

公路建设的节能减排效果评估软件设计与实现

王海^{1a}, 陈德珍^{1a}, 程玲^{1a}, 施惠生^{1b}, 郑航²

(1. 同济大学 a. 机械工程学院; b. 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 上海浦东工程建设管理有限公司, 上海 201210)

摘要:废旧料用于公路建设时所对应的节能、减排效果的准确、快速评估对于该类技术的发展和政策引导具有重要意义,此外公路建设的材料也在不断发展,对应的能耗和排放也会变化。本文设计了一套软件用于公路建设中使用废旧料以后以及材料改性后所产生的综合能耗、资源消耗、污染物排放和环境综合影响四个方面的变化的快速、定量分析,并命名为“绿色道路建设综合能耗和环境影响评估”(Systematical energy and environmental assessment tool for Green road construction, 简称 SEE-at-GRC)。通过三个实际工程案例展示了此软件工具在废旧料作为建材再生应用于路基甚至路面建设时所发生的能源消耗、资源消耗、废物排放及环境影响 4 个方面变化的快速量化功能。计算结果表明,废旧料用于公路建设时具有良好的节能减排效果;路面、路基材料在改性、改型后使用也具有更好的。SEE-at-GRC 能有效指导废旧料在公路建设中的再生应用工艺发展方向;同时还能有效对比公路建设领域的节能减排工艺方案、定量核算工艺优化后的节能减排效果。

关键词:SEE-at-GRC; 公路建设; 废旧料; 再生; 综合能耗; 环境影响

中图分类号:U491

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0251-07

An Novel Assessment Tool for Evaluating Systematical Energy Consumption and Environmental Impact during Road Construction*

Wang Hai^{1a}, Chen Dezhen^{1a}, Cheng Ling^{1a}, Shi Huishen^{1b}, Zheng Hang²

(1a. Mechanical Engineering College; 1b. Key Laboratory of Advanced

Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Shanghai Pudong Project Development CO, Ltd, Shanghai 201210, P. R. China)

Abstract: New software for quantifying the systematical energy consumption, resources consumption and waste disposal information in road construction has been set up and was named as SEE-at-GRC (Systematical energy and environmental assessment tool for Green road construction). With help of this tool, the quantified contributions of recycling waste materials or modified materials in road construction as well as process improvement etc. on environmental impact can be evaluated by showing savings on energy consumption and resource consumption quantitatively; at the same time waste disposal capacity and environmental impacts were also provided. Two examples were given to shown the output of the software. Those results are useful for guiding the utilization of recycled waste materials, as well as for developing new technology process and advanced materials in road construction. Based on Visual Basic (VB) language and MSSQL database, SEE-at-GRC has provided a full set of evaluation methodology on energy saving, emission reduction and process optimization for guiding green road construction developing.

Key words: SEE-at-GRC; road construction; energy consumption; environmental impact

1 前言

我国交通运输事业迅猛发展,2010年底,全国公路总里程突破400万公里,达400.82万公里^[1]。道路建设不仅意味着大量的资源消耗,同时也对应着可观的能耗和污染物的排放^[2];另一方面,当道路废弃或重建时,废弃的路面材料若不妥善处理也会造成环境污染。因此道路建设的节能减排问题已经是道路建设企业和社会关注的焦点,众多的节能、减

排和废料再利用措施正在研究或者实施^[3-6]。而快速、准确地定量核算某些节能减排措施的效果,对技术的推广和政策的制定是必须的,这方面的工具还很少。

丹麦学者开发一种ROAD-RES软件分析了垃圾焚烧底灰用于填埋或作为沥青路面下层回收利用的情况下能源和资源的消耗情况以及对应的环境影响^[7],但这只是对单一材料的再生利用分析,不能全面反映多种综合措施的节能减排效果。在分析建筑材料生产对环境的影响方面有 Simapro^[8]

和 GaBi^[9] 等商业软件,但这些软件仅对建材而言,尚不能包含道路建设的全过程。为了快速、准确评估道路建设中所采用的节能减排措施的效果,及核算废旧材料再生利用于道路建设的环境效果,指导绿色道路建设的相关政策制定,本文将道路建设中涉及的材料、施工等环节全面考虑,将道路建设的各个步骤涉及的能耗数据和污染物数据结合起来,以方便地进行道路建设的节能减排分析。由此,本文基于一些节能减排评估的综合指标,设计并成功开发了一套基于 VB.net 语言和 MSSQL 数据库的软件,进行道路建设综合能耗与污染物排放计算。该软件命名为“绿色道路建设综合能耗和环境影响评估”(Systematical energy and environmental assessment tool for Green road construction, 简称 SEE-at-GRC),可提供一整套在道路建设领域节能减排效果的评价方案。

2 软件的功能和系统设计构架

SEE-at-GRC 软件的功能与任务如下:

