

高黏改性乳化沥青粘结层力学性能研究

张建华¹, 王倩², 忻磊迪^{3,4}, 叶心成⁴

[1.上海市道路运输事业发展中心,上海市 200025; 2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200433;

3.华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510640; 4.华运通达科技集团有限公司,广东省 佛山市 528313]

摘要: 相比于传统磨耗层技术,超薄磨耗层技术具备施工便捷、经济耐久、平顺静音等优势,目前被广泛应用于公路预防性养护工程和道路品质提升工程当中;但因其厚度较薄,在车辆荷载作用下发生层间滑移的风险相对较高,故对其黏层体系的性能和耐久性提出了更高的要求。针对这一问题,选取三种黏层材料——高黏改性乳化沥青、Nova-B 改性乳化沥青、PC-3 乳化沥青和 2 类下承层界面——GAC-16 沥青混凝土和水泥混凝土面板作为研究对象,通过制备复合式超薄试件并开展层间剪切疲劳试验和层间拉拔疲劳试验,结合实际工程应用效果验证,研究黏层材料种类、温度和荷载对黏层的力学性能的影响。

关键词: 高黏改性乳化沥青;粘结层;粘结性能;疲劳性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0281-06

0 引言

截至 2022 年,我国的公路养护里程数已超过 520 万 km,在公路总里程中占比高达 98% 以上。相比于传统磨耗层技术,超薄磨耗层技术具备施工便捷、经济耐久、平顺静音等优势,目前被广泛应用于公路预防性养护工程和道路品质提升工程当中^[1]。然而,由于其厚度较薄,在车辆荷载作用下其层底拉应力和剪应力相对增大,在实际应用过程中易发生脱皮、推移等病害。因此,选择性能良好的黏层体系,配套合适的界面处置工艺,是预防超薄磨耗层结构发生层间滑移的关键。

早在 1978 年,Uzan 等^[2]就研究了柔性路面的性能受各层之间粘结状态的影响,对试验中材料参数的变化对超应力破坏现象的影响规律进行了总结。2007 年,张志勇^[3]选用多种黏层进行试验,采用抗剪和抗拉试验研究了涂抹量、温度、正向应力、水的粘结性能的影响。2012 年,刘丽等^[4]对复合试件进行了大量层间剪切疲劳试验,归纳数据发现:喷洒不同种类的黏层涂料能不同程度得提高疲劳寿命;层间所受应力越大,对疲劳寿命越不利。2016 年,田俊壮等^[5]在室内利用剪切试验,研究了沥青混合料结构、温度、乳化沥青洒布量、类型对沥青路面层间粘结性

能的影响。2018 年,Isailovic 等^[6]利用循环直剪试验评价了沥青路面结构的界面剪切疲劳性能。2019 年,李啸华^[7]研究了温度对三种常用乳化沥青性能的影响,发现乳化沥青拉拔强度和剪切强度均随着温度的上升而下降。2020 年,徐一超^[8]以黏结材料种类、应力水平和温度为变量进行了剪切疲劳试验。试验结果表明疲劳寿命与应力比、试验温度成反比。

综上,近年来国内外学者对粘结层性能的研究逐渐增多,研究方法以剪切试验和拉拔试验为主,重点考虑了温度对粘结层性能的影响,但对于其他影响因素如水、荷载及界面粗糙度对于黏层效果的影响等方面研究较少。因此,本文通过分析温度、水及不同界面处置工艺等作用因素对不同种类乳化沥青黏层体系的层间粘结性能的影响规律,同时研究了荷载作用对层间粘结疲劳的影响程度,结合实体工程应用效果为超薄磨耗层的黏层体系选型和界面处置方式提供参考依据。

1 原材料选择

1.1 集料和填料

所用粗集料和细集料均为产自河源芙蓉石场的辉绿岩;矿粉为产自博罗县公庄镇天利石粉厂的石灰岩;水泥选用福建省永定闽福建材有限公司生产的 P.042.5 水泥。

1.2 改性乳化沥青

本研究采用的高黏改性乳化沥青,是一种新型的

收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 张建华(1979—),男,硕士研究生,高级工程师,从事项目规划设计、设施养护运维管理工作。

