

就地热再生技术在微表处罩面沥青路面中的应用研究

胡志涛^{1,2}, 陈国健^{1,2}

(1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510080;

2. 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 511400)

摘要: 为研究就地热再生技术在微表处罩面沥青路面中的应用情况, 实地取样对微表处路面材料的性能进行评价, 分析再生剂及直投改性剂对微表处就地热再生混合料路用性能的影响, 确定其合理掺量, 并进行微表处就地热再生混合料的配合比设计。室内试验及工程应用结果表明: 选用的再生剂可有效恢复老化沥青的性能, 直投改性剂可明显提升微表处回收沥青以及微表处就地热再生混合料的高低温性能、疲劳性能。基于马歇尔设计法设计的 GAC-16 微表处就地热再生混合料具备良好的高温稳定性和水稳定性, 满足广东湿热多雨地区的路用性能要求。微表处就地热再生路面表面效果良好, 压实度、渗水系数、构造深度均满足规范要求。实体工程研究结果表明, 就地热再生技术在微表处罩面沥青路面中具备良好的适用性和较好的推广应用前景。

关键词: 既有微表处; 就地热再生; 改性沥青混凝土 GAC-16; 再生剂; 改性剂

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

Research on the Application of In-situ Hot Recycling Technology in Micro-Surfacing Overlay Asphalt Pavement

HU Zhitao^{1,2} CHEN Guojian^{1,2}

(1. Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong, China;

2. Guangdong Heli Traffic Maintenance Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, Guangdong, China)

Abstract: In order to present the application of in-situ thermal recycling technology in micro-surfacing overlay asphalt pavement, field sampling was conducted to evaluate the performance of micro-surfacing pavement materials. The effects of rejuvenators and direct injection modifiers on the road performance of in-situ thermal recycled micro-surfacing mixtures were investigated. The reasonable dosages of rejuvenators and direct injection modifiers were determined, and the mixture proportion design of in-situ thermal recycled micro-surfacing mixtures was carried out. The results of indoor tests and engineering application effects show that the selected rejuvenator can effectively restore the performance of aged asphalt, and the direct injection modifier can significantly improve the high and low temperature performance and fatigue performance of recycled micro-surfacing asphalt and in-situ recycled micro-surfacing mixtures. The GAC-16 in-situ recycled micro-surfacing mixture based on the Marshall design method has good high-temperature stability and water stability, meeting the road performance requirements of the humid and hot rainy areas in Guangdong. The surface appearance of the in-situ thermal recycled micro-surfacing pavement is good, and the compaction degree, water permeability coefficient and texture depth all meet the specification requirements. Through the research on the actual project, the in-situ thermal recycling technology has good applicability in micro-surfacing overlay asphalt pavement and has a good prospect for promotion and application.

Key words: micro-surfacing; in-situ hot recycling; modified asphalt concrete GAC-16; rejuvenator; modifier

收稿日期: 2025-12-23

作者简介: 胡志涛, 高级工程师, 硕士, 研究方向为路面结构设计、沥青路面材料设计

近年来,随着绿色环保理念在基础设施建设领域的持续深入,道路养护方式向节能低碳、资源循环方向转型已成为行业重要趋势。在此背景下,就地热再生作为一种具有良好应用前景的沥青路面预防性养护技术,逐渐受到广泛关注^[1]。广东省在该技术方面已积累了较多工程实践经验,例如近年开展的长深高速梅州段绿色养护工程试点项目,通过积极推广新技术应用,成功打造了国家公路现代养护样板工程,为就地热再生技术的推广提供了实践范例^[2]。

