

RAP 掺量对厂拌热再生沥青混合料路用性能的影响

张 丛, 唐文洋, 张轩铭, 陈良锐, 何俊雄

(中机中联工程有限公司, 重庆 400041)

摘要:为探究 RAP 掺量对厂拌热再生沥青中路用性能的影响,通过配合比设计确定不同掺量条件下的最佳沥青用量,并对其主要路用性能进行试验分析。结果表明:1)再生沥青混合料动稳定系数随 RAP 掺量增加而增加,当掺量由 20% 增加至 50% 时,动稳定度增加 47.1%;2)在 RAP 掺量由 20% 增加至 50% 过程中,再生沥青混合料弯拉强度增长 20.16%,但弯拉应变降低 31.37%,劲度模数增加 79.94%,且掺量超过 40% 时,低温抗裂性能不再满足规范要求;3)RAP 掺量会降低再生沥青混合料的水稳定性,其由 40% 增加至 50% 过程中,残留稳定度比降低 7.94%。本文成果可为再生沥青混合料在公路路面工程中的应用提供借鉴与参考。

关键词:厂拌热再生沥青; RAP 掺量; 路用性能; 配合比设计

中图分类号:U416.26

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)03-0008-04

doi:10.13402/j.gcjs.2025.03.029

Effect of RAP content on road performance for factory-mixed heat regenerated asphalt mixture

ZHANG Cong, TANG Wenyang, ZHANG Xuanming, CHEN Liangrui, HE Junxiong

(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

Abstract: In order to explore the effect of RAP content on the road performance of plant-mixed heat recycled asphalt, the optimal asphalt under different conditions is determined by mix ratio design, and the main road performance are experimentally analyzed. The results show that: 1) The dynamic stability coefficient of recycled asphalt mixture increases with the increase of RAP content, and when the content increases from 20% to 50%, the dynamic stability increases 47.1%; 2) In the process of increasing the RAP content from 20% to 50%, the tensile strength of the recycled asphalt mixture increases 20.16%, but the tensile strain decreases 31.37%, the stiffness modulus increases 79.94%, and the low-temperature crack resistance no longer meets the requirements of the specification when the content exceeds 40%. 3) The RAP content will reduce the water stability of the recycled asphalt mixture, and the residual stability ratio reduces 7.94% when the content is increased from 40% to 50%. The results can provide a certain reference for application of recycled asphalt mixture in highway pavement engineering.

Key words: factory-mixed heat regenerated asphalt; RAP content; road performance; mix ratio design

随着交通工程的蓬勃发展,截至目前,我国公路总里程已超过 500 万公里。在数目庞大的高等级公路中,沥青路面占据了主要形式。沥青路面设计使用年限通常不超过 20 a,而 20 世纪末修建的沥青路面大多已到达寿命极限。在此背景下,高速公路养护成为近年来的重要研究课题。在公路养护维修

过程中,产生的废旧沥青材料数量庞大,但由于其材料特性特殊,废旧混合料在其他领域的应用受到限制。将废弃沥青混合料应用于公路养护或新建道路建设中的技术称为沥青混合料再生技术。该项技术的应用有助于节约资源、保护环境,是一项绿色环保、节能低碳的新型施工技术^[1-2]。

收稿日期:2024-05-14

作者简介:张 丛(1992—),男,工程师,从事道路设计工作。

再生沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)的生产工艺主要受拌和时间、温度、掺量及拌和时序等因素影响。厂拌热再生技术是再生沥青混合料应用最为广泛的工艺。该项技术在发达国家中已逐步实现标准化和规范化, RAP掺量也已达到了较高水平。然而,我国在该技术的应用起步较晚,质量控制体系尚未完善,工程应用大多处于经验判断阶段。因此,有必要开展RAP掺量对厂拌热再生沥青混合料的路用性能影响的研究。基于此,本文依托贵州某一级公路大修处治工程为背景,探究不同RAP掺量下的厂拌热再生沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性以及水稳定性,以期为高速公路养护维修新技术提供一定参考。

