

# 水玻璃强化砂岩集料沥青混合料动态模量研究

黄美林<sup>1</sup>, 费西洋<sup>1</sup>, 蒋双全<sup>1</sup>, 刘泽宇<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>四川路桥建设集团股份有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>长安大学公路学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月10日; 发布日期: 2025年8月22日

## 摘要

四川分布的大量砂岩吸水率偏高, 力学性能较差, 岩石轧制而成的集料其物理力学性能不满足设计规范中沥青路面所用集料的要求。基于此, 研究对集料的物理力学性能进行改善, 以便于可以应用于沥青路面中。本文选择水玻璃作为强化剂, 通过旋转压实仪旋转压实成型试件, 采用SPT测试系统测试试件的动态模量、相位角, 通过sigmoidal函数拟合出动态模量与加载频率变化的主曲线用于对比。研究表明在较宽范围加载频率下, 水玻璃处理过的沥青混合料的动态模量有很大的提高, 永久变形降低、抗车辙能力提高、通过水玻璃处理过的集料吸水率降低、力学性能得到了提高, 磨耗值降低, 达到路面使用要求。

## 关键词

高速公路, 沥青混合料, 砂岩, 水玻璃, 动态模量

# Study on Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures with Sodium Silicate Reinforced Sandstone Aggregate

Meilin Huang<sup>1</sup>, Xiyang Fei<sup>1</sup>, Shuangquan Jiang<sup>1</sup>, Zeyu Liu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sichuan Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>College of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 20<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2025

## Abstract

Sichuan distribution of a large number of sandstone water absorption rate is high, poor mechanical

\*通讯作者。

文章引用: 黄美林, 费西洋, 蒋双全, 刘泽宇. 水玻璃强化砂岩集料沥青混合料动态模量研究[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 2018-2026. DOI: 10.12677/hjce.2025.148220

properties, rock rolled from the aggregate of its physical and mechanical properties do not meet the design specifications of asphalt pavement used in the aggregate requirements. Based on this, research on the physical and mechanical properties of aggregates to improve, so that can be applied to asphalt pavement. In this paper, sodium silicate is chosen as the reinforcing agent, and the specimens are rotationally compacted by rotary compactor, and the dynamic modulus and phase angle of the specimens are tested by SPT test system, and the main curve of the dynamic modulus and the change of the loading frequency is fitted by the sigmoidal function for comparison. The study shows that in a wide range of loading frequency, the dynamic modulus of sodium silicate treated asphalt mixture has a great improvement, the permanent deformation is reduced, the rutting resistance is improved, the water absorption rate of sodium silicate treated aggregates is reduced, the mechanical properties are improved, the abrasion value is reduced, and the requirements of pavement use are met.

## Keywords

Highway, Asphalt Mixture, Sandstone, Sodium Silicate, Dynamic Modulus

Copyright © 2025 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

随着我国公路里程的不断增长,对传统优质集料的需求将会不断增大,势必会引起用料困难的局面。砂岩广泛分布于四川地区,为了合理利用当地资源,减少运输成本,选用砂岩替代玄武岩、石灰岩应用于路面中,可以适当缓解用料困难等问题。且将砂岩应用于路面中在国内已有广泛的报道[1]-[4]。

