



应变硬化水泥基复合材料氯盐传输行为的细观数值分析

鲍玖文 孔令艳 张心钰 张鹏 秦玲 郭伟娜

Mesoscale numerical analysis of chloride ingress behavior of strain hardening cement-based composites

BAO Jiuwen, KONG Lingyan, ZHANG Xinyu, ZHANG Peng, QIN Ling, GUO Weina

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230824.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的拉伸本构关系

Tension constitutive relationship of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(7): 1754–1762 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191114.001>

混杂纤维增强应变硬化水泥基复合材料的压缩本构关系

Compression constitutive relation of hybrid fiber reinforced strain hardening cementitious composites

复合材料学报. 2020, 37(5): 1221–1226 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190823.002>

干湿循环作用下水泥基复合材料抗氯离子侵蚀性能及其微观结构变化

Resistance to chloride erosion of cement matrix composite materials under dry-wet cycling and their micro-structural changes

复合材料学报. 2017, 34(12): 2856–2865 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170407.001>

耦合离子与水化产物间相互作用的水泥基材料氯离子传输模型

Chloride transport model for cement-based materials considering ion-cement hydrate interactions

复合材料学报. 2018, 35(12): 3526–3533 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180402.001>

氧化石墨烯/再生水泥基复合材料的制备

Preparation of graphene oxide/recycled cement-based composite materials

复合材料学报. 2021, 38(5): 1526–1534 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201106.001>

氧化石墨烯增强水泥基复合材料的力学性能及微观结构

Mechanical properties and microstructure of graphene oxide reinforced cement-based composites

复合材料学报. 2018, 35(8): 2132–2139 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170919.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

应变硬化水泥基复合材料氯盐传输行为的 细观数值分析



分享本文

鲍玖文, 孔令艳, 张心钰, 张鹏*, 秦玲, 郭伟娜

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266520)

摘要: 应变硬化水泥基复合材料(SHCC)因其具有高延性、裂缝宽度可控等优点已被广泛应用于海洋腐蚀严重区域的混凝土结构加固与修复工程中。基于此, 提出了海洋干湿循环作用下 SHCC 中氯离子传输的对流-扩散模型, 并利用 COMSOL 仿真软件建立考虑纤维乱向分布的二维细观模型; 通过开展人工室内模拟海洋浪溅区 SHCC 氯离子传输试验, 分析了不同干湿循环比(3.0 : 1、11.0 : 1 和 85.4 : 1)和不同暴露时间(30 天、90 天和 180 天)下的氯离子含量时空分布规律, 对比验证了模拟氯盐传输行为的细观数值模型的有效性。结果表明: 随着暴露时间的延长, SHCC 氯离子峰值浓度增大, 且随着干湿循环比的增加峰值浓度升高; 随着渗透深度增大, 氯离子浓度迅速下降并最终趋于稳定, 使氯离子浓度整体表现出峰值浓度较高而传输深度较小的规律; 基于 Fick 第二定律解析解并考虑对流区的影响, SHCC 的表面氯离子浓度(C_s)和表观氯离子扩散系数(D_{app})均呈现明显的时变性, 干湿循环比一定时, 随着暴露时间的延长而分别增大和减小; 当干湿循环比为 85.4 : 1, 暴露时间为 90 天和 180 天时 C_s 相较于 30 天分别提高了 51.72% 和 83.45%, D_{app} 分别降低了 27.71% 和 48.50%; 暴露时间一定时, 随着干湿循环比的增加, C_s 和 D_{app} 均呈现先增大后减小的趋势; 最后将氯离子含量分布实测值与计算值进行对比, 验证了所建立的干湿循环作用下氯盐传输的扩散-对流模型的适用性。

关键词: 应变硬化水泥基复合材料; 干湿循环; 氯离子传输; 细观数值模拟

中图分类号: TU528; TB330.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)04-2137-11

Mesoscale numerical analysis of chloride ingress behavior of strain hardening cement-based composites

BAO Jiuwen, KONG Lingyan, ZHANG Xinyu, ZHANG Peng*, QIN Ling, GUO Weinan

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Strain hardening cement-based composite (SHCC) owing to its advantages of high ductility and controllable crack width has been widely used in the strengthening and repairing of concrete structures exposed to severe marine corrosion zones. Based on this, a convection-diffusion model of chloride transport in SHCC subjected to marine drying-wetting cycles was proposed, and a two-dimensional mesoscopic model considering the chaotic distribution of fibers was established by COMSOL simulation software. The spatial and temporal distribution of chloride content under different drying-wetting ratios (3.0 : 1, 11.0 : 1 and 85.4 : 1) and exposure durations (30 days, 90 days and 180 days) was analyzed by conducting a simulated indoor test of chloride ingress into SHCC. The effectiveness of the mesoscopic numerical model to simulate chloride ingress behavior was contrastively veri-

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-07-03; 录用日期: 2023-08-12; 网络首发时间: 2023-08-25 14:11:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230824.001>

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600704); 国家自然科学基金(51922052); 山东省自然科学基金(ZR2021JQ17); 山东省高等学校青创科技创新团队项目(2021KJ019)

National Key Research and Development Program of China (2021YFB2600704); National Natural Science Foundation of China (51922052); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021JQ17); Youth Innovation Team Development Plan of Shandong Province in China (2021KJ019)

通信作者: 张鹏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为混凝土耐久性 E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

引用格式: 鲍玖文, 孔令艳, 张心钰, 等. 应变硬化水泥基复合材料氯盐传输行为的细观数值分析 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 2137-2147.

BAO Jiuwen, KONG Lingyan, ZHANG Xinyu, et al. Mesoscale numerical analysis of chloride ingress behavior of strain hardening cement-based composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 2137-2147(in Chinese).

fied. The results show that the peak chloride concentration inside SHCC increases with the extension of exposure time, and similarly increases with the increase of drying-wetting ratio. However, with the increase of penetration depth, the chloride concentration rapidly decreases and tends to be stable eventually, which make the chloride content as a whole show a higher peak concentration and a smaller penetration depth. According to the analytical solution to Fick's second law and considering the effect of convection zone, both the surface chloride concentration (C_s) and apparent chloride diffusion coefficient (D_{app}) of SHCC show obvious time-varying characteristics. At a given drying-wetting cycle ratio, the C_s and D_{app} increase and decrease as the exposure time increases, respectively. When the drying-wetting cycle ratio is 85.4 : 1, compared to 30 days, the C_s of SHCC for exposure to 90 days and 180 days increase by 51.72% and 83.45%, and the D_{app} decreases by 27.71% and 48.50%, respectively. At the same exposure time, as the drying-wetting cycle ratio increases, both the C_s and D_{app} first increase and then decrease. Finally, the comparison between the measured data and calculated results of the chloride content distribution indicates the feasibility of the proposed convection-diffusion model under the cyclic drying-wetting action to depict the chloride transport behavior in SHCC.

