

热再生钢渣沥青混合料性能研究

宋俊涛

(山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山东 太原 030001)

摘要:采取室内模拟老化方法得到了钢渣旧沥青路面材料(RAP),制备了掺量为0、10%、20%、30%、40%和50%的6种热再生钢渣沥青混合料,并测试了其体积性能、水稳定性、高温稳定性和低温抗裂性能。结果表明:RAP的掺入不会对沥青混合料的体积性能造成影响。热再生钢渣沥青混合料的飞散损失值随RAP掺量的增加而增大。随着RAP掺量增加,热再生钢渣沥青混合料的水稳定性呈线性减弱,高温稳定性呈线性提升。热再生钢渣沥青混合料的低温抗裂性能随RAP掺量增加显著降低。综合各项性能参数,热再生钢渣沥青混合料中RAP掺量应不高于30%。

关键词:钢渣;旧沥青路面材料;热再生;沥青混合料;路用性能

沥青路面服役过程中在温度、荷载和水的耦合作用下会出现车辙和裂缝等病害,在维修过程中会产生大量的废旧沥青路面材料(RAP)。随着中国公路的大规模扩建,沥青路面发展需求已进入建养并重的阶段。RAP的再生利用是降低道路行业资源依赖性、节能减排的关键,符合可持续发展的要求。因此,RAP材料的再生循环利用成为中国道路养护中的重点研究课题。大量研究表明:在RAP中加入再生剂与新集料和新沥青拌和,可以实现对RAP的再生利用,且再生混合料性能良好。游金梅研究了RAP掺量对热再生混合料路用性能的影响,结果表明随着RAP掺量的增加,热再生混合料的抗车辙性能和抗疲劳性能增强,水稳定性和低温抗裂性能降低;左锋进行了相似的研究工作,结果表明在低RAP掺量下(小于30%),RAP掺量的增加可以提升再生沥青混合料的高温性能、疲劳性能和水稳定性,明显降低其低温性能。较高RAP掺量下再生沥青混合料的各项性能均明显降低;韩永强研究发现,温拌再生沥青混合料的RAP掺量宜控制在40%~50%;查旭东依托实体工程将30%RAP制备AC-20C再生沥青混合料,并在浙江省102省道铺筑了试验段,经过两年考察后试验段使用性能优良;程培峰研究了不同细RAP比例对再生沥青混合料性能的影响,结果表明再生沥青混合料的路用性能随着细RAP比例的增加会出现峰值。近年来钢渣作为天然集料的替代矿料,用其制备的钢渣沥青

混合料的性能优异,也广泛应用在各大高等级路面中。而且转炉钢渣本身具有较好的储热性,将其沥青混合料回收料与新料拌和回收利用可以最大程度发挥钢渣的潜能;谭冲将转炉钢渣沥青混凝土刨除料进行回收利用,研究了AC-20转炉钢渣再生沥青混合料的性能,结果表明钢渣RAP掺量为40%时沥青混凝土各项性能最优。

以上研究表明:天然集料RAP和钢渣RAP的回收利用所制备的再生沥青混合料性能良好。该文基于室内模拟老化的方法,得到与室外服役5年左右的钢渣RAP,制备不同掺量的热再生钢渣沥青混合料,并测试其基本路用性能,以期在实际工程中钢渣RAP的应用提供参考。

1 原材料与钢渣沥青混合料配合比设计

1.1 原材料

试验采用的沥青为内蒙古生产的SBS改性沥青,其基本性能指标见表1。

钢渣为来自上海宝钢产滚筒渣(简称宝钢钢渣)。通过JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》对宝钢钢渣的性能进行检测,结果见表2。钢渣和玄武岩的化学组成见表3。

收稿日期:2020-11-11

基金项目:山西交通控股集团有限公司科技项目(编号:19-JKKJ-48)

作者简介:宋俊涛,男,硕士,高级工程师。E-mail:35809550@qq.com

表 1 SBS 改性沥青的主要性能指标

试验项目	单位	试验结果	技术要求	试验规程
针入度(25 ℃,100 g,5 s)	0.1 mm	68	≥60	T0604—2011
软化点(环球法)	℃	62	≥55	T0606—2011
延度(5 cm/min,5 ℃)	cm	49.1	≥30	T0605—2011
质量损失(TFOT)	%	+0.57	≤±1.0	T0609—2011

