

橡胶沥青混合料高温稳定性影响因素试验

黄卫东¹, 王伟², 黄岩³, 李彦伟⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海浦东路桥沥青材料有限公司, 上海 200122;
3. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092; 4. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050051)

摘要: 通过室内车辙试验和浸水车辙试验, 采用单因素对比分析的方法, 对橡胶沥青混合料高温稳定性能的主要影响因素进行了系统研究. 试验结果表明, 胶粉来源、胶粉掺量、油石质量比、空隙率等因素, 对于橡胶沥青混合料高温稳定性的影响比较显著, 基质沥青对高温稳定性也有一定程度的影响, 而胶粉细度等因素所产生的影响较小. 尽管不同级配形式下混合料常规动稳定度的测试结果差异不大, 但由于浸水对比车辙试验条件下动稳定度的衰减幅度最小, 因此, 矿粉比例低且细料较少的间断级配形式更适用于橡胶改性沥青.

关键词: 橡胶沥青; 橡胶沥青混合料; 车辙试验; 动稳定度
中图分类号: U 416.217 **文献标识码:** A

Influencing Factor Research on High-temperature Performance of Asphalt Rubber Mixture

HUANG Weidong¹, WANG Wei², HUANG Yan³, LI Yanwei⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Pudong Road & Bridge Asphalt-based Material Company, Shanghai 200122, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Shanghai 200092, China; 4. Shijiazhuang Bureau of Transportation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Based on single-factor analysis, rutting test and immersion rutting test were made to study the influencing factors on high-temperature performance of asphalt rubber (AR) mixture. Test results show that crumb rubber modifier (CRM) source, CRM content, asphalt content and air voids have great influence on high-temperature performance of AR mixture, while the effect of base asphalt and CRM size/gradation on high-temperature performance is not so obvious. Though the rutting test results under different aggregate gradations do not show much variation, the gap gradation with less mineral filler and less fine aggregate performs better in

immersion rutting test, thus the gap gradation with less mineral filler is suitable for application in asphalt rubber mixture.

Key words: asphalt rubber; asphalt rubber mixture; rutting test; dynamic stability

橡胶沥青混合料由于其突出的环保优势和足够的高温稳定性, 已逐步在国内道路工程中得到应用^[1]. 与其他改性沥青混合料相比, 橡胶沥青混合料胶粉掺量大, 胶粉与基质沥青改性机理有所不同. 以亚利桑那州橡胶沥青规范为例, 同时具有以下特点^[2]: ① 油石质量比高, 一般为 7.0%~8.5%, 对于一般沥青混合料, 如此高的用量, 其高温稳定性能难以保证; ② 级配中允许不掺加矿粉 (小于 0.075 mm 的细料), 而一般沥青混合料中矿粉对于提升高温稳定性、防止析漏、填充空隙等作用显著; ③ 混合料的设计目标空隙率达到 4.5%~6.5%, 较一般沥青混合料大 1%~2%. 常规沥青混合料的研究表明, 较大的空隙率可能导致高温稳定性下降、抗水损能力减弱. 笔者针对橡胶沥青混合料高温稳定性的担忧, 采用车辙试验及浸水车辙试验, 对其高温稳定性进行大量的试验研究, 并据此对橡胶沥青混合料高温稳定性影响因素及影响程度进行了比较与研究.

1 试验方法与方案

1.1 橡胶沥青

对橡胶沥青的改性采用湿法 (wet process) 工艺, 即在 185 ± 5 °C 下, 用强力搅拌器以 250 r · min⁻¹ 转速将沥青与橡胶粉混合搅拌 90 min, 橡胶粉的掺量为橡胶沥青质量的 19%. 基质沥青采用加德

士 70[#],埃索 70[#],中海 70[#],河北宏润 70[#],东海金山 70[#],盘锦 90[#]、加德士 90[#]等 7 种型号.橡胶粉选用 4 种胶粉,产地分别为上海、河北、四川、南京,其中,上海与河北的胶粉为大货车子午胎胶粉,四川与南京的胶粉为非大货车胶粉.胶粉细度以 20 目为主,南京胶粉还包括 60 和 80 目两种细度.橡胶改性沥青常规指标的实测结果见表 1 所示.

