DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.012 文章编号:1671-2579(2025)02-0106-12

纤维增强半柔性路面材料路用性能研究

孙学聪[1],王宏畅[1,2*],刘嵩[1,3]

(1.南京林业大学 土木工程学院,江苏 南京 210037;2.江苏省公路智能检测与低碳养护技术工程研究中心,江苏 南京 210037;3.江苏苏博特新材料股份有限公司,江苏 南京 211103)

摘要:为探讨玄武岩纤维、聚酯纤维、木质素纤维对半柔性路面材料的增强效果,并研究其在不同结构层中的适用性,该文通过析漏试验和飞散试验确定不同纤维掺量下的最佳油石比,并进行马歇尔试验,确定最佳纤维掺量;通过马歇尔试验、车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂试验及劈裂疲劳试验,评估纤维增强效果;利用ABAQUS软件建立三维有限元模型,分析半柔性材料在不同结构层中的力学响应。研究结果表明:玄武岩纤维、聚酯纤维、木质素纤维均改善了半柔性材料的路用性能,其中玄武岩纤维在半柔性路面材料中具有显著的增强效果;半柔性材料在上、中面层的应用效果最佳,提高了路面结构的耐久性,有效延缓了路面疲劳破坏,增强了抗车辙能力,尤其适用于重载路段和高温环境。

关键词:玄武岩纤维;半柔性路面材料;有限元模型;路用性能

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Road Performance of Fiber-Reinforced Semi-Flexible Pavement Materials

SUN Xuecong[1], WANG Hongchang[1,2*], LIU Song[1,3]

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 2. Jiangsu Highway Intelligent Detection and Low-Carbon Maintenance Engineering Research Center, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 3. Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211103, China)

Abstract: This paper aimed to investigate the reinforcement effects of basalt fiber, polyester fiber, and lignin fiber on semi-flexible pavement materials and study their applicability in different structural layers. The optimum bitumen-aggregate ratio under different fiber dosages was determined through the leakage test and dispersion test, and the optimum fiber dosage was determined through the Marshall test. The fiber reinforcement effect was evaluated through the Marshall test, rutting test, low-temperature bending test, freeze-thaw splitting test, and splitting fatigue test. A three-dimensional finite element model was established by using ABAQUS software to analyze the mechanical response of semi-flexible materials in different structural layers. The results show that basalt fiber, polyester fiber, and lignin fiber all improve the road performance of semi-flexible materials, with basalt fiber demonstrating a significant reinforcement effect in semi-flexible pavement materials. The semi-flexible materials have the best application effect in the upper and middle layers, which can improve the durability of pavement structures, effectively delay pavement fatigue damage, and enhance rut resistance, and they are particularly suitable for heavy-duty road sections and high-temperature environments.

Keywords: basalt fiber; semi-flexible pavement material; finite element model; road performance

0 引言

随着中国交通基础设施的不断完善,道路建设质量和耐久性成为关注焦点。在水泥混凝土和沥青混凝土道路的优缺点对比中,半柔性路面作为一种新型路面结构逐渐受到关注。半柔性路面不仅结合了水泥路面和沥青路面的优点,还克服了各自的缺陷,具有较好的耐久性和稳定性。为了进一步提高半柔性路面的性能,纤维增强技术应运而生。纤维增强半柔性路面在抗裂性、抗疲劳性及整体强度方

收稿日期:2024-12-10(修改稿)

基金项目:江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(编号:BK20220419);湖南省交通科技项目(编号:202111)

作者简介:孙学聪,男,硕士研究生.E-mail:927909158@qq.com

***通信作者:**王宏畅,男,博士,教授.E-mail:seuwhc@126.com

面表现出显著优势，这对于提高道路的使用寿命和安全性具有重要意义。

近年来，国内外对路面纤维增强的研究取得了一定进展，例如：Kim等[1]在沥青混凝土中掺入聚丙烯、聚酯、尼龙和碳纤维，研究结果表明，与普通沥青混凝土试件相比，纤维增强沥青混凝土的机械性能得到了显著提高；Klinsky等[2]的对比研究表明，纤维改性的混合料表现出较好的机械性能；Mohammed等[3]探究如何改善玻璃纤维改性沥青的流变性能；Enieb等[4]研究表明，玻璃纤维增强沥青混合料具有强度增大、抗车辙能力提高、湿敏性较弱、疲劳开裂延缓、自愈能力增强和老化性减缓的优势；Luo等[5]提出了复合改性的新型沥青混合料改性方式，该方法能够综合提升沥青混合料的整体性能；Slebi-Acevedo等[6]通过定性和定量分析纤维对HMA的机械影响，综述了纤维在HMA中的加固效果；Cai等[7]通过声发射（AE）技术分析SFP及其多孔沥青（PA）基体在单轴压缩试验中的破坏过程，结果表明，添加纤维能够抑制剪切开裂，提高抗裂性；Mohammed等[8]的试验结果表明，纤维对测试温度为20 ℃下的沥青混合料的刚度模量和断裂韧性有显著影响，能够提高纤维增强沥青混合料的疲劳寿命；Slebi-Acevedo等[9]发现，当空隙率在20%以上时，在多孔沥青混合料中，添加纤维提高了延性和韧性；Pirmohammad等[10]的研究表明，添加黄麻纤维和碳纤维，可以更有效地增加沥青混凝土的断裂韧性。

上述研究大多从纤维材料的种类、掺量以及分布形式等方面进行了研究，但是关于纤维增强半柔性路面的理论研究缺乏系统性的研究和规范的设计方法。本文通过探讨不同类型纤维（玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维）对半柔性路面力学性能的影响，系统研究纤维增强半柔性路面的优化设计，为工程实践提供指导。

1　原材料

沥青选用SBS改性沥青，技术指标参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG E20—2011），见表1。母体沥青混合料中集料仅包含粗集料（9.5～13.2 mm玄武岩碎石），无细集料，矿粉为石灰岩矿粉，符合《公路工程集料试验规程》（JTG 3432—2024）的要求，结果见表2、3。纤维类型如图1所示。

玄武岩纤维呈褐色，由玄武岩在高温熔融后经复杂工艺处理得到[11]，如图1(a)所示。具有较高的抗拉强度，能耐高温和碱性，能增强沥青混合料的高温稳定性和低温抗裂性[12]。

表1　SBS改性沥青技术指标

Table 1　Technical indicators of SBS-modified asphalt

技术指标	单位	试验测试结果	指标要求
针入度（25 ℃、100 g、5 s）	0.1 mm	58	40～60
软化点	℃	81	≥60
延度（5 ℃、5 cm/min）	cm	47.8	≥30.0
密度	g/cm^3	1.03	实测
闪点	℃	285	≥230
运动黏度（135 ℃）	Pa·s	1.8	≤3.0
TFOT后残留物质量变化	%	0.3	≤0.6

