

文章编号:1007-9629(2025)04-0323-07

再生砖细骨料混凝土抗氯离子渗透性能与孔结构的灰色关联分析

赵顺波^{1,2}, 朱瑞丰¹, 党钧陶^{1,2,*}, 苗伟¹, 刘耘池¹

(1. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045;

2. 华北水利水电大学 河南省生态建材工程国际联合实验室, 河南 郑州 450045)

摘要:评价了不同粒径再生砖细骨料(RFCB)的表面活性,研究了RFCB颗粒级配、替代率和初始饱和度对再生砖细骨料混凝土(RBC)抗氯离子渗透性能和孔隙结构的影响.结果表明:在碱性环境下,RFCB的表面活性随其粒径减小而逐渐增大;RFCB的掺入增加了混凝土的总孔隙体积和孔隙率,但细化了其孔径分布,降低了其平均孔径和最可几孔径;RFCB还减小了混凝土的氯离子扩散系数和电通量,分别降低了19%~59%和24%~54%.最后,基于灰色关联理论和多元非线性回归分析,确定了与RBC抗氯离子渗透性能关联度最高的平均孔径、最可几孔径参数,建立了RBC氯离子扩散系数、电通量与孔结构参数的数学模型.

关键词:再生砖细骨料;表面活性;电通量;氯离子扩散系数;孔结构;灰色关联度

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.005

Grey Correlation Analysis between Chloride Permeability and Pore Structure of Concrete Incorporating Recycled Fine Aggregate from Clay Bricks

ZHAO Shunbo^{1,2}, ZHU Ruifeng¹, DANG Juntao^{1,2,*}, MIAO Wei¹, LIU Yunchi¹

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. International Joint Research Lab for Eco-building Materials and Engineering of Henan,

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The surface activity of recycled fine aggregate from clay brick (RFCB) with different particle size was evaluated. Furthermore, the effect of particle size distribution, replacement ratio and initial water saturation of RFCB on the chloride permeability and pore structure of concrete incorporating recycled fine aggregate from clay bricks (RBC) was carried out. The results show that the surface activity of RFCB increases with the decrease of particle size in the alkaline environment. The incorporation of RFCB increases the total pore volume and porosity of RBC, but refines the pore size distribution, thus reduces the average pore diameter and the critical pore diameter. The chloride diffusion coefficient and electric flux of RBC are also reduced by 19%–59% and 24%–54%, respectively. Based on the grey correlation theory, the average pore diameter and critical pore diameter parameters are more sensitive to the chloride permeability. On this basis, the mathematical models of chloride ion diffusion coefficient, electric flux and pore structure parameters are established using the multivariate nonlinear regression analysis.

Key words: recycled fine aggregate from clay brick; recycled concrete; chloride diffusion coefficient; electric flux; pore structure; grey correlation analysis

收稿日期:2024-05-08;修订日期:2024-07-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208247);河南省青年骨干教师培养计划项目(2024GGJS062)

第一作者:赵顺波(1964—),男,河北武邑人,华北水利水电大学教授,博士生导师,博士.E-mail:sbzhao@ncwu.edu.cn

通讯作者:党钧陶(1990—),男,河南郑州人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:dangjuntao@ncwu.edu.cn

随着新型城镇化进程的推进,建筑废弃物的激增和自然资源的滥挖滥采对生态系统造成了长期且不可逆的损害.值得注意的是,建筑垃圾中废弃砖块所占的比例较大,传统采用堆放和简单填埋的处理方法,不仅会占用土地资源,还会进一步污染土壤^[1].与此同时,天然砂石骨料的开采也会加重生态环境的恶化.因此,废弃砖块的资源化利用对推动绿色低碳发展具有重要的意义.与河砂相比,再生砖细骨料(RFCB)自身固有的多孔结构及其在破碎过程中产生的次生裂缝,是造成其低表观密度、低弹性模量和高吸水率的主要原因.但是,RFCB在一定程度上可以缓解再生砖粗骨料混凝土孔隙大的缺陷,为提高其利用率提供了可行的途径^[2].

