

- [5] 王红茹. 全国30个海绵城市试点19城今年出现内涝[J]. 中国经济周刊, 2016(35): 48-50.  
WANG Hong-ru. In 30 sponge cities nationwide 19 cities have waterlogged this year[J]. China Economic Weekly, 2016(35): 48-50.
- [6] 刘士林, 马娜. “十三五”中国城镇化仍将保持中高速增长[J]. 中国建设信息化, 2017(5): 12-14.  
LIU Shi-lin, MA Na. "The 13th five-year plan" China's urbanization will still maintain a medium-high-speed growth[J]. China Construction Information Technology, 2017(5): 12-14.
- [7] 车伍, 吕放放, 李俊奇, 等. 发达国家典型雨洪管理体系及启示[J]. 中国给水排水, 2009, 25(20): 12-17.  
CHE Wu, LYU Fang-fang, LI Jun-qi, et al. Typical stormwater management system in developed countries and its enlightenment [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(20): 12-17.
- [8] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述[J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3 873-3 884.  
MEI Chao, LIU Jia-hong, WANG Hao, et al. A review of urban design rainstorm research[J]. Science Bulletin, 2017, 62(33): 3 873-3 884.
- [9] 朱玲, 龚强, 李杨, 等. 辽宁葫芦岛市新旧暴雨强度公式对比及暴雨雨型分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 251-258.  
ZHU Ling, GONG Qiang, LI Yang, et al. Comparison of new and old rainstorm intensity formulas and analysis of rainstorm patterns in Huludao City, Liaoning[J]. Heavy Rain Disaster, 2017, 36(3): 251-258.
- [10] 环海军, 刘焕斌, 刘岩, 等. 鲁中主城区暴雨强度公式的修正方法[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 188-194.  
HUAN Hai-jun, LIU Huan-bin, LIU Yan, et al. Revising method of rainstorm intensity formula in main urban in middle area of Shandong Province [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 188-194.
- [11] 徐雨. 泰州市暴雨强度公式修编及设计暴雨雨型研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.  
XU Yu. Revision and design of the rainstorm intensity formula of Taizhou City[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [12] 段燕楠, 王赞, 杨芳园, 等. 昆明市暴雨强度公式推算与对比[J]. 气象科技, 2017, 45(1): 86-90, 106.  
DUAN Yan-nan, WANG Yun, YANG Fang-yuan, et al. Calculation and comparison of the rainstorm intensity formula in Kunming [J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(1): 86-90, 106.
- [13] 艾志生, 黄殿男. 基于历史公式和近年降雨数据耦合的暴雨公式推求研究[J]. 科技创业月刊, 2016, 29(22): 134-135.  
AI Zhi-sheng, HUANG Dian-nan. Research on the derivation of storm formula based on the coupling of historical formula and rainfall data in recent years [J]. Science and Technology Pioneering Monthly, 2016, 29(22): 134-135.
- [14] 李莉, 冷艺, 黄俊, 等. 基于规划求解的暴雨强度公式推求方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 17-23.  
LI Li, LENG Yi, HUANG Jun, et al. Research on the method of deriving storm intensity formula based on programming [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 17-23.

文章编号:1672-9331(2021)02-0017-09

# 水-温耦合作用对高模量沥青混合料性能的影响

宁毅<sup>1</sup>, 李文凯<sup>2</sup>, 刘向杰<sup>3</sup>

(1. 河南中州路桥建设有限公司, 河南 周口 466000; 2. 河南交院工程技术集团有限公司, 河南 郑州 450003;  
3. 河南交通职业技术学院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 为研究 RA, PR, M 和 BRA 3 种高黏剂对沥青混合料路用性能的影响, 对水-温耦合作用下的工程上常用的 AC-13C 和 AC-20C 两种密级配沥青混合料展开了研究。从矿料级配类型、高黏剂、含水率、试验温度等方面对高模量沥青路面的高温抗车辙性能、抗疲劳性能进行了研究。结果表明: 当级配类型相同时, 高黏剂的种类及掺量对沥青混合料最佳油石比的影响不大。在相同条件下, AC-20C 沥青混合料的吸水率及高温抗车辙能力明显大于 AC-13C 沥青混合料的, 且掺入 RA 高黏剂的沥青混合料的高温抗车辙能力整体最优。随着试验温度的升高、加载应力及吸水率的增大, 沥青混合料 AC-13C 和 AC-20C 的疲劳寿命均有所缩短; 在低温、低应力条件下, AC-13C 沥青混合料的疲劳寿命长于 AC-20C 沥青混合料的。

