DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.04.004 文章编号:1671-2579(2025)04-0025-08

带裂缝大掺量粉煤灰砂浆氯离子扩散行为研究

刘扬,毛晟哲,鲁乃唯

(长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了探究带裂缝大掺量粉煤灰水泥砂浆中氯离子的传输特性,该文采用人工预制裂缝的方式,制备了不同粉煤灰掺量(FA)和不同裂缝宽度的水泥砂浆试件。通过自然浸泡30 d、60 d后,测定试件裂缝内氯离子含量。结果表明:裂缝加快了氯离子在砂浆中的传输速度,其中0.05 mm与0.10 mm裂缝宽度对氯离子扩散系数的增大程度相近,而0.20 mm裂缝宽度对扩散系数的增大程度显著;30 d浸泡后,FA50在侵蚀深度大于10 mm范围内的氯离子含量随深度增加而显著降低;浸泡60 d后,所有试件的氯离子含量均随深度增加显著降低;当粉煤灰掺量不大于40%时,砂浆的抗氯离子性能随着掺量的增加而改善,但当掺50%粉煤灰时,砂浆的抗氯离子性能急剧下降;裂缝宽度与氯离子扩散系数呈线性关系,而粉煤灰掺量与氯离子扩散系数可用三次函数描述,并建立了考虑粉煤灰掺量和裂缝宽度的扩散系数模型,通过对比试验值与拟合值验证了模型有效性。

关键词:裂缝宽度;大掺量粉煤灰;水泥砂浆;氯离子含量;氯离子扩散模型

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Study on Chloride Ion Diffusion Behavior in Cracked Cement Mortar with High Fly Ash Content

LIU Yang, MAO Shengzhe, LU Naiwei

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to explore the diffusion behavior of chloride ions in cracked cement mortar with high fly ash (FA) content, this study fabricated cement mortar specimens with different FA contents and crack widths by artificially prefabricating cracks. The chloride ion content in cracks was measured after natural soaking for 30 days and 60 days. The results show that the cracks accelerate the diffusion of chloride ions in cement mortar. The increase in the diffusion coefficient caused by 0.05 mm and 0.1 mm cracks is similar, while that caused by a 0.2 mm crack is significantly higher. After 30 days of soaking, the chloride ion content of the FA50 group decreases significantly with increasing depth beyond 10 mm. After 60 days of soaking, the chloride ion content of all specimens decreases significantly with increasing depth. When the fly ash content is not more than 40%, the chloride ion resistance of the mortar improves with increasing FA content. However, at 50% FA content, the chloride ion resistance sharply decreases. The relationship between crack width and the chloride ion diffusion coefficient follows a linear function, while the relationship between fly ash content and chloride ion diffusion coefficient can be described by a cubic function. A diffusion coefficient model considering both fly ash content and crack width has been established, and the validity of the model is verified by comparison between experimental values and fitted values.

Keywords: crack width; high fly ash content; cement mortar; chloride ion content; chloride ion diffusion model

0 引言

混凝土氯离子扩散作用会引起钢筋锈蚀,进而导致结构劣化,这一现象已成为结构耐久性领域的热点研究方向之一[1-2]。其中,裂缝宽度与粉煤灰(FA)含量是影响混凝土氯离子扩散行为的关键因

收稿日期:2024-01-15 **修回日期:**2025-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52178207)

