

老化及浸水条件下凝灰岩沥青混合料长期水稳定性能研究

Study on Long-term Water Stability of Tuff Asphalt Mixture under aging and Water Immersion Conditions

刘玉东¹, 蔡燕霞^{1,2,3}, 奚进⁴, 杨杰^{2,3}, 吕小博¹

- (1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 中路高科 (北京) 公路技术有限公司, 北京 100088;
3. 公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心, 北京 100088;
4. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 杭州 330000)

摘要: 为提高凝灰岩沥青混合料抗水损害能力, 以 SUP20 沥青混合料为研究对象, 通过老化前后的浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验及混合料试件浸水后的单轴压缩试验, 评估不同配合比设计方案对混合料长期水稳定性能的改善效果, 并开展混合料路用性能试验。结果表明: 使用 70# 基质沥青 + 2% 水泥替代矿粉, 或者使用 SBS 改性沥青 + 矿粉, 凝灰岩沥青混合料的长期水稳定性能及高温、低温路用性能指标均满足路用技术要求。研究成果为酸性岩在公路工程建设中的大规模使用提供参考。

关键词: 凝灰岩沥青混合料; 老化; 浸水; 长期水稳定性; 路用性能

中图分类号: U141 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 04-0013-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.003

LIU Yudong¹, CAI Yanxia^{1,2,3}, XI Jin⁴, YANG Jie^{2,3}, LYU Xiaobo¹

- (1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Beijing Zhonglu Gaoke Highway Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;
3. Research and Development Center of Transport Industry of New Materials, Technologies
Application for Highway Construction and Maintenance, Beijing 100088, China;
4. Zhejiang Jiaotou Expressway Construction Management Co., Ltd., Hangzhou 330000, China)

Abstract: In order to improve the water damage resistance of tuff asphalt mixture, SUP20 asphalt mixture was taken as the research object, and the improvement effect of different mix ratio design schemes on the long-term water stability of the mixture was evaluated through the water immersion Marshall test before and after aging, the freeze-thaw splitting test and the uniaxial compression test after the mixture sample was immersed in water. The results show that: when using 70# matrix asphalt + 2% cement instead of mineral powder, or using SBS modified asphalt + mineral powder, tuff asphalt mixture of long-term water stability performance and high temperature, low temperature road performance indicators are satisfied with the road performance technical requirements. The research results provide a reference for the large-scale use of acid rock in road construction.

Key words: tuff asphalt mixture; aging; be submerged in water; long-term water stability; road performance

0 引言

近几十年来,我国公路建设取得快速发展,大规模集中建设导致优质集料供应不足及工程造价提高^[1-2]。凝灰岩作为酸性石材材料,在我国有着丰富的储量,并在现阶段工程上开发、使用较少^[3]。酸性集料资源化利用技术,研究凝灰岩集料沥青混合料的长期水稳定性能,对缓解砂石料供需矛盾,降低高速公路成本造价,保护环境,提升经济和社会效益有重要意义^[4]。

国内大量学者开展了沥青混合料长期水稳定性能相关研究。邓星鹤等^[5]通过沥青老化前后的黏附性试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验对 OGFC-13 型沥青混合料进行水稳定性评价,得出其抗水损害能力在第 2 d 最强,随后开始呈现下降趋势,4 d 后下降速度减缓,趋于平稳的结论;张洪刚等^[6]通过在室内对沥青混合料反复冻融后进行劈裂试验,发现冻融次数越多,水稳定性能越差,并且沥青混合料的孔隙率越大,其水稳定性能受冻融次数的影响越大;开鑫等^[7]利用光电比色法测定沥青与集料的黏附性,以此来预测沥青混合料的水稳定性能,当集料与沥青之间的黏附性越好,则沥青混合料的水稳定性能越好;Kamani 等^[8]通过无侧限抗压强度试验和点荷载指数试验分析了酸性集料的机械降解问题,得到了酸性集料力学劣化性质;杨玉晶等^[9]对不同集料主要化学成分的特性参数进行了正交试验,得到了满足不同公路等级的适用性指标;吴义春等^[10]通过研究老化前后凝灰岩沥青混合料的黏附性及水稳定性发现,对凝灰岩沥青混合料中掺加少量的消石灰或水泥,能够提高混合料的抗水损害能力,当添加 3% 的消石灰或 2% 水泥效果最好;Hesami 等^[11]对凝灰岩和花岗岩,两种沥青改性剂 sasobit 和 asphamin,以及熟石灰作为抗剥落剂用表面自由能法进行了评价,结果表明熟石灰提高了沥青在集料上的湿润性,沥青与骨料之间的黏附力得到改善;王富强等^[12]在花岗岩沥青混合料中加入不同外掺剂,通过冻融劈裂试验和浸水马歇尔试验发现,混合料的长期水稳定性提高了 5%~17% 不等;程浩等^[13]提出浸水抗压法这种新的水稳定性评价方法,结果表

