

发泡用水对泡沫沥青流变性能的影响

王昊宇^{1*}, 胡国玺^{1#}, 李永波²

¹蜀道投资集团有限责任公司, 四川 成都

²长安大学公路学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年7月29日; 录用日期: 2024年8月20日; 发布日期: 2024年8月30日

摘要

泡沫沥青作为近年来新兴的一种冷拌再生稳定剂, 用其稳定沥青混合料在材料性能评价、低碳环保方面均有较为理想的效果, 具有独特的优势及发展成果。为明晰泡沫沥青中水分对沥青性能的影响, 选用SK90#沥青作为基质沥青, 通过动态剪切流变试验(DSR)、弯曲梁流变试验(BBR)及傅里叶红外光谱仪(FTIR)对其高低温流变性能与微观性能进行表征。结果表明, 发泡用水对沥青高温流变性能具有不利影响, 并且随着用水量增加, 高温流变性能降幅逐渐增大; 发泡用水增加使沥青低温脆性和蠕变劲度增强, 应力松弛性能变差, 低温流变性能受负面影响; 沥青在经过发泡用水后微观性能与基质沥青相似, 无新官能团, 即发泡用水过程为物理变化。

关键词

道路工程, 泡沫沥青, 流变性能, 水分影响

Effect of Foaming Water on the Rheological Properties of Foamed Asphalt

Haoyu Wang^{1*}, Guoxi Hu^{1#}, Yongbo Li²

¹Shudao Investment Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 29th, 2024; accepted: Aug. 20th, 2024; published: Aug. 30th, 2024

Abstract

Foam asphalt as an emerging cold-mix regeneration stabilizer in recent years, with its stabiliza-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王昊宇, 胡国玺, 李永波. 发泡用水对泡沫沥青流变性能的影响[J]. 土木工程, 2024, 13(8): 1640-1648.

DOI: 10.12677/hjce.2024.138177

tion of asphalt mixtures in the evaluation of material properties, low-carbon environmental protection has more satisfactory results, with unique advantages and development results. In order to clarify the effect of water in the foam asphalt on asphalt performance, SK90# asphalt was selected as the matrix asphalt, and its high and low temperature rheological properties and microscopic properties were characterized by Dynamic Shear Rheology (DSR), Bending Beam Rheology (BBR), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The results show that the foaming water has an adverse effect on the high temperature rheological properties of asphalt, and the decrease of high temperature rheological properties gradually increases with the increase of water consumption; the increase of foaming water increases the low temperature brittleness and creep strength of asphalt, and the stress relaxation performance deteriorates, and the low temperature rheological properties are affected by the negative effect; the microcosmic properties of asphalt are similar to those of matrix asphalt after foaming water, and there is no new functional group, that is, the process of foaming water is a physical change.

Keywords

Road Engineering, Foam Asphalt, Rheological Properties, Moisture Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

截至 2022 年底,中国高速公路的通车里程达到 17.7 万公里[1] [2],成为通车里程最长的国家。随着公路里程数的提升,路面养护的需求也呈上升趋势。路面铣刨作为传统养护方式会产生大量的废旧沥青混合料,废料长期堆放将造成恶劣的环境污染及严重的资源浪费[3]。泡沫沥青冷再生绿色施工技术[4]在当前能源短缺及环境问题日益严重的背景下,因其经济型、环保型的特点受到了研究人员的关注,具有广阔发展前景。

加水作为泡沫沥青发泡技术实现过程中不可缺少的一个环节,其在发泡完成后依旧部分残留在沥青中[5],水分对泡沫沥青性能影响非常重要。Dong 等[6]研究泡沫水含量对泡沫温拌沥青老化特性的影响,得出泡沫水可以延缓沥青老化过程,但抗疲劳性能降低。Liu 等[7]对泡沫再生沥青耐水性进行了研究,通过表明自由能的方法,得出发泡用水过程增强了抗水损害能力,并提高了与骨料粘附性。徐金枝等[8]研究沥青发泡性能的评价指标及优化设计,得出温度、发泡用水量对发泡性能有重要影响,同时发泡指数应与膨胀率和半衰期结合使用。韦万峰等[9]研究了沥青发泡特性及其对温拌混合料水分敏感性的影响,得出泡沫沥青胶结料残留水分的存在削弱了泡沫沥青与集料的黏结程度,对混合料的水稳定性具有不利影响。周培研等[10] [11]研究发泡水对泡沫沥青粘聚性和粘附性的影响,得出水分子与沥青分子存在排斥作用,发泡水越多对沥青间界面能的削弱也越大。上述的研究表明发泡用水对沥青混合料老化特性、水稳定性及黏附性能等产生不利影响,针对发泡用水对泡沫沥青性能的影响存在不足。

