DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260869

高模量AC-20沥青混合料动态模量与车辙性能研究

张宏伟[1],王　婧[2]
(1.宁夏公路管理中心银川分中心,宁夏 银川 750001; 2.宁夏公路管理中心,宁夏 银川 750002)

摘　要: 为提高重载交通路段沥青混合料的高温抗永久变形能力,以AC-20混合料为对象,设置0~0.9%聚烯烃类高模量剂掺量,开展体积指标、55 ℃多频动态模量及60 ℃车辙试验。结果表明,高模量剂可显著提高混合料高温刚度与抗车辙能力,且对低频慢速重载工况改善更明显。掺量为0.7%时,$E^*_{55,10}$达到6 250 MPa,较基准组提高82.2%,K_{55}增至0.093;动稳定度达到11 320次/mm,提高106.6%,车辙深度降低46.9%。$E^*_{55,10}$与动稳定度相关性较高R^2达0.999。掺量增至0.9%后性能略有回落,综合确定适宜掺量为0.7%。

关键词: 高模量沥青混合料;动态模量;频率稳定性;车辙;重载交通
中图分类号: U414　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0080-04

Study on Dynamic Modulus and Rutting Performance of High-Modulus AC-20 Asphalt Mixtures

ZHANG Hongwei[1], WANG Jing[2]
(1. Yinchuan Branch of Ningxia Highway Management Center, Yinchuan 750001, China; 2. Ningxia Highway Management Center, Yinchuan 750002, China)

Abstract: To improve the high-temperature resistance to permanent deformation of asphalt mixtures in heavy-load traffic sections, taking the AC-20 mixture as the object, the dosage of polyolefin high modulus agents ranging from 0 to 0.9% is set, and the volume index, 55 ℃ multi-frequency dynamic modulus and 60 ℃ rutting tests are carried out. Results show that the high modulus agents can significantly enhance the high-temperature stiffness and rutting resistance of mixtures, and the improvement is more obvious in low-frequency, slow-speed and heavy-load working conditions. When the dosage is 0.7%, $E^*_{55,10}$ reaches 6 250 MPa, which is 82.2% higher than that of the benchmark group. K_{55} increases to 0.093. The dynamic stability reaches 11 320 times per mm, an increase of 106.6%, and the rutting depth is reduced by 46.9%. $E^*_{55,10}$ has a relatively high correlation with dynamic stability, with R^2 reaching 0.999. After the dosage is increased to 0.9%, the performance slightly declines. It is comprehensively determined that the appropriate dosage is 0.7%.

Keywords: high-modulus asphalt mixture; dynamic modulus; frequency stability; rutting; heavy traffic

0　引　言

随着货运车辆轴载、重载交通比例及渠化程度不断提高,沥青路面在高温条件下易发生车辙、推移和拥包等永久变形。较大压应力、剪应力及低速启停造成的长时荷载作用,会加剧混合料的黏性流动和塑性累积[1-2]。因此,中下面层常用AC-20混合料仅依靠常规级配骨架和基质沥青,难以满足长期重载条件下的抗变形要求。

高模量沥青混合料可通过提高胶结料刚度、增强胶浆对矿料骨架的约束,改善混合料的动态模量与高温稳定性[3-4]。然而,传统60 ℃车辙试验难以反映不同荷载作用时间下的黏弹性差异,而低频动态模量更能表征低速重载条件下的高温变形风险[5-6]。基于此,本文在AC-20级配和油石比保持不变的条件下,研究聚烯烃类高模量剂掺量对体积指标、55 ℃多频动态模量及60 ℃车辙性能的影响,并分析$E^*_{55,10}$、K_{55}与车辙指标的相关性,为重载交通路段高模量沥青混合料的材料设计与掺量优化提供依据。

1　材料与试验方法

1.1　原材料

基质沥青采用70号道路石油沥青;粗集料采用玄武岩碎石,细集料采用机制砂,矿粉采用玄武岩矿粉;高模量剂为聚烯烃类外掺型颗粒材料。原材料

收稿日期:2026-08-05
作者简介:张宏伟(1970—),男,学士,高级工程师,从事公路工程设计及管理工作。

各项技术指标均满足现行公路沥青路面相关规范及工程设计要求。聚烯烃类高模量剂在混合料拌和温度下软化并分散于沥青胶浆中，其工程作用主要表现为提高胶浆高温刚度、增强沥青膜对集料接触点的约束，并降低高温长时荷载下的黏性流动。

