

纳米黏土与尼龙纤维复合改性沥青混合料力学性能研究

申正¹, 刘杰²

(1. 长沙市雨花区城市人居环境局, 湖南 长沙 410000; 2. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 将不同掺量的纳米黏土和尼龙纤维加入到沥青混合料中进行复合改性, 通过马歇尔试验、弹性模量试验、动态蠕变试验、疲劳试验等进行力学性能对比与验证, 以期提高沥青混合料综合力学性能。试验结果表明, 0.4% 尼龙纤维+6% 纳米黏土复合改性沥青混合料的马歇尔稳定度、弹性模量和疲劳寿命相比于尼龙纤维或纳米黏土单一改性时可提升 11.4%、9.1% 和 14%, 但在抵抗永久变形方面, 复合改性效果显著弱于 6% 纳米黏土单一改性效果。研究成果可为建设高性能沥青路面提供理论基础。

关键词: 纳米黏土; 尼龙纤维; 复合改性; 沥青混合料; 力学性能

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0094-05

Study on the Mechanical Properties of Nano Clay and Nylon Fiber Composite Modified Asphalt Mixture

SHEN Zheng¹, LIU Jie²

(1. Urban and Rural Living Environment Bureau of Changsha City Yuhua District, Changsha 410000, China; 2. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: In the improvement of mechanical properties of asphalt mixtures, nanoclay and fibers exhibit excellent performance in reducing permanent deformation and resisting fatigue cracking, respectively. This study added nano clay and nylon fibers with different dosages to asphalt mixture for composite modification. The mechanical properties were compared and verified through Marshall test, elastic modulus test, dynamic creep test, fatigue test, etc., in order to improve the comprehensive mechanical properties of asphalt mixture. The experimental results show that the Marshall stability, elastic modulus, and fatigue life of 0.4% nylon fiber+6% nanoclay composite modified asphalt mixture can be improved by 11.4%, 9.1%, and 14% compared to nylon fiber or nanoclay single modification. However, in terms of resistance to permanent deformation, the composite modification effect is significantly weaker than the single modification of 6% nanoclay. The research results provide a theoretical basis for the construction of high-performance asphalt pavement.

Keywords: nano-clay; nylon fiber; composite modification; asphalt mixture; mechanical property

0 引言

沥青路面是我国主要的路面结构形式, 其具有行车舒适、开放交通时间短、养护方便等优点, 但经实践证明, 普通的沥青路面在使用过程中易出现车辙变形、疲劳开裂等力学性能病害^[1-2]。目前行业内学者普遍采用提升路面结构设计合理性和制备高性能沥青混合料等方法来解决普通沥青路面力学性能不足的问题, 其中高性能沥青混合料的制备方法和

机理分析相对简单, 同时性能效果便于验证, 是实际工程中应用最多的方法^[3]。

通常制备高性能沥青混凝土的途径是改变传统级配设计理念、采用高品质原材料、添加改性剂等, 其中添加改性剂是效果提升最显著的, 所以越来越多的改性剂被开发用于制备高性能沥青混凝土^[4]。纳米黏土和各类型纤维是众多改性剂中的代表, 前者具有独特的纳米结构, 而后者具有优异的力学特性, 两者在提升沥青混合料力学性能方面发挥着重要作用^[5]。

纳米黏土方面, 陈振华^[6]依据 Superpave 标准规范, 将 6% 纳米黏土加入到沥青中进行 DSR 试验, 结

收稿日期: 2025-12-15

作者简介: 申正(1991—), 男, 本科, 工程师, 从事市政、房建工程管理工作。

果表明纳米黏土改性沥青的复数剪切模量 G^* 增大 196%,即纳米黏土对沥青的抗永久变形能力有着极大提升作用。其作用机理是纳米黏土表面积相对较大,且沥青分子与纳米黏土的极性相反,两者之间的相互作用可形成新的黏结形式。但是,纳米黏土对沥青的抗疲劳开裂能力具有消极作用。任毅等^[7]使用纳米黏土来提高沥青及其混合料的老化问题,研究过程中发现,纳米黏土改性沥青相比于 70# 基质沥青的最大弯拉应变至少高 10.8%,且经过老化后,纳米黏土改性沥青的最大弯拉应变降低幅度比 70# 基质沥青低 15.2%。数据对比表明,纳米黏土可显著提升老化前后沥青混合料的极限抗变形能力,但对其他性能的改善效果不明显或有负面影响。

