

基于生命周期评价的大掺量厂拌热再生效益分析

林育萍

(浙江省交通投资集团有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 在路面养护领域,随着厂拌热再生技术研究的日益深入,人们越来越关心该技术相较于常规罩面技术是否具有更好的环境效益和经济效益。文中从沥青路面生命周期能耗及碳排放的角度,将 20%、30% 废旧沥青混合料(RAP)掺量的厂拌热再生混合料与常规沥青混合料进行对比,分析三者应用于路面养护时的经济效益;在此基础上,增加 30% RAP 掺量(机械发泡)厂拌热再生混合料进行对比,分析其环境效益。结果表明,应用厂拌热再生技术和机械发泡技术可降低路面生命周期内能耗和 CO₂ 当量排放,且节约成本。

关键词: 工程经济;厂拌热再生;环境效益;经济效益;生命周期评价(LCA)

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0156-06

生命周期评价(LCA)是利用物质不灭定律、能量守恒原理计算产品生产及使用过程中能量消耗的方法。近年来,随着对资源节约和环境保护的重视,人们开始利用 LCA 研究沥青路面建设过程中的能耗及碳排放问题。王小凤等采用 LCA 计算了不同时间方案下路面全寿命周期内费用,建立了选择最优养护时机的效果费用比模型。张童童等基于 LCA 建立能耗和碳排放评价体系,对温拌再生技术的能耗及碳排放影响因素进行了敏感性分析。李冠男等采用 LCA 分析高速公路沥青路面的能耗与排放,认为将交通延误的环境影响计入养护维修阶段具有重要意义。张海涛等对 3 种沥青路面结构类型的 LCA 碳排放进行评估,分析了不同沥青结构层设计参数对碳排放特征化结果的影响。随着大掺量厂拌热再生沥青混合料应用的不断深入,其在整个生产和应用过程中的能耗、排放及经济效益亟待研究。该文选用废旧沥青混合料(RAP)掺量分别为 20%、30%、30%(机械发泡)的厂拌沥青混合料与常规沥青混合料进行对比,测算沥青路面养护过程中各环节的温室气体排放和能耗,并运用 LCA 理念对路面养护过程进行分解,分别考虑铣刨、原材料生产运输、混合料拌合、路面摊铺和压实等施工环节,对厂拌热再生各环节进行能耗、排放和经济效益评价,研究环境及经济效益最优的养护方案。

1 效益评价指标

结合中国环境污染治理的节能减排和宏观政

策,以能耗及 CO₂ 排放为主要测算指标,综合考虑自然资源消耗和废弃物循环利用等,确定效益评价指标如下:1) 标准能耗(MJ/t);2) CO₂ 排放当量(kg/t),用于评价温室气体的排放情况。采用上述 2 个指标进行量化评价,为循环利用和节能减排评价提供依据。

2 效益评价模型的边界条件

研究范围应尽量保证研究的广度、深度以实现研究目标,主要包括系统功能、系统边界和功能单位等。考虑集料、沥青等材料的生产过程,以沥青路面建设养护的能耗为调查对象。由于沥青的加工工艺较复杂,相关数据以引用为主。

根据国际标准化组织的建议,对环境影响小于 1% 的因素可忽略,但总共忽略的部分不应超过 5%。取舍规则如下:1) 根据 LCA 相关研究成果分析环境排放的影响,决定该数据是否忽略。2) 如果是原料消耗,收集其生产过程数据后才能对其环境影响进行判断,较为耗时。实际操作中,一般先从可得数据库中选用一个类似的原料数据估算其环境影响,如果影响较小,则可忽略;如果影响明显,则需收集相应生产数据。3) 只有在差异显著和较为粗略的情况下,才可直接忽略掺量较小的原料。

根据上述原则测算的上面层厂拌热再生沥青路面施工能耗系统的边界条件见图 1。沥青路面建设和使用的全寿命周期包括施工能源的生产,施工机械设备的生产和运输,基础设施的建设,原材料的生

