

## 利用煤矸石粉制备生态型超高性能混凝土的设计研究

张敏<sup>1</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 武迪<sup>1</sup>, 郑强<sup>1</sup>, 李冠男<sup>1</sup>, 侯东帅<sup>1,2,\*</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 青岛 266525)

**摘要:**超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种性能优异的水泥基材料,但因其水泥用量较大,造成数倍于普通混凝土的二氧化碳排放量。基于颗粒紧密堆积理论,将煤矸石粉作为水泥替换材料制备 UHPC,旨在降低传统 UHPC 的碳排放。对煤矸石粉基 UHPC 进行系统表征发现煤矸石粉掺加劣化了 UHPC 堆积结构和工作性能,但对 UHPC 强度影响较小,含有高掺量(>40%)煤矸石粉的 UHPC 强度仍大于 120 MPa。本研究在降低 UHPC 高能耗的同时也为煤矸石的回收利用提供了新思路。

**关键词:**超高性能混凝土;煤矸石粉;生态化

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)03-0019-08

## Study of the design and preparation of a sustainable ultra-high performance concrete using coal gangue powder

ZHANG Min<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, ZHENG Qiang<sup>1</sup>, LI Guannan<sup>1</sup>, HOU Dongshuai<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong

Blue Economic Zone, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** Ultra-high performance concrete (UHPC) is a cement-based material with excellent performance. However, it causes high carbon dioxide emission due to the large content of cement. Based on the particle dense packing theory, this study prepares UHPC by replacing cement with coal gangue powder (CGP), which can effectively reduce carbon dioxide emissions and provide ideas for CGP management. The results show that the addition of CGP deteriorates the packing structure and working performance of UHPC while having slight effect on the strength of UHPC. Consequently, the strength of UHPC with a high content (>40%) CGP is greater than 120 MPa, which not only reduces the high energy consumption of UHPC but also provides a new idea for the recycling of CG.

**Key words:** ultra-high performance concrete; coal gangue powder; sustainable

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)因其超高的抗压强度和优异的耐久性而被广泛应用于超高层建筑、大跨度桥梁施工和海洋工程<sup>[1-3]</sup>。然而 UHPC 的水泥用量达 900~1150 kg/

收稿日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2006224); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE045)

作者简介: 张敏(1995—), 女, 湖南麻阳人。硕士, 研究方向为超高性能混凝土。E-mail: 179837592@qq.com。

\* 通信作者: 侯东帅(1986—), 男, 山东东营人。博士, 教授, 主要从事超高性能混凝土、轻骨料混凝土以及分子动力学模拟等方面的研究。E-mail: dshou@outlook.com。

$\text{m}^3$ ,其平均全球变暖潜能值为普通混凝土的4倍左右,增加了环境的负担<sup>[4]</sup>,而使用低能耗的胶凝材料部分替代水泥可以减轻UHPC对于环境的负担。HUANG等<sup>[5]</sup>使用石灰石粉设计低水泥用量UHPC,结果表明在石灰石粉掺量高达54%时抗压强度仍可以达到170 MPa,且具有较为优秀的工作性能。膨胀珍珠岩<sup>[6]</sup>、高炉矿渣<sup>[7]</sup>、粉煤灰<sup>[8]</sup>、赤泥<sup>[9]</sup>、铅锌尾矿<sup>[10]</sup>、偏高岭土<sup>[11-12]</sup>、甘蔗渣<sup>[13]</sup>、稻壳灰<sup>[14-16]</sup>等多种工农业废料也被用于制备生态型UHPC。生态型UHPC不仅能够降低能耗,还可以促进各种工农业废弃物的回收利用,进一步地减少了废弃物堆积造成的污染。

煤矸石是煤矿开采、洗涤和选矿过程中产生的固体废料,占煤炭产量的10%左右,根据有关数据测算,我国2021年煤矸石产生量约为7.43亿<sup>[17]</sup>,累积堆存量已达70多亿<sup>[18]</sup>。煤矸石的储存不仅占用了巨大的土地资源,而且污染了土壤、空气和地下水<sup>[19]</sup>,因此,煤矸石的可持续应用与管理日益迫切。已有研究<sup>[20-21]</sup>证明了使用煤矸石粉(Coal Gangue Powder, CGP)作为辅助性水泥材料(Supplementary Cementitious Materials, SCMs)制备出强度为30~50 MPa的普通混凝土的可行性,但研究使用煤矸石粉制备出抗压强度超过120 MPa的UHPC却鲜有报道。

