

碳化对大坝混凝土细观结构及力学特性的影响

郑开发¹, 卢万友¹, 周程涛^{2,3}, 陈波^{2,3}, 董春晖^{2,3}

(1. 安徽省梅山水库管理处, 安徽 金寨 237300; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究碳化对大坝混凝土细观结构及力学特性的影响, 对梅山连拱坝坝体混凝土试样开展了 SEM、X-CT 及单轴压缩和声发射联合试验, 基于 Avizo 图像和声发射基本参数分析了碳化后大坝混凝土孔隙率、孔径分布、孔隙形态等细观结构特征及材料损伤演化特性。结果表明: 碳化改变了混凝土的微观形貌, C-S-H 凝胶表面出现大量碳酸钙颗粒, 孔隙率减小; 随碳化深入, 以 160 μm 等效孔径为界, 大孔隙占比增大, 小孔隙占比减小; 碳化 14 d 和 28 d 后球形度为 0.9~1.0 的孔隙较未碳化时分别上升 8.9% 和 6.5%, 碳化填充了孔隙的不规则边缘; 碳化后大坝混凝土声发射信号整体活跃度下降, 碳化降低了混凝土抗压强度和弹性模量。

关键词: 大坝混凝土; 碳化; 细观结构; 力学特性; 损伤特性

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)03-0008-08

Effect of carbonation on mesostructures and mechanical properties of dam concrete//ZHENG Kaifa¹, LU Wanyou¹, ZHOU Chengtao^{2,3}, CHEN Bo^{2,3}, DONG Chunhui^{2,3} (1. Management Office of Meishan Reservoir in Anhui Province, Jinzhai 237300, China; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the impact of carbonation on the mesostructure and mechanical properties of dam concrete, scanning electron microscope (SEM), X-ray computed tomography (X-CT), and combined uniaxial compression-acoustic emission tests were conducted on concrete specimens from the Meishan Arch Dam. Based on Avizo images and acoustic emission parameters, the mesostructural characteristics (including porosity, pore size distribution, and pore morphology) and material damage evolution characteristics of carbonated dam concrete were analyzed. The results show that carbonation alters the microscopic morphology of concrete, numerous calcium carbonate particles appear on the surface of the C-S-H gel, and the porosity decreases. As carbonation progresses, the proportion of pores with equivalent diameters larger than 160 μm increases, while the proportion of pores with equivalent diameters lower than 160 μm decreases. After 14-day and 28-day accelerated carbonation, pores with a sphericity of 0.9 to 1.0 increase by 8.9% and 6.5%, respectively, compared with that of the non-carbonated concrete, indicating that carbonation fills the irregular edges of pores. After carbonation, the overall activity of acoustic emission signals of dam concrete decreases, and the compressive strength and elastic modulus of concrete decline.

Key words: dam concrete; carbonization; mesostructure; mechanical properties; damage characteristics

混凝土的碳化是指 CO_2 与混凝土中的液相碱性物质发生的反应^[1-2]。研究^[3]表明, 碳化会破坏混凝土胶结物的稳定性, 引起碳化收缩从而降低混凝土强度, 形成酸性环境导致钢筋腐蚀膨胀, 显著影响钢筋混凝土结构的耐久性。为了解碳化机理, Wang 等^[4]从细观层面研究了混凝土碳化, 并探讨了细观结构对宏观力学特性的影响; Rimmelé 等^[5]借助压汞孔隙仪研究了硅酸盐水泥胶结物的孔隙

率, 结果表明孔隙率随碳化程度加深先下降后上升, 最终趋于稳定; Shah 等^[6]发现硅酸盐水泥混凝土在碳化后孔隙率降低, 而掺入粉煤灰或石灰石煅烧物的混合水泥混凝土碳化后孔隙率则增大; Arandigoyen 等^[7]针对石灰和水泥混合物碳化的研究表明, 碳化降低了试样孔隙率及表面分形维数, 但在不同孔径尺度下的变幅并不一致。

混凝土材料在长期碳化作用下强度有所下

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52079049); 国家重点实验室基本科研业务费专项资金项目 (522012272, 5230248A2)

作者简介: 郑开发 (1967—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程运行管理工作。E-mail: 748516614@qq.com

通信作者: 陈波 (1986—), 男, 教授, 博士, 主要从事水工结构工程安全监控研究。E-mail: chenbohhu@126.com

降^[8-10],而 Liu 等^[11]通过纳米压痕试验检测了碳化前后混凝土的弹性模量和硬度,发现碳化后弹性模量和硬度均有明显下降。Borges 等^[12-13]发现含大量 C-S-H 的水泥浆在碳化后呈现出多孔结构,孔隙率上升,裂纹大量发育,部分学者认为这可能是碳化后混凝土力学性能衰减的原因。

目前关于碳化环境下混凝土细观结构及力学性能的研究多基于室内成型及养护的混凝土,其龄期一般较短,水化反应尚不充分,研究结果无法准确反应碳化对实际工程的影响;且现有研究大多基于压汞孔隙仪和扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 试验,该方法易于揭示碳化前后水泥浆体的孔径分布,但无法分析孔隙率局部变化情况或个别大孔隙碳化前后的变化,而对力学特性的描述也较少涉及碳化后损伤演化特征。