表2　玄武岩粗集料性能测试结果

Table 2　Performance test results of coarse basalt aggregate

性能指标	单位	检测结果	指标要求
石料压碎值	%	14.3	≤26.0
洛杉矶磨耗损失	%	16.1	≤28.0
表观密度	g/cm^3	2.95	≥2.60
吸水率	%	0.66	≤2.00
坚固性	%	3	≤12
针片状颗粒含量	%	9.5	≤15.0

表3　矿粉性能测试结果

Table 3　Performance test results of mineral powder

性能指标	单位	检测结果	指标要求
表观相对密度		2.66	≥2.5
含水率	%	0.52	≤1.0
亲水系数		<1	≤1.0
外观		无团粒结块	无团粒结块
粒度<0.15 mm	%	96	90～100
粒度<0.075 mm	%	82	75～100

（a）玄武岩纤维　（b）聚酯纤维　（c）木质素纤维

图1　纤维类型

Figure 1　Fiber type

聚酯纤维是一种合成纤维,外观呈白色丝状[图1(b)],具有耐高温和易分散的特点,在沥青混合料中具有抗开裂的效果[13];木质素纤维外观呈灰色絮状物[图1(c)],具有耐高温、抗腐蚀性强的特点,也被称作惰性纤维[14]。3种纤维的物理性能见表4。

表4 纤维技术指标测试结果

Table 4 Technical indicator test results of fiber

纤维类型	纤维长度/mm	纤维直径/μm	相对密度	断裂强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/GPa	可燃性	吸湿率/%	卷曲性
玄武岩纤维	6	10～15	2.475	3 300	2.7	8.6	明火点不燃	0.7	无
聚酯纤维	6	6～8	1.350	500	15.0～30.0				
木质素纤维	6								

纤维类型	工作温度范围/℃	熔点/℃	堆积密度/(g·cm^{-3})	灰分含量/%	pH值	含水率/%	吸油率/%
玄武岩纤维	－260～800						
聚酯纤维		245～260					
木质素纤维			18	14.3	7.5	2.81	6.5

表5 母体沥青混合料级配

Table 5 Gradation of parent asphalt mixture

筛孔尺寸/mm	通过百分率/%	筛孔尺寸/mm	通过百分率/%
13.2	100.00	0.6	10.65
9.5	10.65	0.3	10.65
4.75	10.65	0.15	10.35
2.36	10.65	0.075	9.57
1.18	10.65		

2.2 最佳沥青用量设计

2.2.1 谢伦堡沥青析漏试验

析漏试验是用来确定最大沥青用量的方法。沥青用量过多时,会导致混合料内的自由沥青过多,降低沥青混合料的黏聚力,减小了其内摩擦角。在实际施工过程中,会出现强度不足、松散等问题。析漏试验主要目的是通过在高温情况下检测沥青混合料析出沥青的质量,并观察沥青混合料里面有没有多余的自由沥青。

以不掺纤维的情况为例,设计了4组不同的油石比,分别为2.8%、3.2%、3.6%和4.0%,并进行了析漏试验,析漏损失图如图2所示。

从图2可以看出:沥青析漏损失随着油石比的增加而增大;当油石比达到一定量时,析漏损失的增大速度急剧上升,该拐点约在3.2%,即确定最大油石比为3.2%。

2.2.2 肯塔堡飞散试验

肯塔堡飞散试验是利用洛杉矶磨耗机的高速旋转来模拟道路上的飞散现象[15],通过测量飞散损失来评估沥青对集料的黏附作用,并确定最小沥青用量。在不掺纤维的沥青混合料情况下,每组油石比变化量为0.4%,飞散损失与油石比的关系见图3。

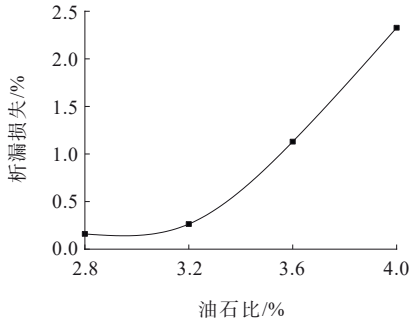

图2 母体沥青混合料析漏损失图

Figure 2 Leakage loss of parent asphalt mixture

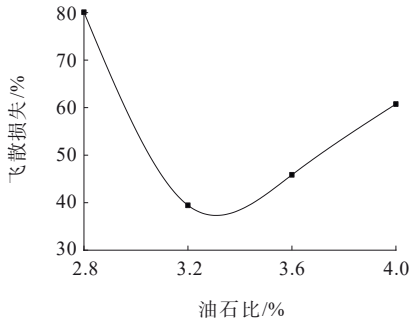

图3 飞散损失–油石比关系图

Figure 3 Relationship between dispersion loss and bitumen-aggregate ratio

由图3可知:当油石比小于3.3%时,母体混合料

2 母体沥青混合料配合比设计

2.1 母体沥青混合料级配设计

本研究使用空隙率为28%的母体沥青混合料,级配见表5。

的飞散损失随油石比的增加逐渐减小；当油石比大于3.3%时，飞散损失开始逐渐增大。油石比约为3.3%处出现拐点，因而可以确定沥青混合料的最小油石比为3.3%。

通过测定最大沥青用量与最小沥青用量，取两者的中值作为最佳油石比，其值与拟定的油石比3.2%非常接近。因此，最终确定最佳油石比为3.3%。

在纤维掺量不同的情况下，采用相同方法确定不同掺量下的最佳油石比，结果见表6。

表6　不同纤维掺量母体混合料的最佳油石比

Table 6　Optimum bitumen-aggregate ratio of parent mixture with different fiber dosages

纤维类型	纤维掺量/%	最佳油石比/%
玄武岩纤维	0.1	3.3
	0.2	3.4
	0.3	3.6
	0.4	3.6
聚酯纤维	0.1	3.3
	0.2	3.4
	0.3	3.5
	0.4	3.6
木质素纤维	0.1	3.4
	0.2	3.5
	0.3	3.6
	0.4	3.7

2.3　最佳纤维掺量设计

本文以马歇尔稳定度和流值为指标，在最佳油石比情况下，确定母体沥青混合料的最佳纤维掺量。玄武岩纤维、聚酯纤维、木质素纤维的掺量为0.1%～0.4%。本文将这3种纤维分别以0.1%、0.2%、0.3%、0.4%的掺量加入沥青混合料中，按照确定的级配拌制混合料，并成型马歇尔试件。马歇尔试验结果如表7所示。

由表7可知：掺入纤维的母体沥青混合料的马歇尔稳定度相较于不掺纤维的情况都有不同程度提高。掺入玄武岩纤维、聚酯纤维、木质素纤维的混合料，其稳定度分别比不掺纤维的混合料最高提高了27.6%、14.4%、8.3%。随着纤维掺量的增加，这3种混合料的稳定度呈先增加后减小的趋势，并且达到最大稳定度的掺量也不同。其中，在纤维掺量为0.2%时，玄武岩纤维和木质素纤维表现出最大的稳定度，而聚酯纤维则是在0.3%掺量时达到最大稳定度。因此，玄武岩纤维、聚酯纤维、木质素纤维的最佳纤维掺量分别为0.2%、0.3%和0.2%。

