

高模量沥青混合料在长寿命沥青路面的路用性能

李兵

山东高速股份有限公司工程建设项目管理中心, 山东 济南 250098

摘要:为研究高模量沥青混合料在长寿命沥青路面中的路用性能,将高沸点石油融入基质沥青中制备高模量沥青黏结剂(high modulus asphalt binder, HMAB),进行针入度、软化点、脆点和动态模量试验,对掺加 HMAB 制备的高模量沥青混合料(high modulus asphalt mixture, HMAM)进行动态模量、湿度敏感性、车辙试验和疲劳试验。结果表明:与普通沥青黏结剂相比, HMAB 的刚度显著增大,但低温性能降低;在高温条件下, HMAM 的动态模量比普通沥青混合料大,抗水破坏性能比普通沥青混合料增大约 10%,抗永久变形能力显著优于普通沥青混合料,抗疲劳开裂能力优于普通沥青混合料。

关键词: HMAB; HMAM; 长寿命沥青路面; 动态模量

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2025)03-0074-05

引用格式: 李兵. 高模量沥青混合料在长寿命沥青路面的路用性能[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(3): 74-78.

LI Bing. Pavement performance of high modulus asphalt mixture on long life asphalt pavement[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(3): 74-78.

0 引言

我国高速公路的面层大多采用沥青混合料,随着交通量的急剧增大,大部分高速公路进入维修和养护阶段。在初次修复后,公路面层的永久变形不断累积,路面的结构承载能力逐渐减弱,使用寿命逐步缩短。现有路面出现严重的疲劳开裂和变形时,从路面结构 and 经济角度考虑,加铺不再是延长使用寿命的有效方法^[1-3]。

为延长沥青路面的使用寿命, Nunn 等^[4]提出长寿命路面概念。在不进行重大结构加固的情况下,路面的设计寿命大于 40 a 称为长寿命路面,原理是增大沥青基层的结构强度或厚度,最大程度地减小沥青混合料层层底拉应变和路基顶面压应变,减小潜在的结构变形,将主要的路面变形限制在面层内,在设计寿命内只需对道路面层进行定期修复^[5-8]。长寿命路面的沥青面层需有较好的抗车辙、防渗及高耐磨性能,确保路面在重交通负荷下仍能保持平整无辙痕,并有效阻止水分侵入。基层选用高模量材料,抗车辙性能优良,路面的耐久性和承载能力大幅提高^[9-10]。长寿命的路面设计更倾向于在基层采用高模量沥青混合料,而非单纯增大基层厚度,可减少自然资源的消耗,防止路面与上部结构间出现间隙,可通过采用高模量沥青黏结剂增大沥青混合料的刚度^[11-13]。目前专门用于长寿命路面的高模量沥青种类较少且力学性能不佳。

本文通过将高沸点石油融入基质沥青中,制备适用于长寿命沥青路面沥青基层的高模量沥青黏结剂(high modulus asphalt binder, HMAB)和高模量沥青混合料(high modulus asphalt mixture, HMAM)。研究 HMAB 和 HMAM 的疲劳开裂、永久变形等性能特征以及长寿命沥青路面的结构承载能力、路面性能,对 HMAB 进行针入度、软化点、脆点和动态模量试验,对 HMAM 进行动态模量试验、湿度敏感性试验、车辙试验和间接拉伸疲劳试验,以期明确 HMAB 和 HMAM 的关键性能指标及其对长寿命沥青路面耐久性的

收稿日期: 2024-06-19

作者简介: 李兵(1970—),男,山东淄博人,工程师,主要研究方向为高速公路改扩建期间相关材料研究, E-mail: 406039539@qq.com。

影响,为高模量沥青材料的优化设计和工程应用提供理论依据与技术支持。

1 材料制备

采用高沸点石油和聚合物制备 HMAB。将高沸点石油融入基质沥青,提高沥青硬度,进行间接拉伸测试。加入高沸点石油可增大沥青混合料的刚度,但脆性增大。为减小由脆性增大导致的开裂可能性,在混合黏结剂中添加质量分数为 4% 的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS),以及在沥青和聚合物间产生化学键的添加剂,防止沥青和聚合物分离。长寿命沥青路面的设计寿命大于 40 a,高模量基质沥青混合料长期存在受潮的可能性,在黏结剂中添加液态抗剥落剂,能减少受潮引起的损坏。

