

成型温度对旧 SBS 改性沥青混合料 热再生性能的影响

李秀君¹, 王尧¹, 拾方治², 高世柱¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 嘉兴市高新交通技术测评研究院, 浙江 嘉兴 314000)

摘要:以旧 SBS 改性沥青混合料为研究对象,通过室内试验,探究了 20%、40%、70%、100% 4 种旧料掺量下成型温度对沥青混合料物理力学性能的影响以及较低成型温度下改善混合料性能的措施。结果表明:随着成型温度增大,旧 SBS 改性沥青混合料热再生性能得到不同程度改善;随着旧料掺量增加,混合料所需适宜成型温度随之增大,且成型温度对混合料密实性影响效果愈发显著;成型温度较低时建议采取控制旧沥青混合料掺量、适当增加粗集料含量、延长拌合时间的方法改善混合料性能,可使混合料达到较高成型温度时的性能状态,满足路用要求。

关键词:旧 SBS 改性沥青混合料; 成型温度; 旧料掺量; 热再生性能; 改善措施

中图分类号:TV42⁺3

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)06-0190-06

Influence of compaction temperature on the material regeneration performance of old SBS modified asphalt mixture

LI Xiujun¹, WANG Yao¹, SHI Fangzhi², GAO Shizhu¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Jiaxing Hi-Tech Communication Evaluation Institute, Jiaxing 314000, China)

Abstract: Based on the materials of old SBS modified asphalt mixture, the influences of compaction temperature on physical and mechanical properties of material regeneration performance under four normal RAP contents (20%, 40%, 70%, and 100%) and the measures to improve performance of mixture under low compaction temperatures were investigated by laboratory tests. The results showed that, with the increase of compaction temperature, the regeneration performance of old SBS modified asphalt mixture was improved; with the increase of RAP (Recycled Asphalt Pavement), the required suitable compaction temperature increased, and the impacts of compaction temperature on compactness of mixture was more significant. It was suggested that the measures of controlling RAP (Recycled Asphalt Pavement) content, increasing coarse aggregate content appropriately and extending mixing time could be applied to improve the performance of mixture, in order to achieve the same performance as compacting under a high compaction temperature and to meet the requirements of road.

Key words: old SBS modified asphalt mixture; compaction temperature; RAP(recycled asphalt pavement) content; regeneration performance; improvement measures

近年来,沥青路面热再生技术已广泛应用于废旧沥青混合料再生处理中,在实现废旧资源再利用的同时,可有效防止环境污染,具有良好的经济效益^[1]。在热再生施工过程中,对沥青混合料压实效果的控制尤为关键,将直接决定再生沥青路面的使用性能和耐久性能^[2]。

成型温度是影响沥青混合料压实效果的关键因素,温度过低时沥青黏度较大,混合料难以压实,而温度过高沥青可能发生短期老化,或因高温下沥青黏度过小出现混合料滑移等问题,均将对再生路面的性能造成不利影响。目前规范中对热再生沥青混合料成型温度没有一个较为准确的范围规定^[3],不

收稿日期:2016-05-26; 修回日期:2016-06-22

作者简介:李秀君(1976-),女,江苏江阴人,博士,副教授,主要从事路面工程及路面材料的教学与研究工作。

通讯作者:王尧(1992-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,研究方向:道路材料设计、道路材料再生研究。

利于施工控制同时成型温度的变化可能会对混合料性能产生显著影响,因此对于实际施工确定出适宜的成型温度十分必要;此外,SBS 改性沥青高温时具有显著的非牛顿特性^[4],亦不能简单依据沥青“黏-温曲线”来确定混合料成型温度,且目前对于这种材料相关的应用研究较少。因此,本文针对旧 SBS 改性沥青混合料,在几种旧料(Recycled Asphalt Pavemet,RAP)掺量(20%,40%,70%,100%)下分别在 100℃、125℃、150℃、175℃ 4 种成型温度下加以再生压实,探求成型温度对混合料热再生性能的影响,以期得出不同 RAP 掺量下较适宜的成型温度,为实际施工温度控制提供参考,并提出较低成型温度下改善混合料性能方法。

