

沥青路面全寿命周期节能减排策略案例研究

宋庄庄¹, 朱洪洲^{1,2}

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室)

摘要:为定量评估沥青路面全寿命阶段的环境效益,实现沥青路面的绿色生态发展,应考虑完善路面节能减排策略体系。该文以某某已建高速公路的典型沥青路面为基础,采用全寿命周期评价(LCA)对沥青路面不同阶段的能耗与碳排放清单进行研究,对比分析在不同养护阈值下路面设计寿命内各阶段的节能减排影响程度。研究表明:沥青路面使用阶段的环境影响明显高于全寿命其他阶段,其能耗与碳排放占比均达到90%以上,其余各阶段的能耗与排放占比均不足5%。不同养护策略中,沥青路面养护阈值设置为75时节能减排效果最佳。路面使用阶段的能耗与碳排放逐年增长,从节能减排层面考虑,在交通量大的年限应采用较高的养护标准,提高路面平整度,可进一步降低寿命周期的环境影响。

关键词:沥青路面;全寿命周期评价;使用阶段;节能减排;养护阈值

1 引言

随着经济的迅速发展,全球变暖日益加剧,低碳环保已成为当今世界备受瞩目的社会话题。高速公路的建设、运营与养护过程会产生巨大的能源消耗与温室气体排放,交通运输行业正是国务院明确提出的要加快建设以低碳排放为特征的重点行业之一。目前,公路行业一般采用全寿命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)对公路工程的能源消耗与气体碳排放进行分析。LCA是一种量化分析产品全寿命周期能耗及排放的环境评价工具,其目的在于满足项目使用性能的前提下,从一系列备选方案中选出环境效益最优的方案,以期对产品全寿命的累计环境影响最小。因此,运用LCA来量化工程项目各个阶段的环境影响,从而提出更加全面的节能减排建议。

路面LCA通常分为材料物化阶段、建设施工阶段、使用阶段、养护维修阶段及结构拆除阶段共5个阶段进行能耗及排放的量化评估。潘美萍选择了3种高速公路路面结构(半刚性基层沥青路面Ⅰ、柔性基层沥青路面Ⅱ与水泥混凝土路面Ⅲ),分别对其寿命周期的4个阶段(不包括使用阶段)进行了能耗及排放量化分析,结果表明:材料物化阶段的环境影响最为显著;与直接大修相比,预养护方案更节能减排;杨博与李肖燕均在LCA的基础上采用参数传递法对路面使用阶段

进行了研究,指出路面使用阶段的能耗及排放均由车辆运营产生;李冠男等对高速公路的养护维修进行了分析,指出车流变为压缩状态时,由交通延误产生的能耗及排放呈指数型增加,且全长分车道施工是较节能减排的施工组织方式;Choi以碳税为货币工具将环境排放转化为经济效益,将LCA与LCCA(Life Cycle Cost Analysis)进行了有效结合,提出了3种不同的养护维修方案(修补、铣刨加铺以及两者结合)并分别对路面使用阶段进行分析,指出若LCCA考虑环境排放,当CO₂交易价格高于42.27美元/t时,铣刨加铺是最经济的养护方案。

现阶段关于沥青路面LCA的研究尚没有一个相对全面的环境影响分析,基本都集中在路面的材料物化阶段、建设施工阶段和养护维护阶段,尤其是对于交通参数更加敏感的路面使用阶段并未能得到足够重视,仅少数学者对使用阶段进行了研究,导致路面LCA分析体系不够完善。使用阶段能耗及排放主要由运营车辆的燃油消耗产生,鉴于道路较长的使用寿命,使用阶段的持续时间最长,其能耗及排放预计会占比路面全寿命周期的95%以上,忽略掉该阶段会导致LCA的分析结果出现较大偏差。

为进一步完善路面全寿命分析方法,促进中国公路可持续发展,该文着重对路面使用阶段进行研究。以中国某已建高速公路沥青路面为基础,针对使用阶段的4个不同养护阈值,分别对沥青路面LCA涉及到