因此,本文对长龄期大坝混凝土进行加速碳化试验,通过 SEM、X-CT 试验扫描得到不同加速碳化时间下混凝土的细观特征,并开展了单轴压缩和声发射联合试验,研究了碳化对大坝混凝土细观结构及力学特性的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试样取自梅山连拱坝,该坝位于安徽省淮河支流史河上游的金寨县境内。梅山连拱坝工程于 1956 年 4 月竣工,为了减轻环境水侵蚀,施工时选用掺入了 20%火山灰质材料(煅烧后的硅酸白土)的混合水泥混凝土作为筑坝材料。

参照 JGJ/T 384—2016《钻芯法检测混凝土强度技术规程》,采用钻芯法在大坝支墩垛墙处取芯。由于大坝还在服役期,取芯数量受到严格限制。钻孔取芯前使用钢筋探测仪检测待取芯区域,确保避开主筋、预埋件和管线,取芯后对孔洞进行修补。取芯后,以 0.0314 mol/L 浓度的酚酞溶液作为指示剂区分碳化区,未碳化区经切割、打磨,加工成 100 mm×100 mm 的圆柱体试样并蜡封。共计取得 100 mm×100 mm 的圆柱体试样 10 块,其中 6 块用作宏观力学特性试验,剩余 4 块分别碳化 3、7、14、28 d 后测量碳化深度。此外,取 50 mm×50 mm 的圆柱体试样 2 块用作细观结构试验。

1.2 试验方法

参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,采用苏州市东华实验仪器有限公司生产的 HTX-12X 型微电脑混凝土碳化试验箱进行加速碳化试验,控制碳化时间为 0、3、7、14、28 d。试样放入碳化箱后,将碳化箱用机械方

法密封,启动箱内气体对流装置,徐徐充入 CO₂,并测定箱内 CO₂ 含量。试验中逐级调节 CO₂ 流量,使箱内 CO₂ 体积分数保持在 (20±3)% 范围内,在整个试验期间采取除湿措施,使箱内相对湿度控制在 (70±5)%、温度控制在 (20±2)℃ 的范围内。

采用 Tescan Mira 高性能 SEM 观测试样表面微观形貌,试样取自未碳化区和经 28 d 加速碳化试验后的碳化区域,分别取体积约 2 cm³ 的块状试样,从试样中间掰断试样获得自然断面,观察面不进行磨平处理。

对试样开展单轴压缩和声发射联合试验,单轴压缩试验参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行,试验装置采用上海三思纵横生产的 WAW-1000 型电液伺服万能试验机,每组两个试件,共计 3 组,分别对应碳化时间 0、14、28 d。试验采用位移控制,设置加载速率 1 mm/min,当最大位移达到 4 mm 时停止加载。

声发射试验参照 GB/T 26644—2011《无损检测声发射检测总则》进行,试验前根据现场噪声情况调整前置放大器增益为 40 dB,阈值值设置为 40 dB,滤波频率为 1~60 kHz,声发射试验在待测试样的 4 个侧面各布置 1 个声发射传感器,型号为 PK6I。为了确保传感器与试样之间充分接触,采用与圆柱体弧面相同曲率的垫片作为传感器与试样之间的连接并以凡士林为耦合剂,传感器由柔性绑带固定,见图 1。



图 1 声发射试验

采用 Waygate Technologies 的 Phoenix Vtomex S 微焦点 X 射线 CT 系统进行 X-CT 试验,图像空间分辨率为 29.5 μm/体素,图像后处理采用 Avizo 软件,经去噪、切分、滤波、阈值划分后三维重构得到试样三维细观模型(图 2)。采用 Non-local means 滤波。

2 结果与分析

2.1 碳化深度

碳化深度随时间变化的速率可直观反映混凝土抗碳化能力,当 pH 值小于 10.0 时,喷涂酚酞溶液的混凝土区域由紫红色变为无色,该区域通常称作

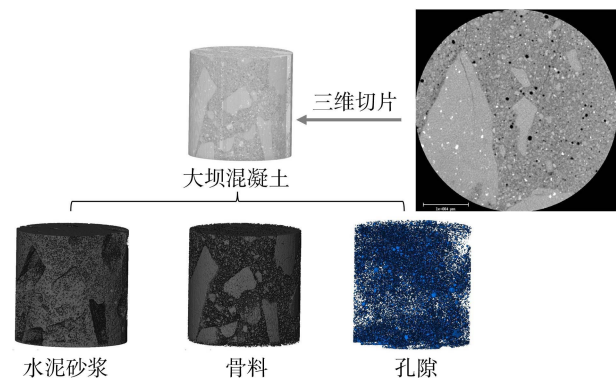


图2 试样 X-CT 图像分析示意图

完全碳化区^[14]。图3为大坝混凝土试样在经历不同碳化时间后的碳化深度,可见大坝混凝土的碳化速率服从幂指数为0.36的幂函数变化规律,曲线拟合结果良好,相关系数为0.93。试样碳化速率先快后慢,因为随着碳化的深入,碳化所形成的碳酸钙会填充混凝土中的孔隙^[6],从而减缓CO₂的扩散。