**关键词:** 矿料级配; 油石比; 高模量沥青混合料; 水-温耦合; 路用性能

**中图分类号:** U416.17

**文献标志码:** A

## Influence of water-temperature coupling on performance of high modulus asphalt mixture

NING Yi<sup>1</sup>, LI Wen-kai<sup>2</sup>, LIU Xiang-jie<sup>3</sup>

(1. Henan Zhongzhou Road and Bridge Construction Co., Ltd., Zhoukou 466000, China; 2. Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. Henan College of Transportation, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of three kinds of high viscosity agents RA, PR, M and BRA on the road performance of asphalt mixture, two kinds of dense-graded asphalt mixtures AC-13C and AC-20C, which were commonly used in engineering, were researched under the action of water-temperature coupling. The performance of high temperature anti-rutting and anti-fatigue of high modulus asphalt pavement was studied from the aspects of gradation type of mineral aggregate, high viscosity agent, moisture content, test temperature, etc. The research results show that when the gradation type is the same, the type and content of high viscosity agent have little effect on the optimal oil-stone ratio of asphalt mixture. Under the same conditions, the water absorption and high temperature anti-rutting of AC-20C asphalt mixture are significantly greater than that of AC-13C asphalt mixture, and the high temperature anti-rutting performance of asphalt mixture adding RA high viscosity agent is the best as a whole. With the increase of test temperature, loading stress and water

**收稿日期:** 2021-04-13

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51408553); 河南省重点科技攻关计划项目(152102210033)

**通讯作者:** 宁毅(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事公路与桥梁施工方面的研究。E-mail: 632596972@qq.com

absorption, the fatigue lives of AC-13C and AC-20C asphalt mixtures are shortened. The fatigue life of AC-13C asphalt mixture is longer than that of AC-20C asphalt mixture under low temperature and low stress.

**Key words:** mineral aggregate gradation; oil-stone ratio; high modulus asphalt mixture; water-temperature coupling; road performance

沥青路面因其施工工艺成熟、通车快、行车舒适度高、胎噪低及便于养护等优点被广泛应用到高等级公路的建设中。但沥青路面是一种柔性结构层,其性能受温度、雨水、车辆轴载及紫外线等因素的影响较大。沥青路面在夏季高温环境中、在车辆轴载作用下易形成车辙,在降雨较多的地区易发生水损害,且紫外线的长期作用也容易使沥青老化<sup>[1-4]</sup>。为缓解车辙病害,道路工作者做了大量研究,例如,通过加入高黏剂改善路面结构层的高温抗车辙能力等。如何改善沥青混合料的力学性能,提高路面结构层的高温抗车辙性能及抗疲劳性能,延长路面的运营年限成为道路工作者关注的重点。宋乐春等<sup>[5]</sup>研发的 AM 系列高黏剂能够适应不同的气候环境,其中 AM-1 更适用于南方多雨地区,AM-2 更适用于北方夏季高温地区。汪于凯等<sup>[6]</sup>对不同种类的高模量沥青混合料的动、静态模量进行了研究,认为在低频条件下二者存在指数关系。王知乐等<sup>[7]</sup>应用 Superpave 法将 PP,HDPE 和 EVA 3 种高模量改性剂及 SBR 改性剂掺入到沥青混合料中进行车辙及低温抗裂试验,结果表明,沥青混合料的高温抗车辙性能及低温抗裂性能均得到了大幅改善。戚林玲等<sup>[8]</sup>将硬质沥青及高黏剂掺入到混合料中进行车辙及动态模量试验,结果表明,沥青混合料的高温抗车辙性能及动态模量均得到了大幅改善,其中高温抗车辙性能增强了 1.6 倍。刘华敏<sup>[9]</sup>将湖沥青掺入到混合料中进行车辙及抗水损害试验,结果表明,掺入湖沥青的混合料更适合湿热地区。本研究选取 RA,PR.M 和 BRA 3 种高黏剂,针对 AC-13C 和 AC-20C 两种级配类型,开展不同浸水时长、不同试验温度时沥青混合料的吸水特性以及不同高黏剂、不同试验温度、不同吸水率时沥青混合料的高温抗车辙性能及抗疲劳性能的研究,为高模量沥青路面的推广应用提供一定的理论基础<sup>[10-11]</sup>。

## 1 原材料及配合比设计

### 1.1 沥青

沥青种类对路面结构的性能起着决定性的作用。本研究选用 70<sup>#</sup> A 级道路石油沥青进行研究,其主要技术指标的试验结果见表 1。

表 1 70<sup>#</sup> A 级道路石油沥青主要技术指标试验结果

Table 1 Test results of main technical indexes of 70<sup>#</sup> A grade road asphalt

检测项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃)/(0.1 mm)	60~80	72
软化点/℃	≥46.0	48.5
延度(5 cm/min,15℃)/cm	≥100	135
闪点/℃	≥260	267
针入度指数	-1.5±1.0	-0.6
60℃动力黏度/(Pa·s)	≥180	206
蜡含量(蒸馏法)/%	≤2.2	1.6
溶解度/%	≥99.5	99.9
质量变化/%	±0.80	-0.14
RTFOT 后残留物		
针入度比(25℃)/%	≥61	67
残留延度(10℃)/cm	≥6	23

