

文章编号:1671-8879(2014)06-0019-08

沥青路面温室气体排放评价方法

蔺瑞玉,沙爱民,杨发林,杜 丽

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:沥青路面温室气体排放显著,目前中国尚无全面的沥青路面建设过程温室气体排放评价体系。应用生命周期评价法,根据新建沥青路面工程建设过程划分了沥青路面温室气体排放评价体系边界,提出了各建设阶段温室气体排放评价指标,研究了温室气体排放指标的测算方法,以此为基础建立了中国沥青路面建设过程温室气体排放指标的综合评价体系;同时,针对中国典型路面结构进行了温室气体排放评价分析。研究结果表明:沥青面层拌和阶段温室气体排放量居首位,占总量的 50% 以上,其次是原材料生产阶段;节能减排措施应以机械设备能耗控制为主,选用节能高效的机械设备,优化施工组织设计;半刚性基层/底基层原材料生产阶段排放最大,约占总排放量的 98%,其中水泥排放占 92%,节能减排措施应以原材料控制为主,选用高效节能方法生产水泥产品。

关键词:道路工程;沥青路面;温室气体;评价指标;评价体系;节能减排;生命周期评价

中图分类号:U411

文献标志码:A

Evaluation method for greenhouse gas emissions of asphalt pavement

LIN Rui-yu, SHA Ai-min, YANG Fa-lin, DU-li

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Greenhouse gas emissions of asphalt pavement is huge. At present there is no overall evaluation criteria of greenhouse gas emissions in asphalt pavement construction. The paper delimited the evaluation system boundaries for greenhouse gas emissions of asphalt pavement according to its construction process by using life cycle assessment(LCA) method,advanced the indexes of greenhouse gas emissions in each construction stage. Based on these approaches, the paper set up the evaluation system for greenhouse gas emissions of asphalt pavement and gave a case for the greenhouse gas emissions of typical pavement structure in China. The results show that the quantity of greenhouse gas emissions for asphalt surface is the most in asphalt mixture mix stage, over 50% of total amount, the second is in production stage of raw materials. The measures of energy conservation and emission reduction for asphalt pavement should focus on controlling energy consumption like using efficient mechanicals and optimizing construction organization. The greenhouse gas emissions for semi-rigid base or subbase in the production of raw materials occupies the most, about 98%, in which 92% is in cement production. Controlling raw materials such as choosing cement producing by new dry process kiln is a good way for energy conservation and emission reduction. 4 tabs. 15 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; greenhouse gas; evaluation system; emission in-

收稿日期:2014-05-20

基金项目:交通运输部科技项目(2011 318 812 1270)

作者简介:蔺瑞玉(1982-),女,甘肃白银人,工学博士研究生,E-mail: ruiyu333@sina.com。

dexes; energy saving and emission reduction; life cycle assessment

0 引言

中国是温室气体排放大国,其中交通运输排放占到全社会排放总量的 8%左右^[1]。道路工程建设依赖于土石、石灰、水泥、沥青、化学添加剂等建材资源,施工过程中混合料拌和、运输、摊铺与碾压施工时的温室气体排放量较大。

国外于 20 世纪 90 年代起应用生命周期法对道路工程温室气体排放进行了大量研究。生命周期评价(LCA)是一种通过对产品从原料开采、加工到最终处置这一过程中能量和原材料的需求,以及环境释放的量化分析以寻找提高产品环境性能方法和环节的评价方法^[2]。美国 Cross 等介绍了生命周期环境分析法,并应用生命周期环境分析进行了就地冷再生法和传统沥青罩面修复法各自的环境影响评价^[3];Häkkinen 等应用生命周期分析方法比较了芬兰沥青玛蹄脂碎石路面与水泥混凝土路面在设计年限内的能耗与温室气体排放^[4];Yue 等应用生命周期法分析了基于英国道路行业的再生道路施工过程中的能耗和排放量^[5];Pablo 等基于生命周期法研究了连续配筋混凝土路面和沥青路面建设过程的能耗情况^[6];Kwangho 等应用综合性生命周期分析方法,对韩国路面生命周期材料生产阶段(原材料生产,施工,维修和回收阶段)各自的能耗量及所使用能源的环境影响进行了分析^[7];Pontarollo 等基于生命周期成本分析法评价了加拿大沥青路面和混凝土路面从原料开采到路面使用寿命结束的整个生命周期中,采用最低成本时选择的生产材料对环境的各种潜在影响^[8]。中国引入生命周期法较晚,在道路工程中的应用才刚起步,针对中国沥青路面工程建设中的温室气体排放评价研究较少。赵联芳等应用生命周期评价方法评价了道路水泥混凝土的环境性能^[9];尚春静等将公路生命周期过程分为原材料生产和加工、公路施工、公路运营养护、拆除回收 4 个阶段,进行了公路环境分析^[10];潘美萍建立了高速公路能源消耗和 CO₂ 排放量的计算模型,归纳整合了高速公路相关产品的能耗和碳排放清单^[11];沈卫国等应用生命周期评价法,采用输入输出模型对中国典型的路面基层材料水泥稳定粒料与石灰稳定粒料,以及几种工业固体废弃物路面基层材料的环境影响进行了研究^[12]。

