

汪德才,常昊雷,郝培文,等. 改性乳化沥青冷再生混合料动态模量特性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2020,40(6):35-46.

WANG De-cai, CHANG Hao-lei, HAO Pei-wen, et al. Dynamic modulus characteristics of modified cold recycled mixture with asphalt emulsions[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(6): 35-46.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.06.004

# 改性乳化沥青冷再生混合料动态模量特性

汪德才<sup>1,2</sup>, 常昊雷<sup>2</sup>, 郝培文<sup>3</sup>, 蔡迎春<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 2. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450000; 3. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了适应沥青路面新的动态设计方法,加深对改性乳化沥青冷再生混合料动态模量的认识,针对再生剂(rejuvenation agent, RA)、玄武岩纤维(basalt fiber, BF)、布敦岩沥青(Buton rock asphalt, BRA)及聚苯乙烯丁二烯共聚物(SBR)胶乳改性的乳化沥青冷再生混合料,开展单轴压缩动态模量与车辙试验,利用时温等效原理将不同温度下的乳化沥青冷再生混合料动态模量平移形成主曲线,并通过图像比对得到乳化沥青冷再生混合料的最佳外掺剂以及最佳掺量,最后基于灰熵理论进行动态模量与动稳定度的关联分析。试验结果表明:乳化沥青冷再生混合料黏弹性质与普通热拌沥青混合料相近;RA 可以显著改善乳化沥青冷再生混合料的黏弹特性,并可降低乳化沥青的用量,但 RA 用量并非越多越好,推荐 RA 最佳用量为 8%。利用 Sigmoidal 函数确立了 7 种不同乳化沥青冷再生混合料动态模量主曲线,其总体呈现出 S 形扁平状曲线特征。在同一级配与油石比条件下,BRA、SBR 胶乳改性方式均能提升乳化沥青冷再生混合料的高温性能,而掺量(质量分数,下同)4%、8%、12%的 RA 改性对其高温性能有负面影响,相比于普通(未改性)乳化沥青冷再生混合料,采用 SBR、BRA 胶乳改性的冷再生混合料动稳定度分别增加 18.6%、5.5%,而 BF 改性以及掺量为 4%、8%、12%的 RA 改性,冷再生混合料的动稳定度分别下降 10.8%、12%、30.1%、51.7%。乳化沥青冷再生混合料动态模量与动稳定度的关联度较好。试验成果可为改性乳化沥青冷再生混合料动态模量提升及其在道路维修设计中的应用提供依据。

**关键词:**道路工程;乳化沥青冷再生;动态模量;改性手段;灰熵关联度

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2020)06-0035-12

## Dynamic modulus characteristics of modified cold recycled mixture with asphalt emulsions

WANG De-cai<sup>1,2</sup>, CHANG Hao-lei<sup>2</sup>, HAO Pei-wen<sup>3</sup>, CAI Ying-chun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Key Laboratory for Special Region Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to comply with the new dynamic design method of asphalt pavement and

收稿日期:2020-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51708513);河南省交通运输厅科技项目(2016J1)

作者简介:汪德才(1983-),男,湖南益阳人,高级工程师,工学博士,E-mail:decaiww@126.com。

further understand the dynamic modulus of modified cold recycled mixture with asphalt emulsions (CRME), uniaxial compression dynamic modulus test and rutting test were carried out about different CRME with rejuvenation agent (RA), basalt fiber (BF), Buton rock asphalt (BRA) and SBR latex modified. The principle of time-temperature equivalence was used to translate the dynamic modulus of the CRME at different temperatures to form principal curves, and the best admixture and the best content of the admixture were obtained through image comparison. Finally, the correlation between dynamic modulus and dynamic stability was analyzed base on grey entropy theory. The results show that the viscoelastic properties of the CRME are similar to those of ordinary hot-mixed (unmodified) asphalt mixtures. The additive RA can significantly improve the viscoelastic properties of the CRME and reduce the amount of emulsified asphalt. But the amount of RA is not as much as possible, according to the dynamic modulus test, the optimum dosage of RA is 8%. Using sigmoidal function, the master curves of dynamic modulus of the seven different CRME are established, which show S-shaped flat curve characteristics. Under the same gradation and asphalt aggregate ratio, both BRA and SBR latex modification methods can improve the high temperature performance of CRME, while BF modification and RA modification with 4%, 8% and 12% respectively, it have negative effects on high-temperature performance of the CRME. Compared with unmodified CRME, the dynamic stability of SBR latex and BRA modified CRME increased by 18.6% and 5.5%. However, when CRME with BF or mixed with 4%, 8% and 12% of RA, the dynamic stability of the CRME decreased by 10.8%, 12%, 30.1% and 51.7%. The grey entropy correlation analysis shows that the correlation between dynamic modulus and dynamic stability of CRME is pretty good. The test results have a certain technical reference value for improving the dynamic modulus of CRME and its application in road maintenance design. 6 tabs, 11 figs, 28 refs.

**Key words:** road engineering; cold recycled of asphalt emulsion; dynamic modulus; modification mean; grey entropy correlation

## 0 引 言

随着中国早中期修建的各级沥青路面集中进入大中修阶段,路面的翻修改建会产生大量废旧沥青面层材料(reclaimed asphalt pavement, RAP), RAP 再生利用具有良好的社会、经济与环境效益。乳化沥青冷再生技术是常见的沥青旧料再利用技术,具有对环境污染小、施工和易性好、造价经济等优点。近年来,乳化沥青冷再生技术在沥青路面养护维修和升级改造中广泛应用<sup>[1-3]</sup>,然而中国现行规范<sup>[4]</sup>中并没有引入动态模量作为乳化沥青冷再生混合料的性能控制指标。动态模量作为冷再生混合料性能的关键表征指标之一,在实际工程应用中,常会出现由于冷再生混合料强度、模量不足而导致的车辙、坑槽与裂缝等病害,这在一定程度上限制了其应用。

目前,国内外学者已对改性乳化沥青冷再生混合料(CRME)性能进行了相关研究。Kim 通过

弯沉试验、动态蠕变试验和剥落试验,评价了就地冷再生乳化沥青混合料设计过程的一致性,以确保在不同交通气候条件下其性能可靠<sup>[5]</sup>。Castaneda 使用沥青路面分析仪(APA)对不同固化温度和压实度的乳化沥青冷再生混合料进行试验研究,发现更高的压实度或固化温度会导致乳化沥青就地冷再生混合料抗车辙能力增强<sup>[6]</sup>。Li 等通过测试不同乳化沥青用量的冷再生混合料无侧限抗压强度和间接拉伸强度发现,适量的乳化沥青可以改善冷再生混合料的性能,其最佳掺量(质量分数,下同)为 3%<sup>[7]</sup>。严金海等使用 Cooper 试验机进行试验,测试了乳化沥青冷再生混合料在不同温度、应力水平下的劲度模量以及 15℃ 下间接拉伸疲劳性能<sup>[8]</sup>。李志刚等对乳化沥青冷再生混合料进行冻融循环试验,测定了不同冻融循环周期下试件空隙率、贯入剪切强度以及无侧限抗压强度,系统分析了不同冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料的力学性能与抗剪强度参数衰变规

