

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.241108

不同RAP分档厂拌热再生沥青混合料性能研究

李恒达, 秦孔源, 谢雨雨

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200433]

摘要: 为了更高效地利用废旧沥青混合料, 通过将拌和楼原有的两档废旧沥青混合料划分为三档, 对不同RAP分档下的厂拌热再生沥青混合料的路用性能进行对比研究, 结果表明: 经二次筛分分档处理后获得的三档RAP热再生混合料的抗水损害性能、高温抗车辙性能、低温抗开裂性能均有不同程度的提升, 加入再生剂后, 经过二次筛分处理后的三档RAP热再生沥青混合料中的旧料的再生利用率更高, 再生混合料的路用性能提升更为显著, 能够有效满足沥青路面的运营使用需求。

关键词: 厂拌热再生; 废旧沥青混合料(RAP); RAP分档; 再生剂; 路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0337-06

Study on Performances of Different RAP-graded Hot-recycled Asphalt Mixtures

LI Hengda, QIN Kongyuan, XIE Yuyu

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: In order to utilize the waste asphalt mixture more effectively, the original two grades of waste asphalt mixture in the mixing building are divided into three grades to compare and study the pavement performances of the plant-mixed hot-recycled asphalt mixture under different RAP grades. The results show that the water damage resistance, high-temperature rutting resistance and low-temperature cracking resistance of the RAP hot-recycled mixtures at the three grades obtained after the secondary screening and grading treatment are improved to varying degrees. After adding the reclaiming agent, the recycling rate of the old material in the three grades of RAP hot-recycled asphalt mixture is higher, and the pavement performances of the recycled mixture is improved more significantly after the secondary screening treatment, which can effectively meet the operational needs of asphalt pavement.

Keywords: plant-mixed hot recycling; reclaimed asphalt pavement (RAP); RAP grading; reclaiming agent; pavement performance

0 引言

随着我国公路建设的发展,公路总里程也在逐年攀升,早期建设的公路养护、维修等工作任务变得尤为繁重。由此带来两个方面的问题,一是沥青路面长期使用引起病害后需要进行养护和维修,届时需要新的沥青混合料完成修复工作,导致每年都需要大量的资金用于沥青和石料,生产沥青和开采石料的过程中会对环境造成不利影响^[1-5]。二是,沥青路面翻修后产生的废旧沥青路面材料(RAP)数量庞大,据相关部门估算我国每年在沥青路面养护维修的过程中产生的RAP料数量达到了2 000万t,并且

这一数量还在逐年增加^[6-12]。这些无法及时处理的大量废旧沥青混合料堆放处理比较困难,合理地堆放废旧沥青混合料不仅需要在运输、处理方面花费大量的资金,而且堆放后同样会对周围生态环境造成污染。如能将其加以利用,则可以省去大量的沥青和石料成本,变废为宝,减少了工程建设成本的同时还保护了生态环境^[13-17]。沥青路面再生方式有很多种,而厂拌热再生是工程中使用最多的方式,通常认为RAP掺量超过25%就是高掺量,现有用于沥青路面中下面层的再生沥青混合料中废旧沥青混合料的掺量通常在20%~25%之间^[18-20]。因此,为充分发挥旧料的剩余价值,针对沥青混凝土拌站原有的废旧沥青混合料进行细化分档,通过对回收获得的废旧沥青混合料进行二次筛分处理后,增加其在再生混合料中的掺量到达40%,对AC-25厂拌热再生沥

收稿日期: 2024-11-14

作者简介: 李恒达(1996—),男,硕士,工程师,从事路面材料研究工作。

青混合料的抗水损害性能、高温抗车辙性能、低温抗开裂性能的变化进行对比研究。

1 RAP料分档处理与分析

1.1 RAP分档处理

拌和楼的废旧沥青混合料无法溯源,而不同来源、使用年限、回收工艺获得的废旧沥青混合料差异性特别大^[21-23]。拌和楼场地堆放的废旧沥青混合料分为粗细两档,在此基础上,人为进行二次筛分处理,将原有的两档RAP料分为三档后,进行抽提试验,分析不同分档下的RAP料级配的变异性(见表1、图1)。