的各个阶段进行能耗及排放评估,提出适用于中国的高等级沥青路面全寿命周期节能减排策略。研究结果可为沥青路面的低碳化研究提供进一步的参考依据。

2 沥青路面全寿命周期分析

2.1 目标与范围

目标与范围的确定是沥青路面全寿命周期研究的前提。该文的LCA研究目标为定量评估沥青路面生命周期内的能源消耗与碳排放,涵盖沥青路面从“摇篮”到“坟墓”的整个过程。研究范围按沥青路面设计年限划分为以下4个阶段:材料物化阶段、建设施工阶段、使用阶段及养护维修阶段。由于很多沥青路面达到设计年限时往往会进行大修改造,一般不会被毁弃处置,因此该文不涉及结构拆除阶段。为简化研究,该文仅考虑研究范围内与功能单元直接相关且影响较显著的能耗及排放活动,而对于诸如人类活动以及道路照明等不予考虑。该文的LCA分析框架如图1所示。

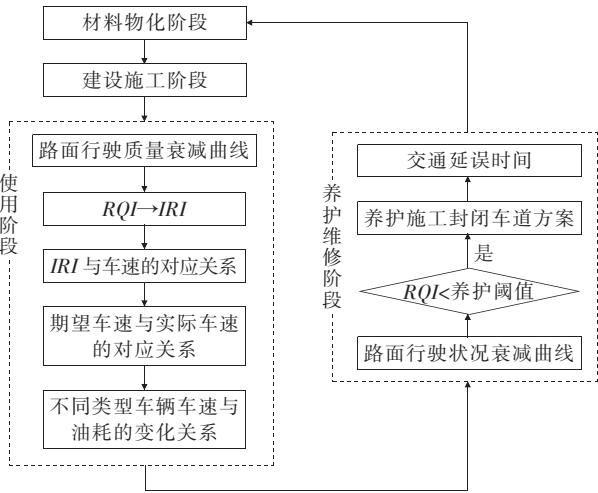


图1 沥青路面LCA分析框架

2.2 功能单元与评估参数

功能单元为路面LCA中计算能耗及排放的基本单元,它是全寿命清单分析中的一个横向比较的度量单位,可以更直观地反映各阶段能耗及排放的差异。该文所选取的功能单元为:中国某典型1 km双向四车道高速公路半幅路面(0.75 m土路肩+3 m硬路肩+2×3.75 m行车道+0.75 m左侧路缘带+1/2×2 m中央分隔带),路基宽度为26 m,路面面层结构组成为:4 cm改性AC13+6 cm AC20+8 cm AC25,基层结构组成为:20 cm 3%CTB+20 cm 4%CTB+20 cm 5%CTB,设计年限为15年,设计速度为100 km/h,单

车道累计当量轴次为 1.65×10^7 次。初始年交通数据如表1所示,交通量年增长率6.5%,假设设计年限内各类型车辆组成比例保持不变。

表1 初始年交通参数

车型	交通量/ (pcu·d ⁻¹)	车型	交通量/ (pcu·d ⁻¹)
小客车	1 344	中货	306
小货	601	大客	473
中客	656	大货	251

2.3 清单分析

沥青路面清单分析的主要内容包括:沥青路面全寿命周期中的能耗与碳排放。道路材料的时效清单为生产1个功能单元该材料需要消耗的能源与排放的当量CO₂,该清单与原材料开采工艺、运输成本等关系较大,考虑到中国目前尚未公布统一的排放因子数据库,该文结合中国沥青路面的现状整理了国内外普遍认可的能耗及排放时效清单数据,如表2所示。

表2 材料能耗及排放时效清单

材料类型	单位能耗/(MJ·t ⁻¹)	单位排放/(kg·t ⁻¹)
水泥	3 433.0	900.0
沥青	4 900.0	285.0
乳化沥青	3 490.0	221.0
集料	31.8	2.5
汽油	43 070.0	74 100.0
柴油	42 652.0	74 100.0
电力*	3.6	—

