

# ECA 罩面沥青路面就地热再生技术的可行性分析

李明亮<sup>1</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 汪鑫<sup>2</sup>, 曹东伟<sup>3</sup>, 平树江<sup>3</sup>

(1.交通运输部公路科学研究院, 北京市 100088; 2.大连理工大学; 3.中路高科(北京)公路技术有限公司)

**摘要:**为分析铺设 2.5 cm ECA-10 罩面的 SMA-13 上面层采用就地热再生技术进行养护维修的可行性,基于 6.5 cm 翻松深度,采用室内试验和工程实践相结合的方法,对整形再生和复拌再生两种就地热再生方案开展了再生沥青混合料的配合比设计、路用性能验证等研究,并结合路面现场的试验检测结果,论证了不同再生方案的适用性。研究表明:室内拌制再生沥青混合料,复拌再生方案由于新沥青混合料掺量大于整形再生方案,对矿料级配优化和沥青还原的效果更好,因此其路用性能要优于后者。但是对于现场取样的再生沥青混合料,复拌再生方案受限于现有施工技术条件,存在加热效果不好、拌和不均匀等问题,其路用性能整体上差于整形再生方案。

**关键词:**道路工程; ECA 罩面; 就地热再生; 整形再生; 复拌再生

易密实沥青混凝土(以下简称 ECA)罩面是一种骨架—密实结构类型的超薄磨耗层,近年来在中国不同地区均有一定规模的工程应用。ECA 罩面用于沥青路面罩面时可以有效填补车辙,提高旧路面的高温稳定性能。但是 ECA 罩面的厚度较薄,例如 ECA-10 罩面一般厚度仅为 2.5 cm,故其作为一种预防性养护措施,主要作用是作为功能层填补车辙、恢复路表抗滑性能等,而非起到主要承载作用的结构层,这就意味着如果在 ECA 罩面上直接加铺罩面,则 ECA 层有可能会以薄弱夹层的形式存在于面层结构中。随着 ECA 罩面设计使用年限的临近,以及旧路面性能进一步衰减,ECA 罩面沥青路面出现了车辙、裂缝等病害,如何科学地对含 ECA 罩面的旧路面进行养护维修还处于前期探索阶段,相关研究参考较少。

就地热再生作为一种绿色环保的养护技术,近年来在沥青路面养护工程中得到大规模的应用。沥青路面就地热再生施工前需要确定再生剂和新沥青混合料(以下简称新料)的掺量,以及是否需要掺加新沥青,并以此完成再生沥青混合料的配合比设计;施工过程中旧路面加热则是影响就地热再生施工质量最为关键的工艺。张友华、马登成、徐静等分别对普通沥青路面的旧沥青混合料(以下简称旧料)矿料级配优化、沥青还原等进行了研究。SMA 沥青路面已经逐步成为高速公路的主要面层结构形式,考虑到 SMA 沥青混合料

中高黏度沥青玛蹄脂增加了就地热再生的施工难度,杨彦海、赵博等对其再生沥青混合料的路用性能进行了研究。张建、张怀宇、卢勇等则分别介绍了含微表处或薄层罩面的沥青路面就地热再生技术研究现状。ECA 罩面沥青混合料一般采用高强沥青,并掺加纤维和易密实剂,其混合料成分比较复杂,因此对含 ECA 罩面的沥青路面进行就地热再生的技术难度较大。徐东、符适、徐菲等对 ECA 罩面沥青路面就地热再生进行了初步技术性探索,在室内设计了再生沥青混合料的配合比,并且为了论证施工可行性也铺筑了小规模试验段。

该文采用整形再生和复拌再生两种就地热再生方案,分别对应设计两种方案再生沥青混合料的配合比,并在江苏省 G2513 淮徐高速公路修筑约 2.5 km 的实体工程,据此对 ECA 罩面沥青路面就地热再生的施工可行性进行论证。

## 1 再生沥青混合料配合比设计

使用微波加热方法在路面现场取旧料(ECA-10 和 SMA-13 的混合材料),采用 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中“T0722-1993 沥青混合料中沥青含量试验”对旧料进行抽提试验确定其油石比,然后再分别采用“T0726-2011 从沥青混

收稿日期:2019-03-09

基金项目:江苏省交通运输科技项目(编号:2016Y01)

