

# 不同纤维改性透水沥青混合料水稳定性的试验研究

Experimental Study on Water Stability of Permeable Asphalt Mixture Modified by Different Fibers

袁冻雷

(河南交通投资集团有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 通过将不同掺量的玄武岩纤维与聚酯纤维掺入透水沥青混合料中进行改性, 采用室内冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验及浸水飞散试验, 系统考察纤维类型及掺量对透水沥青混合料水稳定性的影响规律。结果表明: 随着 BF、PF 纤维掺量的增加, 透水沥青混合料的劈裂强度、稳定度、冻融劈裂强度比及浸水残留稳定度大致均呈先增大后减小变化, 而浸水飞散损失则随之呈先减小后增大变化; 适量 BF、PF 纤维的掺入能起到良好的加筋分散作用, 有利于沥青混合料空间结构稳定, 改善透水沥青混合料的水稳定性, BF 纤维和 PF 纤维的最宜掺量分别为 0.4% 和 0.2%; BF 纤维能够显著提高透水沥青混合料的冻融劈裂强度比, 而 PF 纤维能够显著提高透水沥青混合料的浸水残留稳定度及浸水飞散损失, 故 BF 纤维适用于北方季冻地区, 而 PF 纤维则更适用于南方多雨地区。

**关键词:** 透水沥青混合料; 玄武岩纤维; 聚酯纤维; 水稳定性

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0052-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.010

YUAN Donglei

(Henan Transportation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** By adding basalt fiber and polyester fiber with different content into permeable asphalt mixture for modification, indoor freeze-thaw splitting test, immersion Marshall test and immersion dispersion test are used to systematically investigate the influence of fiber type and content on water stability of permeable asphalt mixture. The results show that: With the increase of BF and PF fiber content, the splitting strength, stability The freeze-thaw splitting strength ratio and the immersion residual stability increased first and then decreased, while the immersion dispersion loss decreased first and then increased; The proper amount of BF and PF fibers can play a good role in reinforcement and dispersion, which is conducive to the stability of the spatial structure of asphalt mixture. Therefore, it can improve the water stability of permeable asphalt mixture. The optimal amount of BF fiber and PF fiber is 0.4% and 0.2% respectively; BF fiber can significantly improve the freeze-thaw splitting strength ratio of permeable asphalt mixture, while PF fiber can significantly improve the immersion residual stability and immersion dispersion loss of permeable asphalt mixture. Therefore, BF fiber is suitable for the northern seasonal frozen areas, while PF fiber is more suitable for the southern rainy areas.

**Keywords:** permeable asphalt mixture; basalt fiber; polyester fiber; water stability

## 0 引言

随着我国大力发展“海绵城市”的建设, 许多城市都新建了不同类型的排水路面, 而在复杂气候环境、服役因素的影响下, 使得其使用质量及效果出现良莠不齐的现象<sup>[1-3]</sup>。因透水沥青混合料具有优

作者简介: 袁冻雷 (1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 道路与桥梁工程。

收稿日期: 2023-11-09

异的透水性、降噪性、抗滑性等性能,故广泛应用于市政排水路面铺装工程中<sup>[4-5]</sup>。但随着国内交通运输量的逐年增加,重载轴载现象日益严重,使得传统透水沥青路面逐渐无法满足通行需求,如何有效改善透水沥青路面的综合性能,已成为现阶段道路工作者亟需解决的重点难题<sup>[6-7]</sup>。