1) 分析和评价路面、路基材料在改性、改型后使用以及施工工艺发生变化后的环境综合影响和能耗的变化,以指导道路建设新工艺和新材料的发展方向;

2) 分析和评价废旧物料(包括固废与建筑废料)再生用于路面、路基材料与原生建材相比对环境综合的影响和能耗的变化,以指导废旧物料的利用与指导性政策的建立。

2.1 综合指标计算模型

SEE-at-GRC 软件基于一套节能减排的评估指标体系,包括综合能源消耗、资源消耗、固废处理量和综合环境影响 4 个指标,在软件中其计算方式如下:

1) 综合能耗计算

由于能源形式多样,因此在道路建设中的综合能耗统一折合成标准煤耗;由下式计算:

$$E_R = E_m + E_c \quad (1)$$

式中, E_R 为某道路工程的综合能耗;它具有类似生命周期能耗的概念,全面地考虑了建筑材料生产加工的能耗 E_m 、施工能耗 E_c , 二者的计算如下。

建材能耗:

$$E_m = \sum_i M_i e_i \beta_i \quad (\text{kg 标煤} / t \text{ 材料}) \quad (2)$$

式中 M_i 是道路建设用到的第 i 种建材的质量, t /单位工程量; e_i 是第 i 种建材的生产和运输能耗之和; β_i 是该建材的从当时的能耗转换到标煤的转换系数。

施工能耗:

$$E_c = \sum_j \tau_j e_j \beta_j \quad (\text{kg 标煤} / t \text{ 材料}) \quad (3)$$

式中 τ_j 是某建设施工技术用到的第 j 种建设机械运行的时间(包括空载、满载时间); e_j 是第 j 种建设机械的小时能耗; β_j 是该施工机械的能源转换到标煤的系数。

2) 资源消耗

将所有的建材按其生产来源追溯到原生材料耗量,然后用原生材料消耗量(virgin material consumption, VMC)来计算某项道路工程对资源的消耗程度。

计算 VMC 时,选择一种原生建材如沙石(Gravel)作为基准,将一项道路工程涉及到的建材全部按比例转化成 Gravel 当量,转化系数的设定方法在[10]中已有详细介绍。

在比较不同的建设工程的原生材料消耗量时,采用下述公式计算:

$$\text{VMC} = \sum_i M_i \alpha_i \quad (4)$$

式中 M_i 是第 i 种材料消耗的质量; α_i 是该建材转化为 Gravel 的转换系数, α_i 存放在标准参数数据表。VMC 值越小,说明道路建设对自然资源的破坏越少、筑路的绿色化程度就越高。比较不同工程方案的 VMC 的数值,就可得到改进工程方案后对资源的量化节约效果。

3) 纳废量

道路建设可以产生新的固废,也可以消纳固废;例如废旧料的再生利用,此时道路建设替代了填埋场的容量。废物处置能力指标用纳废量(waste dumping capacity, WDC)来计算,其值为正则有利于废物减排,愈大则筑路的绿色化程度就越高;为负则增加了废物量。计算时把道路建设中的再生建材按照折算系数转换成某种废物当量后累加:

$$\text{WDC} = \sum_i M_i \beta_i \quad (5)$$

式中 M_i 是第 i 种的再生材料的用量; β_i 是该再生料对应固废当量的转化系数,它们的设定原则见文献[14]。

4) 综合环境影响

废物再生利用于道路建设时要求满足一定的标准,例如,当用焚烧炉底渣用于铺路基时要求满足浸出标准;但建成后相对于原生材料的道路,其对环境的污染物排放可能不同。再生料的加工过程也消耗能源,同时也会排放污染物。与所节约的采石、挖土方等消耗原生材料的生产过程相比,对环境的污染排放量是增是减,有待计算。在本软件中借用“部分”生命周期分析方法来计算。之所以称之为“部分”,是因为常规的生命周期分析方法是“从摇篮到坟墓”的思想。而在道路建设中,不可能直接预期道路服务期的情形,无论是否有材料改变、工艺变更、或者废旧料的再生利用,当建成后道路本身的各种结构参数、强度、可靠性指标一致时,只能认为道路今后的服务期表现一致,这是在考察期不足时的一种合理假定。

为计算综合环境影响,本软件采用将内置基于 EDIP1997 体系的生命周期分析方法,将道路建设所引起的各种排放转化成对环境的影响潜值。各种污染物最终转换成相关的环境影响类型潜值,如全球暖化、酸化、富营养化等^[11]。

2.2 软件的构架设计

软件 SEE-at-GRC 的系统构架采用符合当前软件开发的标准构架体系—以数据库处理为应用核心的 MVC(Model-View-Control)构架体系。其中,Model 层的核心设计是将上述能耗计算、资源消耗、固废处理量计算和综合环境影响 4 个计算模型分别封装成 Model 层的 4 个子模块。在数据库中多种数据表的支持下,Model 层实现软件逻辑模型计算。Control 层控制数据流处理。功能包括响应用户并映射到对应逻辑模型,选择视图,分发数据,验证数据有效性,容错分析等,如图 1 所示。Control 模块是连接 Model 和 View 功能模块的桥梁,也是软件健壮性和可维护性的关键。View 模块主要是响应用户请求和来自 Model 模块的状态改变命令。

