

冷补沥青混合料老化特征的宏微观性能

黄允江¹,李响²,耿立涛^{3*},宋昊³,康潇涵²,苗庭选⁴

1. 山东高速湖北发展有限公司,湖北 武汉 430000;2. 湖北樊魏高速公路有限公司,湖北 襄阳 441123;
3. 山东建筑大学交通工程学院,山东 济南 250101;4. 湖北联合交通投资开发有限公司,湖北 武汉 430000

摘要:为分析老化对冷补沥青混合料界面形态和力学性能的影响,设计9组基质沥青、稀释剂和添加剂的质量比制备冷补沥青混合料,测定旋转黏度和裹覆率,确定基质沥青、稀释剂和添加剂的质量比为75:22:3。根据5种不同冷补沥青质量分数(3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%)制备的冷补沥青混合料的裹覆效果,确定冷补沥青最佳质量分数为4.0%~4.5%。根据经验关系公式可确定3种级配(A、B、C)的最佳冷补沥青质量分数分别为4.3%、4.2%、4.0%。对3种不同级配的冷补沥青混合料进行间接拉伸、扫描电镜观察和纳米压痕等多尺度试验分析老化时间对其宏观力学性能和微观界面形态特性的影响。结果表明:3种级配冷补沥青混合料的间接拉伸模量均随老化时间的增大而增大;采用最佳沥青质量分数4.3%制备的级配A冷补沥青混合料经长期老化后间接拉伸模量仍较大,微观界面形态光滑,集料部分的弹性模量变化极小,界面处及沥青胶浆的弹性模量均随老化时间的增大而增大。沥青胶浆的弹性模量在老化初期迅速增大,后期趋缓。

关键词:冷补沥青混合料;老化时间;间接拉伸模量;微观界面特性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)01-0061-07

引用格式:黄允江,李响,耿立涛,等.冷补沥青混合料老化特征的宏微观性能[J].山东交通学院学报,2025,33(1):61-67.

HUANG Yunjiang, LI Xiang, GENG Litao, et al. Macro and micro properties of cold patching asphalt mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(1): 61-67.

0 引言

坑槽是沥青路面的主要病害之一,易导致路面破坏加速,影响驾驶安全性和舒适性,存在较大的交通隐患^[1]。在车辆和环境因素的综合作用下,坑槽易发展为更大范围的病害,甚至损害路基^[2]。传统修复作业模式为采用热拌沥青混合料修补坑槽,材料性能稳定,施工工艺成熟,但投入施工设备较多,修复工作受季节限制^[3]。

冷拌沥青混合料具有使用便捷、修复及时和节能环保等优势,近年来在坑槽修补作业中应用广泛^[4-5]。为改善施工性能,增强渗透性,需对沥青进行稀释,但沥青稀释后黏附性大幅降低,冷补沥青混合料易出现松散、脱落等病害^[6-7]。研究人员优选添加剂与稀释剂,优化设计冷补沥青混合料,并测试材料的路用性能等^[8-10]。研究人员采用环氧树脂、聚苯乙烯、聚酯、丁苯橡胶、苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物等单体或复合材料开发添加剂^[11-12],进行冷补沥青混合料黏附性、存储稳定性及路用性能的试验设计与评价^[13-16],微观界面特性测试及微观界面特性与冷补沥青混合料路用性能对应关系研究^[17-20]等。对冷补

收稿日期:2023-09-26

基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE007)

第一作者简介:黄允江(1976—),男,武汉人,高级工程师,主要研究方向为路面结构与材料,E-mail:huangyunjiang@sdhsg.com。

***通信作者简介:**耿立涛(1979—),男,辽宁法库人,教授,工学博士,主要研究方向为路面结构与材料,E-mail:glt@sdjzu.edu.cn。

沥青混合料服役过程中老化特性、界面黏附性能及力学参数变化的研究较少^[21-22]。
本文通过间接拉伸试验、扫描电镜试验和纳米压痕试验等宏微观测试手段,研究老化时间对冷补沥青混合料的力学性能及微观结构特征的影响,为提高冷补沥青混合料的路用性能提供依据。

