

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220221001

文章编号:1672-9331(2023)05-0067-09

引用格式:吕松涛,丁星岚,刘超超,等.基于界面增强的橡胶-水泥稳定碎石抗冻抗裂性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版)2023,20(5):67-75.

Citation: LYU Songtao, DING Xinglan, LIU Chaochao, et al. Study on the frost resistance and cracking resistance of rubber-cement stabilized macadams based on interface enhancement[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 67-75.

基于界面增强的橡胶-水泥稳定碎石抗冻抗裂性能研究

吕松涛¹, 丁星岚¹, 刘超超¹, 黄慧²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广西交投集团有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要:【目的】解决橡胶-水泥界面黏结性能不足的问题。【方法】首先采用4种常见的化学改性方法,即氢氧化钠(NaOH)改性、氢氧化钠-尿素(NaOH-Urea)复合改性、硅烷偶联剂KH560改性和硅酸钠(Na₂SiO₃)改性,分别对橡胶颗粒进行改性;然后采用改性后的橡胶颗粒制备橡胶-水泥稳定碎石试件;最后开展冻融、干缩及温缩试验。【结果】分别经NaOH-Urea和KH560改性后的橡胶-水泥稳定碎石的抗冻强度损失几乎无变化,但其冻融前后的无侧限抗压强度均约增大1.5倍;5种橡胶-水泥稳定碎石按其干缩性能从优到劣排序依次为:NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石、KH560改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH-Urea改性橡胶-水泥稳定碎石、Na₂SiO₃改性橡胶-水泥稳定碎石、未改性橡胶-水泥稳定碎石;NaOH-Urea和KH560可以提高橡胶-水泥稳定碎石的温缩性能,而NaOH和Na₂SiO₃对其温缩性能的改善效果不太理想。【结论】NaOH-Urea和KH560的改性效果较好,其有效增强了橡胶-水泥稳定碎石的抗冻抗裂性能。

关键词:水泥稳定碎石;橡胶颗粒;化学改性;抗冻性能;抗裂性能

中图分类号:U416.214

文献标志码:A

0 引言

水泥稳定碎石是我国使用最为普遍的半刚性基层材料,具有承载能力强、稳定性好、抗冻性能强、造价经济等优点^[1-2],但在交通荷载、温度和湿度等诸多因素的持续作用下,水泥稳定碎石基层很容易产生裂缝,从而导致整个路面结构的使用寿命下降^[3-6]。橡胶是一种高分子弹性材料,近年来道路工作者们把废旧轮胎加工成橡胶粉末或颗粒,将其作为改性剂制备橡胶沥青混合料、橡胶混凝土或橡胶-水泥稳定碎石^[7-11]。杨松等^[12]、YANG等^[13]发现掺加橡胶粉后水泥稳定碎石的抗冻性能增强。覃峰^[14]研究了橡胶-水泥稳定碎石

的抗裂性能,发现橡胶粉的掺入能有效减小水泥稳定碎石的干缩应变、干缩失水率、温缩应变和温缩失水率,延缓水泥稳定碎石基层开裂,且当橡胶粉的掺量为5.0%~8.0%(按水泥质量计)时,改善效果最为显著。王海鹏等^[15]研究发现虽然橡胶粉对水泥稳定碎石的收缩开裂性能有积极作用,但是橡胶粉掺量过高会导致基层强度与刚度不足,所以应严格控制其掺量。当橡胶粉掺量为0.5%~1.5%(按混合料质量计)时,水泥稳定碎石的强度与刚度能满足相关规范的要求,且其收缩性能也能在一定程度上得到改善。

有研究发现,橡胶颗粒对水泥稳定碎石性能的改善效果比橡胶粉的好,本文作者在前期开展的橡胶颗粒改性水泥稳定碎石的研究中也对此进

收稿日期:2022-02-21;修回日期:2022-03-14;接受日期:2022-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078063);上海城投(集团)有限公司科技创新计划项目(CTKY-ZDXM-2020-010、CTKY-PTRC-2018-003);广西科技计划项目(AB202097030);长沙理工大学科研创新项目(CX2020SS03)

