科学家为高性能低碳混凝土设计提供新思路

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42897.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

科学家为高性能低碳混凝土设计提供新思路。近日，东南大学教授、中国工程院院士刘加平团队与加州大学伯克利分校合作系统总结了水化硅铝酸钙（C-(A)-S-H）纳米力学性能的最新研究进展，并从本征力学、变形机制到材料增强策略构建了较为完整的跨尺度认识框架。相关研究成果发表于中国工程院院刊《工程》

据悉，C－(A)－S－H是水泥基材料最主要的水化产物之一，其体积分数可占水化产物的约70%，直接影响混凝土的强度、变形和长期服役性能。然而，C－(A)－S－H具有多孔、低结晶度和胶体化等特点，传统纳米压痕、原子力显微镜等测试方法容易受到孔隙、局部堆积状态及相互作用的影响，难以准确获得其不受孔隙影响的本征力学性能。

本研究围绕这一关键问题，系统梳理了C－(A)－S－H从原子结构、颗粒结构到宏观性能的多尺度模型，并重点总结了同步辐射高压X射线衍射、高压拉曼光谱等先进技术在其本征力学研究中的应用。

本研究从晶体结构尺度系统阐明了化学组成与C－(A)－S－H本征力学性能之间的关系。相关研究表明，在层间距相近的条件下，提高Ca/Si比可增加层间钙离子含量、提高层间结构致密程度，从而显著增强沿层间方向的抗压缩能力；Al的引入及其诱导形成的交联结构，则能够进一步稳定硅酸盐链和层间结构，提高材料刚度。由此，将传统上较为分散的组成—结构—力学性能研究结果整合为清晰的结构调控机制，为从原子尺度定向设计C－(A)－S－H提供了理论依据。

在长期变形机制方面，研究进一步梳理了C－(A)－S－H层间滑移、层内滑移、颗粒重排以及择优取向等不同机制。高压拉曼结果表明，C－(A)－S－H是否形成交联结构会改变其主要滑移位置：非交联结构更容易发生层间滑移，而交联结构则可能通过层内结构变形释放应力。更重要的是，同步辐射研究显示，在偏应力作用下，C－(A)－S－H纳米晶会逐渐发生重排，其较软的c轴趋向沿加载方向取向。

研究指出，这种择优取向能够在约40 MPa的偏应力水平下发生，与实际水泥基材料产生宏观徐变的应力水平相当，因此为连接C－(A)－S－H纳米尺度变形与混凝土宏观徐变提供了新的物理图像

基于上述机制认识，研究团队进一步提出了面向C－(A)－S－H的自下而上强韧化策略。与单纯提高宏观材料强度不同，该思路首先识别C－(A)－S－H相对薄弱的晶体学方向，再通过调控Ca/Si比、Al掺入及交联结构，提高其沿c轴方向的力学性能；同时探讨蒸汽养护、碱激发以及纳米增强组分等实现路径。其核心理念是从纳米结构源头抑制水化产物在长期荷载下的重排与变形，从

而为降低混凝土徐变、提升尺寸稳定性和服役寿命提供材料设计依据。

面向未来，随着超高层建筑、超长跨桥梁、核电工程以及大型水利工程不断发展，混凝土长期变形与耐久性问题日益突出。同时，低碳水泥体系中辅助胶凝材料的大量使用也会显著改变C－(A)－S－H的化学组成和结构特征。通过建立化学组成、纳米结构、本征力学和宏观徐变之间的关联，可为低熟料、低碳水泥体系的性能调控提供新的理论基础，并推动水泥基材料设计由传统经验配比逐步向基于微纳结构机制的精准设计转变。（来源：中国科学报 赵宇彤）

相关论文信息：https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.11.015

作者：刘加平 来源：《工程》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发