

贫沥青碎石新材料组成设计及性能研究

彭波^{*1}, 曹世江¹, 巩伟², 李文瑛³, 曹宁¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;
3. 西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了深入研究贫沥青碎石这种新型材料作为中间层结构时,其材料组成对缓解半刚性基层反射裂缝的效果,运用多级嵌挤理论,采用逐级填充设计方法,对贫沥青碎石粗、细集料进行设计.研究7种矿料级配组成及其各自最佳沥青用量,通过对贫沥青碎石的强度、CBR(加州承载比)、高温性、水稳性等性能进行研究比选,给出了推荐的级配范围;在选定的级配范围和最佳沥青用量内进行贫沥青碎石粉胶比设计,并铺筑试验路进行路用性能验证.研究表明,当粗、细集料比例在3:1~17:3,最佳沥青用量为2.52%~2.75%,粉胶比为0.78~1.22时,该新型材料具有很好的延缓路面反射裂缝的功能,其组成配比及设计方法对防治半刚性基层反射裂缝具有重要意义.

关键词: 道路工程;缓裂性能;逐级填充;贫沥青碎石;反射裂缝

中图分类号: U416.217 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201706009

0 引言

反射裂缝及其影响是半刚性基层沥青路面设计及施工中十分棘手而又不容回避的问题,但由于半刚性基层沥青路面具有较高的刚度、稳定性、耐久性以及较强的荷载扩散能力等优点,目前,国内外很多高速公路采用半刚性基层结构^[1],然而道路在运营1~2 a后,都不同程度地出现了大小不等的反射裂缝,而且裂缝的大小和数量随时间在逐渐增长,加剧了路面状况的恶化^[2-3].在解决沥青路面半刚性基层反射裂缝问题上,国外道路工作者也进行了相关研究^[4-5],设置级配碎石抗裂过渡层能够在一定程度上延缓反射裂缝的发展^[2],但该方法也有显著缺点:一是级配碎石中没有添加黏结材料,在施工中表面易松散、难碾压成型;二是级配碎石回弹模量较小,抵抗荷载的能力较弱,易产生永久变形、车辙、网裂等病害^[6-8].

基于此,采用贫沥青碎石来代替级配碎石是较为可行的措施,贫沥青碎石的特点是少量沥青

黏结剂就能改善无黏结剂粒料表面松散、施工性能差等施工缺点,另外能够提高碎石的模量,增强其抵抗荷载的能力,达到改善材料抗裂性能的目的^[9].近年来,国内针对贫沥青级配碎石进行了一些研究^[10-12],但主要是对贫沥青碎石过渡层混合料的级配设计方法和沥青用量等方面的研究,没有综合考虑各材料配比对其使用性能的影响.

本文依据现有研究成果中对于防治沥青路面半刚性基层反射裂缝的不足之处,提出一种贫沥青碎石新材料,在此基础上,为了进一步验证贫沥青碎石对抑制和缓解半刚性基层反射裂缝的效果,课题组在甘肃省内的庄天公路 HS3 标段以室内试验优选的最佳配比材料铺筑了一条长 150 m 的贫沥青碎石试验路和一条长 150 m 的普通路段进行对比验证.

1 贫沥青碎石原材料的选定

沥青选自克拉玛依油田 90 # A 级道路石油

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-09-15.

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2011JM7001);陕西省科技厅科技计划项目(15-08K);甘肃省交通运输厅科研项目(201227).

作者简介: 彭波^{*}(1970-),男,博士,教授,E-mail: pengb8888@126.com;曹世江(1991-),男,硕士生,E-mail: 15109298170@163.com.

沥青;粗集料选用甘肃甘泉天开石料厂生产的石灰岩;细集料为甘肃甘泉天开石料厂生产的机制砂;矿粉由石灰岩磨细而成. 原材料的技术指标见表 1~3.

由表 1~3 可以看出所选原材料的性能指标满足规范要求,可以进行贫沥青碎石反射裂缝的研究.

