

碳化对混凝土微孔特征和吸水性能的影响

宋辰^{1,2}, 姜超^{1,2}, 顾祥林^{1,2}

(1. 同济大学 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 为研究碳化对混凝土毛细吸水性能的影响, 对比开展了不同水灰比非碳化与碳化混凝土的毛细吸水试验, 并通过压汞试验, 定量获取了碳化前后混凝土的孔隙结构参数, 通过电镜背散射图像扫描和热重分析定性观察分析了孔隙结构变化特征。结果表明, 碳化后混凝土的毛细吸水能力下降 20.0% ~ 26.5%, 毛细吸水系数下降 30.8% ~ 37.8%。相较于未碳化混凝土, 碳化混凝土的最可几孔径减小 13.9 ~ 15.1 nm, 最高减大幅度达 41.8%, 且水灰比越高降低越显著。测试观察到碳化导致氢氧化钙转化为碳酸钙, 孔径减小。计算表明, 碳化混凝土毛细吸水性能使用 Lucas-Washburn 等人提出的模型依然有效, 且选取最可几孔径作为等效孔径时模型效果最佳。

关键词: 碳化; 混凝土; 毛细吸水; 孔隙结构

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

Effects of Carbonation on Microscopic Pore Characteristics and Water Absorption Performance of Concrete

SONG Chen^{1,2}, JIANG Chao^{1,2}, GU Xianglin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Capillary water absorption tests on non-carbonated and carbonated concrete specimens with different water-cement ratios were conducted to investigate the effects of carbonation on capillary water absorption performance of concrete. Mercury intrusion porosimetry (MIP), backscattered electron microscopy (BSE) and thermogravimetric analysis (TGA) were used to identify the pore structure of concrete before and after carbonation. The results show that the water absorption performance of carbonated concrete greatly decreases, and absorption capacity declines by 20.0% to 26.5%, and

the water absorption coefficient falls by 30.8% to 37.8%. Compared with non-carbonated concrete, the most probable pore diameter of the carbonated concrete decreases by 13.9 nm to 15.1 nm, with the highest reduction rate reaching 41.8%. The reduction is more significant for concrete with higher water-cement ratios. The carbonation process is found to result in the transformation of calcium hydroxide into calcium carbonate and a decrease in pore diameter. The calculation results indicate that the model proposed by Lucas-Washburn et al. is still effective for carbonated concrete water absorption, and the selection of the most probable pore diameter as the equivalent pore diameter has the best model performance.

Keywords: carbonation; concrete; capillary water absorption; pore structure

我国服役超过 30 年的基础设施的比例不断攀升^[1], 混凝土结构的耐久性病害日益突出。实际上, 混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融损伤等病害^[2]均与混凝土中的水分密切相关。然而, 长久服役的混凝土结构表层已发生碳化, 孔隙结构产生变化, 影响水分在混凝土内传输^[3]。因此, 研究碳化导致的混凝土吸水性能的变化, 对既有混凝土结构性能评估与服役寿命延长具有重要意义。

另外一方面, 为适应“双碳”战略目标, 对二氧化碳在混凝土材料中的资源化利用日益受到重视。例如, 碳化固化再生混凝土骨料^[4-5]、碳化养护混凝土^[6]等低碳混凝土材料广受关注。碳化后的再生混凝土骨料吸水能力对再生混凝土配合比设计, 尤其是用水量的设计极其重要。碳化养护导致的表层混凝土碳化会影响表层混凝土的毛细吸水能力, 进而影响碳化养护混凝土结构的耐久性。综上所述, 碳化混

收稿日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(51938013)

第一作者: 宋辰, 博士生, 主要研究方向为混凝土结构耐久性。E-mail: songchen@tongji.edu.cn

通信作者: 顾祥林, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构性能演化与控制。Email: gxl@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