### 1.2 改性剂

高黏剂在 100℃以上的高温条件下会软化,能很好地溶解到混合料中,并与沥青胶浆一起填充到混合料孔隙中,冷却后又能在混合料内部起到填充、增韧、胶结作用,可避免矿料相互错动,从而提高混合料的模量。本研究对掺入 RA,PR.M 和 BRA 3 种高黏剂的 AC-13C 和 AC-20C 两种沥青混合料的相关性能进行研究。其中,PR.M 由法国研发,能提高沥青混合料高温抗车辙及耐久性能,在西欧得到广泛推广;RA 能改善树脂合金的某些特性,从而生产出特殊性能的材料;BRA 作为一种天然固态沥青,形成周期较长,性能稳定,具有很好的路用性能。3 种高黏剂如图 1 所示。

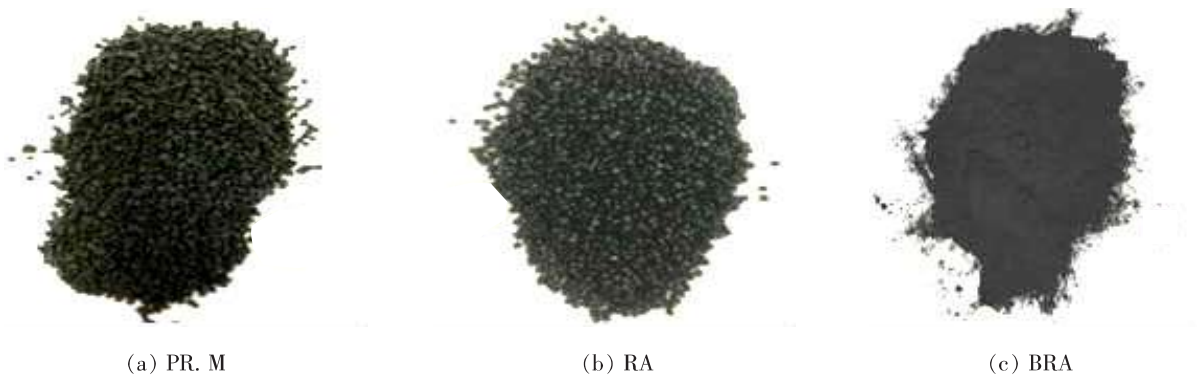


图 1  3 种高黏剂图示

Fig. 1  Diagrams of three kinds of high viscosity agents

1.3  配合比设计及马歇尔试验结果

本研究对 AC-13C 和 AC-20C 两种类型的沥青混合料进行研究。粗骨料分别为 3~5,5~10,10~15 和 10~20 mm 石灰岩碎石,细骨料为 0~3 mm 石灰岩机制砂,填料为矿粉,粗、细骨料及矿粉的主要技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的要求。AC-13C 和 AC-20C 矿料级配设计结果见表 2。通过关键筛

孔 2.36,4.75 mm 的质量百分率分别为 36.1%,39.7%。在沥青混合料配合比设计时 PR. M 掺量分别为 0.40%,0.45%和 0.50%,RA 掺量分别为 0.35%,0.40%和 0.45%,BRA 掺量分别为 3.00%,3.50%和 4.00%。掺入不同高黏剂的 AC-13C 和 AC-20C 沥青混合料的最佳油石比及马歇尔试验结果见表 3 和表 4。

表 2  矿料级配设计结果

Table 2  Design results of aggregate gradation

级配类型	类别	通过下列筛孔(mm)的质量百分率											%
		19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC-13C	上限	100.0	100.0	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0	
	下限	100.0	100.0	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0	
	目标级配	100.0	100.0	94.6	75.7	54.0	36.1	28.6	19.7	14.1	9.3	6.1	
AC-20C	上限	100.0	92.0	80.0	72.0	56.0	44.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0	
	下限	90.0	78.0	62.0	50.0	26.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0	
	目标级配	94.1	86.4	72.3	63.4	39.7	29.0	21.4	15.3	11.6	9.4	6.3	

表 3  AC-13C 沥青混合料最佳油石比及马歇尔试验结果

Table 3  Optimal oil-stone ratio and Marshall test results of AC-13C asphalt mixture

沥青混合料类型	最佳油石比/%	孔隙率/%	毛体积相对密度	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
道路石油沥青	4.7	4.5	2.443	14.9	68.3	11.3	2.6
0.40%PR. M	4.7	4.6	2.439	14.8	69.7	14.7	3.0
0.45%PR. M	4.8	4.4	2.436	14.7	67.4	15.0	3.2
0.50%PR. M	4.9	4.3	2.434	14.6	68.5	15.6	3.4
0.35%RA	4.7	4.6	2.436	14.8	69.1	13.8	2.9
0.40%RA	4.8	4.5	2.432	14.9	68.5	14.3	3.1
0.45%RA	4.8	4.5	2.435	14.8	68.0	15.5	3.2
3.00%BRA	4.7	4.6	2.439	14.6	67.4	14.2	3.1
3.50%BRA	4.8	4.5	2.436	14.5	68.4	15.7	3.3
4.00%BRA	4.8	4.4	2.437	14.4	67.9	16.1	3.6

表 4 AC-20C 沥青混合料最佳油石比及马歇尔试验结果

Table 4 Optimal oil-stone ratio and Marshall test results of AC-20C asphalt mixture

