

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.024



环境温度对混凝土管桩氯离子扩散性能的影响

邵伟¹, 史旦达¹, 李镜培²

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:基于 Fick 第二扩散定律, 建立混凝土管桩中考虑环境温度和氯离子结合能力的氯离子扩散模型。针对环境温度对混凝土管桩中氯离子扩散性能的影响开展试验研究, 将不同水灰比 (0.30、0.45 和 0.55) 混凝土管桩置于不同温度 (21、30、50 °C) 的 5% 氯化钠盐雾中, 开展为期 32 d 的浸泡试验。依据试验结果和氯离子扩散模型, 得到不同温度条件下、不同水灰比混凝土管桩中的自由氯离子浓度分布、表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数、活化能和氯离子结合能力值。试验结果表明: 随着环境温度的升高, 自由氯离子浓度、表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数增大。随着环境温度从 21 °C 升高到 30 °C, 氯离子结合能力显著增加, 但随着环境温度从 30 °C 升高到 50 °C, 氯离子结合能力却略有减小。由于表观氯离子扩散系数的对数与环境绝对温度的倒数呈线性变化规律, 因此, 可推断氯离子在混凝土管桩中的扩散符合 Arrhenius 理论。

关键词:环境温度; 氯离子扩散; 钢筋混凝土管桩; 氯离子

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)02-0012-08

Effect of environment temperature on chloride diffusion in RC pipe piles

Shao Wei¹, Shi Danda¹, Li Jingpei²

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, P. R. China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Based on Fick's second law of diffusion, the chloride diffusion equation in reinforced concrete (RC) pipe pile was developed considering the effects of environment temperature and chloride binding. The experimental study on the effect of environment temperature on chloride diffusion in RC pipe pile was conducted in this paper. RC pipe piles with different water-to-cement (w/c) ratios (0.30, 0.45 and 0.55) were exposed to 5% chloride salt spray for 32 days at different exposure temperatures (21, 30, 50 °C). Based on the experimental results and proposed model, the chloride concentration profiles, surface chloride concentration, apparent and effective diffusion coefficients, activation energy and binding capacity values of RC pipe piles with different w/c ratios at different exposure temperatures were explored. The experimental results show that the free chloride concentration, surface chloride concentration, apparent and effective diffusion coefficients increase with the environment temperature. The binding capacity increases significantly with the increase of environment temperature from 21 to 30 °C. However, the binding capacity decreases slightly when the environment temperature increases from 30 to 50 °C. It could be concluded that the chloride diffusion into RC pipe pile follows the Arrhenius theory due to the linear distribution of the

收稿日期: 2018-05-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51609135, 41772273)

作者简介: 邵伟 (1984-), 男, 博士, 主要从事近海岩土工程结构耐久性研究, E-mail: shaowei2775@163.com。

Received: 2018-05-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51609135, 41772273)

Author brief: Shao Wei (1984-), PhD, main research interest: durability of offshore engineering structures, E-mail: shaowei2775@163.com.

log-variation of apparent diffusion coefficient with the inverse of absolute temperature.

Keywords: environment temperature; chloride diffusion; reinforced concrete pipe pile; chloride

服役于沿海地区的钢筋混凝土管桩经常遭受强烈的季节性温度变化,这对钢筋混凝土管桩中氯离子扩散性能影响较大。首先,环境温度的升高引起分子运动速度加快,进而加速了氯离子在混凝土中的扩散。其次,环境温度的升高引起氯离子的热运动加快,进而导致氯离子物理结合能力下降。相反,环境温度的升高加快了化学反应的速率,因而增大了氯离子的化学结合能力^[1-2]。因此,研究环境温度对氯离子侵蚀环境下钢筋混凝土管桩中氯离子扩散性能的影响具有重要意义。

