

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.062



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同尺度纤维复合增强水泥基材料的 抗氯离子渗透性能

张勤¹, 解雨璇¹, 顾仁杰¹, 梁熙¹, 张正²

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210024; 2. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013)

摘要:为研究不同尺度纤维复合增强水泥基材料的抗氯离子渗透性能,对单掺和复掺碳酸钙晶须、聚乙烯醇(PVA)纤维的水泥基材料分别进行电通量试验、电镜扫描观测及基本力学性能试验,分析不同纤维尺度、掺量及复合比例对水泥基材料抗氯离子渗透性能和基本力学性能的影响规律,并基于试验结果给出了多纤维复合增强水泥基材料的氯离子侵蚀深度计算模型。结果表明,不同尺度纤维可在不同结构层次上发挥对水泥基材料的增强作用,使得多纤维复合增强水泥基材料的抗氯离子渗透性能明显优于单一纤维增强水泥基材料;多纤维复合材料的抗压强度与氯离子侵蚀深度及电通量大致呈反比例关系;当复合材料的抗压强度提高13.6%时,其氯离子侵蚀深度和总电通量则分别降低39.1%和44.7%;建立的氯离子侵蚀深度计算模型,可用于多纤维复合增强水泥基材料的抗氯离子渗透和侵蚀性能评估。

关键词:纤维增强混凝土;水泥基材料;抗氯离子渗透性能;电通量;抗压强度

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)03-0198-09

Chloride ion resistance of multi-scale fiber reinforced cementitious composites

ZHANG Qin¹, XIE Yuxuan¹, GU Renjie¹, LIANG Xi¹, ZHANG Zheng²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, 210024, P. R. China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: The electric flux tests, scanning electron microscope and mechanical tests were carried out respectively on cementitious composites with single mixing and compound mixing CaCO₃ whisker and PVA fiber to investigate chloride ion resistance of multi-scale fiber reinforced cementitious composites. The effects and mechanisms of different fiber sizes, amount of admixture and mixing ratios on the chloride ion resistance and basic mechanical properties of cementitious composites were analyzed. In addition, the calculation method of the depth of chloride ion erosion was proposed. The results showed that different types of fibers can enhance cementitious composites at different structural levels, and the chloride ion resistance of multi-scale fiber

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51978125、51678104、51508154); 江苏省自然科学基金(BK20211206)

作者简介: 张勤(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢筋混凝土结构抗震及新型结构材料应用等研究, E-mail: zhangqin8190@163.com。

Received: 2022-03-31

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51978125, 51678104, 51508154); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20211206)

Author brief: ZHANG Qin (1983-), PhD, associate professor, main research interest: durability of reinforced concrete structure, E-mail: zhangqin8190@163.com.

reinforced cementitious composites is much better than that of single fiber reinforced cementitious composites. The compressive strength of composites is inversely proportional to the depth of chloride ion erosion and the electric flux. When the compressive strength of the composite was increased by 13.6%, the depth of chloride ion erosion and the electric flux were decreased by 39.1% and 44.7%, respectively. Based on the experimental data, a calculation model of chloride ion erosion depth considering the influence of compressive strength is established, which can be used to evaluate the chloride ion penetration and erosion resistance of cement-based materials reinforced by multi-fiber composite.

Keywords: fiber reinforced concrete; cementitious composite; chloride ion resistance; electric flux; compressive strength

水泥基材料在工程领域应用前景广泛,但材料自身也存在抗拉强度低、韧性差以及耐久性不足等问题,特别是用于海洋腐蚀环境下加固修复时。受氯离子侵蚀作用影响,钢筋锈蚀、混凝土保护层开裂与剥落等一系列耐久性问题就更为突出^[1],为改善水泥基材料的耐久性,增强其抗氯离子渗透能力尤为重要。而研究表明^[2-4],在水泥基材料中掺入合适的纤维形成纤维复合增强水泥基材料能有效提高基体的抗氯离子渗透能力,有利于水泥基材料力学性能与耐久性的提升。因此,开展纤维增强水泥基材料的抗氯离子渗透性能研究具有十分重要的实用价值^[5]。

近年来,对于掺入不同纤维增强水泥基复合材料的抗氯离子渗透性能,学者们从不同角度开展了相关研究。部分学者通过对不同掺量的聚乙烯醇(PVA)纤维增强水泥基材料进行电通量试验并根据灰色模型分析PVA掺量对水泥基材料抗氯离子渗透性能的影响,研究发现,适量厘米级的PVA纤维具有增强水泥基材料的阻裂作用,抗氯离子渗透性能也随之增强^[6-9]。此外,还有相关学者研究发现在水泥基材料中掺入矿渣、粉煤灰、硅灰、碳酸晶须等对水泥基材料的抗氯离子渗透性能也有增强效果^[10-13]。主要原因是微米级掺合料可以有效填补水泥基材料的孔隙,与基体结合较好,增加结构的密实性。上述研究表明,在水泥基材料中适量掺入单纤维或单矿物材料均可提高水泥基材料的抗氯离子渗透性能,但涉及多纤维掺合料复合增强水泥基抗氯离子渗透性能的研究相对较少,而水泥基材料有着明显的多尺度特征^[14-15],不同尺度纤维对水泥基材料内部孔隙和微观结构改善效果不同,可在不同结构层次上发挥作用^[16-17]。