Keywords: SHCC; drying-wetting cycles; chloride transport; mesoscale numerical simulation

水泥作为建筑材料中最常用的材料，被广泛应用在混凝土结构中，但水泥造成的CO₂排放问题成为影响生态环境的重要原因^[1-2]。为解决此问题，多采用粉煤灰这种绿色胶凝材料来代替水泥。此外，混凝土作为一种脆性材料，提高韧性也是延长混凝土结构服役寿命的重要举措，聚乙烯醇(PVA)纤维因良好的伸长率和粘附性可以显著提高混凝土的抗拉强度和韧性^[3-4]。与传统混凝土相比，应变硬化水泥基复合材料(SHCC)的高延性有效控制着混凝土内部裂纹的扩展从而限制外部有害离子的侵入^[5-6]。对于严酷的海洋服役环境，海水中大量游离的氯离子会对服役中钢筋混凝土结构造成严重腐蚀，尤其是在干湿交替区域氯盐腐蚀最为严重^[7-9]，因此，研究海洋干湿循环下SHCC氯盐传输规律对其耐久性评价具有重要意义。

目前，针对SHCC氯盐传输性能方面展开了研究，张鹏等^[10]开展了人工模拟潮汐区SHCC氯盐传输试验，分析了自由氯离子含量、表面氯离子浓度及表观氯离子扩散系数的变化规律，结果表明：与普通混凝土C30相比，虽然SHCC内峰值氯离子浓度较高，但在长期服役过程中表现出更加优异的氯盐传输性能。Wang等^[11]研究了PVA纤维与粉煤灰(FA)复掺情况下混凝土氯离子传输性能，结果表明二者共同作用使混凝土结构更加致密，对提高混凝土抗氯盐传输性能具有显著效果。Paul等^[12]通过快速氯离子迁移试验(RCM)，分析了SHCC在开裂与未开裂状态下的氯离子扩散系数变化，说明SHCC开裂状态加速了氯离子在混凝土内部的迁移，且裂纹形状及附近孔隙也会对试件内部的氯离子分布造成影响。Kobay-

ashi等^[13]对不同水灰比和纤维掺量的开裂SHCC进行了干湿循环作用下氯离子渗透试验，发现开裂SHCC的氯离子渗透性能很大程度取决于其裂缝的数量和水灰比，且氯离子渗透深度随干湿循环次数的增加而增大。

除了试验研究外，细观数值模拟也是研究纤维混凝土介质传输行为的有效手段^[14-15]。对于SHCC材料的数值模拟，张鹏^[16]利用MATLAB采用蒙特卡罗法进行纤维的二维随机投放，并将其导入到ABAQUS有限元软件进行数值模拟，通过对纤维体积分数、基体开裂强度等参数进行敏感性分析，为工程水泥基复合材料(ECC)在有限元模拟角度进行力学性能分析提供了理论基础。Li等^[17]考虑材料的非均质性，建立了基于微观力学的随机模型，从而研究SHCC拉伸行为变化，并与试验结果进行比较，证明该模型能够较好地模拟SHCC拉伸行为，发现纤维强度和纤维体积分数是导致SHCC拉伸应变能力和平均裂纹宽度发生显著变化的重要因素。Lu等^[18]对掺有FA和PVA纤维的ECC进行了长期力学性能数值分析，考虑微观力学参数建立了仿真模型，揭示了ECC拉伸延性劣化机制。熊阳^[19]将建立的随机散乱分布PVA纤维几何模型导入ANSYS中，模拟了不同纤维掺量对PVA纤维混凝土力学性能变化的影响，模拟结果虽与试验结果存在一定差异，但整体变化趋势一致。

综上所述，目前对于纤维混凝土数值模拟多集中于力学性能分析，而对于实际海洋服役环境下，特别是干湿循环作用下SHCC氯盐传输性能研究不充分。基于此，为了重点研究纤维随机分

布对海洋混凝土氯盐侵蚀性能的影响，构建由砂浆基质、PVA 纤维及二者之间的界面过渡区 (ITZ) 三相复合组成的 SHCC 细观模型，并提出干湿循环作用下氯离子传输的对流-扩散模型，利用细观数值模拟手段探究氯离子在 SHCC 中的传输规律，结合干湿循环作用下氯盐传输试验，对比分析非饱和状态下 SHCC 氯离子传输规律，为海洋环境下 SHCC 氯盐侵蚀行为评估提供理论依据。

1 干湿交替作用下氯离子传输模型

1.1 水分传输模型

非饱和状态下混凝土中水分主要以气态和液态两种形式存在，可采用扩展的达西定律表征水分传输行为，其表达式为

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \nabla(K(\Theta)\nabla\Psi) \quad (1)$$

式中： Θ 为水分饱和度； $K(\Theta)$ 为非饱和状态下水力传导率，用来表征多孔介质中水分的渗透能力； Ψ 为毛细势能； t 为水分传输时间。

上式中的非饱和状态下水力传导率是关于饱和度 Θ 的分段函数，可表达式为

$$K(\Theta) = \begin{cases} K_s \Theta^l \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2, & 0 < \Theta < 1 \\ K_s, & \Theta = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： K_s 为饱和水力传导率； l 表示经验常数，结合 Mualem 方程取 0.5； m 表示经验参数。根据 V-G 模型来表示饱和度 Θ 与毛细势能 Ψ 的关系：

$$\Theta(\Psi) = \begin{cases} \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n} \right]^m, & \Psi < 0 \\ 1, & \Psi \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： α 、 m 和 n 为经验参数，其中 $m=1-1/n$ 。干湿交替过程中干燥和湿润两阶段分别对应着脱附和吸附过程，因此 α 、 m 和 n 的取值采用文献 [10] 所绘制的等温吸附-脱附曲线确定，如表 1 所示。结合式 (1)~(3) 可知：

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \Theta^l \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2 \frac{-1}{\alpha m n} \Theta^{(-\frac{1}{m}-1)} \right) \quad (4)$$

结合质量守恒定律，将描述毛细水传输过程的动力学模型 Richard 方程可用 Θ 为中间变量转变为水分的扩散方程，其表达式可表示为

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) \quad (5)$$

表 1 干湿过程吸-脱附曲线的参数取值

Table 1 Parameters values of adsorption-desorption curves in dry and wet conditions

Duration	$\alpha/10^{-3}$	m	n
Drying process	1.021	0.324	1.480
Wetting process	5.159	1.874	1.874

Notes: α , m , n —Empirical parameters of adsorption-desorption model.

