

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.001

纤维改性沥青混合料性能研究进展

梁波^{1,2},张海涛¹,刘政¹,廖威¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;2.公路养护技术国家工程研究中心,湖南 长沙 410114)

摘要:纤维作为一类沥青混合料添加剂和稳定剂,能有效改善沥青路面的各项性能指标,延长沥青路面的使用寿命。该文通过分析国内外相关文献,总结了纤维改性沥青及沥青混合料的作用机理、纤维掺量对性能的影响及不同类型纤维改性沥青的特点。纤维能有效改善沥青混合料的高温性能、低温性能和疲劳性能,尤其对沥青混合料的抵抗低温和疲劳开裂具有较大的优势。选择合适的纤维长度和掺量、改性纤维的表面结构都能提高纤维的改性效果。纤维复配改性沥青可改善单一改性沥青的部分性能不足的问题,进一步提升沥青混合料的综合性能。纤维改性沥青混合料可全面提升沥青路面的综合性能,为持久耐用的长寿命路面提供技术支持。最后,结合纤维增强作用机理对沥青混合料的性能影响进行分析,给出了后续的研究方向。

关键词:道路材料;纤维;改性沥青路用性能;复合改性;长寿命路面

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

道路技术正从以高速公路为代表的“第四代”道路,向以耐久、绿色、智能为特征的“第五代”智能道路转型发展。国内外新形势对“十四五”公路交通发展提出了新的更高要求。中国公路运输行业的快速发展以及重荷载、多轴次、交通量大的交通特性,普通沥青道路已经无法满足高等级道路的需求。提升路面服役品质与耐久性以及促进绿色公路发展是当前国内外公路工程研究的重点^[1]。沥青路面在实际使用过程中经受着复杂的气候环境和沉重的交通荷载等条件的综合作用,加速了沥青的老化、黏度下降和路面结构变形,导致沥青路面在预计使用年限前发生较多的路面病害,缩短了沥青路面的使用寿命。

为了实现沥青路面长寿命,要求路面“基层长久、路基永久、路面耐久”。纤维是一种改善沥青混合料路用性能的重要改性剂,主要起到加筋、吸附、稳定、增黏的作用,通过改变混合料的材料组成提高其路用性能,是提高路面耐久性、延长道路使用寿命

的有效途径,因此纤维改性沥青混合料在路面工程中得到日益广泛的应用^[2]。纤维可以提高结构沥青的比例,增强集料之间的黏结能力,从而有效控制集料之间的相互滑移,常用于沥青玛蹄脂碎石混合料和开级配表面磨耗层沥青混合料中。相比“湿法”工艺,“干法”工艺制备纤维改性沥青混合料更加简便,且有利于纤维在混合料中分布,大多数关于纤维增强沥青混合料路用性能的实际工程通常使用“干法”工艺施工。《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)对沥青表面磨耗层材料的要求更侧重于功能性,要求路面具有足够的耐久性和高性能。纤维改性沥青的性能主要受纤维长度、纤维掺量、纤维种类和表面特性等因素的影响。不同纤维材料对改善沥青混合料的高温性能、低温性能和疲劳性能具有较大的优势,但纤维在较高掺量下会造成成本增加且纤维在沥青中易团聚,因此,总结纤维改性沥青的作用机理,纤维在沥青及沥青混合料中的合适掺量,以及不同纤维改性沥青的优势与缺陷,对理解和开发新型沥青纤维材料,以及提高纤维改性沥青混合料的路用性能及经济效益具有重要作用。

收稿日期:2023-06-01

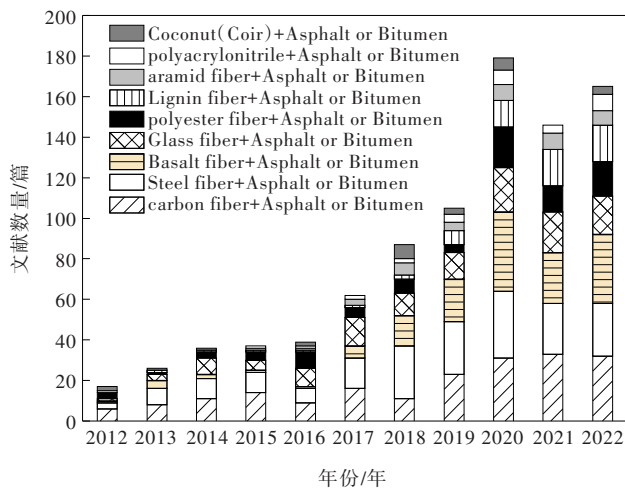
基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2022YFB2602601);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2022JJ30599);湖南省教育厅科学研究项目(编号:21A0199);湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:202003);长沙市自然科学基金资助项目(编号:kq2014106)

作者简介:梁波,女,博士(后),教授.E-mail:Liangbo26@csust.edu.cn

本文主要围绕玄武岩纤维、玻璃纤维、聚酯纤维、木质纤维和芳纶纤维进行总结,分析纤维对沥青及沥青混合料的作用机理及改性效果,对不同纤维改性沥青的优势和存在的问题进行了总结和展望,并总结了纤维复合改性沥青的研究进展。

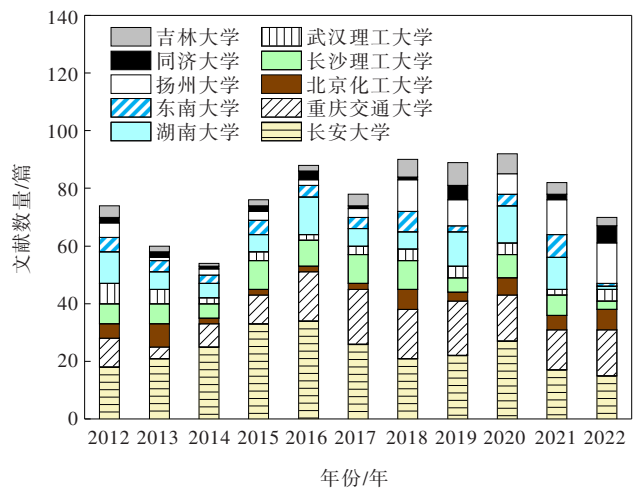
1 纤维改性沥青的主要研究情况

通过 Web of Science 以“纤维类型”与“Asphalt or Bitumen”组合为关键词进行搜索,分析了温拌沥青技术近 10 年的文献研究[图 1(a)]。以“沥青”和“纤维”组合为关键词通过中国知网和中国科学引文



(a) 关键词:不同纤维改性沥青 (Web of Science)

数据库,分析了中国关于纤维改性沥青的主要研究机构近 10 年的研究成果[图 1(b)]。从图 1 可知:为了更好地提高沥青道路的路用性能,国内外学者对不同类型的纤维改性沥青混合料进行了大量研究,纤维改性沥青及沥青混合料的相关学术论文呈逐年递增的趋势。碳纤维、钢纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维、聚酯纤维和木质纤维在沥青及沥青混合料研究中发文数量较多,这 6 种纤维在纤维改性沥青混合料的研究中代表了典型的沥青路面路用纤维。其中,碳纤维和钢纤维可以提高沥青混合料的热导率和导电性,可以应用在路面结构自我修复和自我监控方面^[3-5]。



(b) 关键词:纤维改性沥青 (中国知网和中国科学引文数据库)

图 1 纤维改性沥青的研究情况

2 纤维改性沥青及沥青混合料的作用机理

纤维材料改性沥青混合料的增强作用主要包括阻断、增韧、加筋和吸附的作用。为了研究纤维在沥青混合料中如何发挥增强和增韧效果,现阶段主要采用结构层次理论、复合材料理论、界面理论及断裂力学理论分析纤维改善沥青混合料性能的机理^[6-7]。

2.1 纤维的阻裂作用机理

沥青路面在低温条件下的温度应力及受到外荷载作用时,容易出现开裂的现象,裂缝尖端会产生应力集中,使裂缝不断扩展直至断裂。当沥青混合料中添加了纤维材料时,沥青混合料的开裂现象减少,在纤维的“加筋”作用下,裂缝不会扩展致使沥青混合料断裂。纤维阻裂机理可根据线弹性断裂力学原

理的应力强度因子叠加法进行分析^[7-8]。对于单根纤维而言,当纤维至裂缝尖端的距离为 0 时,纤维阻裂作用产生的应力强度因子趋于无穷大,纤维阻止沥青混合料裂缝扩展的效果十分明显。

根据断裂力学理论可知,沥青混合料存在许多闭合孔隙及小裂缝,在受到温度应力及外部荷载作用时,沥青混合料的内部结构受到损伤,小裂缝扩展至大裂缝且孔隙扩大发展成连通孔隙,导致沥青混合料的整体结构性能下降。当纤维材料加入沥青混合料中,在混合料中形成网络结构,当混合料出现裂纹时,纤维材料在混合料内部起到加筋及阻断作用,可以减缓混合料内部的裂纹进一步扩展(图 2)。

2.2 纤维的吸附作用机理

两相间结合的界面特征将直接影响复合材料的力学特性,分析沥青与纤维材料的界面作用机理具

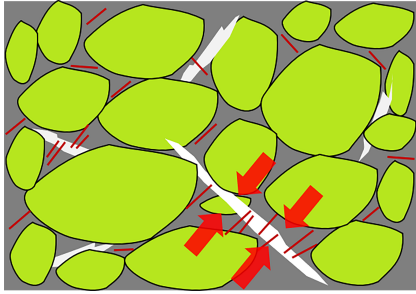


图2 纤维阻裂机理示意图

有重要意义。从微观角度分析,沥青在纤维表面呈现出单分子状排列的特点,会形成一层紧密相连的“结构沥青”界面层^[9]。常用的路用纤维具有较大的比表面积,在沥青混合料中,纤维表面形成的“结构沥青”含量增加,降低了“自由沥青”的含量,增加了沥青胶体的黏度,纤维沥青胶结体附着在集料表面可以增大集料之间的黏聚力^[10],如图3所示。