沥青混合料类型	最佳油石比/%	孔隙率/%	毛体积相对密度	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
道路石油沥青	4.2	4.7	2.456	13.9	67.6	12.5	2.4
0.40%PR.M	4.2	4.7	2.452	14.1	68.7	15.7	2.8
0.45%PR.M	4.3	4.8	2.448	14.2	69.4	15.9	3.0
0.50%PR.M	4.3	4.8	2.446	14.3	68.3	16.9	3.1
0.35%RA	4.2	4.7	2.454	13.9	69.7	15.0	2.9
0.40%RA	4.3	4.9	2.450	14.0	70.3	15.6	3.1
0.45%RA	4.3	4.7	2.451	13.8	70.9	16.0	3.3
3.00%BRA	4.2	4.8	2.457	13.9	70.6	15.4	3.0
3.50%BRA	4.3	4.9	2.453	14.3	71.0	16.0	3.1
4.00%BRA	4.4	4.7	2.451	13.8	71.4	16.6	3.4

2 吸水试验

本试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的规定成型马歇尔试件。将 AC-13C 和 AC-20C 试件分别浸泡在 40 ℃

和 60 ℃ 水中,记录不同浸水时长的普通沥青混合料及 3.50%BRA 高黏剂沥青混合料马歇尔试件的质量。用不同浸水时长的吸水量除以试件饱和时的吸水量作为试件的吸水率,评价不同水温及浸水时长下沥青混合料的吸水能力。沥青混合料吸水量及吸水率试验结果分别见图 2 和图 3。

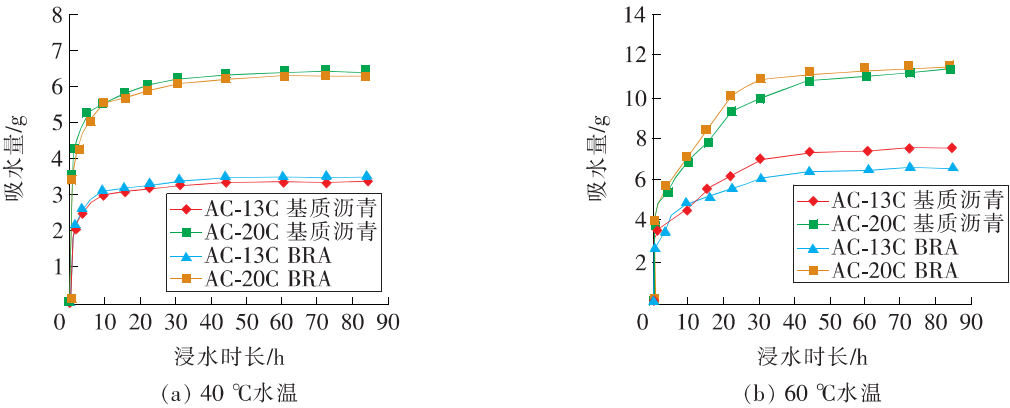


图 2 沥青混合料吸水量随浸水时长变化的关系曲线

Fig. 2 Relation curves of water absorption capacity of asphalt mixture changing with immersion duration

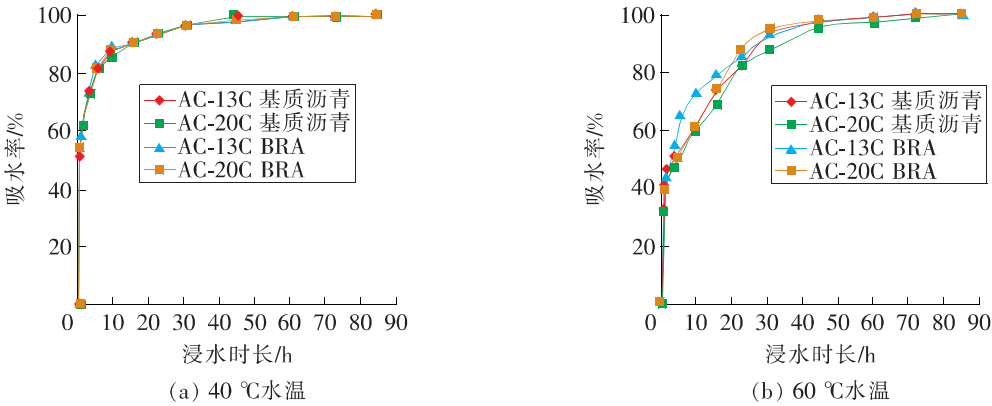


图 3 沥青混合料吸水率随浸水时长变化的关系曲线

Fig. 3 Relation curves of water absorption of asphalt mixture changing with immersion duration

