

基于全寿命周期的光催化路面环境效益分析^{*}

邹毅松¹, 胡雷^{1,2}, 徐亦冬², 杜坤^{1,2}, 倪晨啸², 周佳琰², 陈永康²

(1.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2.浙江大学 宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 近些年, 由于汽车使用量的大幅增加, 中国大气环境急剧恶化。光催化砼路面作为一种新型环保路面, 为解决汽车尾气污染开辟了一条新途径。文中运用全生命周期模型, 对普通沥青砼道路、掺入式光催化沥青砼道路和涂覆式光催化沥青砼道路在建设、使用、维护等阶段的费用进行对比分析, 并在光催化道路全生命周期中模拟其能去除的汽车尾气量, 折算为污染治理费用, 对光催化道路成本差与污染治理费用进行比较, 结果显示光催化道路具有显著的环境效益。

关键词: 工程经济; 光催化路面; 全生命周期; 环境效益; 沥青砼

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)02-0186-04

TiO₂等光催化剂在光照条件下可降解污染物, 但光催化剂对污染物的降解速率受光照强度、湿度、温度等外部条件的影响。相关研究表明, TiO₂的添加对沥青砼道路流变性能、老化流变性能的影响很小, 高温稳定性和剪切模量等路用性能均能满足道路使用要求。将光催化剂运用到道路工程中, 常见的添加方式有掺入式与涂覆式。该文主要对比在满足道路使用性能条件下两种添加方式光催化沥青砼与普通沥青砼路面的环境效益。

1 方案设计

主要比较普通沥青砼、掺入式和涂覆式光催化沥青砼路面在全生命周期中的成本, 以对 NO 的降解量作为经济效益。掺入式: 将 TiO₂与矿粉混合使用, 使 TiO₂处于路面的上表面, 更好地与空气、尾气接触, 为加大催化效果, 可在集料表面包裹 TiO₂。涂覆式: 将常规道路涂料、固化剂和 TiO₂按合适的比例调和均匀后涂覆在道路表面, 令光催化剂和汽车尾气充分接触, 将光催化作用效果最大化。

根据相关资料, TiO₂粉末掺加比例达到 50% 时, 催化效率才有显现, 但进一步提高掺量会带来造价过高的问题, 出于经济性考虑, 将 TiO₂粉末掺量定为 50%。对于涂覆式光催化沥青砼, 将光催化剂与涂覆粘结剂分别按 3%、5%、8%、10%、15%、20%的比例混合进行试验, 发现随着光催化剂比例的上升, 催化效率得到一定程度提升, 但到达一定比

例(8%)后提升效果不明显。因此, 出于经济性考虑, 将涂料的光催化剂含量定为 8%。

2 成本分析

2.1 施工用量对比

试验段为 20 m 双向四车道二级公路, 长度 100 m。假设沥青砼面层厚度为 18 cm, 按照当前盛行的“4+6+8”体系分配, 上面层、中面层、下面层厚度分别为 4、6、8 cm。有资料显示, 在多孔沥青砼表面 7~8 mm 范围内掺入 50% 以内的 TiO₂微粉可制成光催化沥青砼。因此, 这里主要研究路面的上面层, 假定上面层主要由 AC-16 沥青砼建成。采用由蒋应军等设计的 AC-16 沥青砼(该沥青砼路用性能良好, 且能节省 8%~10% 沥青用量), 密度为 2.5 g/cm³, 最佳油石比为 4.56%, 各集料占比为 9.5~19 mm: 4.75~9.5 mm: 2.36~4.75 mm: 机制砂: 矿粉=27: 26: 17: 26: 4。

根据试验段情况, 该路段需耗费的 AC-16 沥青砼为 80 m³, 砼质量为 200 t(见表 1)。

表 1 试验段 AC-16 普通沥青砼路面原材料用量

材料名称	用量/t	材料名称	用量/t
沥青	8.72	9.5~19 mm	51.65
机制砂	49.73	碎石 4.75~9.5 mm	49.73
矿粉	7.65	2.36~4.75 mm	32.52

掺入式沥青砼用 TiO₂代替一半矿粉, 集料比例

^{*} 基金项目: 宁波市自然科学基金项目(2015A610297); 国家科技支撑计划项目(2015BAL02B03); 国家大学生创新创业项目(201513022012)

