

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.014

海砂氯离子溶出机制和模型研究

陈莉¹, 李沙罡¹, 张欢¹, 黄承庚¹, 陈达^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究海砂淡化过程中氯离子的溶出机制, 采用海砂淡化试验分析不同淡化方法下溶出氯离子量与淡化时间、水砂质量比的关系; 在此基础上, 考虑海砂氯离子分布及溶出特征, 以 Fick 定律推导的溶解扩散理论为基础, 建立同时考虑海砂表面氯离子溶解和内部氯离子释放的溶出模型, 并对模型进行了验证。结果表明: 海砂氯离子溶出模型可以较好地描述海砂氯离子的溶出过程, 能够反应淡化时间和水砂质量比对海砂淡化效果的影响。

关键词: 海砂; 氯离子; 溶出模型; 淡化方法; 淡化时间; 水砂质量比

中图分类号: TU521.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2022)03-0104-06

Investigation on mechanism and model of chloride dissolution from sea sand

CHEN Li¹, LI Shagang¹, ZHANG Huan¹, HUANG Chenggeng¹, CHEN Da^{1,2}

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the dissolution mechanism of chloride in the desalination process of sea sand, desalination experiments were conducted by different methods to analyze the relationships of the amount of dissolved chloride with time and water-sand mass ratio. Based on the distribution and dissolution characteristics of chloride in sea sand, a chloride dissolution model considering both the surface chloride solution and the internal chloride dissolution was developed, from the dissolution and diffusion theory derived from the Fick's law. The results of model validations show that this model can well describe the chloride dissolution process and reflect the influences of time and water-sand mass ratio on the desalination effect of sea sand.

Key words: sea sand; chloride; dissolution model; desalination method; desalination time; water-sand mass ratio

近年来, 河砂资源紧缺, 过量的河砂开采带来了诸多环境问题^[1]。为此, 人们把目光投向了储量丰富的海砂。海砂级配良好, 含泥量少, 是一种优良的建筑材料^[2]。但海砂中含有大量的氯离子, 会导致钢筋过早发生锈蚀, 造成严重的工程质量问题^[3-4]。韩国、土耳其和我国东部沿海城市均发生过“海砂屋”倒塌事件^[5-6]。因此海砂在用于实际工程之前, 必须进行淡化处理。

常见的海砂淡化方法有自然堆置法、淡水冲洗法、机械法等^[7]。近年来, 许多学者通过试验分析了淡化方法和工艺参数对海砂淡化效果的影响。范轶^[8]和陈松敏^[9]比较了静水和机械淡化的淡化效果, 分析了淡化时间和水砂质量比的影响; 蔡照贤^[10]探究了用水量、浸泡时间和淡化次数对淡水冲洗法效果的影响; 於林锋等^[11]研究了水砂质量比与出砂、出水氯离子含量之间的关系。然而受不同试验方法和过程的影响, 已有研究成果差异较大, 规律性不强, 不便于指导工业生产, 因此需要进一步探究海砂淡化过程中氯离子的溶出规律, 分析海砂中氯离子的溶出机制。海砂氯离子的溶出过程本质上是氯盐的溶解扩散过程。张亚楠等^[12]、张响飞等^[13]分别研究了 NaCl 颗粒、混合盐压片在水中的溶解过程。而海砂中的氯盐部分附着在海砂表面, 另一部分浸入海砂内部^[14], 其溶出条件与盐在水中直接溶解不尽相同。鉴于此, 本文对海砂淡化过程进行试验及理论分析, 揭示海砂氯离子的溶出机制, 并建立同时考虑海砂表面氯离子溶解和内部氯离子释

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2020715)

作者简介: 陈莉 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事近海工程材料和结构研究。E-mail: chenli2806@163.com

通信作者: 陈达 (1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事港口航道工程、近海工程耐久性研究。E-mail: chenda@hhu.edu.cn

引用本文: 陈莉, 李沙罡, 张欢, 等. 海砂氯离子溶出机制和模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 104-109.

