

氧化铝微胶囊/聚丙烯纤维复合沥青的性能研究

张康乐¹, 李栓^{1,2*}, 李正飞¹, 杨键鑫¹, 赵龙¹

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 采用针入度、延度、软化点、黏度测试以及动态剪切流变仪试验, 明确氧化铝微胶囊和聚丙烯纤维在沥青中的最佳掺量和性能, 对基本性能指标、愈合性能、环境愈合检测、温度敏感性、应力敏感性和疲劳性能进行分析。结果表明: 随着两种材料掺量的增加, 复合改性沥青针入度和延度降低, 软化点与黏度上升; 最佳配方为 0.1% 聚丙烯纤维和 0.3% 氧化铝微胶囊的复合沥青。该复合沥青损伤速率低, 愈合指数高, 愈合指数在水环境中稳定, 随愈合时间增加而增大, 受疲劳加载次数影响呈线性下降趋势; 剪切模量随温度升高而减小, 相位角随温度升高而增大, 温度敏感性低; 蠕变恢复率和不可恢复蠕变柔量表现优异, 应力恢复敏感性与应力不恢复敏感性适宜; 疲劳因子最小, 剪切模量和疲劳因子随频率增大而增大, 疲劳性能良好, 综合性能突出。

关键词: 最佳掺量; 愈合性能; 温度敏感性; 应力敏感性; 疲劳性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0091-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.017

Study on Properties of Alumina Microcapsules/Polypropylene Fiber Composite Asphalt

ZHANG Kangle¹, LI Shuan^{1,2*}, LI Zhengfei¹, YANG Jianxin¹, ZHAO Long¹

(1. College of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Key Laboratory of Building Energy-Saving Materials and Engineering Safety, Qinghai Provincial, Xining 810016, China)

Abstract: The optimum dosage and performance of alumina microcapsules and polypropylene fibers in asphalt were determined through penetration, ductility, softening point, viscosity tests, and dynamic shear rheometer (DSR) experiments. The basic performance indicators, healing performance, environmental healing detection, temperature sensitivity, stress sensitivity and fatigue performance were analyzed. The results showed that with the increase of both materials' dosage, the penetration and ductility of the composite modified asphalt decreased, while the softening point and viscosity increased. The optimal formulation was the composite asphalt containing 0.1% polypropylene fiber and 0.3% alumina microcapsule. The composite asphalt exhibited low damage rate and high healing index. The healing index remained stable in water environment, increased with healing time extension, and showed a linear decreasing trend with the increase of fatigue loading cycles. The shear modulus decreased with increasing temperature, while the phase angle increased with increasing temperature, indicating low temperature sensitivity. The creep recovery rate and non-recoverable creep compliance performed excellently, and the stress recovery sensitivity and stress non-recovery sensitivity were appropriate. The fatigue factor was minimal, and both shear modulus and fatigue factor increased with increasing frequency, demonstrating good fatigue performance and outstanding comprehensive properties.

Keywords: Optimal dosage; Healing properties; Temperature sensitivity; Stress sensitivity; Fatigue properties

在道路工程中, 沥青作为核心筑路材料, 其性能对路面使用寿命与行车安全具有决定性影响^[1]。交通流量持续

收稿日期 Submitted date 2025-03-21; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-23

基金项目: 青海省科技厅项目(2023-ZJ-776)

*联系人, lishuanls@163.com

引用本文: 张康乐, 李栓, 李正飞, 等. 氧化铝微胶囊/聚丙烯纤维复合沥青的性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 91-97.

Citation: ZHANG K L, LI S, LI Z F, et al. Study on properties of alumina microcapsules/polypropylene fiber composite asphalt[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 91-97.

增长,传统沥青的性能短板日益凸显:高温下易出现裂缝、流淌,导致车辙、拥包等病害,严重影响路面平整度与行车安全^[2-4];低温下脆性增大,致使路面开裂频发,显著降低道路耐久性与设计使用年限^[5]。

近年来,基于沥青的自愈合特性^[6],纤维改性与微胶囊改性成为研究热点。聚丙烯纤维^[7-10]凭借优异的力学性能,可增强沥青的韧性及抗裂性,提升其抵抗外力的能力。该纤维高温稳定性好,韧性足,在拌和过程中不易折断,与沥青亲和性佳,能均匀分散于沥青中。氧化铝微胶囊^[11-15]则能释放愈合功能物质,在路面出现微裂缝时促使沥青分子重排与结合,实现裂缝自愈合,延缓病害发展^[16-19]。