表 1 两档RAP料级配及变异系数表						
筛孔尺寸/ mm	粗 RAP		变异系	细 RAP		变异系
	通过百分率/%		数/%	通过百分率/%		数/%
19	100.0	100.0	0.0	100.0	100	0.0
16	95.8	95.5	0.1	100.0	100	0.0
13.2	82.9	84.2	0.8	100.0	96.2	1.9
9.5	46.2	45.6	0.7	99.9	87.4	6.7
4.75	23.8	23.8	0.1	83.8	56.9	19.1
2.36	19.5	19.8	0.7	44.0	38	7.3
1.18	16.4	16.7	0.9	31.3	28.1	5.3
0.6	14.1	14.5	1.3	25.4	21.1	9.3
0.3	11.8	12.2	1.6	21.1	16.5	12.3
0.15	9.9	10.3	1.9	17.9	13.5	13.9
0.075	8.1	8.5	2.2	14.3	11.1	12.5



图1 两档RAP料实物

由表1可知,拌和楼取样的粗细两档RAP料中的细RAP小于等于4.75 mm粒径的RAP料变异系数达到19.1%,远远高于其他筛孔粒径。所以,在进行二次筛分处理时,以4.75 mm粒径划分为三档RAP料,粒径分别为0~4.75 mm、4.75~9.5 mm和9.5~20 mm(见表2、表3,图2)。

由表2和表3可知,经二次筛分处理之后的各档RAP料的级配变异性比拌站原有的RAP料的级配变

表2 三档RAP料级配表						
筛孔尺寸/mm	0~4.75 mm		4.75~9.5 mm		9.5~20 mm	
19	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
16	100.0	100.0	100.0	100.0	85.4	89.4
13.2	100.0	100.0	100.0	100.0	73.3	76.8
9.5	100.0	100.0	100.0	100.0	41.5	44.8
4.75	99.8	99.8	41.9	41.9	23.9	26.2
2.36	74.2	71.6	24.3	25.4	18.6	18.5
1.18	49.2	46.9	20.0	20.6	14.9	14.8
0.6	37.3	36.2	17.2	17.6	12.6	12.6
0.3	28.6	28.1	14.7	14.9	10.7	10.8
0.15	22.4	22.1	12.7	12.7	9.1	9.2
0.075	16.0	15.9	10.1	10.1	7.4	7.4

表3 三档废旧沥青混合料变异系数表			
筛孔尺寸/mm	变异系数/%		
	0~4.75m	4.75~9.5m	9.5~20m
19	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	2.3
13.2	0.0	0.0	2.3
9.5	0.0	0.0	3.8
4.75	0.0	0.0	4.5
2.36	1.8	2.3	0.2
1.18	2.3	1.4	0.1
0.6	1.5	1.2	0.1
0.3	0.9	0.7	0.3
0.15	0.5	0.1	0.4
0.075	0.3	0.1	0.1



图2 三档RAP料实物

异性显著下降,同时因拌和楼取样的RAP料0.075 mm以下的粉尘含量过高,后续进行AC-25厂拌热再生混合料设计时应控制三档RAP料中的0~4.75 mm粒径的用量,使级配符合设计要求。同时,测试抽提后的各档位RAP料的密度,由于RAP料中粉尘含量较高且不具备一定规格,采用抽提后的各档位RAP料中含量较高的石料的密度作为该档RAP料密度的代表值,采用该代表值作为后续再生沥青混合料的体积参数性能的计算依据,各档位RAP料检测结果如表4所列。

