文章编号:1007-9629(2025)04-0291-08

硅灰-橡胶水泥砂浆的蠕变性能及微观机制

张金松 1 , 唐雨轮 1,* , 占佳佳 1 , 张向阳 2 , 江丙友 3 (1.安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南 232001; 2.安徽理工大学矿业工程学院,安徽淮南

232001; 3.安徽理工大学安全科学与工程学院,安徽淮南 232001)

摘要:为探究硅灰掺量及橡胶粒径对水泥砂浆蠕变性能的影响,设计16组试件进行正交试验,分别对不同硅灰掺量、不同橡胶粒径水泥砂浆的无侧限抗压强度、蠕变特性及微观特征进行分析.结果表明:橡胶颗粒会减小砂浆的无侧限抗压强度,增大其蠕变变形,但在硅灰加入后橡胶砂浆(为掺橡胶颗粒的水泥砂浆的简称,下同)的强度回升,蠕变变形减少;橡胶砂浆与普通砂浆都经历了三级加载,且橡胶砂浆的蠕变历时更长,硅灰的加入使试件发生破坏的载荷等级明显提高;基于减速蠕变阶段和等速蠕变阶段的试验数据对Burgers模型的参数进行辨识,发现二者的吻合情况较好;微观结构与细观模型很好地阐明了橡胶、硅灰对砂浆蠕变性能的协同作用机理.

关键词:水泥砂浆;橡胶粒径;硅灰;蠕变;微观结构

中图分类号:TU528.09

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.001

Creep Properties and Microscopic Mechanism of Silica Fume-Rubber Cement Mortar

ZHANG Jinsong¹, TANG Yulun^{1,*}, ZHAN Jiajia¹, ZHANG Xiangyang², JIANG Bingyou³

- (1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
- 3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to investigate the effects of silica fume dosing and rubber particle size on the creep properties of cement mortar, orthogonal tests were carried out using 16 groups of specimens designed to analyse the unconfined compressive strength, creep properties and microscopic characteristics of cement mortar with different silica fume dosing and different rubber particle sizes, respectively. The results show that the rubber particles would reduce the unconfined compressive strength and increase the creep deformation of the mortar, and the strength of the mortar recovers and the creep deformation decreases after the addition of silica fume. Both rubber mortar and ordinary mortar experienced three levels of loading, and the creep of rubber mortar lasted longer, while the addition of silica fume significantly increased the load level at which the specimen suffered damage. The parameters of the Burgers model are identified based on the test data of the decelerated creep stage and the isokinetic creep stage, and it is found that they are in good agreement. The microstructure and fine-scale modelling show well the synergistic mechanism of rubber and silica fume on the creep performance of mortar.

Key words: cement mortar; rubber particle size; silica fume; creep; microstructure

收稿日期:2024-05-05;修订日期:2024-12-17

基金项目:安徽省高校自然科学研究项目(2023AH051219);煤炭资源与安全开采国家重点实验室基金资助项目(SKLCRSM23KF007);国家自然科学基金资助项目(52074007);矿山建设工程安徽省高校重点实验室基金资助项目(GXZDSYS2022102);绿色建筑与装配式建造安徽省重点实验室基金资助项目(2022-JKYL-007);建筑结构与地下工程安徽省重点实验室基金资助项目(KLBSUE-2021-01)

废弃轮胎每年多达1000万t,已成为难以处理的"黑色污染".可喜的是,有学者将其代替细骨料掺入混凝土中制成的橡胶水泥基材料^[1-2],具有更好的韧性^[3]、能量吸收^[4]和抗冲击性能^[5],对于设计新型降噪且环保的道路、桥梁具有重大意义^[6].