CHEN Li, LI Shagang, ZHANG Huan, et al. Investigation on mechanism and model of chloride dissolution from sea sand[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 104-109.

放的溶出模型,为海砂的资源化利用提供理论参考。

1 试验与分析

1.1 试验材料

所用海砂为广东湛江的海滩砂,参照 JGJ 52—2006《普通混凝土用砂、石质量及检测方法标准》测试其基本物理性质,细度模数为 2.41,级配区为Ⅱ级,表观密度为 2 610 kg/m³,堆积密度为 1 510 kg/m³,饱和面干吸水率为 2.8%。

1.2 试验方法

将海砂置于 (105±5)℃ 的烘箱中烘干至恒重,过筛去除贝壳后备用。在水砂质量比 $m_w/m_s=1$ 的情况下,分别模拟静水法、机械法、机械-静水组合法淡化海砂,测试不同时间下从海砂中溶出的氯离子量,得到单位质量砂的氯离子溶出量 ω_{out} 。静水法将海砂浸泡于蒸馏水中静置 0 h、8 h、16 h、24 h、32 h、40 h、48 h、56 h、64 h、72 h、88 h、104 h、120 h 后过滤,测量滤液中的氯离子含量;机械法淡化时,将浸水海砂机械振动 30 s、60 s、90 s、120 s、150 s、180 s、210 s、240 s、360 s、480 s、600 s、720 s 后过滤,测量滤液中的氯离子含量;机械-静水组合法试验,是将浸水海砂振动 300 s 后,再静置 96 h,每隔 12 h 测量滤液中的氯离子含量。

为了研究水砂质量比的影响,分别测试水砂质量比为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 时静置 12 h、36 h 以及振动 60 s、120 s,海砂溶出的氯离子量。

试验中氯离子浓度参照 GB 11896—89《水质 氯化物的测定 硝酸银滴定法》,使用雷磁 ZDJ-4A 自动电位滴定仪进行测定,所用滴定液 AgNO₃ 溶液的浓度为 0.01 mol/L。单位质量砂的氯离子溶出量 ω_{out} 计算公式为

$$\omega_{out} = \frac{M}{m} \times 100\%$$

(1)

式中: M 为滤液中的氯离子质量; m 为海砂的总质量。

所有试验均进行 3 次平行试验来保证测试结果的精度。

1.3 不同方法单位质量砂的氯离子溶出量与时间的关系

图 1 为静水法、机械法和机械-静水组合法 ω_{out} 与时间 t 的关系曲线。由图 1 可知,随着时间的增长,静水法和机械法溶出的氯离子量逐渐增多,且都呈现先快速增长、后缓慢上升的趋势。考虑氯离子存在于海砂表面和内部,且海砂内部氯离子的溶出速率要远低于表面,因此,可以认为在海砂淡化的过程中,溶出的氯离子分别来自海砂表面和内部,且先以海砂表面氯离子的溶解为主,待表面氯离子几乎全部溶出后,改以海砂内部氯离子释放为主。

在静水法海砂淡化初期,溶出的氯离子量几乎呈线性增长,48 h 时 ω_{out} 增加了 0.074 4%;48 h 后,海砂表面氯离子大部分溶解,氯离子溶出速率减缓,但海砂内部的氯离子仍持续缓慢释放,溶出的氯离子量缓慢增加,120 h 时的 ω_{out} 相比 48 h 时增加了 0.011 8%。同样,机械法也有相同的规律:210 s 内,溶出的氯离子量随时间近似线性增长, ω_{out} 在 210 s 时达到 0.082 3%;210 s 后,氯离子缓慢溶出。但机械法振动时间短,内部氯离子释放量很少。参考机械法的试验结果,可以认为机械-静水组合法机械振动 300 s,海砂表面的氯离子几乎全部溶出;之后静置的 96 h 中, ω_{out} 增加了 0.017 7%,增加的氯离子主要来自海砂内部氯离子的释放。

