

基于室内试验的不同材料改善微表处性能的研究

罗要飞^{1,2}, 于景兰³, 张争奇², 谢祥兵¹

(1. 郑州航空工业管理学院 土木建筑学院, 河南 郑州 450046; 2. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室;
3. 郑州航空工业管理学院 外国语学院)

摘要:针对普通微表处抗裂性能和抗车辙能力等的不足,室内采用微表处常规试验和混合料低温弯曲试验及汉堡车辙试验(HWTD),对比分析水性环氧乳化沥青、SBS改性乳化沥青和纤维改善微表处性能效果的优劣;并探讨纤维掺量变化对微表处路用性能的影响。结果表明:改变结合料类型或添加纤维稳定剂均能提升微表处的相关性能,其中纤维的整体改善效果相对最好,尤其是低温性能,且能够兼顾改善微表处的各项性能。玄武岩纤维微表处在抗车辙性能和成本造价方面具有明显的优势,而耐磨性、水稳定性和低温抗裂性等略差于聚丙烯纤维微表处,通过剂量优化玄武岩纤维微表处的整体性能仍优于水性环氧乳化沥青微表处和SBS改性乳化沥青微表处。根据微表处性能变化和经济因素,推荐微表处中纤维的掺量为0.10%~0.20%。

关键词:预防性养护;微表处;纤维;路用性能;改善效果

1 前言

微表处是一种重要的预防性养护技术,其在改善路面抗滑性能、平整度、防水、耐磨耗性能以及修复车辙、快速开放交通等方面具有显著的优势,已在国内外实体工程中得到了广泛应用。但通过长期的跟踪观察和经验总结发现,普通微表处混合料存在着抗裂性能差、抵抗重交通能力较弱等缺陷,以至于严重缩短其使用寿命。如何有效降低普通微表处在应用中出现的性能不足问题,国内外研究者采用了不同的方法且取得了较好的效果,主要有混合料中掺加纤维、结合料替换为水性环氧改性乳化沥青或SBS改性乳化沥青等。

SBR改性乳化沥青中水性环氧树脂组分的添加,能够使共混体系在常温环境下发生固化交联反应,形成三维网状空间结构,从而显著改善微表处的耐磨耗性能和抗剥落性能;孙晓立、邝坚锋等研究指出,改性乳化沥青与2%水性环氧树脂复配制备的微表处混合料,其耐磨耗性和抗水损害性能提高约60%,且抗滑

性能和抗剥落性能明显优于常规微表处。张庆等研究发现,常规微表处中水性环氧树脂的添加明显改善了混合料黏聚强度和耐久性能,且效果与掺加量呈正相关关系。纤维具有吸附、加筋和桥接等作用,添加于微表处混合料中能够形成三维分散形态,故可以改善其抗裂性能和耐久性;Krummenauer等探讨分析了铬鞣皮革残留物(含有纤维成分)掺量对微表处相关性能的影响,指出其掺量为0.30%时混合料具有相对较好的路用性能和减小的开裂概率;Wright等研究指出,0.20%玻璃纤维的掺加显著改善了微表处的抗裂性能,劈裂抗拉强度、间接拉伸劲度模量、疲劳寿命等指标分别提高23%、24%和200%。中国普遍采用聚丙烯纤维来改善微表处的整体性能,其合理掺量根据分散效果、性能变化和经济条件确定,建议控制为0.10%~0.20%。SBS聚合物具有橡胶和塑料的双重特性,在显著改善沥青高温性能的同时也可一定程度上改善低温性能;用其制备改性乳化沥青能够改善微表处的高温抗变形能力和耐磨耗性,尤其是前者。然而遗憾的是上述研究中并没有提及不同改善方法的性能优劣和加工难易程度,且纤维微表处采用的纤维类

收稿日期:2021-01-21(修改稿)