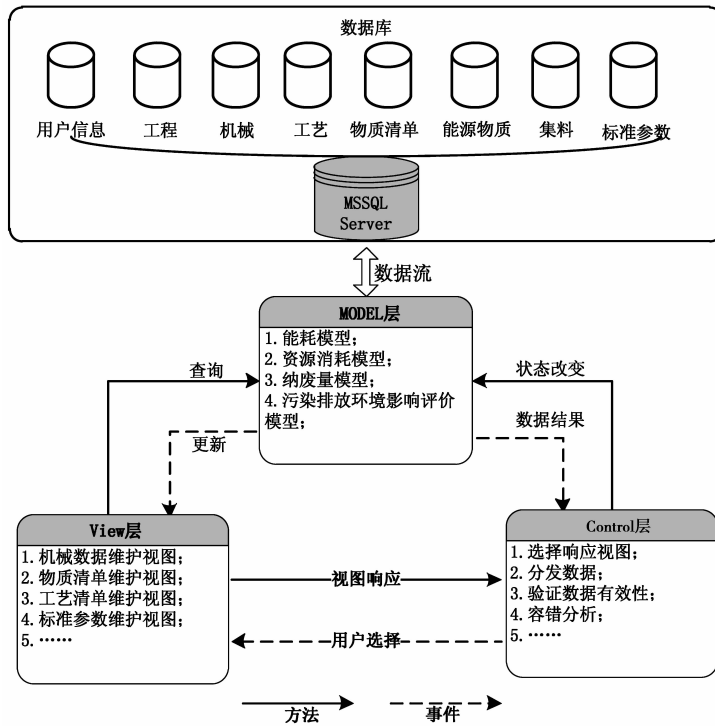


图 1 软件构架设计

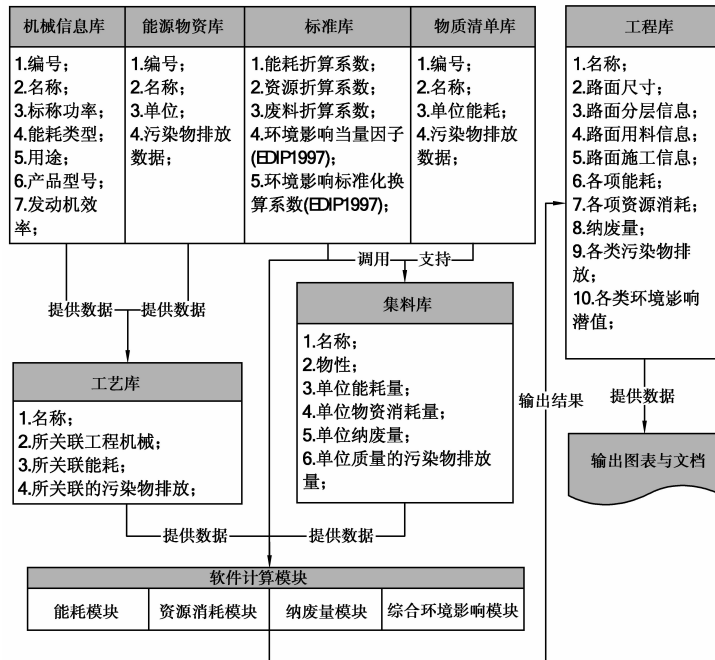


图 2 子库间调用关系设计

数据库作为后台参与所有数据支持,它们将浩如烟海的数据有序储存,只要用户知道相应的工程细节即可按需调用。其中,用户信息库存放合法用户信息;机械信息库存放道路建设中各类机械参数信息,如式(3)中的 e_i ;物质清单库存放各类建材材料(原生材料、单项再生材料、改型材料和改性材料)的信息(包含单位能耗和单位量的污染物排放等);工艺库存放道路建设各类工艺信息;能源物质库存放各种能源类物质(煤、油、气、电等)的信息;集料库存放各类已知建

材集料组成与能耗(如式(2)中的 e_i)以及排放信息;标准参数库存放在能耗、资源消耗、纳废量和综合环境影响计算模型中用到的各类参数或折算系数等,例如式(2)和式(5)中的 β_i ; (3)式中的 β_i , (4)式中的 α_i 等,并将生命周期评价方法中的一些换算基准值放在此处。工程库存放工程的名称,路面的结构,所用的材料(如式(2)中的 M_i)、工艺和机械状况等信息(如式(3)中的 τ_i),当计算任务执行完毕时该工程对应的所有计算结果也储存于工程库中、便于输出和比较。

