双纤维协同赋能地质聚合物复合材料：高强高韧还降碳，小样本AI实现韧性精准预测

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/43045.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！

双纤维协同赋能地质聚合物复合材料：高强高韧还降碳，小样本AI实现韧性精准预测。粉煤灰、矿渣等工业固废制备的地质聚合物，是极具潜力的低碳胶凝材料，相比传统水泥可大幅降低碳排放。但地质聚合物基体固有脆性大、断裂韧性低，在高层建筑、大跨桥梁、抗震墙体等既需要承载强度、又需要变形韧性的场景中，应用受到很大限制。

向地质聚合物中掺入纤维制备纤维增强地质聚合物复合材料（FRGPC），是改善脆性的主流技术路径。但单一纤维始终存在短板：掺钢纤维（SFs）强度高、刚度大，但开裂后变形能力差，材料偏脆；掺聚乙烯纤维（PEFs）延性好、控裂能力强，但对强度提升有限，随着掺量增加，甚至会降低抗压强度。如何让材料同时拥有高强度与高韧性，是该领域的核心难题。

南京水利科学研究院范向前团队在中国工程院Engineering集群子刊ENGINEERING Structure and Civil Engineering上发表了题为Strengthening mechanisms and machine learning prediction of fiber-reinforced geopolymer composites的研究论文。

研究团队通过钢纤维与聚乙烯纤维混杂设计，发挥两种纤维的协同增效作用，制备出兼具高强、高韧、低碳特性的混杂纤维增强地质聚合物复合材料；提出基于能量与强度理论修正的受弯韧性评价方法，更全面反映材料裂纹扩展全过程的力学行为；基于高斯过程回归（GPR）构建韧性预测模型，仅靠少量试验样本即可实现高精度预测，为材料快速优化设计提供了工具。

混杂纤维协同效应

研究团队共设计了12组配比，对比无纤维对照组、单掺钢纤维、单掺聚乙烯纤维、混杂纤维四大系列的性能。

试验发现，当采用0.5%体积分数钢纤维+1.5%体积分数聚乙烯纤维的混杂配比时，两种纤维在不同阶段分工配合，呈现出显著的协同增益：钢纤维在裂纹萌生初期提供高强度承载，抑制裂纹快速扩展；聚乙烯纤维在裂纹扩展阶段通过桥接、界面滑移与拔出耗散能量，使材料产生大变形。最终材料抗压强度达到99.4?MPa，受弯跨中挠度达到27.627?mm，理论拉伸应变2.95%，真正实现高强且高韧。