目前,学者们已针对环境温度对钢筋混凝土结构中氯离子扩散性能的影响开展了大量理论和试验研究。鲁彩凤等^[3]基于氯离子在非饱和和多孔介质中的传输机理,研究了海洋大气环境下氯离子在粉煤灰混凝土中的传输规律,探讨了环境温度和相对湿度对氯离子传输速率的影响。刘毅^[4]推导了考虑温度影响的氯离子扩散系数计算公式,并得到了混凝土中氯离子扩散的活化能值。张伟平等^[5]开展了不同侵蚀角度、氯化钠溶液质量浓度、环境温度、应力水平下的混凝土盐雾加速侵蚀试验,探讨了不同环境条件下氯离子在混凝土中的扩散规律。徐文冰等^[6]基于炎热气候条件下氯盐对混凝土结构侵蚀机理,研究了环境温度对混凝土氯离子扩散性能的影响。杨海成等^[7]通过开展混凝土在不同环境温度和养护龄期的室内盐水浸泡试验,研究了环境温度和养护龄期对普通混凝土和高性能混凝土氯离子侵蚀规律的影响。Oh等^[8]基于氯离子扩散机理,建立了考虑温度、龄期、相对湿度、氯离子结合能力、对流等因素的氯离子传输模型,并开展了混凝土的浸泡试验对所建模型进行验证。Samson等^[9]从温度场、温度对氯离子扩散系数的影响以及温度对化学反应的影响等方面研究了环境温度对水泥基材料中氯离子传输的影响。Care^[10]和Nguyen等^[11]通过对不同水灰比水泥基材料开展不同温度条件下氯离子扩散试验,研究了环境温度对水泥基材料中氯离子扩散性能的影响。Isteita等^[12]基于新试验技术对不同水灰比和不同温度梯度条件下混凝土中氯离子扩散性能开展了系统性的试验研究,结果表明,当温度梯度与氯离子浓度梯度同向时,温度的升高会显著加速氯离子在混凝土中的扩散过程。但上述研究主要针对环境温度对暴露于水下区域普通钢筋混凝土结构中氯离子扩散性能的影响,关于温度对海洋大气腐蚀环境下钢筋混凝土管桩中氯离子扩散性能的影响

还少有报道。因此,有必要对此进行更加深入的研究。

本文建立了混凝土管桩中考虑环境温度和氯离子结合能力的氯离子扩散模型,通过对不同环境温度条件下不同水灰比钢筋混凝土管桩进行盐雾腐蚀试验,模拟了海洋大气腐蚀环境下混凝土管桩中氯离子的扩散过程。依据试验结果和氯离子扩散模型,得到了不同环境温度条件下不同水灰比钢筋混凝土管桩中的自由氯离子浓度分布、表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数、活化能和氯离子结合能力值。基于上述试验结果,分析研究了环境温度对海洋大气腐蚀环境下混凝土管桩氯离子扩散性能的影响。

1 氯离子扩散模型

基于 Fick 第二扩散定律,混凝土管桩中氯离子的扩散方程为^[13]

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = D_c w_e \left(\frac{1}{r} \frac{\partial C_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

式中: C_t 为总氯离子浓度,kg/m³; t 为暴露时间; r 为管桩的径向半径,m; D_c 为氯离子有效扩散系数,m²/s; w_e 为蒸发水含量,%; C_f 为孔隙溶液中的自由氯离子浓度,kg/m³。总氯离子浓度(C_t)、结合氯离子浓度(C_b)和自由氯离子浓度(C_f)之间的关系为^[14]

$$C_t = C_b + w_e C_f \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得自由氯离子浓度表示的混凝土管桩中氯离子扩散方程。

$$\left(\frac{\partial C_b}{\partial C_f} + w_e \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = D_c w_e \left(\frac{1}{r} \frac{\partial C_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} \right) \quad (3)$$

式(3)可改写为

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = D_a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial C_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} \right) \quad (4)$$

其中

$$D_a = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{w_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \quad (5)$$

式中: D_a 为氯离子表观扩散系数,m²/s; $\partial C_b / \partial C_f$ 为胶凝材料对氯离子的结合能力,被定义为结合氯离子与自由氯离子关系曲线的斜率,用来表征胶凝材料中自由氯离子与结合氯离子之间的平衡关系。假定结合氯离子和自由氯离子之间为线性关系,即在某一温度条件下氯离子结合能力为常数。基于上述假定,氯离子结合能力可表达为

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),可得

$$D_a = \frac{D_c}{1 + \frac{\alpha}{w_e}} \quad (7)$$

式(7)中蒸发水含量(w_e)可利用式(8)进行估算^[15]。

$$w_e = \frac{CkV_m h}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]} \quad (8)$$