产和运输,沥青混合料的拌合、运输、摊铺、碾压等,路面服役期的运营管理,路面养护维修。考虑到分析完整全寿命周期的工作量较大,仅分析全寿命周

期中的部分环节。因采用的测算方法原理相同,后期对路面全寿命周期过程的分析中采用同样的方法对其他环节能耗及碳排放进行测算。

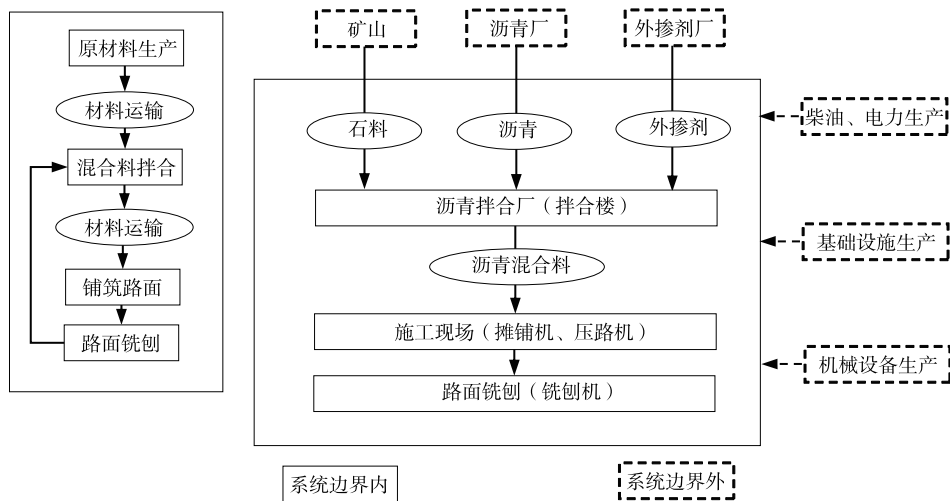


图 1 沥青路面施工能耗的系统边界

3 能耗及温室气体计算方法

3.1 能耗计算方法

沥青路面施工包括原路面铣刨、原材料运输和混合料拌合、运输、摊铺、碾压等环节,所消耗的能源包括电力、汽油、柴油、重油等。为便于分析工艺的能耗水平,根据标准煤、热量值换算系数对各种能源类型进行换算。假设在铺筑某段沥青路面时拌合、运输、摊铺、碾压等过程消耗表 1 所示能源,根据各种能源折合标准煤的转换系数,施工过程中消耗的标准煤当量为:

$$\begin{aligned} EM_{\text{拌合}} &= 61.61 \times 1.471\,4 + 339.69 \times 1.457\,1 + \\ &\quad 15\,031.81 \times 1.428\,6 + 9\,290.65 \times 0.122\,9 = \\ &\quad 23\,201.88\,\text{kg} \\ ET_{\text{运输}} &= 843.08 \times 1.457\,1 = 1\,228.45\,\text{kg} \\ EL_{\text{摊铺、碾压}} &= 929.43 \times 1.457\,1 = 1\,354.27\,\text{kg} \end{aligned}$$

表 1 施工过程中能源消耗量

能源类型	折合标准煤的转换系数	各施工过程的能源消耗量		
		拌合	运输	摊铺、碾压
汽油	1.471 4	61.61 kg	—	—
柴油	1.457 1	339.69 kg	843.08 kg	929.43 kg
重油	1.428 6	15 031.81 kg	—	—
电	0.122 9	9 290.65 kW·h	—	—

根据各种能源折合发热量的转换系数,采用同样的方法可计算得到施工过程中消耗的总热量。按

照上述方法将消耗的能源类型及用量折算为标准能耗,评价各施工工艺的能耗水平。

3.2 温室气体计算方法

温室气体主要包括 CO₂、HFCs、N₂O 等。为统一温室气体计算结果,采用 CO₂ 排放当量为度量单位,CO₂ 排放当量 = 质量 × 全球变暖潜能(GWP)。根据政府气候变化专门委员会(IPCC)的评估报告,温室气体的 GWP 值见表 2。

