

水泥基材料多尺度抗裂增韧机理研究进展

雷东移^{1,2}, 李明昂¹, 张 鹏¹, 尹斌斌³, 李 莹¹, 宋淋萍¹, 张吉庆⁴, 张秀才⁵,
卢桂霞¹, 钱 凯⁶, 刘加平²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266520; 2. 东南大学材料科学与工程学院, 南京 211189; 3. 香港城市大学建筑学及土木工程系, 中国 香港 999077; 4. 青岛瑞源工程集团有限公司, 山东 青岛 266555; 5. 青岛德泰建设工程有限公司, 山东 青岛 266555; 6. 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541010)

摘 要: 水泥基材料为多相多尺度结构, 各组分均不同程度影响整体韧性, 将相关组分按宏观、介观、纳观 3 个尺度分类概述其对水泥基材料的抗裂增韧机理。宏观尺度如胶凝组分、集料、外加剂、纤维、水胶比、养护制度等, 分析其物化效应对水泥基材料抗裂增韧特性的影响机理; 介观尺度如微珠、晶须、渗透结晶材料等微米级增强材料, 阐述其火山灰、填充、桥接、键合、渗透结晶等增强效应; 纳观尺度如纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃、石墨烯、碳纳米管及微生物、纳米聚合物等纳米级增强材料, 介绍其对水化产物微观结构、生长方式及硬化浆体孔结构的增强及优化机理; 并阐述‘碳纤维+碳纳米管’、‘纤维+晶须+石墨烯’等跨尺度组分的共轭增韧效应。最后, 讨论不同尺度增韧组分当前应用、研究中的不足及发展趋势。

关键词: 水泥基材料; 抗裂增韧; 多尺度; 宏观; 介观; 纳观

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-2876-14

网络出版时间: 2023-10-08



Research Progress on Multi-Scale Cracking Resistance and Toughening Mechanisms for Cement-Based Materials

LEI Dongyi^{1,2}, LI Mingang¹, ZHANG Peng¹, YIN Binbin³, LI Ying¹, SONG Linping¹, ZHANG Jiqing⁴, ZHANG Xiucan⁵, LU Guixia¹, QIAN Kai⁶, LIU Jiaping²

(1. Department of Civil Engineering, Engineering Research Center of Concrete Technology under Marine Environment, Ministry of Education, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 4. Qingdao Ruiyuan Engineering Group Company Limited, Qingdao 266555, Shandong, China; 5. Qingdao Detai Construction Engineering Company Limited, Qingdao 266555, Shandong, China; 6. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541010, Guangxi, China)

Abstract: Cement-based materials have a multi-phase and multi-scale structure, and each component forming the structure affects the overall toughness to varying degrees. This review summarized the cracking-resistance and toughening mechanisms of relevant components classified in macroscale, mesoscale and nanoscale to cement-based materials. In the macroscale (such as the cementitious component, aggregate, admixture, fiber, water-binder ratio, curing system, etc.), the influence mechanisms of the physicochemical effects of relevant components on the cracking resistance and toughening characteristics of cement-based materials were analyzed. In the mesoscale (such as microsphere, whisker, capillary crystalline material, etc.), the enhancement effects such as volcanic ash, filling,

收稿日期: 2023-07-26。 修订日期: 2023-08-21。

基金项目: 国家自然科学基金(U22A20244, 52008223); 西海岸新区科技惠民专项(2021-102); 青创科技支持计划(2021KJ045); 山东省自然科学基金(ZR2020QE252); 海洋环境混凝土技术教育部工程中心开放课题(TMduracon2022009, TMduracon2022019); 宁波市科技创新 2025 重大专项(2020Z035)。

第一作者: 雷东移(1986—), 男, 博士, 副教授。

通信作者: 张 鹏(1981—), 男, 博士, 教授。

李 莹(1988—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2023-07-26. Revised date: 2023-08-21.

First author: LEI Dongyi (1986—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: leidongyi@qut.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Peng (1981—), male, Ph.D., Professor.

LI Ying (1988—), female, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn; liying@qut.edu.cn

bridging, bonding, capillary crystallization were described. In the nanoscale (such as nano-SiO₂, nano-CaCO₃, graphene, carbon nanotube, microorganism, nano-polymer, etc.), the mechanisms enhancing and optimizing the microstructure of hydration products, growth mode, and pore structure of hardened paste were introduced. The conjugating toughening effects of cross-scale components such as ‘carbon fiber+carbon nanotubes’, ‘fiber+whisker+graphene’ were elucidated. In addition, the shortcomings in the current application/research, and the future development trends for toughening components in different scales were also discussed.

Keywords: cement-based materials; cracking resistance and toughening; multi-scale; macroscale; mesoscale; nanoscale

水泥基材料一旦开裂, 随着裂缝的扩展, 强度和耐久性将急剧下降。我国混凝土材料的抗裂性普遍不足, 建筑结构的平均服役寿命普遍偏低(一般为 25~30 a)^[1]。此外, 中国新疆、云南、四川、河北、台湾等地区地震频发^[2], 要求水泥基材料要具有较高的抗裂性。并且, 建筑工程逐渐向超高(>100 m)、超长(>55 m)、超强(>150 MPa)发展, 对结构设计和水泥基材料的韧性、强度、耐久性提出更高要求。

准脆性水泥基材料的开裂原因可归纳为内、外两方面: 内因为水化作用致使胶凝体系绝对体积变化引发的化学、塑性、干燥、温度等收缩或膨胀变形^[3]; 外因为外部静、动荷载及侵蚀离子、温、湿度等作用致使水泥基材料耐久性劣化及内部钢筋腐蚀加速^[4]。

目前关于水泥基材料的抗裂增韧特性已有大量研究, 但仍存在如下不足: 1) 缺乏针对韧性的配合比设计方法: 各项原材料均不同程度影响水泥基材料的抗裂特性, 原材料用量对整体韧性贡献度的计算方法尚属空白; 2) 增韧效果有限: 单一尺寸的抗裂增韧组分能够对某一尺度的缺陷起到增韧作用, 但无法全面提升多尺度非均质水泥基材料的抗裂性能。如: 碳酸钙晶须能够有效弥补 PVA 纤维增强水泥基材料初裂应变和初裂应力不足的缺陷^[5]; 3) 产生负面效应: 如: 过高掺量的纤维不仅无法有效传递应力, 还会成为薄弱点而降低力学性能^[6]; 纳米增强材料易团聚而危害浆体工作性能; 纳米聚合物可通过“架桥作用”增强水泥基材料的韧性, 但包覆于水泥颗粒表面而阻碍矿物离子与水的接触、延缓水化^[7]。

因此, 有必要深入探究水泥基材料的抗裂增韧机理, 基于多尺度理念, 从宏观、介观、纳观 3 个尺度综述原材料和增韧组分对水泥基材料的抗裂增韧机理, 宏观尺度包括胶凝组分、集料、外加剂、纤维、水胶比、砂胶比、养护制度等^[8-12], 介观尺度包括微珠、晶须、渗透结晶材料等^[13-14], 纳观尺度包括纳米 SiO₂、纳米 CaCO₃、碳纳米管、石墨烯、微生物、纳米聚合物等^[15-18], 及“碳纤维+碳纳米管”、“纤维+晶须+石墨烯”等跨尺度增韧组分的共轭增韧特性, 并讨论和展望不同尺度增韧组分的发展趋势。

1 水泥基材料宏观尺度抗裂增韧机理研究进展

该部分包括胶凝组分、集料、外加剂、纤维等原材料, 水胶比、砂胶比等配合比参数及养护制度对水泥基材料抗裂增韧特性的影响机理。

1.1 原材料性能对水泥基材料抗裂性能的影响

水泥 用于高韧性水泥基材料的水泥类型主要为硅酸盐水泥(OPC)和硫铝酸盐水泥(CSA)。硅酸盐水泥的主要矿物组分为硅酸三钙(C₃S, 63%~67%)、硅酸二钙(C₂S, 21%~24%)、铝酸三钙(C₃A, 4%~7%)、铁铝酸四钙(C₄AF, 2%~4%)。水化产物主要为水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、水化铝酸钙(C-A-H)、钙矾石(AFt)、氢氧化钙(CH)。其中, C₃A 水化速率最快, 易引起水泥基材料急凝、干缩变形^[19]。C₂S 因水化速率慢, 水化前期需水量少, 可避免产生较大收缩应力, 降低裂缝生成几率。另外, 水泥颗粒越大, 水化程度越低, 未完全反应的水泥颗粒可填充水泥基材料内部孔隙、提高抗裂特性^[20]。硫铝酸盐水泥主要由硫铝酸钙、石膏、C₂S 等矿物成分组成, 水化产物主要为 AFt、单硫型水化硫铝酸钙(AFm)、铝胶(AH₃)、C-S-H 凝胶。矿物原料生成 AFt 体积膨胀 120%, CSA 中 C₃A 的含量远小于 OPC, 致使其具有低收缩、高抗渗性等特性^[21]。

矿物掺和料 矿物掺合料可减少水泥用量, 降低水泥基材料的收缩、温度应力, 提高抗裂性。超细硅灰颗粒的填充效应和火山灰效应能够细化水泥基材料孔径、降低孔隙率, 与水化产物 Ca(OH)₂ 发生火山灰反应生成 C-S-H 凝胶、改善内部微观结构, 提高力学性能和抗裂特性。Roy^[22]在水泥基材料中添加 15% 硅灰, 显著提高其耐久性和抗裂性。但硅灰的自团聚效应极大降低其增强效果^[23], 为此, 雷东移^[24]将氨基硅烷共价接枝到硅灰颗粒表面, 极大提高硅灰分散性, 发现改性硅灰有效提高了水泥基材料的抗弯强度。粉煤灰主要通过球形颗粒的滚珠效应和火山灰效应、矿渣主要依靠火山灰效应优化水化产物和硬化浆体内部微观结构、降低孔隙率, 且其中的活性物质(SiO₂、Al₂O₃、CaO 等)可作为晶