然而,四川当地砂岩存在吸水率较高,且抗压强度较低的问题,属于软化岩石,直接将其应用于路面势必会影响路面的质量和使用寿命[5][6],因此研究砂岩集料强化对砂岩的应用具有很大的意义。目前对集料强化大多集中于再生骨料中,其中以化学强化为主,其主要原理是通过集料表面的空隙进行填充和包裹,从而达到提高集料强度、降低吸水率的目的,朱坤学[7]研究利用水玻璃对再生集料进行强化处理发现,再生集料的吸水率随水玻璃溶液浓度增大会出现先增大后降低的趋势,当浓度为8%时,吸水率降低幅度最大,达到了18%。黄焯旻等[8]研究使用渗透性防水剂+水性聚氨酯对再生集料进行强化处理发现,处理后压碎值和吸水率分别降低了16.9%和1.05%,与天然集料性质基本相同。黎旭等[9]研究再生集料掺量对沥青混合料的影响发现,随着掺量越多,混合料性能衰减越快,但通过对集料表面涂甲基硅酸钠后,会显著影响再生集料的吸水率,沥青混合料的低温稳定性提高,但高温性能影响较小。张文腾[10]研究偶联剂KH-560对再生集料的影响发现,经过偶联剂处理后的再生集料吸水率和力学性能满足规定要求,且混合料的高温性能有所提高,但在高应力作用下(0.9 MPa),集料出现破碎现象,再生集料不推荐在重载下使用。Spaeth[11]对比硅酸钠和聚二甲基硅氧烷对再生集料进行浸泡处理发现,经过强化后,再生集料的吸水量和洛杉矶磨耗有所减小,其中硅酸钠通过填充空隙从而降低吸水率,而硅氧烷会形成疏水薄膜从而减小吸水率,因此硅氧烷表现出更好的改性效果。闫洪生[12]用纳米SiO<sub>2</sub>溶液浸泡处理再生骨料。结果表明,再生骨料在2%浓度的纳米SiO<sub>2</sub>溶液浸泡48 h后的吸水率和压碎值分别降低了29.9%和31.0%。唐世亮[13]等分析得出硅酸钠水溶液可通过孔隙进入砂岩内部后产生固化作用,并保持在孔隙内,从而降低砂岩孔隙率。可以发现,现阶段集料强化大多集中于再生集料中,对软弱岩石的研究较少,因此本文选用水玻璃对砂岩集料进行强化处理,同时研究强化前后动态模量变化趋势。

2. 材料技术指标

2.1. 强化剂

针对硅烷(Silane)、聚氨酯(PU)和水玻璃(Sodium Silicate)三种强化剂,在经济性和性能方面进行对比,情况如表 1 所示。

Table 1. Fortifier indicators

表 1. 强化剂指标

| 材料                   | 价格参考(元/kg) | 性能         |
|----------------------|------------|------------|
| 硅烷(Silane)           | 30.0       | 疏水性好、结合力强  |
| 聚氨酯(PU)              | 15.0       | 高弹性、耐磨、抗老化 |
| 水玻璃(Sodium Silicate) | 1.0        | 粘结性强、耐酸碱性好 |

本次强化剂选用嘉善县优瑞耐火有限公司所生产硅酸钠水溶液,对砂岩通过水玻璃浸泡处理来进行强化处理,与其他强化剂相比经济性良好,其技术参数见表 2 所示。

Table 2. Technical standards for sodium silicate

表 2. 水玻璃技术标准

| 技术指标         | 实测结果  |
|--------------|-------|
| 密度(20℃)/g/ml | 1.385 |
| 二氧化硅质量分数/%   | 26.98 |
| 氧化钠质量分数/%    | 8.53  |
| 波美度(20℃)°Bé  | 38.5  |
| 模数/(M)       | 3.30  |
| 固含量/%        | 35.5  |

2.2. 沥青

普通沥青与砂岩碎石粘附性较差,而改性沥青与砂岩粘附性较好[14],因此本次采用 SBS 改性沥青(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯),其各项指标检测结果如下表 3 所示。

Table 3. SBS modified asphalt technical indicators

表 3. SBS 改性沥青技术指标

| 技术指标                         | 试验结果 | 技术标准 |
|------------------------------|------|------|
| 针入度/(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm | 55   | ≥50  |
| 软化点/℃                        | 80   | ≥75  |
| 延度/(5℃, 5 cm/min)/cm         | 32   | ≥20  |
| 闪点/℃                         | 260  | ≥230 |
| 溶解度/%                        | 99.6 | ≥99  |

