第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20250580

综 合 评 述

从生物矿化到碳矿化：仿生材料制备新策略

陈靖泽[1,2]，徐信刚[1,2]，刘志超[1,2]，杨 露[2]，胡曙光[2]，王发洲[2]

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070；2. 武汉理工大学，硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室，武汉 430070)

摘 要：自然界历经数十亿年的自然选择，孕育出具备精妙微观结构、优异力学性能与独特功能特性的生物材料，其温和的制备过程和极高的资源利用效率，为人造材料的发展提供了重要借鉴。然而，当前关于仿生材料的研究存在性能与能耗之间的矛盾，呈现出“性能优先”与“工艺滞后”的失衡局面。而碳矿化材料作为一种将气态 CO_2 矿化转化为固态碳酸钙的新型无机非金属复合材料，具有反应条件温和、高强高耐久、组成结构可调控等优势，又称为可设计的人造石材，即 Engineered LimeStone (ELS)，成为仿生材料绿色制备的理想载体。本文总结了仿生材料制备的最新研究进展，综合分析了性能、能耗、效率等指标，并对仿生材料的未来发展趋势进行展望，提出了基于碳矿化体系的仿生材料制备策略。

关键词：生物矿化；仿生材料；碳矿化材料；高强高韧
中图分类号：TQ172　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0381–16
网络出版时间：2026–01–21

在自然界中，生物系统经过数十亿年的自然选择，形成了令人惊叹的微观结构、出色的机械性能以及各种奇妙的功能特性，使其具备了可以适应各种环境特征的特殊功能[1]。从深海硅藻精密的多孔骨架到蜘蛛丝的强度–延展性平衡，从螳螂虾的抗冲击双齿棍到具有自修复特性的骨骼[2]，从珍珠层的超高断裂韧性到壁虎脚的粘附能力[3]，生命体通过有限的元素(如碳、钙、硅)和温和的条件(常温常压、水基环境)，构建出超越人工材料结构与功能的复合体[4]。这种自然制造的智慧不仅体现在最终的材料性能上，更反映在资源利用的高效性与制备过程的可持续性之中。

当前生物启发材料的研究存在显著的路径分歧，如图 1 所示。一方面，追求性能最大化的仿生设计通过复制天然生物结构，已成功开发出抗冲击装甲、轻质航空陶瓷等高端材料；另一方面，试图模仿生物矿化过程的绿色制备技术，却在工程转化中遭遇性能、效率与成本的瓶颈。这种性能提升与能源消耗的失衡，暴露出当前材料工程领域的关键矛盾，即如何在保持仿生材料性能优势的同时，实现制备工艺的可持续发展。

天然生物矿化过程为解决这一问题提供了关键启示。生命体通过精准调控溶液化学环境、有机模板分子和结晶动力学，在温和条件下即可生成复杂的多级结构。本文聚焦于生物启发式制造工艺在仿生陶瓷复合材料领域的应用潜力与现存挑战，对仿生陶瓷复合材料的制备工艺进行探讨，将结构设计与制备工艺优化相结合，综合分析性能、能耗、效率等指标，并对仿生材料的未来发展趋势进行展望，期望为开发兼具高性能与可持续性的新一代仿生材料提供指导，推动仿生复合材料的工业化应用。

1 典型天然生物矿物

生物材料所展现出的卓越性能组合源于生命系统在进化过程中形成的精妙的调控体系。通过多层级协同作用，跨越分子、纳米与宏观尺度，实现对材料组成、结构与形态的精确控制[5]。其独特优势在于分子层面的精准识别、纳米尺度的有序自组装、宏观结构的拓扑优化之间的有机协同。这种跨尺度

收稿日期：2025–08–05。　修订日期：2025–10–17。
基金项目：国家自然科学基金(52130208)。
第一作者：陈靖泽(1996—)，男，博士。
通信作者：刘志超(1983—)，男，博士，教授；
王发洲(1975—)，男，博士，教授。

Received date: 2025–08–05.　**Revised date:** 2025–10–17.
First author: CHEN Jingze (1996–), male, Ph.D.
E-mail: 907271843@qq.com
Correspondent author: LIU Zhichao (1983–), male, Ph.D., Professor.
WANG Fazhou (1975–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: liuzc9@whut.edu.cn; fzhwang@whut.edu.cn

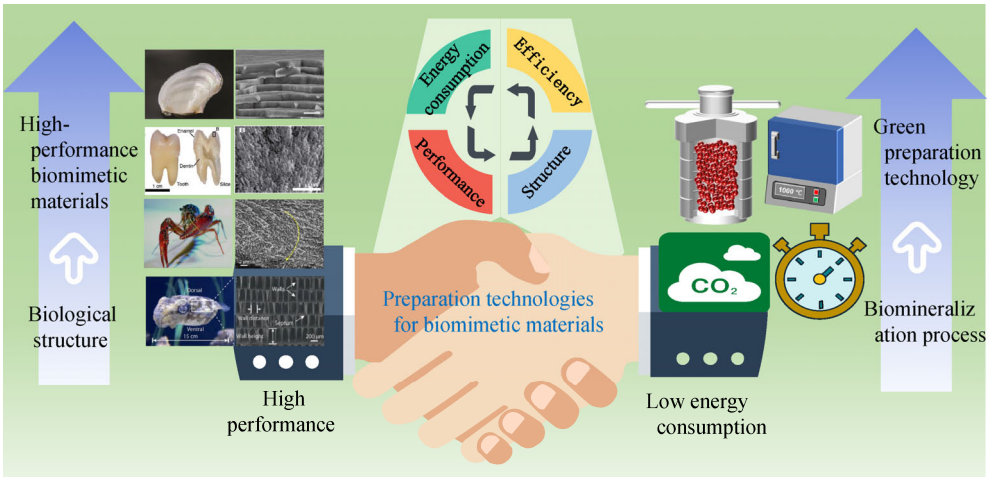


图 1 仿生材料制备策略

Fig. 1 Strategies for the preparation of biomimetic materials

的集成能力，使得骨骼、贝壳等生物材料兼具高强度、高韧性、环境响应性等多重特性。

本文将聚焦于具有超高断裂韧性的珍珠母，通过解析其结构与性能的构效关系，梳理出生物矿化过程中的五大核心调控机制，为发展新一代仿生材料提供理论支撑。

1.1 珍珠层

软体动物的外壳由外向内分为 3 个功能层，最外层的壳质素角质层负责腐蚀防护，中间由方解石晶体构成的棱柱层提供基础硬度，最内层的珍珠层通过有机–无机复合结构实现高强度与高韧性的结合[6]。如图 2 所示，珍珠层由 95%的文石型碳酸钙晶体和 5%的有机基质组成，二者交替排列形成独特的“砖–泥”层状结构[7]，使珍珠层的断裂韧性达到纯碳酸钙单晶的 3000 倍以上[8]。

珍珠层的形成过程体现了生物调控的精密性[9]。贝壳外套膜细胞首先分泌 β-几丁质构成三维多孔支架，随后蚕丝蛋白与酸性蛋白复合形成动态凝胶网络，精确调控 500 nm 的层间距[10]。液态非晶碳酸钙前驱体在静电作用下渗入有机框架，沿水平方向定向结晶为文石晶体。在这种有序的生物矿化组装机制的作用下，最终形成了具有规则梯田状片层特征的有机–无机复合结构[11]。

珍珠层在断裂过程中展现出独特的有机–无机协同耗能机制。从纳米尺度的分子键断裂到微米尺度的结构滑移，再到宏观裂纹控制，这种跨尺度的能量耗散体系使珍珠层即使产生局部损伤，仍能保持整体结构的完整性[12]。

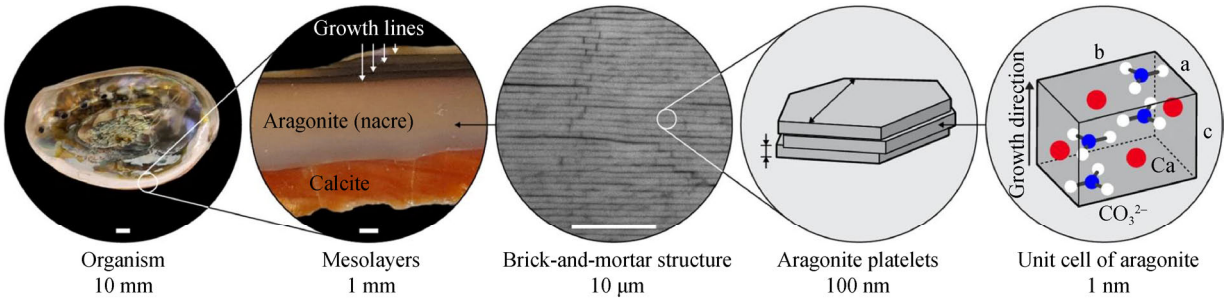


图 2 珍珠层的多级结构[7]

Fig. 2 The multilayered structure of nacre[7]

1.2 多级结构的调控机制

生物材料出色的性能组合源于生命体在生物过程中对材料组分、结构和形貌的精确调控。通过对生物矿物的矿化过程和多级结构特征进行研究，研究人员提出了基于各向异性无机结构单元、较强的有机–无机界面、复杂的微结构排列等关键要素，这是独特的多级结构形成的关键，其核心在于生物系统通过多重机制的协同调控，突破传统晶体生长的热力学限制，在温和条件下实现无机矿物的定向合成与跨尺度组装[5]。具体可归纳为如图 3 所示的 5 种调控机制：

1) 分子识别

生物体利用糖蛋白、转运蛋白等有机基质与无机离子的特异性结合，精确操控矿化进程[13]。例如通过调控溶液过饱和度优化成核位点分布、借助表面电荷匹配引导特定晶面异相成核、利用大分子构象变化诱导晶相转变等。这种分子级别的化学识别为后续结构组装奠定了基础。

2) 限域生长

海洋生物体内的矿化过程发生在硅藻囊泡、贝壳外套膜腔等特定的亚细胞结构中，通过离子和分子的选择性传输实现对晶体生长动力学和晶体形貌的精准调控[4]。这种预定形状的封闭空间可以充当矿物生长的初始模具，通过限域空间的约束作用实现对矿化产物形貌的调控。

3) 有机模板

胶原纤维、几丁质等生物大分子通过表面官能团(如羧基、氨基)与矿物晶格匹配，诱导晶体取向生长。研究发现，珍珠层中文石晶体的(001)晶面与壳基质蛋白的 β 折叠构象存在 0.3 nm 级周期性匹配，这种匹配效应确保晶体沿特定方向有序排列[14]。

4) 非晶前驱体转化

突破传统晶体生长的对称性限制，生物系统常以非晶磷酸钙、无定形碳酸钙等作为结构前驱体。这些各向同性材料更易塑形，通过液–固转变逐步结晶化，最终实现复杂多级结构的构筑[15]。

