

加热碎石封层对沥青路面层间抗剪性能的影响

刘圣洁¹,赵之仲^{1*},李晓波²,隋明言¹,王晓铭¹,刘桂强³,赵瑜隆¹

1. 山东交通学院 交通土建工程学院,山东 济南 250357;

2. 济宁市公路管理局微山公路局,山东 济宁 277600;

3. 中铁十局集团有限公司,山东 济南 250100

摘要:为提升沥青路面层间的抗剪性能,延长沥青路面使用寿命,以沥青路面碎石封层为研究对象,采用AC-20沥青混合料与水泥稳定碎石混合料成型复合试件,采用剪切仪进行层间抗剪强度和层间剪切疲劳试验,分析在摊铺沥青面层时加热碎石封层对沥青路面层间剪切疲劳性能的影响。试验结果表明:碎石封层经过加热的复合试件的抗剪强度、破坏位移、疲劳寿命分别增大约36%、26%、118%,加热碎石封层有利于提高沥青路面层间整体性能,延长沥青路面寿命;随应力比的增大,复合试件的剪切疲劳寿命急剧降低,道路运营时应控制通行车辆的超载情况。

关键词:碎石封层;复合试件;抗剪强度;抗剪寿命

中图分类号:U416.03

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)02-0075-06

引用格式:刘圣洁,赵之仲,李晓波,等.加热碎石封层对沥青路面层间抗剪性能的影响[J].山东交通学院学报,2023,31(2):75-80.

LIU Shengjie, ZHAO Zhizhong, LI Xiaobo, et al. Influence of heating crushed stone seal on shear fatigue performance of asphalt pavement structure interfaces[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(2):75-80.

0 引言

沥青路面层间结合质量是影响沥青路面寿命的主要因素之一^[1-2],合理的层间处治措施不仅能提高沥青路面层间的黏结力,减少层间滑移与反射裂缝的产生及发展,还可减少水损坏现象的发生,对提高沥青路面的使用寿命、节省养护费用等均有重要意义^[3-5]。部分学者认为沥青面层的层间联结状态是完全连续的,也有学者认为是完全滑动的^[6-7]。目前较一致的结论是若路面较厚,设计时应按层间连续状态计算,保证各层紧密结合;需考虑沥青层与半刚性基层间的移动状态时,可针对具体情况选定层间结合因数或摩擦因数计算^[8-10]。各研究对层间摩阻力的试验方法和标准未给出明确答案^[11-12]。因此,有必要选择较先进的试验方法分析沥青路面的层间联结状态。

路面层间摩擦因数与传统致密材料间的摩擦因数意义不同,后者是指2个物体接触面间的摩擦力和作用在其中1个物体表面上的垂直力之比^[13-14],而产生层间摩擦因数的接触面由沥青、碎石封层及水泥稳定碎石形成,摩擦力源于沥青的黏结力和碎石相对移动而产生的抗剪切力^[15-16]。

收稿日期:2022-07-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600103);山东省交通运输厅科技计划项目(2018B02-01,2020B93);山东交通学院2022年研究生科技创新项目(2022YK024)

第一作者简介:刘圣洁(1997—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:liushengjie97@126.com。

***通信作者简介:**赵之仲(1978—),男,山东德州人,副教授,工学博士,主要研究方向为路基路面工程、BIM技术等,E-mail:zhaozhizhong@sdjtu.edu.cn。

提高沥青路面层间结合质量的关键是提高层间的结合强度和层间的摩擦性能。主要从理论和试验2个方面研究层间联结状态。在理论研究中,学者们多采用有限元或离散元对层间界面进行仿真^[17-19], 芮润华等^[20]采用软件 ABAQUS 实现路面的三维建模,分析不同的层间接触状态对路面力学性能的影响,并建立考虑层间接触状态的疲劳性能预估模型,但缺乏实践验证。在室内试验分析中,石长洪等^[21]设计30种层间处治方案,在试验段铺筑路面后钻芯取样获得层间试件,并进行直剪试验和应力消散试验,结果表明:应力消散能与直剪试验的黏结强度相关性较高,应力消散试验可作为层间黏结性能测试的1种试验方法。邸洪江等^[22]设计不同配比的层间黏结材料,并进行抗剪强度和抗拔强度测试,分析温度对层间强度的影响规律,为不同环境下层间黏结材料的优化设计提供试验支撑。各研究中试件结构的加载状态与路面实际受力状态存在偏差,且未分析后续的层间联结状态破坏规律^[23]。因此,有必要优化试验进程,分析层间联结产生抗剪强度的机理,确定层间联结强度的指标和变化规律。