GARCIA等^[20]制备以环氧树脂和水泥为囊壁、包裹再生剂的微胶囊,显著改善沥青的自愈合性能,可快速修复微裂缝。SUN等^[21]以三聚氰胺甲醛树脂为壳材,采用原位聚合法制备微胶囊,发现其热稳定性满足实际使用要求。测试结果表明,破碎后55%的愈合剂在10 s内即可释放,验证其提升沥青愈合行为的能力。该研究还测试了微胶囊/沥青复合材料的疲劳寿命恢复,发现添加微胶囊后沥青疲劳寿命显著延长,部分可提升约20%。MICAELLO等^[22]系统研究含葵花籽油的微胶囊及其沥青复合物的力学性能,指出胶囊粒径应根据沥青混合料自愈合所需油量确定。SHEN等^[23]基于耗散能理论研究沥青的自愈合行为,提出愈合形式主要包括界面黏结性愈合与自身凝聚愈合。

将氧化铝微胶囊与聚丙烯纤维复合,用于沥青改性,可实现性能优势互补^[24-27],为突破沥青性能局限开辟新途径^[28-29]。该策略不仅能充分发挥纤维的增强增韧作用,还可实现微裂缝自修复,从而减少道路养护频率。本研究聚焦氧化铝微胶囊-聚丙烯纤维复合改性沥青,系统探究其性能,旨在为道路工程提供性能更优、适用性更强的沥青材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

十二烷基硫酸钠(SDS)、脲(尿素)、纳米氧化铝、间苯二酚、氯化钠、氯化铵、三聚氰胺、柠檬酸、甲醛(37.0%~40.0%)水溶液、石油醚(30~60 °C沸程),分析纯,国药集团化学试剂有限公司;菜籽油,分析纯,青海通达油脂加工有限责任公司;基质沥青,90#,青海万道石化有限公司;聚丙烯纤维,3 mm,济南泰驰工程材料有限公司。

1.2 仪器与设备

高速剪切机,P300,冀群(江苏)仪器有限公司;针入度试验仪,SYD-2801G,上海昌吉地质仪器有限公司;延度试验仪,SYD-4508G,上海昌吉地质仪器有限公司;软化点试验仪,SYD-2806H,上海昌吉地质仪器有限公司;旋转黏度计,NDJ-5S,上海精密仪器仪表有限公司;动态剪切流变试验仪(DSR),DHR2,美国TA公司。

1.3 样品制备

1.3.1 氧化铝微胶囊样品制备

(1)再生剂乳化:在烧杯中准确量280 g去离子水,向其中加入SDS乳化剂4.48 g,配制质量分数为1.6%的乳化剂水溶液。随后精确添加70 g菜籽油。将混合液置于高速剪切机中,以3 000 r/min的剪切速率持续乳化40 min。最终制得菜籽油乳状液。

(2)预聚体制备:往烧杯中依次加入5.23 g纳米氧化铝、6.40 g三聚氰胺、1.60 g尿素、5.00 g氯化钠、0.25 g氯化铵、0.25 g间苯二酚和100.00 g去离子水。将烧杯放入水浴中,使用恒温磁力搅拌器对混合溶液进行搅拌。以1.5 °C/min的升温速率将水浴温度从15 °C逐步提升至45 °C,同时保持650 r/min的转速,持续电磁搅拌35 min,直至获得透明澄清的预聚体溶液。然后向预聚体溶液中逐滴加入质量分数为10%的柠檬酸标准溶液,缓慢调节体系pH值至5.8。

(3)微胶囊合成:将制备好的预聚体溶液缓慢转移至装有菜籽油乳状液的烧杯中,在室温环境下,使用磁力搅拌器以650 r/min的速率搅拌35 min。接着向溶液中逐滴加入17.328 g甲醛水溶液。再次进行水浴加热与磁力搅拌操作,以1.5 °C/min的速率将水浴温度从室温逐渐升至55 °C,并保持950 r/min的转速,持续搅拌分散3 h,反应结束后,得到微胶囊悬浮液。

(4)微胶囊洗涤:将微胶囊悬浮液转移至离心管中,使用台式高速离心机,以1 000 r/min的转速离心2 min。收集离心管上部漂浮的微胶囊,先后用去离子水和石油醚反复洗涤2~3次,有效去除漂浮液中未被包裹的芯材。