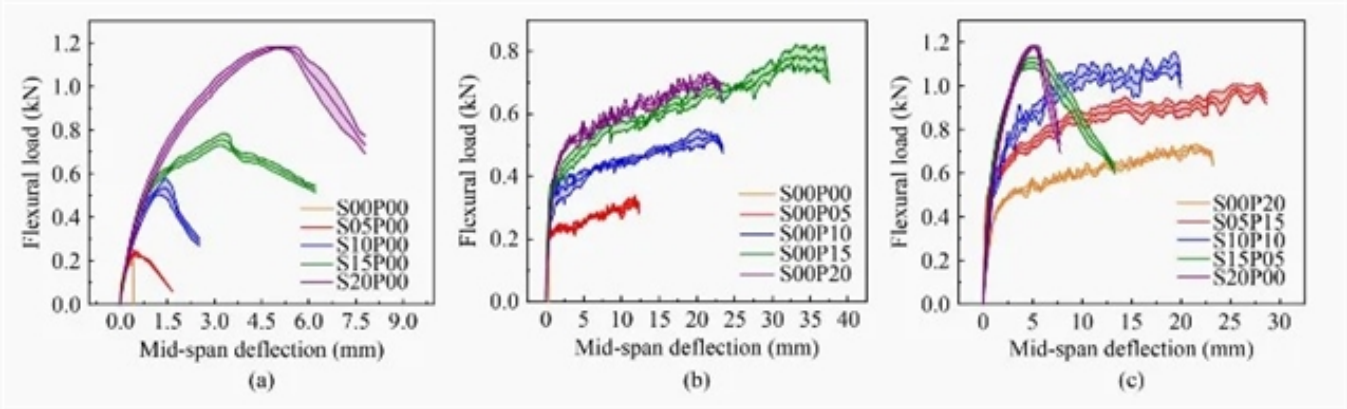


图1.纤维类型与掺量对FRGPC载荷-挠度曲线的影响。(a)钢纤维；(b)聚乙烯纤维；(c)混杂纤维

微观形貌观测也验证了这一机制：纤维断裂、纤维桥接可以有效消耗变形能量，延缓裂纹扩展；但如果纤维掺量过高出现团聚，反而会造成局部应力集中，降低增强效率。这也说明纤维并非掺得越多越好，存在最优配比区间。