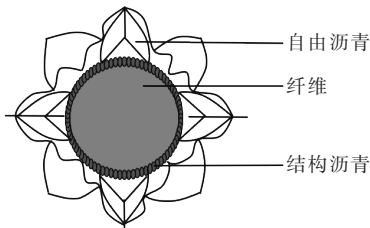


图3 纤维吸附作用机理图

根据界面理论分析可知,纤维随机分散在沥青混合料中形成三维网状结构,纤维表面会完全被沥青包裹,并吸收部分沥青中的轻组分,在物理吸附和交互作用下,沥青与纤维两相之间会形成界面力,增强纤维改性沥青的黏附性,限制了高温条件下沥青的自由流动,有效增强了基体的整体稳定性。

2.3 纤维的加筋作用机理

纤维的强度和模量相比沥青的强度和模量高,纤维加入沥青中可以有效提高沥青混合料的强度,对沥青混合料起到“加筋”的作用。通常采用复合材料理论评价纤维沥青混合料的劲度模量(E_c)和抗拉强度(σ_c),纤维呈无规则三维乱向分布状态分散于沥青混合料中,张攀^[11]综合纤维长度、取向、界面黏结等因素对复合材料理论进行了修正。

根据复合材料理论分析可知,纤维随机分散在沥青混合料中形成三维网状结构,在受到外力作用时能通过界面作用层将力分散到纤维网状结构中,有效避免应力集中造成的破坏,进一步提高沥青混合料的强度^[10]。

2.4 纤维的增韧作用机理

韧性是在受到外荷载作用时材料的抗变形能力。纤维可以有效提高沥青混合料的强度和抗变形能力^[9]。材料的韧性可用应力-应变关系定量描述,通过应力-应变曲线所包围的面积表示^[12]。为了分析纤维增强沥青混合料的拉应力随应变的变化情况,Sobhan等^[13]采用韧性指数定量分析掺入纤维后复合材料的延性和整体韧性的增强机理。

纤维的增韧作用机理与加筋作用机理类似,纤维随机分布在沥青混合料中形成三维网状结构,能有效传递和消散集中应力,当沥青混合料出现裂纹时,网状结构能将受损部分连为一体,阻止裂纹的扩展。同时,纤维间相互作用一定程度上限制了沥青高分子的运动,提高了混合料在高温条件下的自愈合能力^[10]。

3 不同纤维对沥青及沥青混合料性能的影响

不同种类的纤维有明显的优劣性,纤维自身特点、形态、长度、掺量和分散性对沥青及沥青混合料的性能有直接的影响,为了解各种纤维材料对沥青及沥青混合料性能的影响,表1对常用的道路沥青纤维的成本,纤维在沥青及沥青混合料中的掺量及其优缺点进行调查分析。

纤维的形态和纤维对沥青的吸附差异导致在沥青中产生不同效果。Xing等^[38]研究了纤维形态对沥青性能的影响,对比研究絮状纤维和束状纤维改性沥青的性能和机理发现,絮状纤维可以吸附和稳定沥青,而束状纤维可以增强韧性,且纤维对沥青的吸附率越高,沥青胶浆的高温性能越好;Kou等^[39]研究发现,束状纤维能随着掺量的增加逐渐在沥青中形成网状结构,使得沥青黏度和高温稳定性增强,而絮状纤维对沥青的弹性恢复能力和疲劳寿命具有较好的改善效果。

在纤维材料对沥青混合料进行改性时,应根据具体纤维材料研究其在沥青及沥青混合料中的最佳长度和最佳掺量,实现经济效益最大化。表2总结了常用纤维材料改善沥青混合料性能的最佳长度与最佳掺量。纤维的长度和掺量对其分散性具有较大的影响,纤维在沥青混合料中的分散性直接决定了纤

表 1 不同纤维改性沥青性能对比汇总

纤维类型	单价/ (万元·t ⁻¹)	沥青中的纤维 掺量/%	沥青混合料中的 纤维掺量/%	优点	缺点
玄武岩纤维 ^[14-19]	3.00~4.00	2~7	0.20~0.50	力学性能和抗老化性能好;不会变质退化,防潮;耐高温和低温	不易分散;相容性较差,常需表面改性
玻璃纤维 ^[18,20-21]	0.80~1.10	1~4	0.20~0.60	韧性好;强度高;耐高温	不易分散;表面光滑,不利于与沥青黏结,常需进行表面处理
木质纤维 ^[20,22-23]	0.75	1~4	0.20~0.40	高比表面积,提高沥青膜厚度,增加黏度;具有一定的抗氧化作用	不易分散;强度低;易吸水;热分解和抗酸碱腐蚀能力差
聚酯纤维 ^[10,24-26]	1.10	4~8	0.25~0.75	增加混合料的强度和稳定性;提高抗开裂和抗车辙能力	不易分散;成本较高;提高了沥青混合料的油石比
芳纶纤维 ^[18,27-31]	12.00	≥0.4	0.05~0.07	改善抗车辙和抗开裂性能;高疲劳寿命和模量;抗裂纹扩展和断裂韧性	成本较高;惰性强,需改性
碳纤维 ^[3,18,32-35]	29.00	1~2	0.50~1.50	高强度和模量,热稳定性好;提高混合料的导热系数,具有融雪化冰的作用	纤维易团聚;成本较高
聚丙烯腈纤维 ^[33,36-37]	5.00	4~6	0.15~0.45	马歇尔稳定度高,动稳定度高,网状结构稳定	增大沥青用量;成本相对较高

表 2 常用纤维材料改善沥青混合料性能的最佳长度与掺量

纤维种类	最佳纤维 长度/mm	最佳掺量/%			
		高温 性能	低温 性能	水稳 定性	疲劳 性能
钢纤维 ^[42]	—	1~2	1	1	—
碳纤维 ^[35]	4	1	1	1	—
玄武岩纤维 ^[9,19]	6	0.5	0.5	0.3	0.3
玻璃纤维 ^[9,43-44]	12	0.3	0.2	0.4	0.4
木质纤维 ^[9]	—	0.3	0.3	0.3	0.3
聚酯纤维 ^[9,45]	6	0.1	0.1	0.1	0.1
芳纶纤维 ^[46,47]	2	0.3	0.3	0.3	0.3
剑麻纤维 ^[9]	—	0.2	0.2	0.2	—
聚丙烯腈纤维 ^[9]	—	0.3	0.4	0.3	—

纤维改性沥青混合料的性能^[40]。Kou等^[39]为了评价短切玄武岩纤维、木质纤维、聚酯纤维和絮状玄武岩纤维的分散性,将4%的纤维改性沥青溶于三氯乙烯中,筛分干燥得到纤维,将筛分干燥后的纤维与纤维改性沥青的质量比作为分散性指标。结果显示:4种纤维的分散性指标均小于4%,最大偏差均在0.06%~0.13%的可接受范围内;Noorvand等^[41]采用类似的回收方式对不同长度纤维分散性进行评价,结果表明:随着纤维长度的增加,单根纤维的百分比逐渐降低,10 mm、19 mm和38 mm纤维的百分比分别为59%、50%和33%。该方法能定量分析纤维在沥青中的分散性,但取样的随机性误差较大,不能真实地反映纤维在沥青中的分布状态。因此,需要探

索更加科学有效的纤维分散性的评价方法,对纤维的分散性进行科学有效的评价分析。

4 纤维改性沥青混合料的应用研究

在沥青混合料中加入纤维,可以有效提高沥青混合料的路用性能,有效延长沥青路面的使用寿命^[48]。从纤维材料的自身特性入手,介绍几种常用路用纤维的物理力学特性,了解各种纤维材料在沥青及沥青混合料中的应用研究及进展。

4.1 玄武岩纤维改性沥青混合料

玄武岩纤维是以存在于冻结熔岩的火山岩中玄武岩为原料,在1450~1500℃下熔化,制成玄武岩矿物纤维^[49]。长径比大于3的纤维不会引起与石棉导致的致癌或毒性等影响健康的相似问题^[50],玄武岩纤维不存在石棉等矿物纤维威胁人体和环境的情况。相比有机类纤维,玄武岩纤维具有更高的强度、弹性模量、抗老化性能和耐高温等优点,并且可以进行再生利用^[51]。

由纤维的阻裂机理可知,玄武岩纤维能在沥青中形成较好的网状结构,能增大沥青承受荷载应力的能力,尤其对沥青的抗裂性能具有较好的改善作用。马峰等^[52]采用响应曲面法对玄武岩纤维的掺量和长度进行优化设计。纤维长度为6 mm,掺量为

6%是最佳优化方案,在最佳掺量下的混合料的高温性能、低温性能、疲劳寿命和水稳定性得到有效改善。Qin等^[19]研究了不同长度(6 mm、9 mm和15 mm)的玄武岩纤维对沥青性能的影响。6 mm玄武岩纤维与沥青接触面积最大,能在沥青中形成稳定的三维网络结构,能有效地分散应力,抑制沥青裂缝的发展,对沥青的抗裂性能改善效果最明显,纤维掺量范围为5%~7%。

