

不同环境下酸性闪长岩沥青混合料长期 水稳性能评价研究

曹忠露¹, 陈平², 刘学文², 谭波^{2*}

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津市 300222; 2. 桂林理工大学 广西建筑新能源与
节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:通过浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验以及车辙试验评价了采用酸碱复合集料、单掺水泥(2%水泥替代矿粉)、消石灰(30%消石灰水浸泡石料)以及抗剥落剂(0.3%抗剥落剂改性沥青)的酸性闪长岩沥青混合料的短期水稳性能,再通过反复冻融劈裂试验、反复冻融烘劈裂试验以及反复酸蚀冻融劈裂试验测试处置酸性闪长岩沥青混合料在不同环境下的长期水稳性能。结果表明:酸性闪长岩的物理力学性能均满足规范要求;处置后酸性闪长岩沥青混合料的短期水稳性能显著提升,满足规范使用要求;但经0.2%抗剥落剂处置的酸性闪长岩沥青混合料在高温下的长期水稳性能较差;经30%消石灰水处置的酸性闪长岩沥青混合料具有良好的长期水稳性能,可推荐应用于工程中。

关键词:沥青混合料;酸性闪长岩;冻融;冻融烘;酸蚀冻融;水稳性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Evaluation of Long-Term Water Stability of Acidic Diorite Asphalt Mixtures in Different Environments

CAO Zhonglu¹, CHEN Ping², LIU Xuewen², TAN Bo^{2*}

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Building New
Energy and Energy Conservation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The short-term water stability of acidic diorite asphalt mixtures with acid-alkaline composite aggregates mixed with cement (2% cement instead of mineral powder), slaked lime (30% slaked lime water for stone immersion), and anti-spalling agent (modified asphalt with 0.3% anti-spalling agent) was evaluated by Marshall test of immersion, freeze-thaw splitting test, and rutting test. Then, by repeated freeze-thaw splitting test, repeated freeze-thaw and baking splitting test, and repeated acid-etching freeze-thaw splitting test, the long-term water stability of the treated acidic diorite asphalt mixtures in different environments was tested. The results show that the physical and mechanical properties of acidic diorite meet the specification requirements; the short-term water stability of the treated acidic diorite asphalt mixtures is significantly improved and meets the specification requirements. However, the long-term water stability of the acidic diorite asphalt mixtures treated with 0.2% anti-spalling agent is poor at high temperatures. The acidic diorite asphalt mixtures treated with 30% slaked lime water have good long-term water stability and can be recommended for engineering applications.

Keywords: asphalt mixture; acid diorite; freeze-thaw; freeze-thaw and baking; acid-etching

收稿日期:2023-05-16(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52062009)

作者简介:曹忠露,男,博士,高级工程师.E-mail:caozhonglu@126.com

*通信作者:谭波,男,博士,教授.E-mail:bbbza2004@163.com

0 引言

随着广西壮族自治区公路网的不断建设,对于石料的需求越来越多^[1-2]。其中,中碱性石料由于与沥青黏附性好而被广泛应用于公路建设当中,而酸性集料由于与沥青黏附性较差而被诟病^[3-5]。但某些在建高速公路沿线仅有大量的酸性集料,若能“因地制宜,就地取材”,将可以减少因追求中碱性集料而扩大运距造成的环境破坏和经济负担,进而产生巨大的经济效益与社会效益^[6-7]。现已查明,广西浦北至北流在建高速公路沿线存有大量的酸性闪长岩石料,若能将其用于公路工程建设中,可有效解决中碱性石料紧缺的问题^[8-10]。查询相关文献可知^[11-14]:酸性石料经处置后可用于沥青路面且短期水稳性能良好,但其长期水稳性能还需要理论支撑。针对上

述问题,本文对广西浦北至北流高速公路沿线酸性闪长岩石料进行全面的分析,对处置后沥青混合料进行路用性能测试,并通过改进的冻融劈裂试验对其在不同环境下的长期水稳性能进行测试,以期广西壮族自洽区酸性石料的使用提供技术支撑。