本试验研究采取有效提高层间摩擦因数和层间联结强度的技术制备沥青混合料,采用材料试验系统(material test system, MTS)模拟路面结构层层间竖向受力状态,测试抗剪强度和剪切疲劳寿命,分析加热碎石封层对沥青路面层间最大抗剪力、层间破坏位移、疲劳寿命的影响。

1 混合料配合比设计

采用 AC-20 沥青混合料与水泥稳定碎石混合料成型复合试件。AC-20 沥青混合料采用 >11~22 mm、>6~11 mm、>3~6 mm、0~3 mm 等 4 档石料进行混合料配合比设计,通过调整确定合成级配,如表 1 所示。AC-20 沥青混合料的最佳油石比为 4.3%。水泥稳定碎石混合料采用 >20~40mm、>10~20mm、>5~10mm、0~5mm 等 4 档石料进行混合料配合比设计,经调整确定最佳合成级配,如表 2 所示。水泥稳定碎石混合料的最佳含水量为 5.8%,最大干密度为 2.268 g/cm³,水泥质量分数为 5%。

表 1 AC-20 沥青混合料配合比

筛孔边长/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配/%	100	98.9	85.8	72.2	57.2	33.4	27.2	19.1	13.5	9.0	6.5	5
规范上限 ^[24] /%	100	100	92	85	72	53	44	32	24	18	12	7
规范下限 ^[24] /%	100	95	78	65	48	23	16	12	10	7	4	3

表 2 水泥稳定碎石混合料配合比

筛孔边长/mm	37.5	31.5	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
合成级配/%	100	93.6	68.5	33.2	20.0	11.2	2.8
规范上限 ^[24] /%	100	100	70	50	35	20	5
规范下限 ^[24] /%	100	93	50	29	15	6	0

2 复合试件制备及试验方法

2.1 复合试件制备

为制备与路面实际情况相符的复合试件,按照与施工现场一致的操作顺序制备复合试件,最后用旋转压实仪成型复合试件。复合试件分为3部分:上部为 AC-20 沥青面层,下部为水泥稳定碎石基层,中间为碎石封层。

复合试件制备流程为:根据文献^[24],采用静压法制备 $\Phi 150$ mm×60 mm 的圆柱形水泥稳定碎石试件,依据施工现场乳化沥青使用量对其表面进行均匀喷洒;将喷洒乳化沥青的水泥稳定碎石试件放入包装袋中,封袋扎牢,放入养护间养护 7 d,此试件不进行抗剪强度检测,养护最后 1 d 不做浸水处理;水泥

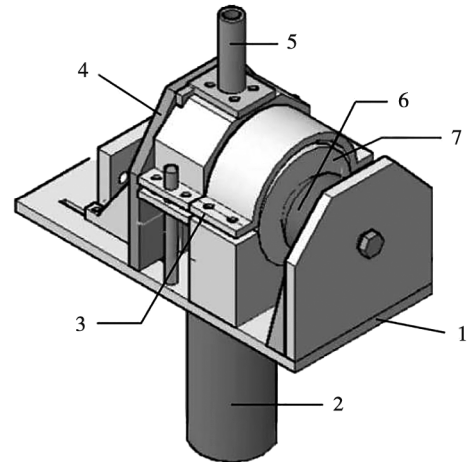
稳定碎石试件养护 7 d 后,用刷子在试件表面涂刷热的基质沥青,用量为 0.9 kg/m^2 ,涂刷后立刻撒布预拌碎石,用量为 6 kg/m^2 ,并进行碾压,制备半刚性基层;将半刚性基层放入旋转压实仪试模内,将试模放入烘箱烘烤至 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 后备用;计算制备 AC-20 沥青面层试件所需沥青混合料的质量,将称好的沥青混合料置于烘箱加热至 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 预留;将半刚性基层等分为 2 组进行对照观察,每组成型 2 个试件,1 组放入烘箱内,将半刚性基层烘至 $130 \text{ }^\circ\text{C}$,另 1 组置于室温(20 ± 1) $^\circ\text{C}$ 下,不经过加热;用旋转压实仪将沥青混合料与 2 种半刚性基层分别碾压成型为 2 种复合试件。