式中: C 、 k 和 V_m 分别为与温度、水灰比(w/c)和混凝土水化程度相关的参数。 Xi 等^[16]通过对试验结果进行拟合分析,给出了 $t_c \geq 5$ d且 $0.3 < w/c \leq 0.7$ 时上述参数的拟合公式。

$$C = \exp\left(\frac{855}{T}\right) \quad (9)$$

$$k = \frac{(1 - 1/n_w)C - 1}{C - 1} \quad (10)$$

$$n_w = (2.5 + \frac{15}{t_c})(0.33 + 2.2w/c)N_{ct} \quad (11)$$

$$V_m = (0.068 - \frac{0.22}{t_c})(0.85 + 0.45/c)V_{ct} \quad (12)$$

式中: T 为混凝土内的当前绝对温度,K; t_c 为混凝土水化时间,d; N_{ct} 和 V_{ct} 为与水泥类型相关的参数,本文取 $N_{ct} = V_{ct} = 1.0$ 。式(7)中氯离子有效扩散系数 D_c 与环境温度相关,考虑环境温度影响的氯离子有效扩散系数可以表示为^[17]

$$D_c = D_{c,ref} \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (13)$$

式中: $D_{c,ref}$ 为氯离子在参考温度时的扩散系数, m^2/s ; E_a 为氯离子在管桩扩散过程中的活化能,kJ/mol; R 为理想气体常数, 8.31×10^{-3} kJ/(mol·K⁻¹); T_{ref} 为参考温度, $T_{ref} = 296$ K。基于大量的试验和分析方法,学者们提出大量模型来评估氯离子在参考温度时的扩散系数。一般认为,氯离子在参考温度时的扩散系数主要受水灰比的影响。本文采用式(14)来评估氯离子在参考温度时的扩散系数^[18]。

$$D_{c,ref} = 1 - 12.6 + 2.4w/c \quad (14)$$

假定钢筋混凝土管桩初始氯离子浓度为零,管桩内、外保护层均处于氯离子环境中,基于上述假设,式(4)的初始和边界条件为

$$\begin{cases} C_f(r, 0) = 0, & (t = 0, a \leq r \leq b) \\ C_f(a, t) = C_s, & (t > 0, r = a) \\ C_f(b, t) = C_s, & (t > 0, r = b) \end{cases} \quad (15)$$

式中: a 和 b 分别为混凝土管桩的内、外半径; C_s 为管桩内、外侧的表面氯离子浓度, kg/m^3 。假定表面氯离子浓度为不依赖于时间的常数,则可得式(4)的解为

$$C_f(r, t) = C_s \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi J_0(\alpha_n a) U_0(\alpha_n r)}{J_0(\alpha_n a) + J_0(\alpha_n b)} e^{-D_a \alpha_n^2 t} \right] \quad (16)$$

式中: α_n 为方程 $U_0(\alpha_n a) = 0$ 的根;其中 $U_0(\alpha_n r) = J_0(\alpha_n r)Y_0(\alpha_n b) - J_0(\alpha_n b)Y_0(\alpha_n r)$; J_0 和 Y_0 分别为第一类和第二类零阶 Bessel 函数。

2 试验方案

2.1 试验材料与试件制备

试验采用水泥为 52.5 级硅酸盐水泥,浇筑用水为普通自来水,细骨料采用细度模数为 2.6~3.0 的河砂,表观密度为 2 640 kg/m^3 ,连续级配。粗骨料采用粒径为 5~20 mm 的石灰岩碎石,表观密度为 2 760 kg/m^3 ,连续级配。试验制作 3 种不同水灰比($w/c = 0.30, 0.45$ 和 0.55)的混凝土管桩试件,试件的实验室设计配合比如表 1 所示。试验所采用的混凝土管桩外径为 600 mm,内直径为 400 mm,壁厚为 100 mm,高度为 100 mm。采用强制式搅拌机进行搅拌,并用振动台振捣密实。混凝土管桩试件浇筑后 24 h 拆模,然后,将管桩试件放入温度为 20 °C ± 2 °C、湿度为 95% ± 5% 的标准养护箱中养护 28 d。为了确保氯离子只发生径向扩散,将混凝土管桩试件的上下表面用环氧涂层进行处理。