1 原材料及制备方法

1.1 冷补沥青添加剂的合成

采用乙烯基硅氧烷、不饱和脂肪酸、醇类润湿剂等材料协同作用,制备合成类冷补沥青添加剂,用于增大冷补沥青与集料的黏附性,提升冷补沥青混合料的抗水能力。采用小型反应釜合成添加剂,反应温度为 80~120 ℃,以偶氮引发剂引发化学反应,以链终止剂控制反应程度,以醇类润湿剂保证反应物混合均匀,成品为棕黑色油状液体。

1.2 冷补沥青的制备

以齐鲁 70[#]道路石油沥青为基质沥青,轻质柴油为稀释剂,加入制备的合成类添加剂制备冷补沥青。冷补沥青的制备工艺为:加热基质沥青至 135 ℃后加入一定比例的稀释剂,搅拌 0.5~1.0 h 混合均匀后,控制沥青混合物的温度为 85~100 ℃,再按比例加入添加剂,持续搅拌 4.0~6.0 h 后得到冷补沥青。齐鲁 70[#]道路石油沥青的技术性能指标如表 1 所示。

表 1 齐鲁 70[#]道路沥青的技术性能指标

项目	针入度 ^① / (0.1mm)	延度 ^② / cm	软化点/℃	闪点/℃	针入度指数	质量 损失 ^③ /%	针入度 比 ^③ /%	延度 ^② / cm	PG 性能 等级 ^③
实测	63.3	20.8	47.2	>300	-0.291	0.05	68.9	8.4	64~22
技术指标 ^[23]	60.0~80.0	≥20.0	≥46.0	≥260	-1.500~1.000	≤±0.80	≥61.0	≥6.0	

①温度为 25 ℃,②温度为 10 ℃,③薄膜烘箱试验(163 ℃,5 h)。

黏度是衡量冷补沥青施工和易性的重要指标。为使冷补沥青易于拌和并均匀裹覆石料,温度为 60 ℃时旋转黏度通常要求为 0.8~1.6 Pa·s^[24]。黏附性是评价冷补沥青混合料水稳定性的重要指标,可采用裹覆率指标进行黏附性评价^[24]。为优化基质沥青、稀释剂和添加剂的质量比 w_1 ,设计制备不同质量比的冷补沥青混合料,测试旋转黏度及裹覆率,结果如表 2 所示。

表 2 不同质量比的冷补沥青混合料的旋转黏度及裹覆率

w_1	81 : 16 : 3	79 : 18 : 3	77 : 20 : 3	75 : 22 : 3	73 : 24 : 3	78 : 22 : 0	76 : 22 : 2	74 : 22 : 4
旋转黏度 ^① / (Pa·s)	2.836	1.930	1.295	1.122	0.804	1.165	1.126	0.963
裹覆率/%	100	100	99	100	100	0	96	100

①温度为 60 ℃。

由表 2 可知:冷补沥青的旋转黏度随稀释剂和添加剂比例之和的增大而减小;稀释剂质量不变,增大添加剂质量时,旋转黏度减小。当基质沥青与稀释剂的质量比为(73~77):(20~24)时,冷补沥青的旋转黏度(60 ℃)为 0.787~1.366 Pa·s,满足冷补沥青对黏度的一般要求。不掺加添加剂时,裹覆率为 0,即冷补沥青与集料间无黏附性;添加剂的质量比不小于 3%时,裹覆率可达 100%,黏附性明显提高。综合考虑技术性与经济性,采用基质沥青、稀释剂和添加剂的质量比为 75 : 22 : 3 制备冷补沥青混合料。

1.3 集料

以石灰岩石料为集料,与沥青的黏附性较好。按文献[25]的试验要求,对不同粒径集料进行取样、筛分及密度试验,集料的物理指标如表 3 所示。

表3 集料的物理指标

粒径/mm	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率/%
>10~15	2.840	2.730	1.418
>5~10	2.832	2.757	1.408
>3~5	2.921	2.806	1.402
0~3	2.753	2.693	0.817

2 冷补沥青混合料组成设计

设计3种骨架型矿料级配A、B、C用于制备冷补沥青混合料,如图1所示。3个级配的公称最大粒径均为13.2 mm,冷补沥青在沥青混合料中的质量分数分别为3.0%、3.5%、4.0%、4.5%、5.0%。

