

高模量沥青结合料及混合料路用性能研究

陈俊波¹, 任希鹏², 安南³, 张思萌³, 梅林健¹, 肖庆一³

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300072; 2. 北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京市 100073; 3. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津市 300401)

摘要: 提升沥青结合料模量可有效增强路面耐久性, 减少高温病害。为丰富长寿命路面结构方案, 以20#硬质沥青、70#基质沥青、HM-A高模量剂为原材料, 通过常规性能指标与流变学分析, 建立Burgers模型, 结合混合料路用性能, 充分研究高模量对沥青结合料与混合料的影响。沥青试验结果表明: 提高模量显著提高了沥青结合料的劲度, 改善了抗老化性、温度敏感性, 使沥青结合料保持弹性, 永久变形大幅减少, 但同时损失了部分应力松弛性。混合料试验结果表明: 提高沥青结合料模量有效降低了车辙的产生, 提高了路面承载能力, 同时低温性能与水稳性能也有所改善; 高模量沥青流变性质较好地反映出混合料的温度敏感性与高温抗变形能力规律。研究为高性能沥青路面设计提供理论支撑。

关键词: 高模量沥青; 长寿命路面; 流变学; Burgers模型; 高温性能

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0080-06

Research on Pavement Performance of High-Modulus Asphalt Binder and Mixture

CHEN Junbo¹, REN Xipeng², AN Nan³, ZHANG Simeng³, MEI Linjian¹, XIAO Qingyi³

(1. China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300072, China; 2. Beijing State Highway Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing 100073, China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Increasing the modulus of asphalt binder can effectively enhance the durability of the pavement and reduce the high-temperature diseases. In order to enrich the long-life pavement structure scheme, taking 20# hard asphalt, 70# matrix asphalt and HM-A high-modulus agent as the raw materials, and through the conventional performance indicators and rheological analysis, a Burgers model is established. Combined with the pavement performance of the mixture, the effect of high modulus on the asphalt binder and mixture is fully studied. The asphalt test results show that the increase of modulus significantly improves the stiffness of the asphalt binder, and the aging resistance and the temperature sensitivity are improved, which keep the asphalt binder elastic and significantly reduce its permanent deformation. But at the same time, some stress relaxation is reduced. The results of the mixture test show that increasing the modulus of the asphalt binder effectively reduces the generation of rutting and improves the bearing capacity of the pavement. At the same time, the low-temperature performance and the water stability performance are also improved. The rheological properties of high-modulus asphalt better reflect the temperature sensitivity and high-temperature deformation resistance of the mixture, which provides the theoretical support for the design of high-performance asphalt pavement.

Keywords: high-modulus asphalt; long-life pavement; rheology; Burgers model; high-temperature performance

0 引言

截至2023年末,公路营运汽车中载货汽车数量所占权重为95.49%,载货汽车的吨位数为17 216.7万t,平均吨位数为14.7 t^[1],汽车载重增大与温室效应加

剧,对沥青路面高温稳定性提出更高要求。以往的道路材料及结构已无法满足日益增长的车辆轴载,为适应更高的温度及更大的车辆轴载,需针对传统路面材料进行改良,从而延长沥青路面的使用年限。与普通沥青相比高模量沥青拥有更高的劲度模量,采用高模量沥青混合料修筑的道路拥有高温稳定性强、耐疲劳性能强的优点,在重载和高温地区,车辙变形明显减少,目前采用最多的高模量化方法就是向沥青中加入高模量剂或使用硬质沥青^[2-3]。目前,

收稿日期: 2024-11-12

基金项目: 天津市科技计划项目(16ZXCXSF00110)