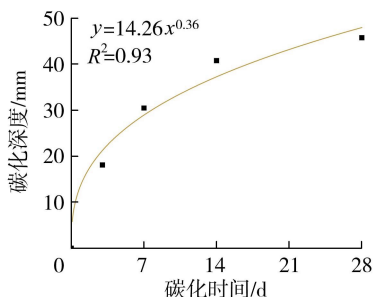
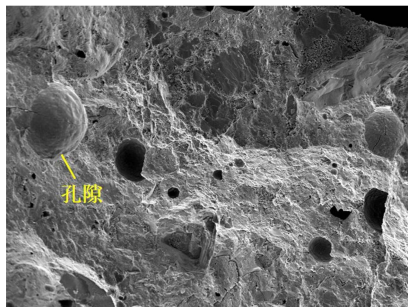


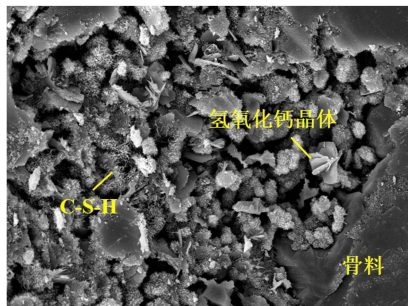
图3 试样碳化深度

2.2 SEM 试验

图4为碳化前试样200倍和3500倍下的微观形貌。由图4(a)可见,水泥砂浆和粗骨料间存在形



(a) 放大200倍

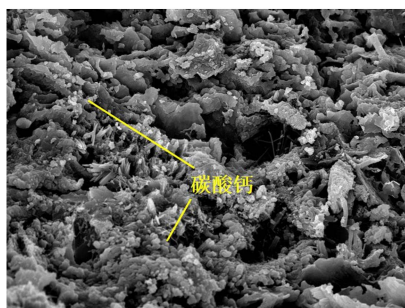


(b) 放大3500倍

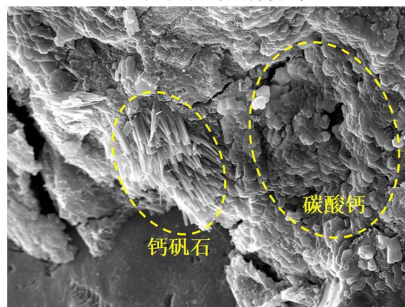
图4 碳化前试样 SEM 图像

状、大小不一的孔隙,其孔径在几十微米到数百微米不等;由图4(b)可见,大坝混凝土内部存在大量纤维状C-S-H凝胶及少量六角板状、层状的氢氧化钙晶体,凝胶体形成了较为均匀致密的连续体。由于水泥中的火山灰质材料和长期环境水侵蚀,试样中的氢氧化钙含量较少。

图5为碳化28d后试样的微观形貌,图像均放大了7000倍。由图5(a)可见,碳化后的试样表面几乎没有CH晶体,C-S-H凝胶表面出现了大量呈立方体或棱柱体的细小碳酸钙颗粒,其紧密堆积并依附于水化产物表面。由图5(b)可见,碳化改变了混凝土的微观形貌,碳化生成的碳酸钙晶体有效填充了孔隙。现有研究普遍认为,碳化过程中碳酸钙的析出、沉淀是碳化后混凝土孔隙率下降的主要原因^[8,15]。



(a) 碳酸钙晶体分布



(b) 碳酸钙孔隙填充作用

图5 碳化28d后试样 SEM 图像

2.3 X-CT 试验

2.3.1 孔隙率与分形维数

为准确分析试样孔隙率的变化,在X-CT分析中将孔隙、砂浆和粗骨料三相分离,借助Avizo自带的Volume Fraction功能计算得到碳化时间0、14、28d的混凝土试样砂浆孔隙率(孔隙在水泥砂浆中的体积占比)分别为9.075%、6.765%、6.717%,可见碳化28d相比碳化14d试样内孔隙率下降有限,说明14d后试样已充分碳化,析出的碳酸钙致密地覆盖在C-S-H凝胶和内部孔隙之上,导致14~28d孔隙率变幅较小。

分形维数为定量描述几何复杂性提供了参考。一般认为,分形维数表征了分形体的复杂程度,分形

维数越大,非均匀性越强,分形体越复杂^[16]。在 Avizo 软件中调用 Fractal Dimension 命令,计算得到不同碳化时间下大坝混凝土在 x 、 y 、 z 3 个方向上的平面平均分形维数以及体分形维数,结果如表 1 所示。

表 1 不同碳化时间下试样孔隙分形维数

碳化时间/d	孔隙率/%	x 向平面平均分形维数	y 向平面平均分形维数	z 向平面平均分形维数	体分形维数
0	9.075	1.28	1.27	1.24	2.29
14	6.765	1.18	1.17	1.15	2.19
28	6.717	1.20	1.20	1.16	2.22

由表 1 可见,在碳化 14 d 后,平面平均分形维数和体分形维数较碳化前均减小,其中平面平均分形维数减小约 7%,体分形维数减小 4.37%;与碳化 14 d 相比,碳化 28 d 后试样的平面平均分形维数和体分形维数均出现小幅增大。说明大坝混凝土经历碳化后其内部孔结构复杂度首先下降,孔隙均匀度提升,这是因为碳化导致大量碳酸钙析出,填补了孔隙网络,降低了孔隙的连通性,使孔隙复杂度下降;在持续碳化作用下,试样孔隙分形维数出现小幅上升,碳化充分发生,已生成的碳酸钙覆盖在剩余的 C-S-H 凝胶上,导致反应速率下降;碳化 28 d 后,孔隙分形维数出现了小幅上升,原因可能是碳酸钙堆积和膨胀产生的微裂纹导致了孔隙连通。