5) 跨尺度协同组装

生物矿物多级结构的形成往往依赖于不同尺度下的逐级自组装过程，包括纳微观尺度上结构基元(晶粒、纳米线)的定向排列，介观尺度上结构单元(片层、纤维束)的拓扑优化以及宏观尺度上的功能梯度设计，这种独特的多级组装机制赋予了材料优异的力学性能[16]。

研究人员对自然界的生物矿化过程的研究揭示了多尺度协同作用的调控机制，即通过分子识别、空间限域、模板导向、非晶转化以及跨尺度组装等策略，在温和条件下实现了高性能、多功能天然生物材料的合成，其理论模型为材料科学的发展提供了重要启示，为开发新型仿生材料奠定了基础。

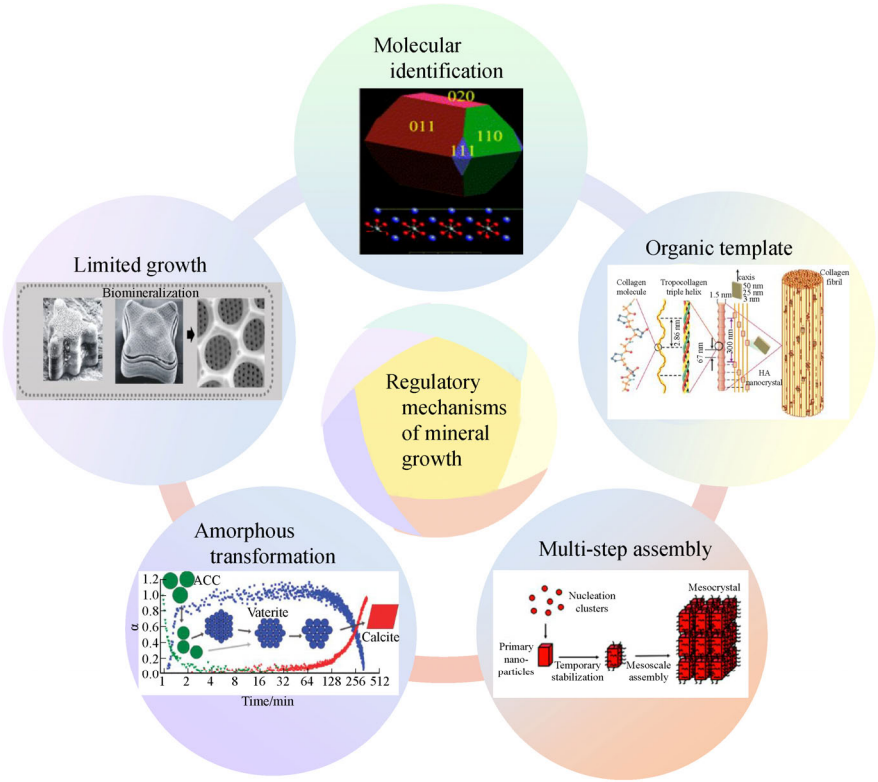


图 3　生物体内矿物生长调控机制[17–19]

Fig. 3　Regulatory mechanisms of mineral growth in biological organisms[17–19]

2　仿生材料制备策略

受到天然生物材料复杂的多级结构以及特有的调控机制的启发，科研人员已经开发出了冷冻铸造、层层自组装、电泳沉积、刮涂旋涂、3D 打印等多种仿生策略。通过多尺度设计，实现了对材料结构与

性能的精准控制，成功制备了机械性能接近甚至超越天然生物材料的仿生复合材料。然而，目前大多数仿生材料的制备仍需要较为苛刻的条件，如高温、高压、复杂的工艺、较长的时间等，这与自然界中温和的生物矿化过程存在显著差异。高温高压的制备条件不仅增加了能耗，也限制了某些活性组分的引入，影响了材料的功能化设计。因此，如何在温和条件下实现对材料结构和性能的精确控制，成为仿生材料研究领域的重要挑战。本部分系统梳理了仿生材料的制备策略，重点剖析其对能源密集型工艺的依赖程度，并评估其在工业化生产与功能设计中的局限性，以推动仿生材料绿色高效制备技术的发展。

2.1 高温常压

陶瓷材料凭借高刚度、耐高温、耐腐蚀等特性[20]，成为模拟生物结构与功能的理想载体。传统陶瓷的脆性缺陷通过仿生跨尺度结构设计得以显著改善，借鉴珍珠层的“砖–泥”层状排列、骨骼的梯度孔隙等生物原型，研究人员成功赋予陶瓷材料能量耗散机制，实现韧性、抗冲击性与功能性的协同提升。例如天然珍珠层的断裂韧性可达纯陶瓷的 3000 倍，而仿生设计通过调控裂纹扩展路径，使人工陶瓷获得类似的强韧化效果。

赵赫威团队采用冷冻铸造技术制备氧化铝–氰酸酯复合材料，通过调控羧甲基纤维素钠浓度构建三维互锁骨架(2 μm 厚的氧化铝层片间由 8 μm 厚的聚合物层填充)，如图 4 所示[21]。经 1600 ℃烧结 4 h 后，材料弯曲强度达 300 MPa，断裂应变提升至 5%。这种三维互锁结构通过裂纹偏转、桥联与层间滑移三重机制耗散能量，为轻质高强韧陶瓷设计开辟新路径。

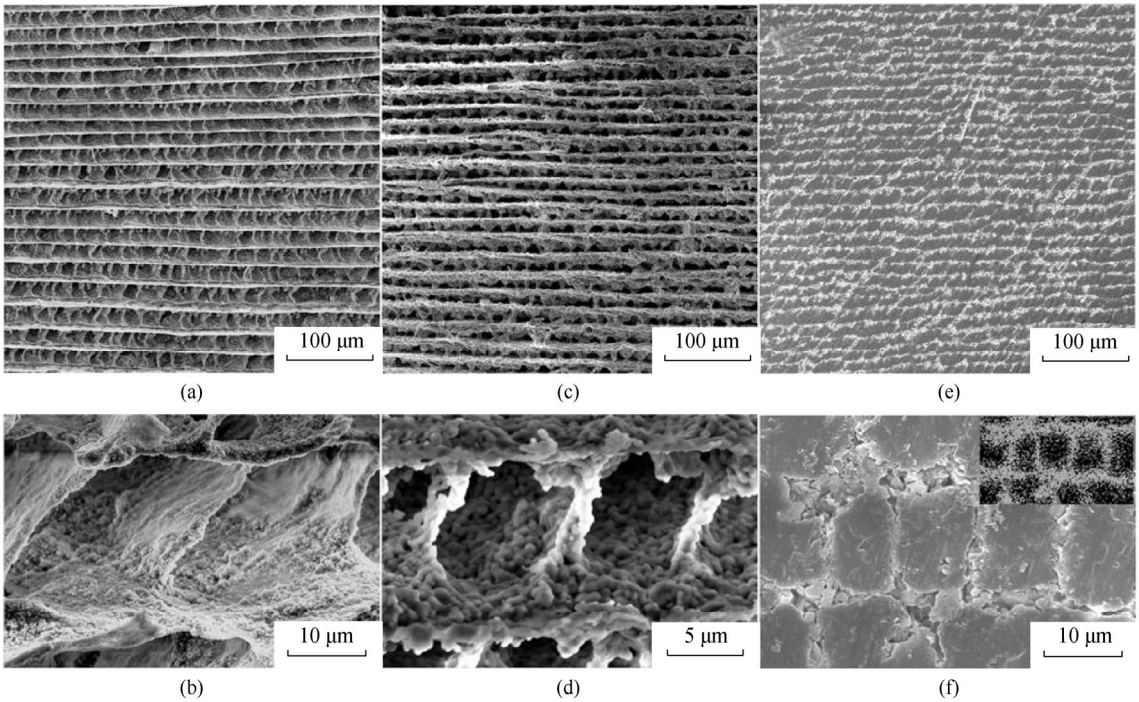


图 4 具有三维互锁骨架的珍珠母状 Al_2O_3/CE 复合材料的微观结构[21]：(a)、(b)分别为由 Al_2O_3 支架和 SCMC 组成的冻干产物的低倍和高倍 SEM 图像；(c)、(d)分别为去除 SCMC 并形成烧结 Al_2O_3 层状支架后的煅烧产物低倍和高倍 SEM 图像；(e)、(f)分别为去除 SCMC 并形成烧结 Al_2O_3 层状支架后的煅烧产物低倍和高倍 SEM 照片

Fig. 4 Microstructure of nacre-like Al_2O_3/CE composite with 3D interlocking skeleton (3D IL): (a), (b) Low-and high-magnification SEM images of freeze-dried products consisting of Al_2O_3 scaffold and SCMC; (c), (d) Low- and high-magnification SEM images of calcination products in which SCMC had been removed and sintered Al_2O_3 lamellar scaffolds formed; (e), (f) Low-and high-magnification SEM images of 3D IL composite prepared by filling the sintered lamellar Al_2O_3 scaffolds with CE

2.2 常温高压

陶瓷材料的致密化过程是保证其较高机械强度的关键，传统高温烧结工艺虽能实现致密化，但会带来较大的能源消耗并限制功能相的引入。受生物矿化与地质成岩过程的启发，基于高压调控的常温致密化技术近年来取得突破性进展，为高性能陶瓷绿色制备开辟了全新路径。在本节我们聚焦高压技术在无定形颗粒融合与纳米粉末冷烧结中的关键作用，揭示其协同作用机制及工程化应用潜力。

Florian Bouville 团队借鉴地质成岩机制，开发

出一种室温高压冷烧结技术[22]。将纳米尺寸的球霰石粉末分散于水介质中，施加 280~800 MPa 压力，仅需 30 min 即可获得相对密度 84%、抗压强度 280 MPa 的陶瓷材料。该技术借助纳米颗粒的高比表面积特性与压力驱动下的溶解蠕变机制的协同作用，将地质作用中以百万年为时间尺度的碳酸盐岩致密化过程压缩至工业制造允许的时间范畴。所得陶瓷材料的比强度与混凝土相当，为低碳陶瓷的制备开辟了新路径。

在此基础上，Mu 等[23]聚焦于无定形碳酸钙(ACC)颗粒的高压融合机制，如图 5 所示，通过精准调控 ACC 内部结构水含量与外部压力，成功实现颗粒的完全融合。当压力超过 1.5 GPa 时，动态水通道在无定形基体中形成网络，促进离子扩散和颗粒界面消除，最终获得透明度达 75%、硬度 2.739 GPa 的连续单块材料。此策略突破了传统烧结的温度限制，所得材料的机械性能接近方解石单晶，为仿生复合材料制备提供了新思路。

