**文章编号:**1007-9629(2022)11-1210-09

# 基于结晶劈裂作用的再生粗骨料冻融改性方法

弓扶元\*, 支 点, 吴庆培, 赵羽习 (浙江大学建筑工程学院,浙江杭州 310058)

摘要:利用多孔水泥基材料在冻融循环中的孔隙水结晶劈裂原理,开展了不同工况下再生粗骨料的 冻融改性试验,以部分或全部去除再生粗骨料表面附着的旧砂浆.结果表明:冻融最低温度越低,附 着砂浆的剥除速率越快;经过一定次数的冻融循环后,附着砂浆几乎全部剥离,且改性后的再生粗骨 料各项物理力学性能接近天然骨料;高温干燥预处理对后续冻融改性有较好的促进作用.最后,基于 孔隙水相变的热力学原理以及冻胀开裂的孔隙介质力学机理,对再生粗骨料的冻融改性进行了理论 分析,构建了再生粗骨料细观模型,从细观尺度解释了附着砂浆冻胀开裂及剥离的全过程.

**关键词:**再生粗骨料;冻融改性;结晶劈裂;孔隙介质力学;细观模拟 **中图分类号:**TU528.01 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.015

# A Freezing-Thawing Modification Method for Recycled Coarse Aggregate Based on Crystallization Fracture of Pores

GONG Fuyuan<sup>\*</sup>, ZHI Dian, WU Qingpei, ZHAO Yuxi

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Based on the crystallization fracture principle of ice forms in porous cement-based materials and initiates cracking during freezing-thawing cycles, freezing-thawing modification experiments of recycled coarse aggregate under different working conditions were carried out to remove part or all of the attached old mortar. The results show that the lower of the minimum freezing-thawing temperature is, the faster of the peeling of the attached mortar is. After a certain number of freezing-thawing cycles, the attached mortar is almost completely peeled off. Besides, the physical and mechanical properties of the modified recycled coarse aggregate are close to those of natural aggregate. In addition, the high temperature drying treatment before freezing-thawing cycles improves the efficiency of the method. Finally, based on thermodynamics and poromechanics principles, the process of freezing and cracking to remove the attached mortar is analyzed and simulated in a mesoscopic model.

**Key words:** recycled coarse aggregate; freezing-thawing modification; crystallization fracture; poromechanics; mesoscale modeling

使用建筑固废制备再生混凝土是建筑垃圾资源 化利用的重要方面.然而,采用未经特殊处理的再生 混凝土骨料(RCA)浇筑的再生混凝土往往在施工性 能、力学性能和耐久性等方面劣于普通天然骨料混 凝土.再生混凝土劣于天然骨料混凝土的原因之一 在于其骨料表面附着有旧砂浆,使孔隙率增大,从而 导致再生骨料的物理力学性能低于天然骨料,对再 生混凝土的力学性能和耐久性等均有不利的影响<sup>[14]</sup>. 为了改善再生混凝土的各项性能,需要对再生混凝 土骨料进行改性处理.目前,常用的骨料改性方法主 要可以分为附着老砂浆强化<sup>[5-7]</sup>、界面强化<sup>[6,8]</sup>和去除 附着老砂浆<sup>[5,9-10]</sup>3类.其中,去除再生混凝土骨料上 附着的旧砂浆是改善再生粗骨料性能最直接有效的 方法.然而,当前去除附着砂浆的方法主要是研磨、

收稿日期:2022-05-05;修订日期:2022-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008367);浙江省自然科学基金资助项目(LQ20E080016)

第一作者(通讯作者):弓扶元(1988—),男,陕西西安人,浙江大学研究员,博士生导师,博士.E-mail:gongfy@zju.edu.cn

超声波清洗等物理方法以及利用酸腐蚀的化学方 法,这些方法或引入微裂缝,或增加有害离子浓度, 均会对骨料造成明显的损伤.

基于多孔水泥基材料在冻融循环中的孔隙水结 晶劈裂原理,本文提出纯水冻融循环改性工艺,并引 入高温干燥处理再生混凝土骨料以达到最优、高效 的工艺流程,在试验的基础上,根据孔隙水相变的热 力学原理以及冻胀开裂的孔隙介质力学机理,从理 论角度对再生混凝土骨料的冻融改性过程进行分 析,并构建再生混凝土骨料细观模型,以期从细观尺 度解释附着砂浆冻胀开裂及剥离的全过程.