高掺量 SBS 改性乳化沥青,其蒸发残留物 60℃动力黏度超过 25 000 Pa·s。为对其性能开展全面评价研究,将其与市面常见的高性能黏层材料 Nova-B 改性乳化沥青以及 PC-3 乳化沥青进行对比,相关技术指标试验结果见表 1。

表 1 不同类型乳化沥青技术指标试验结果

试验项目	试验结果		
	Nova-B 改性乳化沥青	高黏改性 乳化沥青	PC-3 乳化沥青
筛上残留物(1.18 mm 筛)/%	0.03	0.02	0.04
粒子电荷	阳离子	阳离子	阳离子
破乳速度	快裂	慢裂	中裂
黏度(标准黏度 C25,3)/s	19	26	15
残留分含量%	64.8	62.5	51.8
针入度(25℃) 0.1 mm	72	48	73
软化点/℃	58	84	47
延度(5℃)/cm	25	25	32
溶解度 /%	99.1	99.6	99.8
弹性恢复(25℃)/%	81	93	62
动力黏度(60℃)	3 415	34 861	1 216
贮存稳定性(1 d)/%	0.5	0.5	0.6

对乳化沥青性能试验结果进行对比分析可知,高黏改性乳化沥青蒸发残留物的软化点为 84℃和 25℃弹性恢复率为 93%,远高于 Nova-B 改性乳化沥青和传统 PC-3 乳化沥青,表明其具有优良的高温稳定性和抗永久变形的能力。此外,高黏改性乳化沥青的 60℃动力黏度试验结果远超于其他两种乳化沥青。经过对比分析,发现高黏改性乳化沥青具有优异的性能。

2 复合试件成型设计

2.1 水泥混凝土成型板成型及界面处治

水泥混凝土板成型主要分两步完成:根据配合比计算各种材料用量,并乘以 1.15 倍的富余系数。按集料、水泥的顺序添加,开动搅拌机机械后缓缓加入水胶溶液,并继续搅拌 2 min。将拌和物先倒至铁盘内,再按计算得到的质量将水泥混凝土倒入 4 cm × 30 cm × 30 cm 的自制木模振动成型,直至试件密实。振动完成后,放置于水泥养生室中养生 7 d。

2.2 水泥混凝土的界面处治

本研究选用以下五种界面处治方式对水泥混凝土面板进行处理:刻槽界面、磨损界面、拉毛界面、抛丸界面、光面界面,并通过手工铺砂法检测其构造深度,同时采用超高速面域激光扫描仪测量其三维表

面构造。

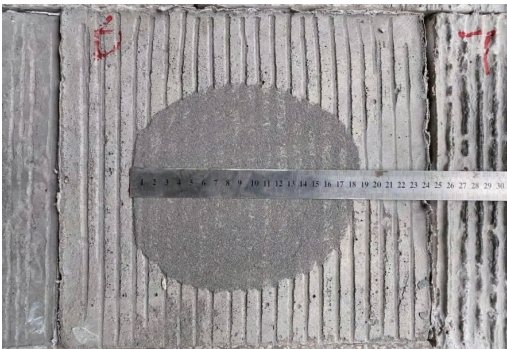


图 1 手工铺砂法测构造深度

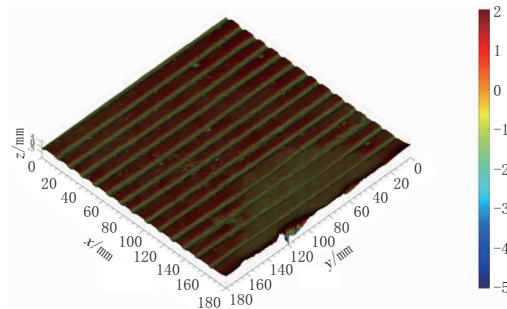


图 2 超高速激光扫描仪成像图

五种界面处治方式的表面构造检测结果见表 2。

表 2 水泥混凝土路面结构评价指标统计

界面处治方式	构造深度/mm		微观纹理 分布密度
	铺砂法	激光扫描仪	
光面界面	—	0.08	1.108
拉毛界面	0.37	0.54	1.172
刻槽界面	0.95	1.17	1.225
抛丸界面	—	0.11	1.116
磨损界面	0.51	0.69	1.189

宏观的手工铺砂法和微观的超高速面域激光扫描仪检测结果一致,不同界面处治方式的水泥混凝土板构造深度不同,其排序如下:刻槽界面>磨损界面>拉毛界面>抛丸界面>光面界面。