注: *指消耗1 kW/h电力所产生的单位能耗。

工程项目最大的特点就是其唯一性,尤其是公路工程,每一个公路项目其所处地域、施工方案以及承包公司的技术管理水平都不尽相同,导致了道路工程在建造过程中所用材料和施工机械的数量和种类千差万别。所以,该文选取了已投入使用的沥青路面,利用已收集的工程资料和调研数据,对沥青路面全寿命周期各阶段展开清单分析。

2.3.1 材料物化阶段

材料物化阶段主要包括道路建造材料的开采、运输、提炼以及储存过程。根据工程量清单和《公路工程预算定额》计算1个功能单元沥青路面主要建造材料消耗量,根据式(1)、(2)计算得出其能耗及排放如表3和图2所示。沥青路面材料物化阶段,能耗及排放为

水泥贡献比例最高,占到 50%以上,其次是沥青,能耗占比 32.5%,而排放仅占 10.6%,再者是集料。因此,对于沥青路面工程而言,适当降低水泥和沥青的物化能耗是节能减排的关键。

$$TEC = \sum_i (UEC_i \times M_i) \tag{1}$$

$$TER = \sum_i (UER_i \times M_i) \tag{2}$$

式中: TEC 为总能源消耗量; TER 为总碳排放量; UEC_i 为第 i 种原材料的排放因子; UER_i 为第 i 种原材料的能耗因子; M_i 为第 i 种原材料的消耗量。

表 3 沥青路面主要材料物化阶段能耗及排放

材料	材料消耗/t	能耗/MJ	排放/kg
沥青	279.29	1 368 521.0	79 597.60
乳化沥青	16.67	58 178.3	3 684.07
水泥	712.33	2 298 688.9	641 097.00
集料	10 550.20	316 506.0	26 375.60
合计	—	4 041 894.2	750 754.27

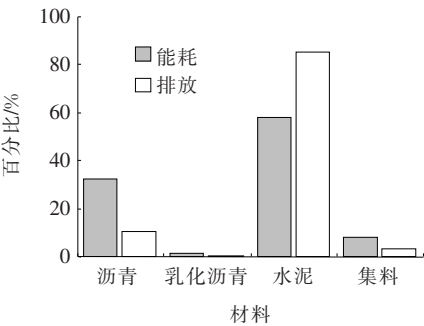


图 2 材料物化阶段能耗及排放比较

2.3.2 建设施工阶段

沥青路面建设施工阶段的能耗及排放主要由工程机械消耗燃料与电力产生,按施工工艺将该阶段分为 3 个环节:拌和、运输、铺筑(摊铺和碾压),并根据《公路工程预算定额》和工程量清单,计算 1 个功能单元沥青路面施工机械的台班数量,参考《公路工程机械台班费用定额》及表 2 的时效清单,得出建设施工过程能源消耗和气体碳排放量,如表 4 和图 3 所示。

表 4 沥青路面建设施工阶段能耗及排放

施工 工艺	柴油消 耗/kg	电力消耗/ (kW·h)	总能耗/ MJ	总排放/ kg
拌和	1 973.32	15 100.5	138 527.81	163 437.53
运输	1 824.00	—	77 797.27	135 158.40
铺筑	1 158.43	—	49 409.55	85 839.99
合计	4 955.75	15 100.5	265 734.63	384 435.97

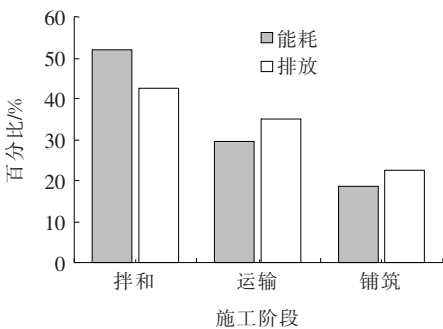


图 3 建设施工阶段能耗及排放比较

在建设施工过程各环节中,拌和阶段的能耗及排放比重最大,均占到 50%左右。因此,选择生产效率高技术状况良好的拌和设备是提高建设施工阶段节能减排效果的有利途径。

2.3.3 使用阶段

使用阶段的能耗及排放主要来自车辆行驶。当路面开始投入运营,路面使用性能逐年衰减,车辆行驶速度也会随之降低,从而导致车辆油耗的变化,该文将利用路面状况、车速、油耗及排放之间的对应关系来展开使用阶段的清单分析。

