

高强二氧化碳泡沫混凝土的设计、制备与宏微观特性

范定强, 陆建鑫, 刘康宁, 潘智生

(香港理工大学土木及环境工程学系, 香港理工大学碳中和资源工程研究中心, 中国 香港 999077)

摘 要: CO₂ 的大量排放给全球生态环境构成了严峻挑战。对此, 提出了回收 CO₂ 废气制备高强 CO₂ 泡沫混凝土 (HSCFC) 的新策略, 旨在实现混凝土领域的高效碳捕捉与碳利用。首先, 提出了高强 CO₂ 泡沫混凝土的设计理念与方法, 即将设计的 CO₂ 泡沫纳入基于颗粒紧密堆积理论设计的高强水泥浆体中。随后对制备的高强 CO₂ 泡沫混凝土材料进行了宏/微观性能评估。结果表明, 设计的 HSCFC 具有低密度、高抗压强度 (约为相似密度下普通泡沫混凝土强度的 2 倍)、高显微硬度 (HV 均值可达 90) 以及低导热系数。提高 CO₂ 泡沫用量可增加 HSCFC 的孔隙率, 但使用过量 CO₂ 泡沫导致孔结构的粗化。此外, CO₂ 泡沫的使用提高了水泥水化程度, 并在水泥基体内产生了内碳化效应, 于泡孔壁上原位生成大量碳酸钙, 从而增强泡孔。研究成果为回收工业尾气制备固碳型泡沫混凝土提供了一条新途径, 有利于水泥混凝土行业的低碳可持续发展。

关键词: 二氧化碳泡沫; 泡沫混凝土; 碳捕集; 孔结构; 内碳化

中图分类号: TU528.2 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)05-1193-12

网络出版时间: 2025-01-09



二氧化碳(CO₂)的大量排放给地球生态环境带来愈加严峻的挑战。数据显示, 建筑业是碳足迹的重要来源, 约占全球碳排放量的 30%, 并伴随着大量的能源消耗^[1]。其中, 水泥混凝土生产过程具有高碳排高能耗的特征, 其碳排放量约占建筑业总量的 40%^[1]。因此, 水泥和混凝土行业的低碳可持续发展已引起全球广泛关注。

泡沫混凝土作为一种典型的轻质多孔水泥基材料(密度通常为 400~1600 kg/m³), 因其保温隔热、隔音耐火及低碳环保等优势, 在节能建筑中表现出显著应用价值^[2-3]。泡沫混凝土通常采用化学发泡或物理发泡法制备。化学发泡法通过化学反应在浆体内部产生孔隙, 常用发泡剂包括铝粉和过氧化氢^[3]。然而, 铝粉的生产是高能耗高碳排的过程, 不利于泡沫混凝土的低碳化发展; H₂O₂ 发泡的稳定性较差, 受环境影响较大, 易导致混凝土材料性能不佳^[4]。物理发泡则是通过压缩空气制备性能稳定的水性泡沫, 可定向生产功能性泡沫与泡沫混凝土产品^[3, 5]。因此, 物理发泡法具有高效稳定、可调可控等优势,

受到建筑行业的广泛青睐。

近年来, 随着对 CO₂ 捕集、利用和封存(CCUS)技术的重视, 利用 CO₂ 取代空气制备 CO₂ 泡沫并制备固碳型泡沫混凝土材料得到了越来越多的关注^[6-8]。研发 CO₂ 泡沫混凝土具有多重优势: 1) 首先, 将 CO₂ 封存于泡沫混凝土体系内, 可实现高效碳捕集与利用, 减轻水泥混凝土行业的碳排放压力^[6]; 2) 其次, 泡沫内的 CO₂ 可与水泥基体系内的碱性物质(如氢氧化钙)反应并在孔壁生成稳定的碳酸钙(CaCO₃), 实现永久性碳封存和内碳化增强的双重效益^[4, 8]; 3) 此外, 由于 CO₂ 的导热系数比空气低, 使得制备的泡沫混凝土产品具有更优越的保温隔热性能, 从而提升建筑的节能效率^[9]。因此, 开发 CO₂ 泡沫混凝土(CFC)具有重要的意义与前景。

目前, 关于利用 CO₂ 泡沫制备泡沫混凝土的研究相对有限。Jiang 等^[8]利用纳米材料改性的 CO₂ 泡沫制备了抗压强度约 4 MPa 的泡沫混凝土, 指出使用 CO₂ 泡沫可在泡孔上生成一层碳酸钙薄膜, 有利于材料整体性能的提升。丰士根等^[10]通过正交实验

收稿日期: 2024-10-20。 修订日期: 2024-11-24。

基金项目: 国家自然科学基金(52308275); 广东省基础与应用基础研究
海上风电联合基金(2024A1515240013); 香港创新及科技基金(ZS1H、ZM3H)。

第一作者: 范定强(1996), 男, 博士研究生。

通信作者: 陆建鑫(1988), 男, 博士, 助理教授。

Received date: 2024-10-20. Revised date: 2024-11-24.

First author: FAN Dingqiang (1996-), male, Doctoral candidate.

E-mail: ding-qiang.fan@connect.polyu.hk

Correspondent author: LU Jianxin (1988-), male, Ph.D., Assistant Professor.

E-mail: jxinlu@polyu.edu.hk

设计了复合发泡剂并制备了系列 CO₂ 泡沫混凝土, 材料密度为 1.3~1.6 g/cm³, 7 d 抗压强度为 3~5 MPa。Ta 等^[11]提出采用 CO₂ 泡沫与预碳化浆体协同制备 CO₂ 泡沫混凝土的策略, 结果表明预碳化可提升 CO₂ 泡沫在水泥基体系内的稳定性并增强基体性能。此外, Liu 等^[4]采用聚合物改性发泡剂制备了 CO₂ 泡沫及 CO₂ 泡沫混凝土, 结果显示降低 CO₂ 气体浓度可提升泡沫稳定性, 从而提高泡沫混凝土性能。尽管已有一些研究尝试开发 CO₂ 泡沫混凝土材料, 但目前制备的 CO₂ 泡沫混凝土仍面临密度高、强度低(<5 MPa) 的不足, 这与泡沫混凝土轻质高强的发展方向不符。因此, 开发一种新型的轻质高强 CO₂ 泡沫混凝土具有重要意义和价值。

基于上述, 本工作开发了一种新型高强 CO₂ 泡沫混凝土 (HSCFC), 旨在为混凝土领域实现高效 CCUS 提供新策略。首先, 提出了 HSCFC 组成设计方法, 即通过将设计的 CO₂ 泡沫纳入基于颗粒紧密堆积理论设计的密实基体中, 从而制备高强泡沫混凝土。然后, 评估了设计的 HSCFC 的宏微观特性, 并揭示了水泥基体系内 CO₂ 泡沫内碳化与水化过程的协同作用机制。最后, 总结了高强 CO₂ 泡沫混凝土的设计理念与发展前景, 以期为固碳型混凝土材料的研发与应用提供参考。

1 实验

1.1 原料

采用普通硅酸盐水泥(OPC, CEM I 525)、硅灰(SF)和粉煤灰(FA)作为胶凝材料, 其化学成分和粒度分别见图 1 和表 1。采用固体含量为 0.22 的聚羧酸减水剂(巴斯夫 SKY 8588)。此外, 添加硬脂酸钙以提升泡沫在新拌浆体内的稳定性。基于前期研究^[12], 设计了一种由十二烷基硫酸钠(SDS)、双亲纳米二氧化硅(ANS)和水组成的高效发泡剂, 用以制备 CO₂ 泡沫。制备的泡沫密度为 98 kg/m³。生产 CO₂ 泡沫时, 采用模拟工业废气(20% CO₂+80% N₂)作为发泡气体^[13]。采用模拟废气的原因在于工业废气通常为混合气(约含 20% 的 CO₂ 及 70%~80% N₂

等其他成分), 而提纯 CO₂ 是一种高成本和高能耗的过程, 不符合 CO₂ 泡沫混凝土低碳发展的目标。另外, 采用低浓度 CO₂ 混合气可以弱化气泡尺寸增大趋势, 从而提升 CO₂ 泡沫及其制备的 CO₂ 泡沫混凝土的综合性能^[4, 14]。