本研究从发泡用水对泡沫沥青流变性能影响开展,通过应变扫描和频率扫描实验(DSR)研究沥青的高温流变性能,通过低温小梁蠕变试验(BBR)探究水分对沥青低温性能的影响,通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)研究沥青的微观特性,旨在揭示泡沫沥青中水分与沥青反应过程,具有推动泡沫沥青发泡技术发展的现实意义。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料及准备

2.1.1. 沥青

本研究选用 SK90#沥青作为基质沥青，主要技术指标见表 1 所示。

Table 1. Main technical indicators of asphalt

表 1. 沥青主要技术指标

技术指标	SK90#	技术要求	试验方法
针入度(100 g, 5 s)	15	28.7	T0604
	20	83	T0604
针入度指数	-1.04	-	T0604
延度(15°C, cm)	>160	≥100	T0605
软化点(°C)	46.2	≥45	T0606
动力粘度(135°C, Pa·s)	0.409		T0620

2.1.2. 发泡装置

发泡研究采用德国维特根厂家自主生产的 WLB10S 型发泡机，配套有气压泵装置进行室内试验，它是现场泡沫冷再生机器的缩小版，完全满足室内试验要求，可提前对所用沥青发泡性能进行检测，试验设备如图 1。



Figure 1. Asphalt foaming device

图 1. 沥青发泡装置

2.2. 试验方法

2.2.1. 动态剪切流变试验

美国 TA 公司研发生产的 DHR-1 型动态剪切流变仪 DSR (见图 2)，是美国 SHRP 计划提出的用于分析沥青中高温及抗疲劳性能的仪器，试验过程中将沥青试件置于下层固定板与上层振荡板之间，振荡板以角频率 ω 进行振荡旋转剪切。平行板尺寸选择 25 mm，平板间距设置 1 mm。

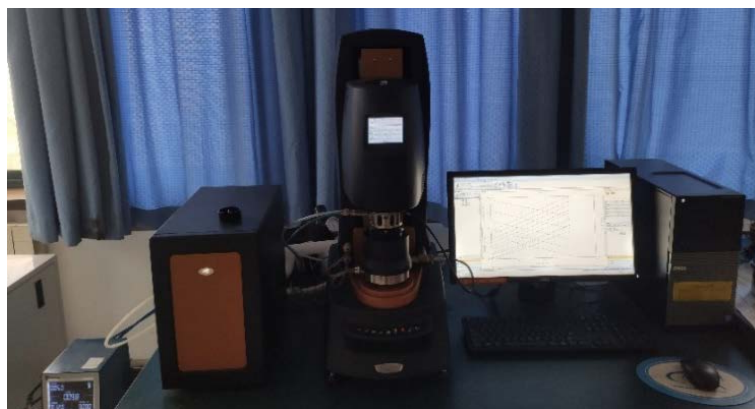


Figure 2. DHR-1 dynamic shear rheometer
图 2. DHR-1 型动态剪切流变仪

1) 温度扫描试验

在 30°C~70°C 的温度域内开展温度扫描, 数据收集应以 5°C 的温度间隔进行, 角频率及应变值分别选用 10 rad/s 及 3%。基于车辙因子及粘温指数对基质沥青及发泡用水量分别为 1.5%、2.0%、2.5% 的泡沫沥青的高温流变性能进行分析。

2) 频率扫描试验

在 30°C~70°C 的温度域内开展频率扫描, 数据收集应以 5°C 的温度间隔进行, 角频率及为 0.1~100 rad/s, 试验施加应变为 1.25%。基于复数模量曲线对基质沥青及发泡用水量分别为 1.5%、2.0%、2.5% 的泡沫沥青低温高频及高温低频黏弹特征进行分析。