本文采用生命周期法构建沥青路面温室气体排

放评价体系。通过分析新建沥青路面工程建设中原生产材料加工、运输、现场施工等各阶段的技术特征,在路面工程温室气体排放评价边界内选择各阶段温室气体排放测定指标,研究排放指标的测算方法,以此为基础建立中国沥青路面工程建设中温室气体排放评价体系。

1 沥青路面温室气体排放评价边界

构建沥青路面温室气体排放评价体系,首先要确定沥青路面温室气体排放评价边界(图 1)。评价边界涵盖沥青混凝土面层、半刚性基层/底基层建设全过程。其中沥青混凝土面层建设过程包括原材料(沥青、集料、矿粉)生产加工过程、沥青混合料拌和、原材料和混合料运输、摊铺及碾压过程;半刚性基层/底基层建设过程包括原材料(集料、水泥)开采加工、拌和、原材料和混合料运输、摊铺、碾压和养护阶段。

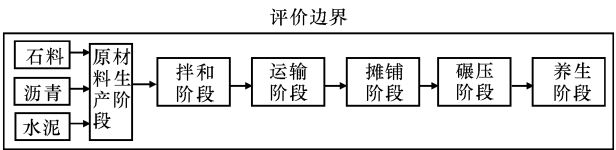


图 1 沥青路面温室气体排放评价边界
Fig. 1 Evaluation boundary of greenhouse gas emissions for asphalt pavement

2 沥青路面温室气体排放评价体系指标

路面工程温室气体排放评价体系为定量评价。定量指标分为一级指标和二级指标。一级指标为普遍性、概括性的指标;二级指标为反映路面工程建设各阶段排放的具有代表性的、易于评价考核的指标。

2.1 沥青面层温室气体排放评价指标

沥青混凝土面层建设过程主要有原材料开采加工、沥青混合料的拌和、运输、摊铺、碾压 5 个阶段,每个阶段都有不同的排放源。根据对沥青混凝土面层建设各阶段的温室气体排放源及排放气体类型的调研分析结果(下页表 1),提出沥青混凝土面层建设温室气体排放评价指标(下页图 2)。

各阶段排放的温室气体以 CO₂、CH₄、N₂O 为主,考虑到指标的代表性和生产过程中的可控性,本文采用当量 CO₂ 排放量为代表值。根据沥青面层建设过程的温室气体排放源和主要排放气体类型,得到沥青面层温室气体排放评价指标框架。沥青面

层温室气体排放评价指标分为两级,按照沥青面层的建设阶段将一级指标分为 5 个,分别为原材料生产、沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压 5 个阶段的 CO₂ 当量排放量(CO₂ 当量排放总量由各生产阶段 CO₂、CH₄、N₂O 排放量换算)。每个一级评价指标根据其生产工序,可细分为多个二级指标。

表 1 沥青面层温室气体排放源及排放气体类型
Tab. 1 Source and type of greenhouse gas emissions for asphalt surface

生产阶段	温室气体排放源		能耗(反应)	排放气体
原材料生产	集料 ^[13]	汽车、推土机、铲运机、爆破、喂料机、破碎机、吸尘器	柴油、电能、炸药	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	沥青 ^[14-16]	热交换器、脱水装置、初馏塔、减压塔、深拔装置、氧化塔、改性或乳化沥青生产设备	电能、燃料、原油挥发	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	矿粉	粉磨机	电能	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
拌和	电气及控制系统、冷料供给、干燥滚筒、燃烧器、热料筛分仓、计量系统、成品料提升系统、沥青导热油提升系统、气动系统、除尘系统、粉料系统、装载机		电能、柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆ 、HFCS
	沥青混合料		高温下化学反应	CO ₂ 、N ₂ O
运输	原材料	公路、铁路、水运	电能、柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	混合料	储存仓、卡车、加热保温设备	柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
		沥青混合料	高温下化学反应	CO ₂ 、N ₂ O
摊铺	摊铺机、自卸汽车、洒布车		柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
	沥青混合料		高温下化学反应	CO ₂ 、N ₂ O
碾压	钢筒式、轮胎、振动压路机		柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
	沥青混合料		高温下化学反应	CO ₂ 、N ₂ O

