

不同岩性机制砂对沥青混合料路用性能的影响

丁蓬勃¹, 郑董成², 陈 搏³, 揭继兴³

(1.广东潮惠高速公路有限公司粤东分公司, 广东 揭阳 516251; 2.广东省高速公路有限公司深汕西分公司扩建管理处, 广东 惠州 516200; 3.广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广东 广州 510641)

摘 要:为指导不同岩性机制砂在沥青路面的应用,选择3种岩性机制砂制备沥青混合料,分析机制砂岩性对沥青混合料水稳定性、高稳定性、低温抗裂性能的影响,并探索抗剥落措施对混合料性能的影响。结果表明:石灰岩机制砂混合料的稳定度和残留稳定度比均略高于辉绿岩机制砂混合料,远高于花岗岩机制砂,冻融劈裂试验也显示出一致的规律;相比花岗岩机制砂,辉绿岩机制砂混合料动稳定度提升52.6%,石灰岩机制砂混合料动稳定度提升45.2%;低温状态下,花岗岩机制砂混合料的抗裂性能最差,石灰岩机制砂和辉绿岩机制砂混合料的低温弯拉应变优良;使用抗剥落措施后,花岗岩机制砂和辉绿岩机制砂混合料水稳定性、高温性能均得到明显改善,其中残留稳定度比提升5%以上,残留强度比提升16%以上,动稳定度提升50%以上。

关键词:机制砂岩性;水稳定性;低温抗裂性能;高温稳定性;抗剥落措施

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)12-0213-06

0 引 言

沥青胶浆主要由沥青、细集料、填料组成,于沥青混合料内提供主要填充和胶结功能,并在很大程度上决定了混合料的路用性能^[1-3]。为了提高提高细集料与沥青的粘附性能,广东省主要采用碱性岩石石灰岩碎石破碎制备的机制砂,而随着多年的开采,很多区域已经发生石灰岩集料开采资源的枯竭情况,只能远距离采购优质材料,额外加大了材料支出,同时也延误工期。此外,近年来的重载交通道路发现,使用石灰岩机制砂的路面抗滑性能抗滑性能衰减较快,主要与石灰岩的抗磨耗性较差有关^[4]。而反观花岗岩、辉绿岩等材料,兼具有坚硬、致密、耐磨的材料特征,可以更好地展现颗粒的相互嵌挤功能^[5-7]。尤其是辉绿岩机制砂,偏向于中性与基质岩类,质地坚硬,与沥青粘附性良好,且局部地区储量丰厚,因而具备较好的应用前景和研究意义^[8]。

细集料包含天然砂、机制砂、石屑等,其中天然砂粘附沥青的效果不佳,基本不用于沥青路面,石屑的加工粒型不佳,且大部分为石场边角料,强度低,也基本不在高等级沥青路面中使用^[9]。机制砂主要为0~2.36 mm规格,属于石场的精加工材料,具有良好

的加工特性与应用价值。国内外研究人员对机制砂做了丰富的研究,主要包括机制砂的加工工艺、规格级配、几何特性等方面^[10,11]。马士宾等采用不同棱角的细集料制备了试件,分析了集料棱角对路面抗车辙能力的意义^[12]。姚形傲等采用显微镜测量细集料形貌,构建了分维数表征模型,并系统开展了不同形貌细集料对沥青路面的性能影响研究^[13]。然而,关于细集料的研究中,分析细材料岩性和沥青混合料路用性能影响的相关内容甚少。

因此,本文选取三种矿物组成相异的机制砂并开展沥青混合料路用性能试验研究,对各岩性机制砂成型试件的水稳定性、低温抗裂性、高温性能进行分析,并探索抗剥落措施对混合料性能的影响,为不同岩质机制砂的应用提供技术支撑。