1 工程背景

贵州省遵义市夜郎镇区段某一级公路,于2008年建设,道路宽度为30 m(4.5 m人行道+21 m车行道(双向六车道)+4.5 m人行道),受检路段全长为18.56 km。根据钻芯取样结果显示,该路段路面面层为沥青材质,平均厚度为10 cm,路段路面基层材质为水稳层,平均厚度为36.5 cm。采用落锤式弯沉仪测定路面弯沉,按重交通评价,当弯沉值大于31(单位为0.01 mm)为基层临界或不足,应予以补强。根据弯沉测量详细数据,受检路面大于31的段落占比为33.5%。

对公路K0+000~K18+568段沥青面层进行调查,检测总面积为38 976 535 m²,总体评价结果如表1所示。

表1 路面损坏情况调查结果

路面调查位置	路面状况指数	评价等级
左幅	52.24	差
右幅	34.87	差
全幅	42.54	差

由表1可知:依据《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)规定,路面综合评价等级为差,路面病害严重,已对车辆的正常运行产生了较大影响,因此需要对公路及其沿线设施进行大修处置。

针对上述调查结果,对无病害及松散、车辙轻病害路段刨铣2 cm;对龟裂、横纵裂缝、块状裂缝等病害较重路段需挖除原有路面结构层,重

新铺筑5 cm厚AC-16上面层+7 cm厚AC-20下面层,最后采用4 cm厚SMA-13进行罩面;对于废旧沥青混合料而言,则采用厂拌热再生技术应用于此次大修工程的沥青面层中。

2 配合比设计

2.1 RAP技术指标

RAP材料的回收利用方式主要有翻松和铣刨两种。翻松设备工作原理:将原有路面结构进行振捣翻松,不改变原始路面混合料的级配,此方式中,RAP材料的回收利用率较高,但作业时间较长,一般对于旧路面结构的全厚度回收处理采用翻松的方式,其缺点在于破碎后的沥青材料容易发生离析现象,不建议在高等级公路的RAP回收材料中使用。针对面层结构指定厚度的回收处理多采用铣刨的方式。铣刨设备能够根据实际情况,分层、分厚度进行回收处理,同时铣刨机的封闭作业不会造成严重的环境污染,处理后的RAP材料运输也较为便捷^[3]。通过对比分析,铣刨作业的回收效率较翻松作业的回收效率更高,但矿料级配偏小。综合考虑,采用铣刨的方式对RAP材料进行回收利用更为合适。

铣刨得到的RAP材料还需进行以下处理步骤:1)粒径超过19 mm的RAP颗粒需进行二次破碎后方可使用;2)筛分过程中,筛分等级不少于三档;3)RAP材料储存过程中应防止雨水侵蚀,储存时间不应超过规定期限,处理完成后应立即使用,以避免重新结块;4)对于厂拌热再生沥青混合料,应仅使用改性沥青刨铣材料。RAP处理完成后,需达到《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)要求。

2.2 再生沥青配合比设计

在再生沥青的工程应用中,RAP掺量越高,其回收利用率也越高,工程成本相应降低。然而,再生沥青的路用性能会随RAP掺量的变化而发生改变,因此不能一味地追求成本而忽略工程质量。特别是路面的面层结构直接承受车辆荷载作用,需要具备足够的强度保障,否则在设计使用年限内,沥青面层可能会再次出现开裂等破坏。本文以上面层AC-16为研究对象,设计含不同RAP掺量的厂拌热再生沥青混合料。AC-16矿料粒度组成如表2所示。

表 2 AC-16 矿料粒度组成 (质量分数)

级配类型	>19.000 mm	(16.000, 19.000]	(13.200, 16.000]	(9.500, 13.200]	(4.750, 9.500]	(2.360, 4.750]	(1.180, 2.360]	(0.600, 1.180]	(0.300, 0.600]	(0.150, 0.300]	(0.075, 0.150]
级配上限	100	100	85	73	52	38	20	18	13	11	8
级配下限	100	95	75	60	38	25	15	10	6	6	6