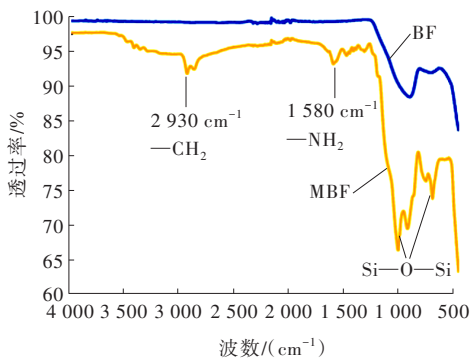
玄武岩纤维具有较大的抗拉强度,可以承受较大的拉力,对沥青混合料的裂纹具有较强的抑制作用。Li等^[53]通过在不同温度(-10℃、-20℃和-30℃)和玄武岩纤维含量(0.2%~0.5%)下对AC-13和AC-20分别进行三点弯曲试验。结果表明:相比不掺纤维的沥青混合料,AC-13在纤维最佳掺量为0.4%时,-20℃的应变能密度(dW/dV)提高了49.5%;

AC-20在纤维最佳掺量为0.3%时,-20℃的应变能密度提高了50.7%。在最佳纤维含量下,-20℃时沥青混合料的低温破坏类型由脆性破坏转变为柔性破坏,玄武岩纤维网络增强了沥青混合料的完整性,延缓了微裂纹的扩展;申爱琴等^[54]为增强防治轻度反射裂缝病害,对玄武岩经编纤维布阻裂性能进行了试验研究。铺设玄武岩经编纤维布可获得较好的抗疲劳性能,沥青混合料的冲击韧性可提升70%以上,抗冲击性能得到大幅度提升。

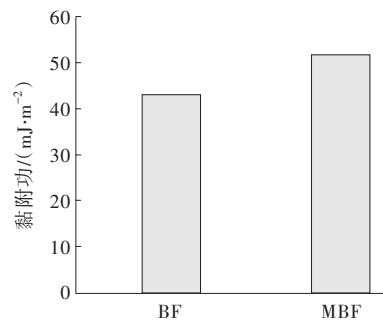
玄武岩纤维在道路工程领域显示出很大的优势,但其界面性能不足使其在沥青混合料中的增强效果充分发挥受到一定限制。Hui等^[55]总结了不同改性剂用于改性玄武岩纤维,其中最常用的改性剂为硅烷偶联剂(KH-550);为提高纤维的加固效果,Liu等^[56]采用KH-550对玄武岩纤维表面进行预处理



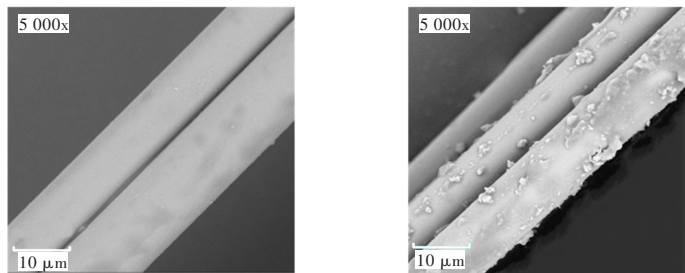
(a) 玄武岩纤维与KH-550的改性机理^[57]



(b) 玄武岩纤维经KH-550改性前后的官能团变化^[57]



(c) 改性前后玄武岩纤维改性沥青的黏附功^[57]



(d) 玄武岩纤维经KH-550改性前后的扫描电镜图^[58]

图4 改性玄武岩纤维改性沥青的研究

和改性。KH-550溶液能显著改善玄武岩纤维的界面性能,在玄武岩纤维表面形成具有稳定化学键的凹凸面,增强其与沥青的黏结力,提高了玄武岩纤维在沥青混合料中的作用;Lou等^[57]研究了KH-550改性玄武岩纤维对黏附性能的影响,如图4所示。红外光谱测试结果显示,改性玄武岩纤维存在—CH₂、—NH₂和Si—O—Si官能团,说明KH-550与玄武岩纤维发生反应,有利于提高纤维与沥青的黏结性能,同时,相比未改性的玄武岩纤维,改性后的玄武岩纤维改性SBS改性沥青的黏附功由42.93 mJ/m²提高至51.64 mJ/m²。KH-550与纤维表面发生聚合反应,使玄武岩纤维表面具有块状、条纹状和鳞片状突起,增加了纤维表面的粗糙度,同时,硅烷薄膜还进一步避免了与外部腐蚀介质的接触,增强了纤维本身的强度和化学稳定性^[58]。经KH-550改性后,玄武岩纤维的极性和非极性组分均得到改善,从而提高了改性玄武岩纤维的表面能,改善纤维表面的润湿性,提高了纤维与沥青的界面附着力,从而增强了沥青的力学性能。

4.2 玻璃纤维改性沥青混合料

玻璃纤维属于无机纤维的一种。玻璃纤维的杨

氏模量接近70 GPa,比沥青混凝土的模量高20倍,在温度为200℃的沥青混合料中玻璃纤维具有化学和热稳定性,在沥青路面施工阶段和服役阶段能更好地发挥纤维的增强效果^[59]。

根据纤维的加筋作用和增韧作用机理可知,玻璃纤维长度对沥青混合料的强度和模量起决定性作用。Zarei等^[44]使用6 mm和12 mm的玻璃纤维改善沥青混合料的性能,结果如图5(a)所示。长度为6 mm的玻璃纤维降低了马歇尔强度,长度为12 mm的玻璃纤维提高了马歇尔强度;郭庆林等^[60]表示玻璃纤维改性沥青混凝土具有更高的临界断裂能量和断裂韧性,基于极限抗拉强度、极限破坏应变、模量、裂缝嘴张开位移、临界断裂能、断裂韧性等指标研究结果,建议在工程应用中纤维长度不宜超过12 mm;Luo等^[61]总结了玻璃纤维掺量为0.2%~0.6%时,可以显著提高沥青混合料的高温抗车辙的能力。因此,在实际工程中,使用玻璃纤维的长度不宜超过12 mm,在沥青混合料中的最佳掺量范围为0.2%~0.6%。

玻璃纤维可以有效改善沥青混合料的高温稳定性和抑制沥青混合料裂纹的扩展。Morea等^[62]研究

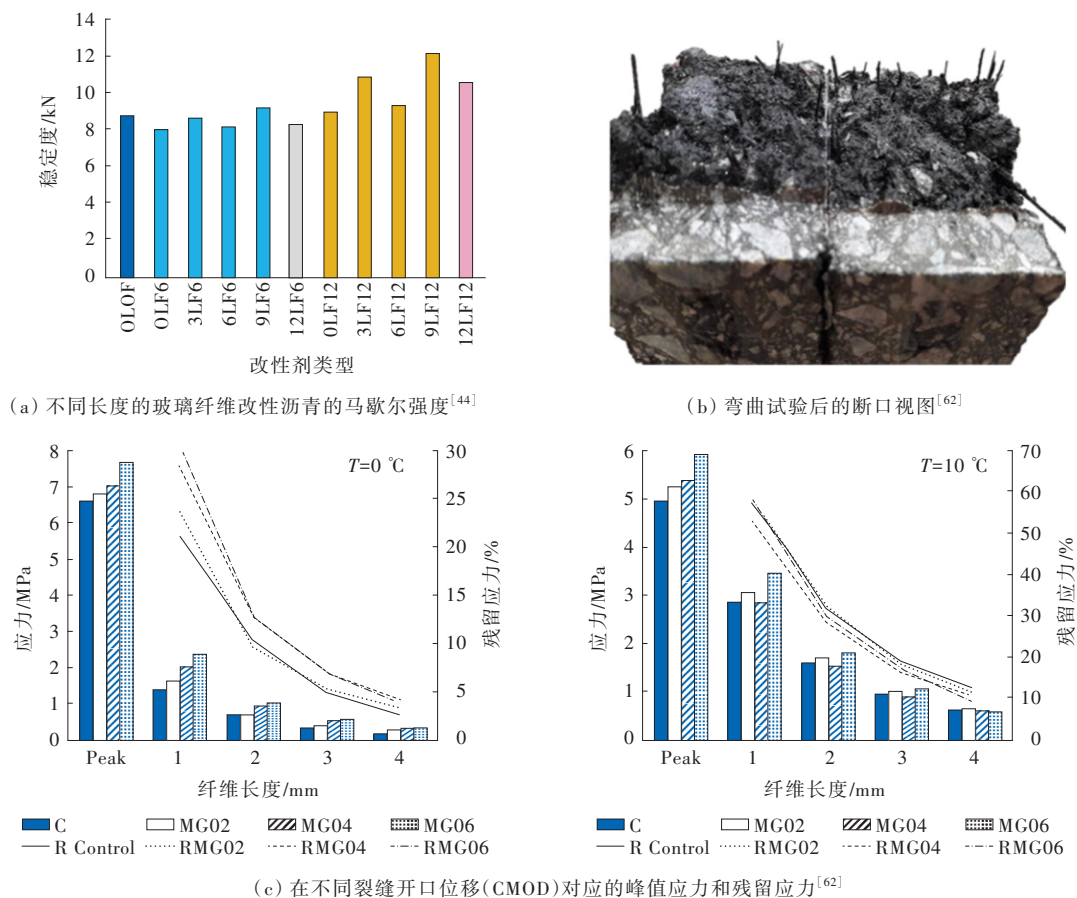


图5 玻璃纤维的长度和掺量对沥青性能的影响

发现,与不含纤维的混合料相比,加入长玻璃纤维(MG)后车辙行为得到了显著改善,永久变形减少了50%。裂缝开口位移(CMOD)越大对应的峰值应力和残留应力越小,且玻璃纤维的掺量越大在低温条件下的阻裂效果越好,如图5(b)、(c)所示,图中RMG表示长玻璃纤维的残留应力。张争奇等^[63]对比分析了环氧沥青封层、SBS改性乳化沥青封层和玻璃纤维沥青封层作为水泥混凝土桥面铺装结构的防水黏结层的路用性能。研究表明:玻璃纤维复配SBS改性沥青玻璃纤维封层时的残留剪切强度比和残留拉拔强度比在85%左右,要远好于SBS乳化沥青封层。玻璃纤维的加入改善了SBS改性沥青的抗剪切性能和黏结性能,极大地提高了抗疲劳性能;Ziari等^[64]采用加入玻璃纤维的方式,解决高掺量旧沥青路面材料(RAP)的再生沥青混合料的低温性能不足的问题。结果表明,当玻璃纤维掺量为0.12%时,随着RAP掺量的增加,沥青混合料在-15℃时的低温抗裂性能没有明显降低,说明玻璃纤维可显著增强沥青混合料的抗裂性和裂纹扩展能力。综上所述,玻璃纤维可以提高沥青混合料的流值、空隙率和马歇尔强度,从而能够防止高温下出现泛油和车辙病害,同时,玻璃纤维具有良好的抗裂缝扩展的能力。

