

长期水损害对凝灰岩沥青混合料路用性能影响研究

赵嘉明¹, 李琛琛^{2,3}, 张宝鑫^{4,5}, 史佳晨², 蔡燕霞^{1,4,5}

- (1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056000; 2. 浙江交投高速公路建设管理有限公司, 杭州 310024;
3. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
5. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088)

摘要: 为研究长期水损害对凝灰岩沥青混合料各项路用性能的影响。借助表面能理论对沥青-集料的黏附性进行定量评价并确定外掺剂的最佳掺量, 对凝灰岩沥青混合料进行劈裂、单轴压缩动态模量和中低温半圆弯曲试验, 分析长期水损害对混合料各项路用性能的影响。结果表明: 水泥和抗剥落剂的最佳掺量分别为2%和0.6%; 两种外掺剂均能提高凝灰岩沥青混合料的长期抗水损害能力, 抗剥落剂对凝灰岩沥青混合料的高温 and 低温性能提升显著; 抗剥落剂在水损害前期的效果较好, 而水泥在整个水损害过程中的改善效果更稳定持久。研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 道路工程; 长期水损害; 凝灰岩; 沥青胶结料

中图分类号: U416.217 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2026)04-0085-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.013

Influence of Long Term Water Damage on road Performance of Tuff Asphalt Mixture

ZHAO Jiaming¹, LI Chenchen^{2,3}, ZHANG Baoxin^{4,5}, SHI Jiachen², CAI Yanxia^{1,4,5}

- (1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China;
2. Zhejiang Communications Investment Group Expressway Construction and Management Co., Ltd., Hangzhou 310024, China;
3. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
5. Beijing Zhonglu Gaoke Highway Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In this paper, the contact angle between aggregate and asphalt is measured and the adhesion parameters are calculated to study the performance of asphalt mixture after long-term water damage. The results show that the contact angle test is an effective method to analyze the adhesion between aggregate and asphalt, and the optimal dosage of cement and anti stripping agent is 2% and 0.6%, respectively; Both admixtures can improve the long-term water damage resistance of tuff asphalt mixture, which is indirectly reflected in the road performance, and the improvement effect is different in different road performance. The research findings can provide reference for relevant engineering projects.

Key words: road engineering; prolonged water damage; tuff; asphalt binder

0 引言

浙江沿海凝灰岩等酸性岩石分布广泛，而且储量丰富^[1]，这些资源为当地提供了大量的原材料选择。因此，研发沿线凝灰岩资源化利用技术对缓解砂石料供需矛盾，降低高速公路工程造价，提升经济效益有重要意义^[2]。

张文涛^[3]通过室内试验验证了花岗岩沥青混合料的水稳定性、高温抗车辙性能和耐久性，进一步确定抗剥落剂掺加方案，并应用于试验路段；吴义春等^[4]对比消石灰和抗剥落剂这两种外掺剂及掺量对凝灰岩沥青混合料水稳定性和黏附性的改善效果；郝青等^[5]研究发现粉尘质量分数和空隙率的提高对花岗岩沥青混合料的水稳定性有不利影响；廖光坚^[6]研究发现选择石灰岩作为细集料有利于提高花岗岩沥青混合料的水稳定性；冯明杰等^[7]研究发现少量钢渣细集料的掺入可以提高花岗岩沥青混合料的路用性能；王立业等^[8]研究发现对花岗岩沥青混合料高温性能及水温稳定性的改善效果排序均为偶岩复合改性沥青>岩沥青改性沥青>SBS 改性沥青>基质沥青>硅烷偶联剂；Hoy 等^[9]研究了花岗岩等集料对天然橡胶改性沥青混合料性能的影响；Azarhoosh 等^[10]将纳米 TiO₂ 加入到花岗岩沥青混合料中，通过间接拉伸疲劳试验评估沥青混合料的疲劳寿命；Moghadas 等^[11]使用高密度和低密度聚乙

烯对花岗岩表面进行处理，通过间接拉伸强度试验和刚度模量试验评价混合料的水稳定性；杨涛等^[12]初步验证了凝灰岩应用于沥青路面的可行性；胡满意^[13]研究发现减小凝灰岩的针片状含量可以改善沥青混合料的各项路用性能；罗列^[14]验证了凝灰岩应用于福建地区 SMA 路面的可行性；杨祖涛等^[15]优化了凝灰岩隧道洞渣的破碎和除尘工艺，使其可以应用于沥青路面中下面层。