纤维方面,朱洪洲等^[8]基于界面理论模型,分析了纤维的微细观作用机理。结果显示,纤维是沥青混合料的改性剂,可在一定程度上提高其物理力学性能,尤其是疲劳抗裂性能,因此推断纤维复合改性将是纤维改性沥青混合料的主要发展方向。梁波等^[9]根据已有研究成果,总结出低温和疲劳抗裂性能是构建长寿命沥青路面的重要阻碍,并为解决此问题进行了大量沥青改性工作,从积累的数据中得出纤维改性和纤维复合改性是高效的补强措施,可显著提升沥青路面疲劳开裂寿命的结论。肖杰等^[10]选用 3 种类型纤维制备改性沥青,探索纤维类型对 OGFC-13 沥青混合料抗拉拔力学性能的影响,通过对比得出了玻璃纤维对沥青混合料力学性能提升效果最好,但在制备过程中应严格控制玻璃纤维掺量的结论。

为解决纳米黏土和纤维对沥青混合料力学性能补强(减小永久变形和抵抗疲劳开裂)的单一性问题,本研究将不同掺量的纳米黏土和尼龙纤维加入到沥青混合料中进行复合改性,并通过马歇尔试验、弹性模量试验、动态蠕变试验、疲劳试验等进行力学性能对比与验证,以期提高沥青混合料综合力学性能^[11-12]。

1 原材料及试件制备

1.1 原材料

本研究所用沥青为国产重交 70# 基质沥青,集料由本地的石灰岩矿料磨细而得,经检测两者常规技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的相关要求。纤维为尼龙纤维,由尼龙 6 为原料制成,具有弹性模量高、延展性好、物化稳定

性好等特点。纳米黏土为国内专业材料生产厂家提供的成品材料,外观呈白灰色。尼龙纤维、纳米黏土的基本性能指标检测结果见表 1、表 2。

表 1 尼龙纤维基本性能指标检测结果

原始长度/ mm	密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉强度/ MPa	熔点/℃	弹性模量/ MPa	吸水率/%
60	2.78	692	200	3 655	0.01

表 2 纳米黏土基本性能指标检测结果

蒙脱石 含量/%	含水量/ %	燃烧 损失率/%	离子 类型	表观密度/ (g·cm ⁻³)	层间间距/ nm
97	1.8	38	阴离子	0.32	1.4

1.2 配合比设计

本研究制备的尼龙纤维和纳米黏土复合改性沥青混合料主要用于沥青路面上面层,所以沥青混合料采用上面层常用的 AC-13C 级配类型,严格按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的相关流程进行配合比设计。复合改性沥青混合料合成级配曲线见图 1。

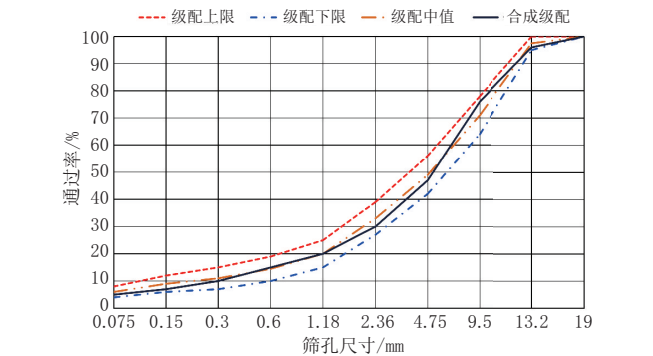


图 1 复合改性沥青混合料合成级配曲线

根据已有研究成果可知,复合改性沥青混合料中尼龙纤维的适合掺量为 0.3% 或 0.4%,而纳米黏土适合掺量为 4% 或 6%。为进行性能对比,同时制备尼龙纤维、纳米黏土单一改性沥青混合料。改性沥青混合料类型用 B_xC_y 表示,其中 x 为纳米黏土掺量, y 为尼龙纤维掺量,如 $B_4C_{0.3}$ 表示纳米黏土和尼龙纤维掺量分别为 4% 和 0.3% 的复合改性沥青混合料。