数据库之间调用的逻辑关系如图 2 所示,基于数据库之间的联合调用,可得到道路建设过程中的综合能耗、资源消耗、固废处理量及综合环境影响共 4 项指标所需的全部数据,然后提供给计算模块进行计算,再将结果输出到工程库中。

在软件中对各类工程对象进行数据封装,充分实现了面向对象编程思想。例如:对软件中涉及的每种能源、资源和污染物等都实现类封装。这样的数据结构化设计,大幅增强了软件的可维护性并提高了数据库效率。

3 软件的工作流程

软件的工作流程可以用一个新建工程的分析计算流程来体现,通过 8 个功能子模块按次序推进。计算流程图如图 3 所示。在实际分析计算中,可根据项目情况采用默认参数或跳过其中某一步骤。下面对步骤进行简要说明。

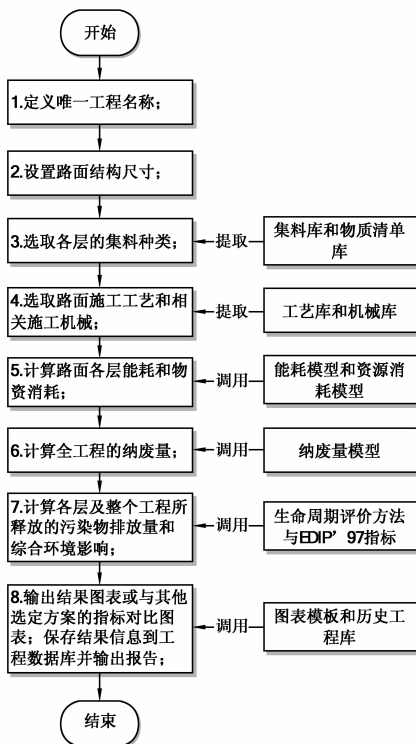


图 3 路面工程计算流程

3.1 定义工程名称模块

工程名称是工程计算项目的唯一索引标识。

3.2 设置路面结构参数模块

输入路面长度、宽度,得到路面面积;输入某层的材料厚度和比重计算该层的总用料量及其单位面积的用料量。

3.3 选配各层的集料种类模块

选择道路各层如上面层、中面层、下面层、基层等的材料。若添加集料库中还未记录的新材料,可在维护界面中添加新材料。此时,各层的集料生产所需的能耗、物资消耗和污染物排放等数据已全部从数据库中调出,供后续计算使用。

3.4 选定施工工艺及相关机械设备模块

根据施工要求选择各层的使用工艺。工艺的实施需要选定对应的机械设备。机械设备又对应着相应的能耗、物耗和污染物排放。如沥青温拌工艺和热拌工艺在选择机械设备和工艺有所区别,则得到的能耗和污染物排放值就存在差别。

3.5 计算道路各层的能耗和资源消耗量

道路各层的能耗计算包括 2 部分。一是建材的生产过程中所消耗的能量;另一部分是在施工过程中所消耗的能量。计算建材的能耗时,若已有建材能耗报告中的统计数据,都分别预先置于相应的数据库中,在计算中直接调用;若没有相关报告,如某些再生集料、再生材料等,则需要调研加工细节后得到。如收集焚烧炉渣生产再生集料时的磁选、分选、破碎、筛分等施工机械、功率、耗时等信息,然后根据加工细节进行计算^[10]。一些道路建设常用的再生材料和集料的能耗通过调研,也已预置在物质清单或集料库中,计算时直接调用。计算施工能耗时,根据施工细节,分别调用工艺库、机械信息库、集料库及标准参数库的相关数据进行计算,其计算遵循式(1)~(3),调用关系如图 2、3 所示。

计算资源消耗要根据各层建材的集料组成来调用集料库、物质清单库及标准参数库,根据式(4)来计算。

3.6 计算固废处理量

当工程使用再生集料等再生建材时,调用物质清单库和集料库中的相应数据,再根据式(5)来调用标准参数库中的折算系数计算纳废量。在施工时如果产生新废料,当仅为土方,不作为固废;当产生其它废物,如带沥青的废混凝土块,则产量存于工程库和物质清单库中,纳废量相应为负值。

3.7 确定污染物的排放和综合环境影响

污染物的排放包括建材生产过程中产生的污染物排放和施工过程中产生的排放 2 个方面。建材所含的物质在生产过程中的污染物排放信息可直接由图 1 中的物质清单进行查取;集料库中已包含了集料在生产过程排放的污染物数据。路面各层的建材在选定为某种集料后,也就确定了建材生产的污染物排放的信息。要计算施工过程中产生的排放,需要实测道路建设的每种工序,如拌和、摊铺、压实等工序对应的排放;并了解其值变化的影响因素,输入到工艺数据库中。目前这些工序大多没有现成的排放数据,需要通过现场测试等手段获取输入数据库。该数据库的建设也是目前的一个研究方向。目前本软件根据现场调研可以计算常规工序在 CO_2 、 CO 、 NO_x 、 HC 、 SO_2 、 H_2S 、 Dust 、 沥青烟 、 COD 、 VOC 、 NH_3 、 HCl 等项目上的污染物排放量和炉渣集料、再生混凝土集料等在重金属方面的排放信息。评价对环境的综合影响时,计算模块在确定上述污染物排放信息的基础上,基于 EDIP1997 体系对道路建设的全程进行生命周期评价^[12],给出各项环境影响类型的潜值(Impact potentials)。