作者简介:刘扬,男,博士,教授.E-mail:liuyangbridge@163.com

***通信作者:**毛晟哲,男,硕士研究生.E-mail:1348101941@qq.com

素[3]。从材料角度来说,粉煤灰具有颗粒小和比表面积大的特点,能够填充构件中的大孔隙,具有良好的微集料效应。此外,粉煤灰中的活性成分SiO_2、Al_2O_3与水泥发生水化反应产生$Ca(OH)_2$,进而发生火山灰反应生成C—S—H等凝胶物质,这样不仅填充了孔隙,还能物理吸附氯离子[4]。近年来,因大掺量粉煤灰混凝土具有节能环保等优点,逐渐成为研究热点。因此,研究其抗氯离子性能是很有必要的。高延红等[5]测定了长期暴露试验下0～50%掺量粉煤灰混凝土中的自由氯离子含量,并计算出各试件的瞬态氯离子扩散系数,结果表明:随着粉煤灰掺量增大,瞬态氯离子扩散系数减小;Ortega等[6]发现适当的温度与湿度环境下,相较于OPC砂浆,矿渣与粉煤灰砂浆抗氯离子渗透性能有显著提升。因此,在实际工程中,常加入适量的粉煤灰,增大混凝土的密实性,提升混凝土的抗氯离子性能。混凝土结构带裂缝服役时,裂缝的存在会使环境中的侵蚀物质快速进入混凝土内部,加速钢筋的锈蚀[7-8]。国内外关于裂缝对氯离子扩散行为的影响已经取得了一定研究成果。张希瑾等[9]对带裂缝水泥砂浆试件进行自然浸泡试验,结果表明:氯离子会沿着垂直裂缝面的方向进行扩散,双裂缝间距过大氯离子相互影响较小,并修正了氯离子扩散系数进行数值模拟;Djerbi等[10]、Park等[11]和Jang等[12]采用横向加载的方式将圆柱体水泥砂浆和混凝土试件劈裂产生裂缝,然后对其进行抗氯离子扩散和渗透性研究,发现氯离子扩散系数与裂缝宽度呈正相关,并给出了氯离子扩散系数与裂缝宽度的定量关系式;黎鹏平等[13]通过横向加载使混凝土试件产生裂缝后,对其进行氯离子侵蚀行为研究,结果表明:裂缝宽度从0.10 mm增加到0.15 mm对氯离子扩散的影响并不显著,纯水泥试件与复合掺合料试件氯离子扩散系数与裂缝宽度呈指数函数关系;左国望等[14]采用预设裂缝的方式,探究氯盐环境下混凝土的裂缝宽度与氯离子含量的关系,结果表明:氯离子在裂缝周围影响区域的深度为30～50 mm,裂缝宽度与氯离子扩散系数的关系表达式可用三次函数来表示;沈孛等[15]研究表明:在冻融环境中,持续荷载作用下的裂缝宽度与氯离子扩散系数呈指数函数关系,而人工预制裂缝作用下的裂缝宽度与氯离子扩散系数呈线性关系;张菊辉等[16]采用人工预制裂缝的方式探究了裂缝宽度与深度对氯离子扩散行为的综合影响,结果表明:裂缝宽度与深度与氯离子扩散系数的关系均可以以指数函数来表述;陆春华等[17]提出考虑粉煤灰和裂缝宽度的开裂混凝土氯离子传输修正扩散模型,其中粉煤灰影响系数随着掺量增大而降低,裂缝宽度影响系数随着宽度增大而增大。由此可见,现有研究主要集中于裂缝对氯离子扩散行为的影响,而粉煤灰和裂缝宽度对水泥砂浆氯离子扩散性能的综合影响研究较少。本文在考虑裂缝宽度、粉煤灰掺量的条件下对自由氯离子含量的分布规律进行了分析,并且建立了氯离子扩散系数模型,为其耐久性的寿命预测提供了相关依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用普通硅酸盐水泥P·O 42.5,细骨料为细度模数2.52的标准砂,粉煤灰为Ⅰ级粉煤灰,减水剂为高效减水剂。具体配合比见表1,其中:FA后数值表示分别掺入0%、30%、40%、50%的粉煤灰。

表1 材料配合比

Table 1 Material mix proportion

试验组	配合比/(kg·m^{-3})					抗压强度/MPa
	水泥	粉煤灰	细骨料	水	减水剂	
FA0	450	0	1 340	180	2	47.8
FA30	315	135	1 340	180	2	39.2
FA40	270	180	1 340	180	2	37.6
FA50	225	225	1 340	180	2	29.4

1.2 试验步骤

试件按照尺寸为50 mm×50 mm×50 mm的正方体模具制作,为了使裂缝的宽度和深度更加精确,本试验采用埋设不锈钢薄片的方式来预制裂缝。

本试验每组预制了无裂缝、0.05 mm、0.10 mm和0.20 mm 4种裂缝宽度,所有薄片预埋深度均为20 mm。FA0-1代表预制0.05 mm裂缝的水泥砂浆试件,FA30-2代表预制0.10 mm裂缝的粉煤灰掺量为30%的水泥砂浆试件,以此类推。养护24 h后拔出薄片。为了加快粉煤灰二次水化反应速度,试件标准养护60 d后,再将试件放入饱和$Ca(OH)_2$溶液浸泡7 d,以达到饱水状态,保证氯离子运输行为接近纯扩散行为。

饱水后,除了裂缝面,将试件其余5个面用环氧树脂密封,使氯离子呈现一维侵蚀的效果。为了模拟海洋环境下氯离子侵蚀环境,将试件放入质量分数为3.5%的氯盐溶液中浸泡,每15 d更换一次溶

液。试验采用短期浸泡方案，暂不考虑水化反应引起的裂缝自愈合效应，浸泡前后的裂缝宽度和深度保持一致。到达浸泡时间后，从溶液中取出试件，采用切片磨粉的方式制备样品，切片示意图如图 1 所示。切片宽度为 10 mm，沿裂缝左右各延伸 5 mm，切片厚度沿裂缝深度方向，前 10 mm 取样方式为 0～2 mm、2～4 mm、4～7 mm、7～10 mm；10～25 mm 每隔 5 mm 取一次样。切片后进行磨粉，烘干，测定自由氯离子含量。

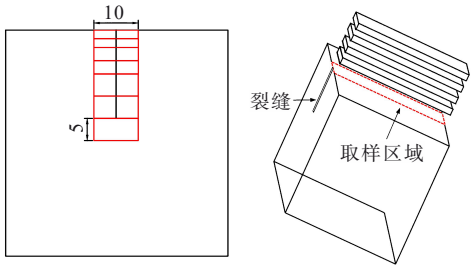


图 1　试件切片示意图（单位：mm）

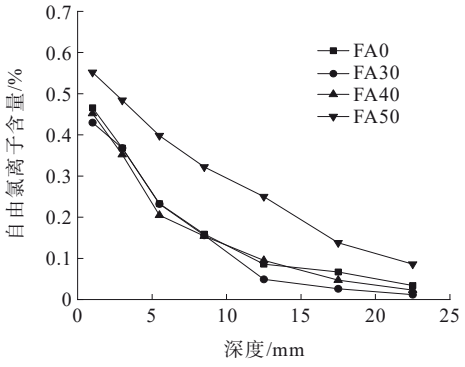
Figure 1　Specimen section (unit: mm)