1.2 级配与配合比设计

混合料采用 AC-20 连续级配，设计油石比为 4.3%[7]，其合成级配见表 1。为排除级配和沥青用量差异的干扰，各试验组保持相同合成级配与油石比，仅改变高模量剂掺量。高模量剂按混合料总质量的 0%、0.3%、0.5%、0.7% 和 0.9% 设置，分别记为 HM-0、HM-0.3、HM-0.5、HM-0.7 和 HM-0.9。高模量剂在集料干拌阶段加入，充分分散后加入沥青拌和，最后加入矿粉，以提高其在混合料中的分散均匀性。不同试验组的配合比及体积指标见表 2。

表 1 AC-20 混合料合成级配

筛孔尺寸/mm	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075
通过率(%)	100.0	92.0	77.0	64.0	50.0	34.0	25.0	19.0	14.0	10.0	7.0	5.5

表 2 不同试验组配合比及体积指标

试验组	高模量剂掺量(%)	油石比(%)	空隙率 VV(%)	矿料间隙率 VMA(%)	沥青饱和度 VFA(%)
HM-0	0	4.3	4.2	13.7	69.3
HM-0.3	0.3	4.3	4.1	13.8	70.3
HM-0.5	0.5	4.3	4.2	13.9	69.8
HM-0.7	0.7	4.3	4.0	13.9	71.2
HM-0.9	0.9	4.3	4.1	14.0	70.7

1.3 试件制备与试验方案

首先进行马歇尔体积指标试验，将空隙率控制在 4.0%±0.5%，以保证不同掺量组具有可比的结构密实状态。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)开展动态模量与车辙试验[8]。动态模量试验温度为 55 ℃，加载频率为 0.1、1.0、10.0 和 25 Hz；每组不少于 3 个平行试件。选择 55 ℃是为了突出高温服役状态，0.1 Hz 用于表征长作用时间或低速重载响应，10 Hz 作为高温承载刚度的代表频率，25 Hz 用于反映较短荷载作用时间下的模量水平。

车辙试验温度为 60 ℃，以动稳定度和试验车辙深度评价混合料的抗永久变形能力。动稳定度越大、车辙深度越小，说明混合料在重复轮载作用下的变形速率越低。

1.4 评价指标与数据分析方法

以 55 ℃、10 Hz 条件下的动态模量 $E^*_{55,10}$ 作为高温承载刚度指标。为描述材料从低频到高频的模量保持能力，定义高温频率稳定系数 K_{55} 如式(1)所示：

$$K_{55}=E^*_{55,0.1}/E^*_{55,25} \quad (1)$$

式中：$E^*_{55,0.1}$ 和 $E^*_{55,25}$ 分别为 55 ℃、0.1 Hz 和 25 Hz 条件下的动态模量。K_{55} 越大，表明低频模量相对于高频模量的保持程度越高，材料受荷载作用时间变化的影响越小。采用线性回归分析 $E^*_{55,10}$、K_{55} 与动稳定度、车辙深度之间的关联，并以决定系数 R^2 评价拟合一致性。

2 结果与讨论

2.1 体积指标及试验可比性

由表 2 可知，各组 VV、VMA 和 VFA 分别为 4.0%～4.2%、13.7%～14.0% 和 69.3%～71.2%，整体差异较小，且未随高模量剂掺量呈单调变化，说明其对混合料压实状态及骨架空隙结构影响有限。因此，动态模量与车辙性能的变化主要源于胶浆高温刚度和矿料骨架约束能力增强，而非体积指标差异[9-10]。HM-0.7 空隙率仅较 HM-0 降低 0.2 个百分点，难以解释其动态模量和动稳定度分别提高 82.2% 和 106.6% 的幅度，进一步表明胶浆增刚及骨架传力能力提升是性能改善的主导因素。

2.2 加载频率对动态模量的影响

由表 3 和图 1 可知，各组动态模量均随加载频率升高而增大，呈现典型的黏弹性时间依赖特征。低频加载时，沥青胶浆具有较充分的流动与应力松弛时间，混合料刚度较低；随频率升高，黏性流动受到抑制，弹性响应增强，动态模量随之提高。