核促进水化产物结晶生长^[25], 从而提高水泥基材料整体抗裂性。

集料 相关学者利用橡胶颗粒、碎玻璃粉、铁尾矿砂等人工集料替代石英砂或天然河砂作为高韧性水泥基材料的集料。柔性橡胶颗粒可减少水泥基材料内部孔隙, 优化内部薄弱点的韧性^[27]。Li 等^[28]证实了橡胶颗粒可以显著改善水泥基材料的变形能力, 提高极限应变。郑克仁等^[29]发现钠钙玻璃粉可以释放 Na^+ , 消耗 CH, 降低水化产物的钙硅比(Ca/Si 比), 优化水化产物微观结构, 从而提高水泥基材料韧性。Zhao 等^[30]发现铁尾矿砂替代量在 20%~40% 的 UHPC 具有与对照组相同的力学性能。

外加剂 用于提高水泥基材料抗裂增韧特性的外加剂主要有膨胀剂、减水剂、减缩剂。膨胀剂核心组分与自由水反应生成膨胀产物(CH、AFt、氢氧化亚铁、氢氧化镁)填充孔隙或裂缝^[31]。Liu 等^[32]发现氧化镁膨胀剂可细化孔结构、降低水泥基材料自收缩和干燥收缩。减水剂分子通过静电斥力、引气、润滑、空间位阻等作用打破矿物颗粒的絮凝状态而释放自由水, 减小矿物颗粒间摩擦, 增强水泥基材料韧性。Zhu 等^[33]发现减水剂分子吸附在水泥颗粒、气泡及液滴表面, 产生静电斥力, 提高浆体均匀性, 减少应力集中, 提高水泥基材料韧性。减缩剂通过降低自由及孔隙水的表面张力、蒸发速率、

孔隙溶液离子浓度来减少水泥基材料的收缩^[34](自、干燥、塑性等收缩)。王俊颜等^[35]用减缩剂替代 6% 的水, 使水泥基材料的自收缩降低 48%。Gao 等^[36]发现添加 1%、2%、3%、4% 减缩剂, 水泥基材料的干燥收缩分别降低 27.1%、45%、56.6%、68.7%。Andreas^[37]通过对比裂缝宽度累计频率和开裂时间发现减缩剂可降低水泥基材料的塑性收缩。

各项原材料均不同程度影响水泥基材料的抗裂特性, 水泥、矿物掺合料、集料、水分等大宗组分决定硬化浆体整体密实性, 外加剂通过对水化速率、水化产物微观结构、固体颗粒分散特性、界面过渡区的优化而改善新拌浆体工作性能和硬化后整体特性, 需对各组分进行科学的配合比设计以最大程度改善其抗裂增韧特性。

1.2 纤维增强材料对水泥基材料的抗裂增韧特性

吴中伟^[38]于 2009 年指出“掺加纤维、聚合物的高强、特高强水泥基材料是今后的发展方向”, 纤维与基体通过两者之间的界面传递应力, 界面作用经历 3 个阶段: 弹性、脱黏和滑移^[39]。弹性阶段, 纤维和水泥基体特性共同决定初始裂缝的形成, 但纤维对初始裂缝的抑制作用仅为 10%~20%^[4], 脱黏和滑移过程则决定了纤维对水泥基材料韧性的改善程度。纤维材料按材质可分为有机、无机和金属类, 常用纤维的关键性能如表 1^[4, 40]。

表 1 用于提高水泥基材料抗裂增韧特性的纤维性能^[4, 40]

Table 1 Properties of fibers used to improve the cracking-resistance and toughening characteristics for cement-based materials^[4, 40]

Fiber type		Physical properties					Chemical characteristics		
		Specific gravity/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Tensile strength/ MPa	Elastic modulus/ GPa	Breaking elongation/ %	Softening temperature/ ℃	Stability		Corrosiveness
							Thermostability	Light-stability	
Organic fiber	Polyvinyl alcohol (PVA) fiber	1.23–1.31	1 200–1 600	20.0–40.0	6.0–8.0	225–230	Poor thermostability	Light resistance	Corrosion resistance to acid and alkali
	Polyethylene (PE) fiber	0.92–0.97	1 950–3 000	39.0–100.0	3.1–8.0	125–135		Easy to aging under light irradiation	
	Polypropylene (PP) fiber	0.91–0.97	850–928	2.7–9.0	7.3–30.0	165–173			
Inorganic fiber	Carbon fiber	1.57–1.80	525–4 660	33.0–268.0	0.8–2.4	800–900	High temperature resistance	Light resistance	Corrosion resistance to acid and alkali
	Basalt fiber	2.60–2.80	2 230–4 840	85.8–89.0	2.8–3.1	>1 500			
	Glass fiber	2.40–2.70	2 000–4 000	70.0–80.0	2.0–3.5	500–750			
Metal fiber	Steel fiber	7.80–7.90	350–3 000	200–210	2.0–4.0	1 425–1 510	High temperature resistance	Light resistance	Susceptible to acid and alkali corrosion

1.2.1 有机纤维对水泥基材料的抗裂增韧特性 20 世纪 90 年代, Li^[41]通过调控体积掺量为 2% 的 PVA 纤维、基体和纤维-基体界面之间的协同效应, 首次设计出具有高延性的水泥基复合材料(ECC), 欧洲称

之为应变硬化水泥基复合材料(SHCC), ECC 设计理论建立起了微观力学参数与宏观力学性能之间的桥梁。

有机纤维可极大提高水泥基材料的弹性应变和

整体韧性, 其中, 低弹性模量有机纤维(如 PP 纤维)可一定程度上分散收缩应力, 提高初裂强度, 抑制塑性收缩和开裂, 但水泥基材料一旦开裂, 纤维的低弹性模量无法有效承受水泥基体的高断裂韧度, 较低的纤维桥接应力致使裂缝宽度大、裂缝数量少^[4, 43]; 高弹性模量有机纤维(如 PE、PVA 纤维)可有效抑制水泥基材料塑性开裂, 且较高的纤维桥接应力可有效释放裂缝尖端应力并在开裂面处不断引发新的裂缝, 从而产生一个广泛的非弹性能量吸收区域, 使水泥基材料以多缝开裂的形式提高其延性、并细化裂缝^[24]; 因此, 为使水泥基材料实现多缝开裂, 需调控有机纤维的弹性模量和拉伸强度与水泥基体断裂韧度之间的匹配度。

国内, 徐世烺等^[44]较早利用 PVA 纤维研制出拉伸应变超过 3%、裂缝宽度低于 100 μm 的高延性水泥基材料, 称其为超高韧性水泥基材料(UHTCC), UHTCC 可作为保护层提高建筑结构的抗震性和耐久性, 可用于裂后建筑的修复。余江滔等^[45]利用体积掺量 2% 的 PE 纤维研制出拉伸应变达 12% 的超高延性水泥基材料。Lei 等^[39]基于最紧密堆积理论和 ECC 基本设计方法, 研制出抗压强度超过 160 MPa 且拉伸应变稳定超过 6% 的超高强超高延性水泥基材料(UHS-UHDCC), 并提出 UHS-UHDCC 的应变硬化(PSH)行为设计框架及微观力学本构模型。彭小芹等^[46]发现 PP 纤维可使超高强混凝土的断裂能提高 54.5%。高延性水泥基材料兼具高延、高耐久、高安全等特性, 但纤维的高成本及复杂的施工工艺限制其生产及应用。

1.2.2 无机纤维对水泥基材料的抗裂增韧特性 用于水泥基材料抗裂增韧的无机纤维主要有玄武岩、玻璃、碳纤维等。Ramakrishnan 等^[47]发现玄武岩纤维在水泥基体中具有良好的分散性, 极大提高了水泥基材料的延展性。周健等^[48]利用玄武岩纤维研制出具有应变硬化特性且裂缝宽度在 3 μm 内的 ECC。Wang 等^[49]发现玄武岩纤维能够降低水泥基材料的塑性收缩, 抑制早期开裂、减少裂缝数量。Jawad 等^[50]发现玻璃纤维体积掺量为 1.5% 水泥基材料的抗拉强度提高 10.03%, 且抑制裂缝宽度增长。Safiuddin 等^[51]发现 1%~4% 体积掺量碳纤维增强水泥基材料的 7 d 极限韧性增加了 144.7%~676.4%。

尽管无机纤维弹性模量高、抗拉强度高、耐久性好、与水泥基材料相容性好。但断裂伸长率较低, 柔韧性差, 对韧性提高程度有限。

1.2.3 金属纤维对水泥基材料的抗裂增韧特性 相

较于有机纤维, 金属纤维具有较高的抗拉、抗弯、抗剪和抗扭强度, 钢纤维是应用于水泥基材料的主要金属纤维。超高性能混凝土(UHPC)中乱向分布的钢纤维依靠其超高的抗收缩和抗徐变能力, 可有效抑制水泥基材料内部微裂缝的生成与扩展, 且裂后、失效前, 高强度的桥联纤维仍可承受较高弯曲荷载^[53]。1993 年, 黄政宇^[8]在国内首次研制出抗压强度达到 200 MPa 的超高强度钢纤维增强水泥基材料。杨久俊等^[54]发现掺入钢纤维后水泥基材料的断裂能提高 34 倍。Huang 等^[55]发现水泥基材料中钢纤维掺量为 2% 时, 长度 20 mm 时要比 6 mm 时的抗弯强度和韧性分别提高 45%、195%。柴鑫伟等^[56]认为, 低掺量时长钢纤维, 而高掺量时短钢纤维, 更有利于抵抗开裂。上海虹桥机场高架车道钢纤维混凝土道面共 6400 m^2 , 钢纤维体积掺量为 1.25%, 实际应用证明钢纤维增强水泥基材料明显提高了高架车道的抗裂性和耐久性。

尽管钢纤维能显著提高水泥基材料的韧性及抗压强度, 但钢纤维自重重大, 易结团下沉、分布不均, 致使其有效利用率低(仅 40% 左右)^[59], 单位体积内纤维数量较有机类少的多、与水泥基体粘结性不足, 无法实现多缝开裂, 韧性提升极限受限, 且海洋环境下易锈蚀, 影响水泥基材料长期耐久性。