基金项目:河南省科技攻关计划(社发领域)项目(编号:212102310459,202102310589);长安大学“道路结构与材料交通行业重点实验室”2019年度开放基金项目(编号:300102219523);中原科技创新领军人才项目(编号:194200510015)

作者简介:罗要飞,男,博士,讲师.E-mail:hpulyf@163.com

型相对单一,缺乏试验论证和比选,以致于影响微表处技术的推广和应用。

鉴于此,该文以改善普通微表处路用性能为目的,室内采用常规试验、组合试件低温弯曲试验和汉堡车辙试验方法等探析纤维、水性环氧改性乳化沥青和 SBS 改性乳化沥青等措施的改善效果差异;并选取添加方式较简单和成本相对低的纤维改善措施,借助上述试验方法分析纤维掺量变化条件下聚丙烯纤维微表处和玄武岩纤维微表处路用性能的优劣,以阐明玄武岩纤维在微表处中应用的可行性,其成果为纤维微表处组分材料的选取提供更多的可取方案。

2 试验材料与方法

2.1 原材料和改善方案

结合料是微表处性能形成的关键,基于对比分析

不同结合料改善效果的考虑,选取 SBR 改性乳化沥青、水性环氧树脂改性乳化沥青和 SBS 改性乳化沥青开展相关试验,其主要组分掺配方案如表 1 所示,相应的制备工艺参照其他研究成果。粗细集料分别采用辉绿岩和石灰岩,矿粉为磨细的石灰岩粉,水泥采用 325 号普通硅酸盐水泥,矿料和填料技术指标均满足相关规范指标要求;微表处混合料矿料级配选用 MS-3 型,具体级配如图 1 所示。

纤维稳定剂选用聚丙烯纤维和玄武岩矿物纤维,主要技术指标如表 2 所示。不同类型微表处各组成材料的掺配比例按照《微表处和稀浆封层技术指南》中推荐的方法进行确定,具体如表 3 所示;其中纤维的掺量是以集料总量的质量百分率进行计算。玄武岩纤维微表处中集料、SBR 改性乳化沥青和水泥的掺配比例为 100 : 12.5 : 2.0,而玄武岩纤维的掺量为 0.05% ~ 0.30%。

表 1 不同乳化沥青组分掺配方案

改性乳化沥青	基质沥青	SBR 胶乳 掺量/%	SBS 改性剂 掺量/%	水性环氧添加 剂掺量/%
SBR 改性乳化沥青	SK-90 [#]	3.5	—	—
水性环氧改性乳化沥青	SK-90 [#]	—	—	2.0
SBS 改性乳化沥青	SK-90 [#]	—	4.0	—

注:水性环氧添加剂中水性环氧树脂与固化剂的掺配比例为 1 : 1.5。

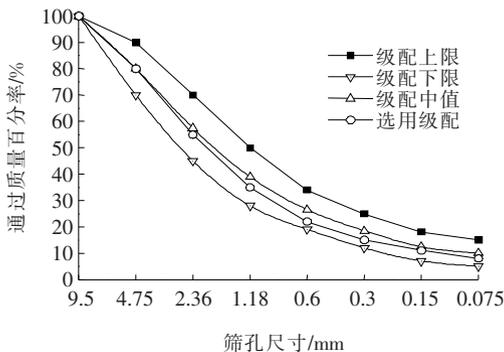


图 1 试验用 MS-3 型矿料级配

2.2 试验方法与测试条件

微表处技术具有快速开放交通的优势,摊铺后能否达到开放交通的条件室内采用黏聚力试验进行判断;而微表处的耐磨耗性能和抗水损害性能则采用湿轮磨耗试验来评价,相应指标分别为 1 h 和 6 d 的湿轮磨耗损失量。

微表处位于路面结构的最上层,直接与大气环境相接触,受温度变化的影响相对最为剧烈;一旦气温出现骤降的现象,微表处极易产生低温开裂病害,这样会导致其失去封水效果。提高微表处混合料的抗裂性