基于以上讨论,本研究尝试利用煤矸石粉来代替水泥制备UHPC,并系统评价煤矸石粉基UHPC的性能,为煤矸石的回收利用提供新思路。

## 1 材料和方法

### 1.1 原材料

采用P.O 52.5水泥、硅灰、煤矸石粉、石英砂和减水剂来制备UHPC。主要胶凝材料的化学成分和粒径分别见表1和图1。煤矸石粉的XRD与SEM见图2,从图2(a)中可以看出,煤矸石粉的主要物相组成为高岭石、石英、莫来石、菱铁矿、白云母和伊利石。从图2(b)中可以看出,煤矸石粉呈不规则层状结构。

表1 水泥、硅灰与煤矸石粉的化学组成

材料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量
水泥	64.09	19.68	4.28	3.40	0.80	0.09	3.43	1.65	0.09	2.49
硅灰	0.37	94.58	0.26	0.15	0.86	0.13	0.71	0.48	0.17	2.29
煤矸石粉	1.75	36.32	58.64	1.62	0.22	0.10	0.68	0.41	0.15	0.11

### 1.2 制备UHPC样品

表2为制备UHPC的配合比。制备UHPC样品时先使用砂浆搅拌机低速搅拌4 min,将水泥、硅灰、煤矸石粉、石英砂混合均匀,然后将水和减水剂添加到干混合物中,当混合物变成浆体后,将搅拌机转到高速档搅拌1 min,以确保混合物的均匀。混合后将新拌的UHPC放入40 mm×40 mm×160 mm的模具中,随后放置在(20±2)°C和相对湿度为95%的环境条件中,待1 d硬化后拆模并如图3所示进行热养护。

### 1.3 试验方法

UHPC的设计依据颗粒紧密堆积理论,颗粒填充能力在堆积系统优化中起着至关重要的作用。因此,通过WONG等<sup>[22]</sup>提出的湿堆积密实度,探讨了添加CGP对UHPC的影响。湿堆积密实度 $\Phi$ 可根据式(1)计算。