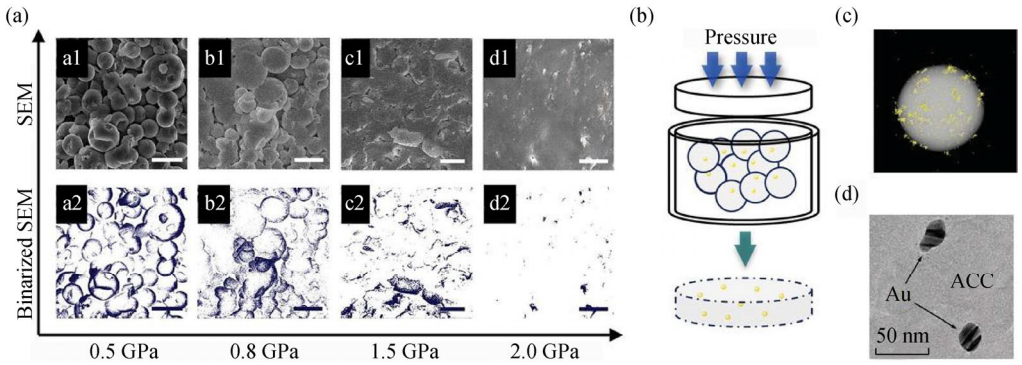


图 5　压力驱动下无定形颗粒的聚集[23]：(a)分别在 0.5、0.8、1.5 GPa 和 2 GPa 压力下压实的 ACC 颗粒的扫描电子显微镜图像；(b) 压力下金纳米粒子标记的 ACC 颗粒聚合示意图；(c) 金纳米粒子标记的 ACC 特性表征；(d) 经金标记的压实 ACC 透射电子显微镜横截面照片

Fig. 5　Coalescence of ACC particles under pressure[23]: (a) SEM images of ACC particles compacted under 0.5, 0.8, 1.5 GPa, and 2 GPa, respectively; (b) Scheme of coalescence of ACC particles labeled with Au nanoparticles under pressure; (c) Characterization of ACC labeled with Au nano particles; (d) Transmission electron microscopy cross-sectional view of compacted ACC labeled with Au

2.3　低温低压

传统仿珍珠层材料制备依赖高温烧结或高压成型工艺，存在能耗高、热敏感成分易失效等瓶颈。近年来，基于生物矿化与自组装原理的低温低压制备策略取得重要进展，成功在相对温和条件下实现仿生结构的可控构筑。

Mao 等[24]受生物基质调控矿化过程启发，开发出“组装–矿化”一体化工艺。制备过程如图 6 所示，首先通过冷冻诱导组装构建层状壳聚糖模板，经乙酰化处理转化为稳定 β-甲壳素骨架。随后在循环矿化系统中利用碳酸氢钙溶液，在常温条件下实现文石片层的原位结晶。最终通过丝素蛋白渗透与热压成型(200 MPa 压力结合 80 ℃高温处理)强化界面结合。该技术完全规避高温烧结，所得材料断裂韧性接近天然珍珠层。但该工艺仍存在流程复杂度高、制备周期长以及尺寸受限等问题，难以满足工业化生产需求。

在此基础上，Gao 等[25]创新提出“蒸发自组装–热压复合成型”策略，将磷酸钙微片与海藻酸钠溶液共混，利用蒸发诱导的毛细作用力驱动微片定向排列，形成二维类珍珠层薄膜。通过壳聚糖喷涂建立层间粘结网络，结合预压–热压(压力 100 MPa，温度 80 ℃)工艺实现三维块体构筑。该技术通过 Ca^{2+}–海藻酸钠的配位键强化有机基质与无机组分的界面相互作用，借助壳聚糖–海藻酸钠的静电作用提升层间结合力。所得材料弯曲强度达 267 MPa，超越天然珍珠层(172 MPa)，并成功实现半米级尺寸制备。相较于传统工艺，该制备策略在保持材料优异力学性能的同时显著提升制备效率，为大规模生产奠定基础。

Wu 等[26]从珍珠母“砖–泥”结构与竹子梯度架构中获灵感，通过自下而上策略[水泥与聚乙烯醇(PVA)混合制备分级碎屑、树脂包覆、150 ℃/100 MPa 热压]制备梯度水泥–树脂复合材料，以水泥碎屑尺寸、树脂质量分数为参数，采用反向传播神经网络(BPNN)与遗传算法(GA)的机器学习模型优化结构，所得材料弯曲强度[(66.1±9.8) MPa]、韧性[(854.2±38.2) kJ/m³]分别较纯水泥提升约 6 倍、

700 倍。这种制备策略创新性地融合了 2 种生物结构的优势并且通过机器学习辅助大幅缩短优化周期，实现了 4 cm 级大尺寸样品的制备，为仿生材料制备提供了新思路。

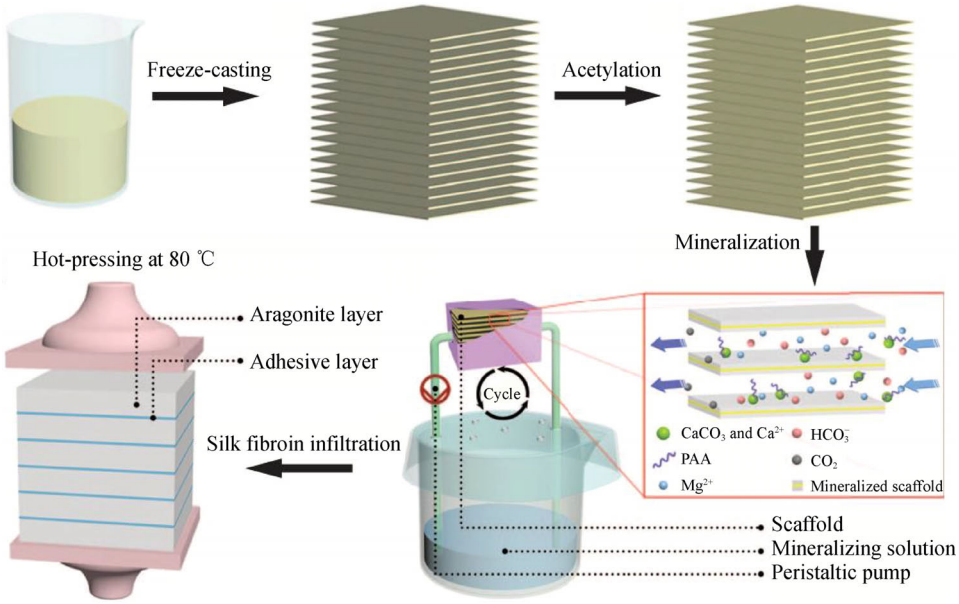


图 6　人造珍珠层的制备过程[24]

Fig. 6　Fabrication scheme of the synthetic nacre[24]

2.4　常温常压

传统仿生材料制备多依赖高温高压的能源密集型工艺，而天然生物材料在温和条件下合成的特性，为开发节能环保的新一代仿生材料指明了方向。具有自硬化特性的水泥基材料以及新型的天然基低碳建材，在常温常压条件下即可实现材料成型与固结，成为承载仿生技术与绿色制造的理想载体。

Wang 等[27]从木材的多孔结构中获取灵感，采用冰模板定向冻结技术开发出具有单向层状孔隙结构的水泥基材料。如图 7 所示，该技术利用双向冷冻过程中冰晶的定向生长特性，使水泥颗粒沿特定方向有序排列，形成孔隙率可在 30%~80%间实现精准调控的多孔材料体系。与传统发泡工艺制备的随机孔隙材料相比，这种仿生多孔水泥在垂直载荷方向展现出显著增强的抗压性能(较同密度发泡水泥提升约 200%)，同时横向热导率低至 0.12 W/(m·K)，兼具优异的隔热与定向渗透功能。值得关注的是，该工艺创新性地利用水泥水化反应的自身硬化特性，省去了传统冰模板技术必需的冷冻干燥步骤，将整体制备周期控制在 28 d 以内。

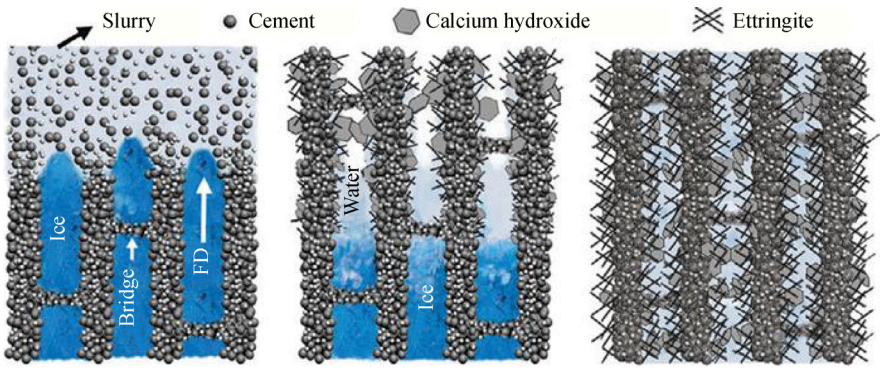


图 7　冰模板法制备仿木材水泥的微观机制示意图[27]

Fig. 7　Schematic diagram of the micro-mechanism for preparing wood-like cement using the ice template method[27]

基于这一突破，Chen 等[28]借鉴珍珠母的“砖–泥”复合结构，将冰模板技术与真空浸渍工艺结合，在水泥基体中引入 PVA 水凝胶柔性相，构建出具有交替层状结构的复合材料，制备过程如图 8 所示。

这种仿生设计使材料韧性提升至 1407 kJ/m^3，较纯水泥基体提升 2 个数量级，部分性能指标甚至超越常规金属材料。

为进一步实现水泥基材料的轻质高强化制备，Du 等[29]借鉴墨鱼骨的“壁–隔片”多孔结构，通过钙铝硅酸盐水合物(C-A-S-H，为水泥主要水化产物)纳米颗粒在 PVA 溶液中的自组装与定向冷冻干燥技术，开发出兼具超高力学性能与超低导热性的仿生水泥气凝胶，旨在解决建筑围护结构“保温–承重–阻燃”难以兼顾的难题。与商用建筑材料相比，该水泥气凝胶展现出多功能集成优势：在力学性能方面，其轴向压缩弹性模量达 315.65 MPa，韧性高达 14.68 MJ/m^3；在保温性能方面，其热导率低至 0.025 W/(m·K)，较商用聚苯乙烯泡沫低 20%~37%；在阻燃性能方面，C-A-S-H 纳米颗粒形成的无机保护层使材料极限氧指数(LOI)达 46.26%。

