

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2021.055

# 海砂超高性能混凝土试验

韦建刚<sup>1,2</sup>, 陈荣<sup>1</sup>, 黄伟<sup>1,3</sup>, 卞学海<sup>1</sup>, 麻秀星<sup>3</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福州 350116; 2. 福建工程学院土木工程学院, 福州 350118; 3. 垒知控股集团股份有限公司, 福建 厦门 361004)

**摘要:** 采用未淡化的海砂制备超高性能混凝土(UHPC)和普通混凝土, 研究了不同氯离子含量的海砂对 UHPC 抗压强度、孔结构、快速氯离子渗透性以及内置钢筋耐久性的影响, 并与普通混凝土进行分析比较。结果表明, 海砂中的氯离子含量对 UHPC 抗压强度并不会产生较大的消极影响; 海砂 UHPC 的临界孔半径约为 2 nm, 与海砂普通混凝土不同, 孔隙率随海砂中氯含量的增加而增加; 即使海砂氯离子含量高达 0.636%, 海砂 UHPC 的氯离子渗透性仍可忽略不计; 海砂 UHPC 中钢筋在 28 d 后处于钝化状态并趋于稳定。

**关键词:** 海砂; 超高性能混凝土; 抗压强度; 孔结构; 耐久性

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)02-014-08

## Experimental study on sea-sand ultra-high performance concrete

WEI Jiangang<sup>1,2</sup>, CHEN Rong<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1,3</sup>, BIAN Xuehai<sup>1</sup>, MA Xiuxing<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, P. R. China; 3. Lets Holding Group Co., Ltd., Xiamen 361004, Fujian, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, ultra-high performance concrete(UHPC) and ordinary concrete are prepared using undesalted sea-sand. The impact of sea-sand with varying chloride ion levels on the compressive strength, pore structure and durability of steel embedded in UHPC is investigated and compared with that of conventional concrete. The results show that the chloride ion content in sea-sand does not significantly negatively affect the compressive strength of UHPC. The critical pore radius of UHPC made with sea-sand is approximately 2 nm. Different from sea sand concrete, the porosity of sea-sand UHPC increases with the increase of chlorine content in sea-sand. Even when the chloride ion content in the sea sand is as high as 0.636%, the chloride ion permeability of the sea-sand UHPC remains negligible. The reinforcement in sea-sand UHPC is in a passive state and tends to stabilize after 28 days.

**Keywords:** sea-sand; ultra-high performance concrete; compressive strength; pore structure; durability

收稿日期: 2021-02-25 网络出版日期: 2021-06-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0705400); 国家自然科学基金资助项目(51878172); 中国博士后科学基金资助项目(2020M671951); 绿色建筑材料国家重点实验室开放基金资助项目(YA-612)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFC0705400), National Natural Science Foundation of China (51878172), China Postdoctoral Science Foundation (2020M671951), and Open Fund of National Key Laboratory of Green Building Materials (YA-612).

作者简介: 韦建刚(1971—), 男, 研究员, 主要从事超高性能水泥基复合材料研究, (E-mail)weijg@fzu.edu.cn。

通信作者: 黄伟(1987—), 男, 博士, (E-mail)WeiHuang@fzu.edu.cn。

近年来,大量的重大基础项目集中在我国东部沿海城市,但是大部分沿海地区长期缺乏河砂资源,利用储量丰富的海砂资源已成为解决沿海及岛屿地区建设用砂短缺问题的有效措施。然而,未充分淡化的海砂会引起钢筋混凝土锈蚀开裂,甚至发生工程事故,如我国东部沿海城市发生的“海砂屋”坍塌事故<sup>[1-2]</sup>。因此,采用海砂制备普通混凝土前应进行严格的淡化处理。传统的处理方法包括天然滩涂法、海水淡化法、机械法、混合法、防锈剂法等<sup>[3]</sup>。由于岛屿环境条件恶劣,加上淡化技术复杂且成本高,无法满足快速建设岛屿基础设施的需求。超高性能混凝土(UHPC)是一种新型水泥基工程材料,具有超高的强度和优异的耐久性<sup>[4-5]</sup>;除了内部缺乏游离毛细水外,UHPC具有非常致密的微观结构和极强的抗渗性能<sup>[6-7]</sup>,外部的水分、有害离子和氧气难以渗透到UHPC内部。研究表明,UHPC具有优异的耐久性,可以有效地应用于恶劣的海洋环境中<sup>[8]</sup>。这也为直接利用未淡化海砂配制UHPC技术提供了可行性。文中采用未淡化海砂制备UHPC,研究不同氯离子含量的海砂对UHPC抗压强度、孔结构、氯离子快速渗透性及内置钢筋耐久性的影响,制备相应的海砂普通混凝土(强度等级C40)进行对比分析。