1 原材料

1.1 机制砂

选择花岗岩、石灰岩、辉绿岩三种机制砂(0~3 mm),测试指标汇总见表1。

1.2 粗集料

粗集料采用广西辉绿岩,粒径分别是3~5 mm、5~10 mm、10~18 mm。具体技术指标见表2。

1.3 沥青材料

沥青胶结料选择壳牌公司的SBS(I-D)改性沥青。具体性能检测情况汇总于表3。

收稿日期: 2022-08-12

作者简介: 丁蓬勃(1989—),男,硕士,工程师,从事高速公路建设管理工作。

表 1 三种岩性机制砂技术指标

项目	技术要求	试验结果		
		花岗岩	石灰岩	辉绿岩
表观相对密度	不小于 2.50	2.614	2.729	2.911
坚固性%	不大于 12	6.4	5.1	2.6
砂当量%	不小于 60	29.7	66.2	70.78
亚甲蓝值 g/kg	不大于 25	5.2	4.2	2.4
棱角性 s	不小于 30	35.1	37.5	42.6

表 2 粗集料性能指标

检验指标	技术要求	试验结果	单项评定
石料压碎值 1%	不大于 20	10.7	合格
洛杉矶磨耗损失 1%	不大于 22	12.2	合格
表观相对密度	不小于 2.60	2.951	合格
吸水率 1%	不大于 1.5	0.66	合格
坚固性 1%	不大于 12	1.4	合格
与改性沥青的黏附性级	5	5	合格
磨光值	不小于 42	44	合格

表 3 沥青性能指标

试验项目	技术要求	试验结果	单项评定
针入度 25℃, 100 g, 5 s, 0.1 mm	40~60	53	合格
延度 5℃, 5 cm/min, cm	Min	20	合格
软化点 TR&B(℃)	Min	75	合格
存储稳定性*: 163℃, 48 hrs, 软化点差℃	2.0	0.7	合格
弹性恢复 25℃, %	Min	85	合格

2 机制砂岩性测试与评定

集料表面官能团与酸碱特性是影响沥青粘附性的重要因素,采用 X 射线衍射仪对不同岩性机制砂矿物成分进行测试。X 射线衍射仪主要通过发射短波电磁波穿透被测材料,X 射线收到物体晶体原子的散射,产生的散射波又形成衍射,进而可获得晶体结构。选择三种机制砂(花岗岩、石灰岩、辉绿岩),筛分不同岩性机制砂,选取 0.045 mm 左右的粉体进行测试。使用型号 XRD-6000 衍射仪,采用 2 θ / θ 连续扫描,采样步宽 0.02°,扫描速度 2°/min。获得岩样衍射图谱后,利用 Jade 6 数据处理软件对集料的矿物开展成分对比。从表 4 数据可看出,所选取的花岗岩样品主要成分为石英、钠长石、绿锥石、云母、绿泥

石,石灰岩样品的主要成分为方解石、石英、白云石、云母,辉绿岩样品的主要成分为辉石、霞石、拉长石、单斜硼镁石、尖晶石。根据化学式与质量分数计算得 SiO₂ 含量,花岗岩的 SiO₂ 含量最高,辉绿岩次之,石灰岩最低。沥青混合料关于石料酸碱性判别依据为: SiO₂ 含量大于 65%为酸性岩石,52%~65%为中性岩石,45%以下为基性(碱性)岩石。因此,所选花岗岩为酸性岩,石灰岩为碱性岩,辉绿岩为中性岩。

表 4 不同岩石成分

矿物成分	石英	钠长石	绿锥石	云母	绿泥石	SiO ₂
	质量比 1%					
花岗岩	17.8	63.3	3.6	11.6	3.7	69.70
矿物成分	方解石	石英	白云石	云母	—	SiO ₂
	质量比 1%					
石灰岩	82.2	11.7	2.1	4	—	28.60
矿物成分	辉石	霞石	拉长石	单斜硼镁石	尖晶石	SiO ₂
	质量比 1%					
辉绿岩	24.7	26.9	27.2	16.1	5.1	47.30