沥青路面就地热再生是对旧沥青路面现场加热、翻松,掺入新沥青、再生剂及新集料,就地拌和、摊铺碾压形成再生路面的预防性养护技术。目前,围绕就地热再生的研究多集中于以下几方面:不同旧沥青混合料(RAP)掺量对再生混合料性能的改进效果^[3]、就地热再生路面在广东省实际使用中的耐久性跟踪研究^[4]、改性剂等添加剂对混合料性能的改善作用研究^[5]等。然而,针对已实施微表处罩面的沥青路面结构,其就地热再生的适用性与效果尚未得到充分探讨,相关研究较为有限。微表处属于路面表面处治工艺,由一定级配的石屑或砂、填料与聚合物改性乳化沥青、外掺剂(按需)及水拌和而成。《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)对微表处加铺沥青路面就地热再生技术的适用性作了相关规定和说明,指出:对稀浆封层、微表处、路面再生设计采用就地热再生方式时,混合料的级配、加热温度应满足混合料性能及施工工艺要求。当不能满足混合料性能及施工工艺要求时,应将上述材料层铣刨后再进行就地热再生。由此可见,目前对于就地热再生中微表处的处治方式(是否保留)以及微表处同步就地热再生的技术可行性仍需进一步系统论证。

本文结合室内试验以及实体工程,针对微表处罩面沥青路面开展就地热再生技术的应用研究,对微表处罩面就地热再生技术的适用性进行验证,旨在拓展就地热再生技术的适用范围,并为同类路面结构的绿色养护方案设计提供实践依据与技术参考。

1 项目概况

广东某高速公路桩号:K0+000—K34+929。主线双向四车道,设计速度为100 km/h,2005年通车,路面结构见表1。

表1 某高速沥青路面结构

位置	主、超车道(路基段)
功能层	1 cm 微表处/超级微表处/超黏微表处
上面层	4 cm 沥青混凝土 AK-16A
中面层	6 cm AC-20 中粒式沥青混凝土
下面层	7 cm AC-25 I 粗粒式沥青混凝土
上基层	18 cm 5%~6% 水泥稳定碎石
下基层	18 cm 5%~6% 水泥稳定碎石
总厚度	54 cm

2009年逐段开展预防性养护,路基段采用1 cm 微表处、超级微表处或超黏微表处进行处治。经过7年通车使用,沥青路面表面出现较多反射裂缝。经过多方案技术经济比选,采用就地热再生养护方式提升路面技术的耐久性、环保性及经济性最优。为研判就地热再生前微表处材料是否保留及其对就地热再生沥青混合料的影响,本文从原材料评估、再生剂用量、改性剂用量、添加新沥青混合料掺比、再生后混合料性能评价等几方面展开研究。分别选取微表处、超级微表处、超黏微表处路段罩面层和上面层开挖取样,具体取样位置见表2。

表2 取样位置

序号	桩号位置	车道	养护历史
1	K2+000	主车道	2015年微表处
2	K19+000	超车道	2018年超级微表处
3	K25+000	超车道	2019年超黏微表处

2 原路面沥青混合料状况

为测试原路面级配和沥青含量,对开挖回收料进行抽提筛分和阿布森试验,同时得到回收沥青,开挖情况见图1。级配结果和沥青性能结果如表3所示。



图1 原路面旧料取样图

表 3 RAP 沥青混合料的沥青用量及矿料筛分检测结果

取样桩号	通过下列筛孔 (mm) 的百分比/%											油石比/%
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
K2 + 000	100	96.1	81.6	65.8	40.9	28.8	20.5	16.8	14.8	13.4	9	4.4
K19 + 000	100	95.1	81.9	66.8	38.6	30.8	22.5	18.5	15.3	13.1	8.9	4.2
K25 + 000	100	98.1	78.9	64.8	43.9	31.6	18.5	15.8	13.8	12.4	8.1	4.5

抽提筛分结果表明：经过多年行车荷载作用及功能层的影响，原路面级配出现一定程度的细化。4.75 mm 筛孔通过率均超过 38%。微表处路段的原路面级配结果显示，0.075 mm 筛孔通过率在 8% ~ 9%，含粉量相对可控，需要添加一定量的新料来调整就地热再生混合料的合成级配，使其合成级配满足 GAC - 16 型级配的技术要求。