## 1 试验

### 1.1 原材料

试验主要原料有:PO 42.5R 硅酸盐水泥(炼石有限公司),硅灰(西宁有限公司  $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2\geq 90\%$ ),石英粉( $<0.05\ \text{mm}$ )和碎石( $5\sim 20\ \text{mm}$ )。聚羧酸型高效减水剂(福州创业工程材料有限公司)的减水率为25%。试验用砂包括以下5种:闽江河砂、2种天然海砂(氯离子含量分别为0.035%和0.077%)以及用氯盐溶液浸泡闽江河砂所制备的2组高浓度模拟海砂(氯离子含量分别为0.328%和0.636%)。砂的性能指标如表1所示,砂的粒径分布如图1所示。普通混凝土和UHPC的配合比如表2所示。值得注意的是,为消除钢纤维对快速氯离子渗透试验的影响,UHPC中不掺入钢纤维。

表 1 砂的性能

Table 1 Properties of the sand

种类	细度模数	表观密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含泥量/%	贝壳含量/%	氯离子含量/%
河砂	1.78	2 661.94	0.36	—	—
海砂 1	2.51	2 591.31	3.23	0.32	0.035
海砂 2	1.61	2 671.42	0.26	0.92	0.077
模拟海砂 1	1.78	2 661.94	0.36	—	0.328
模拟海砂 2	1.78	2 661.94	0.36	—	0.636

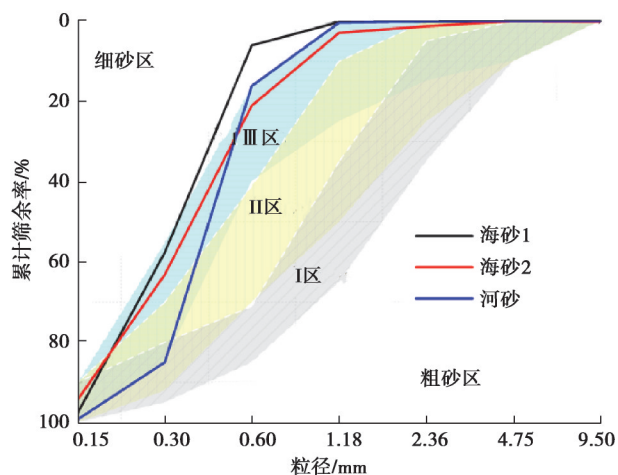


图 1 砂粒的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of the sand

表2 普通混凝土和UHPC配合比

Table 2 Formulation of ordinary concrete and UHPC

种类	水泥	砂	石子	水	硅灰	石英粉	减水剂
普通混凝土	488.0	528.0	1 176.0	195.0	—	—	—
UHPC	859.5	925.0	—	179.0	258.0	80.5	21.5

kg/m<sup>3</sup>

## 1.2 试件制备与养护

试件成型:将骨料、水泥、硅灰按照配合比称量,依次倒入搅拌机中,干拌3~4 min;随后将减水剂与水一同混合并倒入搅拌机中,搅拌4 min;最后,将搅拌完成的UHPC拌合物浇注在试模中。

试件养护:为了与UHPC养护条件一致,普通混凝土和UHPC试件均在24 h脱模后进行90 °C蒸汽养护,3 d后放置标准养护室直至测试。

## 1.3 试验方法

1)立方体抗压强度试验。试样尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,在龄期7 d和28 d时,对试块进行抗压强度试验,加载速率为1.5 kN/s,平均值基于3%试验结果计算。

2)孔结构试验。在AutoPore Master-60型全自动压汞仪上采用压汞孔隙率测定法(MIP)进行孔结构分析,加压能力为350 MPa。到28 d时,使用精密切割机从立方体上切下尺寸为3 mm的小块样品。其中,用于MIP测试的普通混凝土样品中的粗骨料已被剔除。样品浸入乙醇至少7 d停止水化,并在烘箱中用50 °C干燥3 d。

3)快速氯离子渗透试验。渗透性能测试试件采用直径100 mm,高度50 mm的圆柱体,在20 °C下密封固化。主要实验步骤参考美国ASTM C1202-12标准<sup>[9]</sup>。阴极及阳极电解液分别为3%质量浓度的NaCl溶液和0.3 mol/L NaOH溶液,通电时间为6 h。

