



稻壳灰橡胶混凝土抗冻融性能及微观结构

王恒 徐义华 姚韦靖 庞建勇 刘雨珊

Freeze-thaw cycle and microstructure of rice husk ash rubber concrete

WANG Heng, XU Yihua, YAO Weijing, PANG Jianyong, LIU Yushan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220712.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐冻融循环条件下沥青高温流变性能及微观结构

High temperature rheological properties and microstructures of asphalt under salt freezing cycles

复合材料学报. 2017, 34(8): 1839–1846 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161008.002>

冻融循环作用下玄武岩纤维-矿渣粉-粉煤灰混凝土压拉强度试验与细观结构

Compression-tensile tests and meso-structure of basalt fiber-slag powder-fly ash concrete under freeze-thaw cycles

复合材料学报. 2021, 38(3): 953–965 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.002>

冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响

Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick

复合材料学报. 2020, 37(9): 2294–2302 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.002>

盐冻条件下水泥砂浆受风沙冲蚀磨损性能及损伤机制

Erosion-wear performance and mechanism of cement mortar subjected to freeze-thaw cycles in salts solution

复合材料学报. 2018, 35(1): 192–199 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170417.002>

纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验

Anti-freeze performance test of nano carbon fiber reinforced concrete

复合材料学报. 2019, 36(10): 2458–2468 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190510.002>

橡胶/混凝土盐冻循环后性能劣化及微观结构

Performance degradation and microscopic structure of rubber/concrete after salt freeze-thaw cycles

复合材料学报. 2021, 38(12): 4294–4304 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210202.005>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220712.002

稻壳灰橡胶混凝土抗冻融性能及微观结构



分享本文

王恒, 徐义华, 姚韦靖, 庞建勇*, 刘雨姗

(安徽理工大学 土木建筑学院, 淮南 232001)

摘 要: 为研究稻壳灰橡胶混凝土 (RRC) 的抗冻融性能, 对比分析在氯盐环境下冻融循环后, 普通混凝土 (Normal concrete, NC)、橡胶混凝土 (Rubber concrete, RC) 和 RRC 的质量损失、相对动弹模量损失、强度损失及微观结构特征, 同时对相对动弹模量与相对抗压强度的关系进行拟合分析。结果发现: 随冻融循环次数增加, 稻壳灰橡胶混凝土表面坑蚀愈明显, 内部孔隙增多, 微裂缝发展并贯通, 宏观强度显著降低, 相对动弹模量与抗压强度有良好相关性, 拟合结果较优。橡胶的高弹性和稻壳灰极高的火山灰效应有效缓解了冻胀力带来的损伤, 各冻融阶段 RRC 的损伤程度均明显优于 NC, 其中以稻壳灰掺量 (占胶凝材料质量比) 为 10%、橡胶掺量 (等体积取代砂) 为 10% 时的 RRC 力学性能与抗冻融性能综合最优, 经历 120 次冻融循环后, 其抗压强度损失率较 NC 降低了 18%。

关键词: 稻壳灰; 氯盐环境; 冻融循环; 火山灰效应; 微观结构

中图分类号: TU528; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)05-2951-09

Freeze-thaw cycle and microstructure of rice husk ash rubber concrete

WANG Heng, XU Yihua, YAO Weijing, PANG Jianyong*, LIU Yushan

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In order to study the freeze-thaw resistance of rice husk ash rubber concrete (RRC), the mass loss, relative dynamic modulus loss, strength loss and microstructure characteristics of normal concrete (NC) and RRC after freeze-thaw cycles in chloride environment were compared and analyzed, and the relationship between relative dynamic modulus and relative compressive strength was fitted and analyzed. The results show that with the increase of freeze-thaw cycles, the pit erosion on the concrete surface becomes more obvious, the internal pores increase, microcracks develop and penetrate, and the macroscopic strength decreases significantly. The relative dynamic modulus has a good correlation with the compressive strength, and the fitting structure is better. The high elasticity of rubber and high pozzolanic effect of rice husk ash effectively alleviate the damage caused by frost heaving force, and the damage degree of RRC in each freeze-thaw stage is significantly better than that of NC. When the content of rice husk ash (mass ratio to cementitious materials) is 10% and the content of rubber (volume replacement of sand) is 10%, the comprehensive optimum of mechanical properties and freeze-thawing resistance of RRC is the best. After 120 freeze-thaw cycles, the loss rate of compressive strength is 18% lower than that of NC.

Keywords: rice husk ash; chloride environment; freeze-thaw cycle; volcanic ash effect; microstructure

当前, 废弃物资源回收利用因满足绿色可持续发展的要求, 受到广泛关注。农业副产品稻壳存在焚烧处理污染环境且利用率低等问题, 可将其高温煅烧制成稻壳灰掺入混凝土中制成稻壳灰混凝土^[1-3], 其显著提高了混凝土的力学性能和耐久性能^[4-6], 作为有益的新型矿物掺合料而受到广泛关注。稻壳灰混凝土的研究主要集中于其力学性能和微观结构的讨论, 如欧阳东等^[7]的研究表

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-19; 录用日期: 2022-07-02; 网络首发时间: 2022-07-13 10:12:00
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220712.002>
基金项目: 国家自然科学基金 (面上项目)(2108085ME158); 安徽省高等学校自然科学研究项目 (重点项目)(KJ2020A0297)
National Natural Science Foundation of China (2108085ME158); Natural Science Research Project of Universities in Anhui (KJ2020A0297)
通信作者: 庞建勇, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水泥混凝土材料 E-mail:pangjiyong@163.com
引用格式: 王恒, 徐义华, 姚韦靖, 等. 稻壳灰橡胶混凝土抗冻融性能及微观结构 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2951-2959.
WANG Heng, XU Yihua, YAO Weijing, et al. Freeze-thaw cycle and microstructure of rice husk ash rubber concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2951-2959(in Chinese).

