

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202008027



地聚物砂浆半柔性路面材料 的路用性能分析

包惠明, 汤铭锋

(桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 将地聚物砂浆和水泥砂浆作为灌浆材料制备半柔性路面,在灌注率分别为 85%,90%,95%的条件下进行马歇尔稳定度、高温车辙、冻融劈裂和低温抗裂试验,以评价两者的路用性能.结果表明:当灌注率为 90%时,两者的路用性能最佳;相较于水泥砂浆半柔性路面材料,地聚物砂浆半柔性路面材料的马歇尔稳定度明显提升,高温稳定性与水稳定性更优,但低温稳定性不佳;地聚物砂浆推荐配合比的矿灰比为 0.43,碱激发剂掺量为 14%,水玻璃模数为 1.5,水胶比为 0.45,砂胶比为 0.2.

关键词: 地聚物砂浆; 水泥砂浆; 半柔性路面材料; 路用性能

中图分类号: U 414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)03-0329-07

Road Performance of Geopolymer Mortar Semi-Flexible Pavement Materials

BAO Huiming, TANG Mingfeng

(College of Civil and Construction Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Semi-flexible pavement were prepared with geopolymer mortar and cement mortar as grouting materials. Marshall stability, high temperature rutting, freeze-thaw splitting and low temperature crack resistance tests were conducted to evaluate the road performance of both mortars under the conditions of 85%, 90% and 95% grouting rates. The results show that when the grouting rate is 90%, both road performances are best. By comparison with cement mortar semi-flexible pavement materials, the Marshall stability of geopolymer mortar semi-flexible pavement materials is significantly improved, the high temperature stability and water stability performance are upgraded, but the low temperature stability is degraded. The geopolymer mortar recommended mineral cement ratio is 0.43, alkali activator content is 14%, water glass modulus is 1.5, water binder ratio is 0.45, sand binder ratio is 0.2.

Keywords: geopolymer mortar; cement mortar; semi-flexible pavement materials; road performance

灌注式半柔性路面一般是指在开级配大孔隙沥青混合物中灌注胶浆形成的复合式路面,它兼具沥青混凝土和水泥混凝土的优点.一方面,灌注式半柔性路面可以解决夏季高温条件下沥青材料高温稳定性不佳造成的车辙问题,尤其是在重载地区,可以减少拥包、推挤、波浪、坑槽,以及路面整体的塑性变形等道路病害;另一方面,也可避免水泥混凝土路面接缝复杂、养护条件严格、养护时间长及行车舒适性不佳等问题^[1].

半柔性路面灌浆材料复合砂浆的组成及配合比是重要的影响因素^[2],灌浆材料可分为有机、无机、

收稿日期: 2020-08-18

通信作者: 包惠明(1963-),男,教授,博士,主要从事边坡工程、道路工程的研究. E-mail: bhming@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768016)

有机无机复合 3 种类型^[3]. 近年来,国内学者对半柔性路面灌浆材料的研究颇多^[4-8],但主要针对水泥砂浆(OPC)进行研究,对地聚物砂浆(GP)的研究很少. 然而,地聚物砂浆作为一种新型的灌浆材料,比水泥更加节能环保,无需高温煅烧,在常温下即可进行反应,且地聚物的来源十分广泛^[9-10],主要应用于水泥混凝土路面的快速修补及基层注浆加固等方面^[11-17]. 徐建军等^[18]研究粉煤灰、矿渣通过碱激发剂的作用,制备用于道路修复加固的地聚物注浆材料,较好地解决了传统水泥注浆材料耐久性差、使用寿命短等问题. 宋鲁侠^[19]的研究表明,粉煤灰取代率和碱激发剂掺量是影响矿渣基地聚物净浆抗压强度、拉伸强度和粘结强度的主要因素,粉煤灰可以提高矿渣基地聚物净浆的力学性能. 基于此,本文对地聚物砂浆半柔性路面材料的路用性能进行研究.