表 3 55 ℃条件下不同试验组的动态模量及频率稳定系数

试验组	$E^*_{55,0.1}$/MPa	$E^*_{55,1}$/MPa	$E^*_{55,10}$/MPa	$E^*_{55,25}$/MPa	$E^*_{55,10}$ 提升率(%)	K_{55}
HM-0	395	1 145	3 430	5 070	–	0.078
HM-0.3	490	1 410	4 240	5 900	23.6	0.083
HM-0.5	600	1 715	5 180	6 890	51.0	0.087
HM-0.7	740	2 080	6 250	7 950	82.2	0.093
HM-0.9	690	1 970	5 980	7 890	74.3	0.087

HM-0 组动态模量由 0.1 Hz 时的 395 MPa 增至 25 Hz 时的 5070 MPa。掺加高模量剂后，各频率动态模量均明显提高，并在掺量为 0.7% 时达到最大值。HM-0.7 组在 0.1、1.0、10.0 和 25 Hz 下的动态模量分别较 HM-0 组提高 87.3%、81.7%、82.2% 和 56.8%。表明低频下增幅更大，说明高模量剂对长作用时间荷

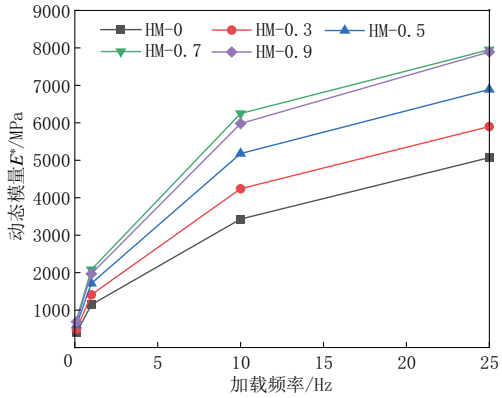


图1 55 ℃下动态模量—加载频率关系

载下的刚度提升更为明显，有利于抵抗低速重载、交叉口启停及长大纵坡爬坡等工况下的黏性剪切变形。当掺量增至0.9%时，各频率动态模量均小幅下降，其中$E^*_{55,10}$下降4.3%。该回落主要与胶浆刚度和骨架变形协调性变化有关，过量高模量剂可能使胶浆黏度和刚度过高，降低其润湿、包裹及压实适应性，并限制集料颗粒的合理嵌挤与微量重排，同时局部富集或分散不均可能引起应力集中。因此，高模量剂的增强作用并非随掺量线性增加，而存在合理的掺量区间[11-12]。

2.3 高温频率稳定性分析

K_{55}由HM-0的0.078提高至HM-0.7的0.093，增幅为19.5%，表明适量高模量剂不仅能提高动态模量，还可增强低频模量保持能力，抑制荷载作用时间延长引起的刚度衰减，从而补充单一10 Hz动态模量对时间敏感性表征的不足。当掺量增至0.9%时，K_{55}降至0.087，较HM-0.7下降约6.0%，与$E^*_{55,10}$的变化趋势一致，说明过量高模量剂可能造成刚度分布不均或界面协调性下降。因此，重载交通路面设计应关注单一频率下的模量水平，还需兼顾低频模量保持能力，以降低慢速重载条件下的黏塑性变形风险。

2.4 高模量剂对车辙性能的影响

不同高模量剂掺量混合料的车辙试验结果见表4和图2。随着高模量剂掺量由0增至0.7%，动稳定度由5 480次/mm提高至11 320次/mm，车辙深度由3.18 mm降至1.69 mm。0.3%、0.5%和0.7%掺量组的动稳定度较基准组分别提高32.3%、67.5%和106.6%，车辙深度分别降低17.6%、32.7%和46.9%，表明高模量剂可显著减缓车辙发展并降低累积变形。由于各组空隙率差异较小，车辙性能改善主要来源于高模量剂增强胶浆高温黏聚力与抗剪刚度，提高对集料的界面黏结和侧向约束，抑制颗粒转动和滑移，从而维持矿料骨架稳定并抑制塑性变形累积[13-14]。