3 沥青混合料设计

3.1 级配设计

采用上述原材料,进行 GAC-16 型沥青混合料目标配合比矿料级配曲线设计,并充分参考近年来的广东省高速公路沥青路面应用经验,设计的矿料级配见表 5。油石比为 4.7%,矿粉掺量为 4.0%。

3.2 沥青混合料体积指标

从混合料密度指标可以看出,相同的矿料级配设计下,仅改变机制砂细集料类型,计算出来的混合料最大理论密度大小依次为:花岗岩机制砂混合料<石灰岩机制砂混合料<辉绿岩机制砂混合料,与机制砂的密度排序一致。而经过标准击实后,各试件毛体积密度大小依次为:花岗岩机制砂混合料<辉绿岩机制砂混合料<石灰岩机制砂混合料,此时石灰岩机制砂的混合料试件密度最高。不同机制砂混合料的密度见图 1。

进一步,计算各机制砂混合料的空隙率指标(见图 2)。分析可得,石灰岩机制砂混合料试件的空隙率

表 5 矿料合成级配组成

级配范围	筛孔(mm)通过率 1%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	90	70	44	35	29	23	18	13	8
下限	100	95	70	50	26	18	15	12	8	6	4
合成	100	96.9	81.7	60.2	33.7	24.4	17.4	13.4	9.6	7.5	5.3

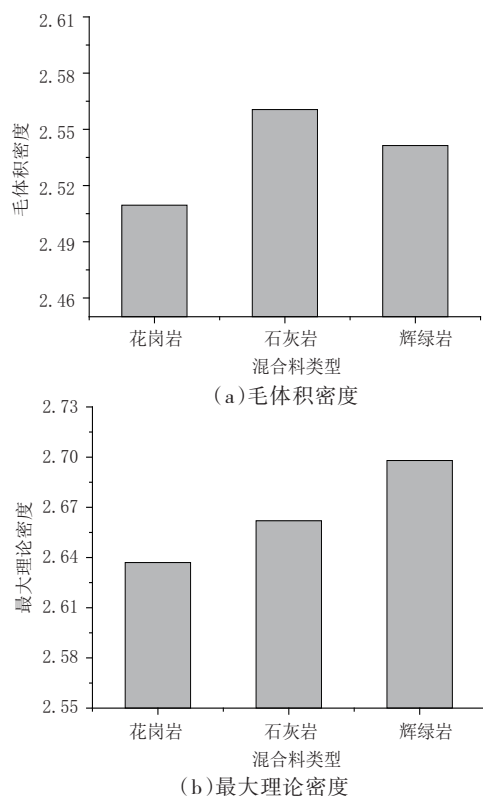


图1 不同机制砂混合料的密度

最低,花岗岩其次,辉绿岩最高。分析可得:花岗岩机制砂混合料试件内部空隙率居中,与设计目标空隙率较接近。石灰岩机制砂混合料计算的空隙率指标明显小于其他组,说明该混合料试件过度密实。究其原因,石灰岩机制砂一方面压碎值较低,在成型过程中容易被压碎,导致混合料内部密实;另一方面,石灰岩颗粒在拌锅中干拌过程容易研磨起粉,尤其是较粗颗粒的棱角被磨光,此时导致混合料中的粉量增大,而棱角磨光的粗颗粒也容易锤击密实。辉绿岩机制砂混合料空隙率最大,一方面辉绿岩机制砂密度较大,相同质量下细料体积小;另一方面,辉绿岩机制砂颗粒坚硬,棱角丰富,与粗集料之间的摩擦阻力较大,相比石灰岩机制砂混合料更加难以压实。因此,使用高密度辉绿岩机制砂作为填料时,可适当增加机制砂的掺配比例。