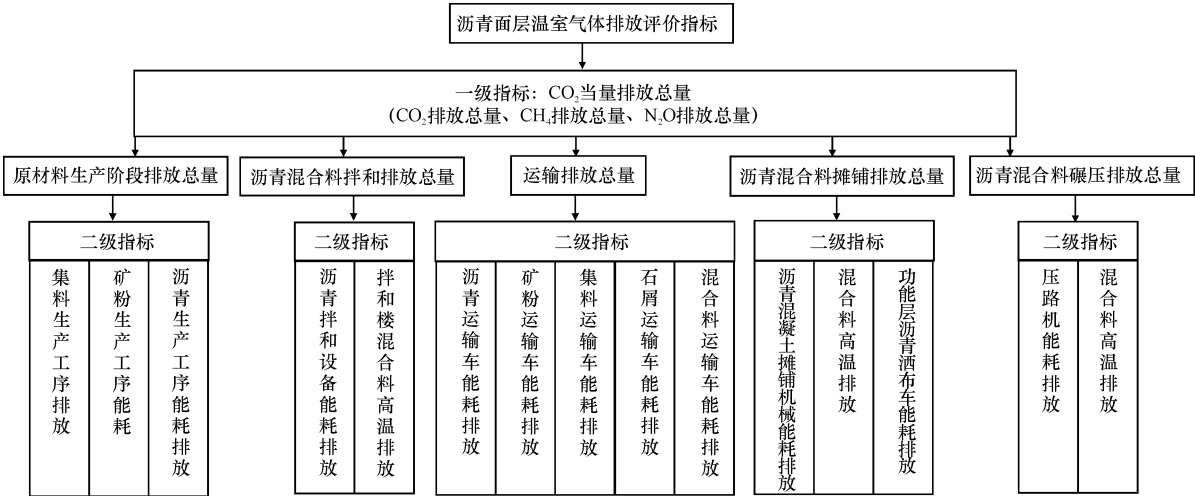


图 2 沥青面层温室气体排放评价指标框架
Fig. 2 Evaluation indexes of greenhouse gas emissions for asphalt surface

2.2 半刚性基层/底基层温室气体排放评价指标

半刚性基层/底基层建设分为原材料生产、混合料拌和、原材料和混合料运输、基层/底基层摊铺、基层/底基层碾压、基层/底基层养生 5 个阶段。通过对基层/底基层建设整个过程的调研分析结果(下页表 2),提出了半刚性基层/底基层建设温室气体排放评价指标(下页图 3)。

半刚性基层/底基层温室气体排放评价指标分

为两级,半刚性基层、底基层材料组成和施工工艺相同。因此,其一级指标层和二级指标层一致。一级指标为 6 个,即按半刚性基层/底基层建设阶段分为原材料生产、混合料拌和、运输、摊铺、碾压、养生 6 个阶段的 CO₂ 当量排放总量(CO₂ 当量排放总量由各生产阶段 CO₂、CH₄、N₂O 排放量换算);二级指标为各阶段生产过程中各种机械设备能耗排放量和材料化学反应排放量,均为易于评价考核的指标。

表 2 半刚性基层/底基层温室气体排放源及排放气体类型

Tab. 2 Source and type of greenhouse gas emissions for semi-rigid base/subbase

生产阶段	温室气体排放源		能耗(反应)	排放气体
原材料生产	集料 ^[13]	汽车、推土机、铲运机、爆破、喂料机、破碎机、吸尘器	柴油、电能、炸药	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
	水泥 ^[17]	钻孔机、输送机、矿区锅炉、煤层气洗选设备、破碎机、堆料机、烘干机、粉磨机、搅拌设备、CaCO ₃ 分解、MgCO ₃ 分解	电能、燃料、化学反应	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆
拌和	装载机,厂拌设备		电能、柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、SF ₆ 、HFCS
运输	公路		柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
摊铺	摊铺机、自卸汽车		柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
碾压	压路机		柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O
养生	洒水车		柴油	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O