图 6 为碳化前后试样 x 、 y 、 z 3 个方向上的平面孔隙率与平面分形维数,可见碳化前后各片层平面孔隙率整体变幅不大,说明试样中孔隙空间分布较为均匀;碳化 0 d 时,试样 3 个方向的平面分形维数

主要在 1.2~1.3 之间波动,而碳化 14 d 和 28 d 后试样 3 个方向的平面分形维数主要在 1.1~1.2 之间波动;碳化 0 d 时平面分形维数波动幅度较大, x 、 y 、 z 3 个方向平面分形维数的标准差分别为 0.048、0.034、0.055;碳化 14 d 后 3 个方向平面分形维数的标准差分别为 0.046、0.032、0.033,碳化 28 d 后则为 0.047、0.026、0.035,说明随着碳化时间的增加,不同片层之间的孔隙分形维数趋向均值,片层间的差异逐步缩小。这是因为未碳化前试样不同片层间存在大小、形状各异的孔隙,碳化后孔隙被碳酸钙晶体充填,孔隙形状差异和几何复杂度降低,各片层间的孔隙分形维数逐步趋同。

2.3.2 孔径分布

研究表明,碳化作用不仅会改变混凝土的孔隙率,同时会改变混凝土的孔径分布^[7,17]。在 Avizo 软件中调用 Label Analysis 命令对各试样三维孔隙结构特征参数进行提取,以等效孔径表征,其物理意义为相同体积下球体的直径。

图 7 为不同碳化时间下试样的等效孔径分布,可见试样中的孔径主要集中在 100~200 μm 之间,约占总孔隙数量的 35%。对孔径频率分布直方图进行拟合,结果表明不同碳化时间下大坝混凝土的孔径频率分布曲线均服从非标准的对数正态分布(式(1)),相关系数均不小于 0.98,拟合后的对数正态分布函数基本参数见表 2。

$$f(x,\mu,\sigma,y_0,A)=y_0+\frac{A}{x\sqrt{2\pi\sigma}}\cdot\exp\left[-(\ln x-\ln\mu)^2/2\sigma^2\right]$$

(1)

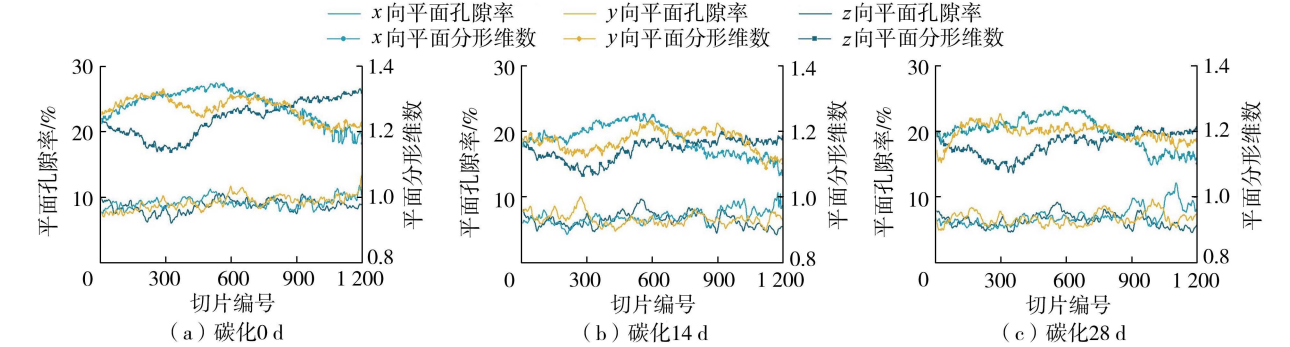


图 6 不同碳化时间下试样片层平面孔隙率和平面分形维数

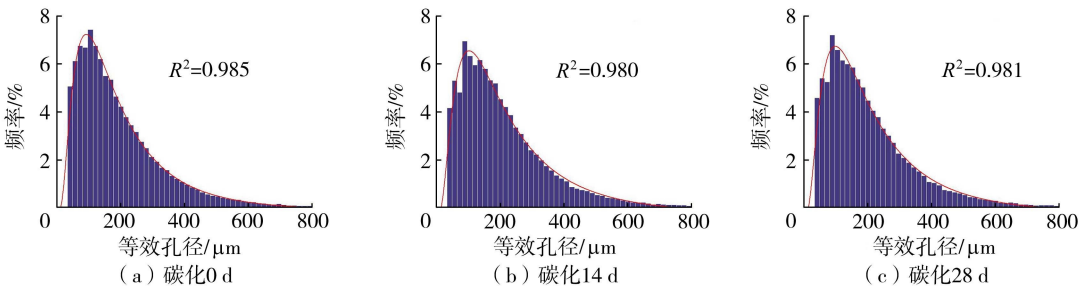


图 7 不同碳化时间下试样孔径分布

式中: μ 为期望; σ 为标准差; y_0 、 A 均为常数。

表 2 孔径分布曲线的对数正态分布函数基本参数

碳化时间/d	y_0	A	$\mu/\mu\text{m}$	$\sigma/\mu\text{m}$
0	-0.13	1734.01	164.17	0.767
14	-0.27	1876.78	189.65	0.791
28	-0.24	1845.69	182.49	0.782