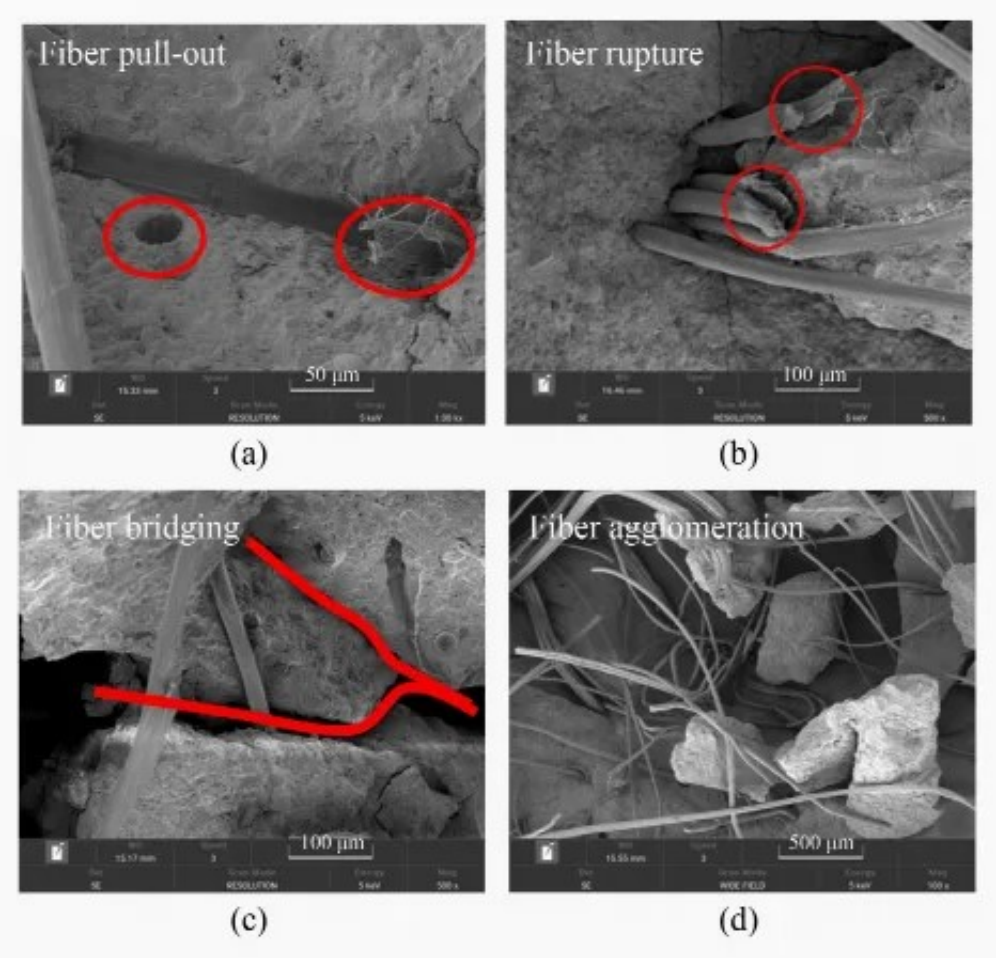


图2.FRGPC基体与纤维微观形貌。(a)纤维拔出；(b)纤维断裂；(c)纤维桥接；(d)纤维团聚

与同等抗压强度的传统水泥基工程复合材料相比，该混杂纤维地质聚合物的CO2排放量降低31.09%，材料成本也有明显下降。其中FRGPC部分的碳排放主要来自碱激发剂，未来通过固废回收制

备碱激发剂，还有进一步降碳的空间。

多维度刻画裂纹扩展全过程

研究团队提出一套基于能量与强度理论的修正受弯韧性评价方法，引入两个核心指标：一是应变硬化受弯强度比，用来衡量材料开裂后承载能力的变化，数值大于1就说明材料开裂后还能继续承重；二是单位应变硬化受弯能量，专门聚焦裂纹扩展阶段的能量耗散能力，更贴合韧性抗断裂、耗能量的物理本质。

这套方法从受弯强度、能量耗散、应变硬化行为三个维度综合评价，比传统单点评价更全面、更贴合实际工程中裂纹扩展的真实过程。

研究还进一步提出纤维增强指数，综合考虑纤维的掺量、长径比、自身强度、界面粘结特性，更适合评价不同种类纤维混杂的增强效果。分析显示，韧性指标和纤维增强指数并非呈线性关系，而是先升后降：纤维太少增强不足，太多又会相互干扰出现屏蔽效应，反而降低性能。