2.3. 集料强化结果对比

采用《公路工程集料实验规范》(JTGE42-2005)中的相关方法进行实验的相关技术指标如下表 4。

**Table 4.** Technical specifications of aggregates before and after sodium silicate treatment**表 4.** 水玻璃处理前后集料的技术指标

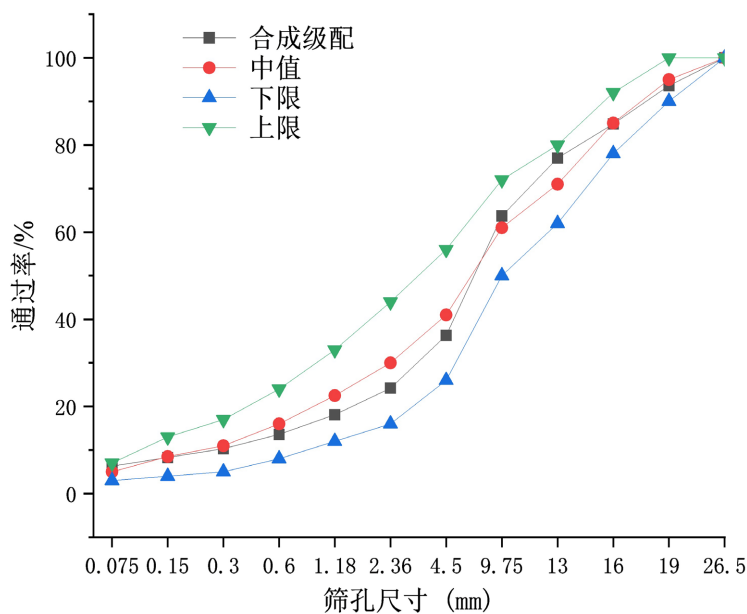
| 技术指标                        |          | 原集料试验结果 | 强化后集料试验结果 | 技术标准 |
|-----------------------------|----------|---------|-----------|------|
| 表观相对密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 15~20 mm | 2.628   | 2.543     | ≥2.5 |
|                             | 10~15 mm | 2.610   | 2.586     | ≥2.5 |
|                             | 5~10 mm  | 2.609   | 2.609     | ≥2.5 |
| 吸水率/%                       | 15~20 mm | 2.663   | 2.475     | ≤3.0 |
|                             | 10~15 mm | 3.031   | 2.740     | ≤3.0 |
|                             | 5~10 mm  | 3.811   | 2.753     | ≤3.0 |
| 压碎值/%                       |          | 28.9    | 19.8      | ≤28  |
| 磨耗值/%                       |          | 33.8    | 26.4      | ≤30  |
| 坚固性/%                       |          | 19.1    | 8.2       | ≤12  |

由表 4 可以发现, 未经处理的集料吸水率与压碎值等均不满足要求, 不适用应用于路面中, 随着水玻璃对集料的浸泡处理后, 水玻璃会填充部分空隙, 砂岩集料的吸水率、压碎值、磨耗值均有不同程度的降低, 且满足相关的要求, 水玻璃在一定程度上可以改善集料的性能。

### 3. 配合比设计

#### 3.1. 级配设计

根据集料的筛分结果调整级配曲线, 级配曲线见下图 1 所示。

**Figure 1.** Grading curve**图 1.** 级配曲线

采用 AC-20 型密级配设计, 粗骨料之间的嵌挤作用形成骨架, 细集料充分的填充于空隙内, 形成密实式沥青混合料。

3.2. 最佳油石比

采用马歇尔方法确定沥青混合料的最佳油石比。选择 4.5%、5%、5.5%、6%、6.5%共 5 个油石比。分别按规范求击实成型马歇尔试件，每组 5 个。根据体积、稳定度、空隙率、流值指标算出未处理砂岩的最佳油石比为 5.5%。强化砂岩的最佳油石比为 5.3%，经过水玻璃溶液处理后，最佳油石比有所减少，这说明水玻璃会填充集料的开口孔隙，减少集料对沥青的吸收，总的沥青用量也因此减少。

4. 动态模量实验

4.1. 试样与制备

按最佳油石比，配备集料、沥青、矿粉、消石灰，然后通过旋转压实仪进行压实，制备  $\varnothing 150 \times 170$  mm 的试件，然后钻芯取  $\varnothing 100 \times 150$  mm 的试样，其中旋转压实次数选择 100 次，实验温度-10℃、20℃、50℃保温 4 h，之后采用 spt 测试系统进行动态模量测试，为了观测不同加载频率下的动态模量的表征，本次实验选取的加载频率为 0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、10 Hz、25 Hz。实验仪器见下 图 2 所示。混合料的技术指标如下表 5 所示。