表 1 用于试验研究的橡胶沥青常规指标

Tab.1 Conventional requirement of asphalt rubber

基质沥青	胶粉种类	25℃针入度/ 0.1 mm	软化 点/℃	177℃粘度/ (Pa·s)
加德士 70 [#]	上海,20 目	38.3	68.4	3.3
加德士 70 [#]	河北,20 目	36.5	69.0	3.5
加德士 70 [#]	南京,80 目	54.5	60.0	1.8
加德士 70 [#]	南京,20 目	43.5	64.5	2.1
加德士 70 [#]	南京,60 目	49.5	61.7	1.6
加德士 70 [#]	四川,20 目	47.8	60.6	1.4
河北宏润 70 [#]	河北,20 目	36.6	70.9	4.1
河北宏润 70 [#]	上海,20 目	39.1	69.5	3.8
埃索 70 [#]	上海,20 目	34.8	68.0	3.2
中海 70 [#]	上海,20 目	38.4	65.6	2.9
东海金山 70 [#]	上海,20 目	39.5	66.1	2.9
加德士 90 [#]	上海,20 目	51.2	62.2	2.7
盘锦 90 [#]	上海,20 目	48.8	64.6	3.0

1.2 集料与级配

集料包括江苏茅迪玄武岩和江苏溧阳石灰岩两种,筛分成 13.20~9.50,9.50~4.75,4.75~2.36,2.36~0.075 等 4 档.对压碎值、磨耗值、针片状含量等指标的测试表明,所用集料的各项指标均满足现行规范的技术要求.

由于我国现行沥青路面设计、施工规范中尚无橡胶沥青混合料专用级配的技术要求,因此,在级配选择上参考了国外的经验.橡胶沥青的粘度较大,在集料表面所形成的油膜较厚,因此,国外在胶粉掺量较大的情况下,级配选择上比较倾向于细料较少的间断级配,而且往往选择具有较大空隙率的半开级配,其中又以美国亚利桑那州推荐的间断级配为代表^[2-3].笔者参考亚利桑那州的间断级配范围,选择了粗、中、细三种级配;为了对比分析,还增加了目前常用的连续级配(AC-13)和间断级配(SMA-13)两种形式.在试件成型中,4.75 mm 以上的粗集料选择玄武岩,4.75 mm 以下选择石灰岩.选用的各种级配如表 2 所示.

表 2 试验中选用的各种级配(质量分数)

Tab.2 Aggregate gradations in the test (quality percentage)

级配	筛孔尺寸/mm				
	13.200	9.500	4.750	2.360	0.075
AR-AC-13 粗 ¹⁾	100	65	30	20	0
AR-AC-13 中 ¹⁾	100	70	35	21	0
AR-AC-13 细 ¹⁾	100	72	40	28	0
SMA-13	100	60	25	24	8
AC-13	100	74	39	30	6

注:1) 为了提高混合料的抗冻融劈裂性能,参考国内外的工程经验,在混合料中还外掺了质量分数为 1.5% 的普通硅酸盐水泥.

1.3 车辙试验

根据车辙试验要求,需在试验室中成型 300 mm×300 mm×50 mm 的车辙板试件(压实 40 次).考虑到道路摊铺时混合料存在短期老化的实际情况,在试件成型时先将新拌橡胶沥青混合料均匀摊铺在搪瓷盘,放入 165±5℃ 的烘箱中,短期老化 2 h±5 min 后再成型.

各种级配橡胶沥青混合料最佳油石质量比采用马歇尔法确定.拌和温度为 170~175℃,双面 75 次击实,击实温度为 155~160℃.用计算法求得混合料的最大理论密度,试件的毛体积密度采用水中重法测定.5 种级配混合料的目标空隙率与最佳油石质量比如表 3 所示.