通信作者:吕松涛(1979—)(ORCID:0000-0003-0426-5033),男,教授,主要从事道路工程方面的研究。

E-mail:lst@csust.edu.cn

行了验证^[16]。但橡胶元件与水泥浆之间的不良界面黏合是一大问题,因为橡胶组分与矿物骨料两者的物理性能不同^[17-18]。SGOBBA等^[19]将橡胶用 KMnO_4 溶液氧化,再用 NaHSO_3 溶液磺化,然后对其进行傅里叶变换红外光谱和接触角测量试验,发现氧化和磺化过程将大量的亲水性羟基和磺酸盐引入橡胶屑中,降低了橡胶表面与水的接触角,从而大大提高了两者界面的黏结强度。HUANG等^[20]提出了两阶段表面处理橡胶颗粒的方法,第一阶段采用Z-6020硅烷偶联剂对橡胶颗粒表面进行改性,第二阶段用水泥覆盖Z-6020处理过的颗粒,并通过室内试验验证了该表面处理方法的有效性,橡胶改性水泥基复合材料的抗压强度提高了110.0%。刘誉贵等^[17]采用尿素和 NaHSiO_3 分别对橡胶颗粒进行氨化和磺化,试验结果表明,氨化在橡胶表面引入了羧基和氨基,磺化则引入了羟基和硫磺基,两种改性方法均可提高橡胶与水泥砂浆之间的黏结强度以及橡胶混凝土的抗压强度。可见,现有研究已认识到橡胶与水泥砂浆的缺陷,并有了初步的改善方法,但大多数学者仅研究开发了一两种改性方法,且常将改性橡胶应用于沥青混合料和水泥混凝土中,对橡胶颗粒改性后再掺至水泥稳定碎石这一做法鲜有研究。

因此,本研究选取4种常见的橡胶颗粒表面改性方法,即氢氧化钠(NaOH)改性、氢氧化钠-尿素(NaOH-Urea)复合改性、硅烷偶联剂KH560改性和硅酸钠(Na_2SiO_3)改性。其中, NaOH 与 NaOH-Urea 可以增强橡胶表面的亲水性,KH560和 Na_2SiO_3 在橡胶表面接枝 Si-O 键。本文将上述4种改性方法分别应用于橡胶-水泥稳定碎石材料中,并对比分析改性后橡胶-水泥稳定碎石的抗冻抗裂特性,从而选出抗冻抗裂性能最佳的改性橡胶-水泥稳定碎石半刚性基层材料。本研究在一定程度上提升了橡胶-水泥稳定碎石的界面黏附性能,提高了水泥稳定碎石半刚性基层材料的抗冻抗裂性能,减少了因基层开裂反射到路面的裂缝,提高了基层结构的耐久性,同时降低了橡胶对环境的污染,具有显著的经济效益与环保作用。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

本研究采用的粗集料是由玄武岩加工而成

的,采用的细集料是玄武岩机制砂,表1和表2分别列出了粗集料与细集料的主要技术指标,粗、细集料均满足《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中的相关要求。水泥采用的是标号为P·O 32.5的普通硅酸盐水泥,生产厂家为华新水泥(株洲)有限公司,其各项物理力学性能指标均符合《道路硅酸盐水泥》(GB/T 13693—2017)规范的要求,具体见表3。橡胶颗粒规格为4~8目,过2.36和4.75 mm的圆形标准筛后,选取粒径为[2.36, 4.75) mm的橡胶颗粒等体积替换相同粒径的集料,以保证集料的级配不发生改变。橡胶颗粒的基本性能指标满足《路用废胎硫化橡胶粉》(JT/T 797—2011)规范的要求,具体见表4。

表1 粗集料主要技术指标

Table 1 The key technical indexes for coarse aggregates

指标	技术要求	不同粒径集料的试验结果		
		[4.75, 9.5) mm	[9.5, 19) mm	[19, 26.5) mm
压碎值/%	≤26	24.7	20.5	18.4
针片状颗粒质量分数/%	≤22	11.9	9.5	8.8
粒径小于0.075 mm 粉尘质量分数/%	≤2	0.8	0.7	0.5
软石质量分数/%	≤5	4.1	3.7	2.9

表2 细集料主要技术指标

Table 2 The key technical indexes for fine aggregates

指标	技术要求	试验结果
有机质/%	≤2	0.6
硫酸盐质量分数/%	≤0.25	0.17
粒径小于0.075 mm 材料的塑性指标	≤17	9

表3 水泥物理力学指标

Table 3 Physical and mechanical indexes of cement

指标	技术要求	试验结果	
初凝时间/h	≥1.5	3.3	
终凝时间/h	≤12.0	4.3	
安定性	合格	合格	
不同养护龄期的 抗折强度/MPa	3 d	≥3.5	3.8
	28 d	≥6.5	7.1
不同养护龄期的 抗压强度/MPa	3 d	≥16.0	15.0
	28 d	≥32.5	34.8

表4 橡胶颗粒基本性能指标

Table 4 Basic performance indexes for rubber particles

指标	技术要求	试验结果
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.10~1.30	1.11
丙酮提取物质量分数/%	≤ 16.0	13.3
水分/%	≤ 1.0	0.96
灰分/%	≤ 8	6.2

表5 集料的合成级配

Table 5 Gradation of aggregates

%

级配类别	通过下列筛孔的集料的质量分数											
	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
合成级配	100.0	82.0	74.0	68.7	57.5	39.8	26.4	17.3	11.6	7.9	5.2	3.2
级配上限	100.0	86.0	79.0	72.0	62.0	45.0	31.0	22.0	15.0	10.0	7.0	5.0
级配下限	100.0	82.0	73.0	65.0	53.0	35.0	22.0	13.0	8.0	5.0	3.0	2.0

