



中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

C15-水泥与混凝土材料

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C15 水泥与混凝土材料

分会主席：钱春香、龙武剑、胡红梅、于岩、何富强、季韬、荣辉

基于 DIC 的 HPC-NSC 界面性能试验研究

毛振豪¹, 肖会刚^{1,*}, 路一鸣¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150300;)

摘要：通过 3 种几何尺寸（边长分别为 70.7、100、和 150 mm），3 种粗糙度（A 型表面光滑、B 型粗骨料部分裸露、C 型粗骨料全部裸露）的 HPC-NSC 界面劈裂抗拉试验，研究了结构尺寸和基材表面粗糙度对 HPC-NSC 界面劈拉强度的定量影响规律和作用机制。采用灌砂法、数字图像处理和三维扫描等方法评估了基材表面粗糙度，并使用 DIC 技术监测试件的裂纹发展过程。结果表明：三维扫描和数字图像处理方法的结合克服了灌砂法的局限性，可以从局部和整体全面评估基材粗糙度。基材粗糙度对界面强度有显著影响，基材粗糙度的增加只会一定范围内显著提高修复效果。此外，普通混凝土的尺寸效应明显小于修复试件的尺寸效应。随着基材粗糙度的增加，修复试件的尺寸效应呈现出先增大后减小的趋势。基于 Weibull 统计尺寸效应理论和 Bažant 能量尺寸效应理论，建立了复合试件劈裂抗拉强度尺寸效应规律参数的计算公式。

人工智能驱动的超高性能混凝土材料设计新范式

余睿*¹、范定强²、李旺¹、徐汪洋¹

1. 武汉理工大学

2. 香港理工大学

随着人工智能技术的蓬勃发展，土木工程行业迎来智能化转型契机。本研究聚焦人工智能技术于超高性能混凝土（UHPC）材料中的应用，创新性地提出“数据库优化 - 模型开发 - 模型应用”的人工智能新框架，推动 UHPC 材料设计与发展迈向智能化新范式。在数据库层面，针对 UHPC 材料数据库存在的不稳定、不可靠及数据缺失问题，构建了从数据库清理到性能预测的机器学习新框架。通过多重插补（MI）技术对缺失数据进行精准插补与补充，利用隔离森林算法有效筛选异常数据，并建立人工智能预测模型完成验证，为后续模型开发奠定可靠数据库基础。预测模型开发环节，系统建立了系列 UHPC 性能预测模型。深入验证和对比人工神经网络（ANN）、弹性回归网络（EnR）等多种机器算法在 UHPC 性能预测中的应用特点与优劣，并研发多种超参数优化算法对模型进行参数优化，显著提升了预测精度与可靠度，实现了 UHPC 性能的高效、精准、智能预测。在模型应用中，所开发的 UHPC 人工智能模型展现出显著价值：首先，实现了抗压强度、工作性能、微观孔隙特征等宏观性能的精准预测；然后，基于模型采用元启发算法开展了单目标或多目标材料组成优化设计；同时，结合物理堆积理论对 UHPC 材料组成进行深度优化设计，并构建 UHPC 水化进程的智能解析模型；最后，开发了超高性能混凝土材料的性能预测与智能设计可视化软件平台。研

究成果为 UHPC 材料的功能化、可控化、智能化设计提供了全新路径与有力工具，对推动超高性能材料领域发展具有重要意义。

拟交流类型：邀请报告

持荷状态下 UHPC 力学性能演化规律研究

姚一鸣 1,2,3, 吴赣 1, 林勋 1, 张洪锐 1, 王景全 2,4,

(1. 东南大学土木工程学院, 南京 211189; 2. 长大桥梁安全长寿与健康运维全国重点实验室, 南京 210096; 3. 黑龙江省寒地建筑科学研究院, 哈尔滨 150080; 4. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013)

超高性能混凝土 (UHPC) 因其优异的力学性能和耐久性在桥梁工程中具有重要应用价值。然而, 实际服役过程中 UHPC 结构常处于持荷与环境耦合作用状态, 现有研究多基于无持荷条件, 难以反映其真实性能演化规律。本研究通过单裂缝直拉和弯曲试验, 研究了持续荷载与环境耦合作用对 UHPC 力学性能的影响及其机理。结果表明, 持荷水平与预裂宽度显著影响 UHPC 的变形和裂缝扩展行为, 60 天内变形与裂缝宽度随荷载增大而增加并逐渐稳定, 且极限强度随持荷水平升高而降低。持荷抑制 UHPC 自愈合效应, 且荷载越大抑制越明显; 水环境与氯离子环境可促进自愈合, 但荷载增大会削弱其积极效果, 导致强度差异扩大。持荷同样不利于 UHPC 自愈合, 其力学性能演化规律与拉伸试验相似, 但环境引起的强度差异变化较不显著。本研究揭示了持荷与环境耦合作用下 UHPC 的力学性能退化机制, 为 UHPC 桥梁结构的耐久性设计与维护提供了理论依据。

关键词: UHPC; 持续荷载; 环境耦合; 力学性能; 自愈合

二氧化碳泡沫混凝土的制备与性能研究

郝鑫, 李瑞, 蒋一飞, 刘明坤, 曾宇霄, 杨艺菲, 陈嘉愉, 胡捷, 黄浩良
华南理工大学材料科学与工程学院

摘要: 泡沫混凝土是一种新型绿色建筑材料, 具有轻质多孔, 保温隔热等优点。目前制备泡沫混凝土主要使用空气发泡, 若以较高浓度 CO₂ 气体发泡, 制备 CO₂ 泡沫混凝土, 通过较高浓度 CO₂ 和大内比表面积实现混凝土固碳。本研究针对 CO₂ 配制了复合型发泡剂, 并模仿天然碳酸酐酶对 CO₂ 水合反应促进机制研发模拟碳酸酐酶 (mCA) 以提高水泥基材料的固碳速率。结果表明, 相同条件下所制备的 CO₂ 泡沫混凝土抗压强度比传统空气泡沫混凝土提高 25%, 导热系数相当, 但固碳量提高 30% 以上。

关键词: 泡沫混凝土, 固碳, CO₂ 泡沫, 模拟碳酸酐酶

硫酸根及阳离子类型对海洋暴露环境下混凝土自修复行为的机理研究

赵亚州

江苏智能工厂工程研究中心, 淮阴工学院, 淮安, 223003, 中国

摘要：裂缝是海洋工程混凝土结构服役过程中普遍存在的现象。本文研究硫酸盐离子及其阳离子类别对含氯盐环境中砂浆的裂缝闭合行为影响。砂浆开裂后置于纯氯盐以及氯盐和硫酸盐的复合溶液（CNS 和 CMS 系列），通过裂缝宽度演变、吸水率和无损超声检测来评估自修复行为，进一步采用维氏硬度评价裂纹间隙内产生自修复产物的显微硬度，最后利用 Gibb 自由能理论对从砂浆基体到裂纹表面的相体积膨胀进行热力学建模，从而探讨其自修复机理。实验结果表明，氯盐溶液中硫酸盐离子的存在有利于裂纹闭合，当与硫酸根结合的阳离子为镁离子时，自修复作用更为明显。砂浆表面沿裂缝方向的维氏硬度分布表明，CMS 系列中水镁石层降低了砂浆基体的维氏硬度，但有利于提高自修复产物的显微硬度。热力学模型解释了在不同浸泡溶液作用下自修复产物相对于原始未水化水泥的体积膨胀率。