作者简介: 陈俊波(1982—),男,硕士,高级工程师,从事道路设计、道路材料研究工作。

高模量技术主要侧重于高模量沥青混合料的研究,而对高模量沥青结合料的性能研究较少。王海阳^[4]采用不同高模量剂制备相应的沥青混合料,对其路用性能进行研究发现高模量剂改善了混合料的高温性能;Qian G^[5]通过试验探究发现30#沥青混合料的高温性能强于SBS改性沥青混合料,相较于基质沥青混合料提高了近7倍,低标号沥青对混合料的水稳定性影响较小,低温性能满足规范的要求;王昊鹏^[6]通过对两种高模量改性剂的沥青混合料进行动态模量试验,认为沥青路面以动态模量进行设计更加科学合理;孙雅珍^[7]基于层次分析法以混合料的高、低温性能,感温性及水稳定性四个指标对高模量沥青混合料性能进行综合评价。

本文基于常规性能指标和流变学,充分研究了添加高模量剂与使用硬质沥青两种高模量化技术手段对沥青结合料的高低温性能影响,同时结合混合料路用性能研究,旨在丰富高模量化技术理论,为提高沥青路面耐久性提供新思路。

1 试验

1.1 原材料

选用国产20#硬质沥青(以下简称20#沥青)、70#A级沥青,两者主要技术指标见表1。高模量剂HM-A成分为PE/PP,具体参数见表2。

表1 20#沥青与70#沥青主要技术指标		
技术指标	20#沥青	70#沥青
针入度(25℃)/0.1mm	20.3	75.6
软化点/℃	66.4	49.5
延度(15℃)/cm	7.19	>150

表2 HM-A高模量剂主要物理性能指标				
粒径/mm	密度/(g·cm ⁻³)	软化点/℃	断裂延伸率/%	拉伸强度/MPa
3~6	0.95~1.15	150~160	9~15	25~30

1.2 试验方案

使用高模量剂时,为使70#沥青与其共混,采用高速剪切熔融搅拌的方法:70#沥青热至流动后,投

入HM-A高模量剂,掺量分别为6%、8%、10%(质量分数),在150~160℃,5 500~6 000 r/min下搅拌60 min后添加稳定剂,继续搅拌60 min后放置于150℃恒温箱发育30 min。对高模量沥青进行针入度、软化点、延度试验,高温和低温流变试验,同时结合混合料的高温性能、低温性能、水稳定性,同时结合混合料的高温性能、低温性能、水稳定性,充分研究高模量沥青的黏弹性变化规律,分析其路用性能。

1.3 配合比设计

采用中粒式沥青混合料AC-16为目标级配,按照马歇尔(Marshall)模数法进行高模量沥青配合比设计,HM-A选择三种掺量中的最优,级配曲线如图1所示。

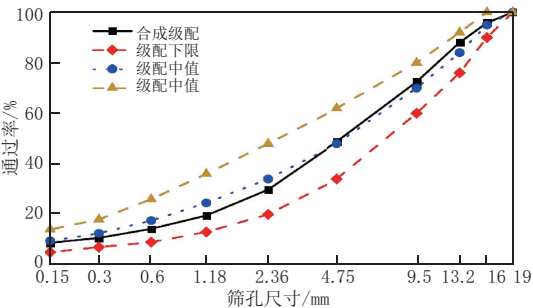


图1 AC-16合成级配图

HM-A选择3种掺量中的最优,Marshall试验结果见表3。

表3 沥青混合料Marshall试验结果					
沥青种类	最佳油石比/%	空隙率/%	稳定度/kN	流值/mm	矿料间空隙率/%
70#沥青	4.3	4.3	11.8	4.1	14.8
20#沥青	4.7	4.1	15.3	3.4	14.5
HM-A	4.5	4.4	13.1	3.7	14.6

