

湿热地区高速公路乳化沥青厂拌冷再生柔性基层 沥青路面路用性能检测与评价

聂妮, 张晨龙

(广东冠粤路桥有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 为分析湿热地区高速公路乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面路用性能, 对开阳高速公路乳化沥青厂拌冷再生沥青路面结构型式、配合比设计、施工过程质量及工后5年的技术状况进行了检测与评价。结果表明: 工后5年的乳化沥青厂拌冷再生基层沥青路面技术状况良好, 乳化沥青厂拌冷再生基层沥青路面适用于大交通量、重载交通和湿热地区高速公路; 采用连续式拌合工艺生产的乳化沥青厂拌冷再生混合料, 材料性能和耐久性能可满足使用要求; 乳化沥青厂拌冷再生基层与热拌 ATB-25 基层在路面破损、结构强度和车辙等方面无明显区别, 但路面平整度相对较差, 应优化碾压等施工工艺, 提高平整度。

关键词: 高速公路; 乳化沥青厂拌冷再生; 柔性基层; 路用性能; 检测与评价

中图分类号: U414

文献标识码: A

Detection and Evaluation of Road Performance of Emulsified Asphalt Plant-mixed Cold Recycled Flexible Base of Expressway in Hot and Humid Areas

NIE Wei, ZHANG Chenlong

(Guangdong Guanyue Road and Bridge Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China)

Abstract: In order to analyze the performance of emulsified asphalt plant-mixed cold recycled flexible base road in humid and hot areas, the structural type, mix design, construction process quality and technical condition of emulsified asphalt plant mixed cold recycled pavement on Kaiyang Expressway were tested and evaluated for 5 years after construction. The results show that the technical condition of emulsified asphalt plant-mixed cold recycled base asphalt pavement is good after 5 years of construction. The emulsified asphalt plant-mixed cold recycled base asphalt pavement can be applied to highways with high traffic volume, heavy load traffic, and humid and hot areas; the performance and durability of emulsified asphalt plant mixed cold recycled mixture produced by continuous mixing process can meet the requirements for use; there is no significant difference in road surface damage, structural strength, and ruts between emulsified asphalt plant-mixed cold recycled base and hot mixed ATB-25 base, but the road surface smoothness of the former is relatively poor, so the construction technology of emulsified asphalt plant mixed cold recycled base should be optimized, such as rolling, to improve smoothness.

Key words: expressway; emulsified asphalt plant-mixed cold recycled; flexible base; road performance; detection and evaluation

乳化沥青厂拌冷再生技术具有常温施工、再生沥青混合料 (reclaimed asphalt pavement, RAP) 利用率高、低碳环保等优势, 已成为公路

路面养护和公路改扩建中的重要发展和应用方向^[1-3]。公路改扩建过程中产生了大量的 RAP 材料, 采用乳化沥青厂拌冷再生技术将 RAP 材料再

收稿日期: 2024-02-23

作者简介: 聂妮, 工程师, 本科, 研究方向为道路与桥梁工程技术

利用是广东省高速公路改扩建常用的做法之一，形成了乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面，但这种路面结构型式的耐久性及在湿热地区的适用性需要明确。针对此类问题，万超^[4]以江西乳化沥青厂拌冷再生下面层应用情况为例，分析了乳化沥青厂拌冷再生技术实施前后的检测技术指标，总结了技术要点和常见问题。孙艳华^[5]等研究了乳化沥青厂拌冷再生混合料性能与应用，开发了新型级配范围，引进了双层多步拌合设备并在实体工程中进行了应用。欧阳亮酉^[1]结合改扩建工程乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面应用项目，研究了乳化沥青厂拌冷再生技术的施工要点。杨彦海^[6]依托辽宁冷再生工程项目，分析了使用效果，相对于非再生路面，乳化沥青厂拌冷再生沥青路面路用性能衰减速度更快，工后 4 年路面整体性能不满足使用要求，仅适用于中等交通量条件以下。武其学^[7]将乳化沥青冷再生技术应用于山东省二级公路重交通路面下面层，通过 4 年的连续检测，确定了该技术适用于在重交通路面推广应用。