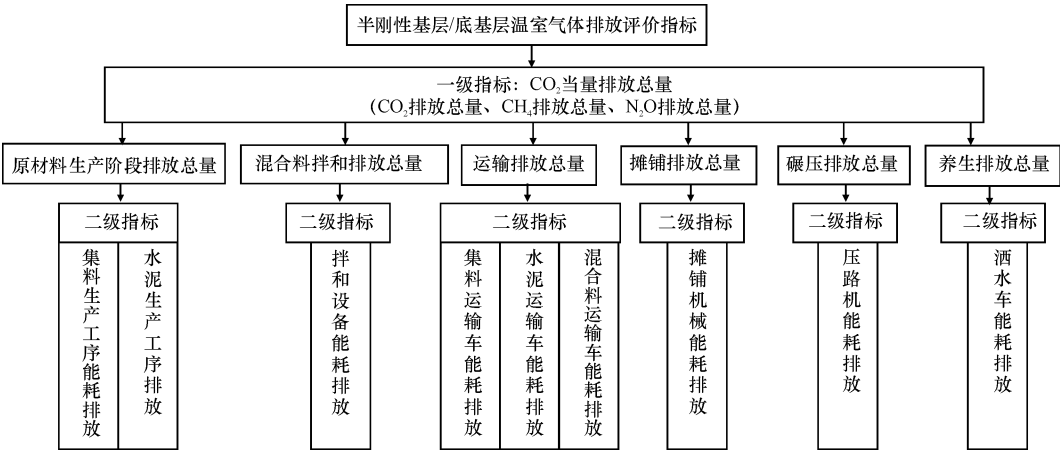


图 3 半刚性基层/底基层温室气体排放评价指标框架

Fig. 3 Evaluation indexes of greenhouse gas emissions for semi-rigid base / subbase

3 沥青路面温室气体排放评价体系指标测算方法

沥青面层温室气体排放量为原材料生产、沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压 5 个一级指标 CO₂ 当量排放量的总和;二级指标排放量为各阶段生产过程中机械设备能耗排放量和混合料高温排放量。半刚性基层/底基层温室气体排放量为原材料生产、混合料拌和、运输、摊铺、碾压和养生 6 个一级指标的 CO₂ 当量排放总量;二级指标为各阶段生产过程中各种机械设备能耗排放量。

能耗排放指标采用能耗量与排放因子乘积计算温室气体排放量,混合料高温排放采用现场实测法。以摊铺阶段的二级指标测算方法为例,沥青面层摊铺过程一般分为上、中、下面层沥青混合料摊铺和功能层(粘层、封层、透层)摊铺洒布。因此,沥青面层摊铺二级评价指标根据产生温室气体的排放源分为摊铺机械和沥青混合料自身高温排放,其中摊铺机

械即沥青混合料摊铺机和功能层沥青洒布机。基层/底基层摊铺二级评价指标为摊铺机械排放。

3.1 摊铺机、洒布机排放

摊铺机、洒布机排放量与所配柴油机单耗、作业时间以及温室气体排放因子有关。其具体计算公式为

$$G_i = pn h Y \tag{1}$$

式中: G_i 为摊铺机、洒布机温室气体排放量(kg); p 为摊铺机、洒布机功率(kW); n 为柴油机单耗(g/kWh); h 为作业时间(h); Y 为柴油温室气体排放因子(EF_d)。

3.2 混合料高温排放

在沥青路面摊铺及碾压时,温度达到 150 ℃~180 ℃以上,混合料排放出大量的沥青烟及有害气体 CO、SO₂ 等。可以采用现场实测法测出沥青混合料摊铺过程有害气体排放密度。按照式(2)计算混合料摊铺排放量。

$$G_j = V c_j \tag{2}$$

式中: G_j 为 j 类温室气体排放量(kg); c_j 为 j 类温

室气体排放浓度(kg/m^3); V 为混合料排放气体体积(m^3)。

4 沥青路面温室气体排放评价体系

4.1 评价体系结构

完整的路面工程温室气体排放评价体系包含 5 个层次:一是路面工程的温室气体排放总和,或是作为节能减排的目标,即目标层;二是按照分项工程的内容不同,相应将目标分解到分项控制的要求,即准则层;三是在具体分项工程中按照施工程序或阶段划分后,各个阶段的温室气体排放量测算,即一级指标层;四是在

各个具体施工阶段中,按照所涉及的设备和材料特征的生产能耗和排放的温室气体排放量的测算,即二级指标层;五是根据现场实际施工中采用的材料种类、设备型号参数和工艺组成确定的具体排放,即变量层(图 4)。沥青路面工程温室气体排放评价体系的准则层按沥青路面结构分为沥青面层排放、半刚性基层排放和底基层排放三部分,共同构成目标层即半刚性基层沥青路面温室气体排放体系。二级指标为体系基础指标,由于生产工序不同、所选机械设备不同,其结果变化很大。因此在二级指标下需确定变量层,即指标对应的机械设备参数和工作量参数。