现有研究主要集中在花岗岩集料，对同为酸性集料的凝灰岩研究较少，同时缺少凝灰岩沥青混合料受到长期水损害后性能的研究，因此有必要对凝灰岩沥青混合料进行进一步的研究。通过表面能理论对各外掺剂方案沥青与凝灰岩的黏附性进行分析研究并确定外掺剂的最佳掺量。之后通过多次冻融循环模拟凝灰岩沥青混合料受到的长期水损害，分析验证混合料受到水损害后的各项路用性能。

1 试验原材料与配合比设计

1.1 主要原材料

(1) 沥青：SBS 改性沥青参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对沥青的各项性能指标进行测试，沥青各项性能指标均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求，具体性能指标见表 1。

表 1 SBS 改性沥青技术指标							
Table 1 SBS-modified asphalt binder properties							
技术指标	针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s) / (0.1 mm)	5 ℃ 延度 /cm	软化点 (R&B) /℃	运动黏度 (135 ℃) / (Pa·s)	RTFOT 试验后		
					质量变化 /%	针入度比 (25 ℃) /%	5 ℃ 延度 /cm
试验结果	53	35	90.5	2.5	-0.033	79	21

(2) 集料：凝灰岩粗集料产自浙江温州；玄武岩粗集料产自河北邯郸。参照 JTG 3432—2024《公路工程集料试验规程》对集料各项性能指标进行试

验。集料各项指标见表 2，各项指标均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

表 2 集料技术指标					
Table 2 Aggregate technical index					
技术指标	凝灰岩		玄武岩		技术要求
	9.5~13.2 mm	4.75~9.5 mm	9.5~13.2 mm	4.75~9.5 mm	
表观相对密度	2.691	2.690	2.923	2.920	≥2.60
针片状颗粒/%	6.3	6.4	5.3	4.0	≤12
吸水率/%	0.49	0.66	0.71	1.33	≤2.0
洛杉矶磨耗/%	11.4	11.4	13.8	13.8	≤28
压碎值/%	9.2	9.2	11.8	11.8	≤26

(3) 外掺剂

抗剥落剂：磷酸酯类液体抗剥落剂，各项指标均符合 JT/T 860.4—2014《沥青混合料改性添加剂第四部分：抗剥落剂》要求。

水泥标号为 P·O 42.5，其所检指标均符合

表 3 沥青混合料配合比设计结果及最佳油石比
Table 3 Asphalt mixture mix design results and optimum asphalt aggregate ratio

	筛孔尺寸/mm										最佳油石比
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
玄武岩	100	97.6	59.9	24.6	19.6	15.1	13.3	12.0	11.5	9.7	6.0
凝灰岩	100	94.2	61.2	23.2	19.8	15.9	14.4	12.7	11.9	9.6	6.2

1.3 试验方法

(1) 接触角试验及表面能参数计算

试验中将沥青制成固态沥青膜片进行接触角的测定。

探测液体分别为蒸馏水、乙二醇及甲酰胺，其 25℃ 下表面能参数数据见表 4。

表 4 25℃ 下的表面能参数数据
Table 4 Surface energy parameter data at 25℃

探测液	γ	γ^{LW}	γ^+	γ^-
蒸馏水	72.80	21.60	25.50	25.50
乙二醇	48.30	29.30	1.92	47.00
甲酰胺	58.20	39.50	2.28	39.60

(2) 劈裂试验

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》成型试件并进行劈裂试验。

(3) 单轴压缩动态模量试验

通过旋转压实仪成型尺寸直径 150 mm、高 180 mm 的圆柱体试件，采用钻芯机从成型的试件中钻取直径 100 mm 的芯样，并用切割机切除试件两端空隙率较大的部分，保证试件高度为 150 mm。冻融循环后的试件置于 60℃ 条件下养护 5 h 后，将其移入沥青混合料基本性能试验仪中 60℃ 保温 0.5 h 后进行单轴压缩动态模量试验，获得 20、10、5 Hz 加载频率下试件的动态模量 ($|E^*|$) 和相位角 (φ) 并计算抗车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$ [16]。