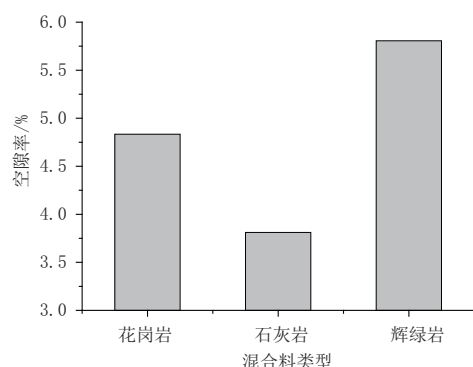
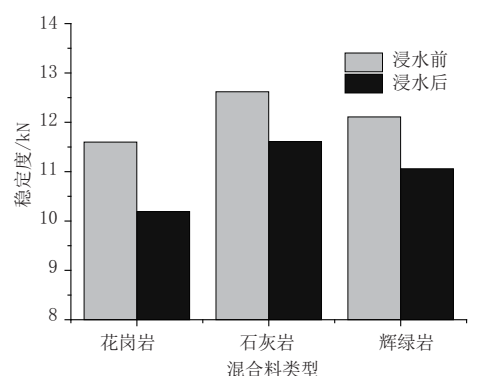


图2 不同机制砂混合料的空隙率

4 机制砂岩性对沥青混合料路用性能的影响

4.1 浸水马歇尔试验分析

参照试验规程 JTG E20 制作马歇尔试件,开展 4 h 的浸水养护,分析结果见图 3。从浸水前后的马歇尔稳定度水平来看,石灰岩机制砂混合料和辉绿岩机制砂混合料的强度水平明显高于花岗岩机制砂混合料,尤其是浸水后,花岗岩机制砂混合料的强度衰减衰减幅度最大。三种机制砂混合料的残留稳定度比皆满足高速公路的技术指标。进一步分析背后原因:粗集料由于使用了黏附性较好的辉绿岩,且沥青为性能良好的 SBS 改性沥青,一定程度上保证了混合料稳定度的水平均较高。掺加花岗岩机制砂的沥青混合料,其浸水前的稳定度低于掺加石灰岩混合料约 8.8%,低于辉绿岩机制砂混合料约 4.4%;浸水后的稳定度低于石灰岩机制砂混合料约 13.9%,低于辉绿岩机制砂混合料约 8.5%;说明花岗岩机制砂填料与沥青的黏附性相对石灰岩以及辉绿岩较弱。石灰岩机制砂混合料的稳定度和残留稳定度比均略高于辉绿岩机制砂混合料,一方面与碱性材料的粘附性优良有关;另一方面与石灰岩机制砂有助于提高混合料密实性有关。



(a) 马歇尔稳定度

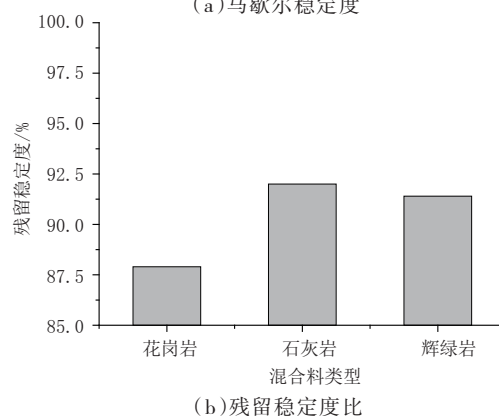


图3 浸水马歇尔试验结果

4.2 冻融劈裂试验分析

参照试验规程 JTG E20 制作马歇尔试件,开展

循环冻融养护以及劈裂强度测试。首先将试件放置在 25℃ 养护 2 h, 测试劈裂强度; 然后将另一组试件放置于 -18℃ 保温箱养护 16 h; 随后放置 60℃ 水箱养护 24 h; 最后浸泡 25℃ 水箱 2 h, 以此循环后测试试件劈裂强度。由图 4 可看出, 冻融前后的劈裂强度优劣依次为石灰岩>辉绿岩>花岗岩混合料, 尤其是花岗岩机制砂参加的混合料, 冻融前后的劈裂强度明显弱于石灰岩和辉绿岩机制砂混合料。残留强度比的规律与劈裂强度水平规律一致, 石灰岩机制砂和辉绿岩机制砂混合料的抗冻融性能均处于优良水平。