不同纤维母体的沥青混合料最佳油石比和最佳纤维掺量如表8所示。

表7　不同纤维母体沥青混合料马歇尔试验结果

Table 7　Marshall test results of parent asphalt mixture with different fibers

纤维类型	纤维掺量/%	油石比/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
无纤维	0	3.2	5.08	37.2
玄武岩纤维	0.1	3.3	6.12	35.1
	0.2	3.4	6.48	36.5
	0.3	3.6	6.28	37.1
	0.4	3.6	5.62	37.8
聚酯纤维	0.1	3.3	5.32	33.6
	0.2	3.4	5.70	34.8
	0.3	3.5	5.81	35.3
	0.4	3.6	5.48	36.7
木质素纤维	0.1	3.4	5.38	33.2
	0.2	3.5	5.50	34.5
	0.3	3.6	5.34	35.2
	0.4	3.7	5.12	35.9

表8　纤维母体沥青混合料最佳纤维掺量

Table 8　Optimum fiber content of parent asphalt mixture with different fibers

纤维类型	最佳油石比/%	最佳纤维掺量/%
玄武岩纤维	3.4	0.2
聚酯纤维	3.5	0.3
木质素纤维	3.6	0.2

3　水泥基灌浆材料

3.1　原材料

本文采用的42.5R快硬（低碱度）硫铝酸盐水泥的技术性能见表9。水泥基灌浆材料的配合比为水灰比0.4，早强剂0.15%，减水剂0.5%，缓凝剂0.3%，消泡剂0.1%，增稠剂0.1%，膨胀剂0.05%。为满足灌浆材料的性能要求，采用聚羧酸高效减水剂作为减水剂，碳酸锂作为早强剂，葡萄糖酸钠作为缓凝剂，羟丙基甲基纤维素作为增稠剂，以及ALLPON P801粉末消泡剂作为消泡剂。

3.2　灌注率

灌注率是评估灌浆料在混合料充实程度的指

表9 快硬(低碱度)硫铝酸盐水泥技术性能

Table 9 Technical performance of fast hardening (low-alkalinity) sulphoaluminate cement

参数	单位	指标取值
强度等级		42.5
比表面积	m^2/kg	≥350
初凝时间	min	≥25
终凝时间	min	≤180
碱度		≤10.5
自由膨胀率(28 d)	%	0.0～0.10
3 h抗压强度	MPa	15.0
6 h抗压强度	MPa	20.0
1 d抗压强度	MPa	25.0
7 d抗压强度	MPa	35.0
3 h抗折强度	MPa	2.0
6 h抗折强度	MPa	2.5
1 d抗折强度	MPa	3.5
7 d抗折强度	MPa	5.0

标,对半柔性路面的强度和耐久性具有重要影响。如果灌浆材料在母体混合料中灌注不充分,会导致灌浆材料和母体混合料之间存在空隙,从而影响半柔性路面的整体强度[16]。

根据2.1所述的母体沥青混合料配合比进行混合料的拌制,并成型马歇尔试件。再使用塑料袋包裹马歇尔试件的四周和底部,并用透明胶带将塑料袋与试件表面紧密固定,如图4(a)所示。然后将拌制好的早强型水泥浆灌注至母体沥青混合料中,直至水泥浆与试件表面平齐且不再有气泡产生为止[图4(b)]。灌浆后,将试件养护至少3 h。最后,拆除塑料袋,得到灌浆后的试件[图4(c)]。

(a) 灌浆前 (b) 试件灌浆 (c) 灌浆后

图4 灌浆试件成型

Figure 4 Grouting specimen moulding

灌注率试验方法:首先,称取体积为V_0的水泥砂浆置于容器中,并记录其质量m_0,通过式(1)计算浆体的密度ρ。其次,分别称量马歇尔试件灌注前的质量m_1和灌注后的质量m_2。然后,测量半柔性试件的总体积V及闭口孔体积V_1,以此得出理论灌浆体积。最后,通过式(2)计算实际灌浆体积与理论灌浆体积的比值即为灌注率V_{PR}。

$$\rho=\frac{m_0}{V_0} \tag{1}$$

$$V_{PR}=\frac{(m_2-m_1)/\rho}{V-V_1} \tag{2}$$

式中:V_0为浆液体积(cm^3)。

试验测得灌浆材料的密度为1.865 g/cm^3,灌注率试验结果见表10。

表10 灌注率试验结果

Table 10 Perfusion rate test results

纤维类型	连通孔隙率/%	理论灌浆量/g	实际灌浆量/g	灌注率/%
无纤维	26.5	251.3	231.4	92.1
玄武岩纤维	24.8	235.2	218.5	92.9
聚酯纤维	25.7	243.7	227.4	93.3
木质素纤维	24.1	228.6	202.8	88.7

4 纤维半柔性路面材料路用性能研究

4.1 高温性能试验研究

以最佳纤维掺量将纤维掺入混合料并成型马歇尔试件,灌浆养护3 h后再进行马歇尔试验,结果见表11。

表11 纤维半柔性路面材料马歇尔试验结果

Table 11 Marshall test results of fiber semi-flexible pavement materials

纤维类型	纤维掺量/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
无纤维	0.0	25.3	24.8
玄武岩纤维	0.2	29.7	24.5
聚酯纤维	0.3	28.6	23.6
木质素纤维	0.2	27.2	24.1

由表11可知:掺入玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维的半柔性路面材料相对于未掺纤维情况下,稳定度分别增加了17.4%、13.0%和7.5%,而流值则有所减小。值得注意的是,母体沥青混合料的稳定度约占半柔性路面材料稳定度的20%,这表明半柔性路面材料的强度大约有20%来自母体沥青混合料,而80%左右的强度来源于水泥灌浆。

掺入纤维后半柔性路面材料强度增加的原因为:① 母体混合料构成了半柔性路面材料的骨架,其强度约占复合材料的20%,整体强度随之提高;② 混合料表面的纤维增加了水泥灌浆和母体沥青混合料间的摩擦力,增强了复合材料的骨架密实结构,从而提高了强度。此外,由于水泥灌浆和母体沥青混合

料间摩擦力的增大，阻碍了材料在破坏时产生的变形，因此流值也有所减小。

4.2　低温性能试验研究

本文选用低温弯曲试验对纤维半柔性路面材料的低温性能进行研究[17]。低温弯曲试验是将长为(250±2) mm、宽为(30±2) mm、高为(35±2) mm的棱柱体小梁试件放置在－10 ℃的低温环境下5～6 h，使小梁内部温度达到－10 ℃，然后施加荷载，加载速率为50 mm/min，测得跨中最大荷载和挠度，计算试件的抗弯拉强度、抗弯拉应变以及劲度模量[18]。