(4) 半圆弯曲疲劳试验

通过旋转压实仪成型尺寸直径 150 mm、高 140 mm 的圆柱体试件，用切割机切除试件两端空隙率较大的部分后，将剩下的部分切成 4 个厚度为 50 mm 的半圆形试件 [17]。冻融循环后的试件进行置于 15℃ 条件下养护 5 h 后，将试件移入配备控温箱的沥青混合料多功能材料试验机中，确定应力比和

GB175—2007《通用硅酸盐水泥》。

1.2 混合料配合比设计

采用 SMA-13 沥青混合料作为研究对象，按照 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》SMA 配合比设计，最终所选级配及最佳油石比见表 3。

加载频率分别为 0.3 和 10 Hz，以正弦波的形式进行加载直至破坏，记录循环加载的次数为沥青混合料的疲劳寿命。

(5) 低温半圆弯曲劈裂试验

采用 (4) 相同的方式成型半圆形试件。冻融循环后的试件进行置于 -10℃ 条件下养护 5 h 后，将试件移入配备控温箱的沥青混合料多功能材料试验机中，以 50 mm/min 的加载速率进行劈裂试验通过下式计算沥青混合料的低温断裂能 [18]。

$$G_f = W_f / A_{lig} \tag{1}$$

式中： G_f 为断裂能，J/m²； W_f 为断裂功，J； $A_{lig} = r \times t$ 为断裂面面积，m²； r 为试样半径，m； t 为试样厚度，m。

2 试验结果与分析

2.1 接触角试验及黏附性参数计算结果

在 25℃ 下三种探测液与沥青、集料之间躺滴法试验测得的接触角结果见表 5。

表 5 25℃ 下躺滴法接触角试验结果
Table 5 Contact angle test results by the sessile drop method at 25℃

方案	甲酰胺		乙二醇		水	
	$\theta/ (^{\circ})$	$\cos\theta$	$\theta/ (^{\circ})$	$\cos\theta$	$\theta/ (^{\circ})$	$\cos\theta$
SBS 改性沥青	89.6	0.007	82.9	0.124	97.9	-0.137
1%水泥	88.1	0.033	81.3	0.151	96.4	-0.111
2%水泥	81.3	0.151	74.2	0.272	88.9	0.019
3%水泥	82.2	0.136	74.9	0.261	89.7	0.005
4%水泥	84.5	0.096	77.6	0.215	92.3	-0.040
0.2%抗剥落剂	87.6	0.042	80.1	0.172	95.7	-0.099
0.4%抗剥落剂	84.2	0.101	78.3	0.203	93.5	-0.061
0.6%抗剥落剂	82.1	0.137	76.5	0.233	90.1	-0.002
0.8%抗剥落剂	83.0	0.122	76.9	0.227	91.2	-0.021
1.0%抗剥落剂	84.5	0.096	78.1	0.206	93.4	-0.059
凝灰岩	58.8	0.518	45.5	0.701	70.3	0.337
玄武岩	59.0	0.515	43.9	0.721	73.1	0.291
石灰岩	54.8	0.576	36.7	0.802	70.9	0.327

材料科学

躺滴法试验测得的只是已知液体与沥青表面的接触角值，需通过进一步计算才能得到沥青具体的表面能参数，具体计算结果见表 6、7。

表 6 各集料与 SBS 改性沥青之间的黏附功
Table 6 Adhesion work between aggregates and SBS-modified asphalt binder

集料	$W_{as}/(mJ/m^2)$
凝灰岩	34.26
玄武岩	41.61
石灰岩	42.90

表 7 凝灰岩与各方案沥青的黏附性参数计算结果
Table 7 Calculation results of adhesion parameters between tuff and asphalt of each scheme

方案	$W_{as}/(mJ/m^2)$	$W_{asw}/(mJ/m^2)$	ER
SBS 改性沥青	-34.26	-117.560	0.291 4
1%水泥	-43.75	-118.262	0.369 9
2%水泥	-49.38	-122.130	0.404 3
3%水泥	-48.65	-121.866	0.399 2
4%水泥	-46.82	-120.424	0.388 8
0.2%抗剥落剂	-44.82	-118.086	0.379 6
0.4%抗剥落剂	-46.87	-118.843	0.394 4
0.6%抗剥落剂	-49.98	-121.001	0.413 1
0.8%抗剥落剂	-48.12	-120.523	0.399 3
1.0%抗剥落剂	-46.61	-119.222	0.391 0