表 2 聚丙烯纤维和玄武岩纤维技术指标

纤维	颜色	形状	长度/ mm	直径/ μm	单价/ (元·kg ⁻¹)	抗拉强 度/MPa	断裂伸 长率/%	弹性模 量/MPa	吸油率/ (g·g ⁻¹)	吸湿 率/%
聚丙烯纤维	白色	束状单丝	6	20	16.0	>350	28.0	>3.6	3.79	0
玄武岩纤维	金褐色	集竖状短切	6	21	10.0	≥1 500	3.2	93.1~110.0	3.65	<0.1

表3 不同类型微表处的试验方案

方案	混合料配方
1	集料: SBR 改性乳化沥青: 水泥=100:11:2
2	集料: 水性环氧改性乳化沥青: 水泥=100:11:2
3	集料: SBS 改性乳化沥青: 水泥=100:11:2
4	集料: SBR 改性乳化沥青: 聚丙烯纤维: 水泥=100:12.5:0.2:2

能,能够有效延长路面的使用寿命。但中国相应的规范中并没有关于微表处抗裂性能的评价方法,一定程度上阻碍了微表处该方面性能的研究和合理改善措施的提出。综合考虑沥青混合料低温抗裂性能不同试验方法的优劣和普适性,该文采用弯曲试验评价微表处的低温抗裂性能,其试验温度及加载速率分别为 -10°C 和 50 mm/min ;而在测试用试件和指标获取位置方面做了相应调整,如图2所示。

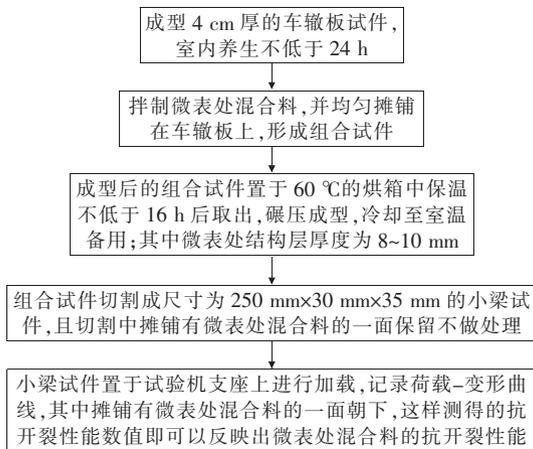


图2 低温性能测试试件成型与指标获取方法

微表处能够用于填补沥青路面的车辙病害,相应的性能评价时应测定其抗车辙能力;但规范中采用车辙变形试验进行评价,试验温度为 $(22\pm 2)^{\circ}\text{C}$,这不符合夏季路面的实际温度状况。另外试件在加载过程中,由于受设备精度的影响,加载轮并不是严格按照直线的方向运行,容易出现跑偏的现象;再加之橡胶轮[宽度 $(26.0\pm 1.0)\text{ mm}$]置于试件[宽度 $(50.0\pm 1.0)\text{ mm}$]上后,两边剩余宽度较窄,容易加载到试件边缘,二者综合导致试件会发生断裂或松散破坏,影响测试结果精度。基于上述因素的考虑,试验时借助汉堡车辙试验系统、选取空气浴模式评价不同微表处混合料的抗车辙能力;空气浴的温度选定为 60°C ,加载轮速度和施加荷载的大小分别为 52 ppm 和 705 N 。试件为组合型试件,由水泥板和微表处混合料构成,成型方

法如下:①按照标准车辙试模成型 5 cm 厚C30水泥混凝土板,养生后放入 8 cm 车辙模中;②涂刷黏层油,在水泥混凝土板试件上洒铺改性乳化沥青,用量为 $0.3\sim 0.5\text{ L/m}^2$;③拌制微表处混合料,并均匀摊铺在车辙板上,形成组合试件;④烘箱保温,组合试件置于 60°C 的烘箱中保温不少于 16 h ,取出后碾压成型,冷却至室温备用,处理过程如图3所示;其中微表处养生后的厚度统一为 25 mm 。