明,温度是影响水稳定性最大因素;孙瑞^[14]通过比较多种类型外掺剂对混合料的性能影响,添加高黏改性剂等外掺剂可提高沥青混合料水稳定性;李闯民等^[15]使用不同的沥青混合料,湿法制备的 TPCB 改性沥青混合料的抗车辙、低温抗开裂和抗水损害性能均有所提高。

目前对凝灰岩沥青混合料的长期水稳定性能的研究较少,凝灰岩沥青混合料在工程应用中是否满足长期水稳定性能还有待进一步评估。因此,通过老化前后浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验及单轴压缩试验,对不同沥青及填料组合方案下的凝灰岩沥青混合料的长期水稳定性能进行评价,为酸性岩在公路工程建设中的大规模使用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

沥青为 SBS 改性沥青和 70# 基质沥青,技术指标见表 1。粗、细集料采用凝灰岩和石灰岩,凝灰岩中 SiO₂ 含量为 66.8%,为酸性集料,技术性能指标见表 2。凝灰岩沥青混合料中部分矿粉填料用水泥替代,水泥选用 P·O 42.5 号硅酸盐水泥,密度为 3.03 g/cm³,初凝时间为 243 min,终凝时间为 379 min,抗压、抗折强度分别为 51.6、8.7 MPa;矿粉选用优质石灰岩矿粉,矿粉性能指标见表 3。

表 1 沥青技术性能指标				
Table 1 Asphalt technical performance index				
针入度 (25 ℃、5 s、 100 g) /0.1 mm	针入度指数 PI	软化点 /℃	延度 (5 cm/min、 5 ℃) /cm	10 ℃ 延度 /cm
55.2		88.0	32.5	
64.3	-1.30	48.5		21.5

表 2 集料技术指标						
Table 2 Technical specifications of aggregates						
材料 名称	粗集料				细集料	
	压碎值 /%	坚固性 /%	洛杉矶磨 耗损失/%	单轴抗压 强度/MPa	砂当量 /%	坚固性 /%
凝灰岩	9.2	2	6.0	79.5	73	3
石灰岩	17.8	5	16.0	96.4	67	3

表 3 石灰岩矿粉性能指标				
Table 3 Limestone mineral powder performance index				
密度/(g/cm ³)	亲水系数	含水量	加热安定性	外观
2.736	0.7	0.5	颜色无变化	无团粒固结

1.2 配合比设计

原材料配比方案见表 4；沥青混合料选用 SUP20 级配，通过试配法来计算沥青混合料设计合成级配，见表 5。

石灰岩沥青混合料确定设计级配后，按照《高性能沥青路面（Superpave）基础参考手册》，目标孔隙率应为 4%，估算初始沥青掺量均为 $P_b = 4.2\%$ ，选择四种沥青掺量， P_b 、 $P_b \pm 0.5\%$ 、 $P_b + 1\%$ 进行 Superpave 旋转压实试验，通过体积参数和沥青掺量

关系，确定最佳沥青掺量为 4.6%。用相同方法，得出凝灰岩沥青混合料最佳沥青掺量为 4.38%。

表 4 试验方案
Table 4 Pilot programme

方案号	沥青	集料	填料
1	70#基质沥青	石灰岩	石灰岩矿粉
2	70#基质沥青	凝灰岩	石灰岩矿粉
3	70#基质沥青	凝灰岩	1% 的水泥替代石灰岩矿粉
4	70#基质沥青	凝灰岩	2% 的水泥代替石灰岩矿粉
5	SBS 改性沥青	石灰岩	石灰岩矿粉
6	SBS 改性沥青	凝灰岩	石灰岩矿粉