除了水泥基材料，新型的天然基低碳建材由于原料上的优势，进一步降低了制备过程中的碳排放。Xu 等[30]受沙塔蠕虫巢穴构筑机制启发，采用阳离子季铵化壳聚糖与阴离子海藻酸钠作为复配粘合剂构建仿生低碳建材。该材料在常温常压条件下通过简单混合沙粒与生物粘合剂即可成型，仅需 2 d 固化时间，较传统水泥 28 d 的养护周期大幅缩短。同时通过实验验证了该策略对沙漠沙、海沙、矿渣等 11 类颗粒具有普适性，并成功制备出 500×500 mm 的大尺寸构件。

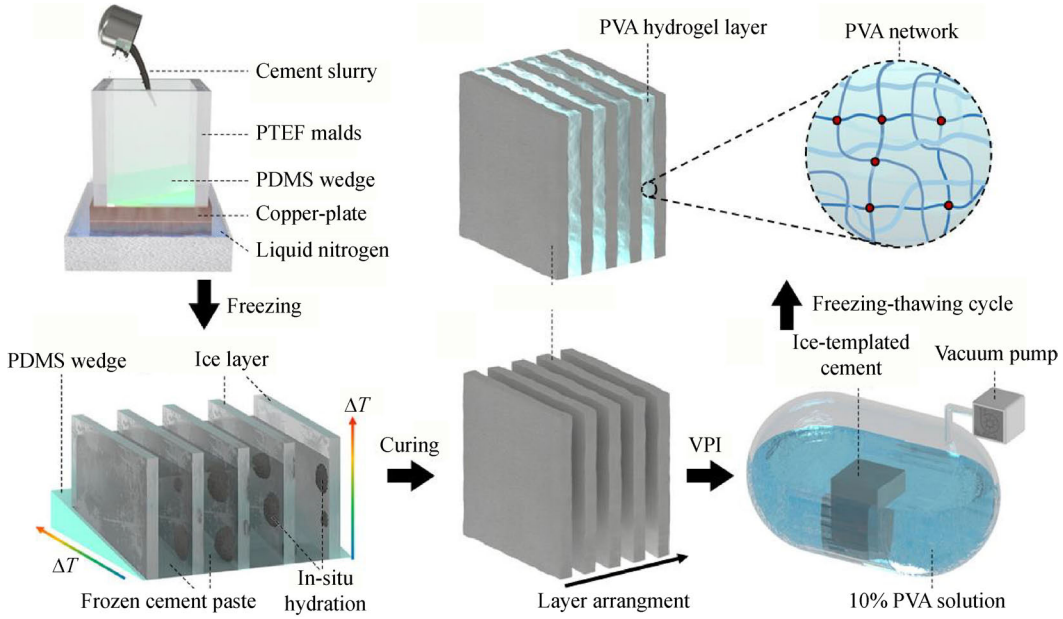


图 8　水泥-水凝胶复合材料的组装工艺示意图[28]

Fig. 8　Schematic diagram of the assembly process for cement-hydrogel composite materials[28]

2.5　现有技术总结及面临的挑战

受生物矿化启发制备的仿生材料在机械性能方面目前已经可以轻松超越天然材料，但实际上生物矿物是由生物体通过热力学过程自然产生的，在制造过程中能耗较低。因此，通过生物启发工艺制备的仿生材料仍需在机械性能和能源消耗之间进行权衡。

仿生材料现有的制备策略普遍面临能耗与性能的双重挑战。以陶瓷基仿生材料为例，无论是冷冻铸造构建的互锁结构，还是静电纺丝制备的手性阵列，最终都需要通过 1000 ℃以上的高温处理实现致密化与界面强化。虽然高温工艺能将氧化铝陶瓷的弯曲强度提升至 300 MPa，但其能耗占比超过总生产成本的 60%，且会导致生物活性组分的热分解，限制了其应用范畴。对于近年兴起的高压常温制备技术，虽能通过 800 MPa 压力实现纳米陶瓷的室温致密化，但超高压设备的运行能耗反而比传统烧结工艺高出 3~5 倍，暴露出技术路线转换中的隐性成本问题。

为了降低生产能耗，仿生材料的制备策略朝着低温低压的趋势发展，其中典型的仿珍珠层材料的制备展现出更强的工艺可控性。通过蒸发自组装与热压复合成型，磷酸钙微片与生物聚合物的层状结构可在 80 ℃条件下获得 267 MPa 的弯曲强度。这类技术通过分子间作用力(氢键、静电相互作用)替代高温烧结，将能耗降低约 70%。但复杂的多级组装流程及依赖于热压的致密化策略，在延长生产周期

的同时增加了能源消耗，并且层间界面强度的不均匀性也使材料性能稳定性面临挑战，制备工艺仍需进一步优化。

水泥基仿生材料作为常温常压制备的代表，其技术突破验证了仿生设计与低能耗工艺的兼容性。冰模板技术结合水化反应调控，可使多孔水泥的抗压强度提升 200%，28 d 的养护周期虽远长于高温陶瓷的 4 h 烧结，但全程无需外部能源输入的特性具有显著环保优势。然而，其内部范德华力、氢键的弱键合本质导致材料抗折强度仅有 5 MPa，难以兼顾强度和性能的协同提升，制约了水泥基仿生材料的实际工程应用。新型天然基低碳建材采用纯天然的原料，通过混合沙粒与生物粘合剂制得新型仿生材料，进一步降低了材料制备过程中的能源消耗，但性能不足的问题仍难以解决。

如图 9 所示，综合考虑仿生材料在机械性能、固化时间、工艺复杂性、能源消耗等方面的限制，开发在常温常压下兼具快速固化、高强韧、低能耗且可规模化扩展的仿生材料绿色制备技术，是仿生材料工程化应用的攻坚方向。

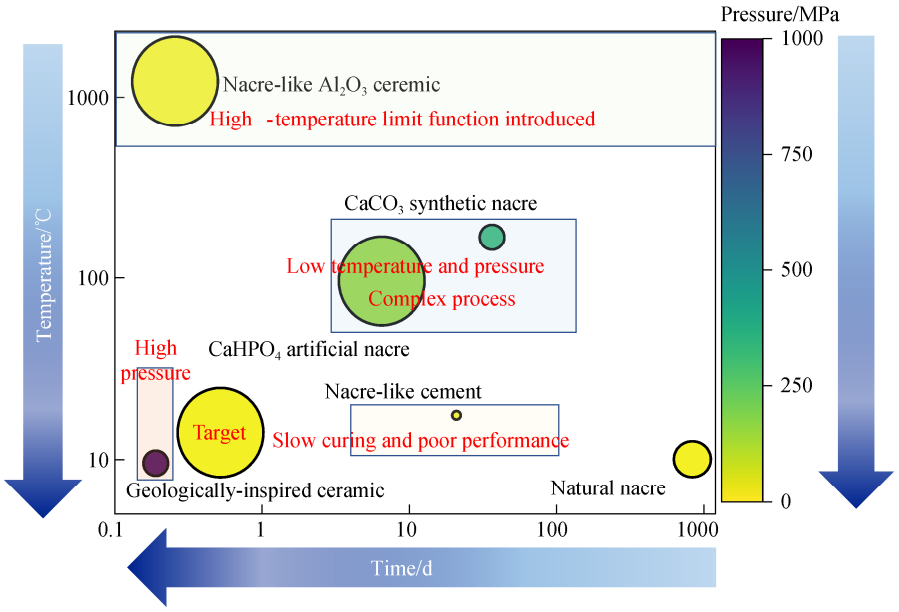


图 9 仿生材料制备技术总结

Fig. 9 Summary of preparation techniques of biomimetic materials

3 基于碳矿化反应的仿生材料制备新思路

3.1 碳矿化材料的定义

碳矿化材料是由固碳胶凝材料与 CO_2 在常规条件下发生矿化反应，快速形成以碳酸钙为主要基体组成、具有高机械强度的一种新型无机非金属复合材料[31](图 10)。碳矿化材料具有常温常压制备、结构组成可设计以及材料尺寸可扩展性强等优点，为仿生材料的绿色制造提供了理想的载体。碳矿化反应本质是模拟自然界石灰石岩石风化、贝壳形成等生物矿化过程的仿生技术，将 CO_2 从气态转化为固态矿物，同时创造具有工程价值的材料，因此也被称为 Engineered LimeStone (ELS)，一种可设计的人造石材。不同于传统高能耗材料制造，该技术可以利用工业固废(钢渣、镁渣等)或天然矿物为原料，在温和条件下协同实现 CO_2 永久封存与材料低碳合成。

3.2 碳矿化材料应用于仿生体系的优势

碳矿化材料因其独特反应机制以及优异的综合性能成为仿生体系构建的理想选择。其在温和条件下的反应特性、与生物矿物接近的组成成分，以及高度可调控的产物组成和性能表现，为碳矿化仿生材料的设计与应用带来了显著优势。

3.2.1 温和的反应条件 硅酸盐矿物等固碳胶凝材料可以在常温常压下与 CO_2 发生碳矿化反应，形成以碳酸钙和硅胶为主要组成的碳矿化材料。如图 11 所示，碳矿化反应过程起始于硅酸钙矿物的水解，此阶段本质上属于金属–质子交换反应。当 H_2O 分子中的质子对硅酸盐结构中的 Si—O 基团进行亲核攻击时，会引发基团的羟基化反应，这一过程有效削弱了 Ca^{2+} 与 SiO_4^{4-} 之间的静电库仑相互作用，促使钙离子从晶格中溶出。值得注意的是，相较于纯水体系，CO_2 水解生成的 H_2CO_3 和 HCO_3^- 因其更

强的质子供给能力，显著加速了 Si—O 基团的羟基化进程，这为后续反应提供了动力学优势。该反应之所以可以快速且自发进行，是由热力学过程和动力学过程共同决定的。在热力学上，我们以处于稳定状态的 $CaCO_3$ 和 SiO_2 为原料，通过高温赋能制备得到具有高碳化反应活性的高能态硅酸盐矿物。此时处于高能态的硅酸盐矿物可以与 CO_2 发生快速的碳矿化反应，碳矿化产物依然为低能态的 $CaCO_3$ 和 SiO_2，因此该反应在热力学上是可行的，这也是碳矿化反应在温和条件下可以快速发生的根本原因。但是对于动力学过程，碳矿化反应的快速进行往往需要严苛的条件。因为碳矿化反应的发生必须依赖 CO_2 气体在水中的溶解，因此 CO_2 的水合动力学成为反应发生的主要限制因素。由于 CO_2 分子在常规状态下具有非凡的稳定性，其线性构型和较强的 C═O 键(键能约 800 kJ/mol)导致水分子对 CO_2 的亲核攻击具有极高的活化能(79 kJ/mol)，这就意味着在常规状态下 CO_2 的溶解是碳矿化反应动力学上的主要限制步骤。而在高能态的硅酸钙表面，CO_2 分子能被表面电子有效活化为激发态，由线型分子转化为椅型分子，极大地降低了其与水反应生成 H_2CO_3 或 HCO_3^-的难度，如图 12 所示。而且，界面处的 H_2CO_3 和 HCO_3^-表现出向 CO_3^{2-}转化的热力学倾向，常以自发解离方式进行。这一特性对反应进程的推进产生双重促进作用：一方面，解离释放的质子降低了固–液界面局部区域 pH 值，促进钙离子溶出；另一方面，原位生成的 CO_3^{2-} 提高了 Ca^{2+}–CO_3^{2-}离子对的形成几率，加速后续成核与晶体生长[32]。正是由于热力学和动力学的共同作用，保证了碳矿化反应在常温常压下的快速进行。