然而,橡胶混凝土强度较低的问题一直阻碍着工程应用的推广^[7].目前,提升强度的方法主要有添加纤维材料^[8]或掺合料^[9]及化学法^[10].其中,纳米 SiO₂作为一种矿物掺合料,能有效改善混凝土的界面过渡区,提升其力学性能^[11-12],但高昂的成本限制了其在工程中的应用.为了进一步推进橡胶水泥基材料的应用,部分学者将含有大量 SiO₂的硅灰作为纳米 SiO₂的 低价 替代,并取得了一系列成果.如 Mostofinejad 等^[13]采用数字图像分析法发现硅灰能有效提升橡胶与水泥浆之间的黏聚力,从而提升橡胶混凝土的力学性能;Luo等^[14]发现硅灰能提升混凝土在冻融循环下的弯曲强度;Singh等^[15]研究证明了硅灰较废玻璃粉能更好地增强橡胶混凝土的抗压强

度;Singh等[16]发现加入硅粉的橡胶混凝土拥有更好的抗冲击性能.以上对改性橡胶混凝土的研究多集中于其峰值强度的变化,但对长期荷载作用下的变形研究较少.

本文采用单轴压缩、分级压缩蠕变和扫描电镜(SEM)试验,来分析硅灰-橡胶水泥砂浆(为掺硅灰和橡胶颗粒的水泥砂浆的简称,下同)的抗压强度、蠕变特性和微观结构,为橡胶水泥基材料的应用推广提供试验依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验水泥为P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料为淮河中砂,细度模数为2.67,堆积密度为1 361 kg/m³,含泥量(质量分数,文中涉及的含量、掺量等除特别说明外均为质量分数)1.25%;橡胶颗粒的堆积密度为392 kg/m³;硅灰为河南义翔新材料工厂生产;拌和水为实验室自来水.以上材料的各项性能参数见表1.

表 1 硅灰的性能参数
Table 1 Performance indexes of silica fume

Appearance	Specific surface area/(m ² ⋅g ⁻¹)	$w(\mathrm{SiO_2})/\%$	$w(\operatorname{Cl}^-)/\%$	IL(by mass)/%
White powder	21	98.40	0.01	1.48

在前人研究基础上^[17],在砂浆中分别加入不同粒径(0.850、0.425、0.250 mm)的橡胶颗粒等体积替代20%的砂子,同时加入不同掺量(0%、2%、4%、6%、8%)的硅灰,试验共计16组,详细配比见表2,表中编号内的"A"、"B"、"C"分别表示橡胶颗粒的粒径为0.850、0.425、0.250 mm.

1.2 试验方法

试验采用 ϕ 50×100 mm 圆柱型试件,在振捣台上振动成型后,放入标准养护箱((20±2) ℃、相对湿度 95%)中养护 1 d 后脱模,随后置于饱和 Ca(OH)₂ 溶液中养护至 28 d时取出备用.

单轴压缩和分级压缩蠕变试验采用 CLY15016型电子蠕变松弛试验机进行.首先,以 0.5 kN/s 的加载速率对砂浆试件进行单轴压缩,获得各组试件的无侧限抗压强度,记为f.然后,对试件进行等量分级递增加载,加载速率为 0.5 MPa/s,共设置 5 级加载:第 1 级载荷 σ 为 0.5f_e、第 2 到 5 级载荷分别在第 1 级载荷的基础上依次递增 10%,5 级加载的应力依次为 0.5f_e、0.6f_e、0.7f_e、0.8f_e、0.9f_e,每级加载的持续时间为 2 h,共加载 10 h. 蠕变试验中试验机具备对试件应力应变数值的自动采样功能,采样间隔为 5 s,稳定加载期间数据采样间隔为 10 min.在试验期间,试验机的

表 2 硅灰-橡胶水泥砂浆的配合比

Table 2 Mix proportions of silica fume-rubber mortars

No. Cement Water Sand Silica fume Rubber OM 1 080 () () A0 A2 A4 Α6 Α8 B0 () В2 В4 В6 В8 C0 () C2C4 C6

加载系统会根据实时反馈的数据自动调整应力,因此试验时能保证施加的载荷始终恒定.微观试验采用日立产 S-3400N 型 SEM 分别对具有代表性的试件 OM、A0、A8进行形貌分析.

