

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.241299

不同RAP掺量沥青混合料动态模量性能研究

奚 鹏,史杉杉,盛海荣,王 娟,葛 唱
(江苏现代路桥有限责任公司,江苏 南京 210018)

摘 要: 为评价不同RAP掺量下再生沥青混合料的动态模量性能,作为再生沥青路面养护设计时期的设计参数依据,选用AMPT沥青混合料性能试验仪,测试了RAP掺量分别为0%、10%、15%和30%的再生沥青混合料动态模量 E^* 和相位角 φ ,并以此阐述了RAP掺量对再生沥青混合料力学性能的影响规律;同时通过2S2P1D模型建立再生沥青混合料动态模量主曲线,探讨了RAP掺量与其动态力学参数的相关性。研究数据显示:同一加载频率下,再生沥青混合料的动态模量随着RAP掺量的增加而增大;当试验温度达到35℃时,30%RAP掺量的再生沥青混合料动态模量开始降低,动态力学响应开始变差,综合考虑RAP掺量控制在30%以内较好;基于2S2P1D模型建立的再生沥青混合料动态模量主曲线相关系数 R^2 大于0.98,拟合度较好,说明可将现有的试验温度和加载频率扩展至更宽的范围,为不同应用环境下再生路面质量控制提供依据。
关键词: 废旧沥青路面材料(RAP); 2S2P1D模型; 动态模量; 主曲线
中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2025)09-0163-06

Study on Dynamic Modulus Properties of Asphalt Mixtures with Different RAP Contents

XI Peng, SHI Shanshan, SHENG Hairong, WANG Juan, GE Chang
(Jiangsu Modern Road and Bridge Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

Abstract: To evaluate the dynamic modulus properties of recycled asphalt mixtures with the different RAP contents, as a design parameter basis for maintenance and design of recycled asphalt pavement, the asphalt mixture property tester (AMPT) is used to test the dynamic modulus E^* and phase angle φ of recycled asphalt mixtures with RAP contents of 0%, 10%, 15% and 30%. And based on this, the influence law of RAP content on the mechanical properties of recycled asphalt mixture is expounded. Meanwhile, the dynamic modulus master curve of the recycled asphalt mixture is established through the 2S2P1D model to discuss the correlation between RAP content and its dynamic mechanical parameters. Research data indicate that the dynamic modulus of recycled asphalt mixtures increases with the increase of RAP content at the same loading frequency. When the test temperature reaches 35℃, the dynamic modulus of recycled asphalt mixtures with 30% RAP content begins to decrease, and the dynamic mechanical response begins to deteriorate. Taking all factors into account, it is better to control the RAP content within 30%. Based on the 2S2P1D model, the correlation coefficient R^2 of the principal curve of the dynamic modulus of the recycled asphalt mixture established is greater than 0.98, and the fitting degree is good. It is indicated that the existing test temperature and loading frequency can be extended to a wider range, providing a basis for the quality control of recycled pavement in different application environments.
Keywords: recycled asphalt pavement (RAP) material; 2S2P1D model; dynamic modulus; principal curve

0 引 言

现阶段高速公路发展重心逐渐从建设往养护方向转移。随着公路交通量的日益增加,对于公路养

护的需求也持续增长。路面翻新作为公路养护方式的组成部分,施工过程中会产生大量的废旧沥青路面材料(RAP),而路面再生技术能实现RAP的重复利用,为绿色环保的道路建设提供有效途径。再生沥青路面在服役过程中受到温度和加载频率的影响,在交通荷载作用下其力学响应特性呈现动态变化。传统的回弹模量已不适用于再生路面设计的评价指标,故引用动态模量来表征路面在动态荷载作用下力学响应的特性^[1]。然而,《公路沥青路面再生

收稿日期: 2025-01-20
基金项目: 江苏现代路桥有限公司科技项目(2021JKY18)
作者简介: 奚鹏(1992—),男,硕士,工程师,从事沥青路面预防性养护技术研究工作。
通信作者: 史杉杉(1988—),女,硕士,高级工程师,从事公路材料试验管理工作。电子邮箱: 506520363@qq.com