图 10　碳矿化材料的定义

Fig. 10　Definition of Engineered Limestone

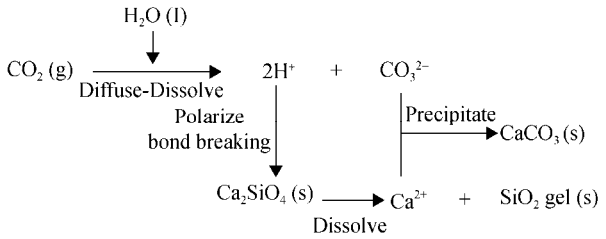


图 11　碳矿化反应过程

Fig. 11　The process of carbon mineralized reaction

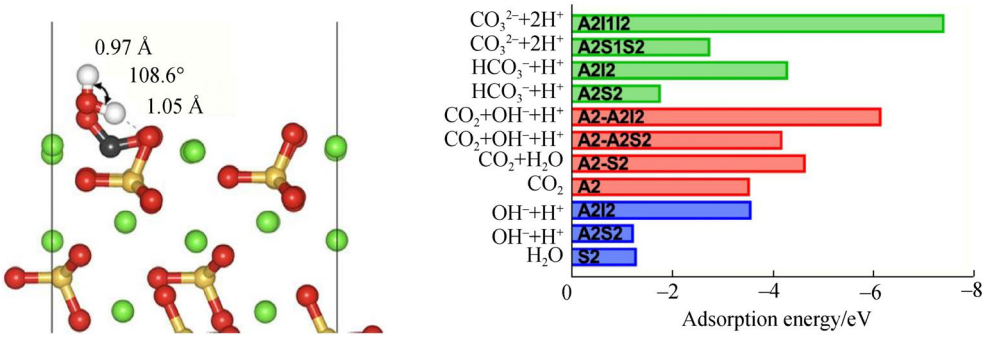


图 12　(a) CO_2 分子椅型构型；(b) 自发解离的热力学驱动[32]

Fig. 12　(a) Chair conformation of the CO_2 molecule; (b) thermodynamic driving force for its spontaneous dissociation[32]

3.2.2　组成/结构的高度可控　　硅酸钙矿物等固碳胶凝材料的碳矿化反应是一个原位生长的化学反应过程，其碳矿化产物主要为碳酸钙，与天然生物矿物的组成类似，并且产物中碳酸钙的晶型、晶体形貌与生长速率具有可控性，在仿生设计上更具优势。在课题组以往的研究中，我们针对碳矿化材料的反应过程和产物特征开发了多种调控手段。Mu 等[31]系统研究了不同硅酸钙矿物的碳矿化反应产物，研究发现高 Ca/Si 比的硅酸钙易生成更致密的碳酸钙骨架。如图 13 所示，Zhao 等[33]系统研究了不同极性基团有机物对碳矿化产物的调控机制，揭示了随着官能团极性的增加，碳矿化产物中方解石的含量会越来越高，并在此基础上研究了不同碳矿化产物晶型对于碳矿化材料力学性能的影响规律，证明了方解石含量越高，材料抗压强度越高。另外 Zhao 等[34]通过产脲酶细菌和尿素处理硅酸钙矿物，在其表面诱导球形方解石晶体的生成，通过控制尿素浓度实现对晶体尺寸的精准调控，通过预处理加速硅酸钙矿物的碳矿化反应，促使碳化产物优先形成方解石，改善了产物

性能。Zhao 等[35]还创新性地将低分子量壳聚糖掺入 γ-C_2S 碳矿化体系以模拟生物有机基质对无机矿物的定向调控机制，实现了壳聚糖与 γ-C_2S 的协同矿化。研究发现，壳聚糖通过氨基/羟基与钙离子的配位作用形成化学键合网络，不仅加速了钙离子的溶出，使碳化程度提升，更通过模板效应引导碳酸钙优先形成高硬度的方解石相，同时促进无定形硅胶与晶体相的致密交联。

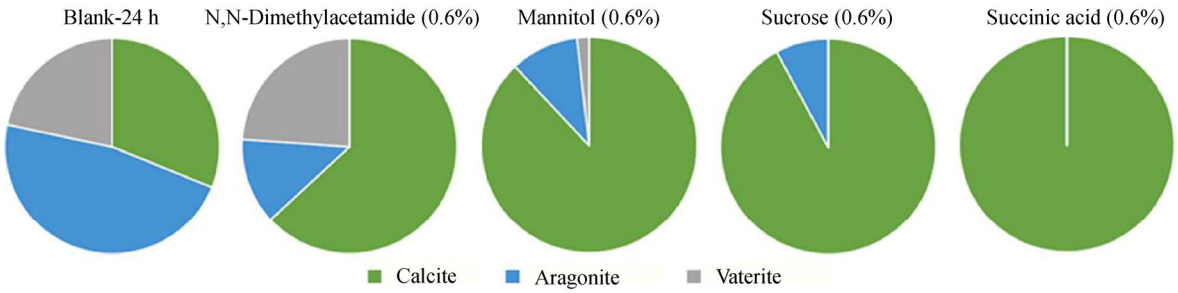


图 13 不同极性基团有机物对碳矿化材料产物组成的影响[33]

Fig. 13 Effect of organic matter with different polarity groups on the composition of Engineered Limestone[33]

3.2.3 优异的机械性能和耐久性 碳矿化材料的反应介质由固碳胶凝材料粉体和 CO_2 气体组成，强度发展机制为气–固碳矿化反应，主要组成为高稳定、耐蚀的碳酸钙晶体，对制备与服役环境具有更优异的耐受度，在深海、深地和极地等极端环境也有潜在的应用价值。在以往的研究中针对碳矿化材料的机械性能及其优化策略进行了大量的研究。Zhao 等[33, 35]研究了碳矿化反应活性提升、产物组成与结构调控策略，通过复合增强手段成功制备养护 24 h 抗压强度达 200 MPa 以上的碳矿化材料。黄恺云研究了碳矿化涂层材料对混凝土抗离子侵蚀性能的影响，发现混凝土表面使用碳矿化涂层材料后，毛细细水系数降低 58%，自由氯离子含量降低 68%，表明碳矿化材料具有良好的耐久性[36]。

3.3 碳矿化仿生材料的制备研究

3.3.1 启发于贝壳珍珠层的高韧碳矿化材料制备 受启发于贝壳珍珠层的“砖–泥”层状分级组装结构，研究人员开发了各种各样的仿生材料制备策略，目前有关贝壳珍珠层仿生材料的研究主要集中在如何将无机组分(Al_2O_3、蒙脱土等)与有机组分(甲基丙烯酸甲酯、丙烯酰胺单体等)通过不同组装工艺(自下而上、层层组装、冷冻铸造、电泳沉积法等)实现层状结构，但其应用场景主要面向小型薄层功能组件(薄膜、传感器等)，对建筑工程领域的应用鲜有研究，而且陶瓷材料基于高温驱动的结构形成与制备模式也制约了很多不耐高温功能组分的引入，进一步限制了其应用范围。

受珍珠层“砖–泥”结构启发，Chen 等[37]以碳矿化材料为基体开发了一种绿色高效的仿生材料制备策略。如图 14 所示，通过冰模板技术构建层状结构框架，结合快速碳矿化技术原位生成碳酸钙，将贝壳珍珠层的优异性能嫁接于硅酸钙碳矿化体系，成功在温和条件下制备出兼具高强度与高韧性的碳矿化材料，同时实现 CO_2 封存。该材料在微观结构和化学组成上实现了对珍珠层的双重仿生。通过双重温度梯度精确控制冷冻动力学，构建出由 γ-C_2S 构成的有序层状骨架结构，随后在温和条件下进行的快速原位碳矿化反应，在层状框架内原位生成弥散分布的碳酸钙晶粒，再经明胶渗透形成类珍珠层结构的碳矿化材料。所得材料表现出 45 MPa 的抗弯强度(较水泥–水凝胶复合材料提升 8 倍)和 2.03 MJ/m³的断裂韧性(较未改性碳矿化材料提升 20 倍)，同时密度仅 1.2 g/cm^3，是一种典型的轻质高强材料。其性能提升源于多尺度增韧机制，包括裂纹偏转、次生裂纹形成和强界面结合，这些协同作用实现了高效能量耗散。该研究通过仿生原理与碳矿化技术的协同整合，为设计高性能仿生材料的合成建立了新范例，在可持续基础设施建设和碳中和领域展现出广阔应用前景。

3.3.2 启发于海洋生物“特权空间”的超高强碳矿化材料制备 现有的关于仿生材料的研究多集中于结构–性能关系或功能化设计，即根据所需的材料特性开发仿生材料的不同加工技术，忽略了对生物矿化过程本身的研究，导致仿生材料领域出现“性能优先”与“工艺滞后”的发展现状。而从自然过程中汲取灵感，开发可持续的高性能仿生材料是解决这一现状的关键。如图 15 所示，在海洋生物矿物质的形成过程中，在生物大分子的作用下，矿化所需的钙离子首先在囊泡中富集浓缩，随后被运输到一个生物