#### 试验材料与方法 1

### 1.1 试验材料

再生混凝土骨料来自于建筑固废处理厂.对再 生混凝土骨料进行筛分,剔除小于10.0 mm和大于 37.5 mm的颗粒.将再生混凝土骨料按照不同粒径由 小到大以5%、15%、40%、25%和15%的质量比进 行重新组合,得到每组质量约为1.5 kg的再生混凝土 骨料试样(见图1).



(a) 10.0-16.0 mm

(b) 16.0-19.0 mm

图1 不同粒径的再生混凝土骨料

Fig. 1 Recycled concrete aggregates of different particle sizes

#### 1.2 冻融改性装置

冻融改性试验采用HC-HDK型混凝土快速冻 融试验机进行,试件筒尺寸为110 mm×110 mm×

500 mm.在试验过程中,温度传感器被放置在骨料的 中心,以确保精确可靠的温度控制.再生混凝土骨料 试样及温度传感器布置如图2所示.



图 2 再生混凝土骨料试样及温度传感器布置 Fig. 2 Recycled concrete aggregate sample and temperature sensor distribution

### 1.3 冻融改性工艺参数设置

为了研究冻融循环最低温度(t)对附着砂浆剥落效 果的影响,设置了2种温度历程.两者的最高温度均设 置为15℃,最低温度分别设置为一10、一20℃,冻融循 环过程中试样中心的温度变化如图3所示.

本文采用80、200℃2种高温干燥工艺对再生混 凝土骨料进行处理.在冻融循环开始前,将再生混凝 土骨料分别置于80、200℃的环境中进行高温干燥处 理,控制两者加热速率一致,高温干燥持续时间为72h, 而后自然冷却至室温.

高温干燥方案:(1)冻融改性前对再生混凝土骨 料分别进行高温干燥1次80℃或200℃的处理.(2)在 冻融改性前对再生混凝土骨料进行1次200℃高温干 燥,随后在第10个冻融循环结束后对再生混凝土骨 料进行二次200℃高温干燥处理.同时,探究不同含 水状态再生混凝土骨料在高温干燥中的劣化效果.





在本试验中,每经过5个冻融循环后,将每组试样的一半取出,对其进行机械振捣处理.振筛机的电机 功率0.75 kW,振动频率221次/min,每次持续约10 s.

最后,综合考虑冻融循环最低温度、骨料含水状态、高温干燥工艺、机械振捣等控制参数的各组试样 名称及其处理工艺如表1所示.

# 2 结果与分析

再生混凝土骨料吸水率和砂浆剥落率随冻融循 环次数(N)的变化如图4所示.由图4可见:

(1)随着冻融循环次数的增加,各组再生混凝土骨料试样的吸水率呈下降趋势,附着砂浆的剥落率则呈上升趋势,两者共同反映了随着附着砂浆的脱落,再生混凝土骨料逐渐接近天然骨料的过程.在前10个冻融循环内,再生混凝土骨料的吸水率略有上升,原因可能是大量附着砂浆尚未剥落而内部损伤逐渐累积,导致试样的孔隙率增大,吸水率增加.在经过10个冻融循环后,再生混凝土骨料的吸水率迅速降低.-20℃冻

融条件下的附着砂浆剥落速率显著高于-10℃冻融条件下的剥落速率.经过40个冻融循环后,-10℃冻融 条件下再生混凝土骨料的吸水率由7.31%下降到 5.75%,-20℃条件下再生混凝土骨料的吸水率则下 降到3.21%;附着砂浆剥落率从-10℃时的31.16% 增加到-20℃时的51.81%,附着砂浆基本剥落完全.