表 2 宝钢钢渣的性能指标

钢渣粒径/mm	指标	单位	检验结果	技术要求	试验规程
9.5~16	表观相对密度		3.646	≥2.9	T0304—2005
	毛体积相对密度		3.458	—	
	吸水率	%	1.490	≤3.0	
4.75~9.5	表观相对密度		3.602	≥2.9	
	毛体积相对密度		3.375	—	
	吸水率	%	1.870	≤3.0	
2.36~4.75	表观相对密度		3.573	≥2.9	
	毛体积相对密度		3.247	—	
	吸水率	%	2.810	≤3.0	
0~2.36	表观相对密度		3.173	≥2.9	T0328—2005
	压碎值	%	13.400	≤26	T0316—2005

表 3 钢渣和玄武岩的化学组成 wt%

材料	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	LOI
钢渣	45.62	24.20	16.80	6.39	1.20	1.93	0.20
玄武岩	8.23	9.82	47.90	4.34	18.30	3.60	3.23

试验细集料统一采用湖北京山生产的玄武岩,其基本性能指标见表 4。采用江苏常州产 XT-2 再生剂。

表 4 玄武岩细集料(0~2.36 mm)的基本性能指标

测试项目	单位	测试结果	技术要求	试验规程
表观相对密度		2.853	≥2.5	T0328—2005
吸水率	%	1.744	—	
含泥量	%	2.4	≤3	T0333—2000

1.2 钢渣沥青混合料配合比设计

试验中粗集料采用钢渣,细集料使用玄武岩,制备 AC-13 沥青混合料,其合成级配曲线见图 1。依据马歇尔设计方法成型钢渣沥青混合料,在各项指标均满足规范要求下,确定钢渣沥青混合料的最佳油石比为 4.7%。

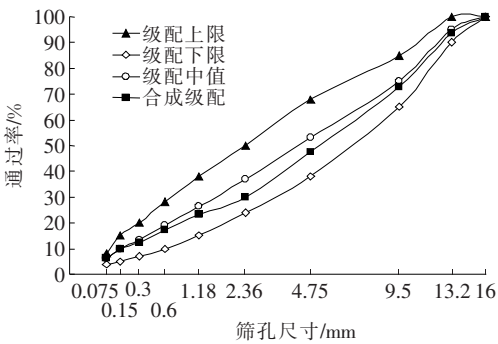


图 1 钢渣 AC-13 级配设计曲线图

2 再生钢渣沥青混合料的制备与性能测试

2.1 钢渣 RAP 的室内模拟

采用烘箱延时室内模拟老化的方法得到钢渣

RAP,即采取短期老化和长期老化结合的方式。先将按上述 AC-13 配合比拌和好的混合料松铺约 21 ~ 22 kg/m², 将其放入(135±3)℃的烘箱中,在强制通风条件下加热 4 h±5 min,每隔 1 h 翻拌一次。将加热后的混合料从烘箱中取出成型马歇尔试块。再将试

件置于(85±3)℃烘箱中,加热 5 d (120 h ±0.5 h),冷却不少于 16 h 即得到模拟老化的钢渣 RAP。采用德国 InfraTest 全自动沥青抽提仪对模拟得到的 RAP 进行沥青的回收,得到的沥青性能指标见表 5。

表 5 RAP 中回收沥青的基本性能指标

试验项目	单位	试验结果	技术要求	试验规程
针入度(25℃、100 g、5 s)	0.1 mm	45	≥60	T0604—2011
软化点(环球法)	℃	73	≥55	T0606—2011
延度(5 cm/min、5℃)	cm	18.7	≥30	T0605—2011

2.2 再生剂掺量的确定

选择 2%、4%、6%、8%和 10%共 5 个再生剂质量掺比制备再生沥青,测试不同掺量对应的再生沥青的针入度、软化点和延度,测试结果见表 6。由表 6 可知:随着再生剂掺量的增大,再生沥青的针入度和延度逐渐增大,软化点逐渐下降。当掺量为 6%时,再生沥青的针入度、软化点和延度均满足 SBS 改性沥青的性能指标要求,故再生剂的掺量应为沥青质量的 6%。

