

面向高地热隧道衬砌的碱激发材料3D打印黏附性能调控

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41159.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！

面向高地热隧道衬砌的碱激发材料3D打印黏附性能调控。高地热隧道环境对衬砌施工安全、材料黏附性能以及早期承载能力提出了更高的要求。本文以矿渣基碱激发材料作为3D打印隧道衬砌的候选材料，设计了不同硅酸盐模数（ $M_s=0、1、2$ ）的配方，系统比较了 20°C 和 40°C 条件下材料的新拌黏附性能、结构化速率、硬化黏结性能、力学性能、干燥收缩及孔结构演化规律。结果表明，升温可显著加速结构建立并改善早期黏附性能；硅酸钠激发体系则可优化硬化强度和孔结构，尤其在 40°C 下表现出更优的黏结与致密化效果。

关键词

碱激发材料；3D混凝土打印；隧道衬砌；高地热环境；界面黏附；结构建立

研究背景

高地热隧道施工环境复杂，极端情况下围岩温度可超过 70°C 。传统喷射混凝土虽可实现快速支护，但存在回弹损失大、施工质量易受人工操作影响以及人员暴露风险高等问题。挤出式3D混凝土打印具有自动化程度高、无回弹及表面质量好等优势，为隧道衬砌智能建造提供了新的路径。然而，现有打印材料通常依赖较高的胶凝材料用量，低碳性能受到制约；此外，高温条件下材料从新拌阶段到硬化阶段的黏附演化机制仍不清晰。因此，利用工业副产物制备的碱激发材料凭借其低碳潜力和快速结构建立特征，有望成为高地热隧道打印衬砌的可持续材料选择。

核心观点

本文的核心创新在于将矿渣基碱激发材料引入高地热隧道衬砌3D打印场景，并从新拌黏附—结构建立—硬化黏结—孔结构多尺度层面，建立了温度与激发剂组成之间的关联。研究采用黏附拉脱试验、流动度测试、SAOS小振幅振荡剪切、7d力学性能测试、干燥收缩及MIP孔结构表征等方法，对比了 20°C 和 40°C 下不同 M_s 值体系的性能演化。图1、图2和表1表明，在 20°C 条件下，新拌黏附主要受材料剪切阻力控制： M_{s0} 配方流动度最低，对应峰值拉力最高，达 6.7N ； M_{s1} 配方流动性更高，峰值拉力较低，为 5.3N ，但临界分离位移更大。在 40°C 条件下，温度显著加速了结构建立过程， M_{s0} 配方甚至因过快硬化而难以完成标准黏附测试，而 M_{s1} 配方峰值拉力提高至 7.6N ，表明高温可快速增强材料的早期支撑和黏附能力。图3进一步揭示，纯 NaOH 激发体系因碱度高而具有更快的初始结构建立速率；而硅酸钠激发体系虽然初期较慢，但随着时间推移，因硅酸根提供了更多的成核位点与反应产物沉淀，储能模量迅速增长。力学性能与微结构结果

也支持这一机制：图4显示，20 ° C下Ms1配方硬化黏结强度最高，约为1.1 MPa；40 ° C下Ms2配方获得了最优的黏结表现。图5、图6和表2表明，提高Ms值及温度均有助于降低孔隙率，其中Ms2配方在40 ° C下孔隙率降至4.3%，形成了更为致密的基体。