2.2.2. 弯曲梁流变实验

弯曲梁流变试验通过衡量基质沥青和发泡后泡沫沥青在低温条件下的挠曲变形情况, 对其低温性能进行评估, 所用弯曲梁流变仪为 Cannon 公司生产的 TE-BBR 型(见图 3)。研究在 -12°C 和 -18°C 条件下, 对各组沥青进行弯曲梁流变试验。

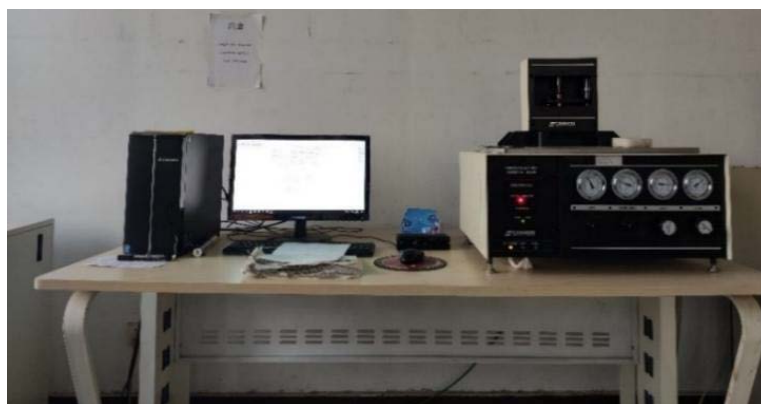


Figure 3. TE-BBR bending beam rheometer
图 3. TE-BBR 型弯曲梁流变仪

2.2.3. 傅里叶红外光谱试验

采用红外光谱仪对发泡水用量为 2% 的泡沫沥青和 SK90# 基质沥青进行红外扫描试验。基于二者的特征峰对其进行定性分析。试验采用美国 Thermo 公司生产的 Nicolet iS-5 型红外光谱仪(见图 4)。



Figure 4. Nicolet iS-5 Fourier infrared spectrometer
图 4. Nicolet iS-5 型傅里叶红外光谱仪

2.2.4. 泡沫沥青试样制备

制备采集时泡沫沥青发泡温度为 165°C ，用水量为 1.5%、2% 和 2.5%。样品采集冷却后立即进行沥青的流变试验及傅里叶红外变换试验和低温小梁蠕变实验，保证水分蒸发较少，减少水分蒸发产生的不利影响，由于沥青性能测试试验均在 100°C 下进行，可认为泡沫沥青中的水分处于稳定状态。

2.3. 泡沫沥青发泡机理

试验前的各项工作准备好之后，按下沥青喷射按钮，高温的沥青与冷水在发泡仓迅速接触，水滴表面温度瞬间升高，体积膨胀形成蒸汽，蒸汽泡在高压气体的作用下进入沥青的连续相，形成泡沫沥青，沥青发泡及机头喷射泡沫沥青机理[12]如图 5。泡沫沥青形成后以一种亚稳态的气泡形式[13]存在。

