

# SBS 改性沥青砼再生设计与路用性能评价<sup>\*</sup>

彭剑<sup>1</sup>, 凌俊<sup>2</sup>, 周志刚<sup>2</sup>

(1.湖南省通盛工程有限公司, 湖南 长沙 410004;

2.长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 结合醴潭(醴陵—湘潭)高速公路表面层的厂拌热再生工程,回收检测评价旧沥青、旧集料的性能指标,试验对比分析不同再生剂掺量再生沥青的技术性能,根据新旧沥青+再生剂的复合再生方式确定新旧沥青砼掺配比例和再生剂掺量,进而确定再生沥青砼和新沥青砼的配合比,并对比分析再生沥青砼和新旧沥青砼的路用性能。结果表明,旧沥青针入度和延度不满足技术规范要求,旧集料细化较严重,但均可回收利用;新、旧沥青砼的掺配比为 72:28,再生剂占旧沥青掺量的 8%;旧沥青砼的低温抗裂性和水稳定性不满足技术要求,再生沥青砼的高低温稳定性和水稳定性均满足技术规范要求,且接近于新沥青砼的路用性能。

**关键词:** 公路;厂拌热再生;SBS 改性沥青;再生沥青砼;路用性能

**中图分类号:** U416.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)05-0050-04

再生沥青砼配比设计是再生沥青路面技术的核心之一,包括再生沥青和再生沥青砼设计。目前以旧沥青及旧沥青混合料性能改善为目的对再生沥青砼配比设计开展了不少研究,发现要调和出满足使用要求的再生沥青,需掺加适量的再生剂对旧沥青进行再生。再生剂掺量一般根据再生沥青的技术性能指标与再生剂掺量的关系确定,再结合 JTG F41—2008《公路沥青路面再生技术规范》中 Marshall 试验方法进行再生沥青砼配合比设计。对于不同沥青路面工程,因所用原材料及混合料级配不同、旧沥青砼材料劣化程度不同,需对再生沥青砼进行专门设计,保证其路用性能满足相关技术规范要求。

湖南醴潭(醴陵—湘潭)高速公路自 2007 年 10 月通车以来,在自然环境及交通荷载作用下路面出现松散剥落、裂缝、车辙等损坏,部分路段车辙严重。为改善路面使用性能,对表面层沥青砼铣刨后经厂拌热再生重新铺筑。该文研究其表面层 SBS 改性沥青砼的再生设计,并进行路用性能评价。

## 1 旧沥青路面材料回收与评价

在现场铣刨回收 4 cm 厚 AK-13A 细粒式沥青砼材料,经破碎抽提,将旧沥青砼材料分离为旧沥青和旧集料。其中:旧沥青为 SBS 改性沥青,含量为 4.4%,其主要性能检测结果见表 1;旧集料的主

要物理性能指标检测结果见表 2,筛分结果见表 3。

由表 1 可知:旧沥青的软化点和 135 ℃粘度满

**表 1 不同再生剂掺量下再生 SBS 改性沥青的主要性能检测结果**

再生剂 掺量/%	25 ℃针入 度/(0.1 mm)	5 ℃延 度/cm	软化 点/℃	135 ℃粘 度/(Pa·s)
0	24.0	脆断	71.8	2.63
4	32.2	2.6	68.1	—
8	46.5	7.3	65.7	—
12	58.4	11.8	63.6	—
技术要求	40~60	≥20	≥60	≤3

**表 2 旧集料的主要物理性能检测结果**

项目	检测结果	技术要求
压碎值/%	18.5	≤26
洛杉矶磨耗损失/%	21.3	≤28
粗集料与 SBS 改性沥青的粘附性/级	5	>4
表观相对密度	9.5~13.2 mm	2.85
	4.75~9.5 mm	2.86
吸水率/%	9.5~13.2 mm	1.51
	4.75~9.5 mm	1.96
针片状颗粒含量/%	9.5~13.2 mm	7.08
	4.75~9.5 mm	14.41
坚固性/%	4.4	≤12

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178065);湖南省交通运输厅交通科技计划项目(201504)