1.2 含水率

对拌站原有的RAP料和经二次筛分处理之后的RAP料依据规范进行含水率测试^[24],含水率测试结果如表5所列。

表 4 RAP 料密度表

RAP 档位	毛体积密度	表观密度
粗 RAP	2.748	2.766
细 RAP	2.728	2.780
0~4.75 mm	2.715	2.773
4.75~9.5 mm	2.736	2.769
9.5~20 mm	2.752	2.788

表 5 RAP 料含水率表

RAP 档位	含水率/%	规范要求
粗 RAP	0.45	
细 RAP	1.87	
0~4.75 mm	2.44	≤3.0%
4.75~9.5 mm	1.27	
9.5~20 mm	0.5	

根据表 5 的检测结果显示,回收的 5 档 RAP 料中含水率最大为 0~4.75 mm 档 2.44%,粗 RAP 档位的含水率最小 0.45%,其他档位均小于 3.0%,符合规范要求^[25],能够用于后续 AC-25 型再生混合料配合比设计以及路用性能验证。

2 不同分档下厂拌热再生沥青混合料级配设计

2.1 原材料

2.1.1 新集料

粗集料和细集料均采用石灰岩,检测结果如表 6 所列,均满足规范要求^[26]。

表 6 新集料密度表

仓号	毛体积相对密度	表观相对密度
1#	2.686	2.710
2#	2.722	2.736
3#	2.754	2.770
4#	2.714	2.723
5#	2.710	2.722
6#	2.708	2.722

2.1.2 旧集料

拌和楼原有的 RAP 料在实际工程中可能常常经过多次养护维修,且大量的修补养护过程没有进行详实的记录,故很难明确回收获得的 RAP 料中原材料的品牌及使用年限,采用抽提后的石料取代表试样的密度作为代表值,如 1.1 中表 4 所列。

2.1.3 沥青

沥青采用 70# 基质沥青,检测结果如表 7 所列,结果均满足规范的要求^[26]。

2.1.4 矿粉

矿粉的视密度为 2.711 g/cm³,亲水系数为 0.81。

2.1.5 再生剂

再生剂采用芳香族油分,其分子质量较小,具有

表 7 沥青指标检测结果表

项目名称	试验结果	规范要求
针入度(25℃,100 g,5 s)(0.01 cm)	62	60~80
延度(5 cm/min,15℃)/cm	>100	≥100
软化点(环球法)(5℃)	47.0	≥46
密度(25℃)	1.036	实测记录

良好的溶解度,采用厂家推荐掺量,掺量为沥青的 4%。

2.2 配合比设计

2.2.1 级配

本次再生沥青混合料配合比设计为 AC-25 型,首先以无旧料的 AC-25 沥青混合料作为基础级配,通过测定 VV、VMA 以及 VFA 等指标,在混合料指标满足技术要求的基础上最终确定无旧料的 AC-25 沥青混合料最佳油石比为 3.8%。RAP 掺量为 40%,用抽提后集料筛分数据的平均值,进行级配设计,第一组为粗 RAP 和细 RAP,用 RAP2 表示,第二组为经过二次筛分处理的 0~4.75 mm、4.75~9.5 mm 和 9.5~20 mm 三档 RAP 料,用 RAP3 表示,两组的合成级配应与基础级配相近,如图 3 所示,级配如 8 所列。