氯离子侵蚀是引起混凝土内部钢筋腐蚀的主要原因之一^[3].而混凝土的孔隙结构直接影响了其抗氯离子渗透性能.李淑进等^[4]研究表明,混凝土的渗透系数由最可几孔径决定.史文娟等^[5]建立了可以预测再生骨料绝热混凝土抗氯离子渗透能力的氯离子扩散系数-孔隙结构双参数模型.张献蒙等^[6]研究表明,由于再生砖骨料本身孔隙率较高、吸水率较大,在混凝土中掺入再生砖骨料导致其抗氯离子渗透性能明显降低.Adamson等^[7]研究发现,含再生砖粗骨料的混凝土孔隙率较高,是混凝土抗氯离子渗透性能劣化的主要原因.然而,由于再生砖细骨料表面活性的特殊性,再生砖细骨料混凝土的抗氯离子渗透性能与孔隙结构的关联性分析还未深入研究.

因此,本文首先评价了不同颗粒级配RFCB的表面活性,研究了RFCB的颗粒级配、替代率和初始饱水度对混凝土抗氯离子渗透性能和孔隙结构的影响;其次基于灰色关联度理论,对RFCB混凝土抗氯离子渗透性能与孔结构参数进行了相关性分析;最后,通过多元非线性回归建立了氯离子渗透系数或电通量与平均孔径和最可几孔径的数学模型,从而定量分析平均孔径和最可几孔径对混凝土抗氯离子渗透性能的影响.

表1 再生砖细骨料混凝土的配合比
Table 1 Mix proportions of RBC

Specimen No.	Water	Cement	CA	RS	RFCB	Initial water saturation
R0	171	380	1 077	780	0	0
R50AP	171	380	1 077	390	356	25
R50AF	171	380	1 077	390	356	32
R50BP	171	380	1 077	390	375	36
R100AP	171	380	1 077	0	712	51

1.3 RFCB表面活性测试

根据 Snellings 等^[8]人的研究方法,用骨料在碱性

1 试验

1.1 原材料

水泥选取河南天瑞集团水泥有限公司生产的42.5级普通硅酸盐水泥;天然细骨料为细度模数2.65的河砂(RS);粗骨料(CA)为连续级配5~20 mm的碎石.建筑拆除过程中产生的废弃黏土砖被运输到实验室后经破碎和筛分后,制成0~5 mm(RFCB-a)和0.15~5 mm(RFCB-b)2种不同颗粒级配的RFCB,可替代河砂(RS)制备再生硅细骨料混凝土(RBC).依据GB/T 14684—2022《建筑用砂》,测得RFCB-a和RFCB-b的吸水率(质量分数,文中涉及的组成、比值等均为质量分数或质量比)分别为9.0%和11.4%.河砂、再生砖细骨料和粗骨料的级配曲线如图1所示.

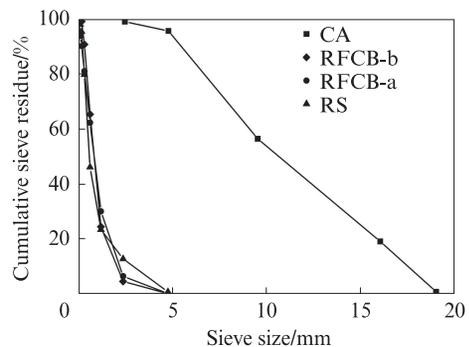


图1 粗、细骨料颗粒级配曲线

FIG. 1 Gradation curves of coarse and fine aggregates

1.2 配合比设计

本试验研究了RFCB不同的颗粒级配、替代率和初始饱水度对混凝土抗氯离子渗透性能和孔隙结构的影响.RBC配合比设计目标强度等级为C40,水灰比为0.45,具体如表1所示.试件编号中,R0为普通混凝土;最后一位字母F代表RFCB的完全饱水,即骨料为饱和面干状态,P代表RFCB的部分饱水,即骨料在搅拌时快速吸水后达到的状态;倒数第2个字母A和B分别代表RFCB颗粒级配为0~5 mm和0.15~5 mm.