静水法淡化 48 h 时, ω_{out} 为 0.084 2%。对比机械振动 210 s 时的试验结果,可以发现,在相同的水量下,达到相似的淡化效果,机械法耗时远小于静水法,机械法的淡化效率要优于静水法。其原因是在静水法下,海砂表面氯离子与水接触面积小,溶解缓慢且不充分;而机械振动增加了海砂表面氯离子与水的接触面积,加快了氯离子的溶解^[12]。同时,还可以发现,机械法虽然能在短时间内实现海砂表面氯离子的快速溶解,但是并不能加速海砂内部氯离子的释放。海砂内部氯离子的释放主要与时间有关,与淡化方法无关。因此,当

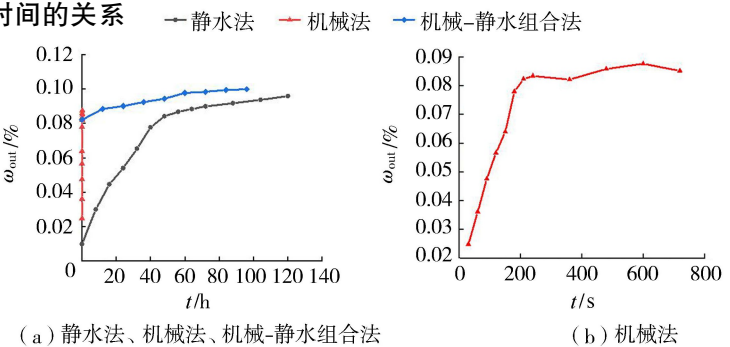


图 1 不同方法单位质量砂的氯离子溶出量与时间的关系

Fig.1 Relationship between dissolved chloride of unit mass sea sand and time by different methods

工业生产对于海砂的淡化要求较高时,可先采用机械法快速淡化,再采用静水法进行长期淡化,从而提高海砂的淡化效率和淡化质量。

1.4 水砂质量比的影响

为研究水砂质量比对不同方法淡化海砂效果的影响,分别测试得到静水法、机械法不同时间单位质量海砂 ω_{out} 与 m_w/m_s 的关系,如图2所示。

由图2可知,水砂质量比越大,海砂溶出的氯离子越多。但水砂质量比对静水法溶出氯离子量的影响较小,是因为静水法淡化海砂时,海砂堆积在底部,大部分的海砂颗粒仅与空隙水接触,而增加的淡化水主要位于海砂上部,增加的水量并不能直接对空隙水氯离子浓度起到稀释作用,因此淡化效果变化不明显。所以静水法不宜采用增加水量的方法来提高海砂淡化效果。

在机械法中,海砂与水充分混合,海砂均匀分布在淡化水中,随着水量的增加,氯离子溶出明显增加。与此同时,随着时间的增长,水砂质量比对淡化效果的影响也增大,说明水量增加可加快海砂表面氯离子的溶解速率。因此,水砂质量比对机械法淡化海砂效果影响显著。

2 海砂氯离子溶出模型

海砂氯离子的溶出分为两个部分:海砂表面氯离子的溶解和海砂内部氯离子的释放。由于海砂表面和内部氯离子的溶出条件不同,因此分别建立模型来描述这两个过程。

2.1 海砂内部氯离子释放模型

海砂内部氯离子的溶出过程为存储于海砂孔隙中的氯离子从海砂中的释放过程,此过程与储存于多孔基质中的药物进入人体血液的释放过程类似。由于药物从多孔基质中的释放过程十分复杂,Higuchi 等^[15-16]提出的药物释放模型通过一些简化和假定成功实现了药物扩散动态过程的描述。参考该方法对海砂内部孔隙中氯离子的分布和扩散进行简化。假定海砂为球形,氯离子均匀分散在其内部。考虑存在溶解边界,溶解边界以内氯离子不发生溶解,溶解边界以外氯离子以自由扩散的形式向海砂外扩散,且溶解边界到释放边界之间氯离子为稳态扩散。释放时间增加 dt ,溶解边界向内移动 dh 。以单粒砂为研究对象,海砂内部氯离子释放过程简化示意图如图3所示, R 为砂的半径, h 为溶解边界到释放边界之间的距离。