低温弯曲试验结果如图5～7所示。

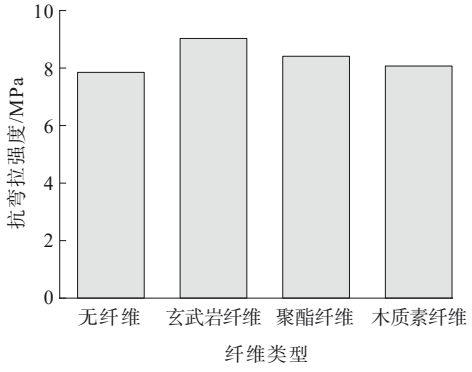

图5　不同纤维半柔性路面材料抗弯拉强度

Figure 5　Flexural and tensile strength of different fiber semi-flexible pavement materials

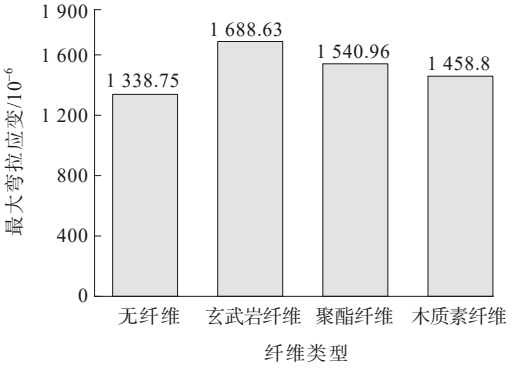

图6　不同纤维半柔性路面材料最大弯拉应变

Figure 6　Maximum flexural and tensile strain of different fiber semi-flexible pavement materials

从图5～7可以看出：掺入玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维的半柔性路面材料的抗弯拉强度和抗弯拉应变均有所提高。与未掺纤维的半柔性路面材料相比，掺入玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维的半柔性路面材料的抗弯拉强度分别增加了15.0%、7.1%和2.8%，而抗弯拉应变分别增加了26.1%、15.1%和9.0%。这表明：掺入纤维后的半柔性路面材料能够承受更大的断裂荷载，抗变形能力增强。

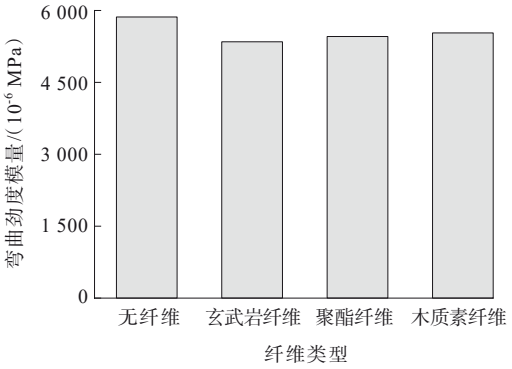

图7　不同纤维半柔性路面材料弯曲劲度模量

Figure 7　Bending stiffness modulus of different fiber semi-flexible pavement materials

水泥材料最大的弊端是其抗裂性能差，同时也是半柔性路面材料的缺陷之一。半柔性路面材料的最大弯拉应变通常远小于普通沥青混合料的，而纤维的加入可以有效提高其抗弯拉强度和最大弯拉应变。在大空隙沥青混凝土基体中，集料与集料的黏结能力是防止半柔性路面材料早期开裂的关键因素。将纤维掺入母体沥青混合料能够增加沥青的黏性，提高集料间的黏结能力，从而延缓半柔性路面材料的早期开裂。

纤维的加入还能够有效阻止水泥和沥青混合料中裂缝的扩展，提高抗裂能力。玄武岩纤维有效提升了半柔性路面材料抗裂性能，这是因为玄武岩纤维的抗拉强度和韧性优于聚酯纤维和木质素纤维的，使得母体沥青混合料能够承受更大的弯拉应力，从而延缓了裂缝的形成。相比之下，木质素纤维的成絮状结构导致其分散能力较差，抗拉强度也较低，因此其抗开裂效果相对较差。

4.3　水稳定性能试验研究

本文采用冻融劈裂试验研究纤维半柔性路面的水稳定性[19-20]，试验结果见图8、9。

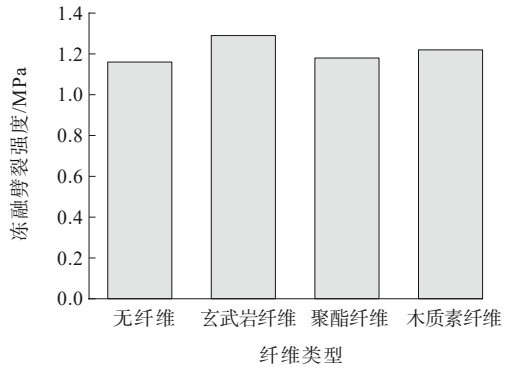

图8　不同纤维半柔性路面材料的冻融劈裂强度

Figure 8　Freeze-thaw splitting strength of different fiber semi-flexible pavement materials

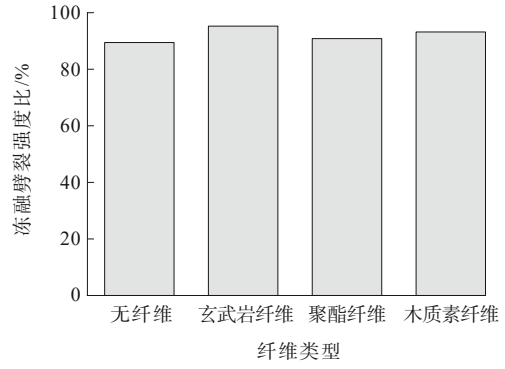

图9 不同纤维半柔性路面的冻融劈裂强度比

Figure 9 Freeze-thaw splitting strength ratio of different fiber semi-flexible pavement materials

从图8、9可以看出：掺入玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维后的半柔性路面材料在冻融劈裂强度和冻融劈裂比方面均有小幅度提高，冻融劈裂强度分别增加了11.2%、1.7%和5.2%。这些纤维的加入能够增强半柔性路面材料的水稳定性，主要原因是掺入纤维后提高了母体沥青混合料中沥青膜的厚度，使其不易形成裂纹，从而阻止了水分的侵入，减轻了水对混合料的侵害。

在马歇尔试件断裂处，纤维沥青胶浆能够承受更大的拉力，受水的影响会更小，因此提高了冻融劈裂强度。值得一提的是，玄武岩纤维对半柔性路面材料的水稳定性增强效果更加显著。这是由于玄武岩纤维具有分散均匀、表面积大的特点，能够有效增加沥青膜的厚度，因此在抵抗水损害方面表现更出色。相比之下，聚酯纤维的直径较小，表面积较小，对沥青膜的影响也较小，因此对半柔性路面材料水稳定性的增强效果不太明显。

4.4 疲劳性能试验研究

本文采用劈裂疲劳试验来评估半柔性路面材料的性能。劈裂疲劳试验模拟了沥青路面的受力状态，通过劈裂强度的一半作为施加的应力水平[21]，用试件断裂破坏时的作用次数来表征沥青路面的疲劳寿命[22]。