笔者考虑掺入纤维的种类、尺度及掺量等因素,选用微米级纤维(碳酸钙晶须)和厘米级纤维(PVA纤维)作为掺和物,并加入适量粉煤灰,组成多尺度纤维复合增强水泥基体系,通过电通量试验从试件通过的电量、氯离子侵蚀深度等方面对不同

尺度纤维增强水泥基复合材料的抗氯离子渗透性能进行研究,还通过相应力学性能试验分析了材料强度与抗氯离子渗透性的关系,并基于试验结果以及相关文献数据建立与抗压强度相关的抗氯离子渗透性能预测模型。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验的水泥基复合材料采用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)、普通河砂(Ⅱ区中砂)、JM-PCA(Ⅰ)型减水剂和自来水人工拌和而成;为提高增强效果,水泥基试件配比中加入了适量由盐城发电厂生产的Ⅱ级粉煤灰,具体的配合比设计为水泥:水:砂:粉煤灰:减水剂=1:0.35:1.62:0.2:0.015,其中粉煤灰密度约为2.1 g/cm³,堆积密度约为0.8 g/cm³,40 μm筛余量小于20%,颗粒级配属于细灰,宏观表面为灰色粉末状。增强材料主要采用峰竺NP-CW2型碳酸钙晶须和亚泰达公司生产的12 mm聚乙烯醇(PVA)纤维。其中,微米级碳酸钙晶须如图1(a)所示,宏观表现为白色粉末状,相对密度为2.9 g/cm³,平均直径为1.5 μm,长径比约为25;厘米级的PVA纤维如图1(b)所示,宏观表现为絮状,PVA纤维力学性能指标见表1。

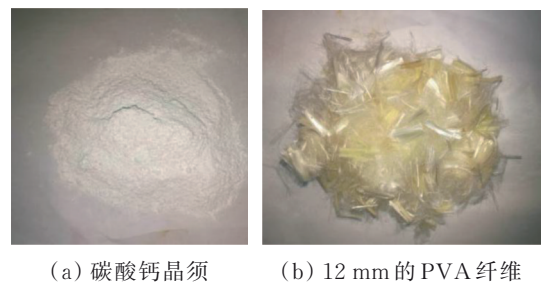


图1 纤维形貌

Fig. 1 Fiber appearance

1.2 试件设计及制作

参考《水泥复合砂浆钢筋加固混凝土结构技术规范》(CECS 242—2016)^[18]的试验要求,以单掺或

表 1 PVA 纤维力学性能指标

Table 1 Mechanical properties of PVA fiber

直径/ μm	弹性模量/ GPa	极限伸长 率/%	抗拉强度/ MPa	密度/ (kg/m^3)
35	29	7.1	1 500	1 300

复掺碳酸钙晶须、PVA 纤维的含量作为变化参数共设计了 9 组纤维增强水泥基材料试件,具体参数如表 2 所示。其中,用于电通量试验的试件为直径 100 mm、厚度 50 mm 的圆柱体;用于抗压、劈拉试验的试件为边长 70.7 mm 的立方体、用于抗折试验的试件为 40 mm×40 mm×160 mm 的棱柱体,每组试件均浇筑 3 个。

表 2 纤维增强水泥基复合材料试件设计参数

Table 2 Design parameters of fiber reinforced cement-based materials

试件编号	碳酸钙晶须体积掺量/%	PVA 纤维掺量/%
CF	0	0
CFCW1	1.2	0
CFCW2	2.4	0
CF-P1	0	1
CF-P1.6	0	1.6
CF-P2	0	2
CFCW1-P1	1.2	1
CFCW1-P1.6	1.2	1.6
CFCW1-P2	1.2	2

注:符号 CF 表示未掺纤维的基准组;CFCW1 表示混凝土中掺入 1.2% 的碳酸钙晶须;CFCW1-P1 表示混凝土中掺入 1.2% 的碳酸钙晶须和 1% 的 PVA 纤维;其他符号含义以此类推。

1.3 试验方法

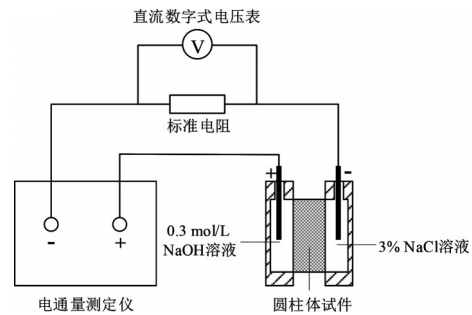
1.3.1 电通量试验测值

试件抗氯离子渗透能力可用试件的电通量试验反映,电通量越高,试件的抗氯离子渗透性能越弱。试件的电通量试验装置及示意图如图 2 所示,主要包括智能化真空饱水仪、NEL-PEU 混凝土电通量测定仪等。电通量试验原理是利用电场来加速氯离子的移动,氯离子在电流作用下穿过试件,在一定时间内通过试件的电量可以反映出试件的抗氯离子渗透能力。试验步骤主要为先将圆柱体试件标准养护 28 d;然后将其拿出烘干,并在试件侧壁包裹一层石蜡,待其固化后放入真空饱水机进行饱水;将饱水试件安装在试验槽内并密封,符合密封要求后,向装置的负极槽内注入质量分数为 3% 的 NaCl 溶液以及在正极槽中注入 0.3 mol/L 的 NaOH 溶液;最后接上电源开始通电,通电时间为 6 h,每 30 min 记录一次电流值。