2.2 试验方法

剪切仪如图 1 所示。将剪切仪的底板通过立柱连接在 MTS 上,固定挡板提供横向约束力;通过前后调节移动挡板改变横向约束力;压头与 MTS 和移动剪切环连接,施加上下往复的竖向力;采用轮辐式传感器测量横向约束力;将剪切环固定在底板上,将复合试件的一半放置在底板上,固定剪切环与移动剪切环一起形成竖向剪切力;移动剪切环可上下自由移动,将竖向应力传至试件,在复合试件的碎石封层处,移动剪切环与固定剪切环共同作用形成剪切力。

对 2 种复合试件进行直剪试验。设置加载速率为 0.1 mm/s ,记录垂直压力及对应垂直位移,至复合试件破坏时停止加载,确定最大剪应力和相对位移。

对 2 种复合试件进行剪切疲劳试验。取疲劳荷载与最大剪应力之比分别为 0.07、0.05、0.03,加载频率为 2 Hz ,加载曲线为正弦波形,至直剪试验最大剪应力对应位移时停止加载,确定疲劳破坏次数。



1—底板和固定挡板;2—立柱;3—移动剪切环;
4—移动挡板;5—压头;6—轮辐式传感器;
7—固定剪切环。

图 1 剪切仪示意图

3 试验结果

3.1 加热碎石封层对复合试件抗剪强度的影响

将 2 种复合试件分别安装在剪切仪上,采用 MTS 以 0.1 mm/s 的加载速率进行直剪试验,剪应力随剪切位移的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知:2 种复合试件的剪应力均先随剪切位移的增大而增大,当剪切位移增大到一定程度时达到最大剪应力,然后剪应力随剪切位移的继续增大而减小并趋于稳定。

与碎石封层未经过加热的复合试件相比,碎石封层经过加热后,复合试件的抗剪强度和最大剪应力对应的滑动距离均较大。原因是碎石封层经过加热后,基质沥青因温度升高而黏附在半刚性基层和碎石表面,复合试件层间联结强度较高,结合更紧密,层间的抗滑性能显著提升。在压力作用下,铺筑沥青面层时热的碎石封层更易嵌入沥青混合料中,碎石封层与沥青面层结合更紧密,层间联结强度提高。

3.2 加热碎石封层对复合试件剪切疲劳寿命的影响

在直剪试验中,碎石封层加热后复合试件的最大剪应力为 0.76 MPa ,对应剪切位移为 1.71 mm ,未加热碎石封层试件的最大剪应力为 0.53 MPa ,对应剪切位移为 1.36 mm 。对 2 种复合试件进行剪切疲劳试

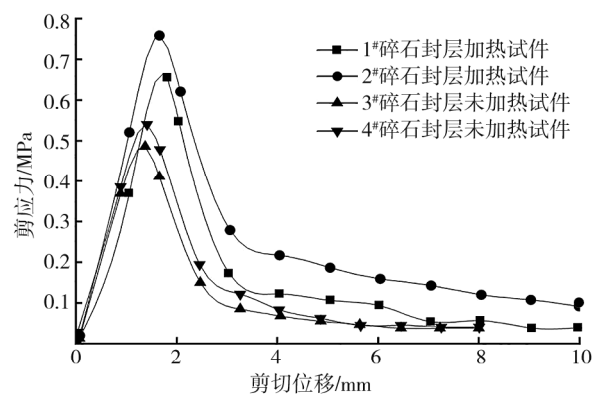


图 2 剪切应力随剪切位移的变化曲线

验。取疲劳荷载与最大剪应力之比分别为 0.07、0.05、0.03,采用正弦波形加载,加载频率为 2 Hz,当剪切位移达到复合试件直剪试验中最大剪应力对应位移时,视为复合试件已破坏,立即停止加载,确定加载次数。剪切位移随加载次数的变化曲线如图 3 所示。