图 8 对比了碳化前后试样中的孔径分布,可见以 160 μm 为界,试样中大孔和小孔的孔径分布呈现出不同的变化规律。等效孔径小于 160 μm 的小孔随碳化时间的增加,其占比先大幅减小而后小幅增大,变化主要发生在碳化前期(0~14 d);等效孔径大于 160 μm 的孔隙占比则先增大后小幅回落,其最大变幅位于 300~400 μm 之间。说明在不同的孔径尺度下,碳化对大坝混凝土孔径的影响并不一致。等效孔径小于 160 μm 的小孔碳化后数量下降的原因可能是其孔隙空间较小,少量碳酸钙沉淀对其影响即较为明显;此外,小孔中的渗透压会促进碳酸钙的沉淀^[7]。等效孔径大于 160 μm 的孔隙碳化后数量增大的原因可能是 C-S-H 凝胶碳化后形成无定形硅胶,导致固体体积减小,使大于 160 μm 的孔隙占比增大。值得注意的是,在碳化 28 d 后,小孔和大孔的孔径分布均出现了小幅波动。等效孔径小于 160 μm 的小孔出现小幅增加,等效孔径大于 160 μm 的孔隙则小幅下降,说明碳化作用下混凝土孔隙可能同时受到碳酸钙结晶密实及无定形硅胶生成导致固体体积减小的影响。

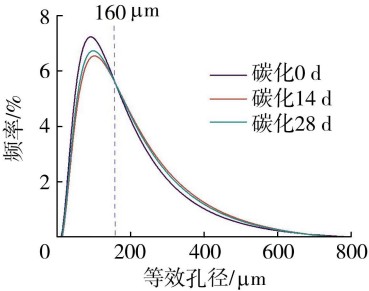


图 8 不同碳化时间下试样的孔径分布对比

2.3.3 孔隙形态

在碳化作用下,试样的孔隙形态也会受到一定影响。球形度是定量表征孔隙形状与真实球体接近程度的指标,其物理意义为与孔隙相同体积的球体表面积与该孔隙表面积之比,其值越接近 1,孔隙越接近球状。

图 9 为不同碳化时间下试样的孔隙球形度分布,可见碳化 0、14、28 d 试样中孔隙的球形度都集中在 0.9~1.0 之间,占比分别为 32.8%、41.7%、39.3%,球形度为 0.5~0.9 之间的孔隙在试样内广泛存在,球形度为 0.2~0.4 之间的孔隙约占总孔隙的 15%。试样在碳化 14 d 后球形度为 0.9~1.0 的

孔隙占比变幅最大,较未碳化时上升了 8.9%,这是因为碳酸钙的沉淀填补了孔隙的不规则边缘,降低了孔结构的复杂程度,该结果与孔隙分形维数分析结论一致。试样在经历 28 d 碳化后,其球形度为 0.9~1.0 的孔隙占比较未碳化时上升了 6.5%,但较碳化 14 d 时下降了 2.4%。对比分形维数的结果,碳化 28 d 后孔隙的分形维数较碳化 14 d 上升 1.35%,说明孔隙结构在碳化 28 d 时小幅趋向复杂化。可能的原因有以下两点:①碳酸钙堆积和膨胀产生的微裂纹导致了孔隙连通;②C-S-H 凝胶碳化后生成大量无定形硅胶,碳化过程进入“溶解阶段”,形成了碳化收缩,导致孔结构复杂化^[18]。

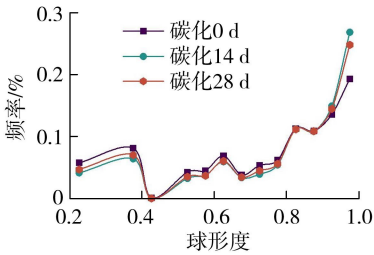


图 9 不同碳化时间下试样的孔隙球形度分布

图 10~12 为不同碳化时间下典型孔隙的变化情况,为碳化对混凝土微观结构的影响提供了直观证明。试样未碳化前,3 个典型孔隙 Pore-A、Pore-B、Pore-C 均与周围的小孔有诸多孔隙连通,孔结构相对较为复杂;在碳化 14 d 后与周边孔隙连通性大大