明使用水泥量 10%~20% 的低温稻壳灰代替水泥，高强混凝土的抗压强度可提高 10 MPa 以上。冯庆革等^[8]分析了混凝土的孔结构，得出掺入稻壳灰可以改善混凝土孔结构，从而增强其抗压强度。Zhang 等^[9]的研究表明稻壳灰可以降低混凝土的孔隙率和界面区 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的含量，与普通混凝土 (NC) 对比，稻壳灰混凝土的骨料和水泥浆体之间的界面区宽度减小。Faried 等^[10]分析了不同燃烧程度的稻壳灰对高性能混凝土力学性能和微观结构的影响，得出最佳燃烧方式。因此，稻壳灰混凝土作为绿色混凝土有良好发展前景。

将废弃橡胶轮胎处理成橡胶颗粒作为细骨料等体积替代砂制成橡胶混凝土^[11-12]，极大解决了废弃轮胎难降解的问题。由于橡胶优良的韧性和延性，橡胶混凝土具有良好的韧性^[13]、抗冻性能^[14-15]、抗冲击性能和保温性能，故在道路^[16]、桥梁和水利工程等方面得到广泛应用。

在北方严寒地区降雪时常导致路面结冰，公路管理部门向路面撒盐除冰，使混凝土处于冻融循环和氯盐环境的双重损伤^[17-18]。目前，已有大量学者对橡胶混凝土和稻壳灰混凝土的抗冻融性进行研究，结果表明橡胶具有高弹性，在冻融循环的过程中，缓解混凝土在静水压作用下造成的开裂和裂缝贯通，改善橡胶混凝土抗冻性^[19-21]，但力学强度大幅降低，而稻壳灰不仅粒径小、比表面积大，还含有大量 SiO_2 ，与水泥水化产物

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶，C-S-H 的致密、均质截面填充了空隙，优化内部级配，强度提高，改善混凝土的抗冻性能，如 Cheolwoo 等^[22]研究了掺入酸蚀稻壳灰混凝土的抗冻融性能。冯庆革等^[23]研究了气泡及空气量对高活性稻壳灰混凝土的抗冻融性能影响。目前，国内外关于将稻壳灰掺入橡胶混凝土对其力学性能和抗冻融性能研究鲜少。因此，开展稻壳灰橡胶混凝土 (Rice husk ash rubber concrete, RRC) 冻融循环后性能的研究对于绿色混凝土在氯盐环境下抗冻融性能方面的研究有重大意义。

为此，本文对稻壳灰橡胶混凝土在氯盐环境下进行冻融循环试验，测定和分析了不同冻融时间下 RRC 的质量和强度宏观损失，使用非破损超声检测技术^[24-25]和电镜扫描反映混凝土的内部损伤，并进行微观机制分析。

1 试验

1.1 原材料

水泥采用淮南八公山牌 42.5 级普通硅酸盐水泥，其 28 天抗压强度为 49.75 MPa；稻壳灰采用 600℃ 高温下恒温煅烧而成，属电厂稻壳灰，主要组成成分见表 1。粗骨料使用粒径 5~15 mm 的碎石；细骨料采用淮河中砂；橡胶颗粒采用粒径为 1~2 mm，由废旧轮胎经过加工而成的，其实物图见图 1；水为普通自来水；减水剂采用陕西秦奋建材厂产 HPWR 型标准高性能减水剂。

表 1 稻壳灰化学成分
Table 1 Chemical constituents of rice husk ash

Composition	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO
Content/wt%	85.6	2.51	2.44	0.56	0.51

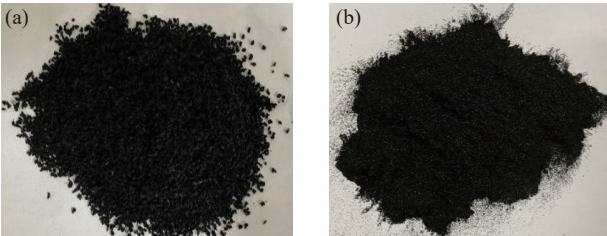


图 1 橡胶 (a) 及稻壳灰 (b) 实拍
Fig. 1 Actual rubber (a) and rice husk ash (b) shootings

1.2 试验设计

主要以稻壳灰掺量和橡胶掺量为研究参数，RRC 为研究对象。其中，橡胶作为细骨料等体积

取代砂，掺入量设计为拌合物中胶凝材料质量的 5% 和 10%(质量比)，稻壳灰取代量按胶凝材料质量的 0%、5%、10%、15% 和 20% 替代水泥，设计 10 种不同的组合形式。参照 GB/T 18736—2017^[26]测定矿物掺合料需水量的试验方法确定稻壳灰水泥砂浆需水量的试验方法，即使受检水泥砂浆流动度与基准水泥砂浆流动度值相差小于 5 mm 的用水量。基于此需水量测定方法，确定当在稻壳灰取代量超过 10% 时，RRC 试件的用水量则在 NC 的用水量上增加 $0.2n$ (n 为试件中掺入稻壳灰的质量) 克水，以此弥补稻壳灰给水泥砂浆工作性能带来的不利影响，并保证水泥水化反应的充分进行。

1.3 试块制作及试验方案

在室温下制备 330 个 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体非标准试件,其中普通混凝土制备 30 块;不同橡胶掺量橡胶混凝土共制备 60 块;不同稻壳灰掺量的 RRC 试块共制备 240 块。成型 24 h 后拆模,置于标准养护条件下(相对湿度≥95%,温度为(20±2)℃)养护 28 天,试验具体按照 JGJ55—2011^[27]进行,试验配合比见表 2。测试拌合物的坍落度、混凝土试件力学性能,其具体数据见表 3。

由表 3 可见,随橡胶掺量增加,由于橡胶的疏水性,试样的抗压强度降低。混凝土搅拌中引入气泡,导致混合料坍落度增加,结硬后,混凝土内部孔隙增多,表观密度减小,抗压强度下降^[28]。而当橡胶掺量相同时,随稻壳灰取代水泥量增大,其高火山灰效应和大比表面积填充细小孔隙,混凝土密实度增加,抗压强度提高,很好的弥补了由于添加橡胶而导致的混凝土力学性能

