

煅烧渣土对超高性能混凝土力学及收缩性能的影响

常诚¹,王绪富^{2*},王瑜²,钟原¹,张伯发¹,唐宇翔²

(1. 深圳市政集团有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 长沙理工大学 交通学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 利用广东地区的煅烧渣土为原料部分取代水泥制备绿色超高性能混凝土(UHPC)。该文研究了不同煅烧渣土掺量(0%、5%、10%、15%、20%)对UHPC工作性能、力学性能和收缩行为的影响,并对其进行了生命周期评估(LCA)以量化碳排放。结果表明:煅烧渣土的掺入提高了UHPC拌和物的流动度;在3d龄期时,煅烧渣土对UHPC力学性能的影响有限,但在7d和28d龄期时,UHPC抗压强度和抗折强度随煅烧渣土掺量的增加呈现先增加后降低的趋势,并在10%掺量下获得最大值,分别约为172.5 MPa和32.7 MPa;煅烧渣土的使用降低了UHPC基体的收缩,尤其是自收缩;在本研究的掺量范围内,煅烧渣土部分取代水泥最多可以降低UHPC约11.3%的碳排放。

关键词: 超高性能混凝土;煅烧渣土;抗压强度;收缩;生命周期评估

中图分类号:U414

文献标志码:A

Effect of Calcined Construction Spoil on Mechanical and Shrinkage Properties of UHPC

CHANG Cheng¹, WANG Xufu^{2*}, WANG Yu², ZHONG Yuan¹, ZHANG Bofa¹, TANG Yuxiang²

(1. Shenzhen Municipal Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000 China; 2. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: This study utilized calcined construction spoil from Guangdong as a partial replacement for cement in the preparation of green ultra-high-performance concrete (UHPC). The effects of different calcined construction spoil content levels (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) on the workability, mechanical property, and shrinkage behavior of UHPC were investigated. Additionally, a life cycle assessment (LCA) was performed to quantify carbon emissions. The results indicate that the incorporation of calcined construction spoil improves the fluidity of the UHPC mixture. At the age of 3 days, the effect of calcined construction spoil on the mechanical properties of UHPC is limited. However, at 7 and 28 days, the compressive strength and flexural strength of UHPC show a trend of initially increasing and then decreasing with the increase in calcined construction spoil content, reaching maximum values of approximately 172.5 and 32.7 MPa at a 10% replacement level, respectively. The use of calcined construction spoil reduces the shrinkage of the UHPC matrix, particularly the autogenous shrinkage. Within the range of dosages studied, the partial replacement of cement with calcined construction spoil can reduce the carbon emissions of UHPC by approximately 11.3%.

Keywords: ultra-high-performance concrete (UHPC); calcined construction spoil; compressive strength; shrinkage; life cycle assessment

收稿日期:2025-09-26 修回日期:2025-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52408464);中国博士后科学基金资助项目(编号:GZB20240636, 2025T180894, 2025M773268);湖南省研究生创新项目(编号:LXBZZ2024233)

作者简介:常诚,女,高级工程师. E-mail:626384457@qq.com

*通信作者:王绪富,男,博士研究生. E-mail:wxfcsust@163.com

0 引言

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种具有高强度、高韧性、高耐久性能的水泥基复合材料^[1]。与普通混凝土相比,UHPC能够大幅减轻混凝土构件重量,提高其服役寿命,减少后期维护费用的增加^[2]。因此,在公路、桥梁等交通基础设施建设中展现出广阔的应用前景。

然而,UHPC的推广仍受制于成本与体积稳定性问题^[3-4]。一方面,其水泥用量普遍高达800~1 000 kg/m³,远超普通混凝土,导致能耗和二氧化碳排放显著增加,生产成本亦居高不下;另一方面,低水胶比与致密结构使其硬化过程中伴随明显的自收缩与干燥收缩,易产生裂缝,削弱耐久性。因此,降低水泥用量并改善其收缩问题,成为UHPC研究与应用的关键。

针对上述问题,学术界已开展大量探索,主要通过矿物掺合料部分替代水泥来优化性能。例如,粉煤灰因球形颗粒效应改善流动性,并能降低用水量;偏高岭土活性高,可加速水化产物生成并提升早期强度;矿渣粉、硅灰、稻壳灰等也表现出良好的火山灰反应与填充效应^[5-9]。这些研究表明,合理利用工业副产物或固体废弃物替代水泥,既能提升UHPC的综合性能,又契合工程建设低碳化和可持续化发展的需求。