表 3 混合料的油石质量比与空隙率

Tab.3 Asphalt-stone ratios and air voids of mixtures

级配类型	目标空隙率/%	最佳油石质量比/%
AR-AC-13 粗	5.4	8.0
AR-AC-13 中	5.4	8.0
AR-AC-13 细	5.4	8.2
AC-13	4.0	7.3
SMA-13	4.0	7.0

为了在混合料高温稳定性评价中考虑水的影响,在试验研究中补充了浸水车辙试验.即根据各自的最佳油石质量比成型车辙试件,常温下静置 48 h 后,在车辙试验机的恒温(60℃)水槽中浸水 2 h,然后再进行浸水车辙试验.

1.4 试验方案

可能影响橡胶沥青混合料高温稳定性的因素包括基质沥青的品质、胶粉(包括胶粉来源、目数、掺量)、级配形式、油石质量比、空隙率等.由于影响因素多,如果分析多因素的综合影响,一方面室内试验的工作量很大,另一方面由于各因素之间可能存在耦合影响,导致分析结果出现偏差.因此,采用单因素对比分析方法,即在分析某一影响因素时,在试验

方案中将其他影响因素尽可能地统一,从而分析该因素的变化对于动稳定度的影响程度.为此,针对上述影响因素分别设计了8个对比试验方案.车辙动稳定度原始数据详见附件及参考文献[4].

2 胶结料对于高温稳定性的影响

2.1 基质沥青的影响

针对7种不同的基质沥青,试验了27组常规车辙.胶粉选择大货车子午胎胶粉(上海与河北的20目胶粉),胶粉掺量为19%(质量分数,后同),混合料级配为AR-AC-13粗(油石质量比为8%,空隙率为5.4%).试验结果见表4,对比情况见图1.

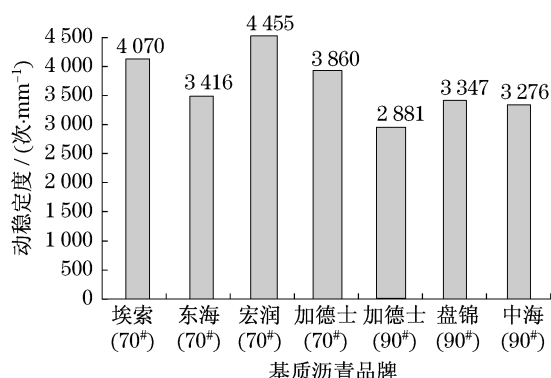


图1 基质沥青对于动稳定度的影响对比

Fig.1 Dynamic stability comparison of different base asphalts

将7种不同基质沥青混合料常规车辙试验动稳定度的试验结果进行统计,变异系数为15%,变异水平属于动稳定度试验的偏高水平.试验结果表明,中海(70#)和宏润(70#)动稳定度相差30%以上.说明不同基质沥青对橡胶沥青混合料的高温稳定性具有一定程度的影响.

表4 基质沥青对于高温稳定性的影响

Tab.4 Influence of base asphalts on high-temperature performance

基质沥青	车辙试验组数	动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	变异系数/%
埃索(70#)	6	4 070	9
东海(70#)	3	3 416	10
宏润(70#)	6	4 455	12
加德士(70#)	3	3 860	4
加德士(90#)	3	2 881	13
盘锦(90#)	3	3 347	14
中海(70#)	3	3 276	5

2.2 胶粉的影响

在大比例(质量分数大于15%)掺入胶粉的情况下,胶粉与基质沥青在高温状态下(180℃以上)通过物理反应(融胀),在颗粒表面将形成沥青质含量很高的凝胶膜,融胀后橡胶粉体积达到胶结料的近40%^[5],因此,胶粉性质的变化将对混合料的高温稳定性产生较大的影响.为此,笔者设计了3个对比试验方案,分别用于比较胶粉来源、细度、掺量对于动稳定度的影响.混合料级配为AR-AC-13粗(油石质量比8%,空隙率5.4%),胶粉掺量为19%(胶粉掺量分析方案除外),基质沥青为加德士70#.