首先需要确定路面使用性能衰变模型。选取路面行驶质量指数(RQI)作为路面使用性能评价指标。考虑到运营初期路面状况实测数据的缺乏,采用同济大学陈子建的路面行驶质量衰变模型,如式(3)~(5)所示,并给出了适用于该项目的回归参数值(表 5)。该模型考虑了路面结构参数、初始交通参数等因素的影响,具有较好的适用性。

$$RQI = RQI_0 \{1 - \exp[-(A/t)^B]\} \tag{3}$$

$$A = ah^bESAL^cl_0^d \tag{4}$$

$$B = ah^bESAL^cl_0^d \tag{5}$$

式中: RQI_0 为新建路面行驶质量指数; A 、 B 为方程的回归系数; t 为使用时间(年); h 为路面面层厚度(cm); $ESAL$ 为日当量轴载作用次数[次/(日·车道)]; l_0 为初始弯沉值; a 、 b 、 c 、 d 为回归系数,取值如表 5 所示。

表 5 RQI 衰变方程回归系数(半刚性基层, BZZ-100)

项目	a	b	c	d
式(4)	19.492 0	0.239	-0.238	-0.119
式(5)	0.368 6	0.150	-0.164	-0.050

为了保证路面使用阶段的服务质量,通常需要进行多次养护维修,路面性能也会随之发生相应的跃迁。该文参考 JTG 5421-2018《公路沥青路面养护设计规

范》,确定4个RQI养护阈值:75、80、85、90,当RQI低于上述阈值,即对路面进行养护维修。因此,得到4个不同养护阈值下新的路面性能衰变模型,如图4所示。假设路面每进行一次养护维修后路面性能均能恢复到最高水平。

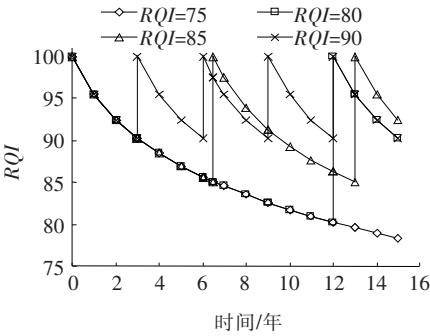


图4 不同养护阈值下的路面性能衰变曲线

分别计算不同养护阈值下使用阶段的能耗及排放;根据JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》中RQI与IRI的换算关系[式(6)]和RQI衰变方程[式(3)]得到IRI随路面时间变化的曲线;再代入张金喜等拟合的平均驾驶速度 v_o 与IRI的关系[式(7)],计算出平均车速随路面使用时间的变化关系,将期望车速导入根据该研究工程参数建模的VISSIM微观交通仿真软件中,得到实际车速随路面使用时间的变化关系;导入汽车油耗 F_m 与车速模型(表6),得到不同类型车辆每辆车的日百公里油耗UFCV,利用式(8)计算出不同养护阈值下每一年的百公里油耗TFCV;最后对油耗变化曲线积分,得到15年内的总百公里油耗量,该值除以100即为15年内1个功能单元的油耗量,再利用式(1)、(2)计算出4种养护阈值下使用阶段的总能耗及排放,如图5所示。

$$RQI = \frac{100}{1 + 0.026e^{0.65IRI}}$$

(6)

$$v_o = 116.555 - 22.63\ln(IRI)$$

(7)

式中:IRI为国际平整度指数; v_o 为平均驾驶速度。

$$TFCV_t = AADTV_i \times 365 \times \frac{(1+tg)^t}{tg} \times UFCV_i$$

(8)