3.8 计算结果的图表输出模块

输出模块将结果整理成规定格式的图表输出。输出结果除包括能耗、资源消耗、纳废量、综合环境影响报告 4 个方面外。如用户还需要更详细的其它数据,也可以单独输出。

此外软件还设有数据库功能模块和文件系统接口模块,

对已分析的方案可作为历史方案保存,供方案比较和查询使用。另外,数据库直接支持输入/输出文件。接口模块包括输入规定格式的文本数据报表和基础数据的输出表。在数据库进行维护时提供标准 I/O 功能,实现批量数据维护的要求。

4 软件应用实例

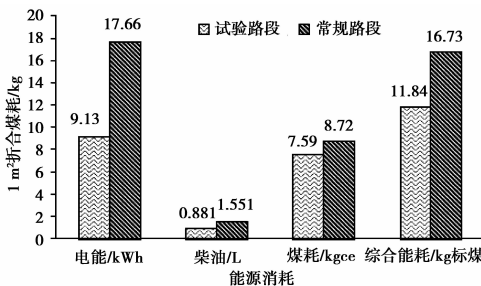
例 1 废旧料再生利用的节能减排快速核算

以上海浦东机场北通道 17 标段实际采用新材料和新工艺两方面的试验案例来说明软件的快速节能减排核算功能。工程建设的信息见图 7。该试验段采用焚烧炉底渣替代原生碎石骨料在路基建设中的应用;路面长 200 m,宽度 15.5 m。

| 再生集料工段 (a) 和常规路段 (b) 的对比 | |
|--|--|
| (a) 试验段--焚烧炉渣再生集料 | (b) 传统路段--碎石集料 |
| 沥青混凝土面层 (15 cm) 细粒砂二灰碎石基层 (20 cm) 粗粒砂二灰碎石基层 (22 cm) 粗粒砂二灰碎石基层 (20 cm) 土路基 试验段路面结构(长 200 m, 宽 15.5 m) 粗粒砂焚烧炉渣垫层: $\phi 15-25$ mm 粗粒砂焚烧炉渣集料。 粗碎石基层: 消石灰 8%, 粉煤灰 17%, $\phi 0-4.75$ mm 的焚烧炉渣 10%, 碎石 65%。 细碎石基层: 消石灰 8%, 粉煤灰 12.5%, $\phi 0-4.75$ mm 的焚烧炉渣 20%, $\phi 0-5.0$ mm 的碎石 34.5%, $\phi 5-15$ mm 碎石 25%。 | 沥青混凝土面层 (15 cm) 细粒砂二灰碎石基层 (20 cm) 粗粒砂二灰碎石基层 (22 cm) 100%级配碎石垫层 (20 cm) 土路基 常规路段路面结构(长 200 m, 宽 15.5 m) 100%级配碎石垫层: $\phi 15-25$ mm 的 100%级配碎石。 粗碎石基层: 消石灰 10%, 粉煤灰 25%, 碎石 65%。 细碎石基层: 消石灰 7%, 粉煤灰 13%, $\phi 0-5.0$ mm 的碎石 10%, $\phi 5-15$ mm 的碎石 32%, $\phi 15-25$ mm 碎石 38%。 |

图 7 上海浦东机场北通道 17 标段工程与常规工程的对比

计算按照流程图 3 进行,路面结构与尺寸方面信息的输入见上面介绍与图 7 的信息,在各层配料和施工工艺按照相关规定输入以后,后步指标的计算直接调用有关数据库,该数据中库能耗和污染等有关信息的获取可见文献[12]。按照图 3 的计算流程用 SEE-at-GRC 的计算结果可以得到若干报告,这里关注的 4 项指标:综合能耗和资源消耗计算报告如图 8,纳废量结果见表 1,而综合环境影响见表 2。