(5)微胶囊干燥:将洗涤后的微胶囊放入电热恒温鼓风烘箱,将温度设定在60~70 °C,干燥1 h,最终制得氧化铝微胶囊粉末。

图1为氧化铝微胶囊制备流程。



图1 氧化铝微胶囊制备流程

Fig.1 Preparation process of alumina microcapsules

1.3.2 氧化铝微胶囊/聚丙烯纤维复合沥青制备

把90#基质沥青放入烘箱,调温至165 °C,加热至沥青达到试验所需流动性。精准称取氧化铝微胶囊(掺量为基

质沥青质量的0、0.3%、0.5%、0.7%)与聚丙烯纤维(掺量为基质沥青的0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%)的用量。将加热后的沥青与称取的添加剂一同加入强力电动搅拌机,搅拌10 min达到初步混匀,之后转至剪切机,以4 500 r/min转速剪切60 min,最后把改性沥青移至烘箱融胀120 min。

1.4 性能测试与表征

1.4.1 基本性能试验

对复合沥青进行25 °C针入度、5 °C软化点、10 °C延度及135 °C黏度试验。

1.4.2 愈合性能试验

(1)仪器设置:使用动态剪切流变试验仪,设置温度35 °C、应力48 000 Pa、频率10 Hz,时间扫描模式每30 s采集一次数据。

(2)两阶段疲劳加载:第一次加载至样本剪切模量降为初始值50%,暂停30 min愈合修复,第二次加载至剪切模量降至初始值50%时结束试验。

(3)数据处理:计算愈合指数来评估愈合性能。取首次加载300 s的数据,计算损伤速率来评估沥青随时间变化的抗剪切性能。愈合指数(I_H)和损伤速率(D)的计算公式为:

$$I_H = \frac{G_2 - G_1}{G_0 - G_1} \times \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

$$D = \frac{G_0 - G_3}{300} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中: I_H 为愈合指数; G_0 为初始剪切模量,Pa; G_1 为50% G_0 ,Pa; G_2 为愈合30 min后的剪切模量,Pa; N_1 、 N_2 分别为一二阶段的加载次数; D 为损伤速率,Pa/s; G_3 为300 s的剪切模量,Pa。

1.4.3 环境愈合检测

(1)在氧化铝微胶囊/聚丙烯纤维复合沥青中选择损伤速率低和愈合指数高的沥青种类。

(2)水环境的影响:把制备好的DSR试件放入35 °C恒温水槽中,水浴30、60、90 min,检测水环境对最佳沥青愈合性能的影响。

(3)愈合时间的影响:设置疲劳加载间歇时间参数为10、30、50 min,检测愈合时间对最佳沥青愈合性能的影响。

(4)疲劳次数的影响:设置疲劳次数参数为1、2、3次,检测疲劳次数对最佳沥青愈合性能的影响。

1.4.4 温度敏感性试验

采用温度扫描,试验温度区间设定为46~82 °C,试验间隔6 °C,频率10 Hz,应变12%,采集剪切模量和相位角数据,计算等效黏度,进而评估温度敏感性,计算公式为:

$$\eta' = \frac{(\sin \delta) - 4.8628|G^*|}{\omega} \quad (3)$$

式(3)中: η' 为等效黏度,Pa; G^* 为剪切模量,kPa; ω 为角频率,rad/s; δ 为相位角,(°)。

1.4.5 应力敏感性试验

采用多重应力蠕变扫描,试验温度60 °C,应力分别为0.1、3.2 kPa,每次加载持续1 s,随后卸载9 s,如此循环重复10个周期,采集应变数据,计算蠕变恢复率、不可恢复蠕变柔量、应力恢复敏感性和应力不恢复敏感性,计算公式为:

$$R = \frac{\gamma_r}{\gamma_p - \gamma_0} \quad (4)$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_r - \gamma_0}{\tau} \quad (5)$$

$$R_{diff} = \frac{R_{(0.1)} - R_{(3.2)}}{R_{(0.1)}} \quad (6)$$

$$J_{nr diff} = \frac{J_{nr(3.2)} - J_{nr(0.1)}}{J_{nr(0.1)}} \quad (7)$$

式(4)~式(7)中: R 为蠕变恢复率; J_{nr} 为不可恢复蠕变柔量; γ_r 为不可恢复应变,%; γ_p 为应变峰值,%; γ_0 为初始应变,%; τ 为加载应力,kPa; R_{diff} 和 $J_{nr diff}$ 为应力恢复敏感性和应力不恢复敏感性指标; $R_{(0.1)}$ 和 $R_{(3.2)}$ 为0.1 kPa和3.2 kPa下 R 的平均值; $J_{nr(3.2)}$ 和 $J_{nr(0.1)}$ 为0.1 kPa和3.2 kPa下的 J_{nr} 的平均值。