1 原材料性能分析

1.1 外加剂基本技术指标

试验用水泥、消石灰和抗剥落剂等外加剂主要技术指标见表1~3。

表1 XT-1型抗剥落剂技术指标

Table 1 Technical index of XT-1 anti-spalling agent

外观	闪点/℃	溶解性
棕色黏稠液体	>200	溶于沥青

表2 水泥基本性能测试结果

Table 2 Test results of basic cement properties

项目	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	初凝/ min	终凝/ min	安定性 (雷氏法)	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
测试结果	376	150	205	合格	29	51	5.8	8.2
规范要求	300~450	≥ 3	≥ 6	—	≥ 17	≥ 42.5	≥ 3.5	≥ 6.5

表3 消石灰测试结果

Table 3 Test results of slaked lime %

项目	有效CaO 含量	MgO含 量	有效CaO+ MgO含量	换算Ca(OH) ₂ 含量
测试结果	71.33	2.10	73.43	94.24
规范要求	—	≤ 5	≥ 70	—

1.2 闪长岩物理力学性能测试

闪长岩的物理力学性能测试结果见表4,并同时测试碱性石灰岩集料进行对比分析。

表4 物理力学性能测试结果

Table 4 Test results of physical and mechanical properties

项目	压碎值/ %	磨光值	磨耗值/ %	针片状含 量/%
闪长岩	14.3	9.1	47.0	14.8
石灰岩	24.3	24.9	43.0	6.4
规范要求	≤ 28	≥ 42	≤ 26	≤ 15

从表4可以看出:闪长岩除针片状含量略高于石灰岩外,其压碎值、磨光值、洛杉矶磨耗值均优于石灰岩,满足规范的要求,说明闪长岩能满足用于沥青

面层的力学性能要求^[15]。

1.3 闪长岩的化学性能测试

利用碱值试验对闪长岩与石灰进行酸碱性测试,并通过水煮法试验评价闪长岩与沥青的黏附性能是否达标^[16-17]。碱值测试结果见表5;黏附性测试结果见表6。

表5 碱值测试结果

Table 5 Test results of alkali value

闪长岩		石灰岩
黑	红	
0.35	0.34	0.85

表6 黏附性测试结果

Table 6 Test results of adhesion 级

闪长岩	石灰岩	规范
3	5	≥ 4

从表5、6可以看出:闪长岩的碱值远小于碱性石灰岩,由石灰岩为碱性推断出广西浦北至北流高速公路沿线的闪长岩为酸性石料。并测试得到闪长岩

与沥青的黏附等级为3级,不符合规范标准,需要经过预处理才可用于沥青路面,同时也验证了碱值试验的测试结果。

1.4 沥青

试验采用70#基质沥青和经XT-1型抗剥落剂改性沥青,测试结果见表7。

表7 沥青技术指标

Table 7 Technical indexes of asphalt

项目	针入度/(0.1 mm)	延度/cm	软化点/℃
70#基质沥青	68.9	35.6	49.7
改性沥青	69.7	39.0	48.1
规范要求	60~80	≥15	≥46

从表7可以看出:经抗剥落剂改性前后沥青的针入度、延度、软化点等技术指标变化不大,均符合相关规范技术要求。

2 配合比设计

为了增强酸性闪长岩沥青混合料的水稳性能,基于AC-20级配采用酸碱复合集料并分别单掺水泥(2%水泥替代部分质量的矿粉)、消石灰(30%消石灰水浸泡酸性闪长岩集料)以及抗剥落剂(0.3%抗剥落剂改性沥青)提高酸性闪长岩沥青混合料的水稳性能。其中,粒径大于2.36 mm的粗集料使用酸性闪长岩集料,粒径小于2.36 mm的细集料采用石灰岩集料。AC-20设计级配见表8。