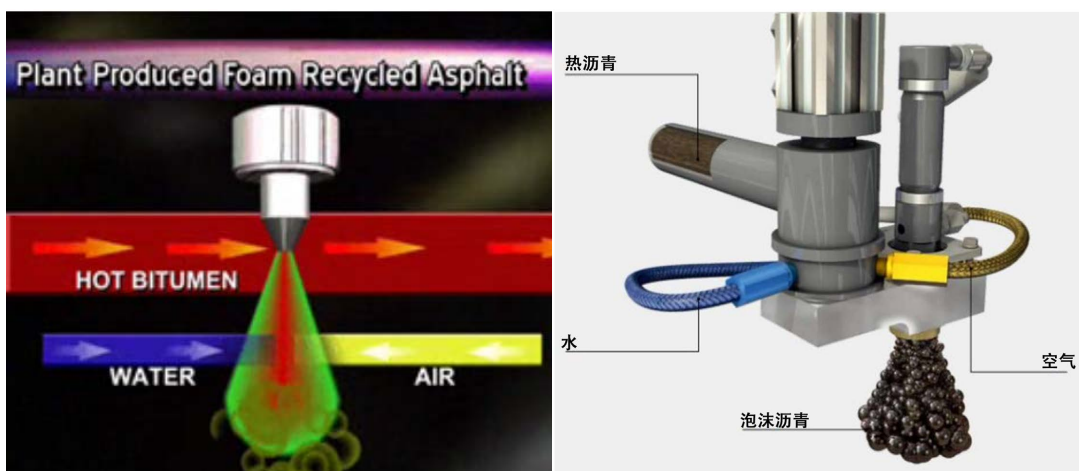


Figure 5. Asphalt foaming and working principle
图 5. 沥青发泡及工作原理

3. 结果与讨论

3.1. 水对沥青高温流变特性影响

研究采用车辙因子 $G^*/(\sin\delta)$ 对沥青高温稳定性能进行评价。车辙因子 $G^*/(\sin\delta)$ 值越小表明沥青在高温下抵抗变形能力越强，其高温稳定性能越好，反之则证明其抗车辙性能越差[14]。为对车辙因子评价沥

青高温性能进行量化,利用车辙因子处于 1 kPa 的临界值时求出的对应临界温度,可有效对沥青的高温性能,临界温度越高表明沥青高温性能越稳定。温度扫描试验沥青车辙因子 - 试验温度拟合结果见图 6。

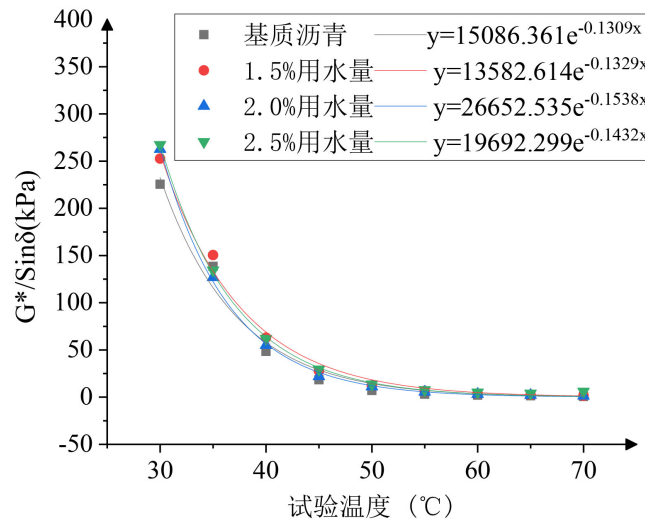


Figure 6. Asphalt temperature-rutting factor fitting
图 6. 沥青温度 - 车辙因子拟合

从图 6 可以看出,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 的值随着试验温度升高在 30°C~40°C 呈现急速下降的趋势,在温度 45°C 以后逐渐减小趋于平和。该种现象表明在 30°C~40°C 之间沥青样品内部黏弹性成分的比例发生了急剧变化,粘性成分比例增多弹性成分比例减少,并且超过 55°C 时沥青成分基本为粘性。