具体试验步骤：将待试验的马歇尔试件放置在UTM气压伺服试验机内，将温度调节至15 ℃并保温4～5 h，设置加载荷载为6 kN，频率为5 Hz，加载波形为正弦波，然后施加荷载，直至马歇尔试件破坏，并记录疲劳寿命，结果见表12。

由表12可知：掺有纤维的半柔性路面材料的抗疲劳寿命相较于未掺纤维的有所提高。在相同应力条件下，掺入玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维的半柔性路面材料的抗疲劳寿命分别提高了54.1%、8.2%和26.0%。玄武岩纤维相对于木质素纤维和聚酯纤维，具有更强的抗反复荷载能力。这是因为在反复荷载的作用下，半柔性路面材料从变形到出现裂纹再到断裂的过程中，母体沥青混合料中的纤维提供了拉拔力，能够阻碍变形和裂纹的扩展，从而延长了材料的疲劳寿命。玄武岩纤维的断裂强度更高，提供的拉拔力更大，因此其抗疲劳性能最优。相比之下，木质素纤维半柔性路面的疲劳性能优于聚酯纤维半柔性路面的，这可能是因为木质素纤维具有较强的吸油性，形成的纤维沥青胶浆较多，在沥青混合料中与骨料的桥接作用更强，从而约束了裂缝的产生和扩展。

表12 纤维半柔性路面材料疲劳寿命

Table 12 Fatigue life of fiber semi-flexible pavement materials

荷载/kN	频率/Hz	纤维类型	疲劳寿命/次
6	5	无纤维	16 500
		玄武岩纤维	25 425
		聚酯纤维	17 858
		木质素纤维	20 785

4.5 动态模量研究

采用旋转压实仪成型直径为150 mm、高度为170 mm的圆柱体试件，并向其灌入配制好的早强型水泥灌浆。利用钻机从试件中取直径为100 mm的芯样，并用切割机切除芯样两端，将试件高度控制为(150±2.5) mm。选取常温20 ℃和高温50 ℃、频率10 Hz的动态模量作为试验指标[23]。其结果见表13。

表13 动态模量试验结果

Table13 Dynamic modulus test results

试验温度/℃	频率/Hz	纤维类型	动态模量/MPa
20	10	无纤维	18 068
		玄武岩纤维	14 589
		聚酯纤维	16 123
		木质素纤维	14 951
50	10	无纤维	1 518
		玄武岩纤维	1 820
		聚酯纤维	1 788
		木质素纤维	1 647

由表13可知：在常温20 ℃、频率10 Hz条件下，

掺有纤维的半柔性路面材料的动态模量有所降低，玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维的动态模量分别降低了19.3%、10.8%和17.3%。而在高温50 ℃、频率10 Hz条件下，掺有纤维的半柔性路面的动态模量分别提高了19.9%、17.8%和8.5%。

5　纤维半柔性路面的力学响应

5.1　半柔性路面有限元模型

5.1.1　结构模型参数

对于半柔性路面宏观结构有限元模型，采用的力学假设为：半柔性路面材料、沥青混凝土及其余各结构层为均质、各向同性的弹性体材料，层间接触为完全连续，路表弯沉远小于结构层厚度，路基底部完全固定，土基厚度视为无限大。

纤维半柔性路面材料采用温度为20 ℃、加载频率为10 Hz条件下的动态模量，其他路面材料参数选自文献[24]，见表14。

表14　路面材料参数

Table 14　Pavement material parameters

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
半柔性路面SFP-13	16 000	0.25	2 200
半柔性路面SFP-16	18 000	0.25	2 200
沥青混凝土AC-13	12 000	0.35	2 300
沥青混凝土AC-16	12 500	0.35	2 300
沥青混凝土AC-20	13 000	0.35	2 300
水泥稳定碎石CTB	2 0000	0.20	2 200
石灰土LS	300	0.30	2 100
压实土SG	40	0.40	1 800

5.1.2　模型尺寸及边界条件

模型尺寸取6 m×6 m×6 m，网格尺寸为0.1 m×0.1 m，采用8节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R)，在荷载区域细化网格，共划分单元21 712个。边界条件采用路基底面完全固定，四周侧面水平方向位移约束，垂直方向无约束，路面顶面设置完全自由。荷载作用形式为正弦波。荷载接触面定为双轮组等效荷载，胎压为0.7 MPa。

5.2　半柔性路面层位分析

实际工程中的路面结构配置多样，纤维半柔性路面材料在不同结构层中的性能表现对其实际应用具有重要参考价值。本研究旨在通过对不同结构层的力学响应分析，全面评估纤维半柔性路面材料的综合性能，为工程应用提供科学依据。虽然半柔性路面材料通常用于上面层，但其在其他层位的适用性尚缺乏系统验证。因此，本研究将半柔性路面材料分别应用于上面层、中面层、下面层和全厚式结构，并对比这4种结构的力学响应来确定半柔性路面材料的最佳适用层位。

5.2.1　路面结构层位组合

设置4种路面结构，把半柔性路面材料分别放置在上面层、中面层、下面层以及全厚式(上、中、下面层都是半柔性路面材料)结构，道路结构如图10所示。

5.2.2　计算结果与分析

通过4种结构计算模型，取路面最大弯沉，上面层最大拉应力、拉应变，下表面最大拉应力、拉应变，基层最大拉应力、拉应变进行分析。以结构1为例，路表最大弯沉云图如图11所示，下面层最大拉应力云图如图12所示，下面层最大拉应变云图如图13所示。再通过相同方法取不同路面结构下的力学响应指标，如图14所示。

(1) 对于路面结构1，即半柔性路面材料作为上面层时，发现上表面的拉应力明显高于其他3种路面形式，而下面层和基层受拉应力最小。这是因为半柔性路面材料的刚度较大，导致其上表面承受较高的拉应力；而中面层和下面层使用柔性材料(如AC-20、AC-16沥青混合料)，其弹性模量相对较小，能够更好地分担应力，因此基层和下面层的拉应力较小。为解决上表面的拉应力问题，可以考虑增加上表面半柔性路面材料的厚度。然而，考虑到使用寿命，不宜将其应用于频繁受车辆制动荷载的路段。

(2) 对于路面结构2，即半柔性路面材料作为中面层时，路表弯沉和面层拉应力最大。这是半柔性层上方使用了AC-16沥青层，其较低的模量导致较大的应变。其他应力应变水平均在正常范围内。在这种层位组合下，半柔性层既能承受荷载，又能抵抗变形，从而提高了路面结构的耐久性。

(3) 对于路面结构3，即半柔性路面材料作为下面层时，基层的拉应力最大。基层的拉应力是一个重要的指标，这种结构容易导致基层开裂破坏，裂缝可能向上延伸至面层形成贯穿裂缝，因此这种结构是不利的。