2 力学性能试验

2.1 无侧限抗压强度

图 1 为硅灰-橡胶水泥砂浆试件的 28 d 无侧限抗压强度 (28 d 时试件 OM 的无侧限抗压强度为 36.43 MPa).由图 1 可知,试件的强度与橡胶的粒径成反比,与硅灰的掺量成正比,这说明硅灰能在一定程度上弥补因橡胶加入而导致的强度损失,且橡胶的颗粒越大,硅灰对橡胶砂浆(为掺橡胶颗粒的水泥砂浆的简称,下同)的补强效果越明显,但这种补强效果会随着硅灰掺量的增多逐渐放缓.这是因为硅灰能在水泥发生水化反应时吸收 Ca(OH)₂,并生产大量的水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,附着在颗粒物表面,使基体变得更加致密^[18],从而提高了砂浆的强度.另外,强度最高的试件 C8 与 OM 仅差 3.08 MPa,充分说明了硅灰改性橡胶砂浆的优越性能.

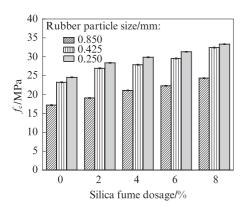


图 1 硅灰-橡胶水泥砂浆试件无侧限抗压强度 Fig. 1 Unconfined compressive strength silica fume-rubber cement mortar specimen

2.2 蠕变曲线

图 2为硅灰-橡胶水泥砂浆试件的蠕变曲线图. 由图 2可见:砂浆试件在长期应力作用下蠕变曲线呈阶梯状上升,各阶段施加荷载的瞬间会产生瞬时突变,而后在荷载不变的情况下,曲线趋于平稳,产生蠕变;当施加荷载较小时,试件以瞬时变形为主,随着荷载逐级递增,曲线的斜率逐渐增大,表现为减速蠕变和等速蠕变;当施加最后一级荷载后,应变呈直线式增大并伴随蠕变破坏,此时蠕变曲线表现为减速蠕变、等速蠕变和加速蠕变3个阶段[18-19].

由图 2(a)可知,在 OM 中加入橡胶后,试件每级加载的蠕变变形均有不同程度的增大,发生破坏的载荷由第 3级 (σ/f_c =0.7)提升至第 4级 (σ/f_c =0.8),破坏的时间点由第 3级载荷施加的前半段变成了第 4级载荷施加的瞬间,其中 3组橡胶砂浆破坏时的荷载与时间点基本一致.由此可知,在长期应力作用下,

橡胶颗粒虽然增大了水泥砂浆的蠕变变形,但抗压能力却能得到提升,橡胶粒径的大小对此影响很小.这是因为橡胶颗粒与水泥砂浆的连接并不紧密,在二者的接触面上会存在一些微观孔隙与裂缝,所以在相同载荷下橡胶砂浆比普通砂浆蠕变变形更大,由于3种橡胶颗粒大小差别并不大,故增加的裂缝数量大致相同,所以3组试件(A0、B0、C0)的破坏时间相同.

进一步观察图 $2(b) \sim (d)$ 可知,在橡胶砂浆中加入硅灰后,试件每级荷载下的蠕变变形都在减小,破坏时的加载等级增大,橡胶砂浆均在第 4 级荷载施加的瞬间发生破坏,当硅灰掺量为 $2\%\sim 6\%$ 时,试件要经历 4 级载荷(σ/f_c =0.8)的全过程才会发生破坏,而硅灰掺量达到 8% 时,试件在第 5 级加载(σ/f_c =0.9)后也没有破坏的迹象.由此可知,在长期应力的作用下,硅灰不仅能增强橡胶砂浆的抗压能力,其蠕变变形增大的问题也能得以缓解.