假设氯离子在海砂中的扩散是径向的,由 Fick 定律可得稳态下离子浓度分布满足:

$$\frac{d}{dt}\left(r^2 \frac{dC}{dr}\right) = 0$$

(2)

式中: r 为计算位置点至海砂中心的距离; C 为时间 t 、位置 r 处的氯离子浓度。

式(2)的通解为

$$C = U + \frac{V}{r}$$

(3)

式中 U 、 V 为由边界条件确定的常数。根据式(3),做出浓度分布图,如图4所示。图4中 A 为单位体积海砂中氯离子初始浓度; C_{sat} 为氯盐在海砂中的溶解度; C_0 为释放边界氯离子浓度。图4中的阴影部分代表 t 时刻内从海砂内部释放的氯离子量。

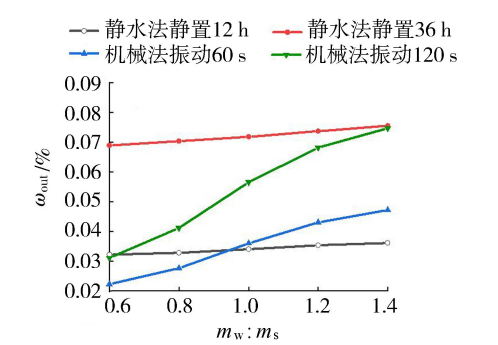


图2 静水法、机械法不同时间单位质量海砂的氯离子溶出量与水砂质量比的关系
Fig.2 Relationship between dissolved chloride of per unit mass sea sand and water-sand mass ratio under different time by hydrostatic method and mechanical method

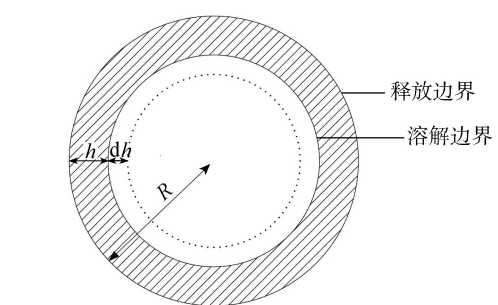


图3 海砂内部氯离子释放过程简化示意图
Fig.3 Simplified schematic diagram of chloride release process inside sea sand

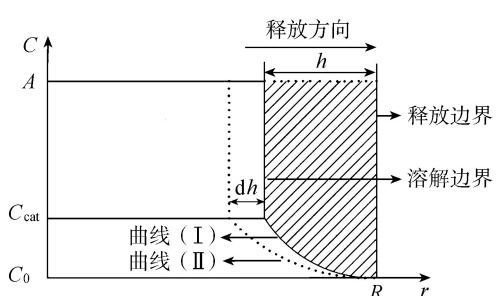


图4 海砂内部氯离子理论浓度分布
Fig.4 Theoretical concentration profile of chloride inside sea sand

当时间增加 dt ,溶解边界向内移动 dh ,释放量增加 dM 。

由式(3)可得曲线(I)和(II)的方程分别为

$$C = \frac{(R - r)(R - h)(C_{\text{sat}} - C_0)}{hr} + C_0 \tag{4}$$

$$C = \frac{(R - r)(R - h - dh)(C_{\text{sat}} - C_0)}{(h + dh)r} + C_0 \tag{5}$$