表 5 沥青混合料级配
Table 5 Asphalt mixture grading

材料名称	筛分通过率/%											
	26.5 mm	19 mm	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
石灰岩	100.0	94.4	89.4	72.7	54.4	35.2	25.8	14.7	10.7	7.4	6.4	4.4
凝灰岩	100.0	92.9	88.3	79.4	59.9	35.7	28.6	17.8	14.0	9.1	7.3	5.3

1.3 试件制备

使用 70#基质沥青时，集料在烘箱温度和拌锅加热温度定为 170℃；使用 SBS 改性沥青时，集料在烘箱温度和拌锅加热温度定为 190℃。将沥青、集料按顺序加入拌锅搅拌 90 s 后，再加入填料继续搅拌 90 s。浸水马歇尔试验试件直径为 101.6 mm、高为 63.5 mm；两面击实各 75 次。冻融劈裂试验试件直径为 101.6 mm、高为 63.5 mm；两面击实各 50 次。单轴压缩试验试件直径为 100 mm、高为 100 mm。车辙试验为 300 mm×300 mm×50 mm 试件。小梁弯曲试验需将车辙试件进行切割，切割后尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm。

1.4 试验方法

为模拟路面在长期浸水条件下的水损害情况，对 6 种沥青混合料分别进行老化前后的浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验。为进一步评价沥青混合料的长期水稳定性能，成型水稳定试件，通过延长试件浸水时间，测定沥青混合料浸水后抗压强度的变化，得出水稳定系数。

(1) 沥青混合料老化试验。沥青混合料老化试验分为短期老化和长期老化，为模拟沥青混合料在施工工程的老化，通过烘箱加热法对沥青混合料进行短期、长期老化试验。

(2) 老化前后的浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验。分别对老化前后沥青混合料浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验，试验方法参考 JTG E20—2011《公路

工程沥青及沥青混合料试验规程》。浸水马歇尔试验测量标准马歇尔试件的稳定度，浸水马歇尔试件在 60℃ 恒温水浴中浸水 48 h 后测量其稳定度并计算浸水残留稳定度。冻融劈裂试验测量冻融前后的劈裂强度，并计算冻融劈裂强度比。

(3) 单轴压缩试验。成型 5 组直径 100 mm、高 100 mm 圆柱形试件，第 1 组试件在自然环境中 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 养护 2 d，其他 4 组试件在 $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水箱中养护 2、6、15、30 d 后，移到 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 水中养护 2 h，对 5 组试件进行单轴压缩试验。后 4 组测得抗压强度与第 1 组的抗压强度比值为水稳定系数。

(4) 车辙试验。车辙试验要求将试件和试模一同放入保持 60℃ 恒温的环境中，在 5~12 h 内进行保温。随后启动试验机使得试验轮往返运动，记录 45 和 60 min 时的车辙变形，计算动稳定度。

(5) 低温小梁弯曲试验。沥青混合料低温小梁弯曲试验需要将准备好的小梁试件放在 $(-10 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 养护不少于 45 min，将试件按照要求放在试验机上，当试件破坏时，记录下最大荷载和跨中挠度，并计算出试件破坏时的最大拉应变。