在胶粉来源的影响分析中,针对4个不同产地、2种不同来源的胶粉所制备的混合料进行了18组常规车辙试验,试验结果见表5所示,对比情况见图2.

表5 胶粉来源对于高温稳定性的影响

Tab.5 Influence of crumb rubber sources on high-temperature performance

胶粉来源	车辙试验组数	动稳定度 / (次·mm ⁻¹)	变异系数/%
上海(大货车子午胎)	9	3 894	12
河北(大货车子午胎)	3	3 487	7
南京(非大货车子午胎)	3	1 732	15
四川(非大货车子午胎)	3	1 702	7

可以看出,一方面不同来源的胶粉(上海、河北的大货车子午胎,以及南京、四川的非大货车子午胎)对于混合料动稳定度的影响非常显著,4个产地胶粉所制备混合料动稳定度的变异系数达到了43%;另一方面,相同来源胶粉(上海与河北,南京与四川)之间,动稳定度的变化非常小.由于大货车胶粉富含天然橡胶,对沥青性能的改善效果更加明显,因此,在橡胶沥青混合料设计中建议使用该类胶粉.

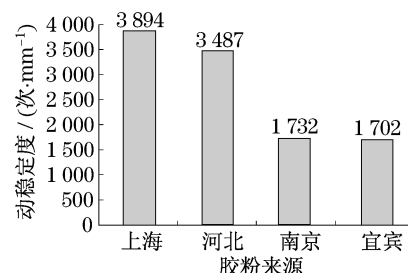


图2 胶粉来源对于动稳定度的影响对比

Fig.2 Relationship between dynamic stability and crumble rubber source

在胶粉细度的影响分析中,采用20,60,80目等3种细度的南京胶粉进行了9组常规车辙试验,试验结果见表6.不同细度胶粉动稳定度的变异系数仅

9%。可以看出,在20~80目的细度范围内,胶粉细度的变化对于混合料高温稳定性的影响较小,但是,实际应用中存在由较细胶粉制备的橡胶沥青随贮存时间延长,177℃粘度下降较快的现象,需要注意。

表6 胶粉细度对于高温稳定性的影响

Tab.6 Influence of crumb rubber size/gradations on high-temperature

胶粉目数	车辙试验组数	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	变异系数/%
20	3	1732	15
60	3	1973	7
80	3	1687	16

限于备料不足等原因,在胶粉掺量影响的试验研究中,仅针对17%和19%两种掺量,采用20目上海胶粉进行12组常规车辙试验,试验结果见表7。

表7 胶粉掺量对于高温稳定性的影响

Tab.7 Influence of crumb rubber content on high-temperature performance

胶粉掺量 (质量分数)/%	车辙试验组数	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	变异系数/%
17	3	3312	18
19	9	3894	12

可以看出,胶粉掺量(质量分数)从17%增加到19%,混合料的动稳定度增加了18%,影响还是比较显著的。针对20目货车轮胎胶粉、70#道路石油沥青情况,曹荣吉等进行了胶粉掺量对于橡胶沥青粘度的影响的试验研究,试验结果如表8所示^[6]。可以看出,胶粉掺量对于粘度的影响并不是线性的,随着掺量从18%增加到20%,橡胶沥青的旋转粘度快速增长。

笔者在橡胶沥青高温性能评价标准的试验研究中发现,橡胶沥青混合料的动稳定度与橡胶沥青的177℃粘度之间具有良好的线性相关性(见图3)。据

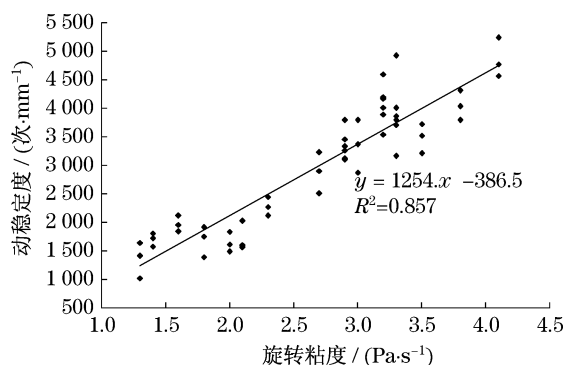


图3 旋转粘度与动稳定度的试验关系(177℃)