表 2 温室气体全球变暖潜能值

气体	寿命/年	特定时间跨度的 GWP 值		
		20 年	100 年	500 年
CO ₂	—	1	1	1.0
CH ₄	12	72	25	7.6
N ₂ O	114	289	298	153.0
CCl ₂ F ₂	100	11 000	10 900	5 200.0
CHClF ₂	12	5 160	1 810	549.0
CF ₄	50 000	5 210	7 390	11 200.0
C ₂ F ₆	10 000	8 630	12 200	18 200.0
SF ₆	3 200	16 300	22 800	32 600.0
NF ₃	740	12 300	17 200	20 700.0

消耗能源释放的温室气体主要有 CO₂、CH₄、N₂O。为便于统一能源质量度量,将发热量排放系数换算为相应质量排放系数。以原油为例,CO₂ 排放数据为 73 300 kg/TJ,平均低位发热量系数为 41 816 kJ/kg,计算得发热 1 TJ 原油的质量为

23 914.291 kg。将其代入 IPCC 官方数据得到单位质量原油 CO₂ 排放系数为 73 300/23 914.291 = 3.065。如果是碳排放,则要乘以原子量系数 12/44,

为 0.836。依据该方法得到的单位质量 CO₂、CH₄、N₂O 排放系数见表 3。电力排放系数从 LCA 基础数据库中选取。

表 3 各种能源单位质量温室气体排放系数

能源类型	发热 1 TJ 的能源质量/kg	CO ₂ 排放系数	CH ₄ 排放系数/10 ⁻⁴	N ₂ O 排放系数/10 ⁻⁵
汽油	23 218.02	2.984 8	1.292 1	2.584 2
柴油	23 445.56	3.160 5	1.279 6	2.559 1
重油	23 914.29	3.236 6	1.254 5	2.509 0
电力	华东电网水平	0.927 kg/(kW·h)	27.300 0	1.440 0
	全国平均水平	0.899 kg/(kW·h)	27.500 0	1.410 0

根据排放系数,可分别计算得到新铺筑 200 m² 沥青路面时沥青混合料拌合、运输、摊铺、碾压等施工过程中各种温室气体排放量。其中 CO₂ 排放为:

$$CM_{\text{拌合}} = 61.61 \times 2.984\ 8 + 339.69 \times 3.160\ 5 + 1\ 5031.81 \times 3.236\ 6 + 9\ 290.65 \times 0.927 = 58\ 521.87\ \text{kg}$$

$$CT_{\text{运输}} = 843.08 \times 3.160\ 5 = 2\ 664.55\ \text{kg}$$

$$CL_{\text{摊铺、碾压}} = 929.43 \times 3.160\ 5 = 2\ 937.46\ \text{kg}$$

采用相同的方法计算甲烷和 N₂O 的排放量并将各种温室气体排放量按 GWP 转换为温室气体排放总量(CO₂ 排放当量):

$$GM_{\text{拌合}} = \sum G_i \times g_i = 58\ 521.87 \times 1 + 27.30 \times 25 + 0.521\ 2 \times 298 = 59\ 359.69\ \text{kg}$$

$$GT_{\text{运输}} = \sum G_i \times g_i = 2\ 664.55 \times 1 + 0.107\ 9 \times 25 + 0.021\ 58 \times 298 = 2\ 673.68\ \text{kg}$$

$$GL_{\text{摊铺、碾压}} = \sum G_i \times g_i = 2\ 937.46 \times 1 + 0.118\ 9 \times 25 + 0.023\ 79 \times 298 = 2\ 947.52\ \text{kg}$$

式中: G_i 为某种温室气体的排放量(kg); g_i 为某种温室气体的 GWP 值。

根据温室效应 GWP 值、气体排放系数,将各环节施工消耗的能源类型和用量折算成 CO₂ 排放当量,评价各施工工艺的碳排放水平。

4 效益计算过程与分析

4.1 研究对象

厂拌热再生是将旧沥青路面经过翻挖后运回拌和厂再集中破碎,根据路面质量要求进行配合比设计,确定 RAP 添加比例,将再生剂、新沥青材料、新集料等在拌合机中按一定比例重新拌合成新的混合料,铺筑形成再生沥青路面。常规罩面是在原路面满足结构强度要求的情况下,为修复路面病害,改善

