

破碎砾石就地热再生技术在成渝高速中的应用

刘东¹,徐金玉²,吴昱瀚¹,夏永²,韩超²,袁梦²

1. 四川成渝高速公路股份有限公司,四川 成都 610041;2. 苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 211112

摘要:为研究破碎砾石沥青路面就地热再生的可行性,依托成渝高速沥青路面大、中修养护工程,采用由破碎砾石、新沥青、再生剂及回收沥青等组成的再生沥青混合料,对再生沥青的流变性能、破碎砾石集料的再生稳定性、混合料设计及路用性能进行试验研究。结果表明:再生沥青的高温等级比回收沥青低,低温抗裂性和疲劳特性得到改善,破碎砾石集料具有有效抵抗就地热再生施工损伤的性能,路面铺筑效果良好,可进行应用推广。

关键词:就地热再生;破碎砾石;再生沥青;流变性能;再生混合料

中图分类号:U416.26;TU521.1

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)02-0094-07

引用格式:刘东,徐金玉,吴昱瀚,等.破碎砾石就地热再生技术在成渝高速中的应用[J].山东交通学院学报,2022,30(2):94-100.

LIU Dong,XU Jinyu,WU Yuhuan,et al. Application of hot in-place recycling of crushed gravel in Chengdu-Chongqing Expressway[J]. Journal of Shandong Jiaotong University,2022,30(2):94-100.

0 引言

就地热再生技术是一种快速、经济、绿色的沥青路面养护技术^[1-2]。近年来,随着路面材料资源的日益短缺和世界各国对于节能、环保等问题的重视,沥青路面就地热再生技术受到较多关注。车法等^[3]依据现场热再生的特点,研究不同掺配率下再生混合料的路用性能,研究结果表明:随着掺配率的升高,再生沥青混合料的高温稳定性和抗水损害能力增加,低温抗裂性减小。张清平等^[4]对海南地区聚乙烯改性沥青混合料进行就地热再生的路用性能验证,结果表明:在旧料比例使用得当时,再生沥青混合料具有良好的路用性能,基本能达到新沥青混合料的指标要求。杨彦海等^[5]研究通车运营一段时间后的碎石玛蹄脂沥青(stone mastic asphalt,SMA)混合料路面,发现SMA就地热再生混合料性能稳定可靠。钟瑞文^[6]认为严格控制原材料、配合比设计和施工工艺各个环节后,SMA就地热再生路面也能达到良好的路用性能。

就地热再生技术在全国各地进行了规模化的推广应用,但破碎砾石表面粗糙度及洁净度不高, SiO_2 的质量分数高,与沥青黏附性较差,极少用于高等级路面面层。对于破碎砾石就地热再生应用缺乏相应的技术指导,其适用性、材料设计和施工控制等需要进行针对性研究。本文结合成渝高速沥青路面大、中修养护工程,开展基于破碎砾石的就地热再生技术研究,分析再生沥青流变性能、破碎砾石集料的再生稳定性、混合料设计和路用性能等,以期实现旧路面材料高效循环利用。

1 原材料

1.1 破碎砾石集料

粗集料的粒径规格为3~5 mm、>5~10 mm、>10~15 mm。粗、细集料检测结果如表1、2所示。

收稿日期:2021-10-22

基金项目:四川省科技计划项目(2020YFS045)

第一作者简介:刘东(1972—)男,成都人,高级工程师,主要研究方向为公路工程建设与养护管理,E-mail:770596752@qq.com。

表1 粗集料检测结果

项目	不小于9.5 mm 针片状颗粒 质量分数/%	小于9.5 mm 针片状颗粒 质量分数/%	压碎值/%	洛杉矶磨耗损失/%	坚固性/%	软弱颗粒 质量分数/%	改性沥青 黏附性
技术要求 ^[7]	≤12	≤18	≤26	≤28	≤12	≤3	不小于5级
检测结果	3.1	4.6	12.1	18.2	3	0.6	5级

表2 细集料检测结果

项目	表观相对密度	砂当量/%	坚固性(大于0.3 mm 部分)/%
技术要求 ^[7]	≥2.5	≥60	≤12
检测结果	2.7	84	2

1.2 新沥青

新沥青采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene,SBS)改性沥青,检测结果如表3所示。

表3 SBS 改性沥青检测结果

项目	针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	延度(5℃)/cm	软化点/℃	动力黏度(60℃)/(Pa·s)
技术要求 ^[7]	60~80	≥30	≥55	>20 000
检测结果	61	39	86.5	>20 000