表 1 混凝土管桩配合比

Table 1 Concrete mixture proportions

水灰比	水 / ($kg \cdot m^{-3}$)	水泥 / ($kg \cdot m^{-3}$)	砂 / ($kg \cdot m^{-3}$)	石子 / ($kg \cdot m^{-3}$)
0.30	126	420	684	1 217
0.45	162	360	720	1 153
0.55	176	320	795	1 086

2.2 盐雾腐蚀试验

为了模拟大气腐蚀环境,通过对混凝土管桩进行盐雾腐蚀试验来评估环境温度对混凝土管桩中氯离子扩散性能的影响。将管桩试件放置于浓度为 5% 的氯化钠盐雾腐蚀试验箱中进行不同温度条件下(21、30、50 °C)的盐雾腐蚀试验。盐雾溶液采用纯度为 99.9% 的分析纯氯盐和蒸馏水配置而成。在试验过程中,环境温度和相对湿度可以通过腐蚀试验箱进行控制和调节,设定相对湿度为 85%,盐雾的喷雾速率为 2 cm^3/s 。侵蚀 32 d 后,将试件从盐雾腐蚀试验箱中取出,然后对其进行水溶性氯离子(自由氯离子)浓度测定。

2.3 氯离子含量测定

浸泡周期完成后,将管桩试件从盐雾腐蚀试验箱中取出并风干后,用混凝土小型钻机对管桩试件

进行逐层磨粉取样,钻孔设备为小型钻机,合金钻头为 6 mm,对每个试件用钻头取 3 个位置,分别在离暴露表面 1、5、15、25、35 mm 深度处进行粉末样品取样,然后将粉末样品置于 $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘 2 h,取出后放入干燥器中冷却至室温,接着将粉末样品收集在封闭的塑料袋中备用;最后,从不同深度处的粉末样品中取 5 g 的粉末样品浸泡于 30 mL 的去离子水中,搅匀后静置 48 h,然后,通过电位滴定法测定各个深度处的自由氯离子浓度。当确定自由氯离子浓度分布后,结合式(16)对氯离子浓度分布曲线进行拟合,得到不同配比管桩试件的表面氯离子浓度 C_s 和表观扩散系数 D_a 参数值。然后,利用式(13)计算氯离子扩散过程中的活化能值 E_a ,利用式(13)和式(14)计算氯离子有效扩散系数 D_c 。利用式(8)计算得到蒸发水含量 w_e 值后,可利用式(7)计算得到氯离子结合能力 α 。主要参数的具体计算过程如图 1 所示。基于上述试验结果,分析研究环境温度对海洋大气腐蚀环境下混凝土管桩氯离子扩散性能的影响。

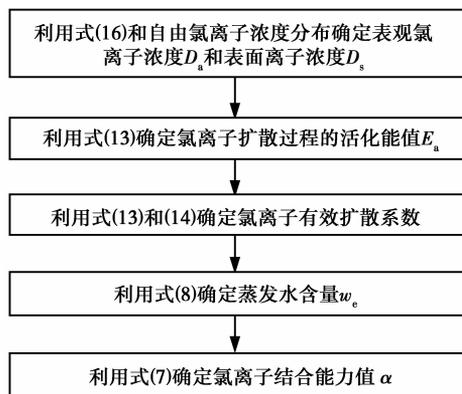


图 1 主要参数的计算流程图

Fig. 1 Calculation flowchart of main parameters

3 试验结果

3.1 氯离子浓度分布

图 2 给出了暴露于盐雾腐蚀环境 32 d 后,不同温度条件下,不同水灰比管桩中的自由氯离子浓度分布。管桩中的自由氯离子浓度沿着暴露深度呈逐渐递减的趋势。环境温度越大,相同深度处的自由氯离子浓度越大。对于水灰比为 0.30 的管桩,当环境温度从 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,1 mm 深度处的氯离子浓度从 0.16% 逐渐增加到 0.26%。对于水灰比为 0.55 的管桩,当环境温度从 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,1 mm 深度处的氯离子浓度分别从 0.18% 逐渐增加到 0.31%。在其他深度处,环境温度对氯离子浓度的影响呈现相似的变化规律。因而,环境温度被认为是影