由于外加剂的掺量比较少,且加入抗剥落剂后沥青的技术指标只发生了略微的变化,因此,仅测试未处置酸性闪长岩沥青混合料的最佳油石比,后续处置前后酸性闪长岩沥青混合料所用到的油石比均相同。最佳油石比时马歇尔体积指标见表9。

表8 AC-20设计级配

Table 8 AC-20 gradation design

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	92	80	72	56	44	33	24	17	13	7
下限	100	90	78	62	50	26	16	12	8	5	4	3
中值	100	95	85	71	61	41	30	22.5	16	11	8.5	5
设计	100	95.3	78.9	65.8	50.5	28.7	21.9	17.3	12.5	8.9	6.9	5.1

表9 最佳油石比时马歇尔体积指标

Table 9 Marshall volume index at optimal oil-to-stone ratio

油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
4.3	2.448	4.6	13.4	65	13.25	2.60

3 酸性闪长岩沥青混合料的路用性能评价

通过高温稳定性以及水稳定性试验对处置前后酸性闪长岩沥青混合料进行基本路用性能评价。

3.1 短期水稳性能测试

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[15],选用“浸水马歇尔试验”和“冻融劈裂试验”对酸性闪长岩沥青混合料进行水稳性能测试,水稳性能测试结果如表10所示。

从表10可以看出:

(1) 与未处置酸性闪长岩沥青混合料相比,经2%水泥、30%消石灰水以及0.3%抗剥落剂处置过

后残留稳定度分别增加了6.45%、6.46%以及3.53%,冻融劈裂强度比分别增加了15%、22%以及12%,说明处置后酸性闪长岩沥青混合料的水稳性能均得到了明显的提升。

(2) 浸水马歇尔试验测得处置前后酸性闪长岩沥青混合料的残留稳定度均符合规范标准,但冻融劈裂试验测试结果除了未处置酸性闪长岩不符合规范要求外,处置后的酸性闪长岩沥青混合料符合规范要求,说明浸水马歇尔试验相比于冻融劈裂试验而言,无法区分处置前后酸性闪长岩沥青混合料的处置效果^[18]。

3.2 高温稳定性测试

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

表 10 短期水稳性能测试结果

Table 10 Test results of short-term water stability

项目	浸水马歇尔试验			冻融劈裂试验		
	标准稳定度/kN	浸水 48 h 稳定度/kN	残留稳定度/%	未冻融劈裂强度/MPa	1 次冻融劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度比/%
未处置	13.25	12.17	91.85	0.83	0.60	72
2% 水泥	13.51	13.28	98.30	0.84	0.73	87
30% 消石灰水	14.20	13.96	98.31	0.87	0.82	94
0.3% 抗剥落剂	12.56	11.98	95.38	0.82	0.69	84
规范要求	≥ 80			≥ 75		

(JTG E20—2011),采用“车辙试验”对酸性闪长岩沥青混合料进行高温稳定性测试,测试结果如表 11 所示。

表 11 高温稳定性测试结果

Table 11 Test results of high temperature stability

处置方法	动稳定度/(次 \cdot mm $^{-1}$)	规范要求/(次 \cdot mm $^{-1}$)
未处置	4 532	$\geq 1\,000$
2% 水泥	2 864	
30% 消石灰水	3 281	
0.3% 抗剥落剂	1 950	

从表 11 可以看出:与未处置酸性闪长岩沥青混合料相比:处置过后酸性闪长岩石料表面因摩阻系数减小,使得沥青混合料的动稳定度均有不同程度的下降,但均符合规范要求。其中:0.3% 抗剥落剂处置下降幅度最大,也可反映出抗剥落剂的耐高温性能不佳。

4 不同处置方法下酸性闪长岩沥青混合料长期水稳性能评价研究

为了评价沥青混合料的长期水稳性能,对相关规范中“冻融劈裂试验”条件进行改进,采用反复冻融、反复冻融烘以及反复酸蚀冻融方式来模拟处置后酸性闪长岩沥青混合料所经历的环境条件,用于评价长期水稳性能^[19-21]。