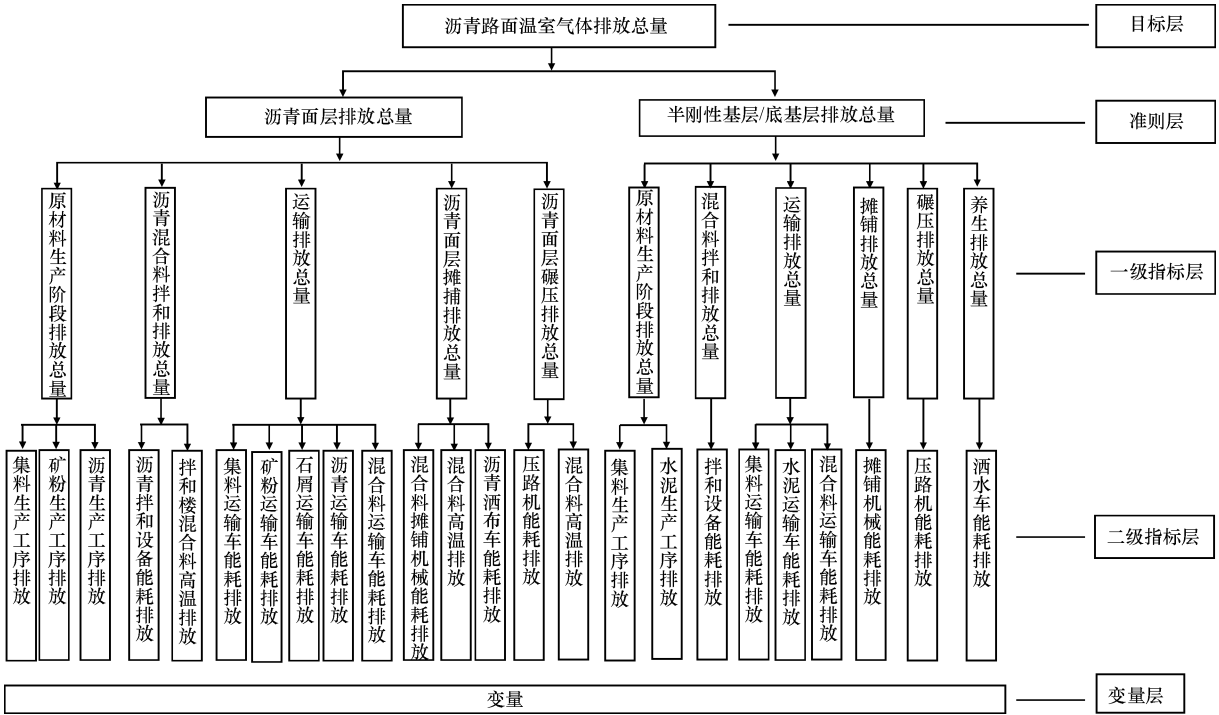


图 4 沥青路面温室气体排放评价体系结构

Fig. 4 Evaluation system of greenhouse gas emissions for asphalt pavement

在所建立的沥青路面温室气体排放评价体系中,旨在得到各个施工建设阶段及整个过程产生的 CO_2 当量排放总量和能耗总量。影响评价主要考虑生态影响和资源耗竭,进行各个阶段 CO_2 当量排放总量和能耗总量的平行对比研究分析,从而得到节能减排可控点,有助于采取相应技术措施。

4.2 评价体系应用分析

这里以中国典型路面结构为例进行温室气体排放影响评价。某高速公路沥青路面工程建设项目,起点桩号 K48+500,终点桩号 K68+500,全长为 20 km。路面结构为 20 cm 水泥稳定砂砾底基层(水泥 5%)+34 cm 水泥稳定碎石基层(水泥 5%)+8 cm 粗粒式沥青混凝土下面层(AC-25)+6 cm

中粒式沥青混凝土中面层(AC-20)+4 cm 细粒式沥青混凝土上面层(AC-13)。路面材料为上面层集料采用玄武岩,中、下面层和基层、底基层采用石灰岩;上面层采用改性沥青,中、下面层采用 70# 道路沥青,封层、透层和粘层采用乳化沥青;基层、底基层采用 32.5 级水泥。指标计算排放量得到能耗及温室气体排放结果见下页表 3。

在沥青面层铺筑各阶段中(下页图 5~图 7),混合料拌和阶段能耗和排放最大,温室气体排放量占总排放量的 54.01%,原材料生产次之,占总排放的 43.18%。因此在沥青面层建设中,选择优化生产的原材料,提高拌和设备生产效率,可以达到节能减排的效果。