表 3 旧料 AK-13A 筛分结果及再生料 AC-13C 合成级配

筛孔尺寸/mm	AK-13A 筛分结果/%	AK-13A 级配范围/%	AC-13C 合成级配/%		AC-13C 级配范围/%
			再生沥青砼	新沥青砼	
16.000	100.0	100	100.0	100.0	100
13.200	98.2	90~100	95.9	96.2	90~100
9.500	86.8	60~80	70.0	72.0	60~74
4.750	62.4	30~53	38.8	39.7	30~42
2.360	45.3	20~40	28.0	28.4	23~33
1.180	34.6	15~30	20.7	20.0	16~26
0.600	25.1	10~23	14.5	13.2	12~20
0.300	16.9	7~18	10.2	9.3	9~16
0.150	11.6	5~12	7.9	7.7	6~12
0.075	7.6	4~8	5.8	6.0	4~8

足技术规范要求,而针入度和延度不满足规范要求,不能直接用于路面铺筑。但其针入度大于 20(0.1 mm),可用于厂拌热再生。

由表 2、表 3 可知:旧集料的性能满足相关技术规范的要求。旧集料最主要的特征是细化明显,9.5~0.6 mm 筛孔通过率超出规范级配范围,规范级配范围中值中 4.75 mm 以下集料所占比例为 41.5%,而旧集料中 4.75 mm 以下集料所占比例高达 62.4%,说明粗集料减少,4.75 mm 以下集料增多。旧集料细化的原因,一是路面在长期使用过程中因外部环境和交通荷载的不断作用,粗集料劣化而出现破碎;二是在回收过程中,集料不可避免地在机械外力作用下被碾碎,导致粗集料减少、细集料增加。

2 旧沥青再生

旧沥青再生采用润强-RA102 再生剂,其主要性能指标(见表 4)满足规范要求。分别将占旧沥青质量比 0、4%、8%、12%的再生剂掺入旧沥青中,进行三大指标试验,结果见表 1。由于老化对 SBS 改性剂交联网络结构的降解破坏,SBS 改性沥青老化后的软化点低于老化前的软化点(见表 5)。而再生剂中轻质组分含量较高,可调和软化旧沥青,使再生沥青软化点降低。因此,随着再生剂掺量的增加,针入度和延度增大,而再生沥青软化点减小。

尽管再生剂能改善旧沥青的低温延度性能,但对延度性能的恢复效果并不理想,需结合添加新沥青的复合再生方式进一步检验再生沥青的再生效果。根据表 1,参考再生剂厂家的建议,结合经济

表 4 再生剂性能指标测试结果

项目	检测结果	
60 ℃粘度/(Pa · s)	1 604	
闪点/℃	240	
15 ℃密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.052	
TFOT 试验后	粘度比	1.34
	质量变化/%	－1.87

表 5 新 SBS 改性沥青主要性能指标检验结果

项目	试验结果	技术要求
针入度/(0.1 mm)	49.0	40~60
针入度指数	0.16	≥0
软化点/℃	76.9	≥60
5℃延度/cm	29.0	≥20
135℃运动粘度/(Pa·s)	2.0	≤3
弹性恢复/%	87	≥75
闪点/℃	332	≥230
溶解度/%	99.70	≥99
离析/℃	1.0	≤2.5
25℃相对密度	1.021	实测
质量变化/%	0.031	-1.0~+1.0
TFOT 试验后 针入度比/%	82.2	≥65
5℃延度/cm	15.0	≥15

性,确定以回收沥青路面材料中旧沥青含量的 8%作为再生剂掺量。新沥青仍采用 SBS 改性沥青,其

主要性能指标(见表 5)满足规范要求。

对于不同配比的新、旧沥青,再生沥青的延度随着旧沥青掺量的增加而下降。通过不同配比的新、旧沥青混合料+外掺旧沥青质量的 8%再生剂的复合再生沥青的性能检测,确定旧沥青混合料:新沥青混合料=28:72,此时复合再生沥青 5℃延度为 22 cm,满足技术规范要求。