控制的“特权空间”，以形成具有特定形貌、取向和空间排列的生物矿物，其所有的结构多样性都是由“特权空间”介导的，这为制备仿生材料提供了重要启示。

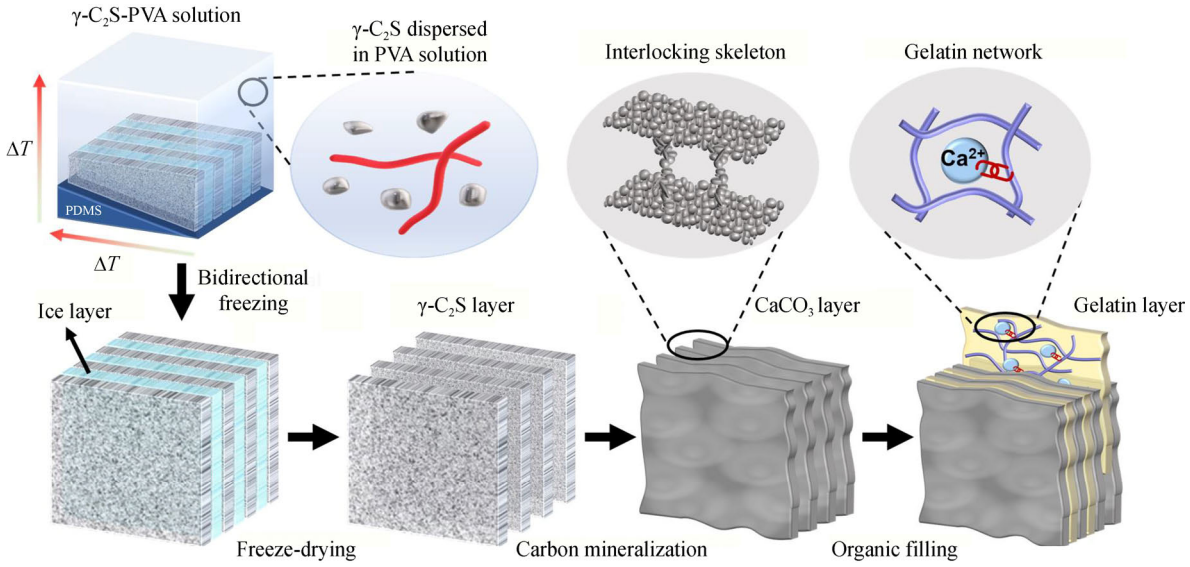


图 14　仿珍珠层结构碳矿化材料制备策略[37]

Fig. 14　Fabrication of nacre-like hierarchical Engineered Limestone[37]

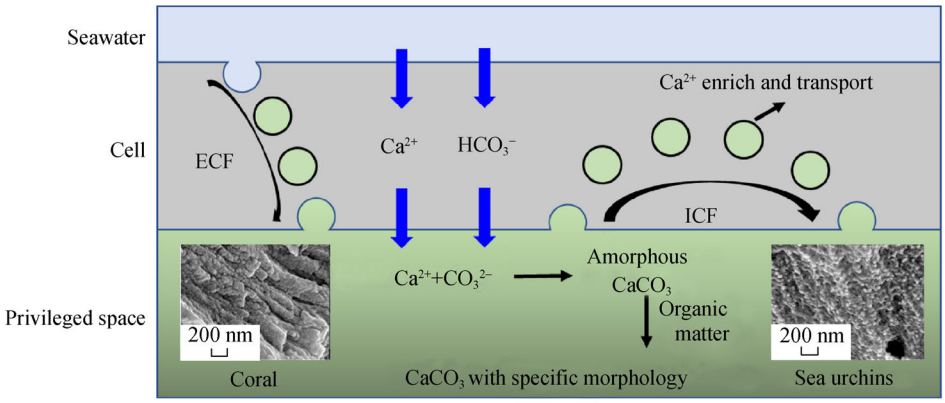


图 15　海洋生物矿化过程

Fig. 15　Marine biomineralization processes

基于海洋生物体在“特权空间”内的矿化过程，Chen 等[38]开发了一种快速、高效的策略以实现对碳酸钙成核、结晶、生长、取向以及组装等一系列过程的控制，在常温常压下制备得到了具有特定晶体取向以及优异力学性能的碳矿化材料。如图 16 所示，以固碳胶凝材料 γ-C_2S 为基体，在 CO_2 养护过程中，溶出的钙离子优先在海藻酸钠分子链内部富集并以离子键的形式结合，形成海藻酸钙凝胶填充在基体的孔隙中。由于海藻酸钠分子中 G 段的存在，在该链段中的羧酸根离子与钙离子结合后将凝胶内部分成了一个个小腔室，为碳酸钙的生长提供“特权空间”，形成具有特定取向并且有序排列的碳酸钙晶体，制备得到的碳矿化材料展现出高达 300 MPa 的抗压强度，其比强度和比模量超越混凝土、石材及部分金属合金，同时每吨材料可固定约 200 kg CO_2，为高性能仿生材料的绿色制备提供了新思路。

3.3.3　启发于天然大理石的碳矿化辐射制冷材料制备　　传统建筑材料因较低的太阳辐射反射率与大气窗口发射率，造成建筑表面热负荷居高不下，显著增加了制冷能耗与碳排放。被动辐射制冷技术为此提供了创新的解决方案，它通过 8~13 μm 大气窗口将热量直接辐射至外太空，从而实现零能耗降温。研究表明，此类材料不仅能有效降低建筑制冷能耗，还有助于缓解城市热岛效应。图 17 所示的北京天坛等

地实测结果印证了其潜力：白色大理石表面温度可比水泥地面低 20~30 ℃，展现出优异的辐射制冷能力。

天然大理石的起源可追溯至远古生物矿化过程，其前体石灰岩多由海洋生物(如有孔虫、珊瑚)精密调控的碳酸钙沉积而成，历经变质作用后才形成大理石。这一从生物矿化到沉积岩再到变质岩的演化链条，为在实验室中利用人工碳矿化技术仿生制备辐射制冷功能材料提供了关键启示：模拟自然中低温、常压下的矿物形成路径，可构建出性能优异的微观结构。受此启发，结合天然大理石的降温效应，Xu 等[39]模拟仿生矿化路径设计并开发了一种基于 γ-C_2S 碳矿化反应的工程大理石辐射制冷材料(EMM)。该研究通过组成结构设计、系统优化材料组成、微观结构及制备工艺，成功实现了高效的被动辐射制冷性能。如图 18 所示，通过调控碳矿化反应过程，并且添加散射单元、优化散射结构，使工程大理石辐射制冷材料的太阳辐射反射率和“大气窗口”发射率分别提高到 95%和 97%以上，从而能够高效反射太阳辐射并通过大气窗口向外发射热量。研究数据显示，工程大理石辐射制冷材料可实现低于环境温度 8.8 ℃，低于水泥基材料 30 ℃左右的降温效果。尤为重要的是，其制备过程本身具备显著的碳封存能力，每吨材料可吸收 357.7 kg CO_2。结合其在建筑应用中所带来的运行节能效益，

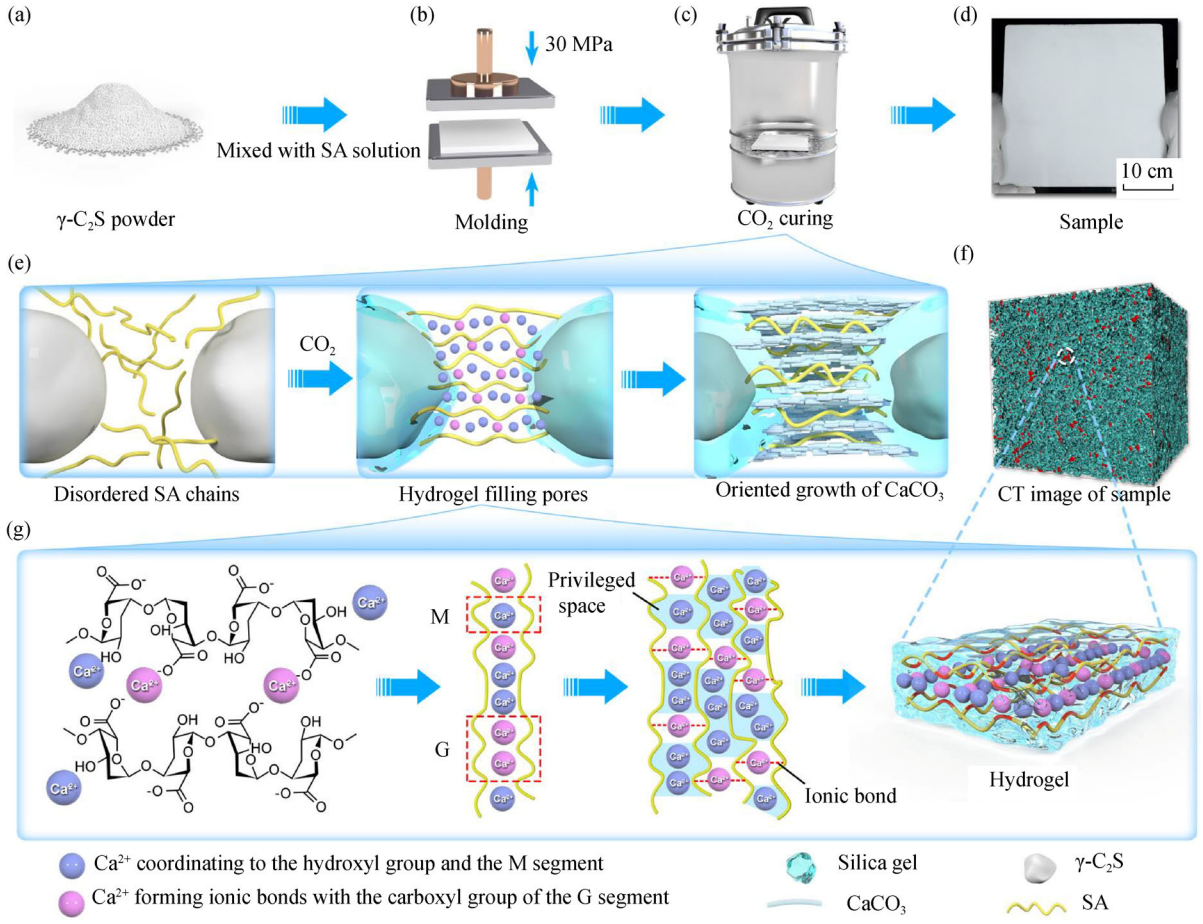


图 16 基于过程仿生的碳矿化材料的制备和表征[38]：(a) γ-C_2S 粉末；(b) 压制成型，将 γ-C_2S 粉末和 SA 溶液均匀混合，然后在 30 MPa 的压力下压制成型；(c) CO_2 固化，在富含 CO_2 的环境中固化压制成型的密实物；(d) 基于过程仿生的碳矿化材料样品，比例尺为 10 cm；(e) 由 SA 控制的碳矿化材料定向组装和排列过程示意图；(f) 碳矿化材料以及孔隙中海藻酸钙凝胶的三维微型计算机断层扫描图像，红色区域代表海藻酸钙凝胶，蓝色区域代表 γ-C_2S 基质；(g) 具有“蛋盒结构”的海藻酸钙凝胶形成过程示意图