空隙率、沥青饱和度和矿料间隙率等体积性能指标;②采用肯塔堡飞散损失、残留稳定度(RMS)和冻融劈裂强度比(TSR)来评价沥青混合料的水稳定性;③选取 60℃下尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 车辙板的动稳定度来表征混合料的高温性能;④混合料的低温性能测试采用-10℃下小梁三点弯曲试验的弯拉应变等指标来评价,试件尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm。

表 6 不同再生剂掺量下再生沥青的性能指标

再生剂 掺量/%	针入度(25℃, 100 g、5 s)/ (0.1 mm)	软化点 (环球法)/ ℃	延度 (5 cm/min, 5℃)/cm
0	45	73	18.7
2	49	69	23.5
4	55	64	27.8
6	63	59	36.6
8	71	54	39.3
10	75	50	41.3

2.3 再生钢渣沥青混合料的制备

再生钢渣沥青混合料采取与上述 AC-13 钢渣沥青混合料相同的油石比(即 4.7%)。RAP 掺量分别采取 0、10%、20%、30%、40%和 50%共 6 个质量掺比。制备过程如下:先将加热到 110℃的钢渣 RAP 倒入拌锅拌和 10 s,接着加入再生剂拌和 30 s,使再生剂与旧料融合;其次加入新钢渣集料拌和 30 s 后加入 SBS 改性沥青,再次拌和 90 s;最后加入矿粉,继续拌和 90 s 得到再生钢渣沥青混合料。

2.4 再生钢渣沥青混合料的性能测试

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对再生钢渣沥青混合料的路用性能进行测试:①测试了不同 RAP 掺量的钢渣沥青混合料的

3 再生钢渣沥青混合料性能研究

3.1 体积性能

不同 RAP 掺量的钢渣沥青混合料的体积性能指标测试结果见表 7。

表 7 再生钢渣沥青混合料的体积性能

RAP 掺量/%	毛体积密度/ (g·cm ⁻³)	空隙率/ %	矿料间 隙率/%	沥青饱和 度/%
0	2.851	4.2	13.6	68.8
10	2.843	4.5	13.8	67.4
20	2.855	4.1	13.4	69.5
30	2.872	3.5	12.9	72.7
40	2.865	3.8	13.1	71.3
50	2.834	4.8	14.1	65.9

由表 7 可知:随着 RAP 掺量的增加,再生料的毛体积密度波动不大,5 组沥青混合料的空隙率均在设定空隙率之间。沥青混合料的矿料间隙率和沥青饱和度随 RAP 掺量增加的变化不大,其值均在规范要求范围内。这表明 RAP 的掺入不会对再生钢渣沥青混合料的体积性能造成影响,且高掺量 RAP 再生钢渣沥青混合料的体积性能仍满足规范设计要求。

3.2 水稳定性能

3.2.1 肯塔堡飞散损失

肯塔堡飞散损失试验常被用来评价开级配沥青混合料中沥青与集料间的黏附性。该文研究的钢渣沥青混合料虽然采取的是密级配,但高掺量 RAP 的再生沥青混合料中由于老化性能与集料的黏附性相对较低,可能会对沥青混合料整体的黏结性产生较大影响。且考虑到研究的 AC-13 沥青混合料作为沥青路面的上面层,在其服役过程中可能因车辙和雨水的双重作用,导致表层脱落。因此采取标准飞散试验对不同 RAP 掺量的再生钢渣沥青混合料进行黏结性测试,从而表征其在常温下的抗水损害能力。

不同 RAP 掺量的再生钢渣沥青混合料的肯塔堡飞散试验结果如图 2 所示。随着 RAP 掺量的增加,钢渣沥青混合料的飞散值逐渐增大,但上升幅度不大。50%RAP 掺量的再生料的飞散值达到了 5.8%,较新拌沥青混合料 4.5%的飞散损失值仅增大了 28.9%。这说明一方面 RAP 中的老化沥青导致混合料中集料与沥青的黏附性降低,在水的作用下使得表层黏结料脱落;另一方面,在再生剂的作用下,老化沥青的黏性得到恢复,从而使得再生料的整体黏结性得到一定程度的提升。综合来看,RAP 掺量的增加会适当降低再生钢渣沥青混合料的黏结性,但不会对其造成结构性破坏。