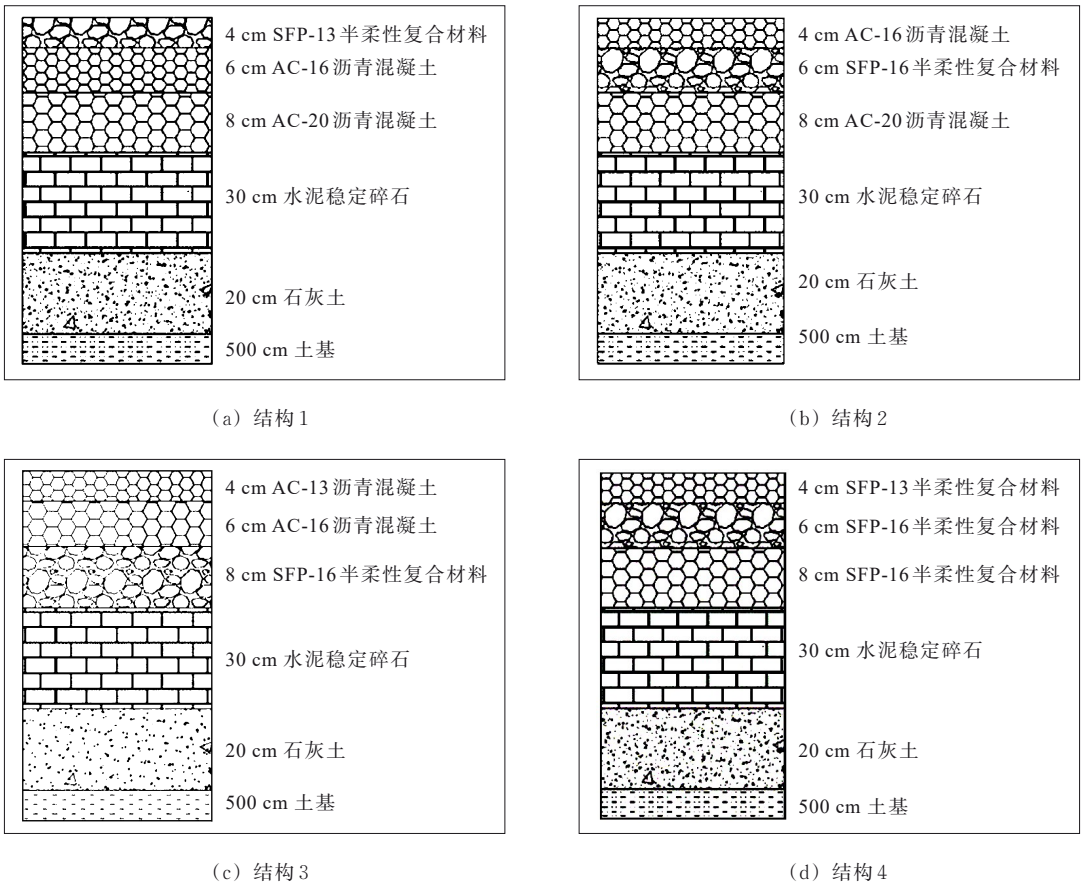

图10 路面结构层位组合

Figure 10 Structure layer combination of pavement

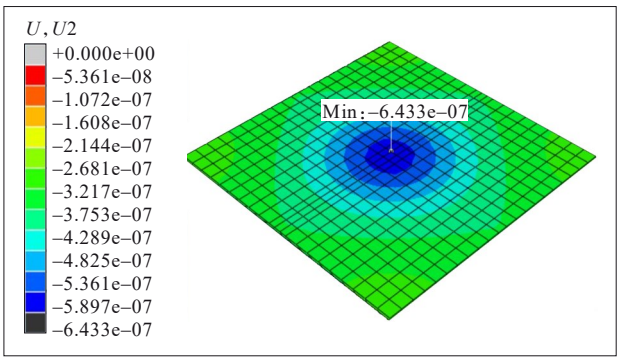

图11 结构1路表最大弯沉云图(单位:m)

Figure 11 Maximum road surface deflection cloud diagram of structure 1 (unit: m)

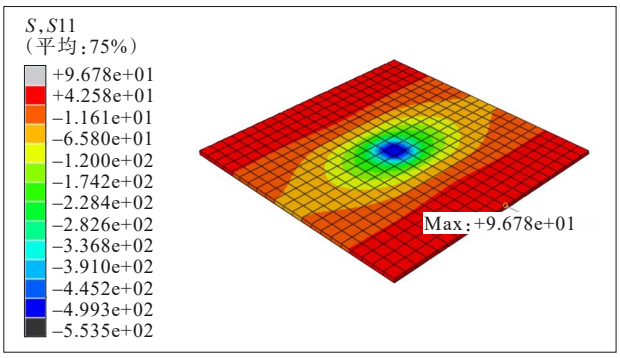

图12 结构1下面层最大拉应力云图(单位:Pa)

Figure 12 Maximum tensile stress cloud diagram of lower layer of structure 1 (unit: Pa)

(4)对于路面结构4,即全厚式结构,因面层整体刚度较大,最大弯沉较小,但面层和基层的拉应力都较大。全厚式路面在车辆制动条件下对最大拉应力的控制效果良好,但容易导致面层和基层开裂。因此,全厚式半柔性路面结构表现并不理想,可能需要与沥青混凝土组合才能获得更好的效果。

5.3 半柔性层模量对路面结构力学响应的影响

路面结构选取结构1进行研究,即半柔性路面材料作为上面层的情况。半柔性路面材料模量取12 000 MPa、14 000 MPa、16 000 MPa、18 000 MPa,其余各层材料参数按表14计算。取上面层、下面层、基层的最大水平拉应力、最大水平拉应变和路表最大弯沉来进行研究分析,结果如图15~17所示。

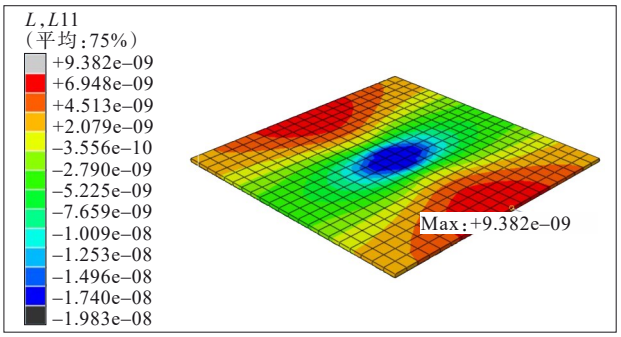

图 13　结构 1 下面层最大拉应变云图

Figure 13　Maximum tensile strain cloud diagram of lower layer of structure 1

从图 15、16 可以看出：随着半柔性路面材料模量的增加，下面层和基层的最大拉应力减小，而上面层的最大拉应力增加，并且增加幅度较大。特别是在重载路段上，半柔性路面的层底拉应力指标对材料模量的敏感性较高。因此，降低半柔性路面材料的弹性模量，可以减小上面层的最大拉应力。从动态模量试验数据可知，常温下掺入纤维的半柔性路面材料的模量会降低，因而延缓路面的疲劳破坏。这说明在常温条件下，掺入纤维的半柔性路面在重载路段上具有一定优势。