环境中溶出的Si、Al离子浓度来评价骨料表面活性,如图2所示.首先,选用NaOH制备出pH值为13的

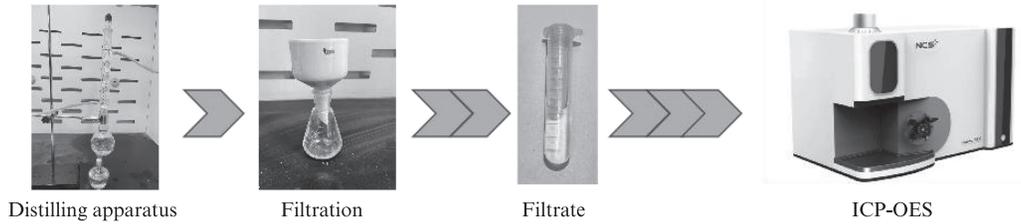


图2 RFCB表面活性测试流程图

Fig. 2 Flow chart of RFCB surface activity test

溶液以模拟混凝土中存在的碱性环境;其次,将1 g RFCB加入100 mL碱性溶液中煮沸30 min,在此过程中需在蒸馏装置上安装回流冷凝器以保持溶液的碱性;然后,将悬浮液用漏斗过滤得到滤液,并用HCl溶液酸化,再经煮沸蒸发得到残渣;最后,将残渣用25 mL体积比为1:1盐酸溶液消解,借助ICP-OES设备分析Si、Al离子浓度。

1.4 RBC抗氯离子渗透性能测试

为了充分发挥RFCB的表面活性,混凝土需在标准养护环境下养护至365 d后才可开展测试。利用NJ-DTL型电通量测量仪和NJ-RCM型氯离子扩散系数测量仪,分别对RBC的电通量和氯离子扩散系数进行了测定。抗氯离子渗透性能试验依据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行。

1.5 RBC孔隙结构表征

从养护365 d后的RBC核心处取芯制样,利用压汞仪(MIP)、扫描电镜和能谱分析仪分别对样品的孔隙结构、微观形貌和化学成分进行表征,其中孔径测量范围为3.2 nm~360 μm 。

2 结果与讨论

2.1 RFCB表面活性

不同粒径区间的RFCB在pH值为13的NaOH溶液中溶出的Si、Al离子浓度如图3所示。由图3可见:(1)RFCB存在不同程度的Si、Al离子溶出,说明其具有一定的火山灰活性;而且溶出的Si离子浓度明显高于Al离子浓度,这是由于RFCB主要化学成分中 SiO_2 的含量远大于 Al_2O_3 所导致。Hasan等^[9]研究表明,废砖中 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量较高,证实了其具有火山灰活性。(2)随着RFCB粒径的减小,在碱性环境中Si、Al离子的溶出浓度随之上升,且上升幅度明显;相较于粒径区间为0.15~0.3 mm和2.36~4.75 mm的RFCB,粒径区间为0~0.075 mm的RFCB的Si、Al离子溶出量分别增大了42.3%和88.7%,表明RFCB粒径的大小对其表面活性具有显著影响。这主要是因为当粒径较小时,RFCB比表面积

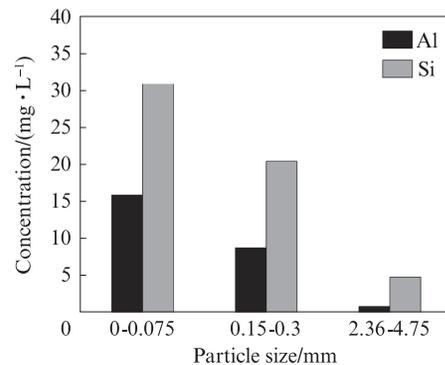


图3 RFCB表面活性

Fig. 3 Surface activity of RFCB

增大,可以充分与NaOH溶液发生化学反应,从而显著提高了Si、Al离子的溶出量。

2.2 RBC抗氯离子渗透性能

2.2.1 氯离子扩散系数

RBC的氯离子扩散系数(D)如图4所示。由图4可见,掺入RFCB后混凝土的氯离子扩散系数明显减小,且随着RFCB替代率的增加而降低。RFCB表面活性的发挥是造成氯离子渗透系数降低的主要原因。具体来说,RFCB溶出的Si、Al离子与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,消耗了部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,减小了腐蚀反应的可能性。同时,RFCB火山灰反应生成的水化产物不仅有助于细化混凝土的孔隙结构,还可以增强氯离子的结合能力,从而抑制了混凝土中氯离子的扩散^[10]。