1 试验材料

1.1 RAP

试验采用浙江省某高速公路经铣刨、破碎、筛分分级的面层沥青混合料,对 RAP 中沥青进行抽提回

收,测定沥青三大指标,确定 RAP 矿料级配;经试验测定 RAP 中沥青含量为 4.73%,旧沥青三大指标及集料级配情况如表 1、表 2 所示。

测试结果表明,旧沥青老化较为严重,针入度、延度明显降低,软化点显著升高,已不能满足规范要求,考虑加入适当新沥青及再生剂加以调和再生;旧集料级配细化现象明显,试验中可观察到少量粗集料具有新鲜的破碎面,其中 9.5、0.6、0.3、0.15、0.075 mm 粒径集料通过百分率均略超出 AC-13C 级配上限,而其他粒径集料亦接近于级配上限,分析原因可能是长期车辆荷载作用、铣刨机器刀头对粗集料切削作用及反击式破碎、筛分作用所致,因级配不符合要求且整体偏细,须加入新集料调整。

表 1 旧沥青常规性能指标

测试指标	25℃ 针入度/ (0.1mm)	软化点/ ℃	15℃ 延度/ cm
测试结果	32	60	26

表 2 旧集料筛分结果

统计项目	筛孔尺寸/mm										%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
分计筛余	0	3.9	8.8	23.0	16.8	9.8	9.3	7.0	2.9	4.0	
通过百分率	100.0	96.1	87.3	64.3	47.5	37.7	28.4	21.4	18.5	14.5	

1.2 新沥青及再生剂

新沥青采用与原 SBS 改性沥青相同标号沥青,再生剂采用江苏某公司生产 RA-102 改性沥青再生剂,以 5%~8% 掺量分别加入到旧沥青中试配,以沥青三大指标为评价标准,最终确定再生剂掺量为 6%。

1.3 新集料

新矿料采用玄武岩,石屑采用石灰石,经试验测试,所采用集料均满足 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》^[5]相关技术要求。

2 试验条件

2.1 级配

就地热再生 RAP 掺量一般在 70% 以上,而厂拌热再生对再生混合料性能要求较高,RAP 掺量一般控制在 50% 以下^[6]。试验采用 20%、40%、70%、100% 4 种 RAP 掺量模拟实际施工中两种不同热再生方掺量,组成方案如下:

A 级配:20% RAP + 25% 碎石(1) + 15% 碎石(2) + 40% 石屑;

B 级配:40% RAP + 15% 碎石(1) + 15% 碎石(2) + 30% 石屑;

C 级配:70% RAP + 10% 碎石(1) + 10% 碎石(2) + 10% 石屑;

D 级配:100% RAP;

4 种级配的合成级配如表 3 所示,A、B、C 级配方案较原始 RAP 级配 D 级配粗集料含量增多且各筛孔分计筛余量分布较均匀,级配更加连续且接近中值。

2.2 最佳沥青用量

最佳沥青用量在 70% RAP 掺量条件下进行确定,采用美国沥青协会经验公式^[7]:

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F \tag{1}$$

式中: P 为再生混合料沥青含量预估值,以占沥青混合料质量百分数表示; a 为 2.36 mm 筛以上集料百分数,以整数表示; b 为 0.075~2.36 mm 筛之间集料百分数,以整数表示; c 为 0.075 mm 筛以下集料百分数,以整数表示; K 为集料系数, $c = 11 \sim 15$ 时,取 0.15; $c = 6 \sim 10$ 时,取 0.18; $c = 0 \sim 5$ 时,取 0.20; F 为系数,根据集料比重及表观性能,取 0~2.0。

