

# PE 植物油复合改性沥青性能评价

Performance Evaluation of PE Vegetable Oil Composite Modified Asphalt

杜 勇

(郑州市公路工程公司, 郑州 450000)

**摘要:** 为了探究聚乙烯 (PE) 与植物油复合改性沥青应用的可行性, 采用针入度、延度、软化点、布氏旋转黏度、针入度指数试验以及短期老化试验、热重分析试验对 PE 植物油复合改性沥青性能进行综合评价。结果表明: PE 可降低基质沥青的针入度与延度, 提升软化点与黏度, 加入植物油后, 随着植物油掺量增大, 复合改性沥青针入度与延度逐渐提升, 软化点与黏度则呈现降低趋势; PE 可改善沥青的温度敏感性, 但植物油掺量达到 7% 时 PI 值显示其温度敏感性较基质沥青差; PE 可改善沥青的抗热氧老化特性与热分解特性, 且适量植物油可进一步提升沥青抗氧化性能, 最佳掺量为 3%。而当植物油掺量增大时, 沥青热分解特性逐渐劣化。

**关键词:** 沥青; 植物油; 聚乙烯 (PE); 物理指标; 老化; 热重

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0018-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.004

DU Yong

(Zhengzhou City Highway Engineering Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of the application of polyethylene (PE) and vegetable oil composite modified asphalt, the performance of PE vegetable oil composite modified asphalt was comprehensively evaluated by penetration, ductility, softening point, Brinell rotational viscosity, penetration index test, short-term ageing test and Thermogravimetric analysis analysis test. The results show that PE can reduce the penetration and ductility of the matrix asphalt, and improve the softening point and viscosity; After adding vegetable oil, as the amount of vegetable oil increases, the penetration and ductility of the composite modified asphalt gradually increase, while the softening point and viscosity show a decreasing trend. PE can improve the temperature sensitivity of asphalt, but when the content of vegetable oil reaches 7%, the PI value shows that its temperature sensitivity is worse than that of base asphalt. PE can improve the thermal oxygen ageing and thermal decomposition properties of asphalt, and an appropriate amount of vegetable oil can further enhance the oxygen aging resistance of asphalt, with an optimal dosage of 3%. As the amount of vegetable oil increases, the thermal decomposition characteristics of asphalt gradually deteriorate.

**Key words:** asphalt; vegetable oil; polyethylene (PE); physical indicator; ageing; thermogravimetry

## 0 引言

沥青作为石化工业的副产品, 是一种黏弹性材

料, 目前已被广泛应用于道路建设中。为提升路面沥青的服役质量, 扩大其应用范围, 需对沥青进行改性。常用的改性材料有 SBS、SBR、橡胶粉、聚乙烯 (PE) 等<sup>[1-3]</sup>, 改性沥青的物理性能、抗氧化性能均会得到较大提升, 可有效延长沥青路面的使用寿命。

PE 作为一种热塑性高聚物改性材料, 可通过废旧塑料等制备得到, 具有较好的经济与环保价值。

作者简介: 杜 勇 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路、桥梁与隧道工程施工。

收稿日期: 2023-07-28

研究表明, PE 可有效提升沥青的高温稳定性、流变性以及抗老化特性<sup>[2,4-5]</sup>, 也可较好改善其高温稳定性、水稳定性等综合性能<sup>[6]</sup>。但同较多高聚物改性沥青一样, PE 改性沥青存在黏度高, 储存稳定性差, 并会导致低温抗裂等弊端<sup>[3]</sup>。目前, 废弃食用植物油逐渐被用于沥青改性中, 被认为与再生剂具有相似的作用机理, 可有效改善沥青的温度敏感性, 提升沥青的抗开裂性能。如汪海年等<sup>[7]</sup>综述分析表明, 生物油可以有效恢复老化沥青各项性能, 具有较好的应用前景; Sonibare 等<sup>[8]</sup>从分子层面探究了植物油对沥青的改性机理; Cao 等<sup>[9-11]</sup>系统探究了含植物油再生剂的再生沥青混合料的老化行为, 结果表明老化并没有显著增加含植物油再生剂的弹性模量。植物油的相关研究表明, 其在改善老化沥青性能、调节沥青组分及黏度等特性方面具有较好的效果。