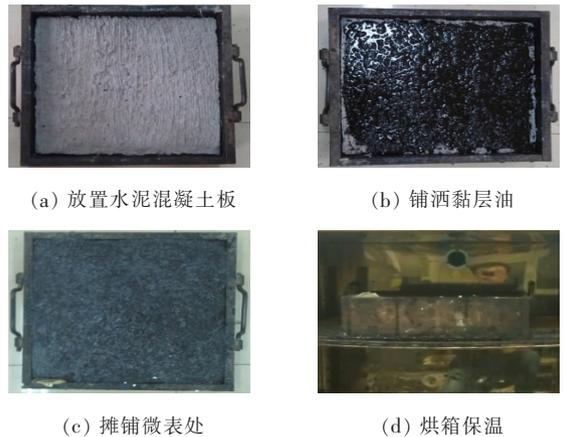


图3 试件成型过程

3 不同材料改善微表处性能效果分析

探析不同类型微表处的常规性能、低温抗裂性和抗车辙能力等差异,以定量说明选取措施改善微表处性能的效果优劣。

3.1 微表处常规性能对比

不同微表处混合料黏聚力和湿轮磨耗试验结果如表4所示。

由表4可知:①不同类型微表处均能够满足快速开放交通的要求,且结合料的改变或添加纤维均一定程度上提高了微表处的黏聚力,其中水性环氧树脂改性乳化沥青的改善效果相对最为显著,分析原因一方面为在测试周期内水性环氧树脂与固化剂充分接触后,二者反应强度能够快速形成,从而提高了微表处的黏聚力;另一方面水泥的水化为放热过程,温度的升高能够促进水性环氧体系的固化反应速度,故在相同时间内含有该组分的微表处混合料强度比较高;②不同类型微表处的耐磨耗性和抗水损害性能优劣为:水性环氧乳化沥青>SBR 乳化沥青+聚丙烯纤维>SBS 乳化沥青>SBR 乳化沥青,其中 SBR 乳化沥青与水性环氧组分复配或常规微表处中添加纤维措施的改善效

表 4 黏聚力与湿轮磨耗试验结果

方案	混合料类型	黏聚力试验/(N·m)		湿轮磨耗试验/(g·m ⁻²)	
		30 min	60 min	浸水 1 h	浸水 6 d
1	SBR 改性乳化沥青	1.20	2.22	480.8	723.5
2	水性环氧乳化沥青	1.40	2.45	208.2	492.4
3	SBS 改性乳化沥青	1.28	2.40	365.0	601.8
4	SBR 改性乳化沥青+聚丙烯纤维	1.35	2.40	245.4	538.0
	规范要求	≥1.2	≥2.0	≤540	≤800

果相对最好,这是因为环氧树脂具有黏结力很强的特性,一旦固化反应完成后,能够赋予沥青结合料更好的黏结性能,增加对矿料的黏附程度;而微表处混合料中添加纤维,凭借其吸附、加筋和桥接等作用,能够提高结合料的黏度、改善与矿料的黏结性,且纵横交错的纤维可以限制矿料的自由移动、降低外力的破坏效应,故二者具有较好的性能改善效果。