1.3 回收沥青

成渝高速公路通车26 a,双向4车道,先后进行大规模的技改工程、大修整治及罩面工程,受地区环境限制及早期我国修建公路的政策及技术因素影响,成渝高速部分路面采用了破碎砾石作为表面层集料。经检测,处治路段路面结构状况良好,路面结构强度指数(pavement structure strength index,PSSI)为100,主要以疲劳裂缝、修补、车辙等表层病害为主,且主车道破损较严重,超车道仅存在少量裂缝。

采用开挖方式从原沥青路面获取回收沥青路面(reclaimed asphalt pavement,RAP)材料,经抽提筛分后得到RAP矿料级配和油石比,并对回收沥青进行了相关检测,结果如表4、5所示,均满足文献[8]要求。RAP矿料油石比为5.1%。

表4 RAP 矿料抽提筛分试验结果

筛孔直径/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过的质量分数/%	100.0	90.1	72.3	45.1	32.4	21.8	18.1	13.2	10.6	8.0

表5 回收沥青检测结果

项目	针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	延度(15℃)/cm	软化点/℃
技术要求 ^[8]	≥20		
检测结果	23	9	61.5

1.4 沥青再生剂

沥青再生剂选用某公司RA1型再生剂,检测结果如表6所示。

表 6 沥青再生剂检测结果

项目	60 ℃黏度/ (mm ² ·s ⁻¹)	闪点/℃	饱和分质量 分数/%	芳香分质量 分数/%	薄膜烘箱试验 前后黏度比	薄膜烘箱试验后 质量变化/%	15 ℃密度/ (g·cm ⁻³)
技术要求 ^[8]	50~175	≥220	≤30	实测记录	≤3	≤4, ≥-4	实测记录
检测结果	82	237	27.38	59.61	1.007	-1.501	0.997 6

2 AC-13C 沥青混合料设计

2.1 再生剂用量

根据经验和 RAP 矿料沥青含量,拟添加的新沥青与回收沥青的质量比为 1:4,初选再生剂与回收沥青的质量比为 5%,再生沥青在标准针入度试验条件(25 ℃,100 g,5 s)下所测得的针入度为 39(0.1 mm),软化点为 59.5 ℃,延度(15 ℃)为 21 cm。

2.2 基于流变特性的再生沥青性能评价

为评价再生剂质量分数的合理性,基于沥青流变特性,分别采用动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer,DSR)和弯曲梁流变仪(bending beam rheometer,BBR)对回收沥青与再生沥青进行性能分级(performance grade,PG)测试^[9-13],评价再生沥青的性能恢复状况。可将沥青分为 PG52、PG58、PG64、PG70 四个等级和 21 个亚级。PG52 表示该级沥青适用于最高设计温度不超过 52 ℃的地区。

高温性能分级主要温度范围为>46~88 ℃,每级 6 ℃。低温性能分级主要温度范围为>-10~46 ℃,每级 6 ℃。沥青高温分级要求所分级温度下原样沥青的车辙因子($G^*/\sin \delta$, G^* 为复合模量, δ 为相位角)不小于 1.0 kPa,短期老化后沥青的车辙因子不小于 2.2 kPa;沥青低温分级要求所分级温度下沥青的蠕变劲度 $S \leq 300$ MPa,蠕变速率 $m \geq 0.300$ mm/min。同时,中温下沥青的车辙因子不大于 5000 kPa。再生沥青由回收沥青、新沥青与再生剂组成,再生剂质量占回收沥青和新沥青总质量的 5%。试验结果如表 7~9 所示。

表 7 旋转薄膜烘箱加热试验后残留沥青 DSR 试验结果

沥青类型	试验温度/℃	G^*/kPa	$\delta/(\circ)$	车辙因子/kPa	技术要求	是否符合标准
回收沥青	70	5.57	74.2	5.79	车辙因子不小于 2.2 kPa	是
	76	2.74	76.3	2.82		是
	82	1.42	78.6	1.45		否
再生沥青	70	2.75	75.1	2.85		是
	76	1.42	78.1	1.45		否

表 8 沥青加速老化试验后残留沥青 BBR 试验结果

沥青类型	试验温度/℃	S/MPa	$m/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	技术要求	是否符合标准
回收沥青	-6	257	0.303	$S \leq 300$ MPa, $m \geq 0.300$ mm/min	是
	-12	390	0.232		否
再生沥青	-12	97	0.323		是
	-18	306	0.287		否