2　试验结果与分析

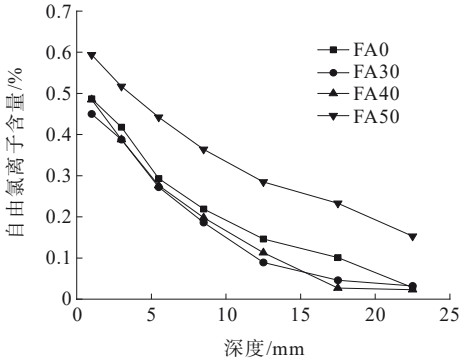
2.1　自由氯离子含量

图 2 为未开裂截面处自由氯离子含量分布图。

从图 2 可以看出：随着侵蚀深度增加，各试件的自由氯离子含量逐渐减小，不同浸泡龄期下均符合此规律。当粉煤灰掺量不大于 40%（FA30、FA40）时，在相同侵蚀深度处自由氯离子含量比普通水泥砂浆试件（FA0）低；当粉煤灰掺量达到 50% 时，自由氯离子含量显著增大。从图 2(a) 可以看出：在 30 d 浸泡龄期，侵蚀深度大于 10 mm 时，FA0、FA30、FA40 的氯离子含量较低且变化速率比较平缓，这可能是由于侵蚀时间较短，氯离子在较大深度范围内的侵蚀程度不高所致。FA50 在侵蚀深度大于 10 mm 时氯离子含量下降比较明显，说明其抵抗氯离子侵蚀的能力小于其他试件。从图 2(b) 可以看出：各试件的氯离子含量在相同的侵蚀深度下要比 30 d 浸泡龄期的更高一些，这是由于浸泡的时间越长，同一位置被侵蚀的程度就越大。各试件在深度大于 10 mm 时，氯离子含量随着侵蚀深度增加而下降的趋势更加明显，也从侧面反映出侵蚀程度加大。综上所述，FA30、FA40 的氯离子含量低于 FA0，抗氯离子性能较好。而当粉煤灰的掺量达到 50% 时，FA50 在相同侵蚀深度下氯离子含量均大于其他试件的氯离子含量，抗氯离子性能急速下降。



（a）30 d 浸泡龄期图



（b）60 d 浸泡龄期图

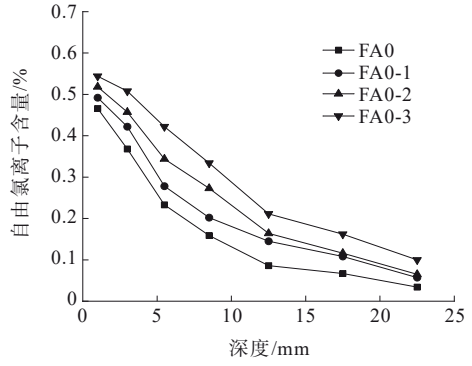
图 2　未开裂截面下的自由氯离子含量图

Figure 2　Free chloride ion content in uncracked sections

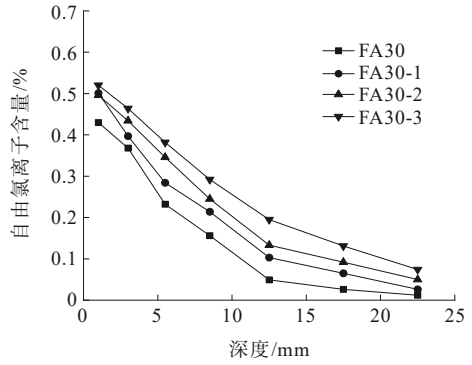
图 3 为浸泡 30 d 后开裂处不同掺量粉煤灰的自由氯离子含量图。

由图 3 可知：① 在相同深度处，开裂截面处的自由氯离子含量明显大于未开裂截面处的，且随着裂缝宽度的加大，增大的程度越明显，这说明裂缝加快了氯离子的扩散速度；② FA0、FA30、FA40 在深度大于 10 mm 时氯离子含量随着裂缝宽度的加大而增大，但是氯离子含量随着深度的增加而减小速率却比较平缓，说明此时裂缝宽度对氯离子含量影响程度较低。而 FA50 在深度大于 10 mm 时随着侵蚀深度的增加氯离子含量逐渐减小的趋势比较明显，且裂缝宽度越大，减小趋势越明显。由此可以推断氯离子在裂缝内的传输过程中，试件的抗氯离子性能越差，裂缝对氯离子含量变化产生的影响程度就越大；③ 裂缝宽度从 0.05 mm 增加到 0.1 mm，相比于未开裂截面处，对氯离子含量增大程度的提升并不显著，当裂缝宽度增加到 0.2 mm 时，裂缝对氯离子含量增大程度的提升比较显著。例如：在 10.0～12.5 mm 区域内，FA0-1、FA0-2 和 FA0-3 自由氯离子含量为 FA0 的 2.1 倍、2.4 倍和 3.1 倍。过多掺量的粉煤灰和

