

# 沥青混合料建设过程碳排放计算模型研究

杨伟军, 蔡慧

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 通过对沥青混合料建设过程碳排放源的调查分析, 采用清单分析法, 构建沥青混合料建设过程碳排放评价体系, 以此为基础建立碳排放量数学计算模型, 以每延米高速公路碳排放量为计量单位, 计算典型高速公路的碳排放量并确立碳排放关键环节。结果显示, 碳排放关键环节是混合料生产阶段和原材料生产阶段, 分别占总碳排放量的 67.88%、28.58%。

**关键词:** 工程管理; 沥青混合料; 碳排放; 高速公路

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)01-0183-04

国外较早对道路工程温室气体排放进行研究, 美国环境保护署自 1998 年以来在全球主办全生命周期评估(LCA)资源索引, 包括书籍、期刊、会议记录、网站、软件、数据库及案例研究, 有案例表明 LCA 在沥青路面处理方法优选上具有适用性; 1993—1995 年, 瑞典环境研究所开发了瑞典国家道路行政管理局第一套实际生命周期清单(LCI)建设和维护模型; Huang Yue 等建立 LCA 模型, 分为工艺参数、路面参数、单位清单、项目清单和特征结果 5 个工作表, 对所用数据进行敏感性分析, 确定了数据使用边界条件和适用范围。国内在道路工程中引用生命周期法尚处于初步发展阶段, 潘美萍将生命周期分为路面材料生产、路面施工、养护维修、改建时原路面处治 4 个阶段, 确定了碳排放评价的系统边界, 提出利用清单分析量化路面各阶段的能源消耗; 孙广远提出高速公路建设期内三大主体碳排放源是施工机械、人工活动、资源性改变, 对道路各分项工程进行了碳排放计算和对比分析; 吴军伟提出借鉴绿色建筑评估方法, 在道路建设中制定评分体系, 按环境影响获得碳积分, 以此建立道路工程碳排放分析模型。该文在已有研究成果的基础上, 采用层次分析法建立碳排放评价体系, 运用清单分析法建立碳排放计算模型, 结合典型高速公路路面结构进行实例分析, 计算每延米高速公路碳排放量并确立碳排放关键环节, 为道路工程推行低碳经济提供方向。

## 1 沥青混合料碳排放来源

构建沥青混合料碳排放评价体系, 首先要确定评价边界。沥青砼面层建设的主要过程包括原材料开采、加工及混合料生产、运输、施工等。该文对碳

排放源的调查限于混合料原材料加工厂、混合料拌和厂和施工现场在内的沥青混合料建设过程的各环节, 不包含沥青路面建成后使用维护和报废回收环节。通过对以上高速公路沥青路面施工过程碳排放源的调查, 将沥青路面施工环节分为原材料生产、混合料生产、运输、现场施工。其中: 沥青面层所需原材料主要包括沥青、集料和矿粉, 消耗化石燃料和电能; 混合料生产包括沥青加热、集料供给、集料加热、混合料拌和 4 个环节; 运输过程指原材料从加工厂运输至混合料拌和厂及混合料从拌和厂运输至施工现场, 对于材料在施工现场小范围的运输所产生的碳排放按所属地归于其他类; 施工阶段包括沥青混合料摊铺和碾压。

目前, 中国沥青路面建设主要采用热拌沥青混合料(HMA), 按 JTG F40—2004《沥青路面施工技术规范》, 高速公路沥青混合料拌和采用间歇式, 其生产工艺流程见图 1。

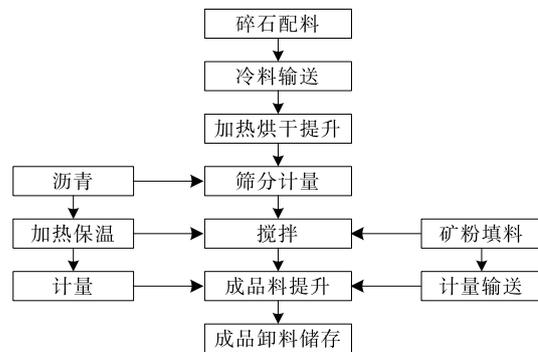


图 1 热拌沥青混合料生产工艺流程

## 2 沥青混合料建设碳排放评价体系

引起全球变暖的温室气体主要包括 CO<sub>2</sub> (二氧

化碳)、CH<sub>4</sub>(甲烷)、N<sub>2</sub>O(氧化亚氮)、HFCs(氢氟碳化物)、PFCs(全氟化碳)、SF<sub>6</sub>(六氟化硫),不同气体的温室效应不同,为统一度量整体温室效应,转化为二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e)进行计量。