的下降。以稻壳灰掺量为 10% 时最佳,当橡胶掺量为 5%、10% 时,RRC 分别较橡胶混凝土抗压强度提升 24%、21%。

采用浙江土工仪器制造有限公司产的 STDW-40D 型高低温试验箱完成对 RRC 的冻融循环试验,在(−20±4)℃ 环境中冻 8 h,在(20±4)℃ 溶液中融 4 h,其溶液为浓度为 4% 的 NaCl 溶液^[29],循环次数为 0、30、60、90、120 次。试验过程中其降温速率要求为在 1.5~2 h 内降至指定温度,为了保证氯化钠溶液的浓度要求,每隔 1 个月更换 1 次溶液。每 30 次冻融循环后,使用北京康科瑞公司产 NM-4 B 非金属超声检测仪测定 RRC 的超声参数;试块测完参数后,使用上海三思纵横机械制造有限公司产 WAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机进行混凝土抗压强度实验,得出每个冻融阶段后 RRC 的抗压强度;最后,在压碎试块中取样,使用日立产 S-3400 N 型扫描电子显微镜进行

表 2 试验配合比
Table 2 Test mixture ratio

								kg/m ³
Mix	Notation	Water	Cement	Sand	Gravel	Rice-husk-ash	Rubber	Water reduce
C	NC	180	450	560	1 210	0	0	4
A0	5%R/NC	180	450	479.04	1 210	0	22.5	4
A1	5%RHA-5%R/NC	180	427.5	479.04	1 210	22.5	22.5	4
A2	10%RHA-5%R/NC	180	405	479.04	1 210	45	22.5	4
A3	15%RHA-5%R/NC	193.5	382.5	479.04	1 210	67.5	22.5	4
A4	20%RHA-5%R/NC	207	360	479.04	1 210	90	22.5	4
B0	10%R/NC	180	450	398.10	1 210	0	45	4
B1	5%RHA-10%R/NC	180	427.5	398.10	1 210	22.5	45	4
B2	10%RHA-10%R/NC	180	405	398.10	1 210	45	45	4
B3	15%RHA-10%R/NC	193.5	382.5	398.10	1 210	67.5	45	4
B4	20%RHA-10%R/NC	207	360	398.10	1 210	90	45	4

Notes: NC—Normal concrete; RHA—Rice-husk-ash concrete; R—Rubber; In *i*RHA-*j*R/NC, *i* represents the mass fraction of rice husk ash to cementitious material, *j* represents the mass ratio of rubber to cementitious material.

表 3 混凝土性能测试结果
Table 3 Test results of concrete performance

Mix	Slump/mm	28 days apparent density/(kg·m ^{−3})	28 days tensile strength/MPa	28 days compressive strength/MPa
C	172	2.476	4.21	46.68
A0	190	2.445	3.93	40.35
A1	185	2.435	4.32	47.43
A2	180	2.422	4.71	49.92
A3	187	2.356	4.08	41.02
A4	185	2.316	3.72	36.03
B0	210	2.397	3.11	33.15
B1	205	2.369	4.05	36.51
B2	195	2.348	4.22	40.26
B3	200	2.330	3.83	34.57
B4	198	2.302	3.41	26.55

SEM 电镜试验，完成对 RRC 冻融损伤后微观结构分析。

2 试验结果与分析

2.1 RRC 试块冻融损伤表现现象

混凝土随冻融循环次数的增加，表面侵蚀孔洞增加，四周边角钝化。以 10% 橡胶掺量的 RRC 为例，其不同冻融循环次数后的形貌如图 2 所示。

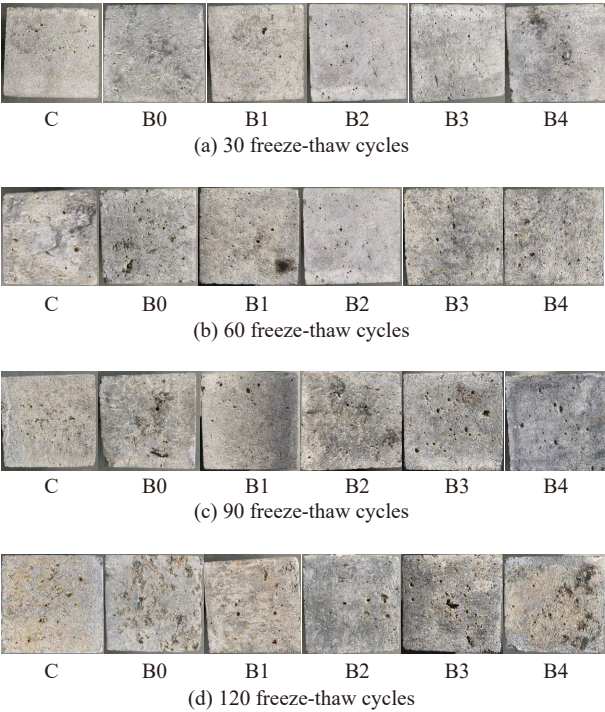


图 2 10% 橡胶掺量的稻壳灰橡胶混凝土 (RRC) 冻融循环表现现象
Fig. 2 Rice husk ash rubber concrete (RRC) freezing-thawing cycle appearance with 10% rubber content

如图 2(a)、图 2(b) 所示，经过 30 和 60 次冻融循环后的 RRC 表面平整且棱角分明，表面出现许多小的坑蚀，变化不明显。由图 2(c) 所示，90 次冻融循环后的 RRC 表面的坑蚀不仅较多，而且也较大，混凝土四周与棱角都出现了一定的损伤与缺失。由图 2(d) 所示，120 次冻融循环后，RRC 试块剥蚀严重、棱角钝化，甚至部分试块出现细骨料脱落，裸露出内部粗骨料。试验现象表明：随着冻融次数的增加，相同橡胶含量的 RRC 表面损伤将更加严重。与其他组相比，B2 组试样较完整，表面点蚀略有增加。

2.2 RRC 冻融循环后的质量损失

质量损失是一种可以在一定程度上衡量混凝土经过冻融循环后的宏观损伤指标。冻融循环后 RRC 试件的损失主要来自试块表面水泥砂浆的脱落，这是由于试块在冻融循环中持续不断的受到冻胀力作用，造成内部裂缝和表面水泥砂浆剥落。质量损失率和 RRC 冻融次数的关系如图 3 所示。可知，随冻融循环次数的增加，普通混凝土的质量损失明显高于 RRC 试件，且 10% 橡胶掺量的 RRC 的质量损失明显低于 5% 橡胶掺量的 RRC，这表明橡胶的高弹性缓解了混凝土内部裂缝的开裂，有效地提高了混凝土的抗冻融性能。在冻融后期，稻壳灰掺量为 10% 的 RRC 试块的质量损失最小。这是由于存在一定的稻壳灰，以改善混凝土中的颗粒级配，使混凝土更加致密，能够更好地抵抗冻融循环带来的损失。质量损失率计算公式如下：