1.2.4 混杂纤维对水泥基材料的抗裂增韧特性 为弥补单一纤维性能的不足, 可掺入 2 种以上尺度、特性的纤维来提高水泥基材料的韧性。Banthia 等^[60]认为混杂纤维应分为 3 种: 基于纤维本构关系的混杂、基于纤维尺寸的混杂、基于纤维功能的混杂。邓宗才等^[61]发现钢纤维和聚烯烃纤维复合增强水泥基材料的韧性比单掺钢纤维时高 70%。张君等^[62]以 PVA 纤维和钢纤维混杂制备出高强度、高延性和低裂缝宽度的水泥基材料。柴鑫伟等^[56]发现复掺 PE 纤维和钢纤维的水泥基材料相比单掺 PE 纤维时的开裂应力高。钢纤维可弥补有机纤维硬度不足的缺陷, 有机纤维可补充钢纤维柔韧性不足的问题, 不同纤维混杂需科学设计长度比、掺量比, 实现拉伸强度、弹性模量、延伸率等特性的最大互补效应。

1.2.5 纤维分散性对水泥基材料的抗裂增韧特性 优异的纤维分散性是充分发挥其在水泥基材料中增强效果的基础, 分散度越高, 有效利用率越高, 桥联作用发挥更加充分, 对水泥基材料力学、变形和耐久性的提高更有利^[63]。分布不均的纤维不仅会成为水泥基材料内部的缺陷, 更减少了桥联纤维的数量, 致使诱发裂缝的尖端能量降低, 裂缝更

易生成,并快速向无纤维区域扩展。Tosun 等^[64]发现高纤维分散性能够提高 ECC 的拉伸性能。张倩倩等^[65]利用图像分析技术发现,合适的基体流变性可诱使较高的纤维轴向取向系数,提高纤维有效利用率,增强力学性能。Ding 等^[66]证实纤维取向越接近受力方向,ECC 的应变硬化特性越显著。因此,应科学调控水泥基体流变性,确保较高的纤维分散度,进而保证优异的力学、变形、耐久等性能。

1.3 水胶比和砂胶比对水泥基材料抗裂性能的影响

水胶比(w/b 比) w/b 比较低时,水分的缺失致使塑形阶段水泥基材料的泌水速率小于蒸发速率,内部收缩应力增大,当自身强度不足以抵抗收缩应力时则开裂^[67]; w/b 比较大时,占据毛细空隙的多余水分蒸发后引起收缩、开裂,并降低密实度、强度^[68]。一定范围内,合理的较低 w/b 比有利于水泥基材料抗裂性能与强度的提高。Han 等^[69]发现水胶比为 0.3 时,碳纤维增强水泥基材料的延性和抗拉强度优于 0.25 和 0.35 时。Mohammed 等^[70]发现水泥基材料的 w/b 比从 0.14 降到 0.12 时,断裂能提高 20% 左右。

砂胶比(s/b 比) 砂子可在水泥基材料内部形成骨架结构、填充孔隙,并提高新拌浆体分散纤维的剪切应力,从而提高水泥基体断裂韧度、减小收缩应力、促使纤维增强水泥基材料多缝开裂行为的实现^[71]。 s/b 比过小不利于骨架结构的形成,降低水泥基体断裂韧度,减小对水分迁移的阻碍作用和对水泥基体收缩变形的约束作用。王玉清等^[72]证实低 s/b 比时,PVA 纤维增强水泥基材料的自收缩高于高 s/b 比时。砂胶比过高,基体断裂韧度增大,增大纤维拔出过程中与基体之间的摩擦应力,不利于纤维拔出和新裂缝的启动,降低水泥基材料的应变硬化多缝开裂能力。Zhu 等^[73]发现当 s/b 比从 0.36 增加到 0.64 时,ECC 的极限抗拉强度增大 25%,但拉伸应变下降了 83%。

1.4 养护制度对水泥基材料抗裂性能的影响

常见的养护方式为:自然、标准、蒸汽、蒸压等,高温可加快胶凝体系水化速率,快速生成大量水化产物,高压可降低孔隙率、改善孔径分布。吴建东等^[74]发现 UHPC 的初裂拉伸应力与蒸养时间和温度正相关。Zheng 等^[75]对比 4 种相对湿度(30%、50%、70%和 98%)对水泥基材料断裂性能的影响,发现高湿度下的水泥基材料拥有较大断裂能、较高有效断裂韧性和较长特征长度。因此,合理的养护条件可以加速胶凝体系水化并优化微观结构,一定

程度上提高韧性。

刘建忠等^[76]认为水泥基材料的抗裂特性是一个系统性的科学技术问题,不仅要优选原材料、抗裂功能组分进行科学的配合比设计,同时要建立合理的制备工艺,并辅以科学的养护制度,从而确保水泥基材料优异的抗裂特性。

2 水泥基材料介观尺度抗裂增韧机理研究进展

介观尺度增强材料如空心玻璃微珠、粉煤灰微珠、晶须等,可通过填充、火山灰、桥联等物化效应提高水泥基材料的抗裂性能,及微纳米级水泥基渗透结晶材料通过渗透结晶原理修复微结构缺陷。

2.1 微珠增强材料对水泥基材料的抗裂增韧特性

空心玻璃微珠(HGM)的尺寸一般在 2~5 μm ,空心球状,减重的同时可起到滚轴^[77]、填充效应,提高工作性能、降低孔隙率、减少裂缝。Li 等^[78]利用空心玻璃微珠研制出具有显著应变硬化与多缝开裂特性的轻质 PVA-ECC。Al-Gemeel 等^[79]证明 HGM 能够显著提高纤维增强水泥基材料的初裂韧性。粉煤灰微珠(FAM)的活性介于粉煤灰与硅灰之间,多为微米级。Maeijer 等^[80]利用小于 4.6 μm 的 FAM 填充水泥颗粒之间的空隙并通过成核结晶促进水泥水化,有效提高水泥基材料的和易性、断裂韧性和耐久性^[81–82]。

2.2 晶须增强材料对水泥基材料的抗裂增韧特性

晶须是一种单晶状微米级短纤维,机械强度来源于相邻原子间作用力,具有高抗拉强度(3~6 GPa)、高弹性模量、高熔点等特性,研究证实碳酸钙和硫酸钙晶须可以显著改善水泥基材料的断裂韧性。2005 年 Rossi 等^[83]为实现水泥基材料的梯度阻裂,提出多尺度纤维增强水泥基材料的概念,认为晶须对水泥基材料具有良好的增韧功效:① 抑制微裂缝生成、延缓裂缝扩展;② 促使小角度裂缝发生方向偏转,增大裂缝扩展范围,促进破坏能耗散;③ 成核效应促进水泥水化、填充裂缝;④ 细化孔径、优化孔隙分布^[84–85]。宋梦凡等^[86]证实 2%碳酸钙晶须体积掺量时,水泥基材料抗折强度提高 20.9%。李东旭^[87]发现硫酸钙晶须可以桥联细小裂缝,但水泥基体断裂面上大多数晶须被拔出而非拔断,表明晶须与水泥基体的粘结强度较弱。

2.3 渗透结晶材料对水泥基材料的抗裂增韧特性

渗透结晶材料核心组分在水泥碱性环境中遇水可形成不溶于水的结晶物(式 1),堵塞孔隙、修复

裂缝(图 1), 减少水泥基材料的缺陷、抑制内部裂缝的产生与扩展, 提高断裂强度、耐久性^[88]。杨敏毅等^[89]发现水泥基渗透结晶材料(CCCW)赋予水泥基材料良好的裂缝自愈能力、降低开裂深度, 黄涛等^[90]发现充足的水分可提高 CCCW 对裂缝的修复效果。渗透结晶材料的渗透结晶能力取决于其中活性物质的活化程度, 然而活性物质硅酸钠胶体、碳酸钠、铝酸盐等多存在自团聚、渗透深度小等缺陷。薛绍祖等^[91]指出由于渗透结晶材料中活性物质自团聚效应的限制, 其对宽度 0.5 mm 以上裂缝的修复作用欠佳。

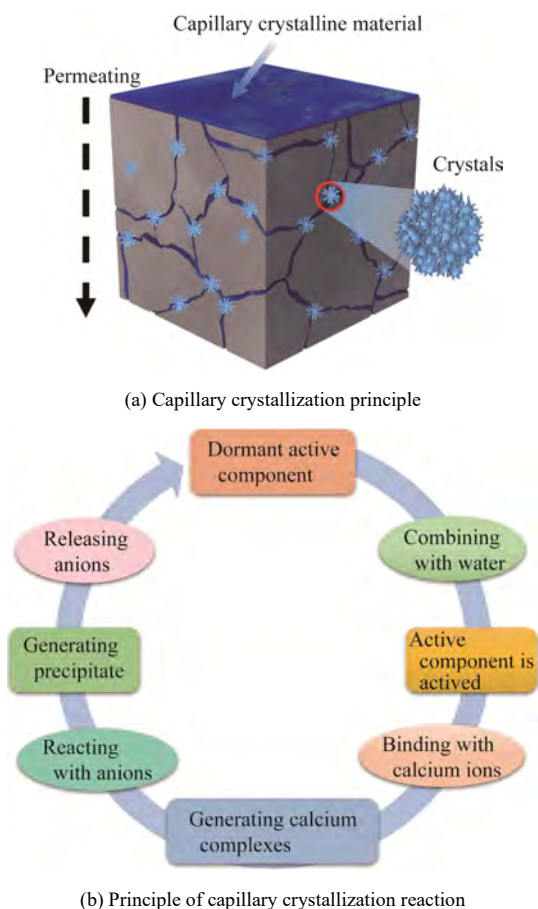


图 1 渗透结晶材料抗裂增韧原理

Fig. 1 Cracking-resistance and toughening principle of capillary crystalline material

3 水泥基材料纳观尺度抗裂增韧机理研究进展

C-S-H 凝胶被称为水泥基材料的“基因”, 占水化产物含量的 60%~70%, 是强度产生的根源^[92], 其微观结构特性决定了水泥基体的固有韧性, 用于改善 C-S-H 凝胶等水化产物微观结构的纳米尺度增韧

组分有纳米增强材料、微生物、纳米聚合物、C-S-H 凝胶等。

3.1 纳米增强材料对水泥基材料的抗裂增韧特性

纳米 TiO_2 、纳米 SiO_2 、纳米 CaCO_3 等纳米颗粒主要通过填充、成核、火山灰、键合等效应提高水泥基材料的抗裂增韧特性, 纳米纤维-碳纳米管、纳米片-石墨烯则主要通过成核、桥联及键合效应发挥功效(图 2~图 4)。