(2)经过高温干燥处理的再生混凝土骨料吸水率降 低速率和砂浆剥落速率均比未进行高温干燥处理的再 生混凝土骨料更快.主要原因可能是在高温干燥过程中 存在由于材料热胀系数差异引起的温度应力,导致附着 砂浆和界面过渡区(ITZ)中可能会出现微裂缝<sup>[11]</sup>.在冻 融循环过程中,这些微裂缝会进一步被水填充,并在下 一次冻结时产生更多的结冰量和更大的冻胀力.同时, 由于高温的影响,水泥基材料的黏结性能会有一定程度 的降低,使孔壁破裂所需的冻结力减小<sup>[12]</sup>.随着微裂纹的 增加和黏结力的减小,在冻融循环过程中ITZ更容易被 破坏,从而加速了附着砂浆的剥落.然而,从试验结果可 以知道,200℃处理后的再生混凝土骨料在冻融循环中 的损伤程度比80℃处理再生混凝土骨料的损伤程度仅 仅是略微提高.此外,经过2次高温干燥处理试样的冻融 改性效果比仅进行1次高温干燥处理的再生混凝土骨料 更好.本试验中,再生混凝土骨料在高温干燥前的含水 程度对高温干燥的损伤程度并没有显著的影响,因此其 相应试样的冻融改性效果没有明显区别.

经过机械振捣处理的再生混凝土骨料吸水率在 冻融改性过程中下降更快,砂浆剥落程度更高.这 主要是因为机械振捣进一步加剧了仍附着在天然骨 料上的老砂浆以及ITZ的内部损伤,使得附着砂浆 在随后的冻融循环中更容易被冻结力剥落.随着冻 融循环次数的增加,附着砂浆被完全剥落,从而从再 生混凝土骨料中回收得到天然骨料,如图5所示.

表1 各组试样处理工艺 Table 1 Treatment process of each group of materials

Sample ID	t/°C	Drying method	Saturation of recycled aggregate before drying	Vibrating				
$\mathrm{NHD}_{20}$	-20	Non		Non				
$\mathrm{NHD}_{20}$ -V	-20	Non		Vibrating				
HD <sub>10</sub> -N <sub>80</sub> -1	-10	1 times at 80 °C	Natural dry	Non				
$HD_{10}$ - $N_{80}$ -1- $V$	-10	1 times at 80 $^\circ\!\!\mathrm{C}$	Natural dry	Vibrating				
HD <sub>20</sub> -N <sub>80</sub> -1	-20	1 times at 80 °C	Natural dry	Non				
$HD_{20}-N_{80}-1-V$	-20	1 times at 80 °C	Natural dry	Vibrating				
HD <sub>20</sub> -S <sub>80</sub> -1	-20	1 times at 80 °C	Saturated	Non				
HD <sub>20</sub> -S <sub>80</sub> -1-V	-20	1 times at 80 °C	Saturated	Vibrating				
HD <sub>20</sub> -S <sub>200</sub> -1	-20	1 times at 200 $^\circ\!\!\mathbb{C}$	Saturated	Non				
$HD_{20}$ - $S_{200}$ -1-V	-20	1 times at 200 $^\circ\!\!\mathbb{C}$	Saturated	Vibrating				
HD <sub>20</sub> -S <sub>200</sub> -2	-20	2 times at 200 $^\circ\!\!\mathbb{C}$	Saturated	Non				
HD <sub>20</sub> -S <sub>200</sub> -2-V	-20	2 times at 200 °C	Saturated	Vibrating				







 (a) Before freezing-thawing cycle
 (b) After freezing-thawing cycle
 (c) Attached mortar

 图 5 冻融改性试验前后的再生骨料和剥落附着砂浆



图 6 为冻融改性再生骨料附着砂浆完全剥落后的压碎指标及吸水率.由图 6 可见:经过冻融改性处理后,改性再生骨料的附着砂浆被完全去除,相较于再生混凝土骨料,改性再生骨料的吸水率和压碎指标值更低,达到了天然骨料的水平,拥有更好的抵抗压碎的能力.

# 3 孔隙水结晶劈裂机理

#### 3.1 结冰冻胀压力

在冻融循环的降温过程中,孔隙水经历了液态 到固态的相变,产生体积膨胀,并在此过程中产生了 孔隙压力.根据热力学平衡原理<sup>[13]</sup>,不同半径的孔隙 中水的冰点不同,某一半径(r<sub>0</sub>)的孔中水的结冰温度 可以根据式(1)进行计算.

$$r_{0} = -\frac{2\gamma_{\rm CL}}{T_{0}\Delta S_{\rm fv}} + \delta \tag{1}$$

式中: $\gamma_{CL} \approx 0.04 \text{ J/m}^2$ ,是晶体与液体界面的比能; $\Delta S_{fv} \approx 1.2 \text{ J/(cm}^3 \cdot \text{K})$ ,是摩尔熔融熵; $T_0$ 是结冰温度,K; $\delta \approx 0.9 \text{ nm}$ ,是冰晶体和孔壁之间的液态薄膜厚度<sup>[13]</sup>.

