

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211227001

文章编号: 1674-599X(2023)02-0008-08

引用格式: 李九苏, 保安青, 姜舜君. 超高模量沥青混凝土的制备与路用性能研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 8-15.

Citation: LI Jiusu, BAO Anqing, JIANG Shunjun. Study on preparation and pavement performance of ultra-high modulus asphalt concrete [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 8-15.

超高模量沥青混凝土的制备与路用性能研究

李九苏, 保安青, 姜舜君

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对高模量沥青混凝土(HMAC)在重复重载作用下出现的车辙及低温开裂等问题, 用两种沥青胶结料(高黏度沥青、30#硬质沥青)和两种细集料(石英砂、金刚砂)制作3种级配(EME-14、AC-13、SMA-10)的超高模量沥青混凝土(UHMAC)进行试验, 研究不同沥青胶结料和细集料及掺量对UHMAC的影响。试验结果表明: 高黏度沥青胶结料可进一步提高UHMAC的高温抗车辙性能, 且其低温抗开裂性较30#硬质沥青胶结料的更好; 以金刚砂为细集料的UHMAC耐高温性好, 金刚砂对UHMAC动态模量的良性影响大于石英砂的; 最优配比的UHMAC的动态模量可达28 956 MPa, 为规范要求的2.07倍, 且其高温性能、低温性能和抗水损性能均较优异。

关键词: 动态模量; 车辙; 高温性能; 路用性能

中图分类号: TU528.42

文献标志码: A

Study on preparation and pavement performance of ultra-high modulus asphalt concrete

LI Jiusu, BAO Anqing, JIANG Shunjun

(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Aiming at the problems of rutting and low temperature cracking of high modulus asphalt concrete (HMAC) induced by the repeated heavy load, the influence of the asphalt binder, fine aggregate type and content on the pavement performance of the UHMAC was studied. To prepare three gradation types (EME-14, AC-13, SMA-10) of ultra-high modulus asphalt concrete specimens, two kinds of asphalt binders (high viscosity asphalt and 30#original asphalt) and two kinds of fine aggregates (quartz sand and carborundum) are designed. The test results show that, the high-temperature rutting resistance performance of the UHMAC can be improved further by high viscosity asphalt, and the low-temperature cracking resistance performance is better than that of 30# original asphalt concrete. The HMAC with carborundum sand has good high-temperature resistance performance, and the positive effect on the dynamic modulus of the UHMAC is greater than that of quartz sand. The dynamic modulus of the UHMAC with optimal proportion can reach 28 956 MPa, that is about 2.07 times of the specification requirement. Furthermore, the high temperature performance, low temperature performance and anti-water damage property are also excellent.

Key words: dynamic modulus; rutting; high temperature performance; pavement performance

20世纪60年代, 法国研究人员首次将高模量沥青胶结料(high modulus asphalt binder, HMAB)掺入沥青混凝土中, 配制出高模量沥青混凝土(high

modulus asphalt concrete, HMAC), 改善沥青混凝土因交通量的增加产生的永久变形^[1-2]。近年来, 在道路与机场跑道建设中, HMAC的使用大幅提高了路

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178411); 长沙市自然科学基金资助项目(2021cskj007)

作者简介: 李九苏(1972—), 男, 长沙理工大学教授。

面质量。其主要原因是提高沥青混凝土的模量,减少了车辆荷载作用下对沥青混凝土产生的塑性变形,改善了路面高温抗车辙性能和沥青混凝土的抗疲劳性能,延长了路面的使用寿命^[3-4]。尽管HMAC的设计没有统一的标准和性能要求,但依据法国规范标准,高模量沥青混凝土主要设计要求为^[5-6]:①采用高模量沥青胶结料以满足混合料的高模量的要求,其指标为HMAC在15℃、10 Hz情况下的动态模量达到14 000 MPa以上;②在HMAC的配合比设计中,建议使用较细粒径的集料,采用较高的沥青用量(油石比为5.5%~6.5%),以及低空隙率(3%左右),提高其抗裂性能;③配合比设计要满足路用水稳定性能、抗车辙性能、抗开裂性能等要求。而HMAB又可分为三大类^[7-8]:①低针入度和高软化点的硬质铺路沥青;②天然沥青改性沥青(如湖沥青和岩沥青)^[9];③掺入高模量等外掺剂的改性沥青。