建立碳排放评价体系时,首先确定两个级别评价指标,一级指标为概括性指标,二级指标为易于路面建设各阶段评价考核的主要排放源指标。沥青路

面建设过程包括原材料生产阶段、混合料生产阶段、运输阶段和施工阶段,以这4个阶段的CO<sub>2</sub>e排放量为碳排放评价的一级指标,将各一级指标按材料类别和生产工序进一步细分出二级评价指标(见表1)。根据沥青混合料建设过程碳排放源和主要排放气体类型建立沥青混合料建设过程碳排放评价体系(见图2)。

表1 沥青混合料各阶段碳排放源

生产阶段	排放源	主要能源类型	排放气体	
原材料生产	集料	喂料机、铲运机、推土机	柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
	沥青	热交换器、初馏塔、氧化塔	电能	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、SF <sub>6</sub>
	矿粉	粉磨机	电能	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、SF <sub>6</sub>
混合料生产	沥青脱桶加热	沥青储存罐	煤	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
	集料供给	装载机	柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
	集料干燥加热	滚筒	重油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
	混合料拌和	拌和站设备、拌和过程中混合料高温化学反应	电能、柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、SF <sub>6</sub> 、HFCs
运输阶段	原材料	汽车	柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、SF <sub>6</sub>
	混合料	汽车	柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
施工阶段	摊铺	摊铺机	柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
	碾压	压路机	柴油	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O

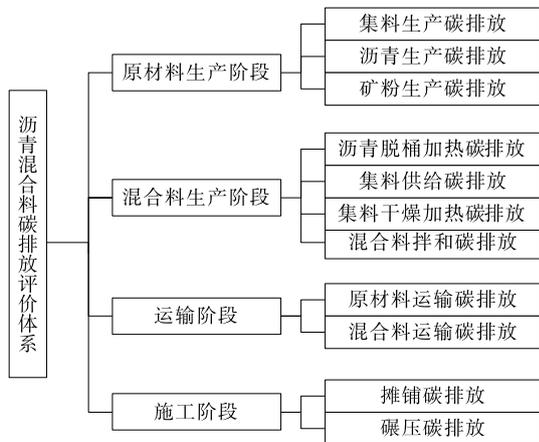


图2 沥青混合料碳排放评价体系

表2 气体全球变暖潜值

气体名称	不同时间(年)跨度下的全球变暖潜值 GWP		
	20	100	500
CO <sub>2</sub>	1	1	1
CH <sub>4</sub>	72	25	7.6
N <sub>2</sub> O	289	298	153
HFCs	3 830	1 430	435
PFCs	8 630	12 200	1 820
SF <sub>6</sub>	16 300	22 800	32 600

已有碳排放计算模型大多采用能耗法,碳排放量等于能源消耗量与能源碳排放因子的乘积,而政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的能源碳排放因子与中国有一定差距,2000—2012年中国能源消费总量比国家统计局报告的值高10%,中国煤炭的排放因子平均比IPCC建议的默认值下降40%,而中国水泥生产的排放量达45%。因此,建立碳排放量计算模型时,对引入的变量以定额算法为主、理

### 3 沥青混合料碳排放计算模型

在碳排放量计算过程中,CO<sub>2</sub>的全球变暖潜值GWP取为1,依据温室气体的全球变暖潜值(其他气体与CO<sub>2</sub>的比值)将其他气体转化为CO<sub>2</sub>e进行计算。温室气体全球变暖潜值见表2。

论分析及现场实测为辅。

以每延米高速公路碳排放量为研究对象。《公路沥青路面设计规范》规定高速公路沥青层厚度在

采用半刚性基层时宜为120~180 mm,路面宽度为42~24.5 m。选取沥青层厚度18 cm、宽度42 m进行碳排放量计量,各面层参数选取见表3。

表3 沥青路面各面层参数

面层	厚度/cm	沥青砼类型	集料类型	沥青类型	油石比/%
上面层	4	细粒式沥青砼 AC-13	玄武岩	SBS改性沥青	4.5
中面层	6	中粒式沥青砼 AC-20	石灰岩	70#道路沥青	4.3
下面层	8	粗粒式沥青砼 AC-25	石灰岩	70#道路沥青	4.0