不同冷补沥青质量分数下的裹覆效果如图2所示。由图2可知:裹覆效果随冷补沥青质量分数的增大而有所改善;冷补沥青质量分数为3.5%时,冷补沥青呈偏干状态,并有明显的花白料现象,说明沥青用量不足,裹覆不均匀;沥青质量分数增至4.0%时,集料表面开始呈油润状态;冷补沥青质量分数增至4.5%时,混合料表面的油润状态更明显;冷补沥青质量分数为5.0%时,集料表面的沥青膜较厚,出现轻微的沥青流淌,沥青用量过大。可初步确定冷补沥青最佳质量分数为4.0%~4.5%。

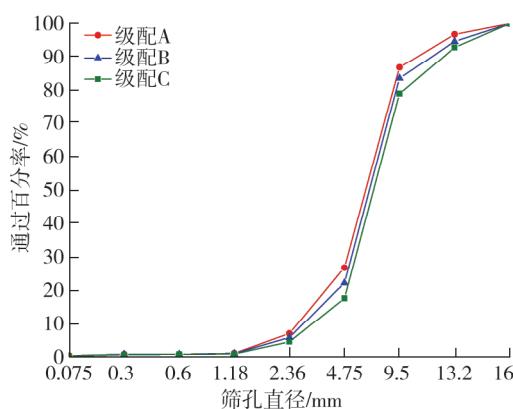


图1 冷补沥青混合料的设计级配

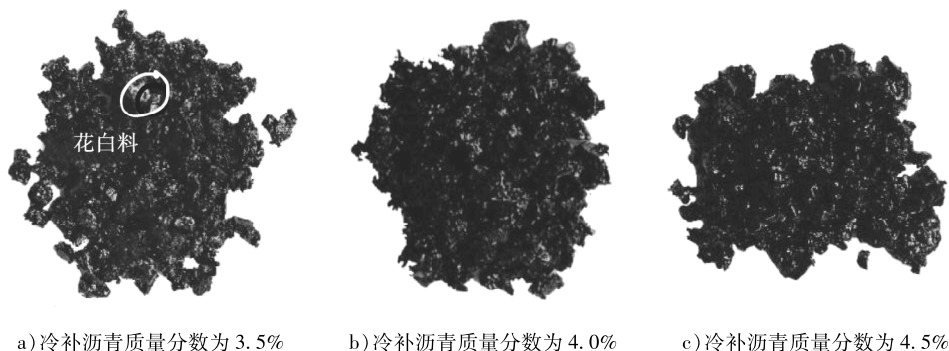


图2 不同冷补沥青质量分数的裹覆效果

冷补沥青最佳质量分数^[9]

$$w_{\max} = 0.021a + 0.056b + 0.099c + 0.120d + 1.200, \quad (1)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 分别为粒径为 >4.75 mm、 $>0.3 \sim 4.75$ mm、 $>0.075 \sim 0.3$ mm、 ≤ 0.075 mm 集料的质量分数。

由施工经验可知,沥青膜厚度为 $6.0 \sim 8.0 \mu\text{m}$ 可有效保证冷补沥青混合料的施工和易性和压实度。采用式(1)确定冷补沥青的最佳质量分数,可得3种级配的冷补沥青最佳质量分数分别为4.3%、4.2%、4.0%,与拌和试验裹覆效果所得结论一致。

3 试验方法和结果分析

3.1 间接拉伸试验

分别采用冷补沥青最佳质量分数制备3种矿料级配的冷补沥青混合料。为模拟冷补沥青混合料在

实际路面坑槽修复后数月间的状态,对冷补沥青混合料进行恒温加热加速老化,试验步骤为:将制备的冷补沥青混合料置于 110 ℃ 的烘箱中,分别加速老化 12、24、36、48、60、72 h,取出后室温冷却至少 4 h,再成型马歇尔试件,进行间接拉伸模量测试。

