

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.057

高 RAP 掺量下热再生混合料路用性能与加热工艺研究

贺华刚¹, 贾晓东¹, 李小龙²

(1. 重庆工商职业学院, 重庆市 400052; 2. 重庆交通大学 土木工程学院)

摘要:为研究热再生混合料相关性能和就地热再生加热工艺,该文选取级配类型为 SMA-13 和 AC-13 两种废旧沥青混合料(RAP),分别掺加 90% SMA-13 型 RAP 和 85% AC-13 型 RAP 进行热再生混合料设计。对两种热再生混合料进行车辙试验、低温小梁弯曲破坏试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验及渗水系数测试。结果表明:两种热再生混合料高温性能良好,低温性能也满足规范要求,但 SMA-13 热再生混合料低温性能改善并不明显;在水稳定性和防渗水性能方面,两种热再生混合料均能较好地达到规范要求,且 SMA-13 热再生混合料的防渗水性能非常好。此外,通过设计正交试验研究混合料再生过程中各环节加热温度,确定两种热再生混合料中旧沥青混合料、新沥青混合料及再生剂最佳加热温度分别为 165、165 和 145 ℃。

关键词: RAP; 就地热再生; 路用性能; 加热工艺

随着中国公路建设事业逐渐步入“建养并重”的新阶段,道路升级改造、维修养护任务日益繁重,每年产生了大量废旧沥青混合料(RAP)。基于绿色公路发展理念,采用路面热再生技术对 RAP 进行有效处理,在很大程度上取代新沥青混合料用于道路建设,实现废料再利用、节能环保的目的。

近年来,研究人员对再生混合料进行了深入探索,齐小飞等研究了高掺量 RAP 下热再生混合料性能在不同再生剂掺量、新料温度、拌和温度及拌和时间下的变化;林翔研究了再生混合料体积参数受沥青针入度、含量以及矿料细度模数的影响;韩娟对 4 种高 RAP 掺量下的再生 SMA 混合料路用性能进行了分析对比;董晓进通过掺加橡胶粉对热再生混合料的性能进行改善;张勤玲采用玄武岩纤维改善再生混合料路用性能。目前,对热再生沥青混合料的路用性能已经进行了大量研究,而对于就地热再生过程中的相关工艺研究较少。因此,该文通过相关室内试验评价高 RAP 掺量下 SMA-13 型、AC-13 型两种常用的热再生混合料的路用性能,并设计正交试验研究其再生工艺中最佳加热温度,为就地热再生混合料施工提供一定参考。

1 试验方案

1.1 原材料

(1) RAP。取自级配类型分别为 SMA-13 和 AC-13 的重庆某两段高速公路沥青混凝土表面层,进行大修时服役时间均为 7 年,在服役期间两条高速公路的交通量较为接近,且所用沥青结合料均为 SBS 改性沥青。通过对两种 RAP 中旧沥青抽提、回收以及旧料的筛分,测算出 SMA-13 型 RAP 中沥青含量为 6%,AC-13 型 RAP 中沥青含量为 4.6%,旧集料级配筛分结果分别如图 1、2 所示。

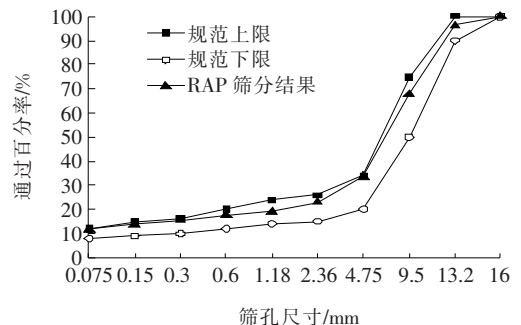


图 1 SMA-13 型旧料级配曲线

收稿日期:2020-09-29(修改稿)

基金项目:重庆通力高速公路养护工程有限公司技术开发项目(编号:18Q-68)