表 3 沥青路面温室气体排放量

Tab. 3 Greenhouse gas emission quantity of asphalt pavement			
路面结构		能耗/MJ	CO ₂ 当量/kg
面层	原材料(集料+矿粉+沥青)	37 325 795	3 939 784.66
	拌和	55 729 912	4 927 045.97
	运输	1 391 168	123 394.56
	摊铺	876 391	78 015.18
	碾压	627 501	55 658.37
	合计	95 950 767	9 123 898.74
基层	原材料(集料+水泥)	89 111 135	29 824 642.31
	拌和	1 627 547	151 389.88
	运输	1 905 549	169 019.34
	摊铺	3 088 159	273 915.05
	碾压	246 994	21 907.97
	养生	175 259	15 545.24
底基层	原材料(集料+水泥)	49 066 368	12 370 826.30
	拌和	857 069	79 898.32
	运输	1 053 011	93 400.51
	摊铺	1 367 194	121 267.99
	碾压	146 410	12 986.31
	养生	70 104	6 218.10
总和		242 422 623	52 171 520.39

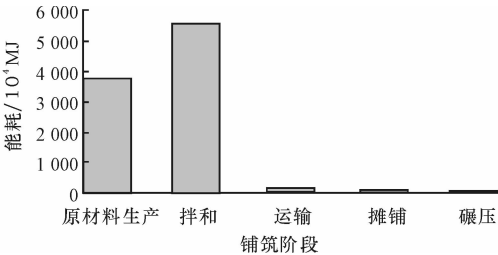


图 5 沥青面层铺筑各阶段能耗

Fig. 5 Energy consumption of asphalt surface

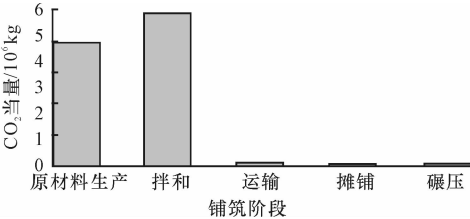


图 6 沥青面层铺筑各阶段温室气体排放量

Fig. 6 Greenhouse gas emission quantity of asphalt surface

水泥稳定碎石基层与水泥稳定砂砾底基层相似(图 8~图 10,下页图 11~图 13)。在铺筑过程中,原材料生产阶段能耗最大,温室气体排放量也位于总排放量首位,约占总排放量的 98%,其中水泥生产能耗占原材料生产总能耗的 78%,温室气体排放占原材料总排放的 92%,是能耗及排放的主要部分。因此,

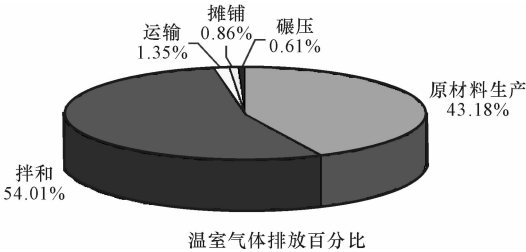


图 7 沥青面层铺筑各阶段温室气体排放量百分比

Fig. 7 Greenhouse gas emission percentage of asphalt surface

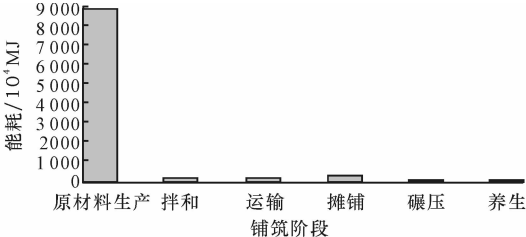


图 8 水泥稳定碎石基层铺筑各阶段能耗

Fig. 8 Energy consumption of semi-rigid base

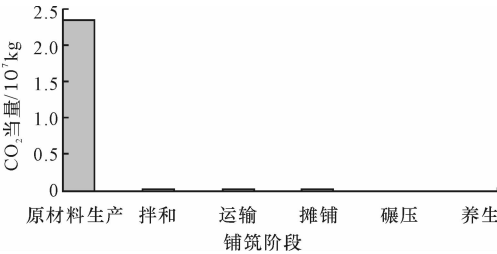


图 9 水泥稳定碎石基层各阶段温室气体排放量

Fig. 9 Greenhouse gas emission quantity of semi-rigid base

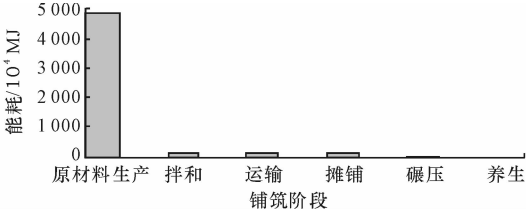


图 10 水泥稳定砂砾底基层铺筑各阶段能耗

Fig. 10 Energy consumption of semi-rigid subbase

在基层、底基层建设中,选择优化组织设计、采用高效节能方法生产水泥厂家的水泥产品,可以达到节能减排的效果。

沥青面层能耗较大,但温室气体排放量相比之下却较小,是因为基层与底基层采用了排放量较大的水泥作为原材料(下页图 14、图 15)。当不考虑原材料,在现场施工阶段主要是机械设备能耗排放,沥青面层能耗最大,温室气体排放量最大,半刚性基层/底基层能耗及排放相对小很多(下页表 4)。因此,在该项目建设过程中,沥青面层以能耗控制为主,选用节能高效的机械设备,优化施工组织设计,半刚性基层/底基