基质沥青与不同用水量泡沫沥青临界温度试验结果见图 7。

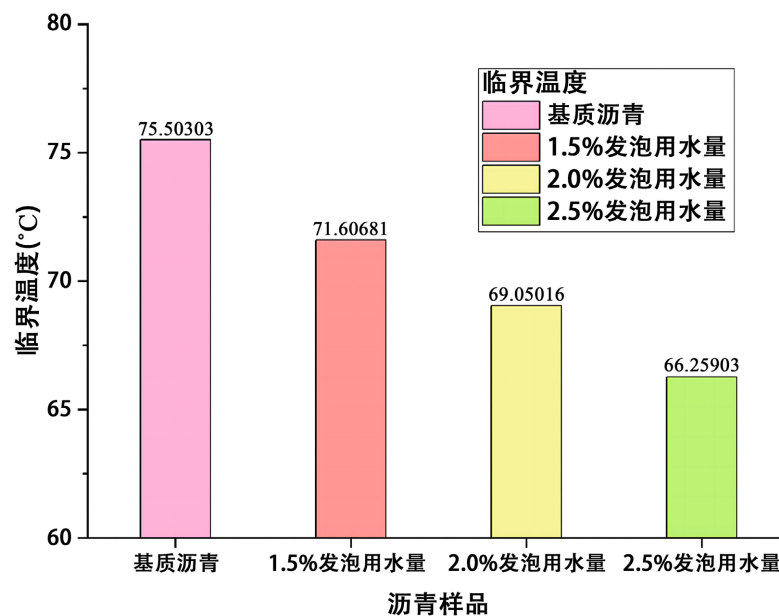


Figure 7. Critical temperature of foamed asphalt
图 7. 发泡沥青临界温度

由图 7 可以看出,基质沥青的临界温度值高于泡沫沥青,表明沥青发泡后其高温稳定性有所下降,

并且随发泡用水量的增长沥青高温稳定性下降 2.5%、6%、9.8%。这表明发泡用水的存在对沥青的高温性能具有不良影响,其原因可能是因为随着发泡用水量的增加,沥青发泡后形成的膜厚度变薄,无法提供足够的保护和粘结力,导致高温性能下降。

3.2. 水对沥青低温流变特性影响

通过 BBR (弯曲梁流变试验)研究发泡水的存在是否对沥青的低温流变性能产生影响,利用试验产生的低温蠕变劲度 S 值和蠕变速率 m 值评价泡沫沥青的低温性能[15]。蠕变劲度值越大表明沥青脆性性质明显,低温性能较差,蠕变速率 m 值表示沥青在低温条件下的劲度变化率[16],其值越大表明材料内部拉应力越小,材料低温抗裂性能越好。BBR 试验结果见图 8。

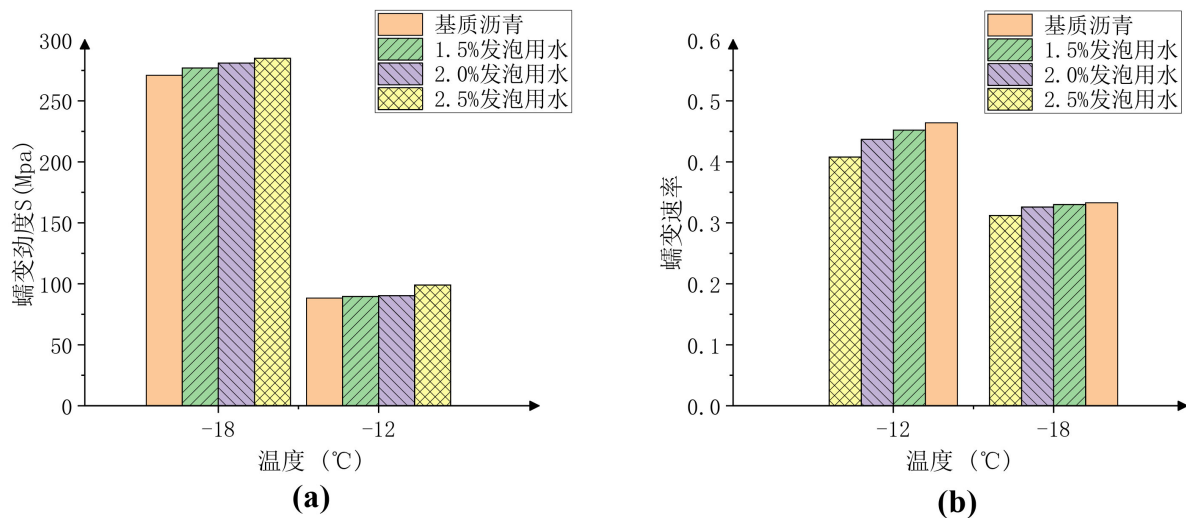


Figure 8. Asphalt BBR test results: (a) Creep strength; (b) Creep rate
图 8. 沥青 BBR 试验结果: (a) 蠕变劲度; (b) 蠕变速率