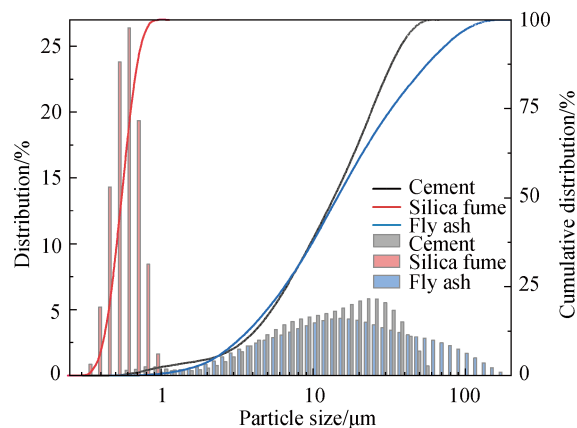


图 1 胶凝材料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of binder materials

1.2 配合比设计方法

首先, 采用改良的 Andreasen & Andersen 颗粒堆积模型(式 1)对胶凝材料的比例进行优化, 以制备高致密性和高强度的水泥浆体:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

式中, $P(D)$ 表示总固体中小于粒径 D 的比例; D 为粒径; $D_{\max}$ 和 $D_{\min}$ 分别为体系中的最大和最小粒径; q 为分布模量。具体计算过程详见文献[15–16]。之后, 将不同体积的 CO₂ 泡沫(0~0.6 m³)纳入设计的高强浆体, 得到不同密度等级的 HSCFC 配比, 如表 2 所示。

1.3 制备流程

图 2 为高强 CO₂ 泡沫混凝土的制备工艺。首先, 将胶凝材料在搅拌机中混合搅拌 1 min, 然后加入水、减水剂(SP)搅拌约 4~5 min, 待成浆后搅入 CO₂ 泡沫, 继续搅拌 1~2 min。CO₂ 泡沫的制备过程如下: 首先, 将配制好的液体发泡剂引入发泡机, 发泡剂可与外部 CO₂ 气体在发泡机内混合; 接着, 采用物

表 1 胶凝材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of cementitious materials

w/%

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
OPC	25.20	3.56	1.32	0.17	0.68	3.56	61.30	3.60	0.36
SF	94.20	1.12	0.63	0.08	1.80	0.27	1.35	0.42	
FA	45.21	34.6	2.28	0.20	1.55	2.40	7.41	3.56	2.26

OPC: ordinary Portland cement. SF: silica fume. FA: Fly ash.

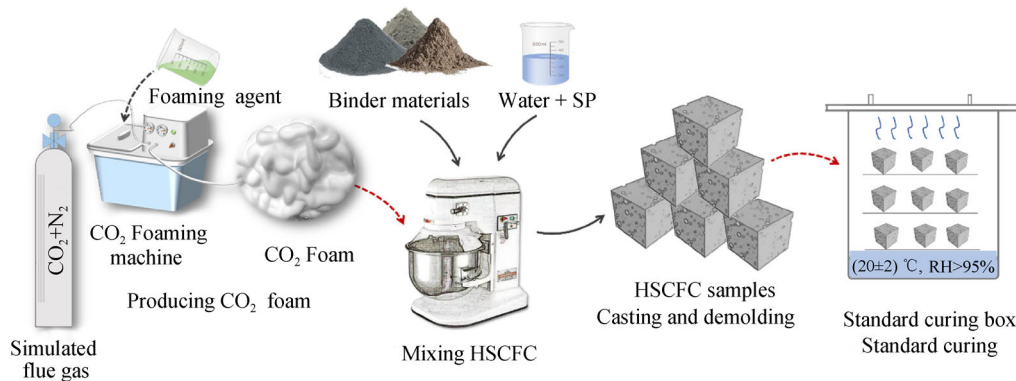
表 2 不同密度等级的 HSCFC 配比

Table 2 Mix proportion of HSCFCs with different densities

kg/m³

Type	Mix portion/(kg·m ⁻³)					w/b	V _f /m ³	Dry density/(kg·m ⁻³)
	OPC	SF	FA	SP	CS			
Ref./C0	1179	283	295	35.4	16.5	0.20	0	1757.0±23.5
C2	818	196	205	24.5	11.5	0.20	0.2	1462.1±35.5
C4	708	170	177	21.2	9.9	0.20	0.4	1266.4±24.8
C6	542	130	136	16.3	7.6	0.20	0.6	968.8±36.0

SP: superplasticizer. w/b: water-to-binder ratio. CS: calcium stearate. V_f: the incorporated foam volume in per m³ foam concrete.

图 2 高强 CO₂ 泡沫混凝土制备工艺Fig. 2 Fabrication process of high-strength CO₂ foam concrete

理发泡法制备 CO₂ 水性泡沫。随后,将新拌高强 CO₂ 泡沫混凝土浇注至模具中,用塑料薄膜包裹,并在 20 °C 养护 24 h。硬化后的试样脱模后,置于标准养护室 [(20±2) °C, 湿度>95%] 中养护至 28 d。

1.4 测试

1.4.1 CO₂ 泡沫特征 采用沉陷距和排水量评估 CO₂ 泡沫稳定性,具体操作参考规范 JC/T 2199—2013^[17]。使用尼康 SMZ1270 显微镜观察 CO₂ 泡沫的微观结构与孔径分布。

1.4.2 流变特性 采用旋转流变仪 (Brookfield, RST CC) 测试 HSCFC 的流变特性。流变特性的测试方法如下: 1) 采用阶梯式增加剪切速率至 60 s⁻¹, 阶梯间隔为 20 s; 2) 随后,保持相同的剪切速率,从 60 s⁻¹逐步减少到 0 s⁻¹,持续 160 s。采用 Bingham 模型计算新拌 HSCFC 的流变参数^[18]。

1.4.3 力学性能 抗压强度按照标准 GB 17671—1999 进行测试。试块在指定龄期养护后,选择边长为 40 mm 的立方体进行测试,至少取 3 组数据并计算其算术平均值作为抗压强度值。显微硬度采用 HVX-1000A 维氏硬度计测定。在养护 28 d 后,酒精终止样品的水化后,将干燥的样品浇筑入环氧树脂中。用砂纸打磨后并用金刚石悬浮液抛光样品表面。采用 25 g 荷载测量维氏显微硬度 (HV)。为了获得显微硬度值的统计分布,每个样品随机选取 100 个点进行压痕测试。

1.4.4 孔结构 采用尼康 XT H225ST X 射线计算机断层扫描(XCT) 系统,对 HSCFC 样品的内部孔隙结构进行扫描。随后通过 Avizo 2022 进行图像处理,实现对孔隙特征的数值分析和三维孔隙结构的重建。

1.4.5 微观结构特性 使用 Rigaku Smart-Lab 仪器进行 X 射线衍射 (XRD) 测试。采用 Cu-K_α 辐射 (λ = 1.54 Å),扫描速率为 5 (°)/min,步长为 0.02°,扫描范围为 5°~70°。采用 Rigaku Thermo 仪器进行热重分析(TG)。温度从 40 °C 升至 1000 °C,升温速率为 10 °C/min。采用 JEOL ECZ 500 MHz 固态核磁共振光谱仪测试样品硅谱。仪器旋转速率为 4 kHz,共振频率为 98.4 MHz,进行至少 500 次扫描,弛豫时间为 30 s。采用扫描电子显微镜 (SEM, Tescan Vega 3XMU) 观察样品微观形貌特征。

1.4.6 导热系数 采用导热仪 (Hot Disk M1) 测试导热系数,测量范围为 0.03~40.00 W/(m·K),取至少 5 个测量值的平均值作为 HSCFC 样品的导热系数。

2 结果与讨论

2.1 CO₂ 泡沫结构与稳定性

CO₂ 泡沫性能与泡沫混凝土性能密切相关^[19]。图 3 为制备的 CO₂ 泡沫的稳定性与微观结构。首先,从图 3a 可以看出,制备的 CO₂ 泡沫孔径主要集中在 50~100 μm,呈正态分布,初始平均孔径约为

85 μm 。图 3b 显示, 泡沫的平均孔径随时间逐步增大, 静置 0.5 h 后平均孔径增至约 240 μm 。图 3c 则表明, CO_2 泡沫的排液量和沉陷距离均随时间延长而增加。这是因为泡沫是一种热力学不稳定体系, 在静止时受到重力排水、聚并 (尤其是泡沫壁破裂) 和气泡间气体扩散的影响, 导致泡沫倾向于破裂和孔径增大, 表现为宏观消泡现象^[14]。

