

基于 R_{CA} 指标与响应曲面法的再生沥青混合料设计及性能研究

李新臻

[上海公路投资建设发展有限公司, 上海市 200335]

摘要: 为实现无废公路建设目标并提升再生沥青混合料(RAP, reclaimed asphalt pavement)的利用率, 针对传统掺量指标未能区分RAP粗、细组分性能影响差异的问题, 提出了RAP粗骨料替代率(R_{CA})指标。研究以 R_{CA} 为核心变量, 采用响应曲面法优化后AC-20型配比的沥青混合料, 系统测试其高温、低温及水稳定性性能, 并进行了相应的工程示范应用。结果表明: 随着 R_{CA} 的增加, 混合料高温稳定性显著提升, 但低温抗裂性及水稳定性下降, 当 R_{CA} 超过50%时, 混合料的最大弯拉应变接近《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)限值, 达到70%时, 混合料的浸水残留稳定性和冻融劈裂强度比已不满足规范要求; R_{CA} 为30%的热再生混合料施工性能良好。相较于传统RAP掺量指标, R_{CA} 指标能更精准地表征RAP对混合料路用性能的影响机制, 可为后续提升再生混合料设计水平提供参考价值。

关键词: 无废公路; 再生沥青混合料; 高掺量; 响应曲面法; 路用性能; 工程应用

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0046-04

Design and Performance Study of Recycled Asphalt Mixture Based on R_{CA} Indicator and Response Surface Methodology

LI Xinzhen

[Shanghai Highway Investment and Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200335, China]

Abstract: To achieve the goal of "No-Waste Highway" construction and improve the utilization rate of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), this study proposes the RAP Coarse aggregate replacement ratio (R_{CA}) indicator, addressing the limitation of traditional RAP content metrics in differentiating the performance impacts of coarse and fine RAP components. Using R_{CA} as the core variable, the mix proportion of AC-20 mixture was optimized via response surface methodology. Its high-temperature, low-temperature, and moisture stability performance were systematically tested, followed by a corresponding engineering demonstration. The results indicate that: (1) As R_{CA} increases, the high-temperature stability of the mixture improves significantly, while its low-temperature crack resistance and moisture stability decline. When R_{CA} exceeds 50%, the maximum flexural tensile strain approaches the specification limit, and at 70% R_{CA} , the retained Marshall stability and freeze-thaw splitting strength ratio fail to meet the specification requirements; (2) The engineering application confirms that the hot recycled mixture with an R_{CA} of 30% exhibits good construction performance. Compared to the traditional RAP content indicator, the R_{CA} indicator can more precisely characterize the influence mechanism of RAP on the pavement performance of the mixture, providing valuable reference for enhancing the design level of recycled mixtures in the future.

Keywords: no-waste highway; reclaimed asphalt pavement (RAP); high rap content; response surface methodology (RSM); pavement performance; engineering application

0 引言

国务院于2018年提出“无废城市”建设理念^[1], 交通强国战略亦明确要求通过固废再生技术推动绿色公路发展^[2]。2024年, 上海市颁布《上海市无废城市建设条例》及相关工作方案, 以进一步构建建筑垃圾综合治理体系, 促进循环经济^[3]。在此背景下, 道

收稿日期: 2025-10-19

基金项目: 上海城投(集团)有限公司科技创新计划(CTKY-ZDZX-2023-003); 上海市科委“科技创新行动计划”(23DZ1202901)

作者简介: 李新臻(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事重大工程建设管理工作。

路工程在升级改造过程中既会产生大量固体废弃物,又具备了消纳废弃物的潜力^[4]。其中再生沥青混合料(RAP)的资源化利用已成为“无废公路”建设与固废处理的重要方向之一^[5]。

目前,RAP在热再生沥青混合料中的利用率普遍较低(通常低于30%),且传统的RAP掺量指标未有效区分RAP中粗、细组分对混合料性能的差异化影响。研究表明,RAP中的粗骨料表面老化沥青膜较薄、结团率低,更接近于原生骨料,对混合料的路用性能影响小,可大比例替换原生粗骨料;细骨料则因沥青含量高、级配变异大、结团严重,对混合料的低温抗裂性、水稳定性等性能的负面影响显著^[6]。据此,本研究针对再生粗骨料进行掺量设计,规避再生细骨料带来的性能风险,引入RAP粗骨料替换率(R_{CA})指标,并以该指标作为核心控制变量,开展厂拌热再生沥青混合料的配合比优化、路用性能系统研究和工程示范应用,旨在提升旧料利用率和利用精度,推动公路建设绿色转型,助力交通强国战略实施。