水泥熟料激发超硫酸盐水泥的激发剂掺量敏感性机理探究

刘彬彬¹，孙桂龙¹，孙光龙¹，陈衡^{1,*}，侯鹏坤²，李琴飞¹

1 济南大学山东省绿色与智能建筑材料重点实验室（筹），济南，250022，中国

2 济南大学材料科学与工程学院，济南，250022，中国

摘要：超硫酸盐水泥 (SSC) 是一种典型的低碳胶凝材料，但其性能对碱激发剂的掺量敏感性高，使其兼顾早期强度和后期强度成为一大挑战。水泥熟料是 SSC 最常用的激发剂之一，本研究将水泥熟料的主要矿物 (C3S、C2S、C3A) 作为 SSC 的碱激发剂，按 1%、2%、3%、4%、5% 的掺量掺入 SSC。综合利用 XRD、TG、EDTA 选择性溶解法定量分析矿粉的水化程度和水化产物 (AFt 和 C-A-S-H 凝胶等) 的含量，通过探究水化程度以及晶胶比对抗压强度的影响，揭示 SSC 性能对碱激发剂掺量敏感性的机理。结果表明，在相同水化程度下，相比于掺入 C3S 或 C2S 的 SSC，掺入 C3A 单位水化程度强度贡献率更大。同样，在相同水化程度下，掺入 C3A 的 SSC 的晶胶比更大。掺入 C3A 的 SSC 生成更多的 AFt，从而减少 C-S-H 凝胶在矿渣表面生成，提高 SSC 的早期和后期强度。过多的 C-S-H 凝胶在矿渣表面生成，是阻碍后期强度发展的主要原因，而减少 C-S-H 凝胶在矿渣表面聚集是解决 SSC 对碱激发剂掺量敏感性的有效方法。

关键词：超硫酸盐水泥 (SSC)；水泥熟料；掺量敏感性；水化程度；物相组成

储气库环空带压井泄压过程水泥环完整性评价技术研究

王锐*^{1,2}、赵超杰^{1,2}、靳彦欣^{1,2}

1. 化学品安全全国重点实验室

2. 中石化安全工程研究院有限公司

我国储气库多周期注采运行，环空带压问题日渐突出，一旦井口压力失控将会造成严重天然气泄漏事故，甚至引发火灾或爆炸事故。当前对于环空带压井的风险管控通常以井口泄放为主，但盲目的泄放可能会加剧井筒结构损伤，导致环空带压情况恶化。为了确定当前环空带压井泄放模式转化的阈值，确定泄放过程对于水泥环完整性的影响，结合现场测井数据

及相关实验数据，分别建立了非均匀地应力条件下气藏型储气库环空带压井套管-水泥环-地层有限元模型。利用 Cohesive behavior 模型模拟了水泥第一、第二交界面的胶结作用，真实的反映泄压过程中水泥环界面失效脱胶的整个过程。依据 Mohr-Coulomb 等经典的材料失效判定准则对水泥环完整性失效结果进行判定，为后期储气库环空带压井泄压策略的制定提供了方向。

基于环境等效力比参数的 UHPC-既有混凝土协同服役性能评价方法

冯硕¹，肖会刚²，*，张庆松¹

1. 山东大学土建与水利学院，山东 济南 250061；2. 哈尔滨工业大学土木工程学院，黑龙江 哈尔滨 150090

摘要：本研究评价了超高性能混凝土（UHPC）与普通强度混凝土（NSC）的协同服役性能。为评估在特定服役条件和收缩作用下基底与 UHPC 之间的非等变形，设计了受约束试件。通过引入膨胀剂和轻质骨料，制备了多种具有不同收缩变形梯度的 UHPC 修复材料，研究了收缩对 UHPC-NSC 协同服役性能的影响，分析了 UHPC-NSC 界面的疲劳粘结性能，并建立了粘结疲劳寿命方程。在静载荷作用下，当应力比为 0.9 时，试件表现出基底和界面双重破坏；而当应力比分别为 0.8 和 0.7 时，仅发生基底破坏。掺入 10%膨胀剂和 15%轻质骨料可使 UHPC 在 28 天龄期的收缩量降低 67.2%。量化了由于 UHPC 与基底之间的非等收缩变形所产生的内应力，发现减小收缩可使修复材料中的拉应力降低 33.0%至 67.3%。在干湿交替、冷热交替及冻融循环等环境变化下，计算了 UHPC-NSC 体系中的内应力，并定义了内应力与界面强度之比为“界面应力强度比”。本研究提出了一种基于环境等效力比的 UHPC-NSC 协同服役性能评估方法，为混凝土修复工程的服役寿命设计提供了理论指导。

关键词：超高性能混凝土；混凝土修复；协同服役性能；疲劳性能；环境等效力比

基于人工智能 BSE-EDS 图像分析的多元胶凝材料体系物相演化定量研究

毛丽璇¹、曹哲渊¹、李粒琿²、何富强*¹

1. 厦门理工学院

2. 昆明理工大学

多元胶凝材料体系（如水泥-粉煤灰-矿渣三元体系）的广泛应用对实现工业固废资源化利用和可持续建设至关重要，然而其组分非均质性与表征技术的局限性使得对多元胶凝体系反应过程的动态追踪面临挑战。本研究开发了一种基于 BSE-EDS 图像分析框架，实现了对胶凝材料在水化过程中元素迁移、物相组成演变与微观结构发展的全周期表征。通过与 VCCTL 和 CemGEMS 模型的对比验证，该方法在物相定量分析中表现出良好一致性。通过将先进图像处理技术与人工智能（AI）算法协同整合，显著提升了物相识别精度。该研究为复杂胶凝体系的多模态微结构表征建立了范式级方法，实现了从原材料到反应产物的高精度、自动化水化过程解析。

Influence of mica in artificial sand on the performance of dam concrete

Jinyang Huo*, Shihua Zhou, Zhongwei Sun, Jianfeng Zhang, Wenguang Jiang

Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission

As one of the important rock-forming minerals, mica is widely distributed in artificial sand. However, the performance of dam concrete can be significantly impaired when the mica content in artificial sand is excessive. In this work, the influence of mica on the performance of dam concrete was evaluated quantitatively and qualitatively by studying the evolution of mechanical properties and durability of dam concrete with different mica content in artificial sand. The results show that when mica content is lower than 2.9%, it has no significant effect on the performance of dam concrete. When mica content exceeds 2.9%, it has adverse effects on strength and frost resistance of dam concrete. Among them, the compressive strength of dam concrete decreases within 2.6%~9.9%, and the splitting tensile strength decreases within 3.3%~11.1% at the age of 90 d. The frost resistance of dam concrete becomes worse under the same freezing and thawing frequency. Therefore, the recommended upper limit of mica content is 2.9%.