由图 8 可以看出沥青发泡后较基质沥青相比其低温蠕变性能产生不同程度下降。沥青发泡后低温劲度增加,表明沥青的脆性在低温条件下变差,且随用水量增加低温脆性逐渐增强,沥青蠕变速率随温度降低而减小,表明沥青随温度降低应力松弛性能变差,且发泡用水对沥青松弛性能有一定影响,用水量增加导致沥青应力松弛性能变差。

3.3. 水对沥青微观特性影响

采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)观察沥青的微观结构,通过物质对特定波长的吸收情况来反映出沥青在发泡过程前后光谱图的变化,研究沥青在发泡后是否存在水分,水分是否与沥青产生反应。因每种物质的特征官能团明显不同,表现为在吸收光束后会反应出不同的吸光度,从而在光谱图上反映出不同的吸收峰,物质的变化由特定的吸收峰值来判断[17][18]。

红外光区[19][20]一般分为:近红外区、中红外区和远红外区,其对应的特征峰位置分别为 $13,158\text{ cm}^{-1}\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 、 $4000\text{ cm}^{-1}\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 、 $400\text{ cm}^{-1}\sim 10\text{ cm}^{-1}$ 。研究表明沥青材料处于中红外区,因此在中红外区特征峰范围内对其进行试验研究。试验结果如图 9 所示。

图 9 反映了基质沥青和发泡用水量为 2% 泡沫沥青的红外光谱试验结果。在波数为 $1590\text{ cm}^{-1}\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ 时吸收峰加强,是由 $\text{C}=\text{C}$ 振动引起的, $1370\text{ cm}^{-1}\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ 吸收峰归类为 CH_3 的对称伸缩振动和反对称伸缩振动,吸收峰位于 $690\text{ cm}^{-1}\sim 770\text{ cm}^{-1}$ 区域内是由苯单取代 $\text{C}-\text{H}$ 面外弯曲振动产生。从图中可以

看出基质沥青在发泡后特征峰值与原基质沥青相似，并且发泡后的沥青没有产生官能团，说明沥青的发泡过程是单纯的物理过程，不涉及化学反应。

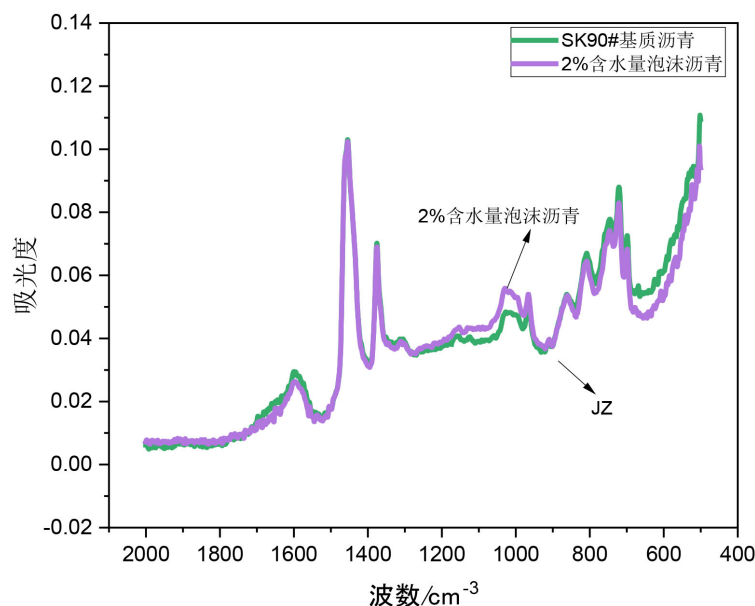


Figure 9. Infrared spectra of matrix asphalt and foam asphalt

图 9. 基质沥青及泡沫沥青红外光谱图

4. 结论

通过 DSR 温度扫描试验、BBR 弯曲梁试验、FTIR 傅里叶光谱试验研究发泡用水对泡沫沥青的高低流变特性及微观特性影响，得出如下结论：

1) 发泡用水对泡沫沥青高温性能的影响随着用水量增加逐渐下降，发泡后形成的沥青膜变薄，导致其保护和粘结力不足，表现为车辙因子在 30℃~40℃ 急剧下降，基质沥青的临界温度高于泡沫沥青。

