

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202309102024081980

文章编号:1674-599X(2024)04-0001-10

引用格式:何忠明,李雅倩,谢唐新,等.复杂环境下蠕变效应对沥青混合料性能的影响[J].交通科学与工程,2024,40(4):1-10,20.

Citation: HE Zhongming, LI Yaqian, XIE Tangxin, et al. The influence of creep effect on the performance of asphalt mixture in complex environment[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 1-10, 20.

复杂环境下蠕变效应对沥青混合料性能的影响

何忠明^{1,2}, 李雅倩¹, 谢唐新¹, 欧剑珺¹, 杨菲玉¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;
2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程研究中心,湖南 长沙 410114)

摘 要:为了探究沥青混合料在高、低温条件下的性能变化,以及各种环境因素对其的影响程度,基于 Burgers 模型和沥青混合料的蠕变效应,通过自主开发的环境模拟仪对沥青混合料进行了基本性能试验,并采用灰色关联度分析方法评估单一因素对沥青混合料高、低温性能的影响程度。同时,采用主成分分析方法进一步揭示了耦合因素对沥青混合料高、低温性能的影响规律。研究发现:单因素对添加了苯乙烯-丁二烯-苯乙烯聚合物(styrene-butadiene-styrene, SBS)的改性沥青混合料高、低温性能的影响程度从大到小的排序为高温、紫外线、降雨;相较于单一因素,耦合因素对 SBS 改性沥青混合料高、低温性能影响更为显著,其中,耦合因素作用中起首要作用的是紫外线。Burgers 模型的拟合结果表明:黏弹性参数会随着环境作用循环天数和环境因素的增多而逐渐降低,进而导致沥青混合料高、低温性能逐渐衰减,究其原因是沥青混合料中的黏性和弹性组分发生了转换。

关键词:沥青混合料;Burgers 模型;蠕变;高温性能;低温性能

中图分类号:U416

文献标志码:A

The influence of creep effect on the performance of asphalt mixture in complex environment

HE Zhongming^{1,2}, LI Yaqian¹, XIE Tangxin¹, OU Jianjun¹, YANG Feiyu¹

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.National Engineering Research Centre for Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Considering the influence of different environmental factors on the high temperature and low temperature performance of asphalt mixture, based on the Burgers model and the creep effect of asphalt mixture, the basic performance test of asphalt mixture after environmental simulation is carried out with the help of self-developed environmental simulator. The grey correlation analysis method is used to evaluate the influence of single factor on the high and low temperature performance, and the principal component analysis method is used to explore the influence of coupling factors on the high and low temperature performance of asphalt mixture. It is found that compared with single factor, coupling factors have more serious damage to the high and low temperature performance of SBS modified asphalt mixture. The degree of influence of individual factors is as follows: high temperature has the greatest impact, followed by ultraviolet light, and then rainfall. Ultraviolet light plays a major role when these factors are coupled. The influence degree of single factor is high temperature, ultraviolet light, rainfall,

收稿日期:2023-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51978084);湖南省教育厅科技重点项目(22A0204)

通信作者:何忠明(1980—),男,教授,主要从事路基路面方面的研究工作。E-mail:hezongming45@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

and ultraviolet light plays a major role in coupling factors. In addition, according to the fitting results of Burgers model, the viscoelastic parameters gradually decrease with the increase of the number of environmental action cycles and environmental factors, resulting in the gradual attenuation of high and low temperature performance of asphalt mixture. The reason is that the viscous and elastic components in asphalt mixture are converted.

Key words: asphalt mixture; Burgers model; creep; high temperature performance; low temperature performance

公路的建设和服役过程均暴露于自然环境中,且受地域环境影响较大,沥青路面在复杂环境作用下具有优异的耐久性是整个道路结构安全服役的前提^[1]。随着我国交通需求的增长,已建成的道路频繁出现低温开裂、高温车辙、冻融破坏等病害。为了提升沥青路面的耐久性,降低其损耗,本文结合我国的实际情况,对影响沥青路面高、低温性能的各种因素进行了全面的分析,以期延长沥青路面在各种环境、荷载下的服役寿命。

为提高沥青路面的耐久性,研究人员通过添加苯乙烯-丁二烯-苯乙烯聚合物(styrene-butadiene-styrene, SBS)以降低沥青温度敏感性并改善沥青的力学性能^[2],然而仅通过添加SBS聚合物还不足以缓解沥青路面病害的发展。在路表面铺设的沥青混合料除了需要承受反复荷载外,还会经受各种复杂自然环境的作用,因此其路用性能损伤速度非常快。特别是在季节性冰冻地区,沥青混合料会反复遭受冻融循环的影响^[3]。其他自然环境因素的作用也会影响路面性能,如强烈的紫外线照射^[4-6]和降雨的侵蚀^[7]等。这些因素无论是单独作用还是耦合作用,都可能导致沥青材料的性质发生改变,从而加剧路面病害的产生。季节等^[8]的研究成果表明:高温和重载等是改性沥青混合料发生永久变形破坏的主要影响因素;LIANG等^[9]的研究表明:沥青混合料中掺入玄武岩纤维后,可以减少冻融循环和紫外线耦合作用下的性能损伤。在夏季持续高温时,车辆会使沥青路面产生可见的累积永久变形,同时路面的高温稳定性变差,影响车辆的运行安全;在冬季持续低温时,沥青路面劲度大大增加,弯拉强度低于温度应力,沥青路面产生温缩裂缝,冻融循环对其的损伤作用使裂缝进一步扩大。因而,研究影响沥青混合料高、低温性能的环境因素有利于减少沥青路面病害,保障沥青路面的运行性能。

本文拟用自主设计的沥青混合料环境模拟箱(图1)研究各环境因素对SBS改性沥青混合料高、低温性能的影响,通过其蠕变特性的变化得出耦合

作用下SBS改性沥青混合料高、低温性能的变化规律,从而延长SBS改性沥青混合料的使用寿命。



图1 沥青混合料环境模拟箱

Fig. 1 Environmental simulation box for asphalt mixture

1 沥青混合料配合比设计

1.1 原材料

1) 沥青胶结料。

试验采用广泛应用于道路建设的SBS改性沥青,各项指标均满足规范要求。

2) 集料。

集料采用玄武岩,分为1#碎石、2#碎石、3#碎石、4#石屑及石灰岩矿粉,各项指标均满足规范要求。

1.2 SBS改性沥青混合料配合比确定

对筛分后的集料进行矿料级配的合成,经过多次配合比的调整和重复的筛分计算得到矿料的级配,1#碎石、2#碎石、3#碎石、4#石屑、石灰岩矿粉的质量比为28:22:15:2:8,矿料筛分级配见表1。