表 2 粗、细集料技术指标

Tab. 2 The technical index of coarse aggregate and fine aggregate

	粗集料					细集料		
	压碎值 不大于/%	毛体积密度(实测)/ (g·cm ⁻³)	表观相 对密度	与沥青黏附性 不小于/等级	吸水率不 大于/%	表观密度不小于/ (g·cm ⁻³)	含泥量不 大于/kg	
规范值 ^[13]	22	实测	2.50	4	3	2.50	5	
试验值	26.5 mm	13.4	2.750	2.788	4	0.50	2.723	1.38
	19 mm	14.9	2.719	2.739	—	0.27	2.758	2.65
	16 mm	12.1	2.724	2.751	—	0.36	2.552	2.82
	13.2 mm	15.3	2.715	2.746	—	0.41	2.736	3.67
	9.5 mm	—	2.742	2.801	—	0.77	2.721	2.33
	4.75 mm	—	2.681	2.755	—	0.35	2.710	3.64

表 3 矿粉性能指标

Tab. 3 The performance index of mineral powder

	表观密度 不小于/ (g·cm ⁻³)	外观	亲水系数	塑性 指数/%
规范值 ^[13]	2.5	无团粒结块	>1,对水的亲和 力大于对沥青的 亲和力 <1,对沥青的亲 和力大于对水的 亲和力	<4
试验值	2.732	无团粒结块	0.65	2.47

2 粗、细集料级配组成及合成级配设计

2.1 粗、细集料级配组成

采用粗集料松装间隙率 VCA_{DRC} 和集料承载比 CBR 分别表征粗集料的结构稳定性和集料的强度;采用振动法测细集料的紧装密度^[14]. 通过

表 1 沥青性能指标

Tab. 1 The performance index of asphalt

	针入度(25℃)/ 0.1 mm	延度(15℃)/ cm	软化 点/℃	溶解 度/%	相对 密度
试验值	94	>100	53.68	98.36	0.992 5
规范值 ^[13]	80~100	100	44	实测	—

注:针入度、延度、软化点、溶解度、相对密度试验方法分别为 T0604、T0605、T0606、T0607、T0603.

上述各级粗、细集料的填充,选取在粗集料 VCA_{DRC} 最小、CBR 最大,细集料紧装密度最大情况下形成的最优比例进行合成换算,计算出粗集料中各级料在满足松装间隙率和集料承载比及细集料满足紧装密度条件下的最优比例. 试验结果见表 4.

2.2 粗、细集料合成级配设计

本文以关键筛孔 4.75 的质量通过率 40%为基础,即粗、细集料质量比例 60:40 为基准,以 5%为步长,向粗集料中填充细集料. 取粗、细集料质量配比分别为 60:40、65:35、70:30、75:25、80:20、85:15 及 90:10 共 7 种级配,分别用编号 A、B、C、D、E、F、G 表示. 粗、细集料的合成级配如图 1 所示.

由图 1 中 7 种级配曲线可以看出曲线的走势基本相同,接近 S 形曲线,在粒径 4.75 mm 处,大于 4.75 mm 粒径部分的曲线之间的差异比较小,小于 4.75 mm 粒径部分的曲线之间的差异比较大,曲线的线形基本一致,符合 S 形级配曲线要求.

表 4 粗、细集料的比例

Tab. 4 The proportion of coarse aggregate and fine aggregate

粗集料各级集料的组合比例/%							细集料各级集料的组合比例/%						
31.5 mm	26.5 mm	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	
0	6.7	10.1	11.2	28	24	20	21	14	15	22	18	10	

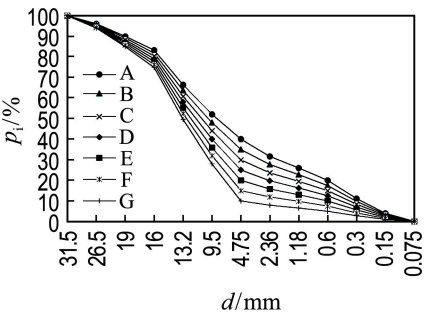


图 1 粗、细集料的合成级配

Fig. 1 The synthetic gradation of coarse aggregate and fine aggregate

3 结合料组成设计及性能研究

3.1 最佳沥青用量的确定

在贫沥青碎石最大、最小沥青用量的基础上，采用马歇尔体积参数和力学指标确定最佳沥青用量。以下试验参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[15]和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[13]进行。