由表 6 可知，凝灰岩、玄武岩、石灰岩与 SBS 改性沥青之间的黏附功分别为 34.26、41.61 和 42.90 mJ/m²，凝灰岩与沥青之间的黏附功最小，石灰岩最大。这说明凝灰岩与沥青之间的黏附性最差，且与玄武岩和石灰岩之间都有较大的数值差距，凝灰岩中过高的 SiO₂ 含量严重影响了其与沥青之间的黏附性。

由表 7 可知，加入外掺剂的方案黏附功 W_{as} 、剥落功 W_{asw} 和水稳定性评价指标 ER 均随掺量的增加呈先增大后减小的趋势，当水泥和抗剥落剂掺量分别为 2% 和 0.6% 时达到最大。剥落功 W_{asw} 随外掺剂掺量的变化幅度较小，黏附功 W_{as} 随外掺剂掺量的变化幅度较大，这说明外掺剂是从提高沥青与集料的黏附功 W_{as} 角度来改善黏附性，而不是从降低水对沥青与集料的剥落功 W_{asw} 。当沥青混合料在拌和阶段时，沥青与集料之间的黏附功越大，沥青和集料的黏附性越强，因而当水泥和抗剥落剂掺量分别为 2% 和 0.6% 时水稳定性评价指标 ER 达到最大，分别为

0.404 3 和 0.413 1。水泥和抗剥落剂最高分别能将 ER 提高 38.7% 和 41.8%，这说明抗剥落剂较水泥对水稳定性改善效果更佳，且两者均能有效改善凝灰岩沥青混合料的水稳定性。

2.2 劈裂试验结果

由图 1、2 可知，随着冻融循环次数的增加，四种沥青混合料的劈裂抗拉强度比都呈下降趋势。在整个水损害过程中，凝灰岩沥青混合料的劈裂抗拉强度比受冻融循环损伤影响最大，其次是玄武岩混合料，水泥和抗剥落剂均能显著提升凝灰岩沥青混合料抗水损害能力。经过 7 次冻融循环后，凝灰岩混合料的劈裂强度和劈裂抗拉强度比最低，分别为 0.525 MPa 和 59.19%；加入水泥和抗剥落剂后，混合料的长期水稳定性均有显著改善，劈裂强度比分别提高 22.64% 和 14.17%。在没有进行任何抗剥落措施的情况下，凝灰岩沥青混合料抗水损害性的能力与玄武岩沥青混合料差距较大。

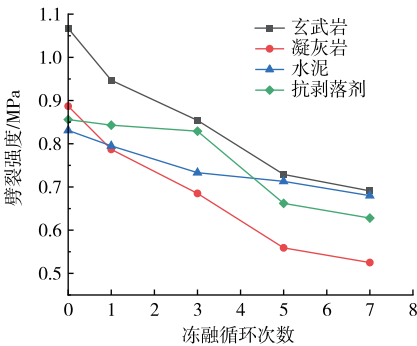


图 1 各方案混合料的劈裂强度随冻融循环次数变化结果
Fig. 1 Variation results of splitting strength of mixtures in each scheme with the number of freeze-thaw cycles

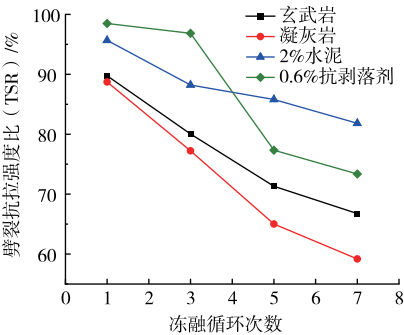


图 2 各方案混合料的劈裂抗拉强度比随冻融循环次数变化结果
Fig. 2 Variation results of splitting tensile strength ratio of mixtures in each scheme with the number of freeze-thaw cycles