图 3 为硅灰-橡胶水泥砂浆试件的蠕变应力水 平与瞬时应变关系图.由图3(a)可见,试件的瞬时 应变会随着载荷的增大而增大,橡胶砂浆相较于普 通砂浆的瞬时应变更大,且颗粒越大应变增大的越 多.进一步观察图 3(b)~(d)可知,当载荷等级相同 时,硅灰的掺量越大,砂浆的瞬时应变越小,且橡胶 颗粒的大小并不能改变此种关系.在硅灰掺量相同 时,加入橡胶的粒径越小,硅灰对试件瞬时应变的减 小效果越好,其中试件C0较试件C8初始瞬时应变 由 3.2×10⁻³ 减小到 2.2×10⁻³, 减小了 31.3%, 而试 件 A0、B0 较之试件 A8、B8 分别减小了 26.5%、 30.3%. 另外,图2和图3(b)~(d)中曲线间的距离均 呈现出先增大后减小的趋势,这说明硅灰对橡胶砂 浆蠕变变形的减小速率会随着硅灰掺量的增多先增 大后减小,在掺量4%时达到最大.同时,这种规律 在前2级加载时表现较为明显,但后3级载荷下这 种规律表现的并不明显,这是因为试件在较大压力 与临近破坏时试件内部结构遭到破坏,蠕变速率呈 现出明显的不均匀性,

2.3 蠕变 Burgers 模型

除最后一级破坏时的蠕动应力水平对应的蠕变曲线之外,其余蠕变曲线均由减速蠕变阶段和等速蠕变阶段组成.Burgers模型能较为准确地反映出砂浆试件在减速蠕变和等速蠕变阶段的变形特征,且能很好地表示砂浆黏弹性变形的特征^[20],故本文选用Burgers模型对各组试件的蠕变特性进行拟合.Burgers模型由1个Maxwell体和1个Kelvin体串联而成(见图4),具体方程为:

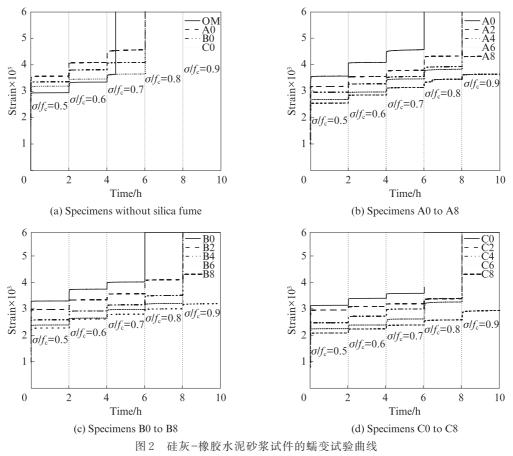


Fig. 2 Creep test curves of silica fume-rubber cement mortar specimens

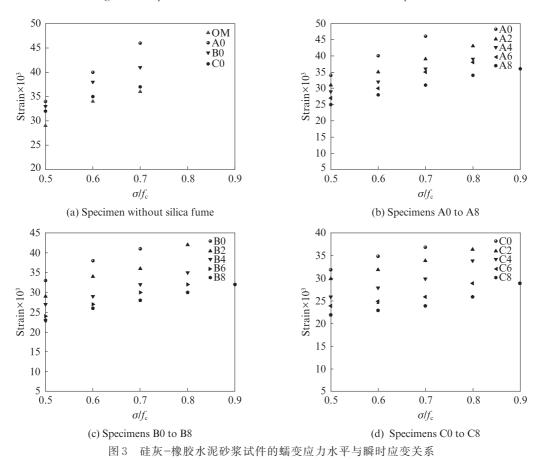


Fig. 3 Relationship between creep stress level and instantaneous strain of silica fume-rubber cement mortar specimens