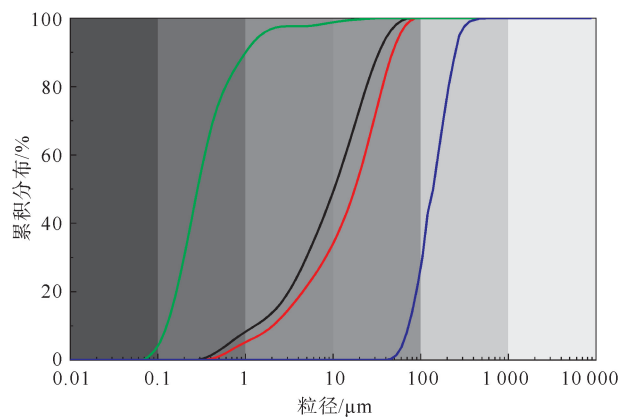


图1 各胶凝材料的粒径累积分布

— 硅灰; — 水泥; — 煤矸石粉; — 石英砂

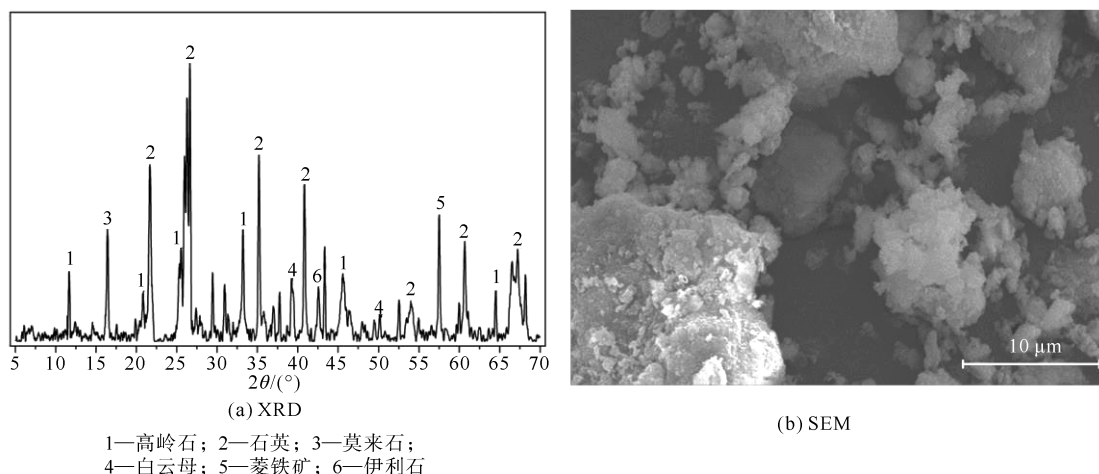


图 2 煤矸石粉的 XRD 和 SEM

表 2 配合比

kg/m<sup>3</sup>

样品	水泥	硅灰	煤矸石粉	石英砂	水	减水剂
Ref	950	174	0	990	180	30
CGP10	855	174	95	990	180	30
CGP20	760	174	190	990	180	30
CGP30	665	174	285	990	180	30
CGP40	570	174	380	990	180	30

注: Ref 为基准组; CGP10—40 分别代表煤矸石粉取代质量分数为 10%~40% 的水泥。

$$\Phi = \frac{M_{\max}}{V} \frac{1}{\rho_w R_w + \rho_s R_s + \sum_{x \in C} \rho_x R_x} \quad (1)$$

式中:  $x$  为不同的胶凝材料;  $C$  为所有胶凝材料组分;  $V$  为容器的体积;  $\rho_w$ 、 $\rho_s$  和  $\rho_x$  分别为水、石英砂和胶凝材料的密度;  $R_w$ 、 $R_s$  和  $R_x$  分别为水、石英砂和胶凝材料与总固体体积的体积比;  $M_{\max}$  为浆体的最大质量。

根据《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2016) 使用跳桌流动度(无任何震动)对 UHPC 的工作性能进行测试; 采用 Mini-V 漏斗进一步评价新拌 UHPC 浆体的黏度; 抗压强度按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—2021) 进行测试; 水化热测定参照《水泥水化热测定方法》(GB/T 12959—2008), 使用 TAMAIR 八通道等温量热仪(TA Instruments 公司, USA) 进行测试; 将 28 d 的样品磨成粉末并过 0.075 mm 筛后以 60 °C 烘干 24 h, 分别放入 PANalytical X-pert 3 X 射线衍射仪(Malvern Panalytical, NL) 与 Netzsch TG209F3(NETZSCH, DEU) 分析仪中进行 XRD(每步的范围与扫描速率分别为 5~65° 和 4(°)/min) 与 TG-DTG(在氮气中以 10 °C/min 的升温速率从室温升温到 800 °C) 测试; 采用汞侵入孔径测定法(MIP)测定 28 d 的 UHPC 样品(5 mm × 5 mm × 5 mm) 孔径分布和孔隙度。使用 Micromeritics Autopore V 9600(Micromeritics Instrument Corporation, USA) 分析样品, 最大压力为 60 000 psi(1 MPa=145 psi), 汞接触角为 140°。