综上分析, 现有研究对 PE 与植物油单独在沥青中的改性进行了较多研究。但对综合利用 PE 与植物油各自性能优势, 进而对沥青进行综合改性的研究较少。基于此, 拟采用针入度、延度、软化点、布氏旋转黏度与针入度指数试验系统评价 PE 复合改性沥青的物理性能, 采用短期老化试验、热重分析试验对复合改性沥青性能进行综合评价, 期望为 PE 植物油复合改性沥青应用提供参考。

## 1 原材料与方法

### 1.1 原材料

沥青为 70# A 级石油沥青, 技术指标见表 1。PE 为低密度聚乙烯 (LDPE), 平均粒径为 0.80 mm, 密度为 0.925 g/cm<sup>3</sup>, 190 °C 的熔体流动指数 (MFI) 为 1.70 g/10 min。植物油为普通食用大豆油。

表 1 基质沥青性能  
Table 1 Performance of base asphalt

测试指标	规范要求	测试值
针入度/(0.01 mm)	60~80	66
延度(25 °C)/cm	≥100	>100
软化点/°C	≥46	49.0
闪点/°C	278	≥260
溶解度/%	99.8	≥299.5

### 1.2 湿法改性沥青制备

采用湿法工艺制备植物油 PE 改性沥青, 制备过程如下:

将 70# 基质沥青加热并搅拌至融化, 采用高剪切剪切机 (弗鲁克) 在 130~135 °C 温度范围内以 5 000 r/min 的转速搅拌 20 min; 少量多次加入基质沥青质量 5% 的 PE 粉末, 并在 170 °C 条件下以 5 000 r/min 的转速剪切 20 min; 按基质沥青质量百分比分别加入固定量的植物油, 并在 160~170 °C 温度范围以 5 000 r/min 的转速搅拌 15 min。将沥青、PE 和植物油按设计比例混合得到 6 种沥青试样, 各试样组成比例及简称见表 2。

表 2 各沥青试样组成比例及简称  
Table 2 Composition ratio of each asphalt sample and its abbreviation

样品	基质沥青	P5	P5O1	P5O3	P5O5	P5O7
LDPE		5	5	5	5	5
植物油		0	1	3	5	7

### 1.3 测试方法

除热重分析 (TGA) 外, 所有试验每个样品均采用 3 次平行试验。各试验方法介绍如下:

#### 1.3.1 常规物理指标测试

依据 JTG E20—2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》<sup>[12]</sup> 分别进行针入度、延度、软化点、布氏旋转黏度、针入度指数试验, 其中针入度、延度、软化点及布氏旋转黏度试验分别参照 T 0604—2011、T 0605—2011、T 0606—2011、T 0625—2011 执行。为了评价改性后沥青试样的温度敏感性, 采用公式<sup>[13]</sup> 计算得到修正方法的针入度指数 (PI)。其中 Pen 为沥青在 25 °C 下针入度, SP 为沥青软化点。

$$PI = \frac{1952 - 500 \lg Pen_{25} - 20SP}{50 \lg Pen_{25} - SP - 120} \quad (1)$$

#### 1.3.2 老化试验

参照 T 0610—2011 进行沥青旋转薄膜加热试验 (RTFOT), 模拟沥青短期老化。试验温度为 163 °C, 测试时间为 16 h。老化试验前后分别进行沥青的质量、黏度、延度测试, 分别得到老化后沥青试样的质量损失率、黏度指数 (老化前后黏度比, 黏度老化指数 VAI)、延度老化率 (DAR)。