混凝土的吸水性能对评估既有已碳化混凝土结构和新型低碳混凝土结构的耐久性意义重大。

毛细吸水性能是定量表征混凝土水分传输性能的重要指标之一,在国内外规范与诸多耐久性研究中都得以采用。研究表明^[7-13],圆柱管内毛细吸水过程主要受到毛细管力、惯性力、黏滞力和重力作用。而二氧化碳进入混凝土孔隙后,与孔隙液溶解氢氧化钙反应生成固体碳酸钙,同时在固液界面与C3S、C2S和C-S-H发生化学反应。碳化反应的固体产物体积膨胀,使得混凝土孔隙率降低,且反应生成物附着在孔壁,使孔径减小,混凝土孔径分布发生变化^[14-15]。结合毛细吸水模型可知,碳化引起的混凝土孔径分布变化势必导致其毛细吸水性能的改变,从而进一步影响混凝土的耐久性能。目前关于毛细吸水的相关研究多基于未碳化混凝土的情况,碳化混凝土毛细吸水过程的模型适用性尚不明确。本文对不同水灰比混凝土碳化前后的毛细吸水性能开展试验研究,通过毛细吸水试验校验理论模型,对碳化前后混凝土样品开展压汞试验、背散射扫描测试和热重分析测试,从孔隙结构、物质成分的角度揭示碳化后混凝土毛细吸水性能的变化规律,为碳化混凝土

结构耐久性相关研究提供试验依据。

1 试验概况

1.1 原材料与试件参数

试验使用现浇混凝土试件作为研究对象,水泥使用P·O 42.5级水泥,粗骨料为5~20 mm连续级配的花岗岩碎石,细骨料为ISO标准沙,使用去离子水拌合。混凝土配合比和28 d棱柱体(100 mm × 100 mm × 300 mm)抗压强度换算得标准抗压强度如表1所示。

试验共浇筑C30与C25,水灰比(质量比)分别为0.50与0.60,尺寸为100 mm × 100 mm × 50 mm的混凝土试件共12件,如图1所示,试件概况如表2所示。浇筑24 h后脱模,在(20 ± 2) °C,相对湿度为95%的条件下养护28 d。试件养护完毕后仅保留正方形顶面和底面不进行处理,将非吸水面(长方形侧面)使用环氧封装。环氧封装时,保证非吸水面的涂层厚实,以避免在干燥处理时发生风化剥落。对不进行加速碳化处理的试件,环氧树脂凝固过程在密封箱中进行,避免凝固过程中试件表层混凝土与大气中二氧化碳反应而发生碳化。

表1 混凝土配合比及棱柱体抗压强度

Tab.1 Mix proportion and compressive strength of concrete

试件	水泥型号	水灰比	配合比/(kg·m ⁻³)				$f_{c,k}$ /MPa
			水泥	水	细骨料	粗骨料	
X50	P·O 42.5	0.50	413.6	206.8	448	1280	30.70
X60	P·O 42.5	0.60	369.3	221.6	448	1280	25.80

注:X为N或C,N代表非碳化混凝土,C代表碳化混凝土;数字50、60代表水灰比为0.50或0.60。

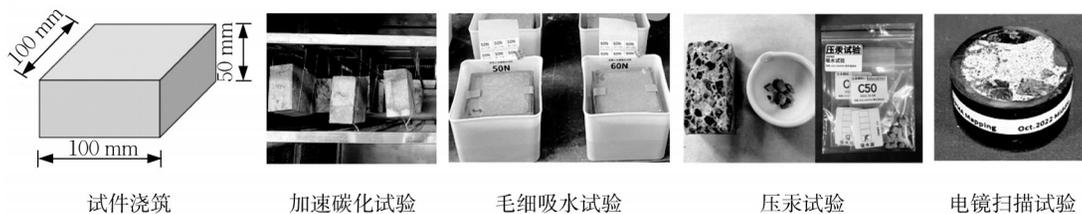


图1 试件参数与试验概况

Fig.1 Concrete specimen and test device

1.2 加速碳化试验

对非碳化的试件(N50与N60),混凝土经环氧处理完毕后立即使用保鲜膜包覆,使其与外界空气隔绝以防止自然碳化。对需要全截面碳化处理的试件(C50与C60),将其放入加速碳化试验箱中60 d,在(30 ± 2) °C,相对湿度(60 ± 5)%,二氧化碳体积分数(20 ± 3)%的环境中进行加速碳化。碳化

进程结束后,进行毛细吸水试验。试验前,对所有“-B”类试件进行劈裂试验,向劈裂剖面喷涂酚酞以检查是否全截面碳化。经测试,N50与N60全截面均未发生碳化,C50与C60两类混凝土均全截面碳化。