3.2 微表处抗车辙能力和低温抗裂性探讨

不同微表处混合料抗车辙能力和低温抗裂性试验结果分别如图 4、表 5 所示。

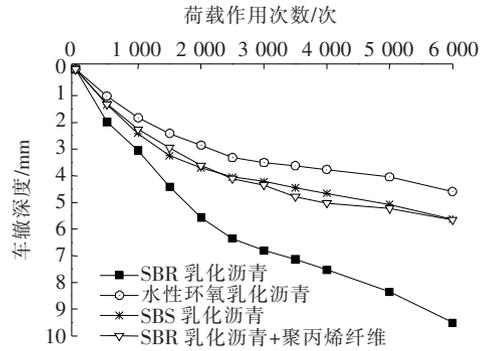


图 4 组合试件 HWTID 试验结果

表 5 HWTID 试验最终车辙深度、车辙变形率和低温弯曲试验结果

方案	微表处混合料类型	荷载作用 次数/次	车辙深 度/mm	车辙变形率=车辙深度/荷载 次数/[mm·(1 000 次) ⁻¹]	抗弯拉强 度/MPa	最大弯拉 应变/ $\mu\epsilon$
1	SBR 改性乳化沥青	6 000	9.50	1.583	8.422	2 930
2	水性环氧乳化沥青	6 000	4.59	0.765	10.981	2 585
3	SBS 改性乳化沥青	6 000	5.62	0.937	8.303	2 658
4	SBR 改性乳化沥青+聚丙烯纤维	6 000	5.65	0.942	10.447	4 820

从图 4、表 5 可以看出:① 变化沥青结合料或添加纤维均可以改善微表处混合料的抗车辙能力,其中水性环氧乳化沥青的改善效果相对最好、而 SBS 改性乳化沥青与添加聚丙烯纤维的改善效果基本相当,这是因为水性环氧体系固化后形成的产物为热固性材料,该过程不可逆、且产物不受温度变化的影响,所以其具有相对较好的抗车辙性能改善效果;而纤维稳定剂的掺加能够起到增加结合料黏度、降低矿料自由移动和承担应力等的作用,但沥青用量的提高有损混合料的抗车辙性能,上述各种效应相互作用,故对应的改善程度有限;② 不同措施对微表处低温性能的改善效果存在明显的差异,就破坏应变指标而言,仅添加纤维起到了改善微表处低温性能的目的,而水性环氧乳化沥青和 SBS 改性乳化沥青的使用则有损其低温抗裂性能,

原因为 SBS 聚合物以改善沥青高温性能为主,其对沥青低温性能的改善效果劣于 SBR 聚合物;水性环氧树脂固化后呈脆性,一定程度上降低了微表处混合料的低温延展能力,故导致其破坏应变值降低,低温性能遭到损害。

综合以上不同试验发现,纤维能够有效改善且可以兼顾微表处的各种性能;而水性环氧乳化沥青和 SBS 改性乳化沥青虽然提高了微表处混合料的耐磨耗、抗水损害和抗车辙能力,但有损其低温抗裂性,起不到改善整体性能的效果。另外纤维改善措施还具有添加方式简单、价格相对较低的特性;有必要充分利用好纤维稳定剂的这些优势,扩大纤维微表处在预防性养护工程中的应用规模。

4 不同纤维微表处路用性能差异探析

纤维材料能够综合改善普通微表处的各项性能,尤其是低温抗裂性;但其改善效果与纤维类型密切相关,选取合适的纤维应用于微表处中可以达到性能和经济俱佳的效果。玄武岩纤维是一种无机类矿物纤维,属于环保型材料,其制备原料为玄武岩石料;具有使用温度范围宽、力学性能优异、耐老化性能和化学稳定性好等优良特性,能够一定程度上弥补有机纤维抗老化性能差的缺陷。通常应用于热拌沥青混合料和水泥混凝土中,较少在微表处技术中使用;而仅有的关于玄武岩纤维微表处的研究也多采用规范中提供的方法来进行,忽略了个别试验方法的不足和玄武岩纤维的性能特点。基于此该部分采用不同掺量的聚丙烯纤维和玄武岩纤维分别制备相应的微表处混合料,借助1.2节提供的试验方法对比分析聚丙烯纤维微表处和玄武岩纤维微表处的性能差异及纤维掺量变化对微表处性能的影响,以阐明玄武岩纤维改善微表处性能的显著效果。

