的相对大小，结果见表 4 和图 2，（在计算过程中，由于浸水膨胀率指标越小越好，故在前面计算的基础上取倒数得到最终的模糊化结果）结果显示除浸水膨胀率指标外，钢渣沥青混凝土的各项指标均优于天然集料沥青混凝土。

从图 2 中可以看出，在对两种沥青混凝土进行性能测试的模糊化结果分析中，除过钢渣沥青混凝土的浸水膨胀率比天然石料沥青混凝土差，其它性能要优于后者，

表 4 两类沥青混凝土性能指标的“模糊化”结果

Table 4 Performance test fuzzy result of two asphalt concrete

Performance index	Steel slag asphalt concrete	Stone asphalt concrete
Dynamic stability	1	0.5
Residual stability	1	0.95
Freeze thaw splitting strength ratio	1	0.92
Flexural-tensile strain	1	0.88
Four-point bending fatigue life	1	0.72
Pendulum type friction coefficient	1	0.85
Water immersion expansion ratio	0.36	1



其中,动稳定度比天然石料沥青混凝土高出 1 倍,残留稳定度比天然石料沥青混凝土高出约 5.26%,冻融劈裂强度比比天然石料沥青混凝土高出约 8.69%,低温弯拉应变比天然石料沥青混凝土高出约 13.64%,四点弯曲疲劳寿命比天然石料沥青混凝土高出约 38.89%,摆式摩擦系数比天然石料沥青混凝土高出约 17.65%,不仅符合道路建设的性能需求,并且较于原有的天然石料沥青混凝土建设模式提高了沥青混凝土的使用寿命,根据建立的性能-需求矩阵可以定量分析出两种沥青混凝土的性能结果值。

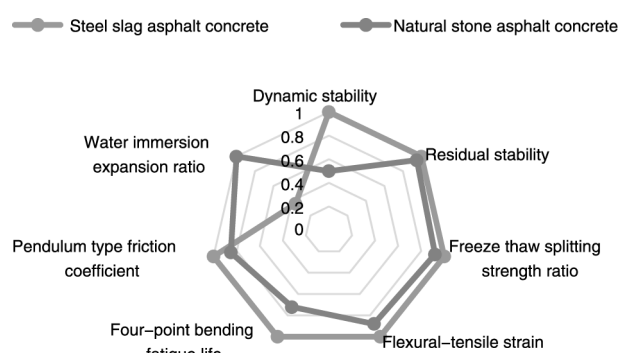


图 2 两种沥青混凝土性能数据模糊化结果的对比

Fig. 2 Performance test fuzzy result comparison of two asphalt concrete

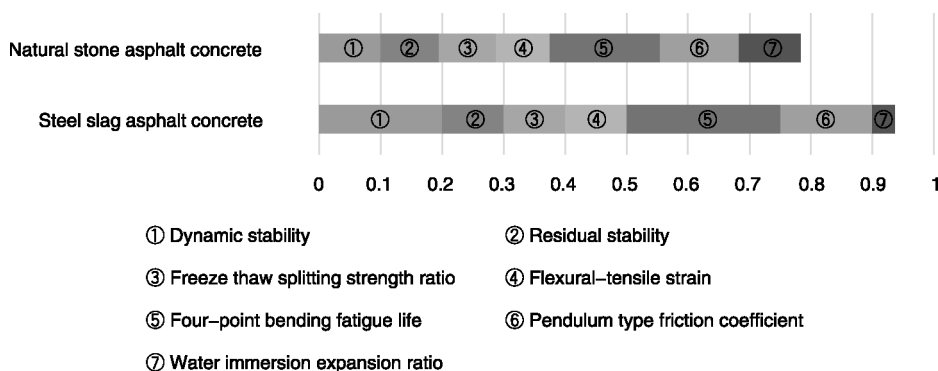


图 3 两种沥青混凝土的综合性能指标值对比

Fig. 3 Comprehensive performance value comparison of two asphalt concrete

将各项性能指标的模糊化结果结合表 2 中所确定的各项性能指标权重进行加权求和,得到两种沥青混凝土的综合性能指标值分别为 0.936 与 0.7825,如图 3 所示。结果显示,钢渣沥青混凝土对道路应用需求的满足程度优于天然石料沥青混凝土,综合性能指标比天然石料沥青混凝土高出约 19.62%。

### 2.2.3 沥青混凝土道路面层的成本分析

在对两种沥青混凝土进行成本核算时,两种沥青混凝土的成本内容主要包括两种沥青混凝土生命周期内的资源消耗和能源消耗等直接成本。评估系统边界的划定主要包括沥青混凝土全生命周期中原材料的开采过程、

沥青混凝土的加工制造过程、沥青混凝土运输过程、使用过程以及拌合过程等,由于两种沥青混凝土在材料运输、道路建设施工中选取的方案类似,成本接近,故两种沥青混凝土的生命周期总成本主要考虑两种沥青混凝土在资源消耗成本和能源消耗成本上的差异,至于道路建设过程中的设计、宣传、管理以及整个过程所涉及的其他人工成本和施工成本在本研究中暂不考虑。