式中， $D(\Theta)$ 为水分扩散系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。根据式 (4) 可确定水分扩散系数为

$$D(\Theta) = K_s \Theta^l \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2 \frac{-1}{\alpha m n} \Theta^{(-\frac{1}{m}-1)} \left(\Theta^{(-\frac{1}{m}-1)} - 1 \right)^{-m} \quad (6)$$

1.2 氯离子传输模型

在干湿循环作用下，氯离子在混凝土内部的传输行为主要是由离子浓度梯度产生的扩散行为与水分对流效应的耦合作用所致。考虑到氯离子扩散系数与水分饱和度 Θ 之间的关系，根据氯离子质量守恒定律，可知混凝土中氯离子传输的对流-扩散模型为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{Cl}} \frac{\partial C}{\partial x} + C D_w(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) \quad (7)$$

式中： $C(x, t)$ 为距混凝土表面 x 深度处传输时间 t 时刻的氯离子浓度； D_{Cl} 为氯离子扩散系数； $D_w(\Theta)$ 为水分扩散系数。

1.3 边界条件

干湿循环条件的变化会影响混凝土湿度，进而影响其氯离子传输行为。其中干燥过程由于水分的蒸发使混凝土内部饱和度降低，水分在饱和梯度驱动下，以较高的对流速率迁移到混凝土表层，因此在干燥过程中，氯离子传输主要以对流作用为主；而在湿润过程中，外部水分侵入使混凝土内部饱和度升高，对流作用减弱，氯离子侵入混凝土内部主要以扩散作用为主 [20]。综合以上分析，湿度的变化会造成水分的迁移，使氯离子在混凝土内部不断进行传输，在此作用下混凝土中氯离子传输过程包括对流和氯离子扩散两个过程，进行模拟时对两个过程分别设置边界条件。因此，假定湿润过程混凝土处于饱和状态，此时饱和度 $\Theta=1.0$ ；干燥过程时假定此时与外部环境湿度达到平衡，取 $\Theta=0.5$ 。即混凝土孔隙溶液饱和度边界条件为

$$\Theta(0, t) = \begin{cases} 1.0, & \text{Wetting period} \\ 0.5, & \text{Drying period} \end{cases} \quad (8)$$

对于氯离子传输的边界条件，在湿润过程符合第一类边界条件，任意时刻 t 的表面氯离子浓度 C_s 保持恒定；而在干燥过程中，由于表层水分蒸发，表层氯离子会留在混凝土中，将试样表面氯离子通量设置为 0，而远离混凝土表面的氯离子会随着水分进入混凝土内部。综上所述，氯离子边界条件为

$$\begin{cases} C(0, t) = C_s, & \text{Wetting period} \\ D(\Theta) \frac{\partial C}{\partial x} = 0, & \text{Drying period} \end{cases} \quad (9)$$

1.4 细观模型

在细观尺度上，将 SHCC 视为由砂浆基质、PVA 纤维及二者之间的界面过渡区 (ITZ) 三相复合材料^[20]。二维试件尺寸取 100 mm×100 mm，由于纤维在混凝土中的分布具有随机性，为了能够更加真实地模拟纤维在基体中的随机分布情况，采用蒙特卡罗法，结合 MATLAB 编程软件生成二维随机纤维几何模型^[21]。选用自由三角形进行网格划分，单元大小按常规设置。构建二维几何模型前，应根据体积分数首先确定投放纤维数目 N ，可根据下式进行计算^[14]：

$$N = \frac{LBV_f}{d_f l_f} \quad (10)$$

式中： L 和 B 分别为基体的长与宽，取 100 mm×100 mm； l_f 为纤维的长度； d_f 为纤维直径； V_f 为纤维体积分数。

在二维模型构建时，首先假定 PVA 纤维为随机均匀分布的矩形单元，纤维实际长度与直径分别对应矩形的长与宽；确定纤维的位置需要考虑两大因素：一是纤维中点坐标；二是纤维轴线与 X 轴夹角，并在确定纤维位置的同时，保证纤维之间不重合、不相交、不包含且纤维不能超出基体边界。由于 ITZ 是混凝土最易发生破坏的部位，通常设定 ITZ 厚度小于 0.1 mm，已有学者研究表明 ITZ 厚度范围可取 5~30 μm^[16, 20]。因此在本文中待纤维投放完毕后，结合自身纤维尺寸特点，按照纤维边界沿同一中点及角度向外扩展 20 μm 作为纤维与基体的 ITZ 厚度。纤维的具体投放流程如图 1 所示，所生成的随机分布纤维的 SHCC 几何模型如图 2 所示。