根据热力学原理,考虑其中最重要的静水压力 (*p*<sub>h</sub>)、渗透压力(*p*<sub>l</sub>)和结晶压力(*p*<sub>c</sub>)这3种孔隙压力,







分别进行量化计算,如式(2)~(4)所示<sup>[14]</sup>.

$$p_{\rm h} = \frac{0.09\varphi_{\rm C}}{\psi_{\rm C}/K_{\rm C} + \psi_{\rm L}/K_{\rm L}} f(S_{\rm r}, \phi_{\rm air}, k_0, \varepsilon_{\rm p}, \cdots) \quad (2)$$

$$p_{\rm L} = \phi_{\rm L} \Delta S_{\rm fv} \Delta T \tag{3}$$

$$p_{\rm c} = -\psi_{\rm C} (1 - \lambda) \Delta S_{\rm fv} \Delta T \tag{4}$$

式中: $K_{c}$ ( $\approx$ 8.8 GPa)和 $K_{L}$ ( $\approx$ 2.2 GPa)分别是冰和 水的体积模量; $\phi_{c}$ 和 $\phi_{L}$ 分别是结冰孔和含水孔的体 积分数;0 $\leq f(S_r, \phi_{air}, k_0, \epsilon_p, \cdots) \leq 1$ 是考虑多因素影响的折减系数; $\lambda$ 是孔隙形状因子<sup>[15]</sup>,可以被回归为 $\lambda = -0.0095T + 0.125^{[14]}; \Delta T \leq 0$ °C.

根据 Powers 的气泡间距模型<sup>[16]</sup>,只有小间距的 小气泡在抗冻中起作用,通过 X 射线计算机断层扫 描(XCT)试验,发现这些气泡大约只占气泡总体积 的10%<sup>[17]</sup>.假定10%的气泡全部发挥作用,并且混凝 土不发生塑性变形(细观裂缝)的情况下,静水压力 可以简化为式(5).

 $p_{\rm h} = \frac{0.09 \psi_{\rm C} - (1 - S_{\rm r}) - 0.1 \phi_{\rm air}/f_{\rm cem}}{\psi_{\rm C}/K_{\rm C} + \psi_{\rm L}/K_{\rm L}}, \quad p_{\rm h} \ge 0 \ (5)$ 

式中:fcm是砂浆中水泥净浆的体积分数.

最后,根据孔隙力学理论,孔隙压力平均施加于 材料的整体骨架上<sup>[18]</sup>,如式(6)所示.

$$\sigma_0 = b\rho \tag{6}$$

式中: $\sigma_0$ 是骨架发生变形前产生的孔隙压力(最大 孔隙压力),随着骨架膨胀变形,孔隙压力逐渐被释 放;b是 Biot 系数<sup>[19]</sup>,可以用砂浆的总孔隙率 $\phi$ (=  $f_{cem}V(\infty)$ )表示为 $b=2\phi/(1+\phi)^{[15]};p=p_h+p_c+p_1$ , 是总孔隙压力.

#### 3.2 冻胀细观力学本构

孔隙水结冰的应力-应变关系如图7所示.由 图7可见,冰的体积增长具有简单的线性特性, $\epsilon_m$ 为冰自由膨胀达到最大值时的应变,此时冰的冻结 应力已经完全释放.多孔材料孔隙的应力-应变关 系是通过在刚体弹簧模型(RBSM)中法向弹簧的 修正来实现的.在冻结过程中,当冰和孔隙骨架达 到平衡时,冻结应力也随之降低到 $\sigma_w$ ,孔隙骨架的 应变则上升到 $\epsilon_{ta}$ 考虑冰融化后孔隙骨架的收缩行 为,在再次结冰的再加载过程中,为了方便计算,通 过引入压缩应变 $\epsilon_{pa}$ 进行考虑,残余应变则保持为  $\epsilon_{pt}$ 从而得到结冰过程中达到平衡时孔隙骨架的变 形计算公式(7).

$$0.09\phi\psi_{\rm C} = \left(\frac{\phi\psi_{\rm C}}{K_{\rm C}} + \frac{\phi\psi_{\rm L}}{K_{\rm L}}\right)\frac{\sigma_{\rm w}}{b} + 3\varepsilon_x \qquad (7)$$