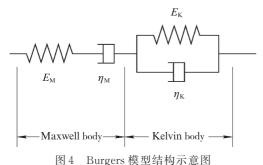


图 4 Burgers 模型绢构水息图 Fig. 4 Schematic diagram of the Burgers model

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_{\rm M}} + \frac{\sigma}{\eta_{\rm M}} t + \frac{\sigma}{E_{\rm K}} \left\{ 1 - e^{-\frac{E_{\rm K}}{\eta_{\rm K}} t} \right\} \tag{1}$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为t时刻的蠕变值; σ 为轴向应力; $E_{\rm M}$ 、 $E_{\rm K}$ 分别为弹性模量和黏弹性模量; $\eta_{\rm M}$ 、 $\eta_{\rm K}$ 分别为黏弹性系数和黏性系数.Burgers模型方程式的第1项表示试件瞬时弹性应变,第2项表示试件的蠕变应变,第3项表示试件的减速蠕变.

在第1级载荷下分别对各组试件的 Burgers 模型 E_{M} 、 E_{K} 、 η_{M} 、 η_{K} 进行了反演,反演结果如表 3 所示.图 5 为硅灰-橡胶水泥砂浆试件的 Burgers 模型拟合曲线.由表 3 和图 5 可知,在各级载荷下 Burgers 模型与试验数据的拟合曲线能通过大部分的数据点,

且模型拟合优度 $R^2 > 0.97$, 表明拟合结果良好,Burgers模型能较好地反映出硅灰-橡胶水泥砂浆的蠕变特征.

表 3 各组砂浆试件 Burgers 模型参数拟合结果
Table3 Fitting parameters of Burgers model for mortar specimen

No.	σ/MPa	$E_{\mathrm{M}}/\mathrm{GPa}$	$\eta_{\rm M}/({\rm Pa} \cdot {\rm h})$	$E_{\rm K}/{ m GPa}$	$\eta_{\rm K}/({\rm Pa} \cdot {\rm h})$	R^2
OM	18. 22	9.458	21 787. 586	2 930. 179	857.354	0.985
A0	8.61	5.639	5 091. 966	1 058. 219	124.894	0.986
A2	9.55	6.307	6 396.710	1 483. 456	181.818	0.978
A4	10.55	6.769	7 693.480	2 250. 738	352.961	0.983
A6	11. 15	7.634	9 565. 260	2 373. 481	430.438	0.984
A8	12.18	8.679	12 836. 530	2 698. 896	502.662	0.830
ВО	11.62	5.977	5 198. 716	1 271. 030	147.943	0.989
В2	13.48	6.619	6 833. 415	1 819. 294	276 654	0.977
В4	13.95	6.830	8 415. 596	2 257. 173	380.664	0.979
В6	14.77	7.876	9 808. 975	2 442. 059	431.184	0.978
В8	16.22	8.773	13 181.868	2 728. 211	648.882	0.989
C0	12.28	6.304	5 888. 081	1 373. 202	177.164	0.978
C2	14.19	6.667	7 619. 530	2 052. 453	317.860	0.978
C4	14.94	7.465	8 596. 841	2 369. 772	418.719	0.985
C6	15.67	7.994	10 031. 565	2 451. 837	499.826	0.981
С8	16.68	8.826	17 284. 405	2 927. 037	716.396	0.987

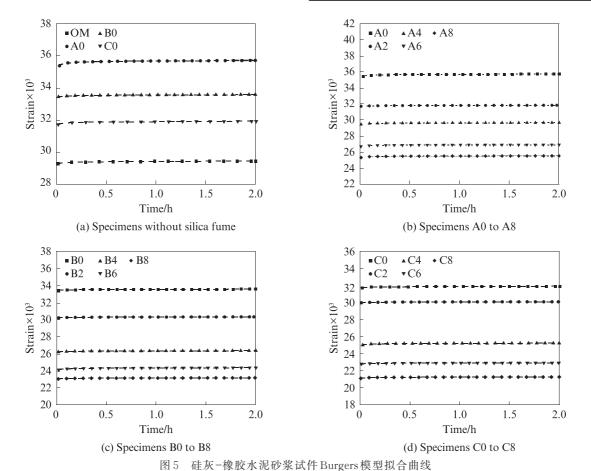


Fig. 5 Fitting curves of silica fume-rubber cement mortar specimens using Burgers model