拟交流类型：口头报告

颜料红 254 强化水泥基材料表面电沉积氧化亚铜防护层性能研究

冯庆革*、毛梓荣、武丽云

广西大学

微生物引发的混凝土腐蚀是影响污水管道中混凝土结构长期服役性能的重要因素,氧化亚铜是广泛应用的杀菌剂,但一般作为外加剂掺入混凝土的氧化亚铜因掺量过多影响水泥基材料性能、结合力不足等问题,难以对混凝土表面提供长期有效的抗菌防护。本研究通过电沉积法,利用碱性乳酸铜体系在水泥基材料表面沉积氧化亚铜防护层。通过加入颜料红 254 (Pigment Red 254, PR254) 调控电解液和水泥基材料表面的界面特性,成功制备了均匀的氧化亚铜沉积层。PR254 通过抑制缺陷处高电流区域的沉积速率,使表面缺陷处不同区域沉积速率一致,呈现共形生长模式,细化氧化亚铜晶粒,从而获得了均匀致密的氧化亚铜沉积层。在 PR254 添加量为 0.5 g/L 时获得了最大的沉积层质量增加率 (5.97%)、沉积层厚度 (130.49 μm) 和最佳的附着力,降低了铜离子的溶出速率,提升了长期工作性能。通过加入 PR254 增加了水泥基材料表面氧化亚铜的沉积量以及提升沉积层和水泥基材料之间的附着力,从而实现抗菌性能的提升和长期工作性能的保持。掺入 PR254 制备的样品在菌液中暴露 1.5 h 后,对大肠杆菌的抑菌率高达 99.0%,对硫氧化菌的 4 次循环抗菌中仍然保持 95.33% 的抑菌率,相较于不掺入 PR254 (82.44%) 的样品抑菌率提高了 12.89%。研究结果对下水道混凝土结构表面抗菌涂层的制备及其实际应用提供了新的研究思路。

碱激发矿渣-粉状炉渣水泥基本拉伸徐变机理研究

许诺诚、丁方硕、林旭健、梁咏宁、季韬*

福州大学土木工程学院

针对现有碱矿渣水泥收缩较大和抗裂性能较差的问题，以矿渣及粉状炉渣为前驱体，采用碳酸钾及钠水玻璃为复合激发剂，研究不同碳酸钾掺量(0→2%)对碱激发矿渣-粉状炉渣砂浆(ASPm)收缩及基本拉伸徐变的影响，并通过 XRD、TG/DTG、SEM-EDS、MIP 及 NMR 揭示其机理。结果表明：随着碳酸钾掺量提高，水化程度降低，化学收缩减小，毛细管压力减小，C-A-S-H 凝胶生成量减少，碳酸钙晶体生成量增加，名义晶胶比提高，Al/Si 下降，C-A-S-H 凝胶的堆叠明显，重组重排受限，ASPm 自收缩减小。当碳酸钾掺量从 0 增加至 1.5%时，自收缩减小，K/Na 提高，C-A-S-H 凝胶生成量下降，此时开裂时间延长和 C-A-S-H 凝胶层间摩擦降低起主导作用，ASPm 开裂时的基本拉伸徐变增大。当碳酸钾掺量从 1.5%增加至 2%时，K/Na 提高，开裂时间不变，此时自收缩减小起主导作用，ASPm 开裂时的基本拉伸徐变减小。碳酸钾掺量为 1.5%时，ASPm 具有较好的力学性能、较小的自收缩、较好的抗裂性能和最大的基本拉伸徐变。

掺黄金尾矿泥粉对环保砂浆的性能影响及碳足迹分析

姬宸源^{1, a}, 赵增丰^{1, b*}

1. 同济大学 土木工程学院建筑工程系, 上海, 200092

achenyuanji@tongji.edu.cn, bzengfengzhao@tongji.edu.cn

*通讯作者: 赵增丰

摘要: 黄金尾矿是金矿石开采经磨细提取黄金后产生的废弃物，堆放在尾矿库或自然场地，造成占用大量土地，造成周围环境污染。因此，黄金尾矿废弃物的资源化利用成为矿山资源利用和生态环境保护的重要方向。黄金尾矿废弃物，一般含有 SiO₂, CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃ 等，与水泥基材料成分类似。本研究探讨了利用金矿尾矿泥通过物理研磨和煅烧处置后制备环保砂浆的潜力。将尾矿泥 20 分钟研磨以制备尾矿泥粉，然后在 750° C 下煅烧获得煅烧尾矿泥粉，探究尾矿泥粉和煅烧尾矿泥粉替代水泥对砂浆工作性、强度和耐久性的影响机理。结果表明，随着尾矿泥粉替代率的增加，砂浆的流动性和密度降低，煅烧尾矿泥粉基砂浆的需水量和密度高于矿泥粉基砂浆。28 天后，使用矿泥粉会显著降低砂浆的抗压强度（在 30% 的取代率下，抗压强度下降了 43.9%）。相比之下，煅烧尾矿泥粉表现出火山灰活性，在 20% 的取代率下，其制备的砂浆强度仅降低了 9%（比尾矿泥粉基砂浆的强度提高了 34.4%）。煅烧尾矿泥粉基砂浆具有更高的电通量和碳化深度，由于煅烧尾矿泥粉的反应活性高于尾矿泥粉。生命周期评估表明，30%的尾矿泥粉取代制备的砂浆可以减少 CO₂ 排放量 156.7kg/m³，而 20%的煅烧尾矿泥粉基砂浆可以实现最佳的单位强度碳排放（与纯水泥基砂浆相比，减少 1.05kg 的 CO₂ 排放量 eq. /m³ /MPa）。结果表明，黄金尾矿泥粉中的铝含量显著影响其环保

砂浆的性能,由于水水化硅铝酸钙凝胶的形成。因此,黄金尾矿泥粉部分取代水泥制备环保砂浆,可以实现黄金尾矿的资源化利用,减少砂浆的碳排放。

关键词: 环保砂浆; 黄金矿尾矿; 碳足迹; 力学性能; 耐久性

水泥熟料激发超硫酸盐水泥的激发剂掺量敏感性机理探究

刘彬彬¹, 孙桂龙¹, 孙光龙¹, 陈衡^{1,*}, 侯鹏坤², 李琴飞¹

1 济南大学山东省绿色与智能建筑材料重点实验室(筹), 济南, 250022, 中国

2 济南大学材料科学与工程学院, 济南, 250022, 中国

摘要: 超硫酸盐水泥(SSC)是一种典型的低碳胶凝材料,但其性能对碱激发剂的掺量敏感性高,使其兼顾早期强度和后期强度成为一大挑战。水泥熟料是SSC最常用的激发剂之一,本研究将水泥熟料的各主要矿物(C3S、C2S、C3A)作为SSC的碱激发剂,按1%、2%、3%、4%、5%的掺量掺入SSC。综合利用XRD、TG、EDTA选择性溶解法定量分析矿粉的水化程度和水化产物(AFt和C-A-S-H凝胶等)的含量,通过探究水化程度以及晶胶比对抗压强度的影响,揭示SSC性能对碱激发剂掺量敏感性的机理。结果表明,在相同水化程度下,相比于掺入C3S或C2S的SSC,掺入C3A单位水化程度强度贡献率更大。同样,在相同水化程度下,掺入C3A的SSC的晶胶比更大。掺入C3A的SSC生成更多的AFt,从而减少C-S-H凝胶在矿渣表面生成,提高SSC的早期和后期强度。过多的C-S-H凝胶在矿渣表面生成,是阻碍后期强度发展的主要原因,而减少C-S-H凝胶在矿渣表面聚集是解决SSC对碱激发剂掺量敏感性的有效方法。