制备的 CO_2 泡沫的稳定性符合规范要求, 可以用于泡沫混凝土的制备^[17, 20]。这种稳定性源于设计的发泡剂的多组分协同作用 (见图 3d)。首先, SDS 分子具有亲水头部和疏水尾部, 这种结构特性使其能够降低水溶液的表面张力, 有利于发泡, 并在水溶液中形成胶束, 通过定向吸附作用降低 CO_2 的渗透性^[21]。同时, SDS 作为阴离子表面活性剂, 其液膜两侧吸附电荷产生的排斥力 (分离压力) 阻止了液膜进一步变薄和排水, 从而增强泡沫的稳定性^[22]。此外, 采用了双亲纳米二氧化硅可以在气-液界面和液膜以单层、多层或簇状网络结构中的嵌入, 形成了高粘度高弹模的气泡液膜, 抵消了泡沫的动态不稳定性, 并且降低 CO_2 在液体膜中的透过性^[12, 19]。

2.2 流变特性

图 4 显示了 CO_2 泡沫用量对 HSCFC 流变性能的影响。如图 4a 所示, CO_2 泡沫混凝土的流变特性符合 Bingham 模型, 拟合曲线的 R^2 值均高于 0.9。图 4b 表明, 使用 CO_2 泡沫可以显著增加 HSCFC 的

屈服应力, 最高可增加约 110% (C2 组); 随着 CO_2 泡沫体积的增加, HSCFC 的屈服应力呈现出先增加后减小的趋势。这主要是因为: 生成泡沫内的 CO_2 与水泥浆中溶解的 Ca^{2+} 反应生成 CaCO_3 晶体 (详见 2.5 节), 这些晶体粘附在颗粒表面, 增加了颗粒间摩擦, 从而产生了内聚力, 表现为屈服应力的增加^[23]; 同时, CO_2 泡沫中含有的纳米硅具有高比表面积和表面活性, 能在水泥颗粒界面产生相互作用增强了颗粒间内聚力, 亦有利于屈服应力的提高^[12, 24]。然而, 随着 CO_2 泡沫量的进一步增加, 屈服应力又有所下降。这主要是由于过量的泡沫会导致泡沫结构的聚并、失稳甚至破裂, 形成较大的气孔结构, 削弱水泥基体的结构完整性, 从而降低屈服应力^[25]。

另一方面, 图 4b 表明增加 CO_2 泡沫体积却显著降低了 HSCFC 的塑性黏度。这是因为: CO_2 泡沫中含有较多的水分, 当这些泡沫引入水泥浆体中时, 水分会起到润滑作用, 减少颗粒间的摩擦力, 从而降低塑性黏度, 这种润滑效应使得浆体在低应力下更容易流动^[26]; 泡沫中的气泡在水泥浆体中起到类似滚珠的作用, 气泡的存在使得颗粒间的接触点减少, 减少颗粒间的摩擦和阻力^[26]。因此, 合理控制 CO_2 泡沫的用量, 不仅能够提高浆体的流动性, 还能在保持适当屈服应力的前提下, 优化 HSCFC 的整体性能。

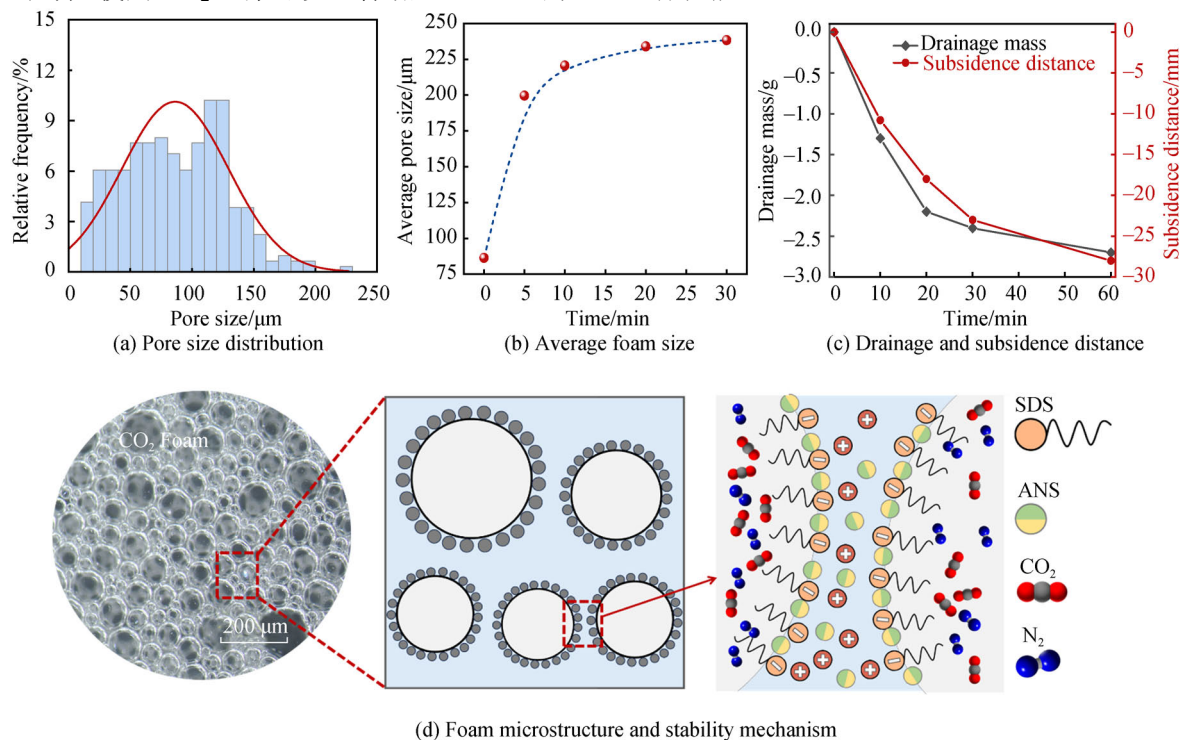


图 3 CO_2 泡沫特性

Fig. 3 Characteristics of CO_2 foam

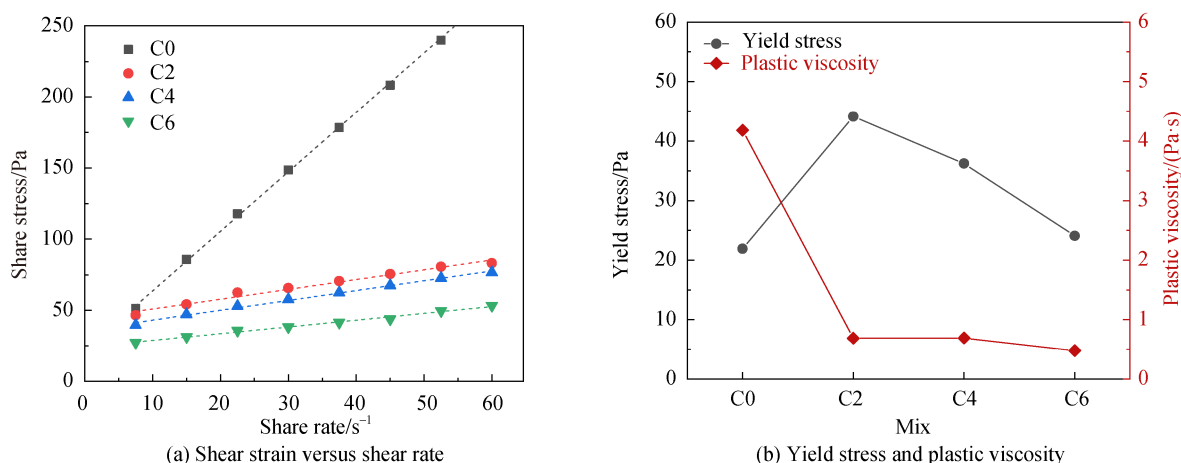


图 4 HSCFC 的流变特性

Fig. 4 Rheological properties of HSCFC

2.3 力学性能与密度

从图 5a 可以看出, 随着 CO₂ 泡沫体积的增加, HSCFC 的密度逐渐下降, 相比于对照组降低了 46.6% (约 900 kg/m³)。同时, 随着 CO₂ 泡沫体积的增加, HSCFC 的抗压强度从 74.1 MPa 降低到 11.5 MPa。这是因为 CO₂ 泡沫含量的增加导致孔隙率升高, 降低了泡沫混凝土的整体强度。另外, CO₂ 泡沫对 HSCFC 微观力学性能 (显微硬度) 的影响如图 5b 所示。对照组 (C0) 的平均显微硬度 HV 为 96.05 HV, 随着 CO₂ 泡沫体积的增加, HSCFC 的平均显微硬度有所下降。但是, 当拌入的 CO₂ 体积低于 0.4 m³ 时, HSCFC 的平均显微硬度下降不明显, 依旧高于 90 HV。这是因为 CO₂ 泡沫的引入增加了浆体中的水分, 从而提高了实际水胶比, 导致微观力学性能有所下降^[27]。值得注意的是, 制备的 HSCFC 具有接近 UHPC 基体的显微硬度, 显著超过普通混凝土 (约 20~60 HV)^[28-29]。这主要是由于