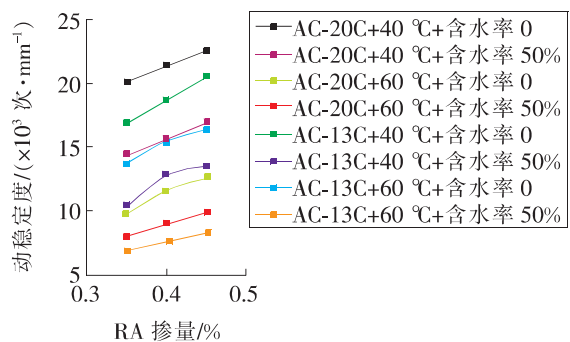


分析图 2 和图 3 可知:在级配类型和水温相同时,随着浸水时间的增长,普通沥青混合料、3.50% BRA 沥青混合料的吸水量与吸水率变化趋势一致;在级配类型及浸水时长相同时,水温越高沥青混合料的吸水量越大,而吸水率越小;在浸水时长及水温相同时,AC-20C 沥青混合料吸水量明显大于 AC-13C 沥青混合料的;在相同条件下,普通沥青混合料与 3.50% BRA 沥青混合料吸水量相差不大,AC-20C 沥青混合料达到饱和状态所需的时间更长。

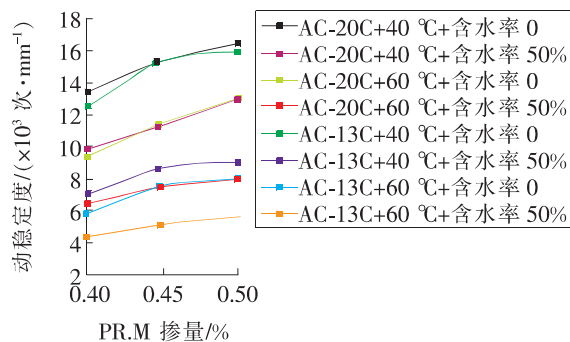
### 3 高温稳定性试验

高温稳定性是指路面结构层在高温条件下抵

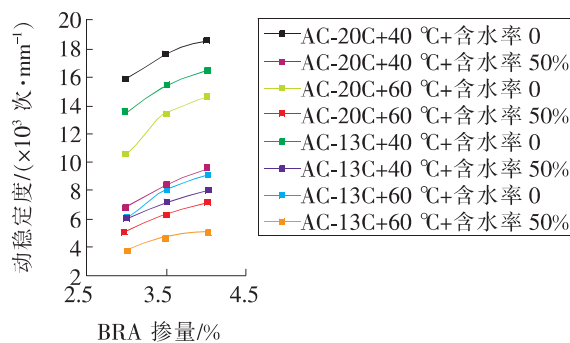
抗车辆轴载塑性变形的能力。车辙、拥包、泛油等路面病害是沥青混合料高温稳定性差的主要表现形式。相关研究发现,在高温多雨地区更易出现路面车辙病害。目前,关于沥青混合料高温抗车辙能力的研究较多,且理论也比较成熟,但关于水-温耦合作用下沥青混合料抗车辙能力的研究较少<sup>[12-19]</sup>。本研究在不同 RA, PR.M 和 BRA 掺量的基础上,对 AC-13C 和 AC-20C 两种沥青混合料在水-温耦合条件下开展动稳定度试验。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的规定,在自动车辙试验仪中、在 40 ℃ 和 60 ℃ 温度下对试件进行不同时长的保养。不同含水率及车辙试验温度下动稳定度试验结果见图 4,不同保养时长及车辙试验温度下动稳定度试验结果见图 5。



(a) 掺入 RA



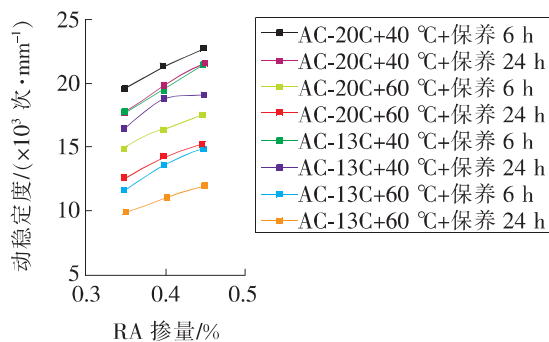
(b) 掺入 PR.M



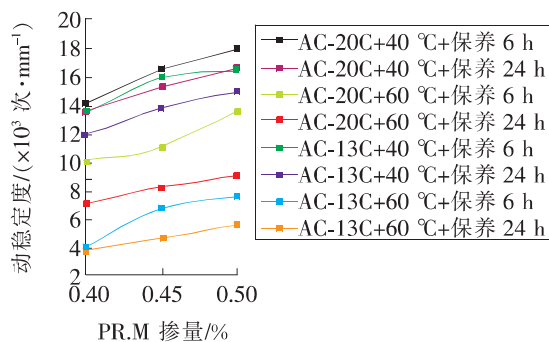
(c) 掺入 BRA

图 4 不同含水率及车辙试验温度下动稳定度试验结果

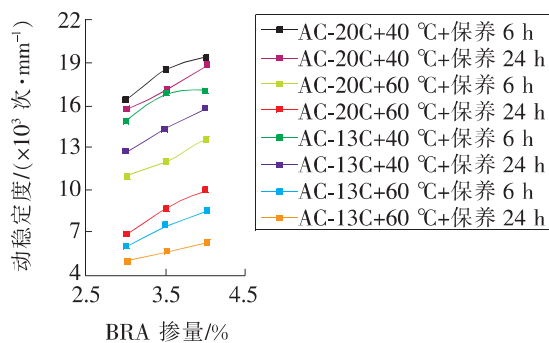
Fig. 4 Dynamic stability test results under different moisture content and rutting test temperatures