作者简介:贺华刚,男,硕士,讲师。E-mail:891519540@qq.com

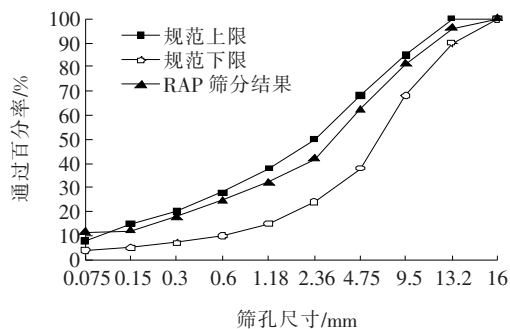


图2 AC-13型旧料筛分结果

由图1、2可知:两种旧料中的细集料均接近级配设计要求上限,且AC-13型旧料级配中0.075mm档已超出规范上限,表明路面在长期服役过程中承受行车荷载作用后导致石料发生明显的破损细化现象。

(2) 新集料。由AC-13型和SMA-13型旧料筛分结果可知,集料出现明显细化,所以需加入新集料以调整再生沥青混合料级配使其满足规范要求。根据取样路段实际情况,SMA-13型再生料中新集料选择玄武岩和机制砂,AC-13型再生料中新集料选择破碎鹅卵石和机制砂,按照JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》对所选集料主要技术指标进行检测,试验结果表明各项技术指标均满足规范要求。

(3) 新沥青。选用SBS改性沥青,其主要技术指标如表1所示。

表1 SBS改性沥青主要技术指标

试验项目	单位	试验结果	规范要求	试验方法
针入度(25℃)	0.1 mm	56	40~60	T0604
软化点	℃	67	≥60	T0606
延度(5℃)	cm	32	≥20	T0605
弹性恢复(25℃)	%	79	≥75	T0662
离析	℃	0.7	≤2.5	T0661
运动黏度(135℃)	Pa·s	2.1	≤3	T0625

(4) 再生剂。沥青再生剂常见类型主要有软沥青、低黏度油分、专用再生剂,近年来亦有研究人员对生物油再生剂进行研究。该文所用再生剂为某种常规的市售国产沥青热再生剂,其基本技术性能指标见表2。室内相关试验表明:再生剂掺量为旧沥青的6%时,RAP中旧沥青的常规物理性能指标针入度、软化点以及延度指标恢复较好,试验结果见表3,所以该文再生剂的掺量确定为6%。

表2 再生剂主要技术指标

技术指标	单位	试验结果	规范要求	试验方法
60℃黏度	mm ² /s	278	200~800	T0619
闪点	℃	248	≥220	T0633
饱和分含量	%	28.4	≤30	T0618
芳香分含量	%	56	实测	T0618
RTFOT前后质量变化	%	1.32	≤3	T0610
密度(25℃)	g/cm ³	1.021	实测	T0603

表3 RAP中旧沥青试验结果

检测项目	单位	试验结果		试验方法
		RAP中旧沥青	旧沥青+6%再生剂	
针入度(25℃)	0.1 mm	29.4	47.3	T0604
软化点	℃	82.5	71.0	T0606
延度(5℃)	cm	3.4	22.6	T0605

(5) 纤维。采用木质素纤维,长度小于6mm,含水率低于5%,掺量为0.35%。

1.2 矿料级配组成设计

(1) SMA-13热再生混合料级配

根据实际施工经验以及对回收筛分后的旧料分析,确定SMA-13型RAP掺加比例为90%,通过调整10%新集料构成比例确定SMA-13热再生混合料的级配,经计算调整后合成级配如表4所示。

表4 SMA-13热再生混合料级配组成设计

级配	新集料/ mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
10~15	100	85.6	7.3	0.4	0	—	—	—	—	—	—
5~10	100	100	97.3	3.6	0.7	0.4	0	—	—	—	—
3~5	100	100	100	95.4	2.7	0.5	0	—	—	—	—
0~3	100	100	100	99.8	72.8	42.6	29.3	16.7	9.6	6.8	—
上限	100	100	75.0	34.0	26.0	24.0	20.0	16.0	15.0	12.0	—
下限	100	90.0	50.0	20.0	15.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0	—
合成级配	100	92.9	65.9	32.0	21.2	17.7	16.1	14.0	12.6	10.8	—