技术规范》(JTG/T 5521—2019)并未对再生沥青路面设计过程中的动态模量作出规定,存在一定的安全隐患,因此对再生沥青路面开展动态模量研究有着极其重要的价值。

为更好地体现沥青路面实际的受力特性,各类学者将动态模量这类动态响应试验应用于研究中。罗群星等^[2]选用道路石油沥青作为再生料的新配沥青,研究了RAP掺量分别为30%、40%和50%时再生沥青混合料动态模量的变化规律,发现40%RAP掺量的沥青混合料动态模量在高频下上升速率最快。朱玉^[3]分析了再生沥青混合料在低温条件下的相位角变化规律,发现50%RAP掺量的热再生沥青混合料相位角比新沥青混合料下降幅度大。朱晶等^[4]通过分析再生沥青混合料动态模量受RAP掺量、试验温度和加载频率等指标的影响,构建了不同RAP掺量的再生沥青混合料动态模量主曲线,发现当RAP掺量增加时其动态模量也相应增大。郭娟等^[5]阐述了当RAP掺量达到50%时,再增加RAP掺量对沥青混合料动态模量的提高效果不明显,提高幅度变小,沥青混合料黏性比例较低的结论。

为明确再生沥青混合料在合理的RAP掺量范围内的动态性能,本文首先借助室内试验,探究不同RAP掺量下再生沥青混合料动态模量的变化规律;然后基于2S2PID模型,对再生沥青混合料的动态模量主曲线进行拟合,为获得更宽加载频率域内的动态模量数值提供依据。

1 工程概况

江苏沿江高速自2016年通车以来局部路段路面出现横向裂缝、抗滑不足等病害。针对路面抗滑性能不足的路段,选用热再生养护方式对厚4.5 cm的Sup-13上面层进行养护翻新。

2 再生沥青混合料技术指标体系

2.1 回收路面材料

此次回收路面材料为沿江高速路经铣刨回收所得。将RAP分散破碎后,采用三滤乙烯试剂浸泡,并用离心分离法和旋转蒸发法分别得到旧沥青和旧集料。

2.1.1 旧沥青技术指标

将分离出的旧沥青进行指标测定,所得结果见表1。

表1 旧沥青技术指标要求及检测结果

技术指标	技术要求	检测结果
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	60~80	54
延度(5℃)/cm	≥25	17
软化点 TR&B/℃	≥80	90
旋转黏度(135℃)/(Pa·s)	≤3	2.826

2.1.2 旧集料技术指标

将离心分离所得的旧集料过4.75 mm筛,分为粗细集料后进行相应指标测定。

依据规范^[6]要求进行压碎值试验,测得压碎值为11.4%;测定细集料砂当量指标,结果为64%,均符合规范^[7]要求。

2.2 原材料

2.2.1 新沥青技术指标

本工程新沥青选用与原路面同种类型的SBS改性沥青,其技术指标见表2。由表2可知,新沥青各项检测结果均符合相应要求。

表2 SBS改性沥青技术指标要求及检测结果

技术指标	技术要求	检测结果
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	60~80	69
延度(5℃)/cm	≥25	33
软化点 TR&B/℃	≥80	88
旋转黏度(135℃)/(Pa·s)	≤3	2.514
质量变化范围/%	[-1.0, 1.0]	0.165
RTFOT后残留物 针入度比(25℃)/%	≥60	72
延度(5℃)/cm	≥20	21

2.2.2 新集料技术指标

热再生沥青面层作为直接与轮胎相接触的路面层,规定所用集料应坚硬、洁净,无杂质且颗粒形状规则,故选择玄武岩作为其粗集料原材^[8]。新集料为10~15、5~10、3~5 mm粒径的3档矿料,细集料为0~3 mm规格的玄武岩。新集料相应技术指标见表3。由表3可知,新集料各项检测结果均满足相应规范要求。

表3 新集料技术指标及检测结果

技术指标	技术要求	检测结果
粗集料破碎面/%	>95	99
细集料棱角性/s	>30	43
扁平细长颗粒含量/%	<10	5.6
砂当量/%	>45	71
磨耗值/%	<30	10.2