#### 1.3.3 热重分析

为掌握改性沥青热分解特性, 采用综合热分析仪进行沥青热重分析试验。测试气体为氮气, 升温速率为 10 °C/min, 测试温度范围为室温~600 °C。

# 材料科学

## 2 结果与讨论

### 2.1 常规物理指标

#### 2.1.1 针入度

植物油对 PE 改性沥青针入度值的影响如图 1 所示。掺入 PE 降低了基质沥青的针入度。当 PE 含量为 5% 时, 与未改性的沥青相比, 针入度降低了近 37%。表明 PE 改性沥青具有更大的刚度, 推测对应沥青路面对交通荷载具有更强的抵抗力。这与文献 [2] 研究结果一致, 即针入度值与沥青的硬度成反比, PE 的加入导致沥青硬度增加, 使混合料具有更强的抗开裂性, 特别是在炎热气候地区。

随着植物油掺量从 1% 增加到 7%, PE 改性沥青的针入度快速增加。添加 1%、3%、5% 和 7% 植物油后, PE 改性沥青的针入度率分别提高了 17%、51%、90% 和 127%。文献 [14] 研究表明, 高针入度值会导致硬度降低, 从而生产出具有较好低温抗裂性能的沥青, 上述变化与植物油具有较好的流动特性有关。但在较高的温度下, 含高掺量植物油的永久抗变形性能将变差, 无法承受高温荷载。因此, 选择合适的植物油掺量是优化复合改性沥青高温性能的关键。

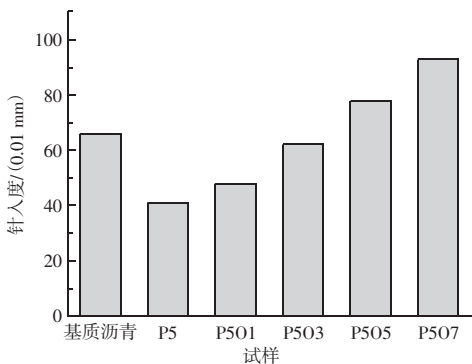


图 1 针入度试验结果  
Fig. 1 Penetration test results

#### 2.1.2 延度

采用延度试验对沥青的抗裂性能进行表征, 结果如图 2 所示。掺入 PE 后, 改性沥青延度显著降低, 加入植物油后延度性能有所提升。掺入 5% 的 PE 后, 改性沥青延度急剧降低, 降幅达到 82%, 这与文献 [2] 测试结果一致。掺入 1%~7% 植物油后, 延度增加到 24~31 cm, 且在植物油掺入大于 3% 后延

度呈现微小的降低趋势。与基质沥青相比, PE 改性沥青变脆变硬, 可能存在潜在的低温开裂风险。

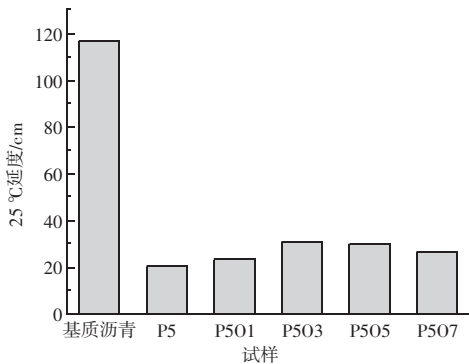


图 2 25 °C 延度试验结果  
Fig. 2 25 °C ductility test results

#### 2.1.3 软化点

一般而言, 软化点越高, 沥青在高温下越稳定<sup>[14-15]</sup>。由图 3 可知, 与未改性的沥青相比, PE 改性沥青软化点提高了 15.6 °C, 表明其抗蠕变性能有所提高。与基质沥青相比, PE 在高温下的高强特性是改性沥青软化点提升的内在原因。植物油的加入使 PE 改性沥青的软化点不断降低, 表明植物油对改性沥青高温性能有一定影响。这是由于植物油可降低沥青中高分子质量的沥青质、增加低分子量的芳香芬类物质, 对沥青起到软化作用。其中, 当植物油掺量超过 3% 后, 软化点降幅逐渐增大, 表明高掺量植物油对沥青高温性能影响增大。当植物油掺量为 7% 时, 沥青软化点甚至低于基质沥青。