试验结束后,通过电流值计算出纤维复合增强水泥基材料圆柱试件的总通电量,并以每组 3 个试



(a) 电通量测定装置



(b) 电通量试验装置示意图

图 2 电通量试验装置及示意图

Fig. 2 Schematic diagram and device diagram of electric flux test

件的平均电量值作为最终测试值。纤维增强水泥基材料的总电通量 Q_s 参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[19]并考虑试件实际截面尺寸的影响,采用式(1)计算。

$$Q_s = A_k \cdot 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_t + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

式中: Q_s 为实际电通量值, C; A_k 为 95 mm 直径的电通量测试试件截面面积与试件实际截面面积之比; I_0 为初始电流, A; I_t 为在时间间隔 t min 的电流(如, I_{30} 表示为时间间隔为 30 min 的电流), A。

1.3.2 显色法试验测深度

为了进一步分析不同设计参数对试件抗氯离子渗透性能的影响,对经过电通量试验后的试件采用显色法来测量氯离子侵蚀的深度。试验主要方法为,先将通电完成的试件取出擦净并在万能试验机下沿直径劈裂成两半,再将这条直径线平均分成 $n+1$ 段;随后在半圆柱体试件的断裂面喷上已配好的 0.3 mol/L AgNO_3 溶液;10 min 后试件断裂表面可呈现一条明显的银白色带状沉淀物(即 AgCl 沉淀),用卡尺测量每个标记点位置所对应的断裂面上白色沉淀的深度(mm),并分别记为 H_1, H_2 至 H_n ,最后取所有测量深度的平均值 \bar{H} 作为氯离子实际侵蚀深度,氯离子侵蚀深度测定示意图及实物图如图 3 所示。试件的总电通量越大,其断裂面处显现的带状沉淀物的深度就越深;图 4 为不同试件遭受氯盐侵蚀后所呈现不同显色深度的对比情况。

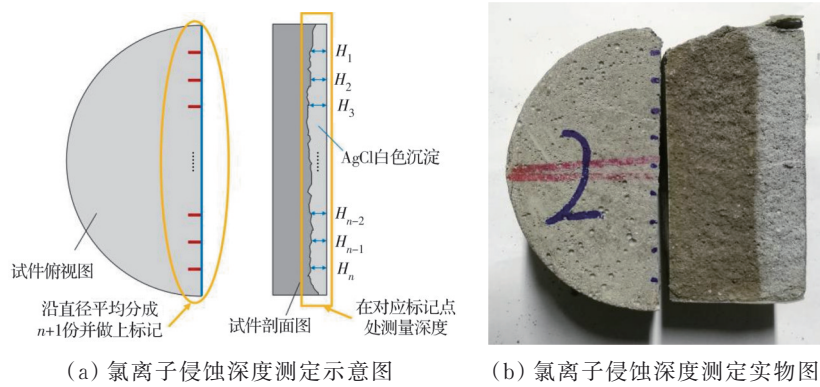


图3 氯离子侵蚀深度测定

Fig. 3 Determination of chloride erosion depth

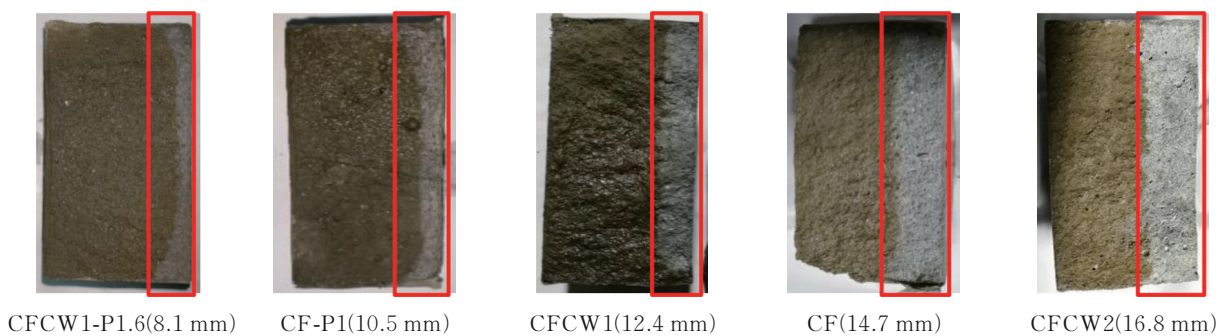


图4 不同试件遭受氯盐侵蚀的显色深度对比情况

Fig. 4 Comparisons of color depth of different specimens subjected to chloride salt erosion