现实情况下材料多处于水环境中,即在冻融循

环中有充足的水分补给,可以填满孔隙和产生的裂缝(见图8).考虑到这一点,对式(7)进一步修改为:

$$0.09\phi\psi_{\rm C} + 1.09\alpha\varepsilon_{\rm pf} = \left(\frac{\phi\psi_{\rm C}}{K_{\rm C}} + \frac{\phi\psi_{\rm L}}{K_{\rm L}}\right)\frac{\sigma_{\rm w}}{b} + 3\varepsilon_x \qquad (8)$$

式中: α 是裂缝完全饱和的可能性,即随着冻融过程 中水分的不断补充,每次循环中可结冰孔隙水增加 的概率.冻融应变损伤积累的过程,即为裂缝产生和 发展的过程,在此过程中,旧砂浆与骨料之间的黏结 力逐渐减小,直至剥离.

## 4 冻融改性细观分析

#### 4.1 再生粗骨料细观模型

RBSM 是一种离散数值分析方法.与其他离散 数值方法相比,RBSM 的优点在于对静态和小变形 问题的模拟,例如混凝土材料的开裂<sup>[20-23]</sup>.这个概念 最早是由Kawai在1977年提出的,而后Nagai等<sup>[22]</sup>引 入砂浆单元、骨料单元和砂浆与骨料之间的界面过 渡区,建立了一种用于混凝土的二维细观 RBSM 模 型.在细观尺度的 RBSM 中(见图9),模型被分解为 按 Voronoi 图随机排列的多面体元素,以确保裂纹可 以随机地在任意方向上产生<sup>[20-23]</sup>.2个相邻的单元通 过1对法向弹簧和剪切弹簧连接,每个单元在重心处 都有 2个平移自由度和1个旋转自由度.

砂浆抗压强度、抗拉强度和弹性模量以及ITZ 的抗拉强度等宏观材料特性根据已有研究确定. Nagai等<sup>[22]</sup>根据给定水灰比确定了其余参数,如式 (9)所示.

$$f_{\rm ti} = -1.44 m_{\rm w} / m_{\rm c} + 2.3$$
  

$$E_{\rm m} = 1.000 (7.7 \ln f_{\rm cm} - 5.5)$$
  

$$f_{\rm tp} = 1.4 \ln f_{\rm cm} - 1.5$$
  

$$m_{\rm c} / m_{\rm w} = 0.047 f_{\rm cm} + 0.5$$
  
(9)

式中: $f_{em}$ 是砂浆的抗压强度, MPa;  $E_m$ 是砂浆的弹性 模量, MPa;  $f_{tp}$ 是砂浆的拉伸强度, MPa;  $f_{ti}$ 是ITZ的 抗拉强度, MPa;  $m_w/m_c$ 是水灰比.

#### 4.2 再生骨料冻融改性模拟

为了分析冻融改性对再生混凝土骨料性能的影









Fig. 8 Continuous water uptake and damage accumulation during freeze-thaw cycles<sup>[20]</sup>



Fig. 9 Schematic diagram of the mesoscale RBSM



图 10 冻融循环再生骨料模型 Fig. 10 Simulation of RCA under freeze-thaw cycles

响,使用RBSM对再生混凝土骨料试样进行建模(见 图10).模型的尺寸为50×50mm<sup>2</sup>,网格尺寸约为2.5mm, 每边划分为20个单元.设置了3组含有不同尺寸天然 骨料的再生混凝土骨料模型(*d* =10、20、32mm).

模型各参数根据水灰比确定.对于不同水灰比, 根据式(9)可以计算出 RBSM 模型使用的材料参数 (表 2).其中 $\phi_{mot}$ 为附着砂浆的孔隙率, $E_{mot}$ 为附着砂 浆的弹性模量, $f_{e,mot}$ 为附着砂浆的抗压强度, $f_{t,mot}$ 为附 着砂浆的拉伸强度, $f_{t,trz}$ 为 ITZ 界面的抗拉强度, $\varphi_{air}$ 为附着砂浆引气量.