1 研究材料与方法

试验用RAP来源于某高速公路上面层铣刨料,经精细分离后使用其中的粗骨料。经燃烧法测定,其沥青含量为0.8%。新沥青采用70#道路石油沥青,再生剂为市售复合型再生剂。

研究以RAP粗骨料替代率(R_{CA})为核心变量。 R_{CA} 所涉及的粗骨料指粒径 $d \geq 2.36$ mm的RAP颗粒;细骨料指粒径 $d < 2.36$ mm的RAP颗粒。分别针对 R_{CA} 为30%、40%、50%、60%、70%的情况进行设计。

RAP粗骨料替代率 R_{CA} 的表达式为:

$$R_{CA} = \frac{M_{RAPc}}{M_{tc}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_{RAPc} 为再生RAP粗骨料质量; M_{tc} 为混合料全部粗骨料总质量。

R_{CA} 与传统RAP掺量指标的关系为:

$$P_{RAP} = R_{CA} \times \frac{100 - P_{2.36}}{100 \times (1 + P_b)} \quad (2)$$

式中: P_{RAP} 为RAP再生料占整个混合料的质量比; $P_{2.36}$ 为集料2.36 mm档筛孔质量通过率; P_b 为油石比,指新沥青+RAP中有效沥青之和与矿料总质量之比。

混合料选用AC-20型,采用响应曲面法(RSM)^[7],以关键筛孔通过率、油石比作为影响因素(影响因子水平范围见表1),以沥青饱和度、空隙率、马歇尔稳定度及矿料间隙率作为响应指标进行级配优化设计,结果见表2。

表1 影响因子水平范围表

不同筛孔尺寸通过率/%			油石比/%
19 mm	4.75 mm	0.075 mm	
90~100	26~56	3~7	3.7~4.9

表2 不同RAP掺量下AC-20配合比优化结果

$R_{\text{CA}}/\%$	RAP 掺量/%	不同筛孔尺寸通过率/%											$P_{\text{b}}/\%$
		19 mm	16 mm	13.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	
30	20.5	97.18	86.89	76.58	61.78	39.26	28.58	20.85	15.41	11.12	8.18	6.21	4.44
40	27.2	97.32	86.61	76.36	61.48	39.12	28.10	20.15	14.89	10.56	7.62	5.52	4.48
50	33.7	96.61	86.23	76.21	61.18	38.78	27.45	19.89	14.14	10.18	7.31	5.23	4.56
60	39.8	96.12	85.69	75.48	60.66	38.28	26.85	18.85	13.45	9.45	6.72	4.72	4.79
70	46.1	95.20	84.15	74.46	59.76	37.56	26.10	18.23	12.56	8.65	6.15	4.24	4.84

经拟合,模型 $R^2=0.92$, $P<0.01$,表明模型具有较高的预测精度和统计显著性。

由表2可知,随着 R_{CA} 的提高(RAP掺量亦同比增加),所需油石比相应增大。主要原因在于,RAP掺量增加意味着旧沥青含量升高,虽然添加再生剂能有效提升旧沥青性能,但其中一部分会被集料表面的空隙吸收,无法有效发挥胶结作用。为了确保混合料整体性能达标,就需要增加油石比,以增强集料之间的黏结力。

此外,RAP中严重老化的沥青往往紧密包裹在集料表面,形成所谓“黑石”,这些裹覆沥青的颗粒实

际上相当于粗集料。因此,随着 R_{CA} 的增大,再生混合料的最佳级配会逐渐偏向粗集料更多的下限方向,即粗集料比例随之增加。

2 再生沥青混合料路用性能研究

采用基于响应曲面法优化出的配合比,对各 R_{CA} 指标下混合料的路用性能展开研究。

2.1 高温稳定性

沥青混合料的高温稳定性采用车辙试验(T0729)^[8]结果表示,试验温度为60℃。

不同 R_{CA} 下车辙试验结果见表3。

表 3 不同 R_{CA} 下车辙试验结果 单位:次/mm

$R_{CA}/\%$	动稳定度	规范要求
30	2 850	$\geq 1\ 000$ (普通沥青)
40	3 200	
50	3 680	
60	4 250	
70	4 850	

由表 1 可知:随着 R_{CA} 的提高,混合料动稳定度显著上升,高温稳定性增强。这是因为 RAP 中老化沥青增多,其硬度大、劲度高,提升了混合料整体刚度^[9]。即使 R_{CA} 达到 70%,混合料动稳定度仍远高于规范^[8]要求,表明高 R_{CA} 混合料具有优异的高温抗车辙能力,适用于高温地区。