采用 70# 沥青黏结剂和 HMAB 分别制备普通沥青混合料和 HMAM,沥青混合料的级配曲线如图 1 所示。由图 1 可知:选择连续密集配作为骨料级配,公称最大粒径为 25 mm。根据马歇尔试验确定普通沥青混合料和 HMAM 在空隙率为 5% 时的最佳沥青质量分数分别为 4.5%、4.7%。

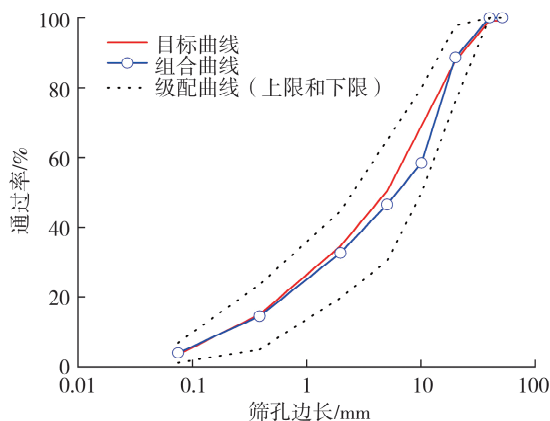


图1 沥青混合料级配

2 试验方法

对 HMAB 进行黏结剂试验,并与普通的未改性黏结剂和 SBS 改性黏结剂对比,测试 HMAB 的硬度、高温稳定性、低温抗裂性及动态荷载响应特性。对 70# 沥青黏结剂和 SBS 改性沥青黏结剂进行软化点、脆点和动态模量试验,研究黏结剂的物理和机械性能^[14-17]。

对掺加 HMAB 制备的 HMAM 进行动态模量、湿度敏感性、车辙试验和疲劳试验,测试 HMAM 的结构刚度、抗水损能力、高温抗车辙性及耐久性,对比普通沥青混合料明确其长寿命路面的适用性。

采用试验段的岩芯制备试样进行动态模量测试,试样为直径 150 mm、高 50 mm 的圆柱体,在 3 种不同温度(5、15、30 ℃)下以间接拉伸模式进行试验;在同一温度下,采用 4 种频率(20、10、0.5、0.1 Hz)进行试验。

根据文献[18]的要求,对沥青混合料进行湿度敏感性试验。测试普通沥青混合料和 HMAM 的干湿抗拉强度,采用马歇尔压实机压实测试试样,目标空隙率为 6%~8%,采用干湿状态拉伸强度比(tensile strength ratio, TSR) E_{TSR} 表示沥青混合料抵抗有害湿度效应的能力。

进行车辙试验的试件长 300 mm、宽 300 mm、高 50 mm,试验温度为 60 ℃,研究沥青混合料在高温环境下的永久变形特性,试验时在车辙板上施加的接触压力为 628 kPa,以及加载轮施加总荷载为 1.37 kN,砂轮在试样中心碾压速度为 42 次/min。

采用 MTS 的伺服液压闭环测试设备,以间接拉伸模式进行疲劳试验,试样为直径 150 mm、高 50 mm 的圆柱体,采用加载时间为 0.1 s 的半正弦波。为研究沥青混合料的愈合能力,进行有间歇和无间歇的疲劳试验,正弦波加载时分有间歇和有 0.9 s 的间歇。