4)钢筋电化学测试。线性极化法是一种评价普通混凝土中钢筋锈蚀快速且有效的方法,试验采用该方法比较普通混凝土和UHPC中钢筋锈蚀行为<sup>[13]</sup>。如图2所示,将普通碳素钢棒和不锈钢棒(8 mm×120 mm)埋入尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的混凝土试块中。饱和CuSO<sub>4</sub>溶液作为参比电极与工作电极和辅助电极相连,钢筋暴露部分用环氧树脂密封。在蒸汽养护结束后开始测试并记录钢筋的腐蚀电流密度以评估其锈蚀程度,如图3所示。

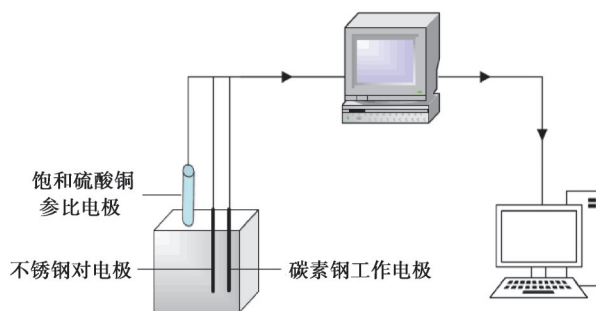


图2 电化学测试钢筋锈蚀示意图

Fig. 2 Diagram of electrochemical measurement on steel corrosion

图3中 $E_{\text{corr}}$ 为腐蚀电位; $\lg i_c$ 为腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}}$ 的对数值; $b_a$ 和 $b_c$ 分别代表钢筋极化时阳极和阴极的Tafel斜率,根据Stern-Geary方程计算 $I_{\text{corr}}$ ,如式(1)所示<sup>[10]</sup>:

$$I_{\text{corr}} = \frac{2.303 (b_a + b_c) R_p}{b_a b_c}, \quad (1)$$

式中, $I_{\text{corr}}$ 为钢筋的腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $b_a$ 为阳极Tafel斜率,mV;  $b_c$ 为是阴极Tafel斜率,mV;  $R_p$ 为极化电阻,即依靠电化学工作站测得的微电压和电流之比, $\Omega/\text{cm}^2$ 。

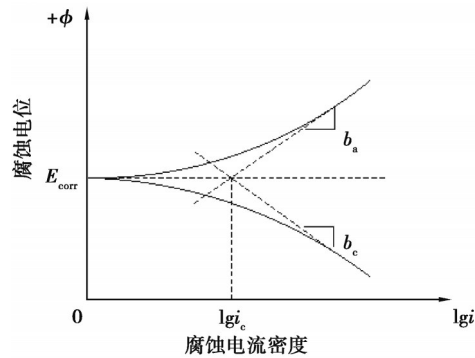


图3 线性极化曲线

Fig. 3 Polarization curve

## 2 结果与讨论

### 2.1 抗压强度

海砂普通混凝土和海砂UHPC的7 d和28 d抗压强度如图4所示。可以看出,河砂和海砂1制备的同等级混凝土无论是7 d还是28 d抗压强度几乎没有差别,而海砂2制备的普通混凝土和UHPC抗压强度均高于其他组,28 d抗压强度相比河砂组分别提高了4%和13%。主要原因是河砂和海砂1的粒径分布相似,而海砂2有更合理的粒径分布(如图1所示),合理的骨料级配有利于实现更高的抗压强度<sup>[1]</sup>。此外,模拟海砂制备的普通混凝土和UHPC的7 d抗压强度相比河砂组略有提升(在7%和6%以内),试件的抗压强度随着海砂中氯离子含量的增加而增加。这主要是由于氯离子加速水泥水化,在文献[12-13]中也有类似的结果。然而,在28 d时氯离子不再起促进作用,模拟海砂组的抗压强度略低于河砂组(在5%和4%以内)。Grirish等<sup>[14]</sup>发现在水化过程中形成的CaCl<sub>2</sub>会转变为粉末状,失去强度,导致混凝土在后期的抗压强度下降。