与此同时,随着城镇化与基础设施建设加速,大量工程渣土在施工过程中被产生和弃置,如何实现高值化利用成为现实难题^[10-11]。广东地区工程建设需求旺盛,相应地工程渣土储量丰富,但目前多用于低附加值的回填或堆弃,不仅造成资源浪费,还带来环境压力。值得关注的是,该地区渣土多为花岗岩残积土,富含SiO₂和Al₂O₃,经煅烧后可转化为活性物质,其化学组成与偏高岭土相近,具备较强的火山灰反应潜力^[12],且其煅烧温度明显低于水泥熟料。已有研究显示,煅烧渣土在水泥基体系中能够改善微结构,促进水化反应,并对力学性能和耐久性发挥积极作用^[13-14]。因此,可以使用煅烧渣土部分替代水泥制备UHPC,降低UHPC制备成本和碳排放的同时,实现工程渣土的高值化利用。

综上,本文探究不同煅烧渣土掺量下UHPC的工作性能、力学性能和收缩行为,为煅烧渣土在UHPC中安全应用提供理论基础。

1 材料与试验

1.1 原材料

试验所用的原材料主要包括水泥、硅灰、石英砂、煅烧渣土、减水剂、钢纤维和水。水泥采用安徽海螺水泥股份有限公司宁国水泥厂生产的P.II 52.5R硅酸盐水泥,密度为3 170 kg/m³,勃氏法测得的比表面积为351 m²/kg。硅灰勃氏比表面积为21.9 m²/g,主要成分为SiO₂,含量为94.89%;石英砂为优质河砂,使用前筛除粒径大于2.36 mm的部分,并用清水淘洗3次,以去除有机质和其他杂质。原状工程渣土取自广州某建筑地基坑。煅烧渣土的处理流程包括:首先利用破碎机将烘干后的渣土破碎,使用1 mm筛网对其进行筛分备用(图1);接着将筛分后的细土使用球磨机球磨18 min,在电阻炉中以800 °C的温度煅烧2 h;最后过0.15 mm的筛网。煅烧后的渣土SEM形貌如图2所示,可以发现煅烧渣土颗粒近似于球形。减水剂采用液体高性能聚羧酸减水剂,固含量为25%,最大减水率为40%。钢纤维选用镀铜短切平直型钢纤维,长度为13.0 mm,直径为0.2 mm。所用水为自来水。水泥、硅灰和原状渣土的化学组成如表1所示。原状渣土中SiO₂和Al₂O₃的比例较大,分别占比为55.01%和29.95%,类似于高岭土。



图1 破碎筛分后的渣土

Figure 1 Crushed and screened construction spoil

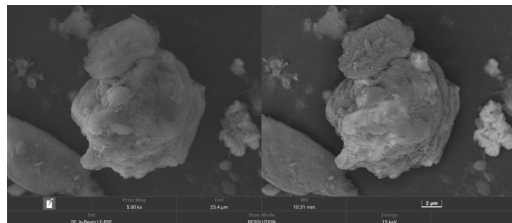


图2 煅烧后的渣土SEM图

Figure 2 SEM image of calcined construction spoil

表1 水泥、硅灰和原状渣土的化学组成

组分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Loss
水泥	21.87	63.47	4.87	3.54	2.18	2.50	0.67	0.11	0.79
硅灰	94.89	0.57	1.02	0.75	0.63	0.18	0.24	0.06	1.64
渣土	55.01	0.07	29.95	10.25	0.54	0.13	2.26	0.04	1.75

图3为煅烧前后的渣土XRD衍射图,可以发现渣土原料的主要矿物组成为SiO₂、高岭石、云母和锐钛矿。渣土中SiO₂等惰性成分几乎不参与水化反应。当热活化温度为800℃时,煅烧后渣土的XRD衍射图中在12.4°无法捕捉到高岭石,仅在19.8°和24.8°观察到非常微弱的衍射峰,结晶度显著降低,这归因于高岭石受热分解为偏高岭石。值得注意的是, SiO₂峰强度随热处理后降低,说明高温处理破坏了SiO₂晶体结构,煅烧后渣土中出现了更多的活性非晶成分, SiO₂被活化。