除矿粉外与普通沥青砼相同,矿粉用量为 3.82 t, TiO₂用量为 3.82 t。

涂覆式沥青砼的集料用量与普通砼相同,只是在表面涂覆 TiO₂涂层。对于 AC-16 沥青砼,当涂覆量过小时,涂料极易起皮剥落;涂覆量过大时,路面抗滑能力又不能达到道路使用要求。经过剥落度研究和抗滑性能研究,将 AC-16 的涂料上限定为 500 g/m²,下限定为 350 g/m²,考虑到抗滑性能的重要性,试验段选用 350 g/m²。涂料用量为 20 m × 100 m × 0.35 kg/m² = 700 kg; TiO₂用量为 56 kg;涂料载体粘结剂用量为 644 kg。

2.2 施工成本对比

根据相关资料,10# 石油沥青的价格为 3 857 元/t、9.5~19、4.75~9.5、2.36~4.75 mm 碎石的价格均为 52.78 元/t,机制砂为 60.90 元/t,矿粉为 310 元/t;锐钛型 TiO₂的价格约为 8 600 元/t;涂料载体粘结剂的价格为 8 元/kg。计算得试验段 AC-16 普通沥青砼路面各材料的成本见表 2,试验段普通沥青砼路面总成本为 46 261.34 元。

表 2 试验段 AC-16 普通沥青砼路面各材料的成本

材料名称	成本/元	材料名称	成本/元
沥青	33 633.04	9.5~19 mm	2 879.68
机制砂	3 028.56	碎石 4.75~9.5 mm	2 629.23
矿粉	2 371.50	2.36~4.75 mm	1 719.33

掺入式光催化沥青砼是将 TiO₂代替一部分矿粉,其他集料的级配及比例与普通沥青砼相同。其 TiO₂掺量为 50%,矿粉为 3.82 t, TiO₂为 3.82 t,则试验段 AC-16 掺入式沥青砼道路的施工成本为 77 926.04 元。

涂覆式光催化沥青砼道路是在普通沥青砼道路的表面涂覆一层 TiO₂作为光催化材料, TiO₂的成本为 481.60 元,涂料载体粘结剂的成本为 5 152.00 元,则试验段 AC-16 涂覆式光催化沥青砼道路的原料成本为 51 894.94 元。3 种道路的建设成本对比见表 3。

表 3 试验段 AC-16 沥青砼路面建设成本对比

路面类型	建造成		成本差	
	本/元	价/元	例/ %	
普通沥青砼路面	46 261.34	—	—	
光催化沥青砼路面	掺入式	77 926.04	31 664.7	68.4
	涂覆式	51 894.94	5 633.6	12.2

2.3 道路养护成本对比

假设试验段为二级公路,使用年限为 14 年。掺入式光催化沥青砼道路的寿命最长为 7 年,即第 8 年需重新修建上面层才能保证催化效果。对于涂覆式光催化沥青砼道路的寿命,采用推论法,通过了解道路标线的寿命推论其涂层寿命。根据相关文献,不同路况下标线的寿命为 3~36 个月,热熔标线和预成标线的寿命超过 12 个月。对于涂覆式光催化沥青砼路面,涂料本身并未采用上述寿命较长的热熔法或预成标线法,其寿命不可能超过 12 个月,而且试验段处于车流量较大的区域,寿命还会有一定减少。综上,暂定涂覆式光催化沥青砼路面的使用寿命为 8 个月,即每 8 个月需重新铺设一次光催化涂层,以保证光催化效果。

普通沥青道路投入使用 3~5 年后就会出现路面破坏。假设试验段的破坏临界点为 5 年,并在其全生命周期中需修补路面的 54%;对于路面破坏,假设其为按年平均分布,即对于生命周期 14 年的道路,每年需修补道路总面积的 6%。对于掺入式光催化沥青砼道路,由于第 8 年需重建道路,其修补合计为道路总面积的 24%。对于涂覆式光催化沥青砼道路,其不仅要考虑每年的道路修补成本,还需每 8 个月对光催化涂层进行再覆盖。

道路修补时需将面层破损部分凿除。假设凿除部分为面层以下 20 mm,面层修补材料为原建设材料 AC-16 沥青砼混合料。根据 AC-16 沥青砼级配,得到各类型路面修补所需材料用量(见表 4)。

结合上述材料价格,计算得到各类型道路维护阶段的实际费用支出见表 5。

表 4 试验段 AC-16 沥青砼路面修补所需材料用量

路面类型	沥青	碎石			机制砂	矿粉	TiO ₂	涂料载体 粘结剂
		9.5~19 mm	4.75~9.5 mm	2.36~4.75 mm				
普通沥青砼路面	2.36	13.94	13.43	8.78	13.43	2.07	—	—
光催化沥青砼路面	掺入式	1.05	6.20	5.97	5.97	0.46	0.460	—
	涂覆式	2.36	13.94	13.43	8.78	13.43	1.176	13.524