1.3 试件制备

制备复合改性沥青混合料时,因尼龙纤维和纳米黏土的状态差异而采用不同路径进行添加。纳米黏土与加热的基质沥青在 150~160 ℃ 条件下混合并搅拌 30 min 直至均匀,接着使用高速剪切仪以 5 000 r/min 的速度剪切 30 min 形成纳米黏土改性沥青;尼龙纤维与加热的集料在沥青混合料拌和机中拌和 15~45 s 直至混合均匀。最终将 2 个路径的混合物拌合均匀、成型马歇尔试件。

复合改性沥青混合料马歇尔试件制备流程

见图2。

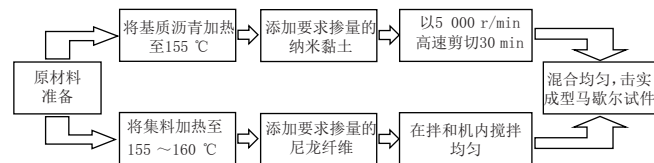


图2 复合改性沥青混合料马歇尔试件制备流程图

2 试验方法和评价指标

本研究包括马歇尔试验、弹性模量试验、动态蠕变试验、疲劳寿命试验等,其中马歇尔试验和疲劳寿命试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行;弹性模量试验和动态蠕变试验过程见2.1、2.2节。

2.1 弹性模量试验

沥青混合料弹性模量为其在循环荷载作用下偏应力与可恢复应变的比值,一方面用于表征沥青路面的刚度及传递荷载的能力,另一方面用于表征沥青混合料的抵抗永久变形能力和抗裂能力。弹性模量试验采用UTM试验机进行加载,以15%抗拉强度的振幅加载半正弦荷载5个循环。以加载500 ms、停歇1 500 ms为1个循环,加载频率为0.5 Hz,试验时温度控制在25 °C。试件为直径10 cm、高4 cm的圆柱体试件。

按式(1)计算每个加载循环的弹性模量 M :

$$M = \frac{P(0.27 + \nu)}{h \times \Delta d} \quad (1)$$

式中: P 为垂直荷载,N; h 为试件高度,mm; Δd 为水平位移,mm; ν 为沥青混合料的泊松比。

取5个循环的弹性模量平均值作为测试混合料的弹性模量。

2.2 动态蠕变试验

动态蠕变试验试件为高5 cm、直径10 cm的圆柱体试件。以200 kPa的振幅加载半正弦荷载,加载过程共计1 000 ms(加载200 ms、停歇800 ms),加载频率为1 Hz,试验时温度控制在50 °C。当通过应变传感器读取的试件垂直应变达到30 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 时,动态蠕变试验结束。根据动态蠕变试验得到的试件累计应变,可以评价沥青混合料抵抗永久变形的能力。

3 试验结果分析

3.1 马歇尔试验结果

沥青混合料马歇尔试件的体积指标对其性能的影响较大,如空隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)、有效

沥青饱和度(VFA)。

沥青混合料马歇尔试件的体积指标试验结果见表3。

表3 沥青混合料马歇尔试件体积指标试验结果

混合料类型	VV/%	VMA/%	VFA/%
B ₀ C ₀	4.06	16.13	74.61
B ₂ C ₀	4.32	15.92	72.98
B ₄ C ₀	4.64	15.73	70.42
B ₆ C ₀	5.20	15.55	66.61
B ₀ C _{0.1}	4.18	16.10	74.03
B ₀ C _{0.2}	4.52	15.67	71.28
B ₀ C _{0.3}	5.18	15.43	66.25
B ₀ C _{0.4}	5.52	15.34	64.13
B ₄ C _{0.3}	5.45	15.39	64.71
B ₆ C _{0.3}	5.61	15.31	63.38
B ₄ C _{0.4}	5.68	15.24	62.84
B ₆ C _{0.4}	5.75	15.07	61.88