作者简介:李明亮,男,博士,副研究员.E-mail:lis.1221@163.com

合料中回收沥青的方法(旋转蒸发器法)”回收旧沥青进行相应的试验;采用“T0725—2000 沥青混合料的矿料级配检验方法”通过筛分试验分析旧料的矿料级配现状,在此基础上进行再生沥青混合料的配合比设计。

1.1 再生剂掺量确定

掺加不同用量再生剂的再生沥青技术指标检测结果如表 1 所示,其中 0%的掺量即为旧沥青。

表 1 不同再生剂掺量的再生沥青技术指标

再生剂 掺量/ %	针入度(25℃, 100 g,5 s)/ (0.1 mm)	软化点 ( $T_{R\&B}$ )/ ℃	延度(5℃, 5 cm/min)/ cm
0	26	80.0	0
2	33	76.0	2
3	44	72.0	6
4	58	64.0	12
技术要求*	40~80	再生沥青软化 点改变量不宜 超过原沥青 10℃	≥20

注: \* 采用的技术要求为江苏省地方标准 DB32/T 3134—2016《沥青路面就地热再生施工技术规范》。

由表 1 可知:经车辆荷载、气候环境等反复作用,旧沥青已经发生了较严重的老化,针入度不满足相关规范的技术要求,延度在试验温度下刚启动试验即发生脆断。随着再生剂掺量的增加,旧沥青的针入度和延度不断增大、软化点不断减小,表明掺加再生剂有效调和了旧沥青的各组分比例,老化沥青得到一定程度的还原。但是当再生剂掺量大于 3%时,旧沥青软化点的变化量已经超过了 10℃,考虑到软化点减小过多会对沥青路面高温性能产生不利的影响,而且沥青过软在施工过程中易发生泛油等问题,因此将再生剂掺量确定为 3%。

1.2 矿料级配优化

1.2.1 旧料的矿料级配现状

旧料的矿料级配筛分结果如图 1 所示。

由图 1 可知:旧料的矿料级配与 SMA—13 矿料级配范围相比呈现细化的趋势,尤其是起到关键骨架作用的 9.5、4.75 mm 两档粗集料含量明显偏少,这与沥青路面在车辆荷载反复作用下粗集料发生不同程度的破碎有关;另一方面,由于筛分的矿料试样为 ECA—10 和 SMA—13 中矿料的混合物,ECA—10 中小粒径的粗集料(主要是 4.75 mm 粗集料)也影响了混合矿料中粗集料的相对含量。

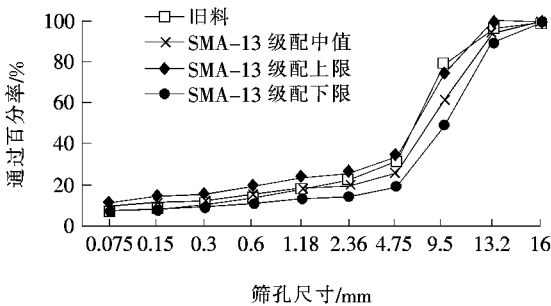


图 1 旧沥青混合料的矿料级配

总之旧料的矿料级配现状与 SMA—13 沥青混合料相差较大,如果仅针对旧沥青路面的车辙、裂缝等病害采用整形再生方案进行处治,可能存在矿料级配改良不足的问题。基于此考虑,该文设计 6.5 cm 的整形再生方案和 6.5 cm+1.5 cm 的复拌再生方案,对比分析不同再生方案的技术可行性。

文中提及的 6.5 cm 的整形再生方案,是指经再生沥青加热后翻松深度为 6.5 cm,即 2.5 cmECA—10 罩面+4.0 cmSMA—13 上面层(下同),然后掺加部分新料,达到一次性摊铺 6.5 cm 厚度(压实厚度)再生沥青路面的目的,该方案主要起到填补车辙、修复裂缝等作用。6.5 cm+1.5 cm 的复拌再生方案,是指经再生沥青加热后翻松深度为 6.5 cm,然后掺加部分新料,达到一次性摊铺 8 cm 厚度(压实厚度)再生沥青路面的目的。该方案除了起到填补车辙、修复裂缝等作用之外,由于新料掺量较大,同时改善了再生沥青混合料路用性能,而且通过增加结构层厚度亦提高了再生沥青路面的承载能力,达到结构补强的目的。