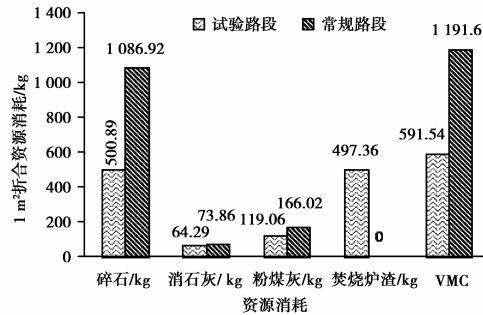


两种工艺在能源消耗方面的分项对比和综合标煤对比

图 8(1) 每 m² 路段的能源消耗比较图

表 1 试验路段和常规路段的固废处理量 WDC / (kg · m⁻²)

| 路段名称 | 单位(1m ² 路基) | 试验路段 | 常规路段 |
|---------|------------------------|--------|--------|
| 纳废量 WDC | kg BA 当量 | 616.42 | 166.02 |



两种工艺在资源消耗方面的分项对比和折合成原生材料当量消耗(VMC)的对比

图 8(2) 每 m² 路段的资源消耗比较图

表 2 例 1 中综合环境变化的变化 (表现为环境影响类型潜值的变化) / (PE · m⁻²)

| 环境影响类别 | 常规路段 | 试验路段 | 节省量 |
|---------------|----------|----------|-----------|
| 全球变暖(100 年) | 6.00E-03 | 4.41E-03 | 1.58E-03 |
| 生态毒性(水体) | 4.36E-03 | 1.13E-02 | -6.90E-03 |
| 人体毒性(土壤) | 6.38E-04 | 5.32E-04 | 1.06E-04 |
| 光化学臭氧形成,低 NOx | 4.33E-04 | 2.81E-04 | 1.52E-04 |
| 生态毒性(土壤) | 1.80E-07 | 1.33E-07 | 4.65E-08 |
| 人体毒性(水体) | 1.16E-03 | 1.08E-03 | 8.03E-05 |
| 酸化 | 3.68E-03 | 2.93E-03 | 7.50E-04 |
| 平流层臭氧消耗 | 4.95E-10 | 2.56E-10 | 2.39E-10 |
| 人体毒性(空气) | 8.80E-04 | 5.07E-04 | 3.73E-04 |
| 富营养化 | 1.38E-03 | 9.45E-04 | 4.36E-04 |
| 光化学臭氧形成,高 NOx | 4.40E-04 | 2.82E-04 | 1.58E-04 |

从图 8 和表 1,2 可得出:在满足道路使用性能的条件下,每 m² 路基用焚烧炉渣集料替代碎石的路段可节省天然石料 586.03 kg,节省消石灰 9.57 kg。该路基每 m² 道路再生利用了约 497 kg 焚烧炉渣,固废处理量达到 616.42 kg 焚烧炉渣当量(BA 当量),节约原生材料 599.52 kg 碎石当量(gravel 当量),此外还有明显的节能效果。但是由于炉渣中还有一些重金属,所以在生态毒性上增加了风险,而其它环境影响类型都是有益的。

由本软件的快速判断可知:利用焚烧炉渣集料代替碎石集料,具有明显的节能减排效果。且指导人们为了避免环境风险,应该尽量采取措施降低炉渣中重金属浸出的可能性。

例 2 工艺改进后节能减排效果的快速核算

以上海市威武东路的沥青路面摊铺为例,该试验路面使用温拌沥青(WMA)为面层,替代常规热拌沥青(HWA)面层,路面长 280 m,宽 14.4 m,面层结构见图 9。施工工艺没有变化,温拌沥青和热拌沥青摊铺时的污染物排放通过现场测试获得数据[6]输入工艺库。按照图 3 的计算流程用 SEE-at-GRC 进行计算,路面尺寸、材料等输入信息按见图 9。对(a)和(b)两种工艺得到的综合能耗计算报告如图 10 和表 3,工艺改进的主要效果表现在节能和减轻环境影响方面,不涉及资源消耗方面的变化(能源除外)和固废处置方面的变化。可以看到利用温拌沥青替代热拌沥青这一工艺改进有明显的节能效果,同时在环境方面有有益的效果。

| (a) 新工艺---温拌沥青 (WMA) | (b) 传统工艺---热拌沥青 (HMA) |
|---|--|
| 温拌沥青上面层 (4 cm) AC-13F 集料 温拌沥青中面层 (20 cm) AC-25 集料 试验路面结构 (长 280 m, 宽 14.4 m) 上面层: AC-13F 型混合料; 其组成: 集料 95.52%, 沥青 4.2%, 温拌剂, 0.28%; 中面层: AC-25 型混合料; 其组成: 集料 95.8%, 沥青 4.2%。 沥青混合料总量为 960 t, 其中 HMA 量为 640t, WMA 量为 320 t。 | 热拌沥青上面层 (4 cm) AC-13F 集料 热拌沥青中面层 (20 cm) AC-25 集料 常规路面结构 (长 280 m, 宽 14.4 m) 上面层: AC-13F 型混合料; 其组成: 集料 95.8%, 沥青 4.2%; 中面层: AC-25 型混合料; 其组成: 集料 95.8%, 沥青 4.2%。 沥青混合料总量为 960 t, 都是 HMA。 |