近年来,国内学者在透水沥青混合料性能改善方面进行了不少研究,王春阳<sup>[8]</sup>发现单掺 0.2%~0.4% 的玻璃纤维可以有效提升透水沥青混合料的低温抗裂性能、高温稳定性及水稳性能;卢志远<sup>[9]</sup>探讨了不同掺量木质素纤维改性透水沥青混合料的路用性能,发现 0.4% 的木质素纤维能够明显增强沥青混合料的各项路用性能;张硕<sup>[10]</sup>研究了玄武岩纤维、聚丙烯纤维单掺混掺对透水沥青混合料高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性、抗疲劳性及排水性的影响规律,认为适量比例混掺纤维能够综合提升水稳性能等各项路用性能;肖军等<sup>[11]</sup>通过室内高温车辙试验、标准飞散试验、抗疲劳试验及水稳定性试验,探讨了玄武岩纤维和聚酯纤维复掺对高黏弹改性透水沥青混合料高温稳定性、黏附性、抗疲劳性及水稳定性的影响规律,研究发现玄武岩纤维与聚酯纤维复掺能够有效改善混合料的各项性能,且两种纤维掺量均为 0.1~0.2% 复掺时的改善效果最好。上述研究主要为透水沥青混合料综合性能的改善,考虑到水损害是沥青路面常见病害,而关于改善透水沥青混合料水稳定性方面的研究还相对较少。基于此,本文将不同掺量的玄武岩纤维与聚酯纤维掺入透水沥青混合料中进行改性,采用室内冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验及浸水飞散试验,系统考察纤维类型及掺量对透水沥青混合料水稳定性的影响规律,旨在为透水沥青混合料的设计提供参考及指导。

## 1 原材料与试验方案

### 1.1 原材料

沥青选用 TPS 高黏沥青,其技术性质见表 1;粗集料选用玄武岩,表观密度为 2.85 g/cm<sup>3</sup>,吸水率为 0.81%,压碎值为 7.9%,针片状含量为 5.7%,洛杉矶磨耗损失为 9.9%;细集料选用机制砂,表观相对密度为 2.73 g/cm<sup>3</sup>,砂当量为 67%,棱角性为 46.6 s;经检验,沥青和粗、细集料的各项技术指标均满足 CJJ/T 190-2017《透水沥青路面技术规程》的要求。填料选用磨细的石灰岩矿粉,表观相对密

度为 2.72 g/cm<sup>3</sup>,亲水系数为 0.5,含水量为 0.4%;纤维选用玄武岩纤维 (BF) 和聚酯纤维 (PF),其技术指标见表 2;经检验,填料与纤维的各项技术指标均满足 JTG F40-2017《公路沥青路面施工技术规范》的要求。

表 1 TPS 高黏沥青技术指标

检测项目	检测值	规范值
针入度 (25℃) / 0.1 mm	57.8	≥40
软化点 /℃	96	≥80
延度 (15℃) / cm	63	≥50
黏度 (60℃) / (Pa·s)	25800	≥20000

表 2 纤维的技术指标

材料	单丝直径 / μm	长度 / mm	密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	断裂伸长率 / %	断裂强度 / MPa	颜色
BF	16	9	2.63	3.2	3517	灰褐
PF	7	9	1.16	16.8	5.6	白

### 1.2 试验方案

为了考察不同纤维类型及掺量对 PAC-13 级配透水沥青混合料水稳定性的影响,试验在沥青混合料拌和过程中分别掺入 BF、PF 纤维,其中三种纤维掺量均为占沥青混合料总质量的 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%,采用冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验及肯塔堡浸水飞散试验来综合评价不同纤维改性透水沥青混合料的水稳性能。

## 2 透水沥青混合料配合比设计

试验采用 PAC-13 级配进行透水沥青混合料的制备及水稳定性测试件目标级配组成见表 3。按照 JTG F40-2017《公路沥青路面施工技术规范》和 CJJ/T 190-2017《透水沥青路面技术规程》的要求,采用马歇尔试验法来确定透水沥青混合料的最佳油石比,设计技术要求见表 4。

表 3 PAC-13 矿料级配

孔径/mm	通过率/%	孔径/mm	通过率/%
16	100	1.18	13.8
13.2	95.8	0.6	8.3
9.5	67.5	0.3	7.2
4.75	23.1	0.15	5.1
2.36	15.3	0.075	3.8

表 4 透水沥青混合料的设计要求

连通孔隙率 / %	流值 / mm	飞散损失 / %	孔隙率 / %	析漏损失 / %	马歇尔稳定度 / kN
≥14	2~4	<15	18~25	<0.3	≥5

材料科学

试验以普通透水沥青混合料为例进行油石比的确定，在初始油石比取 5.0% 的基础上，设计了 5 种沥青用量为 4.5%、4.75%、5.0%、5.25%、5.5%，并对 5 种沥青用量的透水沥青混合料进行马歇尔试件性能测试，分别得到析漏损失、飞散损失、稳定度和流值随油石比掺量的变化规律，如图 1 所示。