油石比测试结果表明：油石比均大于 4.2%，满足就地热再生技术规程中对原路面沥青含量的技术要求（>3.8%），有利于路面的加热和传热，以及就地热再生施工质量控制。

本研究采用的微表处混合料所用乳化沥青均为慢裂快凝型改性乳化沥青。进一步对回收沥青开展沥青性能检测，结果详见表 4。

表 4 回收沥青性能检测结果

桩号	25℃针入度	15℃延度	软化点
	/0.1 mm	/cm	/℃
K2 + 000 微表处	17.5	1.9	70.4
K19 + 000 超级微表处	20.5	2.5	68.8
K25 + 000 超黏微表处	21.0	2.3	70.0

回收沥青性能检测结果表明：经过多年的气候环境和行车荷载作用，原路面沥青出现较为严重的老化，针入度在 17.5 ~ 21 之间，沥青中的轻质组分丧失，沥青质含量升高，沥青变硬变脆，表现为针入度下降、软化点升高、延度降低、低温延性减弱。

3 再生剂及改性剂效果评价

3.1 再生剂再生效果评价

对比老化沥青和添加再生剂后的再生沥青性能，发现加入旧沥青质量 3% 和 6% 的常规再生剂后，针入度变小，延度变大，软化点下降（表 5），表明再生剂的加入可以一定程度恢复老化沥青性能。结合相关成熟工程经验，建议选定再生剂掺量为旧沥青质量的 3%。

表 5 再生沥青性能检测结果

桩号	检测项目	0%	3%	6%
K2 + 000 微表处	25℃针入度/0.1 mm	17.5	25.1	35.0
	15℃延度/cm	1.9	8.0	19.0
	软化点/℃	70.4	65.5	64.0
K19 + 000 超级微表处	25℃针入度/0.1 mm	20.5	26.0	33.5
	15℃延度/cm	2.5	8.5	19.5
	软化点/℃	68.8	65.8	62.0
K25 + 000 超微表处	25℃针入度/0.1 mm	21.0	27.5	42.8
	15℃延度/cm	2.3	7.9	18.5
	软化点/℃	70.0	66.0	64.0

3.2 直投改性剂改性效果评价

本项目除采用再生剂外，还通过直投改性剂进一步提升再生后沥青性能。由于就地热再生工艺具有拌和温度低（140 ~ 160℃）、拌和时间短（15 ~ 30 s）及再生沥青混合料受热不充分、温度下降快、不能“闷料”的特点，因此要求所用直投改性剂具备较高的熔融指数，能够在就地热再生的工艺环境下实现与再生混合料的充分融合，这是直投改性剂发挥作用的基础。VE 改性剂是一种适用于直投式工艺，具备提升沥青混合料综合路用性能，增强混合料黏结，延长路面服役寿命的外添加剂。其具备良好的熔融性能，且对普通沥青的高温性能，特别是对黏韧性、延展性有较大的改善^[6]。VE 改性剂的物理性能检测指标如表 6 所示。

表 6 VE 改性剂检测结果

试验项目	单位	检测指标	技术要求
外观	—	均匀、	颗粒状、
		饱满、	均匀、饱满、
		无结块	无结块
颜色	—	淡黄色	淡黄色
单个颗粒	g	0.023	≤0.03
密度	g/cm ³	0.904	≤1.0
熔融指数 (135℃, 2.16 kg)	g/10 min	3.68	≥3.0
灰分	%	0.49	≤1.0

将直投改性剂放进烘箱中保温，观察改性剂的形体状态，保温温度设置为 140℃、150℃。由图 2 可知，VE 改性剂在 140℃下，可在 30 min 内

实现自熔融;在 150℃下,自熔融进一步加快,并在短时间内呈现流淌水迹状态。结合 VE 的熔融指数 3.68 g/10 min (135℃, 2.16 kg) 可知,该改性剂在就地热再生 140~150℃施工温度区间内熔融性能符合施工要求。