1.5 模型参数及边界条件

将几何模型的下边缘设置为水分和氯离子的侵蚀面，并为保证氯离子的一维传输，将其他三面设置为无通量。假定纤维的氯离子扩散系数为

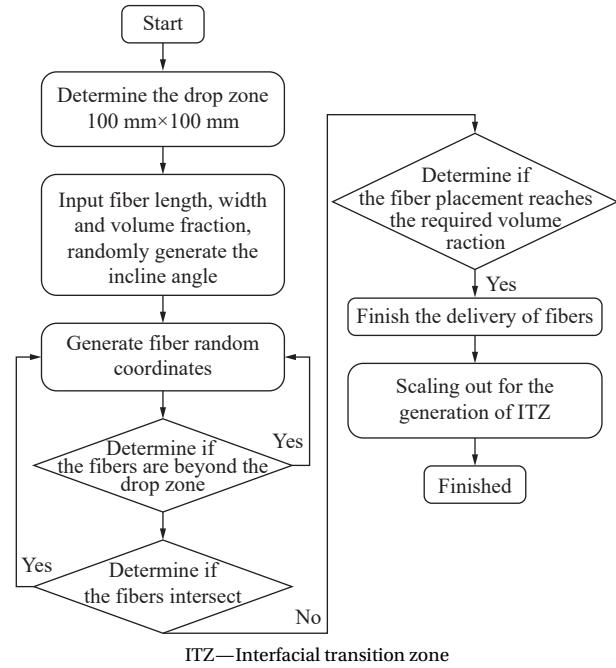


图 1 聚乙烯醇 (PVA) 纤维随机投放流程图

Fig. 1 Flow chart of randomly distributed polyvinyl alcohol (PVA) fibers

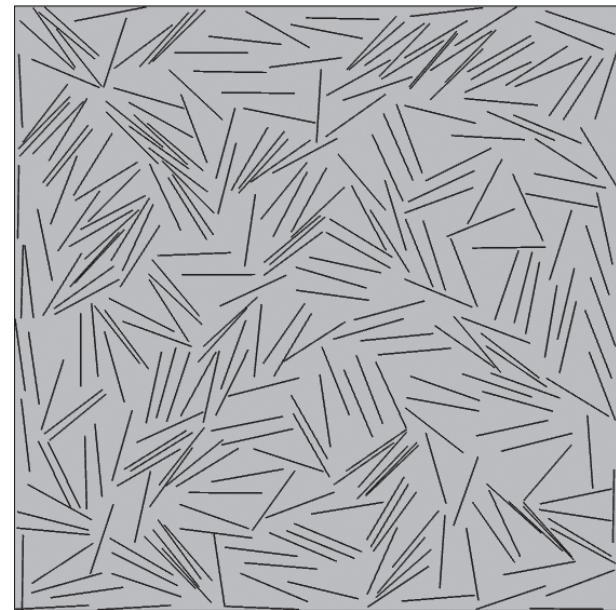
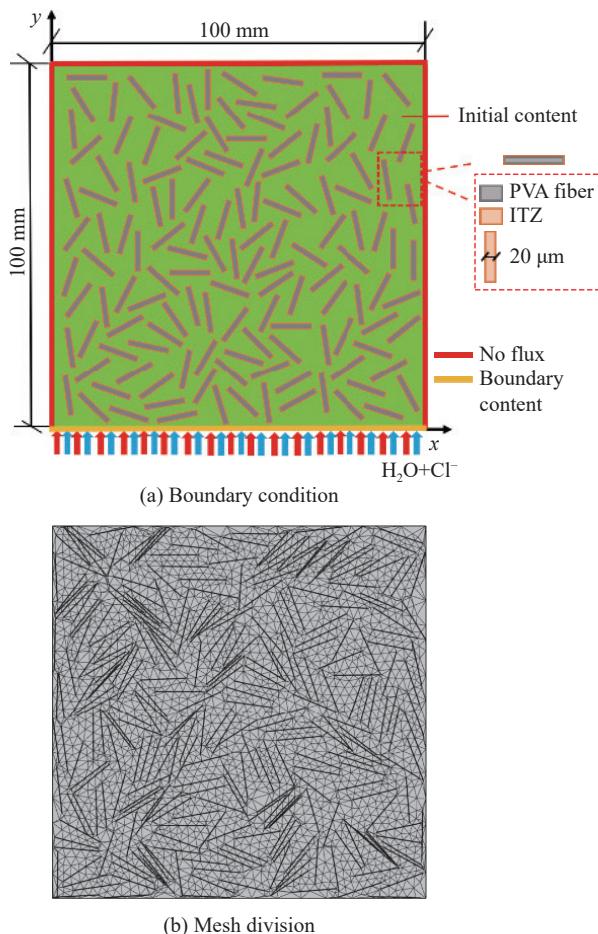


图 2 PVA 纤维随机分布的应变硬化水泥基复合材料 (SHCC) 模型

Fig. 2 Strain hardening cement-based composite (SHCC) model
with the random distribution of PVA fibers

0；由于 ITZ 结构比较薄弱，因此取 ITZ 的氯离子扩散系数为砂浆氯离子扩散系数的 10 倍^[15]。具体边界条件设置及网格划分如图 3 所示，采用常规自由三角形网格，设置网格狭隘区分率为 0.01；最小尺寸为 0.03 mm；最大单元大小为 6.7 mm；最大单元增长率为 1.3；曲率因子为 0.2；最终生



(b) Mesh division

图 3 SHCC 细观数值仿真模型

Fig. 3 Mesoscopic numerical simulation model of SHCC

成了 13 565 个三角形网格。

2 试验分析

2.1 混凝土配合比及试件制备

为制备 SHCC 试件, 胶凝材料选用来自山东青岛的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥和 I 级粉煤灰; 细骨料采用粒径小于 0.3 mm 的石英砂; 纤维采用聚乙烯醇 (PVA) 纤维, 购买于日本 Kuraray 公司, 其相关性能参数见表 2; 所需水均来自实验室普通自来水。

表 2 PVA 纤维的基本性质

Table 2 Properties of PVA fibers

Type	Diameter/ μm	Length/ mm	Elasticity modulus/GPa	Volume fraction/vol%
PVA fiber	40	12	41	2

本试验设置 SHCC 水胶比 (w/b) 为 0.33, 胶凝材料总含量为 $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 水泥和粉煤灰的化学组分如表 3 所示。PVA 纤维体积分数为 2vol%, 可

使纤维的桥接裂缝能力充分显现, 有效提高砂浆基体的延性; 此外, 掺入适量的 FA 可降低 SHCC 基体的断裂韧性, 提高基体延性及变形能力, SHCC 试件具体配合比见表 4。浇筑尺寸边长分别为 100 mm 和 150 mm 的 SHCC 立方体试件。按照配合比将所需水泥、石英砂、FA 及 PVA 纤维进行称量备用, 浇筑时先将水泥、石英砂及 FA 倒入搅拌机内搅拌约 2 min, 待搅拌均匀后, 将减水剂与水的混合溶液倒入搅拌机内继续搅拌约 4 min, 最后加入纤维搅拌约 5 min, 待充分混合均匀后置于振动台振捣, 并不停补充浆体直至填充整个模具中用刮刀使其表面平整, 浇筑完成后立即用不透水的薄膜覆盖表面, 然后将其在室温放置 24 h, 待成型后拆模并立即放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95% 的标准养护室中养护 28 天, 利用深圳三思纵横科技有限公司生产的 YAW-3000D 微机控制恒应力压力试验机测试抗压强度值, 其立方体抗压强度平均值为 40.2 MPa。

表 3 胶凝材料化学成分组成

Table 3 Chemical composition of cementitious materials

Chemical composition	Cement/wt%	Fly ash/wt%
SiO_2	17.04	52.00
Al_2O_3	6.08	28.68
Fe_2O_3	4.08	4.50
CaO	53.57	8.07
SO_3	2.95	1.14
MnO	0.38	—
TiO_2	0.52	—
K_2O	0.80	1.54
P_2O_5	0.14	—
MgO	—	1.18

表 4 SHCC 试件配合比

Table 4 Mix proportion of SHCC specimens

Composition	Content
Cement	$550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Fine aggregate	$550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Water	$395 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Fly ash	$650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
PVA	2vol%

2.2 氯盐传输试验方法

为了分析 SHCC 氯盐传输行为, 开展人工室内模拟干湿交替下氯盐传输试验。采用自主设计的人工模拟浪溅试验箱, 该试验箱包括控制箱、试验箱、储水箱 3 部分。通过控制箱设置循环周期和干湿循环时间比 (α_t); 试验箱侧壁上设置有液位传感器和湿度传感器, 顶部安装鼓风设备及