对沥青混合料的最佳油石比进行确定。将获得的油石比4.8、5.0进行平均,得到最佳油石比为4.9。据此制备沥青混合料试件,并进行高温稳定性检验与水稳定性检验。发现当油石比为4.9时,沥青混合料符合现行规范。

2 试验方案

2.1 环境的模拟

由于目前并未发布具体的沥青混合料冻融循

环试验的操作规范,根据相关文献中半刚性基层和水泥混凝土的冻融循环的试验步骤,结合季节性冻土区长期处于冰冻条件下的现状,确定本文冻融循环试验的具体步骤为:1)对试件进行 15 min 的真空饱和水处理;2)在常压下浸泡 30 min;3)将试件用保鲜膜包裹并放入自制的环境模拟箱中,在-18 ℃条件下冰冻 12 h;4)设置高温、紫外线、降雨条件并进行 12 h 模拟。此为一次冻融循环^[10]。

表 1 AC-13 SBS 改性沥青混合料矿物集料级配范围
Table 1 Mineral aggregate gradation range of AC-13 SBS modified asphalt mixture

类型	原材料级配通过以下筛孔的百分率/%									
	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
1#碎石 (粒径 10 ~ <15 mm)	100.0	90.2	11.4	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2#碎石 (粒径 5 ~ <10 mm)	100.0	100.0	97.4	14.9	0.8	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
3#碎石 (粒径 3 ~ <5 mm)	100.0	100.0	100.0	97.5	18.2	9.3	0.9	0.3	0.3	0.1
4#石屑 (粒径 0 ~ <3 mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	91.5	63.4	41.6	17.7	8.2	1.2
石灰岩矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.0	99.6	96.4	86.2
合成级配	100.0	97.3	74.6	53.1	35.7	26.6	19.3	12.8	10.0	7.2
中值	100.0	95.0	76.5	53.0	37.0	26.5	19.0	13.5	10.0	6.0

设定冻融循环周期为 7 d,在此期间,本文分别模拟了不同天数的高温、紫外线照射及降雨环境。“ T_n ”代表 7 d 冻融循环中高温的天数为 n d;“ U_n ”代表 7 d 冻融循环中紫外线照射的天数为 n d;“ W_n ”代表 7 d 冻融循环中降雨的天数为 n d;“ TU_n ”代表 7 d 冻融循环中高温和紫外线共同作用的天数为 n d,“ TUW_n ”代表 7 d 冻融循环中高温、紫外线、降雨共同作用的天数为 n d(n 分别取值为 0、1、3、5、7)。对图 2 所示的环境耦合仪器进行参数设置,具体参数为:温度为 60 ℃,紫外线波长为 340 nm,辐射强度为 550 W/cm²,降雨为 5 mL/h。

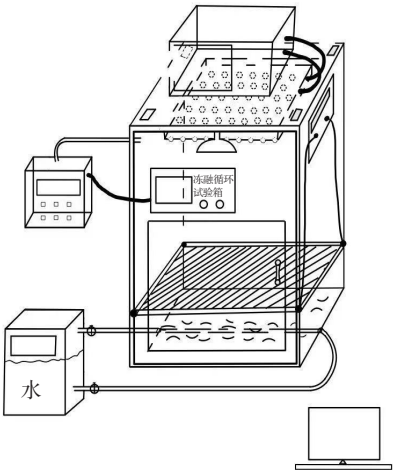


图 2 环境耦合仪器

Fig. 2 Sketch of the coupled action instrument

2.2 高、低温试验

1) 高温试验:三轴重复蠕变试验采取重复轴向压缩脉冲荷载的加载方式,具体步骤为:先加载 0.1 s 进行试验,再卸载 0.9 s 进行变形恢复,以 1.0 s 为一个循环周期完成设定的蠕变循环^[11-12]。轴载轮压采用标准轮压 0.7 MPa,预载应力为轴向压力的 5%,不考虑围压的影响,进行 7 200 次重复试验;先利用轮碾法制备车辙板,然后将成型好的车辙板试件在常温下放置 48 h,再放置于 60 ℃试验台保温 6 h 进行车辙试验。

2) 低温试验:弯曲试验主要为低温弯曲试验以及弯曲蠕变试验^[13-16]。对成型的车辙板进行切割,制备成棱柱体小梁,而后采用测量技术系统仪器(measurement technology system, MTS)在-10 ℃的温度下进行低温弯曲试验,随后在 10 ℃的温度下进行低温弯曲蠕变试验。

2.3 Burgers 模型

Burgers 模型由 Maxwell 模型与 Kelvin 模型串联组成,可以预测材料的应力、应变关系^[17-19]。Burgers 模型的本构方程见式(1),蠕变柔量 J_n 见式(2):

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} + p_2 \ddot{\sigma} = q_2 \dot{\varepsilon} + q_2 \ddot{\varepsilon} \tag{1}$$

$$J_n = \frac{\varepsilon(n)}{\sigma_0} \tag{2}$$

式中： $p_1 = \frac{\eta_1 E_1 + \eta_1 E_2 + \eta_2 E_1}{E_1 E_2}$; $p_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}$; $q_1 =$

η_1 ; $q_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2}$; ε 为应变, $\varepsilon(n)$ 为 t 时刻的应变; σ 为应力, σ_0 为初始应力; t 为时间; E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 为 Burgers 模型参数, 其中 η_1 为黏性流动参数, η_2 为延迟黏性参数, E_1 为瞬间弹性参数, E_2 为延迟弹性参数。

在“四元件五参数”预测模型中将 Burgers 模型的黏度定义为 $\eta_0 = \log_{10}^{Ae^B}$ (A 、 B 均为黏度参数), 即可得到加载时的方程式(3), 卸载时的方程式(4):

$$\varepsilon(n) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{Ae^{Bt}} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}} \right) \right] \quad (3)$$

$$\varepsilon(n) = \sigma_0 \left[\frac{t_0}{Ae^{Bt}} + \frac{1}{E_2} \left(1 - 3e^{-\frac{E_2 t}{\eta_1}} \right) e^{-\frac{E_2 (t-t_0)}{\eta_1}} \right] \quad (4)$$

3 试验分析

3.1 单因素对 SBS 改性沥青混合料高、低温性能的影响

1) 高温试验分析。

为了全面评估 SBS 改性沥青混合料在不同环境条件下的耐久性能, 本文分别模拟了高温、紫外线辐射以及降雨等环境, 并对这些环境下经过冻融循环处理的 SBS 改性沥青混合料进行了车辙试验。试验结果见表 2。

表 2 SBS 改性沥青混合料的车辙试验结果(单因素)

Table 2 Rutting test results of SBS modified asphalt mixture (single factor)

编号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	编号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	编号	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)
T ₁	4 329.59	U ₁	4 148.12	W ₁	3 626.90
T ₃	3 854.56	U ₃	3 591.03	W ₃	3 212.95
T ₅	3 432.14	U ₅	3 306.23	W ₅	3 093.16
T ₇	2 879.84	U ₇	3 102.74	W ₇	2 188.37