1.3.3 力学性能试验及扫描电镜观测

除了电通量试验和显色法试验外,为探讨试件抗氯离子渗透性能与强度的关系,分析不同尺度纤维在水泥基复合材料微观细部孔隙结构上对氯离子渗透的影响机理和改善作用,笔者进一步对相同配比的水泥基复合材料进行相应的力学性能试验和电镜扫描观测。其中,纤维增强水泥基材料的力学性能试验参照《水泥复合砂浆钢筋加固混凝土结构技术规程》(CECS 242—2016)^[18]的要求进行。

2 试验结果与分析

2.1 抗氯离子渗透性能及力学性能

表3给出了不同设计参数纤维增强水泥基材料试件的抗氯离子渗透性能及力学性能的试验结果。需要说明的是,参照规范《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[19]可根据实际电通量 Q_s 将氯离子渗透等级划为5个等级:高、中等、低、很低、可忽略,分别对应通过的总电通量为 $Q_s \geq 4000$ 、 $2000 \leq Q_s \leq 4000$ 、 $1000 \leq Q_s \leq 2000$ 、 $500 \leq Q_s \leq 1000$ 、 $Q_s \leq 500$ 的情况。由表3可见,与基准组试件CF相比,单独掺入碳酸钙晶须时,其电通量降低,最大可降低19.3%;单独掺入PVA纤维时,电通量最大可降低38.7%;同时掺入

碳酸钙晶须与PVA纤维时,电通量下降更为明显,降低幅度可达44.7%。然而当这两种纤维掺入过量时,水泥基材料的抗氯离子渗透能力提高程度会相应减弱,甚至呈现负增长,如试件CF-P2和试件CFCW2。表3中也给出了各试件的氯离子侵蚀深度,不同试件的氯离子侵蚀深度与总电通量值保持基本相同的变化趋势,试件的总电通量越大,试件断裂面处显现的白色带状沉淀物的深度就越大。此外,表3中还给出了不同设计参数水泥基材料的抗压、抗折及劈拉力学性能试验结果,用以分析抗氯离子渗透性能与力学性能之间的关系。由表3中的数据可以看出,掺入适量纤维可提高水泥基材料的力学性能,特别是抗压性能提高明显,最大可提高13.6%。这表明在一定掺量范围内,试件强度越高,其抗氯离子渗透性能越好,对应的侵蚀深度越小。

2.2 纤维增强影响分析

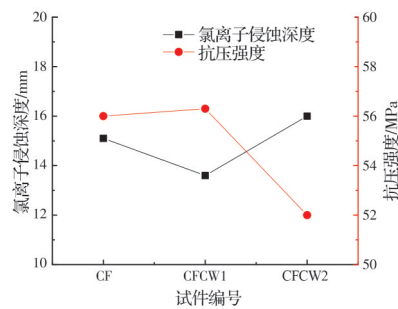
2.2.1 单纤维增强

图5、图6分别给出了单掺不同含量的碳酸钙晶须和PVA纤维增强水泥基材料的氯离子侵蚀深度、与对比组的电通量比值以及抗压强度的变化趋势。由图5可知,单掺碳酸钙晶须的试件与基准组试件CF相比,氯离子侵蚀深度与电通量比值最大降低

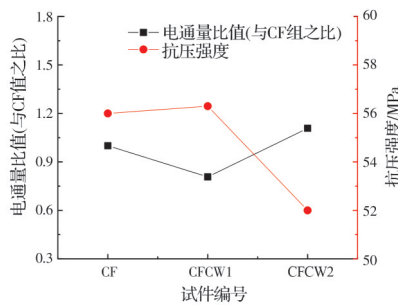
表 3 水泥基复合材料各试验结果汇总

Table 3 Summary of test results of cement-based composite materials

编号	换算后总电通量/C	电通量比值(与CF组之比)	氯离子渗透等级	侵蚀深度/mm	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	劈拉强度/MPa
CF	3 596	1	中等	15.1	56.0	7.5	3.1
CFCW1	2 902	0.807	中等	13.6	56.3	7.7	3.3
CFCW2	3 985	1.108	中等	16.0	52.0	7.1	3.0
CF-P1	2 315	0.644	中等	11.5	60.6	7.8	3.6
CF-P1.6	2 203	0.613	中等	10.0	62.2	8.6	4.1
CF-P2	2 396	0.666	中等	11.9	59.4	9.0	4.2
CFCW1-P1	2 329	0.648	中等	11.7	60.3	8.0	4.0
CFCW1-P1.6	1 988	0.553	低	9.2	63.6	10.0	4.6
CFCW1-P2	2 345	0.652	中等	11.8	60.2	10.8	4.2