4.3 木质纤维改性沥青混合料

木质纤维是世界上最丰富的可再生资源,主要由35%~55%的纤维素、10%~25%的木质素和20%~40%的半纤维素组成^[65]。木质素纤维加入沥青中,可以有效吸附沥青,增强沥青的热稳定性,延缓路面的断裂,增加沥青的黏度、内聚力、抗拉强度和疲劳寿命。

根据纤维的吸附作用机理分析,木质纤维对沥青具有较好的稳定作用,其形态对沥青的性能具有不同的影响。Xing等^[38]采用布氏漏斗法测试了絮状木质纤维对沥青吸附性的影响,结果显示:木质纤维对沥青的吸附率达到了862.4%,絮状的木质纤维具有较大的表面积且密度较小,对沥青具有较强的吸附能力;Zhang等^[66]研究发现,木质纤维在提高动稳定度方面比木质纤维粉末更有效,而木质纤维粉末改性沥青在改善热裂性能方面更为突出。木质纤维具有较好的吸油特性,可以有效稳定并吸附沥青,防止混合料因沥青含量高而流出,应用在沥青混合料中可以有较好的路用性能^[38,67]。

木质纤维通过吸附作用增加结构沥青在混合料中的比例,与沥青混合料紧密相连,形成网状结构,可有效提高沥青混合料的高温性能,但过高的纤维掺量对低温性能改善效果不佳。Liu等^[68]对比了不掺纤维和掺入1%木质纤维改性沥青混合料的力学性能及其路用性能。相比不掺纤维的沥青混合料,木质纤维改性沥青混合料的马歇尔稳定度、抗压回弹模量和抗压强度分别提高了13.5%、17.4%和20.6%,动稳定度提高了57.6%,最大弯拉应变和劲度模量分别增加了7.3%和8.4%。纤维能有效降低沥青胶黏剂的温度敏感性,改善高温抗车辙能力,但对沥青的低温性能有一定的负面影响;Norgbey等^[69]采用张力迟滞试验探究高掺量(10%)的木质纤维改性沥青在较低温度(-25℃)时的黏度变化,未加入纤维的沥青的对数黏度值为6.016 2 MPa,掺入10%的木质纤维的沥青的对数黏度值为6.221 2 MPa,说明增加木质纤维掺量对沥青的低温性能改善效果不明显;Luo等^[61]总结了木质纤维改性沥青混合料的路用性能,确定木质纤维最佳掺量为0.2%~0.4%。木质纤维的掺量对沥青混合料的影响较大,过高掺量存在纤维易团聚的问题,对低温性能产生不利影响,过低掺量对高温性能改善效果不明显,在实际应用过程中需选择合适的木质纤维掺量进行配合比设计。

4.4 聚酯纤维改性沥青混合料

聚酯纤维是由有机二元酸和二元醇缩聚而成的聚酯经纺丝所得的合成纤维,具有较高的强度与弹性恢复能力,是当前合成纤维的第一大品种。高度致密的结晶结构使其具有较好的疏水性^[70]。由于聚酯纤维吸附自由沥青,使沥青的黏稠度和黏聚力增大,同时加筋和桥接作用,降低了沥青的流动性能,有效改善沥青的高温稳定性;纤维对沥青的吸附作用,导致沥青混凝土中最佳沥青用量增加,使纤维沥青混合料在低温下仍然保持柔韧性和较高的抗拉强度,有效地抵抗收缩应力,减少温缩裂缝的产生,增强沥青混合料的低温抗裂性能。纤维的加筋作用,使沥青混合料的劲度模量增加,改善沥青混凝土的抗疲劳性能,在中国公路建设中得到了广泛的应用^[71]。

聚酯纤维具有较好的稳定吸附和加筋阻裂的效果,在低掺量下能有效提高沥青混合料的力学性能。Alnadish等^[72]采用电弧炉渣代替花岗岩集料,当聚

酯纤维掺量为 0.15% 时,抗疲劳开裂性能提高了 18.97%,可减少 8.7% 的沥青层厚度;王宏^[73]为了改善硬质沥青混合料的抗裂性能,采用添加聚酯纤维的方式改善其柔性和韧性。相比未加纤维的硬质沥青混合料,加入 0.3% 的聚酯纤维使得硬质沥青混合料的最大弯拉应变由 2.267×10^{-3} 提高至 3.431×10^{-3} ,疲劳寿命提高 1 倍以上。聚酯纤维在 0.3%~0.4% 掺量时有效提高了硬质沥青混合料的低温抗裂性和抗疲劳耐久性。

聚酯纤维可以有效改善沥青混合料的低温抗裂性能和抗疲劳性能。Qian 等^[45]探究了不同长度的聚酯纤维对沥青结合料的拉伸性能的影响,当聚酯纤维长度为 6 mm 时,沥青的最大拉应力和破坏拉应变达到峰值,其值分别为 4.35 MPa 和 3%,聚酯纤维改性沥青随着温度降低仍能保持抗拉伸性能,对于沥青的低温抗裂性能具有增强作用;Zhang 等^[74]采用四点弯曲试验对比了木质纤维、玄武岩纤维、聚酯纤维和聚丙烯腈纤维对开级配表面磨耗层(OGFC)沥青混合料疲劳性能的影响,4 种纤维改性沥青混合料的疲劳寿命分别为 71 423 次、79 729 次、81 569 次和 49 837 次,可见聚酯纤维可以有效提升 OGFC 沥青混合料的抗疲劳性能。

4.5 芳纶纤维改性沥青混合料

芳纶纤维是一种高性能和高功能的新型纤维,是由酰胺键直接桥连芳基所构成的直链大分子,在酰胺基中羰基氧与亚胺基中的氢键形成 PAF 分子间作用力,芳纶纤维具有高结晶度、高比强度、高比模量、尺寸稳定性好、耐热、耐化学药品性强等一系列优点^[75]。芳纶纤维是第一种被发现用于高级复合材料中具有足够拉伸强度和模量的有机纤维^[47]。在道路工程领域,芳纶纤维可有效改善沥青及沥青混合料的性能,具有较大的发展前景。

纤维的分散对纤维改性沥青的性能至关重要,纤维长度过长容易使纤维团聚,当其不均匀地分散在沥青结合料中,很大程度地削弱了纤维的改善效果。Xing 等^[76]研究了芳纶纤维长度对沥青结合料性能的影响。如图 6(a)、(b)所示,多重应力蠕变恢复试验结果表明:1 mm、2 mm 和 3 mm 的纤维长度在 3.2 kPa 的应力作用下的可恢复蠕变柔量分别为 0.06%、0.37%、0.79%,说明纤维长度越长对沥青高温条件下的可恢复变形具有积极作用。当纤维含量

为 4% 时,3 mm 的芳纶纤维已成为不均匀的黏性固体,导致无法测量黏度,增加纤维长度和增加纤维掺量均可以提高芳纶纤维改性沥青的黏度,使用低含量的长纤维可以实现高含量的短纤维增强效果;Xing 等^[46]研究发现芳纶纤维在沥青中充分发挥增强增韧的作用,能在沥青结合料中起到重要的应力传递和纤维增强作用,长度为 2 mm 的芳纶纤维具有最佳的增强效果。由此可见,纤维的长度过长不易在沥青中分散且充分发挥纤维的增强效果,提高纤维改性沥青混合料的性能应根据不同纤维类型研究最佳纤维长度与最佳掺量。

芳纶纤维能有效提高沥青混合料的路用性能,延长沥青路面的使用寿命。Klinsky 等^[27]表示在 HMA 中使用芳纶纤维可以提高沥青混合料的路用性能,以防止出现车辙、松散、疲劳和反射裂缝等常见问题;Saliani 等^[47]认为纸浆芳纶纤维(PAF)加入沥青混合料中可以提高沥青的用量,加入 0.3% 的纸浆芳纶纤维的沥青混合料表现出较好的疲劳性能和低温性能。如图 6(c)所示,对照组的 ϵ_6 的值为 $78 \mu\text{m}/\text{m}$,PAF 改性沥青混合料的 ϵ_6 的值为 $83 \mu\text{m}/\text{m}$,在相同的应变水平作用下,纸浆芳纶纤维改性沥青混合料表现出更长的疲劳寿命。

在 -18°C 的间接拉伸试验中,纤维改性沥青混合料和对照组的第二阶段断裂功分别为 $1153.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $464.9 \text{ N}\cdot\text{m}$,说明纸浆芳纶纤维有助于提高混合物在低温下的延展性。Ziari 等^[77]将 0.025%、0.05% 和 0.075% 三种掺量的聚烯烃-芳纶纤维加入到热拌沥青混合料中,采用动态蠕变试验、轮辙试验、间接拉伸疲劳试验和半圆弯曲试验评估沥青混合料的车辙性能、疲劳性能和抗开裂的性能。随着纤维含量的增加,抗车辙和抗开裂性能逐渐提高,纤维添加量达到 0.05% 时,疲劳性能得到提高,然后随着纤维用量的增加而趋于平稳。因此,芳纶纤维对沥青混合料的高温抗车辙性能、低温抗开裂性能和疲劳性能具有较好的改善效果。