表 9 沥青加速老化试验后残留沥青 DSR 试验结果

沥青类型	试验温度/℃	G^* /MPa	$\delta/(^\circ)$	车辙因子/MPa	技术要求	是否符合标准
回收沥青	34	3.13	53.3	2.510	车辙因子不大于 5 MPa	是
	31	6.45	52.9	5.144		否
再生沥青	28	1.16	54.3	0.942		是
	25	6.26	53.8	5.052		否

由表 7~9 可知:回收沥青处于高弹性状态,高温等级为 PG76,添加再生剂及新沥青后,再生沥青弹性下降,黏性增加,高温等级降为 PG70,即高温性能有所降低。回收沥青经过外界环境长期老化后,其抗裂性能有一定衰减,其低温等级为 PG16,添加再生剂及新沥青后,低温抗裂性有所改善,低温等级为 PG22。

再生沥青的疲劳温度由 34 ℃降至 28 ℃,其抵抗反复荷载作用下的变形恢复能力有所提高,抗疲劳特性得到了明显改善,再生沥青性能恢复到与新沥青相同的等级。这主要是由于沥青在老化过程中芳香分逐渐变为沥青质,芳香分含量下降,沥青质的含量增大。根据组分调和原理,再生剂富含芳香分,与老化沥青进行了复合调配,使老化沥青的路用性能得到恢复。

2.3 破碎砾石高温性能评价

为评估就地热再生施工高温加热条件下,破碎砾石集料在再生机械铣刨、耙松工作时是否发生二次破碎,造成沥青混合料级配发生较大变异,本文通过模拟现场高温,对沥青混合料进行高温压碎值试验,评估高温性能^[14-16]。

常温下,新添加的破碎砾石粗集料压碎值为 12.1%,RAP 矿料压碎值为 13.7%,表明成渝高速所用破碎砾石集料具有较好的物理抗压碎能力,其指标明显优于文献[8]。高温状态下,新添加的破碎砾石压碎值比常温增加 2%,RAP 矿料增加 1.7%,物理抗压碎性能较佳,表明该破碎砾石具有有效抵抗就地热再生施工损伤的性能。

2.4 AC-13C 沥青混合料设计

AC-13C 沥青混合料由破碎砾石集料、SBS 改性沥青、回收沥青、沥青再生剂组成,AC-13C 沥青混合料的合成级配如表 10 所示,其中新添破碎砾石矿料质量占回收沥青的 19.9%,油石比为 5.3。AC-13C 沥青混合料性能如表 11 所示^[17-18]。

表 10 就地热再生 AC-13C 沥青混合料设计合成级配

筛孔直径/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过的质量 分数/%	100.0	91.6	73.4	43.8	28.7	19.2	15.7	11.2	8.8	6.6

表 11 就地热再生混合料性能评价结果

项目	空隙率/%	稳定度/kN	残留稳定度比/%	冻融劈裂强度比/%	动稳定度/(次 mm^{-1})	低温弯曲破坏应变
试验结果	4.1	12.04	89.3	86.8	5101	2 026.5
技术要求	3~5	9~18	≥ 85	≥ 80	3200~8000	≥ 2000

由表 11 可知:就地热再生混合料各项性能均满足设计及规范要求,具有良好的水稳定性、高温性能及低温性能。

3 工程实践

采用再生深度为 4 cm 的就地热再生技术对成渝高速公路部分路段进行维修处治,温度是影响就地热再生施工效果的重要因素,现场施工中引入信息化监控技术,对就地热再生各个施工环节进行辅助控制,以提高施工质量^[19-21]。施工后,对压实度和路面渗水进行了检测和统计,以验证破碎砾石就地热再生的实际铺筑效果^[22-24]。压实度和渗水系数检测结果如图 1、2 所示,施工完成后检测数据如表 12 所示。