2 结果及分析

2.1 长期水稳定性能

为了评估凝灰岩沥青混合料的长期水稳定性能，进行老化前后的浸水马歇尔试验、老化前后的冻融劈裂试验以及混合料试件浸水后的单轴压缩试验。

材料科学

2.1.1 浸水马歇尔试验

图1为不同老化程度沥青混合料浸水马歇尔试验结果。6种方案沥青混合料的老化前后马歇尔稳定度、浸水马歇尔稳定度和残留稳定度均呈递减趋势,符合随着沥青混合料老化,其水稳定性能下降的规律。当长期老化后,使用基质沥青的凝灰岩沥青混合料浸水前稳定度为8.44 kN,达到使用基质沥青的石灰岩沥青混合料的82.1%;当浸水48 h后,其稳定度为5.66 kN,较浸水前下降了32.9%;但使用2%水泥替代矿粉后,长期老化后的凝灰岩沥青混合料浸水后稳定度达到9.25 kN;使用改性沥青老化后的凝灰岩沥青混合料浸水后稳定度达到10.58 kN。说明当凝灰岩沥青混合料不添加适量外掺剂或不使用改性沥青时,不能满足浸水马歇尔稳定度大于8 kN规范要求,长期水稳定性能较差,不能满足工程需要。

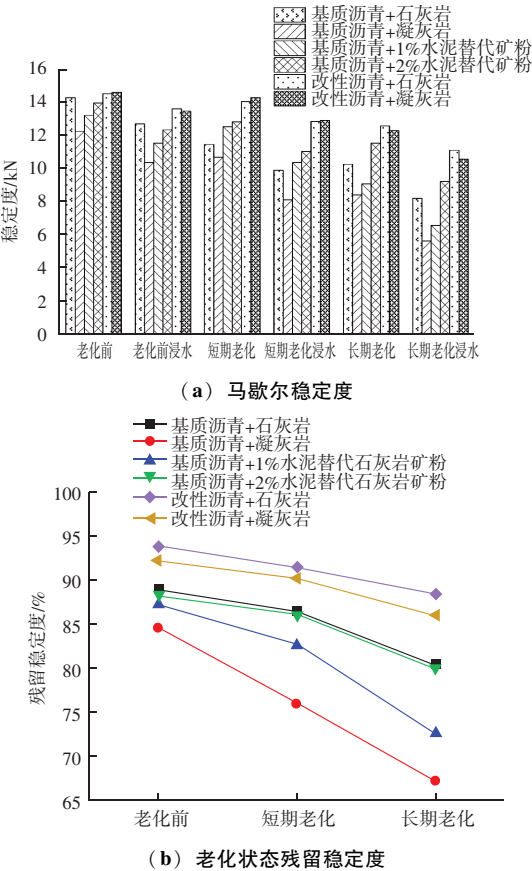


图1 不同老化程度沥青混合料浸水马歇尔试验
Fig.1 Immersion Marshall Test of Asphalt Mixture with Different Degree of Aging

当使用基质沥青时,长期老化后的石灰岩沥青混合料的残留稳定度为80.3%,要优于长期老化后

凝灰岩沥青混合料的67.1%。当用1%水泥替代矿粉时,长期老化后凝灰岩沥青混合料残留稳定度提升5.5%;用2%水泥替代矿粉时,提高效果更为明显,长期老化后凝灰岩沥青混合料残留稳定度提升13.0%。这是因为凝灰岩作为酸性材料,缺少碱性活性,与沥青之间的黏附性较差,沥青易剥落,添加水泥可以增强集料与沥青之间的黏附性。

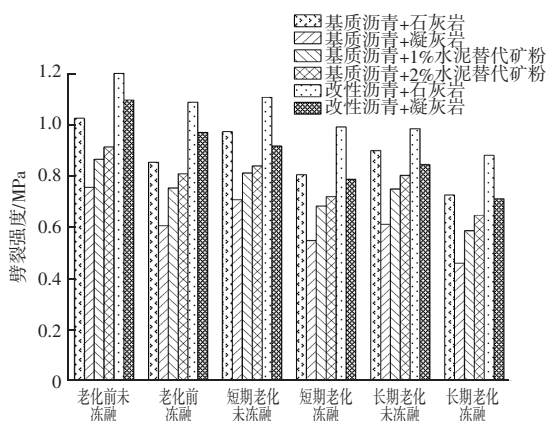
使用改性沥青,长期老化后石灰岩沥青混合料的残留稳定度为88.5%,长期老化后凝灰岩沥青混合料的残留稳定度为86.1%,两者相差不大。使用改性沥青,长期老化后的凝灰岩沥青混合料较使用基质沥青残留稳定度提高了19%。这是因为沥青质量直接影响其性能和黏结性,优质的沥青具有较高的柔性并与集料的黏附性更好,可以提高残留稳定度,因此长期水稳定性能更好。