2 高模量沥青结合料性能

2.1 高模量沥青结合料基本性能

70#沥青、20#沥青及高模量剂改性沥青性能见表4,其中针入度、软化点、延度指标如图2所示。

由表4、图2可知,随着高模量剂掺量增大,针入度与延度下降,软化点升高,未出现离析凝聚现象,

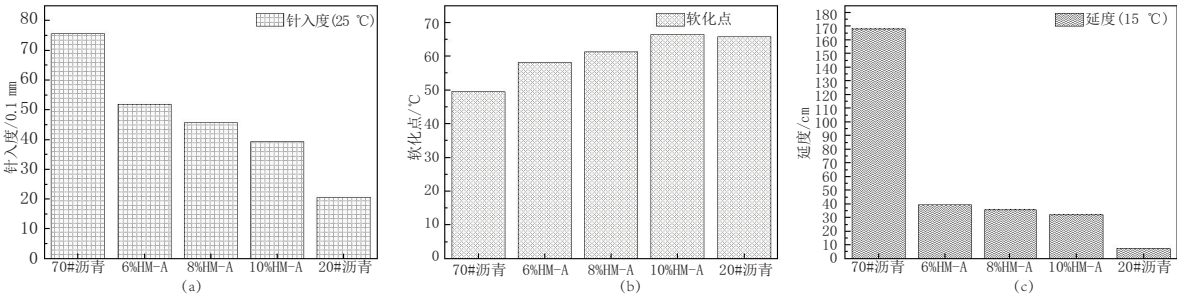


图2 高模量沥青的3大指标

表4 沥青混合料Marshall试验结果

试验项目	70#	6%HM-A	8%HM-A	10%HM-A	20#
针入度(25℃, 0.1mm)	75.2	52.1	45.7	38.9	19.8
延度(15℃)/cm	167.8	39.8	35.9	32.3	6.7
软化点/℃	48.5	58.6	61.2	66.5	65.2
离析,48h软化点差/℃	—	1.9	2.2	2.4	—
RTFOT质量变化/%	0.5	0.6	0.5	0.4	0.1

RTFOT后质量变化小于1%,指标符合规范Ⅲ类聚合物改性沥青技术要求要求^[8]。HM-A中的高聚物分子在溶胀时会吸附沥青内部油分,使稠度升高;HM-A熔融温度远高于试验温度,在改性沥青中保持弹性状态降低了塑性,改善了高温稳定性降低了延性;20#沥青模量较高,有着良好的高温稳定性与稠度但延性较差。针入度可表征沥青的感温性能,随着HM-A掺量上升沥青感温性能下降且降幅放缓,高模量剂大幅降低了沥青结合料的温度敏感性,增强了沥青结合料的抗老化能力,随着掺量的增加,高模量剂性能提升的增益下降;针入度有20#沥青的<HM-A高模量沥青<70#沥青,20#沥青对温度敏感性最弱,高模量剂可显著改善沥青结合料的温度敏感性。为进一步研究高模量沥青高低温性能,进行高低温流变试验分析。

2.2 高温流变性

2.2.1 动态剪切流变

沥青动态剪切流变(DSR)试验温度设定为52~88℃(间隔6℃),角频率为10rad/s,采用应变控制模式,试验材料为原样沥青和经过旋转薄膜加热老化(RTFOT)后的沥青,试验结果见图3至图5所示。