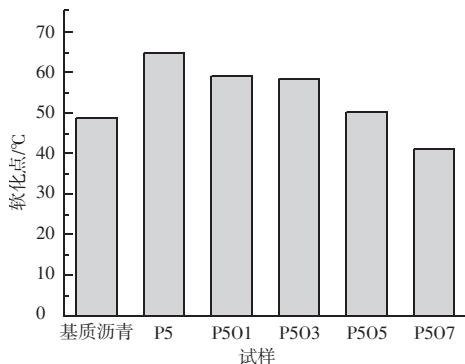


图 3 软化点试验结果  
Fig. 3 Softening point test results

#### 2.1.4 黏度

图 4 为各试样在 175 °C 条件下布氏黏度试验结果。

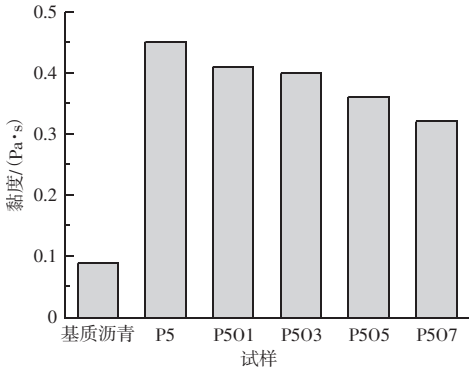


图4 黏度试验结果  
Fig. 4 Viscosity test results

掺入PE后沥青黏度显著提升,而植物油可降低沥青黏度,且掺量越大降幅越显著。掺入PE后,5%掺量PE改性沥青黏度为基质沥青的5倍。温度在160℃以上(此次试验为175℃),PE处于熔融状态,可吸收部分轻质沥青,并释放出自身低分子量的组分至沥青中,这将增加改性沥青的黏度。结果表明,PE可以提高基质沥青黏度,降低其在高温下的流动性,从而提高抗车辙性能。

但过高的黏度一方面会导致沥青混合料刚性过大,抗永久变形能力降低。另外高黏度也会要求过高的拌合、摊铺及碾压等作业温度,导致能源消耗增大,建设过程碳排放量增加。掺入植物油可一定程度降低PE改性沥青的高温黏度,1%~7%掺量植物油可降低PE改性沥青黏度8.9%~28.9%。降低黏度可改善沥青的施工和易性、降低施工作业温度、降低碳排放。同时,相对较低的作业温度也可降低PE改性沥青路面的施工容错率,保障沥青路面施工质量。