1 试验材料

1.1 集料和填料

粗集料、细集料均为广西桂林市瓦窑采石场的石灰岩,石灰岩表面多为灰色,纹理较好,片状较低,质地坚硬,棱角性较好. 填料采用石灰岩磨细矿粉,表观密度为 $2.71\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,各项指标均符合 JTG E 42—2005《公路工程集料试验规程》的要求.

1.2 沥青

沥青采用“东海牌”70 号 A 级道路石油沥青(中国石化股份有限公司广东茂名分公司),各指标均符合 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求. 沥青的检测指标,如表 1 所示.

1.3 砂浆

水泥砂浆采用 P·O42.5 级普通硅酸盐水泥,水泥符合 JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》的要求;采用标准砂(福建省厦门市艾思欧有限公司),其细度模数和粒径均符合 ISO 国际标准. 水泥砂浆胶凝材料的质量为粉煤灰、矿粉、水泥的质量之和. 水泥砂浆配合比的水胶比、砂胶比、矿粉掺量、粉煤灰掺量分别为 0.6,0.2,10%,10%.

地聚物砂浆的制备流程,如图 1 所示.

地聚物砂浆采用一级 F 类粉煤灰(河南省巩义市铂润铸造材料有限公司),密度为 $2.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比表面积为 $393\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$;采用 S95 级矿粉(广东省韶关市钢铁集团有限公司),密度为 $2.96\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比表面积为 $697\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$;碱激发剂的配制采用工业级水玻璃(湖南省湘潭市荷塘化工有限公司). 地聚物砂浆主要由粉煤灰、矿粉、砂和碱激发剂组成,其中,碱激发剂为水玻璃和氢氧化钠调配成模数为 1.5 的水溶液.

碱激发剂掺量为碱激发剂的固态质量占总胶凝材料质量的比率. 地聚物砂浆胶凝材料的质量为粉煤灰、矿渣的质量与碱激发剂的固含量之和,地聚物砂浆配合比的矿灰比、碱激发剂掺量、水玻璃模数、水胶比、砂胶比分别为 0.43,14%,1.5,0.45,0.2.

地聚物砂浆和水泥砂浆的技术指标,如表 2 所示. 表 2 中: L 为流动度; R 为 7 d 抗压强度; R_b 为 7 d 抗折强度; η_1 为泌水率; η_2 为干缩率. 两种砂浆均符合 D51-01—2019《道路灌注式半柔性路面技术规程》的要求.

表 1 沥青的检测指标

Tab.1 Test indexes of asphalt

检测指标	规范要求	检测结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	60~80	78
软化点(环球法)/℃	≥46.0	48.4
动力黏度(60 ℃)/Pa·s	≥180	208
延度(15 ℃)/cm	≥100	>100
蜡含量(蒸馏法)/%	≤2.2	1.9
闪点(开口)/℃	≥260	>300
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99.50	99.83
密度(15 ℃)/g·cm ⁻³	实测	1.033

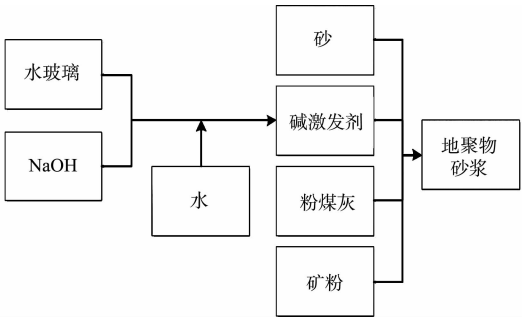


图 1 地聚物砂浆的制备流程

Fig.1 Preparation process of geopolymer mortar

表 2 地聚物砂浆和水泥砂浆的技术指标

Tab.2 Technical indexes of geopolymer mortar and cement mortar

砂浆类型	L/s	R/MPa	R_b/MPa	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
水泥砂浆	12.1	18.6	3.7	1.0	0.16
地聚物砂浆	12.7	25.3	2.2	0.5	0.06
规范要求	10.0~14.0	>15.0	>2.0	≤3.0	≤0.30