1.3 毛细吸水试验

根据规范ASTM-C1585进行毛细吸水试验^[16]。

表2 试件概况

Tab.2 Arrangement of specimen

试件	水灰比	类型	试验用途
N50-A	0.50	非碳化	毛细吸水试验
N50-B	0.50	非碳化	碳化深度测试(初始状态对照)
N50-C	0.50	非碳化	材料测试(压汞/电镜/热重分析)
C50-A	0.50	全截面碳化	毛细吸水试验
C50-B	0.50	全截面碳化	碳化深度测试
C50-C	0.50	全截面碳化	材料测试(压汞/电镜/热重分析)
N60-A	0.60	非碳化	毛细吸水试验
N60-B	0.60	非碳化	碳化深度测试(初始状态对照)
N60-C	0.60	非碳化	材料测试(压汞/电镜/热重分析)
C60-A	0.60	全截面碳化	毛细吸水试验
C60-B	0.60	全截面碳化	碳化深度测试
C60-C	0.60	全截面碳化	材料测试(压汞/电镜/热重分析)

测试前将混凝土试件置于50℃的烘干箱进行恒温干燥,直至试件质量达到恒定值(每24小时质量减少率不大于0.1%^[17])。烘干至恒重后,使用保鲜膜包裹并缓慢降温至室温。试验前,在试件的顶部覆盖PVC薄片,称量吸水试验前的试件质量。

毛细吸水试验时,保持混凝土底面接触液面,底面浸水深度不超过3mm。分别在0、1、5、10、20、30 min,1、2、3、4、5、6 h,1、2、3、4、5、6、7、8 d的时刻称取试件的质量。每次称量前使用含水擦拭布迅速拭去混凝土底面的浮水,擦拭布含水量应保持适中,擦拭过程中仅拭去表面浮水,避免擦拭布与混凝土试件发生水分交换。

1.4 孔隙结构与成分测试试验

应用压汞试验法(mercury intrusion porosimetry, MIP)测试水泥基材料孔径分布。待混凝土毛细吸水试验完成后,将混凝土自然风干至干燥状态,从“-C”类试件中筛取砂浆颗粒进行压汞试验。获取砂浆颗粒后,置于密封袋中,并放入干燥剂保存,避免保存过程中混凝土碳化。压汞测试仪器为AutoPore IV 9500型全自动压汞仪。

使用电子探针分析仪对样本表面开展背散射(back scattered electron imaging, BSE)图像扫描,获得样品表面形貌。在样品中采得样本,经环氧树脂固化封装,表面打磨抛光后,对其观测扫描并以图片形式保存结果。测试仪器为JXA-8230型电子探针分析仪。

应用热重分析法(thermogravimetric analysis, TGA)测试碳化前后混凝土成分变化。压汞颗粒取样的同时,随机选取颗粒,在研磨钵中研磨,并立即置于密封袋内,放入干燥剂保存。测试使用仪器为STA-449C型TG/DTA热分析仪。在30~1200℃的范围内,采用10℃·min⁻¹的升温程序进行测试。

2 试验结果与分析

2.1 累计吸水质量

碳化试件与非碳化试件毛细吸水试验结果汇总如图2所示。由图2可知,累计吸水质量 Δm 由高到低分别为N60、N50、C60、C50,呈现水灰比减小,吸水能力下降,碳化试件吸水能力弱于非碳化试件的规律。试验发现:在曲线增势趋平时,试件顶面混凝土已呈现明显湿迹,代表该试件的吸水能力即将饱和。对比非碳化试件(N类)和碳化试件(C类)曲线,非碳化试件在24h时增势即将趋平,而碳化试件则在72h时增势趋平。这表明,非碳化混凝土的吸水速率整体上大于碳化混凝土。

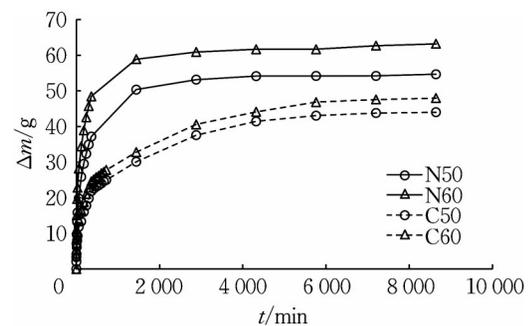


图2 混凝土累计吸水质量曲线

Fig.2 Cumulative water absorption mass of concrete

碳化试件组(C50、C60)的曲线始终低于非碳化试件组(N50、N60),这是碳化使孔隙结构发生改变所致。对水灰比为0.50的混凝土,碳化后混凝土累计吸水质量下降20.0%,水灰比0.60的混凝土累计吸水质量下降26.5%。水灰比大者经碳化作用后,吸水能力下降幅度也更显著。

