

文章编号:1007-9629(2025)02-0127-08

CO₂流通法养护透水混凝土的性能与作用机理

周文嘉¹, 朱亮亮^{1,*}, 刘立熙², 陈曦³

(1. 西北大学 化工学院, 陕西 西安 710127; 2. 西安建筑科技大学 交叉创新研究院, 陕西 西安 710055; 3. 岭南大学 跨学科学院, 香港 999077)

摘要:为了更好地利用透水混凝土的多孔特性,提出并设计了一种新型的流通法养护装置,旨在探索更适合透水混凝土的CO₂养护方法.通过试验探讨了养护时间这一关键参数,并且在固碳率、抗压强度和微观结构等方面与传统的静态养护方法(包括加压和常压养护)进行了对比.结果表明:流通法能够通过气流带走透水混凝土内部多余的水分,从而实现水分的均匀分布,同时还能减少预处理步骤并促进混凝土的碳酸化;流通法有效消除了试件内外的碳化不均匀,显著提升了混凝土的抗压强度.

关键词:透水混凝土;CO₂流通养护;抗压强度;固碳率

中图分类号:TU525

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.02.005

Properties and Mechanism of Pervious Concrete Cured by CO₂ Flow Method

ZHOU Wenjia¹, ZHU Liangliang^{1,*}, LIU Lixi², CHEN Xi³

(1. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Institute for Interdisciplinary and Innovate Research, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. School of Interdisciplinary Studies, Lingnan University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In order to better utilize the porous characteristics of pervious concrete and find a more suitable CO₂ curing method for it, a novel flow method for curing pervious concrete was proposed and a corresponding curing apparatus was designed. Experimental approaches were used to explore the curing time of the flow method, and a comparison was made with commonly used static curing methods including pressure curing, which shows superior performance, and atmospheric curing under similar conditions, with respect to CO₂ uptake, compressive strength, and microstructure. The results show that the flow method can promote carbonation by removing excess moisture, especially from the interior of the concrete, through airflow, reducing the need for pre-treatment steps and ensuring a more uniform distribution of moisture. This effectively eliminates the uneven carbonation inside and outside of the specimens, with the result that it significantly improves the compressive strength of the concrete.

Key words: pervious concrete; CO₂ flow curing; compressive strength; CO₂ uptake

自从工业革命以来,全球变暖、极端天气以及动植物灭绝等生态环境问题接踵而至,大气中CO₂含量的激增则被认为是罪魁祸首之一.CO₂养护水泥基材料技术可以大量封存CO₂,已经受到了广泛的

关注.据报道,世界水泥材料的产量已达44亿t/a且逐年增加^[1-2].理论上,硅酸盐水泥的CO₂吸收量可达到其质量的一半,因此水泥基产品有望成为世界上最大的CO₂储存介质之一^[3].同时,大量研究表

收稿日期:2024-02-13;修订日期:2024-04-29

基金项目:西安市科协青年人才托举计划项目(095920221368);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0529)

第一作者:周文嘉(1998—),男,吉林通化人,西北大学硕士生.E-mail:zhouwenjia@stumail.nwu.edu.cn

通讯作者:朱亮亮(1990—),男,湖北黄石人,西北大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:zhu.liangliang@nwu.edu.cn

明,水泥基产品仅需 2~24 h 的 CO_2 养护就能显著提高其早期强度和耐久性. 并且,开展混凝土制品的 CO_2 养护具有较高的经济效益和明显的实用价值^[4-7].

透水混凝土含有大量孔径为 2~8 mm 且相互连接的宏观孔隙,这些孔隙能促进内部的同步碳化,因而透水混凝土被认为是理想的碳化养护原材料^[8-10]. 目前,广泛采用的 CO_2 养护透水混凝土的方法一般为静态养护方法. 但投资成本高、适用性差以及碳化效率差等问题分别出现在加压养护与常压养护方法中^[1, 11-12]. 同时,由于 CO_2 的渗透和反应由外而内的进行,会导致明显的不均匀碳化现象,表面的碳化程度通常是中心的 2 倍左右^[8, 10]. 针对这一问题,本研究尝试采用一种创新的养护方法,即使用流通的 CO_2 气体直接穿过试件. 动态气流可以促进 CO_2 的均匀分布,从而实现混凝土整体高效充分碳化.

本研究提出了一种常压的流通式透水混凝土养护方法(流通法). 通过自行设计的养护装置实现养护,并与多种养护条件下的常压法、加压法进行了试

验比较,研究了流通法对透水混凝土固碳率、抗压强度和微观结构的影响. 同时,还通过测定混凝土内部和表面的自由水含量分析了流通 CO_2 养护的作用. 本研究为提升透水混凝土产品的养护效果提供了新的方向,同时对混凝土行业碳减排以及碳中和目标的实现具有积极的推动作用.