律<sup>[9]</sup>。杨东光通过沥青路面三大路用性能试验、四点弯曲疲劳试验、肯塔堡飞散试验系统研究了不同纤维类型对乳化沥青冷再生混合料路用性能、抗松散性能和耐久性能的影响<sup>[10]</sup>。吕郑桦等针对华南湿热地区乳化沥青冷再生混合料使用环境,研究了 RAP 用量、乳化沥青用量以及水泥用量对冷再生混合料高温性能、水稳性能、疲劳性能的影响,并通过各影响因素的加权分析,对冷再生混合料进行了性能优化及影响因素优选<sup>[11]</sup>。彭杰研究了不同养生温度对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响,发现提高养生温度后冷再生混合料的高温性能、水稳性能、抗疲劳性能均有显著提高<sup>[12]</sup>。刘海鹏等使用垂直振动成型的方法制备圆柱试件,研究了矿粉、机制砂与 9.5~19.0 mm 粗集料的掺量对乳化沥青冷再生混合料强度的影响<sup>[13]</sup>。王燕采用简易三轴试验模拟路面内部的乳化沥青冷再生混合料受力状态,系统分析了沥青结合料的种类与掺量、RAP 掺配比例、试验级配等对乳化沥青冷再生混合料抗剪切强度的影响,并根据三轴试验得到剪切强度峰值,确定了乳化沥青最佳用量<sup>[14]</sup>。高新文等以乳化沥青的黏性/弹性模量、界面扩张模量、黏性和弹性的转变点、相位角等流变参数为主要特征参数,观察其随温度和频率的变化规律和对冷再生混合料性能的影响情况<sup>[15]</sup>。王宏等采用 50 ℃车辙试验,研究了养生时间、含水率、水泥掺量、乳化沥青用量等因素对乳化沥青冷再生混合料高温稳定性的影响,试验结果表明,提高早期含水率、增加水泥用量,以及采用低标号沥青均能提高冷再生混合料的高温稳定性<sup>[16]</sup>。李蓬通过对不同乳化沥青用量、水泥掺量、RAP 掺量的乳化沥青冷再生混合料进行低温弯曲试验和半圆弯曲试验,研究了各因素对其低温抗裂性能的影响,发现增大水泥掺量和乳化沥青用量均可显著提高乳化沥青冷再生混合料的低温抗裂性能,而 RAP 掺量则影响不大<sup>[17]</sup>。蒋应军等为优化乳化沥青冷再生混合料级配,采用垂直振动试验的方法研究了矿粉、机制砂与粒径 9.5~19 mm粗集料对冷再生混合料路用性能的影响<sup>[18]</sup>。张迪等测试了不同含水率下,乳化沥青冷再生混合料的抗压回弹模量、劈裂强度、钻芯完整率,揭示了其随含水率的变化规律,并建议使用含水率作为冷再生混合料层开放交通条件的控制指标<sup>[19]</sup>。

综上所述,近年来国内外学者主要集中于乳

化沥青冷再生混合料的三大路用性能、疲劳性能及飞散性能等方面的研究,且仅考虑了自身材料组成、成型方法、评价方法及养生方式对其技术性能的影响,对于不同外掺材料的改性乳化沥青冷再生混合料动态力学特性等方面则鲜有报道,也未见具体添加 RA、BF、BRA 以及采用 SBR 胶乳改性冷再生混合料的动态模量特性及高温性能等方面的报道,而这方面的研究对于提升乳化沥青冷再生混合料的动态力学性能,以及完善冷再生路面结构设计具有一定参考价值。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 材料性能与组成

#### 1.1.1 RAP

采用郑州绕城高速沥青面层铣刨材料,用阿布森法从 RAP 中获取沥青,旧沥青含量为 4.78%,25 ℃针入度为 24.1 dmm,软化点 60.8 ℃,15 ℃延度 11.6 cm,60 ℃黏度 2 831 Pa·s。RAP 含水率在 0.32%~0.59%之间,平均含水率为 0.42%。试验前,将 RAP 自然风干,不考虑 RAP 中水对拌和外加用水的影响。

#### 1.1.2 乳化沥青

基质沥青采用 70 号道路石油沥青(A-70),各项指标测试按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)<sup>[20]</sup>,结果见表 1。

表 1 基质沥青(A-70)测试指标  
Tab. 1 Testing indexes of matrix asphalt (A-70)

检测项目		规范要求	试验结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm		60~80	66
延度(15 ℃,5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		≥100	≥100
软化点(环球法)/℃		≥46.0	48.7
蜡含量(蒸馏法)/%		≤2.2	1.8
溶解度(三氯乙烯)/%		≥99.50	99.92
薄膜烘箱老化法(TFOT)后残留物	质量变化/%	≤±0.80	0.03
	针入度比(25 ℃,100 g,5 s)/%	≥61	88
	延度(15 ℃,5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	≥15	25

采用工程中常用的阳离子慢裂快凝型乳化剂制备乳化沥青,依据《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)<sup>[21]</sup>的要求进行测试,其指标见表 2。

#### 1.1.3 材料组成设计

根据筛分结果,参考规范<sup>[21]</sup>中乳化沥青冷再生混合料中粒式级配设计的要求,添加了10%的

表 2 乳化沥青测试指标

Tab. 2 Testing indexes of emulsified asphalt

检测项目		规范要求	试验结果
破乳速率		中裂或慢裂	慢裂
粒子电荷		阳离子(+)	阳离子
筛上残留物/%		≤0.100	0.011
恩格拉黏度(E25)		2.0~30.0	8.1
蒸馏残留物	残留分含量/%	≥62.0	64.2
	针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	50.0~150.0	64.6
储存稳定性	延度(5 cm·min <sup>-1</sup> ,15℃)/cm	≥40.0	87.3
	5 d 稳定度/%	≤5.00	2.21

石灰岩碎石(粒径 10~20 mm),合成级配见表 3。外掺 1.5%普通硅酸盐水泥(32.5),水为饮用自来水,所有材料技术指标均符合规范要求。最佳乳化沥青用量、拌和用水量基于旋转压实 50 次成型而确定,分别为 3.9%、3.5%。

表 3 乳化沥青冷再生混合料级配组成

Tab. 3 Gradation of CRME

筛孔孔径/mm	26.5	19	9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
通过率/%	100.0	95.9	74.5	46.7	30.2	5.7	2.6

1.2 改性方法

1.2.1 再生剂

试验所用再生剂(RA)技术指标见表 4。RA 首先应与自制的有机溶剂按质量比 1:2 混合均匀,然后分别按 RAP 中旧沥青质量分数的 4%、8%、12% 在冷再生混合料中添加。

表 4 RA 的技术指标

Tab. 4 Technical indexes of RA

测试项目	RA
60℃黏度/(Pa·s)	2.3
闪点/℃	≥230
饱和分含量/%	25
芳香分含量/%	75
薄膜烘箱试验前后黏度比	2.1
薄膜烘箱试验前后质量变化/%	1.6