对模型进行40次冻融循环模拟.由于2次冻融 循环之间水分得到补充,因此模型在下一次循环开

表 2 RBSM 模型使用的材料参数 Table 2 Material parameters used in RBSM

$m_{ m W}/m_{ m C}$	$\phi_{ m mot}$	$E_{ m mot}/$ GPa	f <sub>c_mot</sub> ∕ MPa	f <sub>t_mot</sub> ∕ MPa	$f_{t_{\rm ITZ}}/$ MPa	$arphi_{ m air}/\%$
0.35	0.16	24.7	50.26	3.98	1.80	1.8
0.50	0.22	21.2	32.00	3.35	1.58	1.8
0.65	0.28	18.4	22.17	2.84	1.37	1.8

始前处于饱和状态.记录整个过程中的应变变化,在 冻融循环结束后进行了模拟拉伸试验,并记录了砂浆、ITZ和粗骨料各自的变形.

在冻融过程中,通过应变计同步记录了砂浆、天 然骨料和ITZ的应变(见图11).图中横坐标是砂浆 应变( $\epsilon_{M}$ )与天然骨料应变( $\epsilon_{A}$ )之差,纵坐标是ITZ的 裂缝宽度,两者呈现明显的线性关系.由图11可见: 对于同一尺寸的骨料,不同水灰比下应变差和裂缝 宽度关系的斜率几乎相等.比较含有不同直径天然 骨料的模型可以看到,随着天然骨料直径的增加 (10~32 mm),ITZ相对于砂浆的损伤不断增大(9× 10<sup>-3</sup>~18×10<sup>-3</sup> mm).这再一次验证了较小水灰比下 整体应变受ITZ的影响更大,更大尺寸天然骨料的模 型会产生更大的应变;较大的水灰比下砂浆对整体变 形的影响更大,因此小尺寸天然骨料模型的变形更大.

40次冻融循环前后各个模型的单轴抗拉曲线如 图 12 所示.由图 12 可见:总体而言,冻融循环结束后





1217

各个模型的抗拉强度均有不同程度的下降;水灰比 越小以及内部天然骨料尺寸越小,冻融循环前的抗 拉强度越大;抗拉强度小的模型在冻融循环后的强 度降低越多,但是延性越好.因此,冻融改性再生骨 料的方法更适用于强度较低(水灰比大,天然骨料直 径大)的再生混凝土骨料.

# 4 结论

(1)冻融改性对去除再生混凝土骨料上的附着 砂浆效果显著.冻融改性工艺中的最低温度越低, 冻融改性效率越高;冻融改性前对再生混凝土骨料 进行高温干燥处理能提高改性效率.高温干燥前再 生混凝土骨料的含水量对后续冻融剥落效率的影响 不大,在冻融改性过程中对骨料进行机械振捣能够 进一步提升冻融改性效率.

(2)当再生混凝土骨料尺寸一定时,内部的天然 骨料尺寸越大,再生混凝土骨料的整体应变越大,界 面过渡区的应变也越大,天然骨料的尺寸效应随着 水灰比的降低而减弱.当水灰比较小时,冻融循环过 程中砂浆的应变相对于界面过渡区的变形更小,此 时界面过渡区的变形对试件的整体变形起主导作用. 在水灰比较大的情况下,骨料的整体应变由附着砂 浆控制.

(3)本文初步探索了冻融改性的实验室工艺及 其影响因素,旧砂浆去除率接近100%,具有良好的 应用前景.然而目前实验室内处置的能耗较高,后续 研究将进一步优化改性效率,降低能耗.

### 参考文献:

- [1] CHINZORIGT G, LIM M K, YU M, et al. Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO<sub>2</sub> treated recycled fine aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2020, 136:106062.
- [2] DANG J T, ZHAO J, PANG S D, et al. Durability and microstructural properties of concrete with recycled brick as fine aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120032.
- [3] 马昆林,黄新宇,胡明文,等.砖混再生粗骨料混凝土损伤本 构关系[J].建筑材料学报,2022,25(2):131-141.
  MA Kunlin, HUANG Xinyu, HU Mingwen, et al. Damage constitutive model of brick-concrete recycled coarse aggregates concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):131-141. (in Chinese)
- [4] 陈春红,刘荣桂,朱平华,等. 黏附砂浆含量对再生混凝土抗
   氯离子侵蚀性能影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1216-1223.
   CHEN Chunhong, LIU Ronggui, ZHU Pinghua, et al. Effect of

attached mortar content on chloride ion erosion resistance of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1216-1223. (in Chinese)