2.2 毛细吸水系数

对混凝土等多孔建筑材料,通常使用毛细吸水系数来衡量材料毛细吸水的速度。由于吸水试验起始时刻,干燥材料与水接触时,短时间内表层孔隙被水迅速填充,按照ASTM-C1585规范建议^[16],使用带截距一维毛细吸水公式表示毛细吸水高度 I ,mm。

$$I = \frac{m(t) - m_0}{A\rho_1} = S_0\sqrt{t} + b \quad (1)$$

式中: t 为累计吸水时间,min; $m(t)$ 为累计吸水 t 时间后的试件质量,g; m_0 为毛细吸水前试件的干燥质量,g; A 为试件吸水面积,mm²; ρ_1 为液态水的密度,取1g·mm⁻³; S_0 为毛细吸水系数,mm·min^{-0.5}; b 为拟合曲线的纵轴截距。

对吸水试验结果分别绘制累计吸水质量和时间平方根的关系图并对曲线平直部分进行线性拟合,拟合结果如图 3 所示。由图 3 可知,曲线存在吸水快速上升段与平直段,由于快速上升段受惯性影响,因此毛细吸水过程取后半平直段进行拟合^[8]。曲线线性部分斜率即为毛细吸水系数,由大到小排序依次为 N60、N50、C60、C50。不论碳化前后,0.60 水灰比毛细吸水系数均高于 0.50 水灰比试件。碳化后,两类水灰比混凝土的毛细吸水系数均发生明显下降,水灰比 0.60 的试件从 1.802 下降至 1.134,水灰比 0.50 的试件从 1.520 下降至 1.052,水灰比越大,下降越显著。

2.3 孔隙结构特征

混凝土试件砂浆颗粒的压汞试验结果如图 4 所示,所有试件混凝土孔直径 D 主要分布于 0 ~ 200 nm 且集中于 10 ~ 100 nm 区间,4 条曲线分别在上述区间内存在峰值。混凝土经过碳化后,水灰比 0.50 与 0.60 试件砂浆孔隙率均有所下降,分别下降 1.25% 与 2.18%;根据混凝土配合比换算得混凝土

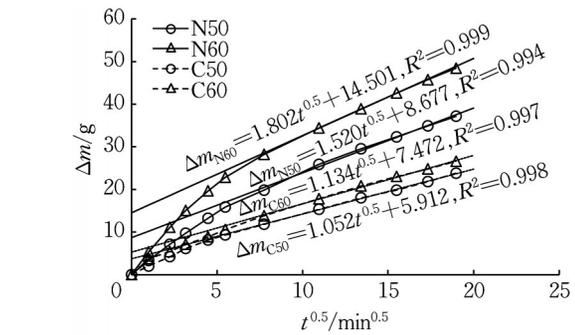


图 3 混凝土毛细吸水质量随时间平方根的变化
Fig.3 Relationship between cumulative water absorption mass and square root of time

孔隙率分别下降 0.86% 与 1.50%。孔径微分布曲线上的峰值即为最可几孔径,为孔隙内出现概率最高的孔径。碳化后,孔径整体减小,水灰比 0.50 与 0.60 混凝土最可几孔径均减小。0.50 水灰比混凝土的最可几孔径从 40.2 nm 减小至 26.3 nm,累计减小 34.6%;0.60 水灰比混凝土的最可几孔径从 36.1 nm 减小至 21.0 nm,累计减小 41.8%。