关键词: 超硫酸盐水泥(SSC); 水泥熟料; 掺量敏感性; 水化程度; 物相组成

印染污泥焚烧灰渣制备蒸压加气混凝土的研究

吴其胜¹、汪笠¹、羊中军²、罗乃将²、朱宝贵²、纪小敏²

1. 盐城工学院

2. 江苏中鼎建材集团有限公司

印染污泥焚烧灰渣是处理印染污水的产物,经过絮凝剂沉淀、机械脱水、预干化、焚烧等预处理措施实现固废减量化。以印染污泥焚烧灰渣为原材料制备蒸压加气混凝土,研究了印染污泥焚烧灰渣掺量和细度、养护条件、水灰比、矿物外加剂和化学外加剂对蒸压加气混凝土力学性能、微观结构和重金属溶出等性能的影响。结果表明:印染污泥焚烧灰渣制备蒸压加气混凝土的最佳工艺参数为水灰比0.7、蒸压温度190℃和蒸压时间8h。水泥:石灰:石膏:尾矿砂:印染污泥焚烧灰渣为12:20:3:32.5:32.5,其制备蒸压加气混凝土抗压强度为5.3MPa,干密度为721.9kg/m³。矿物外加剂玻璃粉掺量为6%时,蒸压加气混凝土的抗压强度为6.8MPa,与空白组相比提高了61%。化学外加剂氯化钙掺量为3%时,蒸压加气混凝土的抗压强度为5.2MPa,与对照组相比提高18%。蒸压加气混凝土固化重金属效果显著,锌、镉、锰、钡在3个月的固定率超过97%。

脲醛与乙基纤维素微胶囊对水泥基材料性能的影响

宋子健

河海大学土木与交通学院

摘要: 混凝土开裂不仅直接影响结构外观和承载力,还会为侵蚀性离子和物质提供了侵入通道,导致钢筋锈蚀和冻融破坏等病害。微胶囊自修复技术是目前混凝土裂缝修复的前沿技术之一,其独特的核壳型结构和多样的触发机制已吸引众多国内外学者的关注。本次介绍四种微胶囊材料,包括:(1) ER@UF 微胶囊:以环氧树脂为芯材、脲醛树脂为壁材,通过超声触发实现裂缝修复;(2) NaNO_2 -ER@UF 微胶囊:芯材复合缓蚀剂亚硝酸钠,兼具裂缝填充与钢筋锈蚀抑制双重功能;(3) SiO_2 改性 ER@EC 微胶囊:引入二氧化硅颗粒优化微胶囊性能,增强微胶囊稳定性;(4) ZIF-8 改性 ER@EC 微胶囊:利用金属有机框架材料进行改性,提升微胶囊的物理稳定性与环境耐受性,确保长期修复效能。

关键词: 混凝土开裂;微胶囊;水泥基材料;裂缝自修复

植物提取碳点在碱盐溶液中的缓蚀机制

项腾飞*, 崔琳晶, 郭明磊, 张舜泉, 吕忠, 陈德鹏

1 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽马鞍山, 243032

2 安徽工业大学 安徽省乡村建设协同技术服务中心, 安徽马鞍山, 243032

钢在碱性环境中由于会产生致密的钝化膜而导致其腐蚀行为往往被忽视。然而,当腐蚀性离子侵入碱性环境时,钢仍然会被腐蚀。碳点(CD)已被应用于防腐,但在碱性环境中使用较少,对缓蚀机理的研究也较少。本研究解析了木兰叶提取物制备的 CD(Ma-CD)在碱盐溶液中(以含有 3.5 wt%NaCl 的混凝土孔隙液为例)中对碳钢的缓蚀作用作用和机理。电化学测试和原位扫描振动电极技术(SVET)表明, Ma-CDs 的缓蚀效率高达 99%。在 298 K 下,含 100 mg/L Ma CD 的 CPF 中碳钢的腐蚀电流密度为 $0.474\mu\text{A}/\text{cm}^2$,比无碳点溶液($22.19\mu\text{A}/\text{cm}^2$)低两个数量级。液相原位 AFM 成像显示, Ma-CD 在长时间浸泡后,在钢表面逐渐形成高达 58 nm 厚的致密保护膜。此外,分子动力学(MD)模拟进一步证实了 Ma-CD 在碳钢表面上的强吸附作用,增强了腐蚀防护性能。这项工作不仅揭示了 CDs 在碱盐环境中的防腐机理,为碳点在碱性盐溶液中的应用提供了技术支撑和理论指导。

AFm 对赤泥石墨尾矿路面材料中铅和铜的固化机理研究

卢晓磊 1, 2, 张响 1, 2, 贾坚 1, 2, 张丽娜 1, 2, 陈衡 1, 2, 侯鹏坤 1, 2, 程新 1, 2 *

1 山东省绿色与智能建筑材料重点实验室, 济南大学, 250022

2 材料科学与工程学院, 济南大学, 250022

摘要: 水泥稳定赤泥石墨尾矿路面材料(RGPM)中 Pb(II)和 Cu(II)对环境构成了重大挑战。本文研究了 Pb(II)和 Cu(II)在 RGPM 中的长期浸出行为以及 AFm 对 Pb(II)和 Cu(II)的稳定机理。进行了半动态浸出试验(EPA 1315)和吸附实验来分析长期浸出行为,并借助密度泛函理论(DFT)分析了 AFm 的稳定机制。结果表明, Pb(II)和 Cu(II)在 AFm 结构中表

现出选择性置换行为,通过溶解机制优先占据钙的晶格位点。Pb(II)的取代能力优于Cu(II),这归因于其较低的缺陷形成能和最小的晶格畸变。AFm有效地降低了RGPM渗滤液中的离子浸出率和pH值。Pb(II)和Cu(II)的释放遵循两阶段Elovich模型。4%的AFm掺量对Pb(II)和Cu(II)的固化效率分别为100%和70%,且力学性能达2.93 MPa。本研究阐明了AFm在重金属固化和增强方面的双重作用,为赤泥和石墨尾矿在基层材料中安全资源利用提供理论和数据支撑。

关键词: 赤泥石墨尾矿路面材料, 单硫型水化硫铝酸钙, 重金属离子, 固化机制

纳米磁流体改性地聚合物电磁-力学性能协同演化机理研究

顾功辉, 付传清*

(1. 浙江工业大学 土木工程学院 杭州 310023; 2. 东南大学 交通学院 南京 211189)

摘要: 纳米SiO₂@Fe₃O₄磁流体改性地聚合物(NMMG)凭借其高磁导率在磁性建筑材料领域具有广阔的应用前景。本研究旨在揭示SiO₂@Fe₃O₄磁流体对地聚合物基体电磁和力学性能的改性机理,从而为NMMG材料的工程应用提供理论指导。结果表明,纳米SiO₂@Fe₃O₄磁流体的引入能够增强地聚合物内部相邻磁矩间的磁交换能,从而通过强化地聚合物内部的磁畴旋转来削弱其矫顽力,这为NMMG材料在软磁建筑材料领域的应用提供了新思路。此外,当纳米SiO₂@Fe₃O₄磁流体的浓度为9.4 vol.%时,NMMG材料的电磁和力学性能能够达到良好平衡。此时,NMMG材料可呈现出65 MPa的28d抗压强度,同时表现出相对较小的矫顽力和相对较大的电阻,这对于降低其在外磁场作用下的磁滞损耗和涡流损耗具有积极作用,反映了其在软磁应用领域的巨大潜力。