1.2.2 聚乙烯丁二烯共聚物胶乳

聚乙烯丁二烯共聚物(SBR)胶乳是一种阴离子型的聚合物分散体,可以显著改善沥青的黏弹性和感温性。常温状态下呈乳白色液态,固含量 50%,易于流动。试验采用进口的 SBR 材料,pH 值 5~7,在制备 SBR 改性沥青时,通过乳化沥青成品与聚合物 SBR 胶乳混合的方式进行改性,掺量为乳化沥青用量的 3%。

1.2.3 玄武岩纤维

玄武岩纤维是天然玄武岩在 1 450℃~1 500℃高温下融化形成的岩浆,经过拉丝漏板快速拉丝形成的耐腐蚀、抗疲劳损伤、高温稳定性好的材料。试验所用玄武岩纤维采用的是短切纤维,直径 15 μm,长度 6 mm,密度 2.463 g/cm<sup>3</sup>,含水率 5%,吸油率 70%,熔点 1 450℃~1 500℃,断裂伸长率为 3.1%,抗拉强度 3 000~4 840 MPa。

1.2.4 布敦岩沥青

布敦岩沥青(BRA)由高黏度纯沥青和高活性矿物质组成,矿物质粒径很细,因此能很好地吸附沥青,BRA 改性热拌沥青混合料时具有良好的高温稳定性、低温抗裂性和抗老化性能。试验所用 BRA 中沥青质量分数 25%,灰分质量分数 75%,密度 1.71 g/cm<sup>3</sup>,外观呈黑褐色颗粒状,含水率≤1%,闪点≥230℃,粒径组成见表 5。

表 5 BRA 的粒径组成

Tab. 5 Particle size compositions of BRA

筛孔孔径/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100.0	86.0	60.0	27.0	7.9	1.6

拌和工艺:首先将冷再生混合料与称量过的外掺材料(RA、BF、BRA)在拌和锅中拌和 10~15 s,然后加入水泥干拌 8~10 s,再加水拌和 30~40 s,以充分润湿集料,最后加入乳化沥青拌和 30 s,形成具有良好和易性的乳化沥青冷再生混合料。

1.3 试验方法

1.3.1 动态模量试验

试验设备采用 IPC UTM-25,见图 1。试件基于旋转压实成型,直径 100 mm,高 150 mm,目标空隙率 10%±1%。正弦波加载,进行-10℃、0℃、10℃、15℃、20℃和 0.1、0.5、1.5、10、25 Hz 加载频率下的单轴压缩动态模量试验<sup>[22-23]</sup>。

1.3.2 车辙试验

采用车辙试验对乳化沥青冷再生混合料的高温性能进行评价。在最佳乳化沥青用量和最佳拌和用水量下拌和冷再生混合料,试件按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中轮碾法成型冷再生混合料车辙试验板,试件长、宽、高分别为 300、300、100 mm。成型后自然养生 24 h,并在 40℃烘箱中加速养生 72 h。养生结束后进行 60℃车辙试验,以动稳定度来评价乳化沥青冷再生混合料的抗车辙能力,试件成型及试验仪器见图 2。

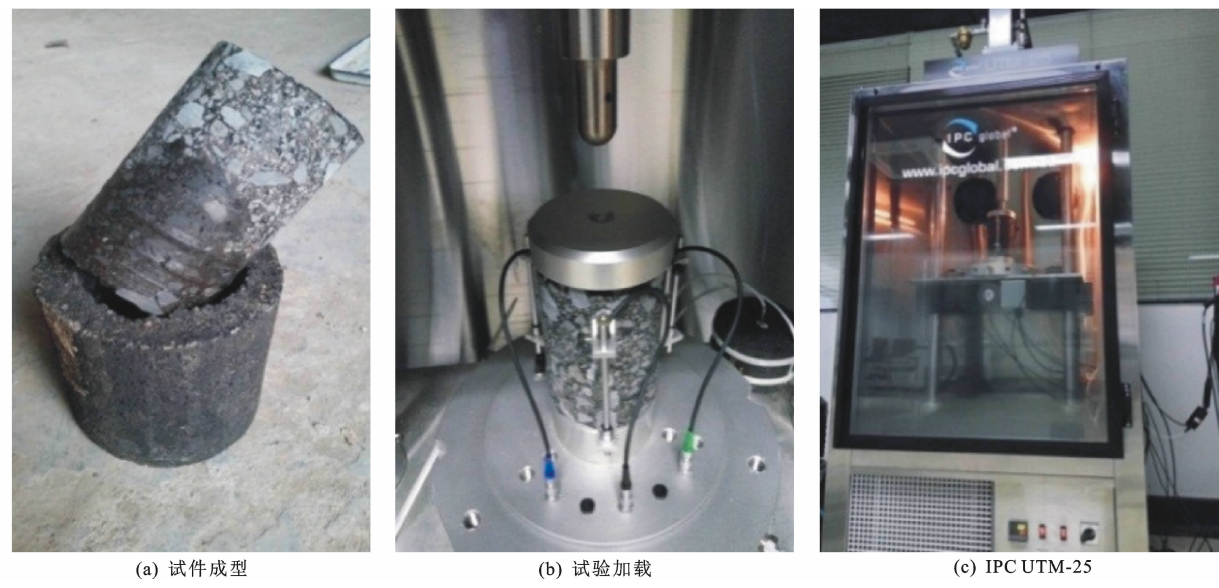


图 1 动态模量试验及设备

Fig. 1 Dynamic modulus test and equipment



图 2 试件成型及车辙试验

Fig. 2 Molding specimen and wheel tracking test

2 结果分析

2.1 温度与荷载频率的影响

普通乳化沥青冷再生混合料动态模量和相位角随荷载频率变化的曲线见图 3。由图 3 可知:普通

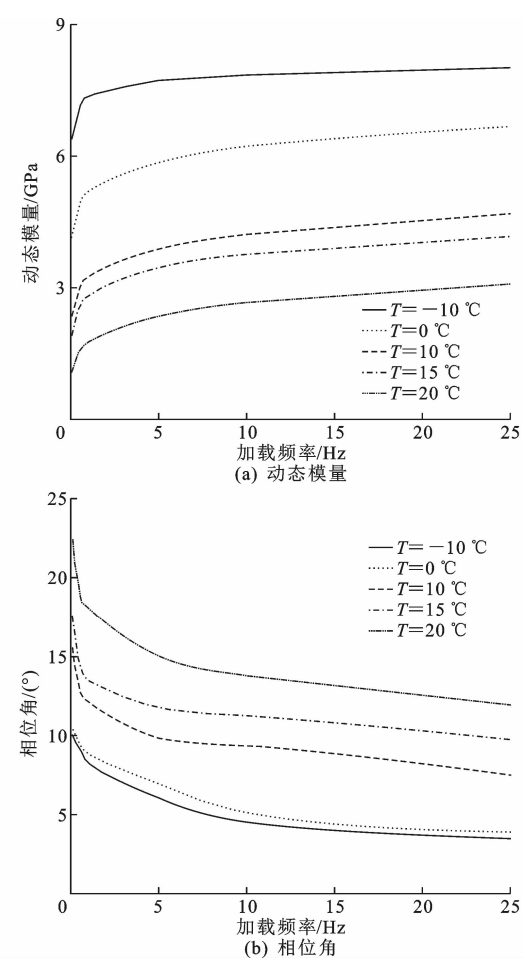


图 3 普通乳化沥青冷再生混合料动态模量、相位角试验结果

Fig. 3 Test results of dynamic modulus and phase angles of unmodified CRME

乳化沥青冷再生混合料的动态模量随荷载频率的升

高而缓慢增加,随温度  $T$  的升高呈降低趋势;而其相位角则随温度升高大幅度增加,随着荷载频率的升高缓慢下降。这说明普通乳化沥青冷再生混合料黏弹性与一般热拌沥青混合料的一致性较好<sup>[24]</sup>。