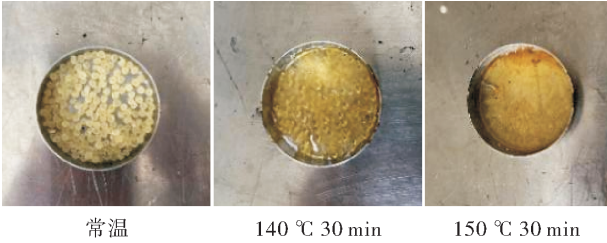


图2 VE 改性剂在不同温度下的自熔融状态

3.2.1 VE 改性剂对普通沥青改性效果

VE 改性沥青具体制备流程为:将 70 号普通沥青放入 140~150℃恒温箱,使沥青具有较好的流动性;然后将 VE 改性剂缓慢加入沥青中,升温至 150~160℃,边加边高速剪切搅拌,速度保持在 2 000 r/min,持续 60 min;最后在 160℃恒温箱中保温发育溶胀 1.5 h。经观测验证,该室内高速剪切方式下制备的 VE 改性沥青可达均匀稳定状态。本项目制备了掺量为 4.5%、8.8%、13.2% 的 VE 改性沥青(对应混合料质量占比 0.2%、0.4%、0.6%),测定其三大指标与黏韧性,并与普通沥青及 PG76 改性沥青进行对比测试,试验结果表 7 所示。分析如下:

表7 VE 改性沥青常规性能测试结果

沥青类型	延度 (5℃, 5 cm/min) /cm	软化点/℃	针入度 (25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	黏韧性/(N·m)	韧性/(N·m)
70 号普通沥青	10	48	62	—	—
70 号普通沥青 + 4.5% VE	17.35	51	58	9.65	4.7
70 号普通沥青 + 8.8% VE	42.4	58.8	57.5	19.2	12.1
70 号普通沥青 + 13.2% VE	46	78	55	22.9	16.1

- (1) 随着 VE 掺量的增加,VE 改性沥青的软化点上升,针入度下降。
- (2) 8.8% VE 改性沥青的延度达到 42.4 cm,相较普通沥青提升了 4 倍,且明显高于 PG76 改性沥青。
- (3) 软化点方面,8.8% VE 掺量下软化点为 58.8℃,提升了 17.0%;13.2% 掺量下软化点达到 78℃,提升了 60%,表明 VE 改性剂有助于普通沥青高温性能的提升,但在高掺量条件下改善

- 效果才相对明显。
- (4) 黏韧性方面,8.8% VE 和 13.2% VE 掺量的改性沥青的黏韧性分别为 19.2 N·m 和 22.9 N·m,基本达到 PG76 改性沥青的标准,说明 VE 改性剂可以显著提高沥青的黏韧性。
- 对 VE 改性沥青进行动态剪切流变 (DSR) 和低温弯曲梁 (BBR) 测试,并与普通沥青及 PG76 改性沥青做对比,试验结果详见表 8 和图 3。

表8 VE 改性沥青常规性能测试结果

沥青类型	70 号普通沥青		70 号普通沥青 + 4.5% VE		70 号普通沥青 + 8.8% VE		70 号普通沥青 + 13.2% VE		PG76	
	64℃	70℃	64℃	70℃	64℃	70℃	64℃	70℃	64℃	70℃
复数模量/kPa	1.292	0.61	1.481	0.729	2.006	1.034	2.913	1.631	3.831	2.344
车辙因子/MPa	1.293	0.611	1.485	0.731	2.018	1.038	2.914	1.633	4.279	2.647
疲劳因子/MPa	1.292	0.609	1.477	0.727	1.994	1.03	2.911	1.629	3.43	2.076