表4 不同试验组车辙试验结果

试验组	动稳定度/（次·mm^{-1}）	动稳定度提升率(%)	车辙深度/mm	车辙深度降幅(%)
HM-0	5 480	—	3.18	—
HM-0.3	7 250	32.3	2.62	17.6
HM-0.5	9 180	67.5	2.14	32.7
HM-0.7	11 320	106.6	1.69	46.9
HM-0.9	10 640	94.2	1.78	44.0

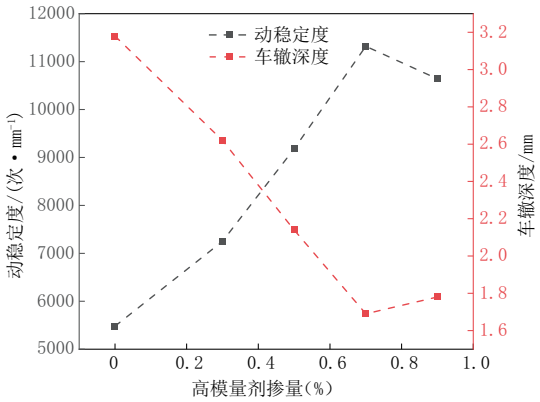


图2 掺量对动稳定度和车辙深度的影响

当掺量增至0.9%时，动稳定度降至10 640次/mm，较HM-0.7降低6.0%，车辙深度增至1.78 mm，增幅为5.3%。其原因可能是过量高模量剂导致分散不均、局部富集及压实协调性下降，削弱骨架—胶浆体系的协同作用，说明高模量剂存在适宜掺量范围。从微观与流变机制看，高模量剂在沥青胶浆中分散后，可增强胶浆内部结构约束，提高高温下的黏聚力和抗剪刚度，并限制沥青组分的黏性流动与应力松弛。同时，增强后的胶浆可提高对集料界面的黏结和约束作用，减少粗集料在重复荷载下的滑移与转动，这与动稳定度提高和车辙深度降低的试验结果相一致。

2.5 动态模量与车辙指标关联分析

基于5组试验数据，$E^*_{55,10}$与动稳定度的线性拟合关系为DS=2.039$E^*_{55,10}$−1 456，决定系数R^2=0.999。同时，$E^*_{55,10}$与车辙深度呈显著负相关，拟合关系为RD=4.903−0.000 523$E^*_{55,10}$，R^2=0.990，见图3。这说明在相同级配、油石比与试验条件下，高温动态模量越大，混合料抵抗轮载剪切流动和永久变形的能力越强[15]。

K_{55}与动稳定度的拟合R^2为0.924，虽低于$E^*_{55,10}$，但仍表现出较好的一致性。$E^*_{55,10}$反映特定代表频率下的绝对承载刚度，K_{55}反映低频至高频范围内的相对稳定性，两者物理含义不同。采用

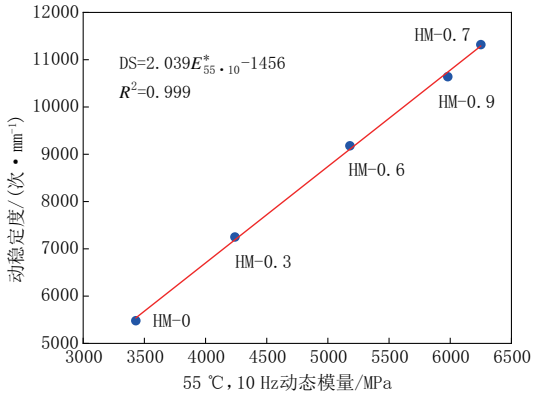


图 3　$E^*_{55,10}$ 与动稳定度的关联关系

“$E^*_{55,10}$ 绝对值+K_{55} 频率稳定性”的双指标体系，可避免仅凭单一模量值判断材料性能：前者回答材料在代表性高温荷载下“有多硬”，后者回答荷载作用时间变化时“刚度衰减有多快”。

3　结　论

（1）在相同级配与油石比条件下，各组 VV、VMA 和 VFA 差异较小，高模量剂对混合料体积结构影响有限，其性能提升主要源于胶浆高温刚度及矿料骨架约束能力增强。55 ℃下，各组动态模量均随加载频率升高而增大，且高模量剂对低频响应的改善更明显。