通气孔，并设置喷淋水管使试样承受盐水冲刷；储水箱用来储存配制的盐溶液，其浓度采用规范中给出的盐溶液浓度标准，取质量分数为5wt%的NaCl溶液，最终通过保持NaCl溶液浓度恒定、设置干湿制度及喷淋与吹风系统来人工模拟海洋浪溅区环境。为保证氯离子的一维传输，需在进行室内加速模拟试验前，将混凝土试件包括成型

面在内的4个连续表面涂抹环氧树脂进行密封。本试验设置3种干湿循环制度：(1)以1天为循环周期的干湿比为3.0:1；(2)以3天为循环周期的干湿比为85.4:1；(2)以6天为循环周期的干湿比为11.0:1。详细的干湿循环制度如表5所示。试验过程中为保证NaCl溶液浓度保持恒定，根据实际情况定期更换调整NaCl溶液。

表5 氯盐侵蚀的干湿循环制度

Table 5 Cyclic drying-wetting regimes of chloride ingress

α_t	One drying-wetting cycle			Number of drying-wetting cycle		
	t	t_d	t_w	30 d	90 d	180 d
3.0 : 1	1 d	18 h	6 h	30	90	180
85.4 : 1	3 d	4 270 min	50 min	10	30	60
11.0 : 1	6 d	132 h	12 h	5	15	30

Notes: α_t —Time ratio of drying-wetting cycle; t —Total exposure time; t_d —Time of drying period; t_w —Time of wetting period.

2.3 自由氯离子含量测试

待试块达到暴露时间后，取出擦净表面至无明显水迹，然后将其烘干12 h。用磨粉机沿氯离子渗透面由表及里进行磨粉取样，距表面10 mm以内每间隔1 mm磨粉，距表面10~40 mm之间每层磨进2 mm，磨出粉末后用孔径0.63 mm的筛子将所磨粉末筛分后收集到包装袋进行密封，每一块混凝土试件可取25个数据。将收集的粉末烘干2 h后取出冷却至室温备用。按照《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/T 236—2019)^[22]进行测定混凝土内自由氯离子含量分布。

3 试验结果分析与模型验证

3.1 自由氯离子含量分布

图4为3种干湿制度下(3.0:1、11.0:1和85.4:1)不同暴露时间(30天、90天和180天)的自由氯离子含量分布情况。总体可以发现，自由

氯离子含量随渗透深度呈现先上升后下降的趋势，出现了明显的对流区，且随着暴露时间的增大，对流区深度逐渐增大。这主要是由于浪溅区的干湿循环作用使距混凝土表层一定区域内的氯离子浓度持续积累，最终会出现氯离子浓度峰值，且随着干湿循环次数增加，峰值处的氯离子浓度随暴露时间的延长不断累积，并逐渐向内部延伸的现象，出现“峰值内移”现象^[23]。此外，随着暴露时间的延长，同一渗透深度下，氯离子含量也呈现增大的趋势。

图5为不同渗透深度处SHCC自由氯离子含量对比。在同一暴露时间和同一渗透深度下，总体上看，随干湿比增加自由氯离子含量大致呈现先增大后降低的趋势，受氯盐传输驱动力的控制，与干湿状态下混凝土含水状态密切相关。主要是由于干燥时间越长，混凝土表层孔隙干燥程度越高，使在湿润过程中，较大的浓度差加速了氯离

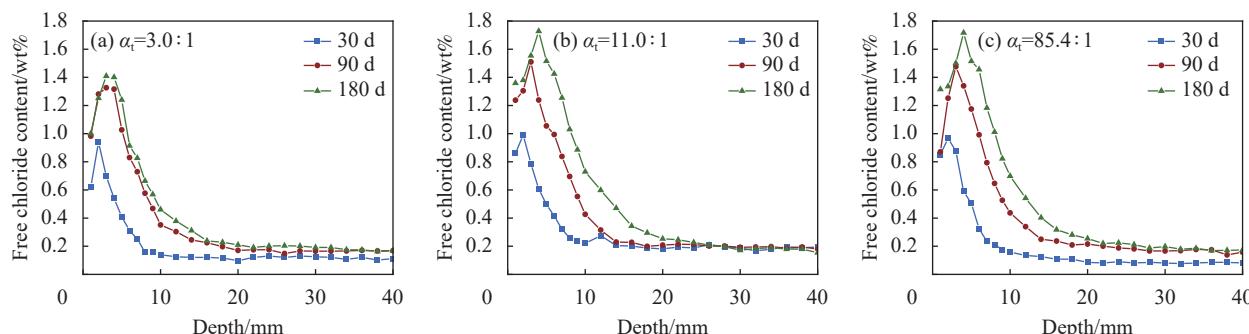


图4 不同干湿循环比下SHCC自由氯离子含量分布

Fig. 4 Free chloride content distribution of SHCC under different cyclic drying-wetting ratios

子向混凝土内部的侵入，氯离子浓度增大；但是随着干燥时间的持续增加，混凝土表面接触氯离子溶液的时间缩短，使进入混凝土内部的氯离子含量降低^[24]。另外，随着暴露时间增加，其自由氯离子含量逐渐增加，但相同渗透深度处的氯离子增速降低，一方面是由于 SHCC 中的 PVA 纤维会和早期水化产物之间产生细小裂缝，为表层氯离子的侵入提供通道；另一方面，早期 FA 未发生火山灰活性效应，主要发挥物理填充效应，但其填充效应较差，使混凝土孔径增大，进而增大了氯离子的渗透性能，随着水化反应的充分发展及 FA 火山灰反应的发生，使 PVA 纤维在混凝土内部形成的网状结构更加致密，此外，纤维的掺入有效地抑制了混凝土内部裂纹的发展，并提高了基体的抗弯强度，表现出随暴露时间增加，自由氯离子含量增速趋于缓慢，因此，SHCC 中纤维的掺入虽然使混凝土氯盐侵蚀性能在短期内未有明显改善，但长期暴露下表现出良好的抗氯盐传输性能^[11, 24-25]。