考虑到传统的沥青混合料一般采用马歇尔试验确定最佳沥青用量，但本研究提出的新型沥青混合料是否适合此方法还未知，所以本文以传统马歇尔试验的确定方法作为切入点研究其性能。在贫沥青碎石最小与最大沥青用量的基础上，选取 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 分别作为毛体积密度的最大值、孔隙率的中值、稳定度的最大值和流值的最小值所对应的沥青用量，取四者的平均值作为 O_{ac1} ；选取 a_5 和 a_6 分别作为劈裂强度的最大值和单轴贯入强度的最大值所对应的沥青用量，取二者的平均值作为 O_{ac2} ，最终求出贫沥青碎石混合料各个级配的最佳沥青用量 O_{ac} ，计算公式如下所示：

$$O_{ac} = (O_{ac1} + O_{ac2}) / 2 = ((a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 + (a_5 + a_6) / 2) / 2$$

(1)

3.1.1 最小沥青用量的确定 通过裹覆观察试验和质量残留变化率试验以保证试件的成型，避免集料松散剥落，试验参考规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)来研究贫沥青碎石混合料的最小沥青用量。裹覆观察试验采用双面击实 75 次，在 7 种级配中，选取中间级配 D 进行试验，沥青用量以步长为 0.5% 进行增加，分别以沥青用量 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 等运用标准击实试验成型贫沥青碎石混合料，试验结果如图 2 所示。

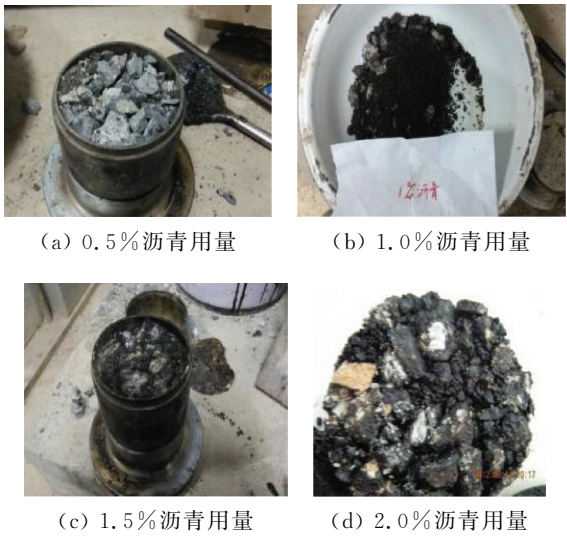


图 2 最小沥青用量裹覆观察试验

Fig. 2 The test of coverage observation for minimum asphalt content

由试验结果发现，当沥青用量为 2.0% 时，沥青基本裹覆集料表面，脱模时试件成型良好。但裹覆观察试验的主观因素较强，结果比较粗糙，只能作为参考，不能完全依赖观察试验法的结果，因此采用谢伦堡飞散试验研究贫沥青碎石试件质量残留变化率来评价其黏聚性能。7 种级配在沥青用量 2.0% 左右下成型，取沥青用量 1.8%、1.9%、2.0%、2.1%、2.2%、2.3% 进行质量残留变化率试验，试验结果如表 5 所示。

表 5 质量残留变化率

Tab. 5 The change rate of mass residual

级配	质量残留变化率/%				
	1.8%~ 1.9%	1.9%~ 2.0%	2.0%~ 2.1%	2.1%~ 2.2%	2.2%~ 2.3%
A	1.55	1.22	1.08	1.20	0.96
B	1.01	1.03	1.35	1.94	0.66
C	1.69	1.05	1.27	0.87	0.74
D	2.34	0.91	0.92	0.92	0.77
E	3.15	0.84	0.91	0.88	0.64
F	2.23	0.77	0.89	0.75	0.60
G	2.88	0.90	0.79	0.14	0.91

由表 5 数据可以看出，质量残留变化率都小于 5%，试验选取质量残留变化率小于 1% 突变处作为相应级配最小沥青用量，可知级配 A 至级配 G 的最小沥青用量分别是 2.3%、2.2%、2.2%、2.0%、1.9%、1.9%、1.9%。