2 基体沥青混合料的设计

以主骨料间隙填充(CAVF)法的设计思想为主导,为保证灌浆质量,选用间断性开级配,设定目标空隙率为 24%。参考 DB44/T 1296—2014《专用砂浆半柔性路面应用技术规范》的推荐级配范围,调整粗、细集料用量,使基体沥青混合料配合比设计符合 D51-01—2019《道路灌注式半柔性路面技术规程》的要求。将该基体沥青混合料作为灌浆母体,其密度、空隙率、马歇尔稳定度、流值的实测值分别为 $1.97\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 23.4%, 4.4 kN, 2.3 mm, 均符合规范要求。沥青用量为 3%, 筛孔孔径为 16, 13.2, 9.5, 4.75, 2.36, 0.075 mm 的质量通过率分别为 100.0%, 97.6%, 13.9%, 10.0%, 8.2%, 3.0%。

3 路用性能评价

3.1 灌注方法及灌注效果

采用振动下渗的方法对基体沥青混合料进行两种砂浆的灌注,灌注完成后,用刮板刮出表面多余的浆料,直至露出沥青混合料表面的粗集料,取养护成型的部分试件进行切割处理,观察基体沥青混合料的灌注效果及内部浆料的填充情况。

两种类型砂浆的灌注效果,如图 2 所示。由图 2 可知:在沥青混合料之间包裹了两种砂浆,淡黄色部分为水泥砂浆,暗灰色部分为地聚物砂浆,这与材料的颜色与用量有关;试件绝大部分空隙被两种砂浆填满,只有极少部分闭合空隙未被填充,这表明地聚物砂浆与水泥砂浆的流动性和可灌性较好。

3.2 马歇尔稳定度

地聚物砂浆和水泥砂浆作为刚性材料,灌注率(δ)对马歇尔稳定度有较大的影响,文献[20-21]的研究表明:灌注率越高,半柔性路面材料的力学强度越大,但过高的灌注率对路面的抗滑性能不利,半柔性路面适宜的浆体灌注率为 85%~95%。以灌注率为控制变量,分别制备灌注率为 85%, 90%, 95% 的两种类型(水泥砂浆型、地聚物砂浆型)的半柔性路面材料(图 3)。标准养护 7 d,测得半柔性路面材料的马歇尔稳定度(S_M)和流值(s),如图 4 所示。

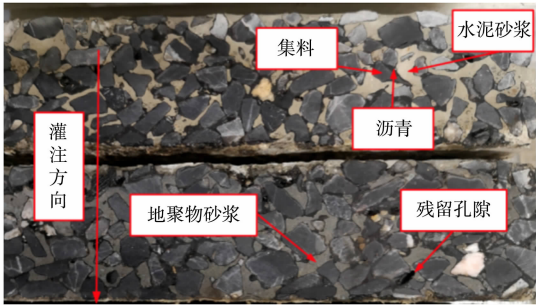


图 2 两种类型砂浆的灌注效果
Fig. 2 Grouting effect of two types of mortar



(a) 水泥砂浆型 (b) 地聚物砂浆型

图 3 两种类型的半柔性路面材料
Fig. 3 Two types of semi-flexible pavement materials

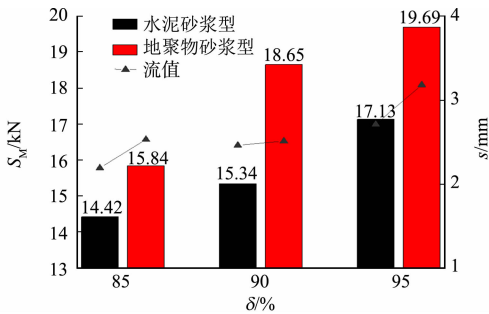


图 4 半柔性路面材料的马歇尔稳定度和流值
Fig. 4 Marshall stability and flow values of semi-flexible pavement materials