在水损害初期，抗剥落剂对混合料抗水损害能

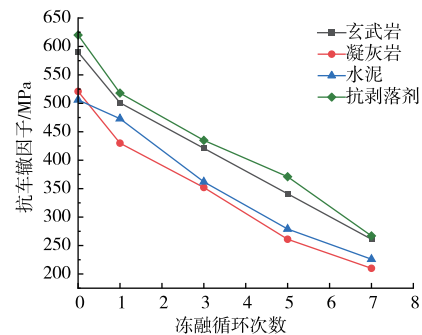
力改善效果最好。冻融循环三次时, 掺入抗剥落剂的混合料劈裂抗拉强度比比凝灰岩混合料和掺入水泥的混合料分别高 19.62% 和 8.64%, 而冻融循环三次后, 掺入抗剥落剂的混合料的劈裂抗拉强度比陡然下降。这是因为抗剥落剂对凝灰岩集料表面改性后与沥青之间生成的黏结产物使沥青-集料界面黏附性增强, 导致沥青混合料早期抗水损害能力较强; 而随着冻融循环次数的增加, 沥青在抗剥落剂的影响下更容易受到损伤, 且界面黏结产物逐渐发生断裂, 导致在水损害后期水分进入沥青-集料界面中发生乳化反应导致混合料强度下降。

整个冻融循环过程中, 掺入水泥的混合料的强度下降速度最慢。在冻融循环 5 次后, 掺入水泥的混合料的劈裂抗拉强度比高于掺入抗剥落剂的混合料, 达到 85.80%。这是因为水泥在水损害过程中发生水化反应, 延缓水损害的进一步发生, 且水化产物本身具有一定强度并形成骨架作用, 导致掺入水泥的混合料的劈裂抗拉强度比强度衰减缓慢。

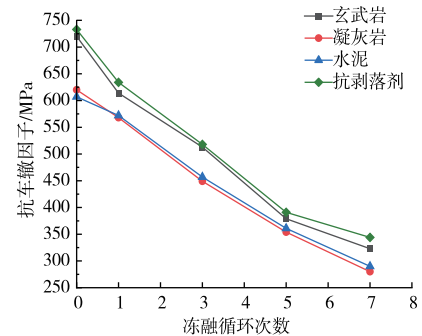
2.3 高温抗车辙性能研究

由图 3 可知, 随着水损害的加深, 各频率下四种沥青混合料的抗车辙因子均呈下降趋势。其中, 抗剥落剂对凝灰岩沥青混合料的高温性能提升显著, 使混合料在整个水损害过程中的抗车辙因子始终高于玄武岩沥青混合料。这是因为抗剥落剂提升了沥青的软化点, 并且在沥青-集料界面产生的黏结产物使混合料产生了较大的黏滞阻力, 使得混合料的抗车辙因子增大。混合料未收到水损害时, 随着频率从 20 Hz 降低到 5 Hz, 抗剥落剂对混合料高温性能改善效果从 9% 提升到 29.5%, 其余几种沥青混合料也呈现大致相同的趋势, 随着频率的降低, 各方案混合料抗车辙因子之间的差距也随之增大。而掺入水泥的凝灰岩沥青混合料在未受到水损害时, 水泥对凝灰岩沥青混合料的高温性能几乎没有影响。随着冻融循环次数的增加, 水泥对凝灰岩沥青混合料抗水损害性能的提升效果开始显现出来, 并且水泥水化后形成的 CaCO_3 本身具有一定的强度, 对混合料的模量和抗车辙因子的提升起到了很大的作用。

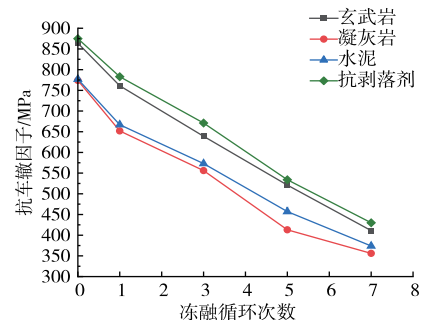
由图 4 可知, 相位角 φ 表示黏弹性材料响应应变落后于应力的程度, 反映了材料属性中弹性成分与黏性成分的比例, 通常认为纯弹性材料的相位角 φ



(a) 5 Hz



(b) 10 Hz



(c) 20 Hz

图 3 各方案混合料冻融循环后的高温抗车辙因子

Fig. 3 High temperature rutting resistance factor of mixture after freeze-thaw cycle in each scheme