关键词: 地聚合物; 纳米SiO₂@Fe₃O₄磁流体; 软磁应用; 电磁性能; 力学性能

Synergistic Evolution Mechanism of Electromagnetic and Mechanical Properties of Nanomagnetic Fluid-Modified Geopolymers GU Gonghui, FU Chuanqing* (College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China) Abstract: Nano-SiO₂@Fe₃O₄ magnetofluid modified geopolymer (NMMG) is presenting promising application potential in the field of magnetic building materials by virtue of its high magnetic permeability. This work aims to reveal the modification mechanisms of nano SiO₂@Fe₃O₄ magnetofluid on the electromagnetic and mechanical behaviors of geopolymer matrix, thus providing theoretical guidance for the engineering applications of NMMG. The results show that the introduction of nano-SiO₂@Fe₃O₄ magnetofluid enhances the magnetic exchange energy between adjacent magnetic moments inside the geopolymer, thus weakening the coercivity by intensifying the rotation of magnetic domains inside the geopolymer, which provides a new idea for the application of NMMG in the field of soft magnetic construction materials. In addition, when the concentration of nano-SiO₂@Fe₃O₄ magnetofluid reaches 9.4 vol.%, good balance is found in the electromagnetic and mechanical behaviors of NMMG material. In that regard, NMMG can achieve satisfactory mechanical performance, ensuring as well low eddy current and hysteresis losses under alternating magnetic field, which reflects its great potential in soft magnetic applications. Key words: Magnetic geopolymer composite; Nano-SiO₂@Fe₃O₄ magnetofluid; Soft magnetic applications; Electromagnetic behavior; Mechanical performance

胶凝材料 CO₂ 养护与碳化过程中铝相作用的研究进展

孙化强 1*, 侯玉涛 1, 季韬 2, 钱觉时 3, 张健 4

福州大学先进制造学院, 泉州, 362251

福州大学土木工程学院, 福州, 350108

重庆大学材料科学与工程学院, 重庆, 400045

深圳大学土木与交通工程学院, 深圳, 350108

摘要:现代胶凝材料中或多或少都有铝相的身影, 由于其含量通常低于硅酸盐相, 铝相在自然碳化和 CO₂ 养护过程中物相演变规律尚未被系统认识和建立。本文系统分析和汇总国内外有关铝相在胶凝材料自然碳化和 CO₂ 养护过程中作用物相演变规律与赋存状态的研究进展, 并比较与铝相-碳酸钙相互反应的差异性。认为无论自然碳化或 CO₂ 养护过程, 铝相水化产物包括 AFt、AFm、C-A-S-H 等, 均能发生碳化反应并伴随物相, 转变, 物相演变与胶凝材料类型有关, 同时受到胶凝材料中硅酸盐相的显著影响。有硅酸盐相存在时, 铝相碳化反应的热力学稳定产物将主要是铝硅凝胶; 当硅酸盐相不存在时, 将形成单独铝胶。尽管热力学决定铝相碳化产物的稳定存在形式, 但其实际演变路径与赋存状态主要受动力学过程因素调控。CO₂ 养护过程中 AFt/AFm 碳化反应后将释放石膏, 后续水化过程中石膏的反应路径及其对硬化性能的影响需引起关注。

基于风积砂和工业固废协同的高导热填料研究

游秀菲

浙江大学

回填材料的导热性能直接影响地热能开发系统、直埋电力电缆、核废料处置设施等地下工程长期运行效果。传统低强度回填材料(如土壤、水泥砂混合物)通常导热系数较低($\sim 1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 难以满足高散热需要。同时, 工业固废的堆积不仅占用土地资源, 还造成严重的环境污染问题。为实现工业固废资源化利用并提升回填材料的导热性能。本文选用粉煤灰、矿渣、电石渣、硅灰为原材料, 并引入风积砂作为导热增强相, 其具有石英含量高、颗粒光滑均匀等特点。通过瞬态平面热源法研究了不同风积砂掺量(0%~90%)下全固废材料的导热性能和微观结构, 研究表明: 固废胶凝材料与风积砂颗粒紧密结合形成致密复合结构。随着风积砂掺量的增加, 全固废材料导热系数先增大后减小, 当风积砂掺量为 50%时材料导热系数达到峰值 $2.105\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 较未掺风积砂试样提升 67.73%。研究结果为新型高导热填料在地热系统、电力基础设施等工程中的应用奠定了技术基础。

煅烧改性电解锰渣硫酸盐特性及对 LC3 水泥性能的影响

朱红兴、冯庆革*

广西大学

为解决电解锰渣（EMR）堆存污染问题，并探索其资源化利用途径。本研究以煅烧改性 EMR 作为硫酸盐源，系统地探究其对石灰石煅烧粘土水泥（LC3）水化及力学性能的影响，评估其应用潜力。采用热重分析、傅里叶变换红外光谱和 X 射线衍射等表征手段，具体分析了 EMR 在不同温度下的物相演变规律、硫酸盐溶解度及其对 LC3 水泥体系的影响。结果表明：煅烧温度对 EMR 的物相组成和硫酸盐溶解度具有显著影响。当煅烧温度为 200℃ 时，EMR 中的二水石膏完全转化为半水石膏，硫酸盐溶解度显著提升至 7.67 g/L；而 400℃ 煅烧后转化为无水石膏，溶解度下降至 2.66 g/L。掺加原状或改性 EMR 均可显著提高 LC3 水泥体系抗压强度，尤其在早龄期的效果更为显著。其中掺 12% 原状 EMR 的水泥，3 d 抗压强度较基准样提升 76.4%；掺 15% 并经 400℃ 煅烧改性 EMR 的水泥则提升 93.3%。EMR 释放的 SO_4^{2-} 会与溶液中的 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 反应生成钙矾石，促进 LC3 水泥早期强度的发展，有效延迟熟料中 C_3A 矿物的直接水化。本研究证实了煅烧改性 EMR 作为有效硫酸盐源在 LC3 水泥中应用的可行性，为电解锰渣资源化处理处置提供了新思路。

高铁站房清水混凝土关键技术研究及工程应用

冯骁*

东南大学

混凝土是现代工程建设的重要材料，在国家“十四五”规划及“双碳”战略背景下，需肩负起更重的减排使命。随着高铁站房大规模建设，清水混凝土因兼具减排潜力与美学价值成为关键结构材料。同时可避免因站台装饰层脱落而威胁列车运行安全。本课题依托南京北站站房相关工程，聚焦于影响混凝土外观质量的气孔、色差、裂缝等关键指标，开展高铁站房清水混凝土关键技术及应用研究。从原材料比选、配合比设计、施工养护工艺控制、成品保护、外观质量参数化评定等角度，建立了一套可靠的全生命周期标准化工艺流程，为实现“内坚外美”的混凝土功能化要求、确保结构百年使用寿命提供了有力支撑。

原位聚合高变形水泥基止水材料研究

邱月

浙江大学

摘要：针对抽水蓄能水库大坝混凝土面板止水材料无粘结及难控渗等问题，本文基于有机-无机杂化形成多尺度高变形结构的原理，研究在混凝土面板接缝有限空间内遇水膨胀自发填充缝隙的复合材料，起到遇水则止水的作用。本文采用丙烯酸钠丙烯酰胺作为有机单体，通过原位聚合改性硅酸盐水泥基材料，测量了其强度、变形性能及止水抗冲刷性能；借助 SEM 与 XCT 表征微观形貌、孔径分布及多尺度结构特征，结合 XRD 分析水化产物化学组成，揭示聚合物网络对水泥基材料宏观性能的调控机制。研究结果显示：原位聚合过程中，随有机物掺量递增，水泥基浆体流动度下降且内聚力显著提升；硬化后，复合材料极限抗折和抗压应变最高增长 1326.84% 和 297.23%，弹性模量降低两个数量级，表明其在低强度下优异的变形性能；微结构测试结果表明原位聚合及水泥水化过程形成了有机-无机互穿结构，克服了传统水泥基材料微纳尺度胶体弱相互作用的局限；止水测试表明复合材料 1 小时内冲淋