由图 4 可得以下 3 点结论。1) 相较于基体沥青混合料,水泥砂浆和地聚物砂浆半柔性路面材料的马歇尔稳定度提高约 3~4 倍,这是因为基体沥青混合料的结构类型为骨架空隙型,随着灌注率从 85% 提高到 95%,水泥砂浆和地聚物砂浆半柔性路面材料的马歇尔稳定度不断提高,灌注砂浆后空隙得到充分填充,骨架空隙型转变为骨架密实型,试件的毛体积密度增大,粘聚力和内摩擦角均有提高,从而使强度得到极大地提高。2) 地聚物砂浆半柔性路面材料的马歇尔稳定度大于水泥砂浆半柔性路面材料,在 3 种灌注率条件下,地聚物砂浆半柔性路面材料的马歇尔稳定度比水泥砂浆半柔性路面材料分别提高了 9.8%, 21.6%, 14.9%, 这可能是因为地聚物砂浆的力学强度大于水泥砂浆,而灌浆后的材料流值

又未明显增加,故地聚物砂浆的抗变形能力优于水泥砂浆. 3) 当同种类型半柔性路面材料的灌注率由 85% 提高到 90% 时,马歇尔稳定度的增幅最大,说明灌注率为 90% 的基体沥青混合料的填充效果较好.

3.3 高温稳定性

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的测试方法,采用轮碾法制备车辙板试件(300 mm×300 mm×50 mm(长×宽×高)). 通过振动台,采用振动下渗法进行胶浆灌注成型(图 5);在标准养护箱内养护 7 d 后,将试件放入 60 ℃ 的恒温干燥箱中,保温 8 h. 在试验温度为 60 ℃,轮碾压力为 0.7 MPa 的条件下进行车辙试验. 车辙深度(h)与灌注率的变化关系,如图 6 所示. 图 6 中: t 为轮碾时间,动稳定度(S_d)与灌注率的变化关系,如图 7 所示.

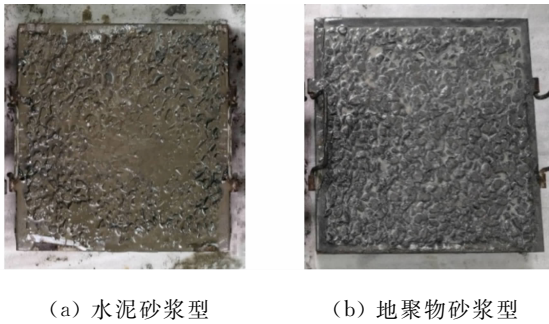


图 5 车辙板试件

Fig. 5 Rut plate specimens

由图 6 可知:车辙深度随轮碾时间的增加而不断增

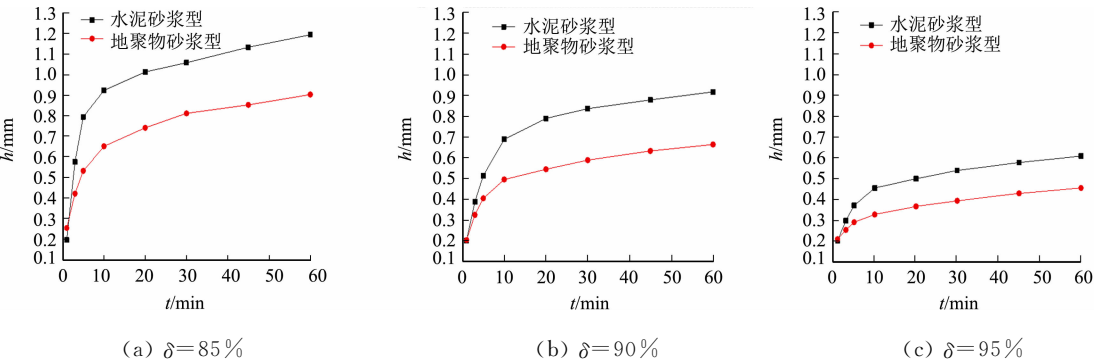


图 6 车辙深度与灌注率的变化关系

Fig. 6 Relationship between rut depth and grouting rate

大,但是最大车辙深度都未超过 1.3 mm,说明两种类型的半柔性路面材料都具有较好的抗车辙能力;两种类型的半柔性路面材料车辙深度的变化都是由快到慢,最后趋于平稳;水泥砂浆和地聚物砂浆半柔性路面材料 10 min 的车辙深度分别达到总车辙深度的 74.6%,71.8%;两者的车辙深度在前 10 min 变化明显,在 20 min 后趋于平稳,这可能是因为车辆在荷载作用下,试验前期混合料内未灌注胶浆的部分闭合空隙被压实挤密.