因HMAC具有良好的抗车辙性能,在许多欧洲国家越来越受到重视。但随着HMAC的使用得越来越频繁时,其低温性能不足的缺点也逐渐暴露出来。1997年,在加拿大魁北克省的8 km试验路段中,其路面表层和HMAC层均使用了松弛能力较差的硬质铺路沥青,导致了路面早期疲劳开裂^[10]。RYS等^[11]对波兰HMAC低温性能进行分析表明:HMAC基层路面的开裂概率是传统沥青混凝土基层路面的2.45倍。GENG等^[12]经过研究发现,虽然HMAB的60℃复数剪切模量高于SBS改性沥青混凝土的,但是其低温抗裂性却显著低于传统沥青混凝土的。许多学者针对HMAC低温性能提出了改进方案,崔华杰等^[13]开发了聚烯烃类改性剂,提高了HMAC的低温抗裂性。WANG等^[14-15]总结了高模量沥青混凝土的相关研究,指出HMAC虽然具有极好的抗疲劳性能,但是其低温性能较差,研究结果还表明:使用SBS或胶粉等材料能够改善HMAC的低温性能。现有HMAC的设计主要从沥青胶结料、材料组成和路用性能等方面进行。虽然使用硬质沥青可以提高沥青混凝土的抗车辙能力,但是其低温开裂在服役期间愈加显著,且在重复重载交通和夏季高温时,HMAC后期仍会出现严重的车辙。因此,本研究通过使用不同沥青胶结料和集料及掺量制备HMAC进行试验,研究超高模量沥青混凝土(ultra-high modulus asphalt concrete, UHMAC)的最佳配合比,以提高UHMAC在重复重载交通和高温时的路用性能。

1 原材料

1.1 沥青胶结料

HMAC常采用低标号的硬质沥青,其在具有优异抗车辙性能的同时,也极易产生低温开裂现象。本研究通过试验,采用外掺法确定一种高黏度沥青胶结料,其配合比例为70#基质沥青:SBS:X-additive高黏改性剂:石墨烯粉末=1:0.050:0.040:0.006。该胶结料兼备良好的高低温性能。为避免SBS掺量过多而导致离析现象,掺入少量的石墨烯粉末,提高该胶结料的高温稳定性。本试验还选用30#硬质沥青作为胶结料,制备UHMAC,进行路用性能对比研究。两种沥青胶结料基本指标见表1~2。经实测,高黏度沥青胶结料满足规范《高黏高弹道路沥青》(GB/T 30516—2014)中AVE-1桥面铺装用高黏高弹道路沥青的技术要求。30#硬质沥青胶结料满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG40—2019)(以下简称规范)有关C级30#道路石油沥青的要求。

表1 高黏度沥青技术指标

Table 1 Technical indexes of high viscosity asphalt

指标	实测值	规范值
针入度 25℃/(0.1 mm)	43	40~80
软化点/℃	90.1	≥70
5℃延度/cm	44.7	≥20
135℃布氏黏度/(Pa·s)	3.81	
60℃动力黏度/(Pa·s)	81 000	≥20 000
黏附等级	5	
25℃弹性恢复/%	96	≥85
离析/℃	1.5	≤2.5

表2 低标号道路石油沥青试验结果

Table 2 Test results of low grade road petroleum asphalt

指标	实测值	规范值
针入度 25℃/(0.1 mm)	34	20~40
软化点/℃	72.6	50
15℃延度/cm	37.5	20
60℃动力黏度/(Pa·s)	920	≥260
闪点(COC)/℃	283	≥260

1.2 集料

为提高沥青混凝土的抗车辙性能,HMAC要求集料拥有较高的内摩擦角和嵌挤力。本试验采用玄武岩为粗集料,石英砂和金刚砂为细集料。其

中,石英砂主要成分为二氧化硅,性质稳定,耐磨性好,价格低廉。金刚砂主要成分为碳化硅,自锐性好,耐高温,热态性能稳定。粗细集料及矿粉均按标准试验规程进行了试验,其指标均满足现行规范要求。

2 级配及试验方案设计

2.1 级配设计

目前,法国较为成熟的级配为EME级配,其应用范围较为广泛。根据HMAC设计要求,结合实际情况应用,在中国较为适合的级配为AC级配和SMA级配。因此,本研究选用EME-14,AC-13和SMA-10作为级配进行试验研究。法国的级配仅对4个粒径做出最低分配要求(16 mm;5~10 mm;3~5 mm;0~3 mm),而AC-13与SMA-10则要求更为详细,对各个粒径都规定了级配上下限。针对不同要求,计算出3种集料配合比,其合成级配见表3~5。

法国级配以丰度系数 K (K 为沥青胶结料裹覆在集料表面的沥青膜常规厚度的一个比值)控制最低油石比,结合四水平性能试验确定。而对于AC-13和SMA-10,最佳沥青用量常采用马歇尔试验,通过孔隙率、矿料间隙率、沥青饱和度、稳定度等物理指标与油石比的关系计算得出。根据不同方法和前期试验,EME-14、AC-13、SMA-10这3种级配确定最佳油石比分别为6.3%、5.6%、6.2%。

