

全比例温拌再生沥青混合料的路用性能

蔡祥¹, 彭馨彦²

(1. 广州市市维新材料科技有限公司, 广州 510000; 2. 广州市市政工程维修处有限公司, 广州 510000)

摘要: 废旧沥青混合料的回收再利用是推动节能减排的重要举措。针对 RAP(废旧沥青混合料)利用率较低等问题, 提出全比例温拌再生沥青混合料的技术方案, 实现 100% RAP 利用率, 同时以马歇尔试验确定最佳外掺剂用量。将全比例温拌再生沥青混合料与常规热拌沥青混合料进行性能比对。结果表明: 再生 AC-13C 沥青混合料的 60、70 °C 车辙动稳定度分别为 6 364、3 158 次/mm, 低温弯曲破坏应变为 2 834 $\mu\epsilon$, 其水稳定性等路用性能测试指标也满足现行规范的技术要求。

关键词: 全比例 RAP(废旧沥青混合料); 温拌; 性能比对; 路用性能

中图分类号: U416.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0309-05

伴随着经济发展, 国内道路建设水平也有了长足进步。截至 2022 年末, 全国公路通车总里程为 544 万 km, 公路养护里程为 542 万 km, 占公路里程比重已超过 99%^[1]。当前主要采用病害路面铣刨后加铺热拌沥青混合料的养护形式, 这就会带来大量的废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP), 受限于各种原因, 目前对这些废旧沥青混合料的利用率不高, RAP 产生后一般会托运集中堆放。目前针对 RAP 主要有 4 种处理方式: 厂拌热再生、就地热再生、厂拌冷再生和就地冷再生^[2], 其中最常用的是厂拌热再生技术, 它是将旧料、再生剂先行搅拌之后, 再投入新料与沥青进行拌和出料的方式。这种生产方式的旧料使用率低, 无法有效削减日益增多的 RAP 存量; 而且生产温度与常规热拌沥青混合料相同, 通常为 160~180 °C, 这不仅会加速旧料中沥青的二次老化, 而且会产生大量的烟尘, 污染环境^[3]。

沥青温拌技术是一种新型节能的沥青混合料生产技术, 它通过降黏剂来降低沥青黏度, 从而达到在较低温度下拌和的目的。温拌沥青混合料技术发源于欧美等国, 国内对温拌技术的研究时间较短, 与国外技术有一定的差距。目前国际上公认的主流温拌方式有 3 种: 第 1 种是有机降黏类温拌剂, 代表样品为 Sasobit(沙索必德), 为长链脂肪族碳氢有机物, 具有适应性好、温拌效果好、提升混合料高温性能等优点; 第 2 种是表面活性类温拌剂, 代表样品为 Evotherm, 为长碳链和附着于两端的亲油/亲

水基团, 拌和时这两种基团发挥润滑作用, 降低沥青混合料的拌和温度^[4], 同时具有节能环保、延长施工时间、增加混合料供应半径、减轻沥青老化、提高混合料整体路用性能等显著优势; 第 3 种是泡沫降黏技术, 代表样品为泡沫沥青, 主要用于低温再生沥青混合料的拌和, 是一种物理降黏手段。王真等^[5]结合温拌与再生技术, 研究了温拌再生沥青混合料的各项试验性能, 得出温拌技术可以提高 RAP 掺配比例等结论。林勇文等^[6]采用不同种类温拌剂与不同用量的 RAP 进行对比试验, 发现 RAP 掺量可提高至 60% 以上而不影响混合料性能, 同时针对不同的现场施工工况, 应采取不同种类的温拌剂。

基于此, 在充分利用 RAP 的基础上, 结合温拌技术带来的节能减排优势, 开发全比例温拌再生沥青混合料。该方案无外掺集料, 采用 100% RAP 设计, 主要包括 RAP、温拌剂、再生剂、道路石油沥青等组分, 设计了再生 AC-13C 型矿料级配, 在此基础上测定分析再生沥青混合料的马歇尔稳定度、车辙动稳定度、水稳定性、低温抗裂性等路用性能, 以期行业的发展进步提供参考。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料

1.1.1 废旧沥青混合料(RAP)