(a) 氯离子侵蚀深度与抗压强度

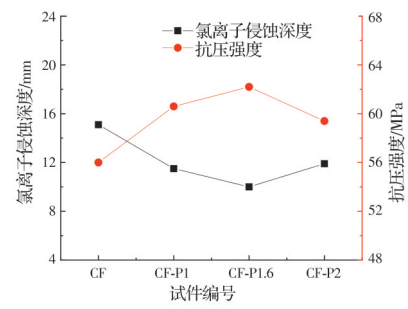


(b) 电通量比值与抗压强度

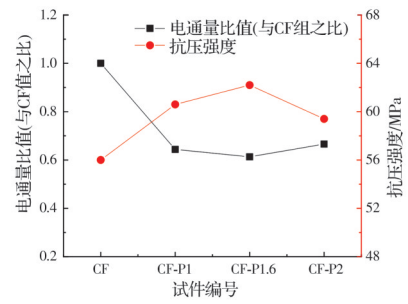
图 5 水泥基材料的抗氯离子渗透性能和抗压性能随碳酸钙晶须掺量的变化规律

Fig. 5 The change rule of chloride corrosion and compression resistance of cement-based materials with the content of calcium carbonate whisker

幅度可达 9.9% 和 19.3%，而其抗压强度最大只提高 0.5%，变化较小。由图 6 可知，单掺 PVA 纤维的试件与基准组试件 CF 相比，抗压强度最大可提高 11.1%，其氯离子侵蚀深度则相应降低，最大可达 33.8%，同时电通量比值降低可达 38.7%。由此可见，纤维增强水泥基材料的种类和掺量不同，对应的抗压强度以及抗氯离子渗透能力也不同。结合氯离子侵蚀深度、电通量比值及抗压强度随掺量的变化规律可以看出，在一定掺量范围内，抗氯离子渗透性能以及抗压强度随纤维掺量的增加而增强；超出掺量范围时，抗氯离子渗透性能和抗压能力反



(a) 氯离子侵蚀深度与抗压强度



(b) 电通量比值与抗压强度

图 6 水泥基材料的抗氯离子渗透性能和抗压性能随 PVA 纤维掺量的变化规律

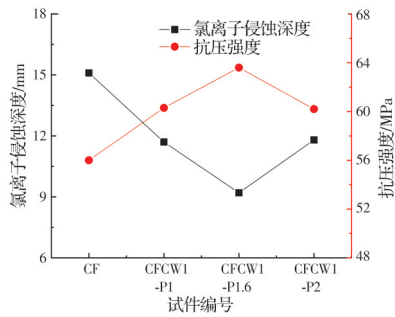
Fig. 6 The change rule of chloride corrosion and compression resistance of cement-based materials with the content of PVA fiber

而会减弱。此外，水泥基复合材料抗氯离子渗透性能与抗压强度存在明显的正相关性，抗压强度越高，抗氯离子渗透性能越强。

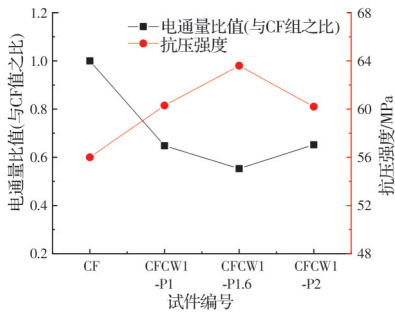
2.2.2 多纤维复合增强

图 7 给出了碳酸钙晶须和 PVA 纤维复合增强水泥基复合材料试件的氯离子侵蚀深度、与基准组电通量比值及抗压强度随纤维掺量增加的变化趋势。可以看出，在掺有 1.2% 碳酸钙晶须的水泥基材料中逐渐增加 PVA 纤维含量后，在一定掺量范围内，试件的氯离子侵蚀深度及电通量比值随着抗压强度的增强而下降。当 PVA 纤维掺量为 1.6% 时，

其抗压强度与抗氯离子侵蚀性能效果最佳,此时抗压强度为 63.6 MPa,与基准组试件 CF 相比,提高了 13.6%;侵蚀深度为 9.2 mm,与基准组试件 CF 相比降低了 39.1%;与基准组试件 CF 电通量比值为 0.553,比值下降最明显。然而,当继续增加 PVA 掺量到 2%,如试件 CFCW1-P2,其抗压强度和抗氯离子渗透性能的提升幅度有明显降低。由此可见,复掺一定量的碳酸钙晶须、PVA 纤维比单一纤维增强效果更优,有利于提高水泥基复合材料的抗压强度,进而增强其抗氯离子渗透性能。根据试验数据得出,在试验范围内碳酸钙晶须和 PVA 纤维的最佳掺量分别为 1.2% 和 1.6%。



(a) 氯离子侵蚀深度及抗压强度



(b) 电通量比值及抗压强度

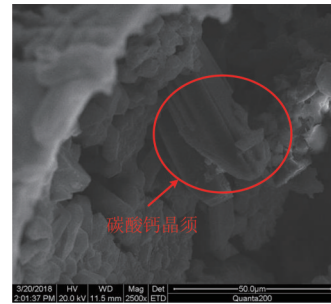
图 7 水泥基材料的抗氯离子渗透性能和抗压性能随碳酸钙晶须和 PVA 纤维掺量的变化规律

Fig.7 The change rule of chloride corrosion and compression resistance of cement-based materials with the content of calcium carbonate whisker and PVA fiber