3.1.2 最大沥青用量的确定 通过裹覆观察试验和自由沥青质量析漏损失试验来研究贫沥青碎

石混合料的最大沥青用量. 裹覆观察试验中,由上面的研究发现,级配 D 的沥青用量约为 2.0%时,可以保证贫沥青碎石集料表面裹覆完整、试件成型良好. 所以从 2.0%开始,以步长为 0.5% 进行增加,分别以沥青用量 2.5%、3.0%、3.5% 运用标准击实试验成型贫沥青碎石,结果如图 3 所示.

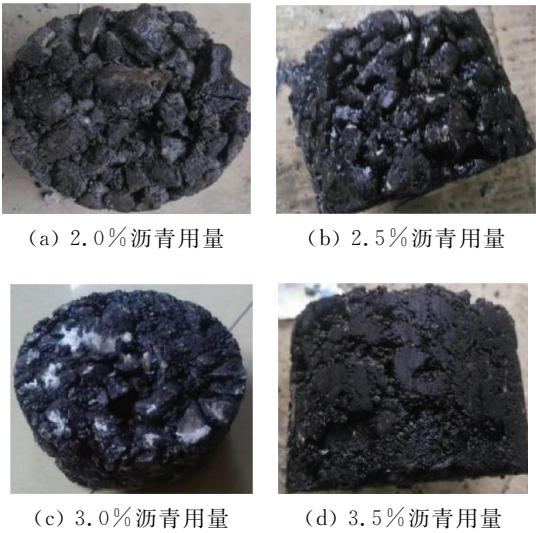


图 3 最大沥青用量裹覆观察试验

Fig. 3 The test of coverage observation for maximum asphalt content

由图 3 裹覆观察试验发现,当沥青用量约为 3.0%时,贫沥青碎石集料表面被沥青包裹完全,且从试件表面沥青膜观察,试件状态良好. 进一步地,采用自由沥青质量析漏损失试验研究最大沥青用量,对 7 种级配分别在沥青用量为 2.8%、2.9%、3.0%、3.1%、3.2%、3.3%、3.4% 进行试验,试验结果如图 4 所示.

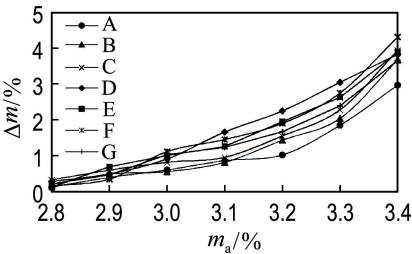


图 4 自由沥青质量析漏损失试验

Fig. 4 The test of Schellenberg binder drainage for loss of original asphalt

通过观察黏附在搪瓷盘上的沥青质量变化,若随着沥青用量的增大,自由沥青析出量明显变大,则以突变点作为最大沥青用量,由图 4 可以看

出,级配 A 至级配 G 对应的最大沥青用量分别为 3.2%、3.1%、3.1%、3.0%、3.0%、2.9% 和 2.9%.

3.1.3 贫沥青碎石体积参数及力学指标的确定
对 7 种级配进行标准马歇尔试验,以最小沥青用量 1.9% 和最大沥青用量 3.2% 为范围要求,分别选用沥青用量为 1.9%、2.2%、2.4%、2.6%、2.8%、3.0%、3.2% 7 种沥青含量进行试验,通过测量试件的毛体积密度(ρ_t)、孔隙率(V_v)、稳定度(M_t)、流值(F_t)等体积参数及劈裂强度(R_t)、贯入强度(τ_d)等力学指标来分析贫沥青碎石的性能变化趋势. 试验参数结果如图 5 所示.

由图 5 中的试验数据曲线结果,可以得出各级配的体积参数与力学指标的计算数据,依据最佳沥青用量对以上 6 个参数的取值要求,将参数代入式(1),进而得出 7 种级配对应的最佳沥青用量,计算结果如表 6 所示.

表 6 中计算结果表明,7 种级配对应的最佳沥青用量在 2.33%~2.95%.