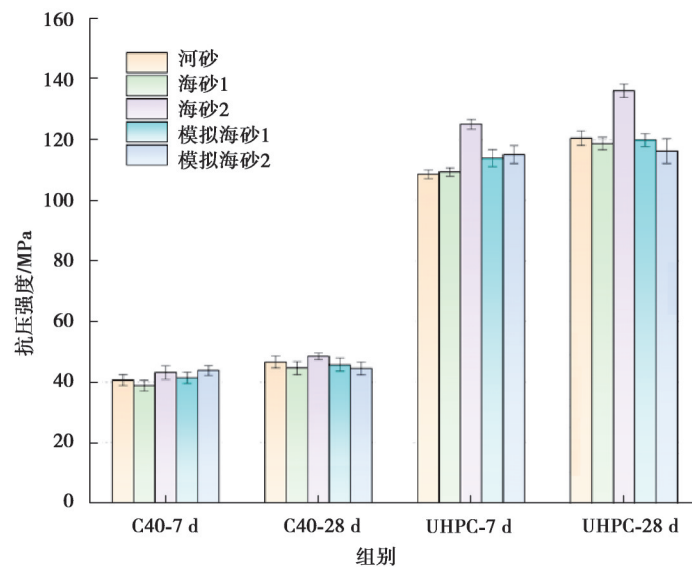


图4 普通混凝土和UHPC的抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of ordinary concrete and UHPC

### 2.2 孔结构

图5对比了28 d龄期海砂普通混凝土和海砂UHPC的孔结构特征。对于临界孔径,即孔径尺寸分布曲线上的最高峰对应的孔径尺寸范围,如图5(a)所示,用天然海砂制备的普通混凝土具有与河砂对照组相似的孔径范围,仅是主峰的峰值减少。而采用模拟海砂制备的普通混凝土的临界孔径转变到较小的孔径范围(10 nm左右),并且峰值的大小随着氯含量的增加而降低。与此同时,海砂1制备的普通混凝土与河砂组相

比其孔隙率更高,而海砂2则更低,如图5(b)所示,这与抗压强度试验结果相对应。对于模拟海砂组中的孔隙率显著降低,主要归因于Friedel盐的形成填充了普通混凝土的大孔。由图5(c)可以看出,所有UHPC的孔径分布没有明显差异,大多数临界孔径接近于2 nm,这是MIP所能测试到的最小孔径;其中,模拟海砂2(氯离子含量最高)制备的UHPC具有最大的临界孔径。由图5(d)可以看出,海砂2制备的UHPC孔隙率最低,这与其抗压强度相对应。与普通混凝土相反,模拟海砂UHPC的孔隙率随氯化物含量的增加而增加,这可能是由于模拟海砂浓度较高,UHPC的致密微观结构难以填充更多的晶体盐,导致UHPC微结构中出现一些细微的孔隙和裂缝。