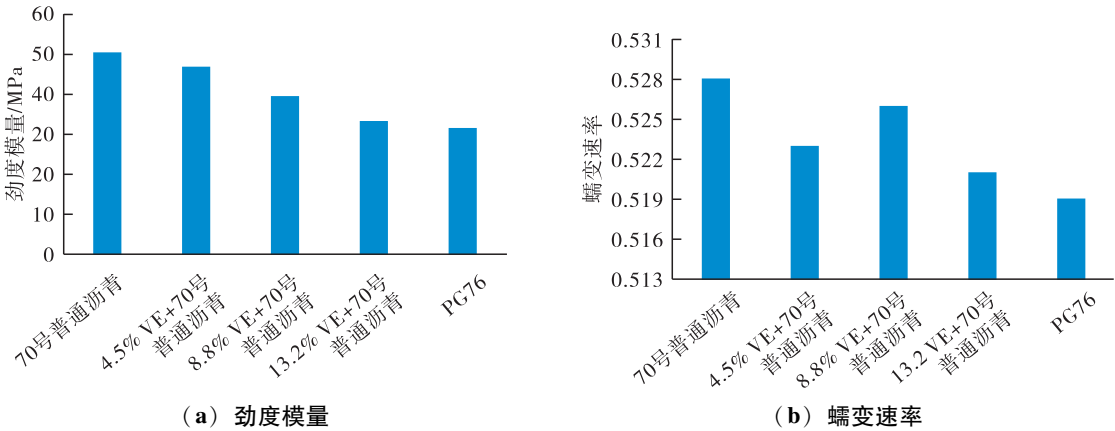


图3 BBR 测试结果 (-6℃)

根据 DSR 试验结果, VE 改性剂的加入使普通沥青的复数模量、车辙因子和疲劳因子等有一定的提升。随着掺量增加, 提升效果更为明显, 但 13.2% VE 掺量下的改性沥青的 PG 等级依然没有达到 PG76。根据 BBR 试验结果, 随着 VE 掺量的增加, 劲度模量下降, 8.8% VE 掺量下的劲度模量下降了 32%, 低温性能有所改善。

3.2.2 VE 改性剂对回收沥青改善效果分析

采用现有路面回收老化沥青, 对比回收沥青 + 再生剂、回收沥青 + 改性剂、回收沥青 + 改性剂 + 再生剂样品的性能, 试验结果详见表 9。由表可知, 加入 3% 再生剂后, 回收沥青变软, 黏度下降, 针入度、延度增大, 软化点降低。在加入 3% 再生剂的前提下, 继续添加 8.8% VE, 沥青延度可以提升至原来的 2 倍左右, 说明了 VE 改性剂对再生后的回收沥青同样具备低温延性改善作用。

表 9 沥青常规性能测试结果 (母体沥青: 回收沥青)

检测项目	15℃延度	软化点	25℃针
	/cm	/℃	入度
回收沥青	2.0	69.5	19.5
回收沥青 + 3% 再生剂	8.4	66.5	27.1
回收沥青 + 8.8% VE	4.2	76.8	21.0
回收沥青 + 8.8% VE + 3% 再生剂	16.2	72.5	25.5

4 就地热再生配合比设计

根据《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019) 附录 D《厂拌热再生沥青混合料配合比设计方法》, 采用马歇尔设计方法进行再生沥青混合料配合比设计, 设计内容包括确定 RAP 的掺配比例、矿料级配、最佳沥青用量。

4.1 配合比设计

该工程处于广东高温多雨地区, 设计配合比时, 重点考虑沥青混合料的抗高温性能和抗水损害的能力, 并结合广东省内已有的经验, 将就地热再生混合料设计成 GAC-16 混合料类型, 该混合料 RAP 掺配比例为 90%, 其余材料为新添加碎石、改性沥青和外加剂等, 详见表 10; 不同位置级配设计结果详见表 11。

沥青混合料制备分四步进行: ①按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0702—2011 拌制新沥青混合料; ②加热 RAP 沥青混合料至 130 ~ 140℃; ③按照 RAP 沥青混合料和新沥青混合料质量比为 90 : 10 的比例进行混合料拌制, 同时掺入 3% 再生剂 (按 RAP 沥青混合料中的旧沥青质量计算); ④采用马歇尔成型法双面击实 75 次, 击实温度为 130 ~ 140℃, 与现场再生路面温度条件保持一致。