3.2 推荐级配范围的确定

根据上面确定的 7 种级配及其对应的最佳沥青用量,通过试验研究 7 种级配下,粗、细集料比例对孔隙率、CBR、高温性、水稳性及低温抗裂性的影响,找到满足多方面性能要求的级配,试验参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行. 测定的试验结果如图 6 所示.

图 6(a)中,级配 A~G 的孔隙率随着粗集料比例的增加,细集料比例的减少,呈现出逐渐增加的趋势. 试验结果表明级配 C~F 范围内试件成型良好,对它们的孔隙率进行实测可知,孔隙率的范围为 12%~16%.

图 6(b)中,随着粗集料比例的增加,细集料比例的减少,CBR 呈现先增大后减小的趋势,这是因为细集料含量较多时,细集料与沥青所形成的砂浆将粗集料黏结在一起,与密实悬浮结构相类似,导致 CBR 较小;随着细集料含量的减少,粗、细集料比例逐渐趋于稳定,CBR 逐渐增大,当细集料减小到一定值时,形成的骨架结构中有大量孔隙没有被细集料所填充,粗集料与细集料不能形成稳定的结构体,导致 CBR 变小. 我国公路沥青路面设计规范规定级配碎石作为基层时 CBR 不应小于 100%,为了保证贫沥青碎石作为过渡层时的性能,建议采用较大的 CBR,推荐采用级配 C~G.

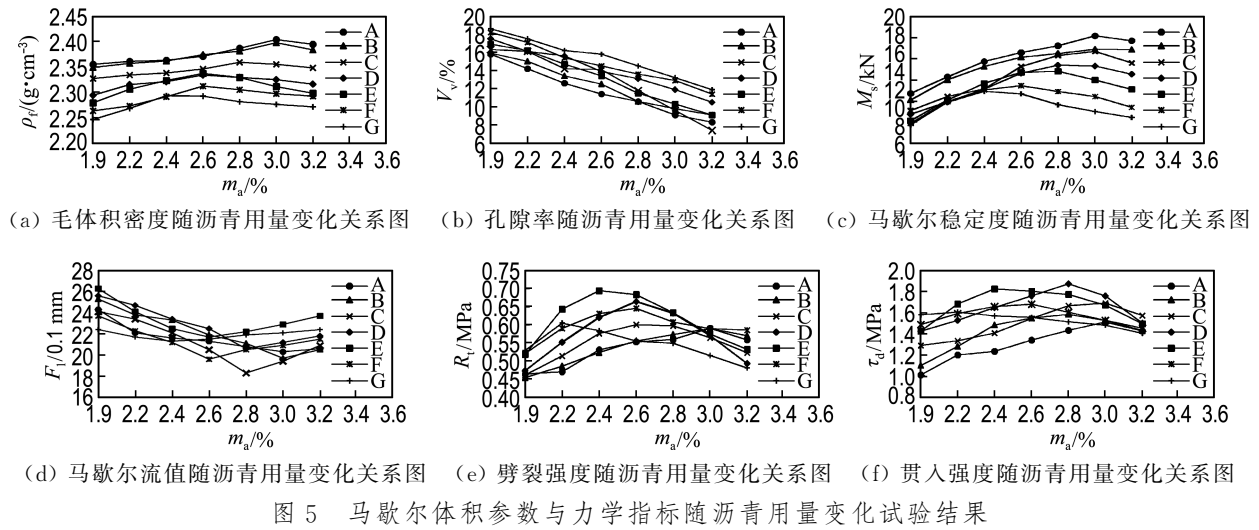


图 5 马歇尔体积参数与力学指标随沥青用量变化试验结果

Fig. 5 The test results of Marshall volume parameters and mechanical index with the change of asphalt content

表 6 各级配最佳沥青用量参数试验结果

Tab. 6 The test results of parameters for optimum asphalt content of each gradation

级配	试验参数/%						
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	O_{ac}
A	3.1	2.65	3.00	3.05	2.9	3.0	2.95
B	3.0	2.62	3.10	3.00	2.9	2.8	2.89
C	2.9	2.82	3.00	2.80	2.7	2.9	2.84
D	2.7	2.63	2.90	2.95	2.6	2.8	2.75
E	2.6	2.50	2.75	2.70	2.5	2.5	2.57
F	2.6	2.40	2.60	2.55	2.5	2.5	2.52
G	2.6	2.60	2.40	2.40	2.2	2.1	2.33