从表 2 可知, 冻融循环下高温、紫外线、降雨均会对 SBS 改性沥青混合料的高温性能产生不利影响。随着单因素循环天数的增加, 车辙深度不断加深, 动稳定度不断降低, 高温稳定性也逐渐变差。

2) 低温试验分析。

在模拟不同环境因素对 SBS 改性沥青混合料性能影响的试验中, 分别进行了针对高温、紫外线及降雨条件下的冻融循环处理, 随后对这些经过特定环境模拟的试样进行了低温弯曲小梁试验。试验结果如表 3 所示。冻融循环下高温、紫外线、降雨等因素会降低 SBS 改性沥青混合料低温性能。随着冻

融循环天数的增加, 其抗弯拉强度和最大弯拉应变降低, 劲度模量增加, 低温稳定性也不断降低。

3) 灰色关联度分析。

灰色关联度分析是一种统计方法, 其通过评估多种因素对系统的影响程度, 来判定影响系统的主要和次要因素^[20-21]。为分析冻融循环中高温、紫外线、降雨等单个因素对 SBS 改性沥青混合料高、低温性能的影响程度, 对高温性能指标(动稳定度)和低温性能指标(弯曲劲度模量)进行灰色关联度分析, 结果见表 4。

表 3 SBS 改性沥青混合料的低温弯曲试验结果(单因素)

Table 3 SBS modified asphalt mixture low temperature bending test results (single factor)

编号	最大 荷载/N	跨中 挠度/ mm	抗弯拉 强度/MPa	最大弯拉 应变/10 ⁻⁶	劲度模量/ MPa
T ₁	1.100 0	0.614 7	8.980	3 227.04	2 782.28
T ₃	1.018 9	0.592 9	8.318	3 112.90	2 767.18
T ₅	0.981 5	0.538 4	8.012	2 826.79	2 841.86
T ₇	0.964 5	0.515 9	7.873	2 708.54	2 908.63
U ₁	1.039 3	0.628 0	8.484	3 297.24	2 572.58
U ₃	1.006 4	0.587 1	8.216	3 082.17	2 665.27
U ₅	0.955 9	0.551 1	7.804	2 893.40	2 710.92
U ₇	0.947 7	0.514 3	7.737	2 700.16	2 863.89
W ₁	1.011 4	0.614 0	8.256	3 223.39	2 562.66
W ₃	1.028 5	0.595 1	8.396	3 124.07	2 688.77
W ₅	0.973 6	0.544 7	7.948	2 859.78	2 778.55
W ₇	0.847 5	0.469 4	6.918	2 464.27	2 808.45

表 4 单因素影响的灰色关联度分析

Table 4 Single factor analysis of grey correlation degree

性能 参考数列	高温性能 (动稳定度)	低温性能 (弯曲劲度模量)
高温	0.753	0.702
紫外线	0.751	0.701
降雨	0.739	0.700

由表 4 可知, 高温、紫外线、降雨与 SBS 改性沥青混合料的关联度均大于 0.7, 即高温、紫外线、降雨都会降低 SBS 改性沥青混合料的高、低温性能。三种因素对 SBS 改性沥青混合料高、低温性能的影响程度从大到小的排序为: 高温、紫外线、降雨。

3.2 耦合因素对 SBS 改性沥青混合料高、低温性能的影响

在实际工程中, 各因素往往通过耦合作用改变沥青路面性能, 从而影响沥青路面的使用寿命。因

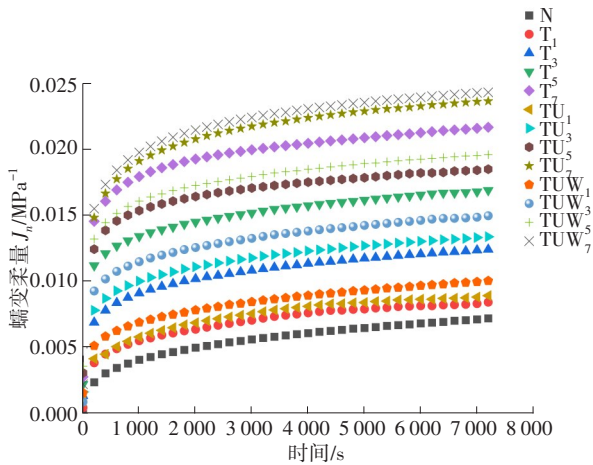
此,为模拟实际沥青路面的服役情况,应综合考虑多种因素的耦合作用。

以上因素的不同组合共计7个(分别为T、U、W、TU、TW、UW、TUW),但考虑到前文中已得出三种因素对SBS改性沥青混合料高、低温性能影响程度从大到小的排序为:高温、紫外线、降雨。因此本文选取高温(T)、高温+紫外线(TU)、高温+紫外线+降雨(TUW)三种情况进行分析。

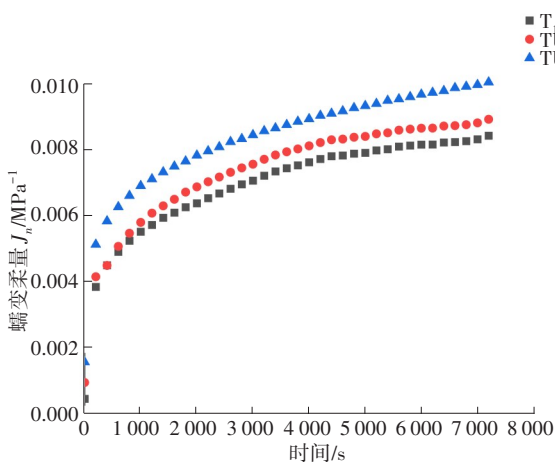
1) 高温试验分析。

沥青混合料的蠕变柔量是评判沥青混合料高温性能的重要指标之一,蠕变柔量越大,沥青混合料的高温稳定性越差^[22-23]。

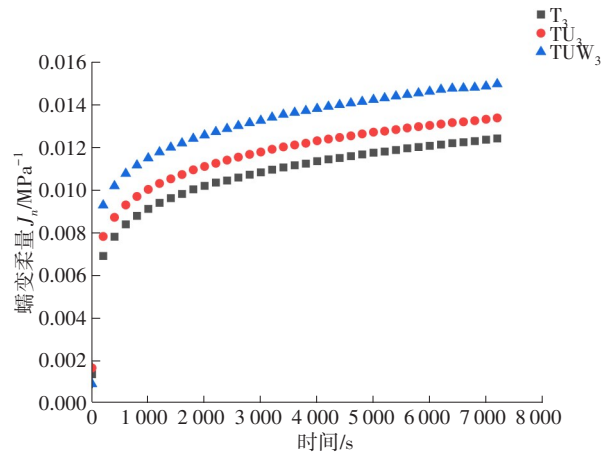
因此,本研究借助沥青混合料性能测试仪(SPT)来记录沥青混合料高温下的轴向应变和应力,并根据式(2)求得不同环境因素作用下SBS改性沥青混合料的蠕变柔量,沥青混合料蠕变柔量随时间变化的曲线如图3所示。