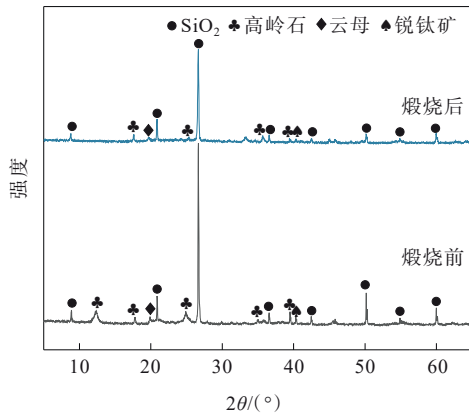


图3 煅烧前后的渣土XRD衍射图

Figure 3 XRD patterns of construction spoil before and after calcination

1.2 UHPC制备方法

试验配合比见表2,其中煅烧渣土取代率分别为0%、5%、10%、15%和20%。制备UHPC试样时,先将水泥、煅烧渣土、硅灰和石英砂在搅拌机中搅拌1 min,然后将所需的水与减水剂混合,将90%混合溶液倒入搅拌机中搅拌3 min,最后加入钢纤维和剩余的10%混合溶液搅拌4 min,形成UHPC拌和物。对于测试基体收缩的试样则无需加入钢纤维,只加入剩余的10%混合溶液再搅拌1 min即可。将拌和物分两次加入尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的三联模中,振捣以确保填充密实,覆盖保鲜膜养护至24 h,

然后脱模放入标准养护室[温度:(20±2)℃、相对湿度:90%±5%]养护至规定龄期。

表2 试验配合比

编号	组成/(kg·m ⁻³)						
	水泥	煅烧渣土	硅灰	石英砂	减水剂	水	钢纤维
P0	850.0	0.0	213.0	1063.0	26.6	192.7	155.0
P5	807.5	42.5	213.0	1063.0	26.6	192.7	155.0
P10	765.0	85.0	213.0	1063.0	26.6	192.7	155.0
P15	722.5	127.5	213.0	1063.0	26.6	192.7	155.0
P20	680.0	170.0	213.0	1063.0	26.6	192.7	155.0

1.3 性能测试方法

1.3.1 流动度测试

UHPC的工作性能用拌和物的流动度进行表征。依据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005),采用跳桌进行UHPC拌和物流动度测试,每个配比测试两个试样取平均值。

1.3.2 力学性能测试

依据《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021)分别对养护至3 d、7 d和28 d的UHPC试样进行抗压和抗折强度测定,每组试验3个试样,结果取3个试验值的平均值。

1.3.3 收缩测试

UHPC基体的收缩主要包括干燥收缩和自收缩。干燥条件下测得的收缩为自收缩与干燥收缩之和,即为总收缩。自收缩通常在密闭条件下进行测试^[15]。依据《建筑砂浆基本性能试验方法》(JGJ/T 70—2009),将圆柱形金属测头嵌入尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的三联模中,并将不含钢纤维的UHPC基体拌和物倒入模具中。带模于(20±2)℃、相对湿度≥90%环境养护7 d后拆模,移入(20±2)℃、相对湿度为60%±5%的环境平衡≥4 h,用立式收缩仪测初始长度L₀,按不同龄期复测长度L_t,初始长度与该龄期下的长度差值即为总收缩,结果取3个试验值的平均值。

对于测试自收缩的试样,将其包裹在保鲜膜中,并用透明胶带将金属测头与保鲜膜之间的间隙密封完好,然后在外层用锡箔纸包裹密实,最后密封的样品放入塑料密封袋中,并放置在(20±2)℃、相对湿度为60%±5%的环境中,如图4所示。

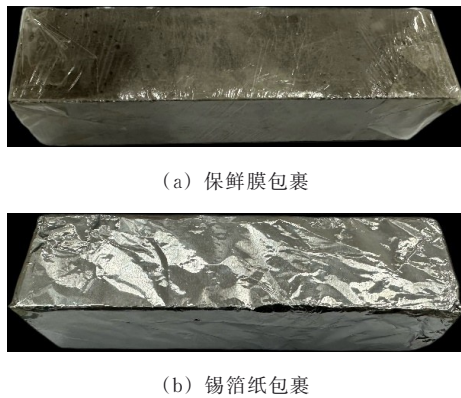


图4 自收缩试样密封处理过程

Figure 4 Sealing process for autogenous shrinkage specimens

2 试验结果分析与讨论

2.1 流动度

图5为不同煅烧渣土掺量对UHPC拌和物流动度的影响。由图5可知:随着煅烧渣土替代率的增加,UHPC拌和物的流动性明显改善,且呈持续上升并趋于平稳的变化规律。当替代率为0%时,UHPC流动度最小,为210 mm;当替代率为20%时,其流动度增至255 mm。这表明在一定范围内用煅烧渣土取代部分水泥有利于提升UHPC拌和物的工作性能。这是因为煅烧渣土颗粒较细且形貌相对规则,掺入后能产生一定的“滚珠效应”,降低颗粒间的摩擦阻力,从而改善浆体的流动性^[16]。其次,与水泥相比,煅烧渣土的早期吸水性较弱,其在拌和初期对拌和水的消耗有限,使体系中自由水比例增大,浆体黏度降低,有助于流动度提升。再次,煅烧渣土取代部分水泥后,单位体积浆体中的水泥用量减少,水化热和早期溶解作用相对减弱,使体系处于更为稳定的分散状态,也间接改善了流动性。