- [5] KATZ A. Treatments for the improvement of recycled aggregate
   [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6): 597-603.
- [6] 叶哲.再生粗骨料改性及其对混凝土性能的影响[D].合肥:安徽建筑大学,2020.
   YE Zhe. Modification of recycled coarse aggregate and its effect

on concrete properties[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020. (in Chinese)

- [7] SHAIKH F, CHAVDA V, MINHAJ N, et al. Effect of mixing methods of nano silica on properties of recycled aggregate concrete
   [J]. Structural Concrete, 2018, 19(2):387-399.
- [8] ZENG W L, ZHAO Y X, POON C S, et al. Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116743.
- [9] SUI Y W, MUELLER A. Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete [J]. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2012, 45(10):1487-1495.
- [10] NAWA T, OGAWA H. Improving the quality of recycled fine aggregates by selective removal of brittleness defects. Legislation, technology and practice of mine land reclamation [C]// Proceedings of the Beijing International Symposium Land Reclamation and Ecological Restoration(LRER 2014). Beijing: CRC Press/Balkema, 2014:384-392.
- [11] 水中和,玄东兴,曹蓓蓓.热-机械力分离制备高品质再生骨料的研究[J]. 混凝土,2006(12):60-62.
   SHUI Zhonghe, XUAN Dongxing, CAO Beibei. Preparation of high-quality recycling aggregate by thermal- mechanical separation from waste concrete[J]. Concrete, 2006(12):60-62. (in Chinese)
- PIASTA J. Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste [J]. Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, 1984, 17(6):415-420.
- [13] SCHERER G W, VALENZA J J. Mechanisms of frost damage[J]. Materials Science of Concrete, 2005, 7(1):209-246.
- [14] GONG F Y, SICAT E, ZHANG D W, et al. Stress analysis for concrete materials under multiple freeze-thaw cycles[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2015, 13(3):124-134.
- [15] SUN Z H, SCHERER G W. Effect of air voids on salt scaling and internal freezing[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40 (2):260-270.
- [16] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1945, 16(4):245-272.
- [17] PROMENTILLA M A B, SUGIYAMA T. X-ray microtomography of mortars exposed to freezing-thawing action
   [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2010, 8(2): 97-111.
- [18] COUSSY O. Poromechanics of freezing materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(8):1689-1718.
- [19] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J].

Journal of Applied Physics, 1941, 12(2):155-164.

- [20] GONG F Y, UEDA T, WANG Y, et al. Mesoscale simulation of fatigue behavior of concrete materials damaged by freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 702-716.
- [21] WANG Z, GONG F Y, ZHANG D W, et al. Mesoscale simulation of concrete behavior with non-uniform frost damage with verification by CT imaging[J]. Construction and Building

Materials, 2017, 157:203-213.

- [22] NAGAIK, SATOY, UEDA T. Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBSM[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2(3):359-374.
- UEDA T, HASAN M, NAGAI K, et al. Mesoscale simulation of influence of frost damage on mechanical properties of concrete
   [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(6): 244-252.

#### (上接第1189页)

artificial intelligence techniques [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122:104171.

- [8] 覃维祖,曹峰.一种超高性能混凝土——活性粉末混凝土[J]. 工业建筑,1999(4):18-20.
   QIN Weizu, CAO Feng. A kind of ultra-high performance concrete—Reactive powder concrete[J]. Industrial Architecture, 1999(4):18-20. (in Chinese)
- [9] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑 科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
   CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. Review of ultra high performance concrete research[J]. Chinese Journal of Building Science and Engineering,2014,31(3):1-24.(in Chinese)
- [10] DONG E, YU R, FAN D, et al. Absorption-desorption process of internal curing water in ultra-high performance concrete (UHPC) incorporating pumice: From relaxation theory to dynamic migration model[J]. Cement and Concrete Composite,

2022,133:104659.

- [11] HABER Z B, MUNOZ J F, DE LA VARGA I, et al. Bond characterization of UHPC overlays for concrete bridge decks: Laboratory and field testing [J]. Construction and Building Materials, 2018, 190:1056-1068.
- [12] LI P P, YU Q L, BROUWERS H J H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 649-659.
- [13] ZENG X, DENG K, LIANG H, et al. Uniaxial behavior and constitutive model of reinforcement confined coarse aggregate UHPC[J]. Engineering Structures, 2020, 207:110261.
- [14] KOUSC, ZHANBJ, POONCS. Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 45(1): 22-28.