层以原材料控制为主,选用高效节能方法生产的水泥产品,可达到该项目节能减排的目的。

表 4 现场施工阶段能耗及温室气体排放量对比

Tab. 4 Greenhouse gas emission quantity of asphalt pavement

现场施工阶段	能耗/MJ			温室气体排放量(CO ₂ 当量)/kg		
	沥青面层	基层	底基层	沥青面层	基层	底基层
拌和	55 729 912	1 627 547	857 069	4 927 045.97	151 389.88	79 898.32
运输	1 391 168	1 905 549	1 053 011	123 394.56	169 019.34	93 400.51
摊铺	876 391	3 088 159	1 367 194	78 015.18	273 915.05	121 267.99
碾压	627 501	246 994	146 410	55 658.37	21 907.97	12 986.31
养生		175 259	70 104		15 545.24	6 218.10
总和	58 624 972	7 043 508	3 493 788	5 184 114.08	631 777.48	313 771.23

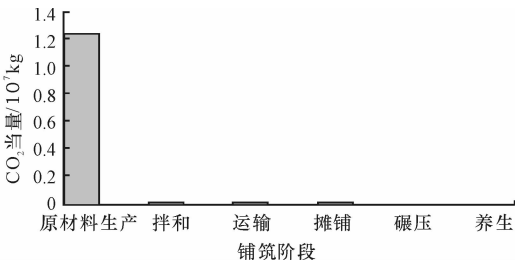


图 11 水泥稳定砂砾底基层各阶段温室气体排放量

Fig. 11 Greenhouse gas emission quantity of semi-rigid subbase

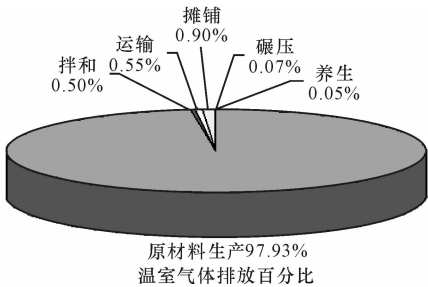


图 12 基层各阶段温室气体排放量百分比

Fig. 12 Greenhouse gas emission percentage of semi-rigid base

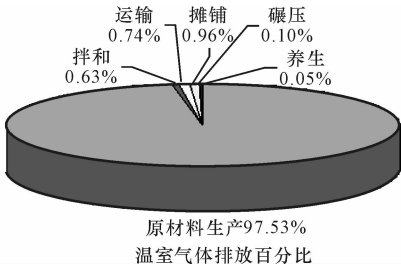


图 13 底基层各阶段温室气体排放量百分比

Fig. 13 Greenhouse gas emission percentage of semi-rigid subbase

5 结 语

(1)构建了基于生命周期的沥青路面温室气体排放评价体系,该体系涵盖评价边界、评价指标和指标测算方法。体系结构分为目标层、准则层、一级指标层、二级指标层和变量层。一级指标为各建设阶段 CO₂ 当量排放总量,二级指标为各阶段生产过程

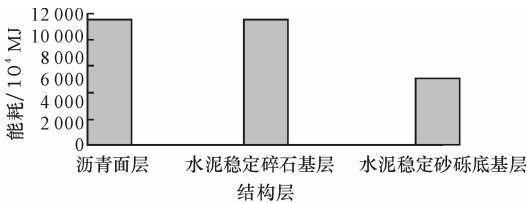


图 14 结构层能耗

Fig. 14 Energy consumption of asphalt pavement structure layer

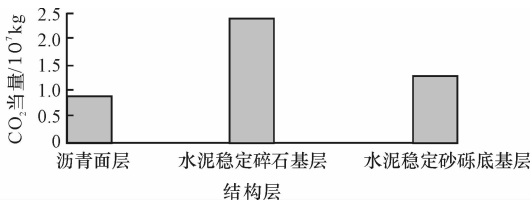


图 15 结构层温室气体排放

Fig. 15 Greenhouse gas emissions of asphalt pavement structure layer

中机械设备能耗排放量和材料自身排放量,变量为指标对应的机械设备参数和工作量参数。

(2)应用评价体系对典型沥青路面进行评价,结果显示沥青面层铺筑各阶段中混合料拌和阶段排放最大,占总排放量的 54%,原材料生产次之,占总排放的 43%。水稳基层/底基层原材料生产阶段温室气体排放量最大,约占总排放量的 98%,其中水泥生产排放占原材料总排放的 92%。

(3)沥青面层和水稳基层/底基层采用不同的节能减排措施。沥青面层建设以能耗控制为主,选用节能高效的机械设备,尤其提高拌和设备生产效率。水稳基层/底基层以原材料控制为主,选择由优化组织设计、采用高效节能方法生产的水泥产品。

参考文献:

References:

[1] 王贺礼,谢运生,罗成龙,等. 交通运输业温室气体排放现状及减排对策[J]. 能源研究与管理,2011(3): 9-11.