1.3 改性橡胶制备工艺

1.3.1 增强亲水性

1) NaOH改性。

将1.0 kg碱片置于10.0 L水中并在常温下溶解3 d,每天搅拌1次,直至完全溶解,无肉眼可见的颗粒,则NaOH溶液制备完成。称3.0 kg粒径为[2.36,4.75) mm的橡胶颗粒倒入NaOH溶液中,在常温下充分浸泡1周,每天搅拌1次,即完成橡胶的NaOH氧化过程。

2) NaOH-Urea复合改性。

首先按上述1)的方法对粒径为[2.36,4.75) mm的橡胶颗粒进行NaOH改性。然后将1.0 kg尿素(Urea)置于10.0 L水中并在常温下溶解3 d,每天搅拌1次,直至完全溶解,无肉眼可见的颗粒,则尿素水溶液制备完成。最后称取3.0 kg的NaOH改性橡胶颗粒倒入尿素水中,在常温下充分浸泡1周,每天搅拌1次,即完成橡胶先NaOH氧化后Urea氨化的复合改性过程。

1.3.2 接枝Si—O键

1) 硅烷偶联剂KH560改性。

将10.0 L水和0.1 L甲酸混合,使混合溶液的pH值为3~4,再加入0.225 kg的KH560,常温溶解3 d,每天搅拌1次,直至完全溶解,无肉眼可见颗粒,然后加入少许质量分数为5.0%的氨水,使KH560溶液的pH值为8~10,则KH560溶液制备

1.2 级配设计

本研究集料的级配范围为[0,26.5) mm。采用精细级配的方式,将集料用振筛机筛分成12档:小于0.075 mm、[0.075,0.15) mm、[0.15,0.3) mm、[0.3,0.6) mm、[0.6,1.18) mm、[1.18,2.36) mm、[2.36,4.75) mm、[4.75,9.5) mm、[9.5,13.2) mm、[13.2,16) mm、[16,19) mm、[19,26.5) mm。并用线性规划的方法求解得到各档集料的质量分数,得到集料的合成级配,见表5。

完成。称3.0 kg粒径为[2.36,4.75) mm的橡胶颗粒倒入KH560溶液中,在常温下充分浸泡1周,每天搅拌1次,即完成橡胶经过KH560改性并接枝Si—O—Si结构的过程。

2) Na_2SiO_3 改性。

将10.0 L水、3.0 kg粒径为[2.36,4.75) mm的橡胶、0.3 kg的 Na_2SiO_3 、0.1 L硅烷偶联剂KH560、1.0 L乙醇以及少许催化剂(氧化锌)混合,在常温下充分浸泡2周,每天搅拌1次,使其充分反应,即完成橡胶经过 Na_2SiO_3 改性并接枝Si—O—Si结构的过程。Si—O—Si空间网状结构如图1所示。

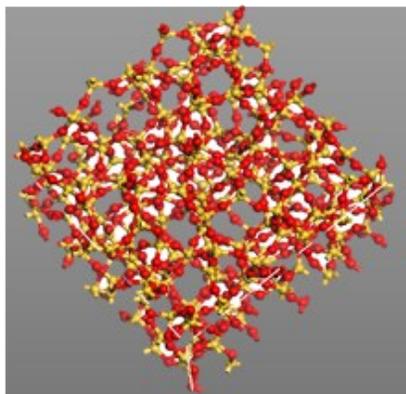


图1 Si—O—Si空间网状结构

Fig. 1 Si—O—Si space network structure

1.4 试件制备与养护

橡胶-水泥稳定碎石的水泥用量为集料质量的4.5%。橡胶颗粒掺量的选取沿用前人的经

验^[9],即橡胶颗粒的体积为[2.36,4.75) mm 粒径集料总体积的 57.0%。水的用量由振动击实试验获得,最佳含水率为 5.4%,最大干密度为 2.298 g/cm³。

橡胶-水泥稳定碎石采用振动搅拌的拌和方式,因橡胶颗粒密度与集料密度之间的差异较大,振动搅拌能保证拌和的均匀性,不会导致橡胶颗粒大面积上浮。

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的要求,7 d 无侧限抗压强度试验和冻融试验采用圆柱形试件,试件尺寸为 150 mm(直径)×150 mm(高),弯拉强度、弯拉模量、疲劳试验、干缩试验和温缩试验采用梁式试件,试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。试件成型采用振动击实仪,击实仪振动频率设为 30 Hz,激振力为 7.6 kN,圆柱形试件的振动时间为 2 min,梁式试件的振动时间为 5 min。

对无侧限抗压强度试验、干缩试验和温缩试验,试件标准养护龄期是 7 d;对冻融试验,试件标准养护龄期是 28 d;对弯拉强度、弯拉模量和疲劳试验,试件标准养护龄期是 90 d,养护龄期最后一天将试件浸水。标准养护室的温度为(20±2) °C,相对湿度在 95% 以上。