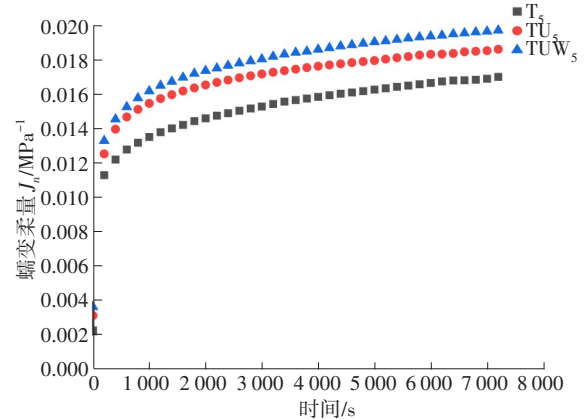
(a) 蠕变柔量汇总



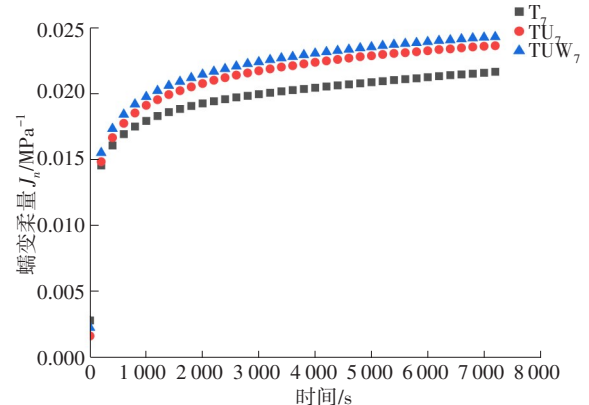
(b) 环境作用1 d后的蠕变柔量



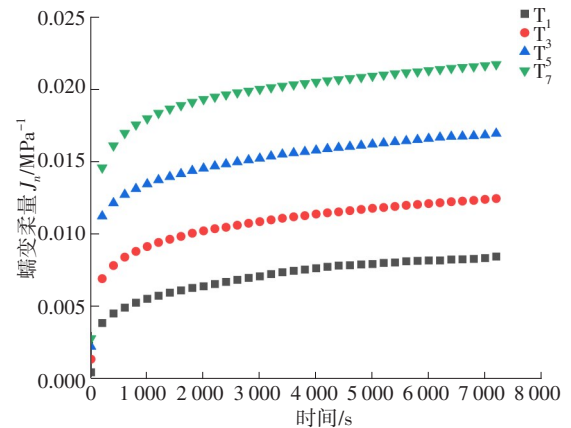
(c) 环境作用3 d后的蠕变柔量



(d) 环境作用5 d后的蠕变柔量



(e) 环境作用7 d后的蠕变柔量



(f) 高温作用下的蠕变柔量

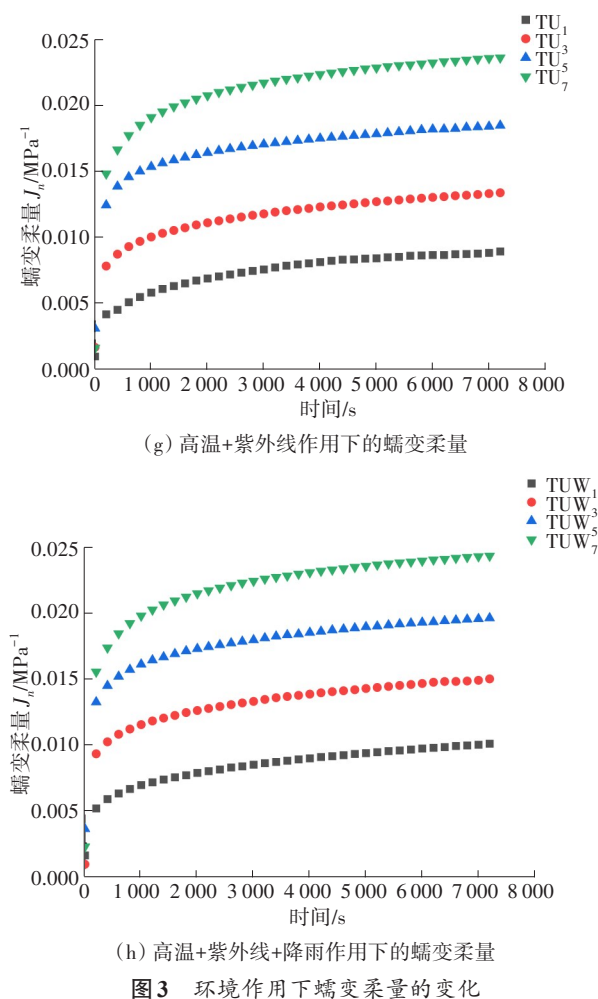


图3 环境作用下蠕变柔量的变化
Fig. 3 Changes in creep compliance under environmental action

图3(a)为在加载水平和试验温度相同的前提下,经历不同环境因素和循环天数时,沥青混凝土蠕变柔量的变化。由图3(a)可知,在相同循环天数下SBS改性沥青混合料的蠕变柔量随环境因素数量的增多而增加;在环境因素相同时,随循环天数的增加,蠕变柔量也在不断增加。这表明环境因素的复杂化和循环天数的增多都会导致沥青混合料高温性能下降。对比图3(b)~3(e)可知,在循环天数相同时,环境越复杂,蠕变柔量增长的速率也越快,此外循环天数小于3 d时蠕变柔量的增长速率大于环境循环天数大于3 d时蠕变柔量的增长速率,并且随着环境因素的增多,蠕变柔量值也在增大。蠕变柔量速率增加的首要原因是在冻融循环的前期,紫外线使得沥青混合料老化程度加深,黏弹性变差,因此蠕变柔量增长地更快,永久变形更容易产生;另外,SBS改性沥青混合料内部孔隙中的水使其内部开裂,在冰冻过程中渗入的水产生了“冻胀

力”,使材料内部产生了损伤;在融化过程中,高温不仅加速了融化速度,也使雨水加速渗入沥青与集料间的黏结界面中。因此,随着循环天数的增加,黏性流动变形增加,宏观表现为SBS改性沥青混合料更容易产生车辙破坏,但是随着循环天数的增加,沥青混合料蠕变柔量增加的速率逐渐减小,一方面是因为紫外线仅仅作用于SBS改性沥青混合料表面,其老化程度有限,另一方面是因为随着循环天数的增加,降雨对SBS沥青混合料的黏性流动变形的影响也逐渐减弱,水温老化增加了沥青混合料的黏度,减小了黏性流动变形。