Figure 2. SPT experiment  
图 2. SPT 实验

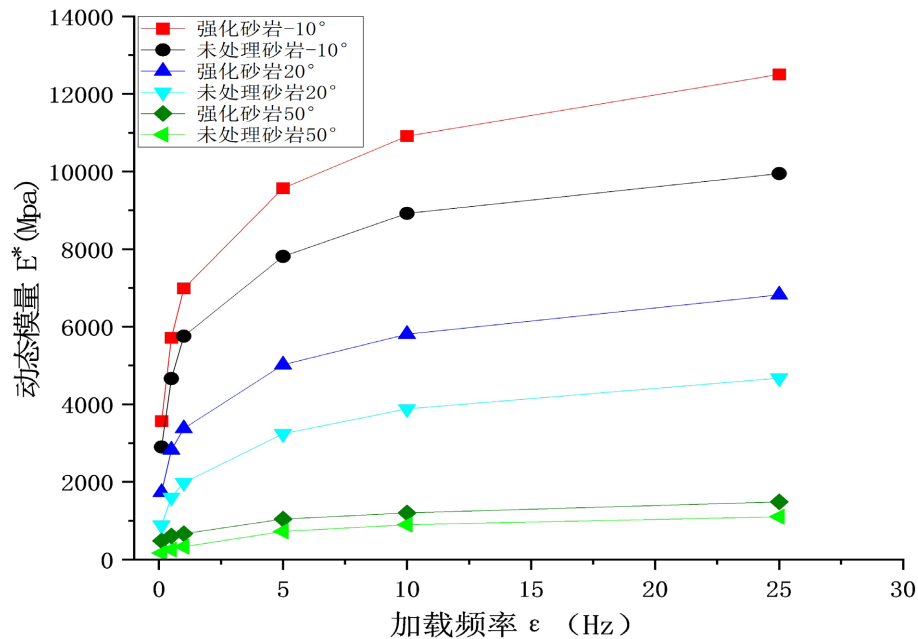
Table 5. Technical specifications of specimens after rotary compaction  
表 5. 旋转压实后的试样技术指标

| 试验项目                         | 强化砂岩  | 未处理砂岩 | 技术要求  |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| 毛体积相对密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.237 | 2.224 | —     |
| 空隙率 VV/%                     | 4.50  | 4.86  | 4~6   |
| 矿料间隙率 VMA/%                  | 13.18 | 13.95 | ≥12   |
| 饱和度 VFA/%                    | 65.86 | 65.14 | 65~75 |