复数剪切模量 G^* 可以衡量材料在周期性剪切荷载下抗变形的能力, G^* 越大表明沥青结合料劲度越

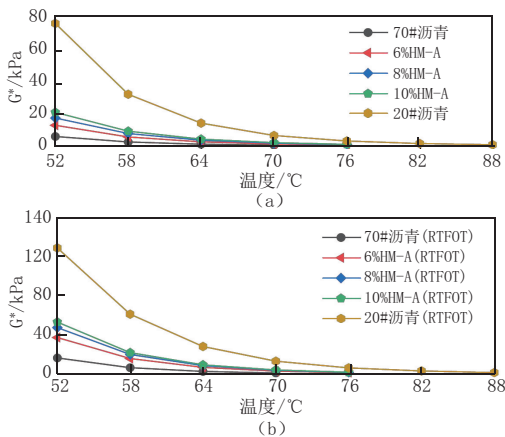


图3 高模量沥青的 G^*

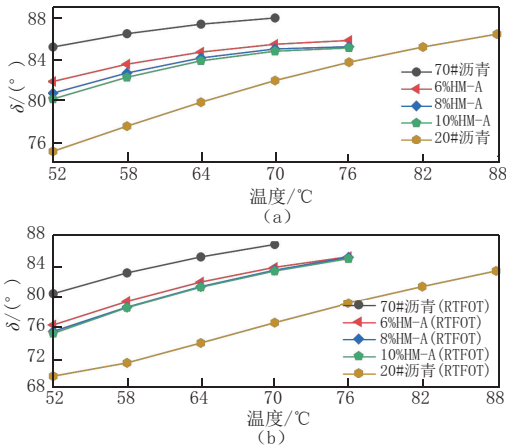


图4 高模量沥青的 δ

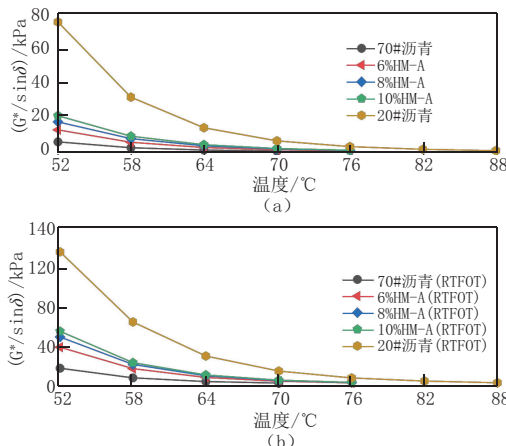


图5 高模量沥青的 $G^*/\sin\delta$

大;相位角 δ 表示沥青结合料中黏性成分与弹性成分比例关系, δ 越大材料黏性成分越多反之弹性成分越多^[9-10]。由图4与图5可知,在相同温度下高模量沥青相较于70#沥青 G^* 提升, δ 减少,表明提升沥青结合料的模量提高了承载能力,增强了弹性。 $G^*/\sin\delta$ 为车辙因子,可表征高温抗车辙性能, $G^*/\sin\delta$ 越大产生的变形越小^[11]。由图5可知, $G^*/\sin\delta$ 与 G^* 表现出的一致趋势,在相同温度下高模量沥青结合料相较于70#沥青抗变形能力提升显著;随着高模量剂掺量的增加, $G^*/\sin\delta$ 随之增大,掺量增大有利于高模量剂吸收更多沥青结合料中的轻质成分,同时改善了沥青结合料的成分结构,这从 δ 的变化趋势也可以看出;高模量沥青对基质沥青的 $G^*/\sin\delta$ 提升在52℃最显著,随着温度升高差距逐渐缩小;RTFOT后沥青结合料的 $G^*/\sin\delta$ 与RTFOT前趋势一致但数值增大,从 δ 可以看出老化加速了氧化过程使沥青弹性部分作用增强,黏性特性起主导作用的温度高于老化前; $G^*/\sin\delta$ 体现出的抗变形能力为:20#沥青>10%HM-A>8%HM-A>6%HM-A>70#沥青。

2.2.2 多应力蠕变恢复

沥青多重应力蠕变恢复(MSCR)试验通过测定 58℃和 64℃条件下,施加应力水平为 0.1 kPa 与 3.2 kPa 下,可恢复与不可恢复蠕变柔量比率,反映出

高模量沥青结合料高温稳定性与抗疲劳性能,不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 越小,不可恢复变形越少,蠕变恢复率 R 越大,变形恢复能力越强^[12], J_{nr} 与 R 的结果见图 6。