表 3 级配组成方案 %

方案	筛孔尺寸/mm									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	100.0	95.7	74.5	55.6	36.9	26.8	17.7	10.7	7.8	4.8
B	100.0	96.3	81.0	58.5	39.7	29.6	20.5	13.4	10.5	7.2
C	100.0	95.9	81.9	57.0	40.4	31.3	23.0	16.7	12.6	6.4
D	100.0	96.1	87.3	64.3	47.5	37.7	28.4	21.4	18.5	14.5

确定出再生混合料预估油石比为 5.0%,按照 0.4% 间隔变化,在 4.2%、4.6%、5.0%、5.4%、6.0% 油石比下分别成型马歇尔试件,测定体积指标并分析,得出最佳沥青含量为 4.9%,并以此作为沥青总量,在以其他 RAP 掺量掺配时,亦沿用此沥青用量,排除沥青用量变化对试验结果的影响^[8]。

2.3 温度

试验以再生混合料的成型温度为研究影响因素,因此尽量控制其他温度条件保持一致;采用 100℃、125℃、150℃、175℃ 4 种成型温度,模拟了常见成型温度(125℃,150℃),以及实际施工中因环境因素、设备调试因素会出现的低成型温度(100℃)及较难达到的高成型温度(175℃,虽然实际工程中很难达到,在此研究是为了保证温度间隔,便于定性分析性能变化),温度控制情况见表 4。

表 4 热再生温度控制 ℃

温控项目	成型温度			
	100	125	150	175
拌合温度	185	185	185	185
RAP 预热温度	110	110	110	110
新料加热温度	180	180	180	180
沥青加热温度	140	140	140	140

2.4 成型与养护

按设计配合比,将 RAP 预热,后加入再生剂拌合均匀,拌合时间为 120s,再加入新集料及新沥青拌合 60s,将拌合好的混合料放置在相应成型温度的空气浴中保温 2h,后采用马歇尔双面击实 75 次的方法成型试件,为减少试验误差及变异性,每组性能试验平行试件 4~6 个,室温冷却脱模,养护完成后进行各项性能试验。

3 成型温度对旧 SBS 改性沥青混合料热再生性能影响

3.1 试件外观

图 1 中 1-1、1-2、1-3、1-4 分别为 70% RAP

掺量下沥青混合料在 100℃、125℃、150℃、175℃ 4 种成型温度下成型的试件。由图可见,随着成型温度增大,试件表面愈发“细腻光滑”,表面空隙呈逐渐减小趋势,而在 175℃ 成型温度下,试件边缘出现沥青混合料滑移现象,因为过高的成型温度会导致沥青黏度显著减小,使其无法与集料结合形成具有较高强度的沥青胶浆,势必对混合料的使用性能造成不利影响。

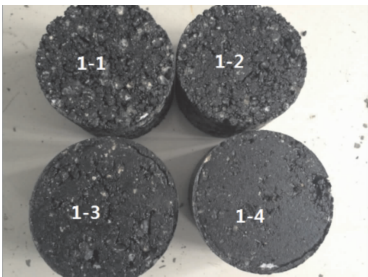


图 1 脱模养护后试件外观

3.2 物理性能

空隙率是表征沥青混合料物理性能的主要指标,测定不同 RAP 掺量下 4 种成型温度成型试件的毛体积相对密度,再生混合料最大理论相对密度,计算相应空隙率,试验及拟合结果如表 5、图 2 所示。

表 5 空隙率拟合曲线结果

RAP 掺量/%	斜率	R ²	关系式
20	-0.0320	0.8725	$y = -0.032x + 10.19$
40	-0.0385	0.9803	$y = -0.0385x + 10.67$
70	-0.0668	0.9042	$y = -0.0668x + 14.73$
100	-0.0773	0.8901	$y = -0.0773x + 17.80$