表3 EME-14合成级配表

Table 3 The composite grading table for the EME-14

筛孔/mm	合成级配/%	级配上限/%	级配下限/%	目标值/%
14.000	96.7	100.0	90.0	-
12.500	92.0	-	-	-
10.000	79.1	-	-	-
8.000	68.7	-	-	-
6.300	61.6	70.0	50.0	60.0
4.000	42.1	60.0	40.0	50.0
2.000	29.9	38.0	25.0	31.5
1.000	17.9	-	-	-
0.314	9.7	-	-	-
0.250	8.9	-	-	-
0.080	6.4	-	-	-
0.063	5.6	7.7	5.4	6.6

表4 AC-13合成级配表

Table 4 The composite grading table for the AC-13

筛孔/mm	合成级配/%	级配上限/%	级配下限/%	级配中值/%
16.000	99.6	100.0	95.0	97.5
13.200	94.2	96.0	88.0	92.0
9.500	76.5	83.0	72.0	77.5
4.750	46.6	55.0	42.0	48.5
2.360	31.4	38.0	28.0	33.0
1.180	22.2	28.0	20.0	24.0
0.600	14.1	20.0	15.0	17.5
0.300	9.4	14.0	10.0	12.0
0.150	7.2	10.0	6.0	8.0
0.075	5.6	6.0	4.0	5.0

表5 SMA-10合成级配表

Table 5 The composite grading table for the SMA-10

筛孔/mm	合成级配/%	级配上限/%	级配下限/%	级配中值/%
13.200	100.0	100.0	100.0	100.0
9.500	96.0	100.0	90.0	95.0
4.750	31.0	60.0	28.0	44.0
2.360	26.0	32.0	20.0	26.0
1.180	21.0	26.0	14.0	20.0
0.600	17.0	22.0	12.0	17.0
0.300	14.0	18.0	10.0	14.0
0.150	11.5	16.0	9.0	12.5
0.075	9.5	13.0	8.0	10.5

2.2 试验方案

选用高黏度沥青和30#硬质沥青两种沥青作为胶结料,EME-14,AC-13和SMA-10作为级配,石英砂和金刚砂作为细集料,设计了30组沥青混凝土进行测试。主要试件制备方案见表6。

表6 UHMAC试件制备方案

Table 6 Preparation scheme for the UHMAC specimen

类别	EME-14	AC-13	SMA-10
高黏度沥青	A ₁₀	A ₂₀	A ₃₀
	A ₁₁	A ₂₁	A ₃₁
	A ₁₂	A ₂₂	A ₃₂
	A ₁₃	A ₂₃	A ₃₃
	A ₁₄	A ₂₄	A ₃₄
30号硬质沥青	B ₁₀	B ₂₀	B ₃₀
	B ₁₁	B ₂₁	B ₃₁
	B ₁₂	B ₂₂	B ₃₂
	B ₁₃	B ₂₃	B ₃₃
	B ₁₄	B ₂₄	B ₃₄

在表6中,A_{n0}、B_{n0}为全玄武岩集料对照组,A_{n1},

B_{n1} 为石英砂替换50%细集料的级配, A_{n2}, B_{n2} 为石英砂替换100%细集料的级配, A_{n3}, B_{n3} 为金刚砂替换50%细集料的级配, A_{n4}, B_{n4} 为金刚砂替换100%细集料的级配。为保证分析的准确性,后续试验均采用最佳油石比成型的试件进行性能测试。

3 试验结果分析

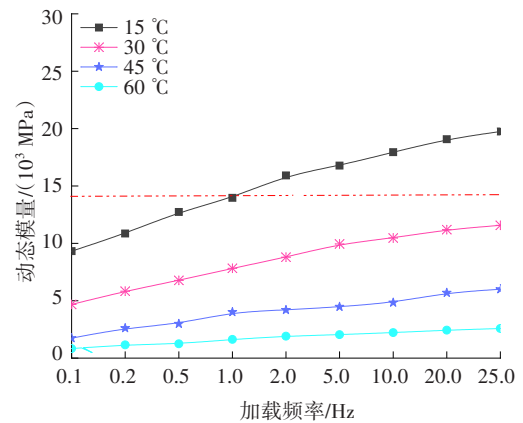
3.1 UHMAC动态模量测试与影响因素分析

根据法国规范对高模量沥青混凝土的定义,只有在15℃、10 Hz工况时,动态模量大于14 000 MPa的沥青混凝土才被称为HMAC。本试验选用旋转压实仪,按照规定以不同的试验温度和频率对试件施加正弦轴向压应力,获得对应时间的轴向应力和轴向应变,通过计算得到动态模量及变化趋势。该旋转压实仪测试的试件高170 mm,直径150 mm。将其切割成直径为 100 ± 2.0 mm、高为 150 ± 2.0 mm的圆柱形作为本试验的试件。为更好地模拟实况,根据法国规范要求,以半正弦荷载施压,采用138 kPa的围压,分别选取15、30、45和60℃4个温度,25.0、20.0、10.0、5.0、2.0、1.0、0.5、0.2、0.1 Hz 9个加载频率进行试验。