为探究不同 RAP 掺量条件下厂拌热再生 AC-16 沥青混合料的路用性能,根据工程经验选择 4 种 RAP 掺量比例(20%、30%、40%、50%)的沥青混合料进行物理力学性能试验。为确保不同掺量条件下的再生沥青混合料合成级配曲线接近 AC-16 级配中值附近,采用马歇尔试验法确定最佳沥青用量。试验结果证明:当 RAP 掺量比例分别为 20%、30%、40%、50% 时,再生沥青混合料对应的最佳沥青用量分别为 4.6%、4.73%、5.08%、4.95%。由此可知:RAP 材料老化后的吸油能力有所下降,旧沥青得到利用,但掺量越大,其旧沥青利用效率越低。

3 路用性能研究

沥青混合料是一种复合材料,其路用性能受沥青质、粗细骨料、矿物添加剂等多种因素影响,在工程中一般关注高温稳定性、低温抗裂性以及水稳定性。

3.1 高温稳定性

高温稳定性反映的是沥青混合料在高温条件下的强度和刚度。这一力学指标主要用于评估沥青混合料在荷载作用下抵抗永久变形的能力,如泛油、推挤、拥包和车辙等现象。在工程中,为改善厂拌热再生沥青的高温稳定性,可采取以下措施:使用优质高黏度沥青、选用棱角度较大的集料,同时增加粗集料质量百分数并控制沥青用量^[4-5]。

沥青混合料高温稳定性的检测方式主要为车辙板试验。选择标准养护条件下的标准车辙板试件,测定其动稳定度。动稳定度数值的大小直接反映沥青混合料的高温稳定性能,其计算方式参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)。本工程拟定 4 种 RAP 掺量条件下的厂拌热再生沥青混合料车辙试验结果(表 3)。

由表 3 可知:随着 RAP 掺量的增加,厂拌热再

表 3 厂拌热再生沥青车辙试验结果

RAP 掺量/%	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	规范要求/ (次·mm ⁻¹)
20	1 653.8	>1 000
30	1 938.5	>1 000
40	2 195.6	>1 000
50	2 433.1	>1 000

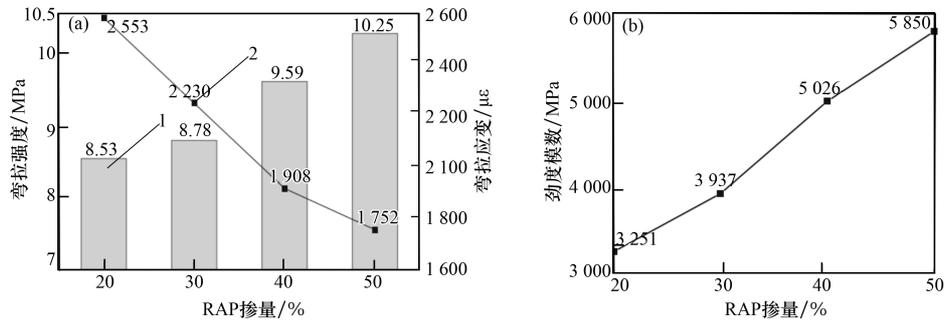
生沥青混合料动稳定度不断提高。当掺量为 20% 时,动稳定度为 1 653.8 次/mm;当掺量增加至 50% 时,动稳定度增加至 2 433.1 次/mm,增长率为 47.1%。原因在于 RAP 材料中的沥青质存在老化现象,其质地较硬,黏度较大,从而提高了再生沥青的高温稳定性。然而,沥青老化也会导致混合料的针入度和延度降低,因此工程中并非 RAP 掺量越高越好^[6]。

3.2 低温抗裂性

在低温条件下,沥青混合料表面层会发生收缩变形。受内外温差影响,其内部会产生较大的拉应力。当此应力值超过材料的抗拉强度极限时,沥青便会出现局部开裂现象。沥青开裂会导致路表和空气中的水分进入混合料内部,软化路面结构并降低路表承载能力。此类微裂缝如不及时修补,在车辆荷载和外部温度交替变化的作用下,裂缝会逐渐扩展并连成网状,使沥青混合料的使用寿命大幅缩短^[7]。