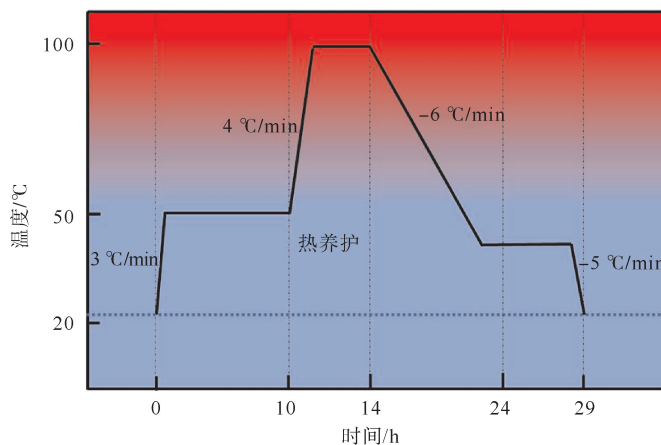


图 3 热养护步骤

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿堆积密实度

通过湿堆积密实度评价 CGP 对 UHPC 堆积结构的影响,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,CGP 的掺入会对堆积结构产生负面影响。基准组的湿堆积密实度最大为 0.8216,而在 CGP 掺量分别为 10%、20%、30%和 40%的样品中的湿堆积密实度分别为 0.8186、0.8090、0.8031 和 0.7914,呈线性降低。当 CGP 掺量为 40%时,湿堆积密实度降低了 3.67%。这是由于 CGP 颗粒呈不规则的层状结构,影响了 UHPC 中颗粒间的排列与堆积,从而劣化了堆积结构。

### 2.2 跳桌流动度

跳桌流动度与 Mini-V 漏斗通过时间如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着 CGP 掺量的增加,跳桌流动度降低,工作性能降低,Mini-V 漏斗通过时间也随之增加,即基体的黏度也随着 CGP 掺量的增加而增加,这与湿堆积密实度的结果相吻合。当 CGP 掺量为 40%时,跳桌流动度减少了 24.3%,Mini-V 漏斗的通过时间增加了 101.6%,这可能是由于 CGP 中高岭石的吸附能力较强,且 CGP 的比表面积比水泥颗粒大,吸水更多,导致 UHPC 工作性能的降低与黏度的增加。

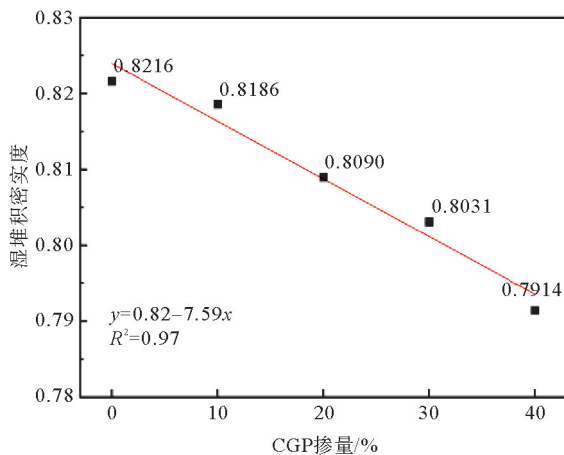


图 4 UHPC 的湿堆积密实度  
■ 湿堆积密实度; — 拟合曲线

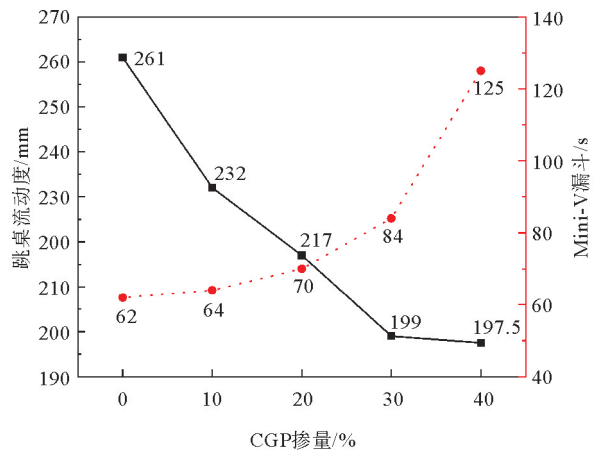


图 5 UHPC 的跳桌流动度与 Mini-V 漏斗  
■ 跳桌流动度; ··· Mini-V 漏斗

### 2.3 抗压强度

图 6 为不同 CGP 掺量下 UHPC 1、3、7 和 28 d 的抗压强度。由图 6 可以看出,虽然含有 CGP 的 UHPC 早期强度相比于基准组较低,这是因为随着 CGP 的掺入,水泥的含量较低,早期硬化中水化产物较少,但 28 d 龄期后水化基本完成,掺有 CGP 的 UHPC 与普通 UHPC 相比,抗压强度均提高且高于 120 MPa,这归因于 CGP 良好的火山灰活性所带来的补偿效应。值得注意的是,当 CGP 掺量高达 40%时,基体的抗压强度为 139.1 MPa,较基准组提高了 7.8%。