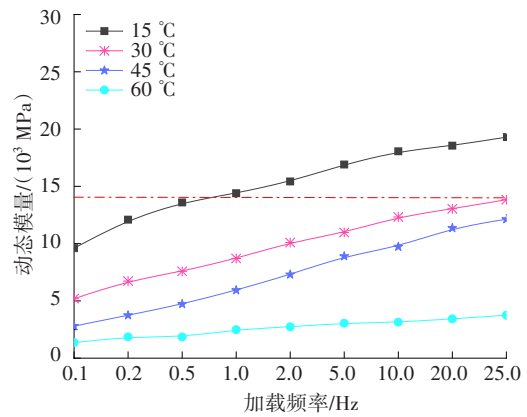
1) 沥青种类、温度和频率对动态模量的影响。

为分析沥青种类、温度和频率对动态模量的影响,仅针对 A_{n0}, B_{n0} 试件测试结果进行分析,其试验结果如图1所示。在图1中,以动态模量14 000 MPa为基准线,确定该混合料是否符合高模量沥青混凝土的基本要求。

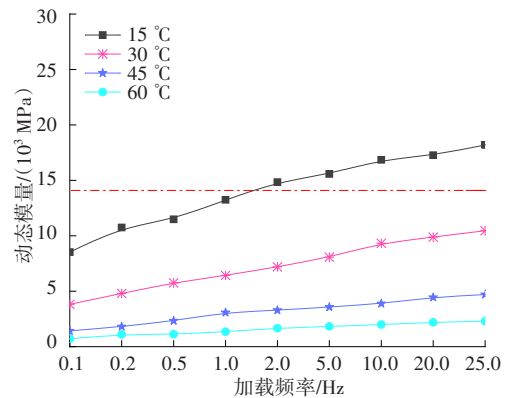
从图1可以看出,6组沥青混凝土在15℃、10 Hz时的动态模量均大于14 000 MPa,满足高模量沥青混凝土的基本要求。但这6种混合料类型的动态模量受温度和频率的影响很大,且规律相似。当加载频率一定时,动态模量随温度的上升而下降。而当温度一定时,动态模量随频率的增大而增加。该变化规律与已有的研究成果一致^[6]。其主要原因是随着温度升高,沥青胶结料逐渐变软,其抵抗变形的能力下降,因此动态模量降低。此外,动态模量的增长幅度也随温度的增加而增大。当频率增加时,沥青混凝土向弹性体转化,荷载对沥青混凝土的作用会因其黏弹特性而滞后,施加荷载时试件不会被瞬时压缩,卸除荷载时也不会瞬时回弹。因此,试件的动态模量表现得更大,这种滞后响应在频率增加时表现得更为明显。



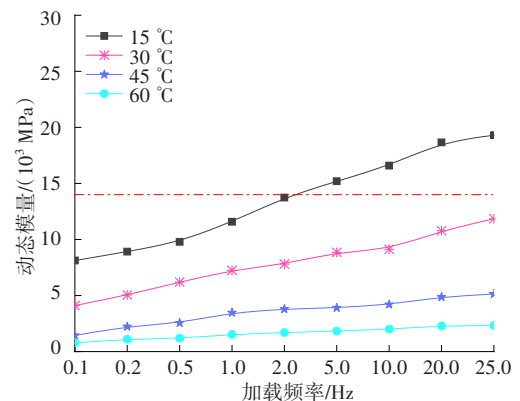
(a) A_{10} 动态模量试验结果



(b) A_{20} 动态模量试验结果



(c) A_{30} 动态模量试验结果



(d) B_{10} 动态模量试验结果

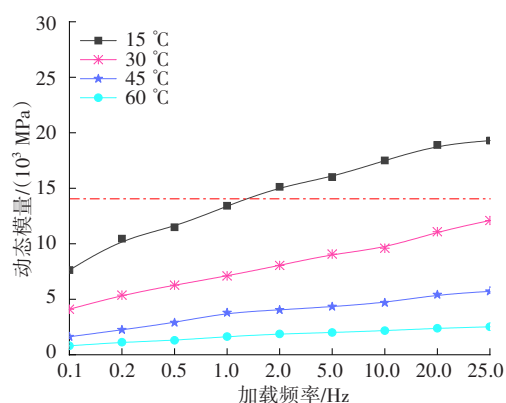
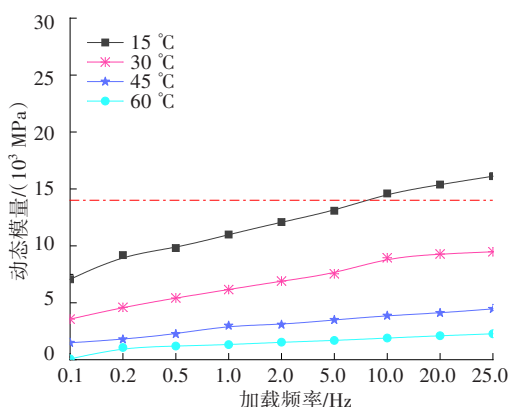
(e) B₂₀ 动态模量试验结果(f) B₃₀ 动态模量试验结果