### 2.1.5 针入度指数

由图5可知,基质沥青的PI值为-1.8,表明其

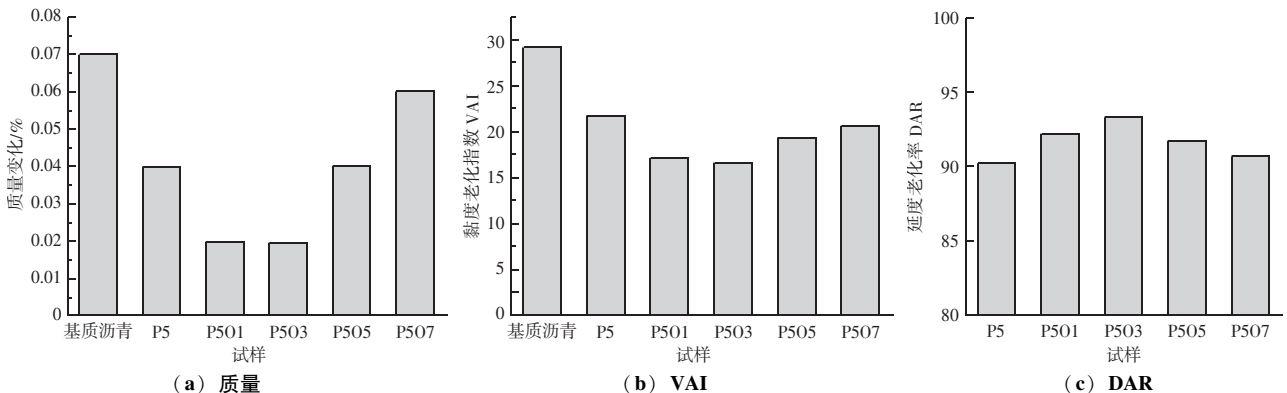


图6 老化后各试样指标变化  
Fig. 6 The indexes change of each sample after ageing

受温度变化的影响较大。采用5%的PE改性后,PI值增加,其PI绝对值减小,表明PE改性沥青对温度的敏感性降低。掺入植物油后,改性沥青PI值显著降低,且掺量越大降幅越显著。当植物油掺量为1%与3%时,PI值绝对值与单一PE改性沥青相差不大;但当植物油掺量继续增加至5%时,PI值降低明显;7%时PI值达到-3.5,已不符合PI值在-2~2的建议范围。

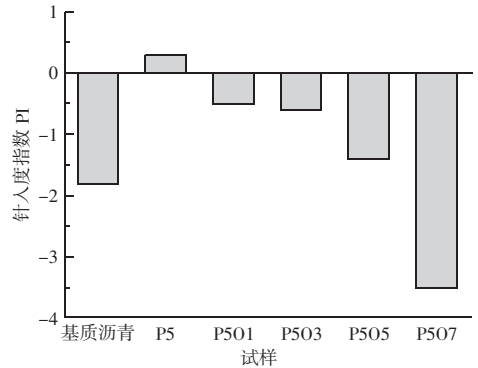


图5 针入度指数 (PI) 试验结果  
Fig. 5 Penetration index (PI) test results of each sample

### 2.2 热氧化老化影响

各沥青试样经RTFOT老化后,质量、黏度老化指数(VAI)及延度老化率(DAR)变化如图6所示。老化后质量变化与黏度变化呈现相似的变化趋势。掺入PE后,沥青老化后质量损失率减小、黏度变化率降低,表明PE加入后提升了沥青的热氧老化稳定性。这是由于PE相较沥青具有更优的高温稳定性,与沥青混溶后的交联作用提升了沥青的抗老化性能。因此,虽然PE改性沥青黏度值较大,但其受热氧老化的影响程度较小,沥青具有更高的稳定性。

## 材料科学

掺入植物油后,老化后质量变化率、VAI 及 DAR 变化趋势存在一致性,存在最佳掺量区间。即当植物油掺量在 1%、3% 时,老化后质量损失与黏度变化降低,延度老化率提升,表明植物油增强了 PE 改性沥青的抗热氧化稳定性;当植物油掺量在 5%~7% 时,变化规律相反,表明沥青抗热氧化稳定性减弱。