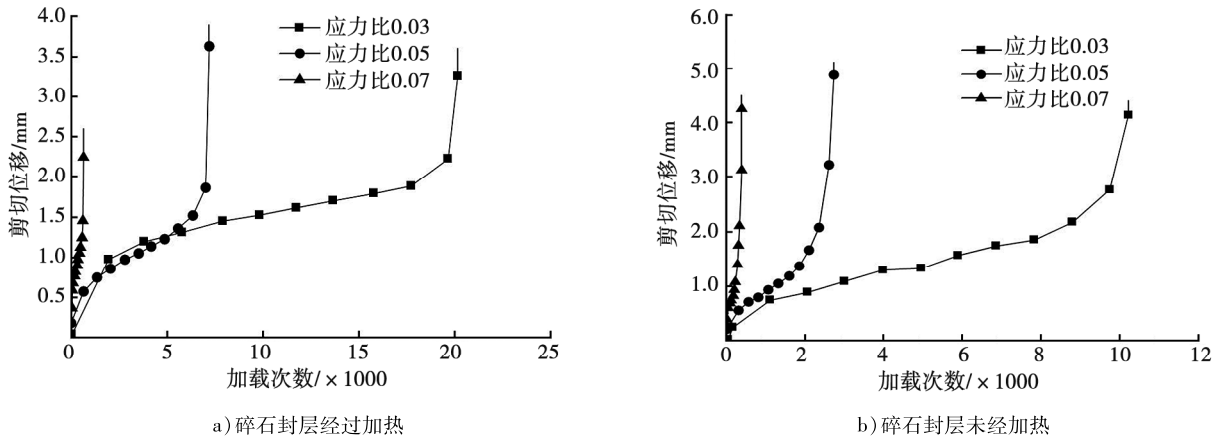


图 3 2 种复合试件在不同应力比下的剪切疲劳曲线

由图 3 可知 2 种复合试件的衰变大致分为 3 个阶段:第 1 阶段,在剪应力作用下,沥青受剪变形,剪切位移随加载次数的增加而迅速增大;第 2 阶段,封层中的碎石在封层沥青和 AC-20 沥青混合料中移位并重新分布,剪应力逐渐增大,当剪切位移增大到一定程度时,封层中碎石重新定位,封层相对于水泥稳定基层开始整体滑移,此时达到最大剪应力,对应图 3 曲线上拐点位置,剪切位移随加载次数的增加达到相对稳定状态;第 3 阶段,复合试件整体滑移后,主要由碎石封层与水泥稳定基层的摩擦力和沥青与碎石封层的黏结力抵抗剪应力,抗剪强度较低,在剪应力作用下剪切位移迅速增大,剪切位移随加载次数的增加而急剧增大,直至复合试件破坏。

2 种复合试件的疲劳寿命不同,但由图 3 可知拐点对应剪切位移与最大剪应力对应位移相近,符合疲劳破坏规律。疲劳荷载与最大剪应力的应力比与加载次数的关系如表 3 所示。

由表 3 可知:碎石封层经过加热的复合试件疲劳寿命明显比碎石封层未加热的复合试件长,说明碎石封层经过加热后层间联结状态较好,抗剪强度较高。随应力比的增大,复合试件的疲劳寿命急剧减小,应力比为 0.03 时复合试件的疲劳寿命是应力比为 0.05 时的 3~4 倍,是应力比为 0.07 时的 26~31 倍。因此,在公路运营阶段,应尽量减少超载情况,减小层间水平剪应力,延长公路的使用寿命。

表 3 应力比与加载次数的关系

复合试件类型	应力比	加载次数
碎石封层经过加热	0.07	684
	0.05	7 244
	0.03	21 086
碎石封层未加热	0.07	389
	0.05	2 716
	0.03	10 211

4 结论

1)对由 AC-20 沥青混合料与水泥稳定碎石成型的复合试件进行直剪试验,碎石封层经过加热和碎石封层未加热的复合试件剪应力均随剪切位移的增大而增大,当达到最大剪应力时,沥青面层与碎石封层的联结面逐渐移动,剪应力逐渐变小并趋于稳定。碎石封层经过加热的复合试件抗剪强度和最大滑动距离均比碎石封层未加热的复合试件高,说明摊铺沥青面层时,加热碎石封层使复合试件层间联结状态较好。