依照消耗资源和能源的市场价值可计算得到两种沥青混凝土的生命周期总成本如图 4 所示:总体来看,两种沥青混凝土的总成本中,资源成本总和高于能源成本总和,建设 1 km 钢渣沥青混凝土道路面层的资源成本和能

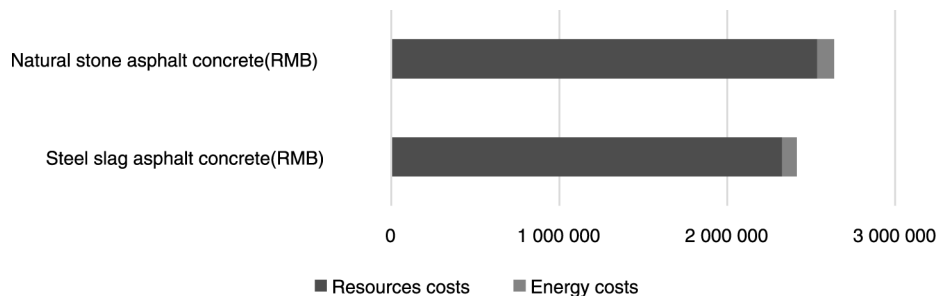


图 4 两种沥青混凝土成本总对比

Fig. 4 Total cost comparison of two asphalt concrete

源成本均低于天然石料沥青混凝土,其中资源成本比天然石料沥青混凝土低 8.17%,能源成本比天然石料沥青混凝土低 13.44%,生命周期总成本(资源成本和能源成本之和)比天然石料沥青混凝土的总成本约低 8.37%。

#### 2.2.4 生态设计定量评价结果

除了从材料性能、环境影响、经济成本 3 方面对生态设计的实施效果进行定性和定量评价之外,还需要对生态设计结果进行综合评价,评估钢渣沥青混凝土道路面层是否符合已确定的生态设计目标要求,判断的计算方法主要是本文选取的模糊矩阵评价方法。

通过建立矩阵进行模糊化处理,为了使得矩阵能够在同一维度上进行加权求和、定量比较,对性能子矩阵进行归一化处理,根据计算得到的使用性能矩阵  $U_1 = (U_{11}, U_{12}) = (\text{钢渣沥青混凝土}, \text{天然石料沥青混凝土}) = (0.545, 0.455)$ ,由于量化计算得到的环境影响值和成本总价值趋于越小表示更能满足生态设计的设计要求,所以对环境影响和经济成本两项指标分别取倒数后再归一化处理,得到环境影响矩阵  $U_2 = (U_{21}, U_{22}) = (\text{钢渣沥青混凝土}, \text{天然石料沥青混凝土}) = (0.538, 0.462)$ ,经济成本矩阵  $U_3 = (U_{31}, U_{32}) = (\text{钢渣沥青混凝土}, \text{天然石料沥青混凝土}) = (0.522, 0.478)$ ,两种沥青混凝土的评价矩阵如式(1)所示:

$$U = (U_1, U_2, U_3) = \begin{pmatrix} 0.545 & 0.455 \\ 0.538 & 0.462 \\ 0.522 & 0.478 \end{pmatrix} \quad (1)$$

生态设计要素权重的确定采用层次分析法。权重的确定需要设计者根据实际情况和用户需求来体现出这几者之间的相对重要程度,在对材料进行生态设计时首先要满足的是材料的使用性能要求,如果连最起码的使用性能都无法满足的话,其他的设计内容也就失去了意义,所以材料的使用性能重要性应高于材料的环境影响和经济成本<sup>[15]</sup>,在用于道路建设时,两种沥青混凝土首先考虑满足道路建设中的使用性能因素,然后再考虑经济成本因素和环境影响因素合理评价两种沥青混凝土,由此所确定的权重系数矩阵  $A = (A_1, A_2, A_3) = (\text{使用性能因素}, \text{环境影响因素}, \text{经济成本因素}) = (0.5, 0.25, 0.25)$ ,进行复合运算得到最后的综合评价矩阵,如式(2)所示:

$$S = (S_1, S_2) = A \cdot U = (A_{11}, A_{12}, A_{13}) \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \\ U_{31} & U_{32} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $S_1$  表示钢渣沥青混凝土的生态设计综合评价结果;  $S_2$  表示天然石料沥青混凝土的生态设计综合评价结果。

通过生命周期使用性能评价、环境影响评价、成本核算 3 方面对两种沥青混凝土进行分析对比可以发现:钢渣沥青混凝土在这 3 方面均要优于天然石料沥青混凝土,综合使用性能指标约比天然石料沥青混凝土高出 19.62%,全生命周期内的环境负荷约比天然石料混凝土低 14.17%,建设 1 km 道路所需成本比天然石料混凝土约能节约 8.37%。在建立的模糊矩阵评价模型中,  $S_1 > S_2$ ,按照模糊矩阵中的最大关联度原则,钢渣沥青混凝土较于天然石料沥青混凝土更符合生态设计的设计需求和设计目标。