图 9 温拌沥青工艺和热拌沥青工艺的工程对比情况

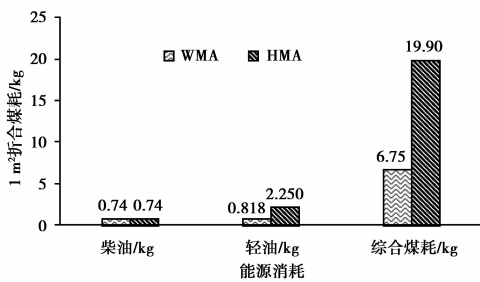


图 10 能耗对比图

例 3 橡胶沥青用于水泥混凝土路面加铺改造的能耗核算

橡胶沥青用于水泥路面或者旧路面的修补是目前正在研究的方向之一。这种应用技术不仅可以处理大量的废旧轮胎, 还可以通过对路面材料进行改性达到节能和延长路面使用寿命的效果。下面以某国内应用案例(图 10 所示)进行分析计算。

表 3 温拌沥青代替热拌沥青的环境影响潜值变化

| 环境影响类型 | HMA | WMA | 节省量 |
|--|---------|---------|---------|
| 全球变暖(GW100) | 7.72 | 7.68 | 3.89E-2 |
| 生态毒性(水体)(ETwc) | 3.03 | 2.49 | 5.47E-1 |
| 人类毒性(土壤)(HTs) | 3.81E-2 | 3.10E-2 | 7.14E-3 |
| 光化学臭氧形成(低 NO _x)(PO _{F1}) | 3.09 | 1.34 | 1.75 |
| 人类毒性(水体)(HTw) | 2.38E-2 | 1.98E-1 | 3.97E-3 |
| 酸化(AC) | 1.50 | 1.08 | 4.17E-1 |
| 人类毒性(空气)(HTa) | 9.52E-3 | 7.54E-3 | 1.98E-3 |
| 富营养化(NE) | 2.90E-1 | 2.10E-1 | 8.10E-2 |
| 光化学臭氧形成(高 NO _x)(PO _{Fh}) | 3.59 | 1.43 | 2.16 |

从图 11 的分析可以得到每平方米路面的能耗指标的比较, 如下表所示

表 4 橡胶沥青用于路面加铺改造的能耗对比

| 方案 | 路面总能耗/(kg·m ⁻²) | 相对能耗/% |
|--------------|-----------------------------|--------|
| a 橡胶沥青用于加铺改造 | 2.287 | 56.54 |
| b 普通沥青用于加铺改造 | 4.045 | — |

| a 新方案---橡胶沥青用于加铺改造 | b 传统方案---普通沥青用于加铺改造 |
|--|---|
| 4 cm 温拌沥青 ARAC-13 1 cm 橡胶沥青应力吸收层 混凝土基层嵌缝注浆 ARAC-13 层: 混合料 88.4%, 矿粉 1.7%, 水泥 2.0%, 橡胶沥青 7.9%; 橡胶沥青应力吸收层: 专用设备热喷 1 层 2.6 kg/m ² 的橡胶沥青, 紧跟撒布预裹覆 0.6% 沥青用量的 9.5~13.2 mm 单粒径碎石。 | 4 cm 改性沥青 SMA-13 8 cm 普通沥青 AC-25 混凝土基层嵌缝注浆 SMA-13 层: 混合料 84.3%, 矿粉 9.4%, 木质素纤维 0.3%, SBS 改性沥青 6.0%; AC-25 层: 集料 95.8%, 沥青 4.2%。 |

图 10 橡胶沥青用于水泥混凝土路面加铺改造对比方案

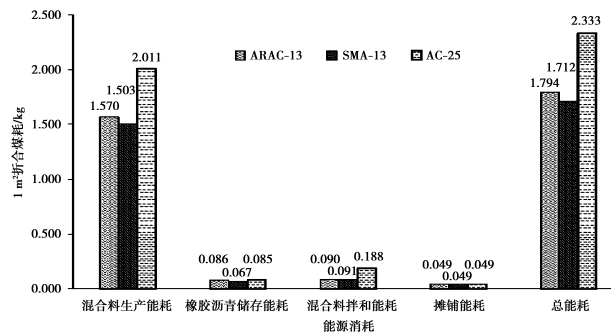


图 11 ARAC-13、SMA-13 和 AC-25 建材筑路面的能耗对比

由表 4 可得知, 用废橡胶改性材料进行路面的加铺改造, 具有节能率可达 43.46%。在实际工程中, 橡胶沥青可以替代多种功能沥青, 并具有较显著的节能优势, 尤其是用于水泥路面或者旧路面的修补上更为明显。

上述工程案例若采用手工核算, 因为环节多、步骤长, 很容易遗漏信息而计算错误。利用 SEE-at-GRC 软件只要知道相应的工程信息, 结合数据库的建设就可以快速、准确得到节能减排效果。因而 SEE-at-GRC 软件中相关数据库的完善是今后进一步工作的目标。