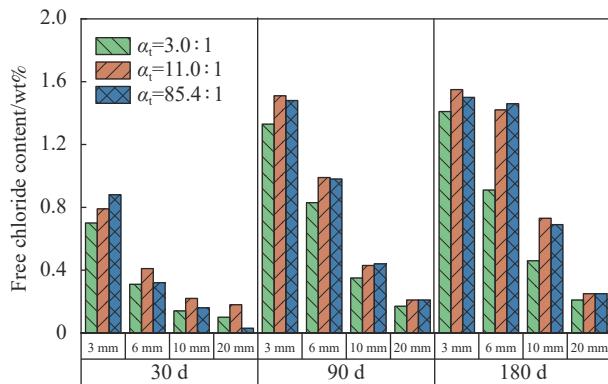


图 5 不同渗透深度处 SHCC 自由氯离子含量

Fig. 5 Free chloride content of SHCC at different penetration depths

3.2 表面氯离子浓度和表观氯离子扩散系数

假定混凝土材料是各向同性、均质的材料，且内部孔隙水始终处于饱和状态，则氯离子在混

凝土内的扩散过程可以用 Fick 第二定律。此外，对流区深度作为混凝土表层对流-扩散耦合传输和内部扩散传输的临界点，是一个重要的参数，即对流区与扩散区的氯离子传输机制有显著区别。故如下式所示，需在描述氯离子扩散的 Fick 第二定律解析解中需考虑对流区深度 Δx 影响，拟合确定表面氯离子浓度和表观氯离子扩散系数：

$$C_f(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2\sqrt{D_{app}t}} \right) \right] \quad (11)$$

式中： D_{app} 为表观氯离子扩散系数 ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)； C_s 为表面氯离子浓度 (wt%)； C_0 为初始氯离子浓度 (wt%)； $\operatorname{erf}(z)$ 为误差函数。由此可知，3 种干湿制度下 SHCC 试件的表面氯离子浓度和表观氯离子扩散系数如表 6 所示。SHCC 的表面氯离子浓度和表观氯离子扩散系数呈现明显的时变性，以干湿循环比 85.4 : 1 为例，随暴露时间延长，90 天和 180 天的表面氯离子浓度分别比 30 天升高了 51.72% 和 83.45%，随时间的延长而增大；而表观氯离子扩散系数分别降低了 27.71% 和 48.50%，随时间的延长而降低。原因在于随着暴露时间的增加，混凝土水化反应继续进行，改善内部孔隙结构导致氯离子传输速率降低。另外，随干湿循环时间比的增加，表面氯离子浓度和表观氯离子扩散系数均呈现先升高后降低的趋势，以暴露时间 180 天为例，SHCC 在干湿循环比为 85.4 : 1 时的表面氯离子浓度比干湿循环时间比为 3.0 : 1 增加了 22.58%，比干湿循环时间比为 11.0 : 1 降低了 0.75%；表观氯离子扩散系数表现为分别增加 42.04% 和降低 4.70%，这是由于随着干湿循环比的增加，干燥时间的水分蒸发造成混凝土表层毛细吸收作用加剧，导致在湿润过程中毛细孔压力作用下氯离子扩散速率加快，更多的氯离子侵入混凝土；但干燥时间增加，氯离子渗入混凝土的时间缩短，氯离子进入混凝土速率降低。

表 6 SHCC 表面氯离子含量 C_s 和表观氯离子扩散系数 D_{app} Table 6 Surface chloride content C_s and apparent chloride diffusion coefficient D_{app} of SHCC

Exposure time/d	3 : 1		11 : 1		85.4 : 1	
	$C_s/\text{wt}\%$	$D_{app}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_s/\text{wt}\%$	$D_{app}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_s/\text{wt}\%$	$D_{app}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
30	1.40	3.34	1.45	4.38	1.45	4.33
90	2.10	2.70	2.21	3.19	2.20	3.13
180	2.17	1.57	2.68	2.34	2.66	2.23

综上分析，SHCC 氯盐传输性能与 FA 的掺入有密切关系，作为一种活性矿物掺合料可与水泥

水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应，反应产物水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶不仅可以填充孔隙，还可

以粘附在 PVA 纤维的表面，从而改善 PVA 纤维的 ITZ 粘结力，使混凝土结构更加致密。另外，PVA 纤维的网状结构提高了基体的韧性和抗弯强度，减少了裂纹的产生，从而减少了氯离子向混凝土内部侵入的路径。除此之外，氯离子向混凝土内部渗入，与水化产物发生反应，在孔隙中生成一些新的盐，破坏基体的内部结构，但由于 FA 与 PVA 纤维的共同作用，使水化产物量增大，氯离子向混凝土内部扩散时，氯离子会与纤维表面的水化产物反应生成 Friedel 盐附着在 PVA 纤维的表面，从而减少了氯离子与基体之间的接触面积，增加了基体的密实度，提高了混凝土对抗氯离子渗透的能力^[11]。

3.3 数值模型验证

为进一步探究不同干湿制度和暴露时间对 SHCC 氯离子传输性能的影响，并验证所建立的数值仿真模型的准确性，本节选择了试验开展的 3 种干湿比 (3.0 : 1、11.0 : 1 和 85.4 : 1) 在暴露时间 30 天、90 天和 180 天的数值模拟结果。**图 6** 为不同干湿循环比下的自由氯离子浓度分布的计算值与

试验值对比，二者吻合较好。将 SHCC 的细观模型尺寸设置为 50 mm×50 mm，其内部自由氯离子含量分布云图如**图 7** 所示。氯离子浓度峰值出现在表层，具有明显的对流区，与试验结果相吻合，且随着暴露时间的延长，氯离子浓度增大，峰值氯离子浓度明显高于深层内部的氯离子浓度，这也进一步证明混凝土早期水化产物反应不充分，PVA 纤维未能较好地被浆体包裹，从而基体内部具有细小缺陷，且早期 FA 的火山灰效应与填充效应较差，混凝土孔隙率增大，进而提高了氯离子的渗透能力。除此之外，干湿循环比为 11.0 : 1 的氯离子浓度比干湿循环比 3.0 : 1 高但低于干湿循环比 85.4 : 1 的氯离子浓度，说明氯离子浓度随干湿循环比增大而升高。此外，氯离子浓度受到纤维单元的影响，纤维周围氯离子出现明显的累积现象，但在同一渗透深度下氯离子浓度分布也不均匀，主要原因是由于在氯离子向混凝土内部侵入的过程中，纤维周围的流动现象使其周围的氯离子浓度偏高；另一方面，纤维在混凝土内部的乱向分布也造成纤维周围氯离子浓度的分布不均匀现象进一步加剧^[26]。