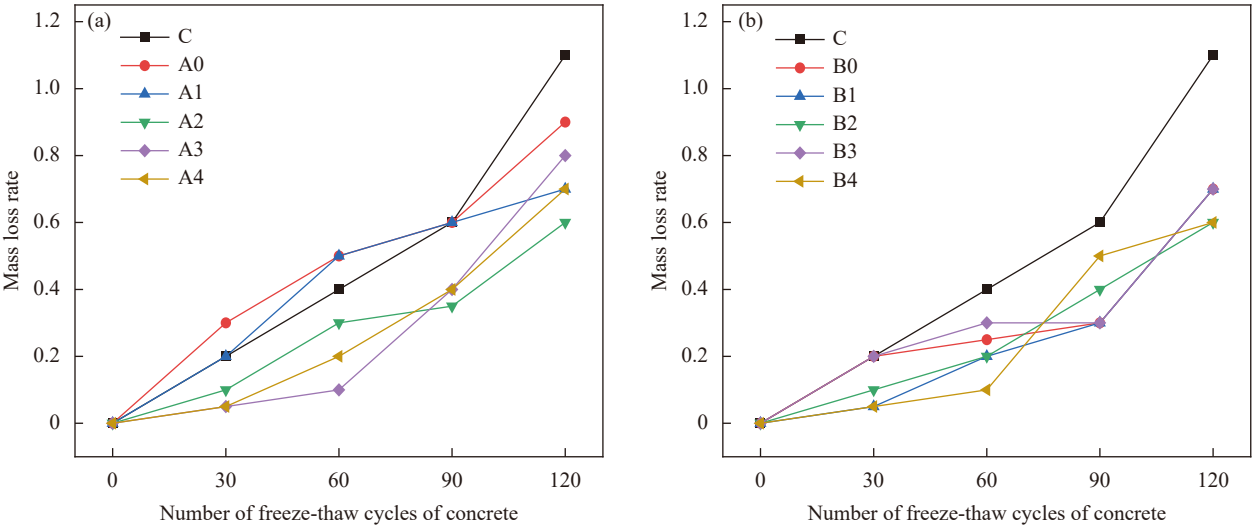


图 3 RRC 试块冻融循环次数与质量损失率的关系

Fig. 3 Relationship between freeze-thaw cycles and mass loss rate of RRC test block

$$\Delta W_m = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

其中： ΔW_m 表示质量损失率(%)； m_n 、 m_0 表示不同冻融循环次数后和未冻融时试件的质量(kg)。

2.3 RRC 相对动弹性模量

使用 NN-4 B 非金属超声检测分析仪测定 RRC 的相对波速等，计算试件的相对动弹性模量，计算公式如下：

$$E_d = \frac{E_{dt}}{E_{d0}} \times 100\% = \frac{T_0^2}{T_t^2} \times 100\% = \frac{V_t^2}{V_0^2} \times 100\% \tag{2}$$

其中： E_d 表示相对动弹性模量(%)； E_{dt} 、 E_{d0} 表示不同冻融循环次数后和未冻融时试件的动弹性模量(MPa)； T_t 、 T_0 表示不同冻融循环次数后和未冻融时试件的声时(s)； V_t 、 V_0 表示不同冻融循环

次数后和未冻融时试件的超声波波速(m/s)。

相对动弹性模量是一种可以良好反映混凝土内部损伤的参数，可以用来评价混凝土耐久性。RRC 试块冻融循环次数和相对动弹性模量的关系如图 4 所示。RRC 试块的相对动弹性模量总体随着冻融次数的增加而明显降低，在 60 次冻融循环内呈波动下降，60 次冻融循环后急速下降。此外，基准混凝土在冻融循环次数的后期，相对动弹模均小于 RRC 试块，且 10% 橡胶掺量的 RRC 试块的相对动弹性模均大于 5% 橡胶掺量的 RRC 试块，10% 的稻壳灰掺量的 RRC 试块相对动弹模最高，说明稻壳灰的掺入改善了混凝土内部结构，使结构更加致密，对混凝土抗冻融性能有明显的改善作用。

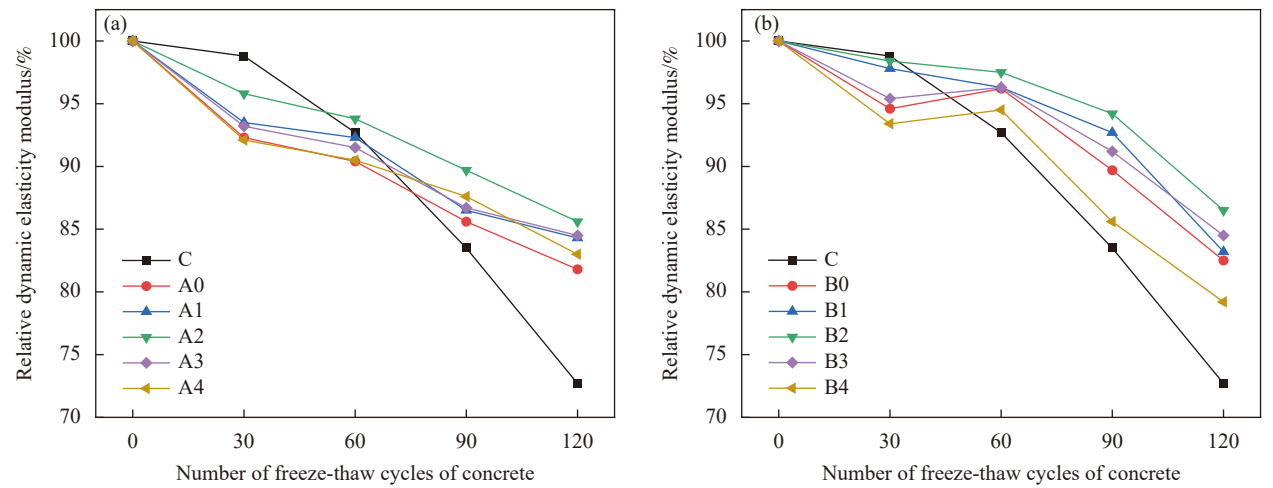


图 4 RRC 试块冻融循环次数与相对动弹性模量的关系

Fig. 4 Relationship between the number of freeze-thaw cycles and the relative dynamic elastic modulus of RRC test block