响管桩中氯离子浓度分布的重要因素之一。此外,对比相同温度条件下不同水灰比管桩中的氯离子浓度分布,可以发现,在相同深度处,管桩混凝土水灰比越大,管桩中自由氯离子浓度也越大。这意味着水灰比对氯离子在管桩中的扩散也有显著的影响。

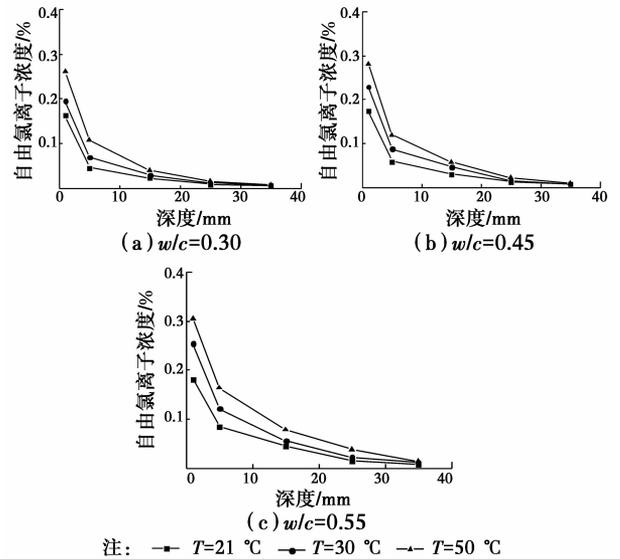


图 2 自由氯离子浓度分布曲线

Fig. 2 Free chloride concentration profiles

3.2 表面氯离子浓度

假定表面氯离子浓度和氯离子扩散系数均为独立变量,则表面氯离子浓度可以通过对氯离子浓度分布曲线进行拟合得到^[19-20]。不同温度条件下,不同水灰比管桩的表面氯离子浓度拟合值见表 2。图 3 给出了不同水灰比管桩的表面氯离子浓度随环境温度的变化曲线。随着环境温度的升高,表面氯离子浓度增大。这是由温度升高所引起的管桩表面盐水分子与水泥浆之间的强结合所引起的。此外,对比相同温度条件下,不同水灰比管桩的表面氯离子浓度,可以发现:在相同温度条件下,水灰比越大,表面氯离子浓度越大。这是由不同水灰比所引起的不同孔隙结构所导致的。对于水灰比更大的管桩,其孔隙结构较疏松,因而导致较多的氯离子附着在管桩表面。

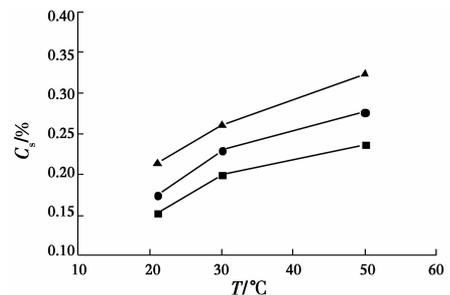
注: \blacksquare $w/c=0.30$ \bullet $w/c=0.45$ \blacktriangle $w/c=0.55$

图 3 表面氯离子浓度随环境温度的变化曲线

Fig. 3 Variation of surface chloride concentration with environmental temperature

3.3 氯离子表观扩散系数

将自由氯离子浓度分布与式(16)进行拟合,可得到氯离子表观扩散系数。表 2 给出了不同温度条件下不同水灰比钢筋混凝土管桩的氯离子扩散系数。由表 2 可知:当环境温度从 21 ℃升高到 50 ℃时,氯离子在水灰比分别为 0.30、0.45 和 0.55 的管桩中的表观扩散系数分别增加了 3.18、2.96 和 3.06 倍。这是因为环境温度的升高增大了氯离子在混凝土孔隙中的扩散速率,因而减小了水分子在混凝土表面的等待时间,进而增大了氯离子表观扩散系数。因此,由于氯离子表观扩散系数的增大,服役于炎热地区的钢筋混凝土管桩劣化更快。此外,图 4 给出了不同水灰比混凝土管桩中氯离子表观扩散系数随环境温度的变化规律。氯离子表观扩散系数随着环境温度的升高逐渐增大。水灰比越大,环境温度对氯离子表观扩散系数的影响也越大。换言之,水灰比越小的管桩对环境温度的升高越不敏感。因而,随着环境温度的升高,氯离子在水灰比越大的管桩中扩散越快。