2.3 复合超薄试件的制作

根据底板的面积以及所需要的涂刷量计算出所需要的黏层涂料质量,利用毛刷将所计算的量均匀涂抹在底板上,涂抹后在室温中静置 24 h,达到指干状态后进行上层 1 cm 超薄磨损层的加铺碾压成型。试件制备完成后,在复合超薄试件板上进行钻芯。

3 粘结层力学性能研究

3.1 黏结层粘结性能研究

3.1.1 温度的影响

本文采用拉拔试验对三种黏层材料分别成型的

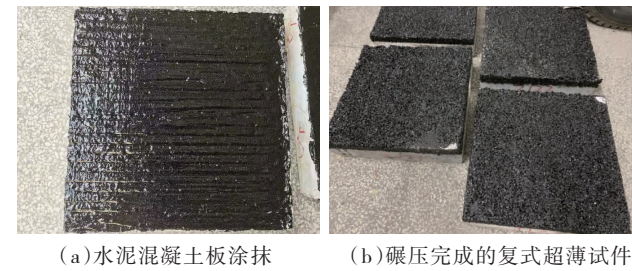


图 3 复合超薄试件制备示意图

复合超薄试件进行试验,以拉拔强度作为粘结性能的评价指标。试件温度采用 15、25、40、50、60℃共 5 个水平,乳化沥青涂抹量均为 0.8 L/m²,水泥混凝土面板界面处治方式均为拉毛工艺。拉拔试验结果见表 3。

表 3 不同种类黏层涂料在各温度下的拉拔强度 单位:MPa

温度	高黏改性乳化沥青	Nova-B 改性乳化沥青	PC-3 乳化沥青
15℃	1.28	0.88	0.65
25℃	0.73	0.35	0.21
40℃	0.51	0.18	0.06
50℃	0.32	0.12	0.04
60℃	0.25	0.08	0.02

由表 3 可知:当温度相同时,高黏改性乳化沥青的拉拔强度显著优于其他两种黏层材料,相比 Nova-B 改性乳化沥青提高至少 31.3%,相比 PC-3 乳化沥青提高至少 49.2%;此外,3 种黏层涂料的拉拔强度均随温度的上升而下降。温度从 15℃升至 60℃,高黏改性乳化沥青拉拔强度下降幅度为 80.4%,Nova-B 改性乳化沥青拉拔强度下降幅度为 90.9%,PC-3 乳化沥青拉拔强度下降幅度为 96.9%。综上,采用高黏改性乳化沥青的粘结层具有最优的粘结性能及最小的温度敏感性。

3.1.2 水泥混凝土界面处治方式的影响

本文采用拉拔试验和直剪试验对光面界面、拉毛界面、刻槽界面、抛丸界面和磨损界面处治后的复合超薄试件进行试验,以拉拔强度和抗剪强度作为粘结性能评价指标。复合超薄试件采用高黏改性乳化沥青进行涂抹,涂抹量为 0.8 L/m²,试验温度为 25℃。试验结果见表 4。

表 4 不同界面形式的粘层结力学性能

指标	光面界面	拉毛界面	刻槽界面	抛丸界面	磨损界面
构造深度/mm	0.08	0.54	1.17	0.11	0.69
微观纹理分布密度	1.11	1.17	1.23	1.12	1.19
抗剪强度/MPa	0.42	0.64	0.75	0.62	0.68
拉拔强度/MPa	0.54	0.6	0.68	0.58	0.63

对试验结果进行计算分析,发现各试件拉拔强度大小差异不明显,其极差仅为 0.14 MPa,抗剪强度大小差异明显,极差高达 0.33 MPa,因此在评价不同水泥混凝土界面处治方式的影响时应以抗剪强度为主。对比试验结果发现,各界面的拉拔强度和抗剪强度大小排序均为:刻槽界面>磨损界面>拉毛界面>抛丸界面>光面界面,与构造深度大小排序相同。说明粘结层粘结性能与水泥混凝土板界面的构造深度显著相关,刻槽界面处治后的粘结层粘结性能最优。