图1 不同温度和频率时各类试件动态模量试验结果

Fig. 1 Dynamic modulus test results of specimens at different temperatures and frequencies

当加载频率为10 Hz时,6组沥青混凝土不同温度的试验结果如图2所示。

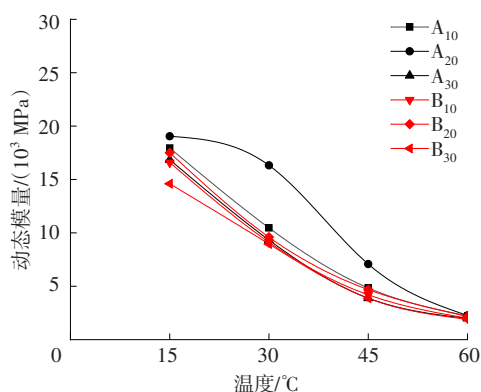


图2 10 Hz时不同类型沥青混凝土的动态模量

Fig. 2 Dynamic modulus of different types of asphalt concrete under the 10 Hz

从图2可以看出,高黏沥青组动态模量大小排序为: $A_{20} > A_{10} > A_{30}$,30#硬质沥青组动态模量大小排序为: $B_{20} > B_{10} > B_{30}$ 。对于同种级配类型, A_{n0} 的动态模量均高于 B_{n0} 的。其原因是 A_{n0} 采用高黏沥青为胶结

料,其软化点高达90.1 °C,较30#硬质沥青的更高,且高温稳定性更好,抗变形能力更强。因此,高黏沥青组混合料的动态模量均比硬质沥青的好。从图2还可以看出, A_{n0} 组试件在15 °C时动态模量相差不大,但随着温度升高, A_{20} 试件与其余试件动态模量有差异,呈先增大后减小趋势。其主要原因可能是AC级配属于悬浮密实型级配,由沥青胶结料提供的黏结力作为强度的主要来源。当温度为15~30 °C时,混合料动态模量的下降速率较慢,当温度达到60 °C时,高黏度沥青良好的黏结力失去优势。因此,60 °C时 A_{20} 的动态模量与其余组试件相差不大。SMA级配属于骨架密实型级配,主要由集料之间的嵌挤和摩阻力来提供强度,而沥青胶结料发挥的作用较小。因此,沥青性能的提升对混合料本身性能所带来的影响要小于 A_{20} 的,导致混合料的动态模量小于AC型级配混合料的。EME级配的主要控制指标为沥青用量和空隙率,强度来源于内部集料嵌挤和沥青本身的模量。由于沥青性能的提升与集料的嵌挤作用,使得各级配的动态模量的排序为:AC级配>EME级配>SMA级配。

2) 集料对动态模量的影响。

以15 °C、10 Hz的工况来分析集料对UHMAC的影响,采用同种沥青胶结料,不同细集料的各组沥青混凝土动态模量试验结果如图3所示。

从图3可看出,石英砂与金刚砂以不同比例替换玄武岩细集料后,各组试件动态模量均有提升。不同集料种类与其掺量获得的沥青混凝土的动态模量增幅更大,这是高黏沥青和金刚砂共同作用的结果。这三类级配的动态模量变化保持同样的规律,即AC级配>EME级配>SMA级配。其中,SMA级配以骨架嵌挤为主要强度来源,但动态模量依旧小于AC级配的和EME级配的,可能是SMA级配粗料多、矿粉多、沥青多、细料少所导致的。与EME级配和AC级配相比,SMA级配细料占比少,其替换对动态模量影响不大。从图3还可以看出,集料对于混合料的影响排序为:金刚砂>石英砂,且当玄武岩细集料被全部替换后,混合料的动态模量更高。这是由于金刚砂的莫氏硬度大于石英砂的,且金刚砂的棱角性较石英砂的更好,具有更高的嵌挤力和摩擦角,并且替换砂料越多,混合料的动态模量越高。