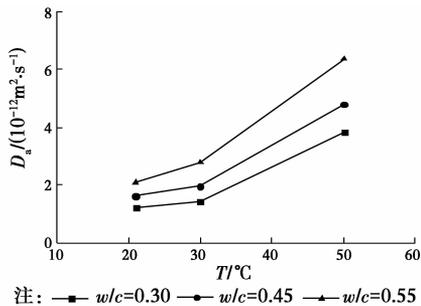


图 4 表观扩散系数随环境温度的变化曲线

Fig. 4 Variation of apparent diffusion coefficient with environmental temperature

3.4 氯离子扩散活化能

活化能是评估不同温度条件下氯离子表观扩散系数的最重要参数^[21]。图 5 给出了不同水灰比条件下混凝土管桩的 Arrhenius 曲线。表观扩散系数的对数与环境温度的倒数呈线性变化。因而,可以推断氯离子在钢筋混凝土管桩中扩散符合 Arrhenius 理论。

通过计算图 5 中曲线的斜率,可以得到不同水灰比条件下氯离子在管桩中扩散过程中的活化能值,见表 2。由表 2 可知:水灰比为 0.30 时,氯离子在管桩中扩散过程中活化能值大于水灰比为 0.45 和 0.55 时的管桩活化能值,但水灰比对活化能的影响无明确变化趋势。所得到的活化能够用于计算不同温度条件下的氯离子扩散系数。

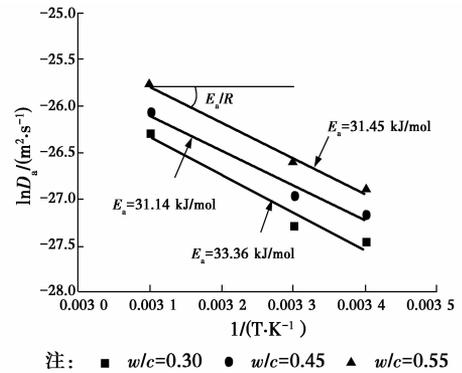


图 5 不同水灰比混凝土管桩的 Arrhenius 曲线

Fig. 5 Arrhenius plots of RC pipe pile with different w/c ratios

表 2 表面氯离子浓度、蒸发水含量、表观和有效扩散系数、活化能和结合能力值

Table 2 Surface chloride concentration, evaporable water content, apparent and effective diffusion coefficient, activation energy and binding capacity values

w/c	T/℃	C _s /%	D _a / (10 ⁻¹² m ² · s ⁻¹)	E _a (kJ/mol)	w _c /%	D _c / (10 ⁻¹² m ² · s ⁻¹)	α
0.30	21	0.154	1.20		14.91	4.168	0.369
	30	0.200	1.42	33.36	14.79	6.253	0.503
	50	0.237	3.82		14.52	14.202	0.395
0.45	21	0.175	1.62		20.56	9.607	1.014
	30	0.230	1.95	31.14	20.43	14.028	1.265
	50	0.277	4.80		20.12	30.170	1.063
0.55	21	0.215	2.08		24.43	16.681	1.715
	30	0.261	2.78	31.45	24.28	24.449	1.893
	50	0.324	6.36		23.94	52.986	1.755

3.5 氯离子有效扩散系数

依据式(13)和式(14),可以得到不同温度条件下不同水灰比混凝土管桩中的氯离子有效扩散系数,见表2。图6给出了不同水灰比混凝土管桩中氯离子有效扩散系数随环境温度的变化规律。氯离子有效扩散系数随着环境温度的升高逐渐增大。当环境温度从21℃升高到50℃时,氯离子在水灰比分别为0.30、0.45和0.55的管桩中的有效扩散系数分别增加了3.41、3.14和3.18倍。此外,从图中也可以看出,在相同环境温度条件下,混凝土管桩水灰比越大,氯离子有效扩散系数也越大。