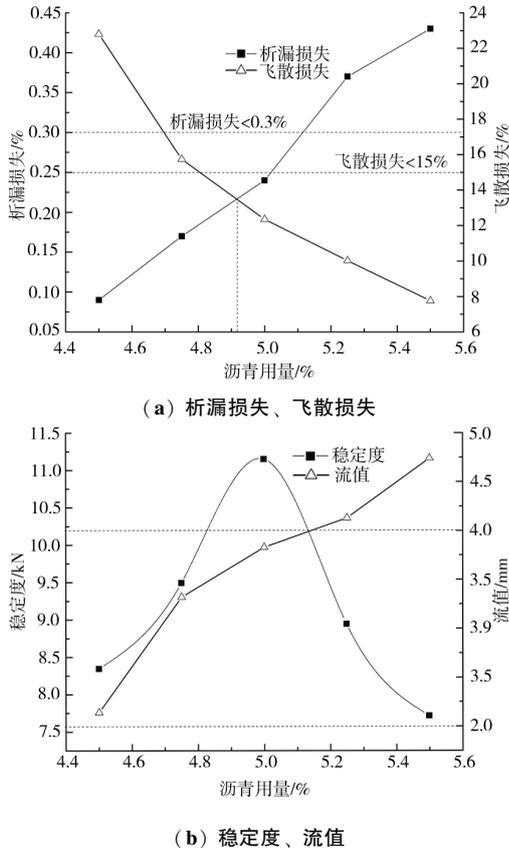


图 1 析漏损失、飞散损失、稳定度、流值与沥青用量的关系  
Fig. 1 The relationship between asphalt usage and the analysis of loss by shrinkage, loss by splashing, stability, flow value, and consistency

由图 1 可知，随着沥青用量的增大，透水沥青混合料马歇尔试件的飞散损失呈逐渐减小，析漏损失和流值呈逐渐增大，稳定度呈先增大后减小，原因是高黏沥青用量的增加能够有效提升其与集料间的裹附能力，从而增强了透水沥青混合料的整体强度，但高黏沥青用量过多会造成材料分散不均、黏度增强而导致的局部材料强度高，进而削弱了结构骨架的稳定性。综合上述马歇尔试验结果可确定出普通透水沥青混合料的最佳沥青用量为 4.9%。考虑到纤维在透水沥青混合料中的掺量不同以及具有一定的吸油性，最终本次试验选取最佳沥青用量为 5.1%。

3 试验结果及分析

为了探讨不同纤维改性透水沥青混合料的水稳定性能，按照 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中击实法成型沥青混合料的标准马歇尔试件，其中试件尺寸为  $\phi 101.6 \times 63.5$  mm 的圆柱体，击实温度为  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，双面各击实 50 次。通过冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验及肯塔堡浸水飞散试验分别对纤维改性透水沥青混合料的水稳定性能展开综合评价。

3.1 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验一般适用于反映季冻区沥青路面的抗水损害能力。试验选用自动马歇尔稳定度仪，加载速率为 50 mm/min。不同纤维改性透水沥青混合料的冻融劈裂试验结果如图 2 所示。