由表3可知,单一改性沥青混合料的空隙率随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者呈正比例关系,而复合改性沥青混合料的空隙率普遍高于单一改性的情况。原因是尼龙纤维可约束集料发生位移,使集料颗粒之间更加致密,纳米黏土则具有高的比表面积,需要一部分沥青与其形成胶浆,因此这两者都能增大沥青混合料的空隙率;而在两者的共同作用下,沥青混合料的空隙率会更大。单一改性沥青混合料的矿料间隙率随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而减小,两者呈反比例关系。这是由于纳米黏土和尼龙纤维均为细观填充材料,其掺量增加时会均匀填充到单一改性沥青混合料矿料颗粒间的空隙中,减少矿料间隙空间,且两种材料均不显著增加矿料整体体积,因此矿料间隙率随掺量增加呈反比例减小。矿料间隙率包括混合料的空隙率和有效沥青含量,即随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加,沥青饱和度减小。

复合改性沥青混合料的马歇尔稳定度和流值、马歇尔模数试验结果见图3、图4。

由图3可知,单一改性沥青混合料的马歇尔稳定度随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者呈正相关关系,而复合改性沥青混合料的稳定度普遍高于单一改性的情况;对于流值指标而言,规律正好相反。B₆C_{0.4}(6%纳米黏土+0.4%尼龙纤维)的稳定度比B₀C₀(未添加任何改性剂)高约34%,而流值低约46%。也就是说,复合改性对稳定度增加的贡献主要是纳米黏土的微观形态和表面性质,对流值降低的贡献则主要是纳米黏土和尼龙纤维使沥青

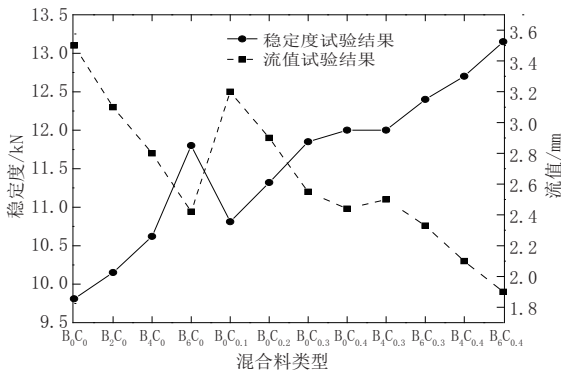


图3 复合改性沥青混合料的稳定度和流值试验结果

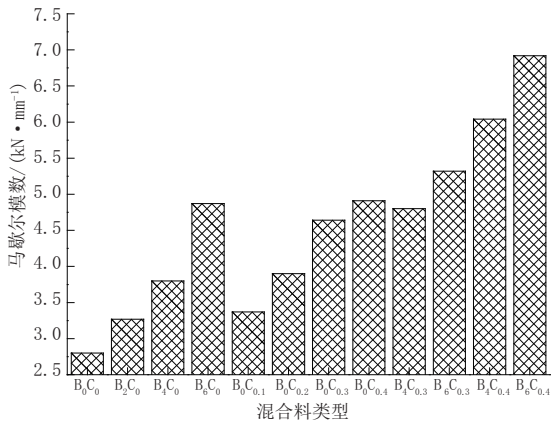


图4 复合改性沥青混合料的马歇尔模数试验结果

黏结料变硬。

由图4可知,单一改性沥青混合料的马歇尔模数随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者同样呈正相关关系。复合改性沥青混合料 $B_6C_{0.4}$ 的马歇尔模数比 B_0C_0 高约147%,即纳米黏土和尼龙纤维可显著提升沥青混合料的抵抗永久变形能力。