在 120 次冻融循环后，A2 的相对动弹性模量较普通混凝土提高了 12.9%，B2 较普通混凝土提高了 13.8%，橡胶的高弹性，缓冲了由于冻融循环带来的冻胀力^[30-31]，抑制了内部微裂纹的发展，使混凝土的内部损伤减少。结果表明，RRC 具有比 NC 更好的抗冻融性能，这与宏观质量损失的实验结果一致。

2.4 冻融循环后 RRC 抗压强度损失

相对抗压强度可以直观地反映出混凝土在经历冻融循环后抗压强度损失程度。计算公式如下：

$$K_f = \frac{f_t}{f_0} \times 100\% \tag{3}$$

其中： K_f 为相对抗压强度(%)； f_t 为经过 t 次冻融循环后的 RRC 抗压强度(MPa)； f_0 为未经过冻融循环前的抗压强度(MPa)。

RRC 试块冻融循环次数与相对抗压强度的关系如图 5 所示。可见，随着冻融循环次数的增加，RRC 试块的抗压强度总体呈下降趋势，这是由于试块遭受到持续不断的冻胀力，内部产生裂缝并逐步发展，加速了氯离子的侵入，最终导致表面水泥砂浆的脱落，内部结构破坏，强度大大降低。

从图 5 可以看出，橡胶掺量为 5% 的 RRC 中，A2 的抗冻融性能明显高于 A0、A1、A3 和 A4，其中稻壳灰掺量为 20% 的 A4 经冻融循环后的力学强度甚至略低于 RC，这是由于过多的稻壳灰掺入，吸收大量水分，以至于前期水泥水化反应不充分，降低了 RRC 力学性能。而在橡胶掺量为 10% 的 RRC 中，B1、B2、B3 和 B4 抗冻融性能均明显优于 RC，表明橡胶掺量越多，稻壳灰对 RRC 力学性能和抗冻融性能的改善效果越明显。

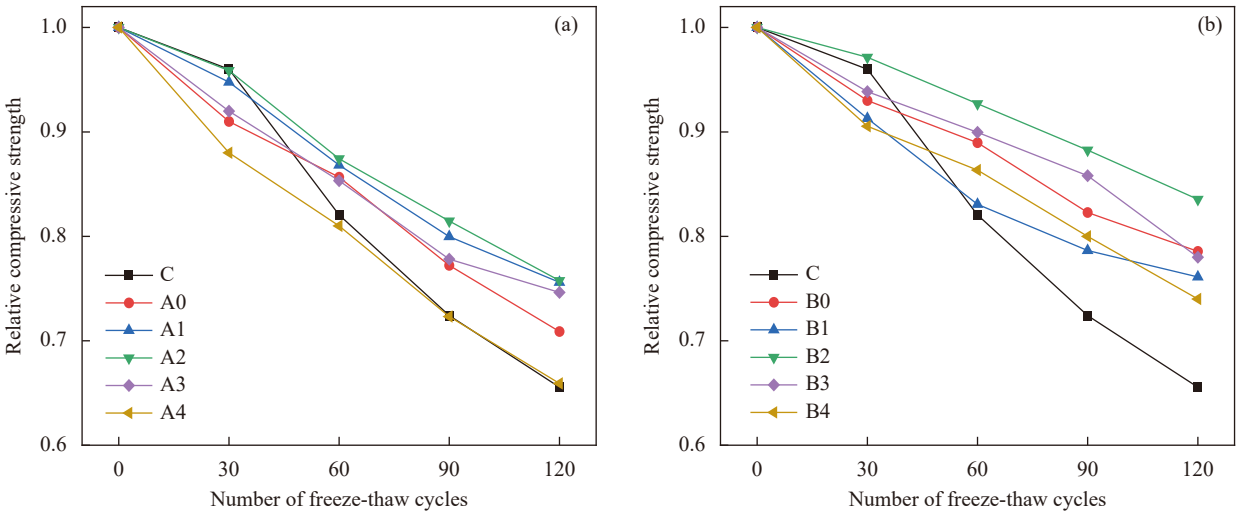
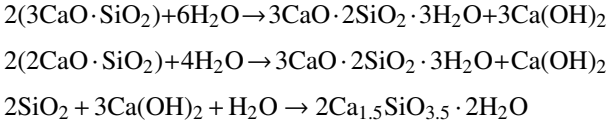


图5 RRC 试块冻融循环次数与相对抗压强度的关系

Fig. 5 Relationship between the number of freeze-thaw cycles and compressive strength of RRC test block

在整个循环过程中，RRC 试块的抗压强度损失总体是低于普通混凝土的，在 60 次冻融循环之前，RRC 试件较 C 的抗冻融性的改善不明显，而在冻融后期， K_f 得到了明显的提升，在 120 次冻融循环后，A0、A1、A2、A3、A4 的抗压强度损失较 C 分别提高了 0.05、0.1、0.1、0.09 和 0；B0、B1、B2、B3、B4 的抗压损失较 C 分别提高了 13%、10%、18%、12% 和 8%，以 10% 稻壳灰掺量的 RRC 抗压强度损失最少。这是由于橡胶与水泥砂浆界面处的空气群堵塞了毛细孔隙，降低氯离子扩散速度，提高混凝土密实度；稻壳灰的存在使混凝土内部孔隙得到了填充，优化了混凝土级配，使盐溶液进入孔隙的速度大大减小；且其中的

SiO_2 在水泥水化过程中与 Ca(OH)_2 反应得到大量 C-S-H 凝胶，聚合性增强，内部结构抗拉强度增强，不易被冻胀力胀坏，有效提高了混凝土的抗冻性，但在冻融后期，其对抗冻性的优化逐渐减弱，强度大大降低。主要反应式如下：