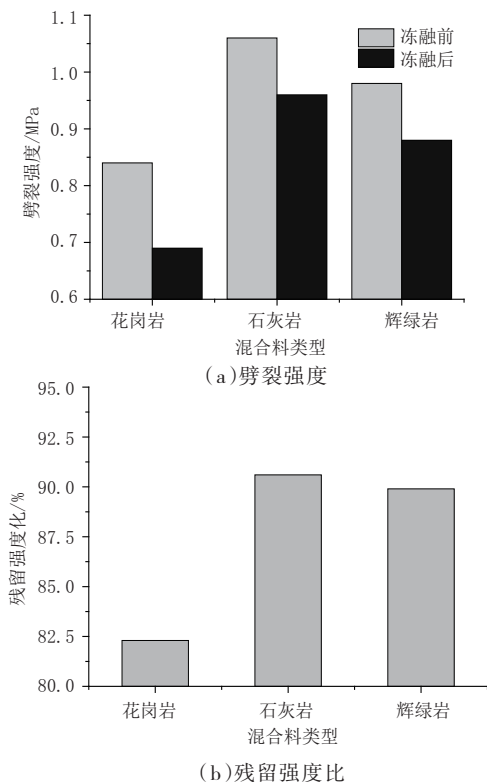


图 4 冻融劈裂试验结果

4.3 高温车辙试验分析

由于广东省常年温度较高, 尤其是夏季地面温度高达 60℃ 以上, 对沥青路面高温条件下的抵抗变形能力要求较高。国内外测试沥青路面高温性能的试验种类繁多, 比如足尺环道试验、高温蠕变试验、加速加载试验等。本研究按照试验规程 JTG E20, 选用 60℃ 的恒温车辙仪开展胶轮往返碾压测试, 轮载设定为 0.7 MPa, 测定沥青试件变形 1 mm 的轮碾作用次数, 进而评价不同岩性机制砂混合料的高温性能。试验结果见图 5。

由车辙试验结果可以看出, 在标准轴载作用下, 花岗岩机制砂混合料、石灰岩机制砂混合料、辉绿岩机制砂混合料试件的稳定度都高于 6 000 次/mm, 远

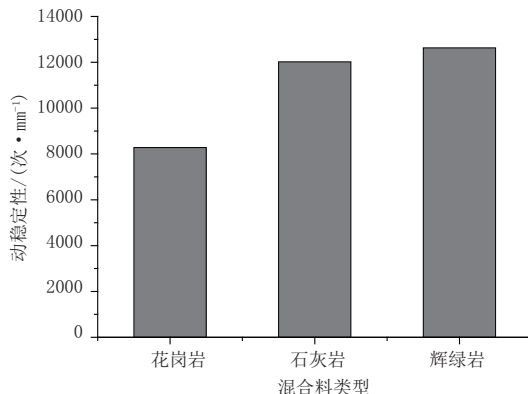


图 5 高温动稳定度

大于设计规定。而改变机制砂的岩性, 沥青混合料之间的高温稳定性变化显著, 体现在: 在其他条件不变的前提下, 仅改变机制砂岩性, 发现辉绿岩机制砂混合料的动稳定度最大, 石灰岩机制砂动稳定度略低, 究其原因, 尽管石灰岩机制砂跟沥青间黏附性更好, 但是由于其硬度稍差, 于车轮荷载作用下易于被压碎, 且细集料颗粒的棱角性较弱, 难以限制轮迹带混合料的迁移; 而辉绿岩机制砂较坚硬, 与粗集料可以形成较好的嵌挤, 且轮碾作用下不容易被压碎, 因此其动稳定度更好。相比酸性岩质花岗岩机制砂, 使用中性岩质辉绿岩机制砂的沥青混合料, 动稳定度可以提升 52.6%, 使用碱性岩质石灰岩机制砂的沥青混合料, 动稳定度可以提升 45.2%, 不仅与机制砂跟沥青间黏附性有关, 也和机制砂的硬度有关, 使用硬质细集料利于增强沥青混合料的高温稳定性。