综上所述，现有研究集中在乳化沥青厂拌冷再生施工技术要点、材料性能，北方寒冷地区使用效果评价等方面，缺乏湿热地区乳化沥青厂拌冷再生沥青路面路用性能检测与评价。亟须结合实际工程项目，总结广东省高速公路乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面应用情况，检测和评价其路用性能及存在问题。本文依托开阳高速公路改扩建工程项目，对相关路面结构型式、配合比设计、施工工艺、路面状况检测和路用性能评价等进行分析研究，成果可为湿热地区高速公路乳化沥青厂拌冷再生技术推广和应用提供参考。

1 开阳高速公路项目概况

沈阳至海口高速公路开平至阳江段（开阳高速公路）是 G15 的重要一段，改扩建前为双向四

车道。为提升服务水平，2018 年实施了开阳高速公路改扩建工程施工，2019 年和 2020 年完成了新拓宽侧路面施工。项目概况如表 1 所示。该路段为重要的交通要道，扩建后日交通量超 10 万辆/日（折算小客车），其中三类及以上车辆占比约 20%，年平均降雨量约 2 000 mm，气温最高温度为 38.4℃，路表最高温度超 60℃。该路段处于典型的湿热气候环境，是大交通量和重载交通路段。开阳高速公路扩建侧路面结构如表 2 所示。

表 1 开阳高速公路乳化沥青厂拌冷再生项目概况

调查项目	气候分区	断面日交通量/万辆	施工时间	应用规模/km
开阳高速公路	1-4-1	>10	2019 年 4 月	18

表 2 开阳高速公路扩建侧路面结构

层位	材料类型
上面层	4 cm SMA-13
中面层	6 cm 改性沥青 AC-20
下面层	8 cm 普通沥青 AC-25
柔性基层	11 cm 乳化沥青冷再生/热拌普通沥青 ATB-25
基层	36 cm 5%~6% 水泥稳定碎石
底基层	20 cm 4%~5% 水泥稳定碎石
总厚度	85 cm

2 配合比设计

2.1 材料组成设计

RAP 料为开阳高速公路旧路铣刨料，按照 10~30 mm、5~10 mm 和 0~5 mm 三档进行筛分，新集料采用石灰岩集料，水泥为 P.O42.5 水泥，乳化沥青为慢裂型乳化沥青，对原材料进行检测，指标均符合《公路沥青路面再生技术规范》（JTG/T 5521—2019）^[8]规定，如表 3 所示。表 4 为开阳高速公路乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料合成级配。

表 3 乳化沥青试验检测结果

试验项目		规定值	试验值	试验项目		规定值	试验值
电荷		阳离子	阳离子	破乳速度		慢裂	慢裂
标准黏度 C _{25,3} /s		—	11.6	恩格勒黏度 E ₂₅		2~30	7.3
蒸发残留物性质	蒸发残留分含量/%	≥62	62.8	与粗集料的黏附性（裹覆面积）		≥2/3	>2/3
	针入度（100 g, 25℃, 5 s）/（0.1 mm）	50~150	58	筛上剩余量/%		≤0.1	0.01
	延度（15℃）/cm	≥40	99.5	储存稳定性	1 d	≤1	0.5
	溶解度/%	≥97.5	99.7		5 d	≤5	2.8

表4 开阳高速公路乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料合成级配

筛孔尺寸/ mm	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
通过率/%	100.0	100.0	93.5	58	46.7	27.8	7.5	3.0