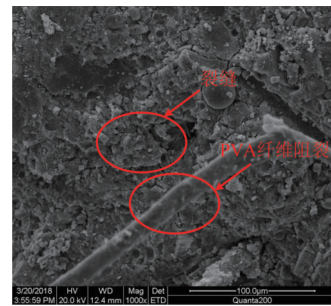
2.3 纤维增强机理分析

为研究碳酸钙晶须、PVA 纤维对水泥基复合材料抗氯离子渗透性能的增强机理,图 8 给出了不同纤维单一及复合增强水泥基材料基体的扫描电镜结果图。可以看出,不同尺度的纤维对水泥基材料的增强机理不同。对于微米级尺度的碳酸钙晶须,如图 8(a)所示,适量晶须与基体结合较好,在水泥基材料内部分散均匀,能够在微米级尺度上有效填充孔隙,提高结构的密实性,从而提高水泥基试件的抗压强度,而抗压强度又与试件抗氯离子渗透性

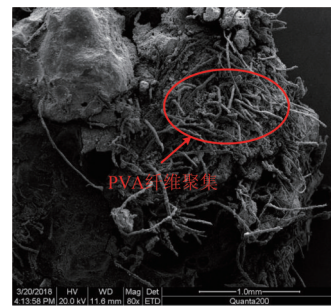
能呈正相关,因此试件的抗氯离子渗透性能也随之提高。对于厘米级的 PVA 纤维,其在单一增强时,作用更多表现在对裂缝的抑制以及对内部结构的桥联。如图 8(b)所示,在水泥基材料中掺入一定量的 PVA 纤维后,除了能在厘米尺度上改善水泥基内部孔隙缺陷外,其更大的作用则体现在抑制裂缝的产生和发展上,从而达到增强增韧的目的,随着强度的提高,其抗氯离子渗透性能也相应地得到了提



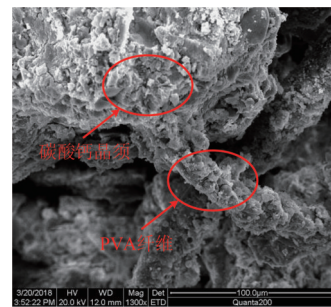
(a) 碳酸钙晶须嵌入



(b) PVA 纤维的阻裂作用



(c) PVA 纤维团聚现象



(d) 碳酸钙晶须和 PVA 纤维混杂

图 8 纤维增强水泥基复合材料试件电镜扫描结果
Fig.8 The scanning electron microscope results of fiber reinforced cement-based composite

高。需要注意的是,当纤维掺量过多时,由于分散不均,纤维会出现“团聚”现象,如图 8(c)所示。由于“团聚”效应,材料内部出现更多新的孔隙,影响了材料的均匀性和密实性,导致抗压强度下降,进而降低抗氯离子渗透性能。

结合微米级碳酸钙晶须和厘米级 PVA 纤维不同的增强机理可知,不同尺度的纤维对材料的微观孔隙和细部结构可在不同层次上发挥着改善作用,因此将二者复合可充分发挥各自不同的增强特性,达到抗氯离子渗透性能更优的增强效果。如图 8(d)所示,两种不同尺度的纤维共同作用,大大提高了试件的抗压强度,一方面,碳酸钙晶须对内部孔隙起到一定的填充效果,使之更为密实;另一方面,PVA 纤维均匀分布在材料内部,与水泥浆体界面充分结合,有效阻挡了宏观裂缝的出现和发展;因此对材料的抗氯离子渗透性能的增强效果比单一纤维作用时更佳。但需要说明的是,当纤维掺量过多时,纤维表面会形成新的渗透界面,对孔隙的填充以及材料之间的桥联作用效果减弱,孔隙变大而引起对水泥基复合材料强度的增强作用下降,氯离子渗透性能变强,侵蚀深度增大。由此可见,微米级碳酸钙晶须和厘米级 PVA 纤维在不同微观尺度上改变了水泥基材料的密实性,进而影响水泥基材料的抗氯离子渗透性能。

3 抗氯离子渗透性能预测模型

基于扫描电镜分析结果以及已有的研究结果^[10]可知,水泥基材料的抗氯离子渗透性能与材料密实性有直接联系,而其密实度与抗压强度呈正相关性,因而抗压强度在一定程度上反映了水泥基材料的抗氯离子渗透性能。此外,水泥基材料的抗氯离子渗透性能又与通过水泥基材料的总电通量值相关,通过的总电通量越低则表示水泥基材料的抗氯离子渗透性能越好。因此,在总电通量与抗压强度之间建立联系,以方便反映水泥基材料的抗氯离子渗透性能。图 9 给出了纤维增强水泥基复合材料抗氯离子渗透试验总电通量 Q_s 与抗压强度 f_{cu} 之间的关系。需要说明的是,图中除了包含本文试验数据外,还补充了文献[20-22]的相关试验数据,尽管不同学者采用的水泥基材料有所区别,但统一到水泥基材料抗氯离子渗透试验的总电通量与其抗压强度的关系上,各试验数据之间仍具有一致的相关性。由图中可以看出,纤维增强水泥基复合材料的抗压强度 f_{cu} 与实际总电通量 Q_s 大致呈幂函数递减关系,可采用式(2)表达。