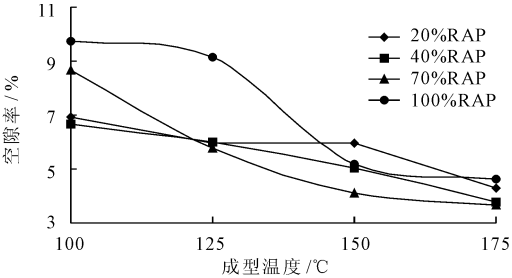


图 2 空隙率随温度的变化情况

由表 5 及图 2 可知,各 RAP 掺量下沥青混合料成型温度与空隙率指标呈较为显著的线性相关性,随着成型温度增大空隙率呈不断减小趋势,20% RAP、40% RAP、70% RAP 掺量下混合料成型温度升至 125℃ 以上时,空隙率已达规范要求(4% ~6%),为减少实际施工中能源消耗,考虑温度控制在 125℃ 以上即可;对于 40% RAP、70% RAP 成型温度不宜过高,因为此时空隙率过小(<4%),可能会导致路面使用过程中泛油等问题的出现;100% RAP 掺量混合料则需要较高的成型温度,结合规范要求,成型温度应控制在 145℃ 以上。

由拟合曲线斜率可知,从 RAP 掺量角度分析,随其不断增加,空隙率指标对成型温度的变化愈发敏感,100% RAP 掺量下空隙率从 9.75% 降至 4.63%,降幅 52.5%,而 20% RAP 降幅仅为 38.3%,高 RAP 掺量的混合料中含有较多的旧沥青,可见旧沥青性能是影响混合料密实性的重要因素,也从一定程度上证明了成型温度对 RAP 中旧沥青影响十分显著,较高的成型温度使旧沥青黏度有效减小,充分发挥 SBS 改性沥青表面摩擦系数大的特点,保证了与再生剂、新沥青充分调和混溶的同时,增加了与细集料间的黏附性,形成的沥青胶浆更好的裹覆在集料表面及空隙中,从而改善了混合料的密实性。成型温度过低时(100 ~ 125℃)各 RAP 掺量混合料空隙率基本均不满足规范要求,在实际施工中应予以避免。

3.3 强度性能

60℃ 马歇尔稳定度表征了沥青混合料在高温下抵抗荷载的能力,可反映混合料的高温稳定性,而 25℃ 干劈裂强度则反映了混合料在常温时的抗弯拉性能,试验通过测试马歇尔稳定度与干劈裂强度指标评价混合料的强度特性,试验及拟合结果如表 6、表 7、图 3、图 4,干劈裂试验试件内部形态如图 5、图 6 所示。

测试结果表明,随着成型温度增大,各 RAP 掺量下混合料 60℃ 马歇尔稳定度及 25℃ 干劈裂强度均呈显著增大趋势,可见为提高混合料的高温稳定

表 6 马歇尔稳定度拟合曲线结果

RAP 掺量/%	斜率	R ²	关系式
20	0.0779	0.9723	$y = 0.0779x + 2.18$
40	0.1096	0.8962	$y = 0.1096x - 2.20$
70	0.0768	0.9061	$y = 0.0768x + 1.10$
100	0.0809	0.9624	$y = 0.0809x - 1.64$

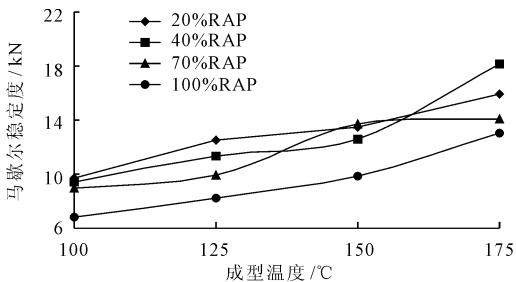


图 3 马歇尔稳定度随成型温度的变化情况

表 7 干劈裂强度拟合曲线结果

RAP 掺量/%	斜率	R ²	关系式
20	0.0082	0.8151	$y = 0.0082x + 1.63$
40	0.0063	0.7738	$y = 0.0063x + 2.04$
70	0.0018	0.8824	$y = 0.0018x + 2.75$
100	0.0067	0.8366	$y = 0.0067x + 1.97$