表 10 就地热再生沥青混合料 GAC-16 掺配比例 单位: %

桩号	上面层 RAP	碎石				矿粉
		10 ~ 16 mm	5 ~ 10 mm	3 ~ 5 mm	0 ~ 3 mm	
K2 + 000 微表处	90	5.0	3.2	0.5	1.0	0.3
K19 + 000 超级微表处	90	4.0	2.5	0.0	3.0	0.5
K25 + 000 超黏微表处	90	3.5	3.2	0.0	2.8	0.5

表 11 GAC-16 再生沥青混合料合成矿料级配组成 单位: %

筛孔尺寸/mm	K2 + 000 微表处		K19 + 000 超级微表处		K25 + 000 超黏微表处		设计级配范围
	RAP 矿料	合成级配	RAP 矿料	合成级配	RAP 矿料	合成级配	
16	96.1	96.5	95.1	96.5	98.1	98.3	95.0 ~ 100.0
13.2	81.9	83.4	81.9	83.4	78.9	80.7	65.0 ~ 85.0
9.5	66.8	66.5	66.8	66.8	64.8	65.1	47.0 ~ 68.0
4.75	38.6	38.8	38.6	38.7	43.9	43.5	28.0 ~ 46.0
2.36	30.8	31	30.8	30.7	31.6	31.5	18.0 ~ 35.0
1.18	22.5	22.5	22.5	22.3	18.5	18.8	15.0 ~ 29.0

续表							
筛孔尺寸/mm	K2+000 微表处		K19+000 超级微表处		K25+000 超黏微表处		设计级配范围
	RAP 矿料	合成级配	RAP 矿料	合成级配	RAP 矿料	合成级配	
0.6	18.5	18.5	18.5	18.3	15.8	15.9	12.0~23.0
0.3	15.3	15	15.3	14.9	13.8	13.6	8.0~18.0
0.15	13.1	12.7	13.1	12.6	12.4	12.1	6.0~13.0
0.075	8.9	8.7	8.9	8.6	8.1	8	4.0~8.0
掺配比例/%	90	—	90	—	90	—	—

对表 12 中 K2+000 微表处、K19+000 超级微表处合成配合比筛孔 0.075 mm 通过率分别为 8.7%、8.6%，超出设计范围（4%~8%）的情况，分析如下：

（1）本项目采用现场就地热再生工艺，从表 3 的 RAP 筛分结果可知，在多年的行车荷载作用下，原路面 RAP 已出现细化特征，存在 0.075 mm 筛孔通过率（9%、8.9%）大于 8% 的情况，而现场就地热再生工艺强调原路面 RAP 100% 利用，仅添加约 10% 新料来填补车辙，一般难以通过新料的添加有效改善就地热再生混合料的合成级配，就地热再生混合料的合成级配更多取决于原路面 RAP 的原始级配。

（2）本研究设计出的 GAC-16 就地热再生混

合料路用性能良好，满足规范要求和路面使用要求，说明混合料性能并未受到合成级配略微超限的影响。

（3）现行 JTG/T 5521—2019 中并未对就地热再生混合料级配作强制性要求，仅说明可参照现行的热拌沥青混合料级配进行设计，基于此考虑，本研究采用了《广东省高等级公路沥青路面施工技术规范》（试用）推荐的 GAC-16 级配设计实施。

4.2 再生沥青混合料性能试验结果

马歇尔试验具体结果详见表 12。通过车辙试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验、浸水飞散试验，评价就地热再生混合料的高温稳定性和水稳定性，试验结果详见表 13。

表 12 最佳油石比马歇尔试验结果

混合料类型	最佳油石比/%	理论密度/(g/cm ³)	毛体积密度/(g/cm ³)	空隙率/%	稳定度/kN	流值/mm	备注
GAC-16	4.9	2.520	2.411	4.3	15.6	4.22	微表处段
GAC-16	4.9	2.522	2.415	4.2	15	4.10	超级微表处段
GAC-16	4.9	2.525	2.425	4.0	15.8	4.55	超黏微表处段
技术要求	—	—	—	4~6	≥8.0	1.5~5.0	—