### 3 再生沥青砼设计

再生沥青砼由新、旧沥青砼和再生剂形成。新

沥青砼集料中,粗集料为辉绿岩,细集料为石灰石机制砂,矿粉为 P.C32.5 水泥,用以代替合成级配中 0.075 mm 以下细集料。新集料和矿粉的主要性能指标均满足规范要求。

根据施工配比确定 28%再生沥青混合料旧料掺配率,以 28%、0 的旧料掺配率分别进行厂拌热再生沥青混合料和新沥青混合料矿料配合比设计(见表 2),然后通过马歇尔试验确定厂拌热再生沥青混合料和新沥青混合料的最佳沥青用量,试验结果见表 6、表 7。最佳油石比均为 5%。

表 6 不同油石比再生沥青混合料马歇尔试验结果

油石比/%	最大理论 相对密度	毛体积相 对密度	空隙率/%	沥青饱 和度/%	矿料间 隙率/%	稳定度/kN	流值/mm
4.0	2.618	2.454	6.3	55.0	14.0	17.24	2.8
4.5	2.599	2.469	5.0	64.0	13.9	17.61	3.2
5.0	2.580	2.480	3.9	71.9	13.9	18.82	3.6
5.5	2.561	2.484	3.0	78.9	14.2	17.67	4.0
6.0	2.543	2.482	2.4	83.6	14.6	17.13	4.3

表 7 不同油石比新沥青混合料马歇尔试验结果

油石比/%	最大理论 相对密度	毛体积相 对密度	空隙率/%	沥青饱 和度/%	矿料间 隙率/%	稳定度/kN	流值/mm
4.0	2.587	2.402	6.9	57	16.3	15.08	3.2
4.5	2.568	2.414	5.8	64	15.6	15.65	3.4
5.0	2.550	2.423	4.7	69	15.2	15.30	3.5
5.5	2.532	2.448	3.3	79	15.7	14.22	3.8
6.0	2.514	2.432	3.0	82	16.7	13.02	4.1

### 4 再生沥青砼路用性能评价

对比分析前面确定的厂拌热再生沥青砼 AC-13C(旧料掺配率 28%,油石比 5%,再生剂掺量 8%)、新沥青砼 AC-13C 和旧沥青砼 AK-13A 的路用性能,进一步分析旧沥青砼的再生效果,并检验其是否满足沥青路面技术要求。

#### 4.1 高温稳定性

以轮碾仪成型 300 mm×300 mm×50 mm 试件,在 60℃温度下用车辙试验机(轮压 0.7 MPa)进行加载,以动稳定度评价各类沥青砼的高温稳定性,结果见表 8。

由表 8 可知:3 种沥青砼的动稳定度均满足大

表 8 不同沥青混合料高温车辙试验结果

沥青混合料类型	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
旧沥青砼	8 439
再生沥青砼	6 812
新沥青砼	5 820

于 2 800 次/mm 的技术要求。再生沥青砼的动稳定度介于旧沥青砼最大值与新沥青砼最小值之间。这是由于旧沥青发生老化后,沥青质和胶质增多,油分减少,导致旧沥青的稠度和粘度增大,沥青回收材料的高温稳定性增加,而新沥青和再生剂的掺入会降低旧沥青砼的高温稳定性,但因旧料的存在,不能完全恢复到新沥青砼的性能水平。

## 4.2 低温抗裂性

将 300 mm×300 mm×50 mm 试件切割为 250 mm×30 mm×35 mm 小梁试件,在-10℃恒温箱中保温 1 h 后在跨中以 50 mm/min 的速率进行单点加载,以弯拉强度、弯拉应变和劲度模量评价各类沥青砼的低温抗裂性能,结果见表 9。

表 9 不同沥青混合料低温弯曲试验结果

沥青混合料类型	弯拉强度/MPa	弯拉应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa
旧沥青砼	13.22	1 984	6 663
再生沥青砼	11.73	3 566	3 289
新沥青砼	11.04	3 769	2 929