2.1.2 冻融劈裂试验

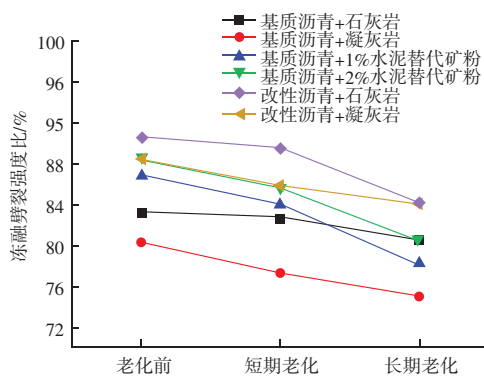
图2为老化前、短期老化和长期老化后的不同沥青混合料冻融劈裂强度。随着老化时间的增加,未冻融和冻融后的劈裂强度都呈下降趋势。使用基质沥青,老化前石灰岩沥青混合料的冻融劈裂强度为0.852 MPa,长期老化后为0.724 MPa;老化前凝灰岩沥青混合料的冻融劈裂强度为0.606 MPa,长期老化后为0.459 MPa。这是由于经过老化后,沥青黏结力下降,与集料之间的吸附力下降。冻融后沥青混合料劈裂强度要比未冻融沥青混合料的劈裂强度小,这是因为在冻融过程中,对沥青混合料疲劳寿命影响较大,沥青与集料的黏附力进一步被破坏。当1%、2%水泥替代矿粉时,石灰岩沥青混合料长期老化后的冻融劈裂强度分别提高了0.127、0.195 MPa。使用改性沥青后石灰岩沥青混合料长期老化后的冻融劈裂强度提高了0.251 MPa。

经过长期老化后的沥青混合料冻融劈裂强度比均不断减少,使用改性沥青的石灰岩沥青混合料和凝灰岩沥青混合料经过长期老化后冻融劈裂强度比分别为84.2%、84.2%;使用基质沥青的石灰岩沥青混合料和凝灰岩沥青混合料的长期老化后冻融劈裂强度比分别为80.6%、75.1%,凝灰岩沥青混合料不能满足80%的技术指标要求,这是因为长期老化的沥青混合料经过冻融后,使用基质沥青的混合料受到的水损害要大于改性沥青混合料。使用改性

沥青的石灰岩沥青混合料和凝灰岩沥青混合料经过长期老化后冻融劈裂强度比分别为 84.2%、84.2%，提升了 3.6%、9.1%。



(a) 冻融劈裂强度



(b) 冻融劈裂强度比

图2 不同老化程度沥青混合料冻融劈裂试验

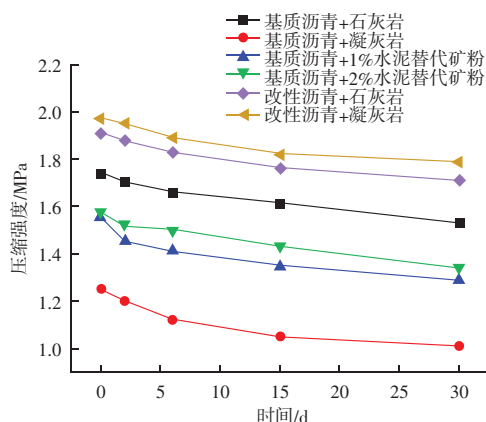
Fig.2 Freeze-thaw splitting test of asphalt mixtures with different degrees of ageing

当 1%、2% 水泥替代矿粉后，凝灰岩沥青混合料的长期老化后冻融劈裂强度比分别提高 3.2%、5.4%，因此，使用 2% 水泥替代矿粉效果最佳。6 种沥青混合料冻融劈裂试验表明，无论是老化前，还是老化后，使用改性沥青的凝灰岩沥青混合料或 2% 水泥替代矿粉的基质沥青凝灰岩沥青混合料都可满足技术要求，长期水稳定性能较好。