3.1.1 纳米颗粒对水泥基材料的抗裂增韧特性

Jayapalan 等^[93]利用等温量热仪发现纳米 TiO_2 的成核效应有效促进了水泥水化, 且粒径越小, 促进效果越显著。Yang 等^[94]利用红外光谱和扫描电镜发现, 纳米 TiO_2 优化了水泥基材料的微观结构, 减小收缩、抑制开裂。徐迅^[95]发现纳米 SiO_2 可加速水泥水化、提高 C-S-H 凝胶(式 2)含量并提高水泥基体密实度。王冲等^[96]发现, 纳米 CaCO_3 的成核效应可促进水泥水化, 并与水化铝酸钙反应生成水化碳铝酸钙, 增强纳米颗粒-胶凝颗粒界面特性。Wu 等^[97]发现纳米碳酸钙掺量从水泥质量的 3.2%增加到 6.4%时, 孔隙率从 12%增加到 18.3%, 抗弯强度下降 14%。这是因为纳米颗粒发生团聚, 成核点位数量减少, 危害孔隙结构, 降低增韧效果。

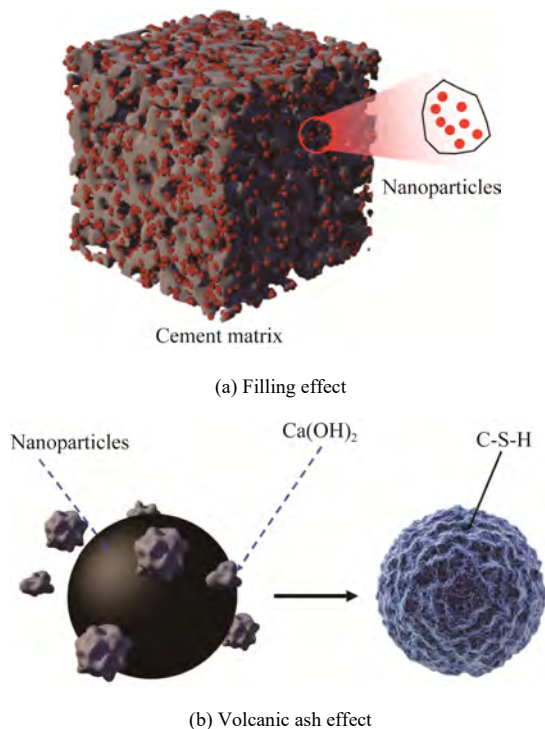
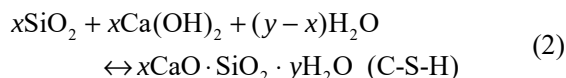


图 2 纳米颗粒的增韧原理

Fig. 2 Toughening principle of nano-particles

3.1.2 纳米纤维对水泥基材料的抗裂增韧特性 纳米纤维-碳纳米管(直径 2~20 nm, 长度 10~30 μm), 力学性能优异(弹性模量>1 TPa, 拉伸强度>1 GPa)。Tyson 等^[98]发现碳纳米管可提供多点位促使 C-S-H 凝胶更易在其表面生成。陈星宇^[99]发现碳纳米管能够增加高密度 C-S-H 凝胶的比表面积, 提高其密实度。Dong 等^[100]发现镀镍碳纳米管(Ni-CNT)具有良好的分散性, 可有效抑制水泥基材料微细裂缝的生成及发展(图 3)。

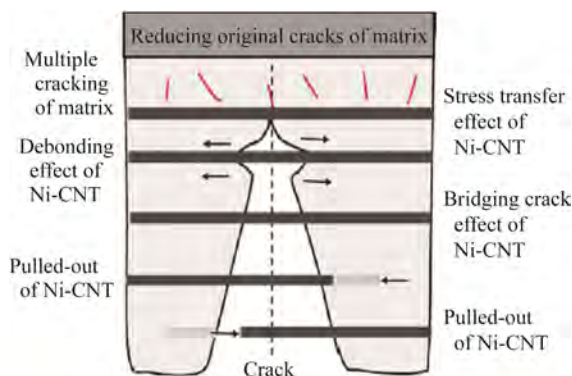


图 3 碳纳米管的“桥联效应”^[100]

Fig. 3 ‘Bridging effect’ of carbon nanotubes^[100]

3.1.3 纳米片对水泥基材料的抗裂增韧特性 石墨烯独特的二维片状褶皱结构能为 C-S-H 凝胶的生长提供模版, 促进水泥水化, 降低毛细孔(10~5 000 nm)孔隙率和总孔隙率、增加凝胶孔(<10 nm)数量(图 4), 优异的抗拉性能(125 GPa)能够起到良好的桥联效应。Yu 等^[101]证实石墨烯可有效抑制 UHPC 微裂缝的产生, 增强内部界面区的断裂韧性。Wan 等^[102]发现石墨烯二维片状褶皱结构使其具有较大的比表面积, 加之表面的-COOH 与-OH 具有催化效应并可与 C-S-H 凝胶发生键合(图 4), 促进水泥水化并改善水化产物微观结构。Yao 等^[103]将葡萄糖作为碳源, 在

水泥颗粒表面原位生长石墨烯, 实现石墨烯的高分散性, 促进水泥基材料致密化及抗弯强度的提高。

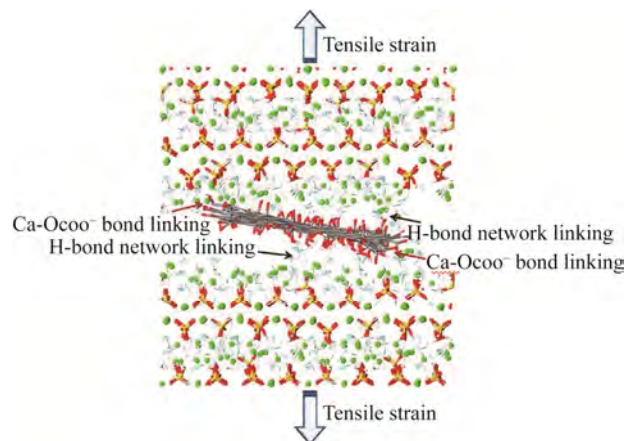


图 4 石墨烯的“键合效应”^[102]

Fig. 4 ‘Bonding effect’ of graphene^[102]

尽管纳米尺度增韧组分具有较好的增韧效果, 但纳米材料因其过高的比表面积, 普遍存在自团聚缺陷, 需对其预分散以充分发挥其增韧效果。

3.2 微生物修复技术对水泥基材料的抗裂增韧特性

微生物技术是一种较为新颖的修复技术, 依靠微生物的有氧光合、产氧光合、甲烷氧化、硫循环、氮循环、有机物代谢转化等生化作用^[104], 生成以碳酸钙为代表的难溶性矿物以修复缺陷(图 5)。Li 等^[105]从宜兴山娟洞分离出具有碳酸钙沉淀能力的细菌, 利用扫描电镜、X 射线衍射和热重分析发现其在水泥基材料中可形成方解石。Alengaram 等^[106]利用微型藻类的生物作用形成方解石(CaCO_3)以封闭微裂缝。钱春香等^[107]利用固碳菌矿化作用产生的碳酸钙填充裂缝, 实现对宽度 0.1~0.2 mm 裂缝的 100%修复。水泥基材料难以以为微生物提供良好的生存环境, 且该技术仅适用于微小缺陷的修复。

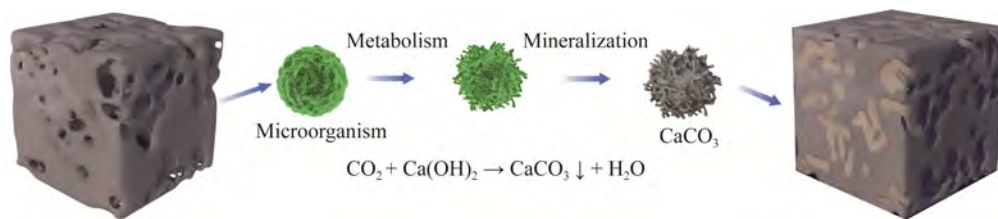


图 5 微生物修复水泥基材料缺陷的原理

Fig. 5 Principle which microorganism repairs the defects in cement-based materials

3.3 C-S-H 凝胶微结构优化对水泥基材料的抗裂增韧特性

C-S-H 凝胶具有短程有序、长程无序的特性,

不同水化程度产生的 C-S-H 凝胶具有不同的 Ca/Si 比和凝胶水含量, Ca/Si 一般为 0.6~2.0^[108], 导致了不同的 C-S-H 凝胶硅氧四面体聚合度和力学性能^[4]。

Ca/Si 降低, C-S-H 凝胶中间层的凝胶水含量减少, 键能高的 Si—O—Si 键含量增加, 键能低的 O—Ca 键含量减少, C-S-H 凝胶微观断裂韧性增强^[109](图 6)。Wang 等^[110]利用生石灰和亲水性气相 SiO₂ 混合粉末制备不同 Ca/Si 比的 C-S-H 凝胶, 发现 Ca/Si 比越低, 50 nm 以下孔隙数量越少, C-S-H 凝胶密实度越高。林伟辉等^[111]基于分子动力学建立了不同 Ca/Si 比的 C-S-H 凝胶分子模型, 发现当 Ca/Si 比为 1.0 时, C-S-H 凝胶的抗拉强度最大。

C-S-H 凝胶的硅氧四面体聚合度是影响自身断裂韧性的重要因素。朱哲誉等^[112]利用 BSE-Raman 技术发现了 C-S-H 凝胶中 Q1、Q2、Q3 硅氧四面体链的结构信息, 硅链链长增加、甚至形成较链, 分子黏聚度提高, C-S-H 凝胶聚合度提高, 微观断裂韧性提高。Kumar 等^[113]通过分子模拟表明, 当 C-S-H 凝胶中 Q2 硅氧四面体链全部转化为硅酸盐长链时, 水泥基材料抗拉强度可提高 66.7%。Hou 等^[114]发现分散良好的纳米 SiO₂ 可加速 CH 的消耗, 有助于降低 C-S-H 凝胶的 Ca/Si 比。Yu 等^[115]通过热力学模拟发现, 增加 CO₂ 浓度时, 较高 Ca/Si 比的 C-S-H 可以完全脱钙为较低 Ca/Si 比的 C-S-H。降低 C-S-H 凝胶 Ca/Si 比、提高其硅氧四面体聚合度, 能够提高高键能 Si—O—Si 键的含量、优化微观结构, 提高 C-S-H 凝胶的微观断裂韧性。