由表 9 可知:1) 再生沥青砼的弯拉强度、弯拉应变和劲度模量均介于旧沥青砼与新沥青砼之间,其中旧沥青砼的弯拉强度和劲度模量最大,新沥青砼的弯拉应变最大,且旧沥青砼的弯拉应变不满足大于 2 500  $\mu\epsilon$  的技术要求。其原因在于沥青路面回收材料经过长时间使用后被压密,旧沥青也发生老化而变硬,导致弯拉强度增加;但由于旧沥青老化后沥青质和胶质增多,油分减少,导致旧沥青的延度减小,低温下瞬时荷载作用时表现为脆性破坏,弯拉应变减小。2) 再生沥青砼的弯拉应变不仅满足技术要求,而且十分接近新沥青砼的最大值,说明经过厂拌热再生后的再生沥青砼的低温抗裂性能比原路面显著提高,且与新沥青砼相差不大。其原因在于新沥青和再生剂的掺入使油分含量恢复,延度增大,弯拉应变增大。

## 4.3 水稳定性

成型  $\phi 101.6$  mm×63.5 mm 标准马歇尔试件。浸水马歇尔试验将两组试件分别在 60℃水浴中保养 0.5 和 48 h,测得马歇尔稳定度。冻融劈裂试验将一组试件在 25℃水浴中保养 2 h,另一组在真空饱水后依次在-18℃冰箱中保养 16 h(塑料袋中)、60 和 25℃水浴中保养 24 和 2 h,以 50 mm/min 的速度加载,测得劈裂强度。以马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比评价各类沥青混合料的水稳定性,结果见表 10。

由表 10 可知:1) 再生沥青砼的水稳定性介于旧沥青砼与新沥青砼之间,其中新沥青砼的马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比均为最大,旧沥青砼均不满足马歇尔残留稳定度大于 85%、冻融劈裂强

表 10 不同沥青砼浸水马歇尔试验和

冻融劈裂循环试验结果

%

混合料类型	马歇尔残留稳定度	冻融劈裂强度比
旧沥青砼	83.1	71.9
再生沥青砼	92.9	83.3
新沥青砼	93.4	84.1

度比大于 80% 的技术要求。说明旧沥青砼虽然能承受的绝对荷载较高,但在水环境影响下容易出现强度衰减,且幅度较大,不符合沥青混合料耐久性的要求。其原因在于沥青路面回收材料经过长时间使用后被压密,旧沥青也发生老化而变硬,导致稳定度和劈裂强度增加;但在水环境中,水渗入沥青砼内部,旧沥青砼由于其旧集料的细化和旧沥青的粘附性降低,水易将细颗粒及沥青冲刷走,导致其稳定度和劈裂强度大幅度降低。2) 再生沥青砼的马歇尔稳定度和冻融劈裂强度比不仅满足技术要求,而且均十分接近新沥青砼,说明经过厂拌热再生后再生沥青砼的水稳定性能比原路面显著提高,且与新沥青砼相差不大。其原因在于再生沥青砼中旧集料的细化被新集料补充,新沥青和再生剂又使得旧沥青的粘附性得到修复。

## 5 结论

(1) 旧沥青的针入度和延度不满足技术规范要求,但含量较高,具有回收利用价值;旧集料细化较严重,但其物理性能指标满足技术规范要求,可直接利用。

(2) 应采取新旧沥青+再生剂的复合再生方式保证再生沥青的各项技术性能指标达到技术规范要求;新、旧沥青砼的掺配比为 72:28,再生剂占旧沥青掺量的 8%。

(3) 旧沥青砼的低温抗裂性和水稳定性不满足技术要求,而再生沥青砼的高低温稳定性和水稳定性均满足技术规范要求,且接近新沥青砼的路用性能。文中提出的再生沥青砼配比方案能恢复旧沥青路面使用性能,保障再生沥青路面未来交通的需要。

## 参考文献:

- [1] 刘树堂,商庆森,郭忠印.沥青混合料目标配合比设计的最佳沥青含量范围估算[J].公路交通科技,2006,23(2).