综上所述,纤维可以有效提高沥青混合料的高温性能、低温性能和疲劳性能,适当长度的纤维对沥青混合料的裂纹扩展具有较强的抑制作用。结合纤维改性沥青的作用机理进行分析,对纤维材料的选择与研发具有重要意义。

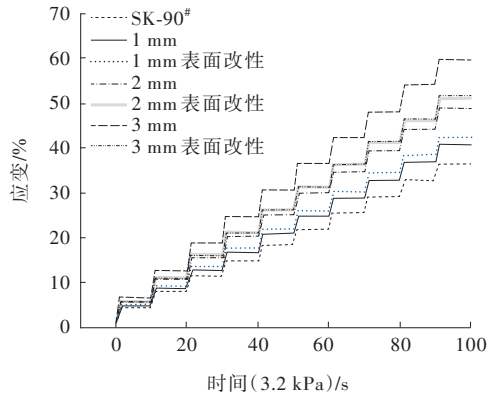
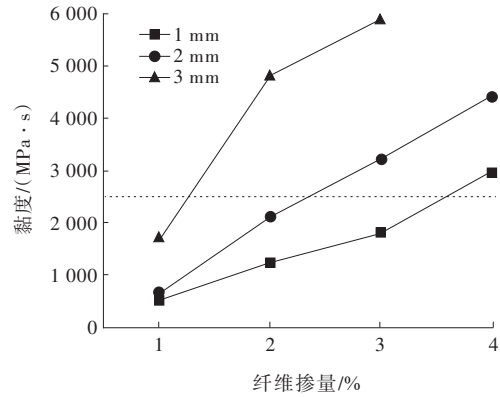
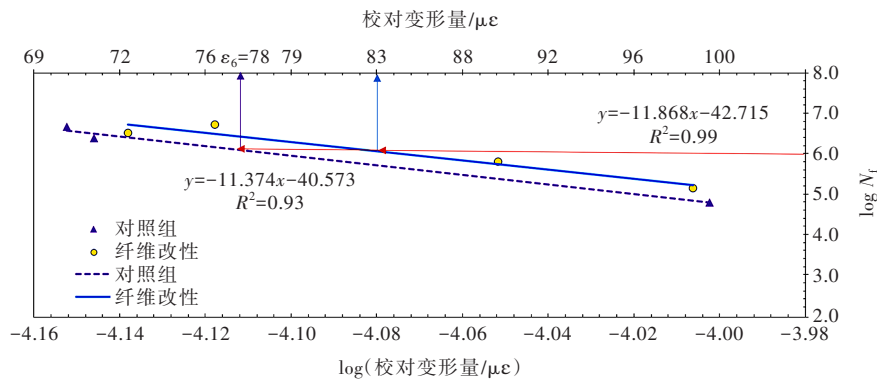
(a) 不同长度的芳纶纤维改性沥青的多重应力蠕变恢复试验^[76](b) 芳纶纤维长度和掺量对沥青黏度的影响^[76](c) 对照组和PAF改性沥青混合料的Wöhler曲线^[47]

图6 芳纶纤维改性沥青的性能研究

5 纤维复合改性沥青的应用研究

单一改性沥青较难同时兼顾沥青及沥青混合料的各项性能,不同类型的纤维复合改性沥青是目前发展的主要方向。对于改性沥青的力学性能、抗疲劳性能、水稳定性和抗老化性能等性能不足的问题,纤维的加入可进一步提升改性沥青的综合性能,延长路面的使用寿命,降低养护成本。

5.1 纤维与SBS的复合改性

SBS改性沥青因其优良的性能广泛应用在高等级公路中。在路面的使用过程中,会受到光、水和热因素的影响,导致SBS改性沥青与集料的黏结性能下降,路面出现各种病害,影响路面的使用寿命。纤维材料复合SBS改性沥青能保持SBS改性沥青优异性能,同时能进一步增强沥青的强度和黏度等,能有效应对中国公路运输行业重荷载和交通量大等交通特性的发展要求。根据界面理论可知,纤维与SBS

改性沥青两相间结合的界面特征将直接影响复合改性沥青的力学特性,分析纤维材料与SBS改性沥青的界面作用机理具有重要意义。Li等^[78]采用聚多巴胺仿生涂料和硅烷偶联剂(KH-570)复合改性聚丙烯腈(PAN)纤维[图7(a)],将改性后的纤维加入SBS改性沥青中,探究改性和未改性纤维对SBS改性沥青性能的影响。测试结果表明:复合改性后的聚丙烯腈纤维(KD-PAN)与SBS改性沥青的黏附功比未改性纤维(PAN)的高25%。由图7(b)可知: PAN与SBS改性沥青之间的附着力较差,因此附着不够紧密,沥青浸润效果较差。图7(c)为PAN经KH-570和聚多巴胺改性后的KD-PAN改性沥青扫描电镜图,纤维表面变得更粗糙并引入亲油基团,增强了改性纤维与SBS改性沥青的附着力。Miao等^[79]探究了纤维增强塑料(FRP)、两种类型的木质素纤维和玄武岩纤维分别对SBS改性沥青黏附功的影响。无水条件下沥青-纤维界面在25℃下的黏附功分别为35.980 MJ/m²、44.041 MJ/m²、42.120 MJ/m²和46.919 MJ/m²。玄武

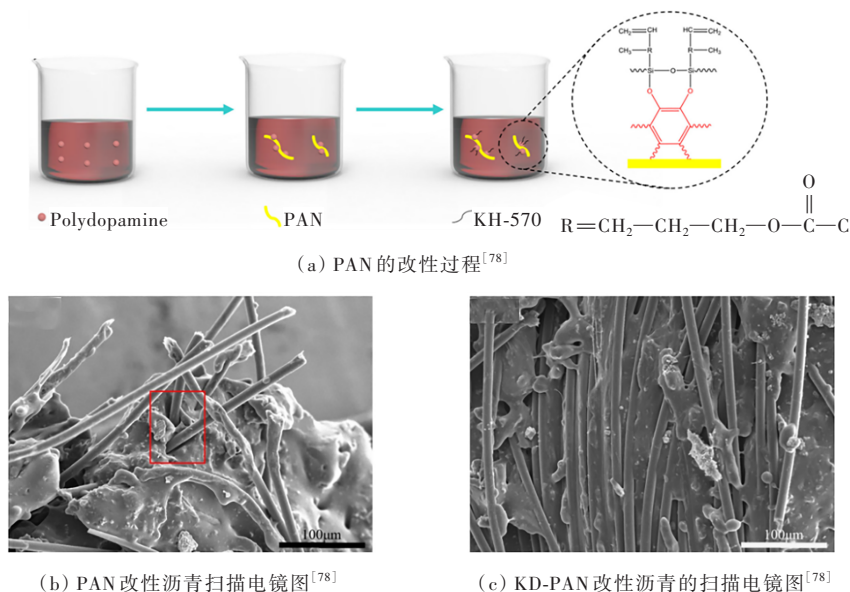


图7 PAN纤维改性机理及其改性沥青的形貌

岩纤维对SBS改性沥青的黏附性能增强效果最好,其次是两种木质素纤维和FRP。由此可知,纤维材料与SBS改性沥青具有较好的界面性能,从而增强改性沥青的黏附性能。

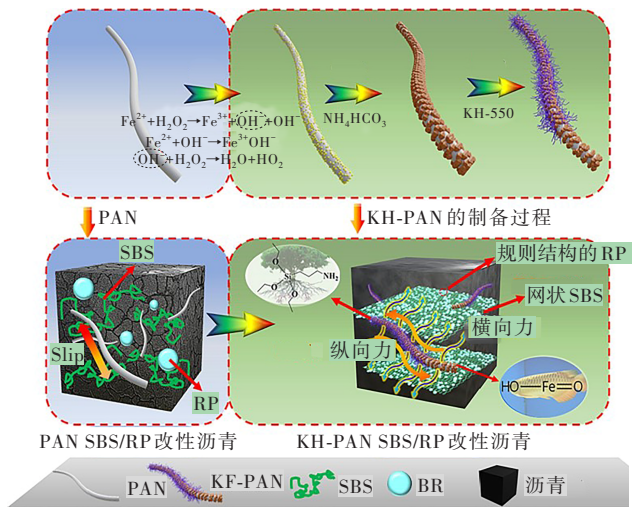
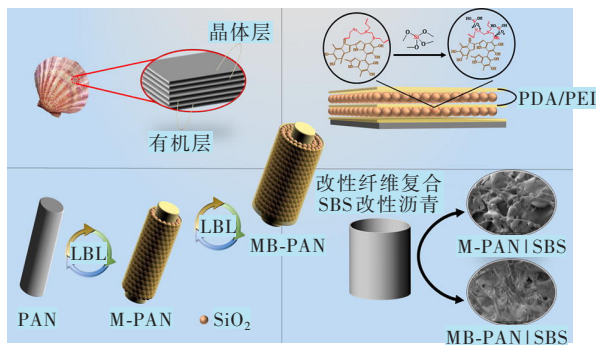
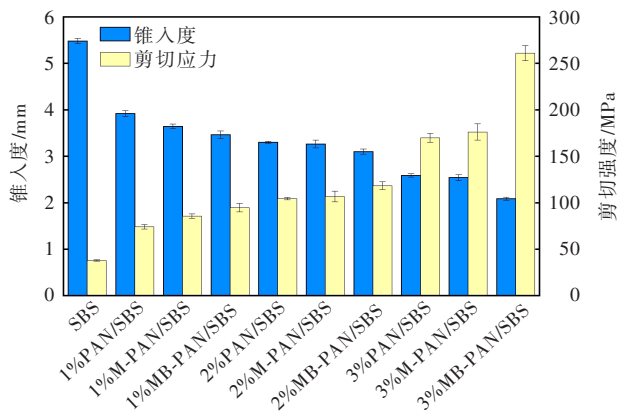
基于仿生原理对纤维材料进行改性可以进一步增强纤维材料与改性沥青的界面性能。Ren等^[80]利用Fenton反应制备具有鱼鳞晶须状仿生分级结构的表面改性聚丙烯腈纤维(KF-PAN),将该纤维用于增强SBS/胶粉改性沥青。如图8(a)所示,在Fenton反应中, Fe^{2+} 分解作为氧化蚀刻剂,使PAN纤维表面被氧化,从而产生大量表面的活性位点。纤维表面的活性位点为KH-550形成的纳米片和晶须状结构的原位生成提供了平台,最终在该活性位点下原位生成了拟鱼鳞晶须状结构。性能试验结果表明,在纤维表面生成的仿生层结构在沥青内部的应力缓冲和隔热网络结构中发挥了出色的作用,减轻了SBS/RP改性沥青中的应力集中和积累,从而增强了KF-PAN/SBS/RP改性沥青的黏弹性和抗车辙性能,同时使改性沥青具有高温稳定性、低温抗断裂性能和抗疲劳性能。Xing等^[81]也对聚丙烯腈(PAN)纤维进行构建仿生多级结构,采用聚多巴胺/聚乙烯亚胺分层组装仿生涂层和纳米二氧化硅,如图8(b)所示。改性后的纤维与SBS进行复合改性制备成复合改性沥青,仿生多级层次结构增强了纤维材料的界面性能,纤维形成的网状结构可以更好地将沥青黏附在纤维上。如图8(c)所示,相比未改性的PAN纤