3.1.3 水的影响

本文通过改进沥青混合料水稳定性试验对粘结层粘结性能的水稳定性进行研究。具体试验步骤为:先将复合超薄试件随机分为两组,将浸水组试件放入 25℃水中浸泡 48 h,标准组在 25℃空调房中养护 48 h;达到规定时间后取出试件进行拉拔和剪切试验。以浸水 48 h 后的强度除以未浸水强度的值即浸水残留强度,作为粘结层粘结性能水稳定性的评价指标。

本试验选用三种黏层材料分别成型试件,涂抹量均为 0.8 L/m²,下承层为 GAC-16。试验结果见表 5 和表 6。

表 5 水对拉拔强度的影响

单位:MPa

乳化沥青种类	未浸水	浸水后	浸水残留强度
高黏改性乳化沥青	0.73	0.70	96%
Nova-B 改性乳化沥青	0.35	0.25	71%
PC-3 乳化沥青	0.20	0.13	65%

表 6 水对抗剪强度的影响

单位:MPa

乳化沥青种类	未浸水	浸水后	浸水残留强度
高黏改性乳化沥青	0.82	0.78	95%
Nova-B 改性乳化沥青	0.43	0.31	73%
PC-3 乳化沥青	0.28	0.17	61%

由表 5 和表 6 可知:三种试件浸水 48 h 之后,试件的拉拔强度和抗剪强度均会下降,说明水的存在

会对粘结层粘结性能造成不利影响。对三种试件的浸水残留强度进行分析,高黏改性乳化沥青的两个浸水残留强度均达到了95%,显著高于Nova-B改性乳化沥青与PC-3乳化沥青的浸水残留强度,证明高黏改性乳化沥青具有最佳的抗水损害能力。

3.2 黏结层的疲劳性能研究

3.2.1 试验方法

为了更真实地模拟路面长期受到的车轮荷载作用情况,本研究重点对车辙试验仪中的车轮荷载作用方向进行了改进(见图4)。改进后胶轮对车辙板施加大小为0.7 MPa的轮载,沿碾压方向做纵横向结合的“W”形运动,行走速率为 (42 ± 1) 次/min。除此之外,改进后的车辙仪可以对温度和湿度进行控制,实现对路面温度和湿度的真实模拟,具体如图5所示。

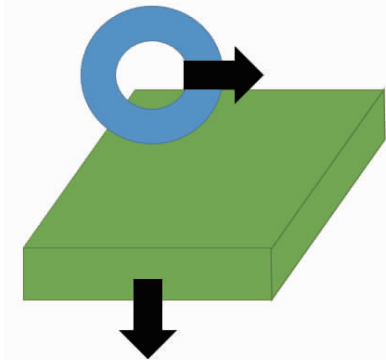


图4 胶轮运行方向示意图



图5 改进的车辙试验仪

具体试验步骤为:(1)制备4 cm GAC-16+1 cm GT-8的复合车辙板;(2)设置试验环境为25℃恒温水浴;(3)运行设备进行加载,加载时间根据荷载作用时间设置;(4)车辙仪作用完成后,进行钻芯取样;(5)对取样的试件在25℃下进行拉拔试验和直剪试验。

3.2.2 车轮荷载作用时间的影响

本文选用三种黏结层材料并通过改进的车辙试验仪成型试件,乳化沥青涂抹量均为0.8 L/m²。车轮荷载作用时间为0 h、4 h和8 h 3个水平,达到规定时间后进行拉拔试验和直剪试验。试验结果见表7。

表7 车轮荷载不同作用时长下粘结性能的衰减情况

试验项目 /MPa	作用时间 /h	高黏改性 乳化沥青	Nova-B 改性乳化沥青	PC-3 乳化沥青
抗剪强度	0	0.82	0.43	0.29
拉拔强度	0	0.73	0.35	0.21
抗剪强度	4	0.79	0.39	0.27
拉拔强度	4	0.70	0.31	0.18
抗剪强度	8	0.77	0.36	0.25
拉拔强度	8	0.68	0.29	0.16

由图6和图7可知:车轮荷载作用时间相同时,高黏改性乳化沥青的粘结性能最优,Nova-B改性乳化沥青次之,PC-3乳化沥青最差;随着车轮荷载的持续作用,3种黏层材料的抗剪强度和拉拔强度均会出现不同程度的下降。