### 2.4 水化进程

通过水化热评价 CGP 对 UHPC 水化动力学的影响,放热速率与累积放热量如图 7 所示。由

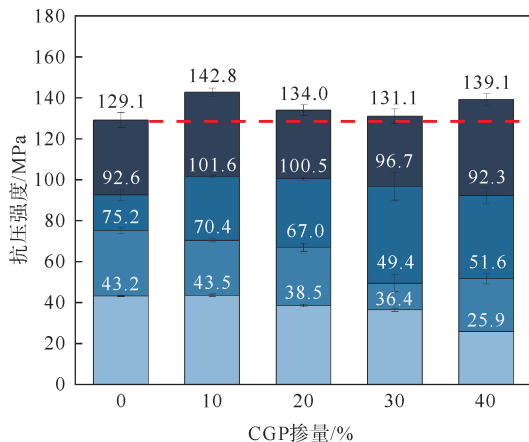


图 6 UHPC 各龄期的抗压强度

■ 1 d 强度; ■ 3 d 强度; ■ 7 d 强度; ■ 28 d 强度

图 7(a)可知,CGP 的掺入会缩短诱导期,加快水化进程,导致水化放热峰值点提前,但当掺量达到 40%时

峰值点延缓。且 CGP 的掺入会降低水化放热主峰峰值,这是因为  $C_3S$  和  $C_2S$  的水化放热导致水化放热主峰的出现,CGP 的掺入会使水化产物变少,从而导致主峰峰值降低。由图 7(b)可知,CGP 的掺入显著降低了 UHPC 的累积放热量,基准组 3 d 的累积放热量为 131.9 J/g;当 CGP 掺量为 40%时累积放热量最低,仅为 113.3 J/g,相较于基准组降低了 14.1%。

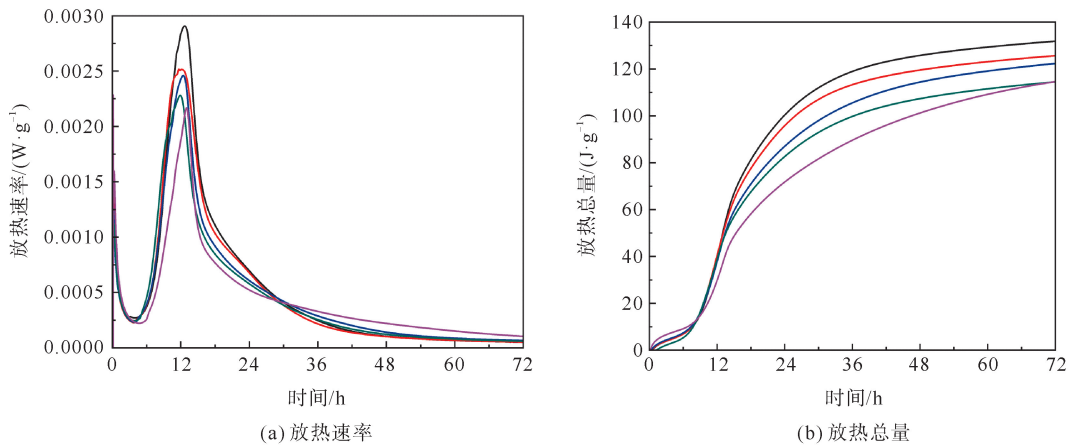


图 7 UHPC的放热速率与放热总量

— Ref; — CGP10; — CGP20; — CGP30; — CGP40

不同 CGP 掺量 UHPC 的 28 d XRD 分析结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,CGP 的掺入并没有改变水化产物的类型。图 8 中出现了  $C_3S$  和  $C_2S$  的衍射峰,这是由于 UHPC 的水胶比较低,存在未水化的水泥,且随着 CGP 的掺入,会减弱该部分的峰值。