需要注意的是,随着煅烧渣土替代率由15%提高至20%,流动度增幅趋于平缓,表明当掺量达到一定水平后,煅烧渣土对改善UHPC流动性的效果逐渐减弱。这是多重机制共同作用的结果:一方面,15%掺量时体系已形成较优颗粒级配,煅烧渣土的填充与“滚珠效应”充分发挥,20%掺量下额外颗粒难以进一步优化级配,降低摩擦的贡献大幅降低;另一方面,过量煅烧渣土因比表面积较大,会小幅增加体系需水量,抵消部分流动性增益,且其对水泥颗粒的稀释解絮作用在15%掺量时已达阈值,20%掺量下进一步稀释的效果呈边际递减。

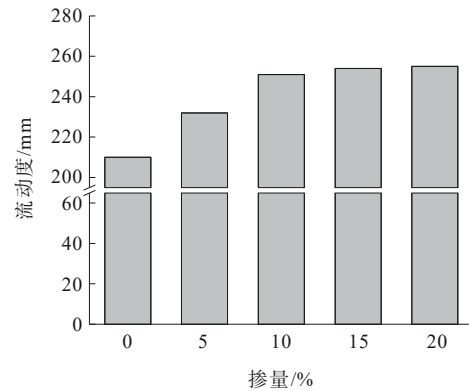


图5 煅烧渣土掺量对UHPC流动度的影响

Figure 5 Effect of calcined construction spoil content on the fluidity of UHPC

2.2 力学性能

图6展示了煅烧渣土掺量对UHPC抗压强度的影响。

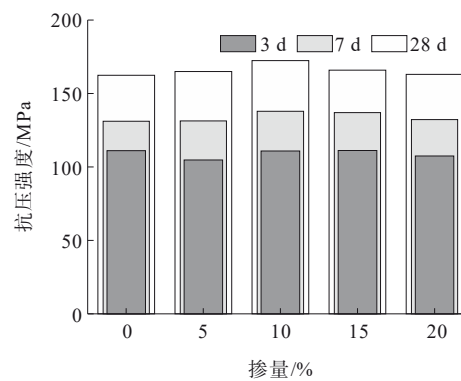


图6 煅烧渣土掺量对UHPC抗压强度的影响

Figure 6 Effect of calcined construction spoil content on the compressive strength of UHPC

由图6可知:随着煅烧渣土掺量增加,UHPC早期强度表现出一定波动。3 d龄期时,中等掺量(10%、15%)的强度与基准组接近。7 d龄期时,各掺量下UHPC强度普遍提升,其中10%和15%掺量明显优于基准,表明适量煅烧渣土对UHPC中期强度有促进作用。28 d结果差异更为突出,10%掺量UHPC强度最高,达到172.5 MPa,较基准提高近10 MPa;15%掺量下次之,而20%掺量下则接近基准值,基本失去优势。总体来看,10%掺量效果最佳,15%掺量表现良好,而过高掺量(如20%)则削弱了UHPC的后期强度。

强度提升主要归因于煅烧渣土的火山灰效应和微填充效应^[17-18]。一方面,煅烧渣土中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 在碱性环境下逐步参与二次反应,消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 并

生成新的凝胶产物,从而增强基体结构的致密性;另一方面,细颗粒掺入改善了浆体的颗粒级配,优化孔隙结构,使水化产物分布更加均匀,利于强度提升。然而,当煅烧渣土替代率过高时,有效水泥用量减少,反应潜力不足,导致早期强度下降且后期优势不明显。综上,煅烧渣土对UHPC抗压强度的影响呈现“低掺量略降—中等掺量提升—高掺量不利”的趋势,其中10%为较优替代比例,兼顾了各龄期强度发展。