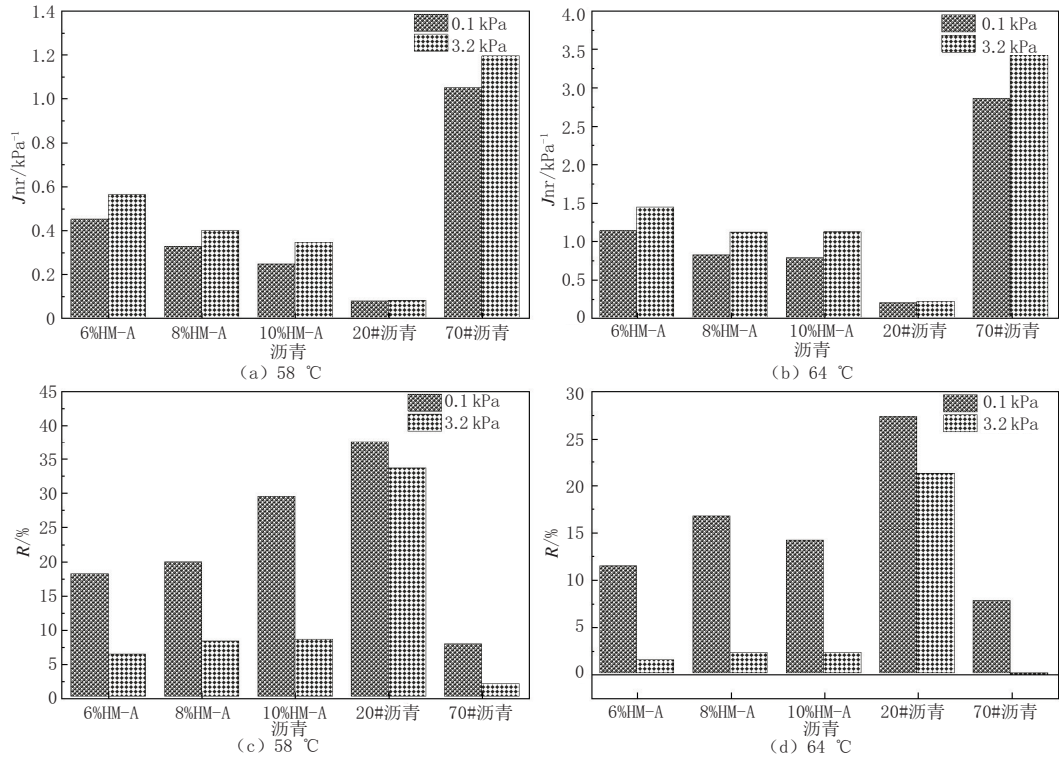


图6 高模量沥青的 J_{nr} 与 R

由图 6 可知,在 58℃下 J_{nr} 值随着高模量剂掺量升高而降低,与 70#沥青相比在 0.1 kPa 与 3.2 kPa 下均在掺量 10% 时降幅最大,分别降低了 77% 与 71%;在 64℃下掺量为 8% 与 10% 的 J_{nr} 值几乎一致,在更为极端的使用条件下高掺量对基质沥青的抗变形能力提升效果减弱;在相同温度下应力水平升高, J_{nr} 值降低;高模量沥青结合料不可恢复变形:20#沥青 $< 10\% \text{HM-A} < 8\% \text{HM-A} < 6\% \text{HM-A} < 70\#$ 沥青。 R 在 58℃下随着高模量剂掺量的升高而增大,在 64℃下随着掺量升高先增大后减小,这与 J_{nr} 在 64℃掺量为 8% 与 10% 差距不大的原因一致;相同温度下应力水平从 0.1 kPa 上升到 3.2 kPa 时,高模量沥青结合料的变形恢复能力下降显著,其中 70#沥青 R 值在 64℃下,应力水平 3.2 kPa 时为负,说明在此条件下已不具备变形恢复的能力;温度相同时,在 3.2 kPa 下三组不同掺量的高模量沥青 R 值基本一致,此时变形恢复能力主要由高模量剂体现,而 70#沥青已基本丧失了变形恢复能力。