(下转第 73 页)

表 11 路基回弹模量测试及评价结果

桩号	路基实测回弹模量/MPa	路基状况等级
K1715+000	38.7	不合格
K1715+020	40.6	不合格
K1715+040	48.8	合格
K1715+060	53.6	合格
K1715+080	40.9	不合格
K1715+100	37.7	不合格
K1715+120	54.4	合格
K1715+140	57.7	合格
K1715+160	42.2	不合格
K1715+180	39.9	不合格
K1715+200	50.8	合格

量作为路基状况评价指标。

(2) 标准轴载作用下,随着路基回弹模量的增大,水泥砼路面临界荷位应力逐渐减小,疲劳寿命逐渐增加,路基回弹模量对路面疲劳寿命的影响比临界荷位应力大;随着路基回弹模量比的增大,路面疲劳寿命衰减速率逐渐降低,最终趋于一个定值。

(3) 可依据水泥砼路面疲劳寿命随路基回弹模量衰减的速度确定路基状况评价方法,并将路基状况划分为优良、合格及不合格 3 个等级。

(4) 基于压实度及含水率对路基回弹模量的影响,提出了路基回弹模量计算方法,并依据路基土击实曲线,提出了采用上限含水率为计算指标的路基竣工回弹模量计算方法。

(5) 对末宜高速公路大修改改造工程 K1715+000—200 段水泥路面路基回弹模量进行测试,并对路基状况进行评价,评价结果与现场情况吻合较好,

证明了文中评价方法的科学性与合理性。

#### 参考文献:

- [1] 邓学钧.路基路面工程[M].第三版.北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 林小平,凌建明,周亮.土基回弹模量对刚性路面疲劳寿命的影响分析[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(2).
- [3] 郭鑫.已知位移场条件下不均匀支承水泥混凝土路面板内力分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 刘涛.地基不均匀支承水泥混凝土路面板的荷载应力分析[D].西安:长安大学,2009.
- [5] 唐学军,苏卫国.路基刚度对冲击压实旧混凝土路面力学行为的影响分析[J].土木工程学报,2006,39(4).
- [6] 王小艳.地基不均匀变形对水泥混凝土路面结构的影响研究[D].西安:长安大学,2011.
- [7] 张杨.不同支撑条件下水泥混凝土路面板的断裂破坏机理研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [8] 李振存.在役高速公路路基性能评价及快速检测技术[D].长沙:长沙理工大学,2014.
- [9] 邓荣彦.路基回弹模量衰减对路面结构性能的影响研究[J].公路与汽运,2015(4).
- [10] JTG D40—2011,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [11] 覃绮平.土基回弹模量影响因素及其相关关系研究[D].西安:长安大学,2005.
- [12] 王选仓,马玉兰,张磊.路基顶面回弹弯沉验收标准的修正[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(6).

收稿日期:2018-05-08

(上接第 53 页)

- [2] 林翔,张金喜,苗英豪,等.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,2011,28(2).
- [3] 侯睿,黄晓明.新旧沥青再生调和规律研究[J].石油沥青,2006,20(4).
- [4] 侯月军,周志刚,高及阳.不同再生剂对旧沥青性能的改善[J].交通科学与工程,2009,25(3).
- [5] Lin P S, Chang C W, Wu T L. The applicability of estimated equations of recycling agents on the viscosity variety of aged asphalt binders[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723.
- [6] 甘新立,郑南翔,纪小平.老化 SBS 改性沥青再生性能预估分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2014,35(6).
- [7] JTG F41—2008,公路沥青路面再生技术规范[S].

- [8] 马登成,任化杰,马尉倘.沥青路面就地热再生混合料级配优化设计[J].公路交通科技,2014,31(8).
- [9] 陈卫东,贾增荣,张勇.高原寒冷地区就地热再生沥青混合料耐久性试验研究[J].公路交通科技,2017,34(2).
- [10] 董玉凯.RAP 热再生沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2017(3).
- [11] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [12] 夏永胜.厂拌热再生沥青混合料耐久性能试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2016.
- [13] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

收稿日期:2018-05-14