1.4.6 疲劳性能试验

采用频率扫描,试验温度35 °C,频率区间设定0.1~100 Hz,应变1.25%,采集 G^* 和 δ 数据,计算疲劳因子(F),进而评估沥青疲劳性能。计算公式为:

$$F = G^* \sin \delta \quad (8)$$

2 结果与讨论

2.1 氧化铝微胶囊样品

采用缩聚反应,根据氧化铝微胶囊制备流程制作氧化铝微胶囊。图2为氧化铝微胶囊荧光显微镜和成品照片。表1为氧化铝微胶囊制备参数。

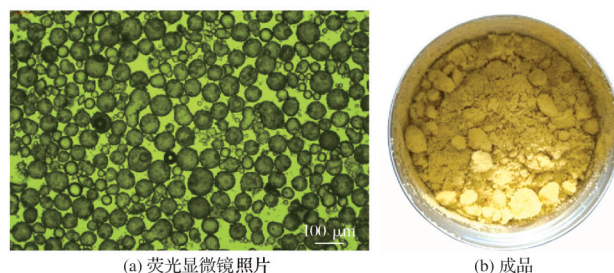


图2 氧化铝微胶囊荧光显微镜和成品照片

Fig.2 Fluorescence microscopy and finished product images of alumina microcapsules

表1 氧化铝微胶囊制备参数

Tab.1 Preparation parameters of alumina microcapsules

乳化剪切速率/(r·min ⁻¹)	缩聚反应搅拌速率/(r·min ⁻¹)	乳化剂	w _{乳化剂} /%	芯壁比	pH值	缩聚反应温度/°C	w _{氧化铝} /%
3 000	950	SDS	1.6	1.6:1.0	5.8	55	4

2.2 复合沥青的基本性能分析

图3为复合沥青的基本性能。从图3可以看出,随着氧化铝微胶囊或聚丙烯纤维含量的增加,复合沥青针入度和延度呈现降低趋势,软化点与黏度呈上升趋势。原因为氧化铝微胶囊作为刚性颗粒分散在基质沥青中,能填充空隙,密实结构,聚丙烯纤维在沥青里形成加筋结构,增强内聚力与支撑力。温度升高时,它们限制沥青分子热膨胀和移动,降低分子运动自由度,增大沥青阻力。

综上所述,氧化铝微胶囊和聚丙烯纤维对基质沥青敏感,可以根据环境要求需要选择合适的配比设计。

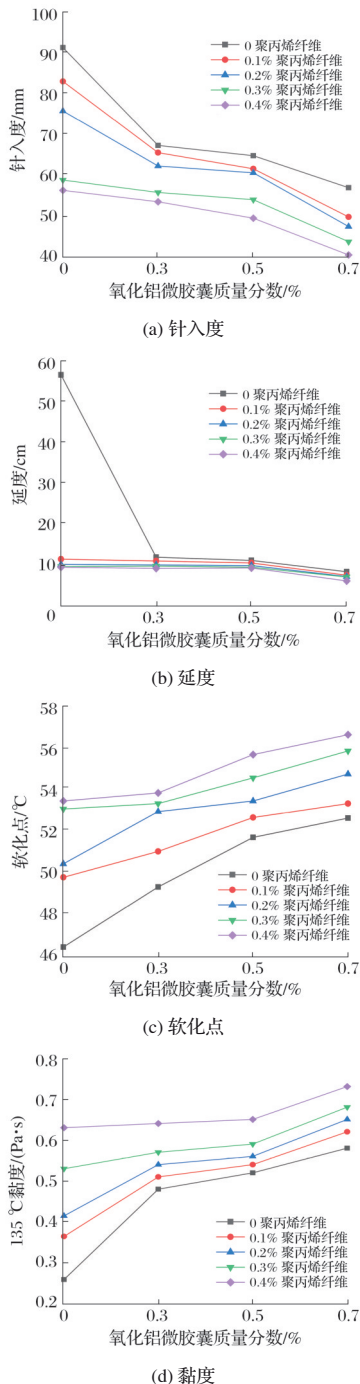


图3 复合沥青的基本性能

Fig.3 Basic properties of composite asphalt

2.3 复合沥青的愈合性能分析

损伤速率是指物体在受到外力作用下,其内部结构和性能随时间损伤的快慢程度。损伤速率越大,材料稳定性和抵抗能力越弱。愈合指数是评价材料在经历损伤后,能够恢复其性能(如力学性能、物理性能等)的程度。