2.5 RRC 相对动弹模量和相对抗压强度的关系

相对动弹模量是表示混凝土内部损伤的参数，从一定程度上反应了混凝土强度的变化。选用合适的函数对相对动弹模和相对抗压强度进行拟合，见图 6，对应的拟合公式及参数见表 4。可知，各

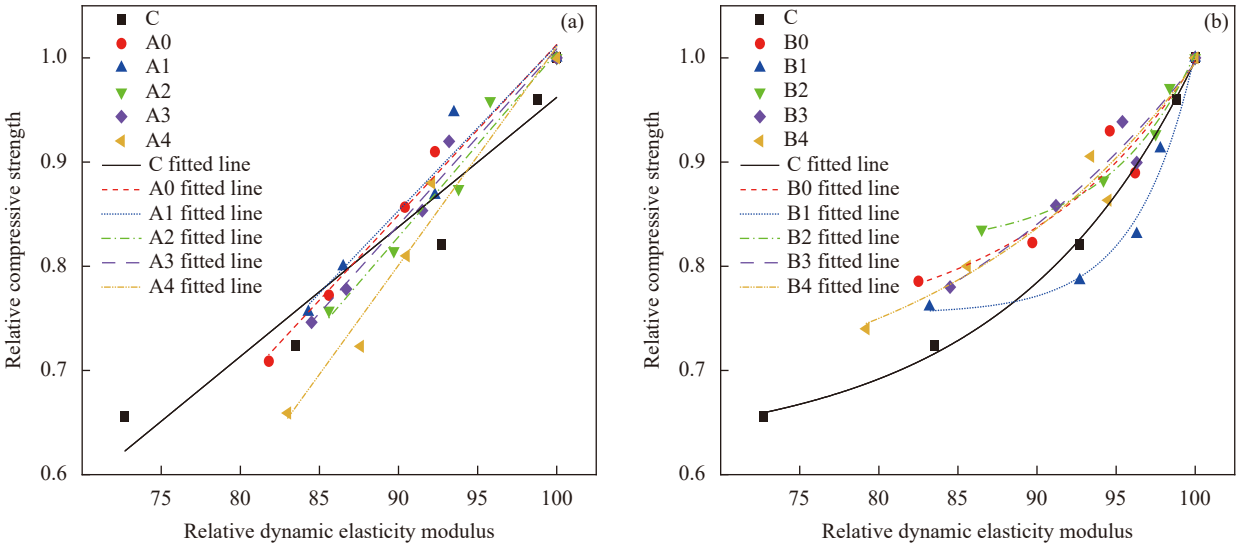


图6 RRC 试块冻融循环后相对弹性模量与相对抗压强度的拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between relative elastic modulus and compressive strength of RRC test block after freeze-thaw cycle

表 4 RRC 试块冻融循环后相对弹性模量 E_d 与相对抗压强度 F 的拟合结果

Concrete number	Fitting formula	Correlation coefficient R^2
C	$F = 9.208 \times 10^{-5} e^{0.0831 E_d} + 0.620$	0.99
A0	$F = -0.622 + 0.016 E_d$	0.98
A1	$F = -0.574 + 0.016 E_d$	0.95
A2	$F = -0.763 + 0.018 E_d$	0.97
A3	$F = -0.682 + 0.017 E_d$	0.98
A4	$F = -1.085 + 0.021 E_d$	0.97
B0	$F = 3.885 \times 10^{-5} e^{0.089 E_d} + 0.725$	0.92
B1	$F = 4.886 \times 10^{-13} e^{0.270 E_d} + 0.755$	0.98
B2	$F = 2.865 \times 10^{-9} e^{0.180 E_d} + 0.818$	0.98
B3	$F = 3.670 \times 10^{-3} e^{0.047 E_d} + 0.584$	0.95
B4	$F = 8.276 \times 10^{-4} e^{0.0605 E_d} + 0.646$	0.95

组拟合相关系数 R^2 均大于 0.9, 拟合结果较好, 表明 RRC 的相对动弹性模量能够较好的反映强度的变化情况。

2.6 冻融循环后 RRC 微观结构特征

B2 组试件在经历 0、60、90 和 120 次冻融循环后的 SEM 图像如图 7 所示。如图 7(a) 所示, 橡胶颗粒的掺入, 导致混凝土拌合时引入气泡, 内部出现少数微小孔洞。如图 7(b) 所示, 大量的水化产物和粒径较小的稻壳灰填充孔隙, 提高密实度, 减小冻胀力带来的损伤。稻壳灰中含有的大量高活性的 SiO_2 , 在 NaCl 溶液中, 促进水化反应过程, 生成大量凝胶填充混凝土内部孔隙。如图 7(c)、图 7(d) 所示, 在氯盐环境下, 混凝土内部产生较大结冰压^[30], 加剧了冻融循环破坏进程, 结构变得疏松, 可以看出, 孔洞和裂缝数量增加, 内部结构进一步受损, 宏观表现为抗压强度进一

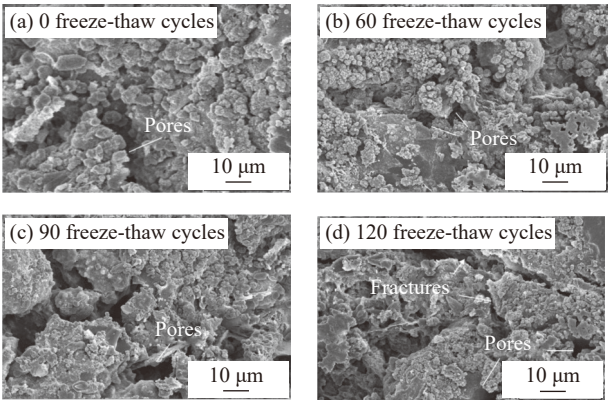
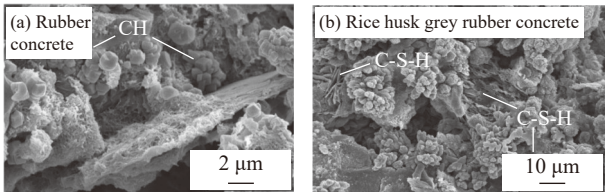