试验所用 RAP 为广州市某高速公路铣刨后的废旧沥青混合料, 通过离心分离技术得到废旧沥青, 测试其基础 3 大指标性能, 见表 1。

收稿日期: 2024-05-09

作者简介: 蔡祥(1994—), 男, 河南信阳人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为市政路面材料; 彭馨彦(1986—), 男, 湖北宜昌人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为道路材料。

1.1.2 温拌剂

采用试验室自制表面活性类温拌剂,具有常温下性质稳定、高温降黏效果好的特点。其技术指标见表2。

1.1.3 沥青再生剂

选用试验室自制的分散型沥青再生剂,其技术指标见表3。

1.1.4 道路石油沥青

采用厦门市某科技公司生产的70#A级道路石油沥青,其各项技术指标见表4。

表1 废旧沥青参数指标

试验项目	试验结果	测试方法
软化点(R&B)/℃	67.4	T0606
针入度(25℃,5s,100g)/0.1mm	30.8	T0604
延度(15℃)/cm	7.1	T0605

表2 温拌剂参数指标

测试项目	性能指标
密度/(g·cm ⁻³)	1.09
固含量/%	100
pH	9.9

表3 沥青再生剂参数指标

测试项目	性能指标
60℃黏度/cSt	975
15℃密度/(g·cm ⁻³)	1.01
闪点/℃	213
饱和分含量/%	27.8
芳香分含量/%	61.2
薄膜烘箱试验前后黏度比/%	0.96
薄膜烘箱试验前后质量变化/%	0.37

注:1 cSt=0.001 Pa·s。

表4 70#A级道路石油沥青参数指标

试验项目	试验结果	测试方法
针入度(25℃,5s,100g)/0.1mm	66	T0604
软化点(R&B)/℃	48	T0606
延度(15℃)/cm	>100	T0605
60℃动力黏度/(Pa·s)	212	T0602
蜡含量(蒸馏法)/%	1.3	T0615
闪点/℃	312	T0611
溶解度/%	99.75	T0607
TFOT(沥青薄膜 加热试验)后 残留物	质量变化/% 残留针入度比(25℃)/% 残留延度(15℃)/cm	0.028 65.0 18.4 T0609 T0604 T0605

1.2 矿料级配设计

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中矿料级配范围的要求,结合本研究对RAP全比例100%的利用率需要,通过筛分等试验确认级配,结果见表5。

1.3 确定最佳外掺剂用量

1.3.1 最佳再生剂用量

再生剂主要用于恢复老化沥青中的轻质组分含量,因此,将RAP进行离心分离后得到的老化沥青与再生剂进行搅拌混合,然后测试其基本性能指标,测试结果见表6。当再生剂掺量为12%时,再生沥青性能基本恢复,各项指标符合规范要求,考虑到老化沥青含量为4%,因此再生剂掺量初步设定为RAP用量的0.5%。

1.3.2 最佳沥青掺量

沥青混合料的油膜厚度直接决定混合料性能。研究表明,空隙率大小直接影响混合料中沥青油膜的最佳厚度^[7]。《公路沥青路面再生技术规范》(JTGT5521—2019)中对热拌再生混合料的空隙率要求与常规热拌沥青混合料一致。依据经验,将全比例再生AC-13C的空隙率设定为4%~5%,对应的沥青油膜厚度应为8~10μm,因此选用基质沥青掺量为0.2%~0.7%。

选取再生剂用量为0.5%,成型不同基质沥青掺量的马歇尔试件,测试其密度和空隙率等指标,结果见表7。

将不同基质沥青用量的马歇尔试件成型后分组,进行60℃水浴稳定度试验,试验结果如图1所示。

从图1可以看出,再生沥青混合料马歇尔强度在基质沥青掺量为0.4%~0.5%时达到峰值,综合试验指标与经济性影响,选用最佳基质沥青掺量为0.4%。

1.3.3 最佳温拌剂用量

试验所用温拌剂为表面活性类温拌剂,其分子结构包含亲油基和亲水基。在沥青混合料拌和过程中,温拌剂与热沥青接触,形成具有润滑功能的结构性水膜,这种水膜不仅增加了混合料的工作性,还阻止了沥青胶浆的结团^[8]。在混合料的摊铺