式中: $TFCV_t$ 为第 t 年的百公里油耗; $AADTV_i$ 为初始年 i 类车的平均日交通量; tg 为年平均交通增长率; $UFCV_i$ 为 i 类车每辆车的日百公里油耗。

由图5可以看出,随着养护阈值RQI的增大,使用阶段的总能耗及排放也随之增大,当RQI为75时最节能减排。

表6 不同类型车辆车速—油耗模型

车型	F_m	R^2
小客	$0.001v^2 - 0.1824v + 13.4078$	0.934
中客	$0.0028v^2 - 0.4013v + 25.6694$	0.897
大客	$0.0073v^2 - 0.9698v + 55.4053$	0.770
小货	$0.0034v^2 - 0.4917v + 25.0686$	0.88
中货	$0.0041v^2 - 0.5817v + 36.9862$	0.904
大货	$0.0126v^2 - 1.4781v + 65.6573$	0.931

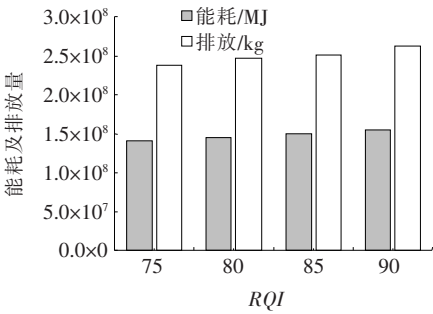


图5 不同养护阈值下的使用阶段总能耗及排放

2.3.4 养护维修阶段

养护维修阶段的能耗及排放来自两部分:①养护维修期间的材料物化和建设施工;②养护维修期间的交通延误。由于公路运营前期,预测沥青路面设计年限内养护维修策略比较困难,该文拟定了在养护阈值RQI分别为75、80、85、90下的4种养护维修策略,具体实施方案均采用目前中国典型养护技术:铣刨加铺4 cm改性AC-13,养护维修功能单元的能耗及排放数据如表7所示。养护施工工期预计为5 d,施工方案采取全长分车道封闭(图6),车速限制为60 km/h。

表7 沥青路面养护维修阶段材料物化与建设施工的能耗及排放

类别	能耗/MJ	排放/kg
材料物化	343 546.20	20 590.53
铣刨	61 695.90	425 736.00
拌和	13 714.38	17 628.49
运输	17 288.28	30 035.21
铺筑	10 979.90	19 075.55
合计	447 224.66	513 065.78

根据前文新确定的路面性能衰变模型,得到4种养护策略下沥青路面的养护维修年份,如表8所示。分别将所有养护年份的交通数据导入VISSIM微观交

通仿真软件中,并根据已选施工方案建立的模型,计算出该年由于养护施工作业导致交通延误产生的能耗及排放,如图 7 所示。养护维修期间交通延误造成的能耗及排放计算表以第 12 年为例,如表 9 所示。可见养护维修阶段交通延误产生的能耗及排放逐年递增,且均大于材料物化与建设施工的能耗及排放。主要是由于交通量逐年增长的缘故,另外车辆增多也会提高总延误时间,使能耗及排放进一步增加。

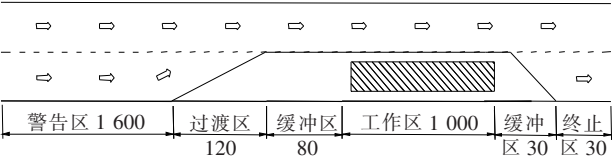


图 6 路面维修施工车道封闭方案(单位:m)

3 沥青路面全寿命周期节能减排策略研究

对沥青路面全寿命周期的能耗组成进行分析(由于能耗与排放的变化趋势基本一致,该文在该节中仅考虑了能耗的影响),如图 8 所示。

表 8 4 种养护策略对应的养护年份

养护年限/ 年	不同 RQI 时养护策略选取			
	<75	<80	<85	<90
3.0				✓
6.0				✓
6.5			✓	
9.0				✓
12.0		✓		✓
13.0			✓	