作用下能够保持形状和质量,具有显著的抗水冲刷效果。研究结果为水下建造及大坝止水提供了技术基础。

关键词:原位聚合;止水材料;微结构;变形性能。

聚丙烯纤维改性橡胶泡沫混凝土(PPR-FC)动静力学特性研究

房彦宏、王岩梓、孙清硕、张宏博*

山东大学齐鲁交通学院

泡沫混凝土(FC)是由水泥、水、外掺料和发泡剂混合搅拌形成的一种多孔材料,因其具有轻质高强、隔音隔热等性,作为建筑材料被广泛应用于房屋建筑、填坑、市政等工程领域。然而,传统FC存在刚度大、抗裂性与稳定性差、能量耗散能力弱等问题,使其在长期荷载作用下容易发生疲劳损伤,尤其在动荷载作用下易因应力集中引发结构失效问题,限制了其在复杂工况下的应用。

因此,本研究通过掺入废旧轮胎橡胶颗粒(1-3 mm)及聚丙烯纤维(0.2%)对传统泡沫轻质土进行改性,系统研究聚丙烯纤维改性橡胶泡沫混凝土(PPR-FC)动静力学特性及在不同加载条件下的能量演化规律,为复杂工程环境中PPR-FC的设计与优化提供理论支撑。

以普通硅酸盐水P.042.5为胶凝材料,选用粒径1-3mm的橡胶颗粒、长度6mm的聚丙烯纤维和特定发泡剂制备PPR-FC试件。将水、水泥、改性后的橡胶颗粒搅拌均匀后加入经浸泡分散的聚丙烯纤维,调整浆液湿密度和流值至 $650\text{kg}/\text{m}^3$ 、160mm。制备橡胶掺量为0%、5%、15%的试样,在标准环境养护28d后,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020),用三轴仪开展三种不同围压(100kPa、200kPa、300kPa)下的静三轴试验,不同加载幅值(20%/40%/60%/80%/105%)、不同加载频率(1/3/5/7Hz)、不同围压(100kPa、200kPa、300kPa)下的动三轴试验。

静力学方面:无橡胶掺入的FC因自身收缩应力受力后易产生纵向裂缝,掺橡胶FC则会出现剪切破坏或压溃式破坏,但围压能显著抑制裂缝的扩展,密实稳定材料内部孔隙结构,增强材料整体的稳定性,提高材料承载能力;PPR-FC呈现典型的弹塑性三阶段特征:弹性阶段、屈服阶段和强度稳定阶段,橡胶掺量增加使应力降低(掺15%橡胶颗粒的强度较无橡胶产量的降低约63%),但延性显著提升以增大应变变形吸收能量(应变增加20%~30%);橡胶颗粒对试件剪切性能的影响主要表现在显著削弱黏聚力(掺15%橡胶颗粒黏聚力较无橡胶掺量的降低67%),但对内摩擦角影响较小(仅降低 4°)。

动力学方面:橡胶颗粒的掺入会降低材料强度与动弹模量(橡胶掺量增加15%时,动弹模量降低24.95%),但橡胶颗粒的粘弹性变形和界面摩擦显著提高试件阻尼比(增幅最高达31.77%)与吸能效应;加载频率主导材料的能量耗散,加载频率提升200%,试件能量耗散约25,阻尼比增加65.74%,而围压则通过约束响应抑制了试件的变形但削弱了能量耗散,使试件耗能减少了21.55%;刚度变化与动弹模量的变化趋势一致,高频加载(200%增幅)通过增强橡胶颗粒-基体界面结合力,使试件动弹模量提高13.11%,幅值的增大(200%增幅)会使试件内部应力水平提高,诱发微裂纹萌生并扩展使试件动弹模量由524.796MPa降低至436.462MPa,降幅为15.90%,而围压则通过抑制微裂纹扩展提升了试件刚度与动弹模量;基于Hardin-Drnevich模型拟合动骨干曲线($R^2>0.95$),验证了PPR-FC在不同幅值循环荷载下的非线性应变硬化特征。

PPR-FC 通过橡胶颗粒的掺入，在动静荷载作用下展现出“以强度换延性、以刚度换耗能”的协同增强机制。在静力学方面，材料通过牺牲部分强度以提升轴向应变能力，其塑性变形特性可有效耗散路基填筑、边坡支护等复杂静应力场景中的能量，降低脆性破坏风险。同时，围压的施加通过抑制裂缝扩展、密实孔隙结构，显著提高材料承载强度，而橡胶掺量对黏聚力的作用效应远高于对内摩擦角的影响。最后，建立了橡胶掺量与修正的 Duncan-Chang 模型数学关系式，分析了橡胶掺量对修正的 Duncan-Chang 模型参数的影响，为进一步研究 PPR-FC 的力学行为和工程应用提供了理论基础。

动力学方面，橡胶颗粒的掺入虽会削弱材料的强度与刚度，但显著提升了材料阻尼比与能量耗散能力。PPR-FC 动弹模量随加载频率与围压的增大逐渐增大，随加载幅值的增大逐渐减小，PPR-FC 阻尼比与能量耗散量则随加载频率和幅值的增大逐渐增大，随围压的增大逐渐减小，切加载频率对试件阻尼比与能量耗散的影响最显著，而加载幅值对动弹模量影响相对较大，围压虽抑制了微裂纹扩展提升了材料刚度和抗变形能力，但削弱了能量耗散能力。最后，基于非线性回归建立了阻尼比与动弹模量预测公式 ($R^2 > 0.9$)，量化了橡胶掺量、加载频率、幅值与围压的耦合影响。研究结果为复杂动载环境下 PPR-FC 的吸能减震设计与工程应用提供了关键参数支持。

重金属污泥烧渣料对生态型高强水泥基复合材料收缩性能的影响及机理

马红瑞、巴明芳*

宁波大学

在工业化进程中，重金属污泥（含 Cu、Cr、Zn、Mn 等）难以避免。传统的填埋处理易造成土壤污染，并通过食物链危害生态和人体健康。为此，本研究采用高温烧渣技术将重金属污泥转化为多孔渣料(PA)，并将其作为内养护剂掺入高强水泥基复合材料(High-Strength Cementitious Matrix, HSCM)中，以减小材料的收缩变形。本文研究了不同 PA 掺量对 HSCM 早期自收缩变形及力学性能的影响，并通过 XRD、TG/DTG、FTIR、 ^1H NMR、纳米压痕和 Micro-CT 等测试手段深入分析了其作用机理。研究表明，PA 的加入有效促进了胶凝材料的进一步水化，增强了界面强度，优化了基体孔隙结构，从而显著提升了 HSCM 的力学性能。同时，由于 PA 的内养护效应，材料的自收缩变形得到显著抑制。在 20°C 条件下，7 天时的自收缩变形由 $518.77\ \mu\text{m}$ 降低至 $30.96\ \mu\text{m}$ 的膨胀变形。随着温度的升高，自收缩变形加剧，掺入 PA 后的 HSCM 表现出膨胀变形增加的趋势。本研究不仅有利于促进重金属污泥的资源化再利用，还为降低 HSCM 成本、推动其在实际工程中的应用提供了新的思路和方法，具有重要的环境效益和工程应用价值。

短切碳纤维分散状态对水泥基复合材料增强机制的影响

肖洋、江大志*

中山大学材料学院

碳纤维具有优异的力学性能和稳定的化学特性，是复合材料理想的增强增韧材料。研究表明，短切碳纤维可以提高水泥基复合材料的强韧性。但采用直接掺杂方式，当碳纤维掺

量较低时，其增强效果较低；当碳纤维掺量较高时，往往会出现碳纤维团聚而影响力学性能的进一步提高。

本文采用造粒剂辅助短切碳纤维造粒，形成尺寸较大的粒料，再与水泥基体混合，形成短切碳纤维两级分散增强水泥基复合材料。一方面，避免碳纤维直接掺杂造成的团聚，提高了复合材料中的纤维含量，从而提高水泥复合材料的力学性能；另一方面，碳纤维形成了非均匀分布的两级分散体系，分散集中应力，并使裂纹偏转，进一步提高水泥基复合材料的强韧性。