维和一次改性的M-PAN纤维,经过二次改性的MB-PAN纤维的表面更粗糙,纤维与沥青的机械咬合阻碍了沥青的流动,使得MB-PAN/SBS改性沥青表现出最低的锥入度和最高的剪切强度。

纤维复合SBS改性沥青是制备高黏度改性沥青的有效途径之一,在排水型和超薄磨耗层等对黏度有较高要求的沥青混合料中具有重要的研究意义。Li等^[82]为改善排水型SBS改性沥青混合料的路用性能,采用玄武岩纤维复合SBS制备排水型改性沥青混合料进行研究。结果显示:纤维在混合物中不规则分布,形成三维网络结构,具有串联骨架功能,提高了排水型沥青混合料的高低温性能和水稳定性;Zhao等^[83]采用高含量的SBS与微碳纤维(MCF)制备超薄磨耗层沥青混合料,与5%SBS改性沥青混合料相比,6%SBS+0.8%MCF复合改性沥青混合料的动稳定性、低温破坏应变和冻融劈裂强度比分别提高了48.7%、24.7%、5.2%,疲劳性能提高了32.2%;Mokhtari等^[84]采用力学-经验法分析矿物纤维、纤维素纤维和SBS改性沥青混合料的使用寿命分别为未改性的1.070倍、1.081倍和1.243倍。高黏度改性沥青制备的功能型沥青路面有助于增加路面使用寿命,减少路面大修,节约资源,响应国家“双碳”政策,具有重要的生态环境价值和工程应用意义。

5.2 纤维与环氧树脂复合改性

环氧沥青是以环氧树脂为改性剂加入沥青中,

(a) KF-PAN对改性沥青的作用机理^[80](b) PAN纤维改性机理^[81](c) 复合改性沥青的锥入度和剪切力^[81]**图8 PAN改性沥青改性机理及其复合改性沥青的剪切强度**

在固化剂的作用下发生固化反应形成不可逆的固化物,从根本上改变了沥青的热塑性行为^[85]。在低温条件下,高模量的环氧沥青混合料会产生较大的温度应力,容易引起开裂。采用加入纤维的方法可以提高环氧沥青混合料的低温抗裂性能和耐久性。

为了解决环氧沥青在高寒地区抗裂性能不足的问题,Xue等^[86]使用玄武岩纤维改性环氧沥青。当纤维含量从0变为9%时,在-20℃失效时弯曲应变的

振幅增加为55.2%,提高了环氧沥青的低温抗裂性。当纤维含量约为9%时,弯曲强度和破坏时弯曲应变都达到峰值,此时混合料具有良好的抗疲劳开裂能力。钱振东等^[87]将环氧沥青与不同掺量的短切玄武岩纤维进行改性,当纤维含量为4%时,环氧沥青的抗弯拉强度、最大弯拉应变和弯曲应变以及抗断裂延伸率分别提高22.5%、18.9%、47.1%和9.3%,具有较好的低温抗裂性和抗疲劳开裂性能,且玄武岩纤维改性剂对环氧沥青黏度的影响较小。

张婧丽^[88]研究了玄武岩纤维对环氧沥青的疲劳性能和低温性能的影响。当纤维掺量为6%时,玄武岩纤维改性环氧沥青比普通环氧沥青的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了18.9%和49.0%,普通环氧沥青混合料的极限弯曲应变增大了46.81%,玄武岩纤维改性环氧沥青混合料的疲劳方程的斜率绝对值减小了13.5%,截距增大了4.6%。说明玄武岩纤维增强了环氧沥青的拉伸强度和抗变形能力,提高了破坏强度,阻止裂纹长度的扩展,同时增大了环氧沥青混合料的疲劳寿命;王水^[89]采用低温弯曲试验和三分点加载疲劳试验分析了聚酯纤维对环氧沥青低温性能和疲劳性能的影响。聚酯纤维掺量为3%时,聚酯纤维改性环氧沥青混合料破坏时弯拉应变比普通环氧沥青混合料增大了20.4%,K值疲劳曲线的线位达到最高,其值为36 843 408,说明聚酯纤维对环氧沥青混合料的低温性能和疲劳性能有较好的改善作用。

5.3 纤维与天然沥青的复合改性

天然沥青常作为一种改性剂用于改善基质沥青的性能,主要有岩沥青和特立尼达湖沥青(TLA),改性后的沥青面临低温抗开裂性能不足的问题。何东坡等^[90]针对岩沥青低温性能不足的问题,采用玄武岩纤维进行复合改性。通过DSR和BBR试验,计算出沥青高低温连续分级温度 T_{LH} 和 T_{LC} 。加入6%玄武岩矿物纤维和4%伊朗岩沥青复合改性对基质沥青的连续分级温度区间跨度最大, T_{LH} 可达74.04℃, T_{LC} 可达-27.48℃,高低温综合性能最佳,并能够分散均匀;Maharaj等^[91]评估了添加不同长度(从2.5 mm到10 mm)和高达8%掺量的椰壳纤维对TLA和特立尼达石油沥青(TPB)流变性能的影响。与未改性的TLA相比,添加6%的2.5 mm椰壳纤维使得复数模量增加了7.3倍以及相位角的显著降低(从49.3°降低至19.8°)。与未改性的纯TPB相比,添

加 6% 的 2.5 mm 椰壳纤维后,复数模量增加了 5.4 倍,相位角从 86.2°降低到 47.4°。表明椰壳纤维改性天然沥青可以有效增强抗永久变形能力和提高天然沥青的弹性;Wang 等^[92]为了改善高模量沥青混合料的低温抗裂性能和耐久性,采用 TLA 与聚酯纤维复合的方法获得高模量沥青混合料。TLA 添加量为 30% 时,复合材料改性沥青混合料的疲劳寿命提高 67%。随着 TLA 含量的增加,高模量沥青混合料的抗弯拉强度、最大弯曲应变和破坏应变能均呈现先增加后降低的趋势,确定最佳配比为 30% TLA + 0.3% 聚酯纤维。

5.4 不同纤维复合改性沥青混合料的路用性能

构建长寿命路面需要具有优异的抗车辙性能

和抗疲劳性能的高模量沥青混合料,但低温抗开裂性能差成为影响高模量沥青混合料应用和发展的重要因素,采用纤维材料进行补强是一种有效的改性措施^[93]。纤维与硅藻土复合改性沥青^[94-95]、纤维与橡胶复合改性沥青^[96-98]和复掺纤维改性沥青^[99-100]等复合改性技术的案例已经陆续推出,表 3 总结了不同纤维复合改性沥青混合料的低温性能和疲劳性能的研究^[101-108]。纤维可以进一步改善环氧沥青、天然沥青等改性沥青的低温性能和疲劳性能不足的问题,因此,结合中国实际,根据不同改性沥青的性能缺陷,添加合适纤维材料可以进一步提高改性沥青混合料的耐久性,有利于延长沥青路面的使用寿命。