基于颗粒紧密堆积设计的水泥浆体具有高强高密实的特性, 表现为更高的微观力学性能, 这也为制备高强泡沫混凝土材料奠定了基础。

图 6 为设计的 HSCFC 与文献报道的普通泡沫混凝土在抗压强度和比强度的对比结果。可以发现, 所有制备的 HSCFC 具有优异的力学性能, 其抗压强度均超过 10 MPa, 比强度最高达到 21 kN·m/kg。同时, 抗压强度和比强度均为文献报道相似密度的普通泡沫混凝土的 2 倍以上^[30-33], 具有如此优异力学性能的泡沫混凝土材料此前鲜有报道。更高的强度意味着可以使用更多辅助胶凝材料以降低材料的经济成本与碳排放。因此, 后续研究可关注采用多源固废辅助胶凝材料用以制备高强 CO₂ 泡沫混凝土, 例如回收钢渣、玻璃粉和磷渣等。综上, 所开发的新型 CO₂ 泡沫混凝土可以被认为是一种高强泡沫混凝土, 在实际建筑工程中具有显著的减碳潜力和应用价值。

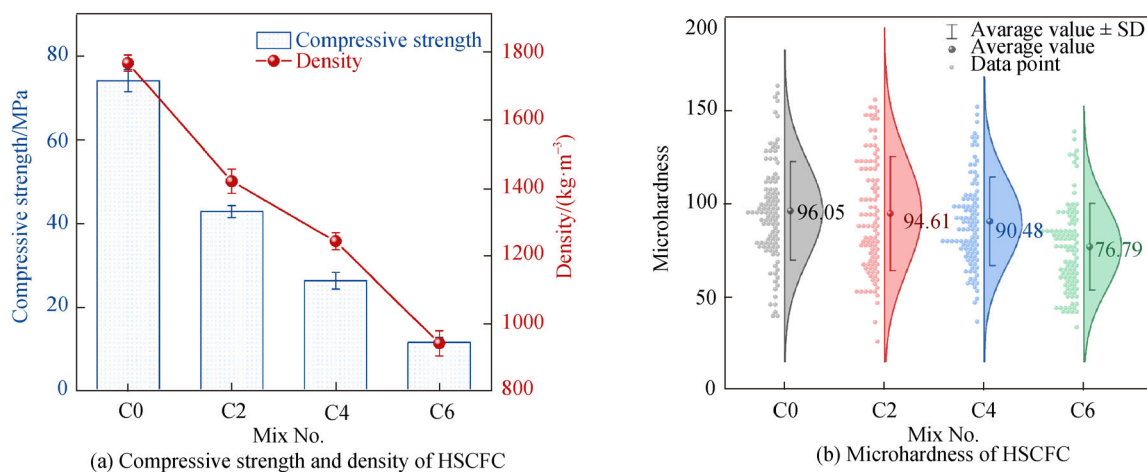


图 5 HSCFC 的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of HSCFC

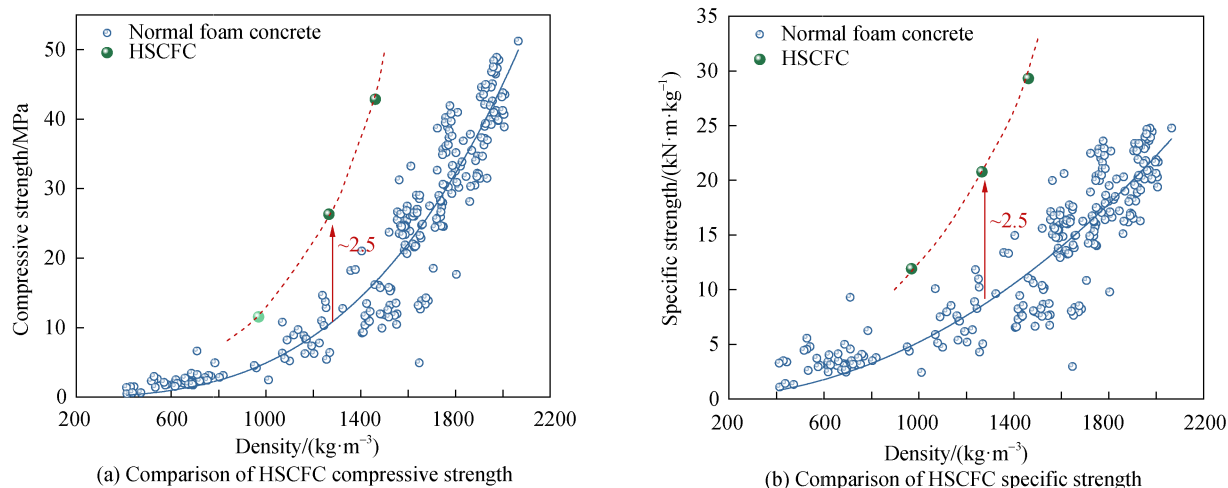


图6 HSCFC 的力学性能的比较

Fig. 6 Comparison of HSCFC mechanical properties

2.4 孔结构

泡沫混凝土基体内部的孔隙结构与材料的力学和耐久性能密切相关^[34]。从图 7a 的 XCT 结果可以看出, HSCFC 基体中随机分布有大量孔隙。从二维图可以发现, 随着 CO₂ 泡沫体积的增加, 除了孔隙量明显增加外, 其孔径尺寸有明显增大趋势且孔隙结构越加复杂。

图 7b~图 7c 为 HSCFC 的孔径分布和孔隙率的定量分析结果。首先, CO₂ 泡沫量的增加使得孔隙率显著增大。同时, 随着 CO₂ 泡沫体积的增加, 孔径分布的峰值从 162.8 μm 逐渐增大到 1105.6 μm , 意味着高 CO₂ 泡沫用量会导致体系内的泡孔粗化。这是由于高泡沫用量会增大泡沫的排液与聚并趋势。因此, 需要根据工程需要合理控制泡沫用量, 以实现轻质与高强的有效平衡。图 7d~图 7f 为 HSCFC 孔结构的均匀性、分形维数和球形度。从图 7d 可以发现, 随着 CO₂ 泡沫量的增加, HSCFC 样品在不同 XCT 切片的二维孔隙度波动程度逐渐增大, 对应孔隙波动标准差从 0.14% 增加到了 1.54%。图 7e 为 HSCFC 样品的 3D 分形维数。通常, 混凝土材料孔结构的 3D 分形维数一般在 2~3 之间, 数值越高, 意味着表面越粗糙, 孔隙结构或形状越复杂^[35]。可以发现, CO₂ 泡沫量的增加使得 HSCFC 的分形维数越来越高, 这意味着孔隙结构越来越复杂。这是因为: 1) 泡沫失稳聚并孔结构更加复杂; 2) CO₂ 泡沫的内碳化作用在孔壁上形成了 CaCO₃, 使得孔表面更加复杂和粗糙 (见 2.5 节)。此外, 如图 7f 所示, CO₂ 泡沫量的增加使得 HSCFC 的平均球形度从 0.887 降低到 0.799。研究表明, 更高的球形度有利于应力分布更均匀, 从而提高混凝土的整

体强度^[36]。总体而言, 增加 CO₂ 泡沫用量对泡孔结构有一定的劣化, 因此有待进一步研究与优化高泡沫用量条件下 HSCFC 的孔结构。

2.5 微观特性

图 8 为制备的 HSCFC 的物相分析结果。从 XRD 谱可以发现, CO₂ 泡沫的加入并不会改变水泥水化产物类型, 但是对物相的含量有所影响。具体地, CO₂ 泡沫降低了 Ca(OH)₂ 特征峰的强度, 暗示 CO₂ 泡沫的加入消耗了 Ca(OH)₂ 并生成 CaCO₃。进一步地, 采用 TG 技术对水化产物进行了半定量分析, 结果如图 8b 所示。首先, 可以发现, 使用 CO₂ 泡沫增加了 C-S-H 凝胶和钙矾石的峰面积, 说明 CO₂ 泡沫的使用促进了基体的水化。但是可以发现, 相比于对照组(C0), C6 组的 Ca(OH)₂ 的面积有所下降, 表明 CO₂ 泡沫的引入消耗了体系内的 Ca(OH)₂, 这与 XRD 谱的结果一致。采用切线法定量分析 CaCO₃ 的含量^[37]。计算结果表明, C6 组的 CaCO₃ 含量相比于对照组 (C0) 增加约 0.3%, 含量提升百分比为 43.5%, 这证明了 CO₂ 泡沫的掺入会导致 HSCFC 基体内部发生碳化反应。因此, 合理地使用 CO₂ 泡沫可以提升水泥水化程度且产生内碳化效应, 这一定程度上有利于材料的性能发展。