Fig.3 Relationship between 177℃ apparent viscosity and dynamic stability

此推断,胶粉掺量的增加对于混合料动稳定度的影响非常显著。这主要是由于随着胶粉掺量的增加,橡胶沥青粘度增加,进而造成混合料动稳定度的增加。

表8 不同胶粉掺量情况下橡胶沥青的粘度
(177℃, 20 r·min⁻¹)

Tab.8 177℃ viscosities for different crumb rubber contents

参数	胶粉掺量(质量分数)/%			
	12	16	18	20
旋转粘度/(Pa·s)	1.30	1.90	2.00	8.10

3 级配、油石质量比及空隙率对于高温稳定性的影响

3.1 级配的影响

在级配的影响分析中,胶粉选择大货车子午胎胶粉(20目),胶粉掺量(质量分数)为19%。考虑到基质沥青对于混合料高温稳定性的影响很小,因此,在对比试验中没有对沥青品牌进行限制(即选择了7种品牌的基质沥青)。混合料方面选择了5种级配(见表2),分别进行了马歇尔试验,根据各自的目标空隙率确定了最佳油石质量比。45组常规车辙试验的结果见表9所示,对比情况见图4。

在最佳油石质量比的情况下,5种不同级配混合料常规动稳定度测试结果的变异系数为7%。一方面说明在级配中矿粉的含量(粒径小于0.075 mm细料)对于橡胶沥青混合料高温性能的影响并不显著,另一方面说明间断级配与连续级配相比,高温稳定性并没有明显的优势,而且各种级配的橡胶沥青混合料均可以满足改性沥青混合料高温稳定性的一般要求。

表9 不同级配对于高温稳定性的影响

Tab.9 Influence of gradation on high-temperature performance

级配类型	车辙试验组数	空隙率/%	油石质量比/%	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	变异系数/%
AC-13	3	4.0	7.3	3 775	6
AR-AC-13粗	30	5.4	8.0	3 776	16
AR-AC-13中	6	5.4	8.0	3 725	17
AR-AC-13细	3	5.4	8.2	3 480	9
SMA-13	3	4.0	7.0	4 168	7

为了进一步分析级配对于高温稳定性的影响,研究进行了不同级配情况下混合料常规车辙试验与浸水车辙试验的对比分析。试验中胶粉仍为大货车子午胎胶粉,掺量为19%,基质沥青统一为加德士

70[#],选择了 AR-AC-13 粗、AR-AC-13 中、AC-13、SMA-13 共 4 种级配,其中 AR-AC-13 粗混合料降低了油石质量比,以分析验证哪种级配更加适用于橡胶沥青.浸水车辙对比试验共进行了 24 组,结果见表 10 所示,对比情况见图 5.

对比试验中,AR-AC-13 粗级配的浸水车辙试验动稳定度的下降幅度很大(仅略好于 AC-13),主要是由于其油石质量比大大低于最佳油石质量比(8%),造成混合料中沥青含量的相对不足.其他采用最佳油石质量比的不同级配混合料中,不含矿粉的“AR-AC-13”中级配的混合料浸水车辙试验动稳定度的下降幅度最小,原因可能与沥青膜的厚度有

关系.其他 2 种级配由于矿粉的存在,增加了集料的比表面积,从而减少了裹覆集料的沥青膜厚度.