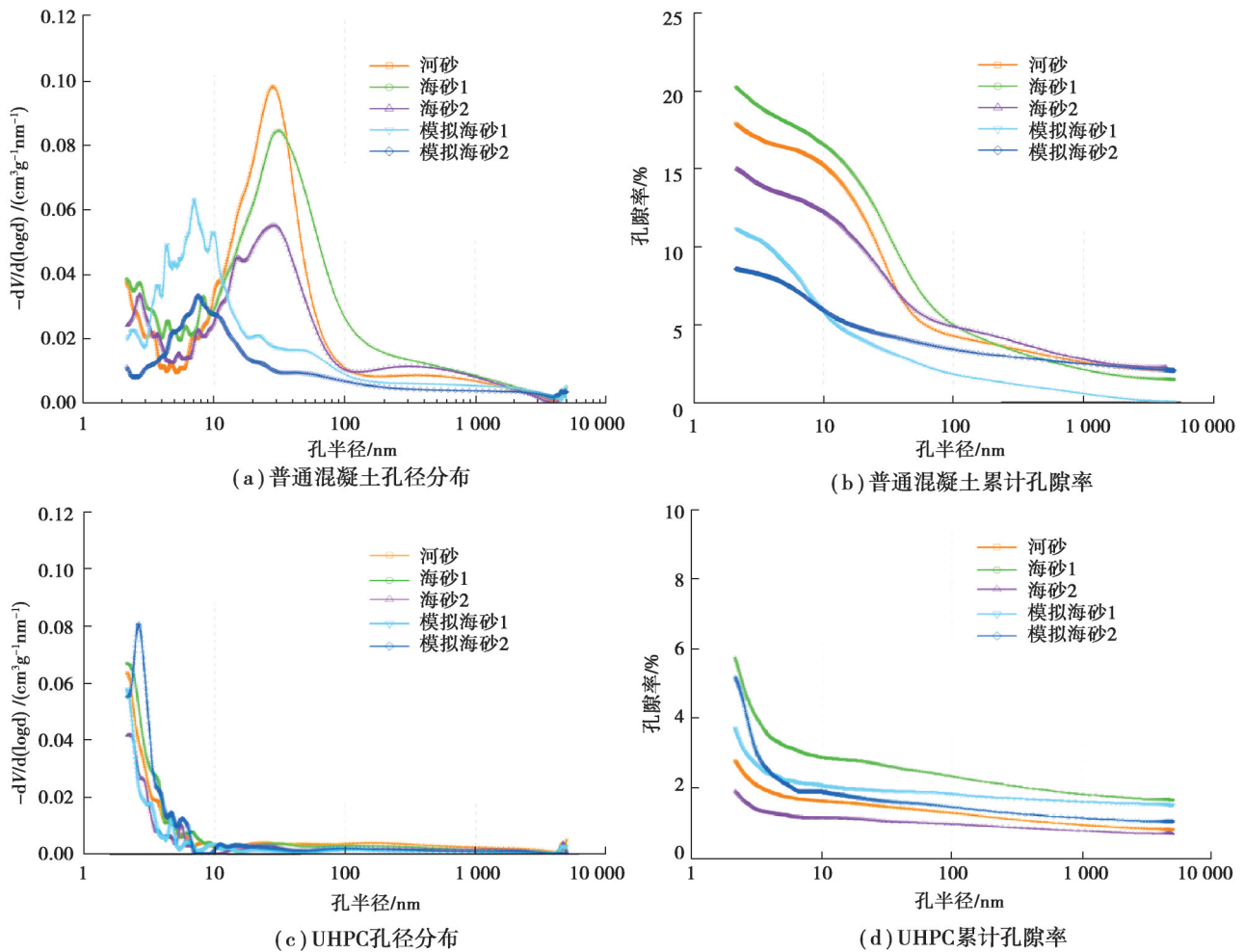


图5 普通混凝土和UHPC的孔结构

Fig. 5 Pore structure of ordinary concrete and UHPC

### 2.3 快速氯离子渗透试验结果

图6为普通混凝土和UHPC的7 d和28 d电通量试验结果。参考ASTM C1202的标准,将图中的背景分类为5个区域,使其更加直观地评价试件抗氯离子渗透性能。各区域对应的渗透等级分别为高( $>4\,000\text{ C}$ )、中( $2\,000\sim4\,000\text{ C}$ )、低( $1\,000\sim2\,000\text{ C}$ )、很低( $100\sim1\,000\text{ C}$ )以及忽略水平( $<100\text{ C}$ )。可以看出,除了海砂2组,其余试件的电通量都随着氯化物含量的增加而增加,这归因于砂中包含的氯盐能够有助于电荷的传导。图6(a)可以看出,海砂普通混凝土7 d的氯离子渗透性处于“中等到高”的范围,虽然,28 d时电通量有所降低,但除了对照组的普通混凝土具有低渗透性外,其余试件仍处在“中等到高”水平。

从图6(b)可以明显看出,7 d和28 d UHPC的氯离子渗透水平均处在忽略不计的范围。即使模拟海砂中的氯离子含量高达0.636%,其电通量值也低于100 C。除了用海砂2制备的UHPC外,UHPC的孔隙率皆随着海砂氯离子含量的增加而增加,如图5(d)所示,然而,电通量反应出的UHPC氯离子渗透性仍然处于忽略不