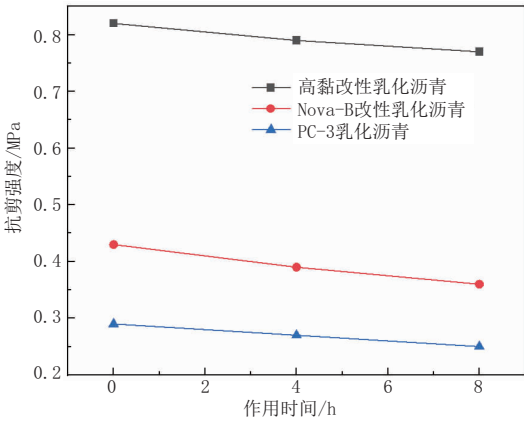


图6 抗剪强度随作用时间变化

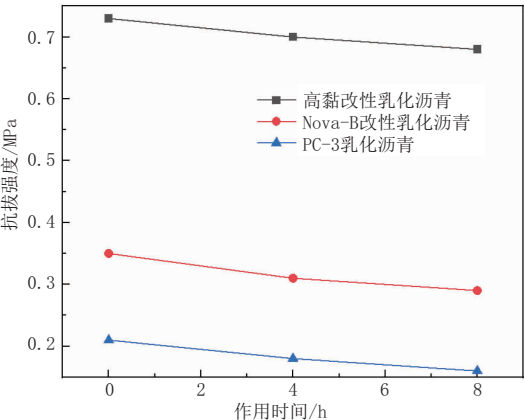


图7 拉拔强度随作用时间变化

对表7的试验数据进行计算分析,发现三种黏层涂料的疲劳衰减幅度不同,与车轮荷载未作用时进行对比,作用8 h后高黏改性乳化沥青、Nova-B改性乳化沥青与PC-3乳化沥青的抗剪强度分别下降了6.1%、16.3%和13.8%,拉拔强度分别下降了6.8%、17.1%和23.8%。证明高黏乳化沥青在具有良好粘结性能的同时,其疲劳衰减幅度也最小。

4 实际工程应用效果及评价研究

高黏改性乳化沥青配合高黏改性沥青已经在全国 26 省范围内广泛应用,本研究选取 4 个高黏改性乳化沥青工程项目进行路用性能检测,并对高黏改性乳化沥青应用效果进行评价。

4.1 路面拉拔强度研究

通过现场拉拔测试(见图 8)获取数据。从表 9 可知,各个点位拉拔强度测试结果均满足《高速公路沥青路面层间处治技术规范》(DB13T 2483—2017)中规定的拉拔强度(≥ 0.3 MPa),表明高黏改性乳化沥青在高韧超薄磨耗层中用作黏层时拉拔性能良好。



图 8 现场拉拔测试图

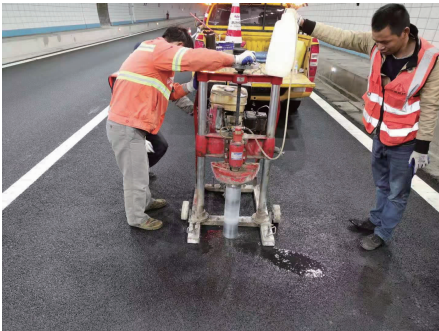
表 9 高韧超薄罩面现场拉拔检测结果

项目	序号	层间结合处温度 /℃	拉拔强度 /MPa	修正系数	修正后拉拔强度 /MPa
东莞江南大桥品质化提升工程	1	42.0	0.44	1.79	0.78
	2	42.4	0.35	1.81	0.64
	3	41.5	0.46	1.77	0.82
	4	41.8	0.4	1.78	0.72
湖北巴东县城区 2019 年危桥加固工程	5	19.0	0.81	0.72	0.58
	6	19.2	1.01	0.73	0.74
	7	18.9	1.13	0.72	0.81
	8	19.1	0.89	0.73	0.65
上海松江区城市道路品质提升工程	9	23.5	0.78	0.92	0.72
	10	24.2	0.67	0.95	0.64
	11	24.3	0.76	0.96	0.73
	12	24.5	0.78	0.97	0.76
2020 年东阳市重要县道公路提升改造工程	13	43.5	0.44	1.87	0.82
	14	43.8	0.35	1.88	0.65
	15	44.2	0.37	1.90	0.71
	16	42.1	0.38	1.80	0.68