2) 发泡后沥青的低温蠕变劲度增加，且随发泡用水量增加，低温脆性逐渐增强。蠕变速率随温度降低而减小，表明沥青低温应力松弛性能变差，且发泡用水量增加进一步降低了沥青的应力松弛性能。

3) 发泡用水对泡沫沥青微观结构未有显著变化，泡沫沥青及未发泡基质沥青的特征吸收峰基本相似，未出现新的官能团，发泡过程为物理变化，不涉及化学反应。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2022 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2023-06-16(002).
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2024 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 1-81.
- [3] 陶卓辉, 沈士蕙, 孙杨, 等. 表面活性泡沫沥青发泡工艺及流变特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 41-49.
- [4] 赵晓康, 马川义, 陈鲁川, 等. 废旧橡胶沥青发泡特性与最佳发泡条件研究[J/OL]. 长沙理工大学学报(自然科学版): 1-11. <https://link.cnki.net/doi/10.19951/j.cnki.1672-9331.20231227001>, 2024-05-31.
- [5] 王杰, 郑鲲鹏, 徐剑, 等. 发泡用水量对泡沫温拌沥青混合料力学性能的影响[J]. 公路交通科技, 2023, 40(8): 1-8.
- [6] Dong, F., Yu, X., Wang, T., Yin, L., Li, N., Si, J., et al. (2018) Influence of Base Asphalt Aging Levels on the Foaming Characteristics and Rheological Properties of Foamed Asphalt. *Construction and Building Materials*, 177, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.100>

- [7] Liu, S., Yu, X. and Dong, F. (2017) Evaluation of Moisture Susceptibility of Foamed Warm Asphalt Produced by Water Injection Using Surface Free Energy Method. *Construction and Building Materials*, **131**, 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.072>
- [8] 徐金枝, 郝培文. 沥青发泡性能评价指标及优化设计研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(6): 776-780+802.
- [9] 韦万峰, 孔令云, 禚炜安, 等. 沥青发泡特性及其温拌混合料水分敏感性研究[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-17. <https://link.cnki.net/doi/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230841>, 2024-05-31.
- [10] 周培研, 刘圣洁, 李晓超, 等. 发泡水对泡沫沥青粘聚/粘附性的多尺度影响研究[J]. 应用化工, 2024, 53(2): 257-261.
- [11] Briscoe, O.E. (1987) Asphalt Rheology Relationship to Mixture. ASTM International.
- [12] Chen, Z., Yi, J., Zhao, H., Luan, H., Xu, M., Zhang, L., *et al.* (2021) Strength Development and Deterioration Mechanisms of Foamed Asphalt Cold Recycled Mixture Based on MD Simulation. *Construction and Building Materials*, **269**, Article 121324. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121324>
- [13] Cheng, H., Luo, Z. and Seliverstov, N. (2022) A Study of Foam Bitumen Preparation for Effective Recycling of Pavement Layers. *Sustainability*, **14**, Article 9375. <https://doi.org/10.3390/su14159375>
- [14] 郭鹏, 何圳, 谢凤章, 等. 基于 DSR/DSC 对泡沫沥青性能研究[J]. 应用化工, 2020, 49(3): 602-605+610.
- [15] 戴文亭, 刘丹丹, 郭威, 等. 冻融循环条件下硅烷偶联剂改性泡沫沥青混合料的损伤特性[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 264-268.
- [16] 刘圣洁, 谢政专, 彭爱红. 泡沫温拌沥青的玻璃态转变温度及低温性能[J]. 深圳大学学报(理工版), 2021, 38(2): 163-169.
- [17] 韩跃杰, 丁智勇, 吴优, 等. 发泡条件对基质沥青发泡膨胀率的影响[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(3): 19-26.
- [18] Li, N., Tang, W., Yu, X., Zhan, H., Ma, H., Ding, G., *et al.* (2020) Investigation of Moisture Dissipation of Water-Foamed Asphalt and Its Influence on the Viscosity. *Materials*, **13**, Article 5325. <https://doi.org/10.3390/ma13235325>
- [19] 温永, 王祯国, 董永康, 等. Terminal Blend 橡胶泡沫沥青制备及性能评价[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10): 1129-1136.
- [20] 李永波. 泡沫沥青冷再生技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.