3 微观结构特征

图 6为硅灰-橡胶水泥砂浆的 SEM图.由图 6(a)~(c)可见:试件 OM与 A0内部均有明显的孔隙,其中试件 A0孔隙更大,主要出现在橡胶颗粒与基体之间的界面过渡区,而试件 A8的内部几乎观察不到孔隙.这是由于橡胶作为疏水材料,与胶凝材料混合时容易在与细骨料接触的地方形成界面过渡区,从而导

致裂缝与孔隙的产生;同时,极小的硅灰颗粒在拌和时极易进入这些孔隙与裂缝中,使得试件内部得到填充,故试件A8几乎没有孔隙.

由图 6(d)~(f)可见,试件 A8中水泥在水化反应时由于硅灰参与了水化反应,产生针棒状水化产物与纤维网状 C-S-H凝胶,这些产物相互穿插和搭接,形成了比较密实的结构,故试件 A8表现出了很好的抗压与抗蠕变能力.

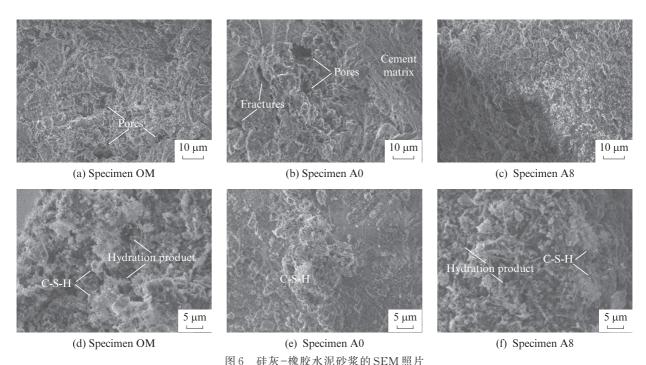


Fig. 6 SEM images of silica fume-rubber cement mortars

4 讨论

当橡胶砂浆中未掺硅灰时,橡胶作为一种弹性材料,在水泥砂浆基体中很难有效地传递外界荷载产生的应力,从而造成砂浆强度下降.同时,橡胶作为疏水材料,在其颗粒与新拌浆体接触时,因拌和水的富集,容易在接触区形成薄弱且多孔的界面过渡区^[21],由此增加了砂浆的整体孔隙率;在外荷载作用下,该界面过渡区容易破裂,进而导致砂浆试件破坏^[22].但橡胶作为多孔材料,其自身具有多孔性,加之自身的高弹性,以及其接触区形成的界面过渡区,都能为橡胶砂浆的蠕变变形提供空间.因此,相对于未掺橡胶颗粒的水泥砂浆试件,橡胶砂浆试件在外荷载的长期作用下,蠕变变形更大,但发生破坏的时间点却明显推迟.

当橡胶砂浆中掺入硅灰时,橡胶颗粒本身及界面 过渡区的孔隙容易在拌和阶段吸附硅灰颗粒,并在水 化后产生大量的水化硅酸钙凝胶,填充了上述孔隙, 同时增强了橡胶颗粒与基体之间的化学黏结力,优化 了界面过渡区.被硅灰及其水化产物填充和包裹的橡胶颗粒,自身得到了强化,因此能够更好的传递外部荷载产生的应力.另外,因界面过渡区被硅灰的水化产物填充,橡胶颗粒的形变空间受到挤压,在宏观上表现为橡胶砂浆的强度提高,蠕变变形减小.但橡胶砂浆中的橡胶颗粒内部以界面过渡区的孔隙是有限的,随着硅会掺量的提高,橡胶砂浆强度的提升效果在慢慢减弱,所以硅灰对橡胶砂浆的改善作用仅在小掺量时比较明显.