表 5 试验段 AC-16 沥青砼路面养护所需材料费用对比

元

路面类型	沥青	碎石			机制砂	矿粉
		9.5~19 mm	4.75~9.5 mm	2.36~4.75 mm		
普通沥青砼路面	9 102.52	735.75	708.84	463.41	817.89	641.7
光催化沥青砼路面	掺入式	4 049.85	327.24	315.09	205.84	363.57
	涂覆式	9 102.52	735.75	708.84	463.41	817.89

由表 5 可以看出:AC-16 普通沥青砼道路的维护成本为 12 467.11 元。掺入式光催化沥青砼道路的 TiO_2 费用为 3 956 元,则其道路维护成本为 9 360.19 元;另外,掺入式光催化沥青砼道路在第 8 年需重新建设,其维护成本还需加上再次建设的成本 77 415.74 元。涂覆式光催化沥青砼道路的使用寿命和普通沥青道路一样为 14 年,且道路面层内部材料相同,期间的道路修补费用同 AC-16 沥青砼道路,为 12 467.11 元;还需加上涂料覆盖 TiO_2 费用 10 113.6 元、涂料载体粘结剂费用 108 192 元。各类型道路维护成本对比见表 6。

表 6 试验段 AC-16 沥青砼路面维护成本对比

路面类型	维护成本/元	成本差/元	超出比例/%
普通沥青砼路面	12 467.11	—	—
光催化沥青 掺入式	86 775.93	74 308.82	596
砼路面 涂覆式	130 772.71	118 305.60	949

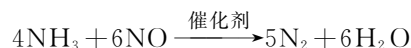
3 环境效益分析

3.1 使用阶段降解尾气

在理想条件下,假设汽车产生的尾气 100% 被光催化路面催化,且有足够的 NO 提供,已达到上文所假设的 NO 吸收效率。在两组光催化道路的 14 年中,被吸收的 NO 量如下(14 年中有 4 年为闰年,全年按 366 d 计算):掺入式光催化沥青砼道路(假

定其第 8 年重建耗费 30 d,14 年中各项维修耗费 60 d)为 434.07 t;涂覆式光催化沥青砼道路(假定每 8 个月重新铺设一次涂料层,每次花费 8 d,14 年中各项维修耗费 60 d)为 717.66 t。

运用 SCR 法进行大气处理时,依靠氨气(NH_3)作为还原剂去除 NO 是较普遍的方式。相关化学方程式如下:



根据分子式的摩尔质量, NH_3 为 17 g/mol, NO 为 30 g/mol,可得到两种道路寿命周期内所吸收的 NO 量。在实验室条件下去除等量 NO 所需 NH_3 质量如下:掺入式光催化沥青砼道路为 $434.07 \text{ t} \times 17 \text{ g/mol} \times 4 \div 30 \text{ g/mol} \div 6 = 163.98 \text{ t}$;涂覆式光催化沥青砼道路为 $717.66 \text{ t} \times 17 \text{ g/mol} \times 4 \div 30 \text{ g/mol} \div 6 = 271.12 \text{ t}$ 。

根据市场参考价,氨气的价格约为 363 元/kg,得到 SRC 法的去除成本如下:掺入式光催化沥青砼道路为 59 524 740 元,涂覆式光催化沥青砼道路为 98 416 560 元。

3.2 环境效益对比

为了使对比更加直观,将上述数据运用时间价值进行换算,折现率取 8%,公式为 $F = P(F/P, 8\%, N)$ 。将 3 种路面的建造成本、养护及 SCR 技术成本采用该公式计算,得到各类道路第 14 年年末终值(见表 7)和环境效益(见表 8)。

表 7 道路建设维护成本及 SCR 第 14 年年终终值

元

路面类型	费用类别	费用	第 14 年年终终值
普通沥青砼路面	第二次建设	46 261.34	135 878.51
	7~14 年维护	1 439.57	17 976.71
掺入式光催化沥青砼路面	第一次建设	77 926.04	228 883.87
	第二次建设	77 926.04	133 551.54
	第 6 年年中维护	2 340.05	4 501.19
	第 7 年年中维护	2 340.05	4 167.77
	第 13 年年中维护	2 340.05	2 626.40
	第 14 年年中维护	2 340.05	2 431.85