1 试验

1.1 原材料

制备透水混凝土的原材料有 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、天然碎石骨料和自来水. 水泥的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水胶比除特别说明外均为质量分数或质量比)如表 1 所示. 骨料通过将大块碎石用颚式破碎机粉碎,然后进行筛选、清洗和干燥后获得. 骨料的尺寸为 7.0~9.5 mm,堆积密度为 1.573 g/cm³,表观密度为 2.469 g/cm³,空隙率为 43%,压碎值为 15.9%. 此外,为了增加拌和浆体的流动性并减少水的用量^[13],添加了减水率为 30% 的聚羧酸高效减水剂.

表 1 水泥的化学组成
Table 1 Chemical composition (by mass) of cement

Unit: %									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Other
61.810	19.960	6.220	3.645	3.250	3.150	1.120	0.320	0.090	0.435

1.2 试验方法

1.2.1 试件制备

所有的透水混凝土试件遵循同样的配合比和制备方法. 水胶比为 0.28,骨胶比为 6. 制备过程如下: 首先,将骨料和一半的水搅拌混合 30 s,以确保骨料充分润湿;随后,加入一半的水泥和所有减水剂,搅拌 3 min;接着,将剩余的水和水泥加入混合物中,再搅拌 3 min;最后,将混合浆料倒入 100 mm×100 mm×100 mm 的方形塑料模具中,并在模具上覆盖 1 层塑料薄膜,以防止水分的过度蒸发. 试件在 (25±2) °C 条件下静置 8 h 后脱模.

1.2.2 试件预处理

脱模后的试件分为静态养护组 (ambient pressure) 和流通养护组 (flow). 为了探究流通法养护的性能表现情况,选取静态养护中 0.3 MPa 下的加压养护试件作为对照组 (pressure). 混凝土碳化养护相关的试验表明,在碳化养护前需要先控制水泥基质中的水分以确保最佳的养护效果,而预处理是目前最常用的方法之一^[1, 14-15]. 本文静态加压养护采取的预处理方式为:在 (25±2) °C、相对湿度 (60±5)% 的条件下干燥 16 h,以达到 30%~40% 的失水率^[16-17].

同时,试验中发现,流通法碳化过程中移除水分的效率远高于预处理,因此不对流通法进行额外的预处理.

1.2.3 养护方法

为了更清晰地阐述养护步骤,结合 2 种养护方式的装置原理图及实物图进行说明,如图 1 所示. 流通法的养护装置见图 1(a),通过泵来实现气体的持续流通. 流通气体为 20% (体积分数) 的 CO_2 . 前期的研究发现,低浓度的 CO_2 养护能够带来更高的长期性能收益并更具经济价值^[18-19]. 在所设计的流通法养护装置中,将反应箱内部填满试件,使更多的气流能够从透水混凝土的内部连通孔隙中流过,从而促进扩散和碳化. 本次试验中容器内部的容积为 6.5 L,可装入 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 的透水混凝土试件. 具体的操作为:将脱模后的试件直接放入碳化反应箱中,装置密封后通入配置好的 20% CO_2 ,吹扫 3 min 将空气排出后关闭进气阀门,并打开气体循环泵,以便气流持续均匀地流过试件中心,气体流速为 10 L/min. 同时,通过冷凝器等干燥系统实时排出气流带出的水分,以维持 CO_2 反应处于合适的环境湿度. 流通气体养护期间借助体积分数表记录容器内

CO₂气体每分钟的体积分数,并通过温湿度检测计监测装置内的温、湿度,以及使用压力表监测容器内的压力以维持 $(1.0 \pm 0.2) \times 10^5$ Pa的压力。由于养护期间CO₂会被试块吸收进而导致CO₂浓度的降低,因此每隔一段时间进行换气。经过初步尝试,排气-重新补气的周期确定为30 min。

静态养护装置如图1(b)所示。将试件放入碳化反应釜中,并持续通入20%的CO₂。其中,常压组的气压保持在0~0.1 MPa,加压组的压力维持在0.3 MPa。具体操作方法与之前的论文^[20]中一致。将进行碳化养护后的试件直接用于后续的测试。