(a) 掺入 RA



(b) 掺入 PR.M



(c) 掺入 BRA

图 5 不同保养时长及车辙试验温度下动稳定度试验结果

Fig. 5 Dynamic stability test results under different maintenance duration and rutting test temperatures

分析图 4 和图 5 可知:含水率、试验温度、矿料级配、试件养护时长、高黏剂种类及掺量对沥青混合料高温抗车辙能力均有较大的影响;在相同条件下,含水率越大、试验温度越高、高温养护时间越长,沥青混合料动稳定度越小;高黏剂掺量越大,沥青混合料动稳定度越大。此外,AC-20C 级配的高温抗车辙能力优于 AC-13C 级配的,掺入 RA 沥青混合料的高温抗车辙能力整体优于分别掺入 PR.M,BRA 沥青混合料的。

4 疲劳性能试验

在高温多雨地区,沥青路面受车辆轴载及雨水冲刷的共同作用。相关研究表明,水和高温对沥青混合料的疲劳性能都有影响,但关于二者耦合作用下沥青混合料疲劳性能的研究却很少<sup>[20-24]</sup>。为保证沥青路面在运营阶段具有足够长的疲劳寿命,本研究对水-温耦合作用下沥青混

合料的疲劳性能展开试验研究。试验条件为:① 轮碾法成型车辙板,并切割成 380 mm×(50±5)mm×(63.5±5)mm 的小梁试件(见图 6);② 选用 UTM-100 万能动态伺服液压材料试验机,以应力控制的方式进行加载,频率为 10 Hz,相邻两波间隔 0 s 的半正弦波;③ 应力比分别为 0.2,0.4 和 0.6;④ 试验温度分别为 15 ℃和 40 ℃,均考虑浸水和不浸水两种情况;⑤ RA,PR.M 和 BRA 3 种高黏剂掺量分别为 0.40%,0.45%和 3.50%。3 种高黏剂沥青混合料三点疲劳弯曲试验结果见表 5~7。



图 6 小梁试件

Fig. 6 Beam specimens

表 5 掺入 RA 的沥青混合料疲劳寿命的试验结果

Table 5 Test results of fatigue life of asphalt mixture mixed with RA

级配类型	试验温度/℃	应力比	吸水率为 0 时		吸水率为 100%时	
			加载应力/MPa	疲劳寿命/次	加载应力/MPa	疲劳寿命/次
AC-20C	15	0.2	180.5	23 899	146.3	16 909
		0.4	361.0	8 097	292.6	5 227
		0.6	541.5	1 582	438.9	1 436
	40	0.2	71.2	4 544	60.7	3 454
		0.4	142.4	1 147	121.4	758
		0.6	213.6	367	182.1	302
AC-13C	15	0.2	172.4	26 703	179.6	18 311
		0.4	344.8	6 149	359.2	3 316
		0.6	517.2	1 248	538.8	792
	40	0.2	69.5	5 547	67.4	3 884
		0.4	139.0	731	134.8	456
		0.6	208.5	231	202.2	127

分析表 5~7 可知:试验温度、加载应力、吸水率、矿料级配均对 AC-13C 和 AC-20C 两种沥青混合料的疲劳寿命有很大的影响。随着试验温度的升高、加载应力和吸水率的增大,两种沥青混合料的疲劳寿命均有所缩短。沥青路面是一种柔性结构层,所用材料为黏弹性材料,其疲劳性能对温度较敏感。当温度升高时,疲劳寿命会大幅缩短。随

着温度的升高,掺入 PR.M 沥青混合料的疲劳寿命的下降速度小于分别掺入 RA,BRA 沥青混合料的。在 40 ℃试验条件下,掺入 3 种高黏剂的沥青混合料的疲劳寿命相差不大;在 15 ℃试验条件下,掺入 PR.M 沥青混合料的疲劳寿命最短。两种矿料级配各有优劣,在低温、低应力条件下 AC-13C 沥青混合料的疲劳寿命长于 AC-20C 沥青混合料的。

表 6  掺入 PR.M 的沥青混合料疲劳寿命的试验结果

Table 6  Test results of fatigue life of asphalt mixture mixed with PR.M

级配类型	试验温度/℃	应力比	吸水率为 0 时		吸水率为 100%时	
			加载应力/MPa	疲劳寿命/次	加载应力/MPa	疲劳寿命/次
AC-20C	15	0.2	175.4	21 010	137.6	13 724
		0.4	350.8	5 715	275.2	3 950
		0.6	526.2	1 087	412.8	924
	40	0.2	81.7	5 739	76.1	4 088
		0.4	163.4	1 405	152.2	958
		0.6	245.1	504	228.3	395
AC-13C	15	0.2	157.9	22 712	165.1	14 701
		0.4	315.8	4 700	330.2	2 480
		0.6	473.7	824	495.3	592
	40	0.2	84.3	5 816	76.8	4 216
		0.4	168.6	1 158	153.6	791
		0.6	252.9	415	230.4	366