2)对复合试件进行剪切疲劳试验,随疲劳荷载与最大剪应力的应力比增大,复合试件的疲劳寿命急剧降低,说明水平剪应力对道路的使用寿命影响较大。在施工过程中应严格控制施工质量,保证道路层

间联结强度,在公路运营阶段严格限制超载,减小道路层间水平剪切应力,延长道路的使用寿命。

本文只对比碎石封层加热到 130 °C 和碎石封层不加热时复合试件的抗剪性能,加热到其他温度对复合试件层间联结强度的影响还有待研究。

参考文献:

- [1] 朱洪洲,朱真景. 沥青路面层间结合状态对路面受力状态的影响综述[J]. 中外公路, 2018,38(4):69-75.
ZHU Hongzhou, ZHU Zhenjing. Review of the influence of interlayer combination state on pavement stress of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018,38(4):69-75.
- [2] 范海山,张军辉,郑健龙. 路基模量沿深度非均匀分布沥青路面动力解析解[J]. 岩土工程学报, 2022,44(6):1016-1026.
FAN Haishan, ZHANG Junhui, ZHENG Jianlong. Analytical solution for dynamic response of asphalt pavement with subgrade modulus varying with depth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022,44(6):1016-1026.
- [3] 任少博,王浩,邹晓龙,等. 复合式路面沥青面层车辙和侧向推移试验研究[J]. 公路, 2019,64(11):6-13.
REN Shaobo, WANG Hao, ZOU Xiaolong, et al. Experimental study on rutting and lateral slippage of asphalt layer on composite pavement[J]. Highway, 2019,64(11):6-13.
- [4] 姚占勇,商庆森,赵之仲,等. 界面条件对半刚性沥青路面结构应力分布的影响[J]. 山东大学学报(工学版), 2007(3):93-99.
YAO Zhanyong, SHANG Qingsen, ZHAO Zhizhong, et al. The influence analysis of the semi-rigid asphalt pavement configuration stress and distortion by interface conditions[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2007(3):93-99.
- [5] 武书华,陈华鑫,张久鹏,等. 半刚性基层沥青路面层间界面力学特性与黏结状态的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016,46(2):406-412.
WU Shuhua, CHEN Huaxin, ZHANG Jiupeng, et al. Experimental study on mechanical properties and bonding condition at interlayer between asphalt surface and semi-rigid base[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016,46(2):406-412.
- [6] ZHANG Weiguang. Effect of tack coat application on interlayer shear strength of asphalt pavement: a state-of-the-art review based on application in the United States [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017,10:434-445.
- [7] YANG Kai, LI Rui. Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: a review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021,8(3):374-387.
- [8] LIU Fuming, DONG Aixia, LIU Chaoqun, et al. Mix design of asphalt mixture used for the waterproof and anti-cracking layer in the rainy area of South China[J]. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 2018,16(Suppl. 1):112-118.
- [9] 郭晓春,季正军,高祥起,等. 沥青路面层间材料路用性能及影响因素研究[J]. 山东交通科技, 2022(5):58-60.
GUO Xiaochun, JI Zhengjun, GAO Xiangqi, et al. Study on road performance and influencing factors of asphalt pavement interlayer materials[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2022(5):58-60.
- [10] 钱高科,蒋常龙,钱旭栋,等. 双重界面增强型沥青路面结构力学响应特性[J]. 交通科技, 2022(5):18-24.
QIAN Gaoke, JIANG Changlong, QIAN Xudong, et al. Mechanical response characteristics of dual interface enhanced asphalt pavement structures[J]. Transportation Science & Technology, 2022(5):18-24.
- [11] WANG Xuancang, SU Ziyuan, XU Aimin, et al. Shear fatigue between asphalt pavement layers and its application in design[J]. Construction and Building Materials, 2017,135:297-305.
- [12] HUANG Hengwei, ZHAN You, TAO Yale, et al. Three-dimensional characterization of bonding features for asphalt pavement interface using a novel interlayer isolation film[J]. Construction and Building Materials, 2021,311:125301.
- [13] 陈世斌,袁永强,姚运仕,等. 半刚性基层沥青路面层间处治增强黏结力的试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019,39(4):44-51.
CHEN Shibin, YUAN Yongqiang, YAO Yunshi, et al. Test on strengthening interlayer cohesion of semi-rigid base asphalt pavement by interlayer treatment[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019,39(4):44-51.
- [14] 张敏江,于江,郭超. 基于内聚力模型的沥青混凝土-无机结合料层间剪切试验数值模拟[J]. 科学技术与工程,