4.1 黏聚力对比

玄武岩纤维和聚丙烯纤维微表处黏聚力试验结果如表6所示。

从表6可知:①纤维微表处混合料黏聚力变化与纤维掺量密切相关,即随着纤维掺量的增加,混合料黏

表6 纤维掺量变化条件下不同纤维微表处黏聚力大小

纤维掺量/%	30 min 黏聚力/(N·m)		60 min 黏聚力/(N·m)	
	聚丙烯纤维	玄武岩纤维	聚丙烯纤维	玄武岩纤维
0	1.20	1.20	2.22	2.22
0.05	1.24	1.21	2.27	2.25
0.10	1.29	1.25	2.33	2.30
0.20	1.35	1.31	2.40	2.35
0.30	1.37	1.33	2.44	2.38

聚力逐渐增大,而掺量超过0.20%后,增长幅度减缓,因为为混合料内部体积空间容纳纤维量有限,掺量超过合理范围后其增强作用受阻,且过多的纤维容易出现结团现象,二者综合作用导致黏聚力增长变缓,结合经济因素推荐纤维掺量不宜高于0.20%;②聚丙烯纤维微表处的黏聚力值大于玄武岩纤维微表处,说明后者开放交通的时间相对滞后;聚丙烯纤维改善作用优于玄武岩纤维的原因为前者的吸油率相对较大,在沥青用量基本相同的情况下,其能够吸附更多的沥青轻质组分,促进乳化沥青破乳和水泥水化,加快混合料强度形成。

4.2 其他性能差异性分析

不同类型纤维微表处高、低温性能和耐磨性能试验结果如表7所示。

表7 不同纤维微表处高、低温性能及耐磨性能试验结果

纤维类型	纤维掺量/%	湿轮磨耗试验/(g·m ⁻²)		破坏应变/ με	车辙变形率/ [mm·(1 000次) ⁻¹]
		浸水1 h	浸水6 d		
聚丙烯纤维	0	480.8	723.5	2 932	1.583
	0.05	420.5	672.8	3 245	1.495
	0.10	335.8	614.2	4 002	1.238
	0.20	245.4	538.0	4 820	0.942
	0.30	302.0	580.5	3 874	1.205
	0.05	454.2	678.2	3 100	1.439
玄武岩纤维	0.10	381.6	637.6	3 606	1.181
	0.20	299.2	575.8	3 999	0.890
	0.30	346.2	623.6	3 528	1.192

由表7可知:①聚丙烯纤维微表处混合料的耐磨耗性、抗水损害和低温抗裂性能等均优于玄武岩纤维微表处,这与4.1节黏聚力试验结果一致;聚丙烯纤维微表处混合料低温性能相对较好的原因为聚丙烯纤维

的断裂伸长率大于玄武岩纤维,该指标越大则材料的韧性越好,受力时越不宜拉断,掺入混合料后其抗变形能力提高,可以承受更大的拉伸力和拉伸应变;②玄武岩纤维、聚丙烯纤维微表处混合料的抗车辙能力依

次递减,原因一方面为材料的塑性和强度是两个相互“矛盾”的性能指标,其中一指标的提高就意味着另一指标必然会受到损害,即低温性能较差的混合料对应的高温性能反而相对较好;另一方面玄武岩纤维的组分为天然玄武岩矿料,其在混合料中的分散效果优于聚丙烯纤维,在掺量相同的情况下,前者可以更好地发挥吸附和加筋的作用,故对应的抗车辙性能相对最优;

③ 纤维掺量在 0~0.20% 范围内变化时,纤维改善微表处各种性能的效果与其呈正相关,一旦掺量达到 0.20% 以上,纤维微表处对应的各种性能反而出现不同程度的降低,还增加了铺筑成本,其原因为混合料中掺加过量的纤维易出现结团现象,吸附大量的结合料,导致混合料中结合料分布不均匀,沥青膜厚度相对减薄,从而影响二者的黏结性能,造成混合料的整体性能出现损害。根据纤维掺量对微表处各种性能的影响和经济因素等,建议纤维的添加量为 0.10~0.20%。