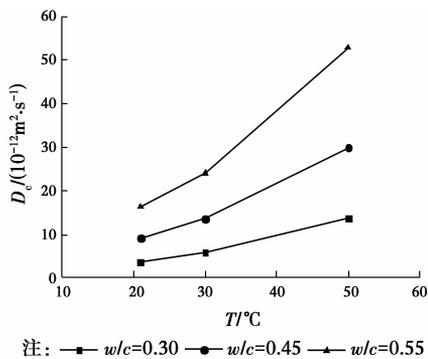


图6 有效扩散系数随环境温度的变化曲线

Fig. 6 Variation of effective diffusion coefficient with environmental temperature

3.6 氯离子结合能力

根据氯离子表观和有效扩散系数,可以计算得到不同温度条件下,不同水灰比混凝土管桩的氯离子结合能力,计算结果见表2。图7给出了不同水灰比混凝土管桩中氯离子结合能力随环境温度的变化曲线。随着环境温度从21℃升高到30℃,混凝土管桩的氯离子结合能力呈现出增大的趋势。具体地,对于水灰比分别为0.30、0.45和0.55的混凝土管桩,随着环境温度从21℃升高到30℃,氯离子结合能力从0.369、1.014和1.715分别增大到0.503、1.265和1.893。但随着环境温度从30℃升高到50℃,氯离子结合能力略有下降。对于水灰比分别为0.30、0.45和0.55的混凝土管桩,随着环境温度从30℃升高到50℃,氯离子结合能力从0.503、1.265和1.893分别减小到0.395、1.063和1.755。产生这种现象的主要原因在于:环境温度的升高引起氯离子的热运动加快,进而导致氯离子物理吸附作用下降;相反地,温度的升高也可以加快化学反应速率,因而能够增大氯离子化学结合能力。当环境温度小幅度升高时,氯离子化学结合能力的增大幅度大于氯离子物理吸附作用的下降幅度,因而导致

氯离子结合能力逐渐增大;但当环境温度继续升高时,氯离子物理吸附作用的下降幅度略大于氯离子化学结合能力,因而导致氯离子结合能力略有下降。

此外,水灰比对氯离子结合能力也有显著的影响。在相同环境温度条件下,水灰比越大的混凝土管桩,氯离子结合能力也相对较大。当环境温度为30℃时,对比水灰比为0.30的混凝土管桩,水灰比分别为0.45和0.55的混凝土管桩中氯离子结合能力值分别增大了151.5%和276.3%。其原因是,一方面,水灰比越大,混凝土中水泥的水化程度越高,生成的水化产物越多,从而提高了氯离子化学结合能力;另一方面,水灰比越大的混凝土,其孔结构较疏松,毛细孔较多,孔隙表面对氯离子的物理吸附作用更加显著。因此,水灰比越大时,混凝土的氯离子结合能力也就越强。

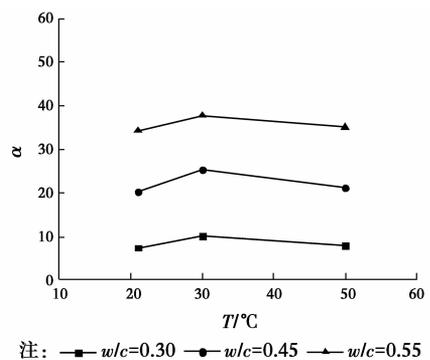


图7 氯离子结合能力随环境温度的变化曲线

Fig. 7 Variation of chloride binding capacity with environmental temperature

4 结论

建立混凝土管桩中考虑环境温度和氯离子结合能力的氯离子扩散模型,通过对不同环境温度条件下不同水灰比钢筋混凝土管桩进行盐雾腐蚀试验,模拟了海洋大气腐蚀环境下混凝土管桩中氯离子的扩散过程。依据试验结果和氯离子扩散模型,得到了不同环境温度条件下不同水灰比钢筋混凝土管桩中的自由氯离子浓度分布、表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数、活化能和氯离子结合能力值。基于上述试验结果,分析研究环境温度对海洋大气腐蚀环境下混凝土管桩氯离子扩散性能的影响。由分析结果可得到以下结论:

1) 环境温度对表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数有较大影响。随着环境温度的升高,表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数增大。