表 13 混合料性能试验结果

混合料类型	车辙动稳定度(60℃,次/mm)	冻融劈裂强度比/%	残留稳定度/%	飞散损失率/%	备注
GAC-16	7 250	88.5	91.7	9.5	微表处段
GAC-16	7 490	87.4	90.1	8.8	超级微表处段
GAC-16	7 150	87.0	91.5	10.0	超黏微表处段
技术要求	≥2 800	≥80	≥85	—	—

由表 13 可知，微表处/超级微表处/超黏微表处+上面层就地热再生混合料，经配合比合理设计完成后，GAC-16 就地热再生混合料均具备良好的高温稳定性和水稳定性。

4.3 再生沥青混合料改性效果验证

前述试验从普通沥青和回收沥青的角度对 VE 改性剂的改性效果进行了评价，接下来将 VE 改性剂添加到再生沥青混合料中，验证 VE 改性

剂在再生混合料的体系中能否起到相关性能的改善作用。其中，级配为 GAC-16，新混合料用量为 10%（沥青为 PG76 改性沥青），VE 改性剂掺量为 0.4%（占旧混合料总质量的比例），再生剂掺量为 3%（占旧沥青质量的比例），油石比为 4.9%。

（1）马歇尔试验表明 0.4% VE + 3% 再生剂与仅添加 3% 再生剂（对照组）在体积指标上无明显差别，结果如表 14 所示。添加 VE 改性剂后，再生混合料的稳定度略有提升，试验组的稳定度指标满足《公路沥青路面施工技术规范》中密级配热拌沥青混合料稳定度的要求（>8 kN）。

表 14 直投改性就地热再生混合料马歇尔试验结果

试验参数	添加 0.4% VE + 3% 再生剂	仅添加 3% 再生剂
毛体积相对密度/(g/cm ³)	2.431	2.426
最大理论相对密度	2.541	2.531
空隙率/%	4.319	4.168
稳定度/kN	17.248	19.788
流值/mm	4.455	4.233

（2）水稳定性能分析：0.4% VE + 3% 再生剂试验组的冻融劈裂强度比均大于对照组，说明 VE 改性剂对再生混合料的抗水损害能力有促进作用，且 0.4% VE + 3% 再生剂试验组的劈裂强度比均大于规范值，即 80%，满足现行规范要求。试验结果如表 15 所示。

表 15 直投改性就地热再生混合料冻融劈裂试验结果

试验参数	添加 0.4% VE + 3% 再生剂	仅添加 3% 再生剂
冻融前劈裂强度/MPa	1.994	2.313
冻融后劈裂强度/MPa	1.861	1.925
劈裂强度比/%	93.347	83.219

（3）抗车辙性能分析：仅添加 3% 再生剂的对照组动稳定度为 8 701 次/mm，增加 0.4% VE 改性剂后，再生混合料的动稳定度（试验温度 70℃）有所提升，为 9 361 次/mm，表明 VE 改性剂对再生混合料的抗车辙性能有改善作用。

（4）飞散试验分析：仅添加 3% 再生剂的对照组飞散损失为 9.8%，增加 0.4% VE 改性剂后再生混合料的飞散损失为 6.1%，降低 38%，表明 VE 改性剂对再生混合料的抗水损害能力有明显改善作用。这也与冻融劈裂试验结果一致。

5 工程应用效果

微表处就地热再生路面的外观情况（图 4）表明：路面的整体均匀性良好，胶浆填充较为饱满，边部位置热黏结效果良好。芯样显示无明显空隙，密实程度高（图 5）。



图 4 路面外观效果



图 5 芯样图

完成施工后，就地热再生沥青路面上面层压实度、构造深度、渗水等就地热再生沥青路面上面层厚度及压实度、渗水系数、构造深度等工后检测参照《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1—2017）。