2 抗冻抗裂性能

2.1 抗冻性能

冻融试验的冻结温度为(-18±1) °C,时间为 16 h;融化温度为(20±1) °C,时间为 8 h,共循环 5 次。每种材料制备 18 个标准试件,其中 9 个为冻融试件,9 个为不冻融试件,进行对比试验。无侧限抗压强度试验的加载速率有效控制在 1 mm/min。

半刚性材料经过 n 次冻融循环后试样的质量变化率 W_n 可按式(1)计算。分别对经 1、2、3、4、5 次冻融循环后的半刚性材料的质量变化率进行测量并计算,结果如图 2 所示。

$$W_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_0 为冻融循环前试样的质量,g; m_n 为 n 次冻融循环后试样的质量,g。

由图 2 可以看出,质量变化率随着冻融次数的增加不断增大。相比于未作改性处理的橡胶水泥稳定碎石,Na₂SiO₃改性橡胶-水泥稳定碎石冻融后

的质量变化率最小,其他几种处理方式反而提高了水泥稳定碎石的质量变化率。将 4 种不同处理方式下的橡胶-水泥稳定碎石按其质量变化率从小到大排序依次为:Na₂SiO₃改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH-Urea 改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH 改性橡胶-水泥稳定碎石、KH560 改性橡胶-水泥稳定碎石。

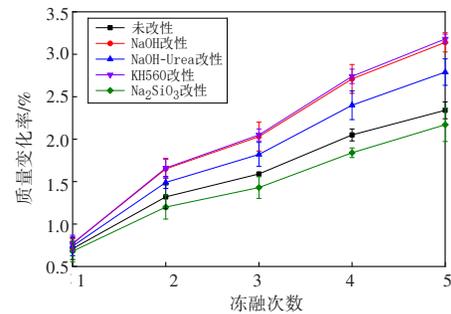


图 2 不同冻融次数下的质量变化率

Fig. 2 Mass change rate under different circles of freezing-thawing

半刚性材料经 n 次冻融循环后的抗冻强度损失 B_{DR} 可用式(2)计算。

$$B_{DR} = \frac{R_{DC}}{R_c} \times 100 \quad (2)$$

式中: R_c 为未冻试件浸水 24 h 后的无侧限抗压强度; R_{DC} 为 n 次冻融循环后试件的无侧限抗压强度。

通过冻融试验测得试件冻融前后的无侧限抗压强度,并利用式(2)计算相应的抗冻强度损失。本研究试件经 5 次冻融循环后的无侧限抗压强度和抗冻强度损失结果见表 6。

表 6 不同橡胶-水泥稳定碎石冻融前后的抗压强度与抗冻强度损失

Table 6 Compressive strengths and antifreeze coefficients before and after the freezing and thawing for different rubber-cement stabilized macadam

橡胶-水泥稳定碎石的种类	R_c /MPa	R_{DC} /MPa	$B_{DR}/\%$
未改性	5.12	4.25	83.008
NaOH 改性	4.05	2.50	61.728
NaOH-Urea 改性	7.55	6.30	83.444
KH560 改性	8.50	7.00	82.353
Na ₂ SiO ₃ 改性	4.30	1.75	40.698

由表 6 可知,经 5 次冻融循环后,将 5 种橡胶-水泥稳定碎石按其抗冻强度损失由大到小排序依次为:NaOH-Urea 改性橡胶-水泥稳定碎石、未改性橡胶-水泥稳定碎石、KH560 改性橡胶-水泥稳

定碎石、NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石、 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石。相比于未作改性处理的橡胶-水泥稳定碎石,NaOH-Urea改性和KH560改性橡胶-水泥稳定碎石的抗冻强度损失相差不大,但两者冻融前后的无侧限抗压强度都大幅度增大,均为未改性橡胶-水泥稳定碎石的1.5倍左右。这是因为NaOH-Urea和KH560改性剂改善了橡胶颗粒与水泥浆体接触界面的薄弱黏结,使橡胶与水泥稳定碎石协同变形能力增强,应力分散效果更好,因而在低温条件下其改性后的橡胶-水泥稳定碎石的耐久性能良好。与此同时,经NaOH和 Na_2SiO_3 分别改性处理后的橡胶-水泥稳定碎石的抗冻强度损失大幅下降,分别锐减了25.6%和51.0%,且冻融前后的无侧限抗压强度也相应减小,这可能是因为NaOH为强碱性溶液,在一定程度上增强橡胶颗粒表面亲水性的同时对橡胶颗粒具有明显的腐蚀老化作用。在本研究中NaOH对橡胶的腐蚀老化占主导作用,故NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石的无侧限抗压强度明显下降;而 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石的无侧限抗压强度较未改性橡胶-水泥稳定碎石的略有降低,可能是由于 Na_2SiO_3 未对橡胶产生明显的改性效果,再加上溶剂乙醇、小分子物质的挥发使材料内部产生了收缩应力。