玄武岩纤维微表处具有优良的抗车辙性能,且纤维成本明显低于聚丙烯纤维;微表处中添加合适剂量的玄武岩纤维,能够显著提高黏聚力、耐磨耗性和低温抗裂性等,但上述性能略低于聚丙烯纤维微表处混合料。玄武岩纤维微表处可以用于沥青路面的预防性养护工程(冬季气温相对较温和的地区)和车辙病害的修复。

5 结 论

(1) 改变结合料类型或添加纤维均能够改善常规微表处混合料的相关性能,其中掺加纤维具有相对较好的整体改善效果;聚丙烯纤维微表处的耐磨耗性和抗水损害性能优于 SBS 乳化沥青微表处、SBR 乳化沥青微表处,劣于水性环氧乳化沥青微表处;其低温性能相对最优、且具有改善效果,而高温性能低于水性环氧乳化沥青微表处,与 SBS 乳化沥青微表处的性能基本相当。

(2) 玄武岩纤维微表处的抗车辙性能高于聚丙烯纤维微表处,而黏聚力、耐磨耗性、水稳定性和低温抗裂性等略低于后者,且玄武岩纤维的成本低廉;合适掺量的玄武岩纤维微表处,其整体性能优于水性环氧乳化沥青微表处和 SBS 乳化沥青微表处混合料。

(3) 聚丙烯纤维和玄武岩纤维剂量在合理范围

内,其能够显著改善微表处的性能,但掺量继续增加则耐磨耗、抗水损害和高低温性能等的改善效果受到损害,性价比下降,结合微表处性能变化和经济因素,建议纤维的添加量为 0.10%~0.20%。

参 考 文 献:

- [1] 孙晓立,张肖宁.高性能微表处的室内试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2012(6).
- [2] 邝坚锋.耐久性微表处混合料室内试验及工程应用研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2015.
- [3] 张庆,郝培文,白正宇.水性环氧树脂改性微表处性能影响及评价研究[J].公路,2015(6).
- [4] Karine Krummenauer, Jairo Jose de Oliveira Andrade. Incorporation of Chromium-Tanned Leather Residue to Asphalt Micro-Surface Layer[J]. Construction and Building Materials, 2009,23(1):574-581.
- [5] Howard Jeffery-Wright, Achint Choudhary, Hassan Akhlaghi, et al. Micro-Surfacing Suspended Fiber Technology-Product Innovation Laboratory Research Investigation[C]. Brisbane: 15th AAPA International Flexible Pavements Conference, 2013:22-25.
- [6] 余剑英,柯昌银,陈斌,等.微表处稀浆混合料抗裂性能的研究[J].公路,2010(3).
- [7] 孙晓立,张肖宁,蔡旭.基于加速加载试验的微表处长期路用性能[J].同济大学学报(自然科学版),2012(5).
- [8] 侯曙光,侯强.纤维微表处混合料性能试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2013(3).
- [9] 黎侃,李新伟,王端宜.聚丙烯单丝纤维微表处路用性能研究[J].公路交通科技,2013(8).
- [10] 丁露萍.基于外掺法的布敦岩沥青改性沥青微表处室内试验研究[J].中外公路,2020(1).
- [11] 陈际江.SBS胶乳替换SBR胶乳应用于改性乳化沥青的技术对比探讨[J].石油沥青,2017(4).
- [12] 夏慧芸,张瑞,袁腾,等.微表处高性能SBS改性乳化沥青制备工艺研究[J].化工新型材料,2017(1).
- [13] 朱敏清,李志刚,张建孔.玄武岩纤维微表处配合比设计及低温抗裂性能试验研究[J].国防交通工程与技术,2014(4).
- [14] 张争奇,姚晓光,罗要飞.间断级配纤维微表处路用性能[J].北京工业大学学报,2015(6).
- [15] 刘军营,姚晓光,罗要飞.基于正交试验的纤维微表处路用性能研究[J].铁道科学与工程学报,2016(1).