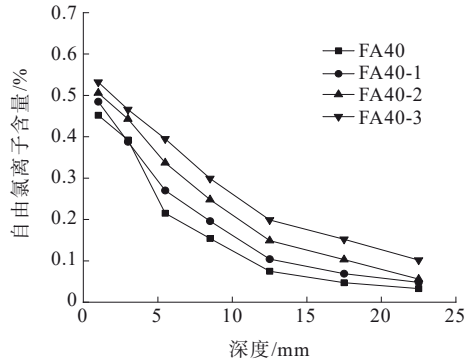
裂缝宽度的增大会使得试件的抗氯离子性能下降。



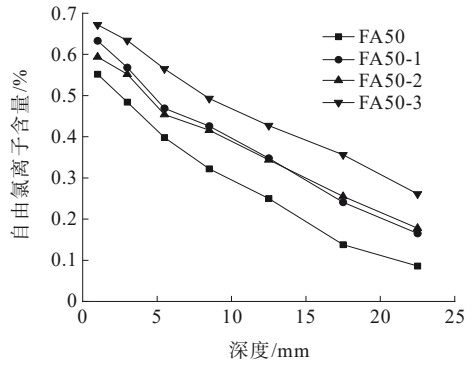
（a）FA0自由氯离子含量图



（b）FA30自由氯离子含量图



（c）FA40自由氯离子含量图

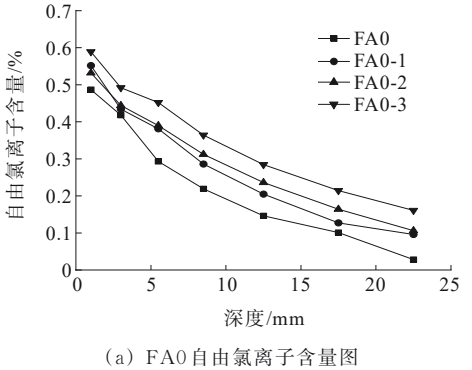


（d）FA50自由氯离子含量图

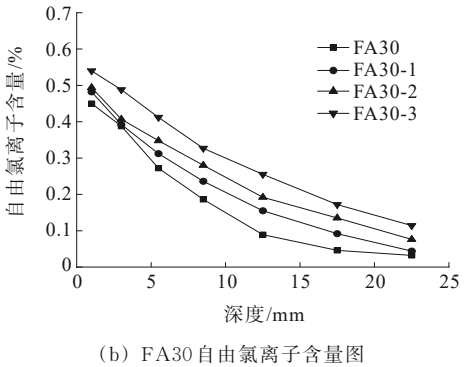
图3 30 d浸泡龄期自由氯离子含量图

Figure 3 Free chloride ion content after 30 days of soaking

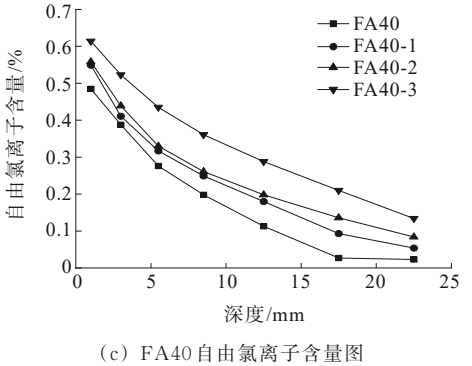
图4为自然浸泡60 d后开裂处不同掺量粉煤灰的自由氯离子含量图。



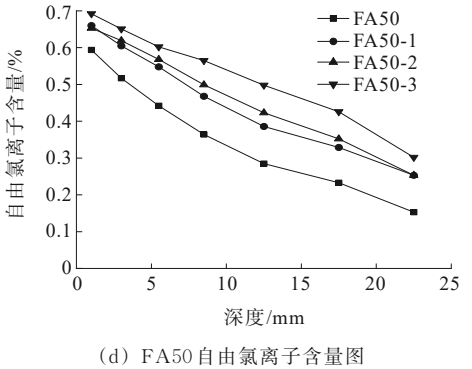
（a）FA0自由氯离子含量图



（b）FA30自由氯离子含量图



（c）FA40自由氯离子含量图



（d）FA50自由氯离子含量图

图4 60 d浸泡龄期自由氯离子含量图

Figure 4 Free chloride ion content after 60 days of soaking

由图4可知：随着浸泡时间增加，相同侵蚀深度处自由氯离子含量仍然随着裂缝宽度的加大而增大。对比图3，在相同裂缝宽度的条件下，同一试件

在相同侵蚀深度处的自由氯离子含量随着浸泡龄期增加而增大，且由于侵蚀程度加大，各试件在深度大于10 mm时随着深度增加自由氯离子含量均有明显减小的趋势。60 d浸泡龄期下的自由氯离子含量均高于30 d浸泡龄期的氯离子含量。

2.2　表观氯离子扩散系数

当混凝土中孔隙溶液处于饱和状态时，氯离子的主要传输方式为扩散。其行为可以用文献[18]给出的Fick第二定律方程解析解来描述，一维扩散时其形式如式(1)所示：

$$C(x,t)=C_0+(C_s-C_0)\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right] \quad (1)$$