(2) AC-13 热再生混合料级配

根据实际施工经验以及对回收筛分后的旧料分析,确定 AC-13 型 RAP 掺加比例为 85%,通过调整

15%新集料构成比例确定 AC-13 热再生混合料的级配,经计算调整后合成级配如表 5 所示。

表 5 AC-13 热再生混合料级配组成设计

级配	新集料/ mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
10~15	100	81.4	7.4	0.4	0	—	—	—	—	—	—
5~10	100	100	97.5	7.6	0.6	0	—	—	—	—	—
3~5	100	100	100	98.8	1.8	0.6	0.5	0	—	—	—
0~3	100	100	100	100	89.4	69.4	51.3	34.3	22.6	11.7	—
上限	100	100	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0	—
下限	100	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0	—
合成级配	100	96.7	80.6	48.7	31.6	22.4	17.1	11.2	8.1	7.4	—

1.3 最佳沥青用量

根据确定的两种再生沥青混合料的级配,参考 JTG F41—2008《公路沥青路面再生技术规范》相关要求,采用马歇尔试验设计法进行热再生混合料的目标配合比设计。试验时先将 RAP 与再生剂拌和 60 s 后加入预热好的新集料再拌和 90 s,使旧沥青完全分散,然后掺加木质纤维(AC-13 热再生混合料省去该过程)拌和 60 s,接着加入 SBS 改性沥青拌和 120 s,使新旧沥青充分融合,最后加入矿粉拌和 60 s。试验结果为 SMA-13 热再生混合料最佳油石比为 6.1%,AC

-13 热再生混合料最佳油石比为 4.7%,其中最佳油石比=(旧料沥青含量+再生剂用量+新沥青用量)/再生混合料集料质量,再生剂为 RAP 中旧沥青的 6%。通过计算可知:SMA-13 热再生混合料中新沥青比例为新集料的 3.76%,而 RAP 料与新集料比为 9:1;AC-13 热再生混合料中新沥青比例为新集料的 3.7%,而 RAP 料与新集料比为 8.5:1.5。各项体积参数及 SMA-13 热再生混合料析漏试验和飞散试验结果如表 6 所示,各项指标均在相关规范要求范围以内。

表 6 热再生混合料试验结果

混合料 类型	油石比/ %	空隙率/ %	矿料间隙 率/%	沥青饱和 度/%	马歇尔稳 定度/kN	密度/ (g·cm ⁻³)	飞散损 失/%	析漏损 失/%	流值/ mm
SMA-13	6.1	3.4	17.5	80.2	13.21	2.489	2.64	0.06	—
AC-13	4.7	4.3	15.1	71.1	21.23	2.422	—	—	2.2

2 路用性能分析

2.1 高温稳定性

高温稳定性良好的沥青混合料能够保证路面在高温状态下仍具有优良的抗车辙变形能力,进而使得道路的服务水平得以提升。因此,该文按照相关规范对所研究的热再生沥青混合料进行车辙试验,评价热再生混合料高温稳定性,结合重庆地区的气候情况试验温度选择 70℃,试验结果如表 7 所示。

根据沥青胶结料老化规律可知,其老化后由于沥青中轻组分向重组分转移,宏观上表现为“硬而脆”,所以使得沥青混合料的高温性能变好。而再生剂中主要

成分以低黏度油分为主,再生剂加入后会降低再生混合料整体高温稳定性,所以此次试验选择恰当的再生剂掺量以保证再生混合料的高温稳定性。由表 7 可知:两种热再生混合料动稳定度结果均能达到夏季炎热地区改性沥青混合料动稳定度要求,所以其高温性能满足规范要求。

表 7 车辙试验结果

再生混合 料类型	沥青用 量/%	动稳定度平均 值/(次·mm ⁻¹)	规范要求(夏季炎热 区)/(次·mm ⁻¹)
SMA-13	6.1	4 356	≥3 000
AC-13	4.7	4 178	≥2 800

2.2 低温抗裂性

低温抗裂性作为沥青混合料路用性能的重要指标,其能反映沥青混合料在低温条件下抵抗收缩变形的能力。此次试验按照相关规范对所研究的两种热再生混合料进行低温小梁弯曲破坏试验,评价两种热再生混合料低温性能,对应规范值按重庆地区实际情况确定,结果如表8所示。

表8 低温小梁弯曲试验结果

再生混合料类型	试验温度/ ℃	弯曲破坏最大应变/ $\mu\epsilon$	规范要求 (冬冷区)/ $\mu\epsilon$
SMA-13	-10	2 584	$\geq 2 500$
AC-13	-10	2 946	