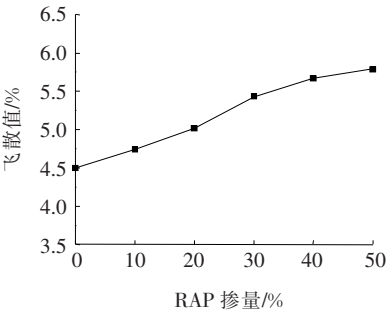


图 2 再生钢渣沥青混合料的肯塔堡飞散试验结果

3.2.2 残留稳定度

不同掺量 RAP 混合料的马歇尔稳定度测试结果见图 3。与未掺 RAP 的新拌沥青混合料相比,再生钢渣沥青混合料的稳定度随 RAP 掺量的增大而增大,在掺量达到 50%时其稳定度达到 24.06 kN。这是因为 RAP 中的高模量的老化沥青提升了再生沥青混合料的整体弹性,使得其力学性能得到增强。从残留稳定度(RMS)来分析混合料的水稳定性,可以看出再生料的 RMS 随着 RAP 掺量的增大先增大后减小,在掺量为 30%时 RMS 达到最大值 94.3%。在掺量超过

30%后,随着 RAP 掺量的增大,再生料的 RMS 值迅速下降,其值均低于新拌沥青混合料的 RMS 值,但仍满足规范中潮湿地区对改性沥青混合料 RMS 不小于 85%的要求。

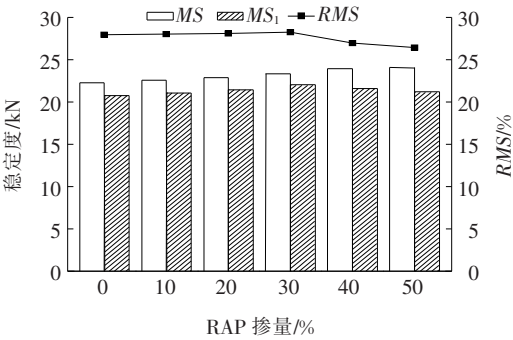


图 3 再生钢渣沥青混合料的马歇尔稳定度测试结果

3.2.3 冻融劈裂残留比

冻融劈裂能最真实地反映沥青混合料的抗水损害性能,一般在残留稳定度满足施工规范要求下,冻融劈裂抗拉强度比(TSR)也可能不满足。图 4 为不同掺量 RAP 混合料的劈裂抗拉强度测试结果。随着 RAP 掺量的增大,再生沥青混合料的劈裂抗拉强度和强度比均呈现线性下降的趋势。其中,50%掺量的再生料的 TSR 值较掺量为 0 的新拌组下降了近 8%,但其仍满足规范中 TSR 值不小于 80%的要求。整体来看,再生钢渣沥青混合料的水稳定性能维持在一个较高的水平。RAP 含量的增加使得混合料中沥青的模量增加,减小了沥青与集料间的黏结力,致使混合料在浸水状态下沥青从集料表层剥离,从而影响再生料的力学性能。因此,RAP 掺量的增加会降低热再生钢渣沥青混合料的水稳定性能。