3 试验结果与分析

3.1 不同沥青黏结剂的性能

70# 沥青黏结剂、SBS 改性沥青黏结剂与 HMAB 性能对比结果如表 1 所示。由表 1 可知:HMAB 的

15 ℃ 动态模量是前二者的 3 倍,刚度增大,低温性能降低。

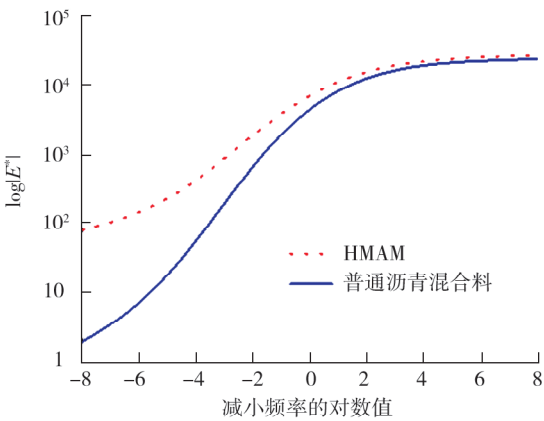
表 1 不同沥青黏结剂性能对比

材料	针入度/(0.1 mm)	软化点/℃	脆点/℃	15 ℃ 动态模量/MPa
70# 沥青黏结剂	70	48.0	-11	7.1
SBS 改性沥青黏结剂	63	100.3	-18	7.0
HMAB	28	89.0	-8	21.0

3.2 不同沥青混合料的性能

温度为 15 ℃ 时普通沥青混合料和 HMAM 的动态模量主曲线如图 2 所示。由图 2 可知:HMAM 的动态模量比普通沥青混合材料大,特别是在低频范围内更显著。依据时间-温度叠加原理,低频条件可类比高温环境,高温下 HMAM 的动态模量急剧增大,很可能是内部高沸点石油与聚合物协同作用,高沸点石油增大了黏合剂的刚度,聚合物提高黏合剂弹性,二者共同作用,显著改变 HMAM 的动态模量^[19-20]。

沥青混合料的湿度敏感性是指在潮湿条件下沥青混合料性能下降的程度。湿度敏感性试验结果如表 2 所示。由表 2 可知:2 种沥青混合料的 E_{TSR} 均大于 80.00%,符合沥青混合料设计规范^[21]。HMAM 的 E_{TSR} 比普通沥青混合料增大约 10%,表明在 HMAM 潮湿试样中水对抗拉强度的影响可忽略不计,原因是 HMAB 中预混了抗剥落剂。



注: $|E^*|$ 为动态模量的绝对值。

图 2 温度 15 ℃ 时沥青混合料的动态模量主曲线

表 2 湿度敏感性测试结果

沥青混合料类型	空隙率/%		抗剪强度/kPa		$E_{TSR}/\%$
	干燥试样	潮湿试样	干燥试样	潮湿试样	
普通沥青混合料	6.19	6.24	1 070.9	948.3	88.54
HMAM	6.36	6.35	1 515.1	1 489.6	98.32

在加载 2 万次、负载 1 372 N 的条件下进行车辙试验,普通沥青混合料和 HMAM 的车辙深度分别为 7.28、2.79 mm,动态稳定性分别为 2 747、7 168 N/mm,表明 HMAM 的高温稳定性明显优于普通沥青混合料。普通沥青混合料和 HMAM 的车辙深度与加载循环次数的对比如图 3 所示。

由图 3 可知:加载 5 000 次后 HMAM 车辙深度无明显增大,HMAM 的抗永久变形能力远优于普通沥青混合料。2 种沥青混合料的骨料级配相同,HMAM 抗车辙能力提高的主要原因是掺入 HMAB。