注:在路面设计年限内,该文选取的沥青路面 RQI 值均大于 75,第 1 种养护策略即养护阈值为 75 时不采用养护措施;表中勾选年份即为在该养护策略的养护时间节点。

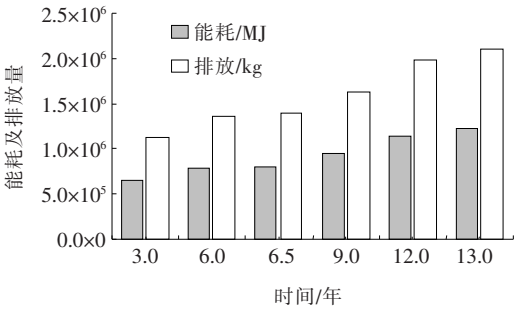


图 7 交通延误产生的能耗及排放

表 9 第 12 年交通延误能耗及排放计算结果

项目	AADT/ pcu	平均车速/ (km · h ⁻¹)	每小时 延误/s	总延误/ h	燃油消 耗/kg	能耗/ MJ	排放/ kg
小客车	2 861	41.7	53.9	1 551	4 877	232 050	399 231
小货车	1 279	41.7	53.9	694	3 030	144 132	247 973
中客车	1 396	40.3	51.6	725	4 102	193 215	335 676
中货车	651	41.1	55.6	364	2 995	141 030	245 014
大客车	1 007	40.3	51.6	523	5 934	279 637	485 817
大货车	534	41.1	55.6	299	3 217	151 489	263 184
求和	7 728	—	322.2	4 155	24 155	1 141 553	1 976 899

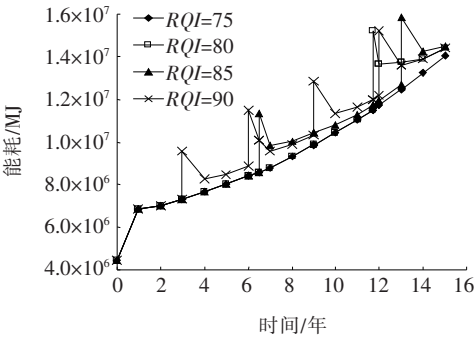


图 8 沥青路面全寿命周期能耗

从图 8 可以看出:路面养护维修后,当年的能源消耗会产生一个大幅度的跃迁,且跃迁后的能耗曲线均高于未进行跃迁的能耗曲线。该部分的能耗变化主要由两部分组成:① 车辆行驶的燃油消耗,由于路面养护维修后,路面平整度 IRI 恢复至较高水平,车辆平均行驶速度增加,油耗增加;② 由交通延误与养护维修的材料物化、建设施工产生。上述两类油耗均随道路的交通量增加而增大。因此,可以得出全寿命周期能耗主要受两个因素的影响,随着路面使用时间的延长交通量的增长,以及养护次数的增多,全寿命周期能

耗越高。沥青路面全寿命周期节能减排的关键在于提高路面的使用性能和耐久性,路面服务质量提高了,养护维修频率自然减少了,从而降低了路面车辆排放的影响。

由前文计算结果可知:路面使用阶段养护阈值为75、80、85、95时,其使用阶段在全寿命周期中能耗占比分别为96.8%、95.8%、95.0%、93.7%。使用阶段的能耗随着养护阈值的增大而减小。