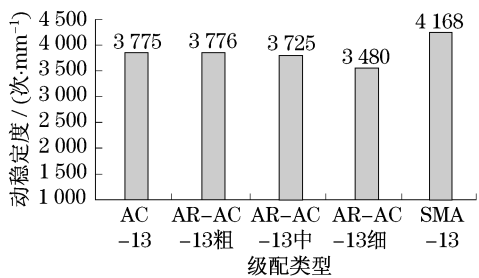


图 4 不同级配对于动稳定度的影响对比
Fig.4 Dynamic stability comparison under different gradations

表 10 不同级配混合料常规车辙与浸水车辙试验的对比

Tab.10 Conventional and immersion rutting test results of mixtures under different gradations

级配类型	车辙试验组数 ¹⁾	油石质量比/%	动稳定度(常规车辙)/(次·mm ⁻¹)	动稳定度(浸水车辙)/(次·mm ⁻¹)	变异系数 ¹⁾ /%	动稳比值
AC-13	3/3	7.3	3 775	998	6/6	3.78
AR-AC-13 粗	3/3	5.0	4 395	1 204	10/10	3.65
AR-AC-13 中	3/3	8.0	3 487	1 739	7/10	2.01
SMA-13	3/3	7.0	4 168	1 520	7/5	2.74

注:1)“/”左侧为常规车辙试验的数据,右侧为浸水车辙试验的数据.

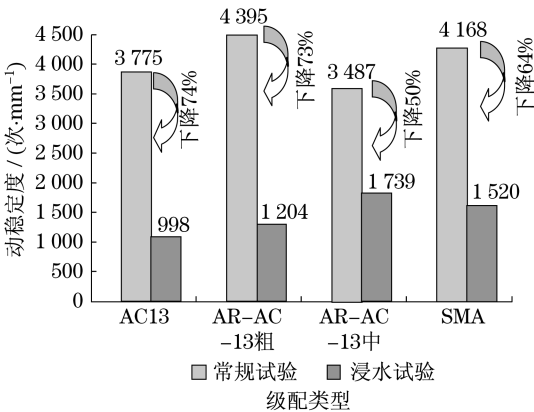


图 5 不同级配常规与浸水车辙试验的对比
Fig.5 Comparison of conventional and immersion rutting test results under different gradations

3.2 油石质量比的影响

在油石质量比的影响分析中,胶粉选择上海 20 目(掺量(质量分数)为 19%),级配形式为 AR-AC-13 粗,基质沥青为加德士 70[#],油石质量比选择了包括最佳油石质量比在内的 6 种,共进行了 21 组常规车辙试验,结果见表 11,油石质量比变化趋势拟合曲线见图 6.

混合料的动稳定度随着油石质量比的增加基本上表现为线性下降的趋势,而且相关性很好.如果以动稳定度大于 2800 次·mm⁻¹控制混合料的最大

表 11 油石质量比对于高温稳定性的影响

Tab.11 Influence of asphalt-stone ratio on high-temperature performance

油石质量比/%	车辙试验组数	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	变异系数/%
5.0	3	4 395	10
8.0	6	3 860	4
8.3	3	3 387	7
8.6	3	3 159	8
9.0	3	2 766	6
10.0	3	1 635	6

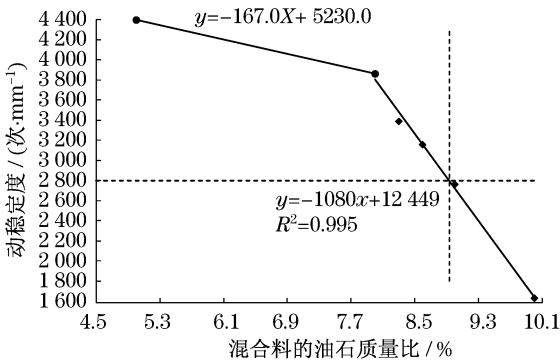


图 6 油石质量比变化趋势拟合曲线
Fig.6 Fitting curve for variation of asphalt-stone ratio

油石质量比,则对于本试验的材料和工艺条件,最大油石质量比建议小于 8.9%.从油石质量比对于动稳

定度的影响趋势拟合情况还可看出,如果为了增加动稳定度而降低油石质量比(假定因油石质量比变化引起混合料其他性能的衰减仍处于可接受的范围之内),那么,当油石质量比低于最佳油石质量比时,因油石质量比降低引起动稳定度增长的斜率远小于油石质量比大于最佳油石质量比的阶段,两个阶段动稳定度受油石质量比变化的影响斜率比值为1:6.5,因此,这种做法并不“经济”。