路面使用性能,铺筑一定厚度加铺层的养护措施。常规罩面的各施工环节与新建沥青路面一致,而厂拌热再生相较于新建沥青路面增加了原路面铣刨、铣刨料运输等环节。针对厂拌热再生各施工环节作如下规定:

(1) 铣刨过程。根据调查,如采用典型的铣刨宽度为 2 m 的铣刨机对旧沥青路面进行铣刨,发动机满负荷油耗为 124 L/h(柴油密度为 0.84 kg/L)。假设铣刨机功率为 80%,在铣刨深度为 12 cm 时,铣刨速度约 4 m/min。

(2) 运输过程。将旧路面的铣刨料从施工现场运输至混合料拌合场(即 RAP 运输),运输距离与新料运输距离相同,为 80 km。

(3) 再生混合料生产过程。采用意大利进口博纳帝单滚筒再生设备,RAP 与新集料共同加热,故生产再生混合料与常规混合料的能耗基本无差别,以相同能耗计算。

(4) 混合料生产、摊铺、碾压。沥青路面常规罩面施工中,沥青混合料的生产、摊铺、碾压与新建路面相同。

4.2 环境效益分析

环境效益的原始数据为筑路过程中各环节(包括原材料生产、原材料运输、混合料拌合、新旧料运输、摊铺、碾压、铣刨等环节)消耗的能源和产生的排放。根据试验路情况作如下假设:厂拌热再生混合料应用于 4 cm 上面层,混合料类型为改性沥青 AC-13,油石比为 4.8%,RAP 料运距为 80 km,原材料运距为 150 km,混合料运距为 80 km。对 20%、30%、30%(机械发泡)RAP 掺量的厂拌热再生和常规罩面的能源、温室气体排放进行计算。

原材料包括改性沥青、粗集料、细集料和铣刨料,其中原材料数据从欧洲沥青协会的沥青数据库、中国

CLCD 数据库等获得。混合料拌合、运输、摊铺和碾压等环节中的能源消耗采用中国 CLCD 数据库中的数据;设备的能耗数据通过调研获得;施工过程的能耗参照相关资料计算得到。原材料及施工过程中燃料、设备的能耗和 CO₂ 排放当量分别见表 4、表 5。

表 4 原材料的能耗和 CO₂ 排放当量

材料	能耗/(MJ·t ⁻¹)	CO ₂ 排放当量/(kg·t ⁻¹)
面层铣刨料	30.80	2.090
改性沥青	5 412.22	323.035
集料	31.82	2.425

表 5 施工设备及燃料的能耗和 CO₂ 排放当量

施工 工艺	效率/(t·h ⁻¹)	参数		燃料消耗/(kg·t ⁻¹)				能耗/ (MJ·t ⁻¹)	CO ₂ 排放当量/ (kg·t ⁻¹)
		额定功 率/kW	油耗/ (kg·h ⁻¹)	柴油	重油	汽油	电		
拌合	240	700	—	—	6.132	—	2.917	256.000 0	19.800 0
运输	240	—	0.252	0.252 0	—	—	—	0.543 8	0.040 3
摊铺	240	130	27.090	0.205 8	—	—	—	16.510 0	1.223 0
碾压	钢轮	240	—	21.300	0.266 3	—	—	3.785 0	0.280 5
	胶轮	240	—	30.620	0.382 8	—	—	5.441 0	0.403 3
其他	240	—	—	—	—	0.038 325	—	8.445 0	0.625 9

注:其他是指装载机、筛料机等设备,因其油耗比主要施工过程的低,通过调研给出一个平均值。

根据原材料及施工各环节的能耗和 CO₂ 排放当量原始数据,采用能耗和 CO₂ 排放当量计算方法得到常规罩面、不同 RAP 掺量厂拌热再生的能耗及 CO₂ 排放当量(见表 6、图 2、图 3)。