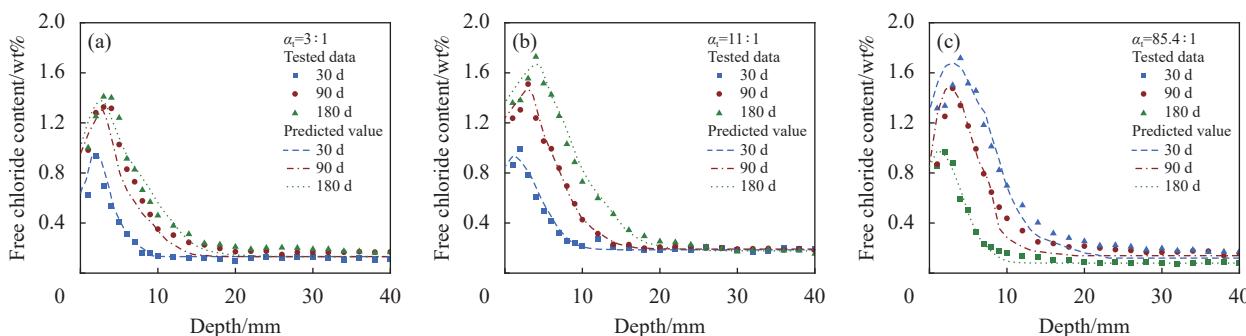


图 6 SHCC 自由氯离子含量计算值与试验值对比

Fig. 6 Comparison between calculated value and tested data of free chloride content in SHCC

为进一步验证所建模型的有效性与适用性，选取文献 [26] 中干湿循环作用下 PVA 纤维混凝土氯盐传输试验结果进行模型验证，具体模型计算参数如**表 7** 所示。针对实际试验中纤维的影响产生的微裂纹或微缺陷作用，在细观模拟中主要基于试验结果从间接方面考虑，确定其表观氯离子扩散系数进行数值分析，通过计算得到模拟结果与试验结果对比如**图 8** 所示，可以发现模型计算值与试验值拟合较好，进一步说明了所建模型具有较高的精度，且证明了所建立的干湿循环作用下氯离子传输模型可表征非饱和状态下 SHCC 氯离子传输规律。

4 结论

(1) 应变硬化水泥基复合材料 (SHCC) 的表面氯离子浓度 (C_s) 和表观氯离子扩散系数 (D_{app}) 呈现明显的时变性。在干湿循环比为 85.4 : 1，暴露时间为 90 天和 180 天时表面氯离子浓度相较于 30 天分别提高了 51.72% 和 83.45%，表观氯离子扩散系数分别降低了 27.71% 和 48.50%；当干湿循环比一定，氯离子含量、表面氯离子浓度均随暴露时间的延长而增大，表观氯离子扩散系数则随暴露时间的延长而减小；随干湿循环比的增加，表面氯离子浓度和表观氯离子扩散系数均呈现先增大后减小的趋势。

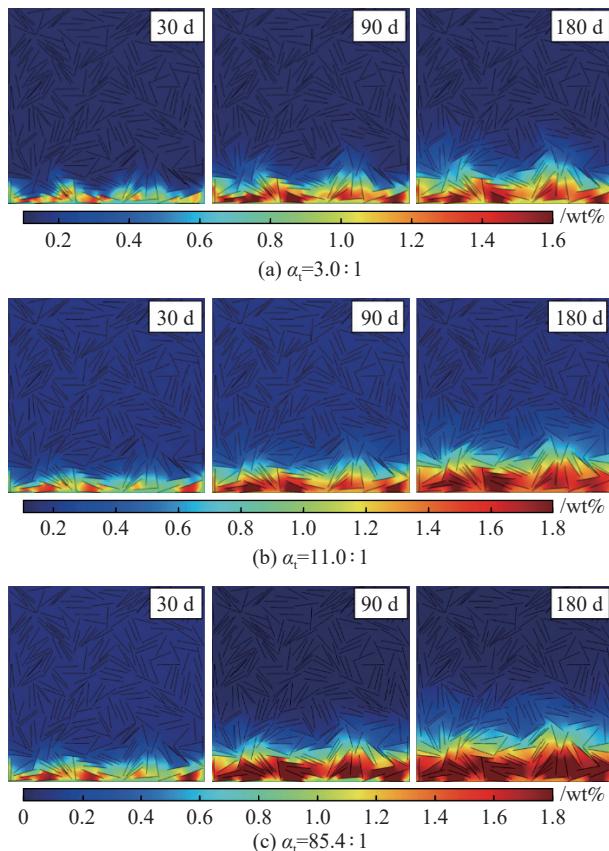


图 7 SHCC 自由氯离子含量分布云图

Fig. 7 Free chloride content distribution in SHCC

表 7 文献 [26] 中 PVA 纤维混凝土的氯离子传输模型计算参数值

Table 7 Calculated parameter values of chloride transport model for PVA fiber reinforced concrete in literature [26]

Group	α_t	One cyclic period/d	$C_s/\text{wt}\%$	$D_{app}/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
P-28			0.24	2.47
P-56	1 : 1	14	0.28	2.09
P-84			0.39	1.32
P-112			0.62	0.80

Notes: P stands for PVA fiber; 28, 56, 84 and 112 represent exposure time of 28 d, 56 d, 84 d and 112 d, respectively.

(2) 通过人工模拟浪溅区氯盐侵蚀试验可知, SHCC 氯离子浓度峰值较高, 但渗透深度及深层氯离子浓度较低, 这主要是由于聚乙烯醇 (PVA) 纤维混凝土早期水化反应不充分, 导致 PVA 纤维不能很好地被浆体包裹, 容易产生细小裂缝, 此外, 早期粉煤灰 (FA) 未发生火山灰反应, 物理填充效应较差, 使基体内部产生较大孔径, 为氯离子传输提供通道; 后期随着 PVA 纤维网状结构更加致密及 FA 发挥火山灰效应提高其抗氯盐渗透性能。

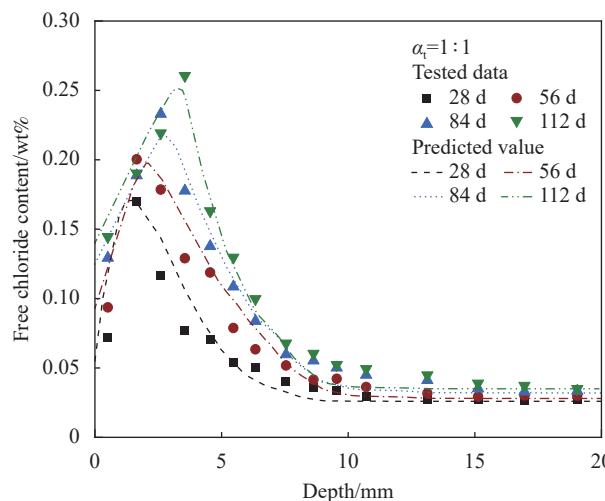


图 8 SHCC 中自由氯离子含量计算值与文献 [26] 中试验值对比

Fig. 8 Comparison between calculated value of free chloride content in SHCC and tested data in literature [26]