1.2.2 新料掺量确定

(1) 修补车辙需要的掺量

旧沥青路面一般均有不同程度的车辙,在再生过程中为了保证路面标高不变,需要掺加一定量的新料修补车辙。经分析实体工程的路面车辙检测数据可知,施工路段的平均车辙深度为 7 mm。由江苏省地方标准 DB32/T 3134—2016《沥青路面就地热再生施工技术规范》中经验公式,即式(1)进行计算。

$$P_1=0.033\ 5m^2+4.35+2.5h$$
 (1)

式中: $P_1$  为新料掺量(%); $m$  为车辙深度(mm); $h$  为路面标高提高值(mm),一般取 2 mm。

(2) 结构补强需要的掺量

结合历年相关工程的设计、施工经验,采用式(2)预估结构补强需要掺加的新料用量。通过计算可知:为了达到提高 1.5 cm 旧路面标高的效果,需要掺加的新料用量约为 20%。

$$P_2=\frac{h_1\times\rho_1}{h_2\times\rho_2}=\frac{1.5\times2.247}{6.5\times2.553}=20\%$$
 (2)

式中： $P_2$  为新料掺量(%)； $h_1$  为新料压实厚度(cm)； $\rho_1$  为新料毛体积相对密度，实测； $h_2$  为旧路面翻松深度(cm)； $\rho_2$  为旧料毛体积相对密度，实测。

综上所述，对于整形再生方案需要参加的新料用量为  $P_1=11\%$ ；对于复拌再生方案需要参加的新料用量为  $P_1+P_2=31\%$ 。

表 2 不同方案再生沥青混合料的矿料级配

混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										油石比/
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	%
旧料	100	96.8	79.0	32.2	23.0	18.4	14.8	11.5	9.9	8.5	5.7
新料	100	89.4	22.0	18.1	17.7	14.3	12.7	11.2	8.1	7.1	5.0
整形再生混合料	100	96.0	72.7	30.6	22.4	17.9	14.6	11.5	9.7	8.3	5.6
复拌再生混合料	100	94.5	61.3	27.8	21.4	17.1	14.1	11.4	9.3	8.1	5.5
SMA-13 级配中值	100	95.0	62.5	27.0	20.5	19.0	16.0	13.0	12.0	10.0	
SMA-13 级配下限	100	90.0	50.0	20.0	15.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0	—
SMA-13 级配上限	100	100	75.0	34.0	26.0	24.0	20.0	16.0	15.0	12.0	

表 3 不同方案再生沥青混合料的体积指标

项目	最大理论 相对密度	毛体积 相对密度	空隙率/ %	马歇尔稳 定度/kN
整形再生	2.648	2.550	3.7	17.8
复拌再生	2.635	2.540	3.6	22.8
技术要求	—	—	3~4	≥6

由表 2 可知：复拌再生沥青混合料的矿料级配中 9.5、4.75 和 2.36 mm 关键筛孔的通过率在 SMA-13 级配中值附近，合成级配曲线呈现较好的“S”形曲线。对于整形再生沥青混合料，由于新料掺量较少，合成矿料级配整体上偏细，但是同样满足了 SMA-13 矿料级配范围的要求。由表 3 可知：两种方案再生沥青混合料的空隙率均满足 SMA-13 的技术要求。

1.3 新料油石比确定

实体工程中新料运输距离较长，一般高温运输时间在 6 h 以上。考虑到新料中粗集料含量高达 80% 以上，为了避免在运输过程中粗集料表面的沥青发生严重析漏，从而影响路面性能，将新料油石比的选取原则调整为：在控制再生沥青混合料合理空隙率的前提下，采用析漏试验确定新料油石比，即选取新料析漏损失增长趋势的突变点作为最佳油石比。

分别以 4.0%、4.5%、5.0%、5.5%、6.0% 共 5 组油石比拌制新料，新料析漏损失与油石比的关系如图 2

1.2.3 矿料级配选择

已知旧料的矿料级配筛分结果和不同再生方案的新料掺量，通过调整新料各档集料的比例，使其合成矿料级配曲线尽量接近规范推荐的 SMA-13 级配中值。该文优选了一组新料的矿料级配，由此得到不同方案再生沥青混合料的合成矿料级配如表 2 所示。不同方案再生沥青混合料的体积指标检测结果见表 3。