由表 6 可知:能耗、排放降低主要发生在原材料的生产和运输环节。此外,使用机械发泡温拌技术时,除原材料生产和运输环节外,混合料拌合过程的能耗和 CO₂ 排放也有所降低。从 LCA 评估环境效益来看,相比常规罩面技术,厂拌热再生技术具有更好的节能减排效益;在同等 RAP 掺量条件下,机械

发泡温拌技术的节能减排效益更明显。

由图 2、图 3 可知:相较常规罩面技术,厂拌热再生技术的能耗及 CO₂ 排放当量都有所降低;RAP 料掺量为 20%、30% 时,其能耗分别降低 7.21%、10.65%,CO₂ 排放分别降低 6.46%、9.48%。

4.3 经济效益计算分析

为综合评价不同 RAP 掺量厂拌热再生技术的效益,对不同掺量厂拌热再生技术进行费用测算分析。进行费用分析的基础是各种原材料、人力资源的单价。通过养护施工定额确定资源、台班消耗,从

表 6 各养护措施的能耗及温室气体排放

施工 工艺		能耗/(MJ·t ⁻¹)				CO ₂ 排放当量/(kg·t ⁻¹)			
		常规 罩面	厂拌热再生			常规 罩面	厂拌热再生		
			20%RAP 掺量	30%RAP 掺量	30%RAP 掺量 (机械发泡)		20%RAP 掺量	30%RAP 掺量	30%RAP 掺量 (机械发泡)
原材料 生产	改性沥青	259.79	207.83	181.85	181.85	15.51	12.40	10.85	10.85
	集料	30.29	24.23	21.20	21.20	2.28	1.82	1.60	1.60
	面层(80 km)	—	23.45	35.18	35.18	—	1.59	2.39	2.39
原材料运输(150 km)		81.57	65.26	58.28	58.28	6.05	4.84	4.32	4.32
混合料拌合		256.00	256.00	256.00	204.80	19.80	19.80	19.80	15.84
混合料运输(150 km)		43.50	43.50	43.50	43.50	3.22	3.22	3.22	3.22
CO ₂ 当量 1		1.22	1.22	1.22	1.22	16.51	16.51	16.51	16.51
路面施工	CO ₂ 当量 2	0.68	0.68	0.68	0.68	9.23	9.23	9.23	9.23
	CO ₂ 当量 3	0.63	0.63	0.63	0.63	8.45	8.45	8.45	8.45
合计		673.80	622.80	598.54	547.34	81.05	77.86	76.37	72.41

注:CO₂ 当量 1 为 16.51 kg/t;CO₂ 当量 2 为 9.23 kg/t;CO₂ 当量 3 为 8.54 kg/t。

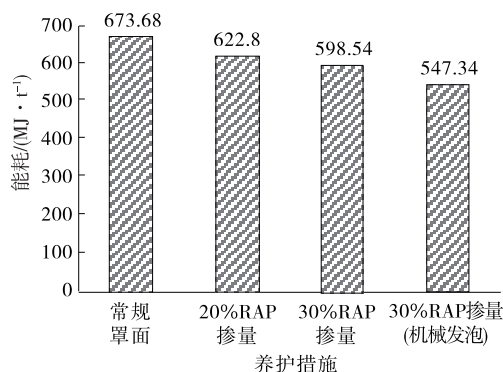


图2 不同养护措施所产生的能耗对比

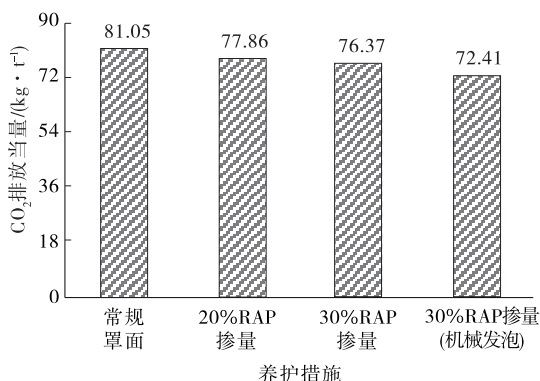


图3 不同养护措施所产生的CO₂排放当量对比

而测算单位面积路面的成本费用。测算费用的基础价格数据来源于浙江省交通工程管理中心发布的交通建设材料指导价格(见表7)。

表7 浙江省交通建设材料指导价格(2021年10月)