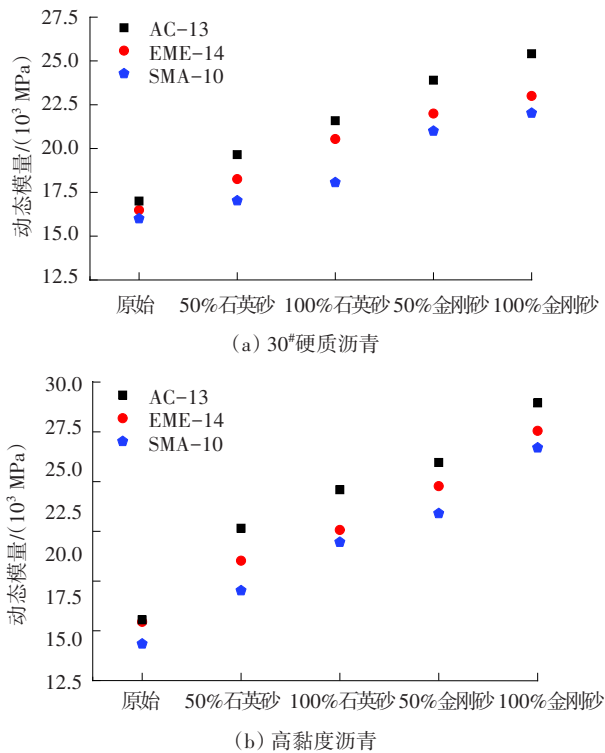


图3 不同细集料掺量的沥青混凝土动态模量测试结果

Fig. 3 Test results of dynamic modulus of asphalt concrete with different content of fine aggregate

3.2 路用性能分析

根据动态模量试验结果,选取动态模量表现良好的 A_{n4} 和 B_{n4} 共6组试件进行路面性能试验,并以 A_{n0} 组和 B_{n0} 组进行对比分析。

1) 高温稳定性。

采用车辙试验对UHMAC进行高温稳定性测试,其高温抗车辙性能与测试的动稳定度呈正相关,动稳定度越大,沥青混凝土的抗车辙性能越好。试验流程依据试验规程的要求进行。试验结果如图4所示。

动态模量与车辙试验均能评价UHMAC的高温抗车辙性能。规范要求沥青混凝土动稳定度不小于3 000次/mm,当其大于6 000次/mm时,试验结果均记作>6 000次/mm。从图4可以看出, B_{10} 组和 B_{30} 组沥青混凝土动稳定度不超过6 000次/mm,但仍满足规范要求。其余类型均大于6 000次/mm,其中 A_{24} 表现最佳,动稳定度达到8 269次/mm。这是因为金刚砂的耐高温性能起到了积极作用,所以其抗车辙能力良好。该试验结果与动态模量测试结果较为一致,即细集料为金刚砂的UHMAC动稳定度大于原始混合料的,进一步验证了金刚砂的掺入有利于提高混合料的高温抗车辙性能。

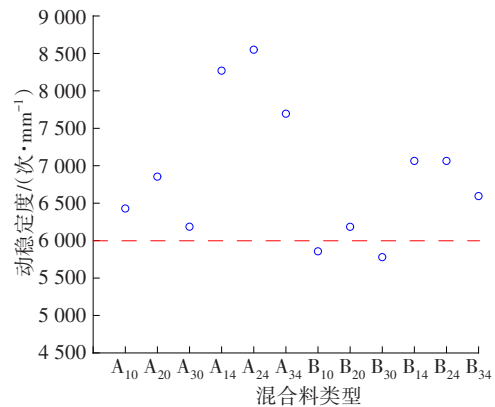
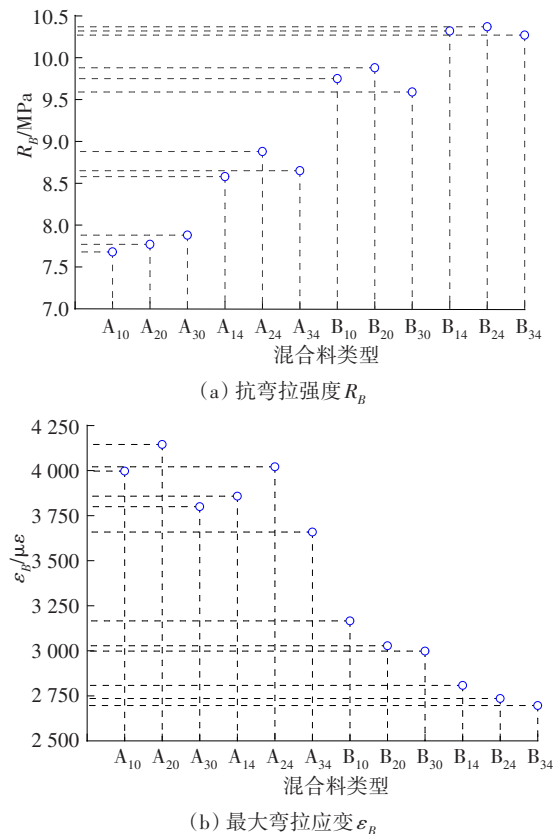


图4 各组混合料动稳定度

Fig. 4 Dynamic stability of each group of mixture

2) 低温抗裂性。

沥青路面的拉裂破坏是体积收缩造成混合料面层承受了拉应力和拉应变,而路面性能不能满足要求所导致的。因此,沥青路面的低温抗裂性能必须考虑弯拉强度和弯拉应变,而低温弯曲试验能从弯拉强度和弯拉应变的角度更有效地评价混合料的低温抗裂性能。试验采用万能试验机进行测试,温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,加载速度设置为50 mm/min。根据试验结果得到小梁破坏时的抗弯拉强度 R_B 、最大弯拉应变 ε_B 及弯曲劲度模量 S_B 。试验结果如图5所示。