2.2 RA 对动态模量的影响

在同一级配、水泥用量的条件下,对 RA 用量分别为 4%、8%、12% 的乳化沥青冷再生混合料进行不同温度下的动态模量试验,结果见图 4~图 7。

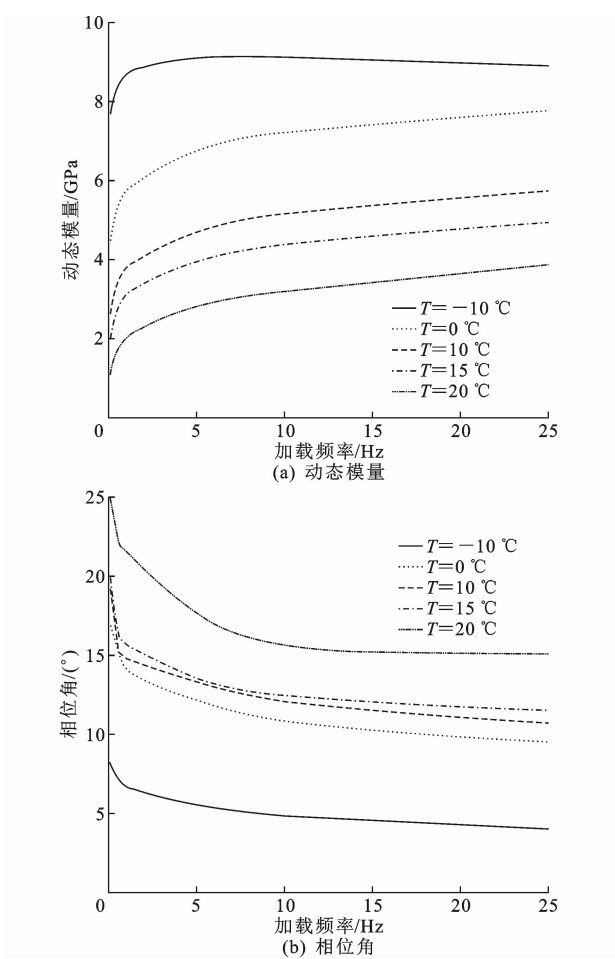


图 4 4%RA 改性乳化沥青冷再生混合料动态模量、相位角试验结果

Fig. 4 Test results of dynamic modulus and phase angles of CRME with 4% RA

由图 4~图 6 可知:掺加 RA 的乳化沥青冷再生混合料动态模量及相位角的变化趋势与普通乳化沥青混合料一致;其动态模量随荷载频率的升高而缓慢增加,相位角随荷载频率的升高缓慢下降。

图 7 为 10 Hz 荷载频率下,未改性普通乳化沥青和 RA 量分别为 4%、8%、12% 的乳化沥青冷再生混合料动态模量和相位角随温度变化。由图 7

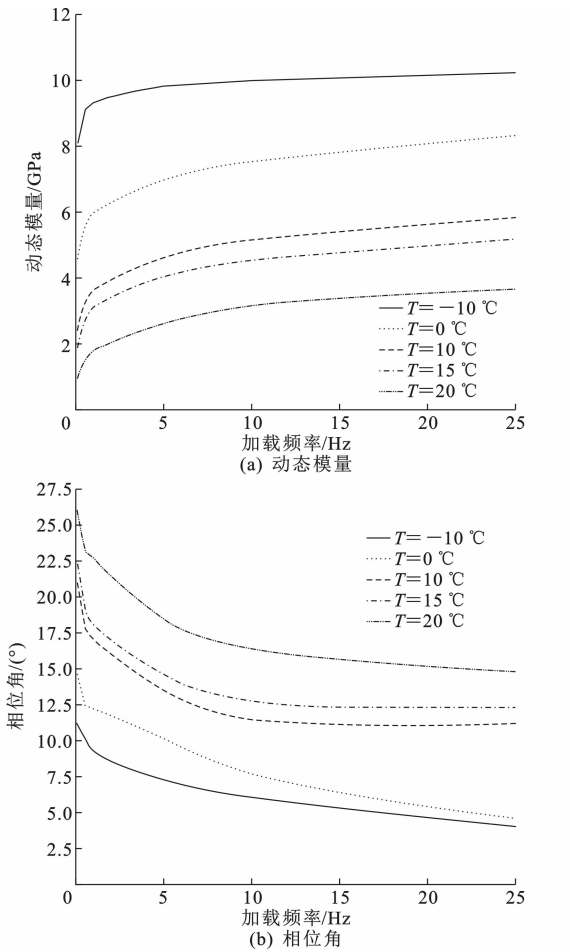


图 5 8%RA 改性乳化沥青冷再生混合料动态模量、相位角试验结果

Fig. 5 Test results of dynamic modulus and phase angles of CRME with 8% RA

可知:在相同温度和荷载频率下,RA 用量为 8% 时其动态模量最大;且 RA 用量分别为 4%、8% 时其动态模量均大于普通乳化沥青冷再生混合料;而 RA 用量为 12% 时,其动态模量小于普通乳化沥青冷再生混合料。因为过少的 RA 恢复旧沥青的性能有限,而过量的 RA 则会导致冷再生混合料流动性增加,从而降低其强度<sup>[25-26]</sup>。这也间接说明了 RA 可以适当降低乳化沥青的用量。RA 添加至乳化沥青冷再生混合料后,RA 会浸润到 RAP 材料中,并向其材料体系提供轻质油性组分,恢复部分旧沥青的性能,并改善旧料的流变性能,增加其复合胶浆的内在黏聚力,从而可以有效替代一部分作为黏结剂的乳化沥青。相同温度下掺加 RA 的乳化沥青冷再生混合料,其相位角均大于普通乳化沥青冷再生混合料,且 RA 用量越大,其相位角越大。说明掺加 RA 能在一定程度上恢复旧沥青性能,改善其流变特性,提高相位角。相位角越