表 7  掺入 BRA 的沥青混合料疲劳寿命的试验结果

Table 7  Test results of fatigue life of asphalt mixture mixed with BRA

级配类型	试验温度/℃	应力比	吸水率为 0 时		吸水率为 100%时	
			加载应力/MPa	疲劳寿命/次	加载应力/MPa	疲劳寿命/次
AC-20C	15	0.2	181.9	25 231	151.7	15 794
		0.4	363.8	6 920	303.4	5 227
		0.6	545.7	1 084	455.1	825
	40	0.2	66.0	4 717	55.2	3 155
		0.4	132.0	956	110.4	630
		0.6	198.0	437	165.6	268
AC-13C	15	0.2	176.6	25 840	186.1	16 711
		0.4	353.2	5 682	372.2	3 119
		0.6	529.8	724	558.3	592
	40	0.2	51.4	4 845	45.7	3 817
		0.4	102.8	797	91.4	586
		0.6	154.2	331	137.1	201

5  结  论

本研究通过对掺入 3 种高黏剂的 AC-13C 和 AC-20C 沥青混合料进行配合比设计,并对其水—温耦合作用下的吸水、高温抗车辙及抗疲劳性能进行研究,得出以下结论:

1) 在级配类型相同时,高黏剂的种类及掺量

对沥青混合料最佳油石比的影响不大。在相同条件下,随着浸水时间的增长,沥青混合料吸水量与吸水率变化趋势一致,但试验温度越高沥青混合料的吸水量越大,吸水率越小,AC-20C 沥青混合料的吸水量明显大于 AC-13C 沥青混合料的,且 AC-20C 沥青混合料达到饱和状态所需的时间更长。

2) 在相同条件下,含水率越大、试验温度越



高、高温养护时间越长,沥青混合料的动稳定度越小;高黏剂掺量越大,沥青混合料的动稳定度越大。AC-20C 沥青混合料的高温抗车辙能力优于 AC-13C 沥青混合料的;掺入 RA 沥青混合料的高温抗车辙能力整体优于分别掺入 PR、M、BRA 沥青混合料的。随着试验温度的升高、加载应力和吸水率的增大,AC-13C 和 AC-20C 两种沥青混合料的疲劳寿命均有所缩短。在低温、低应力条件下 AC-13C 沥青混合料的疲劳寿命长于 AC-20C 沥青混合料的。

### 〔参考文献〕

- [1] 高明. 高模量沥青混凝土对沥青路面结构的高温受力影响分析[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 283-287.  
GAO Ming. Influence of high modulus asphalt concrete on high temperature stress of asphalt pavement structure[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1): 283-287.
- [2] 蔡旭, 祝凤丹, 吴旷怀. 沥青混合料骨架稳态参数及模型[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 39-46, 96.  
CAI Xu, ZHU Feng-dan, WU Kuang-huai. Steady state parameters and model of asphalt mixture skeleton[J]. Journal of China Highway, 2019, 32(2): 39-46, 96.
- [3] 李剑波, 肖雷. 高模量沥青混合料在高速公路养护工程中的应用分析[J]. 中国建材科技, 2018, 27(6): 28-29, 6.  
LI Jian-bo, XIAO Lei. Application analysis of high modulus asphalt mixture in expressway maintenance engineering[J]. China Building Materials Science & Technology, 2018, 27(6): 28-29, 6.
- [4] 高晓伟, 颜薇, 宋琿, 等. 温度与移动荷载作用下特重交通 RCC 基层沥青路面结构响应分析[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 28-33.  
GAO Xiao-wei, YAN Wei, SONG hui, et al. Structural response analysis of RCC base asphalt pavement under temperature and moving load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 28-33.
- [5] 宋乐春, 李志军, 陈保莲, 等. 高模量沥青混凝土添加剂研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 1 221-1 224.  
SONG Le-chun, LI Zhi-jun, CHEN Bao-lian, et al. Study on additives for high modulus asphalt concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4): 1 221-1 224.
- [6] 汪于凯, 李立寒, 孙艳娜. 高模量沥青混合料模量的试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(2): 194-198.  
WANG Yu-kai, LI Li-han, SUN Yan-na. Experimental study on modulus of high modulus asphalt mixture[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2014, 36(2): 194-198.
- [7] 王知乐, 袁学锋. 高模量 Superpave 混合料的抗车辙性能影响机理分析及强化方法研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(6): 119-123.  
WANG Zhi-le, YUAN Xue-feng. Influence mechanism analysis and strengthening method of high modulus Superpave mixture on rutting resistance[J]. Industrial Construction, 2018, 48(6): 119-123.
- [8] 戚林玲, 龚建君, 王晓菲, 等. 基于抗车辙性能提升的复合高模量沥青混合料研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(2): 9-11.  
QI Lin-ling, GONG Jian-jun, WANG Xiao-fei, et al. Research on composite high modulus asphalt mixture based on improvement of anti-rutting performance[J]. Engineering and Technology Research, 2019, 4(2): 9-11.
- [9] 刘华敏. 适用于湿热地区的湖沥青改性高模量沥青混合料设计与关键性能评价[J]. 福建交通科技, 2018(5): 18-21, 48.  
LIU Hua-min. Design and key performance evaluation of lake asphalt modified high modulus asphalt mixture for hot and humid areas[J]. Fujian Transportation Science and Technology, 2018(5): 18-21, 48.
- [10] 陈雍春. 高黏剂掺拌方法及掺量的研究[J]. 中国水运, 2017, 17(7): 370-372.  
CHEN Yong-chun. Study on mixing method and dosage of high modulus agent[J]. China Water Transport, 2017, 17(7): 370-372.
- [11] 黄民如. 减薄高模量沥青路面厚度的可行性分析[J]. 广东公路交通, 2018, 44(1): 26-30, 34.  
HUANG Min-ru. Feasibility analysis of thinning high modulus asphalt pavement thickness[J]. Highway Traffic in Guangdong, 2018, 44(1): 26-30, 34.
- [12] 陈红奎. 稳定型橡胶沥青混合料性能研究[J]. 河南科学, 2019, 37(12): 1 988-1 992.  
CHEN Hong-kui. Performance of stabilized rubber asphalt mixture[J]. Henan Science, 2019, 37(12): 1 988-1 992.
- [13] 张楠, 郑南翔, 高志敏. 中空聚酯纤维沥青混合料的热阻及路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10): 19-25.