图4为复合沥青的损伤速率和愈合指数。从图4可以看出,当氧化铝微胶囊掺量为0时,随着聚丙烯纤维掺量的增加,沥青的愈合指数微高于基质沥青,损伤速率远远低于基质沥青。这表明聚丙烯纤维极大地降低了沥青的损伤速率,增强了沥青的抗剪切能力,其愈合指数的增大来源于聚丙烯纤维减小的损伤速率。当聚丙烯纤维掺量为0时,随着氧化铝微胶囊的增加,沥青的愈合指数呈现出先上升后下降,损伤速率则为先降低后升高。这表明氧化铝微胶囊增加了沥青愈合指数,没有降低愈合指数。

当氧化铝微胶囊掺量为0.5%时,随着聚丙烯纤维掺量的增加,愈合指数呈现稳定值,损伤速率增大,但其中某些损伤速率低于基质沥青。说明氧化铝微胶囊和聚丙烯纤维共同作用,显示出在愈合能力与抗剪切方面的出色表现。当沥青中聚丙烯纤维掺量为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%时,愈合指数随着微胶囊掺量的增加先升后降,损伤速率先增大后减小。这表明聚丙烯纤维通过自身特性稳定体系结构,减缓损伤速率,微胶囊增大了沥青的愈合性能,二者共同提升沥青材料的耐久性。

最终选择损伤速率低、愈合指数高的4类沥青:0.2%聚丙烯纤维0.5%氧化铝微胶囊、0.3%聚丙烯纤维0.5%氧化铝微胶囊、0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊和0.2%聚丙烯纤维0.7%氧化铝微胶囊沥青,研究其性能。

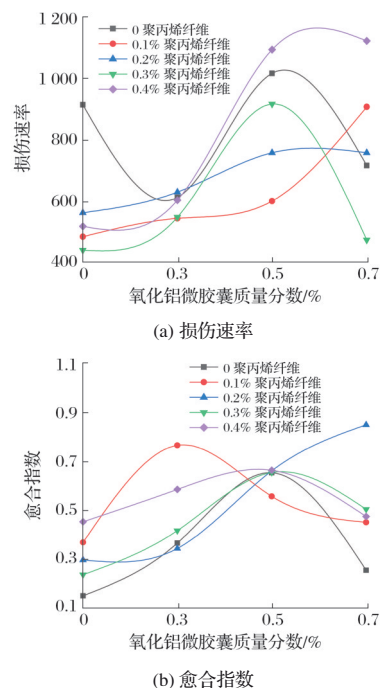


图4 复合沥青的损伤速率和愈合指数

Fig.4 Damage rate and healing index of composite asphalt

2.4 复合沥青的环境愈合性能分析

图5为35℃水浴时间对愈合指数的影响。从图5可以看出,含0.1%聚丙烯纤维与0.3%氧化铝微胶囊的复合沥青愈合指数始终维持稳定,其余几种沥青对水较为敏感,愈合指数随着水浴时间呈现明显的下降趋势。原因是过多的聚丙烯纤维在沥青中难以均匀分散,易相互交织,从而产生孔隙,微胶囊的囊壁具有显著的憎水特性,过量的氧化铝微胶囊会聚集形成局部区域,这些区域在水的长期浸泡与侵蚀下,这些薄弱区域极易出现微裂纹和空隙,进而加速沥青内部结构的破坏。

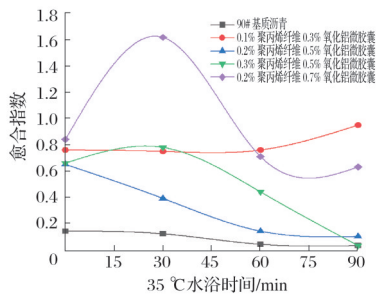


图5 35℃水浴时间对愈合指数的影响

Fig.5 Effect of 35℃ water bath time on healing index

图6为愈合间隔时间对愈合指数的影响。从图6可以看出,基质沥青、0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊和0.3%聚丙烯纤维0.5%氧化铝微胶囊沥青愈合指数随着愈合时间的延长逐渐增大,其他两种复合沥青愈合指数先增大后降低。原因是在愈合过程中,初期由于受到外力冲击或环境因素干扰,氧化铝微胶囊破裂并释放修复剂,迅速填充裂缝,愈合效果显著,物理性能随之得以恢复。但随着时间的持续推移,微胶囊数量逐渐减少,修复剂释放量亦相应降低。当超过特定时间阈值后,微胶囊沥青的愈合能力受限,愈合速率放缓,难以恢复到初始的最佳性能状态。