Fig. 16 Fabrication and characterization of engineered limestone inspired by bioprocessing: (a) γ-C_2S powder; (b) Compression molding, γ-C_2S and SA solution are mixed homogenously and compacted under a uniaxial pressure of 30 MPa; (c) CO_2 curing: the press-formed compact is cured in a CO_2-rich environment; (d) Bionic engineered limestone sample, Scale bar, 10 cm; (e) Schematic of orientated assembly and alignment of Engineered Limestone controlled by SA; (f) Three-dimensional micro computed tomography images of calcium alginate gel in pores of Engineered Limestone, red area represents calcium alginate gel, and blue area represents γ-C_2S substrate; (g) Diagram of the formation process of calcium alginate gel with an “egg-box structure”

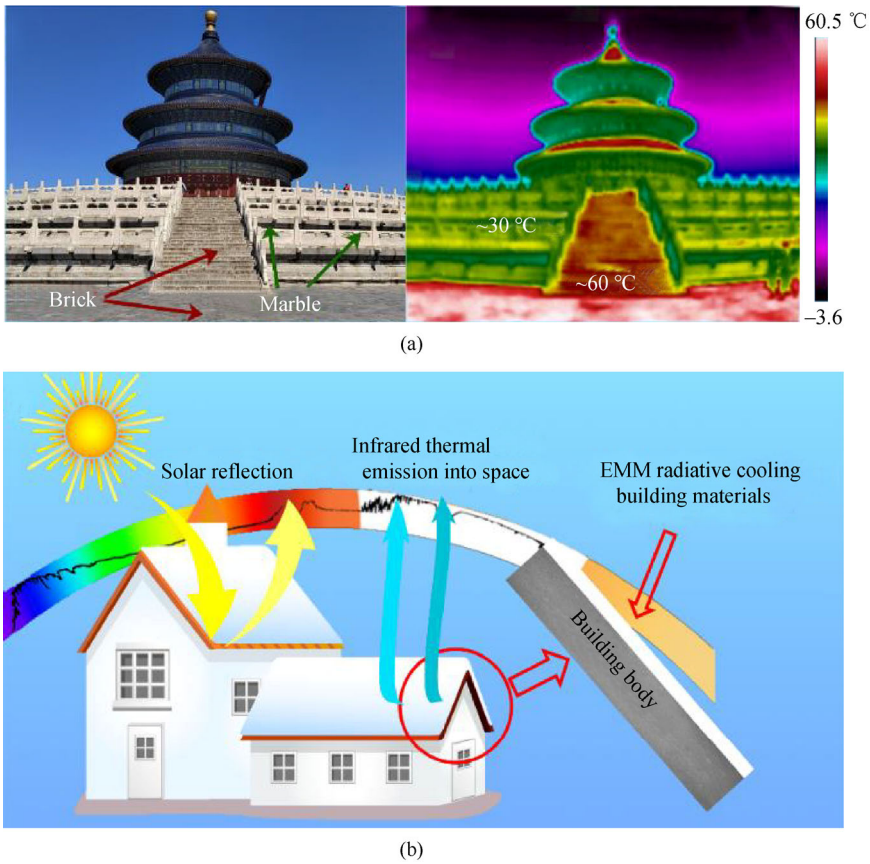


图 17　启发于天然大理石降温效应的设计灵感[39]：(a)白色大理石雕栏建筑的光学及红外照片，照片拍摄于 2023 年 6 月 28 日中午，地点为北京天坛；(b)辐射制冷工程大理石建筑材料的应用示意图

Fig. 17　Design Inspiration Drawn from the Cooling Effect of Natural Marble[39]: (a) Optical and infrared photos of white marble carving architecture. Photo taken on noon of June 28, 2023, at Temple of Heaven in Beijing, China; (b) Schematic of the engineered marble building materials applied on the building body

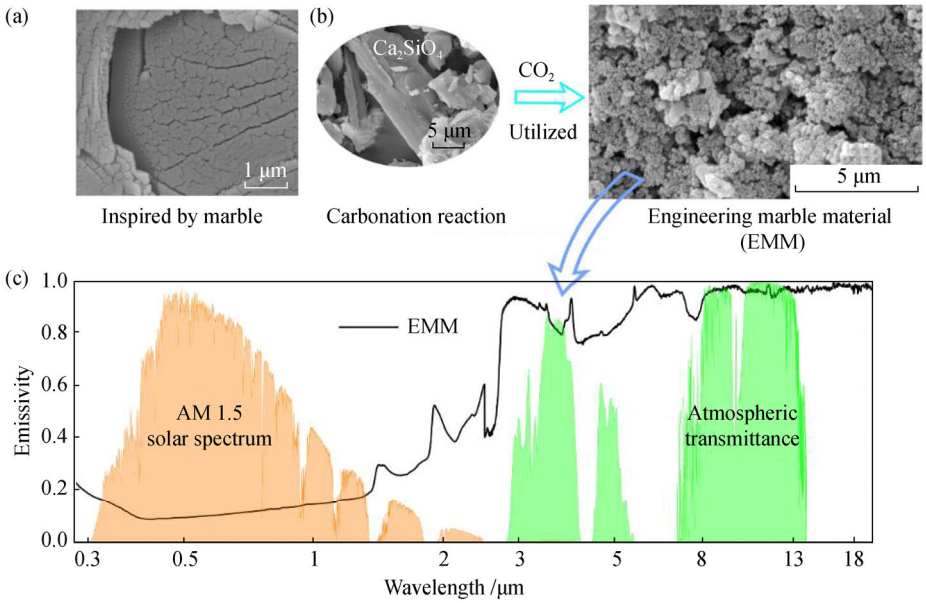


图 18　启发于天然大理石的碳矿化辐射制冷材料制备路径[39]：(a)天然汉白玉的微观形貌；(b) γ-C_2S 碳矿化反应形成工程大理石辐射制冷材料的过程；(c)工程大理石辐射制冷材料的发射率/吸收率

Fig. 18　Preparation Pathway of Carbon Mineralization-Based Radiative Cooling Materials Inspired by Natural Marble[39]: (a) Micromorphology of natural White Marble; (b) The process of γ-C_2S carbonation reaction to form engineered marble materials; (c) Emissivity/absorptivity of engineered marble materials

年均 CO_2 减排量可达 54.8 kg/m^2，在热带地区更可实现高达 55%的全年节能率。该研究将 CO_2 封存与建筑节能两大目标深度融合，不仅为缓解城市热岛效应提供了关键技术支撑，更开创了负碳建筑材料研发的新范式，对推动全球建筑行业绿色转型具有重要的战略意义和应用价值。

4 结论与展望

自然界中的天然矿物虽然是由有限的元素构成，但却凭借复杂的多级结构，在温和的条件下实现了出色的机械性能和功能特性。为了复制这种性能优势，科研人员通过模仿天然生物材料的微观结构特征，在分子识别、限域生长、有机模板、非晶转化以及多级组装等原则的基础上，开发出了基于多种材料体系的仿生策略，虽实现了性能突破，但目前的仿生材料制备工艺多依赖于高温高压的苛刻条件，与天然矿化过程中的温和条件截然相反，这不仅带来极大能源消耗，还限制了某些功能相的引入以及大规模的工业化生产。而仿生水泥基材料虽符合常温常压制备的可持续目标，但却受限于较差的机械性能以及较长的固化周期，难以满足多场景的应用需求。因此，开发兼具快速固化、高强韧、低能耗且可规模化扩展的绿色制备技术，成为仿生材料工程化应用的攻坚方向。

碳矿化材料作为一种可以在常温常压下快速固化并且具有较高机械强度的新型材料，不仅在固化过程中会吸收 CO_2，而且尺寸具有可扩展性，易于实现大规模的工业化生产，为仿生材料的绿色制备提供了理想的载体。基于结构仿生和过程仿生的多维度设计，碳矿化材料突破了传统性能极限，实现了强度和韧性的协同提升。这种将仿生原理与绿色制备相结合的策略，为仿生材料的规模化应用提供了兼具性能与可持续性的解决方案。

参考文献:

[1] XIE J J, PING H, TAN T N, et al. Bioprocess-inspired fabrication of materials with new structures and functions[J]. Prog Mater Sci, 2019, 105: 100571.

[2] TAYLOR J R A, SCOTT N I, ROUSE G W. Evolution of mantis shrimp telson armour and its role in ritualized fighting[J]. J R Soc Interface, 2019, 16(157): 20190203.

[3] FEDERLE W, BARNES W J P, BAUMGARTNER W, et al. Wet but not slippery: Boundary friction in tree frog adhesive toe pads[J]. J R Soc Interface, 2006, 3(10): 689–697.

[4] GILBERT P U P A, BERGMANN K D, BOEKELHEIDE N, et al. Biomineralization: Integrating mechanism and evolutionary history[J]. Sci Adv, 2022, 8(10): eabl9653.

[5] ESTROFF L A. Introduction: Biomineralization[J]. Chem Rev, 2008, 108(11): 4329–4331.

[6] MEYERS M A, CHEN P Y, LOPEZ M I, et al. Biological materials: A materials science approach[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2011, 4(5): 626–657.

[7] LOH H C, DIVOUX T, GLUDOVATZ B, et al. Nacre toughening due to cooperative plastic deformation of stacks of co-oriented aragonite platelets[J]. Commun Mater, 2020, 1: 77.

[8] OLSON I C, KOZDON R, VALLEY J W, et al. Mollusk shell nacre ultrastructure correlates with environmental temperature and pressure[J]. J Am Chem Soc, 2012, 134(17): 7351–7358.

[9] ADDADI L, JOESTER D, NUDELMAN F, et al. Mollusk shell formation: A source of new concepts for understanding biomineralization processes[J]. Chem, 2006, 12(4): 980–987.

[10] NUDELMAN F, GOTLIV B A, ADDADI L, et al. Mollusk shell formation: Mapping the distribution of organic matrix components underlying a single aragonitic tablet in nacre[J]. J Struct Biol, 2006, 153(2): 176–187.

[11] WANG Y Y, NALEWAY S E, WANG B. Biological and bioinspired materials: Structure leading to functional and mechanical performance[J]. Bioact Mater, 2020, 5(4): 745–757.

[12] WANG R Z, SUO Z, EVANS A G, et al. Deformation mechanisms in nacre[J]. J Mater Res, 2001, 16(9): 2485–2493.

[13] YANG T, JIA Z A, CHEN H S, et al. Mechanical design of the highly porous cuttlebone: A bioceramic hard buoyancy tank for cuttlefish[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2020, 117(38): 23450–23459.

[14] LEVI-KALISMAN Y, FALINI G, ADDADI L, et al. Structure of the nacreous organic matrix of a bivalve mollusk shell examined in the hydrated state using cryo-TEM[J]. J Struct Biol, 2001, 135(1): 8–17.

[15] MAHAMID J, AICHMAYER B, SHIMONI E, et al. Mapping amorphous calcium phosphate transformation into crystalline mineral from the cell to the bone in zebrafish fin rays[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107(14): 6316–6321.