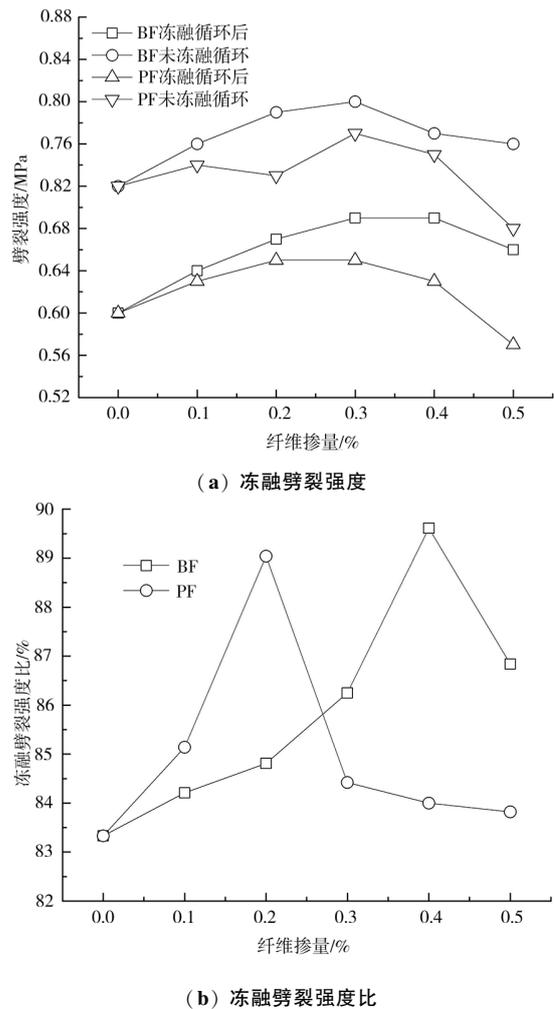


图 2 透水沥青混合料冻融劈裂强度试验结果  
Fig. 2 Results of freeze-thaw splitting strength test for pervious asphalt mixtures

根据图 2 (a) 可知, 随着纤维掺量的增加, 透水沥青混合料的劈裂强度大致均呈先增大后减小变化, 其中在纤维掺量为 0~0.4% 范围时, 透水沥青混合料的冻融劈裂强度从大到小依次为: BF>PF>普通; 而在纤维掺量为 0.5% 时, 冻融劈裂强度从大到小则表现为: BF>普通>PF。掺入一定 BF 纤维和 PF 纤维均能提高透水沥青混合料的冻融劈裂强度, 原因是普通透水沥青混合料的弹塑性较差, 在荷载和低温耦合作用下容易发生开裂破坏现象, 而纤维的掺入能在其结构内起到加筋的作用, 促进混合料空间结构的稳定, 减少裂缝的发展, 进而提高了冻融劈裂强度; 在相同纤维掺量条件下, BF 纤维透水沥青混合料的冻融劈裂强度均高于 PF 纤维的, 原因是 BF 纤维的抗断裂强度更好, 可以更加快速地分散荷载应力, 故冻融劈裂强度更高; 掺 0.5% 的 PF 纤维其冻融劈裂强度低于普通沥青混合料, 说明过量的 PF 纤维不能提高冻融劈裂强度, 原因是 PF 纤维吸附了大量的自由沥青, 使得沥青混合料的黏聚力不足, 因而降低了冻融劈裂强度。

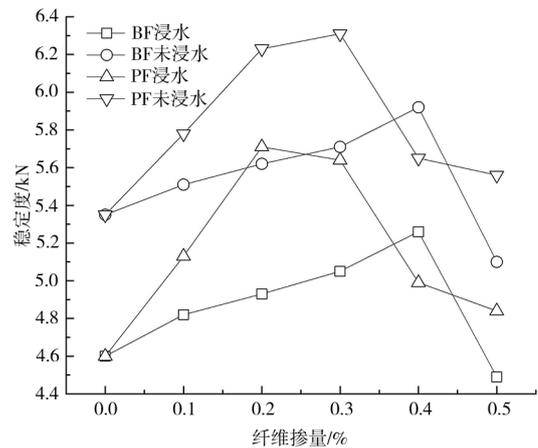
由图 2 (b) 可知, 透水沥青混合料的冻融劈裂强度比均随着纤维掺量的增加呈先增大后减小变化, 其中普通透水沥青混合料的冻融劈裂强度比为 83.3%, 而 BF 纤维和 PF 纤维改性透水沥青混合料的冻融劈裂强度比最大值分别为 89.6%、89.0%, 两者较于普通透水沥青混合料的冻融劈裂强度比分别提高了 7.6%、6.8%, 说明 BF 纤维对冻融劈裂强度比的影响作用更大; BF 纤维和 PF 纤维的掺入均能提高透水沥青混合料的冻融劈裂强度比, 原因是纤维均匀加筋分散于沥青混合料内部, 能够形成稳定的网状结构, 从而有利于其水稳定性的改善。