2.2 干缩性能

干缩变形是水泥稳定碎石最主要的体积变形,对性能危害较大,会使其表面出现拉应力而导致开裂,严重影响水泥稳定碎石的耐久性。本试验采用仪表法对橡胶-水泥稳定碎石进行干缩性能测定,同种橡胶-水泥稳定碎石的6个试件为一组,其中3个试件用来测定其收缩变形量,另外3个用于测量干缩失水率。

将测得的试验数据结果按式(3)~(7)计算不同橡胶-水泥稳定碎石的干缩系数,5种橡胶-水泥稳定碎石在不同养护龄期内的干缩应变和总干缩系数分别如图3~4所示。

失水率 w_i 计算如式(3)所示:

$$w_i = (m_i - m_{i+1})/m_p \quad (3)$$

干缩量 δ_i 计算如式(4)所示:

$$\delta_i = (\sum_{j=1}^4 X_{i,j} - \sum_{j=1}^4 X_{i+1,j})/2 \quad (4)$$

干缩应变 ε_i 计算如式(5)所示:

$$\varepsilon_i = \delta_i/l \quad (5)$$

干缩系数 α_{di} 计算如式(6)所示:

$$\alpha_{di} = \varepsilon_i/w_i \quad (6)$$

总干缩系数 α_d 计算如式(7)所示:

$$\alpha_d = \frac{\sum \varepsilon_i}{\sum w_i} \quad (7)$$

式(3)~(7)中: w_i 为第*i*次失水率,%; δ_i 为第*i*次观测收缩量,mm; ε_i 为第*i*次收缩应变; α_{di} 为第*i*次干缩系数; m_i 为第*i*次标准试件质量,g; $X_{i,j}$ 为第*i*次测试时第*j*个千分表的读数,mm; l 为标准试件的长度; m_p 为标准试件烘干后的恒定质量,g。

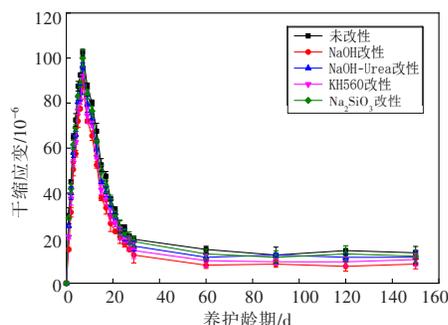


图3 不同养护龄期内的干缩应变试验结果

Fig. 3 Test results of dry shrinkage strain at different ages

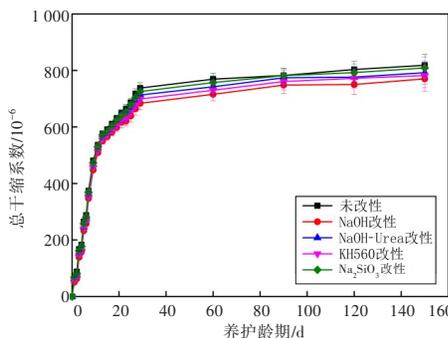


图4 不同养护龄期内的总干缩系数试验结果

Fig. 4 Test results of total dry shrinkage coefficients at different ages

从图3可以看出,5种橡胶-水泥稳定碎石的干缩应变的变化规律几乎一致,在养护7 d左右干缩应变达到最大,随后急剧减小,形成抛物曲线,在养护30 d附近出现拐点,此后曲线逐渐趋于平缓,直到养护150 d干缩应变趋于稳定。将5种橡胶-水泥稳定碎石按其干缩应变从小到大排序,依次为NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石、KH560改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH-Urea改性橡胶-水泥

稳定碎石、 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石、未改性橡胶-水泥稳定碎石。5种橡胶-水泥稳定碎石的总干缩系数的变化规律为,总干缩系数在养护过程中的前一个星期变化较大,在养护7~30 d内变化速率明显减小,养护30 d后试件的总干缩系数趋于稳定。5种橡胶-水泥稳定碎石总干缩系数的大小顺序与其干缩应变的一致。未改性橡胶-水泥稳定碎石的总干缩应变为 102.5×10^{-6} ,最大总干缩系数为 819.3×10^{-6} ,NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石的总干缩应变为 88.5×10^{-6} ,总干缩系数为 770.4×10^{-6} ,分别为未改性橡胶-水泥稳定碎石的86.34%、94.03%。通过改善橡胶颗粒的亲水性或接枝Si-O键以形成Si-O-Si空间稳定结构,在一定程度上可以减小材料特性差异带来的不利影响。

2.3 温缩性能

试件的温缩性能采用仪表法进行测定。每种橡胶-水泥稳定碎石的平行试件为3个,养护结束后将试件放入 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘10~12 h,使试件中无自由水存在。采用的温度范围为 $-20\sim 55\text{ }^\circ\text{C}$,设置6个温度级别,每个级别的温度差为 $15\text{ }^\circ\text{C}$,即测试温度分别为 $55、40、25、10、-5$ 和 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 。从高温开始逐级降温,降温速率为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,降到设定温度时,保温3 h,在保温结束前5 min内测定相应的收缩量。