计的渗透的范围,这主要归因于UHPC中显著缺乏自由水<sup>[15-16]</sup>。

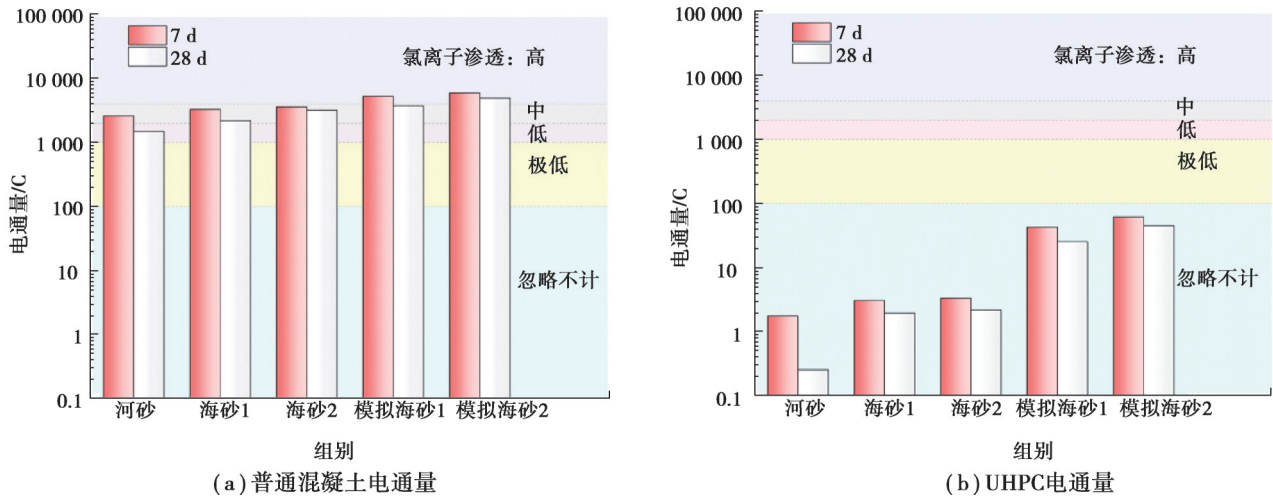


图 6 普通混凝土和UHPC电通量试验结果

Fig. 6 Chloride ion permeability test in ordinary concrete and UHPC

2.4 钢筋的电化学测试

由于难以直接测量UHPC中分布不连续的钢纤维的锈蚀情况,文中仅评估了UHPC中钢筋的锈蚀行为。分别在1 d、4 d、7 d、28 d、56 d和80 d通过线性极化法获得Tafel极化曲线,其中,1 d和28 d的测试曲线如图7所示。可以看出,随着海砂氯离子含量的增长,钢筋的腐蚀电位越低,腐蚀电流密度越高。与海砂普通混