Burgers 模型可较好的反映出沥青的黏弹性^[13],是由麦克斯韦模型和开尔文模型所组成的四

元件模型,其结构如图 7 所示。

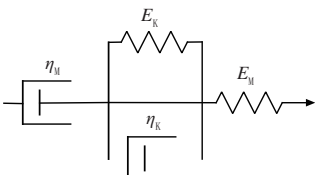


图7 Burgers 模型

为对高模量沥青的流变特性进行充分研究,以多重应力蠕变恢复试验为基础,采用 Burgers 模型对温度在 58℃和 64℃,应力水平为 3.2 kPa 下的蠕变阶段进行拟合。Burgers 模型方程:

$$\frac{\varepsilon(t)}{\tau} = \frac{1}{E_M} + \frac{1}{\eta_M} t + \frac{1}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{tE_K}{\eta_K}} \right) \tag{2}$$

式中: ε 为试件累积应变; t 为加载时间; τ 为外界施加的应力; E_M 、 E_K 分别为麦克斯韦模型与开尔文模型中的弹性模量; η_M 、 η_K 分别为麦克斯韦模型与开尔文模型中的阻尼系数。Burgers 模型认为沥青在高温下所产生的蠕变由弹性应变、黏性应变及延迟弹性应变三部分所构成。由 Burgers 拟合得到的各部分应变与试验实测应变见表 5。

由表 5 可以知, Burgers 模型对黏性应变的拟合

表5 应变拟合结果

应变类别	试验温度/℃	70# 沥青	6%HM-A	8%HM-A	10%HM-A	20# 沥青
弹性应变拟合结果	58	0.4	0.6	0.9	1.1	0.2
	64	0.3	0.4	0.8	1.6	0.5
黏性应变拟合结果	58	376.9	174.1	124.5	106.5	23.5
	64	1087.1	441.5	340.1	317.0	61.7
延迟应变拟合结果	58	3.8	9.4	10.5	9.3	12.7
	64	4.0	6.8	7.4	3.9	18.7
黏性应变实测值	58	382.8	181.8	128.8	110.6	24.9
	64	1155.7	462.0	358.5	325.4	66.9
黏性应变偏差率/%	58	1.5	4.2	3.3	3.8	5.6
	64	3.4	4.4	5.1	2.6	7.8

结果较好,偏差率较低;温度由 58℃升至 64℃后黏性应变显著提高,弹性应变及延迟应变均有下降的趋势,沥青产生的不可恢复变形增大;经 HM-A 改性后,延迟变形及弹性变形所占总应变的权重上升,高模量剂改善了基质沥青变形恢复能力;在 58℃下 HM-A 掺量由 6%到 8%时,黏性应变所占总应变权重由 94.6%下降至 91.5%,掺量为 10%时为 91.1%,在 64℃下亦有相似的规律,表明掺量由 8%到 10%提升效果较小,结合现有研究,高模量剂最佳掺量在 8%~10%范围内^[14],故高模量剂最佳掺量为 8%,由各部分应变所反应出高模量沥青的高温性能有:70#沥青<HM-A 高模量沥青<20#沥青。

2.3 低温流变性

低温梁弯曲蠕变试验(BBR)以蠕变劲度 S 与蠕变速率 m 评价沥青结合料低温性能, S 越大,沥青结合料越趋于脆性低温抗开裂能力越差; m 越大, S 沥青结合料的应力松弛性越好^[15],低温弯曲蠕变试验结果见图 8。

由图 8 可知,随着 HM-A 掺量增高沥青结合料 S 值增大,表明高模量剂使沥青中的弹性成分占据主导,削弱了沥青低温抗开裂的能力;20#沥青自身延展性差,低温下柔性小易产生开裂;由低温流变性可以看出低温性能 70#沥青>6%HM-A>8%HM-A>10%HM-A>20#沥青,低温地区使用高模量沥青时无需过分追求低温性能,只要满足规范要求即可。