采用式(8)~(9)计算不同橡胶-水泥稳定碎石的温缩应变 ε_i' 和温缩系数 α_i ,将得到的温缩系数采用纵坐标对数进行拟合,结果如图5所示。

$$\varepsilon_i' = \frac{l_i - l_{i+1}}{L_0} \quad (8)$$

$$\alpha_i = \frac{\varepsilon_i'}{t_i - t_{i+1}} \quad (9)$$

式(8)~(9)中: l_i 为第*i*个温度区间的千分表读数的平均值,mm; t_i 为温度控制程序设定的第*i*个温度区间, $^\circ\text{C}$; L_0 为试件的初始长度,由于相对于试件的长度而言,温缩变形很小,因此以试验前测定的试件长度 L_0 计,mm; ε_i' 为第*i*个温度下的平均收缩应变; α_i 为温缩系数,指单位温度变化下材料的线收缩系数。

由图5可以看出,零下的低温对每一种橡胶-水泥稳定碎石的温度变形能力的影响都很大。在 $[-20, -5]\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,橡胶-水泥稳定碎石

的温缩系数最大。随着温度的升高,其收缩减小,产生的温缩应变也相应减小,所以5种橡胶-水泥稳定碎石的温缩系数均有所减小。在同一温度范围内,将5种橡胶-水泥稳定碎石按其温缩系数从小到大排序,依次为KH560改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH-Urea改性橡胶-水泥稳定碎石、未改性橡胶-水泥稳定碎石、 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石。试验结果表明,相比于未改性的橡胶-水泥稳定碎石,NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石和 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石的温度变形能力较差,而KH560改性橡胶-水泥稳定碎石和NaOH-Urea改性橡胶-水泥稳定碎石的温度变形能力有所增强。相较于未改性的橡胶-水泥稳定碎石,KH560改性的橡胶-水泥稳定碎石在 $[-5, 10)\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $[10, 25)\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $[25, 40)\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $[40, 55]\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的温缩系数分别减小了68.83%、62.83%、52.21%、63.07%。这是因为橡胶颗粒经过KH560改性后与水泥的黏附性增强,可以更加有效地吸收温度应力,因此,改性橡胶-水泥稳定碎石的温缩开裂减少,其变形能力也得到了提升。

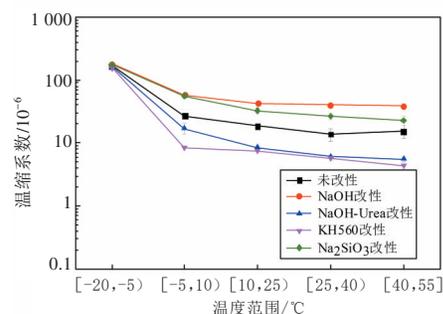


图5 -20~55 °C温度范围内的温缩系数
Fig. 5 Shrinkage coefficients from -20 to 55 °C

3 讨论

橡胶颗粒掺入水泥稳定碎石材料后,可以有效解决水泥稳定碎石因刚度过大与路面、土基不协调,易产生开裂形成反射裂缝的问题。但由于橡胶和水泥砂浆之间物理性能的差异较大,两者黏附性严重不足,本研究采用4种常用的化学改性方法,即氢氧化钠(NaOH)改性、氢氧化钠-尿素(NaOH-Urea)复合改性、硅烷偶联剂KH560改性和硅酸钠(Na_2SiO_3)改性,对橡胶颗粒进行了表面

改性处理,并对比分析了4种改性橡胶-水泥稳定碎石改性前后的抗冻抗裂性能,优选出了最佳的改性剂——硅烷偶联剂KH560。KH560改性剂可以提高橡胶-水泥稳定碎石的黏结强度,增强其抗冻抗裂性能,下一步将开展橡胶-水泥界面性能的研究试验,从微观的角度探究其改性机理。

4 结论

1) 分别经过NaOH-Urea改性和KH560改性后,橡胶-水泥稳定碎石的抗冻强度损失几乎均无变化,但冻融前后的无侧限抗压强度较改性前均大幅度增强,这表明两者改性效果良好,而分别经过NaOH和 Na_2SiO_3 改性处理后的橡胶-水泥稳定碎石的抗冻强度损失和冻融前后的无侧限抗压强度均大幅下降。

2) 将5种橡胶-水泥稳定碎石按其干缩应变和总干缩系数从小到大排序,依次为NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石、KH560改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH-Urea改性橡胶-水泥稳定碎石、 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石、未改性橡胶-水泥稳定碎石。其中,NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石的干缩应变为 88.5×10^{-6} ,为未改性橡胶-水泥稳定碎石的86.34%,总干缩系数为 770.4×10^{-6} ,为未改性橡胶-水泥稳定碎石的94.03%。