采用 SEM 进一步观察了 HSCFC 内部泡孔的微观结构, 结果如图 8c 所示。可以发现, 未纳入 CO₂ 泡沫的水泥基体内部的孔结构呈现光滑表面, 而引入 CO₂ 泡沫导致孔壁上形成了大量的 CaCO₃, 使得泡孔更加粗糙。生成的 CaCO₃ 可以增强泡沫壁, 这是因为可以提供类似于“拱桥”的增强效益。因此, 该结果证明了使用 CO₂ 泡沫可以在水泥基产生内碳化现象, 并由此优化 HSCFC 的宏观性能。

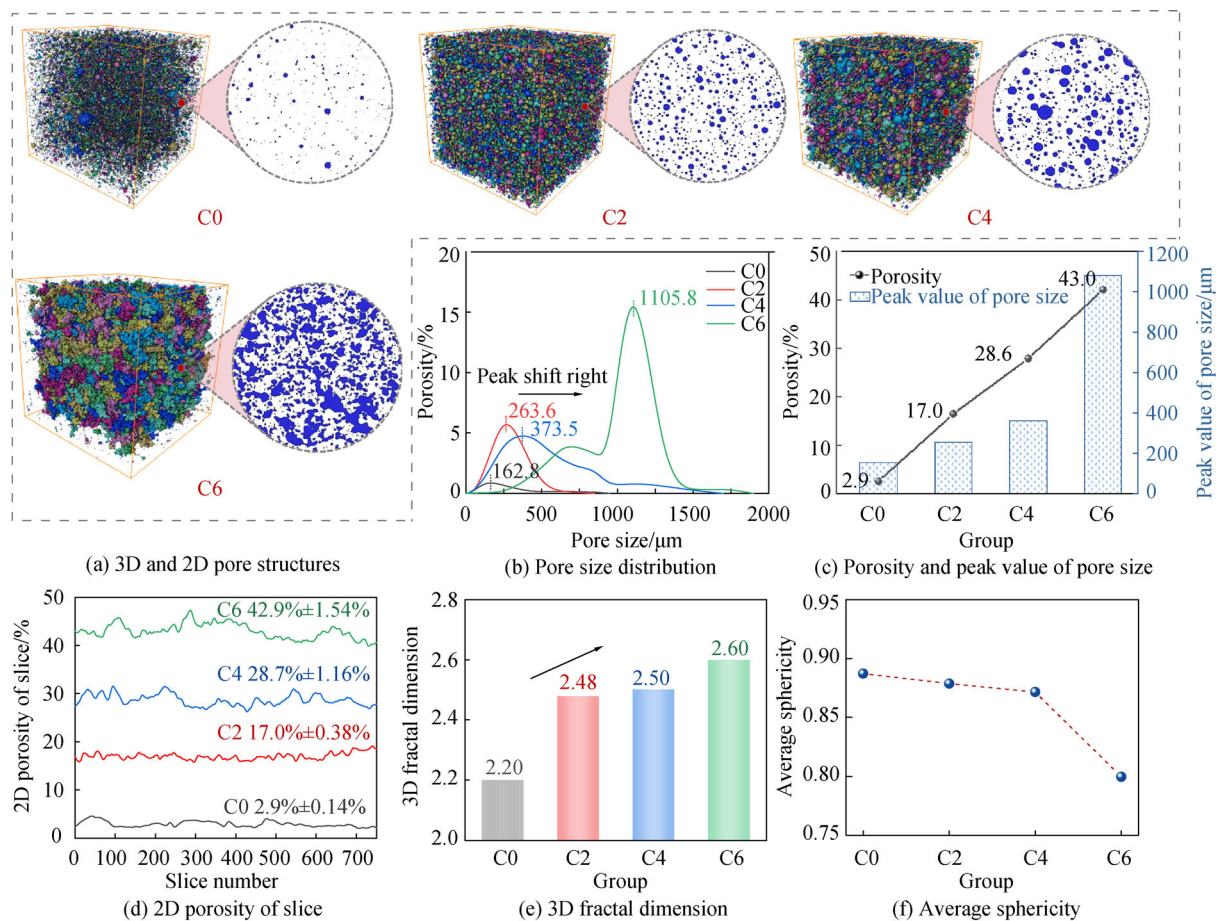


图 7 XCT 扫描孔结构

Fig. 7 Pore structures by XCT

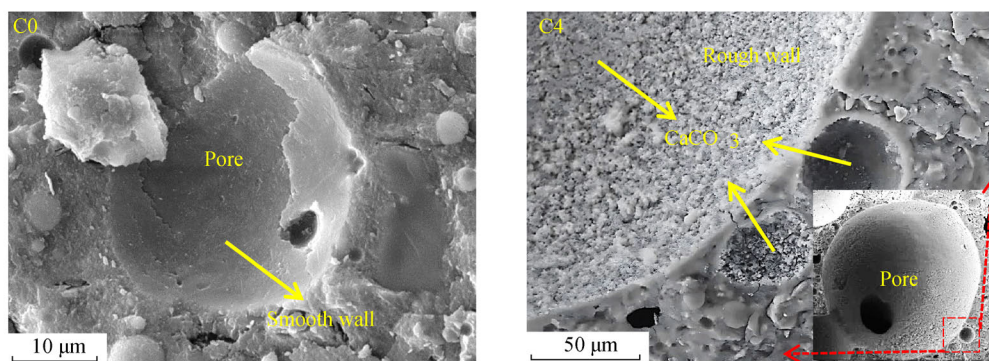
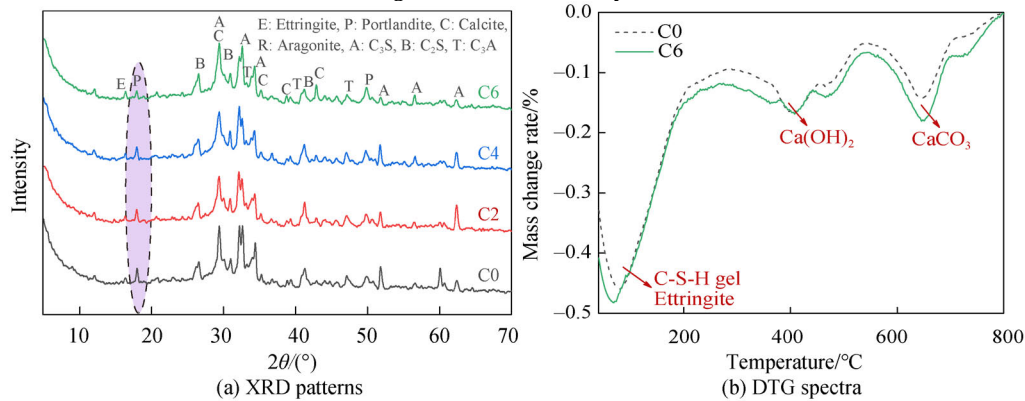


图 8 HSCFC 的物相分析

Fig. 8 Phase analysis of HSCFC

图 9 为 HSCFC 的 ^{29}Si NMR 的分析结果。图 9a 中有 5 个特征峰 (Q^0 、 Q^1 、 Q^2 、 Q^3 和 Q^4 ，其中 Q^3 峰不明显) [38]。定量分析结果表明 (图 9b~图 9c)，随着 CO_2 泡沫含量的增加， C_2S 和 C_3S 的峰(Q^0)面积有所下降，从 36%下降至约 30%，C-S-H 凝胶峰比例 ($Q^1+Q^2+Q^3$) 则有所增加。图 9c 的结果表明，增加 CO_2 泡沫用量可以使得水泥水化程度从 39.80%提高到 50.33%，提升了约 26.5%，但是 CO_2

泡沫量的增加对 C-S-H 凝胶的平均链长影响不明显。这些结果证明了使用 CO_2 泡沫可以促进水泥水化并由此提升水泥使用效率。这是因为：1) 拌入的 CO_2 水性泡沫的液膜会额外引入水分，使得体系内的实际水胶比有所增加，而对于低水胶比体系而言，适当增大水胶比可以提升水化程度[27]；2) CO_2 的内碳化效应消耗了体系内生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 从而促进了水化反应[39]。