2.2 低温抗裂性能

沥青混合料的低温抗裂性采用弯曲梁试验 (T0715)^[10] 结果表示,试验温度为 $-10\ ^\circ\text{C}$ 。

不同 R_{CA} 下小梁弯曲试验结果见表 4。

表 4 不同 R_{CA} 下小梁弯曲试验结果

$R_{CA}/\%$	抗弯拉强度 R_B/MPa	最大弯拉应变 $\varepsilon_B/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	弯曲劲度模量 S_B/MPa	规范要求 $\varepsilon_B/(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$
30	8.2	2 850	2 877	$\geq 2\ 000$
40	8.7	2 550	3 412	
50	9.1	2 250	4 044	
60	9.6	1 950	4 923	
70	10.3	1 650	6 242	

由表 4 可见,随着 R_{CA} 的增加,抗弯拉强度 R_B 、弯曲劲度模量 S_B 增大,最大弯拉应变 ε_B 下降。当 R_{CA} 达到 70% 时, ε_B 为 $1\ 650\ \mu\text{m}/\text{m}$,已低于规范要求 ($\geq 2\ 000\ \mu\text{m}/\text{m}$)。这说明 R_{CA} 过高会导致混合料低温脆性增加,柔韧性下降,低温抗裂性能降低^[10]。

2.3 水稳定性

采用浸水马歇尔试验来评估沥青混合料的水稳性能^[11],浸水时间 48 h,冻融循环 1 次。

不同 R_{CA} 下浸水马歇尔及冻融劈裂试验结果见表 5。

表 5 不同 R_{CA} 下浸水马歇尔及冻融劈裂试验结果 单位: %

$R_{CA}/\%$	浸水残留稳定度		冻融劈裂强度比	
	试验值	规范要求	试验值	规范要求
30	86.5	≥ 80	82.1	≥ 75
40	83.2		78.5	
50	79.8		74.0	
60	75.4		69.2	
70	70.1		63.5	

由表 5 可知,随着 R_{CA} 的提高,沥青混合料的浸水残留稳定度和冻融劈裂强度比均呈下降趋势。当

R_{CA} 为 60%、70% 时,沥青混合料的浸水残留稳定度和冻融劈裂强度比已接近或低于规范下限。这主要归因于:(1)RAP 中老化沥青与集料的黏附性本身较差^[12];(2)高 R_{CA} 下,再生剂难以完全恢复所有老化沥青的性能,导致混合料抗水损害能力减弱^[13]。

3 示范工程应用——以 G320 公路改建工程为例

3.1 工程概况

G320 公路改建工程松江段全长约 12.5 km,线路走向沿既有车亭公路,南起松江金山区界,北至北松公路交叉口,与 G15 沈海高速公路、新艳公路、大叶公路、浏亭路等道路相交。路面结构采用“上面层 SMA-13 + 中面层 AC-20C(热再生)+下面层 AC-25C”结构。

3.2 试验段方案

试验段中面层采用 AC-20C 热再生沥青混合料,控制 R_{CA} 为 30%(对应 RAP 掺量为 20.5%)。试验段路面结构方案见表 6。

表 6 试验段路面结构方案

结构层次	机动车道路面结构	厚度/cm
上面层	SMA-13(SBS 改性)	4
中面层	再生 AC-20C(SBS 改性), $R_{CA}=30\%$	6
下面层	AC-25C	8
层间	乳化沥青稀浆封层	0.8
	透层油	
基层	水泥稳定碎石(3.5 MPa/7 d)	20
	水泥稳定碎石(4 MPa/7 d)	20
上中下沥青面层及封层间撒布黏层油		

3.3 施工工艺

3.3.1 原材料准备

AC-20C 热再生沥青混合料中粗骨料(3~5、5~15 mm 两档料)中旧骨料掺比均为 30%,即 $R_{CA}=30\%$,沥青用量为 4.24%(其中新沥青用量 3.27%)。RAP 用量占新沥青质量的 23%;再生沥青混合料针入度恢复率不小于 85%,软化点恢复率为 90%~110%,以保证高温性能不至过度衰减。原材料加热阶段 RAP 初热温度为 110~130 $^\circ\text{C}$,新沥青加热拌和温度为 145~165 $^\circ\text{C}$,混合料到场温度不低于 140 $^\circ\text{C}$,摊铺温度不低于 135 $^\circ\text{C}$ 。

AC-20C 配合比设计检测结果见表 7。

3.3.2 机械配置

项目机械配置表见表 8。

3.3.3 施工工艺控制

施工过程中严格控制原材料质量、拌和温度

表 7 AC-20C 配合比设计检测结果

试验项目	技术要求	检测结果
设计空隙率 VV/%	4~6	4.02
相对密度(毛体积)		2.43
最大理论相对密度		2.53
矿料间隙率 VMA/%	≥ 13	13.36
沥青饱和度 VFA/%	65~75	69.94
稳定度/kN	≥ 8.0	13.2
流值/(0.1 mm)	15~40	25.9