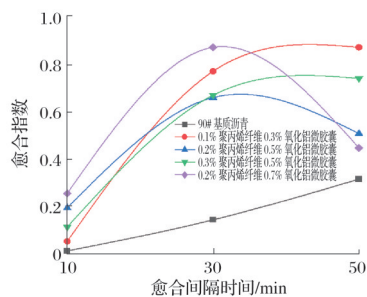


图6 愈合间隔时间对愈合指数的影响

Fig.6 Effect of healing interval time on healing index

图7为疲劳加载次数对愈合指数的影响。从图7可以看出,沥青的愈合指数和疲劳加载次数呈线性相关,线性斜率体现愈合指数下降速率,斜率绝对值越大,下降越快。基质沥青愈合指数随加载次数增加下降缓慢,但愈合指数低,实际应用中沥青结构已损坏,其余4种沥青愈合指数随加载次数增多而降低。原因是多次加载时,沥青内微胶囊

不断破裂释放再生剂,随着加载次数增加,微胶囊因频繁破裂数量减少,当减少到一定程度,用于修复裂缝的再生剂也相应减少,导致沥青愈合能力下降。

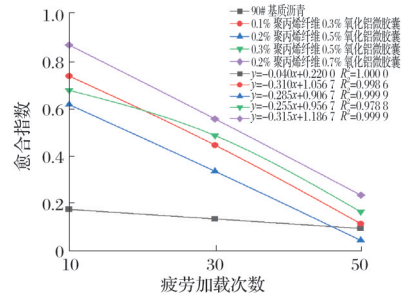


图7 疲劳加载次数对愈合指数的影响

Fig.7 Effect of fatigue loading frequency on healing index

2.5 复合沥青的温度敏感性分析

G^* 表征材料抗剪切变形能力, δ 则反映材料在动态加载时的能量耗散特性。 δ 越大,材料黏性成分越强,能量耗散越多。 η' 将非牛顿流体流动特性等效为牛顿流体黏度,值越高,分子间内摩擦力越大,分子相对运动越困难。图8为复合沥青的 G^* 和 δ 。从图8可以看出,0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊复合沥青优于其余4种沥青,随着温度的升高, G^* 下降, δ 增大。说明 G^* 下降,沥青会更柔软,高温流动性能提升,面对温度变化,能自如变形,避免破裂,提升耐久性。 δ 增大,赋予沥青更强的应力消散能力,能快速分散车辆行驶产生的瞬时压力与剪切力,降低路面疲劳损伤,延长路面使用寿命。

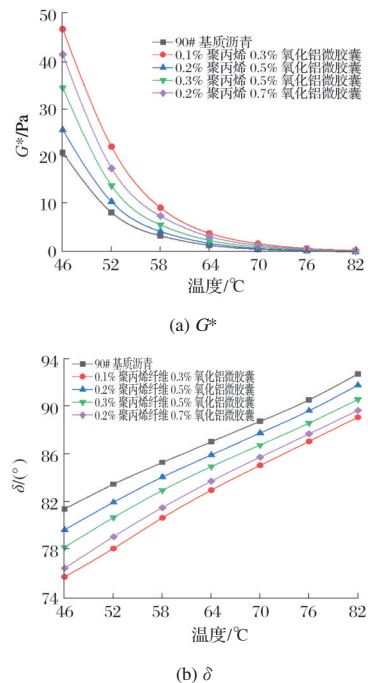


图8 复合沥青的 G^* 和 δ

Fig.8 G^* and δ of composite asphalts

图9为复合沥青的温度敏感性。从图9可以看出,0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊复合沥青的 η' 的线性

拟合关系的斜率绝对值最小,温度敏感性能最小,温度适应性最好。这表明在温度波动环境下,添加0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊的复合沥青展现出更强的温度适应能力。有效降低材料的温度敏感性既能避免沥青在高温时过度软化和低温时过度脆硬,又减缓老化速度,维持沥青良好的使用性能,减少路面因老化导致的性能下降程度。

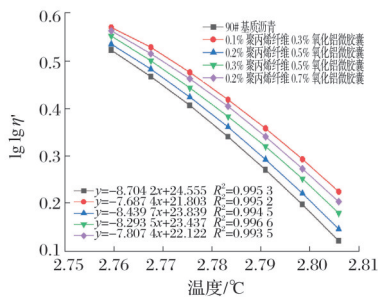


图9 复合沥青的温度敏感性

Fig. 9 Temperature sensitivity of composite asphalts

2.6 复合沥青的应力敏感性分析

蠕变恢复率衡量材料在去除应力后恢复变形的能力。不可恢复蠕变柔量是指外部荷载移除后无法恢复的应变与所施加应力的比值。应力恢复敏感性指材料在受到应力作用后,能够恢复到原状态能力的敏感程度。应力不恢复敏感性是材料对应力作用所产生的永久变形的敏感程度。