3) 在同一温度范围内,将5种橡胶-水泥稳定碎石按其温缩系数从小到大排序,依次为KH560改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH-Urea改性橡胶-水泥稳定碎石、未改性橡胶-水泥稳定碎石、 Na_2SiO_3 改性橡胶-水泥稳定碎石、NaOH改性橡胶-水泥稳定碎石。相较于未改性的橡胶-水泥稳定碎石,KH560改性橡胶-水泥稳定碎石在 $[-5, 10)^\circ\text{C}$ 、 $[10, 25)^\circ\text{C}$ 、 $[25, 40)^\circ\text{C}$ 、 $[40, 55]^\circ\text{C}$ 温度范围内的温缩系数分别减小了68.83%、62.83%、52.21%、63.07%。

4) KH560改性和NaOH-Urea改性这两种改性方法对橡胶-水泥稳定碎石路用性能的改善效果最好,但从两者改性工艺的复杂程度考虑,本研究认为KH560的改性效果最佳。

本研究主要通过室内宏观试验探究4种改性方法对橡胶-水泥稳定碎石抗冻抗裂性能的增强

效果,根据试验结果可推测,NaOH-Urea复合改性可以显著改善橡胶的亲水性能,进而提升橡胶-水泥稳定碎石的抗冻抗裂性能;而硅烷偶联剂KH560在增强橡胶亲水性能的同时,可在橡胶表面接枝Si—O—Si键,有助于在橡胶-水泥稳定碎石内部形成Si—O—Si空间网状结构,进而改善橡胶-水泥稳定碎石的抗冻抗裂性能。该推测需进一步开展相关界面试验研究来进行验证。

[参考文献]

- [1] 李雪莲,宁佐飞,叶峻宏,等. 振动搅拌水泥稳定碎石的强度及其形成机理[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 8-15. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.03.001.
LI Xuelian, NING Zuofei, YE Junhong, et al. Strength and its formation mechanism of vibration mixing cement stabilized macadam[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3): 8-15. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.03.001.
- [2] 刘新海,彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.
LIU Xinhai, PENG Xiaolin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 38-43. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.007.
- [3] 杨倡珍,杨毅. 废旧油脂生物油改性水泥稳定碎石性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 208-213. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.05.035.
YANG Lyuzhen, YANG Yi. Study on performance of waste bio-oil modified cement stabilized crushed stone [J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 208-213. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.05.035.
- [4] 罗坤. 掺聚乙烯醇纤维水泥稳定碎石抗裂性能研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3): 63-65, 97.
LUO Kun. Study on crack resistance of cement stabilized macadam mixed with polyvinyl alcohol fiber [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2021, 47(3): 63-65, 97.
- [5] 赵曜,李兆南. 超吸水树脂在水泥稳定碎石基层中的应用研究[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(3): 54-59.
ZHAO Yao, LI Zhaonan. Application of superabsorbent resin in cement stabilized gravel base [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2020, 46(3): 54-59.
- [6] 李燕军. 添加PVA纤维的水泥稳定碎石混合料抗裂与耐久性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 180-188, 219. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-

- 0610.2020.05.030.
- LI Yanjun. Study on crack resistance and durability of cement stabilized macadam mixture with PVA fiber[J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 180-188, 219. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2020.05.030.
- [7] 周志刚, 蔡扬发, 谭军. 聚酯纤维对橡胶改性沥青混凝土性能的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 1-8. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.001.
- ZHOU Zhigang, CAI Yangfa, TAN Jun. Effect of polyester fiber on performance of rubber modified asphalt concrete[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 1-8. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.001.
- [8] 王家庆, 吴健生, 黄凯健, 等. 生态混凝土绿色护坡的植生性与耐久性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 29-40. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.191.
- WANG Jiaqing, WU Jiansheng, HUANG Kaijian, et al. Planting performance and durability of eco-concrete for slope protection [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(4): 29-40. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.191.
- [9] 狄胜同, 贾超, 乔卫国, 等. 橡胶集料混凝土细观损伤特性的加载速率效应[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(6): 1900-1910. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180729.
- DI Shengtong, JIA Chao, QIAO Weiguo, et al. Loading rate effect of meso-damage characteristics of crumb rubber concrete [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(6): 1900-1910. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20180729.
- [10] 陈超, 陈云耀, 龚耀. 掺钢渣水泥稳定碎石配合比优化设计及路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2019(5): 75-78, 82. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.05.019.
- CHEN Chao, CHEN Yunyao, GONG Yao. Optimization design of mixture ratio of cement stabilized macadam mixed with steel slag and study on road performance [J]. Highways & Automotive Applications, 2019(5): 75-78, 82. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.05.019.
- [11] 胡艳丽, 高培伟, 李富荣, 等. 不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 85-92. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.01.013.
- HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different substitution rates [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 85-92. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.01.013.
- [12] 杨松, 季节, 孙鹏飞, 等. 橡胶粉改性水泥稳定碎石力学性能研究[J]. 现代交通技术, 2015, 12(4): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9889.2015.04.001.
- YANG Song, JI Jie, SUN Pengfei, et al. Mechanical properties of rubber powder modified cement stabilized macadam [J]. Modern Transportation Technology, 2015, 12(4): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9889.2015.04.001.
- [13] YANG R C, LI K, ZHU J P, et al. Effect of rubber particles on cement stabilized gravel system [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2014, 29(5): 990-995. DOI: 10.1007/s11595-014-1032-2.
- [14] 覃峰. 橡胶粉水泥稳定碎石基层收缩性能试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36(12): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2009.12.009.
- QIN Feng. Experimental study on shrinkage properties of cement-stabilized macadam base course with rubber powder [J]. New Building Materials, 2009, 36(12): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2009.12.009.
- [15] 王海鹏, 王平. 橡胶粉水泥稳定粒料基层路用性能试验 [J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 12-16, 22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.08.003.
- WANG Haipeng, WANG Ping. Experiment on road performance of rubber powder cement stabilized aggregate base course [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 12-16, 22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.08.003.
- [16] 吕松涛, 王双双, 王盘盘, 等. 橡胶-水泥稳定碎石持强增韧特性研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 139-147. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.11.012.
- LYU Songtao, WANG Shuangshuang, WANG Panpan, et al. Strength and toughness of rubber-cement stabilized macadam [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 139-147. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.11.012.
- [17] 刘誉贵, 马育, 刘攀. 氨化与磺化改性橡胶混凝土机理及强度研究 [J]. 材料导报, 2018, 32(18): 3142-3145, 3153. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.18.008.
- LIU Yugui, MA Yu, LIU Pan. Study on mechanism and strength of ammoniated modified rubber concrete and sulfonated modified rubber concrete [J]. Materials Review, 2018, 32(18): 3142-3145, 3153. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.18.008.
- [18] 李振霞, 陈渊召, 郭滕滕, 等. 改性橡胶碾压混凝土路用性能及作用机理 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 38-48. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-