受外界温度变化影响较小,面临的应力水平小于面层混合料,贫沥青碎石的动稳定度要求可以适当降低,但需满足规范对普通沥青混合料动稳定度最低要求,文中建议贫沥青碎石动稳定度不应低于 1 000 次/mm,级配 A~F 符合要求。

图 6(d)、(e)为浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验的试验结果,贫沥青碎石的水稳性参考施工规范中对普通沥青混合料的浸水马歇尔试验残留稳定度的要求不小于 75%,冻融劈裂试验残留强度比不小于 70%.结果表明贫沥青碎石的水稳性随粗、细集料比增大而降低,级配 A~F 的残留稳定度大于 75%,冻融劈裂强度比大于 70%.即级配 A~F 具有良好的水稳性。

图 6(c)中,考虑到贫沥青碎石作为过渡层,

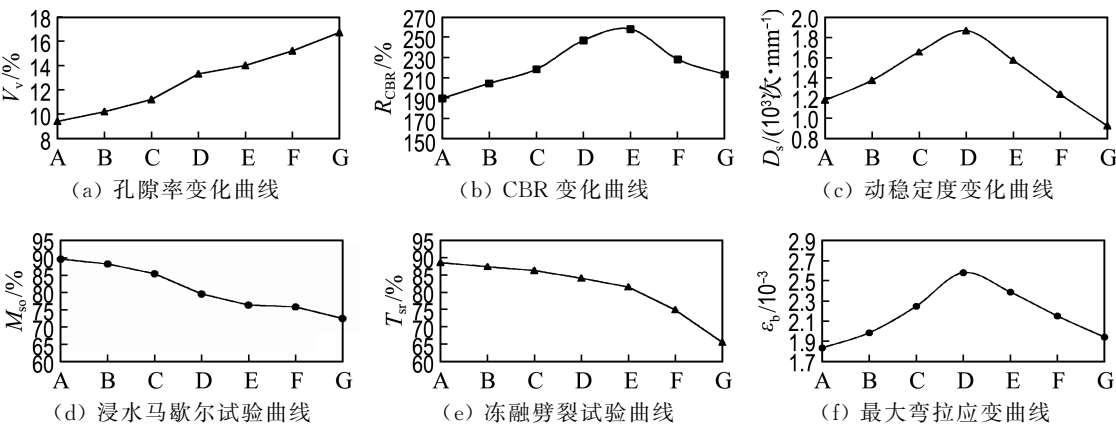


图 6 7 种级配在各自粗、细集料比例下的性能试验结果

Fig. 6 The results of the performance test of seven kinds of gradations in the proportion of their respective coarse and fine aggregate

图 6(f)中,不同级配的最大弯拉应变随混合料中粗集料的增加呈现出先升高后降低的趋势,参考借鉴《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中对最大弯拉应变不小于规范值 $2\,000\times10^{-6}$,结合试验结果可知,粗、细集料填充比例在级配 C~F 的低温抗裂性能良好.

综合以上对贫沥青碎石各级配最佳沥青用量下的性能分析,选取各个方面均满足性能要求的级配,可得出推荐级配为 D、E、F.

3.3 粉胶比范围的确定

沥青与矿粉形成的沥青胶浆,在贫沥青碎石混合料中起到联结骨架的作用,通过对沥青和矿粉形成的沥青胶浆性能研究,确定矿粉的用量范围.

试验在推荐级配 D、E、F 与其最佳沥青用量 2.75%、2.57%、2.52%下参照规范^[15]进行,通过锥入度试验及简易拉伸试验确定出粉胶比研究范围在 0.6~1.8,通过粉胶比对贫沥青碎石的强度、水稳性、高温性及低温性的影响试验,得出不同性能下粉胶比的适宜范围,如表 7 所示.