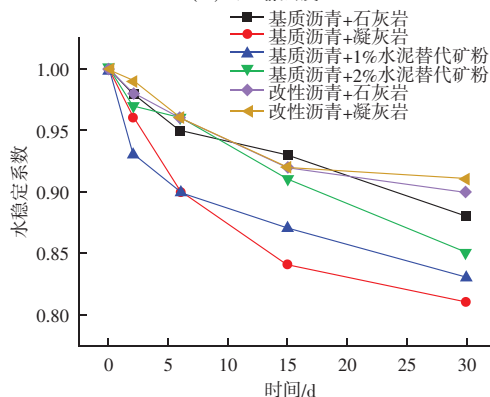
2.1.3 浸水后的单轴压缩试验

图 3 为浸水后单轴压缩试验结果。基质沥青石灰岩混合料和基质沥青凝灰岩沥青混合料在空气中养护 2 d 最大压缩强度分别为 1.74、1.25 MPa，用 1%、2% 水泥替代矿粉后，凝灰岩沥青混合料压缩强度提高了 0.31、0.32 MPa；使用改性沥青后，凝灰岩沥青混合料压缩强度提高了 0.72 MPa。随着沥

青混合料在浸水养护时间推移，沥青混合料的压缩强度均呈下降趋势，在 15 d 后下降速度减缓，在第 30 d 时，压缩强度大小顺序为：改性沥青 + 凝灰岩 > 改性沥青 + 石灰岩 > 基质沥青 + 石灰岩 > 基质沥青 + 石灰岩 + 2% 水泥 > 基质沥青 + 石灰岩 + 1% 水泥 > 基质沥青 + 石灰岩。



(a) 压缩强度



(b) 水稳定系数

图3 浸水后的单轴压缩试验

Fig.3 Uniaxial compression test after water immersion

6 种沥青混合料水稳定系数在 15 d 时下降趋于平缓，使用基质沥青的凝灰岩沥青混合料水稳定系数为 0.84，1% 水泥替换矿粉后凝灰岩沥青混合料的水稳定系数为 0.87，提高了 0.03；2% 水泥替换矿粉后凝灰岩沥青混合料的水稳定系数为 0.91，提高了 0.07。在 30 d 时，使用基质沥青的石灰岩沥青混合料水稳定系数降为 0.88，替换 2% 水泥 0.9 的技术指标要求。后凝灰岩沥青混合料的水稳定系数为 0.85，均低于 0.9 的技术指标要求。

使用改性沥青，石灰岩沥青混合料和凝灰岩沥青混合料的水稳定系数分别为 0.90、0.91，分别提高了 0.02、0.10，这是由于凝灰岩构造致密，硬度

材料科学

更高,使用改性沥青使得抗压能力更好。明显看出,当使用改性沥青或使用基质沥青并2%水泥替换矿粉后,凝灰岩沥青混合料的压缩强度和水稳定系数均有明显提高。

2.2 高、低温路用性能

由上述结果可知,使用基质沥青+2%水泥替代矿粉,或者使用改性沥青+矿粉两种方案下,凝灰岩沥青混合料长期水稳定性能有显著提升。为了评估凝灰岩沥青混合料路用性能,使用以上两种方案进行车辙试验和低温小梁弯曲试验。试验结果如图4所示。

当凝灰岩沥青混合料使用基质沥青时,将2%水泥替代矿粉,其动稳定度值为1 077次/mm,最大拉应变值为2 258 $\mu\epsilon$,与基质沥青+石灰岩沥青混合料相差不大,满足动稳定度1 000次/mm、最大拉应变2 000 $\mu\epsilon$ 的技术指标要求。当凝灰岩沥青混合料使用改性沥青时,其动稳定度值为5 347次/mm,远大于技术指标要求的2 800次/mm,其最大拉应变值为2 943 $\mu\epsilon$,满足技术指标要求的2 500 $\mu\epsilon$,说明改性沥青凝灰岩沥青混合料具有良好的高温和低温路用性能。