- 7372.2023.05.003.
LI Zhenxia, CHEN Yuanzhao, GUO Tengting, et al. Pavement performance and mechanism of action for modified rubber roller compacted concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(5): 38-48. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.05.003.
- [19] SGOBBA S, BORSA M, MOLFETTA M, et al. Mechanical performance and medium-term degradation of rubberised concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 820-831. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.095.
- [20] HUANG B S, SHU X, CAO J Y. A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 270-274. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.014.

Study on the frost resistance and cracking resistance of rubber-cement stabilized macadams based on interface enhancement

LYU Songtao¹, DING Xinglan¹, LIU Chaochao¹, HUANG Hui²

(1. School of Traffic and Transport Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Guangxi Delivery Group Co., Ltd., Naning 530007, China)

Abstract: [Purposes] In this study, in order to solve the problem of insufficient adhesion performance of rubber-cement interface. [Methods] Firstly, sodium hydroxide oxidation (NaOH), sodium hydroxide oxidation and urea ammoniation (NaOH-Urea), silane coupling agent KH560 and sodium silicate (Na₂SiO₃) were used to treat the surface of the rubber particles. Next, the rubber-cement stabilized macadams test pieces were prepared based on the rubber particles treated with different modification methods. Finally, the temperature shrinkage, drying shrinkage and freezing-thawing test were carried out on the prepared samples. [Findings] The results show that rubber-cement stabilized macadams have almost no change after NaOH-Urea modification and KH560 modification. But the unconfined compressive strength of those samples before and after freezing is increased by about 1.5 times. Drying shrinkage performance of the five examined rubber-cement stabilized macadams is in turn: NaOH modification rubber-cement stabilized macadams, KH560 modification rubber-cement stabilized macadams, NaOH-Urea modification rubber-cement stabilized macadams, Na₂SiO₃ modification rubber-cement stabilized macadams, Unmodified treatment rubber-cement stabilized macadams. The KH560 and NaOH-Urea modification methods improve the temperature resistance of rubber-cement stabilized macadams, while Na₂SiO₃ and NaOH lead to insignificant improvement. [Conclusions] In summary, NaOH-Urea and KH560 can provide better modification efficiency than their counterparts and are able to enhance the freezing-thawing resistance and cracking resistance of cement stabilized macadams.

Key words: cement stabilized macadam; rubber particle; chemical modification; frost resistance; cracking resistance

Manuscript received: 2022-02-21; **revised:** 2022-03-14; **accepted:** 2022-03-21

Foundation item: Project (52078063) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects (CTKY-ZDXM-2020-010, CTKY-PTRC-2018-003) supported by Shanghai Chengtuo (Group) Co., Ltd. Science and Technology Innovation Plan; Project (AB202097030) supported by Guangxi Science and Technology Plan; Project (CX2020SS03) supported by Changsha University of Science & Technology Research Innovation

Corresponding author: LYU Songtao (1979—) (ORCID: 0000-0003-0426-5033), male, professor, research interest: road engineering. E-mail: lst@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:李岳林)