表 3 不同纤维复合改性沥青混合料的路用性能

改性沥青	纤维类型	参考文献	纤维掺量/%	级配类型	纤维长(mm)径(μm)比	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	低温性能		疲劳寿命/次
							抗弯拉强度/MPa	最大弯曲应变/με	
玄武岩纤维		[88]	6.00	AC-10	7:12	2 898	36.73	3 787.30	2 354 860
		[101]	0.20	AC-13	5:16	5 867	5.20	2 465.00	—
		[89]	3.00	—	—	—	31.17	4 705.42	—
环氧沥青	聚酯纤维	[102]	0.30	—	6:20	—	37.30	3 281.30	19 854
		[101]	0.20	AC-13	5:20	5 234	4.70	2 539.00	—
	聚丙烯纤维	[101]	0.20	AC-13	5:20	5 532	5.00	2 387.00	—
	纳米黏土纤维	[103]	0.50	AC-10	—	—	31.70	2 348.00	—
	木质纤维	[104]	0.35	AC-13	4:41	3 143	12.45	3 523.69	110 932
天然沥青	聚酯纤维	[104]	0.35	AC-13	5:19	4 326	13.46	4 903.02	140 983
		[105]	0.03	SMA-13	—	—	12.92	3 682.54	—
玄武岩纤维		[104]	0.35	AC-13	5:14	4 879	12.89	4 431.30	183 276
		[106]	8.00	AC-13	6:10	5 043	12.62	4 212.00	—
硅藻土改性沥青	木质纤维	[107]	0.30	AC-16	1.1:45	—	9.33	2 761.90	—
橡胶改性沥青	木质素纤维	[108]	0.30	SMA-13	—	5 480	14.17	3 473.47	8 283

6 结论

纤维作为沥青及沥青混合料的重要改性剂,可以有效改善沥青混合料的路用性能,提高沥青路面的耐久性。总结纤维改性沥青的作用机理以及不同纤维改性沥青的优势与缺陷,对理解和开发新型纤维改性沥青材料,提高纤维改性沥青混合料的路用性能及经济效益具有重要作用。本文分析了纤维改

性沥青及沥青混合料的研究现状,结合纤维增强作用机理对沥青混合料的性能影响进行研究分析,给出了后续的研究方向:

(1) 研究纤维在沥青中的低温抗开裂和抗疲劳开裂的作用机理,提高与沥青的界面性能从而对力学性能进行增强,在今后研究中对研发及应用新型纤维材料具有重要意义。

(2) 纤维的结构特征对沥青及沥青混合料的性能有不同的改善效果,纤维在沥青及其混合料中易

团聚的问题亟须解决,提高纤维在沥青中的分散效果,充分发挥其力学性能。

(3) 提高纤维与沥青的界面性能与相容性,探索新型纤维表面改性技术对降低纤维掺量和增强沥青的性能,延长路面的使用寿命,降低养护成本,符合当前社会经济、环境可持续发展的要求。

(4) 利用人工智能方法和大数据手段深入分析各类数据之间的联系,深入研究材料的结构内部性能,对路面破坏的源头进行直观表征和分析,为路面材料的优化设计提供科学依据,预测改性沥青路面的性能和寿命。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴金荣,孙娣,张经双,等.氯盐对纤维沥青混凝土马歇尔试验影响[J].科学技术与工程,2016,16(34):261-263,275.
- [3] WANG Z G, DAI Q L, PORTER D, et al. Investigation of microwave healing performance of electrically conductive carbon fiber modified asphalt mixture beams[J]. Construction and Building Materials,2016,126:1012-1019.
- [4] WANG H P, YANG J, LIAO H, et al. Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers[J]. Construction and Building Materials,2016,122:184-190.
- [5] LIU Q T, SCHLANGEN E, VAN DE VEN M, et al. Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test[J]. Construction and Building Materials,2012,29:403-409.
- [6] 倪良松,陈华鑫,胡长顺,等.纤维沥青混合料增强作用机理分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2003,26(5):1033-1037.
- [7] 封基良.纤维沥青混合料增强机理及其性能研究[D].南京:东南大学,2006.
- [8] 苟家正,封基良.纤维增强沥青混合料低温性能及增强机理试验[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(7):45-49.
- [9] 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.
- [10] 凡涛涛.CSW-聚酯纤维复合改性沥青及沥青混合料性能研究[D].西安:长安大学,2020.
- [11] 张攀.纤维在沥青混合料中的加筋效果评价研究[D].西安:长安大学,2014.
- [12] KIM Y R, LITTLE D N. Linear viscoelastic analysis of asphalt mastics[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004,16:122-132.
- [13] SOBHAN K, KRIZEK R J. Fatigue behavior of fiber-reinforced recycled aggregate base course[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,1999,11:124-130.
- [14] CELAURO C, PRATICO F G. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses[J]. Construction and Building Materials,2018,170:245-253.
- [15] HAO L C, YU W D. Evaluation of thermal protective performance of basalt fiber nonwoven fabrics[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2010,100:551-555.
- [16] XIANG Y, XIE Y J, LONG G C. Effect of basalt fiber surface silane coupling agent coating on fiber-reinforced asphalt: From macro-mechanical performance to micro-interfacial mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2018, 179:107-116.
- [17] 程永春,毕海鹏,马桂荣,等.纳米TiO₂/CaCO₃-玄武岩纤维复合改性沥青的路用性能[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(2):460-465.
- [18] 周嘉博.基于玻璃纤维及微米级颗粒填料的环氧沥青混凝土增强试验研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [19] QIN X, SHEN A Q, GUO Y C, et al. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers[J]. Construction and Building Materials,2018,159:508-516.
- [20] 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.
- [21] 许淳.玻璃纤维-硅藻土复合改性沥青混凝土性能研究[D].长春:吉林大学,2010.
- [22] KADLA J F, KUBO S, VENDITTI R A, et al. Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications[J]. Carbon, 2002,40(15):2913-2920.
- [23] 吴萌萌.纤维沥青胶浆及其混合料路用性能研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2015.
- [24] MCDANIEL R S. Fiber additives in asphalt mixtures[J]. NCHRP Synthesis of Highway Practice,2015.
- [25] 董洲,吴建铨,沈风华,等.聚酯纤维改性沥青路面的研究进展[J].合成纤维工业,2007,30(1):51-54.
- [26] 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,2020,2020:1-7.
- [27] 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.

- [28] NOORVAND H, SALIM R, MEDINA J, et al. Effect of synthetic fiber state on mechanical performance of fiber reinforced asphalt concrete[J]. *Transportation Research Record*,2018,2672(28):42-51.
- [29] ABTAHI S M, SHEIKHZADEH M, HEJAZI S M. Fiber-reinforced asphalt-concrete: A review[J]. *Construction and Building Materials*,2010,24(6):871-877.
- [30] ALIHA M R M, RAZMI A, MANSOURIAN A. The influence of natural and synthetic fibers on low temperature mixed mode I+II fracture behavior of Warm Mix Asphalt (WMA) materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 182: 322-336.
- [31] 封基良,和昆,李俊锋. 聚合物增强纤维与沥青及沥青胶浆界面粘结性能研究[J]. *中外公路*,2011,31(6):249-253.
- [32] YANG Z X, ZHANG Y, SHI X M. Impact of nanoclay and carbon microfiber in combating the deterioration of asphalt concrete by non-chloride deicers[J]. *Construction and Building Materials*,2018,160:514-525.
- [33] 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.
- [34] BIJWE J. Composites as friction materials: Recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials: A review[J]. *Polymer Composites*, 1997, 18: 378-396.
- [35] 刘莉萍,杜婷,王慧颖,等. 短切碳纤维改性沥青混合料及其路用性能研究[J]. *公路*,2022,67(8):64-68.
- [36] YAO L Y, HU Y P, MA Q, et al. Stability of asphalt binder and asphalt mixture modified by polyacrylonitrile fibers[J]. *Advanced Materials Research*,2011,228-229:242-247.
- [37] CHEN H X, XU Q W, CHEN S F, et al. Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures[J]. *Materials and Design*, 2009,30:2595-2603.
- [38] XING X Y, CHEN S H, LI Y, et al. Effect of different fibers on the properties of asphalt mastics[J]. *Construction and Building Materials*,2020,262:120005.
- [39] KOU C J, CHEN Z K, KANG A H, et al. Rheological behaviors of asphalt binders reinforced by various fibers[J]. *Construction and Building Materials*,2022,323:126626.
- [40] 徐秀维. 聚酯纤维对沥青混凝土路用性能的贡献研究[J]. *中外公路*,2013,33(5):206-310.
- [41] NOORVAND H, MAMLOUK M, KALOUSH K. Evaluation of optimum fiber length in fiber-reinforced asphalt concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(3): 49401-49412.
- [42] 杨硕,解长渊,聂佳佳. 钢纤维掺量对钢渣沥青混合料路用性能影响研究[J]. *公路工程*,2019,44(6):223-227.
- [43] 蒋梦雅,刘頔楠,卢峰. 玻璃纤维对沥青混合料路用性能的影响[J]. *公路*,2021,66(7):63-69.
- [44] ZAREI A, ZAREI M, JANMOHAMMADI O. Evaluation of the effect of lignin and glass fiber on the technical properties of asphalt mixtures[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*,2019,44(5):4085-4094.
- [45] QIAN S Z, MA H, FENG J L, et al. Fiber reinforcing effect on asphalt binder under low temperature[J]. *Construction and Building Materials*,2014,61:120-124.
- [46] XING X Y, PEI J Z, SHEN C C, et al. Performance and reinforcement mechanism of modified asphalt binders with nano-particles, whiskers, and fibers[J]. *Applied Sciences-Basel*,2019,9(15):1-13.
- [47] SALIANI S S, TAVASSOTI P, BAAJ H, et al. Characterization of asphalt mixtures produced with short Pulp Aramid Fiber (PAF) [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 280: 122554.
- [48] SANTONI R L, TINGLE J S, WEBSTER S L. Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001,127(3):258-268.
- [49] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2015,74:74-94.
- [50] KOGAN F M, NIKITINA O V. Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action[J]. *Environmental health perspectives*, 1994,102(5):205-206.
- [51] 王文奇,石银峰,谢远新,等. 玄武岩矿物纤维在沥青玛蹄脂碎石混合料中的应用技术及施工工艺研究[J]. *施工技术*,2014,43(S2):268-271.
- [52] 马峰,闫志彬,傅珍,等. 基于响应曲面法的玄武岩纤维沥青混合料设计及路用性能研究[J]. *功能材料*,2021,52(12): 12137-12142, 12151.
- [53] LI Z N, SHEN A Q, WANG H, et al. Effect of basalt fiber on the low-temperature performance of an asphalt mixture in a heavily frozen area[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,253:119080.
- [54] 申爱琴,龙虹均,郭寅川,等. 基于反射裂缝防治的玄武岩经编纤维布阻裂性能研究[J]. *硅酸盐通报*,2021,40(12): 4151-4157, 4166.
- [55] HUI Y X, MEN G Y, XIAO P, et al. Recent advances in basalt fiber reinforced asphalt mixture for pavement applications [J]. *Materials*,2022,15(19):6826.
- [56] LIU L, LIU Z H, LIU J Y. Effects of silane-coupling agent