2.2 混合料性能验证

根据《公路沥青路面再生技术规范》规定开展配合比设计,如表5所示;乳化沥青厂拌冷再

生沥青混合料马歇尔试验及其性能如表6所示。

表5 冷再生沥青混合料配合比参配比例表

规格	10 ~ 20 mm	RAP 料 10 ~ 30 mm	RAP 料 5 ~ 10 mm	RAP 料 0 ~ 5 mm	水泥 (内掺)	乳化 沥青 用量/%
配合比 比例/%	12.0	30.2	11.0	45	1.8	3.8

表6 乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料马歇尔试验及性能试验结果

试验指标	试件密度/ (g/cm ³)	理论密度/ (g/cm ³)	空隙率/%	劈裂强度/ MPa	干湿劈裂强度 比/%	残留稳定度/%	动稳定度/ (次/mm)
试验结果	2.192	2.383	8.0	0.90	90.0	88.2	8 469
技术要求	—	—	7~12	≥0.7	≥80	≥80	≥5 000

3 施工质量检测

3.1 施工工艺

开阳高速公路乳化沥青厂拌冷再生拌合采用连续式拌合设备,该设备由水稳拌合楼改造而成,乳化沥青和水采用流量式计量方式添加,生产乳化沥青厂拌冷再生混合料时产能降低至200~300 t/h,正式施工前对水泥剂量、乳化沥青添加量、水等进行了标定,确保水泥剂量添加量偏差控制在0.2%以内,水和乳化沥青添加量控制在0.3%以内。乳化沥青厂拌冷再生柔性基层碾压工艺对施工质量影响较大,采用1台26 t单钢轮压路机、1台30 t轮胎压路机、1台13 t双钢轮压路机的组合,按照初压、复压、终压三阶段碾压,初压采用26 t单钢轮压路机静压1遍,复压采用30 t轮胎式压路机揉压6遍,终压采用13 t双钢轮压路机静压1遍。但在施工过程中发现,初压时乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料出现了不同程度的推移问题,其余施工工艺按照《公路沥青路面再生技术规范》规定执行。

3.2 材料性能

严格按照设计配合比生产,摊铺前场取样混合料,进行室内试验,其结果如表7所示。根据表7可知,应用于工程实体的乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料的空隙率、劈裂强度、干湿劈裂强度比、动稳定度等技术指标均满足设计图纸要求,实体工程应用的材料合格。

3.3 实体工程

在实体工程施工完成后,对乳化沥青厂拌冷再生柔性基层进行质量检测,其结果如表8所示。根据表8可知,乳化沥青厂拌冷再生柔性基

表7 乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料性能试验结果

取样时间	空隙率/ %	劈裂强 度/MPa	干湿劈 裂强度 比/%	残留 稳定/%	动稳 定度/ (次/mm)
2019年4月10日	7.5	0.76	93.7	92.4	13 866
2019年4月18日	8.4	0.75	91.2	93.2	12 168
设计要求	7~12	≥0.7	≥80	≥80	≥5 000

表8 乳化沥青厂拌冷再生柔性基层检测结果

检验项目	检验结果	合格率/%	技术要求
外观	表面良好, 符合技术要求	—	表面平整密实、无 明显弹簧、浮石现象, 无明显压路机轮迹
厚度/mm	115	100	110±10
压实度/%	92.2	100	≥88
平整度 (标准差)/mm	1.7	—	≤1.8

层外观、厚度、压实度和平整度均符合要求,但平整度较差。经分析,主要原因是在碾压过程中发生了推移,影响了实体工程平整度。

4 路面状况检测

4.1 路面外观状况

工后5年对路段进行了再次回访,其路面表面状况如图1和图2所示。

4.2 路面技术状况

对开阳高速公路乳化沥青厂拌冷再生柔性基层路段和相邻的热拌ATB-25沥青混合料柔性基层路段的路面破损、路面车辙、路面行驶质量状况及路面结构强度进行了分析,其中路面结构强度仅有工后1年和工后5年数据,其余指标工后进行了连续5年检测,检测数据如表9所示。