[16] BERGSTRÖM L, STURM (NÉE ROSSEEVA) E V, SALAZAR-ALVAREZ G, et al. Mesocrystals in biominerals and colloidal arrays[J]. Acc Chem Res, 2015, 48(5): 1391–1402.

[17] BOTS P, BENNING L G, RODRIGUEZ-BLANCO J D, et al. Mechanistic insights into the crystallization of amorphous calcium carbonate (ACC)[J]. Cryst Growth Des, 2012, 12(7): 3806–3814.

[18] XIAO H, YANG M R, LV J B, et al. Biomineralization-inspired confined-space fabrication of polyimide aerogels[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2024, 16(2): 2763–2773.

[19] STURM (NÉE ROSSEEVA) E V, CÖLFEN H. Mesocrystals: Structural and morphogenetic aspects[J]. Chem Soc Rev, 2016, 45(21): 5821–5833.

[20] ZHANG Z B, GAO H L, WEN S M, et al. Scalable manufacturing of mechanical robust bioinspired ceramic–resin composites with locally tunable heterogeneous structures[J]. Adv Mater, 2023, 35(14): 2209510.

[21] ZHAO H W, YUE Y H, GUO L, et al. Cloning nacre's 3D interlocking skeleton in engineering composites to achieve exceptional mechanical properties[J]. Adv Mater, 2016, 28(25): 5099–5105.

[22] BOUVILLE F, STUDART A R. Geologically-inspired strong bulk ceramics made with water at room temperature[J]. Nat Commun, 2017, 8: 14655.

[23] MU Z, KONG K R, JIANG K, et al. Pressure-driven fusion of amorphous particles into integrated monoliths[J]. Science, 2021, 372(6549): 1466–1470.

[24] MAO L B, GAO H L, YAO H B, et al. Synthetic nacre by predesigned

matrix-directed mineralization[J]. Science, 2016, 354(6308): 107–110.
[25] GAO H L, CHEN S M, MAO L B, et al. Mass production of bulk artificial nacre with excellent mechanical properties[J]. Nat Commun, 2017, 8(1): 287.
[26] WU Z Y, PAN H, HUANG P, et al. Biomimetic mechanical robust cement-resin composites with machine learning-assisted gradient hierarchical structures[J]. Adv Mater, 2024, 36(35): 2405183.
[27] WANG F H, DU Y B, JIAO D, et al. Wood-inspired cement with high strength and multifunctionality[J]. Adv Sci, 2021, 8(3): 2000096.
[28] CHEN Y, ZHENG Y, ZHOU Y, et al. Multi-layered cement-hydrogel composite with high toughness, low thermal conductivity, and self-healing capability[J]. Nat Commun, 2023, 14(1): 3438.
[29] DU F Y, ZHU W K, YANG R Z, et al. Bioinspired super thermal insulating, strong and low carbon cement aerogel for building envelope (adv. sci. 18/2023)[J]. Adv Sci, 2023, 10(18): 2370115.
[30] XU X T, CHEN Z Y, WAN X Z, et al. Colonial sandcastle-inspired low-carbon building materials[J]. Matter, 2023, 6(11): 3864–3876.
[31] MU Y D, LIU Z C, WANG F Z. Comparative study on the carbonation-activated calcium silicates as sustainable binders: Reactivity, mechanical performance, and microstructure[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2019, 7(7): 7058–7070.
[32] ZHAO M C, RAO M J, WANG F Z, et al. Density functional simulation of adsorption behavior within the dicalcium silicate-accelerated carbonation system[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2022, 10(50): 16825–16832.
[33] ZHAO S X, LIU Z C, WANG F Z, et al. Elucidating factors on the strength of carbonated compacts: Insights from the carbonation of γ-C_2S, β-C_2S and C_3S[J]. Cem Concr Compos, 2025, 155: 105806.
[34] ZHAO S X, LIU Z C, WANG F Z. Carbonation reactivity enhancement of γ-C_2S through biomineralization[J]. J CO_2 Util, 2020, 39: 101183.
[35] ZHAO S X, LIU Z C, MU Y D, et al. Effect of chitosan on the carbonation behavior of γ-C_2S[J]. Cem Concr Compos, 2020, 111: 103637.
[36] HUANG K Y, LEI M, LIU Z C, et al. Carbon-absorbing inorganic coating with ultrahigh bonding strength for concrete: Bonding, durability performances, and the underlying mechanisms[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2024, 12(21): 8188–8202.
[37] CHEN J Z, LIU Z C, ZHANG S J, et al. Energy-efficient fabrication of biomimetic materials for sustainable infrastructure applications[J]. Adv Sci, 2025, 12(35): e03854.
[38] CHEN J Z, ZHAO M C, LIU Z C, et al. Bioinspired *in situ* synthesis of high-strength bulk CO_2 mineralized ceramics at room temperature[J]. ACS Nano, 2025, 19(1): 1732–1742.
[39] XU X G, YANG L, XIA Z L, et al. CO_2-utilized synthetic marbles with enhanced radiative cooling[J]. Nano Energy, 2025, 139: 110985.

From Bio-Mineralization to Carbon Mineralization: A New Strategy for the Preparation of Biomimetic Materials

CHEN Jingze[1,2], *XU Xingang*[1,2], *LIU Zhichao*[1,2], *YANG Lu*[2], *HU Shuguang*[2], *WANG Fazhou*[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract Through billions of years of natural selection, nature has nurtured a wide range of biomaterials with exquisite microstructures, excellent mechanical properties, and unique functional characteristics. Their advantages in resource utilization efficiency and sustainable preparation processes provide important references for the development of artificial materials. However, current biomimetic material research faces a significant contradiction: biomimetic designs pursuing high performance often rely on high-energy consumption preparation processes such as high temperature and high pressure, which achieve performance breakthroughs but contradict sustainable development goals. In contrast, green preparation technologies imitating biomineralization face engineering transformation challenges such as performance, efficiency, and costs, leading to an imbalance of “performance priority” and “process lag” in the field of biomimetic materials. Most existing preparation strategies rely on energy-intensive processes such as high temperature (above 1000 ℃) sintering or ultrahigh pressure (exceeding 800 MPa) molding, which not only increase production costs (energy consumption accounts for over 60% of total costs for high-temperature ceramics) but also limit the incorporation of thermally sensitive functional components and large-scale industrialization.

To address this challenge, extensive studies have been conducted on the regulatory mechanisms of natural biomineralization, revealing five core principles: molecular recognition, confined growth, organic templating, amorphous precursor transformation, and multi-scale synergistic assembly. Nacre, a representative biological mineral, consists of 95% aragonite calcium carbonate and 5% organic matrix, forming a unique “brick-and-mortar” layered structure. Its formation involves the secretion of β-chitin as a porous scaffold by mantle cells, followed by the assembly of silk fibroin and acidic proteins into a gel network, which precisely regulates crystal growth and interlayer spacing. Inspired by these mechanisms, researchers have developed various biomimetic preparation strategies, including freeze casting, layer-by-layer self-assembly, electrophoretic deposition, and 3D printing. For instance, freeze casting has been used to prepare alumina-cyanate composites with a 3D interlocking skeleton, achieving a flexural strength of 300 MPa and a fracture strain of 5% after sintering at 1600 ℃ for 4 h. Room-temperature high-pressure cold sintering technology has enabled the densification of vaterite powder into ceramics with a compressive strength of 280 MPa under 280–800 MPa. Low-temperature low-pressure strategies, such as evaporation-induced self-assembly combined with hot pressing, have produced phosphate-based composites with a flexural strength of 267 MPa, exceeding that of natural nacre (172 MPa). Ambient-temperature and pressure approaches, represented by cement-based biomimetic materials, have utilized ice templating to create porous structures

with 200% higher compressive strength than foamed cement, but suffer from low flexural strength (only 5 MPa) and long curing cycles (28 d).

A breakthrough strategy based on carbon mineralization has emerged as a promising solution for green biomimetic material preparation. Carbon mineralized materials, also known as Engineered LimeStone (ELS), are novel inorganic non-metallic composites formed by the mineralization reaction between CO_2-sequestering cementitious materials (*e.g.*, steel slag, magnesium slag, or calcium silicates) and gaseous CO_2 under ambient conditions, converting CO_2 into solid calcium carbonate ($CaCO_3$) as the main matrix. This technology mimics natural biomineralization processes such as shell formation and limestone weathering, achieving permanent CO_2 sequestration while producing high-value materials. Three key advantages make ELS ideal for biomimetic systems: mild reaction conditions (ambient temperature and pressure, driven by thermodynamic feasibility and surface-activated CO_2 dissolution), highly controllable composition and structure (tunable $CaCO_3$ crystal phases, morphologies, and growth rates *via* organic modifiers or bacterial treatments), and excellent mechanical properties and durability (compressive strength exceeding 200 MPa after 24 h of curing, superior corrosion resistance).

Recent studies have demonstrated the versatility of carbon mineralization-based biomimetic design: 1) Inspired by nacre's "brick-and-mortar" structure, ice templating combined with rapid carbon mineralization has produced lightweight high-strength materials with a flexural strength of 45 MPa (8 times higher than cement-hydrogel composites) and a fracture toughness of 2.03 MJ/m^3 (20 times higher than unmodified ELS). 2) Mimicking the "privileged space" in marine biomineralization, sodium alginate hydrogels have been used to create microcompartments for oriented $CaCO_3$ growth, resulting in materials with a compressive strength of 300 MPa and a CO_2 sequestration capacity of 200 kg per ton. 3) Inspired by natural marble's radiative cooling effect, engineered marble radiative cooling materials (EMM) have been developed *via* γ-dicalcium silicate (γ-C_2S) carbonation, achieving a solar reflectance of over 95% and an atmospheric window emissivity of over 97%, reducing surface temperature by 8.8 ℃ below ambient and sequestering 357.7 kg CO_2 per ton.

Summary and Prospects Despite significant progress in biomimetic material design, the trade-off between performance and energy consumption remains a major barrier to industrialization. Traditional strategies rely on harsh conditions (high temperature, high pressure) or suffer from insufficient mechanical properties and long curing cycles. ELS address these limitations by integrating mild preparation conditions, rapid curing, high strength-toughness synergy, large-scale scalability, and CO_2 sequestration. By combining structural and process bionics, this strategy breaks through traditional performance limits and provides a sustainable solution for biomimetic material commercialization. Future research should focus on optimizing the carbon mineralization reaction efficiency, expanding the range of CO_2-sequestering raw materials, and developing multifunctional composites for extreme environments (deep sea, polar regions) and advanced applications (sustainable infrastructure, carbon-neutral buildings, energy-efficient construction). This integration of bionics and green manufacturing not only advances material science but also contributes to global climate goals and the transition to a low-carbon economy.

Keywords biomineralization; bioinspired materials; engineered limestone; high strength and toughness