煅烧渣土对UHPC抗折强度的影响规律与抗压强度存在一定差异,如图7所示。

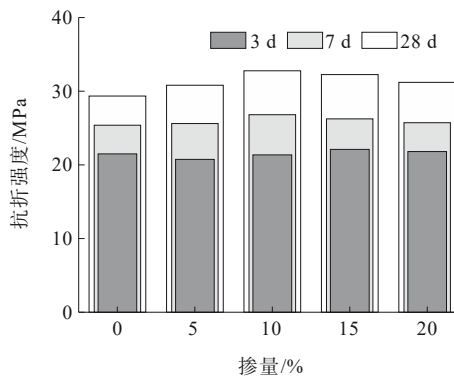


图7 煅烧渣土掺量对UHPC抗折强度的影响

Figure 7 Effect of calcined construction spoil content on the rupture strength of UHPC

由图7可知:3 d龄期时,各掺量下UHPC抗折强度差异不大,与基准值接近。7 d时UHPC强度均有所增长,但变化趋势不同于抗压强度,呈“先升后降”规律。其中10%掺量达到最高值26.8 MPa,15%掺量时略低但仍优于基准值;5%与20%掺量下与基准差别不大,表明中等掺量对UHPC抗折性能改善作用更明显。养护至28 d时,各组强度均显著提升。基准组为29.3 MPa,5%掺量下略有增加,10%时最高,为32.7 MPa;15%和20%掺量下均高于基准水平。与抗压强度不同,抗折强度并未因高替代率出现明显劣化,而是整体优于基准组,且最大值出现在10%掺量。

造成这一差异的原因在于:抗折强度更依赖于基体与骨料、纤维间界面区的致密性与均匀性。煅烧渣土细颗粒的填充效应能有效改善界面过渡区结构,增强基体的抗裂与抗折能力。而抗压强度则更受水化反应速率与凝胶产物数量影响,高替代率下因有效水泥减少而下降。由此可见,煅烧渣土对界面优化作用更突出,使抗折强度在较高掺量下仍能

保持稳定。

2.3 收缩

图8为煅烧渣土掺量对UHPC总收缩的影响。

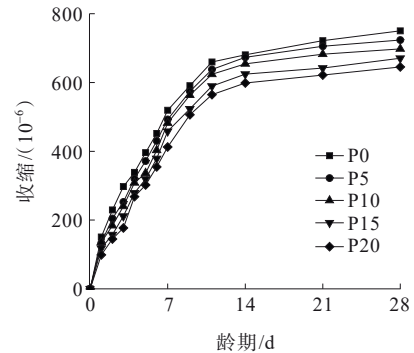


图8 煅烧渣土掺量对UHPC总收缩的影响

Figure 8 Effect of calcined construction spoil content on the total shrinkage of UHPC

由图8可知:不同煅烧渣土掺量下,UHPC收缩均随龄期增长而持续增加,其中早期(1~7 d)发展较快,随后趋于缓和。7 d时UHPC收缩量已达到28 d的63.8%~69.2%,这与相关研究结果一致^[19-22]。在相同龄期下,煅烧渣土替代率越高,UHPC收缩值越低,说明煅烧渣土具有减少UHPC收缩的作用。以20%煅烧渣土掺量的UHPC试件为例,其1 d、7 d和28 d收缩应变相较于基准组分别降低约30%、20%和14%。表明煅烧渣土的减缩效果随龄期延长而减小。

图9显示了煅烧渣土掺量对UHPC自收缩的影响。

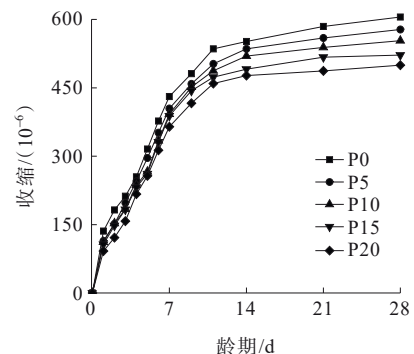


图9 煅烧渣土掺量对UHPC自收缩的影响

Figure 9 Effect of calcined construction spoil content on the autogenous shrinkage of UHPC

由图9可知:各掺量下UHPC的28 d自收缩为 $605.44 \times 10^{-6} \sim 499.71 \times 10^{-6}$,整体低于总收缩。结合图8中的数据,基准组1 d自收缩为 135.81×10^{-6} ,

约占同期总收缩的90%；至28 d时为 605.44×10^{-6} ，总收缩与自收缩差距进一步拉大，说明干燥收缩贡献不容忽视。不同煅烧渣土替代率下的自收缩变化趋势与总收缩的趋势相近。以掺量为20%的试样为例，1 d自收缩仅 91.78×10^{-6} ，较基准组下降32%，与总收缩降幅接近。随着龄期增长，差距基本保持不变，在28 d时，差距为 499.71×10^{-6} ，比基准组低16%，同期总收缩差距约为14%。