由图 6,7 可知:随着灌注率的增加,两种类型的半柔性路面材料的车辙深度减小,动稳定度增加;当灌注率从 85% 提高到 90% 时,动稳定度的增幅较为明显. 此外,在相同灌注率半柔性路面材料的车辙试验中,水泥砂浆半柔性路面材料 60 min 的车辙变形最大;地聚物砂浆半柔性路面材料的动稳定度均大于水泥砂浆半柔性路面材料,前者约为后者的 1.1~1.2 倍,且远大于规范要求($S_d=10\ 000$ 次 \cdot mm $^{-1}$).

综上可知,地聚物砂浆半柔性路面材料的高温稳定性优于水泥砂浆半柔性路面材料,可能是因为地聚物砂浆具有更高的强度、更好的耐高温性能,这与马歇尔稳定度试验的结论一致.

3.4 水稳定性

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的试验方法,将灌注率为 85%,90%,95% 的试件分为未冻融组和冻融组. 冻融组真空饱和后,加入 10 mL 的水,置于 -18 ℃ 恒温冰箱中冷冻 16 h;将其取出,放入 60 ℃ 的恒温水槽中,保温 24 h;将冻融组和室温下保存备用的未冻融组放入 25 ℃ 的恒温水槽中不少于 2 h,采用马歇尔试验仪对两组试件进行劈裂试验. 冻融劈裂的试验结果,如表 3 所

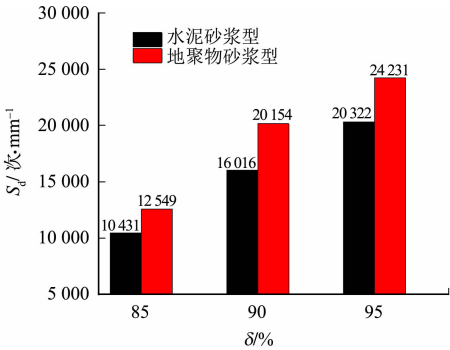


图 7 动稳定度与灌注率的变化关系

Fig. 7 Relationship between dynamic stability and grouting rate

示. 表 3 中: \overline{P}_{T1} 为未冻融组试件的试验荷载(平均值); h_1 为未冻融组试件的高度; \overline{R}_{T1} 为未冻融组试件的劈裂抗拉强度(平均值); \overline{P}_{T2} 为冻融组试件的试验荷载(平均值); h_2 为冻融组试件的高度; \overline{R}_{T2} 为冻融组试件的劈裂抗拉强度(平均值). 经计算可得灌注率为 85%, 90%, 95% 的水泥砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比(TSR)分别为 76.9%, 85.5%, 87.2%; 灌注率为 85%, 90%, 95% 的地聚物砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比分别为 82.3%, 91.8%, 88.3%.

表 3 冻融劈裂的试验结果
Tab. 3 Results of freeze-thaw splitting test

组别	参数	水泥砂浆型			地聚物砂浆型		
		$\delta=85\%$	$\delta=90\%$	$\delta=95\%$	$\delta=85\%$	$\delta=90\%$	$\delta=95\%$
未冻融组	$\overline{P}_{T1}/\text{kN}$	5.3	7.6	8.5	4.9	6.2	6.5
	h_1/mm	63.2	63.4	62.6	63.2	63.5	63.2
	$\overline{R}_{T1}/\text{MPa}$	0.53	0.75	0.86	0.49	0.61	0.65
冻融组	$\overline{P}_{T2}/\text{kN}$	4.1	6.2	7.5	4.1	6.5	6.9
	h_2/mm	63.5	62.8	63.5	63.7	62.5	63.8
	$\overline{R}_{T2}/\text{MPa}$	0.41	0.64	0.75	0.40	0.56	0.57