3 种级配冷补沥青混合料间接拉伸模量随老化时间的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:冷补沥青混合料的间接拉伸模量均随老化时间的增大而增大,从 800~825 MPa 增至 1 030~1 060 MPa;老化时间低于 48 h 时,稀释剂挥发速度较快,间接拉伸模量迅速增大约 200 MPa;老化 48~72 h 时,间接拉伸模量仅增大约 20 MPa;3 种级配 A、B、C 的冷补沥青混合料中,级配 C 间接拉伸模量始终最大,级配 A 间接拉伸模量始终最小。3 种级配的粗细集料比例不同,边长为 4.75 mm 筛孔通过率分别为 26.8%、22.2% 和 17.6%,粗集料质量占比较大,可提供稳定的骨架结构,促进稀释剂的挥发,冷补沥青混合料的间接拉伸模量较大。

为分析冷补沥青质量分数 w 对沥青混合料力学性能的影响,采用级配 A,冷补沥青质量分数分别为 4.0%、4.3%、4.5% 成型试件,对试件进行间接拉伸试验,结果如表 4 所示。由表 4 可知:3 种冷补沥青混合料的间接拉伸模量均随老化时间的增加而增大;老化时间不大于 36 h 时,冷补沥青质量分数为 4.0%、4.3% 的冷补沥青混合料的间接拉伸模量较大;老化时间大于 36 h 时,冷补沥青质量分数为 4.3% 的冷补沥青混合料的间接拉伸模量较大;冷补沥青质量分数为 4.0% 时,初期间接拉伸模量较大但后期抗拉强度不足;冷补沥青质量分数大于 4.3% 时,间接拉伸模量较小。可确定冷补沥青最佳质量分数为 4.3%。

3.2 微观结构试验

采用扫描电镜 SU5000 观测冷补沥青混合料中冷补沥青-集料界面的微观形态,分析界面的黏附特征。采用级配 A,不同冷补沥青质量分数下冷补沥青混合料界面微观结构如图 4 所示。每个图像下部为粗集料的无膜结构,上部为细集料部分,二者界面为冷补沥青胶浆。

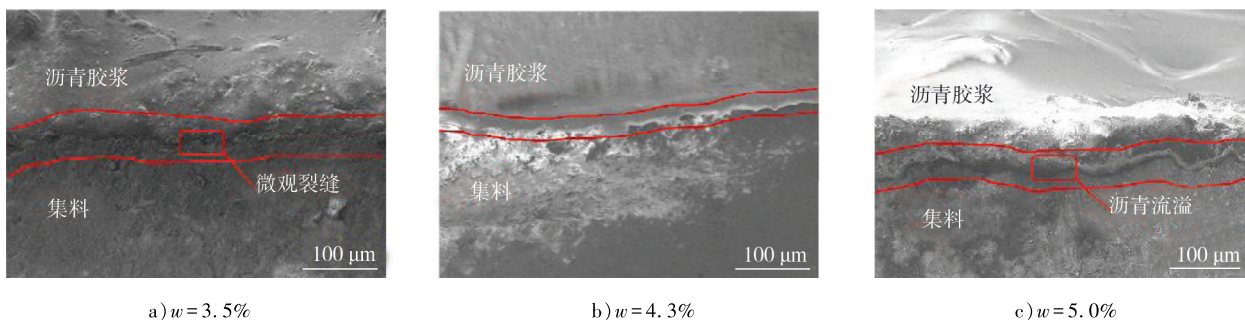


图 4 不同冷补沥青质量分数下沥青混合料界面微观结构

由图 4 可知:冷补沥青质量分数较小(3.5%)时,可在冷补沥青-集料界面观察到微裂纹,也可观察到明显的细集料颗粒,表明此时沥青胶浆与集料的界面黏附强度不足,无法有效黏附细集料;冷补沥青质量