2.2.3 新矿粉技术指标

矿粉为自磨石灰岩矿粉,检测所得各项指标见表4。检测结果符合相应要求。

表 4 矿粉技术指标要求及检测结果		
技术指标	技术要求	检测结果
亲水系数	≤1	0.5
塑性指数/%	≤4.0	3.4
含水量/%	≤1	0.1
粒度/mm	<0.6	100
	<0.3	95~100
	<0.15	90~100
	<0.075	85~100

2.2.4 再生剂技术指标

从 2.1.1 节可知,旧路面所回收沥青的部分指标无法满足相应要求,因此添加再生剂用来恢复沥青性能。所选再生剂的相应技术指标符合规范^[7]技术要求,见表 5。

表 5 再生剂技术指标要求及检测结果		
技术指标	技术要求	检测结果
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	50~175	107.6
闪点/℃	≥220	246
芳香分/%	≥60	61.3
饱和分/%	≤30	22.4

3 再生沥青混合料配合比设计

选用旋转压实方法得到 RAP 掺量分别为 0%、10%、15% 和 30% 的再生沥青混合料。依据 Sup-13 矿料级配上下限进行各档集料的掺配,得出 4 种 RAP 掺量下的矿料合成级配(见图 1),并依据 4% 设计空隙率确定最佳沥青用量。

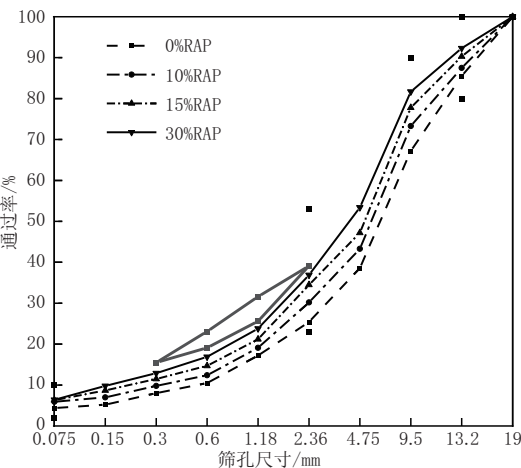


图 1 不同 RAP 掺量下矿料合成级配图

4 再生沥青混合料动态模量试验

本工程选用沥青混合料性能试验仪(AMPT)作为动态模量试验设备,这是一款用于沥青混合料设计以及路面结构设计阶段表征特性的测试仪,其独特的加载方式和温控系统可用于模拟路面在不同季

节、不同车辆载重下的服役情形,相应的试验温度和加载频率参照规范^[8]要求。具体动态模量试验条件如下:将 4 种 RAP 掺量的 Sup-13 沥青混合料旋转压实成型尺寸为 $\phi 150\times 170$ mm 的试件,并用钻芯机钻取芯样,加工得到 $\phi 150\times 100$ mm 的标准试件。试验温度 T 设定范围为 $-10\sim 50$ $^{\circ}\text{C}$,温度梯度为 15 $^{\circ}\text{C}$;加载频率 f 分别取 0.5、1.0、5.0、10.0、25.0 Hz。测定不同加载频率和不同温度下再生沥青混合料相位角 φ ^[9]和动态模量 E^* 。

5 结果与讨论

5.1 动态模量试验结果分析

为研究温度变化与再生沥青混合料动态模量的关联性,绘制了不同加载频率下再生沥青混合料试件动态模量的变化规律,结果见图 2。

分析图 2 可知:4 种 RAP 掺量下,各试件的动态模量均随着测试温度的增加而降低^[10];当加载频率为 25.0 Hz 时,30%RAP 掺量试件的动态模量始终保持最大;当试验温度达到 35 $^{\circ}\text{C}$ 时,30%RAP 掺量试件的动态模量开始小于 15%RAP 掺量试件的动态模量;试验温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 35 $^{\circ}\text{C}$ 时,各试件的动态模量数值下降趋势最为明显;10.0、1.0 Hz 频率下各试件的动态模量变化与 25.0 Hz 时类似,故不再单独分析。加载频率为 0.5 Hz、试验温度从 35 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 50 $^{\circ}\text{C}$ 时,4 种 RAP 掺量试件的动态模量趋于接近,数值相差不大。