- WANG He-li, XIE Yun-long, LUO Cheng-sheng, et al. Greenhouse gas emission status and reduction measures of transportation industry[J]. *Energy research and management*, 2011(3): 9-11. (in Chinese)
- [2] 樊庆铎, 熬红光, 孟超. 生命周期评价[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32(6): 177-180.
FAN Qing-xin, AO Hong-guang, MENG Chao. Life cycle assessment[J]. 2007, 32(6): 177-180. (in Chinese)
- [3] Cross S, Chesner W, Justus H, et al. Life-cycle environmental analysis for evaluation of pavement rehabilitation options[J]. *Transportation Research Record*, 2011(2227): 43-52.
- [4] Häkkinen T, Mäkelä K. Environmental adaptation of concrete environmental impact of concrete and asphalt pavements[R]. ESPOO: Technical Research Centre of Finland, 1996.
- [5] Yue H, Roger B, Margaret B. A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation[J]. *Transportation Research Part D*, 2009(14), 197-204.
- [6] Pablo Z, John A G. Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2005, 11(1): 9-20.
- [7] Kwangho P, Yongwoo H, Seongwon S, et al. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, 129(1): 25-31.
- [8] Pontarollo J, Hooton D, Byer P. Environmental life-cycle cost analysis of asphalt and concrete pavements[J]. *Annual Conference Abstracts - Canadian Society for Civil Engineering*, 2007(5): 97-100.
- [9] 赵联芳, 傅大放, 钱春香, 等. 道路水泥混凝土的环境影响评价[J]. *公路交通科技*, 2004, 21(8): 138-141.
ZHAO Lian-fang, FU Da-fang, QIAN Chun-xiang, et al. Environment impact assessment for pavement concrete[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(8): 138-141. (in Chinese)
- [10] 尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(8): 149-154.
SHANG Chun-jing, ZHANG Zhi-hui, LI Xiao-dong. Research on energy consumption and emission of life cycle of expressway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(8): 149-154. (in Chinese)
- [11] 潘美萍. 基于 LCA 的高速公路能耗与碳排放计算方法研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
PAN Mei-ping. The methodology research and application on energy consumption and carbon emissions of highway based on the life cycle assessment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] 沈卫国, 周明凯. 半刚性路面基层环境影响评价研究[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(5): 75-78.
SHEN Wei-guo, ZHOU Ming-kai. Environment impact assessment of semi-rigid road base material[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(5): 75-78. (in Chinese)
- [13] 周建山, 张茂峰. 集料加工技术在太澳高速公路中的应用研究[J]. *公路交通技术*, 2011(4): 22-27.
ZHOU Jian-shan, ZHANG Mao-feng. Research on application of key aggregates processing techniques in taiyuan-macao expressway[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2011(4): 22-27. (in Chinese)
- [14] 陈淳, 李少萍, 张一安. 常减压蒸馏装置基准能耗计算方法的比较[J]. *石油学报: 石油加工*, 2002, 18(3): 48-53.
CHEN Chun, LI Shao-ping, ZHANG Yi-an. Comparison of calculation methods on energy consumption standards of atmospheric and vacuum distillation unit[J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2002, 18(3): 48-53. (in Chinese)
- [15] 凌逸群. 中国石化道路沥青生产现状及展望[C]//中国公路学会. 2002 年学术交流论文集. 北京: 人民交通出版社, 2006: 172-178.
LING Yi-qun. Current situation and development trend of production of paving asphalt in sinopec[C]//Proceeding of China Highway Society. 2002 Academic exchanges Conference. Beijing: China Communications Press, 2006: 172-178. (in Chinese)
- [16] 陈晓亮. 改性沥青生产工艺探讨[J]. *交通标准化*, 2012(16): 119-121.
CHEN Xiao-liang. Discussion on modified asphalt production technology[J]. *Communications Standardization*, 2012(16): 119-121. (in Chinese)
- [17] 马忠诚, 汪澜. 水泥工业 CO₂ 减排及利用技术进展[J]. *材料导报 A*, 2011, 25(10): 150-154.
MA Zhong-cheng, WANG Lan. Technical progress of emission-reduction and utilization of carbon dioxide in cement industry[J]. *Materials Review A*, 2011, 25(10): 150-154. (in Chinese)