图10展示了不同煅烧渣土掺量下UHPC基体28 d自收缩与干燥收缩占总收缩的比例。

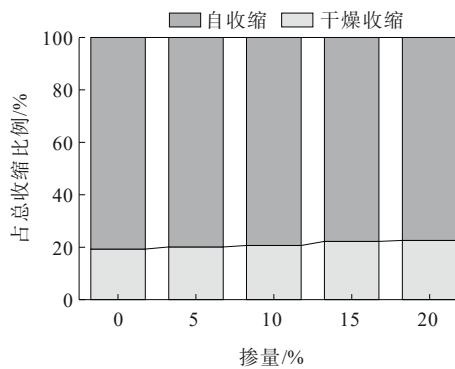


图10 自收缩与干燥收缩占UHPC总收缩的比例

Figure 10 Proportion of autogenous shrinkage and drying shrinkage in total shrinkage of UHPC

由图10可知：UHPC基体的收缩以自收缩为主，约占总收缩的80%，这与其他学者的结果一致^[23]。随着煅烧渣土替代率的提高，UHPC基体总收缩中干燥收缩的占比基本保持不变，煅烧渣土对UHPC干燥收缩的作用不显著，对自收缩则以降低作用为主。与抗压、抗折性能提升的机理不同，收缩性能降低主要源于“稀释效应”和“填充效应”^[23]。一方面，水泥用量减少使水化放热速率和凝胶生成量下降，从源头降低了自收缩的发展动力；另一方面，煅烧渣土颗粒的填充作用改善孔隙结构，减少毛细水迁移通道，从而降低干燥收缩。两方面共同作用，使不同龄期下掺煅烧渣土的试样均表现出更低的总收缩水平。

2.4 碳排放与经济分析

生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)是一种系统分析工具，用于比较不同煅烧渣土掺量对UHPC的环境影响。本研究采用“从摇篮到大门”的方法论，评估范围限定在生产系统。系统边界包括：水泥、硅灰、煅烧渣土的生产(涵盖原材料开采、运输、球磨、煅烧等环节)过程中的能源消耗，碳排放因

子如表3所示。例如“渣土”“煅烧渣土”的碳排放因子，是基于全生命周期视角，涵盖其破碎、颗粒筛分、物料球磨、800℃煅烧2 h等处理流程。各环节碳排放因子数值已在表3中对应列示，最终总碳因子为上述4个环节碳排放因子的累加值。不考虑其他原材料的能源消耗、施工阶段的运输、现场准备、搅拌以及使用阶段的能源消耗。因为这些环节的能耗占比通常较低，且差异性不显著，对不同方案的比较结果影响有限。通过将不同阶段的能源消耗和碳排放因子相乘来计算不同渣土替代方案生产的碳排放量，功能单位为 $1 \text{ m}^3 \text{ UHPC}$ 。

表3 各因素的碳排放因子

过程	碳排放来源	机械效率	碳排放因子	来源
原料	水泥		0.835 kg CO ₂ eq/kg	Shen等 ^[24]
	渣土		0.020 kg CO ₂ eq/kg	计算
	煅烧渣土		0.208 kg CO ₂ eq/kg	
	硅灰		0.482 kg CO ₂ eq/kg	丁超等 ^[25]
渣土处理	破碎	0.005 kW·h/kg		
	筛分	0.030 kW·h/kg	0.570 kg CO ₂ eq/kW·h	Huang等 ^[26]
	球磨	0.045 kW·h/kg		
	煅烧	0.250 kW·h/kg		

不同煅烧渣土掺量下每 1 m^3 UHPC的碳排放量如图11所示。

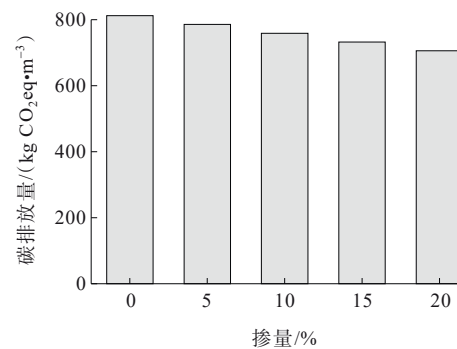


图11 煅烧渣土掺量对UHPC碳排放量的影响

Figure 11 Effect of calcined construction spoil content on carbon emissions of UHPC