3 高模量沥青混合料性能

3.1 高、低温及水稳定性能

采用 60℃车辙试验、-10℃低温弯曲小梁试验及冻融劈裂试验分别评价高模量沥青的高温性能、低温性能及水稳定性,结果见表 6。

由动稳定度结果可以看出, HM-A 高模量沥青相

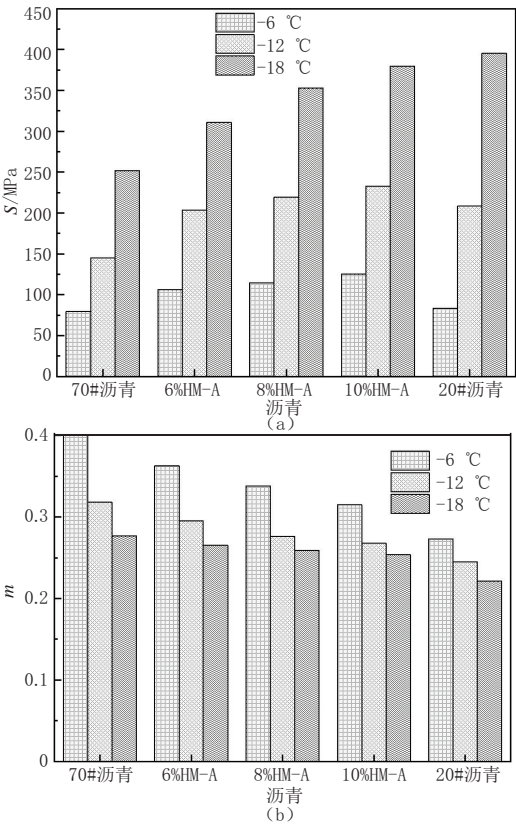


图8 高模量沥青的 S 与 m

表6 高、低温性及水稳定性试验结果

性能指标	70#沥青	HM-A	20#沥青
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	1 262	6 811	9 541
破坏应变(με)	2 143	2 215	1 953
冻融劈裂强度比/%	86	90	92

较于 70#沥青提升 5.38 倍, HM-A 在混合料中填充了残余空隙,通过与集料之间相互嵌挤作用,混合料的弹性得以加强大幅改善了 70#沥青的高温性能; 20#沥青软化点高,劲度损失阈值温度较高,抵抗车辙变形的能力最好。由破坏应变结果可以看出, HM-A 与 70#沥青相比较,高模量剂小幅度改善了混合料的低温性能, HM-A 通过增加集料与结合料之间地聚合力而增加了混合料的应变能,在荷载作用下产生

变形时可以吸收更多能量降低低温下产生裂缝的大小与速度;20#沥青破坏应变结果略低于《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求,结合工程经验 20#沥青可应用于下面层/基层改善路面结构,作为面层使用时应充分考虑当地要求。冻融劈裂强度比表明混合料水稳定性 20#沥青>HM-A>70#沥青;HM-A 填充了残余空隙,溶胀于沥青结合料中使沥青胶浆与集料之间的黏聚力增大,改善了混合料的水稳定性;20#沥青黏度大,极性物质含量高,高温水浴中能保持弹性,抵抗水损能力最强。

3.2 动态模量

流变性质可由沥青混合料的动态模量体现^[16],动态模量试验是在 25、35、45℃温度下施加频率为 0.1、0.5、1.0、5.0、10.0 Hz 的周期轴向压应力,通过产生对应的变形响应来反映出沥青混合料的流变性能与抗变形能力。依据时温置换原理,并根据西格摩德函数,以 45℃作为参考温度,形成动态模量主曲线,如图 9 所示。

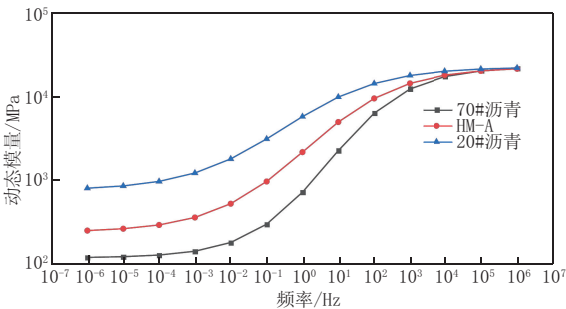


图 9 45℃动态模量主曲线

Sigmoidal 函数为:

$$\lg |E^*| = \alpha + \frac{\lg \lambda - \alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\lg f_r)}} \quad (3)$$