4.4 低温弯曲试验分析

广东粤北地区冬季温度较低, 沥青路面低温开裂也是其早期典型病害之一。国内外对于沥青路面的低温抗裂性能测试试验包括直接拉伸试验、间接拉伸试验、低温劈裂蠕变试验等。本研究参照试验规程 JTG E20, 开展 -10℃ 的小梁弯曲试验, 评价各岩性机制砂混合料的低温抗裂性能。分析结果见图 6。

分析可得:

(1) 从抗弯拉强度指标来看, 石灰岩机制砂混合料的抗弯拉强度最高, 花岗岩机制砂混合料的抗弯拉强度最低, 主要与细集料岩性跟沥青间粘附力的差异有关, 中性与碱性岩性细集料与沥青的粘结强度更大, 因此体现了更好的抗弯拉强度。

(2) 最大弯拉应变指标可以看出, 花岗岩机制砂混合料的破坏应变未能达到高速公路设计要求, 其低温抗裂性能较差; 而石灰岩机制砂和辉绿岩机制砂混合料的破坏应变均达到设计要求, 且二者的试验结果较接近, 因此可以认为, 辉绿岩和石灰岩混合

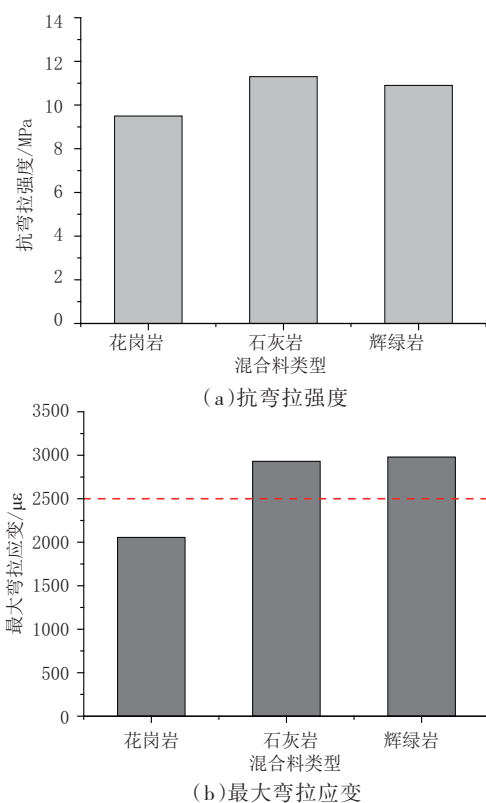


图6 小梁弯曲试验

料均可以表现出较优的低温抗变形性能。

5 机制砂与沥青黏附性改善技术研究

机制砂岩性影响了跟沥青的黏附性,进而影响沥青混合料路用性能。并且,虽然中性岩质机制砂虽然质地坚硬,但是与沥青的粘附性依然比石灰岩机制砂略弱,有必要改善中性岩质机制砂的黏附性。水泥材料可以降低集料表面能,增强其表面活性,在沥青路面工程中作为抗剥落措施的一种有效方式。为此,在本研究里采用1.5%的水泥等质量代替矿粉,添加于沥青混合料中,并对比采用掺加水泥措施前后的不同机制砂混合料高温性能、水稳定性能的影响。