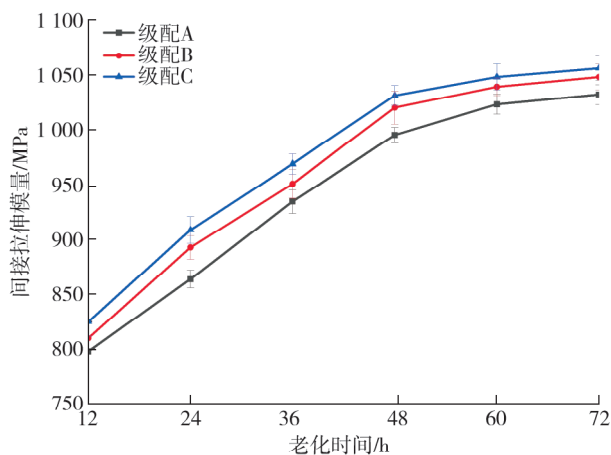


图 3 不同老化时间下级配对间接拉伸模量的影响

表 4 不同老化时间下冷补沥青质量分数对间接拉伸模量的影响

老化时间/h	间接拉伸模量/MPa		
	$w = 4.0\%$	$w = 4.3\%$	$w = 4.5\%$
12	803	798	760
24	868	864	824
36	936	935	883
48	982	995	962
60	999	1 023	992
72	1 015	1 032	1 010

分数为 4.3% 时,沥青胶浆与集料间的界面光滑;冷补沥青质量分数为 5.0% 时,在冷补沥青-集料界面处可观察到自由沥青的溢出现象。

为分析坑槽修复前后冷补沥青混合料的界面变化规律,将冷补沥青混合料置于温度为 110 ℃ 的烘箱中模拟老化过程。采用级配 A、最佳冷补沥青质量分数的冷补沥青混合料经不同老化时间后的微观界面结构如图 5 所示。

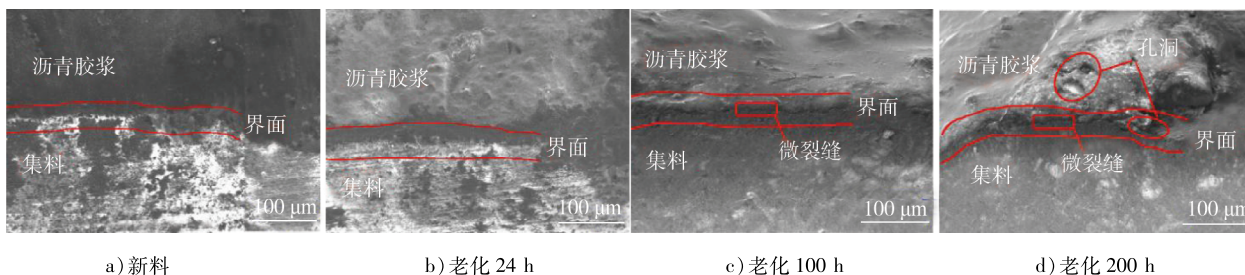


图 5 不同老化时间下冷补沥青混合料界面微观结构

由图 5 可知:新料界面光滑,观测区域内无微裂缝和孔洞;老化 24 后,界面较光滑,但沥青胶浆已呈粗糙状态;老化 100 h 后,在冷补沥青-集料界面有明显的微裂缝;老化 200 h 后,界面处有微裂缝,观测区域内产生孔洞,形态不均匀。坑槽修复初期,稀释剂的挥发不影响冷补沥青-集料界面的黏附性能,但随着老化程度加剧,界面处的沥青胶浆老化,影响冷补沥青混合料的黏附强度。

采用纳米压痕测试仪 Brucker Hysitron 测试不同老化时间的冷补沥青混合料界面弹性模量分布。测点布设如图 6 所示,从集料到冷补沥青胶浆的界面弹性模量分布曲线如图 7 所示。由图 7 可知:集料、沥青胶浆各自的弹性模量均较稳定;集料与沥青胶浆界面处 30 μm 范围内,弹性模量急剧变化。集料弹性模量变化较小,界面处及沥青胶浆的弹性模量均随老化时间的增加而增大;老化 24、48 h 后沥青胶浆的弹性模量约为新料的 7 倍、10 倍。随老化过程中稀释剂的挥发,沥青胶浆的弹性模量变化显著,在老化初始阶段稀释剂挥发速度最快,沥青胶浆的弹性模量增长迅速,后期趋缓。