图 1 乳化沥青厂拌冷再生基层路段



图 2 热拌 ATB-25 沥青混合料基层路段

表 9 路面技术状况检测结果

检测时间	乳化沥青厂拌冷再生基层路段				热拌 ATB-25 沥青混合料基层路段			
	PCI	RDI	RQI	PSSI	PCI	RDI	RQI	PSSI
工后 1 年	99.6	98.2	91.5	99.2	99.4	98.9	96.7	99.8
工后 2 年	99.1	96.5	91.8	—	99.2	96	95.2	—
工后 3 年	98.5	95.2	90.2	—	98.2	95.8	95	—
工后 4 年	98.2	94.8	90	—	98.1	94.5	94.2	—
工后 5 年	98	94.2	89.9	99.1	97.9	94.3	94	99.4

注：PCI—路面状况指数，RDI—路面车辙深度指数，RQI—路面行驶质量状况指数，PSSI—路面结构强度指数。

5 路用性能评价

5.1 路面外观

根据图 1 和图 2 可知，经过 5 年使用后，无论是乳化沥青厂拌冷再生柔性基层路段还是热拌 ATB-25 沥青混合料柔性基层路段，路面表面状况良好，无明显坑槽、车辙等问题，无纵横向裂缝，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的抗水损能力，未出现沥青路面水损坏等病害。

5.2 路面损坏

根据表 9 可知，工后 5 年，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面基本没有病害，路面状况指数 PCI 仍 >95，路面具有良好的状况，相较于工后 1 年，PCI 下降了 1.6，年均下降 0.4。工后 5 年，热拌 ATB-25 沥青混合料柔性基层沥青路面 PCI >95，相较于工后 1 年，PCI 下降了 1.5，年均下降 0.38。两种路面对比可知，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面和热拌 ATB-25 沥青混合料柔性基层沥青路面在通车后 PCI 均呈缓慢下降趋势，下降幅度均较小，路面破损及其衰减无明显差异。

5.3 路面车辙

根据表 9 可知，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面车辙指数 RDI 呈缓慢下降趋势且下降幅度较小，工后 1~2 年时 RDI 有一定程度下降，在 3~5 年时 RDI 相对较为稳定，工后 5 年，路

面车辙深度指数 RDI >90，评级为“优”，相对于工后 1 年，RDI 下降了 4.0，年均下降 10。乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的抗车辙能力，可经受住高温环境考验。热拌 ATB-25 沥青混合料柔性基层沥青路面 RDI 也呈缓慢下降的规律，工后 5 年，RDI >90，相对于工后 1 年，RDI 下降了 4.6，年均下降 1.15。和热拌 ATB-25 沥青混合料对比，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面车辙指数 RDI 及其衰减规律无明显区别。

5.4 路面行驶质量

根据表 9 可知，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面 RQI 较为稳定，工后 RQI 变化较小，工后 5 年 RQI 为 89.9，相对于工后 1 年，RQI 下降了 1.6，年均下降 0.4。热拌 ATB-25 沥青混合料柔性基层沥青路面 RQI 也十分稳定，工后 5 年 RQI >90，相对于工后 1 年，RQI 下降了 2.7，年均下降 0.68。和热拌 ATB-25 沥青混合料对比，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面的 RQI 明显较低，工后 1 年时，乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面的 RQI 为 91.5，热拌 ATB-25 沥青混合料柔性基层沥青路面的 RQI 为 96.7。可见施工过程中乳化沥青厂拌冷再生柔性基层未控制好平整度是造成这种差异的主要原因。根据工后 5 年数据，两种路面的 RQI 指数衰减规律未见明显差异。

5.5 路面结构强度

根据表9可知,乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面路面结构强度较为稳定,工后5年,PSSI无明显衰减,工后五年PSSI>90,评级为“优”,相对于工后1年,PSSI仅下降0.1。和热拌ATB-25沥青混合料柔性基层进行对比,两者之间路面结构强度无明显区别,工后5年热拌ATB-25沥青混合料柔性基层PSSI为99.4,相对于工后1年,仅下降0.4。因此,乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的路面结构强度,路面结构强度衰减规律和热拌ATB-25沥青混合料柔性基层无明显区别。