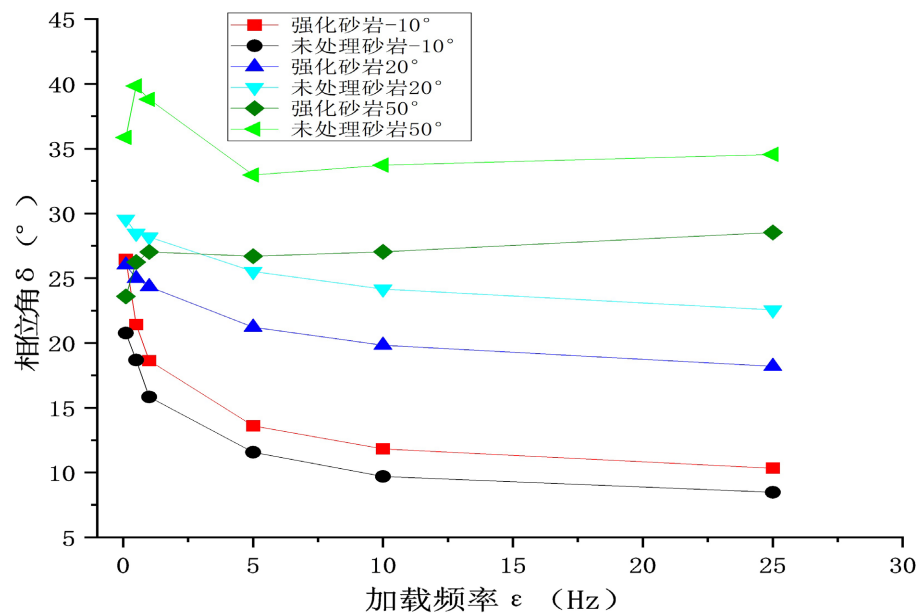
4.2. 结果与讨论

动态模量实验结果如下 图 3 所示。  
动态模量作为衡量沥青混合料刚性指标，对路面设计和评估具有重要的意义。根据 图 3(a)可以看出，随着加载频率增大，强化砂岩(水玻璃处理砂岩)、未处理砂岩的动态都在逐渐增大，这是因为沥青混合料作为一种粘弹性材料，变形具有一定的滞后性，使得应力与应变之间相差一个相位角差，且随着加载频

率越大,作用时间越短,导致变形减少,使得动态模量增大。但动态模量不是无限增长,受混合料的影响,超过限界将趋于稳定。



(a) 混合料动态模量随加载频率变化曲线



(b) 混合料相位角  $\delta$  随加载频率变化曲线

Figure 3. Dynamic modulus test results

图 3. 动态模量测试结果

随着温度上升,强化砂岩与未处理砂岩的动态模量逐渐降低,强化砂岩和未处理砂岩的动态模量随温度增大而降低,这是因为沥青混合料是一种对温度非常敏感的材料,它通常在低温表现弹性,在高温表现为黏性,温度升高更容易流动变形,从而使动态模量降低,这也是在高温容易发生车辙的原因。

根据图 3(b)可以看出强化砂岩与未处理砂岩随频率变化趋势相同,在中低温是在逐渐降低,但在高温时,有稍许升高,造成温度不同变化趋势不同的原因主要在于在高温,沥青混合料处于黏性状态,此时若频率增大,沥青对混合料的影响增大,发生蠕变,延迟变形增大从而引起相位角增大。而在中低温,沥青混合料弹性成分多于黏性,因此延迟变形减小,相位角减小。

强化砂岩的相位角在高、中、低温皆小于未处理砂岩,表明经过水玻璃处理后的砂岩内部形成较致密的网状结构,弹性优于未处理砂岩,这与空隙率、动态模量结果相同。

道路在实际情况中常常处于大跨度的温度范围内、多加载频率下,若对所有温度和频率进行实验验证,需要耗费很多财力和人力,基于此提出了主曲线的概念用于减少工作量。对于粘弹性材料在不同温度和荷载作用频率下得到的力学性质可以通过平移后形成的一条在参考温度下的光滑曲线,称为主曲线(时间~温度置换原理),其他温度条件下是通过非线性最小二乘法进行拟合得出,形成 sigmoidal 函数形式,如式(1)所示[15]-[17]

$$\lg(|E^*|) = \sigma + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \lg(\varepsilon)}} \quad (1)$$

式中:  $|E^*|$  为动态模量;  $\varepsilon$  为加载频率;  $\delta$  为动态模量最小值/MPa;  $\delta + \alpha$  为动态模量最大值/MPa;  $\alpha$  为变量;  $\beta, \gamma$  均为回归系数。

对于其它温度下的动态模量,与参照温度之间相差一个移位因子  $\alpha$ ,它代表与温度的相关性,粘弹性材料的温度位移因子常用 WLF 时-温等效方程来计算,  $\alpha_T$  的表达式如式(2)所示:

$$\lg \alpha_T = \frac{-C1 \times (T - T_0)}{C2 + T - T_0} \quad (2)$$

式中:  $C1, C2$  为拟合参数,  $T$  表示选择的温度;  $T_0$  表示基准温度;