将刚度降至 50% 初始刚度的荷载加载次数定义为试样的疲劳寿命,沥青混合料的疲劳寿命

$$N_f=a\varepsilon_0^b,$$

式中: ε_0 为初始拉伸应变, a 、 b 为疲劳系数。

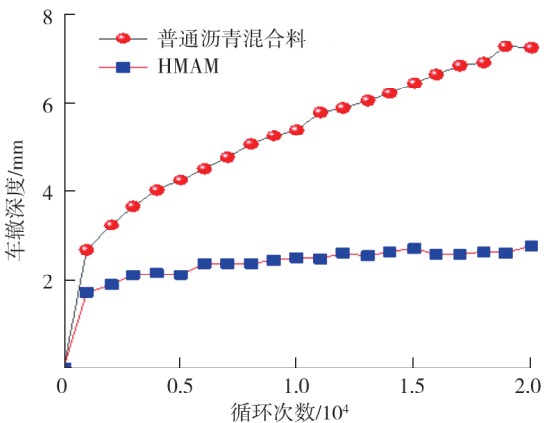


图 3 普通沥青混合料和 HMAM 的车辙深度与加载次数的关系

对2种沥青混合料的测试数据进行回归分析估算得到 a 、 b ,结果如表3所示。

表3 有间歇和无间歇测试不同沥青混合料的疲劳系数

沥青混合料类型	平均空隙率/%		a		b		决定系数 R^2	
	无间歇	0.9 s 间歇	无间歇	0.9 s 间歇	无间歇	0.9 s 间歇	无间歇	0.9 s 间歇
普通沥青混合料	4.87	4.72	6×10^{-18}	8×10^{-13}	-5.245 0	-4.162 2	0.999 3	0.900 5
HMAM	5.45	5.91	1×10^{-21}	3×10^{-36}	-6.228 2	-10.823 0	0.792 7	0.967 2

2种沥青混合料的疲劳试验结果如图4所示。由图4可知:采用沥青黏结剂后,有0.9 s间歇的沥青混合料的疲劳寿命均比无间歇的沥青混合料长,原因可能是沥青混合料在静置期间发生微损伤愈合。与普通沥青混合料相比,HMAM的疲劳寿命在间歇期后增大,表明HMAM的愈合能力更好,混合在HMAB中的SBS聚合物可能是造成这种现象的主要原因^[22-23]。

拉应变小于 150×10^{-6} 时, HMAM的抗疲劳开裂性能优于普通沥青混合料。要求厚沥青路面沥青层层底拉应变小于 150×10^{-6} ^[24],因此厚沥青路面采用HMAM后抗疲劳性能优于普通沥青混合料; HMAM的刚度比普通沥青混合料大,薄沥青路面采用HMAM后抗疲劳性能比普通沥青混合料差。

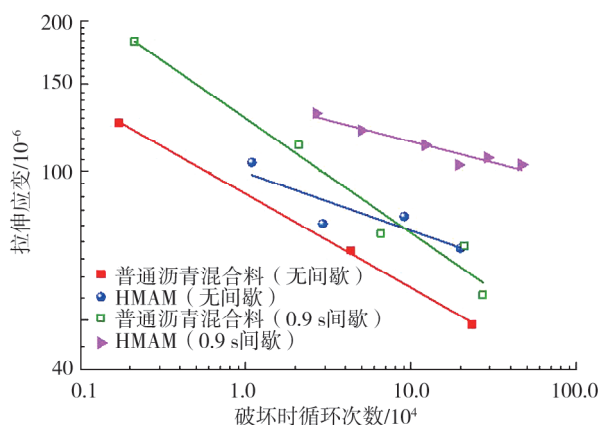


图4 普通沥青混合料和HMAM的疲劳试验结果

4 结论

制备用于长寿命沥青路面基层的HMAB和HMAM,为研究高模量沥青混合料的性能特点,对HMAB进行针入度、软化点、脆点和动态模量试验,对HMAM进行动态模量、湿度敏感性、间接拉伸疲劳性和车辙试验。

1)通过结合SBS聚合物改性沥青黏结剂和高沸点石油,制备HMAB。对黏结剂进行试验,结果表明HMAB的刚度显著提高,低温性能下降。

2)在高温条件下, HMAM的动态模量比普通沥青混合料大,高沸点石油与聚合物的双重作用下, HMAM的物理性能增强。

3)在HMAB中应用抗剥离剂, HMAM的抗水损害能力比普通沥青混合料高约10%; HMAM抵抗永久变形的能力明显优于普通沥青混合料,前者耐久性较好;拉应变小于 150×10^{-6} 时, HMAM的抗疲劳开裂能力优于普通沥青混合料。

参考文献:

- [1] 吕松涛,赵需,鲁巍巍,等.面向长寿命的既有高速公路沥青路面延寿设计综述[J].交通运输工程学报,2024,24(2):20-49.
- [2] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.
- [3] 崔鹏,邵敏华,孙立军.长寿命沥青路面设计指标研究[J].交通运输工程学报,2008,8(3):37-42.
- [4] NUNN M E, BROWN A, WESTON D, et al. Design of long-life flexible pavements for heavy traffic[M]. Crowthorne, UK: Transport Research Laboratory, 1997.
- [5] 刘鹏.长寿命沥青路面结构设计研究[J].工程技术研究,2021,6(5):141-142.