图 7 B2 组 RRC 冻融循环微观形貌

Fig. 7 Microstructure of freeze-thaw cycle of B2 group RRC

步降低。

图 8 为橡胶混凝土 B0 组和稻壳灰橡胶混凝土 B2 组 120 次冻融循环 SEM 图像。从图 8(a) 可知, 普通混凝土内部孔隙和裂缝较多, 存在着较多的块状氢氧化钙 (CH)。图 8(b) 可见, 稻壳灰橡胶混凝土中已基本观察不出由于水泥水化形成的 CH 的存在, 其与稻壳灰中的无定形二氧化硅发生火山灰反应形成 C-S-H 凝胶, 填充孔隙和裂缝, 提高内部密实度, 缓解冻胀力带来的损伤, 有效改善了 RRC 的力学性能和抗冻融性能。



CH—Calcium hydroxide; C-S-H—Calcium silicate hydrate

图 8 120 次冻融循环后 B0 组 RC 和 B2 组 RRC 的微观形貌

Fig. 8 Microstructure of B0 group RC and B2 group RRC after 120 freeze-thaw cycles

与普通混凝土相比, 稻壳灰橡胶混凝土内部存在许多有害孔隙。120 次冻融循环后 B2 组 RRC 的微观形貌如图 9 所示, 由于橡胶的疏水性, 无法与水泥基复合材料有效结合, 界面过渡区孔隙和裂纹明显, 导致吸水率增加, 强度降低。在经过 120 次的冻融循环后, 混凝土内部变得疏松多孔, 裂缝进一步扩展, 界面过渡区缺陷更加凸显, 加速混凝土试件的破坏。

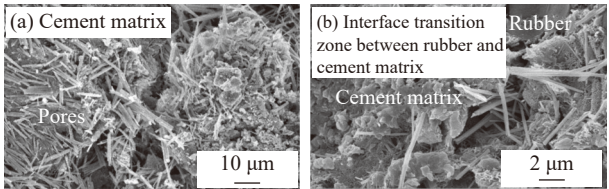


图 9 120 次冻融循环后 B2 组 RRC 的微观形貌

Fig. 9 Microstructure of B2 group RRC after 120 freeze-thaw cycles

3 结论

基于对普通混凝土 (Normal concrete, NC)、橡胶混凝土 (Rubber concrete, RC) 和稻壳灰橡胶混凝土 (Rice husk ash rubber concrete, RRC) 120 次冻融循环的表观分析、力学性能、动弹性模量和内部微观形貌等实验测试结果对比分析, 得出主要结论如下:

(1) 在混凝土中加入适量的稻壳灰和橡胶, 表

观密度略有降低,拌合物工作性能有所下降,但力学性能得到显著提升,以稻壳灰掺量占水泥用量 10% 为最佳,橡胶掺量(与胶凝材料质量比)为 5% 时, RRC 较橡胶混凝土抗压强度提高 24%,较普通混凝土提高 6.9%;橡胶掺量为 10% 时, RRC 较橡胶混凝土抗压强度提高 21%;

(2) 随冻融循环次数增加, RRC 表面损伤、质量损失随之严重,其相对动弹性模量和抗压强度的劣化程度较 NC 得到显著优化,说明稻壳灰和橡胶的掺入有效提高混凝土的抗冻融性能。其中以 10% 稻壳灰掺量、10% 橡胶掺量的 RRC 抗冻融性能最佳,在 120 次冻融循环后,其较普通混凝土抗压强度损失降低了 18%;

(3) 采用相对动弹性模量评判混凝土冻融循环后性能劣化情况,随冻融循环次数增加,相对动弹性模量整体呈降低趋势,抗压强度随之降低,回归公式拟合度较优,表明可用相对弹性模量评估 RRC 冻融循环的劣化程度;

(4) 冻融循环前,稻壳灰填充混凝土内部细小孔洞,提高混凝土密实度,有效提高混凝土早期力学性能。氯盐侵蚀和冻融循环的双重作用改变了 RRC 试件的内部微观形貌,随着冻融次数的增加,橡胶与水泥基体的粘结力减弱,内部孔隙逐步增加,裂缝贯通,导致强度降低。

参考文献:

- [1] SALAS A, DELVASTO S, RMD GUTIERREZ, et al. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete[J]. *Cement & Concrete Research*, 2009, 39(9): 773-778.
- [2] 胡云珍, 刘凤侠. 稻壳灰在水泥混凝土中的综合应用研究[J]. *材料导报*, 2014, 28(S1): 348-350, 357.
HU Yunzhen, LIU Fengxia. Comprehensive application of rice husk ash in cement concrete[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(S1): 348-350, 357(in Chinese).
- [3] 汪知文, 李碧雄. 稻壳灰应用于水泥混凝土的研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(9): 9003-9011.
WANG Zhiwen, LI Bixiong. Research progress on application of rice husk ash in cement concrete[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(9): 9003-9011(in Chinese).
- [4] 王茹, 王高勇, 张韬, 等. 稻壳灰在丁苯聚合物/水泥复合胶凝材料凝结硬化过程中的作用[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(335): 190-195.
WANG Ru, WANG Gaoyong, ZHANG Tao, et al. The role of rice husk ash in the setting and hardening process of styrene-butadiene polymer/cement composite cementitious materials[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(335): 190-195(in Chinese).
- [5] 胡维新, 黄伟, 秦鸿根. 硅藻土、超细稻壳灰、硅灰对双重多孔混凝土性能的影响[J]. *工业建筑*, 2014, 44(10): 113-116.
HU Weixin, HUANG Wei, QIN Honggen. Effect of diatomite, superfine rice husk ash and silica fume on properties of double porous concrete[J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(10): 113-116(in Chinese).
- [6] 叶光, NGUYEN V T. 稻壳灰抑制超高性能混凝土的自收缩机理分析(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(2): 212-216.
YE Guang, NGUYEN V T. Analysis of self-shrinkage mechanism of super high performance concrete inhibited by rice husk ash[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 40(2): 212-216(in Chinese).
- [7] 欧阳东, 陈楷. 低温焚烧稻壳灰的显微结构及其化学活性[J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31(11): 1121-1124.
OUYANG Dong, CHEN Kai. Microstructure and chemical activity of rice husk ash burned at low temperature[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(11): 1121-1124(in Chinese).
- [8] 冯庆革, 杨绿峰, 陈正, 等. 高活性稻壳灰混凝土的强度特性和孔结构研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2005(2): 17-20.
FENG Qingge, YANG Lvfang, CHEN Zheng, et al. Study on strength and pore structure of high activity rice husk gray concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005(2): 17-20(in Chinese).
- [9] ZHANG M H, LASTRA R, MALHOTRA V M. Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 1996, 26(6): 963-977.
- [10] FARIED A, SERAG. The effect of using nano rice husk ash of different burning degrees on ultra-high-performance concrete properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290: 123279.
- [11] 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. Effect of rubber aggregate on properties of polymer modified porous concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(4): 509-514(in Chinese).
- [12] 刘艳荣, 葛树奎, 韩瑜. 废旧轮胎橡胶粉改性水泥基材料研究概况[J]. *材料导报*, 2014, 28(24): 422-426.
LIU Yanrong, GE Shukui, HAN Yu. Research progress of scrap rubber powder modified cement-based composites[J]. *Materials Reports*, 2014, 28(24): 422-426(in Chinese).
- [13] 庞建勇, 陈宇, 黄鑫, 等. 高应力等幅循环加载对橡胶混凝土力学及表现特性的影响[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10): 142-148.
PANG Jianyong, CHEN Yu, HUANG Xin, et al. Impact of equal-amplitude cyclic high stress loading on mechanical and deformation properties of rubber concrete[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020,