4.1 反复冻融劈裂试验

在冻融劈裂试验的基础上,将冻融次数增加到 3 次和 5 次来测试酸性闪长岩沥青混合料在冻、融条件下的长期水稳性能,测试结果见图 1、2。

从图 1、2 可以看出:

(1) 随着冻融次数的增加,处置后沥青混合料劈裂强度比呈整体下降趋势。采用增加冻融次数的劈

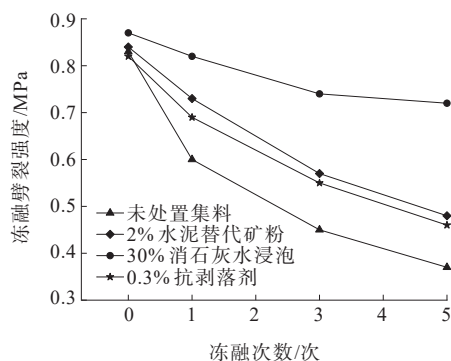


图 1 反复冻融劈裂强度

Figure 1 Repeated freeze-thaw splitting strength

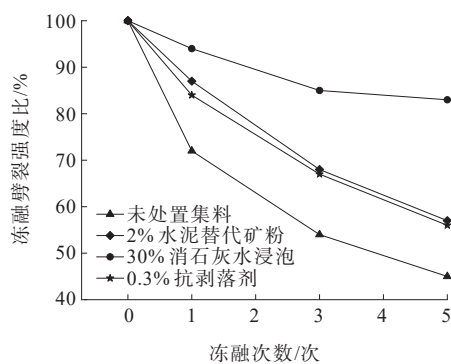


图 2 反复冻融劈裂强度比

Figure 2 Strength ratio of repeated freeze-thaw splitting

裂试验,也可预测出处置过后酸性闪长岩在冻融环境下的长期水稳性能,其中,30% 消石灰水 $>$ 2% 水泥 $>$ 0.3% 抗剥落剂 $>$ 未处置。

(2) 3 次冻融后未处置、2% 水泥、30% 消石灰水和 0.3% 抗剥落剂的劈裂强度比分别下降了 25%、21%、10% 和 20%; 5 次冻融后分别下降了 38%、30%、12% 和 29%,其中,30% 消石灰水在反复冻融条件下劈裂强度比衰减较小,而 2% 水泥与

0.3%抗剥落剂有着较快的衰减趋势,说明在反复的冻融试验条件下,30%消石灰浸泡石料为最佳的处置方案。

4.2 反复冻融烘劈裂试验

根据上述高温稳定性试验可知:处置后酸性闪长岩沥青混合料的高温稳定性均有不同程度的下降,尤其经抗剥落剂处置过后衰减较为严重。因此,在冻融劈裂试验的基础上增加“烘”这一条件来模拟高温(60℃)作用,进而评价酸性闪长岩沥青混合料在冻、融、高温条件下的长期水稳性能(即在完成规范规定的冻融步骤后,将试件放入60℃烘箱中烘12h),测试结果见图3、4。

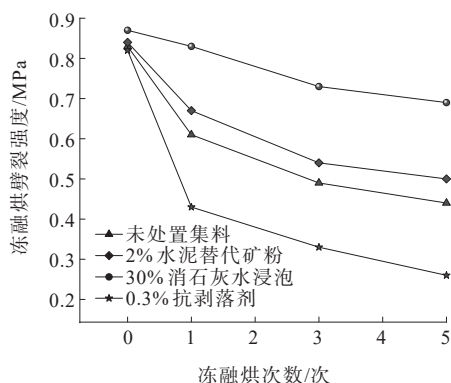


图3 反复冻融烘劈裂强度

Figure 3 Repeated freeze-thaw and baking splitting strength

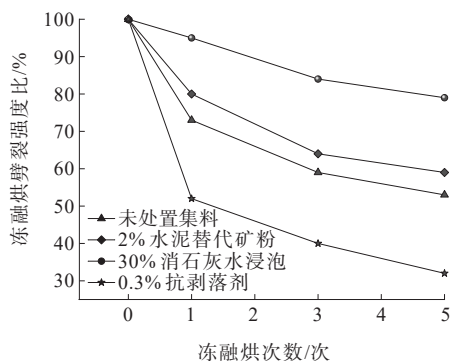


图4 反复冻融烘劈裂强度比

Figure 4 Strength ratio of repeated freeze-thaw and baking splitting

从图3、4可以看出:

(1)随着冻融烘次数的增加沥青混合料冻融烘劈裂强度比呈整体下降趋势,预测处置后酸性闪长岩沥青混合料在冻融烘环境下长期水稳性能为:30%消石灰水>2%水泥>未处置>0.3%抗剥落剂。

(2)1次冻融烘后2%水泥、30%消石灰水和0.3%抗剥落剂的劈裂强度比分别为80%、95%和52%,0.3%抗剥落剂已远不符合规范的要求,说明经抗剥落剂处置后的酸性闪长岩沥青混合料耐高温性能不佳,不适合在高温多雨的地区使用。

(3)3次冻融烘后未处置、2%水泥、30%消石灰水的劈裂强度比分别下降了25%、24%、11%;5次冻融烘后分别下降了38%、21%、16%,下降趋势与反复冻融试验类似,且30%消石灰水的衰减趋势小于2%水泥,说明30%消石灰浸泡石料为冻融烘试验条件下的最佳处置方案。

4.3 反复酸蚀冻融劈裂试验

众所周知,中国主要酸雨(pH<5.6)区位于南方,广西属于西南酸雨区,是酸雨的重灾区之一,酸雨会对路面产生严重腐蚀损坏^[22]。2011—2018年监测结果表明:广西地区酸雨频发且起主要作用的阴离子主要为 SO_4^{2-} ,其次为 NO_3^- (其中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 浓度之比为1.37~3.99),属于混合酸雨型。因此,本次试验采用pH=2, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 浓度之比的高值3.99配置酸雨。

基于冻融劈裂试验,将“融”变换为采用pH=2酸性溶液浸泡7d的方法进行酸蚀冻融劈裂试验。如此反复循环1、2、3次后,进行劈裂试验得到酸蚀冻融劈裂强度与酸蚀冻融劈裂强度比,结果见图5、6。

从图5、6可以看出:

(1)随着酸蚀冻融次数的增加沥青混合料强度呈整体下降趋势,预测其在酸蚀冻融试验条件下的长期水稳性能为:30%消石灰水>2%水泥>0.3%抗剥落剂。

(2)1次酸蚀冻融后2%水泥、0.3%抗剥落剂的劈裂强度比分别为80%和77%,均符合规范要求;2次酸蚀冻融后分别下降了3%和12%;3次酸蚀冻融后分别下降了18%和27%,下降趋势与冻融劈裂试验类似。

(3)1、2、3次酸蚀冻融后,30%消石灰水的劈裂强度比分别为82%、75%和70%,相比于冻融劈裂试验以及冻融烘试验而言,劈裂强度比均有所降低,说明采用消石灰等碱性浸泡改变集料表面酸碱性的方式在酸性溶液浸泡下会使其界面强度降低,从而使水稳性能有所下降。