- pretreatment on basalt fibers: Analyzing the impact on interfacial properties and road performance[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*,2020,32(4):4101-4108.
- [57] LOU K K, XIAO P, TANG Q, et al. Research on the micro-nano characteristic of basalt fiber and its impact on the performance of relevant asphalt mastic[J]. *Construction and Building Materials*,2022,318:126048.
- [58] LU Z, KONG L, HE Z, et al. Modification mechanism and rheological properties of emulsified asphalt evaporative residues reinforced by coupling-modified fiber[J]. *Materials*, 2021,14(23):7363.
- [59] ALDEA C, DARLING J. Effect of coating on fiberglass geogrid performance[C]. *Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements*,2004.
- [60] 郭庆林,王红雨,高颖,等.短切柔性纤维对密实型沥青混凝土断裂特性的影响[J]. *科学技术与工程*,2020,20(13):5377-5382.
- [61] LUO D, KHATER A, YUE Y C, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber:A review dong[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209:377-387.
- [62] MOREA F, ZERBINO R. Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers[J]. *Construction and Building Materials*,2018,164:113-120.
- [63] 张争奇,雷宗建,杨博.玻璃纤维沥青桥面防水黏结层的性能研究[J]. *公路*,2011,55(9):34-37.
- [64] ZIARI H, ALIHA M R M, MONIRI A, et al. Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber[J]. *Construction and Building Materials*,2020,230:117015.
- [65] THAKUR V K, THAKUR M K. Recent advances in green hydrogels from lignin: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*,2015,72:834-847.
- [66] ZHANG Y, WANG X C, JI G Y, et al. Mechanical performance characterization of lignin-modified asphalt mixture[J]. *Applied Sciences-Basel*,2020,10(9):3324.
- [67] SHENG Y, LI H, GUO P, et al. Effect of fibers on mixture design of stone matrix asphalt[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2017,7(3):297.
- [68] LIU K F, LI T, WU C F, et al. Bamboo fiber has engineering properties and performance suitable as reinforcement for asphalt mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2021,290:123240.
- [69] NORGBEY E, HUANG J, HIRSCH V, et al. Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,230:116957.
- [70] KETEMA A, WORKU A. Review on Intermolecular forces between dyes used for polyester dyeing and polyester fiber [J]. *Journal of Chemistry*,2020,2020:1-7.
- [71] YAN J H, LENG Z, LING C, et al. Characterization and comparison of high-modulus asphalt mixtures produced with different methods[J]. *Construction and Building Materials*,2020,237:117594.
- [72] ALNADISH A M, AMAN M Y, KATMAN H Y B, et al. Laboratory evaluation of fiber-modified asphalt mixtures incorporating steel slag aggregates[J]. *Computers Materials & Continua*,2022,70(3):5967-5990.
- [73] 王宏.聚酯纤维对硬质沥青混合料增柔增韧性及改性机理试验研究[J]. *公路*,2016,61(3):160-166.
- [74] ZHANG J W, HUANG W D, ZHANG Y, et al. Evaluating four typical fibers used for OGFC mixture modification regarding drainage, raveling, rutting and fatigue resistance[J]. *Construction and Building Materials*,2020,253:119131.
- [75] 季家友.芳纶Ⅲ表面改性及其与环氧复合体系的结构与性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [76] XING X Y, LIU T, PEI J Z, et al. Effect of fiber length and surface treatment on the performance of fiber-modified binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118702.
- [77] ZIARI H, SAGHAFI Y, MONIRI A, et al. The effect of polyolefin-aramid fibers on performance of hot mix asphalt [J]. *Petroleum Science and Technology*,2020,38(3):170-176.
- [78] LI J, SU Z, HUANG J, et al. Performance of biomimetic coating modified fiber incorporated styrene butadiene styrene modified asphalt[J]. *Journal of Applied Polymer Science*,2021,138(10):1-11.
- [79] MIAO Y H, WANG T, WANG L B. Influences of interface properties on the performance of fiber-reinforced asphalt binder[J]. *Polymers*,2019,11(3):542.
- [80] REN D H, MUHAMMAD Y, CHEN Y C, et al. Effect of PAN fiber with bionic layered surface structure generated in situ by fenton reaction on performance of SBS/RP asphalt binder [J]. *Construction and Building Materials*,2022,352: 129001.
- [81] XING S S, MUHAMMAD Y, CHEN Y C, et al. Preparation and performance evaluation of surface-modified polyacrylonitrile fiber and SBS composite modified asphalt binder based on bionic hierarchy[J]. *Construction and Building Materials*,2022,326: 126866.
- [82] LI Z X, GUO T T, CHEN Y Z, et al. Study on properties of drainage SBS modified asphalt mixture with fiber[J]. *Advances in Civil Engineering*,2021,2021:1-17.

- [83] ZHAO Q, JING S, LU X, et al. The properties of micro carbon fiber composite modified high-viscosity asphalts and mixtures[J]. *Polymers (Basel)*, 2022, 14(13): 2718.
- [84] MOKHTARI A, MOGHADAS NEJAD F. Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 381-390.
- [85] 尹海燕, 王成双, 王玉婷, 等. 环氧沥青的固化反应和微观结构[J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(11): 30-33.
- [86] XUE Y, QIAN Z. Development and performance evaluation of epoxy asphalt concrete modified with mineral fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 378-383.
- [87] 钱振东, 刘长波, 唐宗鑫, 等. 短切玄武岩纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(6): 1-5.
- [88] 张婧丽. 玄武岩短切纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(9): 3032-3039.
- [89] 王水. 聚酯纤维掺量对环氧沥青桥面铺装混合料技术性能的影响[J]. *公路工程*, 2015, 40(4): 95-99.
- [90] 何东坡, 左惠宇. 基于流变学的玄武岩矿物纤维改性沥青青高低温性能研究[J]. *功能材料*, 2020, 51(10): 10081-10088.
- [91] MAHARAJ R, ALI R, RAMLOCHAN D, et al. Utilization of coir fibre as an asphalt modifier[J]. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 2019, 35(2): 59-74.
- [92] WANG X S, QIU Y J, XUE S Y, et al. Study on durability of high-modulus asphalt mixture based on TLA and fibre composite modification technology[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2018, 19(10): 930-936.
- [93] 李昊, 郭荣鑫, 晏永. 高模量沥青及其混合料低温性能研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(S1): 351-365.
- [94] 朱春风, 程永春, 梁春雨, 等. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青混合料路用性能试验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(1): 165-173.
- [95] 李立顶, 马桂荣, 程永春, 等. 基于 DSR 试验的硅藻土/玄武岩纤维复合改性沥青性能研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(S2): 484-488.
- [96] 展宏图, 柳力. 玄武岩纤维/橡胶复合改性沥青胶浆路用性能研究[J]. *中外公路*, 2020, 40(1): 253-257.
- [97] 朱兴龙, 肖鹏, 余郁, 等. 不同级配的纤维胶粉沥青混合料性能试验比较[J]. *公路工程*, 2012, 37(6): 58-61, 84.
- [98] 朱兴龙, 肖鹏, 余郁, 等. 纤维胶粉复合改性沥青混合料性能试验研究[J]. *公路*, 2012, 57(9): 159-164.
- [99] 肖军, 尹强, 姜克锦, 等. 复掺纤维改善高黏弹改性透水沥青混合料性能试验研究[J]. *公路*, 2022, 67(8): 380-385.
- [100] KOU C J, WU X, XIAO P, et al. Physical, rheological, and morphological properties of asphalt reinforced by basalt fiber and lignin fiber[J]. *Materials*, 2020, 13(11): 2520.
- [101] XIA Y, JIA J, CHEN Q. Road performance comprehensive evaluation of polymer modified emulsified asphalt fiber microsurfacing[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022: 1-11.
- [102] 顾晓燕, 高剑飞, 李惠翔. 聚酯纤维用于环氧树脂沥青混合料增柔及增韧技术研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(3): 247-250.
- [103] SUN Y F, ZHANG Y G, XU K, et al. Thermal, mechanical properties, and low-temperature performance of fibrous nanoclay-reinforced epoxy asphalt composites and their concretes[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(12): 1-9.
- [104] 李建亮. BRA 复配纤维改性沥青混合料的技术性能与机理研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(8): 49-54.
- [105] 乔彦春. 基于 TLA 与纤维复合改性技术高模量沥青混合料耐久性试验研究[J]. *公路工程*, 2015, 40(5): 155-160, 175.
- [106] 孙晓. 硅藻土/玄武岩纤维复合改性沥青与沥青混合料性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(12): 90-94.
- [107] ABDELSALAM M, YUE Y C, KHATER A, et al. Laboratory study on the performance of asphalt mixes modified with a novel composite of diatomite powder and lignin fiber[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(16): 5517.
- [108] 哈斯图雅. 木质素与橡胶粉复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. *公路工程*, 2014, 39(6): 170-174.