由表 3 可知: 在相同灌注率的条件下, 地聚物砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比均高于水泥砂浆半柔性路面材料; 当灌注率为 90% 时, 地聚物砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂抗拉强度比是水泥砂浆半柔性路面材料的 107.4%, 说明地聚物砂浆半柔性路面材料的水稳定性较好, 这是由于抗冻融性能与砂浆中的空气含量及气泡间距因子有关^[20], 地聚物砂浆的粉煤灰细度比水泥砂浆的水泥低, 且地聚物砂浆的孔隙率、吸水率较低, 结构致密度和均匀性较好, 抗压强度较高, 结构相对难以冷冻和饱和^[21]. 研究表明, 用 NaOH 和 Na₂SiO₃ 溶液复合激发的地聚物具有优异的抗冻融性^[22-24].

由表 3 还可知: 当灌注率从 85% 提高到 95% 时, 水泥砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比不断提高, 而地聚物砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比先升高后下降; 当灌注率 90% 时, 地聚物砂浆半柔性路面材料的水稳定性最佳, 可能是由于灌注率从 90% 提升到 95%, 地聚物砂浆冻融组的劈裂抗拉强度比相对于水泥砂浆的增长并不明显, 而非冻融组劈裂抗拉强度明显增加, 故冻融劈裂强度比变小; 地聚物砂浆半柔性路面材料的劈裂抗拉强度低于水泥砂浆半柔性路面材料, 这可能是由于地聚物砂浆的压折比高于水泥砂浆, 在劈裂过程中更容易脆断, 故地聚物砂浆半柔性路面材料的韧性较差.

3.5 低温抗裂性

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的试验方法进行小梁低温弯曲实验. 将轮碾成型后的试件切割成 250 mm×30 mm×35 mm(长×宽×高)的棱柱体小梁, 跨径为 200 mm; 将切割后的小梁置于恒温冰箱, 温度为 -10 ℃; 采用加载速率为 50 mm·min⁻¹ 的万能试验机进行测试.

低温弯曲试验结果, 如表 4 所示. 表 4 中: R_B 为抗弯拉强度; ϵ_B 为最大弯拉应变; S_B 为弯曲劲度模量.

由表 4 可知: 随着灌注率的提高, 两种类型的半柔性路面材料的抗弯拉强度先增加后减少; 当灌注率为 90% 时, 两者的抗弯拉强度最大, 低温抗裂性较好, 这可能是由于灌注过少的砂浆(刚性材料), 抗弯拉强度还存在提升的空间, 灌注过多的刚性材料又会使韧性降低; 地聚物砂浆半柔性路面材料的抗弯拉强度低于水泥砂浆半柔性路面材料, 灌注率为 85%, 90%, 95% 的条件下, 地聚物砂浆半柔性路面材料的抗弯拉强度分别只有水泥砂浆半柔性路面材料的 72.0%, 70.7%, 70.0%, 可能是由于地聚物砂浆的抗折强度低于水泥砂浆, 材料的压折比较大, 脆性也较大. 由表 4 还可知: 地聚物砂浆半柔性路面材料的弯曲劲度模量大于水泥砂浆半柔性路面材料, 说明其韧性相对较差.

综上所述, 在不同灌注率的条件下, 地聚物砂浆半柔性路面材料的低温抗裂性能均劣于水泥砂浆.

表 4 低温弯曲试验结果

Tab. 4 Results of low temperature bending test

参数	水泥砂浆型			地聚物砂浆型		
	$\delta=85\%$	$\delta=90\%$	$\delta=95\%$	$\delta=85\%$	$\delta=90\%$	$\delta=95\%$
R_B/MPa	6.07	6.38	5.63	4.37	4.51	3.94
$\epsilon_B/\times 10^{-6}$	1 436	1 594	1 165	1 004	953	781
S_B/MPa	4 227	4 003	4 833	4 353	4 732	5 045

4 路用性能综合分析及经济适用性

不同砂浆类型和灌注率的半柔性路面材料的路用性能也不相同,因此,采用权重指标对路用性能进行综合分析.