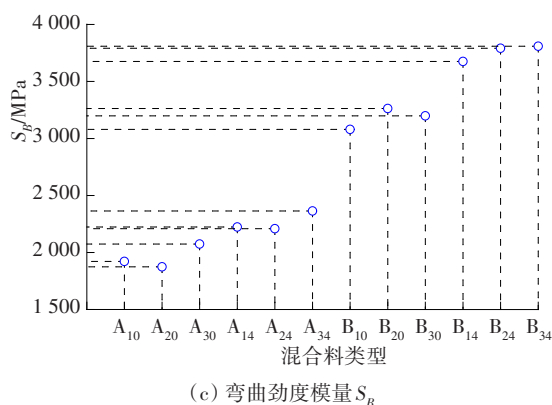


图5 低温弯曲试验结果

Fig. 5 Results of the low temperature bending test

从图5(a)中可看出,硬质沥青组沥青混凝土的低温抗弯拉强度大于高黏沥青组的,而最大弯拉应变小于高黏沥青组的,其破坏应变能减小。这表明:硬质沥青会显著降低高模量沥青混凝土的低温性能。这是因为硬质沥青虽然高温性能好,但是易脆断,增大了高模量沥青混凝土的劲度模量。相比于硬质沥青,高黏度沥青胶结料组分易调控,且在提高沥青混凝土的高温性能时,还可保证其低温抗裂性能。规范^[17]以弯曲应变为控制指标,要求冬严寒区不小于 $3\,000\,\mu\varepsilon$,冬温区不小于 $2\,500\,\mu\varepsilon$ 。从图5(b)可以看出,掺入金刚砂后,高黏沥青组和硬质沥青组的弯曲应变均有所下降。这表明:金刚砂对混合料的低温抗裂性能有不利影响,加之硬质沥青自身的易脆断性, B_{m4} 组均不能满足规范要求。

3) 水稳定性。

沥青与矿料间的黏结性以浸水马歇尔试验测得的沥青混凝土残留稳定度来评价。浸水马歇尔试验按规程^[18]规定的方法和步骤进行,对在 $60\,^{\circ}\text{C}$ 恒温水槽中分别浸水30 min和48 h的两组试件,测其稳定度和流值,通过计算得出沥青混凝土的浸水残留稳定度。试验及计算结果如图6所示。

从图6可以看出,高黏沥青组的UHMAC动稳定度与残留稳定度都大于硬质沥青组的,表明高黏沥青组 A_{n0} 的UHMAC水稳定性较好。各组试件均达到规范提出的残留稳定度大于80%的要求。对于两种胶结料,掺入金刚砂对混合料的水稳定性影响不大。其中, A_{n0} UHMAC的高黏沥青对其良好的水稳定性做主要贡献,高黏沥青良好的黏结性能可较好地黏附集料,沥青与集料结合界面能得到提升,使其内部结构更密实,更好地抵抗水损害。