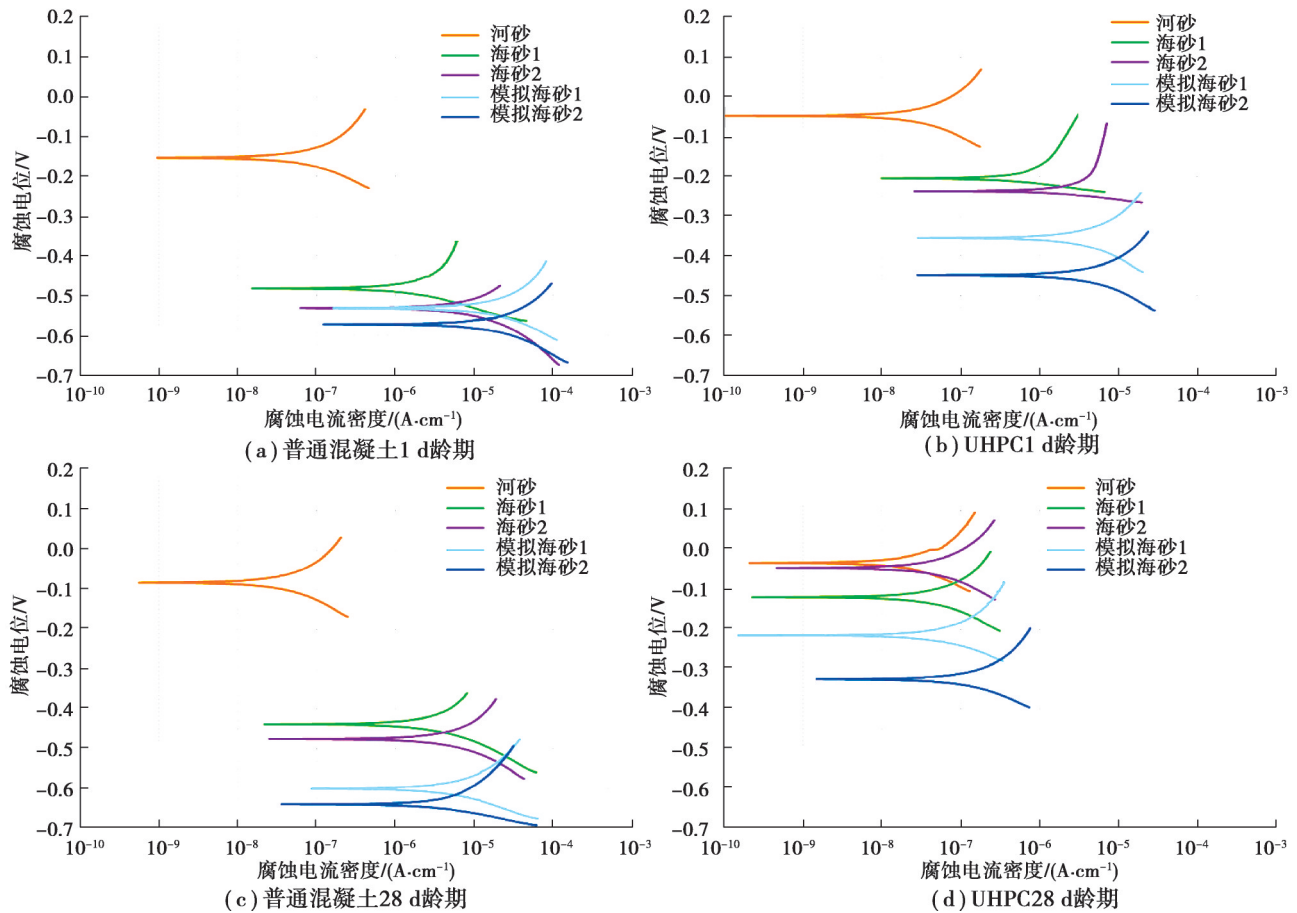


图 7 普通混凝土和UHPC钢筋的Tafel极化曲线

Fig. 7 Tafel polarization curve of steel in ordinary concrete and UHPC

土相比,随着龄期的增长,海砂UHPC中钢筋的腐蚀电位(腐蚀电流密度)正向移动(降低)的幅值更大,在28 d时基本处于普通河砂UHPC中钢筋的钝化状态。这是因为UHPC致密的微观结构以及内部缺乏腐蚀必要的水和氧气,从而使钢筋表面阳极的腐蚀氧化反应和阴极的腐蚀还原反应难以进行。

图8为普通混凝土和UHPC中钢筋腐蚀电流密度随龄期的变化。将腐蚀速率分为4个锈蚀风险区域评估钢筋的耐腐蚀性<sup>[17]</sup>。可以看出,普通混凝土和UHPC中的钢筋腐蚀电流密度随着水化时间的延长而降低,随着氯离子含量的增加而增加。由图8(a)可以看出,海砂普通混凝土中钢筋早期的腐蚀电流密度均超过 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,意味着钢筋均处于快速锈蚀阶段。随着龄期的增长,钢筋锈蚀速率虽有所降低,但仍处于高锈蚀速率范围。而对于海砂UHPC,如图8(b)所示,仅模拟海砂2中钢筋的早期腐蚀电流密度略高于 $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,在28 d所有钢筋均处于钝化状态并在后期趋于平稳。值得一提的是,海砂2的氯离子含量虽然较高,但其钢筋腐蚀电流密度却低于与海砂1组,这归因于海砂2试件更低的孔隙氯,更致密的微观结构所含的氧气和水含量相对更少。总的来说,以海砂作为氯化物来源,UHPC表现出优异的护筋能力。

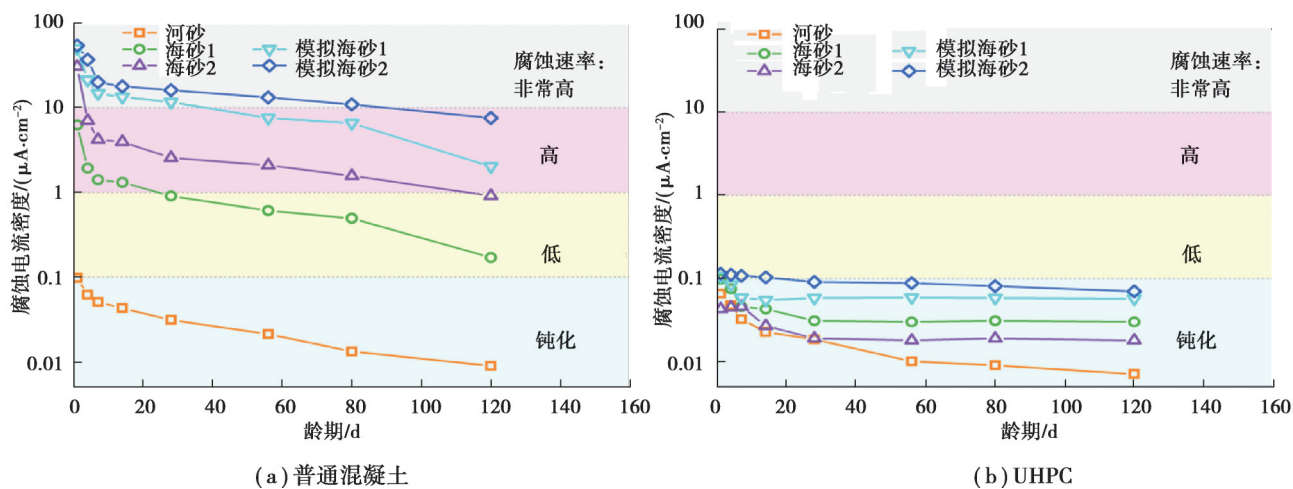


图8 普通混凝土和UHPC中钢筋腐蚀电流密度的变化  
Fig. 8 Evolution of corrosion current density of steel bar in ordinary concrete and UHPC