6 结论

通过对湿热地区高速公路乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面路用性能进行检测与评价研究,得到以下结论:

湿热地区乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面工后5年,路面状况指数仍较好,无明显水损坏问题,可用于多雨地区。乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的抗车辙性能,工后5年,RDI>90,无明显的高温车辙问题,可用于高温气候地区。乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面的RQI相对较低,工后5年,RQI衰减较小,但应注意施工时平整度控制。采用连续式拌合工艺生产的乳化沥青厂拌冷再生混合料材料性能和耐久性能可满足使用要求。和热拌

ATB-25沥青混合料柔性基层沥青路面对比,乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面的路面破损、路面车辙、路面行驶质量和路面结构强度衰减无明显差别,湿热地区乳化沥青厂拌冷再生柔性基层沥青路面具有较好的耐久性。

参考文献:

- [1] 欧阳亮西,王文新. 乳化沥青厂拌冷再生技术在高速公路改扩建工程中的应用[J]. 工程建设与设计,2024(24):154-156.
- [2] 孙军,王元庆. 厂拌冷再生路面基层减排分析及敏感性要素研究[J]. 交通节能与环保,2024,20(4):139-144.
- [3] 邓滔,杨梦,宋涛. 机场高速公路沥青路面大修改造试验研究[J]. 湖南交通科技,2022,48(4):82-85.
- [4] 万超,俞鹏飞. 高速公路乳化沥青厂拌冷再生技术实施效果评价及应用经验总结[C]//中国公路学会养护与管理分会. 中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集,2021:274-278.
- [5] 孙艳华,李泉,吴超凡. 乳化沥青厂拌冷再生混合料性能研究与应用[J]. 湖南交通科技,2021,47(4):49-54.
- [6] 杨彦海,钱百通,安中华,等. 乳化沥青厂拌冷再生技术使用效果评价研究[J]. 公路工程,2021,46(4):129-137,156.
- [7] 武其学. 乳化沥青厂拌冷再生路面结构应用效果分析[J]. 化工管理,2019(20):125.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2019.
- [10] CAI J M, PAN J L, LIN Y Z, et al. Effect of temperature on the low-velocity impact behaviors of engineered cementitious composite [J]. Journal of materials in civil engineering,2023,35(7):04023167.
- [11] 姚洪耀,陆宸宇,滕晓丹,等. 纤维类型及水胶比对海砂ECC宏观力学性能的影响机理分析[J]. 材料科学与工程学报,2023,41(2):222-228,246.
- [12] CHENG L, CHEN S, CHEN F, et al. Research Progress and Performance Evaluation of Polyvinyl Alcohol Fiber Engineered Cementitious Composites[J]. Sustainability, 2023,15(14):10991.
- [13] 张品乐,朱昊天,胡静,等. 高性价比混杂纤维工程水泥基复合材料的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(11):3816-3826.
- [14] 吕林女,陈垚俊,肖静,等. PVA纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(1):97-101,160.
- [15] GAO S L, WANG Z, WANG W C, et al. Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC) [J]. Construction and Building Materials, 2018, 179: 172-185.
- [16] 郝彤,汤晨,王永海,等. 不同配合比参数对高延性纤维增强水泥基复合材料的性能影响[J]. 混凝土,2020(7):1-4.
- [17] 巩妮娜,柳文淑,蔡小宁,等. 工程用水泥基复合材料抗拉及抗弯性能研究与评估[J/OL]. 采矿与安全工程学报,1-12[2025-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1760.td.20240526.1043.002.html>.
- [18] SHI L, LIN S T K, LU Y, et al. Artificial neural network based mechanical and electrical property prediction of engineered cementitious composites[J]. Construction and building materials,2018,174:667-674.

(上接第12页)