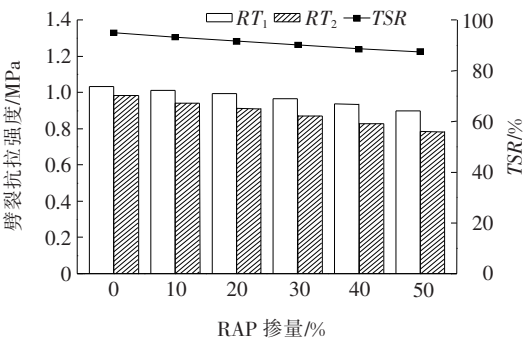


图 4 再生钢渣沥青混合料的劈裂抗拉强度测试结果

3.3 高温稳定性能

不同 RAP 掺量钢渣沥青混合料的车辙深度和动稳定度见图 5。

由图 5 可知:掺量为 0 的新拌组的混合料的动稳

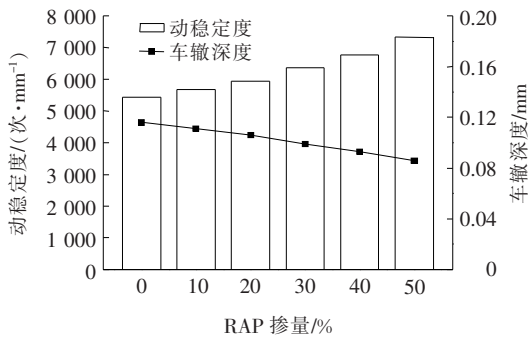


图5 再生钢渣沥青混合料的车辙试验结果

定度高达5 431次/mm,远高于普通集料制备的沥青混合料,这主要是由于钢渣具备抗滑耐磨和高黏附性等优点。随着RAP掺量的增加,再生钢渣沥青混合料的动稳定度逐渐增加,在RAP掺量为50%时其动稳定度为7 326次/mm,是掺量为0的新拌组的动稳定度的1.35倍。再生钢渣沥青混合料的动稳定度远高于规范中不小于2 400次/mm的要求,这说明热再生钢渣沥青混合料的高温稳定性能良好。RAP的掺入对高温稳定性提升的主要原因是其含有的高软化点和高劲度的老化沥青,老化沥青的加入可以明显降低混合料的车辙深度,提升其高温性能。

3.4 低温抗裂性能

沥青混合料的弯拉应变变可以有效地反映其在低温下出现脆性断裂的可能性,表征其低温抗裂性。一般弯拉应变越大,混合料的低温抗裂性能越好。不同掺量的再生钢渣沥青混合料的三点弯曲试验结果见表8。

表8 再生钢渣沥青混合料的三点弯曲试验结果

RAP 掺量/%	破坏荷 载/N	抗弯拉强 度/MPa	弯拉应 变/ $\mu\epsilon$	劲度模 量/MPa
0	1 102.6	9.001	2 901.7	3 101.9
10	1 048.6	8.560	2 839.7	3 014.4
20	1 024.6	8.364	2 693.3	3 105.6
30	977.8	7.982	2 551.0	3 129.0
40	934.8	7.631	2 352.0	3 244.5
50	873.2	7.128	2 183.5	3 264.6

由表8可知:随着RAP掺量的增大,混合料的抗弯拉强度和弯拉应变逐渐下降,其劲度模量逐渐上升。这表明RAP的掺入大大降低了热再生钢渣沥青混合料的低温抗裂性能。主要是由于RAP中的老化沥青其塑性降低,从而变硬发脆,降低了热再生沥青混合料抵抗低温变形的能力。从弯拉应变值的变化可以看

出:当RAP掺量高于30%后,再生钢渣沥青混合料的弯拉应变均小于规范中冬冷区域的最小值2 500 $\mu\epsilon$,表明若热再生钢渣沥青应用在严寒地区,其最大掺量不能高于30%。

4 结论

通过对不同掺量的热再生钢渣沥青混合料的性能研究,得到如下结论:

(1) RAP的掺入对再生钢渣沥青混合料的矿料间隙率和沥青饱和度波动不大,不会对其体积性能造成不利影响。

(2) 随着RAP掺量的增加,热再生钢渣沥青混合料的黏结性能、水稳定性能和低温抗裂性能逐渐降低,高温抗车辙性能明显提升。综合考虑各项路用性能指标,初步推荐RAP在热再生钢渣沥青混合料中的掺量应不高于30%。

(3) 考虑RAP掺量在对热再生钢渣沥青混合料的水稳定性、高温稳定性和低温抗裂性能的影响存在差异,因此在实际工程应用中需根据当地的气候分区、公路等级和应用的结构层位来综合确定热再生钢渣沥青混合料中RAP的最大掺量。

参考文献:

[1] 熊辉,刘洪辉.掺钢纤维和矿渣的高性能再生混凝土性能研究[J].中外公路,2020(1).

[2] 孙凤,刘香香,贾晓东.植物废油再生沥青及其性能研究[J].中外公路,2020(3).

[3] 游金梅.RAP掺量对热再生混合料路用性能影响[J].公路工程,2015(2).

[4] 左锋,叶奋,宋卿卿.RAP掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J].吉林大学学报(工学版),2020(4).

[5] 韩永强,程培峰.RAP掺量对温拌再生沥青混合料性能的影响[J].公路交通科技,2015(12).

[6] 查旭东,闵斌,宋微.RAP掺量对热再生沥青混合料性能影响分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2013(4).

[7] 程培峰,向银剑,李炬辉,等.RAP粒径对热再生沥青混合料性能的影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020(6).

[8] 谭冲.转炉钢渣沥青混凝土刨除料再生应用试验及结果分析[D].华东交通大学硕士学位论文,2015.

[9] JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S].

[10] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].