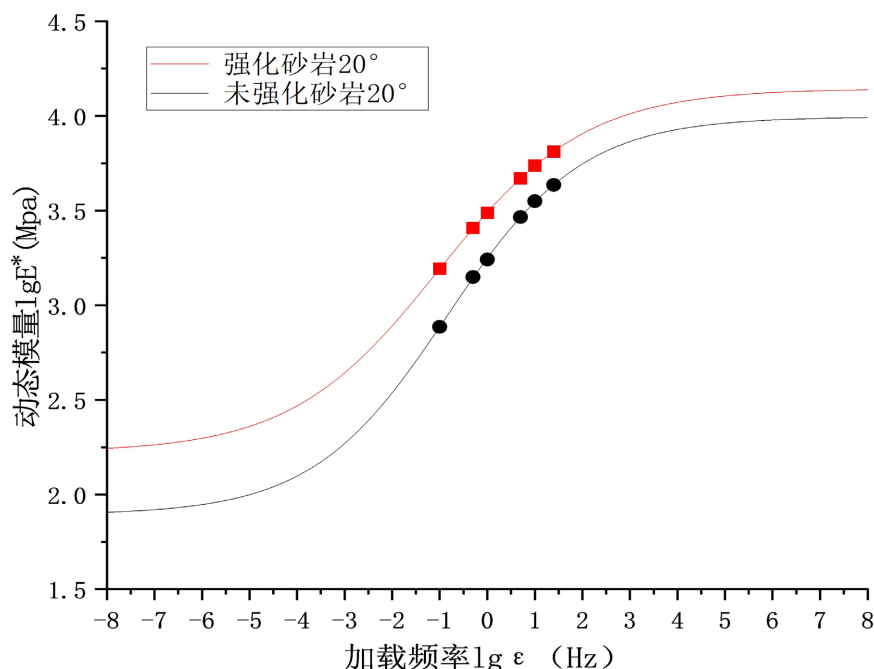
本次选用参考温度为 20℃, 动态模量主曲线参数见下表 6 所示。

**Table 6.** Dynamic modulus master curve parameters  
**表 6.** 动态模量主曲线参数

| 参数                 |          | 强化砂岩     | 未处理砂岩      |
|--------------------|----------|----------|------------|
| 调整后 R <sup>2</sup> | $\delta$ | 2.06461  | 1.93139    |
|                    | $\alpha$ | 2.09775  | 2.06491    |
|                    | $\beta$  | -0.84302 | -0.6806    |
|                    | $\gamma$ | -0.60331 | -0.71359   |
|                    |          | 0.99982  | 0.99952    |
| 移位因子 $\lg a_T$     | -10℃     | 1.10138  | 1.6780665  |
|                    | 20℃      | 0        | 0          |
|                    | 50℃      | -2.43092 | -2.1559507 |
| $C1$               |          | -4.02749 | -15.14103  |
| $C2$               |          | -79.7033 | -240.687   |

其中 R<sup>2</sup> 为确定系数,表示拟合程度好坏,越接近 1,拟合效果越好,本次曲线拟合程度很好(都大于 0.999),贴合实际。

根据上述过程得到强化砂岩和未处理砂岩在参考温度下的主曲线见下图 4 所示。



**Figure 4.** Comparison of the main curves at 20°C between reinforced and un-reinforced sandstones  
**图 4.** 强化砂岩和未强化砂岩在 20°C 时主曲线对比

图 4 看出经过水玻璃处理后的砂岩, 动态模量在宽幅加载频率范围内有大幅度提高, 在 20°C、25 Hz 下动态模量提升 45.8%, 这将减少路面的永久变形, 减少变形的累计, 将显著提高混合料的高温抗车辙能力 [18]-[23], 提高沥青混合料的高温温度性。

水玻璃处理后的砂岩在高温下动态模量增长量比低温小, 这是因为沥青在高温时发生软化, 混合料的结构变得相对松软, 水玻璃通过填充强化的效果降低。

## 5. 结论

- (1) 水玻璃改性后的砂岩表观相对密度、吸水率、压碎值、磨耗值、坚固性都降低, 路面抗滑性能得到提高。
- (2) 动态模量随温度增大而降低且在高温时的增长速率低于低温, 表明动态模量对温度具有很高的依赖性。
- (3) 动态模量随频率增大而增大, 表明动态模量对加载频率很敏感, 因此在道路运营时必须严格控制超重现象。
- (4) 混合料的相位角在中低温随频率增大而减小, 而在高温时随频率增大而增大, 是因为在高温沥青处于黏性, 此时若频率增大, 沥青对混合料的影响增大, 发生蠕变, 延迟变形增大从而引起相位角增大。
- (5) 根据动态模量的提升, 可以推测出强化后的砂岩沥青混合料的高温性能提高。
- (6) 通过 sigmoidal 函数可以对宽范围的温度和加载频率下的动态模量进行预测, 其曲线拟合程度很高。