由表8可知:两种高RAP掺量的热再生混合料弯曲破坏最大应变均超过规范要求,表明它们的低温性能能够满足相关规范要求。但是,SMA-13热再生混合料弯曲破坏最大应变相较规范要求并未有明显差距,其原因是由于SMA-13热再生混合料中RAP掺量高达90%,再生之前其低温性能损失严重,而掺加的再生剂在拌和过程中很难完全与RAP中旧沥青相融合,导致再生效果下降,因而对于热再生混合料低温性能改善不甚明显。

2.3 水稳定性

水稳定性作为沥青混合料耐久性的重要构成部分,对道路服役水平有着重要影响。目前,对于水稳定性的评价方法甚多,该文主要采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验,对应规范值按重庆地区实际情况确定,相关测试结果见表9、10。

表9 浸水马歇尔试验结果

再生混合料类型	对照组/ kN	试验组/ kN	MS_0 / %	规范要求 (湿润区)/%
SMA-13	13.56	11.94	88.1	≥ 80
AC-13	22.12	19.32	87.4	≥ 85

表10 冻融劈裂试验结果

再生混合料类型	对照组/ MPa	试验组/ MPa	TSR / %	规范要求 (湿润区)/%
SMA-13	0.911	1.039	87.7	≥ 80
AC-13	1.694	1.848	91.7	≥ 80

由表9、10可知:两种热再生混合料残留稳定度比 MS_0 和冻融劈裂强度比 TSR 均满足规范要求,表明

在高RAP掺量情况下,两种热再生混合料都具有较好的抗水损害能力。

2.4 防渗水性

再生沥青路面应具备足够的防渗性以保证道路耐久性,该文通过沥青混合料渗水试验测定两种热再生混合料渗水系数,结果如表11所示。

表11 渗水系数测试结果

再生混合料类型	渗水系数平均值/ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	规范要求/ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)
SMA-13	基本不渗水	≤ 80
AC-13	26	≤ 120

由表11可知:两种热再生混合料渗水系数平均值远低于规范值,SMA-13热再生混合料甚至达到了基本不渗水的状态,表明在高RAP掺量下的两种热再生混合料都具备良好的防渗水性能,能有效地阻止水分对路面的损害,从而满足道路实际需求。

3 加热工艺研究

再生工艺加热温度的选择对整个就地热再生过程的施工质量及再生路面使用性能有着关键的影响,其中主要包括旧沥青混合料加热温度、再生剂喷洒温度及新沥青混合料温度的确定。混合料空隙率作为路面施工过程中重要检测指标,对混合料抗水损害能力及抗老化能力有着重要影响。相关研究表明:空隙率过大易使得外界水分渗入混合料内部,在行车荷载作用造成的动水压力下使得沥青膜脱离集料表面甚至迁移,产生路面松散、坑槽现象。因此,该文以旧混合料温度、再生剂温度及新混合料温度为试验考察因素,空隙率为试验考察指标,通过建立三因素四水平正交试验研究两种热再生混合料再生工艺中各个环节最佳加热温度,正交试验方案及结果见表12、13。

由表13可知:极差大小为 $R_A \geq R_B \geq R_C$,所以试验因素对试验指标影响因素主次顺序为旧料温度、新料温度、再生剂温度,各因素的最优水平均为 A_1 、 B_1 、 C_1 。结合RAP、新料及再生剂掺加比例分析,可以发现3种因素对两种再生混合料空隙率的影响显著性基本与新料、旧料及再生剂掺量呈正相关关系,与正交试验计算结果一致。其原因是再生混合料中,RAP占据了很大比例,在施工过程中其加热温度对再生路面性能影响最大。而再生剂作为低黏度油分,其在高温拌和过程中易挥发,进而影响再生效果。因此,结合实际