5 结论

(1)硅灰-橡胶水泥砂浆试件的强度与橡胶颗粒的粒径成反比,与硅灰的掺量成正比,且橡胶颗粒的粒径越大,硅灰对橡胶砂浆(为掺橡胶颗粒的水泥砂浆的简称,下同)的补强效果越明显,但这种补强效果会随着硅灰掺量的提高逐渐减弱.

(2)在长期应力作用下硅灰-橡胶水泥砂浆试件的蠕变曲线均呈阶梯状上升,较之纯水泥砂浆

(OM),橡胶砂浆的蠕变变形更大,硅灰的加入能减小这种变形,且减小速率随着硅灰掺量的增多先增大后减小,在4%时达到最大.随着载荷的增加砂浆试件蠕变变形也逐渐增加,在同一级载荷下,较之OM,橡胶砂浆具有更好的抗压能力,而硅灰不仅能增强这种抗压能力,还能减小因橡胶颗粒而增大的蠕变变形.

(3)硅灰-橡胶水泥砂浆具有密实的水化产物与水化硅酸钙结构.硅灰细小的颗粒能有效填充橡胶砂浆的孔隙和界面过渡区,提供一定的化学黏结力,改善砂浆内部及界面过渡区的裂缝与孔隙,从而加强基体的完整性,提升抗压强度、临界破坏压力和抵抗蠕变变形的能力.

参考文献:

- [1] 徐颖,刘家兴,杨荣周,等.超高强度橡胶混凝土的力学特性及能量演化[J].建筑材料学报,2023,26(6):612-622.

 XU Ying, LIU Jiaxing, YANG Rongzhou, et al. Mechanical properties and energy evolution of ultra high strength rubber concrete [J].Journal of Building Materials,2023,26(6):612-622.

 (in Chinese)
- [2] 沈卫国,张涛,李进红,等.橡胶集料对聚合物改性多孔混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2010,13(4):509-514.

 SHEN Weiguo, ZHANG Tao, LI Jinhong, et al. Investigation on the influence of rubber aggregate on the properties of polymer modified porous concrete [J]. Journal of Building Materials,2010, 13(4):509-514. (in Chinese)
- [3] DONG JF, LIU Y C, YUAN S C, et al. Mechanical behavior and impact resistance of rubberized concrete enhanced by basalt fiber-epoxy resin composite [J]. Construction and Building Materials, 2024, 435:136836.
- [4] KAEWUNRUEN S, LI D, CHEN Y, et al. Enhancement of dynamic damping in eco-friendly railway concrete sleepers using waste-tyre crumb rubber[J]. Materials, 2018, 11(7):1169.
- [5] LÜJ, HANWC, ZHENGJL, et al. Effects of basalt fibre and rubber particles on the mechanical properties and impact resistance of concrete[J]. Structures, 2024, 65: 106677.
- [6] 杨若冲,谈至明,黄晓明,等. 掺聚合物的橡胶混凝土路用性能研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4):15-19.
 YANG Ruochong, TAN Zhiming, HUANG Xiaoming, et al.
 Research on performance of rubberized concrete incorporated with polymer[J]. China Journal of Highway Transport, 2010, 23(4): 15-19. (in Chinese)
- [7] 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.

 HU Yanli, GAO Peiwei, LI Furong, et al. Experimental study on mechanical properties of rubber concrete with different substitution rate[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 85-92. (in Chinese)

- [8] ABAZA O A, HUSSEIN Z S. Flexural behavior of steel fiber-reinforced rubberized concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(1):04015076.
- [9] 姜晓东,张宏,李闯,等. 偏高岭土对 NaOH 预处理橡胶混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报,2024,27(7):589-595.