随着环境温度从 21 °C 升高到 30 °C, 氯离子结合能力显著增加, 但随着环境温度从 30 °C 升高到 50 °C, 氯离子结合能力略有减小。

2) 在相同环境温度条件下, 管桩水灰比越大, 相同深度处的自由氯离子浓度越大, 且表面氯离子浓度、氯离子表观和有效扩散系数以及氯离子结合能力也越大。

3) 表观氯离子扩散系数的对数与环境绝对温度的倒数呈线性变化规律。据此可以推断, 氯离子在管桩中的扩散符合 Arrhenius 理论。

参考文献:

- [1] YUAN Q, SHI C J, DE SCHUTTER G, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment-A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): 1-13.
- [2] PANESAR D K, CHIDIAC S E. Effect of cold temperature on the chloride-binding capacity of cement [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2011, 25(4): 133-144.
- [3] 鲁彩凤, 袁迎曙, 季海霞, 等. 海洋大气中氯离子在粉煤灰混凝土中的传输规律[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(4): 681-690.
- LU C F, YUAN Y S, JI H X, et al. Chloride ion transport in fly ash concrete under marine atmospheric environment [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(4): 681-690. (in Chinese)
- [4] 刘毅. 混凝土中温度对氯离子扩散系数的影响分析[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(3): 325-327, 332.
- LIU Y. Analysis on the influence of temperature on chloride ion diffusion in the concrete [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2013, 31(3): 325-327, 332. (in Chinese)
- [5] 张伟平, 张庆章, 顾祥林, 等. 环境条件和应力水平对混凝土中氯离子传输的影响[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(1): 101-106.
- ZHANG W P, ZHANG Q Z, GU X L, et al. Effects of environmental conditions and stress level on chloride ion transport in concrete [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2013, 34(1): 101-106. (in Chinese)
- [6] 徐文冰, 孙策, 李进辉, 等. 温度对海工混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响及寿命预测[J]. *公路*, 2014, 59(10): 50-54.
- XU W B, SUN C, LI J H, et al. Influence of temperature on marine concrete anti-chloride corrosion ability and analysis on life forecast [J]. *Highway*, 2014, 59(10): 50-54. (in Chinese)
- [7] 杨海成, 杜安民, 范志宏, 等. 温度对混凝土中氯离子扩散性能的影响[J]. *水运工程*, 2015(10): 20-26.
- YANG H C, DU A M, FAN Z H, et al. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concrete [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2015(10): 20-26. (in Chinese)
- [8] OH B H, JANG S Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(1): 47-53.
- [9] SAMSON E, MARCHAND J. Modeling the effect of temperature on ionic transport in cementitious materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(3): 455-468.
- [10] CARÉ S. Effect of temperature on porosity and on chloride diffusion in cement pastes [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): 1560-1573.
- [11] NGUYEN T S, LORENTE S, CARCASSES M. Effect of the environment temperature on the chloride diffusion through CEM-1 and CEM-V mortars; An experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2): 795-803.
- [12] ISTEITA M, XI Y P. The effect of temperature variation on chloride penetration in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 73-82.
- [13] VAL D V, TRAPPER P A. Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2008, 93: 364-372.
- [14] HWANG C C. Analysis of diffusion and extraction in hollow cylinders for some boundary conditions [J]. *IOSR Journal of Engineering*, 2012, 2(8): 141-151.
- [15] SHAZALI M A, RAHMAN M K, AL-GADHIB A H, et al. Transport modeling of chlorides with binding in concrete [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012, 37(2): 469-479.
- [16] XI Y P, BAŽANT Z P, JENNINGS H M. Moisture diffusion in cementitious materials Adsorption isotherms [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1994, 1(6): 248-257.
- [17] DOUSTI A, RASHETNIA R, AHMADI B, et al. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite

- [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 393-399.
- [18] THOMAS M D A, BENTZ E C. Life-365 service life prediction model and computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides [R]. Life-365 Consortium I, 2000.
- [19] SONG H W, LEE C H, ANN K Y. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(2): 113-121.
- [20] ANN K Y, AHN J H, RYOU J S. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): 239-245.
- [21] OTSUKI N, MADLANGBAYAN M S, NISHIDA T, et al. Temperature dependency of chloride induced corrosion in concrete [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2009, 7(1): 41-50.

(编辑 王秀玲)