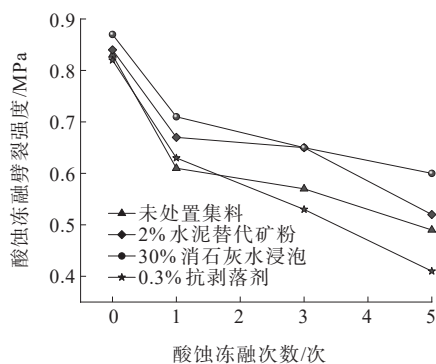


图5 反复酸蚀冻融劈裂强度

Figure 5 Repeated acid-etching freeze-thaw splitting strength

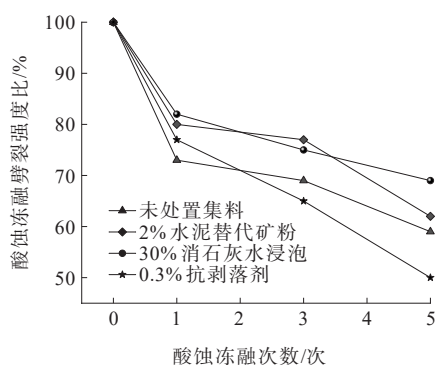


图6 反复酸蚀冻融劈裂强度比

Figure 6 Strength ratio of repeated acid-etching freeze-thaw splitting

5 结论

(1) 经 0.3% 抗剥落剂、2% 水泥以及 30% 消石灰水处置后的酸性闪长岩沥青混合料短期水稳定性能均有显著提高,满足规范使用要求。

(2) 通过 1、3 和 5 次反复冻融劈裂试验预测,处置过后的酸性闪长岩沥青混合料的水稳性能随着冻融次数的增加劈裂强度均呈下降趋势,且 30% 消石灰水 > 2% 水泥 > 0.3% 抗剥落剂。

(3) 在冻融烘、酸蚀冻融模拟试验条件下,30% 消石灰浸泡石料配制的沥青混合料具有良好的水稳定性。

综上所述,30% 消石灰水处置后的酸性闪长岩沥青混合料具有良好的短期和长期水稳性能,可推荐于工程应用中。

参考文献:

References:

[1] 王璐. 沥青-集料界面相结构和粘附机理研究[D]. 西安:

长安大学,2015.

WANG Lu. Research on the phase structure and adhesion mechanism of asphalt aggregate interface[D]. Xi'an: Chang'an University,2015.

[2] 刘光军,陈帅,周恒玉,等. 破碎卵石沥青混合料黏附性改善研究[J]. 中外公路,2021,41(3):300-303.

LIU Guangjun, CHEN Shuai, ZHOU Hengyu, et al. Study on improvement of adhesion of broken pebble asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41 (3):300-303.

[3] 王玉林,徐宁,卢东. 提升沥青路面抗水损害能力措施综述[J]. 中外公路,2022,42(1):66-72.

WANG Yulin, XU Ning, LU Dong. Summary of measures to improve water damage resistance of asphalt pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 66-72.

[4] 路文琴,李健. 酸性片麻岩石料在岳武高速公路上的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(7):145-147.

LU Wenqin, LI Jian. Application of acid gneiss stone in Yue-wu expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 13(7): 145-147.

[4] 樊见维,徐景翠,徐鹏,等. 酸性蚀变闪长岩集料沥青混合料水稳性能改善及评价研究[J]. 公路工程,2018,43(1): 216-220.

FAN Jianwei, XU Jingcui, XU Peng, et al. Comparative study on acidic aggregate asphalt mixture water stability performance[J]. Highway Engineering, 2018, 43(1): 216-220.

[6] 吴登睿. 水泥与胺类抗剥落剂协同作用对沥青路面路用性能的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.

WU Dengrui. The research of performance on cement and amine anti-stripping material's asphalt mixture pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.

[7] 高林,成钢,董彪. 基于水泥裹附的酸性集料沥青混合料性能研究[J]. 合成材料老化与应用,2022,51(3):78-81.

GAO Lin, CHENG Gang, DONG Biao. Study on performance of asphalt mixture based on acid aggregate coated with cement[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2022, 51(3): 78-81.

[8] 丁才. 抗剥落剂对沥青及花岗岩沥青混合料性能影响研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.

DING Cai. Study on the effect of anti-stripping agent on the performance of asphalt and granite asphalt mixture[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.