 JIANG Xiaodong, ZHANG Hong, LI Chuang, et al. Effect of metakaolin on mechanical properties of NaOH pretreated rubber concrete[J]. Journal of Building Materials, 2024,27(7):589-595. (in Chinese)
- [10] 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. 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. (in Chinese)
- [11] 王娟,王文超,许耀群,等.纳米SiO₂对橡胶混凝土断裂行为的 影响[J].建筑材料学报,2023,26(7):731-738. WANG Juan, WANG Wenchao, XU Yaoqun, et al. Effect of nano-SiO₂ on fracture behavior of rubber concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26 (7):731-738. (in Chinese)
- [12] KHAN K, AHMAD W, AMIN M N, et al. Nano-silica-modified concrete: A bibliographic analysis and comprehensive review of material properties [J]. Nanomaterials, 2022, 12(12): 1989.
- [13] MOSTOFINEJAD D, AGHAMOHAMMADI O, BAHMANI H, et al. Improving thermal characteristicsand energy absorption of concrete by recycled rubber and silica fume[J]. Developments in the Built Environment, 2023, 16:100221.
- [14] LUOG, ZHANG J, ZHAOZ, et al. Fatigue property evaluation of sustainable porous concrete modified by recycled ground tire rubber/silica fume under freeze-thaw cycles[J]. Sustainability, 2023, 15(10):7965.
- [15] SINGH G, TIWARY A K, SINGH S, et al. Incorporation of silica fumes and waste glass powder on concrete properties containing crumb rubber as a partial replacement of fine aggregates [J]. Sustainability, 2022, 14(21):14453.
- [16] SINGH S , KAUR G.Impact resistance of waste tyre rubber and silica fume-based concrete mixes [J]. International Journal of Structural Engineering, 2022, 12(1):1-13.
- [17] 任翔,胡功宏,吴帆,等.纳米硅粉对大掺量橡胶砂浆力学及收缩性能影响试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(22):299-304. REN Xiang, HU Gonghong, WU Fan, et al. Experimental investigation on effect of particle size and dosage of rubber on mechanical properties of mortar [J]. Science Technology and Engineering,2019,19(22):299-304. (in Chinese)
- [18] MEI J P, TAN H B, LI H N, et al. Effect of sodium sulfate and Nano-SiO₂: On hydration and microstructure of cementitious materials containing high volume fly ash under steam curing [J]. Construction and Building Materials, 2018, (163): 812-825.
- [19] 刘雨姗,庞建勇,姚韦靖.页岩陶粒轻骨料混凝土高温后蠕变特性[J].建筑材料学报,2021,24(5):1096-1104.
 LIU Yushan, PANG Jianyong, YAO Weijing. Creep behavior of shale ceramsite lightweight aggregate concrete exposed to high

- temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24 (5): 1096-1104. (in Chinese)
- [20] 马志奇,杨小彬,刘腾辉,等.粒径大小对颗粒堆积体Burgers模型蠕变参数相似试验研究[J].矿业科学学报,2022,7(6):730-737. MA Zhiqi, YANG Xiaobing, LIU Tenghui, et al. Similar experimental study on the effect of particle size on the creepparameters of Burgers model of granular accumulation[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(6):730-737. (in Chinese)
- [21] 朱星瞳,耿欧,朱思远.废轮胎橡胶混凝土界面过渡区特征试验研究[J].硅酸盐通报,2021,40(2):573-578.
- ZHU Xingtong, GENG Ou, ZHU Siyuan. Characteristics of interface transition zone of waste tire rubber concrete[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (2): 573-578. (in Chinese)
- [22] 杨荣周,徐颖,陈佩圆,等.SHPB 劈裂试验下橡胶水泥砂浆的动态力学、能量特性及破坏机理试验研究[J]. 材料导报,2021,35 (10):10062-10072.
 - YANG Rongzhou, XU Ying, CHEN Peiyuan, et al. Experimental study on dynamic mechanics, energy characteristics and failure mechanism of rubber cement mortar under SHPB splitting test[J]. Material Reports, 2021, 35(10):10062-10072. (in Chinese)