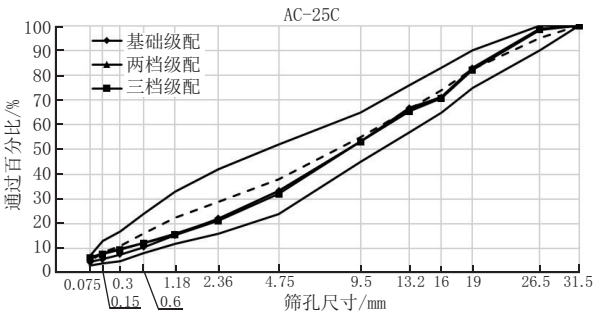


图 3 级配曲线图

表 8 合成级配表

筛孔尺寸/mm	基础级配	RAP2	RAP3	级配中值
31.5	100.0	100.0	100.0	100
26.5	98.9	98.6	98.4	95
19	83.0	82.9	82.2	82.5
16	71.0	71.3	70.7	74
13.2	66.9	66.4	65.5	66.5
9.5	53.1	53.1	53.1	55
4.75	33.4	33.4	32.0	38
2.36	22.2	21.9	21.2	29
1.18	15.3	15.9	15.5	22.5
0.6	10.5	12.3	12.1	16
0.3	7.5	9.8	9.5	11
0.15	5.7	8.0	7.7	8.5
0.075	4.6	6.4	6.1	5

2.2.2 体积参数性能

用马歇尔击实法成型试件,击实次数为双面

75次。废旧沥青混合料的加热温度为90℃,加热时长为1.5h;新集料的加热温度为230℃,加热时长为4h,将新集料和旧料倒入拌和锅中拌和90s;然后加入温度为150℃的新沥青拌和90s,最后加入矿粉拌和90s。其中初定新沥青添加量=基础级配的油石比-RAP料中的油石比×0.8,以初定新沥青添加量±0.3%共成型3组试件,结合上述旧料中集料的密度值,计算出马歇尔试件的体积参数,结果如表9所列。

表9 3种类型混合料的体积参数表				
级配类型	AC-25	AC-25 (RAP2)	AC-25 (RAP3)	规范值
油石比/%	3.8	2.2	2.2	—
空隙率/%	4.5	4.4	4.5	3~6
矿料间隙率VMA/%	12.8	12.6	12.7	≥12
饱和度VFA/%	64.8	65	64.5	55~70
稳定度/kN	9.8	11.3	13.3	≥8
流值(0.1mm)	29.9	32.1	31.5	15~40

3 不同分档下厂拌热再生沥青混合料路用性能影响分析

通过车辙试验、低温小梁弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验研究AC-25厂拌热再生沥青混合料的高温性能、低温性能和水稳定性,并增加含再生剂的AC-25C厂拌热再生沥青混合料作为对照组,同步对比不同分档下的厂拌热再生沥青混合料的路用性能(见表10)。

表10 不同RAP分档的混合料高温性能表					
级配类型	AC-20				
	基础级配	RAP2	RAP3	RAP2 (再生剂)	RAP3 (再生剂)
新沥青油石比/%	3.8	2.2	2.2	2.2	2.2
动稳定度/ (次·mm)	1	1 235	3 756	3 942	3 938
	2	1 320	3 133	4 136	3 736
	3	1 210	3 347	3 856	3 872
	平均	1 255	3 412	3 978	3 849
	规范值	≥1 200			
变异系数/%	实测值	3.8	7.6	2.9	2.2
	规范值	≤20			

3.1 高温稳定性

试验采用上述级配及油石比制备5组车辙试件,分别为基础级配、两档RAP级配(RAP2)、二次筛分处理后的三档级配(RAP3)、两档RAP级配+再生剂和三档RAP级配+再生剂,车辙试验取3个平行试件。试验结果如图4所示,采用3档RAP比采用两档

RAP的热再生沥青混合料的动稳定度提高16.6%,采用3档RAP比采用两档RAP+再生剂的热再生沥青混合料的动稳定度提高3.4%,采用三档RAP的热再生沥青混合料加再生剂比不加再生剂动稳定度提高12.8%。因此,再生剂能够提高厂拌热再生沥青混合料的高温性能。