- [6] 侯荣国,王选仓,高力侠,等. 长寿命路面寿命分析方法[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(2):8-10.
- [7] 曹荣吉. 延长路面寿命是行业使命[J]. 中国公路,2020(14):26-29.
- [8] 魏君鹏. 永久性沥青路面设计[J]. 技术与市场,2016,23(9):135-136.
- [9] 王振. 基于长寿命路面的固化土路基设计研究[J]. 城市道桥与防洪,2023(8):49-52.
- [10] 石长洪,郑俞,严二虎,等. 长寿命路面结构层间处治方案及黏结性能[J]. 公路交通科技,2022,39(7):30-39.
- [11] 曹文涛. ECC在刚柔复合式长寿命路面中的应用研究[J]. 市政技术,2021,39(9):180-183.
- [12] 张杨. 全厚式长寿命路面的龙江“首秀”[J]. 中国公路,2023(20):53-55.
- [13] 朱美蓝,毕可为,于海臣,等. 基于长寿命试验段的路面结构与性能预测研究[J]. 市政技术,2023,41(5):58-65.
- [14] 王林,韦金城,张晓萌,等. “四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J]. 科学通报,2020,65(30):3238-3246.
- [15] 张奕宁,蒋晨. 高等级公路长寿命沥青路面结构设计研究[J]. 西部交通科技,2019(2):33-35.
- [16] 孙红燕,郑传超. 长寿命沥青路面结构层参数的敏感性分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(4):27-30.
- [17] 王旭东,肖倩. 长寿命路面技术发展与实践[J]. 科学通报,2020,65(30):3217-3218.
- [18] ASTM D4867-92. Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1992.
- [19] 杨光,王旭东. 高模量沥青混凝土在半刚性基层长寿命沥青路面中应用的合理性研究[J]. 公路交通科技,2019,36(5):20-26.
- [20] 王琨,郝培文. 高模量沥青及其混合料路用性能研究[J]. 公路工程,2015,40(3):5-8.
- [21] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 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.
- [22] 张玲,耿娟,司飞展. 基于性能的高模量沥青路面结构力学响应[J]. 科技和产业,2023,23(19):239-247.
- [23] 肖庆一,任希鹏,李明扬,等. 高模量沥青结合料流变特性[J]. 公路,2022,67(6):20-28.
- [24] 中华人民共和国交通运输部,中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017.

Pavement performance of high modulus asphalt mixture on long life asphalt pavement

LI Bing

Engineering Construction Project Management Center, Shandong Hi-Speed Holdings Co., Ltd., Jinan 250098, China

Abstract: To investigate the road performance of high modulus asphalt mixtures (HMAM) in long-life pavement applications, high boiling point petroleum is incorporated into base asphalt to prepare high modulus asphalt binder (HMAB). Penetration, softening point, brittleness point, and dynamic modulus tests are conducted to evaluate HMAB's hardness, high-temperature stability, low-temperature crack resistance, and dynamic load response characteristics, demonstrating its modulus enhancement and performance advantages over conventional binders. Furthermore, dynamic modulus, moisture susceptibility, rutting resistance, and fatigue tests are performed on HMAM to assess its structural stiffness, moisture resistance, high-temperature rutting resistance, and durability, confirming its suitability for long-life pavement compared to conventional mixtures. Results indicate that HMAB exhibits significantly higher stiffness than conventional asphalt while maintaining comparable low-temperature performance. Under high-temperature conditions, HMAM demonstrates a 50% higher dynamic modulus, approximately 10% improvement in moisture resistance, twice the resistance to permanent deformation, and 5~10 times greater fatigue cracking resistance compared to conventional mixtures.

Keywords: HMAB; HMAM; long life asphalt pavement; dynamic modulus

(责任编辑:王惠)