3.4 纳米聚合物对水泥基材料的抗裂增韧特性

纳米聚合物对水泥基材料的增韧机理包括物理、化学双重作用。物理作用: 纳米聚合物成膜覆盖于内部水化产物表面、优化孔结构、填充裂缝^[117]; 化学作用: 可与水化产物形成有机-无机复合结构, 提高水化产物微观结构柔韧性^[118]。Liu 等^[119]采用丙

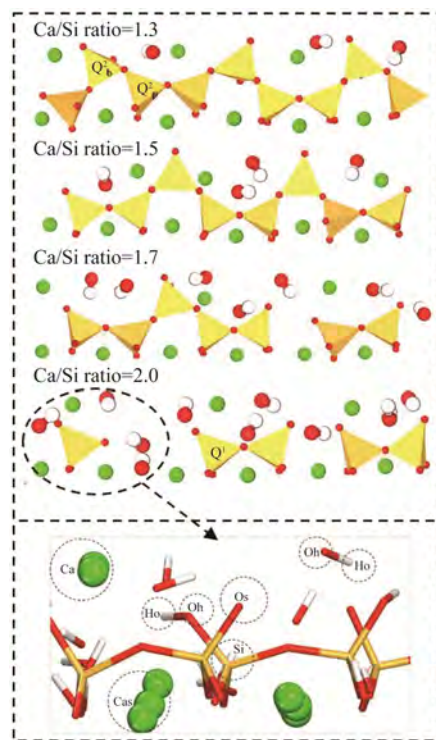
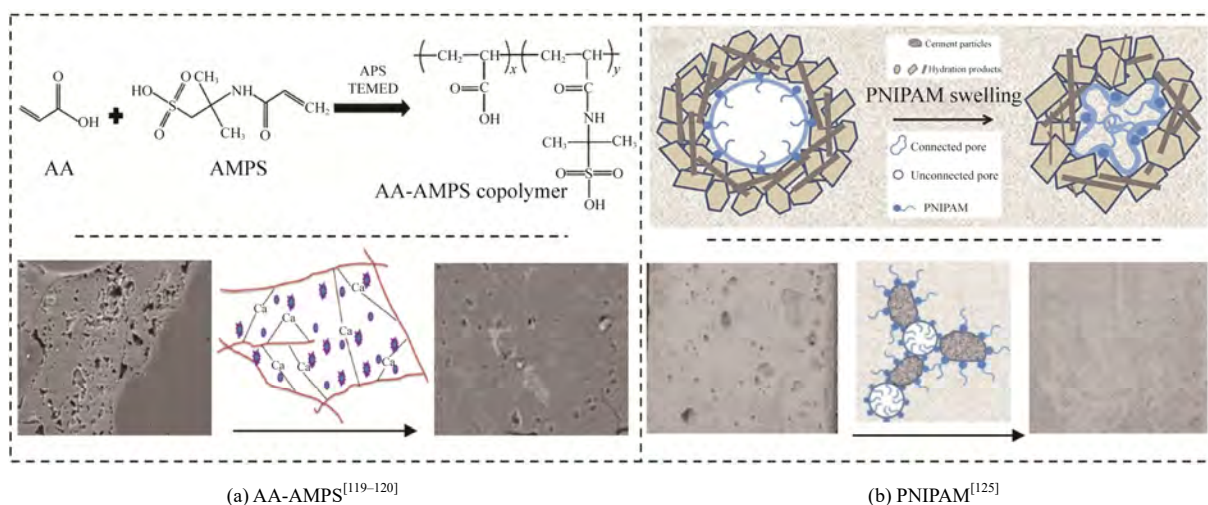


图 6 不同 Ca/Si 比的 C-S-H 凝胶分子模型^[116]

Fig. 6 Molecular model of C-S-H gel with different Ca/Si ratio^[116]

烯酸(AA)与 1-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸(AMPS)形成的聚合物(AA-AMPS)改性水泥基材料, 在 AMPS 中引入羧基, 从而增强与钙离子的配位能力, 加速并强化聚合物-水化产物复合相网络结构的形成, AA-AMPS 共聚物还可填充水泥基材料内部缺陷, 多重作用提高水泥基材料的整体韧性(见图 7a)。Wang 等^[120]发现 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)能够分散水泥颗粒, 且吸附在有害孔表面吸水膨胀后可填充孔隙(图 7b), 提高密实度及整体韧性。熊剑平等^[121]



(a) AA-AMPS^[119-120]

(b) PNIPAM^[125]

图 7 聚合物对水泥基材料的增韧原理

Fig. 7 Toughening principle of polymer for cement-based materials

发现, 利用羧基丁苯乳液改性的水泥基材料比普通水泥基材料的孔隙率低 47%、平均孔径小 41%, 断裂韧性更高。马晓等^[122]发现 C-A-S-H 凝胶的抗裂性优于 C-S-H 凝胶, 利用含铝聚合物在 C-S-H 凝胶中形成 Al—Si 键, 促使 C-S-H 凝胶具有更大的变形特性。Tang 等^[123]证实阳离子聚氨酯聚合物能够调节 CH 晶体微观结构, 其掺量为 0.5% 时, 水泥基体的 3 d 抗拉强度提高 93.63%。Du 等^[124]证实环氧树脂表面的羟基与 C-S-H 凝胶中的 Ca^{2+} 通过静电作用结合, 从而提升水泥基材料的拉伸性能。但是, 纳米聚合物除了自团聚问题外, 还需克服与水泥基体不兼容的问题。

4 水泥基材料多尺度复合抗裂增韧机理研究进展

为克服单一尺度增韧组分无法对非均质水泥基材料内不同尺度的缺陷均发挥增韧效果的不足, 利

用多个尺度增韧组分对水泥基材料组合增强, 实现跨尺度增韧组分之间增韧效应的优势互补。夏伟等^[126]在碳纤维(CF)表面引入碳纳米管(CNTs) (见图 8a), 研发出一种表面粗糙度与比表面积显著增大的新型纤维材料(CNTs-CF), CF 与 CNTs 互为补充, 可同时对宏观、微观多尺度裂缝进行桥联, 对水泥基材料的增韧效果远优于单一 CF 增强时。Cui 等^[127]证实经碳纳米管改性的碳纤维与水化产物具有更好的粘接性(见图 8a)。Yang 等^[128]利用毫米级钢纤维、微米级 CaCO_3 晶须、纳米级石墨烯 3 种尺度增韧组分制备出超高韧性水泥基材料, 开裂时, 石墨烯率先对纳米尺度裂缝进行桥接, 裂缝扩展, CaCO_3 晶须和钢纤维依次在相应尺度下对裂缝起到桥联效应(见图 8b), 相比单一钢纤维增强时其抗弯强度提高 29.9%。对于多尺度增韧组分之间的耦合效应, 需对其弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率、物理形状、化学性能等特性之间的混合效应进行科学设计, 以最大程度激发各尺度增韧组分的共轭增韧效果。

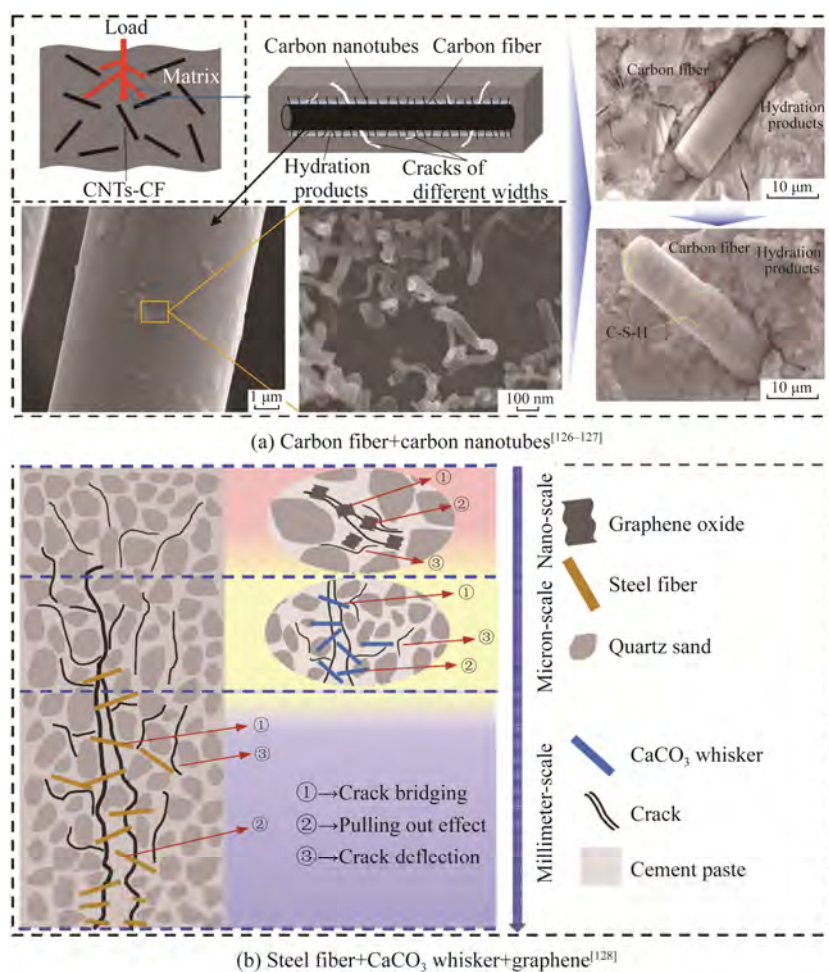


图 8 跨尺度增韧组分对水泥基材料的增韧机理

Fig. 8 Toughening mechanisms of cross-scale toughening components on cement-based materials

5 结论与展望

水泥基材料为多相多尺度结构,影响其韧性的因素众多,从宏、介、纳观多尺度对原材料和增韧组分的增韧机理进行概述:

1) 宏观尺度:各项原材料均不同程度影响水泥基材料的抗裂性,硫铝酸盐水泥的高A_Ft生成量使水泥基材料具有低收缩、高抗渗性等特性;矿物掺和料依靠滚珠、填充、火山灰等效应提高水化产物含量、改善微观结构;柔性橡胶颗粒可减少水泥基材料内部孔隙,优化内部薄弱点的韧性;外加剂通过膨胀、分散、静电互斥等作用细化孔径、提高浆体均匀性、调控体积变形;高纤维分散性是发挥其桥联效应的前提;合理的水胶比、砂胶比可减小收缩应力、优化浆体骨架结构;科学的养护制度可以加速胶凝体系水化并优化微观结构。因此,需科学设计配合比、优化制备工艺和养护制度以最大程度改善水泥基材料抗裂特性。

当前,原材料用量对整体韧性贡献度的计算方法尚属空白,缺乏以韧性为目标的配合比设计方法;良好的纤维-基体界面特性是发挥纤维桥联效应的关键,行之有效的纤维表面物理、化学改性方法仍是研究热点。

2) 介观尺度:微珠类、晶须类增韧组分通过滚轴、填充、成核、桥联等物化效应提高和易性、减小孔隙、促进水化、桥接裂缝,需要注意的是应降低轻质微珠对断裂强度的负面效应;晶须通过微米级尺寸效应实现对微细裂缝的有效桥联,并促进水泥水化、填充孔隙;渗透结晶材料遇水可渗入水泥基材料内部生成不溶性结晶物填充孔隙、修补裂缝。

然而,针对微珠掺量与断裂韧性之间的正负效应数量关系研究不足,缺乏极大发挥微珠增韧效应时的最佳用量计算和设计方法;晶须较低的表面摩擦系数致使其与水泥基体的粘结强度较弱,如何增强晶须-基体界面特性需深入研究;渗透结晶材料中的活性物质多存在自团聚、渗透深度不足等缺陷,需针对不同活性物质研发高效分散剂。

3) 纳观尺度:纳米增强材料通过极高的反应活性、键合效应、尺寸效应,促进水化、优化C-S-H凝胶微观结构、改善纳米级缺陷;微生物通过光合、氧化、代谢等生化作用产生不溶性矿物修复缺陷;降低C-S-H凝胶Ca/Si比,可以减少凝胶中间层的凝胶水含量、提高高键能Si—O—Si键的含量、提高分子黏聚度,提高C-S-H凝胶的微观断裂韧性;

纳米聚合物可成膜覆盖水化产物表面、与水化产物形成有机-无机复合网络结构而提高整体韧性。

目前,利用纳米增强材料自身官能团化学特性和电荷特征而建立其高效分散剂选择方法等方面的研究并不充分;如何优化并长期保证微生物在碱性环境中的生存环境及快速触发其矿化作用需深入研究;缺乏从微纳尺度调控凝胶晶粒生长方式以提高晶粒紧密堆积程度的C-S-H凝胶微观结构有序性提升方法;如何有效提升有机类纳米聚合物与无机胶凝体系之间的分子键合强度需深入研究。

4) 多尺度复合:跨尺度复合增韧组分通过偶联映射效应弥补单一组分无法对不同尺度缺陷均发挥增韧效果的不足。

针对跨尺度增韧组分间的力学、韧性传递效率未能深入研究,致使跨尺度组合机制和影响因素不明确。

参考文献:

- [1] CHANG Y, HUANG Z Y, RIES R J, et al. The embodied air pollutant emissions and water footprints of buildings in China: A quantification using disaggregated input-output life cycle inventory model[J]. J Clean Prod, 2016, 113: 274-284.
- [2] 蒋海昆, 李永莉, 曲延军, 等. 中国大陆中强地震序列类型的空间分布特征[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 389-398.
JIANG Haikun, LI Yongli, QU Yanjun, et al. Acta Seismol Sin (in Chinese), 2006, 28(4): 389-398.
- [3] YAZICI H, YARDIMCI M Y, AYDIN S, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(3): 1223-1231.
- [4] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 47-54.
LIU Jiaping, TANG Jinhui, HAN Fangyu. China Civ Eng J (in Chinese), 2021, 54(10): 47-54.
- [5] MA H, CAI J M, LIN Z, et al. CaCO₃ whisker modified Engineered Cementitious Composite with local ingredients[J]. Constr Build Mater, 2017, 151: 1-8.
- [6] 杜志芹, 孙伟. 纤维和引气剂对现代水泥基材料抗渗性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(3): 614-618.
DU Zhiqin, SUN Wei. J Southeast Univ Nat Sci Ed (in Chinese), 2010, 40(3): 614-618.
- [7] YAO H, FAN M H, HUANG T J, et al. Retardation and bridging effect of anionic polyacrylamide in cement paste and its relationship with early properties[J]. Constr Build Mater, 2021, 306: 124822.
- [8] 黄政宇, 沈蒲生, 蔡松柏. 200 MPa 超高强钢纤维混凝土试验研究[J]. 混凝土, 1993(3): 3-7.
HUANG Zhengyu, SHEN Pusheng, CAI Songbai. Concrete (in Chinese), 1993(3): 3-7.
- [9] 韩建平, 柴巧利. 高延性纤维增强水泥基复合材料研究应用新进展[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(3): 18-23.
HAN Jianping, CHAI Qiaoli. J Civ Eng Manag (in Chinese), 2011, 28(3): 18-23.

- [10] WU J D, GUO L P, CAO Y Z, et al. Mechanical and fiber/matrix interfacial behavior of ultra-high-strength and high-ductility cementitious composites incorporating waste glass powder[J]. *Cem Concr Compos*, 2022, 126: 104371.
- [11] 任增洲. 砂率对混凝土塑性收缩开裂性能的影响[J]. *四川建材*, 2021, 47(6): 10.
REN Zengzhou. *Sichuan Build Mater* (in Chinese), 2021, 47(6): 10.
- [12] 阚黎黎, 王飞, 邬海江, 等. 不同养护条件下混杂钢纤维超高性能混凝土的早龄期力学性能及开裂特性[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(2): 429–437.
KAN Lili, WANG Fei, WU Haijiang, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2022, 50(2): 429–437.
- [13] 张高展, 葛竞成, 丁庆军, 等. 轻质超高性能混凝土的制备及性能形成机理[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 381–390.
ZHANG Gaozhan, GE Jingcheng, DING Qingjun, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(2): 381–390.
- [14] LI L, CAO M L, YIN H. Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste[J]. *Cem Concr Compos*, 2019, 104: 103350.
- [15] 徐建妙, 谢卡茜, 程峰, 等. 基于芽胞的混凝土微生物原位修复技术研究进展[J]. *生物工程学报*, 2021, 37(7): 2351–2365.
XU Jianmiao, XIE Ixie, CHENG Feng, et al. *Chin J Biotechnol* (in Chinese), 2021, 37(7): 2351–2365.
- [16] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J, et al. Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 119: 103992.
- [17] LIANG R, LIU Q, HOU D S, et al. Flexural strength enhancement of cement paste through monomer incorporation and *in situ* bond formation[J]. *Cem Concr Res*, 2022, 152: 106675.
- [18] 孔祥明, 卢子臣, 张朝阳. 水泥水化机理及聚合物外加剂对水泥水化影响的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(2): 274–281.
KONG Xiangming, LU Zichen, ZHANG Chaoyang. *J Chin Ceram Soc*, 2017, 45(2): 274–281.
- [19] 宋少民, 王宇杰, 李统彬. 新型胶凝材料体系的抗裂性能[J]. *材料导报*, 2021, 35(增刊 1): 206–210.
SONG Shaomin, WANG Yujie, LI Tongbin. *Mater Rep* (in Chinese), 2021, 35(S1): 206–210.
- [20] BENTZ D P, HAECKER C J. An argument for using coarse cements in high-performance concretes[J]. *Cem Concr Res*, 1999, 29(4): 615–618.
- [21] KE G J, ZHANG J, LIU Y Z. Shrinkage characteristics of calcium sulphoaluminate cement concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 337: 127627.
- [22] ROY K, SIL A. Effect of partial replacement of cement by silica fume on hardened concrete[J]. *Int J Emerg Technol Adv Eng*, 2012, 2(8): 472–475.
- [23] BODDY A M, HOOTON R D, THOMAS M D A. The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction[J]. *Cem Concr Res*, 2000, 30(7): 1139–1150.
- [24] 雷东移. 生态纳米超高强超高延性水泥基复合材料设计与关键性能[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LEI Dongyi. Design and key performance of eco-nano ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2019.
- [25] HSU S, CHI M, HUANG R. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 176: 250–258.
- [26] PARK B, CHOI Y C. Hydration and pore-structure characteristics of high-volume fly ash cement pastes[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 278: 122390.
- [27] 王龙, 范璐璐. 橡胶颗粒水泥混凝土与基质混凝土路用性能对比分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(3): 77–81.
WANG Long, FAN Lulu. *J Harbin Inst Technol* (in Chinese), 2016, 48(3): 77–81.
- [28] LI L J, RUAN S H, ZENG L. Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 70: 291–308.
- [29] 郑克仁, 陈楼, 周瑾. 玻璃粉的火山灰反应及对水化硅酸钙组成的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 202–210.
ZHENG Keren, CHEN Lou, ZHOU Jin. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(2): 202–210.
- [30] ZHAO S J, FAN J J, SUN W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2014, 50: 540–548.
- [31] ABDELRAZIK A, KHAYAT K H. Effect of type and content of expansive agent on performance of fiber-reinforced concrete with adapted rheology[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 314: 125610.
- [32] LIU K Z, SHUI Z H, SUN T, et al. Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of self-compacting concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 211: 120–129.
- [33] ZHU W W, FENG Q G, LUO Q, et al. Effect of a specific PCE superplasticizer on the initial dissolution and early hydration of Portland cement[J]. *J Build Eng*, 2022, 46: 103786.
- [34] ZHAN P M, HE Z H. Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 201: 676–690.
- [35] 王俊颜, 庄云芳, 刘非凡, 等. 减缩剂和 PVA 纤维对超轻水泥复合材料收缩开裂行为的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(7): 744–750.
WANG Junyan, ZHUANG Yunfang, LIU Feifan, et al. *J Build Mater* (in Chinese), 2022, 25(7): 744–750.
- [36] GAO S L, WANG Z, WANG W C, et al. Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC)[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 179: 172–185.
- [37] LEEMANN A, NYGAARD P, LURA P. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2014, 46: 1–7.
- [38] 叶启汉. 纤维水泥制品行业纤维增强水泥及其制品论文选集. 1: 1960–2009[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2010.
- [39] LEI D Y, LI M G, WANG P G, et al. Design of ultra-high strength, ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC)[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 322: 125914.
- [40] ZHANG D, YU J, WU H L, et al. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. *Compos Part B Eng*, 2020, 184: 107741.
- [41] LI Victor C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(4): 531–536.
LI V C. *J Chin Ceram Soc*, 2007, 35(4): 531–536.
- [42] 高淑玲, 王文昌. 应变硬化水泥基复合材料性能与应用研究进展[J]. *材料导报*, 2019, 33(21): 3620–3629.
GAO Shuling, WANG Wenchang. *Mater Rep* (in Chinese), 2019, 33(21): 3620–3629.
- [43] ZHAO Q X, YU J C, GENG G Q, et al. Effect of fiber types on creep behavior of concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 105: 416–422.