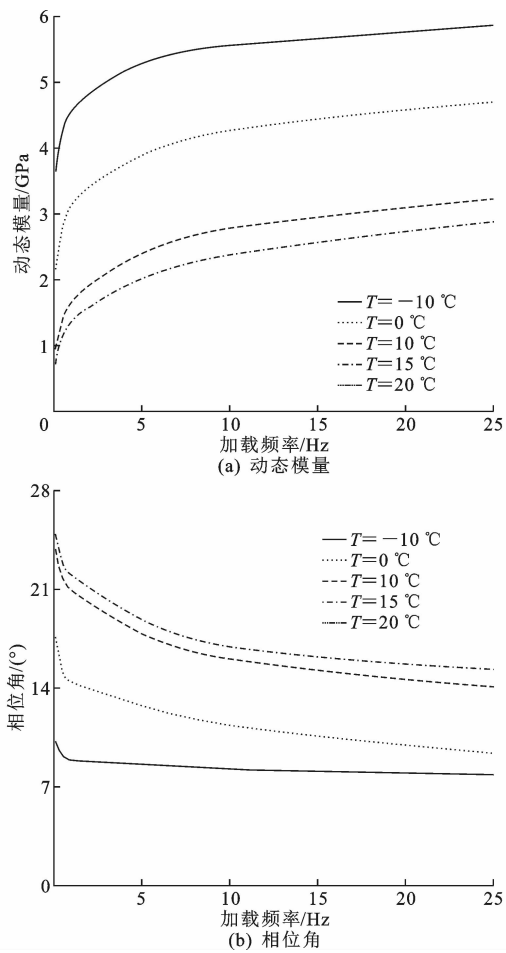


图 6 12%RA 改性乳化沥青冷再生混合料动态模量、  
相位角试验结果

Fig. 6 Test results of dynamic modulus and phase  
angles of CRME with 12% RA

大,说明冷再生混合料的黏性越强。

综上可知:RA 用量并非越多越好,存在最佳用量,使得乳化沥青冷再生混合料的动态模量最大,相位角最佳。对于本文中所选 RAP 和 RA, RA 用量为 8% 时效果最优。

### 2.3 其他添加剂对动态模量的影响

在相同水泥用量、同一级配的条件下,对添加 BF、SBR 胶乳、BRA 的 3 种乳化沥青冷再生混合料分别进行动态模量试验,其试验结果如图 8 所示。由图 8 可知,掺加 BF、SBR、BRA 的乳化沥青冷再生混合料动态模量变化趋势与未改性的一致,其动态模量随荷载频率的升高而缓慢增加。由图 8(d)可以看出,掺加 BRA 的乳化沥青冷再生混合料在温度大于  $20^{\circ}\text{C}$  时,其动态模量稍大于普通的冷再生混合料,而在温度小于  $20^{\circ}\text{C}$  时,掺加 BRA 以及 BF、SBR 胶乳时则小于普通乳化沥青冷再生混合料。

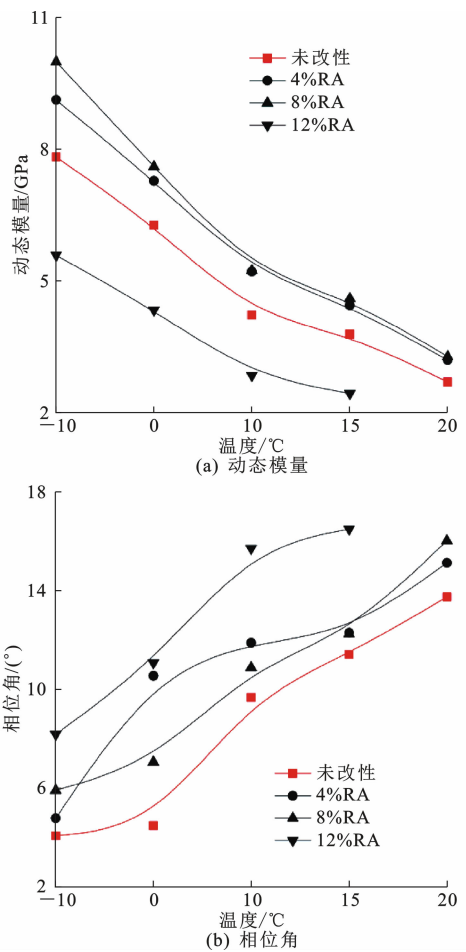


图 7 10 Hz 下 4 种乳化沥青冷再生混合料动态模量、相位角对比

Fig. 7 Comparisons of dynamic modulus and  
angles of 4 types of CRME at 10 Hz

### 2.4 主曲线确定及分析

根据时温等效原理,利用 Sigmoidal 函数,将不同温度下的动态模量平移并形成主曲线,得到不同温度下的移位因子,如表 6 所示。

移位因子是温度函数,反映了动态模量主曲线在不同温度下的平移量。在温度差异相同的情况下,移位因子的绝对值越大,表明材料对温度敏感性越强。由表 6 可知:与普通乳化沥青混合料相比,添加了 RA、SBR 胶乳、BF 以及 BRA 的乳化沥青冷再生混合料动态模量主曲线的移位因子绝对值普遍较小,表明其温度敏感性相对普通沥青混合料有所降低。

本文选用  $15^{\circ}\text{C}$  作为参考温度,利用 Sigmoidal 函数,将 7 种乳化沥青冷再生混合料在不同温度下动态模量平移形成主曲线,如图 9 所示。由图 9 可以看出:7 种冷再生混合料主曲线变化特征总体呈现出 S 形扁平状,一方面反映了混合料动态模量随荷载频率(温度)的变化趋势,即动态模量随