- [9] 凡孝均,鲁攀,谢君.复合集料沥青混合料路用性能研究[J].公路工程,2013,38(3):29-33.
FAN Xiaojun, LU Pan, XIE Jun. Research of road performance of complex-aggregate asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2013, 38(3): 29-33.
- [10] 彭余华,刘惠兴.花岗岩沥青混合料路用性能[J].交通运输工程学报,2010,10(2):6-11.
PENG Yuhua, LIU Huixing. Road performance of granite asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2): 6-11.
- [11] 夏英志.抗剥落剂对沥青及沥青混合料耐久性影响[J].科学技术与工程,2017,17(33):328-333.
XIA Yingzhi. Influence of anti-stripping agent on durability of asphalt and its mixture[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 328-333.
- [12] 黄红铭,黄增,韦江慧,等.2011—2018年广西酸雨污染变化特征及影响因素分析[J].化学工程师,2019,33(10):41-44,75.
HUANG Hongming, HUANG Zeng, WEI Jianghui, et al. Characteristics of acid rain and its influencing factors from 2011 to 2018 in Guangxi[J]. Chemical Engineer, 2019, 33(10): 41-44, 75.
- [13] 吴丹,王式功,尚可政.中国酸雨研究综述[J].干旱气象,2006,24(2):70-77.
WU Dan, WANG Shigong, SHANG Kezheng. Progress in research of acid rain in China[J]. Arid Meteorology, 2006, 24(2): 70-77.
- [14] 冯新军,唐雄,熊旭.酸雨对沥青混合料路用性能的影响研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(6):39-43.
FENG Xinjun, TANG Xiong, XIONG Xu. Study on influence of acid rain on pavement performances of asphalt mixtures[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(6): 39-43.
- [15] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [16] 李善强,叶宏宇,方杨,等.沥青与集料黏附性评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):32-39.
LI Shanqiang, YE Hongyu, FANG Yang, et al. Evaluation method of asphalt and aggregate adhesion durability[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(5): 32-39.
- [17] 肖春发,罗卫,张仕,等.沥青与玄武岩粗集料黏附性水煮法试验及评价方法的改进[J].中外公路,2020,40(2):290-293.
XIAO Chunfa, LUO Wei, ZHANG Shi, et al. Improvement of testing and evaluation method of adhesive boiling method for asphalt and basalt coarse aggregate[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 290-293.
- [18] 樊见维,徐景翠,徐鹏,等.酸性类蚀变闪长岩集料沥青混合料路用性能对比研究[J].中外公路,2018,38(5):182-187.
FAN Jianwei, XU Jingcui, XU Peng, et al. Comparison study on pavement performance of acidic alteration diorite aggregates asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(5): 182-187.
- [19] 谭波,刘湘伶,曹忠露,等.酸性花岗岩沥青混合料水稳性试验[J/OL].桂林理工大学学报,1-5[2023-04-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20220412.1147.006.html>.
Tan Bo, Liu Xiangling, Cao Zhonglu, et al. Water stability test of acidic granite asphalt mixture [J/OL]. Journal of Guilin University of Technology, 1-5 [2023-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.N.20220412.1147.006.html>.
- [20] 柴芮祥,吴恺,叶薇,等.砂复合改性淤泥路用水稳性试验研究[J].中外公路,2023,43(2):202-208.
CHAI Ruixiang, WU Kai, YE Wei, et al. Experimental study on water stability of sand compound modified mud road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 202-208.
- [21] 刘福明,吴迪,何庆德,等.纤维稳定剂对排水沥青混合料抗水温循环损伤能力的影响[J].中外公路,2023,43(1):194-198.
LIU Fuming, WU Di, HE Qingde, et al. Study on effect of fiber stabilizers on water temperature cycle damage resistance of drainage asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 194-198.
- [22] 杜裕,梁骏,梁驹.基于GIS广西酸雨区域分布及变化特征分析[J].环境工程,2012,30(S2):371-374.
DU Yu, LIANG Jun, LIANG Ju. Analysis of regional distribution and variation characteristics of acid rain in Guangxi based on GIS[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(S2): 371-374.