不同颗粒级配和初始饱水度的RFCB对混凝土的氯离子扩散也有不同程度的影响。由图4可知,试件R50AP(RFCB-a的粒径范围为0~5 mm)相较于试件R50BP(RFCB-b的粒径范围为0.15~5 mm)的氯离子扩散系数降低约37%,这是因为RFCB的粒径越小,RFCB的表面活性越高,有利于促进火山灰反应的发生,减少了混凝土中的易腐蚀成分^[11],从而增强其对氯离子扩散的抵抗力。此外,与RFCB完全饱水的试件R50AF相比,RFCB部分饱水的试件R50AP的氯离子扩散系数降低了约34%。原因在于部分吸水的再生砖细骨料仍具有较好的吸释水性能,会改变混凝土的有效水灰比,进而对混凝土的水

化进程产生影响^[12].部分饱水的RFCB可能会进一步降低混凝土的有效水灰比,有助于增强再生混凝土的密实度,从而减少了氯离子渗透的通道.

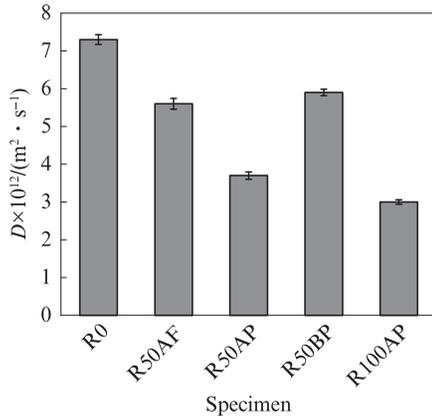


图4 RBC的氯离子扩散系数

Fig. 4 Chloride diffusion coefficient of RBC

2.2.2 电通量

RBC的电通量(Q)如图5所示.由图5可见:(1)与较高电通量的试件R0相比,掺入RFCB导致混凝土的电通量下降了大约24%~54%,尤其是R100AP的电通量降低最多.(2)RFCB不同的颗粒级配、替代率和初始饱水度对混凝土电通量的影响也较显著.RBC的电通量随RFCB替代率的增加呈下降趋势,这与其对氯离子扩散系数的影响趋势相一致.相比试件R50AP,R100AP的电通量降低约15%.这是因为掺入大量具有表面活性的RFCB有利于发挥其火山灰活性,导致混凝土电通量降低.同时,RBC的电通量随初始饱水度和颗粒级配的减小也呈下降趋势.当替代率和颗粒级配相同时,相比完全饱水的RFCB,掺入部分饱水的RFCB导致混凝土的电通量降低了18%.另外,当替代率和颗粒级配相同时,试件R50AP比R50BP混凝土的电通量降低了28%.具体原因与不同颗粒级配和初始饱

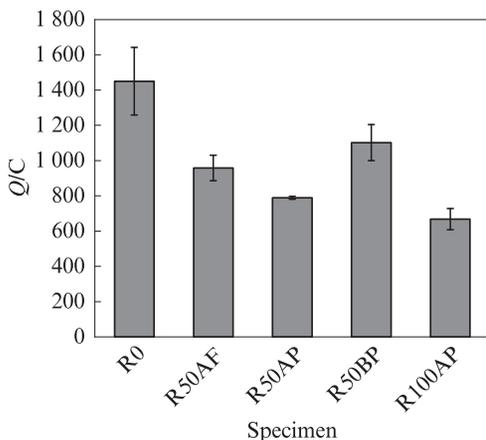


图5 RFCB混凝土的电通量

Fig. 5 Electric flux of recycled concrete with RFCB

水度的RFCB对混凝土氯离子渗透系数的影响相一致.

2.3 RBC孔结构

图6为RFCB不同的颗粒级配、替代率和初始饱水度对RBC孔隙特征的影响.由图6(a)可见,与试件R0相比,试件R50AP、R50AF、R50BP、R100AP的孔隙率(P)和总孔隙体积(V_p)分别增加了27%和65%、42%和85%、68%和132%、60%和123%.这主要是由于RFCB自身多孔结构和微裂纹所导致的混凝土总孔隙体积和孔隙率的增加^[13].由图6(b)可见,掺入RFCB的混凝土平均孔径(Z)和最可几孔径(F)比试件R0都有所减小.具体原因在于RFCB的表面活性和微填充作用可填充在混凝土中的孔隙,从而减小了平均孔径和最可几孔径.当RFCB初始饱水度和替代率增大时,RBC的总孔隙体积和孔隙率也随之显著增大.相比粒径较大的RFCB,包含细颗粒的RFCB在一定程度上减小了RBC的总孔隙体积和孔隙率,这主要归因于粒径较细的RFCB能够充分发挥其表面活性和微填充作用.