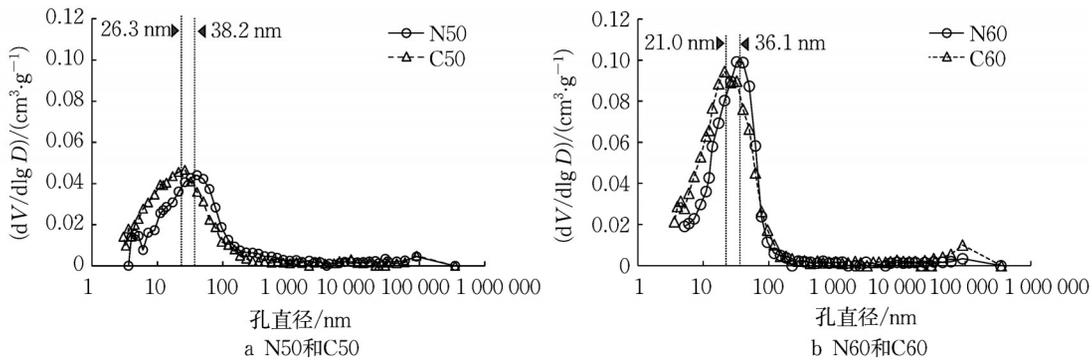


图 4 碳化前后混凝土孔径分布

Fig.4 Pore size distributions of concrete before and after carbonation

图 5 是混凝土样品砂浆颗粒孔径分布图,两种水灰比的混凝土经过碳化后,小孔(孔直径 < 50 nm)的比例均较碳化前有所上升,0.50 水灰比试件比例增加 14.0%,0.60 水灰比试件比例增加 5.6%。结合图 4 可知,说明碳化整体上填实了孔隙,使得碳化后的孔隙率普遍减小,造成小孔比例增加。

各组试件典型背散射电镜扫描图如图 6a 所示。由图 6a 可知,相对于未碳化混凝土,碳化混凝土视觉可见的孔隙数量显著下降,且孔隙开口半径呈现减小的趋势。针对混凝土的小、微孔,由于难以通过肉眼直接观测,作者通过阈值分割将图 6a 转换为二值图像,去除图像中的噪声,并使用白色凸显小微孔,图像可视化处理后结果如图 6b 所示。统计图 6b 中