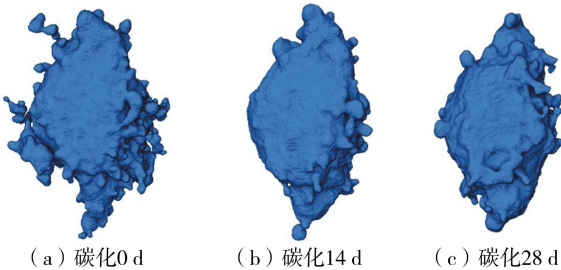


图 10 不同碳化时间下典型孔隙 Pore-A 的变化

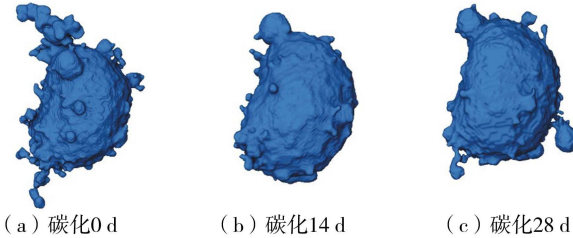


图 11 不同碳化时间下典型孔隙 Pore-B 的变化

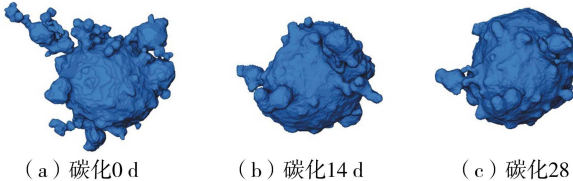


图 12 不同碳化时间下典型孔隙 Pore-C 的变化

减弱,孔隙复杂度下降;碳化 28 d 后孔隙复杂度小幅回升,但仍远不及未碳化前,该结果可与孔隙率、孔隙分形维数、孔隙球形度等数据相互验证。

2.4 单轴压缩特性分析

图 13 为不同碳化时间下试样的单轴压缩应力-应变曲线,可见单轴压缩过程可分大致为两个阶段:①线弹性阶段。在加载初期,试样初步密实后,随着应变的增长,应力基本呈线性增长。②屈服破坏阶段。应力达到峰值,应力-应变曲线出现明显的非线性特征,试样被破坏,应力快速下降。随着碳化时间的增加,曲线峰值应变整体向低值移动,碳化 14 d 和 28 d 后平均峰值应变分别下降 34. 73% 和 41. 91%。

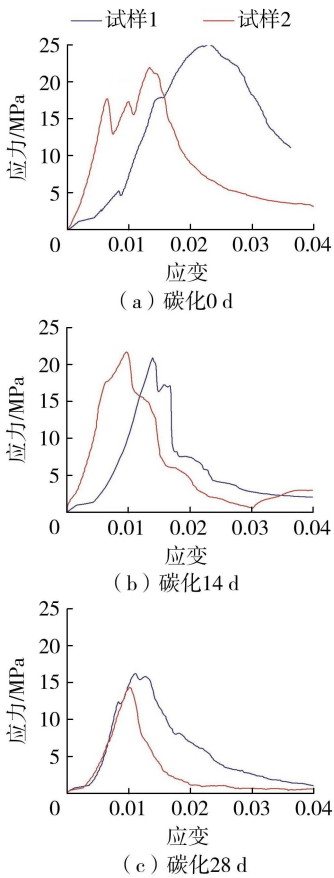


图 13 不同碳化时间下试样单轴压缩应力-应变曲线

表 3 为不同碳化时间下试样的抗压强度和弹性模量,可见在碳化 0、14、28 d 后,试样平均抗压强度分别为 23. 54、21. 36、15. 35 MPa,在碳化 14 d 和 28 d 后,强度损失率分别为 9. 26% 和 34. 79%。弹性模量是衡量物体抵抗弹性变形能力的指标,在碳化 0、14、28 d 后,试样平均弹性模量分别为 3. 128、2. 072、1. 771 GPa,碳化 14 d 和 28 d 后,试样的弹性模量分别下降了 33. 76% 和 43. 38%。结果表明,即使细观孔结构整体上趋于密实,但碳化使长龄期大坝混凝土的力学性能降低,表现为抗压能力和抗变形能力

的劣化。可能的原因有:①试样中大孔隙占比增大及裂纹发育。细观结构试验结果表明,等效孔径大于 160 μm 的孔隙占比随碳化深入整体呈增大趋势,形成碳化收缩,在碳化后期导致试样中裂纹发育。②C-S-H 凝胶碳化后形成了较低弹性模量和硬度的无定形硅胶,破坏了胶凝体之间的黏结性和整体性,掺入火山灰质材料的混凝土中氢氧化钙含量较低,更易被碳化。

表 3 不同碳化时间下试样的抗压强度和弹性模量

碳化时间/d	抗压强度/MPa		弹性模量/GPa		平均抗压强度/MPa	平均弹性模量/GPa
	试样 1	试样 2	试样 1	试样 2		
0	25. 094	21. 988	2. 549	3. 707	23. 54	3. 128
14	20. 951	21. 759	1. 052	3. 091	21. 36	2. 072
28	16. 280	14. 421	1. 781	1. 760	15. 35	1. 771

2.5 声发射分析

图 14 为不同碳化时间下试样的声发射信号参数,可见初始压密阶段声发射信号较为稀疏,幅值普遍较小;在线弹性阶段,应力-应变曲线逐渐达峰,声发射信号趋密,幅值随着应力的增大而增大;试样初次屈服时,声发射信号陡增至 90 dB 左右,说明材料内部出现了较为明显的断裂和损伤;在塑性屈服-失稳破坏阶段,应力出现陡降,应变快速增大,声发射信号幅值逐渐下降,进入平缓期。从累计振铃曲线