基于上述理论,建立沥青混合料温室气体碳排放总量计算模型如下:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \quad (1)$$

式中: $W$ 为温室气体碳排放总量(kg); $W_1$ 为原材料生产阶段碳排放量(kg); $W_2$ 为混合料生产阶段碳排放量(kg); $W_3$ 为运输阶段碳排放量(kg); $W_4$ 为施工阶段碳排放量(kg)。

### 3.1 原材料生产阶段碳排放计算模型

沥青混合料的原材料主要是集料、沥青、矿粉。沥青生产过程包括原油开采、减压渣油生产、溶剂脱沥青等,碳排放计量从溶剂脱沥青阶段起算。集料的生产过程是在采石场中对天然石料进行爆破,然后在石料加工厂经多次破碎得到所需粒径,该文只考虑石料在加工厂所进行的生产过程,计量破碎筛分、给料、洗料、卸料、运输等过程中由设备耗能所产生的温室气体排放量。

原材料生产阶段碳排放量计算中计入生产过程损耗,其他阶段损耗较小,忽略不计,计算模型如下:

$$W_1 = \sum (1 + \varphi_j) \eta_j m_j \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为材料损耗,一般取值不大于0.02; $j$ 为材料类别,包括集料、沥青、矿粉; $\eta$ 为生产单位材料的CO<sub>2</sub>e排放量[kgCO<sub>2</sub>e/kg],由调研得到; $m$ 为材料重量。

### 3.2 混合料生产阶段碳排放计算模型

混合料生产阶段的碳排放由拌和过程中设备运行的燃油消耗和混合料高温中化学反应两部分产生,计算模型如下:

$$W_2 = \sum p_k n_k t_k \delta_k + \sum c_i V_i Q_i \quad (3)$$

式中: $p$ 为设备功率(kW); $k$ 为混合料拌和过程中设备类别,包括沥青储存罐、装载机、滚筒、拌和楼; $n$ 为设备能耗[kg/(kW·h)]; $t$ 为作业时间(h); $\delta$ 为CO<sub>2</sub>e的排放强度[kgCO<sub>2</sub>e/kg],由调研得到; $c$

为气体浓度(kg/m<sup>3</sup>); $i$ 为气体类别; $V$ 为气体体积(m<sup>3</sup>); $Q$ 为气体全球变暖潜值。

### 3.3 运输阶段碳排放计算模型

运输阶段分为原材料运输和混合料运输。原材料运输考虑水路、铁路和公路3种运输方式,其中水路和铁路为单程运输,公路为满载来、空载返。碳排放量计算时,引入返程运输系数,水路、铁路取零,公路取0.7,计算模型如下:

$$W_3 = \sum m_j L (1 + N_r) E_r + 1.7 M L E \quad (4)$$

式中: $L$ 为运输距离; $N$ 为返程运输系数; $r$ 为运输方式; $E_r$ 为对应第 $r$ 种运输方式的CO<sub>2</sub>e排放强度,由调研得到[kgCO<sub>2</sub>e/(kg·m)]; $M$ 为混合料质量; $E$ 为混合料选用公路运输CO<sub>2</sub>e排放强度。

### 3.4 施工阶段碳排放计算模型

沥青路面施工时温度达到150~180℃,产生大量沥青烟和有害气体CO、SO<sub>2</sub>等。施工阶段的碳排放量计算模型中计入施工过程中设备的碳排放量和混合料高温排放,计算模型如下:

$$W_4 = \sum p_s n_s t_s \delta_s + \sum c_i V_i Q_i \quad (5)$$

式中: $s$ 为施工过程中设备类别,包括摊铺机、压路机;其他参数与式(3)相同。

## 4 碳排放量关键环节

基于上述计算模型,得到沥青混合料建设过程中的温室气体排放量(见表4)。

表4 沥青面层建设各阶段碳排放量

建设阶段	CO <sub>2</sub> e/kg	占比/%
原材料生产阶段	103.73	28.58
混合料生产阶段	246.35	67.88
运输阶段	6.17	1.70
施工阶段	6.68	1.84
建设全过程	362.93	100.00