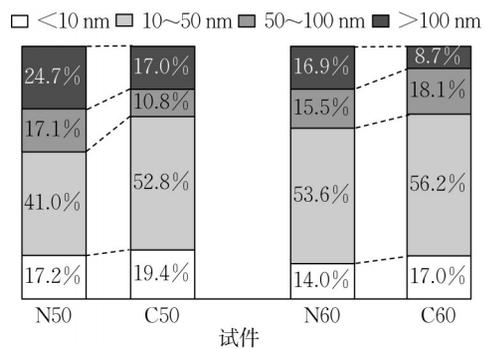


图 5 混凝土砂浆颗粒孔径分布
Fig.5 Aperture gradation of mortar particle

小微孔(白色区域)占比可得,水灰比为 0.5 与 0.6 的碳化混凝土孔隙占比相对于未碳化混凝土分别下降

了25.3%与37.9%,孔隙的整体变化趋势与压汞测试结果一致。背散射图像较为直观展示了碳化混凝土的孔隙变化趋势,但采集的数据受观测面选取的

影响,图像结果存在较大的随机性,此处仅作为辅助方法对孔隙的变化特征进行补充分析,后续传输模型依旧基于压汞法测试数据建立。

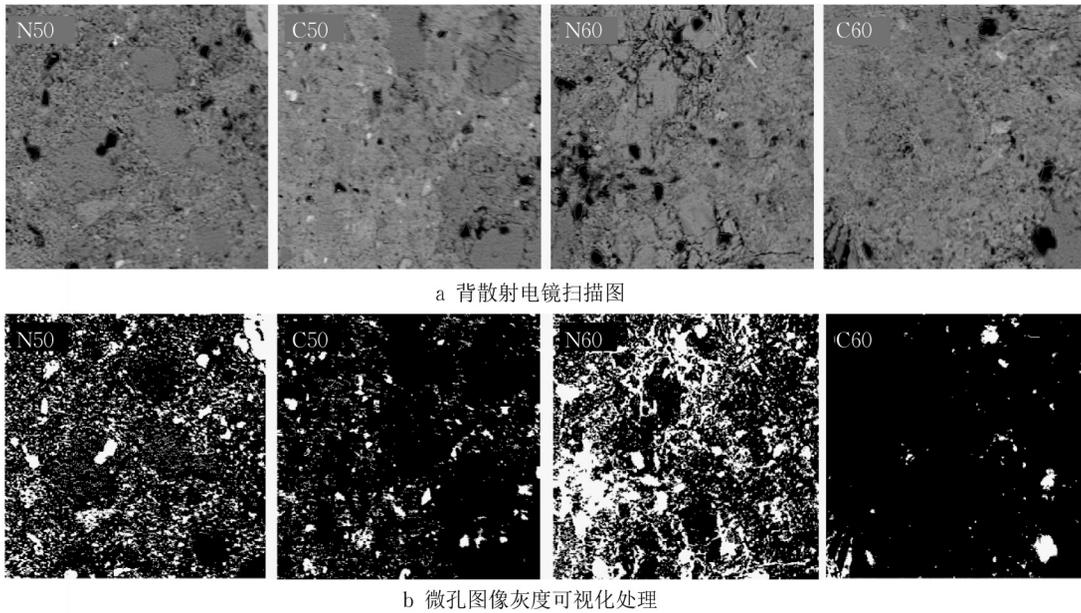


图6 样品碳化前后微孔特征对比

Fig.6 Comparison of microscopic pore characteristics before and after carbonation of sample

各组试件热重分析DTG结果如图7所示。由图7可知,在DTG曲线中,存在两个明显的下降峰值,分别在400℃和750℃附近,对应氢氧化钙和碳酸钙的分解温度。对比相同水灰比试件实线(未碳化)和虚线(全截面碳化)可知,未碳化试件在400℃存在明显的峰值,而全截面碳化试件在该温度曲线走势平缓,说明试件经过加速碳化后氢氧化钙几乎被完全消耗。750℃时,碳化前后试件均存在明显的峰值,但全截面碳化试件的峰值明显大于非碳化试件,这也说明加速碳化处理过程使氢氧化钙转化为碳酸钙造成峰值的显著增加。氢氧化钙生成碳酸钙的过程体积增加,使混凝土的孔隙率减小^[15]。

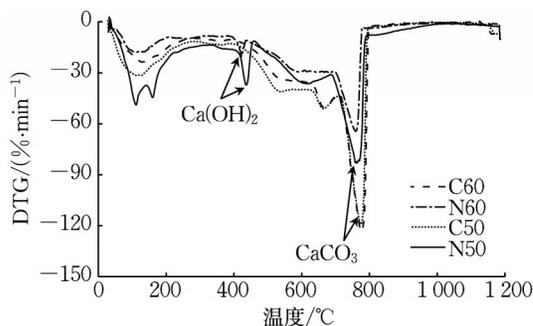


图7 试样热重分析曲线

Fig.7 Curve of thermogravimetric analysis

2.4 毛细吸水模型的适用性讨论

使用Lucas-Washburn方程推导孔毛细吸水率与孔径的关系,该方程描述的毛细吸水高度 y 与时间之间的关系,如式(2)所示。

$$y = \sqrt{\frac{r\sigma}{2\eta}t} \quad (2)$$

式中: r 为毛细孔半径,nm; η 为液态水的黏度系数,Pa·s; σ 为水表面张力,N·m⁻¹。

在温度 T 时,液态水的黏度系数可按式(3)求解^[18]。

$$\eta(T) = 3.2255 \times 10^{-11}T^4 - 4.4262 \times 10^{-8}T^3 + 2.2812 \times 10^{-5}T^2 - 5.2395 \times 10^{-3}T + 4.5432 \times 10^{-1} \quad (3)$$

在温度 T 时,液态水分表面张力可按式(4)求解^[19]。

$$\sigma(T) = -2.66 \times 10^{-7}T^2 + 1.54 \times 10^{-6}T + 9.46 \times 10^{-2} \quad (4)$$

对孔隙率为 φ ,迂曲度为 τ 的水泥基材料,吸水系数可表示为

$$S_0 = \frac{m(t) - m_0}{A\rho_1} = \frac{\varphi}{\tau} \sqrt{\frac{r\sigma}{2\eta}} \sqrt{t} \quad (5)$$