本文采用聚乙烯醇(PVA)作为造粒剂，通过硅胶模具制备疏松多孔的短切碳纤维粒料，探索出适用于增强水泥基复合材料的最佳碳纤维长度与碳纤维/PVA比例，制备出形态较为规整、疏松多孔、在水中可迅速自解离的短切碳纤维粒料；采用该粒料与水泥混合，制备短切碳纤维两级分散增强水泥基复合材料，分析其微观结构与力学性能之间的构效关系。与传统直接掺入碳纤维制备的水泥基复合材料比较，造粒掺入法制备的碳纤维/水泥复合材料的抗折强度提高了23.76%，挠度提高了18.43%，能量吸收提高了44.66%。本文还建立了碳纤维两级分散增强水泥基复合材料有限元模型，分析碳纤维两级分散的传力机制和应力分布，揭示其强韧化机制。

本研究不仅为高性能碳纤维增强水泥基复合材料的制备提供了理论依据与技术支撑，而且为回收碳纤维的大规模再利用提供了解决方案。

Ms 和 Mc 对 Fs 结晶动力学的影响对比

孙玮、王勇*

厦门理工学院

氯离子侵蚀是水泥基材料耐久性最常见问题，AFm 作为氯离子吸附的主要相承担了水泥基材料中超过 70%的固氯责任。在实际的水泥服役环境中，AFm 相同时存在 Mc 与 Ms，而二者的具体固氯能力有待考究。本研究在固定氯浓度(0.53mol/L)环境下，对比 Mc 与 Ms 对氯离子的化学结合能力，主要通过 XRD, ICS/ICP 等方法分析其向 F 盐转变的动力学过程，并综合考虑主要阳离子(CaCl₂和 NaCl 溶液)的影响；研究结果表明：在相同氯浓度环境下 Mc 的氯离子结合速度远超 Ms，Ca²⁺对 Mc 和 Ms 向 F 盐的转变起到促进作用。

水泥基材料介电常数测量与计算方法

阮思婧、何富强*

厦门理工学院

本文首先系统综述了当前水泥基材料介电常数的常用测量方法，分析其各自的适用性与局限性。在此基础上，提出采用交流阻抗技术(AC Impedance Spectroscopy, ACIS)进行介电常数测量。基于“解耦导纳分析法(Decoupled Admittance Analysis, DAA)”有效解决了传统方法在提取材料介电特性时面临诸多挑战，包括弥散效应、介电放大以及拟合阻抗参数的频率依赖性等关键瓶颈技术问题，实现了水泥基材料介电常数的高精度解析。构建了更具物理意义的水泥基材料介电响应模型。介电常数精确测量可为水泥基材料的水化与微观结构表征提供了一新途径。

CSA 水泥基复合材料水化热和性能预测新方法：基于导电性的深度学习预测

邵汀荃、王振军*

长安大学

硫铝酸盐水泥基复合材料 (CSAC) 已广泛应用于快速修复工程和水工混凝土结构。CSAC 的化学成分和结构对混凝土的水化动力学和抗压强度有显著影响。混凝土内部水化热过高会导致结构开裂风险显著增加,准确预测水化热对于有效控制大体积混凝土工程质量与耐久性至关重要。由于 CSAC 的物理化学属性存在很大差异,要实现较高的预测精度具有挑战性,尤其是早期预测。为了解决这个问题,我们提出了一种新的混合深度学习模型结合电阻率特征来提前多步预测水化热。所提出的模型采用基于长短期记忆 (LSTM) 的编码器-解码器架构,集成注意力机制实现序列到序列的建模。该模型通过特征提取电阻率参数,并使用 LSTM 网络将历史信息传递给预测,注意力层为历史信息的不同部分分配不同的权重。除此之外,使用分割技术结合 CSAC 中的成分-结构相关性将水化过程进行分割,以提高模型预测的准确性。我们实验表明,在提前预测多步水化热时,所提出的模型分段预测水化热在决定系数(R^2)方面比未分段模型高出 11%, $MSE=0.339$ 。最后,通过水化热模型中间参数,开发了一个简单的预测模型来预测抗压强度,抗压强度的测试集预测结果为 $R^2=0.990$ 、 $MAE=0.101$ 和 $MSE=0.129$,并揭示了 CSAC 设计、水化热以及抗压强度之间的相关性。因此,该模型为 CSAC 的水化热预测和比例设计提供了科学基础,对工程实践具有重要意义。

拜耳法赤泥、电解锰渣在石灰石煅烧粘土水泥 (LC3) 中的应用

邓星宇、田月晖、陈东彬、冯庆革*

广西大学

随着全球铝工业和锰工业的发展,拜耳法赤泥和电解锰渣的累积量日益庞大,已对环境造成严重危害。石灰石煅烧粘土水泥 (LC3) 作为水泥行业的重要低碳替代品,赤泥和锰渣中含有丰富的氧化铝和二氧化硅含量,可替代煅烧粘土制备新型 LC3 胶凝材料。本研究通过理化特征分析和强度活性指数对热活化处理赤泥和锰渣的活性进行评估,并探究赤泥和锰渣的协同效应。进一步研究了新型 LC3 胶凝材料的力学性能、水化产物和微观形貌特征。结果表明:在 600°C 条件下,赤泥中稳定的硅氧四面体和铝氧八面体结构分离,形成具有较高火山灰活性的亚稳态铝硅酸盐结构。当赤泥/锰渣混合物对煅烧粘土的替代率为 40%时,3d、7d、28d 抗压强度最高,分别为 36.2MPa、56.9MPa、67.7MPa,较传统 LC3 水泥分别提高了 20.3%、4.8%、2.7%,赤泥和锰渣的协同作用主要体现在水化早期。赤泥和锰渣掺入使得体系发生二次水化反应,消耗氢氧化钙形成更多的凝胶产物,凝胶产物包裹针状钙矾石和未水化的颗粒使得微观结构更致密。综上所述,赤泥和锰渣在 LC3 水泥中的应用不仅能缓解其堆积的问题,还能提升材料性能,具有广阔的应用前景。

碳素钢在碳化养护钢渣水泥基材料中的钝化行为

吴旻、陈德鹏*、吕忠、项腾飞、刘纯林

安徽工业大学建筑工程学院

本研究采用磨细钢渣粉替代部分水泥，制备不同碳化养护龄期的钢渣水泥复合砂浆，通过线性极化法和交流阻抗法测试内置钢筋砂浆试件的电化学指标，结合宏观性能测试和微观表征手段，分析碳化养护砂浆内置钢筋的致钝演化规律，并与标准养护试件做对比，探讨砂浆孔结构和矿相成分的改变对钢筋钝化膜生长的影响，提出碳化养护条件下内置钢筋钝化膜的生长机理。研究表明：在相同碳化养护周期条件下，钢渣的掺入降低了砂浆内置钢筋的周边环境碱度，导致预埋钢筋早期的钝化程度较低，钝化膜成形缓慢。而在后续湿养护条件下，钢渣的水化反应逐步开展，生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 提高了钢筋周边环境碱度，有利于钢筋钝化膜的后期生长。同时，钢渣的水化产物可以增加钢筋表面的固相浆体覆盖率，减少与孔溶液直接接触的电化学活性区域，从而降低了钢筋的腐蚀风险。电化学测试试验结果表明，碳化预养护龄期在 24h，钢渣掺量为 10% 的配合比内置钢筋的钝化性能较好，其钝化膜主要由富 Fe^{2+} 层组成，28d 时钢筋钝化膜总厚度和表面粗糙度已经接近标准养护的配合比。此外，碳化预养护周期过长，或者钢渣掺量过多会增加预埋钢筋周边胶凝材料的碳化反应程度，抑制了钢渣后期的水化反应，对钢筋钝化膜的形成和稳定不利。AFM 测试表明，在碳化产物周边低碱度环境下易形成缺陷区，是钢筋钝化保护的薄弱环节。