此外,依据吴中伟院士提出的孔结构理论^[14],将混凝土分为:无害孔($d < 20 \text{ nm}$)、少害孔($20 \text{ nm} \leq d \leq 50 \text{ nm}$)、有害孔($50 \text{ nm} < d \leq 200 \text{ nm}$)、多害孔($d > 200 \text{ nm}$).将MIP数据处理后得到RBC的孔径分布,如图7所示.由图7可见,掺入RFCB增加了混凝土无害孔的体积分数,同时减少了有害孔的体积分数.原因在于:一方面,RFCB中的细颗粒可在混凝土孔隙中起到填充作用;另一方面,RFCB的活性成分可与水泥水化产物发生火山灰反应,生成附加水化产物,而且RFCB的释水行为也有利于后期水化反应,是增加无害孔和减少有害孔的主要原因^[15].由此可见,RFCB的表面活性可以细化RBC的孔隙结构^[16],从而增强了RBC的抗氯离子渗透能力.

2.4 基于灰色关联理论的RBC孔结构与抗氯离子渗透性能的关系

在多属性决策分析中,灰色关联度方法通过比较参考序列和比较序列的关联紧密度进行排序,从而辨认出对参考序列影响最大的关键因素^[17].本文分别以RBC的氯离子扩散系数和电通量作为参考序列,孔隙特征参数和孔径分布参数作为比较序列,计算出各比较序列与参考序列的灰色关联度.如果得出的关联度系数 $R_i \geq 0.6$,说明该因素与参考序列的关联度高,且 R_i 越接近1,则相关性越强;相反,如果 $R_i < 0.6$,则认为相关性较差.

RBC孔结构参数与氯离子扩散系数的灰色关联度结果如表2所示.由表2可知,RBC孔结构参数对氯离子扩散系数影响显著程度的因素排序为:平均孔径(0.98) > 最可几孔径(0.95) > 有害孔体积分数