则 dt 时间增加的释放量 dM 为

$$dM = (A - C_{\text{sat}})4\pi(R - h)^2dh + 4\pi(C_{\text{sat}} - C_0)\left[\frac{Rdh}{h(h + dh)}\right]\int_{R-h}^R r(R - r)dr \tag{6}$$

根据 Fick 定律得

$$dM = 4\pi(C_{\text{sat}} - C_0)\frac{R(R - h)}{h}Ddt \tag{7}$$

式中 D 为氯离子在砂中的扩散系数。

根据式(6)和式(7)得单粒砂 t 时刻内的氯离子释放量:

$$M_{t1}' = 4\pi R^2\left\{\sqrt{2(C_{\text{sat}} - C_0)[A - (C_{\text{sat}} + C_0)]Dt} - \frac{8(C_{\text{sat}} - C_0)}{9R}\left[\frac{A - C_{\text{sat}}}{2A - (C_{\text{sat}} + C_0)} + 1\right]Dt\right\} \tag{8}$$

式中的氯离子浓度均是单位体积海砂的离子质量。将离子浓度转换为单位体积砂孔溶液下的离子质量。初始氯离子含量为

$$A^* = \frac{AV_{\text{砂}}}{V_{\text{砂}}\varphi} \tag{9}$$

则 $A^* = A/\varphi$ 。同理氯离子溶解度 $C_{\text{sat}}^* = C_{\text{sat}}/\varphi$,式中 φ 为砂的渗透孔隙率。海砂中 D 由细观力学有限差分法模型^[17]计算:

$$D = D_0\varphi^{\frac{3}{2}} \tag{10}$$

式中 D_0 为氯离子在水中的扩散系数。

在海砂淡化中, $C_0 \ll C_{\text{sat}}$,因此可以忽略 C_0 的影响,式(8)简化为

$$M_{t1}' = 4\pi R^2\left[\sqrt{2(A^* - C_{\text{sat}}^*)C_{\text{sat}}^*D_0\varphi^{\frac{7}{2}}t} + \frac{4C_{\text{sat}}^*}{9R}\left(\frac{C_{\text{sat}}^*}{2A^* - C_{\text{sat}}^*} - 3\right)D_0\varphi^{\frac{5}{2}}t\right] \tag{11}$$

因此,全部海砂 t 时刻内的内部氯离子释放量:

$$M_{t1} = \frac{m}{m_0}M_{t1}' = \frac{3m}{R\rho_0}\left[\sqrt{2(A^* - C_{\text{sat}}^*)C_{\text{sat}}^*D_0\varphi^{\frac{7}{2}}t} + \frac{4C_{\text{sat}}^*}{9R}\left(\frac{C_{\text{sat}}^*}{2A^* - C_{\text{sat}}^*} - 3\right)D_0\varphi^{\frac{5}{2}}t\right] \tag{12}$$

式中: m_0 为单粒海砂的质量; ρ_0 为海砂的表观密度。

则单位质量海砂内部氯离子溶出量 ω_{out1} 为

$$\omega_{\text{out1}} = \frac{3}{R\rho_0}\left[\sqrt{2(A^* - C_{\text{sat}}^*)C_{\text{sat}}^*D_0\varphi^{\frac{7}{2}}t} + \frac{4C_{\text{sat}}^*}{9R}\left(\frac{C_{\text{sat}}^*}{2A^* - C_{\text{sat}}^*} - 3\right)D_0\varphi^{\frac{5}{2}}t\right] \times 100\% \tag{13}$$

2.2 海砂表面氯离子溶解模型

海砂表面氯离子的溶解过程受扩散过程的控制,符合 Stumm 模型^[18]:

$$\frac{dC}{dt} = K(C_{\infty} - C_t)^n \tag{14}$$

式中: C_{∞} 为氯盐在水中的溶解度; C_t 为氯盐在 t 时刻的溶解浓度; K 为表观速率常数; n 为反应级数,海砂表面氯离子溶解速率近似呈线性,取 $n=1$ 。