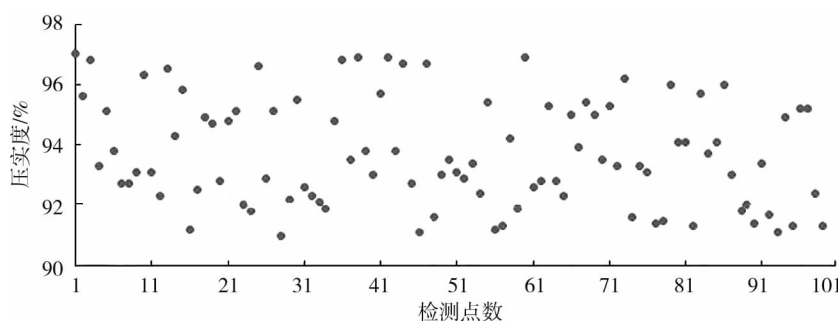


图 1 压实度检测结果

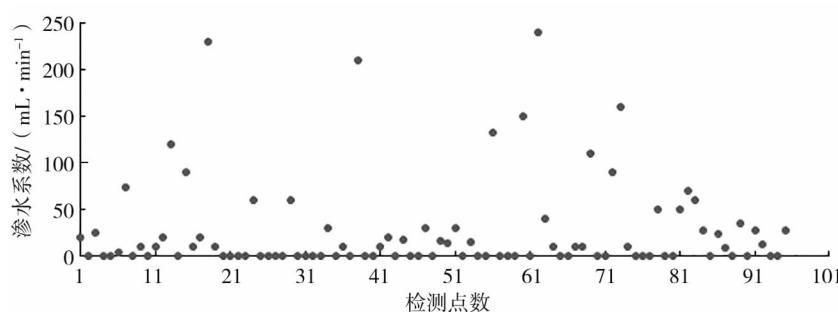


图 2 渗水系数检测结果

表 12 成渝高速就地热再生路段交工检测数据结果

项目	压实度/%	厚度/mm	平整度/(m·km ⁻¹)	构造深度/mm
平均值	94.6	44.6	1.1	0.70
代表值	94.1	43.1		
技术要求	≥93.0	[35,50]	≤2.0	≥0.55
合格率/%	100	100	96.8	100

由图 1、2 可知:绝大部分检测点的压实度为 92%~98%(基于理论最大相对密度);94.12%检测点的渗水系数为 0~100 mL/min。

由表 12 可知:路面铺筑效果良好,工程质量满足规范和设计要求,破碎砾石就地热再生技术可进行规模化推广应用。

4 结论

1) 沥青流变性能试验表明:由新沥青、再生剂及回收沥青等组成的再生沥青高温等级降低,低温抗裂性和疲劳特性得到改善,再生沥青性能恢复到与新沥青相同的等级。

2) 破碎砾石高温压碎值相比常温增加 2%,但仍具有较佳的物理抗压碎性能,可有效抵抗就地热再

生施工时的机械损伤。就地热再生混合料各项性能均满足设计及规范要求,具有良好的水稳定性、高温及低温性能。

3)工后检测结果表明,破碎砾石就地热再生路面渗水系数和压实度均满足规范要求,路面铺筑效果良好,可进行规模化推广。

参考文献:

- [1] 邹友泉. 昌九高速公路沥青路面就地热再生技术应用研究[D]. 西安:长安大学,2017.
ZOU Youquan. Research on application of hot in-place recycling technology of asphalt pavement in Changjiu Expressway[D]. Xi'an:Chang'an University,2017.
- [2] 李铨国. 沥青路面就地热再生工程关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2015.
LI Xuanguo. Research on the key technologies of hot in-place recycling of asphalt concrete pavements[D]. Nanjing:Southeast University,2015.
- [3] 车法,蒋双全,李洪印. 现场热再生沥青混合料性能试验研究及评价[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(14):65-69.
CHE Fa, JIANG Shuangquan, LI Hongyin. Research on performance test and appraisal of hot in-place recycling of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2010,32(14):65-69.
- [4] 张清平,周志刚,李炎炎,等. 海南地区就地热再生沥青混合料的路用性能试验研究[J]. 中外公路,2011,31(2):230-235.
- [5] 杨彦海,张群,纪文强. SMA路面就地热再生技术试验研究及性能评价[J]. 中外公路,2016,36(4):109-113.
- [6] 钟瑞文. SMA路面就地热再生技术在沈大高速公路中的应用与评价[J]. 北方交通,2016(2):61-65.
ZHONG Ruiwen. The application and evaluation of SMA hot in-place recycling in Shenzhen-Dalian Highway[J]. Northern Communications,2016(2):61-64.
- [7] 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.
- [8] 交通运输部公路科学研究院. 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.
- [9] ZHONG H, HUANG W, YAN C, et al. Investigating binder aging during hot in-place recycling (HIR) of asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2021, 276(1):122188.
- [10] 单岗,袁媛,庞露林,等. 就地热再生高温加热对不同深度老化沥青流变性能的影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(7):2864-2869.
SHAN Gang, YUAN Yuan, PANG Lulin, et al. Effect of high temperature heating on rheological properties of aged asphalt with different depths during hot in-place recycling[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(7):2864-2869.
- [11] 贺盛. 基于耐久性提升的沥青路面就地热再生关键技术研究与应用[D]. 长春:吉林大学,2018.
HE Sheng. Research and application of key techniques for hot in-place recycling of asphalt pavement based on durability improvement[D]. Changchun:Jilin University,2018.
- [12] 徐蕾,裴秋波,陈慧亮,等. 就地热再生老化沥青室内外再生效果差异试验研究[J]. 中外公路,2021,41(4):268-272.
XU Lei, Qiu Qiubo, CHEN Huiliang, et al. Experimental study on difference between indoor and outdoor recycling effect of aged asphalt in hot in-place recycling[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021,41(4):268-272.
- [13] PAN Y, LIU G, TANG D, et al. A rutting-based optimum maintenance decision strategy of hot in-place recycling in semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 297(6):126663.
- [14] 贺华刚,贾晓东,李小龙. 高RAP掺量下热再生混合料路用性能与加热工艺研究[J]. 中外公路,2021,41(3):286-290.
HE Huagang, JIA Xiaodong, LI Xiaolong. Study on road performance and heating process of hot recycled mixture with high RAP content[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021,41(3):286-290.
- [15] 张冰,任畅. 就地热再生施工技术要点分析[J]. 技术与市场,2021,28(3):127.
- [16] 仰建岗,姚玉权. 不同工况对就地热再生沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技,2019,36(10):14-24.
YANG Jiangang, YAO Yuquan. Influence of different working conditions on hot in-place recycled asphalt mixture performance[J]. Journal of Highway and Transportation Technology,2019,36(10):14-24.
- [17] 张余. 新材料对就地热再生性能影响及RAP料级配波动范围研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2020.
ZHANG Yu. Research on influence of new asphalt mixture on hot in-place recycling performance and RAP grading fluctuation