磷石膏冷粘结骨料植生混凝土的设计制备及环境影响研究

张波*

西南科技大学

我国磷石膏堆存总量已超 8 亿吨，且年新增量约 8000 万吨，但综合利用率仅为 45%。磷石膏中的可溶性磷 (P)、氟 (F) 和重金属元素易随雨水浸出，环境风险持续加剧。本研究旨在探索利用天然磷石膏协同地域性固废制备冷粘结骨料，并进一步配制植生混凝土的可行性及其环境影响。结果表明，制备的磷石膏冷粘结骨料的磷石膏利用率达 85%、体积密度 1.6 g/cm^3 、筒压强度 4.4 MPa 、1h 吸水率 15.3%；通过调整水胶比 ($W/B \leq 0.24$)、骨灰比 ($3.27 \leq A/C \leq 4.57$) 和硅灰掺量 ($2\text{wt}\% \leq S$) 优化胶凝材料浆体粘度与裹浆厚度，成功配制出连通孔隙率 ($20.7\% \leq C_{\text{void}} \leq 25.8\%$)、透水系数 ($8.97 \text{ mm/s} \leq K_T \leq 19.29 \text{ mm/s}$) 和抗压强度 ($5.0 \text{ MPa} \leq f_C \leq 7.7 \text{ MPa}$) 均满足设计要求的透水植生混凝土；磷石膏自身呈现酸性 ($\text{pH} \approx 4$)，可有效降低植生混凝土内部碱性 ($\text{pH} \approx 9$)，促进植物发芽和生长，水泥水化产物 (如 CH 和 C-S-H) 对磷石膏中可溶性 P、F 和重金属具有一定吸附和固化效果，消除了磷石膏的环境浸出风险。本研究开发的磷石膏冷粘结骨料植生混凝土后期可应用于道路、河道和高标准农田等生态护坡领域，对磷石膏的无害化、规模化和高质化利用以及长江流域生态水土保持具有重要意义。

高铁长江隧道预制混凝土管片养护制度确定方法及工程应用

刘庆波、钱春香*

东南大学材料科学与工程学院

随着我国基础设施建设的快速发展，预制混凝土 (Precast Concrete, PC) 制品因其高强度、高效率 and 耐久性，广泛应用于高速铁路、公路、隧道、桥梁等重大工程中。尤其在高温差和恶劣环境条件下，如何科学合理地确定 PC 制品的养护制度，已成为确保其性能、

提升生产效率以及降低能源消耗的关键问题。针对这一问题,本研究以国内某高铁长江隧道工程 PC 管片为案例,基于成熟度理论,提出了一种通过预测温度和早期强度的养护制度优化方法。研究结果表明,在不同温度条件下,合理调整入模温度、蒸汽养护参数以及冷却降温时间,能够显著降低 PC 管片温差,确保 PC 管片脱模强度,提高生产效率。本研究为不同环境温度中的预制混凝土制品养护制度的优化提供了理论依据,并为隧道工程及其他基础设施建设质量的保障与优化提供了重要参考。

石膏和 $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 对水泥水化性能的影响

The effects of gypsum and $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ on the hydration performance of cement

朱伟伟, 任毅, 刘浪, 徐纯燕, 刘爽, 陈考*

广西民族大学材料与环境学院高校环保材料与碳中和新技术重点实验室, 广西民族大学材料与环境学院先进结构材料与碳中和重点实验室, 南宁 530006

摘要: 本研究针对含磷固废的资源化利用,探讨了在低碳水泥生产过程中, PO_4^{3-} 吸附在水泥颗粒表面并影响水化进程的原因。通过设计不同磷酸钠和石膏掺量的水泥配比,深入分析了 PO_4^{3-} 对 SO_4^{2-} 在水泥颗粒表面的吸附行为及其对水泥性能的影响,以及 PO_4^{3-} 与 SO_4^{2-} 共同作用对水泥水化的影响。利用离子色谱法(IC)测定离子吸附量,并结合热重分析(TGA)、X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM)等技术手段,对水化过程进行了详细研究。研究发现,随着石膏掺量的增加,水泥对 SO_4^{2-} 的吸附量逐渐增加,导致水泥缓凝现象加剧。主要归因于, SO_4^{2-} 的增加促进了钙矾石(Aft)的形成,减少了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH) 的含量,从而加速了 C3S/C2S 的水化,提高了早期抗压强度。另一方面, PO_4^{3-} 掺量的增加导致 SO_4^{2-} 吸附量降低,0.5%的 PO_4^{3-} 掺量显著延缓了水化过程,而 1%的 PO_4^{3-} 掺量则加速了水泥的硬化。随着 PO_4^{3-} 含量的增加,水泥中的 CH 浓度显著下降。观察到 Aft 的含量也有所减少。相比未添加 PO_4^{3-} 的情况,加入 PO_4^{3-} 后,水泥中的 C3S/C2S 水化缓慢,这导致了水泥水化反应的减缓,进而降低水泥的早期抗压强度。1%的 PO_4^{3-} 在 SEM 上显示生成了大量无定型的 $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$, 因此加速了凝结时间。

Abstract: This study focuses on the resource utilization of phosphorus-containing solid waste and explores the reasons why PO_4^{3-} adsorbs on the surface of cement particles and affects the hydration process during the production of low-carbon cement. By designing cement mixtures with different dosages of sodium phosphate and gypsum, the study deeply analyzes the adsorption behavior of PO_4^{3-} on SO_4^{2-} at the surface of cement particles and its impact on cement properties, as well as the combined effect of PO_4^{3-} and SO_4^{2-} on cement hydration. Ion chromatography (IC) was used to measure ion adsorption, and techniques such as thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) were employed to study the hydration process in detail. The study found that with the increase of gypsum content, the adsorption of SO_4^{2-} by cement gradually increased, leading to intensified cement retarding phenomena. This is mainly attributed to the increase of SO_4^{2-} , which promotes the formation of ettringite (Aft) and reduces the content of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH), thereby accelerating the hydration of C3S/C2S and improving the early compressive strength. On the other hand, the increase in the dosage of PO_4^{3-} resulted in a decrease in the adsorption of SO_4^{2-} , with a 0.5% PO_4^{3-} dosage significantly retarding the hydration process, while a 1% PO_4^{3-} dosage accelerated the hardening of cement. As the content of PO_4^{3-} increased, the concentration of

CH in the cement significantly decreased. The content of AFt was also observed to decrease. Compared to the situation without added PO_4^{3-} , the hydration of C3S/C2S in the cement slowed down after the addition of PO_4^{3-} , which led to a slowdown in the cement hydration reaction and subsequently reduced the early compressive strength of the cement. SEM images of 1% PO_4^{3-} showed the formation of a large amount of amorphous $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$, thus accelerating the setting time.