海砂淡化过程中,氯盐溶解浓度远小于氯盐溶解度。因此,式(11)可简化为

$$\frac{dC}{dt} = KC_{\infty} \tag{15}$$

海砂表面氯离子的溶解量 M_2 可以表示为

$$M_2 = \begin{cases} kt + b & 0 \leq t \leq t_1 \\ M_s & t > t_1 \end{cases} \tag{16}$$

式中: k 为溶解速率; b 为起始时刻砂或水流扰动带来的少量氯离子溶解量。海砂表面氯离子完全溶解所需要的时间

$$t_1 = (M_s - b)/k$$

(17)

式中 M_s 为海砂表面总的氯离子量。

则单位质量海砂表面氯离子溶出量 ω_{out2} 为

$$\omega_{out2} = \begin{cases} \frac{kt + b}{m} \times 100\% & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{M_s}{m} \times 100\% & t > t_1 \end{cases}$$

(18)

2.3 海砂氯离子溶出模型

根据式(13)和式(18),得到海砂氯离子溶出模型:

$$\omega_{out} = \left\{ \frac{3}{R\rho_0} \left[\sqrt{2(A^* - C_{sat}^*)C_{sat}^*D_0\varphi^{\frac{7}{2}}t} + \frac{4C_{sat}^*}{9R} \left(\frac{C_{sat}^*}{2A^* - C_{sat}^*} - 3 \right) D_0\varphi^{\frac{5}{2}}t \right] + \left[H(t_1 - t) \frac{kt + b}{m} + H(t - t_1) \frac{M_s}{M} \right] \right\} \times 100\%$$

(19)

其中,单位阶跃函数

$$H(\mu) = \begin{cases} 0 & \mu < 0 \\ 1 & \mu \geq 0 \end{cases}$$

2.4 计算结果及对比较验证

部分模型参数值根据实测结果得出,忽略机械振动 300 s 海砂内部氯离子的释放,使用组合法的试验结果来确定海砂内部氯离子释放模型其他参数。使用水砂质量比的试验结果,确定海砂表面氯离子溶解模型参数。由试验结果可知,水砂质量比对静水法氯离子溶出影响很小,因此在静水法中,忽略水砂质量比的影响。此外,为避免与后续验证模型试验数据重合,确定参数时不使用水砂质量比为 1.0 的试验数据。实测参数主要有: $m=100\text{ g}$, $R=5\times10^{-4}\text{ m}$, $\rho_0=2610\text{ kg/m}^3$, $\varphi=0.1\%$, $C_{sat}^*=360\text{ g/L}$, $D_0=1.1\times10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

计算参数主要有: $A^*=1333.67\text{ g/L}$ 和 k 、 b 。其中,静水法和机械法的 k 和 b 不同,对于静水法, $k=3.812\times10^{-7}\text{ g/s}$, $b=9.801\times10^{-3}\text{ g}$;对于机械法,当 m_w/m_s 为 0.6 时, $k=1.473\times10^{-4}\text{ g/s}$, $b=1.351\times10^{-2}\text{ g}$; m_w/m_s 为 0.8 时, $k=2.245\times10^{-4}\text{ g/s}$, $b=1.426\times10^{-2}\text{ g}$; m_w/m_s 为 1.2 时, $k=4.186\times10^{-4}\text{ g/s}$, $b=1.796\times10^{-2}\text{ g}$; m_w/m_s 为 1.4 时, $k=4.584\times10^{-4}\text{ g/s}$, $b=1.976\times10^{-2}\text{ g}$ 。