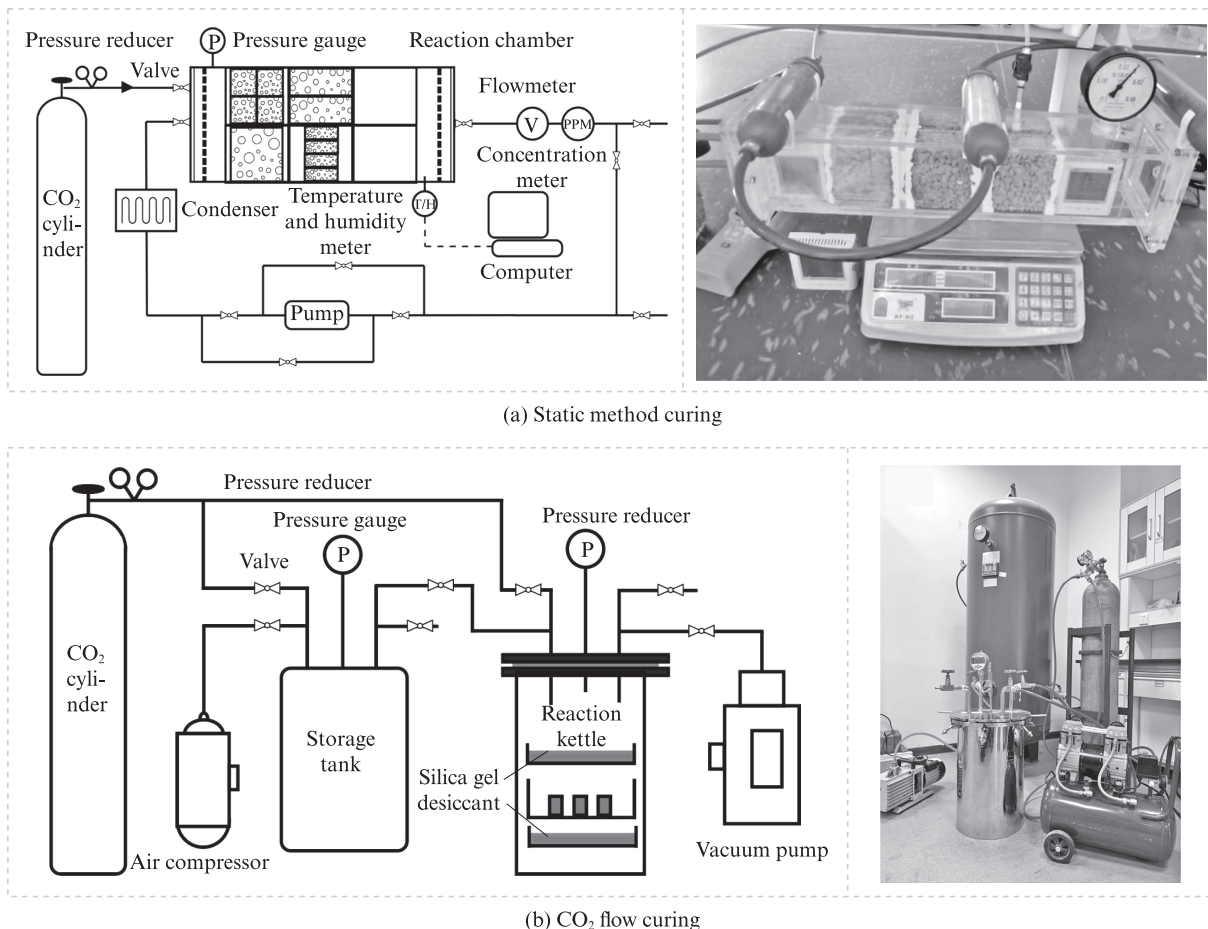


图1 2种养护方式的装置原理图及实物图
Fig. 1 Schematic and actual images of devices for two curing methods

1.3 表征测试方法

透水混凝土的抗压强度依据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,采用YAW—1000D型自动恒应力试验机进行测试。

透水混凝土整体和不同深度的固碳率分别通过2种方法确定。整体的固碳率(M_{CO_2})通过质量增加法获得:

$$M_{CO_2} = \frac{m_a - m_b + m_w}{m_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_b 为CO₂养护前的试件质量,g; m_a 为养护后的试件质量,g; m_w 为反应过程中试件排出的自由水量,g; m_c 为每个试件中水泥的质量,g。

混凝土不同深度处的固碳率则通过热重分析法(TG)确定。对进行抗压强度测试后的试件直接取

样。从试件的表面(0~5 mm)和中心(40~45 mm处)分别取下5~10 g水泥碎块,球磨干燥后使用METTLER TOLEDO TGA/DSC3+型热重分析仪进行测试。对于每组样品,取5~10 mg干燥粉末,在N₂保护下从常温加热至1 000 ℃,升温速率为10 ℃/min。同时每次测试还可获得差示扫描量热法(DSC)的数据。

此外,在CO₂养护后,另取每组中的试件,从中间切成两半,在截面处喷洒1%酚酞乙醇溶液,12 h后观察测量其碳化深度和程度。

在热重分析过程中取得的水泥碎块样品也用于测定不同深度处的自由水含量(C_w)。将样品在105 ℃的真空烘箱中烘干直至恒重,期间的质量损失即为样品的剩余自由水质量(m_1)。样品(质量为 m_p)的 C_w

根据式(2)计算获得.

$$C_w = \frac{m_1}{m_p} \times 100\% \quad (2)$$

另取3组试件中心(40~45 mm)处的水泥碎块样品,在无水乙醇中浸泡7 d,以防止其进一步水化.然后,将样品干燥(真空干燥,60℃,12 h)后采用JEOL JSM-6380LV型扫描电子显微镜(SEM)观察其微观结构.