### 3.2 浸水马歇尔试验

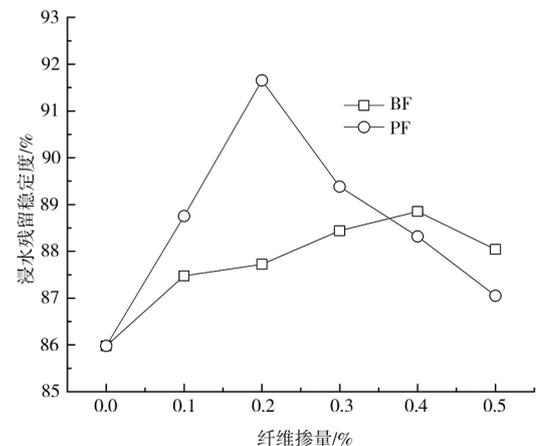
不同纤维改性透水沥青混合料的浸水马歇尔试验结果如图 3 所示。

由图 3 (a) 可知, 透水沥青混合料的稳定度均随着纤维掺量的增加呈先增大后减小变化, 其中当纤维掺量由 0 增至 0.4% 时, BF 纤维透水沥青混合料的稳定度逐渐增大, 而当纤维掺量继续增至 0.5% 时, 沥青混合料的稳定度则逐渐减小; 当纤维掺量在 0~0.2% 范围内时, PF 纤维透水沥青混合料的稳定度逐渐增大, 而当纤维掺量在 0.2%~0.5% 范围内时, 沥青混合料的稳定度逐渐减小; BF 纤维与 PF 纤维的掺入均能提高透水沥青混合料的稳定度, 原

因是纤维具有良好的加筋吸附作用, 有利于沥青混合料整体结构的稳定, 因此稳定度得到提高; 在纤维掺量为 0.5% 时, BF 纤维的稳定度小于普通透水沥青混合料, 原因是 BF 纤维过量出现结团现象, 而引起混合料结构的稳定性破坏。



(a) 稳定度



(b) 浸水残留稳定度

图 3 透水沥青混合料浸水马歇尔试验结果

Fig. 3 Marshall test results of permeable asphalt mixture

由图 3 (b) 可知, 随着 BF、PF 纤维掺量的增加, 透水沥青混合料的浸水残留稳定度均呈先增大后减小变化, 其中普通透水沥青混合料的浸水残留稳定度为 85.9%, 当纤维掺量为 0.2% 时, PF 纤维改性透水沥青混合料的浸水残留稳定度达到最大值 91.7%, 而当纤维掺量为 0.4% 时, BF 纤维改性透水沥青混合料的浸水残留稳定度达到最大值 88.9%, 两者相较于普通透水沥青混合料分别提高了 6.7%、3.5%, 即 PF 纤维对浸水残留稳定度的影响作用更大; BF 纤维和 PF 纤维的掺入均可提高透水沥青混合料的浸水残留稳定度, 有利于改善其抗水损害能力。

## 材料科学

## 3.3 肯塔堡浸水飞散试验

浸水飞散试验主要是测定沥青混合料在受到荷载和水损害后的质量变化, 试验仪器选用洛杉矶试验机, 试验首先将试件置于 60 °C 恒温水浴箱中浸水 48 h, 然后室温放置 24 h, 用干毛巾擦拭试件, 称取并记录试件原始质量  $m_0$ ; 使用洛杉矶试验机分别对试件进行飞散试验, 试验以 30 r/min 的转速旋转 300 转, 并称取试件剩余质量  $m_1$ , 同时根据公式  $\Delta S = (m_1 - m_0) / m_1 \times 100\%$  计算出试件的浸水飞散损失  $\Delta S$  (质量损失与剩余质量的比值)。通过对不同纤维改性透水沥青混合料进行浸水飞散试验, 得到浸水飞散损失的变化曲线如图 4 所示。

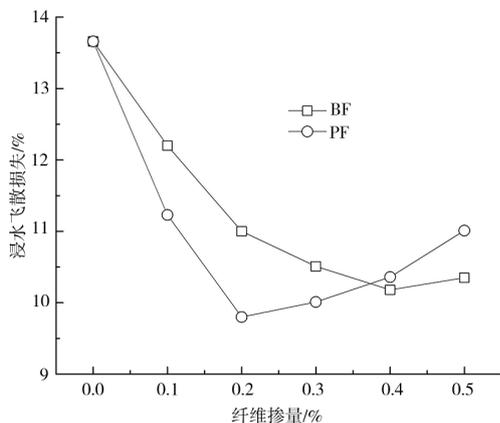


图 4 透水沥青混合料浸水飞散损失变化曲线

Fig. 4 Change curve of water immersion and dispersion loss of permeable asphalt mixture