### 2.3 热重分析

热重分析试验结果如图 7 所示,各曲线特征值汇总见表 3。

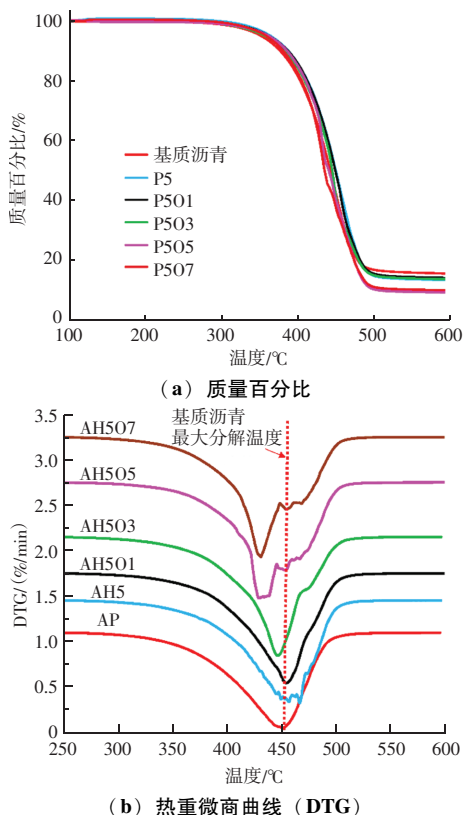


图 7 各沥青试样热重分析曲线

Fig. 7 Thermogravimetric analysis curve of each asphalt sample

表 3 热重分析曲线特征值结果

Table 3 Characteristic value results of thermogravimetric analysis curve

试样	分解温度/°C			残余质量/%
	初始	最大	最终	
基质沥青	303	449	510	15.25
P5	324	464	521	13.10
P5O1	318	454	510	12.97
P5O3	314	456	514	13.34
P5O5	311	432	512	8.30
P5O7	306	428	514	8.27

(1) 所有试样 TG 曲线较为相近,表明各试样存在相似的热分解规律;就 DTG 曲线而言,PE 改性沥

青呈现两个明显的分解峰(或分解台阶),而基质沥青只有一个。

(2) 通过 TG 曲线分析得到,基质沥青的初始降解温度为 303 °C,剩余质量为 15.25%。加入 PE 后沥青的初始降解温度从 303 °C 提高至 324 °C。随着植物油掺量增加,改性沥青的初始降解温度下降。该现象表明,植物油的热稳定性低,对改性沥青的热稳定性存在一定不利影响。但所有植物油 PE 复合改性沥青试样初始分解温度仍较基质沥青高。

(3) 由 DTG 曲线分析可知,加入 PE 后,沥青最大分解温度增大,但在 PE 改性沥青中加入植物油,改性沥青的最大降解温度呈现逐渐降低趋势(图 7 (b)),这与各试样初始分解温度存在相似变化规律。这是由于 PE 改性沥青的分子量较沥青高,高温稳定性好,因此延缓了沥青的分解。而植物油分子量小,自身分解温度低,因此降低了 PE 改性沥青最大分解温度。

## 3 结论

通过对不同植物油掺量下 PE 改性沥青常规物理性能、老化特性以及热分解行为进行综合分析,得到如下结论:

(1) PE 可降低基质沥青的针入度与延度、提升软化点与黏度,加入植物油后,随着植物油掺量增大,PE 植物油复合改性沥青针入度与延度逐渐提升、软化点与黏度呈现降低趋势。同时,PE 可显著改善基质沥青的温度敏感性,但加入植物油后温度敏感性出现劣化,当掺量达到 7% 时甚至较基质沥青差。

(2) 掺入 PE 后,沥青抗热氧化特性得到改善。但随着植物油掺量增大,沥青质量损失、黏度及延度变化存在先改善后劣化的变化规律,推荐 PE 植物油复合改性沥青中植物油掺量为 3%。

(3) PE 可以改善沥青的热分解特性,但植物油对沥青热分解存在一定不利影响,且掺量越大影响越显著。

研究系统评估了 PE 植物油复配改性沥青的综合性能,但该复配沥青距离实际运用仍存在较多技术问题需要解决。后续研究可对 PE 植物油复配改性沥青长期性能、储存稳定性、流变性能以及混合料路用性能进行全面评估。