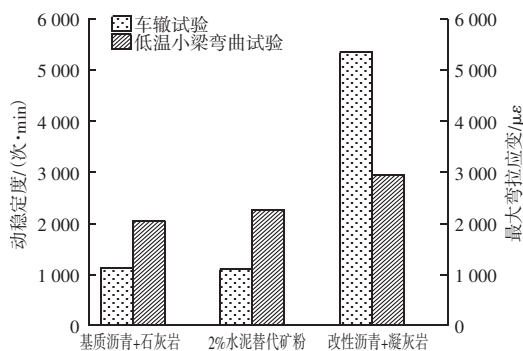


图4 高、低温路用性能试验

Fig. 4 High and low temperature road performance test

3 结论

通过对不同沥青及填料组合方案下的凝灰岩沥青混合料进行长期水稳定性能试验,得到以下主要结论:

(1) 随着沥青混合料老化,沥青混合料抗水损害能力呈下降趋势。使用基质沥青的凝灰岩沥青混合料经过长期老化后残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比和水稳定系数均不满足技术要求,应用在道路中容易引起水损害。

(2) 使用不同沥青、不同材料及级配类型的沥青混合料,其老化前后的性能存在着明显的差别。可以通过使用改性沥青,添加外掺剂等手段提高凝灰岩沥青混合料的长期水稳定性能。

(3) 使用基质沥青的凝灰岩沥青混合料,通过2%的水泥替代矿粉,长期老化后的凝灰岩沥青混合料残留稳定度提高了13%,冻融劈裂强度比提高了5.4%,15 d水稳定系数提高了0.07。当使用改性沥青时,长期老化后的凝灰岩沥青混合料残留稳定度提高了19%,冻融劈裂强度比提高了9.1%,水稳定系数提高了0.1,长期水稳定性能显著提高。经过改良后的两种凝灰岩沥青混合料长期水稳定性能均满足技术规范要求。

参 考 文 献

- [1] 张天. 道路酸性石料表面活化与粘附性研究 [J]. 安徽建筑, 2019, 26 (9): 245-247.
- [2] LIU D, ZHANG W, TANG Y, et al. Orthogonal experimental study on concrete properties of machine-made tuff sand [J]. Materials, 2022, 15 (10): 3516-3516.
- [3] 徐靖怡. 不同外加剂对凝灰岩沥青混合料抗水损害性能的改善研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.
- [4] GUO Y, WU H, SHEN A, et al. Study of the long-term water stability of asphalt mixtures containing steel slag aggregate [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2020, 34 (8): 877-902.
- [5] 邓星鹤, 余满汉. 透水性沥青混合料全程水稳定性规律研究 [J]. 公路工程, 2013, 38 (2): 202-205.
- [6] 张洪刚, 黄慧, 钱国平. 反复冻融条件下沥青混合料的间接拉伸试验研究 [J]. 公路, 2012 (4): 185-188.
- [7] 开鑫, 何建新, 杨武, 等. 沥青混凝土粘附性与长期水稳定性分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2018 (6): 37-40.
- [8] Kamani, Ajalloeian Rassoul. Evaluation of the mechanical degradation of carbonate aggregate by rock strength tests [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 11 (1): 121-134.
- [9] 杨玉晶, 孔令云. 集料化学成分/乳化沥青体系传质吸附 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (3): 22-32.
- [10] 吴义春, 徐靖怡, 张瑜, 等. 水环境下凝灰岩沥青混合料黏附性能研究 [J]. 公路, 2022, 67 (4): 305-310.
- [11] HESAMI S, ROSHAM H, Hamed GHOLAM H, et al. Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47 (5): 935-941.

材料科学

率不超过 50% 时抗压强度损失小于天然碎石混凝土；取代率为 75%、100% 时，150 次干湿循环后抗压强度为天然碎石混凝土的 87.2%、66.5%。

(2) 随着干湿循环次数增加，煤矸石混凝土的质量损失呈先减小后增大趋势，煤矸石掺量越大，150 次干湿循环后质量损失程度越高；掺入粉煤灰、硅灰可降低煤矸石混凝土质量损失率，煤矸石取代率为 25%、50% 时，150 次干湿循环后的质量损失均小于天然碎石混凝土。

(3) 随着干湿循环次数增加，煤矸石取代率为 25%、50% 的混凝土相对动弹性模量先增大后减小，且大于天然碎石混凝土，150 次干湿循环后相对动弹性模量仅略有降低。