- range[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [18] 谷雨. 热再生沥青混合料配合比设计与性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- GU Yu. Research on the proportion design and the performance of the hot recycled asphalt mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [19] SAVENKO V, ILLIASH S, STASIUK T. Research of temperature change of pavement heating in the process of hot in-place recycling of asphalt concrete[J]. Technology Audit and Production Reserves, 2020, 21(52): 22–24.
- [20] 邹雁飞, 王玲. 沥青路面就地热再生全过程温度散失规律[J]. 广东公路交通, 2021(1): 12–15.
- ZOU Yanfei, WANG Ling. Research on law of temperature loss during the whole process of in-situ hot recycling of asphalt pavement[J]. Guangdong Highway and Communications, 2021(1): 12–15.
- [21] 姚赓, 师阳. 就地热再生沥青混合料配合比优化设计[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(4): 40–46.
- YAO Ao, SHI Yang. Optimization mix design of hot in-place recycling of asphalt mixture[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2019, 26(4): 40–46.
- [22] MA T, HUANG X, ZHAO Y, et al. Influences of preheating temperature of RAP on properties of hot-mix recycled asphalt mixture[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2016, 44(2): 762–769.
- [23] 刘筑萦. 基于多步法就地热再生工艺的沥青路面养护加热控制研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(9): 175–180.
- LIU Zhuying. Research on heating control of asphalt pavement maintenance based on multi-step hot-in-place process[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(9): 175–180.
- [24] YU B, MENG X, LIU Q. Multi-objective optimisation of hot in-place recycling of asphalt pavement considering environmental impact, cost and construction quality[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(13): 1576–1584.

Application of hot in-place recycling of crushed gravel in Chengdu-Chongqing Expressway

LIU Dong¹, XU Jinyu², WU Yuhang¹, XIA Yong², HAN Chao², YUAN Meng²

1. Sichuan Expressway Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. JSTI Group, Nanjing 211112, China

Abstract: To study the feasibility of hot in-place recycling (HIR) of crushed gravel, rely on the maintenance engineering of Chengdu-Chongqing Expressway asphalt pavement, the reclaimed mixture is made up from crushed gravel, new asphalt, regenerant and recycled asphalt. The rheological properties of reclaimed asphalt, regeneration stability of crushed gravel aggregate, road performance are studied. The results show that the temperature grade of reclaimed asphalt is lower than that of recycled asphalt. Low temperature anti-cracking performance and fatigue properties are improved. The crushed gravel aggregate has effective resistance to HIR construction damage, and the pavement effect was good, which can be applied and popularized.

Keywords: hot in-place recycling; crushed gravel; reclaimed asphalt; rheological property; reclaimed mixture
(责任编辑: 王惠)