2 结果与分析

2.1 养护时间

图2为流通法养护装置内CO₂体积分数随碳化时间的变化.浓度检测计记录体积分数的时间间隔为10 s,只选取每一个循环周期的初始(换气后)和结束(排气之前)的数据并绘制成图像.由图2可见:随着透水混凝土碳化的持续进行,由于CO₂的消耗,每个周期内CO₂的体积分数均出现下降,而下降的幅度逐渐减小,表明反应的程度逐渐缓和;在前期的8次循环中,结束时CO₂体积分数的最低值由起初的1%左右缓慢的提升至9%,说明碳化快速的进行但正逐渐减慢;在碳化时长达到4.0 h后,CO₂的最低体积分数迅速提升,并在之后的2.0 h内维持在14%左右,碳化仍在持续.6.0 h后CO₂的最低体积分数则是不规律的缓慢提升,最终在碳化时长8.5 h之后趋于平缓,每周期的下降维持在1%左右,表明碳化已经十分缓慢.对体积分数曲线进行拟合后,较平稳的直线同样出现在9.0 h之后.可以认为所采用的流通法养护在10.0 h的养护后便可以十分充分.

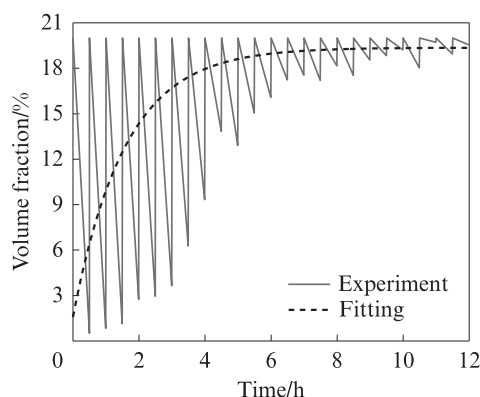


图2 流通法养护装置内CO₂体积分数随碳化时间的变化

Fig. 2 Variation of CO₂ volume fraction inside flow curing device with carbonation time

图3为不同碳化时间下的静态加压养护固碳率.由图3可见:加压养护试件的固碳率随着养护时间的增加而提升,且增幅逐渐下降;试件的固碳率从养护

时长2.0 h的5.7%提升到了12.0 h的10.3%.值得注意的是,养护时长为8.0 h时的固碳率便达到了12.0 h时的98%.依据CO₂养护混凝土动力学研究结论,可以认为此时碳化反应已经接近停止^[21-22].因此,8.0 h为合适的加压碳化时间.

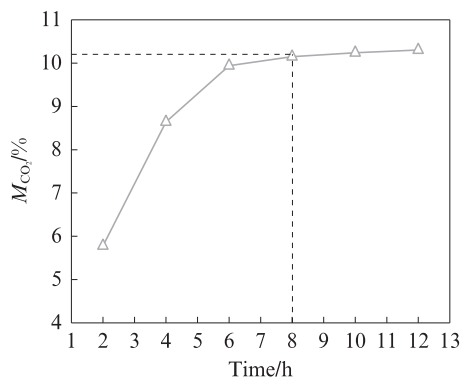


图3 不同碳化时间下的静态加压养护固碳率
Fig. 3 CO₂ uptake of ambient pressure curing at different carbonation times

综上,加压养护组需要16.0 h的预处理以及8.0 h的碳酸化反应,以达到较理想的养护效果.而流通法养护仅需10.0 h的碳酸化反应时长,这有助于提高效率 and 节省能源消耗.常压养护的方案与流通法相同,无预处理且碳化时长为10.0 h.与其他不同原理的流动养护试验及静态CO₂养护方案相比,本研究中的流通养护都具有更高的时间效率^[10, 18-19].

2.2 固碳与抗压强度性能

图4为3组试件表面及中心的固碳率与整体抗压强度.由图4可见:

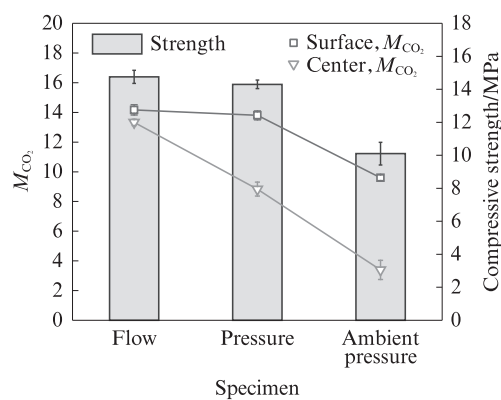


图4 3组试件表面及中心的固碳率与整体抗压强度
Fig. 4 CO₂ uptake at surface and center of three groups of specimens and overall compressive strength