沥青混合料低温抗裂性能力学评价指标主要有弯拉强度、弯拉应变以及材料劲度模数。采用低温弯曲破坏试验,在试验温度为 -15℃ 条件下,得到不同 RAP 掺量条件下的厂拌热再生沥青混合料低温抗裂性各项力学指标变化情况,如图 1 所示。

由图 1 可知:随着 RAP 掺量的增加,厂拌热再生沥青混合料的抗弯拉强度和劲度模数均呈增大趋势,而弯拉应变呈减小趋势。当 RAP 掺量从 20% 增加至 50% 时,其弯拉强度从 8.53 MPa 增加



(a) 再生沥青弯拉性能曲线; (b) 再生沥青劲度模数曲线

1—弯拉强度; 2—弯拉应变。

图1 厂拌热再生沥青低温抗裂性随RAP掺量变化曲线

到 10.25 MPa, 增长率为 20.16%; 与此同时, 弯拉应变降低了 31.37%, 劲度模数增加了 79.94%。从混合料的表观物理性质来看, RAP 材料掺量的增加提高了厂拌热再生沥青混合料的硬度和黏度^[8]。然而, 弯拉应变的降低表明, 随着 RAP 掺量的增加, 混合料的抗变形能力逐渐减弱。当掺量超过 40% 时, 厂拌热再生沥青混合料弯拉应变降至 1 908 $\mu\epsilon$, 已低于规范要求的 2 000 $\mu\epsilon$ 。此时, 沥青表面在低温条件下容易产生微小裂缝, 导致路用性能下降。因此, 在相同条件下, 厂拌热再生沥青混合料的 RAP 掺量应控制在 30% 为宜^[9]。

3.3 水稳定性

路面结构长期暴露在外环境中, 与雨水直接接触。在车辆荷载的共同作用下, 外部水分逐步渗透至沥青结构中, 导致沥青与集料之间的黏结作用减弱, 最终出现松散、坑槽等破坏^[10]。

针对沥青混合料水稳定性的判定, 最常见的方法为浸水马歇尔试验。试验结果用于计算残留稳定度, 以表征沥青混合料的水稳定性。表 4 为沥青混合料浸水马歇尔试验结果。

表4 浸水马歇尔试验结果

RAP 掺量/%	浸泡不同时间后的稳定度/kN		残留稳定度/%
	30 min	240 min	
20	9.02	8.71	96.56
30	10.35	9.22	89.08
40	11.53	10.23	88.73
50	12.39	10.01	80.79

由表 4 可知: 随着 RAP 掺量增加, 其残留稳定度呈现下降趋势。特别是在掺量从 40% 增加至 50% 的过程中, 残留稳定度从 88.73% 降低至 80.79%,

降幅达 7.94%。产生上述现象的原因在于 RAP 材料本身的孔隙较多, 浸泡时间越长, 试件中沥青的黏附效果越低, 稳定度随之下降。当掺量超过 40% 后, RAP 材料孔隙对水稳定性的影响占主导地位, 导致再生沥青混合料的稳定性迅速下降^[11]。

4 结论

(1) 再生沥青混合料动的稳定度随 RAP 掺量的增加而提高。当掺量从 20% 增加至 50% 时, 动稳定度增加了 47.1%。这表明 RAP 材料能够有效提升再生混合料的高温稳定性。

(2) 再生沥青混合料的抗弯拉强度和劲度模数随 RAP 掺量的增加而增大, 但弯拉应变呈现下降趋势。在掺量从 20% 增加至 50% 的过程中, 再生沥青混合料的弯拉强度增长了 20.16%, 而弯拉应变降低了 31.37%, 劲度模数增加了 79.94%。此外, 当掺量超过 40% 时, 其低温抗裂性能不再满足规范要求。

(3) RAP 掺入会降低再生沥青混合料的水稳定性。当掺量超过 40% 后, RAP 材料孔隙对水稳定性的影响占主导地位, 导致再生沥青混合料的稳定性迅速下降。因此, RAP 掺量应控制在 30% 左右为宜。

参考文献:

- [1] 孙欣. RAP 掺量对再生沥青混合料最佳沥青用量影响分析[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(1): 156-159.
- [2] 邳晓, 侯可, 张迅, 等. 高掺量改性 RAP 热再生沥青混合料低温抗裂性能宏观机理[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(11): 1190-1202.