表 8 项目机械配置表

机械装备名称	型号	容积/t	数量/台
双振双钢轮压路机	BW203AD-4AM12t	12	2
振动压路机	STR130C-8S		1
橡胶轮压路机	SPR300C-8S30T	26	2
水车	JX-08/中国	8	1

(RAP 初热 90 ℃, 新集料 190~220 ℃)、摊铺和碾压工艺^[14]。

3.4 质量检测与评价

现场实测项目及综合质量评价结果见表 9。本次检测为试验段初步检测, 后续全线施工将按照规范要求的频率进行系统检测。现场检测结果表明, 沥青混合料压实度、厚度、渗水系数等指标均符合规范要求, 工程质量综合评价结果为“良好”。经过试验段的摊铺, 达到了预期的效果, 质量符合设计和规范要求。

表 9 现场实测项目情况及综合质量评价结果

项目	质量要求或允许差	检测点数	合格点数	合格率/%
压实度	AC-20C 不小于 98% (马氏); 94% ~ 97% (理论)	2	2	100
厚度	平均值不小于 H (H 为设计厚度); 规定 极值不小于 $0.85H$; 合格值不小于 $0.9H$	2	2	100
渗水系数	AC-20C: 80 mL/min	2	2	100

4 结 语

(1)提出的 RAP 粗骨料替代率(R_{CA})指标, 能更精确地表征 RAP 对混合料路用性能的影响机制。基于响应曲面法可有效优化不同 R_{CA} 下的混合料配合比, 随着 R_{CA} 的增加, 所需油石比相应提高, 级配向更粗方向调整。

(2)高 R_{CA} 混合料表现出优异的高温稳定性。即使 R_{CA} 达 70%, 其动稳定度仍可满足相应规范要求, 适合在高温多雨地区应用。

(3)再生沥青混合料的低温抗裂性和水稳定性随着 R_{CA} 的增加而降低。当 R_{CA} 为 50% 时, 混合料低温性能接近规范下限, 安全裕度仅为 12.5%, 建议在实际工程中谨慎使用, 并采取增强措施; 当 R_{CA} 超过 50% 时, 混合料最大弯拉应变接近规范限值; 当 R_{CA} 达到 70% 时, 混合料浸水残留稳定度与冻融劈裂强度比已不满足规范要求。因此, 在实际工程中, 若不采取特殊措施(如高性能再生剂、材料预处理), R_{CA} 不宜超过 50%。

(4) R_{CA} 为 30% 的热再生沥青混合料在 G320 公路改建工程中应用效果良好, 施工工艺成熟可控, 实体工程质量满足规范要求, 具备推广价值。

(5)本研究通过引入 R_{CA} 指标, 为基于组分特性的高掺量 RAP 资源化利用提供了创新的技术视角、系统的设计方法和工程实践依据, 有助于推动无废公路建设及沥青路面绿色维修技术的精细化发展。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅.“无废城市”建设试点工作方案[Z].2018.
- [2] 中共中央, 国务院. 交通强国建设纲要[Z].2019.
- [3] 上海市人民政府. 上海市“无废城市”建设工作方案[Z].2021.
- [4] 陈宇亮, 黄毅, 彭孝南, 等. 就地热再生沥青路面建设期能耗与碳排放分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 30-39.
- [5] PROSPERI E, BOCCI E. A review on bitumen aging and rejuvenation chemistry: Processes, materials and analyses[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 1-35.
- [6] 李波, 王宏军, 刘黎萍, 等. 再生沥青混合料中旧料粒径影响的细观分析[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 23-29.
- [7] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚, 等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 72-88.
- [8] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] 卢青兵, 倪文全, 陆青清, 等.“双碳”背景下沥青路面绿色可持续发展研究进展[J]. 市政技术, 2023(5): 42-51.
- [10] 王宏, 刘小明. 再生沥青混合料设计方法与性能评价[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 45-52.
- [11] 彭文耀, 李婷玉, 陈宇亮, 等. 高掺量厂拌热再生改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2022, 47(4): 155-159.
- [12] 刘小明, 王宏. 高掺量 RAP 沥青混合料路用性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 89-96.
- [13] 李楚雄, 王岚. 老化及冻融条件下温拌再生沥青混合料抗反射裂缝疲劳损伤特性研究[J]. 市政技术, 2025(6): 16-25.
- [14] 王伟. 热再生沥青混凝土在 G15 高速大修中的应用[J]. 上海公路, 2018(2): 123-12.