式中:|E*|为动态模量;α、β、γ均为拟合参数;λ为动态模量的极大值;f_r为缩减频率,f_r=f·a(T),f为试验加载频率,a(T)为参考温度下的位移因子。

动态模量主曲线低频区与高频区可以反映混合料的高温性能与低温性能^[17],高温时,较高的动态模量使混合料在一定的应力条件下产生变形更小;低温时,高模量降低了混合料柔韧性更易发生脆裂。由图 9 可知,动态模量主曲线趋势为 20#沥青>HM-A>70#沥青;HM-A 对 70#沥青的动态模量提升明显,高温性能增强显著。

4 结 论

(1)高模量沥青拥有较大的劲度,高温性能良好,但延度较差不利于抵抗低温开裂,在一定范围内

高模量剂掺量对高温性能的提升呈正相关。提高沥青结合料的模量可显著降低沥青结合料的温度敏感性,使沥青结合料能够在高温及大应力下保持弹性特征降低高温带来的不利影响。

(2)Burgers 模型对高模量沥青的蠕变变化规律有良好的模拟效果,高模量沥青使黏性应变降低,进而减少不可恢复变形,通过高模量沥青混合料路用性能验证,混合料的高温性能与 Burgers 模型中的黏性应变分量呈负相关。

(3)高模量剂对沥青混合料的高温性能提升显著,同时水稳定性与低温性能均有不同程度的提升,20#沥青低温性能虽然略低于规程要求,可通过提高饱和度、降低空隙率等技术手段提高低温性能可作为路面的中下面层结构使用,高模量沥青的流变性能可以作为评价其路用性能的标准。

(4)高模量沥青混合料可以有效减少路面在使用过程中产生车辙病害,进行适当的结构组合设计发挥高模量材料优势,克服劣势不足,符合长寿命路面建设理念;高模量沥青路面有效减少道路养护中的投入更加经济环保,产生社会效益更大。

参考文献:

[1] 交通运输部.2023 年交通运输行业发展统计公报[DB/OL].(2024-06-16)[2024-11-15].https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202406/content_6957901.htm.

[2] 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.

[3] 郭寅川,陈乔森,申爱琴,等.低标号沥青在新疆高温抗车辙地区的应用研究[J].硅酸盐通报,2018,37(10):3042-3048.

[4] 王海阳,李宜锋,郑木莲.不同添加剂下高模量沥青混合料路用性能研究[J].中国科技论文,2019,14(9):1004-1009.

[5] Qian G, Yao D, Gong X, et al. Performance evaluation and field application of hard asphalt concrete under heavy traffic conditions[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116729.

[6] 王昊鹏,杨军,施晓强,等.高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J].公路交通科技,2015,32(8):12-17.

[7] 孙雅珍,顾彬诚.高模量沥青混合料路用性能试验及 AHP 综合评价[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):684-691.

[8] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[9] 卢桂林,许新权,唐志赞,等.高模量改性剂的作用机理及应用研究[J].建筑材料学报,2021,24(2):355-361.

[10] 吕大春,刘斌清,田华,等.高黏改性沥青结合料的流变特性[J].材料科学与工程学报,2021,39(5):820-825.

[11] 赵文辉,谢祥兵,李广慧,等.基于流变学的纳米改性沥青黏弹特性及相态结构研究[J].硅酸盐通报,2020,39(11):3709-3718.

[12] 罗蓉,许苑,刘涵奇,等.DCLR 改性沥青的流变力学性质[J].中国公路学报,2018,31(6):165-171.

[13] 林江涛,樊亮.基于 MSCR 试验及 Burgers 模型分析的沥青高温性