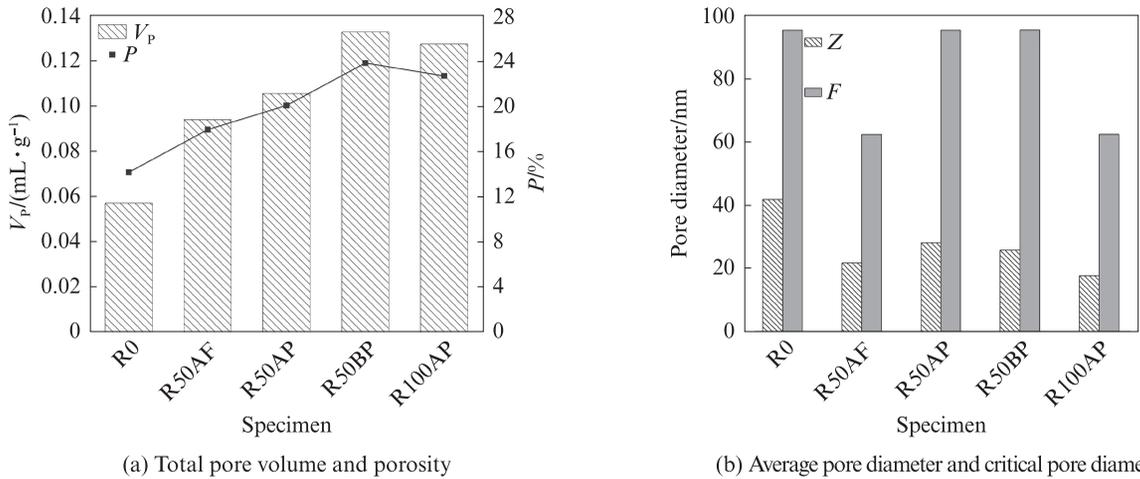


图6 RBC的孔隙特征

Fig. 6 Pore characteristics of RBC

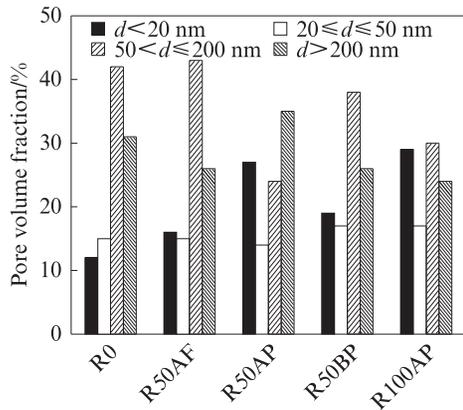


图7 RBC的孔径分布

Fig. 7 Pore volume distribution of RBC

表2 RBC氯离子扩散系数各参数的关联度

Table 2 Correlation of parameters of chloride diffusion coefficient of RBC

Factor	Correlation
V_p	0.78
Z	0.98
P	0.84
F	0.95
φ (harmless pore)	0.72
φ (less harmful pore)	0.83
φ (harmful pore)	0.89
φ (more harmful pore)	0.87

(0.89) > 多害孔体积分数(0.87) > 孔隙率(0.84) > 少害孔体积分数(0.83). 其余参数的灰色关联度均在0.80以下不予考虑.

RBC孔结构参数与电通量的灰色关联度结果如表3所示. 由表3可知, RBC孔结构参数对电通量的影响显著程度的因素排序为: 平均孔径(0.99) > 最可几孔径(0.95) > 有害孔体积分数(0.88) > 多害孔体积

表3 RBC电通量各参数的关联度

Table 3 Correlation of parameters of electric flux of RBC

Factor	Correlation
V_p	0.77
Z	0.99
P	0.84
F	0.95
φ (harmless pore)	0.72
φ (less harmful pore)	0.83
φ (harmful pore)	0.88
φ (more harmful pore)	0.86

分数(0.86) > 孔隙率(0.84) > 少害孔体积分数(0.83). 综上所述, 在孔结构参数中, 平均孔径和最可几孔径与RC氯离子扩散系数及电通量的灰色关联度均在0.90以上, 说明其对抗氯离子渗透性能的影响最为显著.

本文绘制了以RBC的电通量和氯离子扩散系数为X轴, 平均孔径和最可几孔径为Y轴的散点图, 分别如图8、9所示. 由图8、9可见, RBC氯离子扩散系数和电通量均与平均孔径和最可几孔径呈正相关关系, 即随着孔结构参数的增加, 氯离子扩散系数和电通量亦随之上升; 这一发现与Zhang等^[18]的研究相一致. 因此, RFCB的表面活性有利于降低混凝土的平均孔径和最可几孔径, 进而提升了混凝土的抗氯离子渗透性能.

2.5 RBC多元非线性抗氯离子渗透模型

根据2.4灰色关联度分析结果可知, 平均孔径和最可几孔径对RBC抗氯离子渗透性能的影响最为显著. 为了进一步探究RBC孔隙结构对抗氯离子渗透性能的影响, 假设混凝土氯离子渗透系数和电通量与平均孔径和最可几孔径的关系模型为式(1), 对

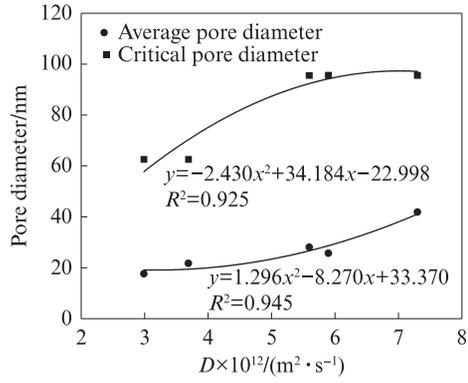


图8 平均孔径、最可几孔径与氯离子扩散系数的关系
Fig. 8 Relationship between average pore diameter, critical pore diameter and chloride diffusion coefficient