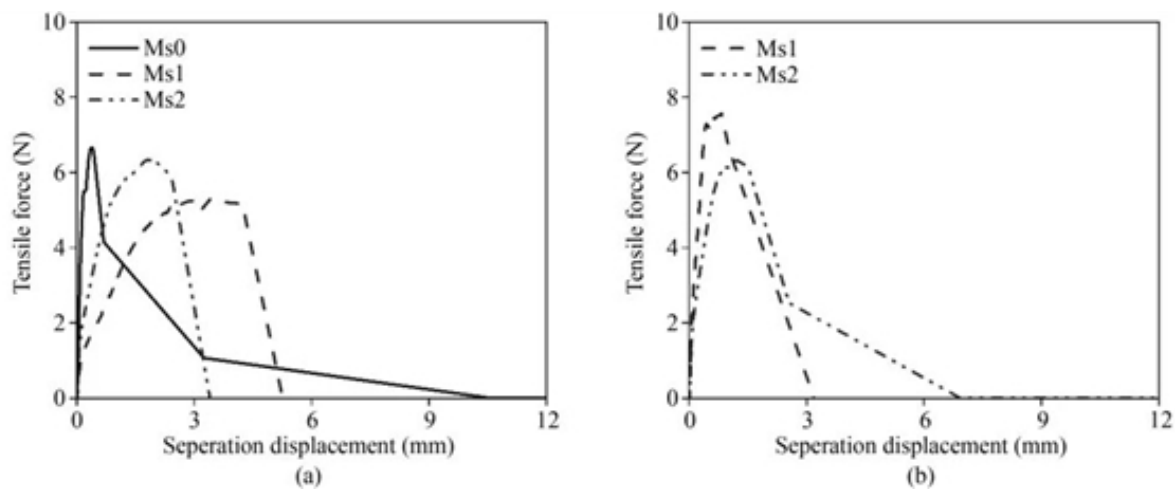


图1.不同混合料在粘性试验中拉伸力-分离位移曲线：(a) 20 ° C；(b) 40 ° C

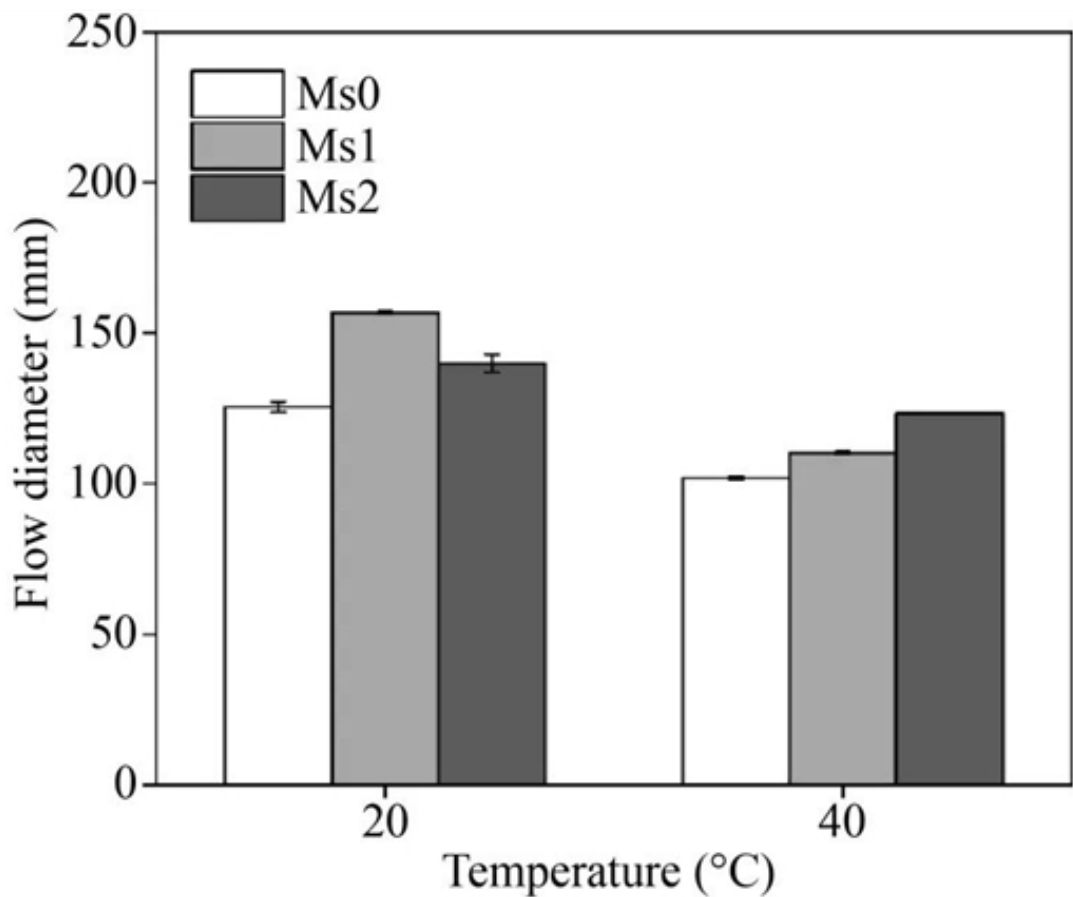


图2.不同混合料的流动直径（误差棒表示标准误差，n=2）

表1.不同混合料在20和40 ° C下的粘附参数

Temperature (°C)	Mixture	Peak tensile force (N)	Critical separation displacement (mm)	Dissipated energy ($\times 10^{-3}$ N·m)
20	Ms0	6.7 ± 0.3	0.4 ± 0.05	14.4 ± 1.2
20	Ms1	5.3 ± 0.2	3.4 ± 0.24	20.1 ± 2.0
20	Ms2	6.3 ± 0.3	1.8 ± 0.04	15.1 ± 0.9
40	Ms1	7.6 ± 0.1	0.8 ± 0.02	13.3 ± 0.6
40	Ms2	6.3 ± 0.2	1.2 ± 0.05	17.8 ± 1.5