5.1 水稳定性的改善

图7浸水马歇尔试验数据表明,采用水泥抗剥落材料后的三种机制砂混合料,其残留稳定度比均有明显改善,改善后残留稳定度以辉绿岩机制砂混合料最优,石灰岩机制砂较为接近,花岗岩较低,但也处于较好水平。表面使用抗剥落材料对沥青混合料的抗水损性能效果良好。进一步,计算不同机制砂混合料掺加水泥抗剥落材料前后的残留稳定度比的增长率(以掺加水泥后的残留稳定度比较掺加前的稳定度比数值之差,并以掺加水泥前的残留稳定度比作为基准,计算其增长率百分数),花岗岩机制砂

混合料掺加水泥后的残留稳定度比增长率最高,达到6.8%;辉绿岩机制砂混合料次之,为5.0%;石灰岩机制砂最小,为2.3%。说明水泥抗剥落材料对酸性机制砂表面活性的提高效果最好,对碱性机制砂的提升效果较弱。

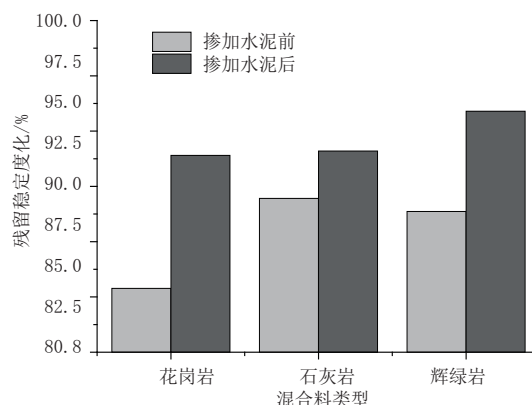


图7 掺加抗剥落材料前后的浸水试验结果

图8冻融劈裂试验结果表明,掺加水泥抗剥落材料后的沥青混合料,经历冻融循环作用后的残留强度,也有显著改善,残留强度比基本达到95%以上。尤其是花岗岩机制砂混合料的试验值,从掺加水泥前的82.3%提升至掺加水泥后的95%,增长率达16%,进一步验证了水泥抗剥落材料对酸性机制砂表面活性的提高效果。因此,掺加水泥材料作为抗剥落措施,对机制砂黏附性的改善效果明显,尤其是酸性花岗岩机制砂和中性辉绿岩机制砂,能够显著提升沥青混合料的水稳定性。

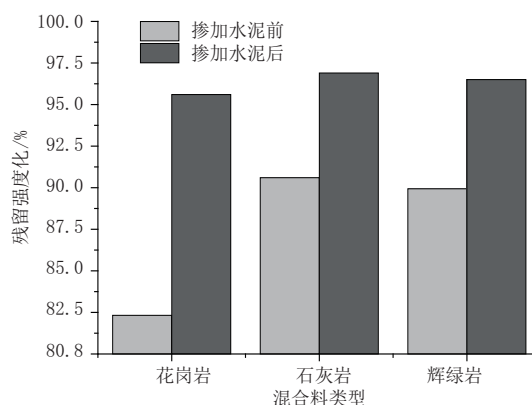


图8 掺加抗剥落材料前后的冻融劈裂试验结果

5.2 高温性能的改善

图9车辙试验结果表明,掺加水泥抗剥落材料后的沥青混合料,在高温状态下经过标准轮碾作用,其高温变形量也出现较大的减少。动稳定度指标的增加量达到6 000~9 000次/mm,增长率达50%以上。究其原因,一方面水泥材料的掺加可以削减机制砂的表面能,增强机制砂表面活性,提高与沥青间的粘结力,有助于改善沥青混合料的抵抗荷载作用下