式中：$C(x,t)$为t时刻距混凝土x处氯离子含量；C_0为混凝土内初始氯离子含量；C_s为表面氯离子含量；erf()为误差函数；D为氯离子扩散系数。本试验视试件内初始氯离子含量$C_0=0$，C_s为恒定值。

文献[19]提出氯离子扩散系数与龄期有关，随着时间的推移，混凝土内氯离子扩散系数会随着水化程度的提升而降低，降低的程度一般用指数函数来表述，如式(2)所示：

$$D(t)=D_0\left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (2)$$

式中：D_0为溶液中浸泡t_0时刻后的氯离子扩散系数；m为时间衰减系数。

考虑时间的修正模型表达式为：

$$C(x,t)=C_0+(C_s-C_0)\left\{1-\mathrm{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{Dt/(1-m)}}\right]\right\} \quad (3)$$

将试验过程中得到的未开裂截面下不同浸泡时间不同深度的自由氯离子含量代入式(1)，使用Matlab工具箱拟合出表观氯离子扩散系数D_a，把拟合出的D_{a30}与D_{a60}通过式(2)计算得到各试件的时间衰减效应系数m。FA0、FA30、FA40和FA50的m值分别为0.30、0.56、0.62和0.39。

再将m值代入式(3)后对图3和图4中的自由氯离子含量进行拟合，得到的氯离子扩散系数见表2、3。

由表2、3可知：

(1) 氯离子含量拟合结果判定系数都在0.95以上，拟合结果较好，推断出裂缝宽度＜0.2 mm时，裂缝内的氯离子传输行为符合Fick第二定律。

(2) 氯离子扩散系数随着裂缝宽度的加大而增大，当裂缝宽度从0.05 mm增加到0.10 mm时，氯离子扩散系数增大的程度不明显，0.05 mm裂缝宽度试件的扩散系数为无裂缝试件的1.40～1.67倍，0.1 mm

表2　30 d浸泡龄期下各试件氯离子扩散系数

Table 2　Chloride ion diffusion coefficient of each specimen after 30 days of soaking

试件编号	w/mm	D_a/(10^{-12} m^2·s^{-1})	C_s/%	R^2
FA0	0.00	11.47	0.498	0.983
	0.05	18.59	0.512	0.971
	0.10	23.06	0.550	0.992
	0.20	32.40	0.586	0.985
FA30	0.00	6.26	0.488	0.993
	0.05	8.64	0.537	0.987
	0.10	12.38	0.536	0.987
	0.20	17.44	0.554	0.993
FA40	0.00	5.54	0.506	0.981
	0.05	7.78	0.506	0.986
	0.10	11.25	0.541	0.991
	0.20	17.07	0.555	0.983
FA50	0.00	27.50	0.579	0.997
	0.05	45.06	0.649	0.998
	0.10	52.80	0.613	0.998
	0.20	77.06	0.693	0.993

表3　60 d浸泡龄期下各试件氯离子扩散系数

Table 3　Chloride ion diffusion coefficient of each specimen after 60 days of soaking

试件编号	w/mm	D_a/(10^{-12} m^2·s^{-1})	C_s/%	R^2
FA0	0.00	9.31	0.515	0.990
	0.05	14.15	0.554	0.979
	0.10	18.66	0.540	0.990
	0.20	24.53	0.589	0.980
FA30	0.00	4.24	0.497	0.993
	0.05	6.67	0.501	0.993
	0.10	9.33	0.507	0.991
	0.20	12.83	0.565	0.987
FA40	0.00	3.56	0.522	0.996
	0.05	5.44	0.549	0.982
	0.10	6.84	0.551	0.972
	0.20	11.17	0.617	0.989
FA50	0.00	21.04	0.598	0.982
	0.05	35.18	0.672	0.985
	0.10	39.38	0.682	0.992
	0.20	54.39	0.717	0.983

裂缝宽度试件的扩散系数为无裂缝试件的1.86～2.03倍。裂缝宽度为0.2 mm时，氯离子扩散系数显著增加，为无裂缝试件的2.58～3.13倍。根据文献[20]关于裂缝宽度阈值研究的总结，当裂缝宽度为0.05 mm时，裂缝已对氯离子扩散产生了增大的效应，表明裂缝宽度下阈值为0～0.05 mm；当裂缝宽度从0.05 mm增加到0.1 mm时，增大效应不明显，说明此时裂缝宽度值仍相对较小，相较于在溶液中的传输速度，氯离子在裂缝内的传输速度较慢，裂缝对氯离子传输起到了一定的阻碍作用。当裂缝宽度增加到0.2 mm时，氯离子扩散系数增大的程度较为明显，推断出裂缝宽度已达到上阈值，氯离子在其内部的传输速度接近在溶液中的传输速度，此时裂缝面等同于外部暴露面。