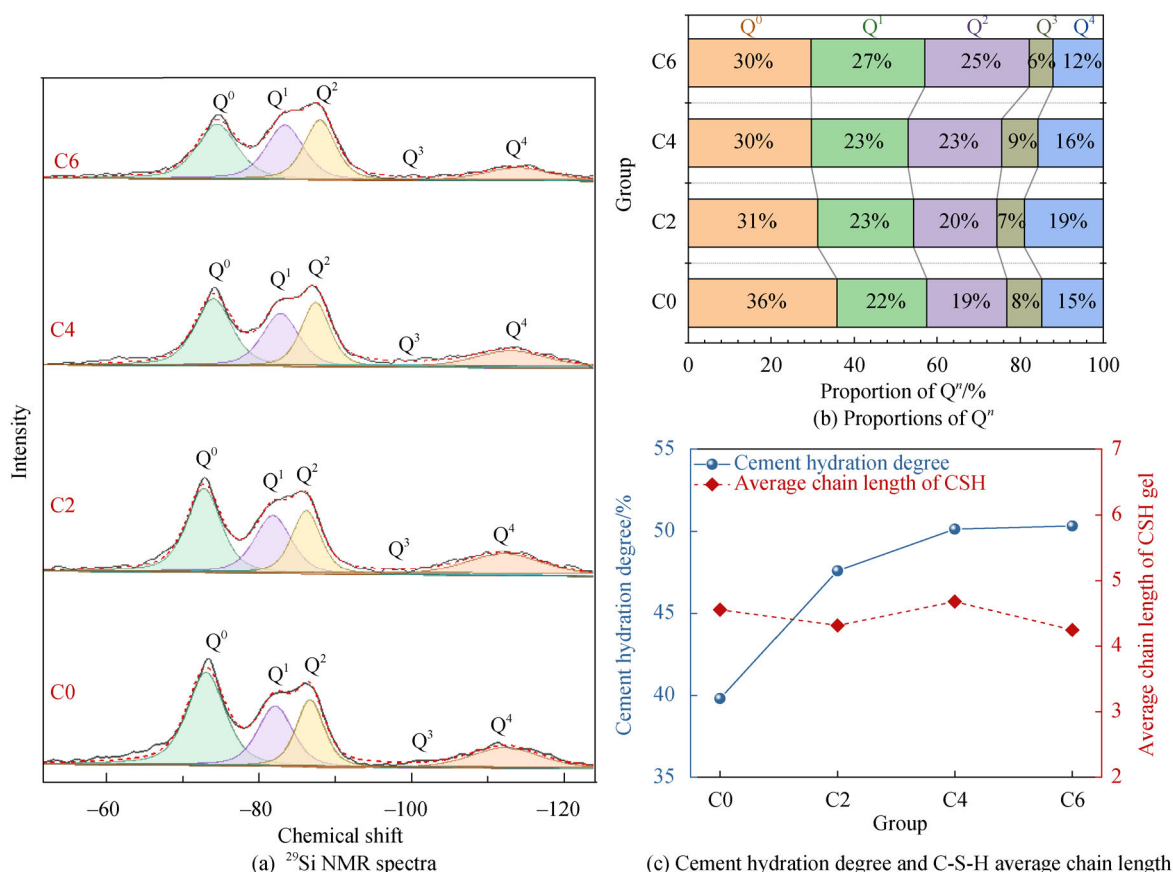


图 9 HSCFC 的 ^{29}Si NMR 分析结果

Fig. 9 ^{29}Si NMR results of HSCFC

2.6 高强 CO_2 泡沫混凝土的设计理念与降碳策略

泡沫混凝土以其轻质、节能、高固碳能力和优异的隔热、隔声等功能特性在现代建筑中得到了越来越多的关注与应用。然而，多孔体系同样使得泡沫混凝土存在强度不足的固有缺陷[3]。因此，本工作通过将 CO_2 泡沫引入高强浆体中，设计了一种新型的高强 CO_2 泡沫混凝土(HSCFC)。为了保证 HSCFC 的优异性能，提出了 2 个核心制备策略 (见图 10a~图 10b)：

1) 设计致密的高强浆体：致密的浆体有利于制备高强与高耐久的混凝土材料[27]。采用了颗粒堆积模型优化胶凝材料的配比，由此制备致密且高强的

水泥浆体。同时，使用硅灰和粉煤灰作为辅助胶凝材料，可提升浆体致密性[40]。另外，采用的低水胶比也有利于体系的致密化与高强度[27]。因此，制备 HSCFC 具有比普通混凝土更高的微观硬度(约 70~100 HV)，从而保证了其优异的宏观力学性能。

2) 设计并采用优异的 CO_2 泡沫：首先，采用纳米材料提升 CO_2 泡沫的稳定性，并将其纳入高强水泥浆体中，从而制备高强泡沫混凝土。适当控制 CO_2 泡沫用量有利于提升体系内孔结构均匀性。此外，泡沫中的 CO_2 可以与水化产物反应，并在孔壁上生成额外的 CaCO_3 ，实现了碳捕捉与基体增强的双重效益。因此，合理利用 CO_2 泡沫可以进一步提升

HSCFC 性能。

开发的 CO_2 泡沫和高强 CO_2 泡沫混凝土具有显著的减碳效应和应用前景, 如图 10c 所示。首先, 提出了直接捕集工业废气生产 CO_2 泡沫, 然后用于制备泡沫混凝土预制构件的应用策略。该工艺减少了废气提纯和运输的需求, 以经济高效的方式实现废弃 CO_2 的主动捕捉和再利用, 从而实现了主动降

碳。同时, 开发的 HSCFC 表现出低导热性 (如图 10c), 即具有优异的保温隔热性能, 在服役过程可以有效降低建筑能耗 (例如空调能耗), 从而实现被动降碳 (隐性降碳)。由于开发的材料从制备到应用均有节能减排效应, 后续有必要计算其固碳量并采用生命周期评估技术进一步计算其碳排放强度。