- 2020,20(32):13417-13424.
- ZHANG Minjiang, YU Jiang, GUO Chao. Numerical simulation of interlaminar shear test between asphalt concrete and inorganic binder based on cohesion model[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(32):13417-13424.
- [15] 黄伟, 琚贵安, 邓玉训, 等. 基于 Mclead 法的掺钢渣碎石封层配合比计算与正交试验研究[J]. 公路工程, 2018,43(3):207-214.
- HUANG Wei, JU Guian, DENG Yuxun, et al. The Mclead-method-calculation and orthogonal experimental study of the proportioning of the asphalt chip seal surface with steel slag[J]. Highway Engineering, 2018,43(3):207-214.
- [16] 霍廷军. 基于斜向剪切试验橡胶沥青碎石封层配合比设计方法[J]. 公路工程, 2015,40(4):149-153.
- HUO Tingjun. Study on design methods of rubber asphalt macadam seal chip based on the oblique shear test[J]. Highway Engineering, 2015,40(4):149-153.
- [17] WU Shuhua, CHEN Huaxin, ZHANG Jiupeng, et al. Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017,10(3):274-281.
- [18] 陈长, 梁远路, 郭忠印, 等. 沥青路面结构层间接触状况诊断新方法[J]. 科学通报, 2020,65(30):3318-3327.
- [19] GE Haitao, QUEZADA J C, HOUEROU V L, et al. Three-dimensional FEM-DEM coupling simulation for analysis of asphalt mixture responses under rolling tire loads[J]. Construction and Building Materials, 2023,369:130615.
- [20] 芮润华, 张海虎. 考虑层间接触状态的沥青路面力学性能分析[J]. 科学技术与工程, 2022,22(25):11203-11211.
- GUO Runhua, ZHANG Haihu. Mechanical properties analysis of asphalt pavement considering interlayer contact state[J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(25):11203-11211.
- [21] 石长洪, 郑俞, 严二虎, 等. 长寿命路面结构层间处治方案及黏结性能[J]. 公路交通科技, 2022,39(7):30-39.
- SHI Changhong, ZHENG Yu, YAN Erhu, et al. Interlayer treatment scheme and bonding performance of perpetual pavement structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022,39(7):30-39.
- [22] 邸洪江, 何宏智, 尹显辉, 等. 沥青路面增强型基-面层层间黏结组合材料优选试验研究[J]. 公路交通科技, 2022,39(5):1-8.
- DI Hongjiang, HE Hongzhi, YIN Xianhui, et al. Experimental study on optimum combination of reinforced interlayer bonding materials between base course and surface course of asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022,39(5):1-8.
- [23] HUANG Wanqing, CAO Mingming, XIAO Liulu, et al. Experimental study on the fatigue performance of emulsified asphalt cold recycled mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2023,369:130607.
- [24] 中华人民共和国交通运输部, 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

Influence of heating crushed stone seal on shear fatigue performance of asphalt pavement structure interfaces

LIU Shengjie¹, ZHAO Zhizhong^{1}, LI Xiaobo², SUI Mingyan¹,
WANG Xiaoming¹, LIU Guiqiang³, ZHAO Yulong¹*

1. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Jining Highway Administration Bureau Weishan Highway Bureau, Jining 277600, China;

3. China Railway No. 10 Engineering Group Co., Ltd., Jinan 250100, China

Abstract: In order to improve the shear performance between the layers of asphalt pavement and prolong the service life of asphalt pavement, taking the crushed stone seal of asphalt pavement as the research object, AC-20 asphalt mixture and cement stabilized macadam mixture are used to form the composite specimens. The

(下转第 88 页)