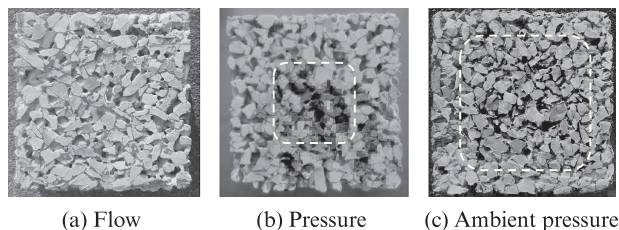
(1)流通法养护试件表面(0~5 mm)与中心(40~45 mm)2处的固碳率均为最高(约14%),尤其是内部固碳率明显高于其他2组,不仅明显高于常压养护(约2%),而且高于以性能出色著称的加压养护

(约8%).

(2)流通法试件在表面与中心2处的固碳率几乎一致.而静态常压和加压养护试件在表面与中心2处的固碳率有明显的差距.严重的碳化不均匀性对试件的强度造成了负面影响.流通法试件的抗压强度同样最高,为14.7 MPa.有研究表明,碳化养护过程可以快速提高水泥基材料的早期强度,其原因在于:一方面,早期碳化反应中迅速生成的CaCO₃具有较高的强度,为主要的强度来源;另一方面,CaCO₃等产物能有效地填补水泥石中的毛细孔,提高了水泥基材料的密实度^[20,23].因此,更高的固碳率会生成更多的碳化产物,使试件获得更高的抗压强度.

总体而言,流通法养护在提高透水混凝土的固碳率和强度方面展现出了显著的优势,这可归因于其在减少内外部碳化不均匀性方面的独特优势.

图5为CO₂养护后3组试件的截面碳化情况.由图5可见:静态养护的常压与加压组试件的截面上可以观察到明显的深色区域(白色虚线框所包围的部分),这代表该区域内水泥浆层的碳化程度较低^[20],即固碳率较低.碳化程度低的部位主要集中在试件



(a) Flow (b) Pressure (c) Ambient pressure

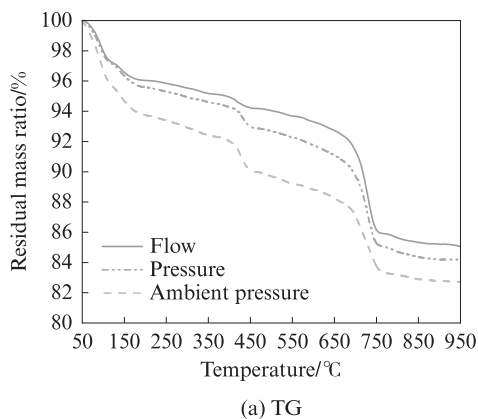
图5 CO₂养护后3组试件的截面碳化情况

Fig. 5 Cross-sectional carbonation images of three groups of specimens after CO₂ curing

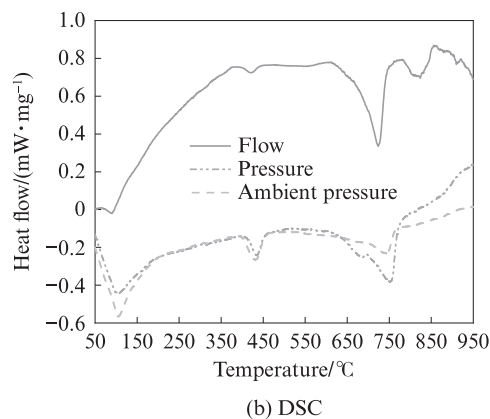
的中心,而外侧的颜色更浅,碳化程度更高,展现了常压与加压养护造成的不均匀碳化现象.同时,常压养护试件中心深色区域的面积要明显大于加压养护且颜色更深,这也与图4固碳率所显示的结论相同.流通法试件的中心则几乎没有变色,说明整个截面的碳化程度都很高,再一次表明了流通法在解决试件内外碳化不均匀性和提升整体的固碳性能上的优异表现.

2.3 TG-DSC 分析

图6为3组试件中心(40 mm处)处的TG-DSC曲线.由图6可见:



(a) TG



(b) DSC

图6 3组试件中心处的TG-DSC曲线

Fig. 6 TG-DSC curves of center of three groups of specimens

(1)105℃以下的质量损失可归因于游离水的蒸发,105~420℃为化学结合水的损失,包括水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸盐(钙矾石(AFt)等)和水化铝酸铁的脱水^[24].420~550℃的质量损失对应于Ca(OH)₂的脱水.550℃后的质量损失则归因于碳化产物(主要是CaCO₃)的分解^[24].