(下转第 17 页)

要控制指标;而主塔和主梁的应力变化表现不敏感,局部少量换索对整体应力变化影响较小。

(2)长索区斜拉索对塔偏的影响较大,在换索方案选择时应避免桥塔上产生过大的不平衡力,以防止出现较大的塔偏;同时,长索区的索力较大,换索对结构的影响显著,对施工安全性要求较高,因此在方案比选中应着重考虑这一区域。中长索区的斜拉索索力较大,各方案的参数变化量和变化率通常会在这一区域达到峰值,施工风险较高,需加以重视。短索区各方案的参数变化量较小而且变化率接近,在这种情况下,选择施工效率更高的方案可以兼顾安全性的同时显著提高施工效率。

(3)由于主跨与边跨存在不对称性,加上辅助墩对边跨的支撑作用,方案1的最大下挠值和索力最大增量在边跨一般小于主跨,而塔顶偏位在主跨一般小于边跨。

参考文献:

- [1] 李斯奇. 独塔钢斜拉桥体系设计理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [2] 袁和旭. 混凝土斜拉桥换索设计方法研究[J]. 工程

(上接第11页)

- [3] 张业盛,金立兵,段杰,等. 再生混凝土的配合比设计研究综述[J]. 工程建设,2024,56(3):1-5.
- [4] 冯亮,郑茂营. RAP掺量与新旧沥青融合程度对热再生混合料性能的影响[J]. 路基工程,2023(2):107-113.
- [5] 赵彩,马鲁宽. 高RAP掺量厂拌热再生沥青混合料路用性能研究[J]. 交通科技,2022(6):127-130.
- [6] 王智超,胡槟,沈明燕,等. 基于路用性能的热再生沥青混合料RAP掺量研究[J]. 公路交通科技,2024,41(1):10-17.
- [7] 王雪松. 再生骨料混凝土增强处理方法和耐久性研究综述[J]. 工程建设,2023,55(2):23-28.

技术研究,2024,9(2):202-204.

- [3] 张伟山,王俊刚. 独塔单索面斜拉桥地震弹性与弹塑性响应分析[J]. 工程建设,2016,48(1):13-18.
- [4] 公路斜拉桥设计规范:JTG/T3365-01-2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [5] 高志朋. 郧县汉江公路大桥全桥换索计算分析[J]. 工业建筑,2023,53(增刊2):376-378.
- [6] 史国刚,孙洪滨,吉伯海,等. 基于灵敏度分析的斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 防灾减灾工程学报,2011,31(5):590-594.
- [7] 叶锦辉,李军兵,郑恒斌,等. 大跨径混合梁斜拉桥全桥更换斜拉索顺序的研究[J]. 公路,2024,69(3):90-97.
- [8] 齐东春,王宇飞,李琦,等. 基于联合静动力修正模型的斜拉桥换索方案[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(11):1-8.
- [9] 张鸿,翁方文,黄灿. 基于敏感性分析与交通荷载控制法的斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 中外公路,2015,35(1):187-190.
- [10] 杨起,普毅,曹正,等. 独塔斜拉桥拉索更换顺序研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014,10(6):333-336.

- [8] 杨耀辉,汲平,李立平,等. 大掺量RAP温再生沥青混合料设计及路用性能研究[J]. 石油沥青,2022,36(3):24-29.
- [9] 万丽霞. RAP掺量对AC-13再生沥青混合料性能影响研究[J]. 交通节能与环保,2024,20(1):160-163.
- [10] 左锋,叶奋,宋卿卿. RAP掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(4):1403-1410.
- [11] 曹阳,张东长. RAP的性能评价及再生利用[J]. 工程建设,2010,42(5):22-25.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。