### 3 结论

文中研究了海砂对UHPC和普通混凝土的抗压强度、孔结构、氯离子渗透性能及内置钢筋锈蚀的影响。基于实验结果,可以得出以下结论。

1) 级配优异的海砂有利于提升混凝土抗压强度;在不考虑级配的影响下,海砂UHPC的7 d抗压强度与普通UHPC相比有所提高(在6%以内),但28 d抗压强度有所下降(在4%以内),表明海砂中的氯盐对混凝土抗压强度并不会产生较大的消极影响。

2) 海砂UHPC的临界孔径在2 nm左右。海砂普通混凝土的孔隙率随着氯离子含量增大而减小,而海砂UHPC反之。前者主要是由于Friedel盐的填充作用,后者则可能是由于UHPC的致密微观结构难以填充更多的晶体盐,导致UHPC微结构中出现一些细微的孔隙。

3) 海砂UHPC相比海砂普通混凝土具有更优异的抗氯离子渗透性能,渗透性处于忽略不计水平。由于砂中氯盐的电荷传导作用,通过海砂普通混凝土和海砂UHPC的电通量随着氯离子含量的增加而增加,抗氯离子渗透性能随龄期增长而提高。

4) 海砂普通混凝土和海砂UHPC中的钢筋腐蚀电流密度随着龄期增长而降低,随着氯离子含量的增加而增加。海砂普通混凝土中的钢筋在120 d内均处于快速锈蚀范围,而海砂UHPC中的钢筋在28 d后均处于钝化状态,且趋于平稳。

## 参考文献

- [ 1 ] 洪乃丰. 海砂腐蚀与“海砂屋”危害[J]. 工业建筑, 2004, 34(11): 65-67.  
Hong N F. Sea sand corrosion and harm of “sea sand house”[J]. Industrial Construction, 2004, 34(11): 65-67.(in Chinese)
- [ 2 ] 李华杰. “海砂屋”应急管理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2012.  
Li H J. The study on emergency management of “sea sand house”[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2012. (in Chinese)
- [ 3 ] 漆贵海, 王玉麟, 李硕, 等. 海砂混凝土国内研究综述[J]. 混凝土, 2013(5): 57-61.  
Qi G H, Wang Y L, Li S, et al. Review on sea sand concrete research in China[J]. Concrete, 2013(5): 57-61.(in Chinese)
- [ 4 ] Richard P, Cheyrezy M H. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength[J]. ACI Special Publication, 1994, 144: 507-518.
- [ 5 ] Zygadlo M. Durability of building ceramics in agricultural environments[M]//Proceedings of the Fourth International Conference on Durability of Building Materials and Components. Amsterdam: Elsevier, 1987: 91-96.
- [ 6 ] Charron J P, Denarié E, Brühwiler E. Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(5): 689-698.
- [ 7 ] Kono K, Musha H, Kawaguchi T, et al. Durability study of the first PC bridge constructed with ultra-high strength fiber reinforced concrete in Japan[C]. in: Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC), Marseille, France, 2013, 239-248.
- [ 8 ] Thomas M, Green B, O’Neal E, et al. Marine performance of UHPC at Treat Island[C]. in: Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, 2012, 365-370.
- [ 9 ] ASTM C1202-12, Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration[S]. 1997.
- [ 10 ] 许晨. 混凝土结构钢筋锈蚀电化学表征与相关检/监测技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
Xu C. Electrochemical characteristic and related testing and monitoring technology of the steel corrosion of concrete structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [ 11 ] de Larrard F, Sedran T. Mixture-proportioning of high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(11): 1699-1704.
- [ 12 ] Ramaswamy S D, Aziz M A, Murthy C K. Sea Dredged Sand for Concrete[J]. Astm Special Technical Publication, 1982 (774):11.
- [ 13 ] Hasdemir S, Tuğrul A, Yılmaz M. The effect of natural sand composition on concrete strength[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112: 940-948.
- [ 14 ] Girish C G, Tensing D, Priya K L, Dredged offshore sand as a replacement for fine aggregate in concrete[J]. International Journal of Engineering Science and Emerging Technologies, 2015, 8(3): 88-95.
- [ 15 ] Kazemi Kamyab M. Autogenous shrinkage and hydration kinetics of SH-UHPFRC under moderate to low temperature curing conditions[D]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2013.
- [ 16 ] Huang W, Kazemi-Kamyab H, Sun W, et al. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 77: 86-101.
- [ 17 ] Millard S G, Law D, Bungey J H, et al. Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete[J]. NDT & E International, 2001, 34(6): 409-417.

(编辑 陈移峰)