同时,不考虑使用阶段的能耗,分析沥青路面全寿命周期的能耗组成,如图9所示。

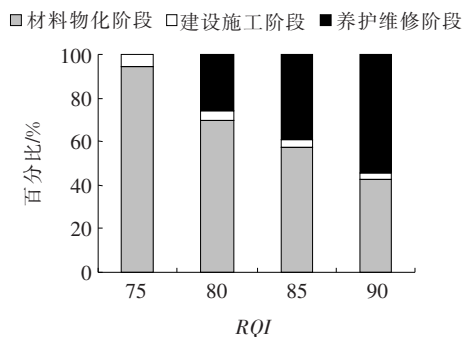


图9 不考虑使用阶段的全寿命周期能耗

从图9可以看出:改变养护阈值,不同阶段的能耗占比(考虑养护维修)大小依次为:材料物化阶段>养护维修阶段>建设施工阶段。

4 结论

沥青路面的使用阶段是其全寿命周期内必不可少的环节,该文将其纳入整个全寿命进行分析,完善了沥青路面节能减排的全寿命周期理念。基于全寿命周期评价方法,量化分析了沥青路面各阶段的能耗及排放,并比较了使用阶段不同养护阈值下的设计寿命内总的能耗及排放,主要研究结论如下:

(1) 根据路面性能衰变曲线,以RQI为养护决策指标,制定了4种养护维修策略,得出最佳养护阈值RQI为75,实现了养护决策的优化,可为实际工程项目提供参考依据。

(2) 路面使用阶段的能耗及排放逐年增长,从节能减排角度考虑,在交通量大的年限应采用较高的养护标准,提高路面平整度,可降低寿命周期的能耗与排放。

(3) 沥青路面在选取不同的养护阈值下,使用阶段的能耗占比均达到90%以上,明显高于全寿命其他阶段,关注使用阶段车辆行驶的排放,可促进路面可持续发展。

(4) 该文测算的数据只是部分工程案例的调查结果,由于每段沥青路面的交通量、养护措施、路况变化规律等方面差异较大,该文的分析结论可能与实际案例路段存在差异,随着路面案例的增加及数据的积累,测算数据将不断地更新完善,更真实地反映不同情况下的环境影响,得出节能减排优化方案。

参考文献:

- [1] 何亮,李冠男,张军辉,等.路面全寿命周期能耗与CO₂排放分析研究进展[J].长安大学学报(自然科学版),2018(4).
- [2] 潘美萍.基于LCA的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D].华南理工大学硕士学位论文,2011.
- [3] Liu Y, Wang Y, An D. Life-Cycle CO₂ Emissions and Influential Factors for Asphalt Highway Construction and Maintenance Activities in China[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2018, 12(6): 1-13.
- [4] 李冠男,何亮,饶志鹏.基于LCA的高速公路养护维修能耗与CO₂排放研究[J].公路,2018(5).
- [5] 杨博.沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D].长安大学博士学位论文,2012.
- [6] 李肖燕.基于LCA的水泥路面与沥青路面环境影响评价[D].东南大学硕士学位论文,2015.
- [7] Wang X, Duan Z, Wu L, et al. Estimation of Carbon Dioxide Emission in Highway Construction: A Case Study in Southwest Region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 705-714.
- [8] Santos, J., Ferreira, A., Flintsch, G.. A Life Cycle Assessment Model for Pavement Management: Road Pavement Construction and Management in Portugal. Int. J. Pavement Eng., 2015, 16(4).
- [9] Araújo J P C, Oliveira J R M, Silva H M R D. The Importance of the Use Phase on the LCA of Environmentally Friendly Solutions for Asphalt Road Pavements [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2014, 32(32): 97-110.
- [10] Choi J H. Strategy for Reducing Carbon Dioxide Emissions from Maintenance and Rehabilitation of Highway Pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 88-100.
- [11] Pierre T. Dorchie, M. Sc., P. Eng. The Environmental Road of the Future: Analysis of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions [C]. Fiftieth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) 50th, 2015.
- [12] 朱浩然,温肖博,卢勇,等.路面寿命周期环境影响评价研究及软件开发[J].中外公路,2016(5).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.05.009

聚氨酯碎石和透水砖两种人行铺装结构及性能对比

王元元^{1,2}, 刘燕燕², 何顺顺³, 刘天诚³, 许家硕³, 梁浚枫³(1. 湖北文理学院 土木工程与建筑学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 重庆交通大学 材料科学与工程学院;
3. 重庆外国语学校)