4.2 路面抗剪强度研究

现场进行钻芯取样(见图 9)。从表 10 可知,各个点位抗剪强度测试结果均满足《高速公路沥青路面层间处治技术规范》(DB13T 2483—2017)中规定的

抗剪强度(≥ 0.45 MPa),表明高黏改性乳化沥青在高韧超薄磨耗层中用作黏层时抗剪性能良好。



(a)现场路面取芯



(b)路面芯样取芯实物图

图 9 现场钻芯取样图

表 10 高韧超薄罩面抗剪强度检测结果

项目	序号	面积 / cm ²	抗剪强度 /MPa	修正面积 /cm ²	修正后抗剪 强度 /MPa
东莞江南大桥品质化提升工程	1	76.98	0.82	74.01	0.85
	2	76.98	0.69	74.01	0.72
	3	76.98	0.75	75	0.77
	4	76.98	0.72	73.02	0.76
湖北巴东县城区 2019 年危桥加固工程	5	76.98	0.8	73.02	0.84
	6	76.98	0.83	74.01	0.86
	7	76.98	0.9	75	0.92
	8	76.98	0.78	75	0.8
上海松江区城市道路品质提升工程	9	76.98	0.73	74.01	0.76
	10	76.98	0.65	73.02	0.68
	11	76.98	0.77	73.02	0.81
	12	76.98	0.72	73.02	0.76
2020 年东阳市重要县道公路提升改造工程	13	76.98	0.81	75	0.83
	14	76.98	0.85	74.01	0.88
	15	76.98	0.87	74.01	0.91
	16	76.98	0.81	73.02	0.85

通过高黏改性乳化沥青在 4 个典型项目的路面性能研究,证明了高黏乳化沥青优异的粘结性能,为整个体系的性能提升,起到了重要作用。

5 结 语

针对超薄磨耗层厚度薄导致易发生脱皮、推移

等病害的问题,本文选用三种黏层材料——高黏改性乳化沥青、Nova-B 改性乳化沥青和 PC-3 乳化沥青,对影响超薄磨耗层粘结层性能的因素进行综合分析研究,得出了以下结论。

(1)随着温度升高,拉拔强度逐渐降低,表明黏层涂料的温度敏感性大;在水中浸泡后三种黏层涂料拉拔强度下降;高黏乳化沥青的温度敏感性与耐久性优于 Nova-B 改性乳化沥青和 PC-3 乳化沥青。

(2)经过拉毛、刻槽、磨损、抛丸处治的界面的抗剪强度显著高于光面界面,不同界面处治的拉拔强度和抗剪强度与其构造深度具有较好的相关性。

(3)车轮荷载的持续作用时间增长,周围环境温度的不断升高都会使得黏结层拉拔强度和抗剪强度下降,其中高黏乳化沥青粘结层下降幅度较小。

(4)4 个工程项目现场检测结果均证明,高黏乳化沥青与高韧超薄沥青磨耗层组合时具有优良的拉拔性能和抗剪性能。

参考文献:

- [1] 忻磊迪. 基于薄层铺装的高粘改性乳化沥青粘结层力学性能研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [2] 王二标. 超薄磨耗层技术浅谈[J].神州,2013(28): 28.
- [3] Uzan J, Livneh M, Eshed Y. Investigation of Adhesion Properties Between Asphaltic-Concrete Layers [C]//Association of Asphalt Paving Technologists Proc. Florida, 1978(47): 495-521.
- [4] 张志勇. 沥青路面夹层抗裂及粘结性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- [5] 刘丽,郝培文,徐金枝. 粘层状况对沥青路面层间剪切疲劳性能的影响[J].公路交通科技,2012,29(10): 11-15.
- [6] 田俊壮,孙增智,武书华,等. 基于模拟试验的沥青路面层间黏结性能研究[J].公路,2016,61(4): 1-6.
- [7] Isailovic I, Wistuba M P. Asphalt mixture layers' interface bonding properties under monotonic and cyclic loading [J]. Construction and Building Materials, 2018(168): 590-597.
- [8] 李啸华,袁野,王体宏,等. 不粘轮乳化沥青应用性能评价及在城市道路大修中的应用[J].石油沥青,2019,33(3): 32-37.
- [9] 徐一超. 加铺于旧沥青路面的薄层罩面层间剪切疲劳性能研究[J].北方交通,2020(3): 57-59,63.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com