- 37(10): 142-148(in Chinese).
- [14] 张亚梅, 赵志远, 陈胜霞, 等. 橡胶粉对混凝土在水和NaCl溶液中抗冻性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(S2): 248-252.
- ZHANG Yamei, ZHAO Zhiyuan, CHEN Shengxia, et al. Impact of rubber powder of frost resistance of concrete in water and NaCl solution[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(S2): 248-252(in Chinese).
- [15] 徐金花, 冯夏庭, 陈四利. 橡胶集料对混凝土抗冻性的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 895-898.
- XU Jinhua, FENG Xiating, CHEN Sili. Effects of rubber aggregate on the frost resistance of concrete[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(6): 895-898(in Chinese).
- [16] 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 of performance of rubberized concrete incorporated with polymer[J]. China Journal of Highway Transport, 2010, 23(4): 15-19(in Chinese).
- [17] 吴鹏程, 杨全兵, 徐俊辉, 等. 低危害除冰盐对水泥混凝土盐冻破坏的影响及其机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 317-321, 327.
- WU Pengcheng, YANG Quanbing, XU Junhui, et al. Effects of a low-harm deicing salt on the salt-frost scaling of concrete and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 317-321, 327(in Chinese).
- [18] ZHU R N, PANG J Y, WANG T Y, et al. Experimental research on chloride erosion resistance of rubber concrete[J]. Advance in Civil Engineering, 2020: 3972405.
- [19] ZHU X B, MIAO C W, LIA J P, et al. Influence of crumb rubber on frost resistance of concrete and effect mechanism[J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 206-213.
- [20] 姚韦靖, 刘雨珊, 王婷雅, 等. 橡胶/混凝土盐冻循环后性能劣化及微观结构[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4294-4304.
- YAO Weijing, LIU Yushan, WANG Tingya, et al. Performance degradation and microstructure of rubber/concrete after salt freezing cycle[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12): 4294-4304(in Chinese).
- [21] ZHANG B F, FENG Y, XIE J H, et al. Rubberized geopolymer concrete: Dependence of mechanical properties and freeze-thaw resistance on replacement ratio of crumb rubber[J]. Construction and Building Materials, 2021, 310: 125248.
- [22] CHEOLWOO P, ANDRES S, CHUL-WOO C, et al. Freeze-thaw resistance of concrete using acid-leached rice husk ash[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(4): 1133-1139.
- [23] 冯庆革, 杨义, 童张法, 等. 掺高活性稻壳灰混凝土的抗冻融特性(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2008(237): 136-139.
- FENG Qingge, YANG Yi, TONG Zhangfa, et al. Freeze-thaw resistance of concrete with high activity rice husk ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008(237): 136-139(in Chinese).
- [24] 姚韦靖, 庞建勇. 玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2932-2941.
- YAO Weijing, PANG Jianyong. Performance degradation and microscopic structure of glazed hollow bead insulation normal concrete after exposure to high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2932-2941(in Chinese).
- [25] HONG C R. Effect of steel plates on estimation of the compressive strength of concrete via ultrasonic testing[J]. Materials, 2020, 13(4): 887.
- [26] 全国水泥制品标准化技术委员会. 高强高性能混凝土用矿物外加剂: GB/T 18736—2017[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017.
- National Technical Committee for Standardization of Cement Products. Mineral admixtures for high strength and high performance concrete: GB/T 18736—2017[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration, 2017(in Chinese).
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architectural & Building Press, 2011(in Chinese).
- [28] 严捍东, 陈秀峰. 橡胶集料及其对水泥基材料物理力学性能的影响[J]. 材料导报, 2007, 21(11): 104-106, 114.
- YAN Handong, CHEN Xiufeng. Review of rubber aggregate and its effects on physical and mechanical properties of cement based materials[J]. Materials Reports, 2007, 21(11): 104-106, 114(in Chinese).
- [29] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(Ⅱ): 冻融饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 741-746.
- YANG Quanbing. One of mechanisms on the deicer-frost scaling of concrete (Ⅱ): Degree of saturation and ice-formation pressure during freezing-thawing cycles[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 741-746(in Chinese).
- [30] 杨全兵. NaCl溶液结冰压的影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2005(5): 495-498.
- YANG Quanbing. Study on influence factors of ice pressure in NaCl solution[J]. Journal of Building Materials, 2005(5): 495-498(in Chinese).
- [31] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(Ⅰ)—毛细管饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 522-527.
- YANG Quanbing. Mechanisms of deicer frost scaling of concrete (Ⅰ)—Capillary-uptake degree of saturation and ice-formation pressure[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5): 522-527(in Chinese).