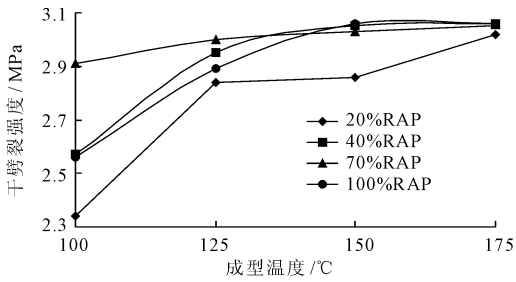


图 4 干劈裂强度随成型温度的变化情况

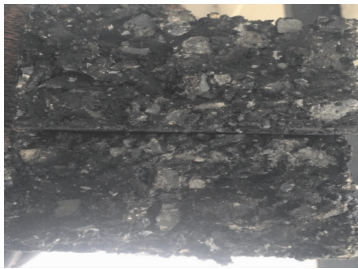


图 5 100℃ 成型温度下干劈裂强度试件内部形态

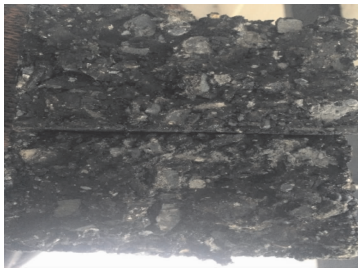


图 6 150℃、175℃ 成型温度下干劈裂强度试件内部形态

性应在条件允许下尽可能采用较高的成型温度;40% RAP、70% RAP、100% RAP 掺量混合料干劈裂强度在 150℃ 时达到较高值而后增长缓慢,而 20% RAP 在 150℃ 以上时干劈裂强度则有效提高,因为

其混合料中含有较多的新沥青,在较高成型温度下充分发挥了 SBS 改性沥青材料本身较强的黏结力及抗拉伸能力,增强了混合料抗弯拉性能;同时将干劈裂试验后的试件由中间裂缝分开观察内部形态,如图 5、图 6 所示,可以看出低成型温度下成型的试件集料与沥青黏附程度较差,部分粗集料几乎没有沥青附着,而在高成型温度下细集料与沥青形成的沥青胶浆较好的裹覆在粗集料表面。成型温度对混合料强度影响显著,成型温度较高时,结构沥青增多,自由沥青减少,结构沥青形成的沥青膜充分黏附在集料颗粒表面,形成较强的黏聚力,整体抗力提高,从而改善了混合料的高温稳定性与抗弯拉性能;由拟合曲线结果可知,成型温度对不同 RAP 掺量混合料强度性能影响程度呈现出一定的变异性,规律并不明显。

3.4 水稳定性

水稳定性反映了沥青混合料抵抗水损坏的能力,直接关系到路面的各项使用性能,为评价混合料的水稳定性,补充测试 25℃ 湿劈裂强度并计算残留强度比,残留强度比试验及拟合结果如表 8、图 7。

表 8 残留强度比拟合曲线结果

RAP 掺量/%	斜率	R^2	关系式
20	0.0604	0.9825	$y = 0.0604x + 80.70$
40	0.1090	0.9468	$y = 0.1090x + 71.44$
70	0.1574	0.9555	$y = 0.1574x + 63.36$
100	0.2194	0.9757	$y = 0.2194x + 49.41$