材料名称	价格
埃索改性沥青	4 925 元/t
汽油	10 226 元/t
柴油	8 602 元/t
中粗砂(杭州)	305 元/m³
石屑(杭州)	164 元/m³
碎石(杭州)	207 元/m³
沥青路面玄武岩碎石(杭州)	415 元/m³
矿粉(杭州)	246 元/t
人工	127.66 元/工日
材料运费(超过 25 km)	0.65 元/(t·km)

注:材料价格为批发价,不含运费。

针对采用厂拌热再生技术的 AC-13 沥青路面,根据各施工工序的台班及单价定额、JTG/T B06—02—2018《公路工程预算定额》定额数据库计算费用组成。采用前述假设条件,根据常规施工工艺条件,计算不同 RAP 掺量下厂拌热再生混合料的费用(不包括人工费用),分析其经济性(见表8、图4)。

表8 沥青路面费用分析 元/t

费用组成	不同养护措施下费用		
	常规罩面	20%RAP 掺量	30%RAP 掺量
沥青	267.36	244.08	232.44
铣刨	0.00	16.84	20.20
破碎筛分	0.00	0.24	0.36
集料	93.21	93.29	79.44
原材料运输	53.60	53.60	53.60
(80 km)			
混合料拌合	35.43	35.43	35.43
混合料运输	53.60	53.60	53.60
(80 km)			
摊铺	3.73	3.73	3.73
碾压	2.14	2.14	2.14
其他工程费(4.45%)	22.65	22.38	21.40
间接费用(2.48%)	13.19	13.03	12.46
利润(7%)	38.14	37.68	36.04
税金(3%)	17.49	17.28	16.52
合计	600.54	593.32	567.36

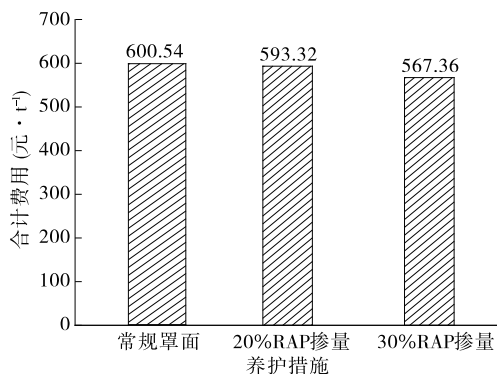


图4 不同养护措施下沥青路面费用

由图4可知:不同养护手段的养护成本费用有一定差距,同时不同 RAP 掺量对成本费用有一定影响。在合理 RAP 掺配范围内,厂拌热再生相对于常规罩面具有较明显的经济效益,RAP 掺量为20%、30%时,其费用成本分别降低1.20%、5.53%。

5 结论

基于 LCA 理念,结合厂拌热再生技术的 RAP 掺量、混合料性能及试验路实体工程,从各施工环节分析不同 RAP 掺量厂拌热再生技术的环境效益和经济效益。通过厂拌热再生技术边界条件、能量消耗及温室气体排放量的统计分析,论证该养护技术的环境效益;通过对常规罩面、不同 RAP 掺量(分

别为20%和30%)厂拌热再生及机械发泡(RAP掺量为30%)厂拌热再生的能耗和温室气体排放的计算,对厂拌热再生技术的节能减排效益进行分析;通过测算单位面积路面的成本费用,分析其经济效益。主要结论如下:

(1) 从LCA评估,厂拌热再生技术相比常规罩面技术具有更好的节能减排效益和经济效益。

(2) RAP掺量从20%增加到30%时,厂拌热再生的节能减排效益和经济效益更明显。

(3) 同等RAP掺量条件下,机械发泡厂拌热再生技术的节能减排效益明显。

参考文献:

- [1] 王爱飞.厦门市住宅产业化发展策略研究[D].厦门:华侨大学,2015.
- [2] 王玄,何露,陈武勇.生命周期评价在制革业中的应用与展望[J].西部皮革,2009,31(17):13-18.
- [3] 王小凤,徐磊磊.基于生命周期法(LCA)的沥青路面预防性养护时机研究[J].城市建设理论研究(电子版),2012(34):1-4.
- [4] 张童童,高阳,贺显威,等.基于LCA的温拌再生沥青路面建设期节能减排效果研究[J].公路,2019(4):287-293.
- [5] 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):269-275.
- [6] 张海涛,孟良,吕丽华.基于LCA的沥青路面设计参数对碳排放的影响[J].公路交通科技,2018,35(2):1-7.

- [7] 温肖博.泡沫温拌沥青混合料性能研究与环境影响评价[D].南京:东南大学,2016.
- [8] 高莉,朱浩然,蔡海泉.沥青路面再生技术环境效益定量评价[J].中外公路,2016,36(4):23-27.
- [9] 吴星.建筑工程环境影响评价体系和应用研究[D].北京:清华大学,2005.
- [10] 谭建伟.产品生命周期评价(LCA)及其在轿车产品中的应用[D].成都:四川大学,2005.
- [11] 李畅.江西省某铜尾矿资源化过程生命周期评价研究[D].赣州:江西理工大学,2020.
- [12] 张永利.橡胶沥青技术的节能减排效果研究[J].交通世界,2017(17):154-156.
- [13] 陈珺,吕正龙,刘开琼.基于LCA的橡胶沥青再生路面节能减排效果研究[J].公路,2016(5):204-211.
- [14] 兰勇烽,龚余富,洪盛祥,等.SMA路面就地热再生全寿命周期综合养护效益分析[J].现代交通技术,2020,17(5):5-12.
- [15] 金莉苹.印度经济增长中的能源消费及其可持续性研究[D].昆明:云南大学,2018.
- [16] 王素凤.中国碳排放权初始分配与减排机制研究[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [17] 刘恩周.非稀土上转换发光材料改性纳米TiO₂可见光催化还原CO₂研究[D].西安:西北大学,2012.
- [18] 崔颖.典型沥青路面热再生能耗及温室气体排放计算分析[J].山西建筑,2015,41(30):130-132.

收稿日期:2021-12-31

(上接第155页)

的下降而增多,通过上述分析,结合实际路面费用使用情况,路面状况指数为“良”时采用微表处养护可获得高效益。

4 结论

对于国道314线巴州境内轮台县野云沟至拉依苏工业园区段,在通车第3年采取微表处预养护措施的费用效益比最大,即投入的资金最少;路面状况指数为“良”时,越早实施微表处养护效益越高。由于路面进行预养护前后各指标在不同年限的值会受到当地实际交通量状况的影响,上述结论仅适用于该路段。

参考文献:

- [1] 施彦,凌天清,崔立龙,等.沥青路面预防性养护评价标

- 准及决策优化研究[J].公路交通科技,2020,37(10):25-34+56.
- [2] 董元帅,周绪利,侯芸,等.基于寿命周期的沥青路面养护时机决策优化[J].公路,2020(4):325-331.
- [3] 姚玉玲,任勇,陈拴发.沥青路面的预防性养护时机[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(6):34-38.
- [4] 许德录.沥青路面预防性养护时机的确定方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015(11):12-15.
- [5] 王笑风.沥青路面最佳预防性养护时机决策模型[J].长安大学学报(自然科学版),2011,31(3):7-12.
- [6] 曹明明,岳建洪,陈金蓉,等.沥青路面预防性养护决策指标体系分析[J].公路与汽运,2021(1):140-143+147.
- [7] 孔令坤,李雪萍,冯志强.超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):9-15.

收稿日期:2021-07-30