对比图3(f)~3(h)可知,在相同环境因素作用下,SBS改性沥青混合料高温性能随着环境循环次数的增加逐渐降低,其中相同环境因素作用下试件蠕变柔量增长幅度基本一致。一方面,经过反复的冻结和融化过程,沥青混合料的内部孔隙产生了明显变化,从而影响其高温稳定性。另一方面,在融化过程中温度的升高,加速了冻融循环对沥青混合料的破坏,使沥青混合料中的黏结性材料——沥青变软,降低了与集料的黏附性,导致高温下稳定性降低。融化过程中的高温、紫外线、降雨等环境因素,其实质均是使沥青经受老化作用变硬变脆,在荷载反复作用下沥青混合料的变形能力降低,高温稳定性降低,进而产生了各种路面病害。

为进一步分析环境因素对沥青混合料高温性能的影响,引入修正的Burgers模型的黏弹性参数作为研究指标,并结合式(3)、式(4)进行拟合分析,拟合曲线的相关性系统系数均大于0.98。

黏弹性参数中 E_1 和 η_1 这两个参数越小,黏弹性变形越大^[24]。因此,根据拟合的黏弹性参数结果可知,随着环境循环天数的增加,沥青混合料的黏弹性参数 E_1 、 η_1 均逐渐减小,即SBS改性沥青混合料抗变形能力逐渐减小,表现为高温稳定性变差,这与前文蠕变试验得到的结果一致。当取 $\eta_0 = \log_{10}^{46}$ 时,循环7 200 d后,各黏弹性参数的变化规律如图4所示。

由图4可知:1)随着试验环境因素增多,SBS改性沥青混合料的 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_0 均有所下降,其中 η_1 和 η_0 占的比例较大,说明高温下SBS改性沥青混合料的黏性特征要大于弹性特征;2)随着作用时长和环境因素的增加, E_1 的下降趋势比 η_1 、 E_2 、 η_0 的小,弹性成分的下降趋势远大于黏性成分的下降趋势,说明各因素影响的是SBS改性沥青混合料的弹性能。

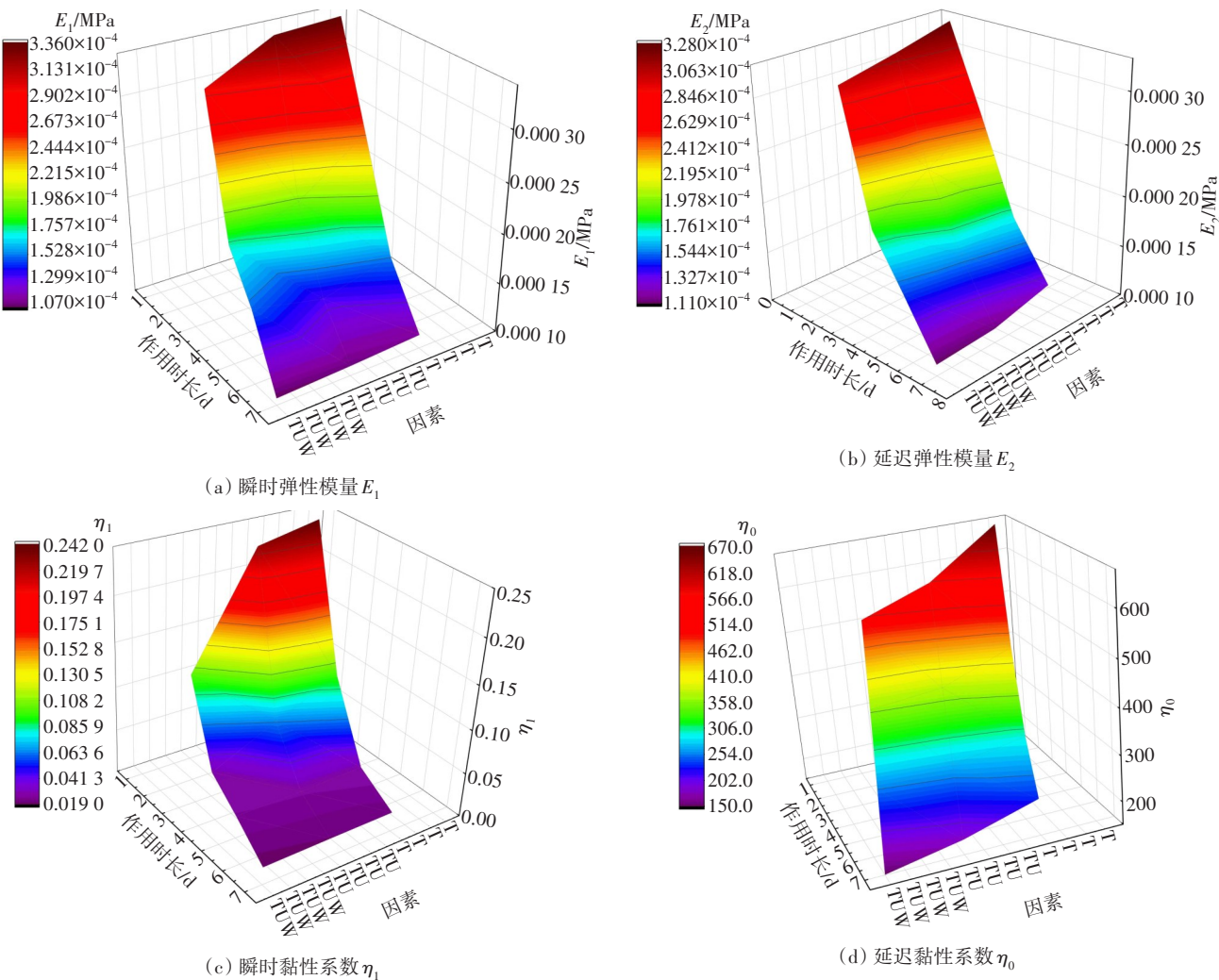


图4 黏弹性参数三维图(高温)

Fig. 4 Three dimensional diagram of viscoelastic parameters at high-temperature

2) 低温试验分析。

为进一步分析低温下SBS改性沥青混合料的性能,计算出低温弯曲试验的各项指标,得到在蠕变过程中SBS改性沥青混合料黏弹性受环境作用的变化规律^[25],将各指标汇总于表5。

在同一温度下,混合料的低温性能越好,则其抗弯拉强度和最大弯拉应变越大,劲度模量越小^[26]。由表5可知,在相同温度下,随着环境因素的增多和循环天数的增加,其抗弯拉强度、最大弯拉应变均降低。在循环天数相同时,抗弯拉强度和最大弯拉应变随着环境因素的增多而减小。对比未处理的沥青混合料,环境因素的作用会导致其劲度模量增大。另外,在环境因素相同时,循环天数越多,SBS改性沥青混合料的低温性能也越差。