样品的 TG 和 DTG 曲线如图 9(a)所示。由图 9(a)可以看出,所有样品呈现三个热失重阶段:第一阶段在 60~300 °C,为 C-S-H、AFt、AFm 相等水化产物的失水分解;第二阶段为氢氧化钙在 380~480 °C 时的分解所带来的失重峰;610~710 °C 为第三阶段,是由于碳酸钙分解引起的。同时,结合 DTG 曲线,通过式(2)对氢氧化钙的含量进行量化,如图 9(b)所示。

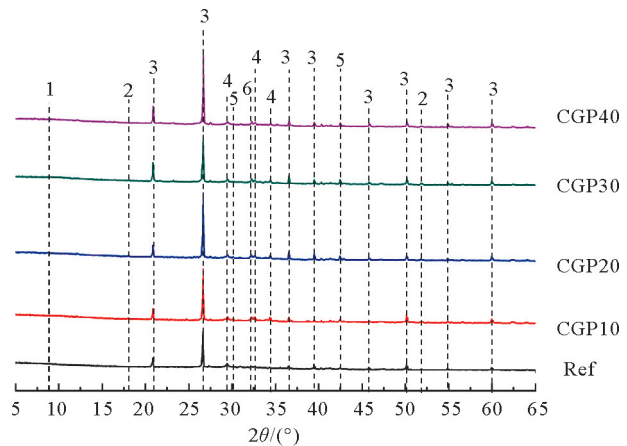


图 8 不同CGP掺量UHPC的XRD (28 d)

1—AFt; 2—氢氧化钙; 3—石英; 4— $C_3S$ ; 5— $C_2S$ ; 6—方解石

$$\eta = \frac{74}{18}\Delta_1 + \frac{74}{44}\Delta_2 \tag{2}$$

式中: $\eta$  为  $Ca(OH)_2$  的含量,%; $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  分别为  $Ca(OH)_2$  和  $Ca(CO)_3$  的质量损失。

由图 9(b)可知,CGP 的掺入会明显减少基体氢氧化钙的含量,与 XRD 的峰值变化一致。当 CGP 掺量为 40%时,氢氧化钙的含量降低了 54.6%。氢氧化钙的减少首先是因为随着 CGP 掺量的增加,水泥用量会减少,其熟料( $C_3S$  和  $C_2S$ )与水反应生成的氢氧化钙便会减少;其次是因为 CGP 具有火山灰活性,会消耗一定量的氢氧化钙。

### 2.5 微观结构

不同掺量的 28 d CGP 基 UHPC 的孔径分布和累积分布如图 10 所示。由图 10(a)可知,基准组的最可几孔径为 4.02 nm,掺入 CGP 各组的最可几孔径均在 3.29 nm 左右,但基准组的峰值要远远高于掺入 CGP 的组别。