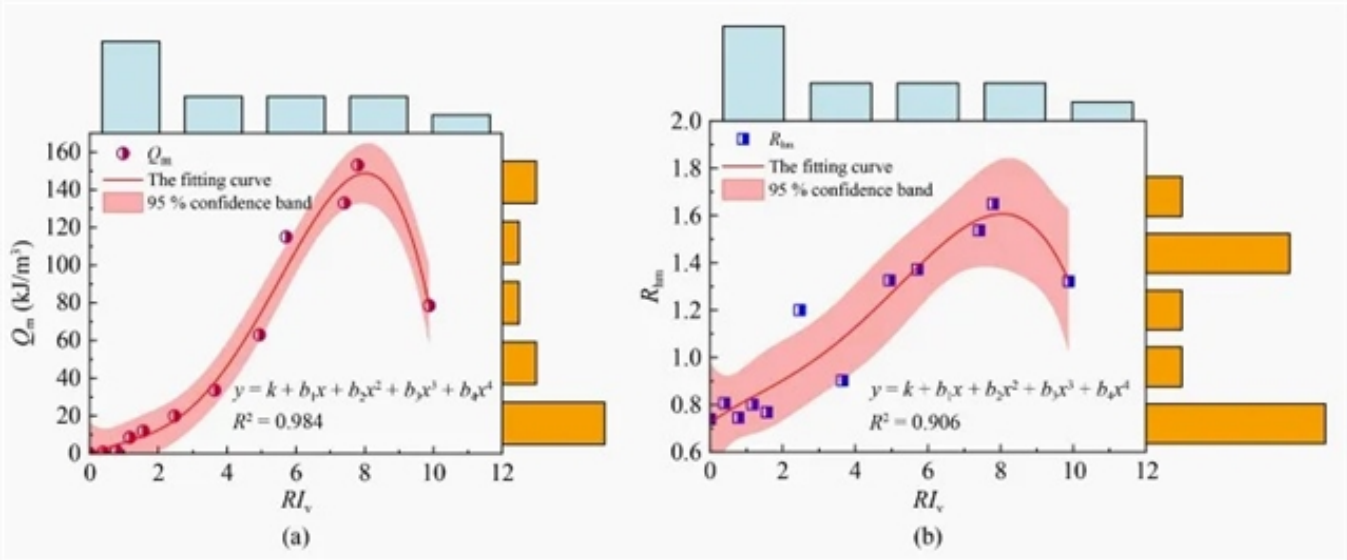


图3.受弯韧性参数与纤维增强指数的关系。

小样本实现韧性高精度预测

纤维复合材料的韧性受纤维种类、掺量、配比、加载特性等多重因素影响，传统方法要靠大量试验反复试错，研发周期长、成本高。

高斯过程回归是基于贝叶斯推断的非参数机器学习方法，特别适合小样本、非线性的工程问题。研究团队仅用12组试验数据，纳入纤维特征、荷载-
挠度参数、强度能量指标共9项输入，构建受弯韧性预测模型。

预测结果精度极高：单位应变硬化受弯能量的决定系数R^2达到1.000，应变硬化强度比的R^2达到0.977。也就是说，只需要少量基础试验，就能通过模型快速预测不同配比下的韧性表现，大幅减少试验工作量，加快材料配比优化效率。

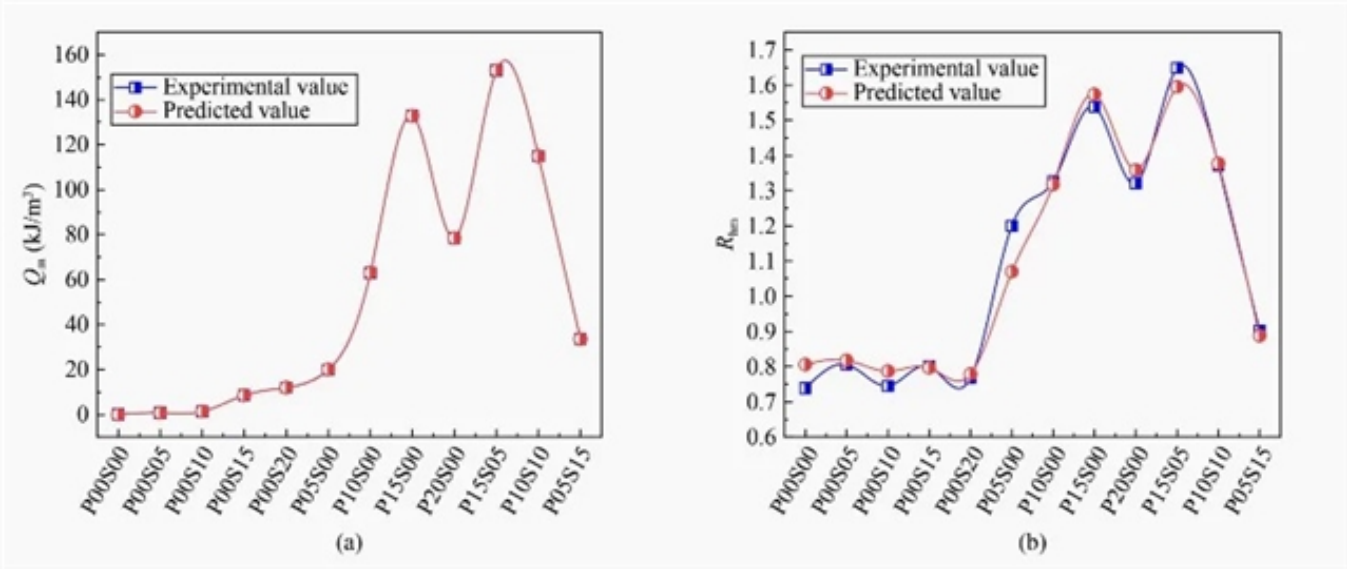


图4.实验值与预测值的对比与分析。

然而，目前性能与模型均基于常温标准养护条件，后续还需要补充高温、冻融、干湿循环等复杂服役环境下的耐久性数据，进一步拓展材料的适用场景。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-026-1335-3

作者：范向前等 来源：《工程·结构与土木工程》

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