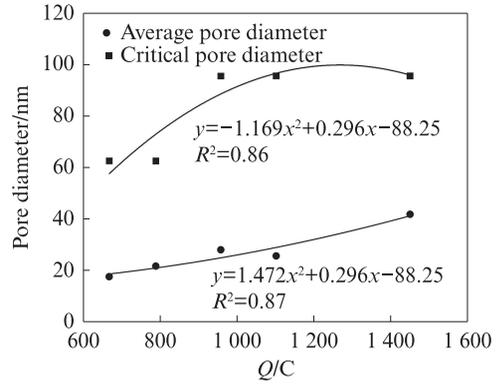
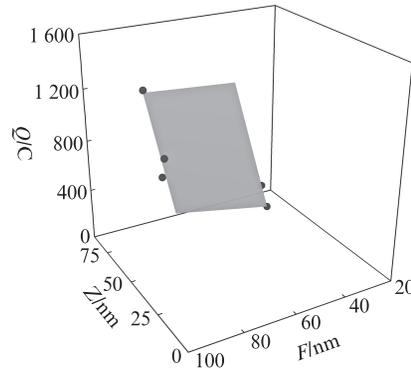
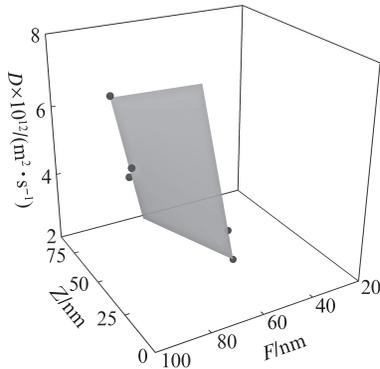


图9 平均孔径、最可几孔径与电通量的关系
Fig. 9 Relationship between average pore diameter, critical pore diameter and electric flux

RBC 氯离子渗透系数、电通量与平均孔径和最可几孔径的关系进行多元非线性回归分析,定量分析平

均孔径和最可几孔径对RBC抗氯离子渗透性能和电通量的影响,结果分别如图10和表4所示.



(a) (b)
图10 RBC 氯离子渗透系数、电通量与孔结构模型

Fig. 10 Model of chloride diffusion coefficient, electric flux and pore structure of RBC

表4 多元回归结果

Table 4 Results of multiple regression

Model	K_0	K_1	K_2	K_3	R^2
$D(Z, F)$	-6.060 94	0.312 66	0.095 91	-0.002 23	0.988
$Q(Z, F)$	-209.208 06	36.035 46	5.579 32	-0.099 29	0.941

$D(Z, F)$ or $Q(Z, F) = K_0 + K_1Z + K_2F + K_3ZF$ (1)
式中: K_0, K_1, K_2, K_3 表示拟合系数.

由表4可知,RBC氯离子渗透系数与平均孔径和最可几孔径回归的方差 $R^2=0.988$,则认为氯离子渗透系数与平均孔径和最可几孔径之间相关性显著,构建的基于平均孔径和最可几孔径参数

的RBC氯离子渗透系数数学模型如式(2)所示;同样RBC电通量与平均孔径和最可几孔径的回归方差为 $R^2=0.941$,则认为电通量与平均孔径和最可几孔径之间相关性显著,构建的基于平均孔径和最可几孔径参数的RBC电通量数学模型如式(3)所示.

$$R = -6.060\ 94 + 0.312\ 66Z + 0.095\ 91F - 0.002\ 23ZF \quad (2)$$

$$Q = -209.208\ 06 + 36.035\ 46Z + 5.579\ 32F - 0.099\ 29ZF \quad (3)$$

综上所述,RBC的抗氯离子渗透性能是由多因素共同影响的,基于孔结构参数(平均孔径和最可几孔径)可以对混凝土的抗氯离子渗透性能进行预测分析.

3 结论

(1)在碱性环境下,再生砖细骨料(RFCB)可以溶解出较高浓度的Si、Al离子,证实其具有较好的表

面活性.RFCB粒径越小,比表面积越大,则其表面活性越高.

(2)掺入RFCB后,混凝土氯离子扩散系数和电通量明显减少,且随着替代率的增加,RFCB混凝土(RBC)氯离子扩散系数和电通量的降低程度不断增大.虽然RFCB多孔性容易造成RBC总孔隙体积和孔隙率显著增大;但是由于RFCB表面活性促进水化产物的生成并填充于孔隙中,导致平均孔径和最可几孔径明显减小,从而增强了RBC的抗氯离子渗透能力.

(3)平均孔径和最可几孔径与混凝土氯离子渗透系数和电通量之间的灰色关联度均在0.90以上,显示两种孔径对RBC抗氯离子渗透性能和电通量的影响最为显著.在此基础上,通过多元非线性回归建立了RBC氯离子渗透系数和电通量与平均孔径和最可几孔径的数学模型.