图10为复合沥青的蠕变恢复率和不可恢复蠕变柔量。从图10可以看出,相比其余4种沥青,0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊复合沥青具有较大的蠕变恢复率、较小的不可恢复蠕变柔量。这说明其受车辆荷载等外力变形后容易恢复初始状态,能够更高效地传递和分散荷载,有助于维持路面的强度与稳定性,大幅降低路面病害的发生概率。

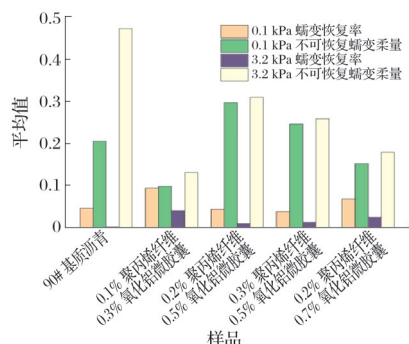


图10 复合沥青的蠕变恢复率和不可恢复蠕变柔量

Fig.10 Strain recovery rate and irrecoverable creep flexibility of composite asphalts

图11为复合沥青的应力恢复敏感性和应力不恢复敏感性。从图11可以看出,0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊复合沥青应力恢复敏感性和应力不恢复敏感性适宜。这说明该复合沥青具有良好的抗变形、耐久性、抗滑性和

低温性能,可实现合理能量耗散。

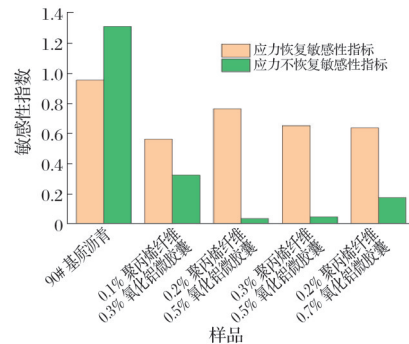
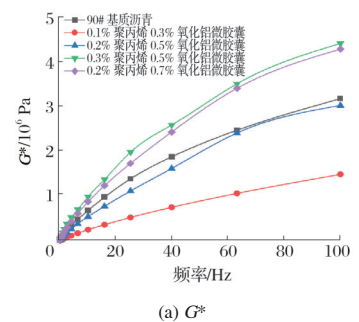


图11 复合沥青的应力恢复敏感性和应力不恢复敏感性
Fig.11 Stress recovery sensitivity and stress non-recovery sensitivity of composite asphalts

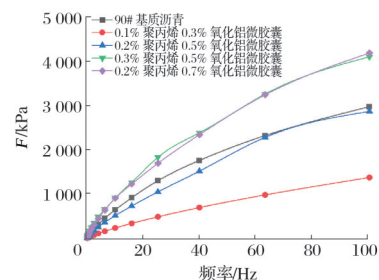
2.7 复合沥青的疲劳性能分析

F 是衡量沥青在重复荷载作用下抵抗疲劳破坏能力的指标。 F 越大,意味着沥青在循环加载过程中消耗的能量越多,材料内部的损伤积累越快,也就越容易发生疲劳破坏。

图12为最复合沥青的 G^* 和 F 。从图12可以看出,随着频率的增加,5种复合沥青的 F 逐渐增大。但相比其余4种沥青,0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊复合沥青在同一频率下 G^* 和 F 最小。这说明其具备良好的疲劳性能,在重复荷载作用下,材料内部的损伤积累较慢,从而更不容易发生疲劳破坏,能够承受更多次数的荷载循环。在长期使用过程中更能够保持良好的性能,减少路面因疲劳开裂等病害的发生,延长道路的使用寿命。



(a) G^*



(b) F

图12 复合沥青的 G^* 和 F

Fig.12 G^* and F of composite asphalts

3 结论

氧化铝微胶囊和聚丙烯纤维材料对基质沥青敏感,针

入度、延度随着氧化铝微胶囊或聚丙烯纤维掺量的增加呈现递降趋势,软化点和黏度呈现递增趋势。氧化铝微胶囊/聚丙烯纤维复合沥青愈合性能优于基质沥青,氧化铝微胶囊增大了沥青的愈合指标,而聚丙烯纤维降低了损伤速率,两者共同作用提高了沥青的耐久性。0.1%聚丙烯纤维0.3%氧化铝微胶囊复合沥青性能最佳。其在水环境影响下呈现稳定趋势,在愈合时间影响下呈现增大趋势,在疲劳加载次数影响下呈现线性下降趋势;其温度剪切模量最大、温度相位角最小、温度敏感性最佳、蠕变恢复率最大、可恢复蠕变柔量最小、应力恢复敏感性适度、应力不恢复敏感性适中、频率疲劳因子和频率剪切模量最小、疲劳性能良好。