(3) 水泥砂浆的氯离子扩散系数随着裂缝宽度、粉煤灰掺量的变化趋势。当粉煤灰掺量一定时，氯离子扩散系数均随着裂缝宽度的增大而增大；当裂缝宽度一定时，氯离子扩散系数随粉煤灰掺量变化的趋势也是一致的，均为FA50＞FA0＞FA30＞FA40。粉煤灰掺量不大于40%且裂缝宽度不大于0.1 mm时，氯离子扩散系数基本上比相同浸泡龄期下的未开裂纯水泥砂浆试件低，说明适当的粉煤灰掺量能够有效改善带裂缝水泥砂浆的抗氯离子性能。当粉煤灰掺量达到50%时，其无裂缝试件的氯离子扩散系数大于0.2 mm裂缝的FA30、FA40的扩散系数，与0.2 mm裂缝的FA0的扩散系数大小相近，说明50%的粉煤灰掺量与0.2 mm裂缝对纯水泥砂浆抗氯离子性能造成的影响程度是相近的。其中，FA50-3试件抗氯离子性能较差，在30 d与60 d浸泡龄期时，其氯离子扩散系数分别是FA0氯离子扩散系数的6.7倍和5.8倍。FA40在30 d与60 d浸泡龄期时的氯离子扩散系数分别是FA0的50%和40%。当掺量增大到50%时，粉煤灰砂浆的抗氯离子性能急剧下降，这是由于粉煤灰掺量过大，对应减少了水泥用量，水化产生的$Ca(OH)_2$减少，火山灰反应程度减弱，使C—S—H等凝胶物质生成量减少，对氯离子结合能力有一定程度上的削弱。

2.3 氯离子扩散系数模型

对于裂缝宽度来说，将本文30 d浸泡龄期下FA0的氯离子扩散系数试验值与文献[14]部分氯离子扩散系数试验值进行对比，如图5所示。

从图5可以看出：在裂缝宽度较小时，$D(t)$与裂缝宽度w近似呈线性函数关系，本文与文献[14]的试验结果的大小和总体变化的趋势都较为相近。且与文献[15]所提出的人工预制裂缝宽度与氯离子扩散系数呈线性关系的观点完全吻合。针对粉煤灰掺量的影响分析，将无裂缝纯水泥试件(FA0)的氯离子扩散系数设为基准数1，然后计算出本文和文献[21]中不同粉煤灰掺量的氯离子扩散系数相对于基准数的放大倍数K并进行对比，如图6所示。

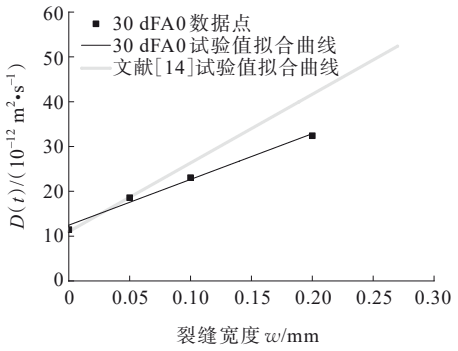


图5 裂缝宽度影响因素比较图

Figure 5 Comparison of factors affecting crack width

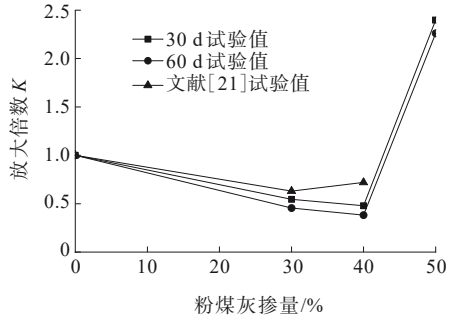


图6 粉煤灰掺量影响因素比较图

Figure 6 Comparison of factors affecting FA content

从图6可以看出：FA30、FA40的抗氯离子性能优于FA0，这一规律与文献[21]所得出的结果一致。而FA50的抗氯离子性能低于FA0，与文献[5]所总结的粉煤灰掺量为50%时，抗氯离子性能大于纯水泥混凝土的结论是相反的，这可能是因为混凝土与砂浆两者的结构存在差异性。混凝土中含有粗骨料，骨料与水泥基体之间存在界面过渡区，而大掺量粉煤灰所具有的微集料效应可以将界面过渡区的空白区域充分填充起来，从而提高混凝土的抗氯离子性能。但砂浆结构中没有粗骨料，所以粉煤灰掺量为50%时，在砂浆中的微集料效应没有被充分发挥，导致抗氯离子性能下降。进一步通过数值分析得出$D(t)$与粉煤灰掺量f呈三次函数关系。

根据上述总结的规律，使用泰勒级数展开的方式对试验值进行拟合，得出氯离子扩散系数关系式：

$$D(t)=D_0(t)(a_1f^3+b_1f^2+c_1f+d_1f^2w+e_1fw+f_1w+g_1) \quad (4)$$

式中：$D_0(t)$为未开裂水泥砂浆试件的氯离子扩散系数；a_1、b_1、c_1、d_1、e_1、f_1、g_1均为拟合参数。

基于表2、3数据的拟合分析得到式(5)和(6)。分别对应30 d和60 d浸泡龄期的氯离子扩散系数表达式，拟合精度分别为0.985和0.982，拟合效果较好。可以观察到浸泡时间对表达式的函数形式并无直接影响，只会改变其中各参数值的大小。计算值与拟合值的比较见图7、8。

$$D(t)=11.47\times10^{-12}(345.904f^3-255.059f^2+44.356f+212.990f^2w-86.005fw+9.140w+1.063) \quad (5)$$

$$D(t)=9.31\times10^{-12}(339.812f^3-249.582f^2+43.076f+172.233f^2w-71.746fw+8.461w+1.039) \quad (6)$$