- [44] 徐世煌, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 32–41.
XU Shilang, LI Hedong. China Civ Eng J (in Chinese), 2009, 42(9): 32–41.
- [45] 俞可权, 余江滔, 李凌志, 等. 可用于无筋建造的超高延性水泥基复合材料力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 49(2): 29–35.
YU Kequan, YU Jiangtao, LI Lingzhi, et al. J Build Struct (in Chinese), 2019, 49(2): 29–35.
- [46] 漆贵海, 彭小芹, 叶浩文, 等. 聚丙烯纤维对超高强混凝土断裂特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3): 487–492.
QI Guihai, PENG Xiaoqin, YE Haowen, et al. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(3): 487–492.
- [47] RAMAKRISHNAN, TOLMARE N S, BRIK V. Performance evaluation of 3-d basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete[R]. NCHRP-IDEA Project 45, Washington: Transportation Research Board, 1998: 96.
- [48] 张允飞, 周健, 徐名凤, 等. BF-ECC 力学性能及应变硬化机理研究[J]. 混凝土, 2023(2): 57–61.
ZHANG Yunfei, ZHOU Jian, XU Mingfeng, et al. Concrete (in Chinese), 2023(2): 57–61.
- [49] WANG X Z, HE J, MOSALLAM A S, et al. The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC)[J]. Adv Mater Sci Eng, 2019, 2019: 1–17.
- [50] AHMAD J, GONZÁLEZ-LEZCANO R A, MAJDI A, et al. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis[J]. Materials, 2022, 15(15): 5111.
- [51] SAFIUDDIN M, ABDEL-SAYED G, HEARN N. Flexural and impact behaviors of mortar composite including carbon fibers[J]. Materials, 2022, 15(5): 1657.
- [52] GUO Y H, HU X Y, LV J F. Experimental study on the resistance of basalt fibre-reinforced concrete to chloride penetration[J]. Constr Build Mater, 2019, 223: 142–155.
- [53] 张秀芝, 毕梦迪, 刘同军, 等. 钢纤维混凝土中纤维分布特性影响因素研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1732–1742.
ZHANG Xiuzhi, BI Mengdi, LIU Tongjun, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(8): 1732–1742.
- [54] 杨久俊, 刘俊霞, 韩静宜, 等. 大流动度超高强钢纤维混凝土力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 1–6.
YANG Jiujun, LIU Junxia, HAN Jingyi, et al. J Build Mater (in Chinese), 2010, 13(1): 1–6.
- [55] HUANG H H, GAO X J, KHAYAT K H. Contribution of fiber alignment on flexural properties of UHPC and prediction using the Composite Theory[J]. Cem Concr Compos, 2021, 118: 103971.
- [56] 柴鑫伟, 谢群, 王欣, 等. 混杂纤维高韧性水泥基复合材料拉伸性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(增刊 1): 353–361.
CHAI Xinwei, XIE Qun, WANG Xin, et al. J Build Struct (in Chinese), 2022, 43(S1): 353–361.
- [57] MAHJOUBI S, MENG W N, BAO Y. Auto-tune learning framework for prediction of flowability, mechanical properties, and porosity of ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Appl Soft Comput, 2022, 115: 108182.
- [58] 徐文磊, 宣卫红, 陈育志, 等. 高性能水泥基复合材料断裂性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1139–1145.
XU Wenlei, XUAN Weihong, CHEN Yuzhi, et al. J Build Mater (in Chinese), 2021, 24(6): 1139–1145.
- [59] GETTU R, GARDNER D R, SALDÍVAR H, et al. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens[J]. Mater Struct, 2005, 38(1): 31–37.
- [60] BANTHIA N, NANDAKUMAR N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites[J]. Cem Concr Compos, 2003, 25(1): 3–9.
- [61] 邓宗才, DAUD Jumbe R. 混掺纤维 RPC 增韧特性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 202–207.
DENG Zongcai, DAUD J R. J Build Mater (in Chinese), 2015, 18(2): 202–207.
- [62] 王振波, 张君, 王庆. 混杂纤维增强延性水泥基复合材料力学性能与裂宽控制[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2): 216–221.
WANG Zhenbo, ZHANG Jun, WANG Qing. J Build Mater (in Chinese), 2018, 21(2): 216–221.
- [63] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 高延性水泥基复合材料的流变特性和纤维分散性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 1037–1040.
ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. J Southeast Univ Nat Sci Ed (in Chinese), 2014, 44(5): 1037–1040.
- [64] TOSUN-FELEKOĞLU K, FELEKOĞLU B, RANADE R, et al. The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC[J]. Compos Part B Eng, 2014, 56: 536–545.
- [65] 张倩倩, 刘建忠, 周华新, 等. 超高性能混凝土流变特性及其对纤维分散性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 73–77.
ZHANG Qianqian, LIU Jianzhong, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 73–77.
- [66] DING C, GUO L P, CHEN B. Orientation distribution of polyvinyl alcohol fibers and its influence on bridging capacity and mechanical performances for high ductility cementitious composites[J]. Constr Build Mater, 2020, 247: 118491.
- [67] BENTUR A, MINDESS S. Fibre reinforced cementitious composites[M]. London: Taylor & Francis, 2006: 624–624.
- [68] COLINA H, ROUX S. Experimental model of cracking induced by drying shrinkage[J]. Eur Phys J E, 2000, 1(2/3): 189–194.
- [69] HAN J S, PAN J L, CAI J M. Self-sensing properties and piezoresistive effect of high ductility cementitious composite[J]. Constr Build Mater, 2022, 323: 126390.
- [70] MOHAMMED B H, SHERWANI A F H, FARAJ R H, et al. Mechanical properties and ductility behavior of ultra-high performance fiber reinforced concretes: effect of low water-to-binder ratios and micro glass fibers[J]. Ain Shams Eng J, 2021, 12(2): 1557–1567.
- [71] LI Y Z, LI J X, YANG E H, et al. Investigation of matrix cracking properties of engineered cementitious composites (ECCs) incorporating river sands[J]. Cem Concr Compos, 2021, 123: 104204.
- [72] 王玉清, 刘潇, 刘曙光. PVA-FRCC 收缩性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1289–1296.
WANG Yuqing, LIU Xiao, LIU Shuguang. J Build Mater (in Chinese), 2020, 23(6): 1289–1296.
- [73] ZHU M Z, CHEN B, WU M, et al. Effects of different mixing ratio parameters on mechanical properties of cost-effective green engineered cementitious composites (ECC)[J]. Constr Build Mater, 2022, 328: 127093.
- [74] 吴建东, 郭丽萍, 曹园章, 等. 蒸汽养护制度对超高性能混凝土早期力学性能及微观结构的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 744–752.
WU Jiandong, GUO Liping, CAO Yuanzhang, et al. J Southeast Univ Nat Sci Ed (in Chinese), 2022, 52(4): 744–752.
- [75] MI Z X, HU Y, LI Q B, et al. Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 169: 403–413.