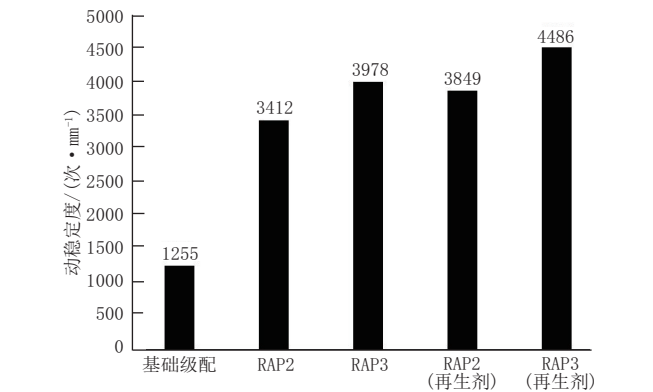


图4 不同RAP分档的混合料高温性能图

3.2 低温抗裂性

采用与3.1相同的方式成型的AC-25厂拌热再生沥青混合料车辙板,切割成规范要求的小梁试件并进行低温抗开裂性能检测^[27]。试验结果如图5所示,最大弯拉应变均大于2 000 με,均符合设计要求。采用三档RAP比未经筛分处理的再生沥青混合料的低温抗开裂性能提升13.0%,主要原因在于二次筛分处理后的RAP料级配变异性小,在室内或拌站拌和后,成品料的级配较为稳定,性能较优。加入再生剂后的混合料,无论RAP料是否进行二次筛分处理,相比于未加再生剂的混合料低温抗裂性能都有不同幅度的提高,加入再生剂后两种混合料(RAP2、RAP3)分别提高了9.8%和17.1%。

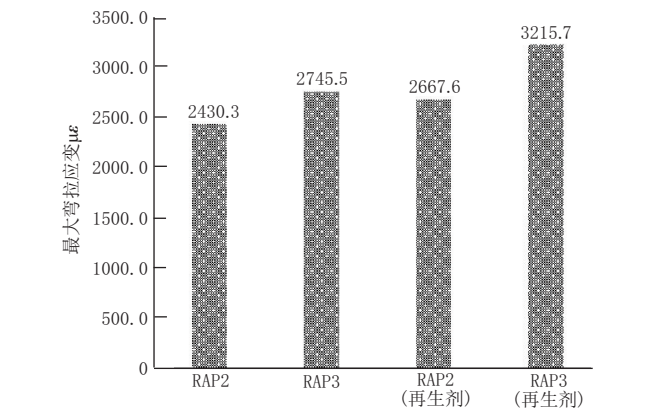


图5 不同RAP分档的混合料低温抗裂性能图

3.3 水稳定性

由于RAP料中的老化沥青黏附性能较低,所以再生沥青混合料的抗水损害性能十分重要,常用浸

水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价水稳定性,按规范要求成型相关试件并进行检测^[27],试验结果如表 11 所列和图 6 所示。采用三档 RAP 或两档 RAP 的厂拌热再生混合料和未加 RAP 的沥青混合料的残留稳定度变化比较平稳,且都符合规范要求,说明分档不同对再生混合料的残留稳定度影响不显著。未加 RAP 的沥青混合料冻融劈裂强度比为 89.3%,采用三档 RAP 和两档 RAP 的再生混合料的冻融劈裂强度比分别为 78.4% 和 84.5%,两者相对于未加 RAP 的混合料冻融劈裂强度比分别下降 12.2% 和 5.4%,而三档 RAP 比两档 RAP 的再生混合料的冻融劈裂强度比提升了 7.8%,说明通过细化分档,将原有的两档 RAP 分为三档 RAP 在相同 RAP 掺量下能够有效地提高混合料抗水损害性能。加入再生剂后的三档 RAP 和两档 RAP 的再生混合料的冻融劈裂强度比分别为 82.1% 和 87.7%,比不加再生剂的再生混合料分别提升了 4.7% 和 3.7%,说明加入再生剂能够有效改善厂拌热再生沥青混合料的抗水损害性能。