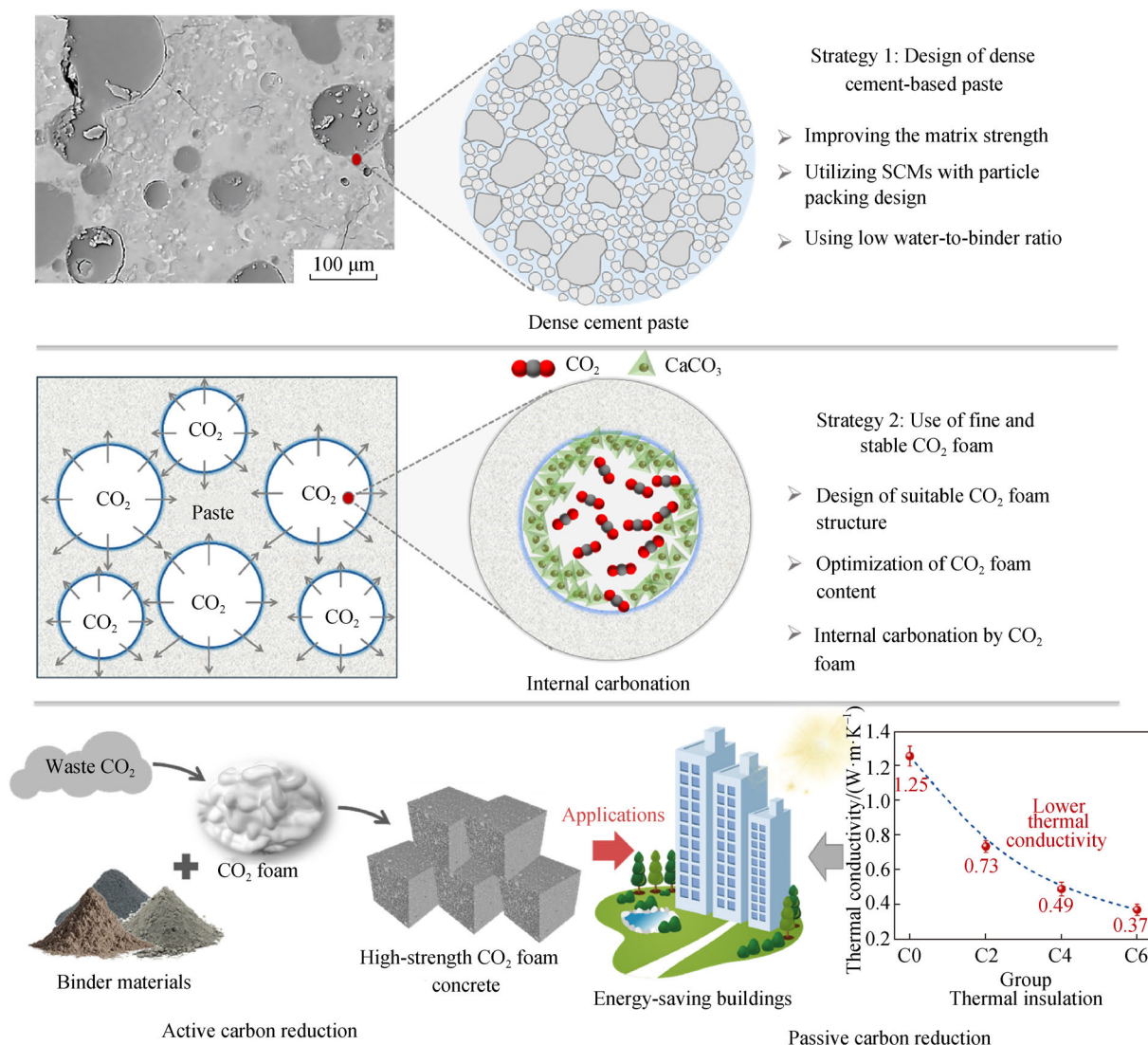


图 10 高强 CO_2 泡沫混凝土的设计理念和主动与被动协同降碳应用策略

Fig. 10 Design concept and strategies of HSCFC and the synergy of active and passive carbon reduction

3 结论

1) 提出了高强 CO_2 泡沫混凝土(HSCFC)的设计理念与制备方法, 即将设计的 CO_2 泡沫纳入基于颗粒紧密堆积理论设计的高强浆体中。设计的 HSCFC 具有低密度、高抗压强度(约为相似密度下普通泡沫混凝土的 2 倍)以及高显微硬度。

2) 采用双亲纳米二氧化硅改性的 SDS 型发泡

剂可以制备 CO_2 泡沫。由于泡沫排液、聚并以及气体扩散的作用下, 泡沫会逐渐消泡且泡孔尺寸会逐渐增大。

3) 过量加入 CO_2 泡沫会导致 HSCFC 泡孔结构有所劣化, 包括增大孔径, 降低均匀性, 增加分形维数以及降低泡孔球形度。

4) 使用 CO_2 泡沫可以提升水泥水化程度, 由此提升水泥使用效率。同时, CO_2 泡沫的使用可以产

生内碳化效应，从而在泡孔上原位生成 CaCO_3 ，有利于泡孔增强。

5) 提出了直接利用工厂废气制备 CO_2 泡沫与 CO_2 泡沫混凝土的主动降碳策略。并且由于制备的 HSCFC 具有低导热系数，在建筑节能减排和被动降碳方面具有明显效益。

参考文献:

- [1] ZHANG Z Y, WANG B. Research on the life-cycle CO_2 emission of China's construction sector[J]. *Energy Build*, 2016, 112: 244–255.
- [2] 宋强, 邹颖杰, 张鹏, 等. 泡沫混凝土气泡性能与基体材料研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(2): 706–724.
SONG Qiang, ZOU Yingjie, ZHANG Peng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2024, 52(2): 706–724.
- [3] 宋强, 张鹏, 鲍玖文, 等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 398–410.
SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiwen, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(2): 398–410.
- [4] LIU Y L, LI C F, ZHAI H X, et al. Production and performance of CO_2 modified foam concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 389: 131671.
- [5] ZHANG Z H, PROVIS J L, REID A, et al. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 56: 113–127.
- [6] 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 等. CO_2 泡沫混凝土碳封存潜力分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5308–5315.
ZHANG Yuan, TA Xupeng, QIN Shubing, et al. *Environ Sci*, 2023, 44(9): 5308–5315.
- [7] ZHANG X, LIU S Y, WU K, et al. Experimental investigation into the self-carbonation mechanism of magnesium oxide carbon sequestration foamed concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 148: 105486.
- [8] JIANG L B, WANG Z, WANG Y, et al. Preparation and properties of carbon dioxide foamed concrete using nanoparticles as foam stabilizer and pre-carbonated cement slurry[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 151: 105585.
- [9] TA X P, ZHANG Y, WAN Z J, et al. Study on preparation and performance of CO_2 foamed concrete for heat insulation and carbon storage[J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2725.
- [10] 丰土根, 厉治平, 张箭, 等. 基于二氧化碳泡沫水泥浆的淤泥固化研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(12): 2538–2547.
FENG Shigen, Li Zhiping, Zhang Jian, etc. *Chin J Geotech Eng* 2024, 46(12): 2538–2547.
- [11] TA X P, WAN Z J, ZHANG Y, et al. Effect of carbonation and foam content on CO_2 foamed concrete behavior[J]. *J Mater Res Technol*, 2023, 23: 6014–6022.
- [12] ZHANG C P, FAN D Q, LU J X, et al. Ultra-stable foam enabled by nano silica engineering for foam concrete improvement[J]. *Cem Concr Compos*, 2024, 150: 105575.
- [13] SHEN P L, LU J X, ZHANG Y Y, et al. Preparation aragonite whisker-rich materials by wet carbonation of cement: Towards yielding micro-fiber reinforced cement and sequestering CO_2 [J]. *Cem Concr Res*, 2022, 159: 106891.
- [14] STEVENSON P. *Foam engineering: fundamentals and applications*[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [15] 余睿, 范定强, 水中和, 等. 基于颗粒最紧密堆积理论的超高性能混凝土配合比设计[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(8): 1145–1154.
YU Rui, FAN Dingqiang, SHUI Zhonghe, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(8): 1145–1154.
- [16] 余睿, 范定强, 孙美娟, 等. 钢纤维掺量及其 3D 空间结构对超高性能混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2313–2321.
YU Rui, FAN Dingqiang, SUN Meijuan, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(11): 2313–2321.
- [17] 中国建筑材料联合会. JC/T 2199—2013 泡沫混凝土用泡沫剂[S]. 北京: 建材工业出版社, 2013.
- [18] 王圣杰, 李兵, 李传习, 等. 超高性能混凝土流动性与流变性关系[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(8): 1962–1970.
WANG Shengjie, LI Bing, LI Chuanxi, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(8): 1962–1970.
- [19] TRAN N P, NGUYEN T N, NGO T D, et al. Strategic progress in foam stabilisation towards high-performance foam concrete for building sustainability: A state-of-the-art review[J]. *J Clean Prod*, 2022, 375: 133939.
- [20] ZHANG J, YANG H, ZHANG S W, et al. Potential utilization of CO_2 foams in developing lightweight building materials[J]. *J Build Eng*, 2023, 76: 107342.
- [21] HOU L, LI J, LU Z Y, et al. Influence of foaming agent on cement and foam concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 280: 122399.
- [22] EXEROWA D, CHURAEV N V, KOLAROV T, et al. Foam and wetting films: Electrostatic and steric stabilization[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2003, 104: 1–24.
- [23] CAO M L, XU L, ZHANG C. Rheology, fiber distribution and mechanical properties of calcium carbonate (CaCO_3) whisker reinforced cement mortar[J]. *Compos Part A Appl Sci Manuf*, 2016, 90: 662–669.
- [24] CHEN Y. Experimental study on application performance of foamed concrete prepared based on a colloidal Nano SiO_2 -stabilized foam[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 409: 134012.
- [25] KUNHANANDAN NAMBIAR E K, RAMAMURTHY K. Air-void characterisation of foam concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2007, 37(2): 221–230.
- [26] ZHANG S L, QI X Q, GUO S Y, et al. A systematic research on foamed concrete: The effects of foam content, fly ash, slag, silica fume and water-to-binder ratio[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 339: 127683.
- [27] FAN D Q, LU J X, LIU K N, et al. Multi-scale design of ultra-high performance concrete (UHPC) composites with centropiasm theory[J]. *Compos Part B Eng*, 2024, 281: 111562.
- [28] LI L, XUAN D X, CHU S H, et al. Efficiency and mechanism of nano-silica pre-spraying treatment in performance enhancement of recycled aggregate concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 301: 124093.
- [29] LU J X, SHEN P L, SUN Y J, et al. Strategy for preventing explosive spalling and enhancing material efficiency of lightweight ultra high-performance concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 158: 106842.
- [30] ASADZADEH S, KHOSHBYAN S. Multi-objective optimization of influential factors on production process of foamed concrete using Box-Behnken approach[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 170: 101–110.
- [31] KIANI B, GANDOMI A H, SAJEDI S, et al. New formulation of compressive strength of preformed-foam cellular concrete: An evolutionary approach[J]. *J Mater Civ Eng*, 2016, 28(10): 4016092.
- [32] NAMSONE E, ŠAHMENKO G, KORJAKINS A. Durability properties of high performance foamed concrete[J]. *Procedia Eng*, 2017, 172: 760–767.
- [33] SALAMI B A, IQBAL M, ABDULRAHEEM A, et al. Estimating compressive strength of lightweight foamed concrete using neural,