参考文献

- [1] 李勇强. 盐-温耦合作用下橡胶沥青性能评价及其在智能道路中的应用潜力[J]. 智能城市, 2025, 11(10): 41-44.
- [2] 叶亚丽, 徐全亮, 宁选杰, 等. 基于非均匀荷载的柔性基层沥青路面纵向开裂分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 35-46.
- [3] 薛爱新, 王洁光, 王海军, 等. 高速公路沥青路面裂缝发展对路面结构性能的影响研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 59-63.
- [4] 刘超. 基于物联网+AI技术的沥青路面施工管控研究[J]. 智能城市, 2024, 10(6): 114-116.
- [5] 崔新壮, 黄丹, 刘磊, 等. 沥青路面病害力学研究进展[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(5): 68-87.
- [6] 徐辰, 何北益, 吴文军, 等. 沥青自愈合性能在不同影响因素下的评价[J]. 中外公路, 2014, 34(2): 274-278.
- [7] 张文才, 郝晓刚, 裴强, 等. 废弃聚乙烯、废弃聚丙烯改性沥青的研究进展[J]. 中国塑料, 2023, 37(6): 91-98.
- [8] AI-HADIDY A I. Engineering behavior of aged polypropylene-modified asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 187-192.
- [9] 李艳艳. 基于DIC硅灰增强聚丙烯纤维混凝土的力学性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [10] WANG S, MALLICK R B, RAHBAR N. Toughening mechanisms in polypropylene fiber-reinforced asphalt mastic at low temperature[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118690.
- [11] XUE B, WANG H, PEI J, et al. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 641-649.
- [12] JIN J Z, MIAO Y Z, ZHAO H W, et al. Study on the self-healing performance of microcapsules and microcapsule-containing asphalt[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12231.
- [13] 刘韧婕. 金属相变微胶囊的制备及其储热特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- [14] WANG X G, GUO G J, ZOU F B, et al. Enhancing self-healing properties of microcrack on aged asphalt incorporating with microcapsules encapsulating rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344: 128123.
- [15] WEN Y, MA F, FU Z, et al. Evaluation of the microcapsules on the rheological and self-healing performance of asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133982.
- [16] RUIZ-RIANCHO N, GARCIA A, GROSSEGER D, et al. Properties of Ca-alginate capsules to maximise asphalt self-healing properties[J]. Construction and Building Materials, 2021, 284: 122728.
- [17] 朱月凤. 自愈型微胶囊在沥青路面中的力学行为及性能需求研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [18] LI J, YANG S, MUHAMMAD Y, et al. Fabrication and application of polyurea formaldehyde-bioasphalt microcapsules as a secondary modifier for the preparation of high self-healing rate SBS modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118452.
- [19] LI J, JI X, FANG X, et al. Self-healing performance and prediction model of microcapsule asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2022, 330: 127085.
- [20] GARCIA A, SCHLANGEN E, VAN DE VEN M, et al. Preparation of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 184(1/2/3): 603-611.
- [21] SUN D, HU J, ZHU X. Size optimization and self-healing evaluation of microcapsules in asphalt binder[J]. Colloid and Polymer Science, 2015, 293(12): 3505-3516.
- [22] MICAEL R, AI-MANSOORI T, GARCIA A. Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 734-744.
- [23] SHEN S, CHIU H M, HUANG H. Characterization of fatigue and healing in asphalt binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(9): 846-852.
- [24] 孙吉书, 郭新茹, 冯德瑜, 等. SBS/SBR/胶粉复合改性沥青与高黏改性沥青性能对比研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 44-50.
- [25] 徐传浩, 石振武, 程有坤, 等. 温拌废塑/SBS复合改性沥青流变性能的研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 70-76.
- [26] LU T, HOFKO B, SUN D, et al. Microscopic and rheologic characterization of third generation self-repairing microcapsule modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132841.
- [27] CHEN S, CAO Y, HE X, et al. Preparation and ageing resistance enhancement of RP/SBS composite asphalt by heterostructure copper oxalate nanoparticles/recycled polypropylene fiber[J]. Construction and Building Materials, 2025, 473: 140992.
- [28] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究报告·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [29] 董鹏军. 多场耦合作用下沥青路面力学响应与破坏机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2025.