机械法的溶解速率比静水法大得多,由此可见机械法海砂淡化效果优于静水法是因为海砂表面氯离子溶解速率快。随着水砂质量比的增大,机械法的溶解速率增大,起始时刻扰动带来的少量离子溶解量 b 也增大。可分别建立机械法下参数 k 和 b 与水砂质量比 m_w/m_s 的关系:

$$k = \left(4.082 \frac{m_w}{m_s} - 0.901 \right) \times 10^{-4}$$

$$b = \left(8.110 \frac{m_w}{m_s} + 8.108 \right) \times 10^{-3}$$

(20)

将式(20)代入式(19)中,即可反应水砂质量比的影响。为直观分析模型的可靠性,将海砂溶出模型的计算结果与水砂质量比为 1.0 时测得的静水法、机械法试验结果进行对比,如图 5 所示。

由对比结果可知,模型计算结果与试验结果非常接近,证明所建立的海砂氯离子溶出模型可以较好地描述海砂氯离子的溶出过程。

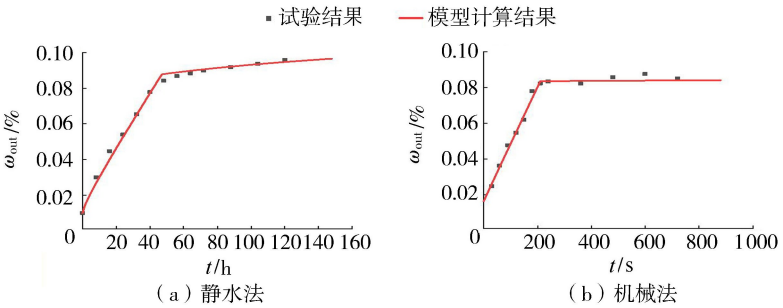


图5 静水法和机械法试验结果与模型计算结果对比

Fig.5 Comparisons between test and model results by hydrostatic method and mechanical method

3 结 论

a. 海砂氯离子的溶出可分为海砂表面氯离子的快速溶解和海砂内部氯离子的缓慢释放。机械法通过加快海砂表面氯离子溶解速率来提高淡化效率,但不能加速海砂内部氯离子的释放。

b. 水砂质量比增大,海砂溶出的氯离子量增大。水砂质量比对静水法的淡化效果影响很小,对机械法的淡化效果影响显著。机械法中,海砂表面氯离子溶解完成之前,水砂质量比增大可加快海砂表面氯离子的溶解。

c. 基于 Fick 定律推导的溶解扩散理论,结合海砂氯离子的溶出条件,建立了同时考虑海砂表面氯离子溶解和海砂内部氯离子释放的海砂氯离子溶出模型。对比试验结果和模型计算结果,证明模型可以较好地描述海砂氯离子的溶出过程。该模型可以反映淡化时间和水砂质量比对海砂淡化效果的影响,为洗砂工艺提供了理论指导。

参考文献:

- [1] BENDIXEN M,BEST J,HACKNEY C,et al. Time is running out for sand[J]. Nature,2019,571(7763):29-31.
- [2] 黄一杰,吴纪达,肖建庄,等. 钢管海砂再生混凝土轴压性能试验与分析[J]. 建筑材料学报,2018,21(1):85-90. (HUANG Yijie,WU Jida,XIAO Jianzhuang,et al. Experimental study and analysis on axial compressive behavior of sea-sand recycled concrete filled steel tube[J]. Journal of Building Materials,2018,21(1):85-90. (in Chinese))
- [3] 刘军,董必钦,邢锋,等. 海砂氯离子与水泥胶体结合的模拟实验与结合机理[J]. 硅酸盐学报,2009,37(5):862-866. (LIU Jun,DONG Biqin,XING Feng,et al. Simulation experiment and mechanism of the combining of sea sand type chlorine ions in cement materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2009,37(5):862-866. (in Chinese))
- [4] 陈平,徐金霞,冯伟,等. 聚羧酸减水剂对水泥浆结合氯离子性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):48-54. (CHEN Ping,XU Jinxia,FENG Wei,et al. Influence of polycarboxylate superplasticizer on the chloride binding in cement paste[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(1):48-54. (in Chinese))
- [5] 洪乃丰. 海砂腐蚀与“海砂屋”危害[J]. 工业建筑,2004,34(11):65-67. (HONG Naifeng. Sea sand corrosion and harm of “sea sand house”[J]. Industrial Construction,2004,34(11):65-67. (in Chinese))
- [6] 李师材,于泳,金祖权. 海水海砂混凝土力学性能与耐久性研究综述[J]. 硅酸盐通报,2020,39(12):3743-3752. (LI Shicai,YU Yong,JIN Zuquan. Review on mechanical properties and durability of seawater and sea-sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(12):3743-3752. (in Chinese))
- [7] 李秀琳. 关于海砂淡化的处理方法分析[J]. 福建建材,2020(5):29-30. (LI Xiulin. Analysis on the treatment method of sea sand desalination[J]. Fujian Building Materials,2020(5):29-30. (in Chinese))
- [8] 范轶. 海砂的优选淡化技术及在水泥混凝土路面中的应用研究[D]. 广州:广东工业大学,2014.
- [9] 陈松敏. 海砂淡化技术的研究[J]. 广州化工,2017,45(13):97-99. (CHEN Songmin. Study on desalination technology of sea sand[J]. Guangzhou Chemical Industry,2017,45(13):97-99. (in Chinese))
- [10] 蔡照贤. 淡化海砂用水量的研究[J]. 福建建材,2020(3):20-21. (CAI Zhaoxian. Research on water consumption for desalination of sea sand[J]. Fujian Building Materials,2020(3):20-21. (in Chinese))
- [11] 於林锋,王琼,施钟毅,等. 海砂的性能及新型净化工艺研究[J]. 粉煤灰,2011,23(5):12-14. (YU Linfeng,WANG Qiong,SHI Zhongyi,et al. Research on marine sand performances and new purification process[J]. Coal Ash,2011,23(5):12-14. (in Chinese))
- [12] 张亚楠,薛济来,朱骏,等. 超声功率对水溶液中 NaCl 颗粒溶解速率的影响[J]. 中国科技论文,2014,9(12):1336-1339. (ZHANG Yanan,XUE Jilai,ZHU Jun,et al. Effect of ultrasound power on the dissolution rate of NaCl particles in aqueous solution[J]. China Sciencepaper,2014,9(12):1336-1339. (in Chinese))
- [13] 张响飞,边绍菊,高丹丹,等. 25℃下 Na₂CO₃/Na₂SO₄/NaCl 混合盐的溶解动力学研究[J]. 化学通报,2017,80(9):852-857. (ZHANG Xiangfei,BIAN Shaoju,GAO Dandan,et al. Study on the dissolution kinetics of Na₂CO₃/Na₂SO₄/NaCl mixture in pure water at 25℃[J]. Chemistry Bulletin,2017,80(9):852-857. (in Chinese))
- [14] 刘军,邢锋,董必钦,等. 模拟海砂混凝土中氯离子扩散研究[J]. 混凝土,2008(3):33-35. (LIU Jun,XING Feng,DONG Biqin,et al. Research of chloride diffusion in sea sand concrete[J]. Concrete,2008(3):33-35. (in Chinese))
- [15] HIGUCHI T. Rate of release of medicaments from ointment bases containing drugs in suspension[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences,1961,50:874-875.
- [16] KOIZUMI T,PANOMSUK S P. Release of medicaments from spherical matrices containing drug in suspension;theoretical aspects [J]. International Journal of Pharmaceutic,1995,116:45-49.
- [17] TIMOTHY J J,MESCHKE G. A micromechanics model for molecular diffusion in materials with complex pore structure[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2015,40(5):686-712.
- [18] 斯塔姆,摩尔根. 水化学:天然水体化学平衡导论[M]. 汤鸿霄,译. 北京:科学出版社,1987:129-134.