5.1 厚度及压实度

首先对路面进行钻芯取样，再对所得芯样使用水中重法测得毛体积密度，基于最大理论密度计算得到对应的压实度，芯样压实度检测结果如表 16 所示。

表 16 压实度检测结果 (最大理论密度)

试样 编号	毛体积 相对密度	最大理论 相对密度	压实度	合格标准
1	2.442	2.558	95.1	≥93%
2	2.442	2.558	95.3	
3	2.403	2.551	94	
4	2.417	2.542	95.1	
5	2.418	2.551	94.1	
6	2.411	2.523	94.6	

5.2 渗水系数

采用渗水仪测试试验路路表渗水系数,测试结果见表 17。

表 17 路面渗水系数检测结果

试样编号	渗水系数/(mL/min)	合格标准/(mL/min)
1	28	≤100
2	8	
3	24	
4	32	
5	18	

5.3 构造深度

采用铺砂法测试试验段路表构造深度,测试结果见表 18。

表 18 构造深度检测结果

试样编号	实测均值/mm	位置	设计值/mm
1	0.99	上面层	≥0.8
2	0.90		
3	0.83		
4	0.92		

路面检测结果表明:压实度、渗水系数、构造深度等各项关键实体工程指标均满足规范要求。实施后路面表观效果良好,结合室内试验的结果,证明了微表处路面在就地热再生中具备适用性。在实体工程方案设计中,建议从原材料性能、添加剂影响、配合比设计等方面进行综合分

析以供决策。

6 结语

(1) 选用的再生剂能有效恢复微表处老化沥青的原有性能,同时,直投改性剂的添加显著提升了再生混合料的高温抗变形能力、低温抗裂性及抗疲劳性能,为解决旧微表处路面性能衰减问题提供了有效的材料设计方案。

(2) 基于马歇尔方法设计出的 GAC-16 微表处就地热再生混合料,不仅表现出良好的高温稳定性和水稳定性,而且其成品路面各项关键指标(压实度、渗水系数、构造深度)均满足规范要求。

(3) 室内试验与实体工程应用效果均表明,就地热再生技术对于微表处罩面沥青路面具有适用性。该技术不仅能保证就地热再生路面良好的表观与使用性能,还体现了资源循环利用的优势,具备显著技术、经济效益和广阔的推广应用前景。

参考文献:

[1]牛广文. 沥青路面就地热再生技术现状与发展历程[J]. 中外公路,2019,39(5): 50-59.

[2]刘峰,辛孟,何子航,等. 长深高速梅州段绿色养护新样板[J]. 中国公路,2024(10):46-47.

[3]李町茁,张垚,桑添翼,等. 高 RAP 掺量就地热再生沥青混合料路用性能影响研究[J]. 公路, 2025,70(4): 36-43.

[4]陈楚鹏,李善强,许新权,等. 广东省高速公路就地热再生路面长期性能调查与评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(2):365-369.

[5]仰建岗,张伟,姚玉权,等. 就地热再生混合料性能影响关键因素的试验研究[J]. 公路交通科技,2021,38(10):7-15.

[6]谢超. VE 改性剂在普通沥青路面复拌就地热再生工程中的应用研究[J]. 交通节能与环保,2024,20(4): 135-138.

(上接第 7 页)

[10]中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[11]ZHOU F,SCOFFON S,MALLICK R B,et al. A laboratory investigation of OGFC compaction using the superpave gyratory compactor[J]. Asphalt Paving Technology, 2010, 79: 789-821.

[12]LU Q,HARVEY J T. Long-term performance of open-graded asphalt concrete: a case study[J]. Transportation

Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2006,1970(1): 83-91.

[13]ALREZAIQI M A,WOODWARD D,MILLAR P. The skid resistance of bituminous surfaces in wet conditions: a review of the influencing factors[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(6): 699-713.

[14]黄桥连,周宏云. 长下坡沥青路面抗滑性能调查分析[J]. 公路与汽运,2013(3):96-98.