(4) 干湿循环条件下，煤矸石混凝土自由氯离子含量随深度增加呈先增大后减小、最后趋于稳定趋势；表层 10 mm 深度范围为氯离子对流区，其他深度为氯离子扩散区；随干湿循环次数增加，煤矸石取代率增大，相同深度自由氯离子含量不断增大；经粉煤灰、硅灰补强作用，煤矸石取代率为 25%、50% 混凝土相同深度自由氯离子含量均小于天然碎石混凝土。

参 考 文 献

[1] 杨彪, 姚贤华, 何双华, 等. 煤矸石粗骨料混凝土力学及耐久性能的研究进展 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (1): 212–222.

[2] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1–5.

[3] 刘泽, 段开瑞, 周梅, 等. 煤矸石在土木工程材料中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (10): 88–99.

[4] 牛晓燕, 王海, 安明磊, 等. 煤矸石粗骨料对混凝土力学性能

的影响 [J]. 混凝土, 2023 (1): 68–72.

[5] 杨晓敏, 贾兵, 臧栋, 等. 非自燃煤矸石混凝土的制备与力学性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 94–97, 140.

[6] 邱继生, 朱梦宇, 周云仙, 等. 粉煤灰对煤矸石混凝土界面过渡区的改性效应 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 75–81.

[7] 胡彪, 李先海, 晏祥政, 等. 热活化煤矸石粉对基体–骨料界面过渡区性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (4): 1315–1322.

[8] 景宏君, 郭美蓉, 单俊伟, 等. 硅灰改性全煤矸石粗骨料混凝土力学性能和微观结构研究 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2018–2027.

[9] 何菁, 沈诗鸣, 沈媛媛, 等. 再生骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019 (6): 40–45.

[10] 王志刚, 安帅明, 王海, 等. 非自燃煤矸石粗骨料混凝土耐硫酸盐侵蚀性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (7): 105–111.

[11] 王志刚, 李颖, 刘明泽, 等. 非自燃煤矸石粗骨料高性能混凝土耐硫酸盐侵蚀性能 [J]. 河北大学学报 (自然科学版), 2024, 44 (3): 235–246.

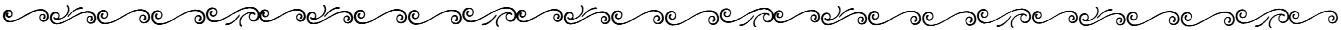
[12] 刘超, 蔡建赞, 朱超, 等. 硫酸盐干湿循环作用下煤矸石喷射混凝土劣化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3686–3693.

[13] 邱继生, 宋会涛, 关斌, 等. 盐冻循环作用下煤矸石混凝土损伤演化规律 [J]. 非金属矿, 2020, 43 (1): 28–32.

[14] 李霖皓, 龙广成, 白朝能, 等. 干湿循环作用下煤矸石及其与水泥石之间界面的耐久性研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51 (6): 153–159.

[15] 李森, 俞莉, 毛明杰. 干湿循环下煤矸石混凝土氯离子分布规律研究 [J]. 非金属矿, 2024, 47 (3): 52–55.

[16] 邱继生, 张如意, 侯博雯, 等. 干湿循环下煤矸石混凝土孔结构特性及抗氯离子侵蚀机理 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (12): 3993–4001.



(上接第 18 页)

[12] 王富强, 阳利君, 莫品疆. 提高花岗岩沥青混合料水稳定性试验研究 [J]. 公路, 2020, 65 (11): 328–330.

[13] 程浩, 袁泉, 周应时, 等. 沥青–炉渣界面黏附性与体系水稳性关系研究 [J]. 公路工程, 2024, 49 (4): 108–113, 128.

[14] 孙瑞. 不同外掺剂对沥青混合料抗老化性能研究 [J]. 黑龙

江交通科技, 2023, 46 (2): 61–63.

[15] 李闯民, 彭博, 甘新众, 等. 干法和湿法制备 TPCB 改性沥青混合料的路用性能室内试验研究 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2022, 19 (2): 49–60.