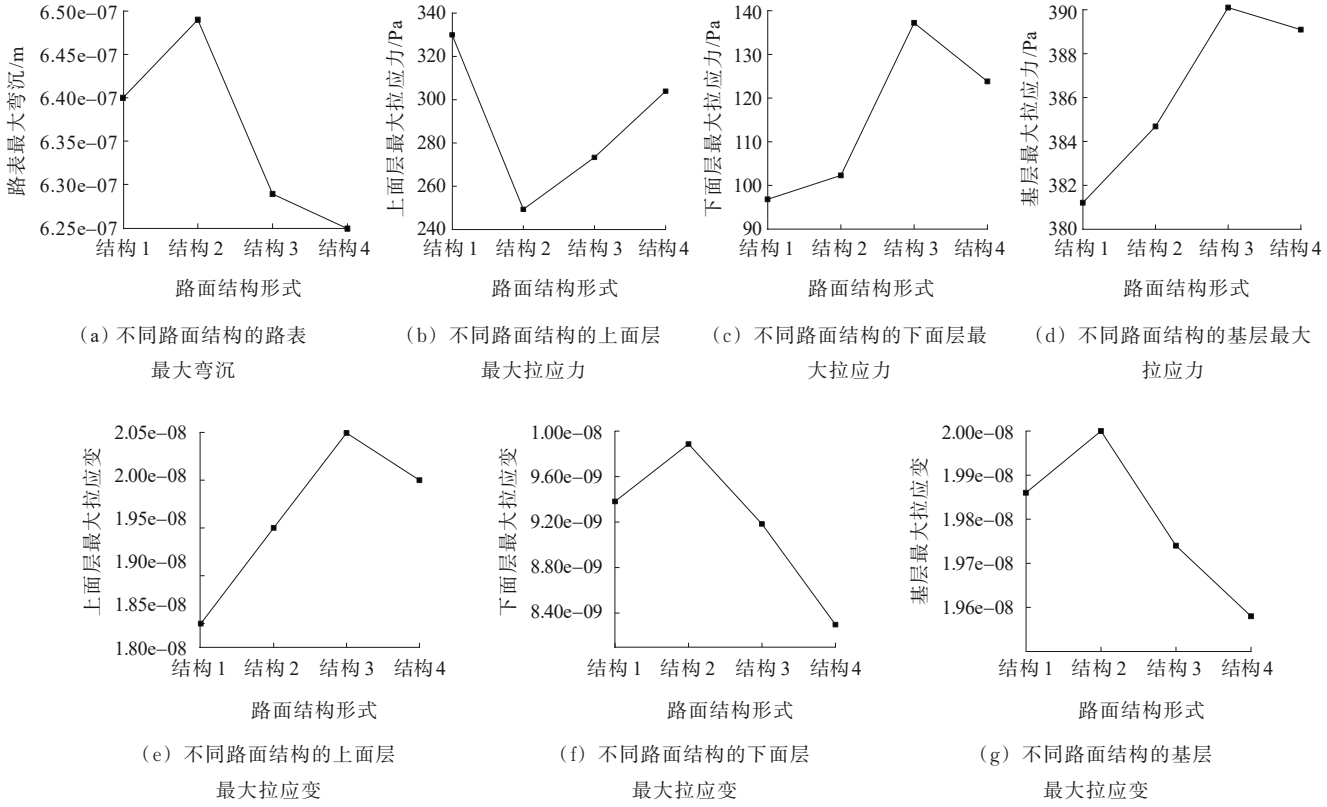

图 14　不同路面结构下的力学响应

Figure 14　Mechanical response under different pavement structures

从图 17 可以看出：随着半柔性路面材料的模量增加，路面最大弯沉逐渐降低。这表明半柔性路面材料的模量增加了路面整体的刚度，提高了其抗车辙能力。在高温条件下，掺入纤维的半柔性路面材料的模量增加，路面的刚度也随之提高，进一步增强了其抗车辙能力。

6　结论

本文利用试验和有限元分析两种方法，探讨了掺入不同纤维对半柔性路面材料路用性能的影响，以及纤维半柔性路面的力学响应，得出以下结论：

（1）根据最佳纤维掺量条件对不同纤维半柔性路面材料进行了一系列试验，包括车辙试验、小梁弯曲试验、冻融劈裂试验和劈裂疲劳试验。结果显示：玄武岩纤维、聚酯纤维和木质素纤维对半柔性路面材料路用性能均有不同程度的增强。特别是玄武岩纤维，在高温性能、低温性能、水稳定性和疲劳性能方面表现最佳，优于其他两种纤维。聚酯纤维在高温稳定性和低温抗裂性能方面优于木质素纤维。

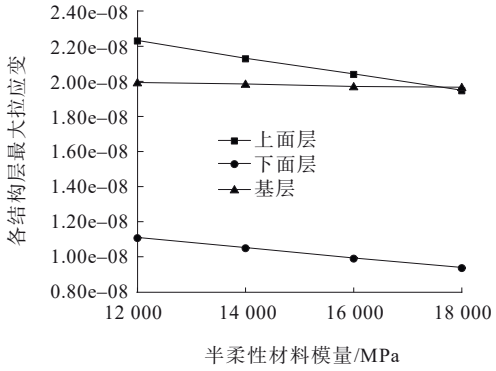

图15 半柔性路面材料模量变化时的各结构层最大拉应变

Figure 15 Maximum tensile strain of each structural layer under changing modulus of semi-flexible pavement materials

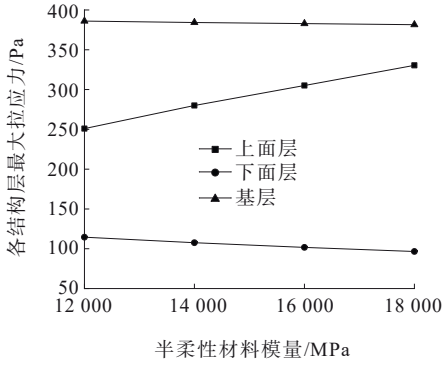

图16 半柔性路面材料模量变化时的各结构层最大拉应力

Figure 16 Maximum tensile stress of each structure under changing modulus of semi-flexible pavement materials

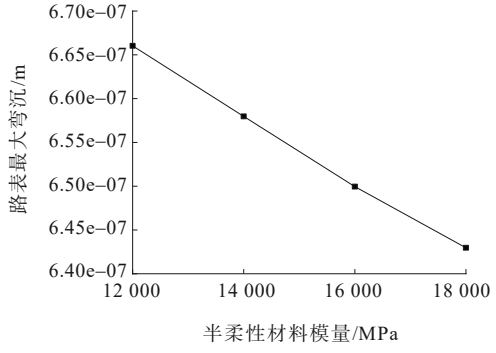

图17 半柔性路面材料模量变化时的路表最大弯沉

Figure 17 Maximum road surface deflection under changing modulus of semi-flexible pavement materials

（2）通过单轴压缩动态模量试验发现，常温下掺纤维半柔性材料的动态模量减小，而高温下增大，这表明纤维的加入改变了半柔性材料的受力模式，并且与温度密切相关。

（3）结构优化分析结果表明：半柔性路面材料应用于上面层和中面层时效果更好，延缓了路面的疲劳破坏。对于重载路段，掺纤维半柔性路面更为适用，尤其在夏季高温时表现出更大的刚度和抗车辙能力。

参考文献：

References：

[1] KIM M J, KIM S, YOO D Y, et al. Enhancing mechanical properties of asphalt concrete using synthetic fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178: 233-243.