(2)AFt的吸热峰约在120℃左右出现,静态养护法AFt的生成数量更多,表明其水化程度更高^[25-26].值得注意的是,在420~550℃阶段Ca(OH)₂的含量明显减少,在550℃之后CaCO₃的含量增加.可能的原因是在水泥基材料的碳化反应中,CO₂与Ca(OH)₂或直接与水泥中的活性物质如硅酸二钙(C₂S)及硅酸三

钙(C₃S)反应生成CaCO₃,这些都会抑制水化作用^[27-29].同时,碳化反应的活化能明显低于水化反应,因此混凝土更程度的碳化代表着更低的水化^[27].从750℃左右CaCO₃的吸热峰也可以明显看出3种养护方式碳化程度的差异,其中流通法生成了更多的CaCO₃,其次是加压养护,最后是常压养护.

2.4 含水率变化

先前的研究表明,试件中的自由水含量会直接影响CO₂养护的效率^[1,30].为了阐明透水混凝土试件产生碳化不均匀性的原因以及流通法的作用,对3组试件的表面及中心处的自由水含量进行了研究,结果如图7所示.由图7可见:流通组与常压组试件在

养护前,即静置脱模结束后表面及内部的含水率均达到了18%以上,其中中心处的含水率较表面高出约1.7%;在养护结束后,流通组试件中心与表面的含水率同步下降,且始终保持约1个百分点的差距;在常压养护结束后,试件表面的含水率显著下降至8.6%,中心的含水率却仍高达16.3%,这是由于静态养护过程中自由水的蒸发也是由外向内的进行.流通法显著减少了内、外部水分分布的不均匀性.由于碳化反应主要在水泥浆体的微观孔隙中进行,过多

的游离水严重阻碍了 CO_2 气体的扩散,具体而言, CO_2 在充满孔隙水的饱和毛细孔中的渗透速度是不饱和毛细孔的万分之一^[31].因此过高的含水率阻碍了碳化反应,是导致试件内外部碳化不均匀的关键因素之一.此外,加压组试件在碳化养护前表面与内部的含水率已经表现出1倍左右的差距,含水率的不均匀性导致了碳化的不均匀性.

值得注意的是,流通法在移除试件中心水分的效率方面成效显著.在碳化前后,试件内部含水率下降了约10%,甚至超过了加压组试件16.0 h预处理的效果.这展现了流通法在提升养护效率方面的优势.

2.5 微观结构

图8为3组试件养护后中心处的SEM照片.由图8可见:流动法养护试件中大面积的 CaCO_3 已连接成片,并在其中心形成致密的结构,表明碳化程度很高;加压养护组试件中心的碳化程度下降,出现 CaCO_3 的颗粒状晶体,层状C-S-H凝胶和针状AFt分散在其周围^[32],这是水化与碳化共同作用的结果;在常压养护组试件中,可以发现大量的AFt和C-S-H凝胶,表明该区域的水化作用占主导地位而碳化作用比较微弱^[32-33].SEM的结果与前文吻合较好,证明了流通法养护试件中心的碳化程度较高.

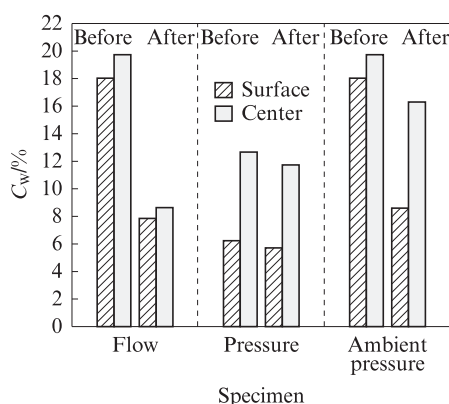


图7 3组试件养护前后试件表面及中心的含水率变化情况

Fig. 7 Changes in water content at surface and center of three groups of specimens before and after curing