## 参考文献

- [1] 楼建敏, 孟宪东, 宋致科, 等. 砂岩用于高速公路沥青路面面层可行性研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 148-154.
- [2] 李晨雨, 姜赫, 巫敏. 以金港高速沿线石材为骨料的沥青混合料路用性能研究[J]. 建筑技术, 2025, 56(3): 355-

- 358.
- [3] 包卫星, 姚莉莉. 砂岩用于沥青混凝土面层的路用性能研究[J]. 公路, 2014, 59(10): 243-246.
- [4] 王金国. 红砂岩 AC-13C 沥青混合料在京藏高速银川段应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(12): 85-88.
- [5] 李黎明, 黄红明, 曾国东, 等. 集料强度对环氧沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 公路与汽运, 2022(6): 118-121.
- [6] 郝凌云. 集料对沥青混合料劈裂强度影响试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.
- [7] 朱坤学. 利用建筑废弃物制备再生混凝土及砂浆的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [8] 黄焯旻, 娄宁, 胡靖. 建筑再生集料复合强化对沥青混合料路用性能影响研究[J]. 公路, 2023, 68(10): 118-123.
- [9] 黎旭, 韦炳锐, 龚伟迪, 等. 建筑再生集料对沥青混合料水稳定性能的影响[J]. 西部交通科技, 2021(8): 78-82.
- [10] 张文腾, 黄磊, 邓贵坤, 等. 硅烷偶联剂改性再生集料及其在沥青混凝土中的应用[J]. 建材世界, 2024, 45(6): 6-8.
- [11] Spaeth, V. and Djerbi Tegguer, A. (2013) Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by Polymer Treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **2**, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.03.003>
- [12] 崔旭东, 闫洪生, 朱亚光, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 强化再生混凝土力学性能的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(3): 503-516.
- [13] 唐世亮, 江志萍. 水玻璃对砂岩浸渍效果的试验研究[J]. 重庆建筑, 2013, 12(5): 55-56.
- [14] 雷俊, 何兆益, 范勇军, 等. 宁夏砂岩集料与沥青粘附性试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(2): 81-83.
- [15] 赵延庆, 吴剑, 文健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路, 2006(8): 163-167.
- [16] 栗培龙, 饶文字, 冯振刚等. 沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 1-5+11.
- [17] 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.
- [18] 肖鹏, 酒雪洋, 吕阳等. 基于动态模量的玄武岩纤维沥青混合料高低温性能研究[J]. 公路, 2016, 61(1): 211-214.
- [19] Xiao, P., Jiu, X.Y., Lv, Y., *et al.* (2016) Study on High and Low Temperature Performance of Basalt Fiber Asphalt Mixture Based on Dynamic Modulus. *Highway*, **61**, 211-214.
- [20] 杨永红, 张尚龙, 张倩. 基于动态模量和三层式车辙试验的车辙深度预估[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(5): 717-723+762
- [21] 黄琪, 刘安, 陈鹏飞. 基于动态模量试验的不同纤维沥青混合料高温性能研究[J]. 公路, 2023, 68(4): 36-44.
- [22] Korkiala-Tanttu, L. (2007) Speed and Reloading Effects on Pavement Rutting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Geotechnical Engineering*, **160**, 123-127. <https://doi.org/10.1680/geng.2007.160.3.123>
- [23] Pereira, P.A.A., Pais, J.C. and Sousa, J.B. (1999) Validation of SHBP A-698 Permanent Deformation Concepts for Different Truck Speeds. *Transportation Research Board Meeting*, Trondheim, 6-8 July 1998, 339-348.