表5 全比例再生混合料试验级配

级配类型		通过下列筛孔的质量百分率/%							
		13.2mm	9.5mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
再生AC-13C	级配上限	100	85	68	50	38	28	20	15
	级配下限	90	68	38	24	15	10	7	5
	合成级配	97.9	78.1	53.7	36.1	26.2	18.7	13.8	9.3

表 6 再生沥青参数指标

再生剂掺量/%	软化点/℃	针入度/0.1 mm	延度/cm
6	59	55	<100
9	53	63	<100
12	48	69	>100
15	44	75	>100
18	39	84	>100

表 7 再生沥青混合料空隙率测试结果

基质沥青掺量/%	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%
0.2	2.389	5.0	15.6	67.9
0.3	2.397	4.7	15.4	69.5
0.4	2.402	4.5	15.5	71.0
0.5	2.407	4.3	15.4	72.1
0.6	2.409	4.2	15.2	72.4
0.7	2.411	4.1	15.3	73.2

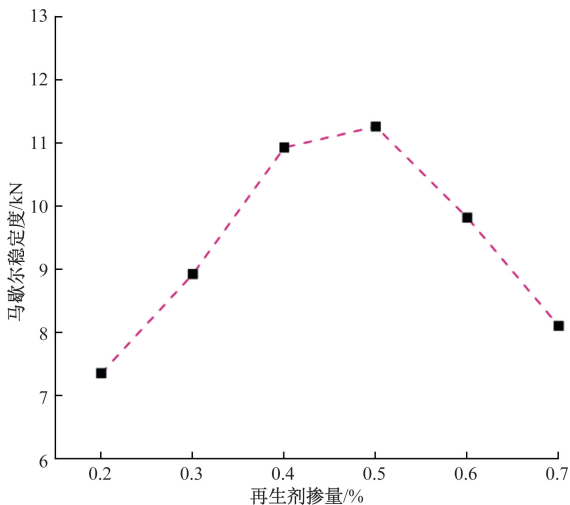


图 1 再生沥青混合料马歇尔强度变化

和压实过程中,这种结构性水膜发挥润滑作用,从而提高摊铺速度并使混合料易于压实^[9]。温拌剂中的水分在较高温度下蒸发,与沥青作用形成泡沫,进一步降低沥青黏度,使沥青在较低温度下与集料均匀混合。在压实过程的最后阶段,随着水分子的逐渐散失,表面活性物质转移到沥青与集料界面上,增强了集料与沥青胶结料的黏结性能。温拌剂还能降低沥青混合料的拌和、摊铺、压实温度,从而减少能源消耗和温室气体排放。

依照温拌剂厂家给定的建议值,温拌剂掺量为RAP用量的0.3%,拌和温度为130℃。以此数据上下浮动取值,成型不同掺量的马歇尔试件进行测试,测试结果见表8。

对比表7中沥青掺量为0.4%时的数据,温拌剂掺量为0.1%、0.2%时的毛体积相对密度、空隙率较大,沥青饱和度较小,无法满足规范要求;温拌

表 8 温拌再生沥青混合料测试结果

温拌剂掺量/%	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/0.1 mm
0.1	2.529	6.4	15.7	59.2	8.28	26.3
0.2	2.453	5.5	15.5	64.5	9.17	27.6
0.3	2.401	4.7	15.6	69.9	10.52	30.1
0.4	2.398	4.3	15.6	72.4	8.96	32.3
0.5	2.396	4.1	15.5	73.5	6.28	36.7

剂掺量为0.5%时的稳定度指标小于8kN,同样无法满足规范要求;只有温拌剂掺量为0.3%、0.4%时的试验测试结果符合既定要求。当温拌剂掺量为0.3%时的各项指标接近表7中沥青掺量0.4%的数据。因此,本文试验所用最佳温拌剂掺量为0.3%。

2 路用性能评价

路用性能测试是评定沥青混合料优劣的重要手段,路用性能包括一系列测试条件下沥青混合料所表现出的物理力学强度、黏结强度、抗老化强度等^[10]。针对本文所述全比例温拌再生沥青混合料的路用性能,采用国标规范进行测试评价,涵盖了沥青混合料的高温抗车辙性能、低温抗开裂性能、水稳定性能等方面。为求试验数据直观易懂,引入常规热拌沥青混合料(改性AC-13C)的性能指标与全比例温拌再生沥青混合料(再生AC-13C)进行对比说明。