以蠕变速率表征不同环境因素作用和不同循环天数下,SBS改性沥青混合料的低温性能,其蠕变速率变化规律如图5所示。由图5可知,不同环境

表5 SBS改性沥青混合料低温性能指标汇总

Table 5 Summary of low-temperature performance of SBS modified asphalt mixture

编号	最大荷载/N	跨中挠度/mm	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/ 10^{-6}	劲度模量/MPa
N	1.14	0.619	8.70	3 249.10	2 695.25
T ₁	1.10	0.61	8.98	3 227.04	2 782.28
T ₃	1.02	0.57	8.33	3 007.90	2 767.92
T ₅	0.98	0.54	7.99	2 818.39	2 841.14
T ₇	0.96	0.52	7.87	2 708.54	2 908.63
TU ₁	1.07	0.60	8.76	3 167.53	2 760.41
TU ₃	1.00	0.57	8.12	2 969.98	2 739.78
TU ₅	0.98	0.53	7.98	2 795.99	2 854.82
TU ₇	0.93	0.51	7.62	2 679.65	2 845.47
TUW ₁	1.04	0.61	8.48	3 194.21	2 658.10
TUW ₃	0.93	0.53	8.02	2 769.27	2 749.61
TUW ₅	0.98	0.52	7.98	2 746.11	2 920.43
TUW ₇	1.08	0.51	7.83	2 673.26	3 302.66

因素作用下沥青混合料的蠕变速率均呈现下降趋势,低温性能变差。图6为蠕变速率的变化规律,由图6可知,在同一环境因素作用下,其蠕变速率随着循环天数的增加而降低,且蠕变速率降低的速度逐渐放缓,说明随着循环天数的增加,SBS改性沥青混合料在低温下更容易发生开裂;蠕变速率在同一循环天数下随环境因素的增加而不断降低,其降低速率也逐渐放缓,在累加降雨作用后蠕变速率的变化规律并不明显;蠕变速率的降低一方面是由于冻融循环和其他环境的作用使得沥青和骨料之间的黏附性降低,另一方面是由于沥青组分的变化(轻质组分变少,重质组分变多),使得沥青黏性逐渐减小,弹性增加,低温开裂性能变差。

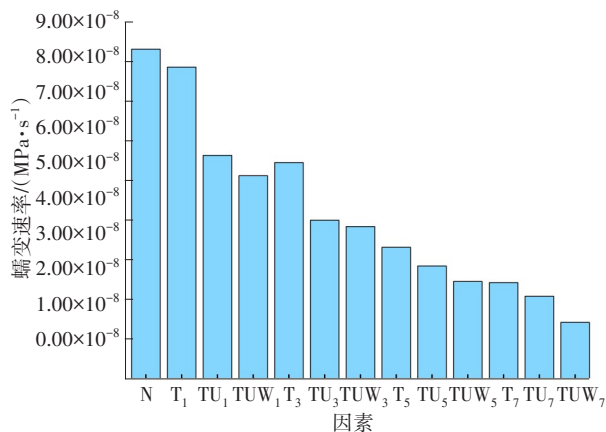


图5 蠕变速率

Fig. 5 Creep rate

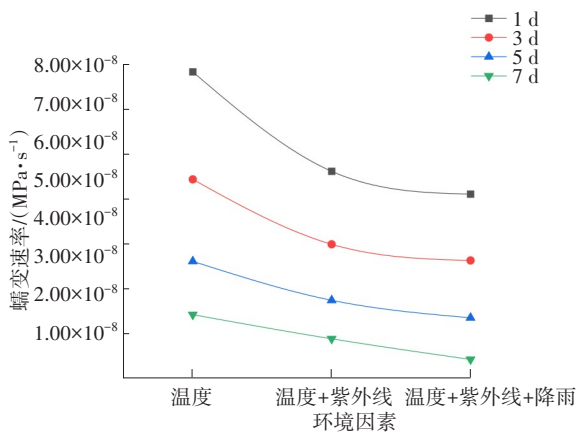


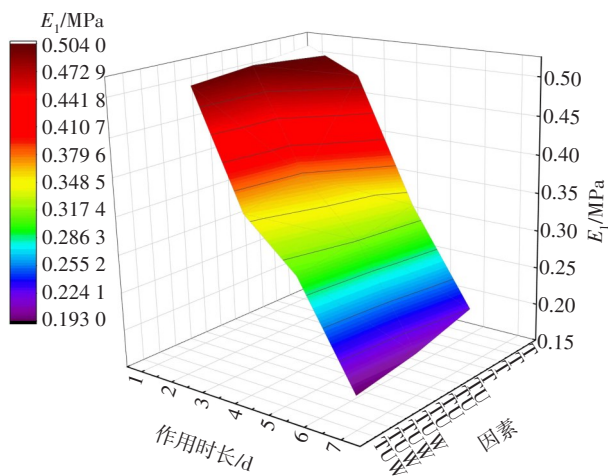
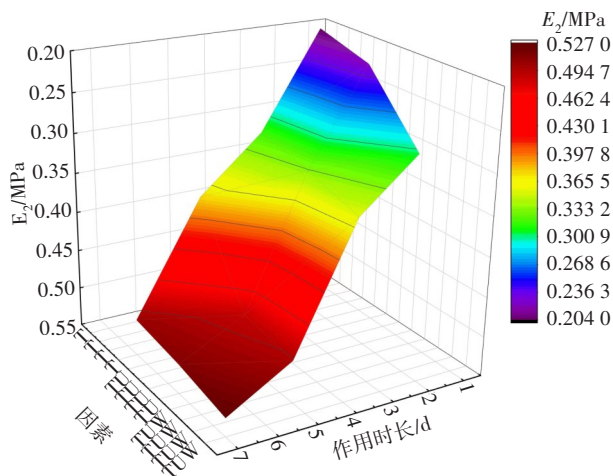
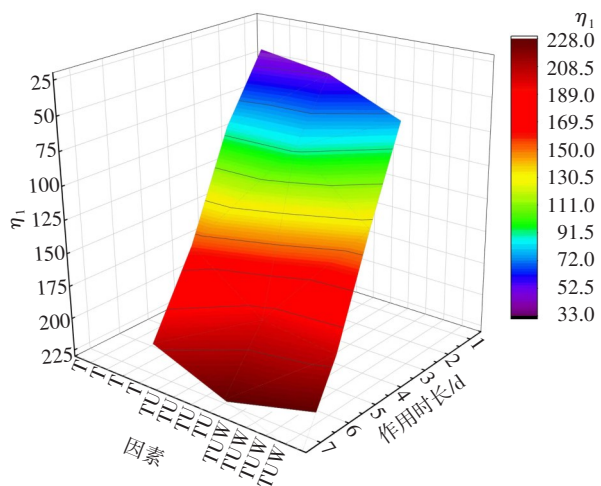
图6 不同循环天数下蠕变速率的变化