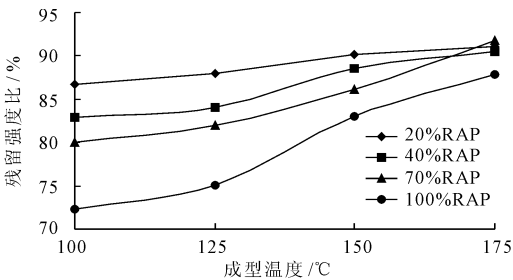


图 7 残留强度比随成型温度的变化情况

由表 8、图 5 可知,各 RAP 掺量下沥青混合料成型温度与残留强度比指标显著线性相关,较高的成型温度有效增强了沥青与集料间的相互作用力,改善了混合料的密实性,而较好的密实性也减弱了混合料透水性,从而提高了混合料水稳定性能;拟合曲线斜率表明,与空隙率规律相似,随着 RAP 掺量增加,混合料残留强度比受成型温度影响程度更趋于显著,也证明了空隙率是影响沥青混合料水稳定性

的重要因素;20% RAP 掺量混合料在低温时即具有良好的水稳定性,对于 40% RAP、70% RAP 及 100% RAP,结合规范要求(>85%)及拟合关系式结果,建议成型温度分别控制在 130℃、140℃、160℃ 以上。

3.5 适宜成型温度范围

综合物理力学性能试验结果,成型温度对旧 SBS 改性沥青混合料热再生性能影响显著,较高的成型温度可有效改善混合料性能,但有时达到一定温度后作用效果微弱,而较低的成型温度(125℃ 以下)将会对混合料产生显著不利影响,结合各项性能规范及减少能耗、便于施工操作的需求,各 RAP 掺量下推荐成型温度范围如表 9 所示。

表 9 适宜成型温度范围

RAP 掺量/%	20	40	70	100
温度范围/℃	> 125	> 130	> 140	> 160

可见,随着 RAP 掺量增加,混合料所需适宜成型温度亦随之提高,而对于 175℃ 以上的成型温度是否会对混合料性能产生不利影响,有待进一步试验加以研究;在实际工程中,虽然成型温度达到 160℃ 以上较难实现,但考虑到本文中 100% RAP 主要作为对照组,实际中完全使用 RAP 的情况也极为少见,因此提出此温度建议亦具有一定参考价值。

4 较低成型温度下提升沥青混合料性能方法研究

虽然较高的成型温度可有效提升混合料的热再生性能,但在实际工程中,由于天气、运输、设备调试等因素,可能导致无法使混合料达到理想温度,不得已在成型温度较低时碾压成型,因此需探求低温下改善混合料性能的措施方法^[9]。

4.1 RAP 掺量与级配

以 100℃ 成型温度下不同 RAP 掺量沥青混合料的各项性能结果进行分析,如表 10 所示。

表 10 100℃ 成型温度下性能指标

RAP 掺量/%	空隙率/%	马歇尔稳定度/kN	干劈裂强度/MPa	残留强度比/%
20	6.94	9.73	2.34	86.9
40	6.67	9.38	2.57	83.0
70	8.67	8.94	2.91	80.0
100	9.75	6.81	2.56	72.2

表 10 结果表明,随着 RAP 掺量减小,混合料空

隙率总体呈降低趋势,高温稳定性、水稳定性均得到不同程度提升,抗弯拉性能则出现一定波动;其中高温稳定性变化情况与相关研究结果不符^[10],这是因为虽然较高 RAP 掺量的沥青混合料中老化沥青含量较多,难以压实,理应获得较高的马歇尔稳定度,但通过级配调整使 20% RAP(A 级配)、40% RAP(B 级配)、70%(C 级配)中含有较多的粗集料且级配分布更为均匀,其中 13.2 ~ 9.5 mm 粒径集料含量明显增多,充分发挥了粗集料的骨架作用,且次一级粒径集料可有效填充骨架空隙,提高了集料颗粒间的内摩阻力和嵌挤力,形成骨架密实结构,从而获得了较高的强度;因此考虑在低温下应控制 RAP 掺量(不宜超过 40%),同时针对 RAP 级配普遍偏细的实际情况,可采用适当增加级配中粗集料含量的方法保证混合料性能。