3.3 空隙率的影响

对于空隙率对于动稳定度的影响,对比试验采用了“AR-AC-13粗”和“SMA-13”两种级配形式。前者选择上海20目胶粉,后者选择了河北20目胶粉,基质沥青为加德士70#,掺量(质量分数)为19%,共进行了15组常规车辙试验,结果见表12和图7所示。可以看出,与其他改性沥青混合料相似,动稳定度随着空隙率的增加而下降,而且下降幅度比较明显,并随着级配形式的不同而存在一定的差异。

表12 空隙率对于高温稳定性的影响

Tab.12 Influence of air void on high-temperature performance

级配形式	空隙率/ %	车辙试验 组数	油石质量 比/%	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	变异系 数/%
AR-AC-13粗	6.8	3	8	2 808	3
	5.6	3	8	3 860	4
	4.7	3	8	4 725	17
SMA-13	2.5	3	8	4 963	7
	4.0	3	7	4 168	7

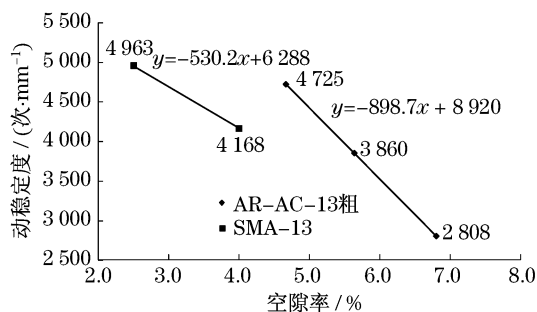


图7 空隙率对于动稳定度的影响

Fig.7 Influence of air void on dynamic stability

4 小结

(1) 橡胶沥青混合料的高温稳定受到基质沥青品质差异影响,试验结果表明,最大差异达到了

30%;受胶粉性质的影响则非常显著,且以胶粉来源和胶粉掺量这两个因素的影响为主。对于橡胶沥青混合料,建议采用大货车子午胎胶粉进行改性,并应合理控制胶粉的掺量。

(2) 浸水车辙对比试验结果表明,矿粉比例低且细料较少的间断级配形式,其橡胶沥青混合料浸水车辙试验结果更好,表明其有更好的抗水损害能力。

(3) 与其他改性沥青混合料相似,橡胶沥青混合料的高温稳定性受油石质量比与空隙率变化的影响较显著,因此,应严格控制混合料的空隙率;对于本试验的材料和工艺条件,建议油石质量比小于8.9%。

由于试验数量的限制,研究成果尚待进一步试验和现场实际的验证与修正。作为试验,研究成果对橡胶沥青混合料的实际应用仅作为技术参考。

参考文献:

- [1] 王旭东,李美江,路凯冀. 橡胶沥青及混凝土应用成套技术[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
WANG Xudong, LI Meijiang, LU Kaiji. The applied technology of the crumb rubber in the asphalt and mixture[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] Arizona Department of Transportation. Standard specifications for road & bridge construction[S]. Phoenix: [s. n.], 2000.
- [3] 吕伟民,孙大权. 沥青混合料设计手册[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
LV Weimin, SUN Daquan. Asphalt mixtures design manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [4] 王伟. 橡胶沥青混合料高温性能研究[D]. 同济大学交通与运输工程学院,2008.
WANG Wei. Study on high temperature performance of asphalt rubber mixture [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transport Engineering, 2008.
- [5] 黄文元,张隐西. 道路路面用橡胶沥青的性能特点与指标体系[J]. 中南公路工程,2007,32(1):111.
HUANG Wenyuan, ZHANG Yinxi. The technical criteria frame of pavement used asphalt rubber in China[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2007, 32(1): 111.
- [6] 曹荣吉,陈荣生. 橡胶沥青工艺参数对其性能影响的试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版,2008,38(2):269.
CAO Rongji, CHEN Rongsheng. Laboratory study on process parameters of asphalt rubber and their effects on performance [J]. Southeast University Journal: Natural Science, 2008, 38(2): 269.