摘要: 为了更好地指导聚氨酯基透水人行道的铺装, 服务海绵城市建设, 该文从路面结构组成、力学性能和抗堵塞效果 3 个方面, 对比分析了聚氨酯碎石和透水砖两种透水人行道铺装的异同。结果表明: 两种铺装的路面结构大致相同, 但聚氨酯碎石铺装比透水砖铺装具有更好的整体性、结构稳定性和铺装高效性; 聚氨酯混合料属于柔性材料, 具有较好的抗疲劳性能和更好的透水性能, 但其抗冻性能却较差; 抗堵塞率和渗透系数变化率均表明聚氨酯混合料具有更好的抗堵塞效果。因此, 聚氨酯基透水人行道的铺装用于海绵城市建设具有整体性好、铺装效率高、柔韧性好、抗堵塞性能好、透水效果好等优势。

关键词: 道路工程; 聚氨酯; 透水路面; 人行道

随着社会经济的持续快速发展, 城市基础设施建设的不断推进, 越来越多的城市地表被水泥混凝土、人行道砖、沥青混凝土等不透水材料覆盖, 致使地下水资源不能得到及时有效补充, 进而引发地表沉降、热岛效应、城市内涝等问题。为了解决上述困扰, 海绵城市建设应运而生, 倡导城市建设应注重生态环保、绿色、可持续发展等理念, 及时还原地下水资源, 并在需要时加以释放。其中, 透水路面铺装因具有吸声降噪、缓解地表径流、保护地下水资源、缓解城市热岛效应等功能, 已成为海绵城市建设中关注的重点和热点。

该文所研究的大孔隙聚氨酯碎石 (PPM) 铺装的孔隙率可达 30% 以上, 透水性和吸水性能良好, 具有

高透水、环保、降噪、防雪抗冻、舒适美观等特性。Chen 等通过抗堵塞试验研究了 PPM 的耐久性, 发现传统大空隙沥青磨耗层 (OGFC) 的质量堵塞率为 25%, 而 PPM 的堵塞率仅为 5%, 具有优异的抗堵塞特性; 文献[6、7]分别研究了 PPM 的力学性能和抗冰除冰效果, 结果表明: PPM 的力学性能可以在一个较宽的范围内变化, 介于沥青混合料和水泥混凝土之间。此外, PPM 结冰试件的抗拉拔力和抗剪切力只有沥青混合料的 50% 和 55%, 破冰断裂功也只有沥青混合料的 50%, 表明 PPM 具有良好的抗冰除冰效果; 邵洪涛等对 PPM 的施工操作性进行统计, 发现对 PPM 透水路面的铺装, 每人每天可完成 200 m² 以上的铺装任

- *****
- [13] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [14] 陈子建. 沥青路面行驶质量研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 1996.
- [15] 张金喜, 苏蕊蕊, 王锋. 路面平整度与驾驶速度关系的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011(10).
- [16] 贾洪飞, 雒志才, 张泉雄, 等. 高速公路后评价油耗指标的确定与对比[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004(2).
- [17] 张占军, 王笑风. 沥青路面使用性能的双参数修正预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2007(5).
- [18] 张倩. 基于生命周期理论的沥青路面养护环境评价方法研究[D]. 北京工业大学硕士学位论文, 2015.
- [19] ISO 14040 Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Framework[S].
- [20] 亿科环境. 中国生命周期基础数据库 (Chinese Life Cycle Database, CLCD)[DB/OL]. (2012-09-05)[2014-10-30]. <http://www.ike-global.com/>.
- [21] 徐剑. 公路全寿命周期能耗分析与节能减排[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.

收稿日期: 2020-01-21(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51808084); 重庆市教委雏鹰计划研究项目(编号: CY180703); 湖北文理学院博士科研基金资助项目(编号: 2059047)

作者简介: 王元元, 男, 博士, 副教授. E-mail: wyy1005@seu.edu.cn