4.2 拌合时间

新、旧料的拌和时间是沥青与集料均匀结合混溶的保证,试验在 70% RAP 掺量 100℃ 成型温度下补充两组拌合时间 150 + 90s,180 + 120s 试验,并与原始拌合时间的混合料进行性能比较,试验结果如表 11。

表 11 低温下不同拌合时间性能指标

拌合 时间/s	空隙 率/%	马歇尔稳 定度/kN	干劈裂 强度/MPa	残留强 度比/%
120 + 60	8.67	8.94	2.91	80.2
150 + 90	6.13	10.34	2.85	84.2
180 + 120	6.05	12.04	2.97	85.8

由表 11 可知,通过增加沥青混合料的拌合时间,有效改善了混合料的物理力学性能,其中 150 + 90s 拌合时间的沥青混合料基本可达到 125℃ 成型温度时性能状态,180 + 120s 拌合时间基本可达到 150℃ 时性能状态,因为随着拌合时间的增加,新、旧沥青与集料的结合更为充分,沥青与集料间黏聚力得到有效改善,因此可考虑在工程中采用适当降低设备运行速度,延长拌合时间的方法保证混合料的使用性能。

5 结 论

(1)随着成型温度增大,不同 RAP 掺量下的 SBS 改性沥青混合料热再生性能均得到不同程度改

善,20% RAP 建议成型温度控制在 125℃ 以上,40% RAP 在 130℃ 以上,70% RAP 在 140℃ 以上,100% RAP 在 160℃ 以上。

(2)随着 RAP 掺量增加,沥青混合料所需适宜成型温度随之提高,成型温度对混合料中空隙率、水稳定性能指标影响效果愈发显著,而对于强度性能则呈现一定变异性,高 RAP 掺量时采用较高的成型温度可显著改善混合料密实性,但因性能指标波动较大,建议实际施工中对温度变化严格控制。

(3)较低成型温度下(125℃ 以下)采用标准成型方法成型的热再生混合料均无法满足使用要求,在实际施工中应控制避免;较高成型温度有时亦不能显著改善混合料性能甚至造成不利影响,有待进行进一步试验研究。

(4)当成型温度较低时,从 RAP 角度,采用控制 RAP 掺量(≤40%)、适当增加级配中粗集料含量的方法可有效改善混合料性能;从再生工艺角度,可采用延长拌合时间的方法使混合料达到较高成型温度时性能状态,在实际施工时,可通过增加搅拌锅中搅拌时间,适当降低再生设备运行速度加以实现。

参考文献:

[1] 毛文华. 废旧沥青混合料厂拌热再生利用研究[D]. 西安:长安大学,2014.

[2] 李宇峙,杨瑞华,邵腊庚,等. 沥青混合料压实特性分析[J]. 公路交通科技,2005,22(3):28-30+34.

[3] 耿九光,戴经梁. 再生沥青混合料最佳拌和温度及压实温度研究[J]. 公路,2011(4):148-151.

[4] 张争奇,李宁利,陈华鑫. 改性沥青混合料拌和与压实温度确定方法[J]. 交通运输工程学报,2007,7(2):36-40.

[5] 交通部公路科学研究所. JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》[S]. 北京:人民交通出版社,2009.

[6] 侯 睿,黄晓明,李海军. 再生工艺对热再生沥青混合料低温抗裂性能的影响[J]. 公路交通科技,2007,24(3):10-14.

[7] 唐 炯,李晓明,袁卓亚. 路面再生技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[8] 李 振,徐世法,罗晓辉,等. 温拌再生沥青混合料压实特性评价[J]. 北京建筑工程学院学报,2010,26(1):14-19.

[9] 李秀君,拾方治,田 原. 施工气温对泡沫沥青冷再生混合料影响[J]. 建筑材料学报,2013,16(2):289-293.

[10] 邹晓勇. RAP 掺量对 SBS 改性沥青热再生混合料性能影响分析[J]. 城市道桥与防洪,2015(5):214-216.