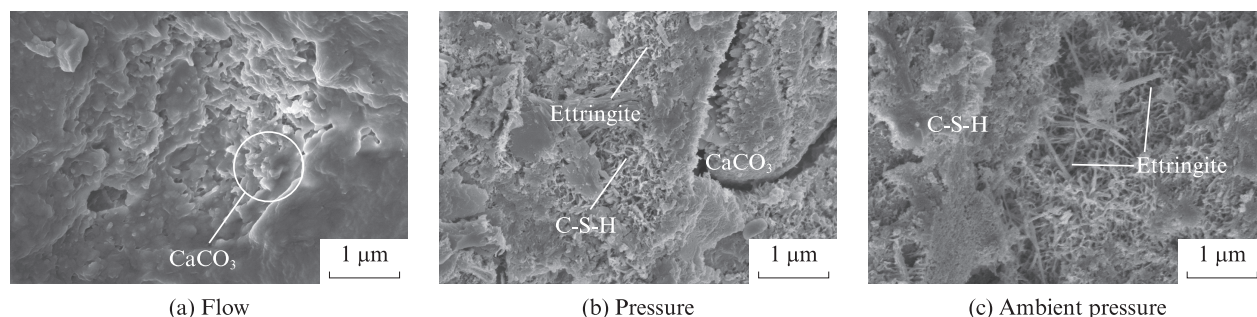


图8 3组试件养护后中心处的SEM照片

Fig. 8 SEM images of center of three groups of specimens after curing

3 结论

(1)流通法养护透水混凝土,通过使 CO_2 流经混凝土的内部,提高了中心区域的碳化程度,消除了内外的碳化不均匀,从而显著提升了混凝土的抗压强度和固碳率,并能够有效地降低碳化养护所需的时间.

(2)透水混凝土试件的含水量是影响 CO_2 养护效率和试件内外碳化不均匀现象的重要因素.流通法养护在调控试件中水分分布方面展现出独特的优势. CO_2 气流有效地带走了内部多余的水分,同时确

保了水分的均匀分布.不仅促进了更加均匀的碳化,还提高了养护过程的效率.

(3)流通法养护节省了静态养护方法中的预处理步骤,能源消耗和时间成本均得到显著降低.

参考文献:

- [1] CHEN K Y, XIA J, WU R J, et al. An overview on the influence of various parameters on the fabrication and engineering properties of CO_2 -cured cement-based composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 366:132968.
- [2] United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022[M]. Reston:Geological Survey, 2022.

- [3] 贺晋瑜,何捷,王郁涛,等.中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究[J].环境科学研究,2022,35(2):347-355.
HE Jinyu, HE Jie, WANG Yutao, et al. Research on the path to peak carbon dioxide emissions in China's cement industry [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2):347-355. (in Chinese)
- [4] LI Z, HE Z, CHEN X R. The performance of carbonation-cured concrete[J]. Materials(Basel), 2019, 12(22):3729.
- [5] 肖力光,雒锋,黄秀霞.利用镁渣配制胶凝材料的机理分析[J].吉林建筑工程学院学报,2009,26(5):1-5.
XIAO Liguang, LUO Feng, HUANG Xiuxia. Mechanism analysis on cementitious materials made from magnesium slag[J]. Journal of Jilin Institute of Architectural & Civil Engineering, 2009, 26(5):1-5. (in Chinese)
- [6] 曹伟达,杨全兵.碳化养护对钢渣-熟石灰固碳耐久性的影响[J].建筑材料学报,2023,26(3):324-331.
CAO Weida, YANG Quanbing. Effects of carbonation curing on the durability of steel slag-lime carbonation bricks[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):324-331. (in Chinese)
- [7] 陈铁锋,高小建.生物炭对碳化养护水泥砂浆的改性机理[J].建筑材料学报,2023,26(8):831-837.
CHEN Tiefeng, GAO Xiaojian. Mechanism of biochar modification on carbonation cured cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(8):831-837. (in Chinese)
- [8] TANG B W, FAN M, YANG Z Q, et al. A comparison study of aggregate carbonation and concrete carbonation for the enhancement of recycled aggregate pervious concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 371:130797.
- [9] RAHMANI H, GHEIB M M. CO₂ curing of hydrated lime modified pervious concretes[J]. Magazine of Civil Engineering, 2019, 92(8):106-114.
- [10] CHEN T F, GAO X J. Use of carbonation curing to improve mechanical strength and durability of pervious concrete[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2020, 8(9):3872-3884.
- [11] FERNANDEZ BERTOS M, SIMONS S J, HILLS C D, et al. A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 112(3):193-205.
- [12] 崔正龙,北迁政文,田中礼治.再生骨料在混凝土预制件中应用的可行性研究[J].建筑材料学报,2010,13(2):210-212.
CUI Zhenglong, KITATSUJI Masahumi, TANAKA Reiji. Feasibility study on the use of recycled aggregate in concrete precasts[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(2):210-212. (in Chinese)
- [13] SUN J, YIN X Y, CUI B, et al. Synthesis and sustained release mechanism of slow release polycarboxylate superplasticizer//[C] 5th International Conference on Environmental Science and Material Application (ESMA 2019). Xi'an:Institute of Physics Publishing, 2020.
- [14] 邹庆焱,史才军,郑克仁,等.预养护对砌块混凝土二氧化碳养护的影响[J].建筑材料学报,2008,11(1):116-120.
ZOU Qingyan, SHI Caijun, ZHENG Keren, et al. Effects of pre-curing on carbonation curing of block concrete[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(1):116-120. (in Chinese)
- [15] 史才军,何平平,涂贞军,等.预养护对二氧化碳养护混凝土过程及显微结构的影响[J].硅酸盐学报,2014,42(8):996-1004.
SHI Caijun, HE Pingping, TU Zhenjun, et al. Effects of pre-curing on the carbonation process and microstructure of carbonation cured concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(8):996-1004. (in Chinese)
- [16] CHEN T F, GAO X J. Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2019, 34:74-86.
- [17] EL-HASSAN H, SHAO Y X. Early carbonation curing of concrete masonry units with Portland limestone cement [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62:168-177.
- [18] XIAN X P, ZHANG D, SHAO Y X. Flue gas carbonation curing of cement paste and concrete at ambient pressure[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313:127943.
- [19] HE Z, WANG S, MAHOUTIAN M, et al. Flue gas carbonation of cement-based building products[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2020, 37:309-319.
- [20] LIU L X, LIU Y L, TIAN X G, et al. Superior CO₂ uptake and enhanced compressive strength for carbonation curing of cement-based materials via flue gas[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346:128364.
- [21] 史才军,王吉云,涂贞军,等.CO₂养护混凝土技术研究进展[J].材料导报,2017,31(5):134-138.
SHI Caijun, WANG Jiyun, TU Zhenjun, et al. Progress in CO₂ curing concrete technology[J]. Materials Review, 2017, 31(5):134-138. (in Chinese)
- [22] 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):1179-1184.
SHI Caijun, ZOU Qingyan, HE Fuqiang. Kinetic study on CO₂ cured concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(7):1179-1184. (in Chinese)
- [23] HASEGAWA L I I. Carbonation curing and performance of pervious concrete using Portland limestone cement[D]. Montreal: McGill University, 2011.
- [24] SHARMA D, GOYAL S. Effect of accelerated carbonation curing on near surface properties of concrete[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(4):1300-1321.
- [25] 赵蓓蕾,刘爽.建筑垃圾-粉煤灰基胶结充填体强度机理研究[J].非金属矿,2023,46(6):82-87.
ZHAO Beilei, LIU Shuang. Study on the strength mechanism of construction waste-fly ash based cementitious backfill [J]. Non-Metallic Mines, 2023, 46(6):82-87. (in Chinese)
- [26] 张建武,管学茂,汪潇,等.可溶性P₂O₅对超细硫铝酸盐水泥基双液注浆材料早期水化性能的影响及机理[J].材料导报,2024,38(19):60-65.
ZHANG Jianwu, GUAN Xuemao, WANG Xiao, et al. Effects of soluble P₂O₅ on early hydration performance of ultrafine sulphoaluminate cement-based double-liquid grouting materials and mechanisms[J]. Materials Reports, 2024, 38(19):60-65. (in Chinese)
- [27] 谢圣浩,费莉,张国良,等.低水胶比水泥胶砂碳化程度和固碳