由图 4 可以看出, 随着纤维掺量的增加, 透水沥青混合料的浸水飞散损失均呈先减小后增大变化。其中普通透水沥青混合料的浸水飞散损失为 13.7%; 当纤维掺量为 0.2% 时, PF 纤维改性透水沥青混合料的浸水飞散损失降至最小值 9.8%; 当纤维掺量为 0.4% 时, BF 纤维改性透水沥青混合料的的浸水飞散损失降至最小值 10.2%, 两者相较于普通透水沥青混合料分别降低了 28.5%、25.5%, 表明 BF 纤维和 PF 纤维的掺入均可降低透水沥青混合料的浸水飞散损失, 且 PF 纤维对浸水飞散损失的影响作用更大。原因是 PF 纤维属于高分子材料, 其吸水性低且分散性更好, 使得沥青混合料结构更为稳固, 因此浸水飞散损失较少。

## 4 结论

(1) 随着纤维掺量的增加, 透水沥青混合料的劈裂强度和稳定度大致均呈先增大后减小变化; 透水沥

青混合料的冻融劈裂强度比和浸水残留稳定度均随着 BF、PF 纤维掺量的增加呈先增大后减小变化, 适量纤维的掺入能起到良好的加筋分散作用, 有利于沥青混合料空间结构稳定, 故水稳定性得到提升。

(2) 透水沥青混合料的浸水飞散损失随着纤维掺量的增加呈先减小后增大变化, PF 纤维的吸水性低且分散性更好, 因此 PF 纤维改性透水沥青混合料的浸水飞散损失较于 BF 纤维更少。

(3) 综合透水沥青混合料的各项水稳定性试验结果可知, BF、PF 纤维均能改善透水沥青混合料的水稳定性, 其中掺入 0.4% 的 BF 与 0.2% 的 PF 单掺改性下的混合料水稳定性提升最为明显; BF 纤维能够显著提高透水沥青混合料的冻融劈裂强度比, 而 PF 纤维能够显著提高透水沥青混合料的浸水残留稳定度及浸水飞散损失, 故 BF 纤维适用于北方季冻地区, 而 PF 纤维则更适用于南方多雨地区。

## 参考文献

- [1] 徐洪跃. 透水沥青混合料透水特性及路用性能研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (6): 42-47, 75.
- [2] 焦江华. 纤维改善排水沥青混合料性能试验研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50 (1): 71-73, 90.
- [3] 陈超, 范子然, 李闯民. 基于高黏剂改性透水沥青混合料的工艺对比研究 [J]. 中外公路, 2020, 40 (3): 237-240.
- [4] 于保阳, 孙宗光, 齐琳. 透水沥青混合料老化特性分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2021, 37 (3): 510-517.
- [5] 徐帅, 朱绘美, 刘文欢, 等. 钢渣透水沥青混合料性能的影响因素研究 [J]. 新型建筑材料, 2016, 43 (12): 53-56.
- [6] 叶树鹏, 吴金荣, 陈超. 侵蚀对透水纤维沥青混合料水稳定性的影响 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (34): 14783-14789.
- [7] 王胜, 吴正光, 伏伟俐, 等. 玄武岩纤维透水沥青混合料的配合比设计 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36 (6): 44-48.
- [8] 王春阳. 玻璃纤维透水沥青混合料路用性能试验研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50 (1): 77-79.
- [9] 卢志远. 木质素纤维对透水沥青混合料路用性能的影响研究 [J]. 西部交通科技, 2022 (1): 40-43.
- [10] 张硕. 混掺纤维透水沥青混合料路用性能试验研究 [J]. 中国测试, 2022, 48 (10): 1-6.
- [11] 肖军, 尹强, 姜克锦, 等. 复掺纤维改善高黏弹性透水沥青混合料性能试验研究 [J]. 公路, 2022, 67 (8): 380-385.