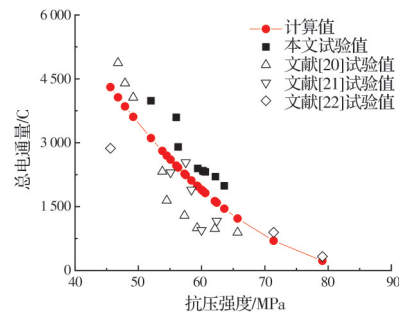


图 9 Q_s 与 f_{cu} 的关系

Fig.9 The relation between Q_s and f_{cu}

$$Q_s = k_1 (100 - f_{cu})^{k_2} \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 为与试件抗压强度 f_{cu} 和实际电通量 Q_s 相关的系数,根据试验数据经优化拟合后 k_1 、 k_2 分别取 2.835 和 1.929。采用式(2)计算得到的总电通量如图 9 中的点曲线所示,该计算结果与试验结果总体吻合较好。因此,可以根据式(2)基于抗压强度进行纤维增强水泥基复合材料的抗氯离子渗透性能预测。值得注意的是,图 9 中相关水泥基材料抗压强度的范围为 40~80 MPa,因而利用式(2)进行总电通量预测时要考虑水泥基材料的抗压强度值。

电通量 Q_s 除与纤维增强水泥基材料的抗压强度存在相关性外,还与氯离子侵蚀深度 D 有关,如图 10 所示。由图可见,水泥基材料的侵蚀深度与电通量呈正相关性。因而,为进一步分析侵蚀深度与抗压强度的关系,以电通量为中间变量,建立氯离子侵蚀深度与抗压强度之间的相关性模型,以便于进行纤维增强水泥基材料的氯离子侵蚀深度预测,二者的关系为

$$D = \alpha_1 Q_s^{\alpha_2} = \alpha_1 k_1 (100 - f_{cu})^{\alpha_2 k_2} = J_1 (100 - f_{cu})^{J_2} \quad (3)$$

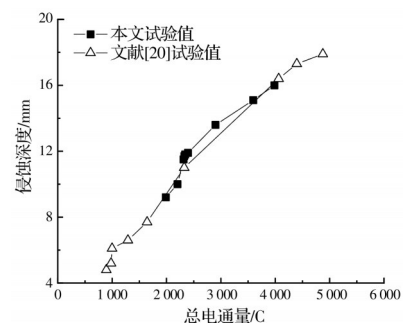


图 10 D 与 Q_s 的变化关系

Fig.10 The relation between D and Q_s

式中: J_1 、 J_2 分别为与试件抗压强度 f_{cu} 与氯离子侵蚀深度 D 相关的系数,基于试验结果优化分析可得系数 J_1 、 J_2 分别取 0.004 和 1.598。图 11 给出了采用式(3)计算的侵蚀深度与实际侵蚀深度的比较。由图可见,各试件的计算值和试验值吻合较好;表明可以根据抗压强度 f_{cu} 对多纤维复合增强水泥基材料

的抗氯离子侵蚀性能进行预测。

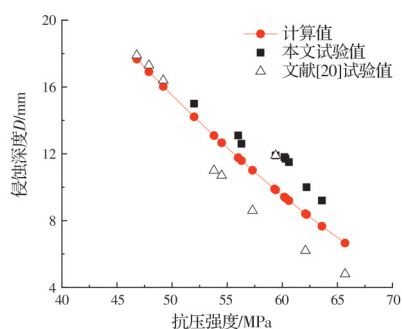


图 11 D 与 f_{cu} 的关系

Fig.11 The relation between D and f_{cu}

4 结论

1)在基体中掺入适量的碳酸钙晶须或PVA纤维可以有效提高纤维增强水泥基复合材料的抗氯离子渗透性能与力学性能,且两种纤维复掺时提高效果更明显。当纤维复合增强水泥基材料中的碳酸钙晶须和PVA纤维体积掺量分别达到1.2%和1.6%时,该复合增强材料的力学性能相对较好,对应的抗压强度提高13.6%、总电通量和氯离子侵蚀深度分别降低44.7%和39.1%。

2)在多尺度纤维复合增强水泥基材料中,微米级的碳酸钙晶须能在微米尺度上填充基体孔隙,增强其密实性;厘米级的PVA纤维则更多表现在对裂缝的抑制以及对内部结构的桥联作用。复掺一定量的碳酸钙晶须和PVA纤维可在不同结构层次上对水泥基材料的微观结构起到改善作用,进而提高水泥基材料的强度,增强试件的抗氯离子渗透性能。

3)纤维增强水泥基复合材料的抗氯离子渗透性能与其抗压强度呈明显的负相关关系;材料的密实性越好,抗压强度越高,越能有效阻断氯离子渗透。建立的抗氯离子渗透性能预测模型,能够基于多纤维复合增强水泥基复合材料的抗压强度直接确定其抗氯离子渗透等级及对应的侵蚀深度。

参考文献

- [1] AL-BAHAR S, ATTIOGBE E K, KAMAL H. Investigation of corrosion damage in a reinforced concrete structure in Kuwait [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(3): 226-231.
- [2] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC) [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215-230.
- [3] 张勤,李三亚,赵永胜,等.纤维网增强混凝土复合材料约束混凝土应力-应变关系研究[J].建筑结构学报, 2021, 42(4): 166-176.