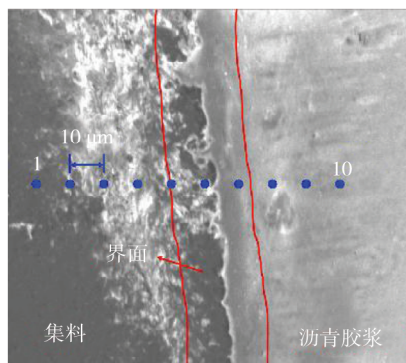


图 6 纳米压痕试验测点布设图

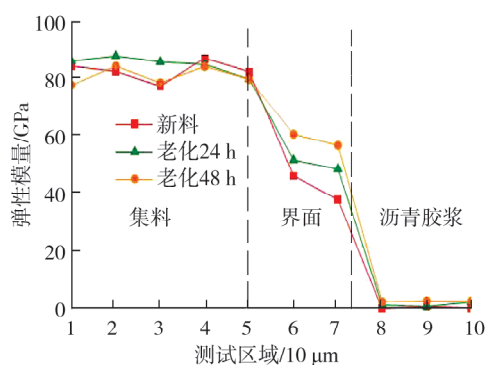


图 7 集料到冷补沥青胶浆的弹性模量分布

4 结论

研究冷补沥青混合料老化后的多尺度界面形态和力学性能。通过间接拉伸、电镜扫描和纳米压痕等试验研究沥青胶浆-集料微观结构的关系,分析老化时间对沥青胶浆-集料界面形态的影响。

1) 设计 9 组基质沥青、稀释剂和添加剂的质量比制备冷补沥青混合料,测定冷补沥青的旋转黏度和裹覆率,确定基质沥青、稀释剂和添加剂的最佳质量比为 75 : 22 : 3。根据 5 种不同冷补沥青质量分数制备的冷补沥青混合料的裹覆效果,确定冷补沥青的最佳质量分数为 4.0% ~ 4.5%。根据经验关系公式可确定 3 种级配的沥青最佳质量分数分别为 4.3%、4.2%、4.0%。

2)3种级配冷补沥青混合料的间接拉伸模量均随老化时间的增大而增大。老化时间不大于48 h时,间接拉伸模量增幅较快,后期增幅趋缓;粗集料占比较高的冷补沥青混合料的间接拉伸模量较大。长期老化后,冷补沥青质量分数为4.3%时的混合料间接拉伸模量较大,沥青胶浆-集料界面光滑;小于4.3%时,初期模量较大,但后期抗拉强度不足,沥青胶浆-集料界面存在微观裂纹;大于4.3%时,间接拉伸模量始终处于较低水平,冷补沥青胶浆与集料间多余沥青溢出。可确定级配A冷补沥青最佳质量分数为4.3%。

3)老化前后,冷补沥青混合料中集料部分的弹性模量变化极小,但界面处及沥青胶浆的弹性模量均随老化时间的增加而增大,沥青胶浆的弹性模量在老化初期迅速增大,后期趋缓。

参考文献:

- [1] 陈平. 新型高性能坑槽冷修补材料研究与设计[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [2] 丁占锋, 盛赛华, 黄国威. 溶剂型冷补沥青混合料强度形成规律研究[J]. 公路, 2014, 59(4): 221-224.
- [3] 刘晓文. 冷补沥青混合料研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [4] 陈磊磊, 马雯琦, 钱振东, 等. 沥青路面坑槽修补界面失效机理分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 571-577.
- [5] 徐心硕. 沥青冷补液及其冷补料性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.
- [6] 谭忆秋, 周水文, 单丽岩, 等. 抗冻型冷补沥青混合料优化设计及性能研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 89-94.
- [7] 曾欣铨. 柴油型冷补沥青混合料成型特性研究[J]. 公路, 2014, 59(2): 185-188.
- [8] 刘非易, 余泳幸, 沈凡. 反应型冷补沥青混合料的强度形成机理及强度发展规律研究[J]. 公路, 2023, 68(5): 45-50.
- [9] YU X, WANG J, SI J, et al. Research on compatibility mechanism of biobased cold-mixed epoxy asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118868.
- [10] GUO M, TAN Y Q, ZHOU S W. Multiscale test research on interfacial adhesion property of cold mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2014, 68: 769-776.
- [11] 张贺亮. 水性环氧乳化型冷补沥青混合料性能评价[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 296-302.
- [12] LIU M M, HAN S, HAN X, et al. Microcapsule and polymer reinforcement techniques developed asphalt for use of pothole repairs in winter and rainy seasons[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 167: 102865.
- [13] CHEN T, LUAN Y, MA T, et al. Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258: 120674.
- [14] RYMS M, DENDA H, JASKULA P. Thermal stabilization and permanent deformation resistance of LWA/PCM-modified asphalt road surfaces[J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 328-341.
- [15] 于力, 魏小皓, 王建伟, 等. 环氧沥青铺装层裂缝类病害修复材料性能研究[J]. 公路, 2019, 64(4): 293-298.
- [16] ABD EL-RAHMAN A M M, EL-SHAFFIE M, ABO-SHANAB Z L. Modifying asphalt emulsion with different types of polymers for surface treatment applications[J]. Petroleum Science and Technology, 2017, 35(14): 1473-1480.
- [17] 罗蓉, 王伟, 罗晶, 等. 多尺度评价相对湿度对沥青-集料黏附性的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 95-100.
- [18] HUANG S L, REN J D, LI M G, et al. Development and evaluation of solvent-based cold patching asphalt mixture based on multiscale[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 1984972.
- [19] ALENEZI T, NORAMBUENA-CONTRERASA J, DAWSON A, et al. A novel type of cold mix pavement material made with Calcium-Alginate and aggregates[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212: 37-45.
- [20] LÜ S, WANG S, XIA C, et al. A new method of mix design for cold patching asphalt mixture[J]. Frontiers in Materials, 2020, 7: 00182.
- [21] 马建民, 孙国强, 胡明君, 等. 沥青混合料水损坏微观尺度研究方法(3): 分子动力学模拟[J]. 石油沥青, 2018, 32(3): 42-47.
- [22] 张明欣, 朱兴兴, 王清亮, 等. 沥青-集料黏附性评价方法研究进展[J]. 材料导报, 2022(增刊2): 129-136.
- [23] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会(SAC/TC 280). 硬质道路石油沥青: GB/T 38075—2019[s]. 北京: 人民

交通出版社,2019.

- [24] 耿立涛,王丽艳,姜成岭,等. 溶剂型冷补沥青及混合料的性能评价[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5):1177-1182.
- [25] 中华人民共和国交通部,交通部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程:JTG E42-2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.

Macro and micro properties of cold patching asphalt mixture

HUANG Yunjiang¹, LI Xiang², GENG Litao^{3}, SONG Hao³,
KANG Xiaohan², MIAO Tingxuan⁴*

1. Shandong High-Speed Hubei Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Hubei Fan-Wei Expressway Co., Ltd., Xiangyang 441123, China;

3. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

4. Hubei United Transportation Investment & Development Co., Ltd., Wuhan 430000, China

Abstract: To analyze the effects of aging on the interface morphology and mechanical properties of cold patching asphalt mixtures, nine groups of quality ratios of matrix asphalt, diluents, and additives are designed to prepare cold patching asphalt mixtures, measuring the rotational viscosity and coating rate, determining the quality ratio of matrix asphalt, diluents, and additives to be 75 : 22 : 3. Based on the coating effects of cold patching asphalt mixtures prepared with five different quality percentages of cold patching asphalt, the optimal quality percentage of cold patching asphalt is determined to be 4.0% to 4.5%. According to empirical relationship formulas, the optimal quality percentages of cold patching asphalt for three different gradations are determined to be 4.3%, 4.2%, and 4.0%, respectively. Three different gradations of cold patching asphalt mixtures undergo indirect tensile, scanning electron microscopy, and nano-indentation tests to analyze the effects of aging time on their macroscopic mechanical properties and microscopic interface morphological characteristics. The results show that the indirect tensile modulus of the three gradations of cold patching asphalt mixtures increase with the increase of aging time; the gradation A cold patching asphalt mixture prepared with the optimal asphalt quality percentage of 4.3% maintain a relatively high indirect tensile modulus after long-term aging, exhibiting a smooth microscopic interface morphology, minimal change in the elastic modulus of the aggregate portion, and an increase in the elastic modulus at the interface and asphalt mastic with increased aging time. The elastic modulus of the asphalt mastic rapidly increase in the early stages of aging and then leveled off in the later stages.

Keywords: cold patching asphalt mixture; aging time; indirect tensile modulus; micro-interface characteristic

(责任编辑:王惠)