从材料特性分析可知,在试验温度较低的情况下,再生沥青混合料力学特性接近弹性。卸载后弹性变形可恢复,应变较低,再生沥青混合料动态模量较大;随着试验温度的上升,4 种再生沥青混合料呈现出黏弹性状态,施加荷载后应变出现滞后性,变形无法迅速恢复,应变较大,动态模量较小^[11]。与其他不同 RAP 掺量的沥青混合料相比,30%RAP 再生沥青混合料的温度敏感性最为明显,说明 30%RAP 再生沥青混合料的动态力学响应较差,为确保路面性能的稳定,实际生产过程中 RAP 掺量低于 30% 较好。

5.2 相位角试验结果分析

4 种再生沥青混合料试件在 -10 、 5 、 20 、 35 、 50 $^{\circ}\text{C}$ 的相位角变化趋势如图 3 所示。由图 3 可见,当试验温度从 5 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,各试件的相位角变化最为明显。同一加载频率下,高 RAP 掺量试件的相位角小于低 RAP 掺量试件的相位角;当加载频率为 25.0 Hz、试验温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 时,30%RAP 掺量试件的相

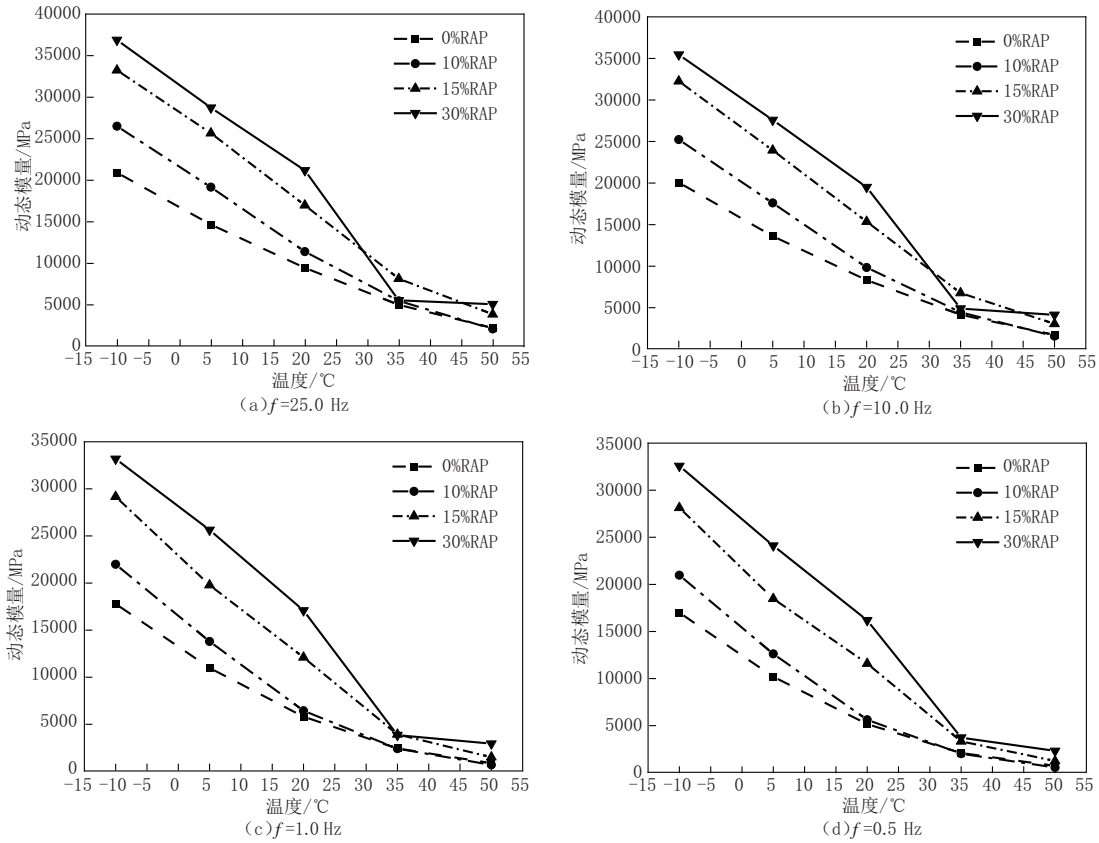


图2 不同加载频率下各试件的动态模量

位角开始大于15%RAP掺量试件的相位角;在10、1.0、0.5 Hz频率下,各试件的动态模量变化与25.0 Hz时类似,故不再单独分析。

当测试温度处于较低范围时,再生沥青混合料为弹性体状态。鉴于加载频率提升,单次荷载加载后形变未达到最大变形量就再次循环加载,从而出现整体形变较小情形。当试验温度达到35℃时,再生沥青混合料黏性特征较为显著,在荷载作用下加载频率越高,其变形滞后越明显^[12]。

5.3 基于2S2P1D模型的动态模量主曲线

5.3.1 动态模量主曲线2S2P1D模型建立