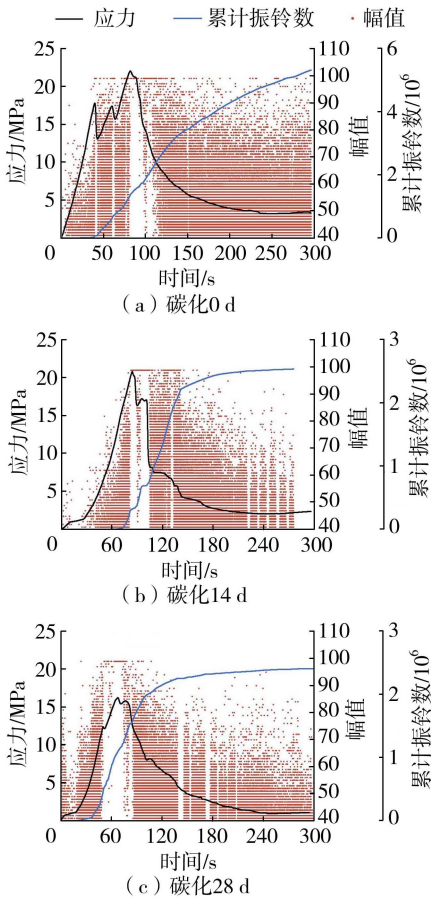


图 14 不同碳化时间下试样的声发射信号参数

看:在初始压密阶段和线弹性阶段,累计振铃曲线几乎平直;随着荷载增大,试样内部裂纹发育,在初次屈服后进入活跃期,累计振铃曲线陡升,说明此时试样内部裂纹开始迅速发育扩展,产生局部破坏,并在峰值应力时裂纹联结贯通;试样完全屈服后,累计振铃曲线再次进入缓慢增长的状态。此外,随着碳化时间的增加,累计振铃曲线峰值逐渐降低。相较于未碳化的试样,碳化 14 d 和 28 d 后的试样声发射累计振铃曲线峰值分别下降了 2 908 412 个和 2 775 856 个,这是由于碳化后试样的抗压强度和弹性模量明显降低,导致声发射信号在加载过程中整体活跃度下降。

图 15 为不同碳化时间下试样单轴压缩过程中声发射 Ib 值随时间的变化。Ib 值主要表征某一声发射信号段上小破裂事件和大破裂事件的相对数量,Ib 值增大时,材料内部破坏以微裂纹为主;Ib 值减小时,材料内部破坏以大尺度破坏为主^[19-20]。由图 15 可见,大坝混凝土声发射 Ib 值主要在 0.04~0.07 之间波动,其中未碳化试样声发射 Ib 值波动幅度最大,其最大值为 0.113,位于塑性屈服-失稳破坏阶段后期,最小值为 0.018,位于屈服破坏期间。声发射 Ib 值的变化与试样应力-应变曲线相关性较强。单轴压缩初期,试样 Ib 值都呈现出波动上升的

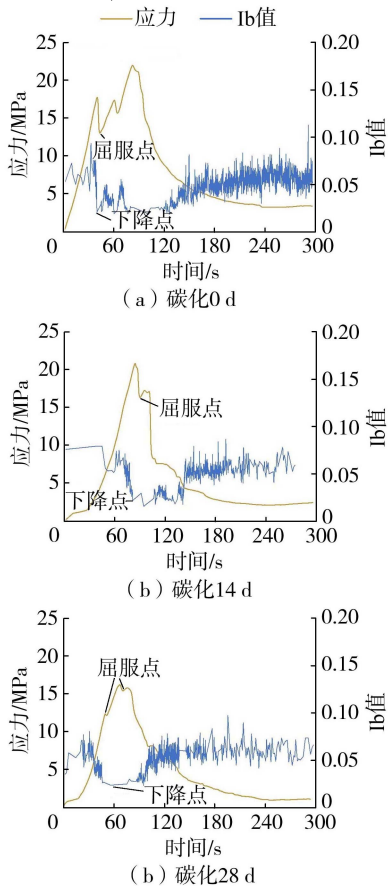


图 15 不同碳化时间下试样的声发射 Ib 值

趋势,说明试样初期破坏主要以微裂纹为主;在荷载持续作用下,微裂纹连通逐步成为宏观大裂纹,并在屈服点能量释放达到极大值,Ib 值骤降,表现在应力-应变曲线上为承载能力的骤降。在未碳化混凝土试样的震荡屈服区,Ib 值在试样初次屈服后骤降,并随着试样应力重新增大而增大,说明在大裂纹出现后试样内部应力重分布,基质间剪切互锁,以小尺度声发射事件为主,当试样出现二次屈服破坏时,声发射 Ib 值同样再次降低。与未碳化试样相比,碳化 14 d 和 28 d 后的试样 Ib 值变幅较小,这是因为碳化导致混凝土胶结物的强度和完整性下降,且碳化生成的碳酸钙和无定形硅胶填充了部分孔隙,使得压缩破坏过程中出现了更多塑性特征,声发射信号活跃度偏低。