3.2 弹性模量试验结果

尼龙纤维和纳米黏土复合改性沥青混合料弹性模量试验结果见图5。

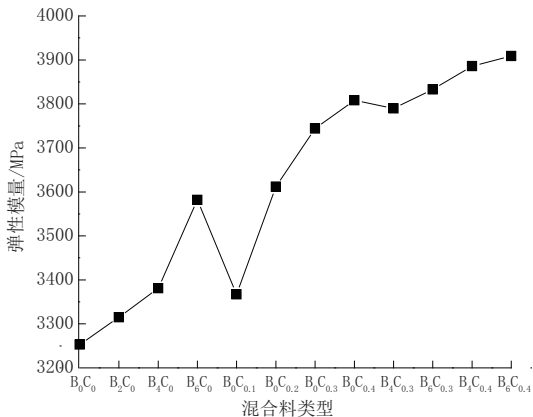


图5 复合改性沥青混合料的弹性模量试验结果

由图5可知,单一改性沥青混合料的弹性模量随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者呈正相关关系,与马歇尔模数试验结果一致,再次证明

2种改性剂可使沥青黏结料变硬。同时复合改性沥青混合料的弹性模量均高于单一改性的情况;在性能对比方面,尼龙纤维对弹性模量的提升作用高于纳米黏土。

3.3 动态蠕变试验结果

尼龙纤维和纳米黏土复合改性沥青混合料动态蠕变试验结果(累计应变)见图6。

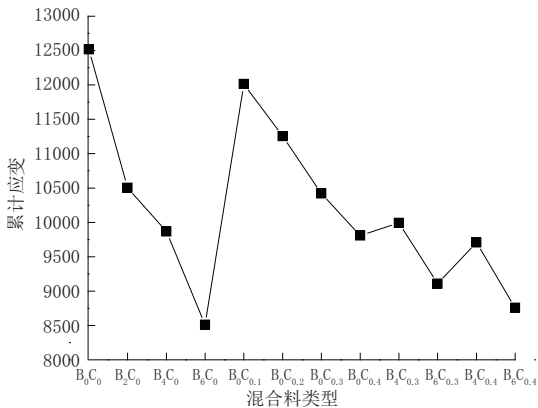


图6 复合改性沥青混合料的动态蠕变试验结果

较低的累计应变表示沥青混合料具有更好的抵抗永久变形能力。由图6可知,无论是用尼龙纤维改性还是纳米黏土改性,混合料的累计应变均有不同程度的减小,说明两者均可提高混合料的抵抗永久变形能力,且掺量越多提高效果越明显。在性能对比方面,纳米黏土对混合料抵抗永久变形能力的提升作用高于尼龙纤维, B_6C_0 和 $B_0C_{0.4}$ 的累计应变比 B_0C_0 分别低约32%和22%,形成这种现象的原因是纳米黏土和沥青间的微观作用影响以及纳米黏土改性沥青混合料更低的空隙率。进一步观察发现,复合改性沥青混合料的抵抗永久变形能力高于相同掺量的单一尼龙纤维改性沥青混合料,而低于相同掺量的单一纳米黏土改性沥青混合料,这是尼龙纤维在改性过程中增加混合料空隙率造成的,在应用中可根据抵抗永久变形能力的实际要求对尼龙纤维掺量进行动态设计。无论是单一改性还是复合改性,添加6%纳米黏土的沥青混合料具有最好的抵抗永久变形能力。

3.4 疲劳寿命试验结果

尼龙纤维和纳米黏土复合改性沥青混合料疲劳寿命试验结果见图7。

较高的疲劳寿命表示沥青混合料具有更好的抵抗疲劳开裂能力。由图7可知,无论是用尼龙纤维改性还是纳米黏土改性,混合料的疲劳寿命均呈增大趋势, B_6C_0 和 $B_0C_{0.4}$ 的疲劳寿命比 B_0C_0 分别高约