以不同砂浆类型和灌注率的路用性能测试结果作为排序依据;以动稳定度作为高温稳定性的评价指标,动稳定度区间为[10 000,15 000],[15 000,20 000],[20 000,25 000],将两者分别赋值为 1,2,3;以冻融劈裂强度比作为水稳定性的评价指标,将冻融劈裂强度比区间[70,80],[80,90],[90,100] 分别赋值为 1,2,3;以弯曲劲度模量作为低温抗裂性的评价指标,将弯曲劲度模量的区间[4 800,5 200],[4 400,4 800],[4 000,4 400] 分别赋值为 1,2,3.将各个路用性能的评分指标相加,根据总值进行综合分析,总值越大,则半柔性路面材料的综合路用性能越好.

半柔性路面材料综合路用性能的对比,如表 5 所示.考虑到实际工程中的经济适用性,结合广西地区的市场价格,对材料价格进行统计.

两种砂浆的价格对比,如表 6 所示.表 6 中: P 为综合单价.

表 6 两种砂浆的价格对比

Tab.6 Price comparison of two kinds of mortar

路面材料类型		配合比设计	$\delta/\%$	$P/\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$
地聚物砂浆型		矿灰比为 0.43,碱激发剂掺量为 14%,水玻璃模数为 1.5,水胶比为 0.45,砂胶比为 0.2	95	580.3
			90	522.2
			85	443.9
水泥砂浆型		水胶比为 0.6,砂胶比为 0.2,矿粉掺量为 10%,粉煤灰掺量为 10%	95	565.0
			90	508.5
			85	432.2

由表 5,6 可知:灌注率为 90%的地聚物砂浆半柔性路面材料的综合路用性能最佳;灌注率为 90%,95%的水泥砂浆半柔性路面材料与灌注率为 95%的地聚物砂浆半柔性路面材料的综合路用性能较为接近;地聚物砂浆半柔性路面材料的综合单价略高,但从综合路用性能角度出发,灌注率为 90%的地聚物砂浆半柔性路面材料的性价比最高,灌注率为 90%的水泥砂浆半柔性路面材料次之.

5 结论

1) 两种类型半柔性路面材料的马歇尔稳定度比基体沥青混合料提高约 3~4 倍,马歇尔稳定度随着灌注率的增加而增加.当灌注率为 90%时,地聚物砂浆半柔性路面材料的马歇尔稳定度比水泥砂浆半柔性路面材料提高了 21.6%;当灌注率从 85%提高到 90%时,两种类型半柔性路面材料的马歇尔稳定度和动稳定的增幅最大;当灌注率为 90%时,地聚砂浆半柔性路面材料的高温性能较优.

2) 当灌注率相同时,地聚物砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比高于水泥砂浆半柔性路面材料;当灌注率为 90%时,地聚物砂浆半柔性路面材料的冻融劈裂强度比是水泥砂浆半柔性路面材料的 107.4%,说明地聚物砂浆半柔性路面材料的水稳定性较好.

3) 地聚物砂浆半柔性路面材料的抗弯拉强度较低,当灌注率分别为 85%,90%,95%时,地聚物砂浆半柔性路面材料的抗弯拉强度分别只有水泥砂浆半柔性路面材料的 72.0%,70.7%,70.0%;地聚物砂浆半柔性路面材料的弯曲劲度模量较高,韧性较差,故其抗裂性较差.

4) 从综合路用性能及经济适用性角度分析,灌注率为 90%的地聚物砂浆半柔性路面材料的性价比最高,灌注率为 90%的水泥砂浆半柔性路面材料次之,地聚物砂浆推荐配合比的矿灰比为 0.43,碱激发剂掺量为 14%,水玻璃模数为 1.5,水胶比为 0.45,砂胶比为 0.2.