表 11 不同 RAP 分档的混合料水稳定性表				
级配类型	残留稳定度/ %	规范值/ %	冻融劈裂 强度比/%	规范值/ %
基础级配	96.1		89.3	
RAP2	93.7		78.4	
RAP3	94.3	≥80	84.5	≥75
RAP2+再生剂	95.7		82.1	
RAP3+再生剂	95.8		87.7	

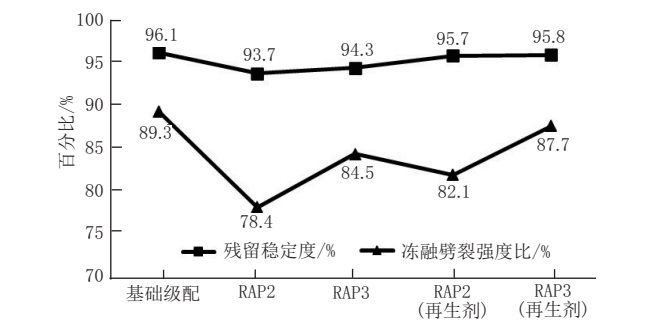


图 6 不同 RAP 分档的混合料水稳定性图

4 现场取样验证

4.1 拌和楼取样性能验证

为了验证经二次筛分处理后的再生混合料的实际应用效果,对拌和楼生产的掺入 3 档 RAP 的 AC-25 再生沥青混合料(不含再生剂)进行取样,从料车里取好样品进行路用性能验证,如表 12 所列,检测结果符合规范要求^[26]。图 7 为现场取样图。

4.2 现场检测

对 AC-25 厂拌热再生沥青混合料压实过程中温

表 12 现场取样检测结果表		
试验项目	实测值	规范值
浸水马歇尔残留稳定度/%	96.5	≥90
冻融劈裂强度比/%	85.4	≥85
动稳定度 60 ℃/(次·mm)	4 256	≥1 200
低温弯曲试验破坏应变 με	2 630	≥2 000



图 7 现场取样图

度进行检测(见图 8),混合料初始摊铺温度为 157.3 ℃,符合碾压要求。



图 8 AC-25 再生混合料摊铺温度

沥青路面摊铺压实后,待摊铺层完全自然冷却,对施工路段进行检测,检测现场渗水系数和取芯后的压实度。检测计算结果如表 13 和表 14 所列,检测合格。

表 13 渗水系数检测结果表			
路段	检测项目 渗水系数/(mL·min ⁻¹)	设计要求/ (mL·min ⁻¹)	结果判定
BT1K1+335	105	≤120	合格
BT1K1+310	99		
BT1K1+230	110		

表 14 压实度检测结果表			
路段	检测项目 压实度/%	设计要求	结果判定
BT1K1+335	98.7	≥98%	合格
BT1K1+310	99.4		
BT1K1+230	99.5		

5 结 论

(1)采用三档 RAP 的厂拌热再生混合料比两档

RAP的厂拌热再生混合料的高温性能提升16.6%,低温抗裂性能提升13.0%,冻融劈裂强度比提升了7.8%。

(2)加入再生剂后,采用三档RAP的厂拌热再生混合料比两档的厂拌热再生混合料高温性能提升16.5%,低温抗裂性能提升20.5%,冻融劈裂强度比提升了6.4%。

(3)经二次筛分处理后,采用三档RAP的厂拌热再生混合料比两档RAP的厂拌热再生混合料+再生剂的高温性能也有略微提高,提升了3.4%。因此,通过细化分档,将原先的两档RAP料划分成三档,对拌站原有RAP料分档进行改进,促进旧料充分再生利用,能够全面提升再生混合料的路用性能和质量。

参考文献:

- [1] 臧超杰.大掺量RAP厂拌热再生沥青混合料配合比优化设计与性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2021.
- [2] 周洲.厂拌热再生沥青混合料抗裂性能和开裂机理研究[D].南京:东南大学,2020.
- [3] 黄晓明,赵永利.沥青路面再生利用理论与实践[M].北京:科学出版社,2014.
- [4] 安茂平,李雄傲,董煊,等.高掺量厂拌热再生沥青混合料再生方法及其路用性能[J].交通世界,2024(17):8-10.
- [5] 朱秋铭.不同RAP掺量的再生沥青混合料性能影响分析[J].交通世界,2021(10):146-148.
- [6] 陈龙.厂拌热再生沥青混合料的设计及路用性能研究[J].山东交通科技,2022(1):66-68.
- [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] 严玉亭.厂拌热再生沥青混合料施工技术研究[J].中华建设,2020(4):160-161.
- [9] 潘万南.厂拌热再生沥青混合料RAP矿料级配变异评价[J].福建建设科技,2020(1):46-49.
- [10] 陈丽.厂拌热再生沥青混合料AC-13C在遂回高速公路路面维修处治的应用[J].四川建筑,2019,39(3):258-260;263.
- [11] 任明.沥青路面大掺量厂拌热再生效益分析[J].交通科技与管理,2023,4(15):87-89.
- [12] 孙海琢.沥青路面厂拌热再生中RAP掺量的影响分析[J].交通世界,2023(20):60-62.
- [13] 张丽宏.基于分档方法的大掺量厂拌热再生混合料性能研究[J].石油沥青,2022,36(6):50-55.
- [14] 夏旭,王鹏飞,孙向进,等.废旧沥青混合料厂拌热再生技术综述[J].现代交通与冶金材料,2024,4(4):23-33;40.
- [15] 张连军.厂拌热再生沥青混合料的设计分析[J].江西建材,2024(3):65-67.
- [16] 裘秋波,施公佐,熊分清,等.RAP料级配变异性对厂拌热再生混合料级配离析的影响研究[J].公路,2022,67(4):28-34.
- [17] 郑凯.沥青路面厂拌热再生技术应用研究[J].交通世界,2021,(17):82-83.
- [18] 薛明亮,徐紫祎,张红兵,等.厂拌热再生沥青混合料研究与应用进展[J].青海交通科技,2021,33(2):38-41.
- [19] 黄雪林.高掺量厂拌热再生RAP料级配控制研究[J].现代交通技术,2020,17(3):17-21.
- [20] 王力.厂拌热再生混合料低温和抗水损害性能试验研究[J].北方交通,2020(2):69-71.
- [21] 程其瑜,仰建岗,祝谭雍.厂拌热再生沥青混合料中RAP掺量对马歇尔指标的影响分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(7):83-86.
- [22] 刘彭成.厂拌热再生沥青混合料的性能研究[J].山东交通科技,2019(3):94-97.
- [23] 翟晓成,丁攀,雷雨涛,等.基于响应曲面法的大掺量RAP厂拌热再生沥青混合料级配优化设计[J].兰州理工大学学报,2023,49(6):119-128.
- [24] JTG 3432—2024,公路工程集料试验规程[S].
- [25] JTG/T 5521—2019,公路沥青路面再生技术规范[S].
- [26] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [27] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [16] 朱云升,章汉卿,王开凤,等.不同RAP掺量下热再生沥青混合料性能衰变规律[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(4):698-704.
- [17] 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.
- [18] 徐光,李启石,旷华平,等.老化SBS改性沥青的结构修复与性能评价[J].中外公路,2024,44(5):108-116.
- [19] 李向阳,马翔,黄芳宇.RAP掺量对热再生沥青混合料高温性能的影响[J].上海公路,2024(3):140-144;208.
- [20] 罗婷,王嘉昕,谢斌,等.不同温拌剂对高黏沥青老化性能的影响[J].材料导报,2024,38(13):106-114.
- [21] Karina S, Kamilla V, Miguel L K, *et al.* Evaluation of recycled asphalt mixtures with different RAP contents and the effect of recycling agent [J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, 25(s1): 124-136.

(上接第336页)