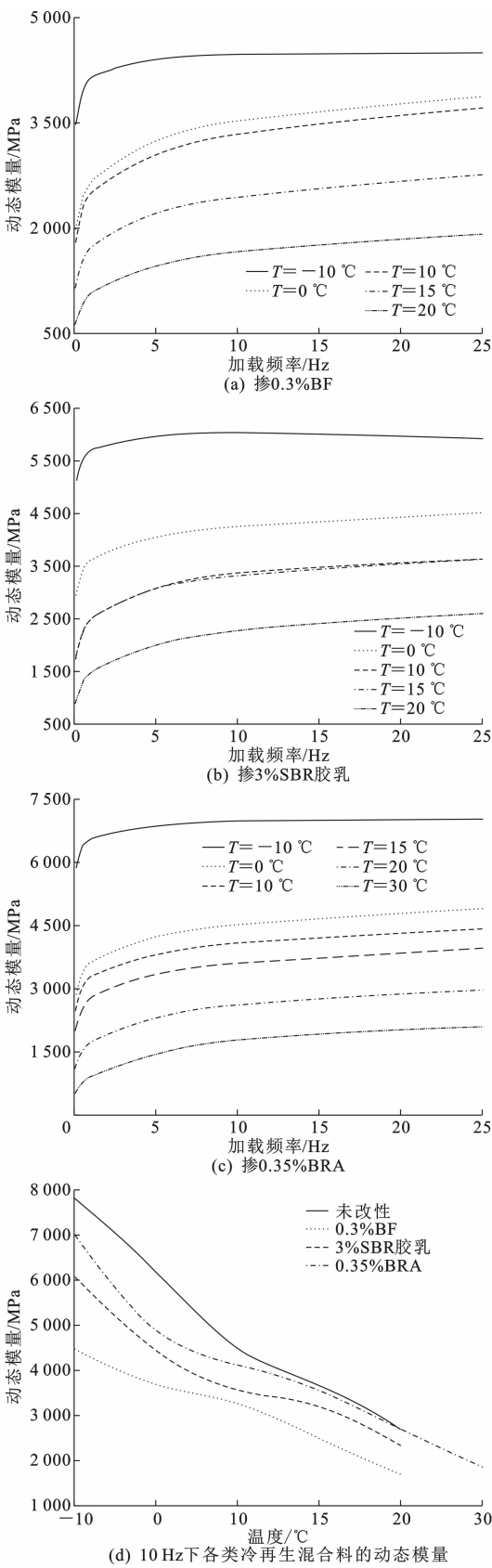


图 8 其他类型乳化沥青冷再生混合料动态模量

Fig. 8 Dynamic modulus of other types CRME

荷载频率的提高(温度的下降)而增大,其差异逐

渐变大,最后趋于稳定;另一方面反映了乳化沥青冷再生混合料在低温(高频)下所表现的弹性特征与在高温(低频)下所表现的黏塑性特征。根据动态模量主曲线可以确定在较高与较低荷载频率下的力学特性。

由图 9 可知:RA 用量为 4%、8%时乳化沥青冷再生混合料动态模量均大于未改性的冷再生混合料,而 RA 为 12%时的动态模量小于未改性的冷再生混合料,RA 用量 8%时动态模量最大,为最佳用量;在高频(低温)情况下,添加 BF、SBR 胶乳及 BRA 的 3 种乳化沥青冷再生混合料动态模量整体小于未改性的冷再生混合料,但随加载频率的降低(温度的升高),其动态模量主曲线与未改性的冷再生混合料出现接近甚至交叉的趋势。这也再次说明了较高温度对乳化沥青冷再生混合料体系性能的影响。

2.5 高温性能

同一级配和油石比的条件下,分别对 7 组不同乳化沥青冷再生混合料的高温性能进行测试,结果如图 10 所示。

由图 10 可知:相比于普通乳化沥青冷再生混合料,添加 SBR 胶乳改性的冷再生混合料动稳定度增加了 18.6%,添加 BF 的冷再生混合料动稳定度减少了 10.8%,添加 BRA 的冷再生混合料动稳定度增加了 5.5%。在高弹态温度范围下,相对较软状态的沥青与较硬的 SBR 胶乳共混改善了沥青的黏弹性质,使得高弹态沥青的黏度提高,从而提高了沥青抗车辙能力。BRA 由许多大分子、多环分子结构、极性碳氢化合物及其金属元素衍生物组成,这种独特的聚合体结构能在一定程度上提高混合料黏附性,并且具有良好的高温稳定性。而 BF 表面粗糙,拌和时的相对摩擦力较大并容易成团,压实难度增加,混合料难以分散均匀,且在混合料中未真正形成纤维加筋的作用,降低了冷再生混合料高温稳定性<sup>[27]</sup>。

当 RA 用量为 4%、8%、12%时,乳化沥青混合料动稳定度分别下降了 12%、30.1%、51.7%,RA 用量越大,动稳定度越低。因为 RA 加入冷再生混合料后,会与 RAP 中的旧沥青组分融合,改善其流变特性,使 RAP 中的旧沥青软化。RA 的用量越大,则软化的旧沥青越多,相应的冷再生混合料高温稳定性就会越差。在冷再生混合料中添加 RA 可以有效降低黏结剂(乳化沥青)的用量。



3 灰熵关联分析

基于灰熵分析法<sup>[28]</sup>,研究不同改性乳化沥青冷再生混合料动态模量与动稳定度的关联性。设  $x$  为灰关联因子集。

将参考序列记为  $x_0$ ,即

$$x_0=(x_0(1),x_0(2),\cdots,x_0(n)),n\text{ 为整数。}$$

比较序列记为  $x_i$

$$x_i=(x_i(1),x_i(2),\cdots,x_i(n)),i=1,2,\cdots,m$$

各系列的均值像 $\overline{x_i}$ (或初值像  $x'_i$ )

$$x'_i=\frac{x_i}{\overline{x_i}}=(x'_i(1),x'_i(2),\cdots,x'_i(n))\tag{1}$$

式中: $\overline{x_i}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^nx_i(k),k=1,2,\cdots,n$

$x_0$  与  $x_i$  的均值像(或初值像)对应分量之差的绝对值序列  $\Delta_i(k)$ 可表示如下

$$\Delta_i(k)=|x'_0(k)-x'_i(k)|\tag{2}$$

式中: $\Delta_i=(\Delta_i(1),\Delta_i(2),\cdots,\Delta_i(n))$

$\Delta_i(k)$ 的两极最大差  $M$ 与两极最小差  $m$ ,分别记为

$$M=\max_{i=1,m}\max_{k=1,n}\Delta_i(k)\tag{3}$$

$$m=\min_{i=1,m}\min_{k=1,n}\Delta_i(k)\tag{4}$$

比较列和参考列间的灰关联系数  $\xi_i[x_0(k),x_i(k)]$ 可表示为

$$\xi_i[x_0(k),x_i(k)]=\left|\frac{\min_{i=1,m}\min_{k=1,n}\Delta_i(k)+\rho\max_{i=1,m}\max_{k=1,n}\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+\rho\max_{i=1,m}\max_{k=1,n}\Delta_i(k)}\right|=\left|\frac{m+\rho M}{\Delta_i(k)+\rho M}\right|\tag{5}$$

式中:分辨系数  $\rho\in(0,1)$ ,灰熵计算中取 0.5。

求分布的密度值

$$P_h\triangleq\frac{\zeta[x_0(k),x_i(k)]}{\sum_{k=1}^n\xi[x_0(k),x_i(k)]}\tag{6}$$

式中: $P_h$  为分布的密度值, $P_h\in P_i(h=1,2,\cdots,n)$ , $P_i$  为密度值的集合; $\zeta$  为关联系数。

序列  $x_i$  关联熵  $H(R_i)$ 表示为

$$H(R_i)\triangleq-\sum_{k=1}^nP_h\ln P_h\tag{7}$$

序列  $x_i$  的灰熵关联度  $E(x_i)$ 为

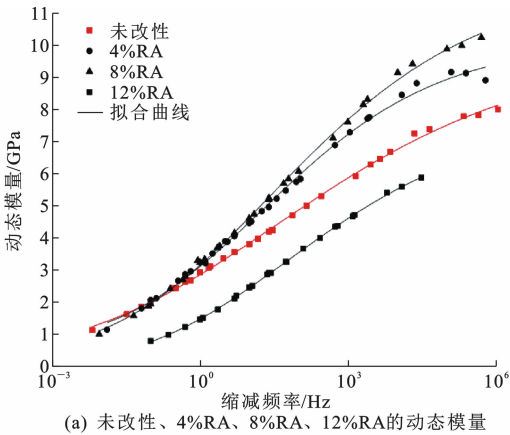
$$E(x_i)\triangleq\frac{H(R_i)}{H_{\max}}\tag{8}$$