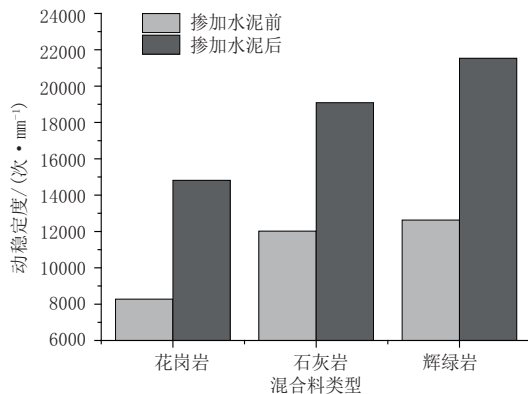


图9 掺加抗剥落材料前后的车辙试验结果

的变形;另一方面,水泥材料经过一定的养生后,裸露部分与空气中水蒸气接触发生硬化,一定程度也能提高沥青混合料的结构强度。

6 结 论

(1)在相同矿料级配设计下,不同机制砂混合料试件的毛体积密度与最大理论密度规律存在冲突,除了受到机制砂本身密度值影响,还与机制砂压碎值、耐磨耗、内摩阻特性有关。

(2)石灰岩机制砂混合料的稳定度与残留稳定度比皆略高于辉绿岩机制砂,远高于花岗岩机制砂,冻融劈裂试验也显示出一致的规律。

(3)相比花岗岩机制砂,辉绿岩机制砂混合料动稳定度提升52.6%,石灰岩机制砂混合料动稳定度提升45.2%,主要受机制砂跟沥青间黏附性、及机制砂的硬度影响。

(4)低温状态下,花岗岩机制砂混合料的破坏应变最低,抗裂性能较差;石灰岩机制砂和辉绿岩机制砂混合料的破坏应变试验结果较接近,具有较优的低温抗变形能力。

(5)使用水泥材料抗剥落改善措施,花岗岩机制砂与辉绿岩机制砂混合料水稳定性、高温性能皆产生明显改善,其中残留稳定度比提升5%以上,残留强度比提升16%以上,动稳定度提升50%以上。

参考文献:

- [1] Luo C X, He J, Li W X, et al. Study on water damage mechanism of asphalt pavement based on industrial CT technology[J]. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2021:102-108.
- [2] Zhang, Ming Z. Early Diseases of Asphalt Pavement Damage of Water Research and Countermeasures[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014(707):532-535.
- [3] 朱洪洲, 谭祺琦, 范世平, 等. 基于图像技术的沥青混合料微观结构研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(10):97-110.
- [4] 王毅, 岳光华, 李维. 石灰岩矿物成分对其集料磨光值的灰色关联分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(3):353-356, 372.
- [5] 杨三旗. 不同集料种类的橡胶沥青混合料水稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [6] 国斌, 刘远东, 刘卫东. 花岗岩集料在沥青路面应用研究进展[J]. 路基工程, 2021(4):12-18.
- [7] 刘康康, 李大为, 曹捷. 超薄罩面在城市道路水泥路面白改黑中的应用实践[J]. 城市道桥与防洪, 2021(9):196-198.
- [8] 欧阳男. 采用辉绿岩骨料的高黏结沥青抗滑磨耗层性能研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(2):153-157.
- [9] 何子胤. 不同粒径细集料对沥青砂浆强度特性及蠕变特性影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 孙星海, 刘泽, 王军伟, 等. 不同机制砂微观形貌和胶砂性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(1):85-89.
- [11] 古洋. 机制砂在沥青路面中的适用性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [12] 马士宾, 袁文瑞, 王清洲, 等. 集料棱角对沥青混合料性能影响研究[J]. 中外公路, 2015, 35(2):207-212.
- [13] 姚形傲, 徐慧宁, 谭忆秋, 等. 细集料形貌的分维数评价及沥青混合料性能试验[J]. 公路交通科技, 2014, 31(10):7-12, 20.

(上接第202页)

- 的研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3):704-711.
- [13] Reinhardt M, Müller B, Gächter R, et al. Nitrogen Removal in a Small Constructed Wetland: An Isotope Mass Balance Approach[J].

- Environmental Science & Technology, 2006, 40:3313-3319.
- [14] 吴海明. 人工湿地的碳氮磷循环过程及其环境效应[D]. 济南: 山东大学, 2014.