为 0, 而纯黏性材料的相位角 φ 为 90° 。研究结果表明, 各方案沥青混合料的相位角均随着冻融循环次数的增加而增大。这说明在受到水损害后, 沥青混合料的黏性逐渐增大, 弹性逐渐减小。这直接导致沥青混合料恢复弹性形变的能力变差和抗车辙性能的下降。由此可见, 相位角的大小间接反映了抗车辙能力的强弱, 相位角越小, 沥青混合料弹性越好, 抗车辙能力越强。由于各频率下沥青混合料的相位角均呈现相同的趋势, 仅以 20 Hz 下沥青混合料的相位角为例进行分析。

材料科学

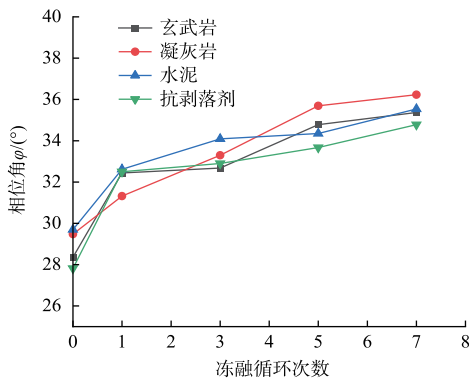


图4 沥青混合料冻融循环后 20 Hz 下的相位角
Fig. 4 Phase angle of asphalt mixture at 20 Hz after freeze-thaw cycle

2.4 中温抗疲劳性能研究

由图5可知,整个水损害过程中,玄武岩沥青混合料的疲劳寿命始终最高。而在未经过冻融循环的凝灰岩沥青混合料的三个方案中,加入抗剥落剂的凝灰岩沥青混合料疲劳寿命最大,为5 536次;其次是加入水泥的混合料和不加外掺剂的凝灰岩混合料,分别为5 349和4 417。加入抗剥落剂和水泥对凝灰岩沥青混合料的疲劳寿命分别提升25.3%和21.1%。这是因为玄武岩粗集料的表观相对密度为2.923大于凝灰岩的2.691。木质素纤维是根据沥青混合料总质量的0.3%掺入,这就导致同体积下凝灰岩沥青混合料中的木质素纤维少于玄武岩沥青混合料。而木质素纤维在延缓沥青混合料破坏方面起到重要作用,这就使得玄武岩沥青混合料的疲劳寿命大于凝灰岩沥青混合料。对于凝灰岩沥青混合料来说,水泥和抗剥落剂的加入会使得沥青胶浆变得更加黏稠,导致沥青混合料的恢复疲劳变形和抵抗疲劳破坏的能力变强。

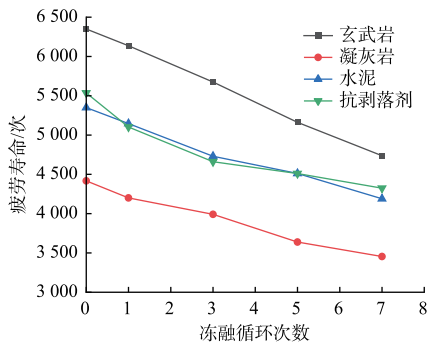


图5 各方案混合料冻融循环后的疲劳寿命
Fig. 5 Fatigue life of mixtures after freeze-thaw cycles in each scheme

2.5 低温抗裂性能研究

由图6可知,各种沥青混合料的低温断裂能均随着冻融损伤的加深而降低。整个水损害过程,玄武岩和凝灰岩沥青混合料的低温断裂能之间的差距始终较小,这说明在SMA沥青混合料中,粗集料的酸碱性对低温抗裂性能影响很小。其次,抗剥落剂的加入使沥青混合料在水损害初期的低温性能较好,而在整个水损害过程中加入抗剥落剂的混合料的低温性能下降速度非常快,下降了29.9%。这是因为抗剥落剂能大幅提升沥青的低温延度,而随着冻融循环损伤的加深,沥青受到的损伤较大,使得沥青混合料的低温性能大幅下降。加入水泥的沥青混合料的低温抗裂性能衰减速度最慢,这是由于在沥青混合料水损害过程中,掺入的水泥水化后形成的 CaCO_3 在沥青混合料内部形成强度,提高了凝灰岩沥青混合料本身被破坏所需要的能量。