参考文献:

- [1] 钟科,陈波,蒋恩贵,等. 灌注式半柔性路面材料研究与应用综述[J]. 中外公路,2017,37(2):232-235. DOI:10.14048/j. issn. 1671-2579. 2017. 02. 052.
- [2] 覃峰. 半柔性路面灌注复合砂浆性能研究[J]. 混凝土,2016(6):97-102. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2016. 06. 026.
- [3] 王红霞,王星,何廷树,等. 灌浆材料的发展历程及研究进展[J]. 混凝土,2008(10):30-33. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2008. 10. 010.
- [4] 刘清斌. 半柔性路面用高性能灌浆料的试验研究[D]. 济南:山东建筑大学,2019.
- [5] 凌天清,周杰,赵之杰,等. 灌入式半柔性路面用聚合物改性水泥砂浆的优选研究[J]. 公路交通科技,2009,26(6):24-28,39. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-0268. 2009. 06. 005.
- [6] 凌天清,郑晓卫,凌濛,等. 保水降温半柔性路面材料性能研究[J]. 中国公路学报,2010,23(2):7-11,17.
- [7] 张晓燕,成志强,孔繁盛. 基于 CA 灌浆材料的半柔性路面低温性能[J]. 北京工业大学学报,2017,43(8):1205-1211. DOI:10. 11936/bjutxb201650034.
- [8] 肖天佑,蔡旭,李翔,等. 掺 ECC 砂浆半柔性材料路用性能研究[J]. 混凝土,2020(3):150-153. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2020. 03. 036.
- [9] CRISTELO N. Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO₂(eq) emissions[J]. Journal of Cleaner Production,2015,192:447-460. DOI:10. 1016/j. jclepro. 2015. 04. 102.
- [10] KOMLJENOVIC M, BASCAREVIC Z, BRADIC V. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers[J]. Journal of Hazardous Materials,2010,181(1/2/3):35-42. DOI:10. 1016/j. jhazmat. 2010. 04. 064.
- [11] 张磊,问鹏辉,王朝辉,等. 道路非开挖注浆加固补强材料研究进展[J]. 材料导报,2017,31(21):98-105. DOI:10. 11896/j. issn. 1005-023X. 2017. 021. 014.
- [12] 王健,张乐文,冯啸,等. 碱激发地聚合物双液注浆材料试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊2):4418-4425.
- [13] 李会安. 非开挖式地聚合物注浆技术研究与应用[D]. 西安:长安大学,2015.
- [14] 段宏伟,倪文,李建平. 地质聚合物在新型建材中的应用[J]. 新型建筑材料,2004(1):14-15. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2004. 01. 006.
- [15] 王红喜,张高展,丁庆军,等. 碱激发-工业废渣双液注浆材料性能研究[J]. 建筑材料学报,2007,10(3):374-378. DOI:10. 3969/j. issn. 1007-9629. 2007. 03. 022.
- [16] 沈伯锋. 地聚合物注浆加固技术在公路唧浆病害处治中的应用[C]//2019世界交通运输大会. 北京:[出版者不详],2019:913-944.
- [17] 马强,张锋. 地聚合物路面快速修补材料的研究与应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(2):4-5.
- [18] 徐建军,吴开胜,赵大军. 用于道路修复加固的地聚合物注浆材料的研制[J]. 新型建筑材料,2016,43(3):26-28. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2016. 03. 007.
- [19] 宋鲁侠. 矿渣基地质聚合物路面修补材料的研究[D]. 北京:中国地质大学,2018.
- [20] 赵国强,邓成,王文达,等. 半柔性抗车辙路面材料的性能研究与应用[J]. 公路交通科技(应用技术版),2015,11(11):124-127.
- [21] 石磊,黄冲,李天祥,等. 浆体灌入率对半柔性路面材料性能影响研究[J]. 现代交通技术,2016,13(4):1-3,7. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-9889. 2016. 04. 001.
- [22] HUSEIEN G F, MIRZA J, ISMAIL M, *et al.* The effect of sodium hydroxide molarity and other parameters on water absorption of geopolymer mortars[J]. Indian Journal of Science and Technology,2016,9(48):1-7.
- [23] CAI Liangcai, FU Yawei, WU Yonggen. Freeze-thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete[J]. Construction and Building Materials,2011,25(7):3144-3148.
- [24] GIFFORD P M, GILLOTT J E. Freeze-thaw durability of activated blast furnace slag cement concrete[J]. ACI Materials Journal,1996,93(3):242-245.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)