由图11可知：随着煅烧渣土替代水泥比例的逐步提升，胶凝体系的碳排放量呈现出持续且显著的下降趋势。当煅烧渣土替代比例为0%时，碳排放量为 $812.41 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^3$ ；当替代比例增加至10%，碳排放量降至 $785.121 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^3$ ，相较基准组降低约3.36%；而当替代比例提高到20%，碳排放量显著

降低至 705.9 kg CO₂eq/m³,与基准组相比降幅达 13.11%。这一结果充分彰显出煅烧渣土在降低 UHPC 胶凝体系碳排放方面具有积极作用。

3 结论

本文研究了煅烧渣土掺量对 UHPC 工作性能、力学性能及收缩行为的影响,主要结论如下:

(1) 煅烧渣土的掺入可改善 UHPC 拌和物的工作性能。当煅烧渣土掺量从 0% 增加至 20%,UHPC 拌和物流动度相应从 210 mm 增至 255 mm,且呈现持续上升并趋于平稳的变化规律。

(2) 3 d 龄期时,各煅烧渣土掺量下 UHPC 力学性能差异不大,而 7 d 和 28 d 龄期时,随着煅烧渣土掺量的增加,UHPC 抗压强度与抗折强度整体上均呈现先增加后降低趋势。使用 10% 煅烧渣土时,UHPC 具有最优力学性能,其抗压强度和抗折强度分别为 172.5 MPa 和 32.7 MPa。

(3) 煅烧渣土的掺入显著降低了 UHPC 基体的收缩,尤其是自收缩(占比约 80%),这主要源于煅烧渣土的“稀释效应”和“填充效应”。

(4) 通过 LCA 分析,煅烧渣土的掺入可以降低 UHPC 的碳排放。当其掺量为 20% 时,UHPC 的碳排放较基准组降低了约 13.1%。

参考文献:

References:

- [1] 刘一帆,吴泽媚,张轩翰,等.超高性能混凝土流变特性及调控研究进展[J].硅酸盐学报,2023,51(11):3025-3038.
LIU Yifan, WU Zemei, ZHANG Xuanhan, et al. Rheological properties and their regulation of ultra-high performance concrete—a short review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(11): 3025-3038.
- [2] 张世昌,颜东煌,刘昀,等.UHPC-NC黏结面抗剪强度试验[J].中外公路,2025,45(4):138-143.
ZHANG Shichang, YAN Donghuang, LIU Yun, et al. Shear strength test of UHPC-NC bonding surface[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(4): 138-143.
- [3] 张占强,李顺凯,陈平,等.高活性氧化镁膨胀剂对UHPC性能的影响[J].功能材料,2023,54(4):4189-4195.
ZHANG Zhanqiang, LI Shunkai, CHEN Ping, et al. Effects of highly active MgO expansive agent on the performance of UHPC[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(4): 4189-4195.
- [4] 方驰,杨伟浩,任康,等.保水轻骨料对超高性能混凝土强度和自收缩的影响[J].中外公路,2025,45(2):65-72.
FANG Chi, YANG Weihao, REN Kang, et al. Effect of lightweight aggregate with water-holding capacity on strength and autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2025, 45(2): 65-72.
- [5] 易富,马泽宇,杨纪,等.火山石与偏高岭土对UHPC立方体抗压性能影响[J].大连理工大学学报,2023,63(6):646-655.
YI Fu, MA Zeyu, YANG Ji, et al. Effect of volcanic rocks and metakaolin on cube compressive properties of UHPC [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63 (6): 646-655.
- [6] YE Guang, NGUYEN V T. Mitigation of autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete by rice husk ash[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40 (2): 212-216.
- [7] 黄政宇,张猜兵.多孔超细粉对超高性能混凝土性能的影响研究[J].硅酸盐通报,2015,34(7):1736-1743.
HUANG Zhengyu, ZHANG Caibing. Effect of porous superfine powder on the performance of ultra high performance concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(7): 1736-1743.
- [8] 肖建庄,沈剑羽,段珍华,等.工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径[J].科学通报,2023,68(21):2722-2736.
XIAO Jianzhuang, SHEN Jianyu, DUAN Zhenhua, et al. Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(21): 2722-2736.
- [9] 陈晟豪,唐咸远,马杰灵,等.基于正交试验的钢渣微粉超高性能混凝土抗压强度影响因素分析[J].公路,2023,68(1):328-332.
CHEN Shenghao, TANG Xianyuan, MA Jiuling, et al. Analysis of influencing factors on compressive strength of ultra-high performance concrete with steel slag powder based on orthogonal test[J]. Highway, 2023, 68(1): 328-332.
- [10] 赵涛,郭军,梁庆国,等.盾构渣土改良试验及绿色利用[J].铁道工程学报,2021,38(3):107-112.
ZHAO Tao, GUO Jun, LIANG Qingguo, et al. An experiment of shield muck improvement and analysis of green utilization[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(3): 107-112.
- [11] 曾利群,鄢雨南,陈信峰.深圳地区风化花岗岩渣土资源化利用试验研究[J].非金属矿,2020,43(5):80-83.
ZENG Liqun, YAN Yunan, CHEN Xinfeng. Experimental study on resource utilization of weathered granite residue in Shenzhen area[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(5): 80-83.
- [12] 金宇,郑大鹏,王耀城,等.城市建筑废弃物制备复合水泥的环境和经济潜力评价[J].环境工程,2024,42(4):225-232.
JIN Yu, ZHENG Dapeng, WANG Yaocheng, et al. Evaluation of environmental and economic potential of composite cement made of municipal construction and