- ZHANG Nan, ZHENG Nan-xiang, GAO Zhi-min. Study on thermal resistance and road performance of hollow polyester fiber asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(10): 19-25.
- [14] 马立杰, 杨春风. 掺入纤维对高模量沥青混合料柔韧性及路用性能影响研究[J]. 功能材料, 2019, 50(1): 164-173, 177.
- MA Li-jie, YANG Chun-feng. Research on the influence of fiber on the flexibility and road performance of high modulus asphalt mixture[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(1): 164-173, 177.
- [15] 郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1): 1-7.
- ZHENG Jian-long. New idea of durability asphalt pavement design based on increasing life of structural layer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1): 1-7.
- [16] 王庆, 李文凯. 盐-雾耦合作用对沥青混合料路用性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 9-15.
- WANG Qing, LI Wen-kai. Influence of salt-fog coupling on the pavement performance of asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2020, 17(4): 9-15.
- [17] 代霞. 不同工艺制备的 SBS 改性沥青混合料性能研究[J]. 公路与汽运, 2020(6): 53-56, 60.
- DAI Xia. Study on performance of SBS modified asphalt mixture with different technologies [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6): 53-56, 60.
- [18] 李献勇. 玄武岩纤维在重载交通沥青路面中的应用研究[J]. 河南科学, 2019, 37(5): 792-796.
- LI Xian-yong. Application of basalt fiber in heavy traffic asphalt pavement[J]. Henan Science, 2019, 37(5): 792-796.
- [19] 刘建芳, 李九苏, 杨帆, 等. 反应型冷拌沥青混合料制备及性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 16-20.
- LIU Jian-fang, LI Jiu-su, YANG Fan, et al. Research on reactive liquid asphalt mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 16-20.
- [20] 周彦鎏. PR. P 高模量沥青混合料的动态模量及疲劳性能研究[J]. 中外公路, 2017, 37(6): 292-295.
- ZHOU Yan-yun. Study on dynamic modulus and fatigue performance of PR. P high modulus asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(6): 292-295.
- [21] 余波, 施晓强, 王力. 高模量沥青及混合料疲劳性能评价研究[J]. 材料导报, 2014, 28(S2): 353-355.
- YU Bo, SHI Xiao-qiang, WANG Li. Study on fatigue performance evaluation of high modulus asphalt and mixture [J]. Materials Review, 2014, 28(S2): 353-355.
- [22] 杨琳. 基于低标号沥青与岩沥青掺配技术高模量沥青混合料耐久性试验研究[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 297-301.
- YANG Lin. Experimental study on durability of high modulus asphalt mixture based on blending technology of low grade asphalt and rock asphalt [J]. Highway Engineering, 2016, 41(4): 297-301.
- [23] 陆青清, 孙艳娜. 基于疲劳寿命的高模量材料结构层适用性研究[J]. 上海公路, 2017(1): 16-19, 4.
- LU Qing-qing, SUN Yan-na. Study on the applicability of high modulus material structure layer based on fatigue life [J]. Shanghai Highways, 2017(1): 16-19, 4.
- [24] 徐明非, 郭平, 李俊. 蒙脱土/SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(1): 4-7.
- XU Ming-fei, GUO Ping, LI Jun. Study on road performance of montmorillonite/SBS composite modified asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(1): 4-7.