## 参 考 文 献

- [1] RIEKSTINS A, BAUMANIS J, BARBARS J. Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123459.
- [2] KAKAR M R, MIKHAILENKO P, PIAO Z, et al. Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122492.
- [3] 汪海年, 郑文华, 尤占平, 等. 聚合物改性剂和石油沥青相容性评价方法研究进展 [J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23 (1): 8-26.
- [4] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞. PE 对沥青及沥青混合料性能影响研究 [J]. *公路工程*, 2016, 41 (1): 28-32.
- [5] 史绍松, 李传强, 凌天清, 等. 不同熔点的废旧 PE 裂解蜡温拌沥青性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2022, 50 (10): 275-280.
- [6] 吴正光, 王彤, 程壮, 等. 废旧 PE 改性沥青混合料路用性能试验研究 [J]. *公路*, 2017, 62 (11): 235-238.
- [7] 汪海年, 徐宁, 陈玉, 等. 生物油再生老化沥青材料研究进展 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36 (5): 1-20.
- [8] SONIBARE K, RUCKER G, ZHANG L Q. Molecular dynamics simulation on vegetable oil modified model asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121687.
- [9] CAO X X, CAO X J, TANG B M, et al. Investigation on possibility of waste vegetable oil rejuvenating aged asphalt [J]. *Applied Sciences*, 2018, 5: 765.
- [10] SUO Z, YAN Q, JI J, et al. The aging behavior of reclaimed asphalt mixture with vegetable oil rejuvenators [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123811.
- [11] SUO Z, CHEN H, YAN Q, et al. Laboratory performance evaluation on the recovering of aged bitumen with vegetable oil rejuvenator [J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [13] MA Q, GUO Z, GUO P, et al. Research on the viscosity-temperature properties and thermal stability of stabilized rubber powder modified asphalt [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (24): 13536: 1-14.
- [14] YANG T, CHEN M, ZHOU X, et al. Evaluation of thermal-mechanical properties of bio-oil regenerated aged asphalt [J]. *Materials*, 2018, 11 (11): 2224.
- [15] 冯新军, 杨洪阳, 肖洪海, 等. 基于 SBS 结构修复的再生沥青性能及机理研究 [J]. *中外公路*, 2024, 44 (4): 56-63.

## (上接第 12 页)

- without transverse reinforcement based on refined experimental measurements [J]. *Structural concrete*, 2017, 19 (1): 49-64.
- [10] HUBER P, HUBER T, KOLLEGER J. Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics [J]. *Engineering Structures*, 2016, 113: 41-58.
- [11] 肖建庄, 孙畅, 谢贺. 再生混凝土骨料咬合及剪力传递机理 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2014, 42 (1): 13-18.
- [12] PETERS W H, RANSON W F. Digital Imaging Techniques in Experiment Stress Analysis [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21 (3): 427-431.
- [13] BELBACHIR A, ALAM S Y, MATALLAH M, et al. Size effect on the contribution of the aggregate interlock mechanism in reinforced concrete beams without shear reinforcement [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, 24 (9/10): 1363-1380.
- [14] 任会兰, 杜一宁, 宋水舟. 基于 DIC 方法研究混凝土劈裂的变形和破坏 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36 (4): 91-100.
- [15] 刘琼, 肖建庄, 潘智生, 等. 废混凝土骨料和废砖骨料再生混凝土的模型化研究 [J]. *建筑结构学报*, 2020, 41 (12): 133-140.

## (上接第 17 页)

- with carbonated modeled recycled concrete aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 136: 106175.
- [5] 王娟, 李秀领, 郭强. 不同粗骨料取代率下粉煤灰再生混凝土的力学性能研究 [J]. *混凝土*, 2024 (6): 105-109.
- [6] 张玉栋, 张佳帅, 贾吉龙, 等. 粗骨料全替代再生混凝土的孔结构与力学性能分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (8): 3005-3016, 3033.
- [7] SONG X B, LI C Z, CHEN D D, et al. Interfacial mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced by nano-materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2021 (270): 121446.
- [8] YU L Z, WU R X. Using graphene oxide to improve the properties of ultra-high-performance concrete with fine recycled aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2020 (259): 120657.
- [9] LI W G, LONG C, TAM V W Y, et al. Effects of nano-particles on failure process and microstructural properties of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 42-50.
- [10] 程子扬, 陈国夫, 屠艳平. 纳米 CaCO<sub>3</sub> 对粉煤灰再生骨料混凝土性能及微结构的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26 (3): 228-235.
- [11] 张正亚, 邢振贤, 龙晋豫. 建筑垃圾再生骨料混凝土配合比试验研究 [J]. *江西建材*, 2017 (24): 2, 4.