Fig. 6 Changes in creep rate under different cycle days

引入修正后的 Burgers 模型的黏弹性参数作为研究指标^[27],拟合曲线的相关系数均大于0.98。

根据 Burgers 模型,循环7 200 d后,各黏弹性参数随着不同环境因素和不同循环天数的变化规律如图7所示,由图7可知:1) 随着环境因素的增多和循环天数的增长,沥青混合料的黏弹性参数 E_2 、 η_1 、

η_0 出现了增大的现象,且沥青混合料弹性成分的增加趋势远大于黏性成分的增加趋势,变形能力逐渐降低,此时的沥青混合料更容易发生低温开裂;2)

(a) 瞬时弹性模量 E_1 (b) 延迟弹性模量 E_2 (c) 瞬时黏性系数 η_1

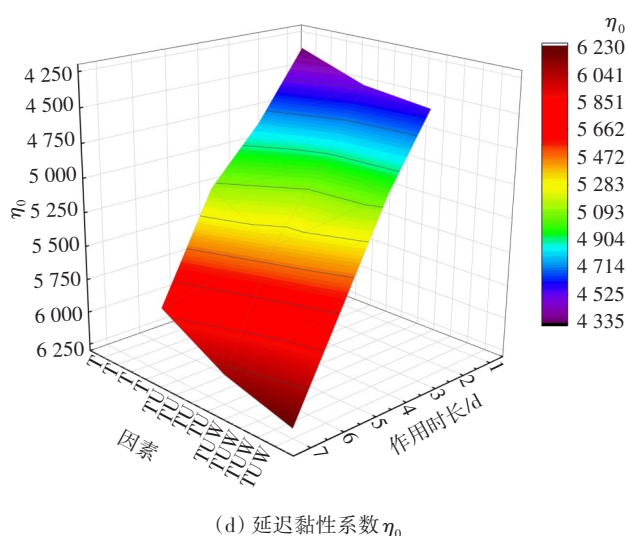


图7 黏弹性参数的三维图(低温)

Fig. 7 Three dimensional diagram of viscoelastic parameters at low-temperatures

瞬时弹性模量 E_t 逐渐降低,是因为沥青混合料的弹性特征减弱,难以有效抵消温度变化所引起的形变,沥青混合料内部产生了破坏,加剧了低温开裂; 3) 瞬时黏性系数 η_t 增大,说明沥青混合料相应变形能力也越来越弱,低温性能越来越差,更容易发生低温开裂。

3) 主成分分析。

耦合作用中,单因素对SBS改性沥青混合料高、低温性能均存在影响。为分析耦合作用下影响SBS改性沥青混合料的主要因素和次要因素,本文选取黏弹性的延迟黏性系数 η_0 进行分析,其拟合结果汇总如式(5)、式(6)所示,其中 $G(n)$ 表示高温稳定性, $D(n)$ 表示低温稳定性, T'_n 、 U'_n 、 W'_n 分别表示7 d冻融循环下 n d的高温、紫外线、降雨作用。

高温稳定性模型公式:

$$G(n)=0.3807 \times T'_n+0.4401 \times U'_n+0.3873 \times W'_n \quad (5)$$

低温稳定性模型公式:

$$D(n)=0.3873 \times T'_n+0.4401 \times U'_n+0.3807 \times W'_n \quad (6)$$

由式(5)~(6)可知,紫外线作用是耦合作用中影响SBS改性沥青混合料黏弹性最主要的因素,次要影响因素是高温和降雨,紫外线老化会显著影响SBS改性沥青混合料弹性性能。

4 结论

本文对SBS改性沥青混合料进行了高、低温相关试验,利用灰色关联度分析方法对冻融循环中单因素作用进行了影响程度分析,利用Burgers拟合的

黏弹性参数进行了主成分分析,得出以下结论:

1) 单因素环境模拟后进行的车辙试验和低温弯曲试验结果表明:高温、降雨、紫外线都在一定程度上对SBS改性沥青混合料的高、低温性能有损害作用。

2) 利用灰色关联度方法评估高温、紫外线、降雨三种因素对SBS改性沥青混合料高、低温性能的影响程度,关联度都大于0.7,说明三者具有良好的关联性,三种因素对混凝土高、低温性能影响程度从大到小的排序为高温、紫外线、降雨。

3) 高温三轴蠕变试验和低温弯曲蠕变试验结果表明:随着环境作用时长和环境因素的增多,沥青混合料高、低温性能逐渐衰减,且作用效果远大于单因素作用效果,这是因为沥青混合料中的黏性和弹性组分发生了转换。

4) 根据Burgers模型拟合出的黏弹性参数的相关性系数均在0.98以上,以此作为指标进行耦合因素的主成分分析,结果表明耦合作用中紫外线是影响SBS改性沥青混合料高、低温性能的主要因素,紫外老化会影响SBS改性沥青混合料的弹性性能。

参考文献(References):

- [1] 熊锐,冯宝珠,乔宁,等.硫酸盐冻融循环条件下沥青性能评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(4):70-75. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.04.11.
XIONG Rui, FENG Baozhu, QIAO Ning, et al. Asphalt performance evaluation exposed to the sulfate attack and freeze-thaw cycles [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(4): 70-75. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.04.11.
- [2] NI H T, HU M J, SUN D Q, et al. Degradation characteristics of SBS polymer and its contribution to weathering aging of modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: 130549. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130549.
- [3] 李钰,刘金修,李泽,等.考虑冻融循环的聚酯纤维沥青混合料性能研究[J].公路与汽运,2023(5):53-57. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.012.
LI Yu, LIU Jinxiu, LI Ze, et al. Study on performance of polyester fiber asphalt mixture considering freeze-thaw cycle [J]. Highways & Automotive Applications, 2023(5): 53-57. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.012.
- [4] WANG K F, CHENG X J, ZHU Y S, et al. Study on performance deterioration regularity of hot regenerated asphalt mixture under multiple aging factors [J]. Construction and Building Materials, 2023, 369:

130568. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130568.
- [5] YU H N, BAI X P, QIAN G P, et al. Impact of ultraviolet radiation on the aging properties of SBS-modified asphalt binders[J]. *Polymers*, 2019, 11(7): 1111. DOI: 10.3390/polym11071111.
- [6] 郭猛, 任鑫, 焦峪波, 等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(4): 41-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.04.002.
- GUO Meng, REN Xin, JIAO Yubo, et al. Review of aging and antiaging of asphalt and asphalt mixtures[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 41-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.04.002.
- [7] 罗蓉, 侯强, 刘涵奇. 湿度对沥青混合料黏弹性质的影响[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(8): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.08.12.
- LUO Rong, HOU Qiang, LIU Hanqi. Effect of humidity on viscoelastic properties of asphalt mixture[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39(8): 77-83. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2020.08.12.
- [8] 季节, 陈磊, 索智, 等. 高温和重载对DCLR改性沥青混合料抗变形能力的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(1): 1-8. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.01.001.
- JI Jie, CHEN Lei, SUO Zhi, et al. Effect of high temperature and heavy load on deformation resistance of DCLR modified asphalt mixture[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(1): 1-8. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.01.001.
- [9] LIANG R W, YU W, LUO Z J. Laboratory investigation on pavement performance of basalt fiber-reinforced asphalt mixture under the coupling effect of freeze-thaw cycles and aging[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 930056. DOI: 10.3389/fmats.2022.930056.
- [10] LI Q, ZENG X H, WANG J Q, et al. Aging performance of high viscosity modified asphalt under complex heat-light-water coupled conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 325: 126314. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126314.
- [11] LYU J X, ZHANG X Y. Prediction models of shear parameters and dynamic creep instability for asphalt mixture under different high temperatures[J]. *Polymers*, 2021, 13(15): 2542. DOI: 10.3390/polym13152542.
- [12] TRAN N, TAYLOR A, TURNER P, et al. Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 18(sup 1): 183-208. DOI: 10.1080/14680629.2016.1266757.
- [13] 陈洪飞, 孙娇娜, 李茜茜. 聚氨酯材料用于提高寒区路面沥青混合料性能分析[J]. *建筑结构*, 2022, 52(增刊1): 1621-1626. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1703.
- CHEN Hongfei, SUN Jiaona, LI Qianqian. Analysis of polyurethane materials used to improve the performance of asphalt mixture on pavement in cold area[J]. *Building Structure*, 2022, 52(sup 1): 1621-1626. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1703.
- [14] 李超, 潘科, 王岚. 基于逐级加载的弯曲蠕变试验分析沥青混合料低温开裂性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(7): 2450-2458. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.030.
- LI Chao, PAN Ke, WANG Lan. Low-temperature cracking performance of asphalt mixture based on stepwise loading bending creep test[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(7): 2450-2458. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.030.
- [15] PSZCZOLA M, JACZEWSKI M, RYS D, et al. Evaluation of asphalt mixture low-temperature performance in bending beam creep test[J]. *Materials*, 2018, 11(1): 100. DOI: 10.3390/ma11010100.
- [16] 张思琴, 查旭东, 邹博, 等. 中面层沥青混合料低温性能的对比如试验评价[J]. *交通科学与工程*, 2023, 39(2): 23-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211018001.
- ZHANG Siqin, ZHA Xudong, ZOU Bo, et al. Comparative test evaluation of low-temperature performance for asphalt mixture in middle surface layer[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2023, 39(2): 23-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211018001.
- [17] 安文静, 盛冬发, 张思成, 等. 沥青混合料非线性黏弹塑性蠕变模型[J]. *材料科学与工程学报*, 2022, 40(6): 1030-1033, 1054. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2022.06.019.
- AN Wenjing, SHENG Dongfa, ZHANG Sicheng, et al. Nonlinear viscoelastic-plastic creep model for asphalt mixtures[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2022, 40(6): 1030-1033, 1054. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2022.06.019.
- [18] 戴文亭, 郝如意, 李颖松, 等. 疏水性纳米白炭黑沥青混合料的蠕变参数对动稳定度的敏感性分析[J]. *材料导报*, 2020, 34(S1): 237-240.
- DAI Wenting, HAO Ruyi, LI Yingsong, et al. Sensitivity analysis of creep parameters of hydrophobic nano-silica asphalt mixture to dynamic stability[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S1): 237-240.
- [19] ZHANG J, LI Z W, CHU H, et al. A viscoelastic damage constitutive model for asphalt mixture under the cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116631. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.012.
- [20] 程永春, 李赫, 李立顶, 等. 基于灰色关联度的矿料对沥青混合料力学性能的影响分析[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(3): 925-935. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200350.
- CHENG Yongchun, LI He, LI Liding, et al. Analysis of

(下转第20页)

- antennae search algorithm and random forest model[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-11. DOI: 10.1155/2020/8863181.
- [23] STEFANIA G, TEOBALD K, ANDRZEJ K, et al. Characterization of eggshell as limestone replacement and its influence on properties of modified cement[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126006. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.006.
- [24] AADI AYAD S, HAMAH S N, ALI M A. The behavior of eco-friendly self-compacting concrete partially utilized ultra-fine eggshell powder waste[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1973 (1): 012143. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012143.
- [25] SPEISER J L, MILLER M E, TOOZE J, et al. A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 134: 93-101. DOI: 10.1016/j.eswa.2019.05.028.
- (责任编辑:石月珍;英文编辑:杜明瑞)

(上接第10页)

- mechanical properties of asphalt mixture affected by aggregate based on grey relational degree[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (3): 925-935. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200350.
- [21] JIANG Q, LIU W, WU S P. Analysis on factors affecting moisture stability of steel slag asphalt concrete using grey correlation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 397: 136490. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136490.
- [22] LOTFI OMRAN N, RAJAEI K, MARANDI S M. Effect of temperature on permanent deformation of polymer-modified asphalt mixture[J]. Magazine of Civil Engineering, 2022, 11(113): 11309.
- [23] TAI NGUYEN H T, DO T T, TRAN V T, et al. Determination of creep compliance of asphalt mixtures at intermediate and high temperature using creep-recovery test[J]. Road Materials and Pavement Design, 2021, 22(sup 1): S514-S535. DOI: 10.1080/14680629.2021.1908407.
- [24] LORANDI N P, CIOFFI M O H, SHIGUE C, et al. On the creep behavior of carbon/epoxy non-crimp fabric composites[J]. Materials Research, 2018, 21 (3): 1-7. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0768.
- [25] 王岚, 裴珂, 李超. 多聚磷酸-SBS复合改性沥青混合料低温流变特性及本构关系研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (4): 842-850. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.023.
- WANG Lan, PEI Ke, LI Chao. On rheological properties and constitutive relationship of polyphosphoric acid-SBS composite modified asphalt mixture at low temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24 (4): 842-850. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.023.
- [26] LIU K F, LIU C L, LI Q, et al. Laboratory investigation of the low-temperature crack resistance of wood tar-based rejuvenated asphalt mixture based on the semi-circular bend and trabecular bending test[J]. Materials, 2022, 15(20): 7223. DOI: 10.3390/ma15207223.
- [27] MACKIEWICZ P, SZYDŁO A. Viscoelastic parameters of asphalt mixtures identified in static and dynamic tests[J]. Materials, 2019, 12 (13): 2084. DOI: 10.3390/ma12132084.
- (责任编辑:薛仪;英文编辑:陈成)