式中: $H_{\max}=\ln n$ ,为  $n$  个元素构成的差异信息列的最大熵。

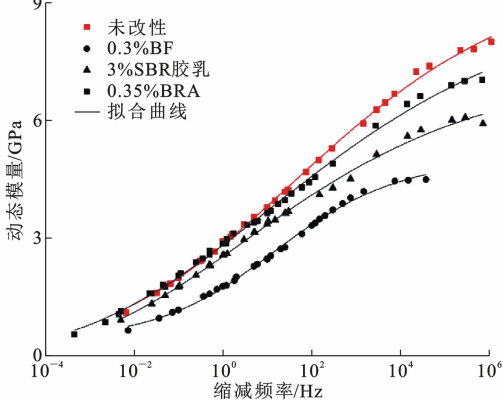
表 6 不同乳化沥青冷再生混合料移位因子计算结果

Tab. 6 Calculation results of temperature shift factor of different CRME types

混合料 类型	不同试验温度下的计算值					
	-10 ℃	0 ℃	10 ℃	15 ℃	20 ℃	30 ℃
普通乳化沥青(未改性)	4.653 2	2.462 4	0.477 1	0	-1.187 1	
4%RA	4.397 9	2.041 4	0.556 3	0	-0.886 1	
8%RA	4.311 8	2.000 0	0.397 9	0	-1.045 8	
12%RA	3.096 9	1.740 4	0.361 7	0		
0.3%BF	3.176 1	1.301 0	1.079 2	0	-1.136 7	
3%SBR胶乳	4.462 4	1.477 1	0.021 2	0	-1.301 0	
0.35%BRA	4.447 2	1.079 2	0.544 1	0	-1.301 0	-2.346 8



(a) 未改性、4%RA、8%RA、12%RA的动态模量



(b) 未改性、0.3%BF、3%SBR胶乳、0.35%BRA的动态模量

图 9 A-70 与掺不同添加剂的乳化沥青冷再生混合料动态模量主曲线

Fig. 9 Master curves of dynamic modulus of A-70 and CRME with different additives

以不同改性乳化沥青冷再生混合料的动稳定度为参考列,以 10 Hz 加载频率下,不同温度的乳化沥青冷再生混合料动态模量和 15 ℃温度条件下不同加载频率的动态模量为比较序列,按上述理论推导计算序列间的灰熵关联度,见图 11。灰熵关联度越高,则比较列与参考列的关联性越强。由图 11 可知,无论是固定温度 15 ℃还是固定频率 10 Hz 条件

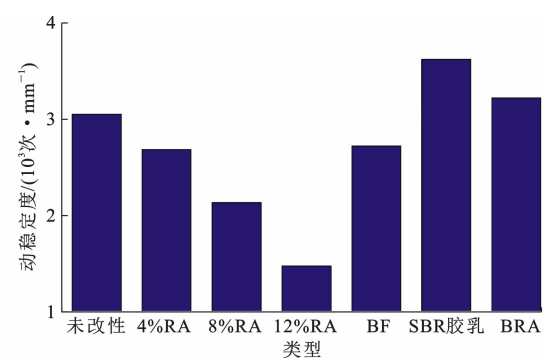
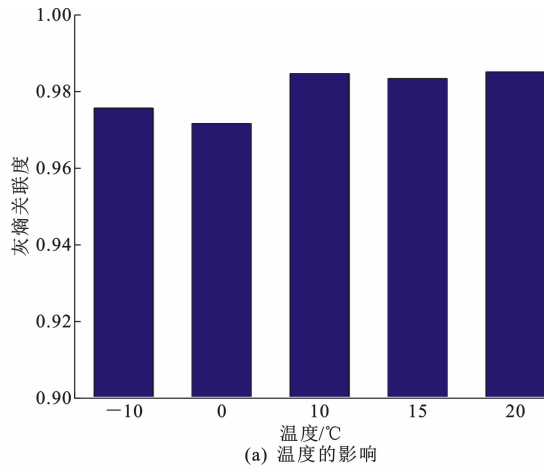
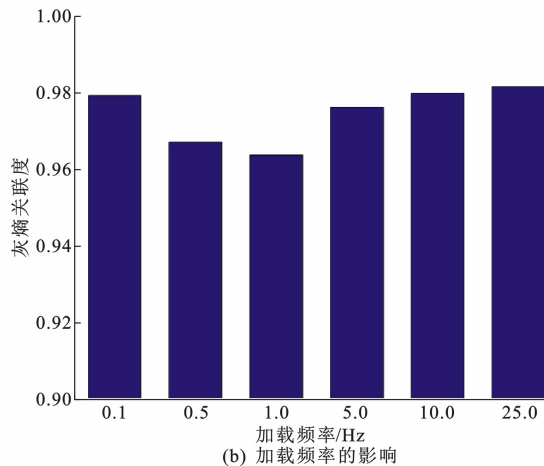


图 10 不同类型冷再生混合料动稳定度

Fig. 10 Dynamic stabilities for different types of CRME



(a) 温度的影响



(b) 加载频率的影响

图 11 动态模量与动稳定度的灰熵关联度

Fig. 11 Grey correlations between dynamic modulus and dynamic stabilities

下,不同改性乳化沥青冷再生混合料的动稳定度与动态模量的灰熵关联度均大于 0.96,表明乳化沥青冷再生混合料的动稳定度与动态模量具有较好的关联度。

4 结 语

(1)单轴压缩动态模量试验中未发现 SBR 胶

乳、BRA、BF 三种改性方式对乳化沥青冷再生混合料动态模量有明显改善作用,而适量 RA 可以显著提升其动态模量。根据时温等效原理,利用 Sigmoidal 函数确立了 7 种不同乳化沥青冷再生混合料动态模量主曲线,其总体呈 S 形扁平状曲线特征。

(2)在同一级配和油石比的条件下,添加 SBR 胶乳、BRA 可以显著提升乳化沥青冷再生混合料的高温性能;而外掺 BF 和不同用量的 RA 均会影响冷再生混合料的抗车辙能力,且 RA 用量越大其动稳定度越低。

(3)RA 能显著改善乳化沥青冷再生混合料黏弹特性,并能降低其乳化沥青的用量,但 RA 用量并非越多越好,本文推荐 RA 最佳用量为 8%。

(4)灰熵关联分析结果表明,乳化沥青冷再生混合料动态模量与动稳定度有较好的关联度。

(5)本文中未开展改性材料添加工艺以及微观结构等方面研究。下一步需要开展外掺材料添加工艺、乳化沥青冷再生混合料形成强度后的内部微观结构演变,及其强度形成机理等方面的研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] 付 涛. 旧沥青路面冷再生混合料性能研究[J]. 中外公路,2018,38(6):263-269.  
FU Tao. Study on cold recycled mixture performance of old asphalt pavement[J]. Journal of China and Foreign Highway,2018,38(6):263-269.

[ 2 ] WANG Z,SHU X,RUTHERFORD T,et al. Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar[J]. Construction & Building Materials,2015,75:25-30.