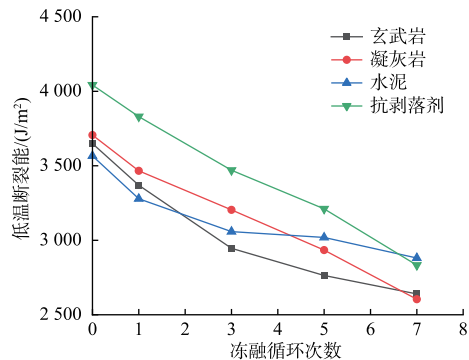


图6 各方案混合料冻融循环后的低温断裂能
Fig. 6 Low temperature fracture energy of mixtures after freeze-thaw cycles

3 结论

借助表面能理论定量评价沥青-集料的黏附性,添加水泥和抗剥落剂改善凝灰岩沥青混合料的水稳定性,研究了沥青混合料受到长期水损害后的各项性能,得到主要结论如下:

(1) 水泥和抗剥落剂对凝灰岩沥青混合料水稳定性改善效果最好的掺量分别为2%和0.6%。

(2) 水泥和抗剥落剂均能有效提升凝灰岩沥青混合料的长期抗水损害能力,抗剥落剂在水损害前期的效果较好,而水泥在整个水损害过程中的改善效果更稳定持久。

(3) 两种外掺剂均可以提升凝灰岩沥青混合料

长期水损害后的各项路用性能。其中抗剥落剂对凝灰岩沥青混合料的高温和低温性能提升显著。受到水损害后, 沥青混合料的黏性逐渐增大, 弹性逐渐减小。凝灰岩密度小是造成成型的沥青混合料疲劳寿命低于玄武岩沥青混合料的重要因素, 在实际工程中适当增加木质素纤维能改善这一情况。

参 考 文 献

- [1] 艾润东. 凝灰岩机制砂吸水特征对水泥基材料性能影响及孔结构分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [2] 李成明, 方树君, 赵嘉明, 等. 抗剥落剂对凝灰岩沥青混合料路用性能的影响分析 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (12): 140-143.
- [3] 张文涛. 花岗岩在高温多雨地区沥青路面上面层的应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [4] 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.
- [5] 郝青, 周世康, 马浩, 等. 花岗岩沥青混合料水稳定性影响因素分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2023, 48 (4): 847-856.
- [6] 廖光坚. 抗剥落剂对沥青及花岗岩集料沥青混合料性能的影响 [J]. 路基工程, 2023 (2): 101-106.
- [7] 冯明杰, 郭荣鑫, 颜峰, 等. 基于表面能理论的钢渣-沥青黏附性研究 [J]. 应用化工, 2022, 51 (增刊1): 113-117.
- [8] 王立业, 杨永富, 张黎明, 等. 基于加速加载试验的花岗岩沥青混合料水温稳定性研究 [J]. 公路工程, 2021, 46 (2): 117-123, 138.
- [9] Hoy M, Suddeepong A, Horpibulsuk S, et al. Improved performance of natural rubber latex - modified asphalt concretes with various types of aggregates [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 36 (1).
- [10] Azarhoosh A R, Moghadas N F, Khodaii A, et al. Using the surface free energy method to evaluate the effects of nanomaterial on the fatigue life of hot mix asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (10).
- [11] Moghadas N F, Arabani M, Hamed G H, et al. Influence of using polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot mix asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1523-1527.
- [12] 杨涛, 郑健龙, 谢博, 等. 凝灰岩沥青混合料高低温和水稳定性性能试验研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (3): 1-6.
- [13] 胡满意. 凝灰岩集料针片状颗粒含量对沥青混合料力学性能的影响研究 [J]. 公路工程, 2017, 42 (6): 311-315.
- [14] 罗列. 福建地区 SMA 路面凝灰岩的应用研究 [J]. 福建建设科技, 2021 (4): 54-56.
- [15] 杨祖涛, 陈彪, 刘燕辉, 等. 凝灰岩隧道洞渣集料技术评价及其在沥青混合料中的应用 [J]. 中国新技术新产品, 2023 (12): 110-114.
- [16] 杨洋, 李玉鑫, 张争奇, 等. 沥青混合料 SPT 简单性能试验及参数评价 [J]. 中外公路, 2013, 33 (1): 262-268.
- [17] Jiang Jiawang, Ni Fujian, Dong Qiao, et al. Research on the fatigue equation of asphalt mixtures based on actual stress ratio using semi-circular bending test [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 996-1002.
- [18] 姜鑫龙, 杨树, 李庭予. 基于半圆弯曲试验的沥青混凝土低温性能指标研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (2): 428-434.