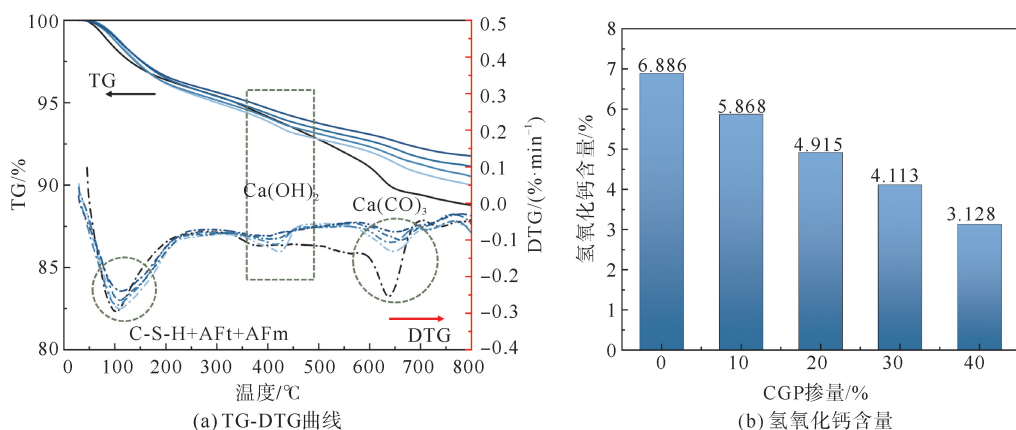


图9 UHPC的TG-DTG曲线和氢氧化钙含量

— Ref; — CGP10; — CGP20; — CGP30; — CGP40

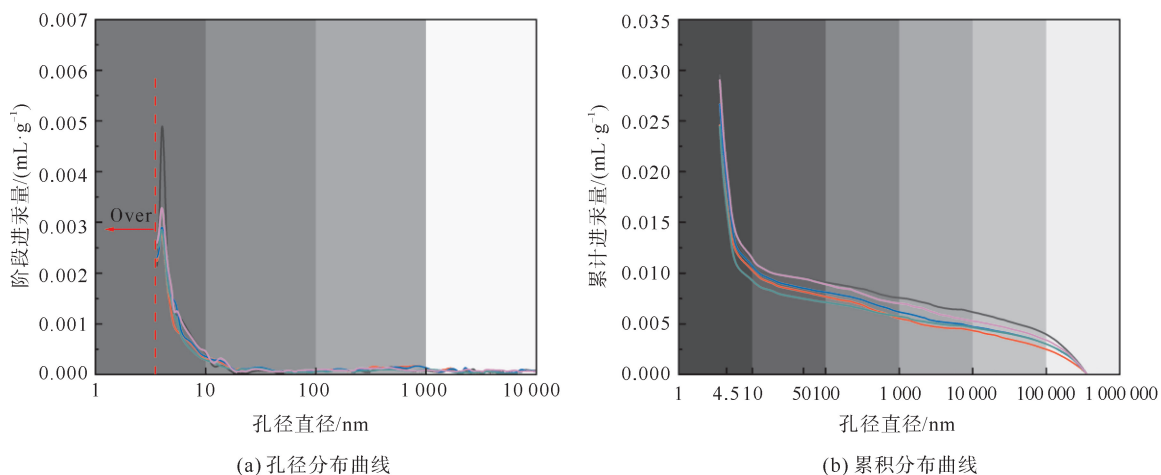


图10 UHPC的孔径分布与累积分布

— Ref; — CGP10; — CGP20; — CGP30; — CGP40

将测量的孔径分布分为4个尺寸范围<sup>[23-25]</sup>:凝胶微孔(<10 nm)、细孔(10~50 nm)、中间毛细孔(50~100 nm)和大毛细孔(>100 nm),且大于10 nm的孔隙会对UHPC的性能产生影响。由图11可知,掺入CGP能降低基体的总孔隙率,当掺量为10%时的总孔隙率降低最大为10.4%,凝胶孔隙含量也低于基准组,这也与力学性能提高的结果是相吻合的。但当掺量为40%时的总孔隙率要稍高于基准组,这可能是由于当CGP的掺量过大时,浆体的黏度高、流动度差,在制备过程中气泡难以排出导致总孔隙率略高。通过对孔隙结构的分析发现,当掺量低于40%时,CGP的加入可以细化浆体28 d的孔隙结构,减小凝胶微孔的含量。

### 2.6 二氧化碳排放量

根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)计算碳排放量(计算公式见式(3)),并结合各原材料成本与其他学者的研究<sup>[8,16,26-41]</sup>进行对比,如图12所示。