- 率的试验研究[J]. 混凝土, 2023(4):131-135.
- XIE Shenghao, FEI Li, ZHANG Guoliang, et al. Experimental study on carbonation degree and carbonation fixation rate of cement mortar with low water-binder ratio[J]. Concrete, 2023(4):131-135. (in Chinese)
- [28] 高强,梅开元,王德坤,等. CCUS环境下水泥单矿 C_3S 的 CO_2 腐蚀动力学研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(8):2644-2653.
- GAO Qiang, MEI Kaiyuan, WANG Dekun, et al. Study on the CO_2 corrosion kinetics of cement single mineral C_3S in CCUS environment [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(8):2644-2653. (in Chinese)
- [29] 朱明,雪高瑞,穆元冬. $\gamma-C_2S$ 和 $\beta-C_2S$ 的碳化与水化活性研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9):3036-3040, 3052.
- ZHU Ming, XUE Gaorui, MU Yuandong. Study on the carbonation and hydration reactivity of $\gamma-C_2S$ and $\beta-C_2S$ [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(9):3036-3040, 3052. (in Chinese)
- [30] 刘琼,汤辉林,迟琳,等. 早龄期碳化养护条件下水泥基材料的阻抗谱特征[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(12):1319-1327.
- LIU Qiong, TANG Huilin, CHI Lin, et al. Impedance spectrum characteristics of cement-based materials under early age carbonation curing conditions[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(12):1319-1327. (in Chinese)
- [31] 贾晓晓. 加速碳化养护对硬化水泥净浆性能及微结构的影响[D]. 长沙:湖南大学, 2020.
- JIA Xiaoxiao. Effects of accelerated carbonation curing on the properties and microstructure of hardened cement paste [D]. Changsha:Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [32] LIU M, HONG S X, WANG Y S, et al. Compositions and microstructures of hardened cement paste with carbonation curing and further water curing[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267:121724.
- [33] YAN D M, LU J Y, SUN Y F, et al. CO_2 pretreatment to aerated concrete with high-volume industry wastes enables a sustainable precast concrete industry [J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2021, 9(8):3363-3375.