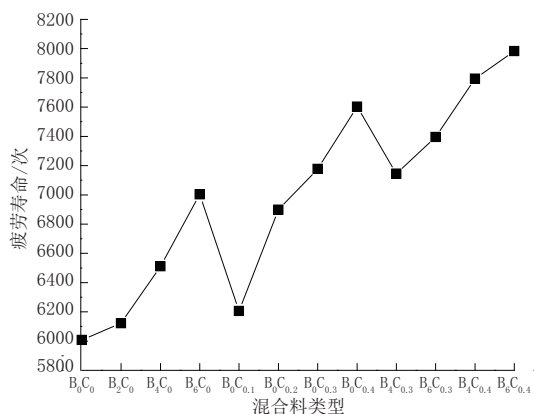


图7 复合改性沥青混合料的疲劳寿命试验结果

17%和27%,其中尼龙纤维的提升效果好于纳米黏土。原因是尼龙纤维可显著提升集料间黏结作用,从而提高沥青混合料的抗拉强度,保证试件开裂之前能承受更多的应变能。

复合改性沥青混合料的抗疲劳开裂能力高于尼龙纤维或纳米黏土单一改性的情况。可通过添加6%纳米黏土和0.4%尼龙纤维的复合改性来实现沥青混合料抗疲劳开裂性能的最大化,相比于未添加改性剂的沥青混合料,其疲劳寿命可提升1976次。

4 结 语

(1)单一改性沥青混合料的空隙率随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者呈正比例关系,而对于矿料间隙率和沥青饱和度该规律正好相反;复合改性沥青混合料的空隙率普遍高于单一改性的情况。

(2)单一改性沥青混合料的稳定度和马歇尔模数随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者呈正相关关系,而对于流值指标该规律正好相反;复合改性沥青混合料的稳定度普遍高于单一改性的情况,即2种改性剂均可显著提升沥青混合料的抗永久变形能力。

(3)单一改性沥青混合料的弹性模量随着纳米黏土或尼龙纤维掺量的增加而增加,两者呈正相关关系,同时复合改性沥青混合料的弹性模量均高于单一改性的情况;在性能对比方面,尼龙纤维对弹性

模量的提升作用高于纳米黏土。

(4)尼龙纤维和纳米黏土均可不同程度地提高试件的抵抗永久变形能力,掺量越多提高效果越明显,其中纳米黏土的提升作用高于尼龙纤维;复合改性沥青混合料的抵抗永久变形能力高于相同掺量的单一尼龙纤维改性沥青混合料,而低于相同掺量的单一纳米黏土改性沥青混合料。

(5)经尼龙纤维和纳米黏土改性后,沥青混合料的疲劳寿命均增大,其中尼龙纤维的提升效果好于纳米黏土;复合改性沥青混合料的抗疲劳开裂能力高于尼龙纤维或纳米黏土单一改性的情况,相比于未添加改性剂的沥青混合料,其疲劳寿命最大提升1976次。

参考文献:

- [1] 刘雯月,郑传峰,毕海鹏,等.聚氨酯改性沥青制备工艺及混合料性能评价[J].公路工程,2024,49(5):154-158.
- [2] ALATAS T, YILMAZ M. Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 42: 161-167.
- [3] DING X H, MA T, GU L H, et al. Investigation of surface microcrack growth behavior of asphalt mortar based on the designed innovative mesoscopic test[J]. Materials & Design, 2020, 185: 108238.
- [4] 王朝辉,舒诚,韩冰,等.高模量沥青混凝土研究进展[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(1):1-15.
- [5] WANG X S, DONG B W, WANG J J. Road performance of calcium sulfate whisker and polyester fiber composite-modified asphalt mixture[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 1: 1-7.
- [6] 陈振华. 纳米黏土改性沥青试验研究[J]. 公路与汽运, 2013, 157(4): 109-111.
- [7] 任毅,王宏祥,李忠良,等. 纳米黏土改性沥青及其混合料老化性能研究[J]. 公路工程, 2023, 48(3): 138-143.
- [8] 朱洪洲,谭祺琦,杨孝思,等. 纤维改性沥青混合料性能的研究现状与展望[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2573-2584.
- [9] 梁波,张海涛,刘政,等. 纤维改性沥青混合料性能研究进展[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 1-16.
- [10] 肖杰,黄诗洪,王子威. 不同类型纤维改性OGFC-13沥青混合料路用性能研究[J]. 西部交通科技, 2024, 201(3): 57-60.
- [11] ASNAKE K, AMARE W, MARINOS P, et al. Review on intermolecular forces between dyes used for polyester dyeing and polyester fiber[J]. Journal of Chemistry, 2020, 31: 45-53.
- [12] 刘东海,陈建民,段旭瑞,等. 高模量改性沥青及混合料高温性能研究[J]. 公路工程, 2024, 49(3): 121-130.