所示。将不同油石比的新料与旧料按照设定比例混合，拌制再生沥青混合料，不同油石比再生沥青混合料的体积指标检测结果如表 4 所示。

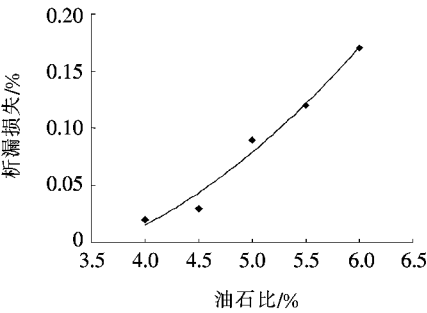


图 2 不同油石比新料的析漏损失

表 4 不同油石比再生沥青混合料的体积指标

油石比/ %	整形再生		复拌再生	
	空隙率/ %	马歇尔稳 定度/kN	空隙率/ %	马歇尔稳 定度/kN
4.0	4.6	20.2	4.0	22.9
4.5	4.0	19.5	3.9	22.8
5.0	3.9	17.5	3.6	23.1
5.5	3.4	16.3	3.4	20.3
6.0	3.2	16.6	3.0	20.6

由图 2 知：新料析漏损失的突变点为油石比 5.0%，此条件下整形、复拌两种再生沥青混合料空隙率均满足

相关技术要求,因此新料最佳油石比取 5.0%。

### 1.4 路用性能验证

不同方案再生沥青混合料的路用性能检测结果如

表 5 所示。

由表 5 可知:无论是采用整形再生方案还是复拌再生方案的再生沥青混合料,其路用性能均满足 SMA

表 5 不同方案再生沥青混合料的路用性能

项目	空隙率/ %	马歇尔稳 定度/kN	谢伦堡沥青 析漏试验的结 合料损失/%	肯塔堡飞散 试验的混合 料损失/%	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	浸水马歇尔 试验残留稳 定度/%	冻融劈裂 试验强度 比/%
整形再生	3.3	18.8	0.02	2.8	7 780	89.3	86.2
复拌再生	3.4	23.4	0.02	3.8	14 000	92.8	94.2
技术要求	3~4	≥6.0	≤0.1	≤15	≥3 000	≥80	≥80

沥青混合料的技术要求。其中采用复拌再生方案的再生沥青混合料各项路用性能较整形再生方案整体上又有进一步提升,这与复拌再生方案的新料掺量较大,对旧料矿料级配改良和老化沥青还原的效果更佳有关。

## 2 工程应用

不同方案再生沥青路面的现场检测结果如表 6 所示。此外在就地热再生施工现场,分别取整形再生和

复拌再生两种方案的再生沥青混合料试样进行各项路用性能试验,检测结果如表 7 所示。

表 6 不同方案再生沥青路面的现场检测结果

项目	压实度/ %	渗水系数/ (mL·min <sup>-1</sup> )	构造深 度/mm	摆值/ BPN
整形再生	99.4	42.8	1.0	65
复拌再生	100.4	11.3	1.2	73
技术要求	≥98	≤80	≥0.55	≥54

表 7 不同方案再生沥青混合料现场取样的路用性能

项目	肯塔堡飞散试验的 混合料损失/%	马歇尔稳 定度/kN	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	冻融劈裂试 验强度比/%	浸水马歇尔试 验残留稳定度/%
整形再生	2.90	16.85	7 340	92.1	92.0
复拌再生	3.75	19.18	6 160	83.7	81.5
技术要求	≤15	≥6.0	≥3 000	≥80	≥80

由表 6 可知:对整形、复拌两种就地热再生方案,其路面现场检测结果均满足相关技术要求,表明采用就地热再生方案养护维修 ECA 罩面沥青路面,可以保证路面施工质量。由表 7 可知:复拌再生方案的再生沥青混合料其各项路用性能反而差于整形再生方案。

在就地热再生施工过程中,对旧料翻松效果和再生沥青混合料的拌和效果进行了实时跟踪观测,发现当采用 6.5 cm 的翻松深度时,旧料翻松之后路槽温度只有 80℃左右,且旧料出现集料破碎、漏白现象,表明由于加热温度不足,旧料在外力作用下发生了破坏。此外对于复拌再生方案,由于新料掺量较大,导致再生主机的拌缸基本上处于满负荷运转状态,拌缸的吞吐能力无法完全满足需求,可能造成搅拌后再生沥青混合料存在均匀性不足问题。复拌再生方案的再生沥青

混合料路用性能差于整形再生方案与此有关。

## 3 结论

(1) 在室内进行配合比设计时,两种方案的再生沥青混合料各项路用性能指标均能满足 SMA 沥青混合料的技术要求,并且由于复拌再生方案的新料掺量较大,对旧料矿料级配改良和沥青还原的效果更佳,因此其路用性能要优于整形再生方案。