5 结论

本文详细分析了“绿色道路建设综合能耗和环境影响评估系统(SEE-at-GRC)”软件的设计构架和功能实现, 应用于核算道路建设中工艺改进或者材料改良(包括废料再生利用)的节能减排效果。软件设计基于一套与道路建设相关的数据库(如工程信息、施工机械库、建材库和工艺库等), 以及借用生命周期的分析系统, 通过简单的数学计算, 可快速准确地给出综合能耗、原生材料消耗、废物处理量以及综合环境影响 4 个指标定量值。工程实例的计算结果表明, 本软件能够为道路建设的工艺改良、废料的再生利用提供一整套节能减排效果的评价方案, 引导绿色道路建设的方向; 而相关数据库的建设和完善是该软件发挥功能的基础。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.《2010 年公路水路交通运输行业发展统计公报》[EB/OL][2010]. <http://www.moc.gov.cn/zizhan/syju/guihui/tongjixinxi/nianubaogao/201104/t20110427-937146.html>

[2] 宋学文, 冯晓. 公路建设对环境的负面影响[J]. 交通环保, 2003, 24(4): 37-40.

- [3] 崔振河,刘普增.降低沥青混合料加热成本的途径[J].路面机械与施工技术,2006,23(12):19-24
- [4] 徐世法.高节能低排放型温拌沥青混合料的技术现状与应用前景[J].公路,2005,(7):195-197.
- [5] 聂文志.废沥青路面旧料再生技术应用[J].石油工程建设,2006,32(3):23-25.
- [6] 程玲,闫国杰,陈德珍,等.温拌沥青混合料摊铺节能减排效果量化研究[J].环境工程学报,2010,4(9):2151-2155.
- [7] Birgisdóttir H, Bhandar G, Hauschild M Z, et al. Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: recycling of bottom ash in road construction or land-filling in Denmark evaluated in the ROAD-RES mode 1[J]. Waste Management, 2007,27(4):75-84.
- [8] PRé Consultants. SimaPro LCA Software. [EB/OL]. [2009]. <http://www.pre.nl/simapro/>. Accessed on October 30, 2010
- [9] PE International. Gabi Software. [EB/OL]. [2009]. <http://www.gabi-software.com/>. Accessed on October 30, 2010.
- [10] 耿翠洁.道路工程中再生利用垃圾焚烧炉渣、废旧水泥混凝土的生命周期评价[D].上海:同济大学,2011.
- [11] Hauschild M, Jeswiet J, Alting L. From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2005,54(2): 1-21
- [12] 陈德珍,耿翠洁,孙文洲,等.焚烧炉渣集料用于道路铺筑的节能减排定量[J].建筑材料学报,2011,14(1):71-77.

(编辑 吕建斌)

(上接第257页)

- [8] Phares D E, Rokjer D M, Crossley I A, et al. Modeling and validating the effective hydraulic detention time for a 10 mgd ozone contactor at the Lake Washington Surface Water Treatment Plant, Melbourne, Florida[J]. Ozone Science & Engineering, 2009, 31: 262-276.
- [9] 森冈崇行,汪兆康.采用模拟系统设计臭氧接触池[J].中国给水排水,2006,22(2):49-51.
MORIOKA T, WANG Zhaokang. Use of simulation system for design of ozone contact tank[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(2): 49-51.
- [10] Ta C T, Hague J. A two-phase computational fluid dynamics model for ozone tank design and troubleshooting in water treatment[J]. Ozone Science & Engineering, 2004, 26: 403-411.
- [11] 金俊伟,刘文君,刘丽君,等.影响清水池 t_{10}/T 值的因素试验研究[J].给水排水,2004,30(12):36-39.
JIN Junwei, LIU Weijun, LIU Lijun, et al. Study on the influencing factors on t_{10}/T in clear water tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(12): 36-39.
- [12] Zhang J P, Huck P M, Anderson W B, et al. A computational fluid dynamics based integrated disinfection design approach for improvement of full-scale ozone contactor performance [J]. Ozone Science & Engineering, 2007, 29: 451-460.
- [13] Zhang J P, Huck P M, Stublely G D, et al. Application of a Multiphase CFD Modelling approach to improve ozone residual monitoring and tracer testing strategies for full-scale drinking water ozone disinfection processes[J]. Journal of Water Supply Research and Technology-aqua, 2008, 57(2): 79-92.
- [14] Audenaert W T M, Callewaert M, Nopens I, et al. Full-scale modelling of an ozone reactor for drinking water treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 157(2-3): 551-557.
- [15] Kulkarni A A, Ekambara K, Joshi J B. On the development of flow pattern in a bubble column reactor: experiments and CFD [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(4): 1049-1072.

(编辑 薛婧媛)