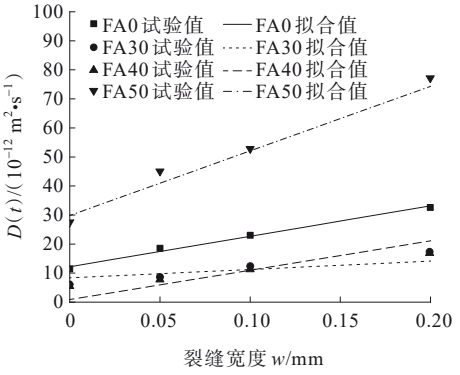


图7　30 d浸泡龄期拟合结果图

Figure 7　Fitting results after 30 days of soaking

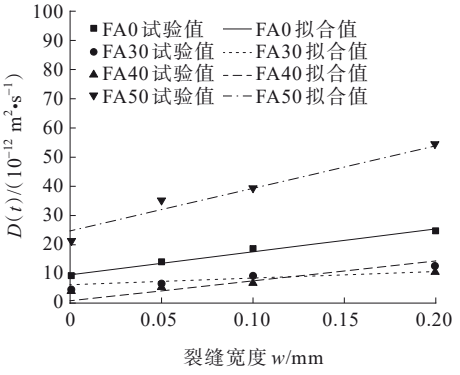


图8　60 d浸泡龄期拟合结果图

Figure 8　Fitting results after 60 days of soaking

3　结论

本文采用人工预制裂缝方法，在不同粉煤灰掺量的砂浆试件中制备不同宽度的裂缝，通过自然浸泡30 d、60 d后，测定了完好试件和含裂缝试件的自由氯离子含量，拟合出氯离子扩散系数表达式，并建立了相应的数值模型，得出以下结论：

(1) 裂缝宽度显著影响氯离子侵蚀过程，自由氯离子含量与裂缝宽度呈正相关。当裂缝宽度从0.05 mm增加到0.1 mm时，氯离子含量增加不明显；裂缝宽度增加到0.2 mm时，氯离子含量显著增大。裂缝下阈值为0～0.05 mm，裂缝上阈值则为0.1～0.2 mm。

(2) 无论是完整试件，还是带裂缝试件，掺量不大于40%的粉煤灰试件在浸泡30 d后，深度大于10 mm区域的氯离子含量变化比较缓慢，50%粉煤灰砂浆试件下降趋势比较明显。60 d后浸泡后，氯离子含量随深度增加下降速率均较为明显，侵蚀程度加深。

(3) 掺入30%、40%粉煤灰砂浆的试件经过长期养护后，能有效改善水泥砂浆的抗氯离子性能。当粉煤灰掺量达到50%时，缺乏足够的$Ca(OH)_2$参与二次水化反应，试件内部密实性降低，导致抗氯离子性能降低。

(4) 大掺量粉煤灰砂浆的抗氯离子性能受到多重因素影响。通过分析考虑时间衰减效应的模型，计算得到氯离子扩散系数，并据此建立了综合考虑粉煤灰掺量、裂缝宽度及不同浸泡时间的氯离子扩散系数模型。相关研究结果可为大掺量粉煤灰水泥砂浆结构寿命预测提供理论依据。未来可以通过延长浸泡时间、细化裂缝宽度，以及增加环境多样性等因素，对模型进行进一步验证与完善。

参考文献：

References：

[1] 张志明，彭建新，程小康，等. 开裂混凝土中氯离子等效扩散系数计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文)，2024，46(5)：184-190.
ZHANG Zhiming，PENG Jianxin，CHENG Xiaokang，et al. Calculation method of chloride ion equivalent diffusion coefficient in cracked concrete[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering，2024，46(5)：184-190.

[2] 彭建新，阳逸鸣，张建仁. 锈蚀钢筋截面面积分析及强度概率模型[J]. 中外公路，2015，35(5)：124-129.
PENG Jianxin，YANG Yiming，ZHANG Jianren. Cross-sectional area analysis and strength probability model of corroded reinforcement[J]. Journal of China & Foreign Highway，2015，35(5)：124-129.

[3] 杨燕，谭康豪，覃英宏. 混凝土内氯离子扩散影响因素的研究综述[J]. 材料导报，2021，35(13)：13109-13118.
YANG Yan，TAN Kanghao，QIN Yinghong. Review of research on the influencing factors of chloride ion

diffusion in concrete[J]. Materials Reports, 2021, 35(13): 13109-13118.

[4] 范志宏,杨海成,于方.基于暴露试验的大掺量粉煤灰混凝土耐久性试验研究[J].硅酸盐通报,2020,39(8):2622-2627,2649.
FAN Zhihong, YANG Haicheng, YU Fang. Durability test of high volume fly ash concrete based on long-term exposure test[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020,39(8):2622-2627,2649.

[5] 高延红,汪蒙,周晓芸,等.粉煤灰掺量对混凝土氯离子扩散性能稳定时间的影响及机理[J].自然灾害学报,2020,29(6):30-40.
GAO Yanhong, WANG Meng, ZHOU Xiaoyun, et al. Effect of fly ash content on the stable time of chloride ion diffusion property of concrete and its mechanism[J]. Journal of Natural Disasters,2020,29(6):30-40.