将混凝土视为均匀随机多孔介质,可取 $\tau=\pi^2/4$ ^[20]。如此,根据式(6)即可求得毛细吸水过程中的等效孔径。

$$r = \left(\frac{\tau}{\varphi} \right)^2 \frac{2\eta S_0}{\sigma} \quad (6)$$

将根据图3所得毛细吸水系数代入式(6),即可

计算得到以经典Lucas-Washburn方程为基础的等效孔径。将其与压汞试验结果进行对比,如表3所示。由表3可知,式(6)计算的等效孔径值与压汞试验最可几孔径值最接近,非碳化试件最大偏差仅15.1%,碳化试件最大偏差仅7.7%。式(6)计算的中位孔径和平均孔径与计算等效孔径值的偏差较大。

表3 孔径计算结果与压汞结果对比

Tab.3 Comparison of calculation results and mercury intrusion results

方法	参数	N50		C50		N60		C60	
		孔径/nm	偏差/%	孔径/nm	偏差/%	孔径/nm	偏差/%	孔径/nm	偏差/%
计算值	孔径	33.2	0	20.4	0	35.3	0	19.5	0
	最可几值	38.2	15.1	20.3	-0.5	36.1	2.3	21.0	7.7
压汞值	中位值	39.1	17.8	25.2	23.5	31.2	-11.6	32.2	65.1
	平均值	16.1	-51.5	15.6	-23.5	14.9	-57.8	19.1	-2.1

2.5 模型参数分析

本节以2.4节所测得结构参数为依据代入各模型进行计算。由于Quere^[8]的模型仅适用于毛细吸水最初阶段,将最可几孔径、平均孔径、中位值孔径分别代入Lucas-Washburn模型与Fries模型^[11],与试验结果对照,对比结果如图8所示。由图8可知,C50

和C60两种水灰比下,使用最可几孔径作为孔径参数计算模型与试验结果吻合程度较好,计算相关系数均大于0.98,而平均孔径,中位值孔径均与试验数据存在不同程度偏离。综上所述,混凝土碳化后的毛细吸水模型仍然适用且使用最可几孔径参数作为等效孔径进行建模描述效果最佳。

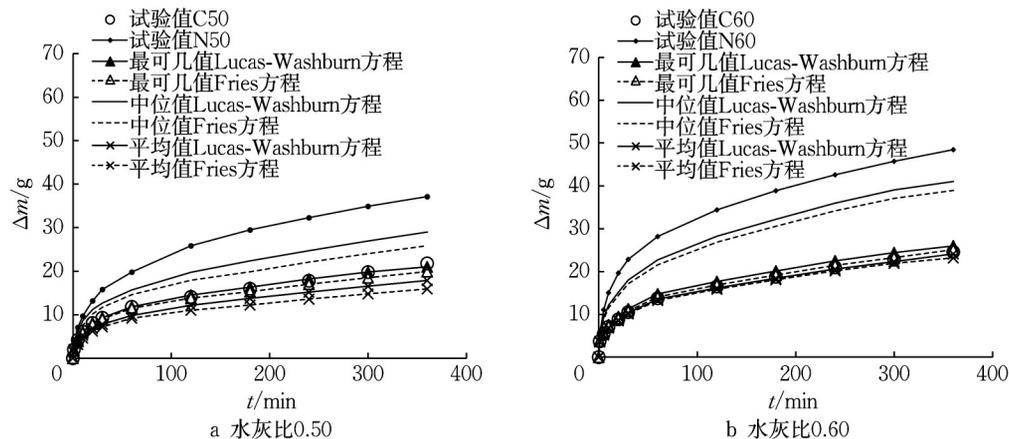


图8 碳化混凝土毛细吸水模型参数分析

Fig.8 Parametric study of capillary model of carbonated concrete

3 结论

(1)碳化可显著降低混凝土的总吸水量和吸水速率,C30混凝土(水灰比0.50),C25混凝土(水灰比0.60)下降幅度分别可达26.5%、37.8%。水灰比越大,碳化导致的总吸水量和吸水速率降低率越大。

(2)碳化后混凝土孔隙率降低,孔径整体减小。大于50 nm孔径比例减少,小于50 nm孔径占比增加。最可几孔径减小达41.8%,水灰比越高降低越

显著,碳化过程消耗了氢氧化钙,碳酸钙含量显著增加,导致孔径缩小。

(3)参数分析表明,碳化后混凝土的毛细吸水过程使用最可几孔径作为等效半径时,采用Lucas-Washburn模型的计算结果与试验结果吻合程度最佳。

作者贡献声明:

宋辰:论文撰写,试验方案设计与开展,理论分析,参数分析,图表可视化。

姜超:论文修改与写作指导,试验指导,理论分析。

顾祥林:论文修改与写作指导,试验指导,理论分析,经费支持。

参考文献:

- [1] 岳清瑞.工程诊治与智慧运维[R].上海:同济大学,2020.
YUE Qingrui. Engineering diagnosis and smart operation & maintenance[R]. Shanghai: Tongji University, 2020.
- [2] SONG C, JIANG C, GU X L, *et al.* Calibration analysis of chloride binding capacity for cement-based materials under various exposure conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2022,314:125588.
- [3] 王昆,屈文俊,李沛豪,等.再碱化后的钢筋混凝土长期电化学研究[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2012,40(3):353.
WANG Kun, QU Wenjun, LI Peihao, *et al.* A long-term electrochemical study on carbonated reinforced concrete after realkalisation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012,40(3):353.
- [4] 史才军,卢豹,潘萧颖,等.利用二氧化碳固化技术制备绿色混凝土材料和制品[J].*江苏建筑*,2018,189(2):14.
SHI Caijun, LU Bao, PAN Xiaoying, *et al.* Preparation of green concrete materials and products with CO₂ curing technology[J]. *Jiangsu Construction*, 2018,189(2):14.
- [5] 史才军,邹庆焱,何富强.二氧化碳养护混凝土的动力学研究[J].*硅酸盐学报*,2010,38(7):1179.
SHI Caijun, ZOU Qingyan, HE Fuqiang. Study on CO₂ curing kinetics of concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2010,38(7):1179.
- [6] SONG B X, HU X, LIU S H, *et al.* Chloride binding of early CO₂-cured portland cement-fly ash-GGBS ternary pastes [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022,134:104793.
- [7] BOSANQUET C, LV H. On the flow of liquids into capillary tubes [J]. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1923,45(267):525.
- [8] QUERE D. Inertial capillarity [J]. *Europhysics Letter*, 1997,39(5):533.
- [9] 顾祥林,徐宁,黄庆华,等.混凝土结构时间多尺度环境作用研究[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2012,40(1):1.
GU Xianglin, XU Ning, HUANG Qinghua, *et al.* Study on temporal multi-scale environmental action for concrete structures[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012,40(1):1.
- [10] 张庆章,顾祥林,张伟平,等.混凝土中毛细压力-饱和度关系模型[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2012,40(12):1753.
ZHANG Qingzhang, GU Xianglin, ZHANG Weiping, *et al.* Model on capillary pressure-saturation relationship for concrete [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012,40(12):1753.
- [11] FRIES N, DREYER M. An analytic solution of capillary rise restrained by gravity [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008,320(1):259.
- [12] LUCAS R. Rate of capillary ascension of liquids [J]. *Kolloid Zeitschrift*,1918,23(15):15.
- [13] WASHBURN E W. The dynamics of capillary flow [J]. *Physical Review*, 1921,17:273.
- [14] 阮欣,刘翔,陈艾荣.考虑应力状态的二维混凝土碳化过程数值模拟[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2013,41(2):191.
RUAN Xin, LIU Xu, CHEN Airong. Two-dimensional numerical simulation of carbonation process with a consideration of stress state [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013,41(2):191.
- [15] JIANG C, GU X L, HUANG Q H, *et al.* Carbonation depth predictions in concrete bridges under changing climate conditions and increasing traffic loads [J]. *Cement and Concrete Composites*,2018,93:140.
- [16] American Society of Testing and Materials. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes: ASTM C1585-13 [S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [17] ZHANG C Y, ZHANG S F, YU J W, *et al.* Water absorption behavior of hydrophobized concrete using silane emulsion as admixture [J]. *Cement and Concrete Research*, 2022,154:106738.
- [18] 朱光俊,孙亚琴.传输原理[M].北京:冶金工业出版社,2009.
ZHU Guangjun, SUN Yaqin. Principles of transmission [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [19] ISHIDA T, MAEKAWA K, KISHI T. Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007,37(4):565.
- [20] WELTY J R, WICKS C E, WILSON R E, *et al.* Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer [M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2009.