若采用等权重方法对两种沥青混凝土产品的各项设计要素进行加权求和,  $S = (S_1, S_2) = (0.535, 0.465)$ ,  $S_1 > S_2$ ,也是钢渣沥青混凝土的生态设计评价结果好于天然石料沥青混凝土,更加符合生态设计的设计需求和设计目标。

### 3 结 语

(1) 以生命周期思想为指导,通过建立模糊矩阵的方法,对用于道路建设的两种沥青混凝土产品进行了多方面分析,建立了用于道路建设的性能-需求矩阵和经济成本核算,完善了沥青混凝土产品生态设计的内容,最后通过单一指标来验证和评估钢渣沥青混凝土道路面层的生态设计实施效果,对用于道路建设的沥青混凝土产品进行择优选择,选取符合人与自然和谐发展的路用沥青混凝土材料。

(2) 对沥青混凝土的生态设计发现,将钢渣作为骨料掺进沥青混凝土中替代原有的传统石料,不仅可以延长沥青混凝土道路的使用寿命,还降低了道路建设中的资源成本和能源成本,同时在道路建设的生命周期内还拥有较低的环境负荷,应用前景非常乐观。

道路建筑材料的生态设计是涉及方法和技术都较广的课题,不仅包含了传统材料学科内容,还涉及到环境、经济、数学等多门学科,到现在为止尚未形成成熟的理论体系结构和研究方法。在本案例研究中虽然对道路建筑材料的择优选择提供了合理的参考意见,但在其中仍有许多地方过度依赖设计者的个人判断,使得最后的结果略欠科学性。在今后的生态设计过程中仍需探索适合于不同材料的生态设计方法,来避免设计过程中出现的过多主观性因素,或者考虑建立基于材料生命周期评价的生态设计数据库,通过庞大的基础材料数据作为材料生态设计的强大支撑,结合适当的数学模型得到量化的评价结果,削弱人为主观价值判断因素,为生态设计工作提供有力的理论依据,使得材料行业的生态设计工作更加趋于完善。

## 参考文献 References

- [1] Huang Weirong (黄维荣). *Road Building Materials* (道路建筑材料) [M]. Beijing: China Communication Press (人民交通出版社), 2011.
- [2] Yao Yuchen (姚昱晨). *Road Building Materials* (道路建筑材料) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press (中国建筑工业出版社), 2013.
- [3] Brezet H, Van Hemel C. United Nations Environment Program. Industry and Environment (Paris). *Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption* [M]. UNEP, 1997.
- [4] National Standardization Administration of the People's Republic of China (国家标准化管理委员会). GB/T 24256-2009 *General Rules for Product Ecodesign* (产品生态设计通则) [S]. Beijing: Higher Education Press (HEP), 2009.
- [5] *Statistical Bulletin of Development of Transport Industry in 2013 - Ministry of Transport of the People's Republic of China* (2013 年交通运输行业发展统计公报-中华人民共和国交通运输部). [http://www.moc.gov.cn/zfxxgk/bnssj/zhghs/201405/t20140513\\_1618277.html](http://www.moc.gov.cn/zfxxgk/bnssj/zhghs/201405/t20140513_1618277.html).
- [6] Ye Yongfang (叶勇芳). *Jiangxi Building Materials* (江西建材) [J], 2014 (10): 144.
- [7] Li Yumei (李玉梅), Liu Jungang (刘军钢). *Machine China* (中国机械) [J], 2014 (22): 212-213.
- [8] Wu Shaopeng (吴少鹏), Yang Wenfeng (杨文锋), XueYongjie (薛永杰), et al. 钢渣沥青混凝土的研究与应用 [C]. *Cement Based Materials of the Academic Annual Meeting of Chinese Silicate Society* (中国硅酸盐学会学术年会-水泥基材料). 2003.
- [9] Liao T W. *Journal of Manufacturing Systems* [J], 1996, 15 (1): 1-12.
- [10] Wu Xiaoning (吴小宁). *Journal of Nanning College for Vocational Technology* (南宁职业技术学院学报) [J], 2006, 11 (4): 85-88.
- [11] Su Qinghua (苏庆华). *Dissertation is for Master* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [12] Ashby M F, Brechet Y J M, Cebon D, et al. *Materials & Design* [J], 2004, 25 (1): 51-67.
- [13] Huang Wenxiong (黄文雄). *Journal of China & Foreign Highway* (中外公路) [J], 2003, 23 (4): 74-76.
- [14] Li Canhua (李灿华). *Waste Iron and Steel in China* (中国废钢铁) [J], 2010 (4): 52-55.
- [15] Zhang Dandan (张丹丹). *Dissertation is for Master* [D]. Tsingtao: Shandong University of Science and Technology, 2011.

(编辑 盖少飞)