表 12 正交试验方案设计

试验 序号	旧料温 度/℃	新料温 度/℃	再生剂 温度/℃	AC-13 空隙率/%	SMA-13 空隙率/%
1	135	135	125	6.2	5.3
2	135	145	135	6.1	5.6
3	135	155	145	6.1	5.0
4	135	165	155	6.0	5.2
5	145	135	135	5.7	5.3
6	145	145	125	5.9	4.6
7	145	155	155	6.0	4.5
8	145	165	145	5.5	4.2
9	155	135	145	5.2	4.4
10	155	145	155	5.2	4.8
11	155	155	125	4.7	4.1
12	155	165	135	4.4	3.8
13	165	135	155	4.5	3.9
14	165	145	145	4.2	4.0
15	165	155	135	4.0	3.3
16	165	165	125	4.1	3.3

表 13 热再生混合料正交试验结果

因素 分析	因素 A		因素 B		因素 C	
	(旧料温度)/%		(新料温度)/%		(再生剂温度)/%	
	SMA-13	AC-13	SMA-13	AC-13	SMA-13	AC-13
K_1	21.1	24.4	18.9	21.6	17.3	20.9
K_2	18.6	23.1	19.0	21.4	18.0	20.2
K_3	17.1	19.5	16.9	20.8	17.6	21.0
K_4	14.5	16.8	16.5	20.0	18.4	21.7
\bar{K}_1	5.3	6.1	4.7	5.4	4.3	5.2
\bar{K}_2	4.7	5.8	4.8	5.4	4.5	5.1
\bar{K}_3	4.3	4.9	4.2	5.2	4.4	5.3
\bar{K}_4	3.6	4.2	4.1	5.0	4.6	5.4
R_j	1.7	1.9	0.7	0.4	0.3	0.3

施工情况及影响显著性差异,确定两种热再生混合料再生工艺中旧沥青混合料、新沥青混合料及再生剂最佳加热温度分别为 165、165 和 145 ℃。

4 结论

(1) 当 SMA-13 和 AC-13 型热再生混合料旧料掺量分别高达 90%、85% 时,通过确定合适的级配和最佳沥青用量后,两者各项马歇尔试验结果及 SMA

-13 热再生混合料的析漏损失和飞散损失均符合规范要求。

(2) 通过对两种热再生混合料高低温性能、水稳性及防渗水性能测试,两种热再生混合料的高温稳定性良好,应该是由于旧料掺量较高所致;在低温性能方面,由于 RAP 掺量过高以及拌和过程中旧沥青很难与再生剂充分融合, SMA-13 热再生混合料的改善并不明显,但基本能达到规范要求;在水稳定性和防渗水性能方面,两种热再生混合料均能较好地达到规范要求,且 SMA-13 热再生混合料的防渗水性能非常好。

(3) 以再生料空隙率为考察指标设计正交试验,通过极差分析确定两种热再生料再生过程中旧料、新料及再生剂的最佳加热温度分别为 165、165 和 145 ℃。

参考文献:

- [1] 寇洪源. 就地热再生沥青混合料温度参数与性能的研究[D]. 东北林业大学硕士学位论文, 2018.
- [2] 郑慧慧. 掺加纤维与青川岩沥青的热再生混合料配合比设计与路用性能[J]. 新型建筑材料, 2018(7).
- [3] Farooq M A, Mir M S, Sharma A. Laboratory Study on Use of RAP in WMA Pavements Using Rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 61-72.
- [4] 齐小飞, 邹晓翎, 阮鹿鸣. 高 RAP 掺量下热再生混合料水稳定性影响因素研究[J]. 中外公路, 2018(2).
- [5] 林翔, 张金喜, 苗英豪. 再生沥青混合料配合比设计影响因素试验研究[J]. 公路交通科技, 2011(2).
- [6] 韩娟, 姬程飞. 高 RAP 掺量热再生 SMA 路面高效再生路用性能研究[J]. 公路工程, 2016(3).
- [7] 董晓进. 橡胶粉对热再生混合料路用性能的影响[J]. 公路工程, 2014(6).
- [8] 张勤玲. 玄武岩纤维改善再生沥青混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2016(3).
- [9] 索智, 季节, 满琦, 等. 植物油再生沥青的性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2016(7).
- [10] 刘春林. 沥青混凝土路面高温稳定性影响因素分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019(1).
- [11] 耿九光. 沥青老化机理及再生技术研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2009.
- [12] 王修山, 邱洋杰, 朱燮瀚. Thiopave 改性沥青混合料路用性能评价[J]. 公路, 2018(4).
- [13] 李立寒, 张南鹭. 道路工程材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013(6).