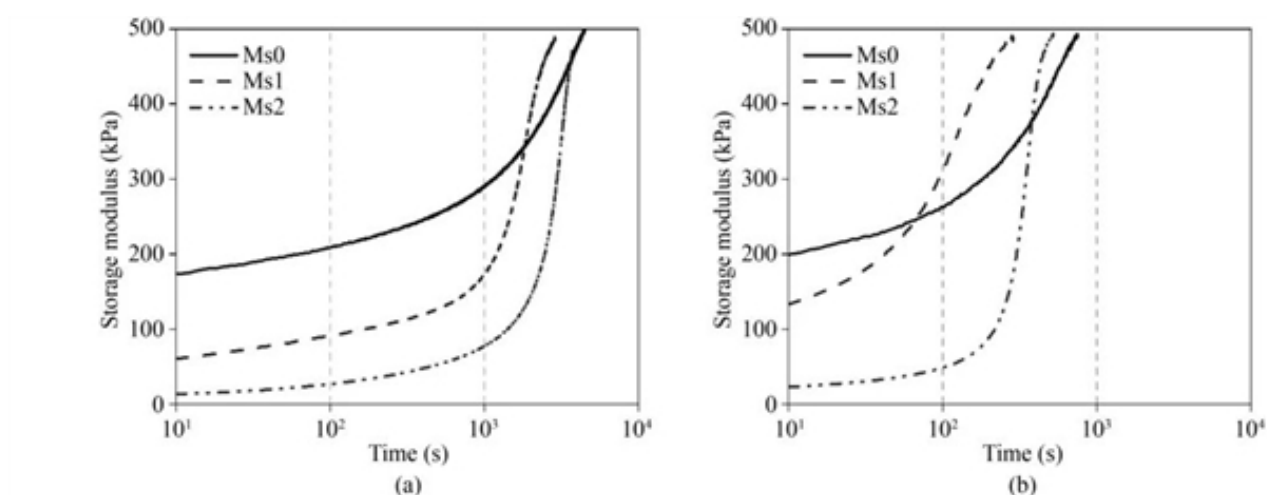


图3.不同混合料储能模量随温度的变化：(a) 20 ° C；(b) 40 ° C

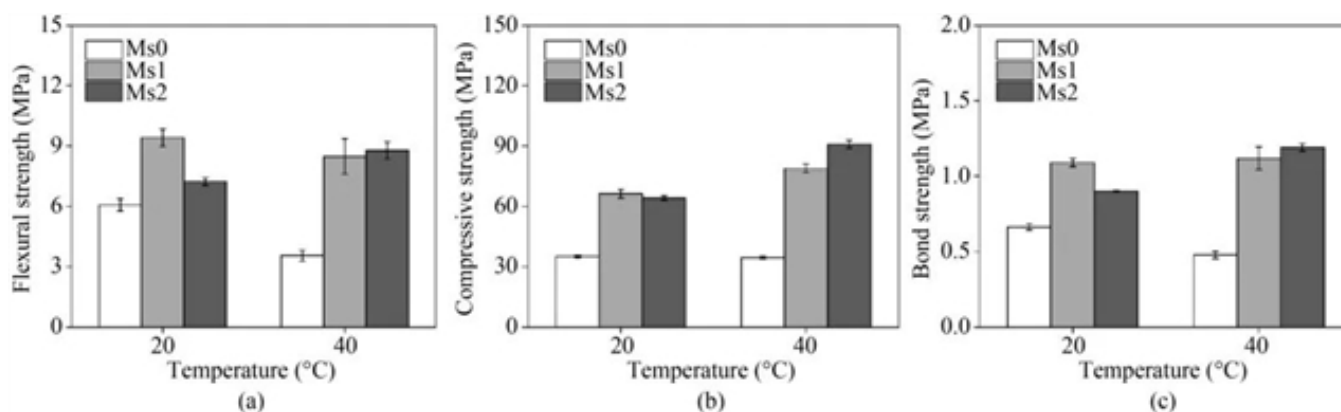


图4.力学性能：(a) 抗弯强度；(b) 抗压强度；(c) 20和40 ° C下的粘结强度（误差棒表示标准误差，抗弯和粘结强度n=3，抗压强度n=6）

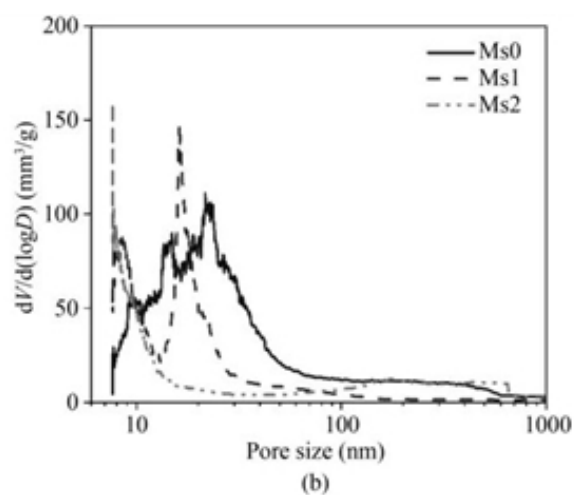
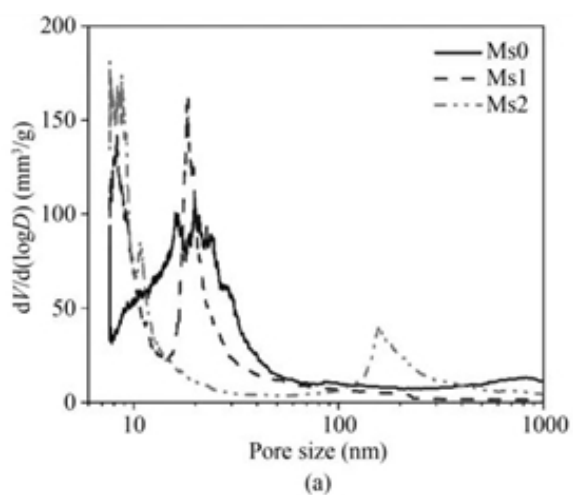


图5.孔径分布：(a) 20 ° C ； (b) 40 ° C

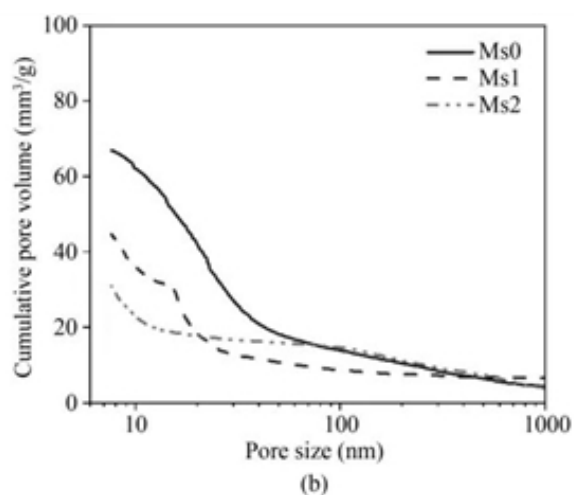
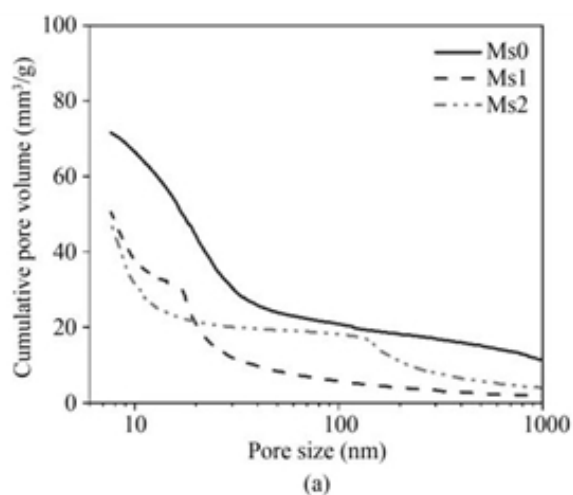


图6.累积孔隙体积：(a) 20 ° C ； (b) 40 ° C

表2.孔隙结构特征

Temperature (°C)	Mixture	Critical pore size (nm)	Porosity (%)
20	Ms0	19.8 ± 0.4	12.6 ± 0.2
20	Ms1	18.5 ± 0.3	6.9 ± 0.3
20	Ms2	7.6 ± 0.1	5.9 ± 0.1
40	Ms0	21.7 ± 0.3	11.7 ± 0.4
40	Ms1	16.2 ± 0.2	6.8 ± 0.1
40	Ms2	7.6 ± 0.2	4.3 ± 0.1

结论与展望

研究表明，高地热环境并不仅仅是3D打印隧道衬砌面临的施工挑战，也可以被视为促进碱激发材料反应、结构建立和界面黏附的有利环境因素。Ms1配方在常温下表现出较优的综合力学与黏结性能，而Ms2配方在40 ° C下展现出更强的黏结能力和更致密的孔结构。未来研究可进一步关注真实岩壁基底、多层打印界面、长期耐久性、温度循环以及更高温度条件下的性能演化，并结合机器人打印工艺验证其工程适用性。同时，也需警惕过高的温度可能引起孔隙水损失和渗透性增加。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-024-1067-1>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：戴小迪等 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](https://www.iikx.com)转发