[6] ORTEGA J, TREMIÑO R, SÁNCHEZ I, et al. Effects of environment in the microstructure and properties of sustainable mortars with fly ash and slag after a 5-year exposure period[J].Sustainability,2018,10(3):663.

[7] 高子瑞,李淑娥,金明东,等.裂缝混凝土中修正的氯离子运移模型研究[J].中外公路,2016,36(5):230-234.
GAO Zirui, LI Shue, JIN Mingdong, et al. Study on modified chloride ion transport model in cracked concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway,2016,36(5):230-234.

[8] 司秀勇,高青宇,潘慧敏,等.环境和疲劳荷载作用下开裂混凝土寿命预测研究进展[J].硅酸盐通报,2024,43(1):1-15.
SI Xiuyong, GAO Qingyu, PAN Huimin, et al. Research progress on life prediction of cracked concrete under environment and fatigue load[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2024,43(1):1-15.

[9] 张希瑾,田稳苓,王浩宇,等.带裂缝混凝土氯离子扩散作用试验研究及数值模拟[J].土木建筑与环境工程,2017,39(2):35-42.
ZHANG Xijin, TIAN Wenling, WANG Haoyu, et al. Experimental analysis and numerical simulation of chlorideion diffusion in concrete with cracks[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2017,39(2):35-42.

[10] DJERBI A, BONNET S, KHELIDJ A, et al. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete[J]. Cement and Concrete Research,2008,38(6):877-883.

[11] PARK S S,KWON S J,JUNG S H.Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation[J]. Construction and Building Materials,2012,29:183-192.

[12] JANG S Y, KIM B S, OH B H. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests[J].Cement and Concrete Research,2011,41(1):9-19.

[13] 黎鹏平,付文金,熊建波,等.横向荷载裂缝对海洋浪溅区混凝土耐久性劣化影响[J].建筑结构,2021,51(2):23-26,84.
LI Pengping, FU Wenjin, XIONG Jianbo, et al. Influence of transverse load cracks on concrete durability degradation in ocean splash zone[J].Building Structure,2021,51(2):23-26,84.

[14] 左国望,苏骏,李扬.氯盐侵蚀环境下裂缝对混凝土内氯离子含量的影响分析[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(2):269-273.
ZUO Guowang, SU Jun, LI Yang. Research on influence of crack width on chloride ion content in concrete in chloride erosion environment[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2016,49(2):269-273.

[15] 沈孛,刘立渠,刁波.冻融侵蚀环境下持续荷载裂缝和人工裂缝对氯离子扩散及寿命预测的影响[J].工业建筑,2021,51(6):170-175,155.
SHEN Bei, LIU Liqu, DIAO Bo. Effects of sustained loading cracks and artificial cracks on chloridion diffusion and service life prediction under freeze-thaw erosion cycles[J].Industrial Construction,2021,51(6):170-175,155.

[16] 张菊辉,刘颖慧,时哲敏.氯离子在开裂混凝土中的扩散特性研究[J].建筑材料学报,2018,21(2):299-303.
ZHANG Juhui, LIU Yinghui, SHI Zhemin. Diffusion property of chloride in cracked concrete[J]. Journal of Building Materials,2018,21(2):299-303.

[17] 陆春华,刘荣桂,崔钊玮,等.开裂状态下沿海干湿区桥梁粉煤灰混凝土氯离子扩散模型[J].中国公路学报,2015,28(8):40-49.
LU Chunhua, LIU Ronggui, CUI Zhaowei, et al. Chloride diffusion model in cracked fly ash concrete bridge subjected to coastal drying-wetting cycles[J]. China Journal of Highway and Transport,2015,28(8):40-49.

[18] 钟小平,金伟良,张宝健.氯盐环境下混凝土结构的耐久性设计方法[J].建筑材料学报,2016,19(3):544-549.
ZHONG Xiaoping, JIN Weiliang, ZHANG Baojian. Durability design method of concrete structures under chloride environment[J]. Journal of Building Materials, 2016,19(3):544-549.

[19] 张秦铭,李全旺,李克非,等.氯盐环境下港珠澳工程混凝土耐久性质量控制[J].工程力学,2015,32(3):175-182.
ZHANG Qinming, LI Quanwang, LI Kefei, et al. Quality control for concrete durability when subjected to chloride diffusion in Hong Kong–Zhuhai–Macau sea link project[J]. Engineering Mechanics,2015,32(3):175-182.

[20] 田雪凯,王海龙,程旭东,等.混凝土裂缝形态参数对Cl^-传输性能影响的研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2018,38(4):309-316.
TIAN Xuekai, WANG Hailong, CHENG Xudong, et al. Effect of crack characteristics on chloride transport in concrete: An overview[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2018,38(4):309-316.

[21] 曹文涛,余红发,胡蝶,等.粉煤灰和矿渣对表观氯离子扩散系数的影响[J].武汉理工大学学报,2008,30(1):48-51.
CAO Wentao, YU Hongfa, HU Die, et al. Influence of fly ash and slag on apparent chloride diffusion coefficient of concretes[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008,30(1):48-51.