(2) 复拌再生方案存在加热效果不足、拌和不均匀等问题,导致实际施工时其路用性能反而差于整形再生方案。针对 ECA 罩面沥青路面就地热再生技术,建议改进其加热工艺,并对适宜的翻松深度开展进一步研究。

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.013

# 基于寿命周期分析的项目级路面养护决策应用研究

陈文, 黄能, 何若夫, 赵正良

(玉溪市晋红高速公路投资发展有限公司, 云南 玉溪 653199)

**摘要:** 建立了基于养护效益的经济、环境综合决策的项目级寿命周期决策分析方法, 应用于项目级养护工程中评价经济效益、环境效益和综合养护效益最优方案, 在全面统筹分析基础上开展系统性决策, 以提高养护方案的效益以及可持续性。

**关键词:** 寿命周期; 经济性; 环境效益; 养护效益; 养护决策

随着高速路网的逐渐完善, 越来越多的高速公路为保持良好的路面使用性能, 需要开展不同等级的养护工程, 传统养护决策方案仅从道路性能或经济性等单一指标进行评估, 但是传统的决策方法注重经济性的分析, 而忽略了社会及环境效益的考虑。作为道路可持续发展的重要组成要素, 社会、经济、环境三大要素必须尽可能全面覆盖。该文通过建立一种全新的路面养护方案决策方法, 以体现道路的社会属性以及基于寿命周期的可持续发展理念, 同时针对项目级养护工程提出养护指标标准优化方法, 在全面统筹分析基础上开展系统性决策, 以降低寿命周期环境影响及费用, 提高养护方案的效益以及可持续性。

## 1 寿命周期决策体系分析

路面养护方案的决策是一个复杂的多因素多目标

的系统工程, 必须在逻辑分析和综合判断的基础上, 做出科学决策, 全面考核与各个方案相关的基本信息, 在性能效益、环境和费用分析基础上, 基于寿命周期分析理念采用多指标决策体系。由于道路寿命周期费用、环境分析的前提和基础都是路面性能发展趋势的预测, 路面寿命周期决策指标包括效益—环境指标和效益—费用指标两个方面。其中效益—环境指标包括效益—能耗和效益—温室气体排放, 经济性分析部分采用效益—费用指标进行评价。

### (1) 路面养护效益分析

路面性能曲线(图1)下的面积代表了养护措施的效益大小, 综合反映了路面使用性能和使用寿命。效益计算基线为路面性能指标最低可接受水平, 即各分项指标达到中修、大修的触发点或预养护措施的失效点, 对于路面性能指数而言, 其养护效益计算如式(1)所示。

### 参考文献:

- [1] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析[J]. 公路交通科技, 2016(10).
- [2] 马登成, 马尉倘, 吕春芬. 沥青路面就地热再生施工工艺及质量控制[J]. 中外公路, 2015(6).
- [3] 张友华, 李新华, 徐莹, 等. 就地热再生施工沥青混合料级配影响性研究[J]. 公路, 2015(5).
- [4] 马登成, 任化杰, 马尉倘. 沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J]. 公路交通科技, 2014(8).
- [5] 杨彦海, 张群, 纪文强. SMA路面就地热再生技术试验研究及性能评价[J]. 中外公路, 2016(4).
- [6] 赵博, 毕连居, 于明明, 等. 改性沥青 SMA 就地热再生混合料路用性能试验研究[J]. 中外公路, 2016(6).
- [7] 卢勇. 就地热再生技术在改性沥青 GAC 罩面层养护工程中的应用[J]. 现代交通技术, 2013(6).
- [8] 徐东, 胡健, 符适. 热再生技术在薄层罩面养护工程中应用效果的探索[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017(6).
- [9] 符适, 陈坤. 就地热再生处理 ECA10+SMA13 的探索性研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015(4).
- [10] 徐菲. 浅谈高速公路养护 ECA-10 路面就地热再生路面配合比设计[C]. 江苏省公路学会学术年会论文集, 2015.
- [11] 董强柱, 顾海荣, 张琿, 等. 就地热再生过程中的沥青路面加热功率控制[J]. 中国公路学报, 2016(4).

收稿日期: 2019-03-10

基金项目: 中电建路桥集团有限公司科技项目(编号: LQKY2017-12)

作者简介: 陈文, 男, 大学本科, 工程师. E-mail: 349658269@qq.com