从表4可以看出:在沥青混合料建设过程中,碳排放量最大的是混合料生产阶段,占总碳排放量的67.88%;其次是原材料生产阶段,占28.58%。这两阶段是沥青混合料建设过程中的碳排放关键环节。

### 5 结语

该文通过高速公路沥青混合料建设全过程碳排放源调查结果分析,将沥青路面建设全过程划分为4个阶段,分析各阶段施工工艺特点并构建沥青混合料建设过程碳排放评价体系,建立碳排放量计算模型,实现碳排放量计算标准化、规范化;确立混合料生产阶段和原材料生产阶段是沥青混合料建设过程碳排放关键环节,对碳排放关键环节进行节能减排技术研究,可有效降低建设过程的总碳排放量。

### 参考文献:

[1] Schenck R. Using LCA for procurement decisions; a case study performed for the US environmental protection agency[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2010, 19(2).  
 [2] Stripple H. Life cycle assessment of road; a pilot study for inventory analysis; Second Revised Edition[R].

\*\*\*\*\*  
 (上接第177页)

### 4 结论

(1) 在管片刚度计算上,梁-弹簧模型适用于考虑管片环向性能的情况;三维骨架模型虽然形象具体,但因单元数目过多,参数不明确,计算容易出现不收敛等问题,实用性不强;纵向等效连续化模型将隧道纵向等效为刚度和特性相当的连续梁,计算较合理。

(2) 引入等效地基梁模型和等效纵向刚度的概念,通过模型计算得出管片最大上浮量与实测值较接近,证实文中模型在上浮预测上可靠。

(3) 可通过监测盾构姿态、满足最小覆土厚度、改善管片接头性能、控制注浆过程、调节泥水压力和合理堆载等手段防止和减少管片上浮,保证隧道管片拼装质量。

### 参考文献:

[1] 杨延栋,陈馈,李凤远,等.全断面硬岩地层盾构隧道管片上浮控制技术[J].隧道建设,2015,35(2).

IVL Report, 2001.  
 [3] Huang Y, Bird R, Heidrich O. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(2).  
 [4] 潘美萍,王端宜.路面寿命周期碳排放评价方法的研究[J].中外公路,2011,31(4).  
 [5] 孙广远.高速公路建设期内源性碳排放对比分析[J].公路工程,2013,38(4).  
 [6] 吴军伟.道路工程碳排放量计算与分析模型的发展与应用[J].城市道桥与防洪,2011(7).  
 [7] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].  
 [8] Swedish Defence Materiel Administration. Listing of GWP Values as Report IPCC WG1 Edition 1.0[S].  
 [9] Liu Z, Guan D, Wei W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. Nature, 2015, 524.  
 [10] Roudebush W H. Environmental value engineering (EVE) environmental life cycle assessment of concrete and asphalt highway pavement systems[R]. Portland Cement Association Skokie, 1996.

收稿日期:2017-09-22

\*\*\*\*\*  
 [2] 段坚堤,傅鹤林,张敬宇,等.浅埋盾构隧道管片设计荷载的确定[J].铁道科学与工程学报,2014,11(2).  
 [3] 曾格华,夏才初.基于梁-非线性弹簧模型的盾构隧道管片环极限变形特征研究[J].铁道学报,2017(4).  
 [4] 李翔宇,刘国彬,杨潇,等.基于修正纵向等效连续化模型的隧道变形受力研究[J].岩土工程学报,2014,36(4).  
 [5] 廖少明,徐进,焦齐柱.盾构法隧道管片拼装过程中的衬砌内力解析[J].土木工程学报,2013,46(3).  
 [6] 徐凌,黄宏伟,罗富荣.软土地层盾构隧道纵向沉降研究进展[J].城市轨道交通研究,2007(6).  
 [7] 叶飞,朱合华,丁文其.考虑管片环间接头抗浮效应的盾构隧道抗浮计算与控制分析[J].中国公路学报,2008,21(3).  
 [8] 殷明伦,张阳玉,王睿.某软土地层盾构隧道管片上浮事故分析[J].市政技术,2014(5).  
 [9] 叶飞,苟长飞,陈治,等.盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J].岩土工程学报,2014,36(4).  
 [10] 张庆贺,王慎堂,严长征,等.盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5).

收稿日期:2017-09-04