[2] KLINSKY L M G, KALOUSH K E, FARIA V C, et al. Performance characteristics of fiber modified hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 747-752.

[3] MOHAMMED M, PARRY T, GRENFELL J J R A. Influence of fibres on rheological properties and toughness of bituminous binder[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 901-911.

[4] ENIEB M, DIAB A, YANG X. Short and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(1): 64-76.

[5] LUO D, KHATER A, YUE Y C, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 377-387.

[6] SLEBI-ACEVEDO C J, LASTRA-GONZÁLEZ P, PASCUAL-MUÑOZ P, et al. Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 756-769.

[7] CAI X, FU L X, ZHANG J Y, et al. Damage analysis of semi-flexible pavement material under axial compression test based on acoustic emission technique[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117773.

[8] MOHAMMED M, PARRY T, THOM N, et al. Microstructure and mechanical properties of fibre reinforced asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 240: 117932.

[9] SLEBI-ACEVEDO C J, LASTRA-GONZÁLEZ P, INDACOECHEA-VEGA I, et al. Laboratory assessment of porous asphalt mixtures reinforced with synthetic fibers[J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 117224.

[10] PIRMOHAMMAD S, MAJD SHOKORLOU Y, AMANI B. Laboratory investigations on fracture toughness of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 226: 106875.

[11] 吴正光，蒋德安，吕阳，等. 玄武岩纤维沥青混合料韧性研究及机理分析[J]. 南京理工大学学报，2015，39(4)：500-505.
WU Zhengguang, JIANG Dean, LYU Yang, et al. Toughness research and mechanism analysis of basalt fiber asphalt mixtures[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(4): 500-505.

[12] 栾利强，余和德，文双寿，等. 玄武岩纤维对聚氨酯改性沥

青混合料水稳定性提升研究[J].化工新型材料,2024,52(5):269-273.
LUAN Liqiang, YU Hede, WEN Shuangshou, et al. Study on the improvement of water stability of polyurethane-modified asphalt mixture by basalt fiber[J].New Chemical Materials,2024,52(5):269-273.

[13] 张楠,郑南翔,高志敏.中空聚酯纤维沥青混合料的热阻及路用性能研究[J].公路交通科技,2018,35(10):19-25.
ZHANG Nan, ZHENG Nanxiang, GAO Zhimin. Study on heat insulating and pavement performance of hollow polyester fiber asphalt mixture[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(10): 19-25.

[14] 彭波.木质素纤维在沥青混合料中的应用[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2005,37(1):104-107.
PENG Bo. Application of methyl cellulose in bituminous mixtures[J].Journal of Xi'an University of Architecture & Technology,2005,37(1):104-107.

[15] 祝云豪,杨晚生,刘群艳,等.基于改进肯塔堡飞散试验的沥青混合料优化设计[J].公路,2023,68(3):49-57.
ZHU Yunhao, YANG Wansheng, LIU Qunyan, et al. Optimal design of asphalt mixtures based on improved cantabro test[J].Highway,2023,68(3):49-57.

[16] 代明欣,杜银飞,孙强.基于灌注饱满度的灌浆路面灌浆材料流动性能调控[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(4):1438-1447.
DAI Mingxin, DU Yinfei, SUN Qiang. Fluidity control of grouting materials in grouting pavement based on grouting saturation degree[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(4): 1438-1447.

[17] 王锐军,李强,商健林,等.拌和用水量和养生时间对泡沫沥青冷再生混合料力学性能的影响[J].林业工程学报,2022,7(2):180-185.
WANG Ruijun, LI Qiang, SHANG Jianlin, et al. Effects of mixed water content and curing time on mechanical performance of cold recycled foamed asphalt mixture[J]. Journal of Forestry Engineering,2022,7(2):180-185.

[18] 吕松涛,陈淇,鲁巍巍,等.沥青混合料低温半圆弯曲试验评价指标研究[J/OL].中外公路,1-15[2024-11-12].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241112.0848.002.html.
LYU Songtao,CHEN Qi,LU Weiwei,et al.Research on the evaluation index of low-temperature semicircle bending test of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway,1-15[2024-11-12].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241112.0848.002.html.

[19] 杨彦海,岳靓,杨野.基于超声波法的冻融作用下冷再生混合料路用性能预测研究[J].森林工程,2023,39(1):140-148.
YANG Yanhai, YUE Liang, YANG Ye. Research on road performance prediction of cold recycled mixture under freeze-thaw based on ultrasonic method[J]. Forest Engineering,2023,39(1):140-148.

[20] 曹忠露,陈平,刘学文,等.不同环境下酸性闪长岩沥青混合料长期水稳性能评价研究[J].中外公路,2024,44(2):75-81.
CAO Zhonglu, CHEN Ping, LIU Xuewen, et al. Evaluation of long-term water stability of acidic diorite asphalt mixtures in different environments[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(2):75-81.

[21] 吴靖江,张聪,吴正光,等.玄武岩纤维沥青混合料高温性能研究[J].公路,2022,67(7):9-13.
WU Jingjiang, ZHANG Cong, WU Zhengguang, et al. Research on high temperature performance of basalt fiber asphalt mixture[J].Highway,2022,67(7):9-13.

[22] 艾长发,邵珠涛,黄杨权,等.外因素作用下沥青路面坑槽修补界面缝疲劳特性试验研究[J].中外公路,2023,43(3):42-46.
AI Changfa, SHAO Zhutao, HUANG Yangquan, et al. Experimental study on interface fatigue characteristics of asphalt pavement pothole patch under external factors[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(3):42-46.

[23] 刘朝晖,杨鑫,黄优,等.基于沥青混合料动态模量主曲线参数的沥青路面结构分析[J].中外公路,2024,44(3):35-45.
LIU Zhaohui, YANG Xin, HUANG You, et al. Analysis of asphalt pavement structure based on master curve parameters of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(3):35-45.

[24] 黄海港,彭妙娟.饱水OGFC沥青路面力学分析[J].中外公路,2020,40(3):48-53.
HUANG Haigang, PENG Miaojuan. Mechanical analysis of saturated OGFC asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(3):48-53.