- genetic and ensemble machine learning approaches[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 133: 104721.
- [34] 张亚梅, 孙超, 王申, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的性能和孔结构[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(8): 54–63.
ZHANG Yamei, SUN Chao, WANG Shen, et al. *J Chongqing Univ*, 2020, 43(8): 54–63.
- [35] LAN X L, ZENG X H, ZHU H S, et al. Experimental investigation on fractal characteristics of pores in air-entrained concrete at low atmospheric pressure[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 130: 104509.
- [36] CHEN Y N, ZHANG Y M, XIE Y D, et al. Unraveling pore structure alternations in 3D-printed geopolymers concrete and corresponding impacts on macro-properties[J]. *Addit Manuf*, 2022, 59: 103137.
- [37] SCRIVENER K, SNELLINGS R, LOTHENBACH B, et al. A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials[M]. *Crc Press Boca Raton, FL, USA*, 2016.
- [38] 王可, 张英华, 李雨晴, 等. 固体核磁共振技术在水泥基材料研究中的应用[J]. *波谱学杂志*, 2020, 37(1): 40–51.
WANG Ke, ZHANG Yinghua, LI Yuqing, et al. *Chin J Magn Reson*, 2020, 37(1): 40–51.
- [39] LU B, DRISSI S, LIU J H, et al. Effect of temperature on CO₂ curing, compressive strength and microstructure of cement paste[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 157: 106827.
- [40] 王倩楠, 顾春平, 孙伟. 水泥-粉煤灰-硅灰基超高性能混凝土水化过程微观结构的演变规律[J]. *材料导报*, 2017, 31(23): 85–89.
WANG Qiannan, GU Chunping, SUN Wei. *Mater Rep*, 2017, 31(23): 85–89.

High-Strength Carbon Dioxide Foam Concrete: Design, Preparation and Characteristics

FAN Dingqiang, LU Jianxin, LIU Kangning, POON Chisun

(Department of Civil and Environmental Engineering & Research Centre for Resources Engineering Towards Carbon Neutrality (RCRE), The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong 999077, China)

Extended Abstract

Introduction Large amounts of CO₂ emissions have caused escalating challenges of global warming risk. The construction industry significantly contributes to global CO₂ emissions, prompting the need for sustainable building materials. Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies provide a promising solution by reducing emissions and integrating carbon storage capabilities into materials. To this end, foam concrete, a lightweight porous material (normally 500–1600 kg/m³), has gained increasing attention for its significant advantages in energy-efficient and low emission buildings. Traditional foam concrete is lightweight with good insulation properties but has low strength and limited environmental benefits. In contrast, CO₂ foam concrete offers the potential of reducing emissions during production and CO₂ sequestration, making it a more environmentally friendly alternative.

The objective of this research was to develop a high-strength CO₂ foam concrete (HSCFC) that incorporates carbon capture and storage (CCS). By enhancing foam stability and optimizing the concrete mixture, this study firstly developed a new HSCFC product with assessing the CO₂ sequestration efficiency and micro/macro performance of the developed material, thereby verifying its potential as both a sustainable building material and a solution for carbon reduction.

Methods The design concept of HSCFC was based on integration of a CO₂ foam precursor into a high-strength cement-based paste, utilizing particle packing theory to optimize strength and density. The CO₂ foam was produced using an amphiphilic nano-silica modified sodium dodecyl sulfate foaming agent, enhancing the stability of the foam and preventing collapse of foam concrete. The HSCFC was prepared by mixing the CO₂ foam with a high-strength cement slurry, followed by curing and a series of micro and macro testing to evaluate HSCFC performance, including compressive strength, concrete density, pore structure and microstructures.

Results and discussion 1) The CO₂ foam exhibited a well-distributed pore size of 50–100 μm, which grew over time due to natural drainage and coalescence processes. The stability of the foam was attributed to the surfactant and nanoparticle interactions, which prevent CO₂ diffusion and enhance liquid film strength. The overall performance of CO₂ foam met the requirements of the Chinese standard for the concrete foam, which thus could be used to fabricate the foam concrete products. 2) The rheological behavior of HSCFC followed the Bingham model, with an increase in yield stress as CO₂ foam volume increases, up to 110% compared to the control group. However, excessive foam content led to a reduction in yield stress due to the weakening of the matrix from enlarged pores. The plastic viscosity was inversely proportional to foam content, enhancing workability by reducing internal friction. 3) The increase in CO₂ foam content led to the decrease in compressive strength of HSCFC. The compressive strength of HSCFC was found to be significantly higher than conventional foamed concretes, which is more than double that of typical foam concretes of similar density. Microhardness tests revealed values above 90 HV, close to ultra-high-performance concrete, despite the presence of foam. 4) X-ray computed tomography (XCT) analyses indicated that the pore structure of HSCFC became more complex as foam content increased, with the peak value of the pore size enlarging from 162.8 μm to over 1100 μm. This indicated the importance of balancing the compressive strength and density for the HSCFC. Additionally, using CO₂ foam improved the cement hydration degree and led to the *in-situ* growth of calcium carbonate (CaCO₃) on pore walls, enhancing pore wall strength. However, excessive foam amounts resulted in non-uniform pore distribution, leading to reduced material strength. 5) The thermal conductivity of HSCFC was lower than conventional concretes due to its porous structures. This property made the material suitable for energy-efficient buildings, where insulation is critical for reducing energy consumption. Therefore, the use of CO₂ foam could realize the synergy of active and passive

carbon reductions by carbon mineralization and decreasing energy uses respectively.

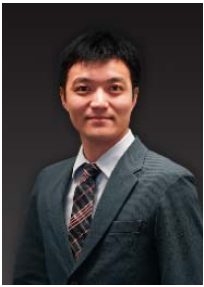
Conclusion This research demonstrated the successful design and development of a high-strength CO₂ foam concrete system with superior mechanical properties, enhanced carbonation, and thermal insulation capabilities. The use of CO₂ foam not only provided an effective CCUS solution but also significantly improved the performance. The synergistic effects of foam stability, internal carbonation, and matrix densification showed a promising pathway for the sustainable development of carbon-neutral building materials. Future research could focus on improving the overall performance of HSCFC and investigating its long-term service values. This material presents a novel approach for CO₂ capture and utilization, alongside advancements in foam concrete technology. The developed materials can be further optimized to improve carbon sequestration efficiency, facilitating their use in innovative structures like energy-efficient and floating buildings.

Keywords carbon dioxide foam; foam concrete; carbon capture; pore structure; internal carbonation

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



范定强，香港理工大学土木及环境工程学系在读博士生，师从潘智生教授及陆建鑫教授。主要研究方向为高性能水泥基复合材料、多功能建筑材料以及碳捕捉技术等。在领域权威期刊如 *Cem Concr Res*、*Cem Concr Compos*、*Compos Part B*、《硅酸盐学报》等发表论文 30 余篇（一作 16 篇），申请授权专利/软著 3 项。受邀担任 *Prog Mater Sci*、*Renew Sustain Energy Rev*、*Cem Concr Compos* 等 20 余个国际 SCI 期刊审稿人。获中国混凝土与水泥制品协会混凝土科学技术二等奖，第二届全国生态混凝土创新设计应用大赛二等奖，《硅酸盐学报》高影响力论文奖和中国复合材料学会卓越硕士论文奖。



陆建鑫，现任香港理工大学土木及环境工程系助理教授(研究)、博士生导师，博士毕业于香港理工大学，入选全球 2% 顶尖科学家榜单。长期聚焦低碳轻质高强混凝土的研究，也在固体废弃物资源化方向开展前沿性和创新性的探索研究。主持国家自然科学基金、香港建造业研发基金、国家钢结构研究中心基金、香港绿色技术基金和碳中和基金等项目。学术成果在建筑材料领域国际权威期刊 *Cem Concr Res*、*Cem Concr Compos*、*Compos Part B* 等发表，已累计发表 SCI 论文 100 余篇，H 因子 41，论文总引用 4000 余次，申请和授权发明专利 10 项，参编 Elsevier 混凝土材料方向的著作 2 部，研究成果已在香港模块化建筑和路面基础设施中推广应用，获得香港绿色创新大奖银奖、香港低碳混凝土大赛银奖和香港环保建筑优异奖。