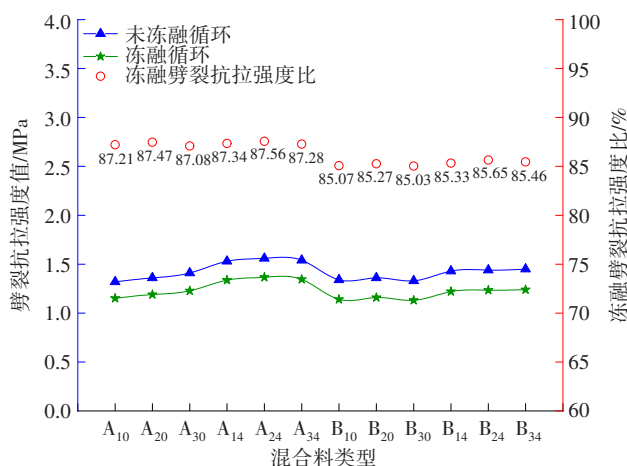


图6 浸水马歇尔试验结果

Fig. 6 Results of the immersion Marshall test

4 结论

本研究采用两种沥青胶结料及两种细集料制备三种级配的UHMAC进行试验,研究不同沥青胶结料和细集料及掺量对UHMAC的影响。研究结果表明: A_{24} 沥青混凝土在高温抗车辙、低温抗开裂和水稳定性等性能表现最好。AC级配的结构特性可有效体现高黏沥青与金刚砂的优势。 A_{24} 采用高黏沥青作为胶结料,相较于硬质沥青胶结料,其能在更提高其高温抗车辙的同时兼顾低温抗裂性能,且能减少硬质沥青混凝土的低温易开裂情况。高黏沥青自身黏结力较强,可保证混合料的抗水损性。除了沥青胶结料的选择,集料对高模量沥青混凝土也产生了影响。其中,金刚砂由于自身的耐高温性能,对沥青混凝土的动态模量影响大于石英砂的,其高温抗车辙能力也更优。根据法国规范的要求,高模量沥青混凝土在 $15\,^{\circ}\text{C}$ 、 $10\,\text{Hz}$ 条件下的动态模量必须达到 $14\,000\,\text{MPa}$,而 A_{24} 试件的动态模量则必须达到 $28\,956\,\text{MPa}$ 。这表明:超高性能水泥混凝土的抗压强度约为高性能混凝土的2倍。因此,以动态模量为评价指标, A_{n4} 类沥青混凝土可以作为超高模量沥青混凝土。

参考文献(References):

- [1] Corté J F. Development and uses of hard-grade asphalt and of high-modulus asphalt mixes in France [J]. Transportation Research Circular, 2001, 503:12-31.
- [2] 马峰,傅珍. 硬质沥青和高模量沥青混凝土在法国的应用[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 221-223.

- MA Feng, FU Zhen. Application of hard asphalt and high modulus asphalt concrete in France[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(6): 221-223.
- [3] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土路面疲劳研究[J]. 土木工程与管理学报, 2013, 30(1): 30-40.
- ZHOU Qinghua, SHA Aimin. Research on fatigue performance for high modulus asphalt concrete pavement [J], 2013, 30 (1): 30-40.
- [4] LEE H J, LEE J H, PARK H M. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5): 1079-1087.
- [5] 王朝辉, 舒诚, 韩冰, 等. 高模量沥青混凝土研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 1-15. WANG Chaohui, SHU Cheng, HAN Bing, et al. Research progress of high modulus asphalt concrete [J] Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40 (1): 1-15.
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 1-49.
- Editorial Department of China Journal of highway. Review on China's subgrade engineering research, 2021 [J] China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (3): 1-49.
- [7] 任非. TB复合高模量剂改性沥青的黏弹特性及混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(1): 98-102. REN Fei. Research on viscoelastic properties and mixture performance of TB composite high modulus agent modified asphalt [J] New building materials, 2021, 48 (1): 98-102.
- [8] 郭寅川, 张争明, 邵东野, 等. 高模量天然沥青混凝土设计及路用性能对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2811-2821.
- GUO Yinchuan, ZHANG Zhengming, SHAO Dongye, et al. Comparative study on design and road performance of high modulus natural asphalt mixture [J] Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (8): 2811-2821.
- [9] 查旭东, 李洲, 王宏祥, 等. 阿尔巴尼亚岩沥青改性混合料设计及性能试验[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 1-7.
- CHA Xudong, LI Zhou, WANG Hongxiang, et al. Experiments of the design and the performance for the modified mixture with Albania rock asphalt[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 1-7.
- [10] 耿韩, 李立寒, 张磊, 等. 高模量沥青低温抗裂性能的评价指标[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1): 98-103. GENG Han, LI Lihan, ZHANG Lei, et al. Indicators for low temperature cracking resistance of high modulus asphalt binders [J] Journal of building materials, 2018, 21 (1): 98-103.
- [11] RYS D, JUDYCKI J, PSZCZOLA M, et al. Comparison of low-temperature cracks intensity on pavements with high modulus asphalt concrete and conventional asphalt concrete bases [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 478-487.
- [12] GENG H, CLOPOTEL C S, BAHIA H U. Effects of high modulus asphalt binders on performance of typical asphalt pavement structures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44: 207-213.
- [13] 崔华杰, 李立寒, 刘栋. 高模量沥青混凝土低温抗裂性能研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2): 37-41.
- CUI Huajie, LI Lihan, LIU Dong. Research on low-temperature anti-crack performance of high modulus asphalt mixture [J] Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (2): 37-41, 53.
- [14] WANG X S, QIU Y J, XUE S Y, et al. Study on durability of high-modulus asphalt mixture based on TLA and fibre composite modification technology [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19 (10): 930-936, 53.
- [15] 宁毅, 李文凯, 刘向杰. 水-温耦合作用对高模量沥青混合料性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 17-25.
- NING Yi, LI Wenkai, LIU Xiangjie. Influence of water-temperature coupling on performance of high modulus asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (2): 17-25.

(责任编辑:欧兆虎;校对:罗容;英文编辑:陈璐)

(上接第7页)

- China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161.
- [19] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [20] 张国栋, 巫锡勇, 凌祥祥, 等. 初始含水率对膨胀性红黏土胀缩及崩解特性的影响[J]. 工程地质学报, 2023, 31 (1): 32-42.
- ZHANG Guodong, WU Xiyong, LING Sixiang, et al. Influence of initial moisture content on swelling-shrinkage and slaking features of expansive red clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 32-42.

(责任编辑:欧兆虎;校对:刘国奇;英文编辑:陈璐)