(3) 考虑氯离子的对流与扩散耦合效应, 建立了干湿循环条件下非饱和混凝土氯离子传输模型; 考虑纤维的随机分布特征, 基于细观方法构建了 SHCC 仿真分析的二维模型, 并开展了不同干湿循环作用下氯盐传输行为的细观数值仿真分析, 并与试验结果进行对比, 验证了模型的适用性与准确性。

参考文献:

- [1] GUO Y Y, LUO L, LIU T T, et al. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 136: 682-697.
- [2] 童良玉, 刘清风. 纤维增强混凝土氯离子扩散系数的多尺度预测模型[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5181-5191.
TONG Liangyu, LIU Qingfeng. Multi-scale prediction model of chloride diffusivity of fiber reinforced concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5181-5191(in Chinese).
- [3] 郭伟娜, 鲍玖文, 张鹏, 等. 基于数字图像方法的混掺纤维应变硬化水泥基复合材料力学性能及变形特征[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(5): 1401-1409.
GUO Weinna, BAO Jiwen, ZHANG Peng, et al. Mechanical properties and deformation characteristics of hybrid fiber strain hardening cementitious composites based on digital image method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(5): 1401-1409(in Chinese).
- [4] 庄智杰. 实海暴露和人工模拟潮汐区水泥基材料氯离子侵蚀机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.

- ZHUANG Zhijie. Study on mechanism of chloride ion erosion on cement-based materials in real sea exposure and artificial Tidal zone[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021(in Chinese).
- [5] PAULS C, BABAFEMIA J. A review of the mechanical and durability properties of strain hardening cement-based composite (SHCC)[J]. *Journal of Sustainable Cement-based Materials*, 2018, 7(1): 57-78.
- [6] 高淑玲, 王文昌. 应变硬化水泥基复合材料性能与应用研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3620-3629.
- GAO Shuling, WANG Wenchang. A review on performance and application of strain hardening cementitious composites[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(21): 3620-3629(in Chinese).
- [7] ZHANG Y, DI LUZIO G, ALNAGGAR M. Coupled multi-physics simulation of chloride diffusion in saturated and unsaturated concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123394.
- [8] HUANG D G, NIU D T, SU L, et al. Chloride diffusion behavior of coral aggregate concrete under drying-wetting cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121485.
- [9] 姜文镪, 刘清风. 冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(2): 258-272.
- JIANG Wenqiang, LIU Qingfeng. Chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles—A short review[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(2): 258-272(in Chinese).
- [10] 张鹏, 庄智杰, 鲍玖文, 等. 人工模拟海洋潮汐区应变硬化水泥基复合材料抗氯盐侵蚀性能[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(1): 1-6, 21.
- ZHANG Peng, ZHUANG Zhijie, BAO Jiuwen, et al. Chloride resistance of strain hardening cementitious composites under the artificially simulated marine tidal zone[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(1): 1-6, 21(in Chinese).
- [11] WANG J, DONG H. PVA fiber-reinforced ultrafine fly ash concrete: Engineering properties, resistance to chloride ion penetration, and microstructure[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 66: 105858.
- [12] PAUL S C, VAN ZIJL G P A G, BABAFEMI A J, et al. Chloride ingress in cracked and uncracked SHCC under cyclic wetting-drying exposure[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 232-240.
- [13] KOBAYASHI K, SUZUKI M, DUNG L A, et al. The effects of PE and PVA fiber and water cement ratio on chloride penetration and rebar corrosion protection performance of cracked SHCC[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 178: 372-383.
- [14] 鲍玖文, 魏佳楠, 张鹏, 等. 海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(5): 689-704.
- BAO Jiuwen, WEI Jianan, ZHANG Peng, et al. Research progress of similarity of resistance to chloride ingress into concrete exposed to marine environment[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(5): 689-704(in Chinese).
- [15] 刘清风. 基于多离子传输的混凝土细微观尺度多相数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1074-1080.
- LIU Qingfeng. Multi-phase modelling of concrete at meso-micro scale based on multi-species transport[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(8): 1074-1080(in Chinese).
- [16] 张鹏. 应变硬化纤维增强水泥基复合材料的有限元模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- ZHANG Peng. Finite elements simulation of strain hardening fiber reinforced cementitious composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [17] LI J X, WENG J, YANG E H. Stochastic model of tensile behavior of strain-hardening cementitious composites (SHCCs)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124: 105856.
- [18] LU C, PANG Z M, CHU H, et al. Experimental and numerical investigation on the long-term performance of engineered cementitious composites (ECC) with high-volume fly ash and domestic polyvinyl alcohol (PVA) fibers[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 70: 106324.
- [19] 熊阳. PVA纤维混凝土的力学性能研究及有限元分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- XIONG Yang. Mechanical properties research and finite element analysis for PVA fiber reinforced concrete[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016(in Chinese).
- [20] CHEN D S, YANG K K, HU D L, et al. A meso-stochastic research on the chloride transport in unsaturated concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121986.
- [21] 薛兵. 基于细观尺度的钢纤维混凝土损伤破坏数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- XUE Bing. The numerical simulation study on the damage and fracture of steel fiber reinforced concrete based on mesoscopic scale[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017(in Chinese).
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程混凝土试验检测技术规

- 范: JTS/T 236—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for concrete testing of port and waterway engineering: JTS/T 236—2019[S]. Beijing: China Communication Press, 2019(in Chinese).
- [23] 陈伟. 模拟潮差环境下水泥基材料氯离子渗透时变相似性及微观机理[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- CHEN Wei. Time-varying similarity and micro mechanism of chloride ion penetration in cement-based materials in simulation tidal environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016(in Chinese).
- [24] 魏佳楠. 浪溅区混凝土氯离子侵蚀的室内模拟和实海暴露相似性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- WEI Jianan. Study on similarity between indoor simulation and marine exposure on chloride penetration into concrete in splash zone[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021(in Chinese).
- [25] 郭伟娜, 张鹏, 鲍玖文, 等. 粉煤灰掺量对应变硬化水泥基复合材料力学性能及损伤特征的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(6): 551-557.
- GUO Weinan, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Effect of fly ash content on mechanical properties and damage characteristics of strain-hardening cementitious composites[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6): 551-557(in Chinese).
- [26] 陈伟. PVA纤维混凝土力学性能及抗氯离子渗透性能试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.
- CHEN Wei. Experimental study on mechanical properties and resistance chloride penetration of PVA fiber concrete[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2019(in Chinese).