表 7 不同性能下粉胶比的适宜范围
Tab.7 The appropriate range of ratio of powder to gel under the different properties

性能	粉胶比范围	性能	粉胶比范围
强度	0.78~1.80	水稳性	0.8~1.6
高温性	0.8~1.4	低温性	0.60~1.22

根据表 7 中各粉胶比范围数据,综合贫沥青

碎石多项性能指标,最终选定粉胶比的范围为 0.78~1.22.

4 试验路验证缓裂性能

为了验证这种新型材料在预防反射裂缝方面的工程效果,便于对其性能进行进一步研究,课题组在甘肃省庄天公路 HS3 标段上铺筑一条长 150 m 的贫沥青碎石中间层结构作为试验路,同时铺筑一条长 150 m 的对比试验路,道路材料选用前文确定的沥青、粗细集料及矿粉,级配选用推荐级配的中值 E,最佳沥青用量为 2.57%,粉胶比选用拟定粉胶比的中值 1.0,按标准施工规范铺筑路面,两条沥青路面结构如图 7 所示.

3 cm AC-13	3 cm AC-13
5 cm AM-20	5 cm AM-20
10 cm 贫沥青碎石	
20 cm 水泥稳定碎石	20 cm 水泥稳定碎石
20 cm 水泥稳定沙砾	20 cm 水泥稳定沙砾
(a) 试验路结构	(b) 对比试验路结构

图 7 沥青路面结构

Fig.7 The structure of asphalt pavement

图 7 中,试验路多铺设了 10 cm 厚的贫沥青碎石,经过一个冻融循环后,对试验路路面裂缝及路面破损情况进行了实地调查.试验路和对比试验路的路面状况对比如图 8 所示.



图 8 试验路与对比试验路路况检测对比图

Fig.8 The comparison diagrams of road detection for test road and contrast test road

实地路况检测发现,对比试验路面 150 m 范围内出现两处表面剥落、坑槽等病害,经检测,总面积约为 0.5 m^2 ,横向有一条长约 4.5 m 的细小裂缝,纵向有一条长约 4 m 的狭长缝隙;而试验路则未出现剥落和坑槽等病害,路表面平整且无任何细小的横向裂缝和纵向裂缝产生. 试验路结果进一步验证了设置贫沥青碎石中间层材料具有抵抗路面反射裂缝的效果.

5 结 论

(1)通过对 7 种选定的矿料级配进行不同沥青用量、不同力学指标、不同路用性能以及不同粉胶比的对比试验,确定了贫沥青碎石的组成设计及配比:级配为 D、E、F,对应的最佳沥青用量范围为 $2.52\% \sim 2.75\%$,相应的粉胶比范围为 $0.78 \sim 1.22$.

(2)在现有试验方法和技术指标下,根据试验结果,提出贫沥青碎石混合料的技术指标:动稳定度不低于 1 000 次/mm,残留稳定度不小于 75%,冻融劈裂试验残留强度比不小于 70%,最大弯拉应变不小于规范值 $2\,000 \times 10^{-6}$.

(3)结合贫沥青碎石的级配范围、最佳沥青用量及粉胶比,确定适合贫沥青碎石的孔隙率为 $12\% \sim 16\%$.

(4)通过试验路的检测结果,进一步验证了贫沥青碎石新型材料具有良好的预防反射裂缝的效果;在贫沥青碎石配合比设计方法及性能验证的基础上,得到了关于贫沥青碎石中间层特有的一套材料组成设计及评价指标方法,为该种新型材料的进一步研究奠定了基础.

参考文献:

- [1] 徐华东,王 磊,刘真国. 半刚性基层沥青路面开裂成因及处治措施[J]. 中外公路, 2008, **28**(5):84-86.
- [2] 郑 义. 半刚性基层沥青路面抗裂措施长期性能观测研究[J]. 公路工程, 2014, **39**(6):234-238.
- [3] 张 海,马光超,张敏江,等. 级配碎石基层对沥青路面反射裂缝抑制机理分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, **27**(2):247-252.
- [4] DHAKAL N, ELSEIFI M A, ZHANG Zhongjie. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements-A synthesis [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, **9**(3):228-239.
- [5] AMARASIRI S, GUNARATNE M, SARKAR S. Modeling of crack depths in digital images of concrete pavements using optical reflection properties [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2010, **136**(6):489-499.
- [6] 李 颀. 级配碎石材料力学特性和设计方法研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
- [7] 魏建国,付其林,徐敬道. 沥青结合料对沥青碎石路面性能的影响[J]. 公路交通科技, 2014, **31**(11):1-8, 21.
- [8] 贾锦绣,韩 森,徐鸣明. 沥青稳定碎石混合料的抗剪性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, **29**(3):23-26.
- [9] 于保阳,张敏江,李拓文. 微粘结级配碎石基层沥青路面结构分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, **29**(5):852-860.
- [10] YU Baoyang, ZHANG Minjiang, LI Tuowen. Analysis of the micro bonding graded gravel asphalt pavement structure [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2013, **29**(5):852-860. (in Chinese)
- [11] ZHANG Hai, MA Guangchao, ZHANG Minjiang, et al. Mechanism analysis of graded aggregate preventing reflection cracks of asphalt pavement [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2011, **27**(2):247-252. (in Chinese)
- [12] LI Di. Research on mechanical characteristics and design method of graded crushed stone material [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [13] WEI Jianguo, FU Qilin, XU Jingdao. Effect of asphalt binder on pavement performance of asphalt macadam [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, **31**(11):1-8, 21. (in Chinese)
- [14] JIA Jinxiu, HAN Sen, XU Ouming. Anti-shearing performance of asphalt treated base mixtures [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2009, **29**(3):23-26. (in Chinese)

[10] 彭 波, 巩 伟, 孟宪光, 等. 微沥青碎石过渡层混合料级配设计方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(2):259-263.
PENG Bo, GONG Wei, MENG Xianguang, *et al.* A study on gradation design method of micro asphalt gravel middle layer mixtures [J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2015, 39(2):259-263. (in Chinese)

[11] 黄允江, 汪 婧, 刘 平, 等. 半刚性基层沥青路面反射裂缝处治新方法探讨[J]. 公路交通技术, 2016, 32(4):43-48.
HUANG Yunjiang, WANG Jing, LIU Ping, *et al.* Exploring new method to treat reflection crack on semi rigid base asphalt pavement [J]. **Technology of Highway and Transport**, 2016, 32(4):43-48. (in Chinese)

[12] 王振亚. 微沥青碎石混合料沥青用量设计及实验研究[J]. 北方交通, 2015, 7(7):81-83.
WANG Zhenya. Experimental study and parameter design of micro asphalt macadam mixture [J]. **Northern Communications**, 2015, 7(7):81-83. (in Chinese)

[13] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People 's Republic of China. Technical Specification for Construction of Highway Asphalt Pavements: JTG F40-2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)

[14] 李凯峰. 微沥青碎石配合比设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
LI Kaifeng. Study on the mixture design of micro asphalt gravel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)

[15] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People 's Republic of China. Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering: JTG E20-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)

Composition design and performance study
of new material low asphalt macadam

PENG Bo^{*1}, CAO Shijiang¹, GONG Wei², LI Wenying³, CAO Ning¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
3. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The new material low asphalt macadam can be used as the middle layer structure. In order to further study the effect of its material composition's alleviation to the semi-rigid base reflection cracks, the multi-grade stone-to-stone theory and the design method of stage filling are applied to design the coarse and fine aggregate of low asphalt macadam. Seven kinds of mineral aggregate gradation and their respective optimum asphalt content are investigated, and through comparison and research on strength, CBR (California bearing ratio), high temperature and water stability of low asphalt macadam, the recommended gradation range is given. The ratio of powder to gel of low asphalt macadam is designed in the selected gradation range and optimum asphalt content, and the pavement performance verification is carried out by paving test road. The results show that when the ratio of coarse and fine aggregate is 3 : 1-17 : 3, the optimum asphalt content is 2.52%-2.75%, and the ratio of powder to gel is 0.78-1.22, the new material has a good function of delaying the reflection crack of the pavement, and its composition ratio and design method are of great significance to the prevention and cure of cracks in the semi-rigid base.

Key words: road engineering; slow crack performance; stage filling; low asphalt macadam; reflection crack