2021, 42(4): 166-176.

ZHANG Q, LI S Y, ZHAO Y S, et al. Study on stress-strain relationship of concrete confined with textile reinforced concrete composites [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 166-176. (in Chinese)

- [4] 岳清瑞,杨勇新.纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述[J].建筑结构学报, 2009, 30(6): 8-15.

YUE Q R, YANG Y X. Introduction to durability of concrete strengthened with fiber reinforced polymers [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 8-15. (in Chinese)

- [5] 唐巍,张广泰,董海蛟,等.纤维混凝土耐久性研究综述[J].材料导报, 2014, 28(11): 123-127.

TANG W, ZHANG G T, DONG H J, et al. Review on durability of fiber concrete [J]. Materials Review, 2014, 28(11): 123-127. (in Chinese)

- [6] 李相国,任钊锋,徐朋辉,等.氧化石墨烯复合PVA纤维增强水泥基材料的力学性能及耐久性研究[J].硅酸盐通报, 2018, 37(1): 245-250.

LI X G, REN Z F, XU P H, et al. Research on mechanical properties and durability of graphene oxide composite PVA fiber reinforced cement-based material [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(1): 245-250. (in Chinese)

- [7] 钟俊飞,王宗林,高庆飞. PVA纤维增强水泥基复合材料抗氯离子渗透性能[J].混凝土, 2019(6): 105-108.

ZHONG J F, WANG Z L, GAO Q F. Chloride ion resistance of cementitious composites with PVA fiber reinforcement [J]. Concrete, 2019(6): 105-108. (in Chinese)

- [8] 王晨飞,牛荻涛.聚丙烯纤维混凝土的耐久性试验研究[J].混凝土, 2011(10): 82-84.

WANG C F, NIU D T. Research on the durability of polypropylene fiber concrete [J]. Concrete, 2011(10): 82-84. (in Chinese)

- [9] KOU S C, POON C S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 649-654.

- [10] CHEN W G, ZHU H T, HE Z H, et al. Experimental investigation on chloride-ion penetration resistance of slag containing fiber-reinforced concrete under drying-wetting cycles [J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121829.

- [11] CAO M L, YAO H, CUI S C. Experimental study on impact resistance of CaCO_3 whisker-reinforced cement mortar [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99/100: 706-710.

- [12] LENG F G, FENG N Q, LU X Y. An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete

- [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(6): 989-992.
- [13] CHOUSIDIS N, RAKANTA E, IOANNOU I, et al. Influence of iron mill scale additive on the physico-mechanical properties and chloride penetration resistance of concrete [J]. Advances in Cement Research, 2016, 28(6): 389-402.
- [14] 张聪, 曹明莉. 多尺度纤维增强水泥基复合材料力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 661-668.
ZHANG C, CAO M L. Mechanical property test of a multi-scale fiber reinforced cementitious composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 661-668. (in Chinese)
- [15] 张勤, 巩稣稣, 赵永胜, 等. 多尺度纤维复合增强水泥基材料的力学性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 123-129.
ZHANG Q, GONG S S, ZHAO Y S, et al. Mechanical properties of multi-scale fiber compound reinforced cement-based materials [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 123-129. (in Chinese)
- [16] 李懿卿, 牛荻涛, 宋华. 复合矿物掺合料混凝土力学性能的试验研究[J]. 混凝土, 2009(3): 47-49.
LI Y Q, NIU D T, SONG H. Effect of multi-mineral admixtures on mechanics properties of concrete [J]. Concrete, 2009(3): 47-49. (in Chinese)
- [17] 高丹盈, 李晗. 纤维纳米混凝土的微观增强机理与强度计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(5): 47-55.
GAO D Y, LI H. Micro enhancement mechanism and strength calculation method of fiber and nanosized material reinforced concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(5): 47-55. (in Chinese)
- [18] 水泥复合砂浆钢筋加固混凝土结构技术规程: CECS 242—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Technical specification for strengthening concrete structures with grid rebar and mortar: CECS 242—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)
- [19] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [20] 刘荣浩, 张勤, 张正, 等. 纤维增强高性能水泥基复合材料抗氯离子侵蚀性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(5): 46-50.
LIU R H, ZHANG Q, ZHANG Z, et al. Experimental study on chloride corrosion resistance of fiber reinforced high performance cement-based composite [J]. Concrete, 2021(5): 46-50. (in Chinese)
- [21] 朱燕, 梅华, 陈佳佳. 矿物掺合料与化学外加剂影响混凝土抗氯离子渗透性的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3844-3849.
ZHU Y, MEI H, CHEN J J. Experimental study on mineral admixtures and additives on chloride ion penetration resistance of concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11): 3844-3849. (in Chinese)
- [22] 丁小平, 张君, 王庆. 低收缩延性纤维增强水泥基复合材料抗氯离子渗透性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 827-834.
DING X P, ZHANG J, WANG Q. Chloride ion permeability of low shrinkage engineered cementitious composite [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6): 827-834. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)