3 结 论

a. 碳化改变了大坝混凝土的微观形貌,C-S-H 凝胶表面出现了大量碳酸钙颗粒,碳化 14 d 和 28 d 后试样孔隙率分别下降了 2.31% 和 2.36%。随着碳化的深入,孔隙分形维数先下降后小幅回升,碳化 14 d 和 28 d 后球形度为 0.9~1.0 的孔隙较未碳化时分别上升 8.9% 和 6.5%,说明碳化降低了大坝混凝土孔隙的复杂度,碳化沉淀物填充了孔隙的不规则边缘,但在碳化后期,碳酸钙堆积和膨胀产生的微裂纹可能导致孔隙连通。大坝混凝土中的孔隙孔径分布遵循非标准的对数正态分布,相关系数均不小于 0.98。随碳化的深入,大坝混凝土中等效孔径小于 160 μm 的孔隙占比减小,等效孔径大于 160 μm 的孔隙占比增大,碳化后期孔径分布频率波动趋稳。

b. 碳化 0、14、28 d 后,试样平均抗压强度分别为 23.54、21.36、15.35 MPa,平均弹性模量分别为 3.128、2.072、1.771 GPa,表明即使大坝混凝土细观孔结构趋于密实,其抗压能力和抗变形能力在碳化作用下趋于劣化。

c. 大坝混凝土声发射信号具备阶段特征,随着碳化的深入,累计振铃曲线峰值逐渐降低,声发射 Ib 值变幅减小,碳化后大坝混凝土的抗压强度和弹性模量降低导致声发射信号在加载过程中整体活跃度下降,碳化劣化了混凝土胶结物的强度和完整性,单轴压缩过程中出现了更多塑性特征。

参考文献:

[1] 李蓓,田野,金南国,等.基于水泥水化的混凝土碳化深度预测模型[J].水利学报,2015,46(1):109-117. (LI Bei, TIAN Ye, JING Nanguo, et al. The prediction model of concrete carbonation depth based on cement hydration

- [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 109-117. (in Chinese))
- [2] 蒋林华, 那彬彬, 周晓明, 等. 冻融与碳化交替作用下的混凝土性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4): 33-36. (JIANG Linhua, NA Binbin, ZHOU Xiaoming, et al. Tests for properties of concrete under alternate freeze-thaw and carbonation actions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4): 33-36. (in Chinese))
- [3] AHMAD S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 459-471.
- [4] WANG Lei, ZHOU Shihua, SHI Yan, et al. The influence of fly ash dosages on the permeability, pore structure and fractal features of face slab concrete [J]. Fractal and Fractional, 2022, 6(9): 6090476.
- [5] RIMMELÉ G, BARLET-GOUÉDARD V, PORCHERIE O, et al. Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO₂-rich fluids [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9): 1038-1048.
- [6] SHAH V, SCRIVENER K, BHATTACHARJEE B, et al. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 109: 184-197.
- [7] ARANDIGOYEN M, BICER-SIMSIR B, ALVAREZ J I, et al. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes [J]. Applied Surface Science, 2006, 252(20): 7562-7571.
- [8] LIU Jun, FAN Xu, LIU Jiaying, et al. Investigation on mechanical and micro properties of concrete incorporating seawater and sea sand in carbonized environment [J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124986.
- [9] HUANG Bin, CHENG Zhengjie, YAO Jitao. Experimental study on flexural behavior of rebar concrete beams in industrial building exceeding 50 years [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46: 103697.
- [10] 袁承斌, 陈兴, 陈小鹏, 等. 粉煤灰掺量对真空脱水混凝土碳化速度的影响[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 17-19. (YUAN Chengbin, CHEN Xing, CHEN Xiaopeng, et al. Effect of fly ash content on the carbonation velocity of concrete by vacuum dewatering treatment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(3): 17-19. (in Chinese))
- [11] LIU Xin, FENG Pan, CAI Yuxi, et al. Carbonation behavior of calcium silicate hydrate (C-S-H): its potential for CO₂ capture [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 431(3): 134243.
- [12] BORGES P H R, COSTA J O, MILESTONE N B, et al. Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 284-292.
- [13] SWENSON E G, SEREDA P J. Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement [J]. Journal of Applied Chemistry, 1968, 18(4): 111-117.
- [14] BERNAL J L P, BELLO M A. Fractal geometry and mercury porosimetry: comparison and application of proposed models on building stones [J]. Applied Surface Science, 2001, 185: 99-107.
- [15] ŠAVIJA B, LUKOVIĆ M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities [J]. Construction and Building Materials, 2016, 117: 285-301.
- [16] GUO Yuzhu, CHEN Xudong, CHEN Bo, et al. Analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121773.
- [17] MORANDEAU A, THIÉRY M, DANGLA P. Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 67: 226-236.
- [18] CHEN J J, THOMAS J J, JENNINGS H M. Decalcification shrinkage of cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(5): 801-809.
- [19] 周程涛, 陈波, 张娟, 等. 玄武岩纤维泡沫混凝土细观结构及损伤特性 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4236-4245. (ZHOU Chengtao, CHEN Bo, ZHANG Juan, et al. Microstructure and damage characteristics of basalt fiber reinforced foam concrete [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4236-4245. (in Chinese))
- [20] 刘伟琪, 陈波, 陈家林. 基于声发射的蒸养混凝土受压损伤特性试验研究 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 50-55. (LIU Weiqi, CHEN Bo, CHEN Jialin. Experimental study on compressive damage characteristics of steam-cured concrete based on acoustic emission [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 50-55. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-04-17 编辑: 熊水斌)