- [76] 刘建忠, 韩方玉, 周华新, 等. 超高性能混凝土拉伸力学行为的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(23): 24–32.
LIU Jianzhong, HAN Fangyu, ZHOU Huaxin, et al. Mater Rev (in Chinese), 2017, 31(23): 24–32.
- [77] LU J X, SHEN P L, ZHENG H B, et al. Development and characteristics of ultra high-performance lightweight cementitious composites (UHP-LCCs)[J]. Cem Concr Res, 2021, 145: 106462.
- [78] WANG S, LI V C. 27 Lightweight engineered cementitious composites (ECC)[C]//4th international RILEM workshop on high performance fiber reinforced cement composites (HPRCC 4). Michigan, 2003: 379–390.
- [79] AL-GEMEEL A N, YAN Z G, YOUSSEF O. Use of hollow glass microspheres and hybrid fibres to improve the mechanical properties of engineered cementitious composite[J]. Constr Build Mater, 2018, 171: 858–870.
- [80] KARA DE MAEIJER P, CRAEYE B, SNELLINGS R, et al. Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability[J]. Constr Build Mater, 2020, 263: 120493.
- [81] JOHN V M, DAMINELI B L, QUATTRONE M, et al. Fillers in cementitious materials—Experience, recent advances and future potential[J]. Cem Concr Res, 2018, 114: 65–78.
- [82] HANIF A, LU Z Y, LI Z J. Utilization of fly ash cenosphere as lightweight filler in cement-based composites—A review[J]. Constr Build Mater, 2017, 144: 373–384.
- [83] ROSSI P, ARCA A, PARANT E, et al. Bending and compressive behaviours of a new cement composite[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(1): 27–33.
- [84] SAULAT H, CAO M L, KHAN M M, et al. Preparation and applications of calcium carbonate whisker with a special focus on construction materials[J]. Constr Build Mater, 2020, 236: 117613.
- [85] LI L, CAO M L, YIN H. Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104: 103350.
- [86] 宋梦凡, 王金邦, 栾从起, 等. 碳酸钙晶须对 SHCC 性能的影响[J]. 混凝土, 2022(3): 14–19.
SONG Mengfan, WANG Jinbang, LUAN Congqi, et al. Concrete (in Chinese), 2022(3): 14–19.
- [87] 潘清, 陈婷, 潘锐之, 等. 复掺硅灰的硫酸钙晶须改性水泥基复合材料的力学性能与微观结构(英文)[J]. 材料导报, 2019, 33(2): 257–263.
PAN Q, CHEN T, PAN R Z, et al. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(2): 257–263.
- [88] LI G, YUE J, GUO C H, et al. Influences of modified nanoparticles on hydrophobicity of concrete with organic film coating[J]. Constr Build Mater, 2018, 169: 1–7.
- [89] 杨敏毅, 曾俊杰, 王胜年, 等. 渗透结晶材料对混凝土裂缝自愈合的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10): 3542–3547.
YANG Minyi, ZENG Junjie, WANG Shengnian, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(10): 3542–3547.
- [90] 黄涛, 陈强, 胡昱, 等. XYPEX 对混凝土裂缝的修复性能试验研究[J]. 混凝土, 2013(11): 88–92.
HUANG Tao, CHEN Qiang, HU Yu, et al. Concrete (in Chinese), 2013(11): 88–92.
- [91] 薛绍祖. 国外水泥基渗透结晶型防水材料的发展现状与市场[C]//全国第十次防水材料技术交流会论文集. 贵阳, 2008: 139–145.
- [92] 刘新, 冯攀, 沈叙言, 等. 水泥水化产物: 水化硅酸钙(C-S-H)的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9157–9167.
LIU Xin, FENG Pan, SHEN Xuyan, et al. Mater Rep (in Chinese), 2021, 35(9): 9157–9167.
- [93] JAYAPALAN A R, LEE B Y, KURTIS K E. Effect of nano-sized titanium dioxide on early age hydration of Portland cement[C]//BITTNER Z, BARTOS PJM, NĚMEČEK J, et al. Nanotechnology in Construction 3. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 267–273.
- [94] YANG L Y, JIA Z J, ZHANG Y M, et al. Effects of nano-TiO₂ on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes[J]. Cem Concr Compos, 2015, 57: 1–7.
- [95] 徐迅, 卢忠远. 纳米二氧化硅对硅酸盐水泥水化硬化的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 478–484.
XU Xun, LU Zhongyuan. J Chin Ceram Soc, 2007, 35(4): 478–484.
- [96] 王冲, 刘俊超, 张超, 等. 纳米 CaCO₃ 对水泥基材料性能与结构的影响及机理[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 22–28.
WANG Chong, LIU Junchao, ZHANG Chao, et al. J Hunan Univ Nat Sci (in Chinese), 2016, 43(6): 22–28.
- [97] WU Z M, KHAYAT K H, SHI C J, et al. Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃[J]. Cem Concr Compos, 2021, 119: 103992.
- [98] TYSON B M, ABU AL-RUB R K, YAZDANBAKHSI A, et al. Carbon nanotubes and carbon nanofibers for enhancing the mechanical properties of nanocomposite cementitious materials[J]. J Mater Civ Eng, 2011, 23(7): 1028–1035.
- [99] 陈星宇. 改性碳纳米管增强水泥基复合材料的力学性能及微观研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2018.
CHEN Xingyu. Mechanical properties and microscopic study of modified carbon nanotubes reinforced cement composites (in Chinese, dissertation). Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2018.
- [100] DONG S F, WANG D N, ASHOUR A, et al. Nickel plated carbon nanotubes reinforcing concrete composites: From nano/micro structures to macro mechanical properties[J]. Compos Part A Appl Sci Manuf, 2021, 141: 106228.
- [101] YU L B, BAI S, GUAN X C. Effect of graphene oxide on microstructure and micromechanical property of ultra-high performance concrete[J]. Cem Concr Compos, 2023, 138: 104964.
- [102] WAN H Y, ZHANG Y. Interfacial bonding between graphene oxide and calcium silicate hydrate gel of ultra-high performance concrete[J]. Mater Struct, 2020, 53(2): 1–12.
- [103] YAO Y, ZHANG Z Y, LIU H, et al. A new *in situ* growth strategy to achieve high performance graphene-based cement material[J]. Constr Build Mater, 2022, 335: 127451.
- [104] LI L W, ZHENG Q F, LI Z, et al. Bacterial technology-enabled cementitious composites: A review[J]. Compos Struct, 2019, 225: 111170.
- [105] LI M M, FANG C L, KAWASAKI S, et al. Bio-consolidation of cracks in masonry cement mortars by *Acinetobacter* sp. SC4 isolated from a Karst cave[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2019, 141: 94–100.
- [106] SRINIVAS M K, ALENGARAM U J, IBRAHIM S, et al. Evaluation of crack healing potential of cement mortar incorporated with blue-green microalgae[J]. J Build Eng, 2021, 44: 102958.
- [107] 钱春香, 冯建航, 苏依林. 微生物诱导碳酸钙提高水泥基材料的早期力学性能及自修复效果[J]. 材料导报, 2019, 33(12): 1983–1988.
QIAN Chunxiang, FENG Jianhang, SU Yilin. Mater Rep (in Chinese), 2019, 33(12): 1983–1988.
- [108] CHEN J J. The nanostructure of calcium silicate hydrate[D]. Evanston: Northwestern University, 2003.

- [109] HU Z L, WYRZYKOWSKI M, GRIFFA M, et al. Young's modulus and creep of calcium-silicate-hydrate compacts measured by microindentation[J]. *Cem Concr Res*, 2020, 134: 106104.
- [110] WANG Z P, CHEN Y T, XU L L, et al. Insight into the local C-S-H structure and its evolution mechanism controlled by curing regime and Ca/Si ratio[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 333: 127388.
- [111] 林伟辉, 付甲, 王志华, 等. 不同钙硅比水化硅酸钙力学性能的分
子动力学模拟[J]. 材料导报, 2017, 31(20): 158–163.
LIN Weihui, FU Jia, WANG Zhihua, et al. *Mater Rev* (in Chinese),
2017, 31(20): 158–163.
- [112] 朱哲誉, 王中平, 周玥, 等. 硅酸盐水泥水化产物微纳结构的原位
研究[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1699–1705.
ZHU Zheyu, WANG Zhongping, ZHOU Yue, et al. *J Chin Ceram Soc*,
2021, 49(8): 1699–1705.
- [113] KUMAR R, SCHMIDT J R, SKINNER J L. Hydrogen bonding
definitions and dynamics in liquid water[J]. *J Chem Phys*, 2007,
126(20): 204107.
- [114] HOU P K, SHI J, PRABAKAR S, et al. Effects of mixing sequences
of nanosilica on the hydration and hardening properties of
cement-based materials[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 263: 120226.
- [115] YU Q, GUO B B, LI C J. Effects of CO₂ concentration and the uptake
on carbonation of cement-based materials[J]. *Materials*, 2022, 15(18):
6445.
- [116] HOU D S, ZHENG H P, WANG P, et al. Molecular insight in the
wetting behavior of nanoscale water droplet on CSH surface: Effects
of Ca/Si ratio[J]. *Appl Surf Sci*, 2022, 587: 152811.
- [117] 姚红云, 梁乃兴, 孙立军, 等. 羧基丁苯聚合物改性混凝土性能及
其机理[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1): 30–36.
YAO Hongyun, LIANG Naixing, SUN Lijun, et al. *J Build Mater* (in
Chinese), 2005, 8(1): 30–36.
- [118] 龙军, 俞珂, 李国鼎. 聚合物与水泥水化物间的相互作用[J]. 混凝
土, 1995(3): 35–37.
LONG Jun, YU Ke, LI Guoding. *Concrete* (in Chinese), 1995(3):
35–37.
- [119] LIU Q, LU Z Y, LIANG X X, et al. High flexural strength and
durability of concrete reinforced by *in situ* polymerization of acrylic
acid and 1-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid[J]. *Constr
Build Mater*, 2021, 292: 123428.
- [120] WANG Z J, WU J Y, ZHAO P, et al. Improving cracking resistance
of cement mortar by thermo-sensitive poly N-isopropyl acrylamide
(PNIPAM) gels[J]. *J Clean Prod*, 2018, 176: 1292–1303.
- [121] 熊剑平, 申爱琴. 聚合物水泥混凝土改性机理研究[J]. 郑州大学
学报(工学版), 2006, 27(3): 15–20.
XIONG Jianping, SHEN Aiqin. *J Zhengzhou Univ Eng Sci* (in
Chinese), 2006, 27(3): 15–20.
- [122] 马骁, 何巨鹏, 谢雪鹏, 等. 基于分子动力学模拟的 C-S-H 凝胶和
C-A-S-H 凝胶研究[J]. 混凝土, 2019(1): 118–122.
MA Xiao, HE Jupeng, XIE Xuepeng, et al. *Concrete* (in Chinese),
2019(1): 118–122.
- [123] TANG J H, LIU J P, YU C, et al. Influence of cationic polyurethane
on mechanical properties of cement based materials and its hydration
mechanism[J]. *Constr Build Mater*, 2017, 137: 494–504.
- [124] DU J P, BU Y H, SHEN Z H. Interfacial properties and nanostructural
characteristics of epoxy resin in cement matrix[J]. *Constr Build Mater*,
2018, 164: 103–112.
- [125] WANG M, WANG R M, ZHENG S R, et al. Research on the
chemical mechanism in the polyacrylate latex modified cement
system[J]. *Cem Concr Res*, 2015, 76: 62–69.
- [126] 夏伟, 陆松, 白二雷, 等. 碳纳米管-碳纤维复合改性混凝土力学
性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(16): 110–118.
XIA Wei, LU Song, BAI Erlei, et al. *Mater Rep* (in Chinese), 2023,
37(16): 110–118.
- [127] CUI H Z, JIN Z Y, ZHENG D P, et al. Effect of carbon fibers grafted
with carbon nanotubes on mechanical properties of cement-based
composites[J]. *Constr Build Mater*, 2018, 181: 713–720.
- [128] YANG K, LONG G C, TANG Z, et al. Enhancement in strength and
toughness of ultra-high performance concrete (UHPC) from micron-
and nano-scale[J]. *J Build Eng*, 2023, 69: 106308.