2.1 高温稳定性

根据现行的《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作标准车辙试件,而后按照规定测试其车辙动稳定度指标,测试结果见表9。

研究表明,全比例温拌再生沥青混合料和热拌沥青混合料的60℃动稳定度均符合规范要求,其中再生沥青混合料的指标更优;在测试条件更严苛的70℃车辙试验中,再生AC-13C动稳定度指标相对60℃时衰减约50%,改性AC-13C相对衰减约60%,这表明全比例温拌再生沥青混合料具备更好的高温抗车辙性能。

表 9 两种沥青混合料车辙试验数据

测试温度/℃	混合料种类	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
60	再生 AC-13C	6 364
	改性 AC-13C	4 041
70	再生 AC-13C	3 158
	改性 AC-13C	1 594

2.2 低温抗裂性能

根据现行的《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作标准小梁试件,按照规定测试其小梁弯曲试验指标,测试结果见表10。

表10 两种沥青混合料小梁试验数据

混合料种类	抗弯拉强度/ MPa		最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$		弯曲劲度模量/ MPa	
	15℃	-10℃	15℃	-10℃	15℃	-10℃
再生 AC-13C	6.12	8.49	5 955	2 834	1 028	2 996
改性 AC-13C	6.62	8.61	5 660	2 917	1 170	2 952

研究表明,全比例温拌再生沥青混合料的破坏应变值大于规范的技术要求($\geq 2\,500\,\mu\epsilon$),说明其符合路用低温抗裂性要求;当温度为15℃时再生 AC-13C 的破坏应变值较大,当温度为-10℃时改性 AC-13C 的破坏应变值较大。这表明全比例温拌再生沥青混合料在中低温时的抗裂性能更为优异,但在低温时的抗裂性能稍逊于常规热拌沥青混合料,因此本文所述再生沥青混合料更加适用于南方区域。

2.3 马歇尔稳定度试验

根据现行的《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作标准马歇尔试件,按照规定测试其马歇尔稳定度与流值指标,测试结果见表11。

表11 两种沥青混合料马歇尔试验数据

混合料种类	时间	稳定度/kN	流值/0.1 mm
再生 AC-13C	4 h	8.45	34.0
	1 d	10.31	33.3
	7 d	11.66	35.0
改性 AC-13C	4 h	9.47	28.6
	1 d	10.58	27.9
	7 d	10.75	28.1

研究表明,全比例温拌再生沥青混合料的4 h 稳定度指标低于常规热拌沥青混合料。这是因为温拌剂在发挥降黏作用的同时,也部分削弱了沥青的黏结性能,影响了再生 AC-13C 的强度;随着时间的推移,再生 AC-13C 的稳定度指标逐步增长直至超越改性 AC-13C,说明当混合料温度逐渐降低后,温拌剂几乎不再发挥作用,此时混合料中的再生剂持续与旧沥青融合,从而导致再生沥青混合料的物理力学强度不断增加。

2.4 水稳定性试验

根据现行的《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作标准马歇尔试件,按照规定进行浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,测试结果见表12。

表12 两种沥青混合料水稳定性试验数据

混合料种类	浸水残留稳定度/%	冻融劈裂强度比/%
再生 AC-13C	91.6	86.7
改性 AC-13C	90.4	88.1

研究表明,全比例温拌再生沥青混合料的浸水残留稳定度较大,说明再生 AC-13C 相比改性 AC-13C 具备更好的高温水稳定性;全比例温拌再生沥青混合料的冻融劈裂强度比较小,说明在较低温度下,再生 AC-13C 的抗水侵害能力稍差。结合2.2节中数据,所述全比例温拌再生沥青混合料更适合在南方城市推广应用。

2.5 路面现场测试

为验证全比例温拌再生沥青混合料实际路用性能,在内部场地进行中试生产并铺筑了试验段,试验段长度3 000 cm、宽度150 cm、厚度3 cm,试验段现场如图2所示。

根据现行《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)中的试验方法,进行路面的抗滑和抗渗水性能测试,测试结果见表13。