- demolition waste[J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(4): 225-232.
- [13] 陈登, 宋旭艳, 何智海. 煅烧渣土-白云石对水泥砂浆强度和膨胀性能的影响[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(1): 146-150.
CHEN Deng, SONG Xuyan, HE Zhihai. Effects of calcined muck-dolomite on strengths and expansion properties of cement mortar[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(1): 146-150.
- [14] 王国杰. 自密实混凝土圆环约束收缩试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(12): 173-180.
WANG Guojie. Experimental study on restrained shrinkage of self-compacting concrete by ring test[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(12): 173-180.
- [15] 贺雄飞, 陈亚豪, 张新东, 等. 超细粉煤灰形态对超高性能混凝土(UHPC)性能和结构的影响[J]. *材料导报*, 2024, 38(S1): 249-253.
HE Xiongfei, CHEN Yahao, ZHANG Xindong, et al. Effect of ultrafine fly ash morphology on ultra-high performance concrete(UHPC)properties and structure[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(S1): 249-253.
- [16] 莫宗云, 白力改, 王大光, 等. 偏高岭土对超高性能混凝土性能的影响研究[J]. *非金属矿*, 2018, 41(6): 30-32.
MO Zongyun, BAI Ligai, WANG Daguang, et al. Effect of metakaolin on the properties of ultra high performance concrete[J]. *Non-Metallic Mines*, 2018, 41(6): 30-32.
- [17] 莫宗云, 刘益良, 王大光, 等. 偏高岭土-水泥基材料力学性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(3): 911-917.
MO Zongyun, LIU Yiliang, WANG Daguang, et al. Research progress on the physical properties of cement-based materials blended with metakaolin[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(3): 911-917.
- [18] 李兵, 杨腾宇, 方昌乐, 等. 蒸养条件下超高性能混凝土收缩试验研究[J]. *中外公路*, 2024, 44(6): 90-97.
LI Bing, YANG Tengyu, FANG Changle, et al. Experimental investigation on shrinkage effect of ultra-high performance concrete under steam curing[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(6): 90-97.
- [19] 刘丹. 不同养护制度下活性粉末混凝土早期收缩的模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LIU Dan. Research on the early shrinkage-age model of reactive powder concrete in different curing conditions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [20] KOH K, RYU G, KANG S, et al. Shrinkage properties of ultra-high performance concrete (UHPC) [J]. *Advanced Science Letters*, 2011, 4(3): 948-952.
- [21] FU D B, XIA C, XU S, et al. Effect of concrete composition on drying shrinkage behavior of ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62: 105333.
- [22] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2025[J]. *中国公路学报*, 2025, 38(12): 1-153.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering research: 2025[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2025, 38(12): 1-153.
- [23] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(1): 13-28.
CHEN Baochun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(1): 13-28.
- [24] SHEN J Y, XIAO J Z, WEN G X, et al. Orthogonal test of alkali-activated slag solidified construction spoil, fluidity, compressive strength, water resistance and carbon emission[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140201.
- [25] 丁超, 贾子杰, 王振华, 等. 基于生命周期评价的UHPC碳排放控制潜力评估[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(4): 1242-1251.
DING Chao, JIA Zijie, WANG Zhenhua, et al. UHPC carbon emission control potential based on life cycle assessment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(4): 1242-1251.
- [26] HUANG X X, JIAO Z X, XING F, et al. Performance assessment of LC3 concrete structures considering life-cycle cost and environmental impacts[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 436: 140380.