（2）在本文高温性能评价范围内，高模量剂掺量为 0.7% 时表现最佳。$E^*_{55,10}$ 达到 6 250 MPa，较基准组提高 82.2%，K_{55} 由 0.078 提高至 0.093；动稳定度达到 11 320 次/mm，提高 106.6%，车辙深度降低 46.9%。当掺量增至 0.9% 时，动态模量和车辙性能均出现回落，表明高模量剂存在适宜掺量范围。

（3）$E^*_{55,10}$ 与动稳定度、车辙深度具有较高相关性，R^2 分别为 0.999 和 0.990，K_{55} 可进一步表征混合料对荷载作用时间的敏感性。建议采用“高温动态模量—频率稳定性—车辙性能”联合评价高模量沥青混合料；在本研究材料组成及高温试验条件下，0.7% 可作为高模量剂的推荐掺量。

参考文献：

[1] 张晓琳，丁润铎，周海军，等. 重载沥青路面结构设计轴载及力学响应分析[J]. 公路交通科技，2024，41(9)：79-86.
[2] 王志红，杨旭红. 基于重载及水平荷载的不同类型沥青路面力学响应分析[J]. 公路，2019，64(12)：21-26.
[3] 樊康鑫，罗健林，朱敏，等. 高模量改性沥青混合料设计与路用性能对比研究[J]. 公路，2025，70(11)：175-182.
[4] 杜银飞，徐君全，王志杰，等. 纤维增强高模量沥青混合料的路用性能表征与机理研究[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(10)：3898-3908.
[5] 刘兆新，杨广亮，赵启睿，等. 基于差异化设计的相邻轻重载车道内部竖向剪应力分析[J]. 科学技术与工程，2022，22(1)：367-373.
[6] 黄优，王旭东，刘朝晖，等.SAC13 沥青混合料动态模量梯形梁试验研究[J]. 公路交通科技，2017，34(6)：7-14.
[7] 管清明.AC-20 SBS 改性沥青推移研究[J]. 四川水泥，2018(2)：356；285.
[8] JTG 3410—2025 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
[9] 王知乐. 高温环境下重复再生集料沥青混合料路用性能变化规律研究[J]. 公路，2026，71(6)：47-52.
[10] 段美栋，张志浩，曹江，等. 基于修正 Burgers 模型的沥青路面力学响应分析[J]. 公路，2026，71(5)：101-111.
[11] 季节，尤鹏超，郑文华，等. 煤液化残渣沥青砂浆及混合料性能相关性研究[J]. 材料导报，2026，40(12)：169-176.
[12] 张清泉，邹皓杨，王培贺，等. 环氧再生沥青及其混合料的路用性能研究[J]. 材料导报，2025，39(增刊 2)：470-476.
[13] 何怀平. 高模量增模改性剂提高路面抗车辙能力应用研究[J]. 中华建设，2026(7)：123-125.
[14] 单伟，董炜，刘乙丁，等. 基于分子模拟的岩沥青/丁苯橡胶复合改性沥青-集料界面特性[J]. 科学技术与工程，2026，26(2)：799-807.
[15] 贾晓东，葛垚，王大为. 固废微粉改性沥青的微观结构及作用机理分析[J]. 材料导报，2026，40(3)：112-120.

（上接第 62 页）

展综述[J]. 黑龙江交通科技，2023，46(2)：23-25.
[9] 王凯，孙欢，孙丹. 农村公路检测和技术评定的思考与分析[J]. 城市建设理论研究(电子版)，2024(21)：146-148.
[10] 王慧. 对农村公路试验检测中存在问题的思考[J]. 运输经理世界，2021(6)：15-16.
[11] 吴琳婕. 低等级农村公路路面技术状况简易评定方法探究[J]. 福建建材，2024(12)：42-45.
[12] 刘俊华. 农村公路水泥路面破损快简评价方法分析[J]. 交通世界，2021(10)：50-51；78.
[13] JTG 5210—2018 公路技术状况评定标准 [S].
[14] JTG 5211—2024 农村公路技术状况评定标准 [S].
[15] JTG 3450—2019 公路路基路面现场测试规程 [S].