图2 全比例温拌再生沥青混合料试验段现场

表 13 全比例温拌再生沥青混合料路面测试结果

测试项目	测试结果
平整度/ δm	0.67
构造深度/mm	0.91
摩擦系数/BPN	74.0
渗水系数/($mL \cdot min^{-1}$)	38

研究表明,全比例温拌再生沥青混合料试验段的路面检测结果优异,其平整度、抗滑性能、渗水性能指标皆满足相关技术规范的要求,说明其具备良好的行车安全性与行车舒适性,符合作为道路路面使用的功能需求。在后续的跟踪检测中,试验段路面状况良好,未见病害发生。

3 结论

(1)全比例温拌再生沥青混合料采用 100% RAP 与温拌的技术方案,符合低碳环保的政策方针,同时其原材料廉价易得、产品性能优异、整体成本可控,具有良好的推广应用前景。

(2)全比例温拌再生沥青混合料的 60℃与 70℃车辙动稳定度分别为 6 364 次/mm 与 3 158 次/mm, -10℃弯曲破坏应变为 2 834 $\mu\epsilon$,浸水残留稳定度与冻融劈裂强度比分别为 91.6%、86.7%,表明其具备较好的高低温稳定性与水稳定性,满足现行规范 JTG F40—2004 中的技术要求。

(3)全比例温拌再生沥青混合料内部试验段路面检测显示,碾压后的路面平整度为 0.67 δm ,构造深度和摩擦系数分别为 0.91 mm、74.0 BPN,渗水系数为 38 mL/min,表明其具有良好的行车舒适性、安全性以及路用耐久性。

参考文献

[1] 2023 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:交通运输部, 2023.

[2] DIFENDERFER K B, BOZ I, HABBOUCHE J, et al. Development and assessment of rapid tests for construction of asphalt-treated cold recycled pavements [J]. Transportation Research Record, 2020(3): 189-198.

[3] 李明宸, 刘黎萍, 邢成炜, 等. 基于原子力显微技术的热再生混合料中新旧沥青融合程度量化指标和方法[J]. 中国公路学报, 2024, 37(2): 168-182.

[4] FRANESQUI A M, YEPES J, DÍAZ V S. Sustainable pavement construction in sensitive environments: low-energy asphalt with local waste materials and geomaterials [J]. Buildings, 2024, 14(2): 530.

[5] 王真, 黄文婷, 李振, 等. 温拌再生沥青混合料性能的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(1): 273-276.

[6] 林勇文, 彭馨彦, 洪晶. 温拌再生沥青的性能研究与试验[J]. 科技和产业, 2021, 21(9): 205-209.

[7] PINKI D, KH S L. Mix design, durability and strength enhancement of cold mix asphalt: a state-of-the-art review [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 7(1): 1-22.

[8] 时敬涛. 温拌剂对沥青性能的影响及其作用机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.

[9] ADEPU R, RAMAYYA V V, MAMATHA A, et al. Fracture studies on basalt fiber reinforced asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement derived aggregates and warm mix additives[J]. Construction and Building Materials, 2023, 386: 131548.

[10] ALI A. Performance evaluation of bioengineered recycled asphalt materials[J]. Transportation Research Record, 2022(2): 464-475.

Pavement Performance of Full-scale Warm Mix Recycled Asphalt Mixture

CAI Xiang¹, PENG Xinyan²

(1. Guangzhou Weixin Material Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
2. Guangzhou Municipal Engineering Maintenance Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The recycling and reuse of waste asphalt mixture is a crucial initiative for promoting energy conservation and emission reduction. In order to address the issue of low RAP(reclaimed asphalt pavement) utilization rate, technical solution for full-scale warm mix recycled asphalt mixture is proposed, achieving 100% RAP utilization rate. Meanwhile, the optimal dosage of admixture is determined through the Marshall Test. A comparative analysis of the performance between the full-scale warm mix recycled asphalt mixture and the conventional hot mix asphalt mixture is conducted. It reveals that the rutting dynamic stability of the recycled AC-13C asphalt mixture at 60℃ and 70℃ is 6 364 and 3 158 times/mm, respectively. Its flexural strain at low-temperature failure is 2834 $\mu\epsilon$. Additionally, the pavement performance indicators such as water stability also meet the technical requirements of the current specifications.

Keywords: full-proportion RAP(reclaimed asphalt pavement); warm mix asphalt; comparative performance analysis; pavement performance