沥青路面在服役过程中受到室外环境温度以及车辆行驶荷载等多种要素的影响,室内试验并不能完全对实际温度区域以及各类加载频率范围内的沥青混合料动态模量进行试验测定。故通过2S2P1D模型建立再生沥青混合料动态模量主曲线。2S2P1D是一种分数阶模型,能将不同温度和不同频率下的黏弹性材料特性拟合成单一变量下的动态模量方程,用以预测胶结料和混合料流变特性,只需要7个参数就能得出拟合结果。2S2P1D模型在频域下的复数模量 E^* 、存储模量 E' 和耗散模量 E'' 的计算方法见式(1)至式(4)^[13]:

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

$$E^* = E_0 + \frac{E_g - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\tau\beta)^{-1}} \quad (2)$$

$$E' = E_0 + \frac{A_r}{A_r^2 + A_i^2} (E_g - E_0) \quad (3)$$

$$E'' = \frac{A_i}{A_r^2 + A_i^2} (E_g - E_0) \quad (4)$$

式中: ω 为角频率,rad/s; δ 为蠕变元校准参数; k 和 h 为无量纲抛物线蠕变元阶数,并满足 $0 < k < h < 1$; β 为无量纲常数; τ 为时间; i 为虚部; E_0 为静态模量,即 $\omega \rightarrow 0$ 时的模量,Pa; E_g 为瞬时模量,即 $\omega \rightarrow \infty$ 时的模量,Pa。

动态模量 E^* 和相位角 φ 的计算方法见式(5)、式(6):

$$E^* = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (5)$$

$$\varphi = \arctan \frac{E''}{E'} \quad (6)$$

上述式中相应的材料参数需进行试验确定。

获得动态模量试验结果后,选用WTF公式依据时-温等效原理和最小二乘法组建复数模量主曲线,参考温度定为20℃,移位因子按式(7)、式(8)计算所得:

$$\lg \omega_r = \lg \omega + \lg a(T) \quad (7)$$

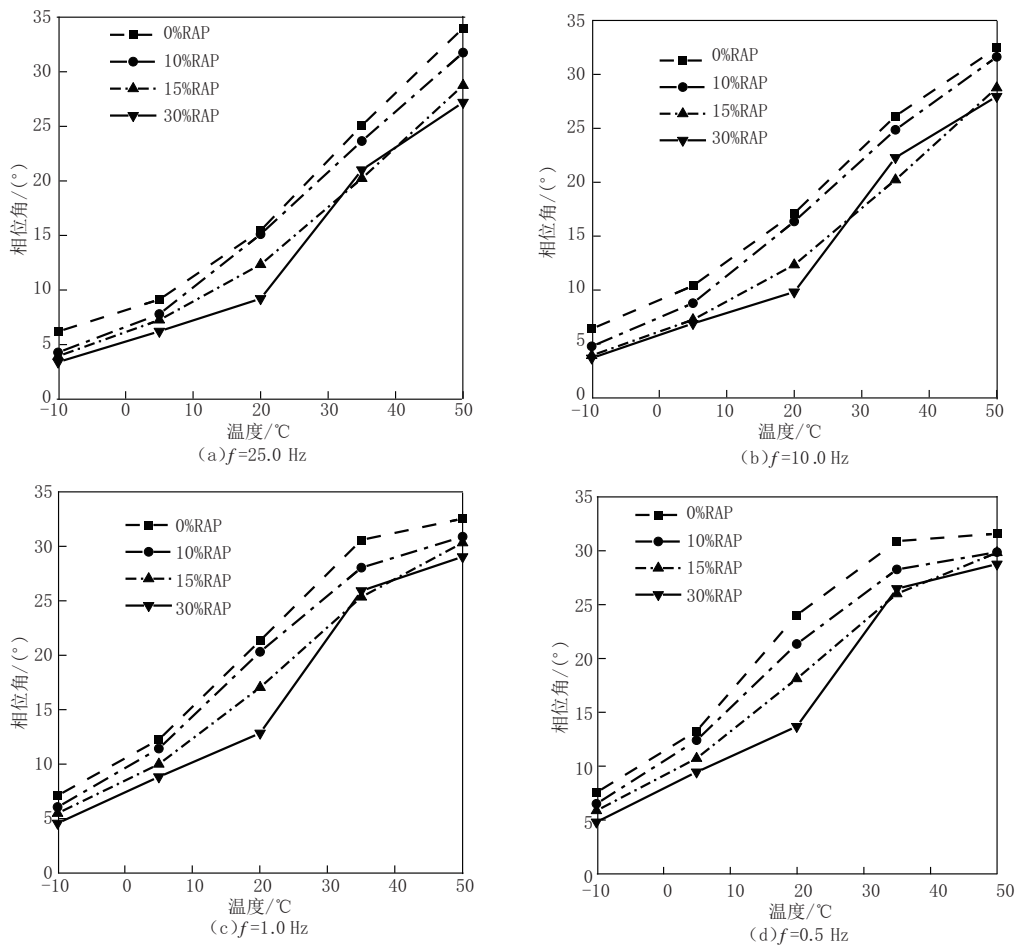


图3 不同加载频率下各试件的相位角

$$\lg \alpha(T) = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \tag{8}$$

式中： ω_r 为缩减频率； T 为试验温度； T_r 为参考温度； C_1 和 C_2 为模型参数。

现对 20 ℃下不同加载频率的动态模量展开拟合分析,得到初步的拟合方程,并将 20 ℃下的 E_0 、 E_g 、 δ 、 k 、 h 、 β 和 τ 作为初始值,用来确定不同试验温

度所对应的 $\alpha(T)$ 。最后将不同温度下的动态模量向 20 ℃平移,得到 20 ℃下动态模量主曲线拟合方程^[14]。

5.3.2 拟合结果分析

依据 4.3.1 节中的主曲线确定方式,绘制再生沥青混合料动态模量主曲线的拟合曲线,如图 4 所示。各项拟合参数见表 6。

表6 动态模量主曲线方程拟合参数表

RAP 掺量/%	E_0 /MPa	E_g /MPa	δ	k	h	β	τ	C_1	C_2
0	367.36	32 916	38.383	0.077	0.425	973.28	0.131	27.565	200
10	243.54	27 271	20.243	0.076	0.337	3 532.63	0.037	31.565	229
15	523.73	32 342	25.409	0.054	0.372	1 662.06	0.170	17.913	125
30	2 015.56	42 227	-4.234	0.116	0.342	58 976	0.050	174 174	832 888

由图 4 可见,动态模量试验结果与 2S2P1D 模型拟合效果较好。在加载频率较低的情况下,动态模量主曲线差距很小且处于相互交叉的情形,原因主要为低频时混合料骨架结构对模量的影响大于胶结料的作用。随着加载频率的增加,胶结料对集料的限制性加强,且随着 RAP 掺量的增加,再生沥青混合料整体的老化沥青占比会提升,胶结料黏度也会增加,提升了其对矿料的摩擦力,因此随着 RAP 掺量和

加载频率的增加,再生沥青混合料动态模量也会增大^[15]。

6 结 语

(1)试验温度和加载频率是影响沥青混合料动态模量和相位角数值变化的关键因素。加载频率越高、试验温度越低,其动态模量越大;加载频率越高、试验温度越高,其相位角越大。