[ 3 ] 王振军,安等等,刘 亮,等. 水泥乳化沥青胶浆与 RAP 附着性的量化评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2016,36(5):16-21,59.  
WANG Zhen-jun,AN Deng-deng,LIU Liang,et al. Quantitative evaluation of the adhesion between cement emulsified asphalt mortar and RAP[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016,36(5):16-21,59.

[ 4 ] CJ/T 529—2018,冷拌用沥青再生剂[S].  
CJ/T 529—2018,Asphalt regeneration agent for cold mixing[S].

[ 5 ] KIM Y. Development of new mix design for cold in-place recycling using foamed asphalt[D]. Iowa City:

- University of Iowa, 2007.
- [6] CASTANEDA F A. Mix design and engineering properties of cold in-place recycling mixtures[D]. Reno: University of Nevada, 2018.
- [7] LI J X, YIN X B, YUAN J, et al. Performance of emulsified asphalt full thickness cold recycling sub-grade materials[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3140: 704-708.
- [8] 严金海, 倪富健, 杨美坤. 乳化沥青冷再生混合料的间接拉伸疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1): 58-61, 77.  
YAN Jin-hai, NI Fu-jian, YANG Mei-kun. Indirect tensile fatigue performance of emulsified asphalt cold recycled mixture[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(1): 58-61, 77.
- [9] 李志刚, 郝培文, 徐金枝. 冻融循环作用对乳化沥青冷再生混合料抗剪性能的影响[J]. 材料导报, 2016, 30(10): 121-125.  
LI Zhi-gang, HAO Pei-wen, XU Jin-zhi. Study on impacts of freeze-thaw cycles on the shear performances of emulsified asphalt cold recycle mixture[J]. Materials Review, 2016, 30(10): 121-125.
- [10] 杨东光. 不同纤维对乳化沥青冷再生混合料力学及路用性能的影响[J]. 公路, 2020, 65(3): 1-7.  
YANG Dong-guang. Effect of different fibers on mechanical and road performance of emulsified asphalt cold recycled mixture[J]. Highway, 2020, 65(3): 1-7.
- [11] 吕政桦, 申爱琴, 覃 潇, 等. 乳化沥青冷再生混合料性能优化及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4): 614-619.  
LU Zheng-hua, SHEN Ai-qin, QIN Xiao, et al. Performance optimization and mechanism of emulsified asphalt cold recycled mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4): 614-619.
- [12] 彭 杰. 养生温度对泡沫沥青冷再生混合料路用性能影响的研究[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 285-289.  
PENG Jie. Research on the effect of health temperature on the road performance of foamed asphalt cold recycled mixtures[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2017, 37(3): 285-289.
- [13] 刘海鹏, 蒋应军, 胡永林, 等. 级配对乳化沥青冷再生混合料强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 503-510.  
LIU Hai-peng, JIANG Ying-jun, HU Yong-lin, et al. Influence of gradation on strength of emulsified asphalt cold recycled mixture[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 503-510.
- [14] 王 燕. 泡沫(乳化)沥青冷再生混合料的剪切性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(9): 81-88.  
WANG Yan. Shear properties of cold recycled foamed (emulsified) asphalt mixture[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2017, 34(9): 81-88.
- [15] 高新文, 庞瑾瑜. 冷再生混合料用乳化沥青流变性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2018, 38(4): 21-28.  
GAO Xin-wen, PANG Jin-yu. Rheological properties of emulsified asphalt for cold recycled mixtures[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38(4): 21-28.
- [16] 王 宏, 郝培文, 南兵章, 等. 乳化沥青冷再生混合料高温稳定性研究[J]. 公路工程, 2013, 38(4): 191-195.  
WANG Hong, HAO Pei-wen, NAN Bing-zhang, et al. Research on high temperature stability of emulsified asphalt cold recycled mixes[J]. Highway Engineering, 2013, 38(4): 191-195.
- [17] 李 蓬. 泡沫沥青冷再生混合料低温抗裂性评价方法及影响机理分析[J]. 公路工程, 2017, 42(2): 233-237, 266.  
LI Peng. Low temperature cracking resistance evaluation methods and influence mechanism of foamed asphalt cold recycled mixture[J]. Highway Engineering, 2017, 42(2): 233-237, 266.
- [18] 蒋应军, 韩占闯. 级配对乳化沥青冷再生混合料路用性能影响[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(6): 607-614.  
JIANG Ying-jun, HAN Zhan-chuang. Influence of gradation on pavement performance of emulsified asphalt cold regenerated mixture[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(6): 607-614.
- [19] 张 迪, 方 琳, 王建伟. 养生期乳化沥青冷再生混合料强度及疲劳损伤特性[J]. 公路工程, 2016, 41(1): 236-241.  
ZHANG Di, FANG Lin, WANG Jian-wei. Characteristics of strength and fatigue damage for emulsified asphalt cold recycled mixture[J]. Highway Engineering, 2016, 41(1): 236-241.
- [20] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].  
JTG F40—2004, Technical specifications for highway

- asphalt pavement construction[S].
- [21] JTG/T 5521—2019, 公路沥青路面再生技术规范[S].
- JTG/T 5521—2019, Technical specifications for highway asphalt pavement regeneration[S].
- [22] 刘 伟, 严金海, 李 锋, 等. 乳化沥青冷再生混合料动静模量相关性[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 1-6, 24.
- LIU Wei, YAN Jin-hai, LI Feng, et al. Correlation between dynamic modulus and static modulus of cold recycled mixture with emulsified asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(5): 1-6, 24.
- [23] GRAZIANI A, GODENZONI C, CANESTRARI F. Experimental characterization of the 3D linear viscoelastic behavior of cold recycled bitumen emulsion mixtures[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2019, 6(4): 324-336.
- [24] 李 敏. 泡沫(乳化)沥青冷再生混合料动态模量特性及其主曲线研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 8-16.
- LI Min. Study on dynamic modulus characteristics and master curve of foamed (emulsified) asphalt cold recycled mixture [J]. Highway Engineering, 2016, 41(3): 8-16.
- [25] 王 清, 汪德才, 都敬丽. 不同改性方式对乳化沥青冷再生混合料疲劳性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(2): 44-48.
- WANG Qing, WANG De-cai, DU Jing-li. Effect of different modification methods on fatigue properties of cold recycled emulsified asphalt mixture[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2019, 36(2): 44-48.
- [26] 周志刚, 杨银培, 张清平, 等. 再生剂对旧沥青的再生行为[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 10-16.
- ZHOU Zhi-gang, YANG Yin-pei, ZHANG Qing-ping, et al. Recycling behavior of recycling agent on aged asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 10-16.
- [27] 汪德才, 郝培文, 魏新来. 乳化沥青冷再生混合料疲劳性能及影响因素[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(4): 541-546.
- WANG De-cai, HAO Pei-wen, WEI Xin-lai. Fatigue performance and influence factor for cold recycling mixture with emulsified asphalt[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(4): 541-546.
- [28] 张岐山, 郭喜江, 邓聚龙. 灰关联熵分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(8): 7-11.
- ZHANG Qi-shan, GUO Xi-jiang, DENG Ju-long. Grey relation entropy method of grey relation analysis[J]. System Engineering Theory and Practice, 1996, 16(8): 7-11.