参考文献:

- [1] 段珍华,邓琪,肖建庄,等.再生混凝土冲击磨耗性能与调控方法[J].建筑材料学报,2022,25(11):1136-1142.
DUAN Zhenhua, DENG Qi, XIAO Jianzhuang, et al. Impact wear performance and control methods of recycled concrete [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1136-1142. (in Chinese)
- [2] DANG J T, XIAO J Z, DUAN Z H. Effect of pore structure and morphological characteristics of recycled fine aggregates from clay bricks on mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 358:129455.
- [3] 应敬伟,肖建庄.模型再生混凝土氯离子非线性扩散细观仿真[J].建筑材料学报,2013,16(5):863-868.
YING Jingwei, XIAO Jianzhuang. Simulation of chloride ion nonlinear diffusion in model reclaimed concrete [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(5):863-868. (in Chinese)
- [4] 李淑进,赵铁军,吴科如.混凝土渗透性与微观结构关系的研究[J].混凝土与水泥制品,2004(2):6-8.
LI Shujin, ZHAO Tiejun, WU Keru. Study on the relationship between permeability and microstructure of concrete [J]. Concrete and Cement Products, 2004(2):6-8. (in Chinese)
- [5] SHI W J, LIU W J, WANG W J, et al. Relationship between chloride ion permeation resistance of recycled aggregate thermal insulation concrete and pore structure parameters[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370:130666.
- [6] 张献蒙,刘旭,柏彬,等.利用砖混建筑废弃物制备再生混凝土的性能研究[J].硅酸盐通报,2021,40(8):2680-2686.
ZHANG Xianmeng, LIU Xu, BO Bin, et al. Study on the performance of recycled concrete from brick-concrete construction waste [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(8): 2680-2686. (in Chinese)
- [7] ADAMSON M, RAZMJOO A, POURSAEE A. Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94:426-432.
- [8] SNELLINGS R, SCRIVENER K L. Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: Past and future [J]. Materials and Structures, 2016, 49:3265-3279.
- [9] BOKE B, AKKURT S, IPEKOGLU I, et al. Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36 (6):1115-1122.
- [10] 万小梅,刘国强,赵铁军,等.C-(A)-S-H对氯离子的吸附性能研究[J].建筑材料学报,2019,22(1):31-37.
WAN Xiaomei, LIU Guoqiang, ZHAO Tiejun, et al. Study on adsorption properties of C-(A)-S-H for chloride ions [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):31-37. (in Chinese)
- [11] 徐长伟,赵佟庆,于法朋.废弃黏土砖粉在灌浆料中的应用研究[J].混凝土,2019(6):71-75.
XU Changwei, ZHAO Tongqing, YU Fapeng. Research on the application of waste clay brick powder in grouting materials [J]. Concrete, 2019(6):71-75. (in Chinese)
- [12] GE Z, FENG Y J, YUAN H Q, et al. Durability and shrinkage performance of self-compacting concrete containing recycled fine clay brick aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2021, 308:125041.
- [13] 党钧陶,刘耘池,肖建庄,等.再生砖细骨料形态对混凝土流变行为与力学性能的影响[J].建筑材料学报,2024,27(7):629-636.
DANG Juntao, LIU Yunchi, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of fine aggregate morphology of recycled brick on rheological behavior and mechanical properties of concrete [J]. Journal of Building Materials 2024, 27(7):629-636. (in Chinese)
- [14] 吴中伟.混凝土科学技术近期发展方向的探讨[J].硅酸盐学报,1979,7(3):262-270.
WU Zhongwei. Discussion on the recent development direction of concrete science and technology [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1979, 7(3):262-270. (in Chinese)
- [15] SCHACKOW A, STRINGARI D, SENFF L, et al. Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62:82-89.
- [16] DANG J, ZHAO J. Influence of waste clay bricks as fine aggregate on the mechanical and microstructural properties of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228:116757.
- [17] 李震南,申爱琴,郭寅川,等.玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的低温性能关联性[J].建筑材料学报,2021,24(1):146-152.
LI Zhennan, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Correlation of low temperature properties of basalt fiber asphalt mortar and mixture [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):146-152. (in Chinese)
- [18] ZHANG J X, MA Y W, HU J, et al. Review on chloride transport in alkali-activated materials: Role of precursors, activators and admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328:127081.