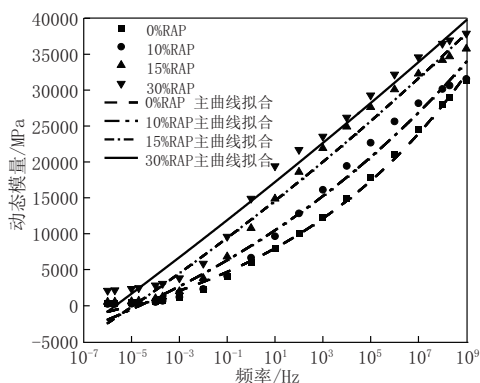


图4 不同RAP掺量下沥青混合料动态模量主曲线

(2)当试验温度在20℃以下时,RAP掺量越高,沥青混合料动态模量越大;当RAP掺量达到30%时,出现了动态模量随着试验温度变化而趋势不一致的情况,原因在于较高RAP掺量的沥青混合料性能变异性较大。因此,生产时RAP掺量控制在30%以内较好。

(3)选用2S2P1D模型构建动态模量主曲线,该模型准确适用,相关系数均大于0.98,拟合结果较好,复现性试验呈现出相同的变化规律。主曲线适用于对动态模量结果有影响的因素,如试验温度和加载频率,故能够精准推断出不同温度域和更宽加载频率下的动态模量数据。

参考文献:

[1] 叶永奇.RAP掺量对厂拌热再生沥青混合料性能的影响研究[J].企

业科技与发展,2024(8):90-93.

[2] 罗群星,潘惠雄,王文峰,等.RAP掺量对厂拌热再生沥青混合料模量影响研究[J].工程技术研究,2021,6(4):30-31.

[3] 朱玉.基于动态模量试验的热再生沥青混合料性能评价[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(5):143-144.

[4] 朱晶,刘宏富.不同RAP掺量热再生改性沥青混合料动态模量试验[J].中国公路,2023(6):110-112.

[5] 郭娟,王立辉.高RAP掺量热再生沥青混合料动态流变性能研究[J].公路,2018,63(9):242-248.

[6] JTG 3432—2024,公路工程集料试验规程[S].

[7] JTG/T 5521—2019,公路沥青路面再生技术规程[S].

[8] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[9] 张贺.再生沥青混合料的动态性能研究[D].长春:吉林建筑大学,2022.

[10] 安丰伟,纵瑾瑜,王云龙,等.沥青混合料动态模量比对试验研究[J].石油沥青,2020,34(1):11-16.

[11] BEHNOOD A, GOLAFSHANI M. Predicting the dynamic modulus of asphalt mixture using machine learning techniques: An application of multi biogeography based programming[J]. Construction and Building Materials, 2021(266): 120983.

[12] 邓少鸿,王志祥,刘逸.基于Ramberg-Osgood模型的橡胶沥青混合料动态模量研究[J].合成材料老化与应用,2023,52(6):87-91.

[13] 马昊天,范立嘉,李思童,等.基于2S2P1D模型的沥青混合料老化前后黏弹性参数演变[J].公路交通科技,2020,37(4):24-31.

[14] 朱超超.2S2P1D模型的沥青材料主曲线构建与FWD应用[D].合肥:合肥工业大学,2023.

[15] 范志宏,唐光星,邓宏观,等.基于时温等效原理的片麻岩-改性沥青混合料的动态模量主曲线研究[J].公路,2022,67(12):41-46.

(上接第145页)

性梳理,为智慧道路交通设施协同设计工作提供经验和参考。

参考文献:

[1] 刘洪纪,孙磊,杨继厅.基于智慧城市建设的综合杆设施设计难点剖析[J].智能建筑与智慧城市,2022(6):166-168.

[2] 吴国华.智慧灯杆的现状及应用场景探究[J].通讯世界,2021,28(5):219-220.

[3] 原红飞.基于物联网的矿井智慧照明系统的设计及应用[J].煤,2020,29(8):50-51.

[4] 陈希.基于智慧城市建设的城市综合杆设计及应用思考[J].光源与照明,2020(7):11-14.