续表 7			元
路面类型	费用类别	费用	第 14 年年终终值
涂覆式光催化沥青砼路面	涂料	8 560.66	207 295.70
	建设费用	51 894.94	152 425.49
SCR 技术	掺入式降解 NO	4 251 767.00	102 956 199.00
	涂覆式降解 NO	7 029 754.00	170 224 932.00

表 8 各类道路的环境效益对比

路面类型		建设维护 成本/元	成本差 额/元	处理污染 费用/元	环境效益/ 元	效益与成本 对比/%
普通沥青砼路面		153 855.22	—	—	—153 855.22	0
光催化沥青砼路面	掺入式	376 162.62	222 307.40	102 956 199	102 733 892.00	27 370
	涂覆式	359 721.19	205 865.97	170 224 932	170 019 067.00	47 264

4 结论

通过对比,得到光催化剂掺入式沥青砼道路与涂覆式沥青砼道路造价分别超出普通沥青砼道路造价的 68.4%、12.2%;道路维护费用分别超出普通沥青砼道路的 596%、949%。但其带来的环境效益分别为两者成本的 273.7、472.64 倍。该试验段假设中未考虑光催化剂对其他污染物的吸收带来的环境效益。综上所述,光催化道路带来的环境效益远高于其成本。

参考文献:

[1] Ballari M M, Yu Q L, Brouwers H J H. Experimental study of the NO and NO₂ degradation photocatalytically active concrete[J]. Catalysis Today, 2011, 161(1).

[2] 赵路.降解 NO_x 纳米 TiO₂ 添加剂对沥青流变性能的影响[J].中外公路, 2013, 33(6).

[3] 陈希.纳米 TiO₂ 沥青混凝土的路用性能和对汽车尾气降解性能研究[D].长沙:中南大学, 2014.

[4] 张增平.纳米改性沥青技术的研究进展[J].化工新型材料, 2016(2).

[5] 魏鹏.可降解汽车尾气的沥青混合料路面研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.

[6] 魏坤霞,史庆南,魏伟. TiO₂ 光催化剂材料的应用研究[J].硅酸盐通报, 2002(2).

[7] 蒋应军,张宜伟,李宇方,等.一种 AC—16 沥青混合料的设计方法[P].中国专利:201310049706.2, 2013—03—29.

[8] 齐从军,陈华鑫,吴艳玲.对我国公路设计中几个问题的分析与建议[J].江苏建筑职业技术学院学报, 2002, 2(3).

[9] 陈庆,李兴文.一种路面汽车尾气净化剂及其制备方法[P].中国专利:201310592904.3, 2014—03—05.

[10] 董凯.城市道路标线有效寿命分析[J].交通标准化, 2009(15).

[11] 胡江碧.道路工程全寿命成本分析方法及案例[M].北京:科学出版社, 2012.

[12] 王辉,任冶,刘成虎.零维纳米材料对沥青性能影响的研究综述[J].公路与汽运, 2016(1).

[13] 钱国平,朱俊文,周大垚.纳米 TiO₂ 涂层在沥青路面及稀浆封层中降解汽车尾气的效果对比试验研究[J].公路与汽运, 2016(3).

[14] 谢香莲.沥青路面结构设计方法研究与发展[J].公路与汽运, 2016(6).

[15] 白志军.路面预防性养护中超薄磨耗层的性能评估与寿命预测[J].公路与汽运, 2015(4).

[16] 张文刚. TiO₂ 催化分解汽车尾气沥青路面材料研究[D].西安:长安大学, 2014.

[17] 王迪,刘大路,王涛.纳米 SiO₂/POE 复合改性沥青路用性能研究[J].公路交通科技:应用技术版, 2016(8).

[18] 林志娟,熊小华,许家雄.高速公路低碳交通运营管理探析[J].公路与汽运, 2015(2).

[19] 刘大梁,姚洪波,包双雁.纳米碳酸钙和 SBS 复合改性沥青的性能[J].中南大学学报:自然科学版, 2007, 38(3).

[20] 汲敏,郭佳.淮兴高速公路重载长寿命沥青砼路面施工技术[J].公路与汽运, 2015(5).

[21] 黄维蓉.纳米层状硅酸盐改性沥青路用性能试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2009, 28(2).

[22] 龙翔.SBS—橡胶粉—纳米 SiO₂ 三元复合改性沥青修补料的制备与性能研究[D].长沙:湖南大学, 2011.