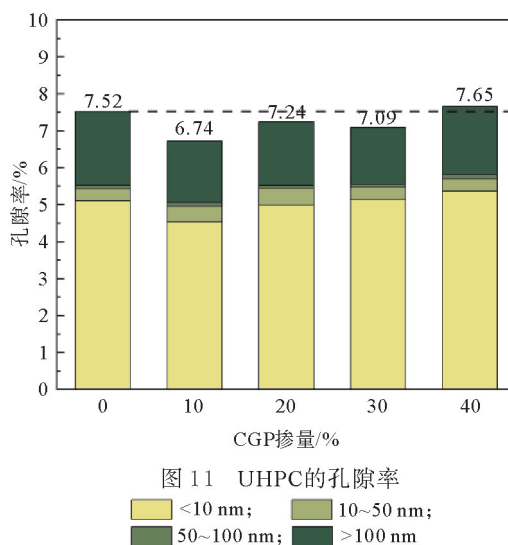


图11 UHPC的孔隙率

■ <10 nm; ■ 10~50 nm; ■ 50~100 nm; ■ >100 nm

$$Q = \sum E_i \times q_i \quad (3)$$

式中: $Q$  为该组混合料  $\text{CO}_2$  的排放量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $E_i$  为某原材料单位质量下的  $\text{CO}_2$  排放量,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;  $q_i$  为单位体积原材料的质量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

本研究中 CGP40 组的碳排放量仅为  $724.821 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 相较于基准组降低了  $51.95\%$ ; 且在保证抗压强度高于  $120 \text{ MPa}$  时, 单价仅为  $1679.7 \text{ 元}/\text{m}^3$ , 相较于基准组降低了  $4.60\%$ 。综合考虑成本与碳排放, 本研究制备的煤矸石粉基生态型 UHPC 在保证强度的前提下表现出优异的环境友好性与低成本性。

### 3 结论

1) CGP 的加入会劣化基体的堆积, 当 CGP 掺量为  $40\%$  时, 湿堆积密实度降低了  $3.67\%$ , 这是由于 CGP 的不规则层状结构影响了颗粒间的堆积结构。

2) CGP 的加入会降低基体的跳桌流动度且增加 Mini-V 漏斗通过时间, 当 CGP 掺量为  $40\%$  时, 跳桌流动度减少了  $24.3\%$ , Mini-V 漏斗的通过时间增加了  $101.6\%$ 。这是由于 CGP 中的高岭石吸附能力较强, 且 CGP 的比表面积较大, 吸水较多。

3) CGP 的掺入对于 UHPC 抗压强度有不同程度的提高, 且含有高掺量 ( $>40\%$ ) CGP 的 UHPC 强度为  $139.1 \text{ MPa}$ , 满足超高性能混凝土 28 d 抗压强度大于  $120 \text{ MPa}$  的要求。当 CGP 掺量为  $40\%$  时, 累积放热量相较于基准组降低了  $14.1\%$ 。

4) 由于 CGP 的火山灰活性, 促进了后期的水化过程, 降低了基体的氢氧化钙含量, 当 CGP 掺量为  $40\%$  时, 氢氧化钙的含量降低了  $54.6\%$ , 且能在后期补偿强度发展。

5) 本研究制备的煤矸石粉基生态型 UHPC 能够降低传统 UHPC 碳排放量  $50\%$  以上, 表现出极高的环境友好性和低成本性, CGP 最佳掺量为  $40\%$ 。

### 参考文献 (References):

- [1] LARRARD F D, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 997-1009.
- [2] SCHMIDT M, FEHLING E. Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete. American Concrete Institute (ACI), 2005.
- [3] 赵筠, 廉慧珍, 金建昌. 钢-混凝土复合的新模式: 超高性能混凝土(UHPC/UHPFRC)[J]. 混凝土世界, 2013(10): 56-69. ZHAO Jun, LIAN Huizhen, JIN Jianchang. New mode of steel-concrete composite: Ultra high performance concrete (UHPC/UHPFRC)[J]. China Concrete, 2013(10): 56-69.
- [4] DE BRITO J, KURDA R. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281(8): 123558.
- [5] HUANG W, KAZEMI-KAMYAB H, SUN W, et al. Effect of cement substitution by limestone on the hydration and microstructural development of ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 77: 86-101.
- [6] WANG X P, WU D, GENG Q H, et al. Characterization of sustainable ultra-high performance concrete (UHPC) including expanded perlite[J]. Construction and Building Materials, 2021, 303: 124245.
- [7] ABDULKAREEM O M, BEN FRAJ A, BOUASKER M, et al. Mixture design and early age investigations of more sustainable UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 235-246.
- [8] ALSALMAN A, DANG C N, MICAH H W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials[J]. Construction and Building Materials, 2017, 133: 135-145.

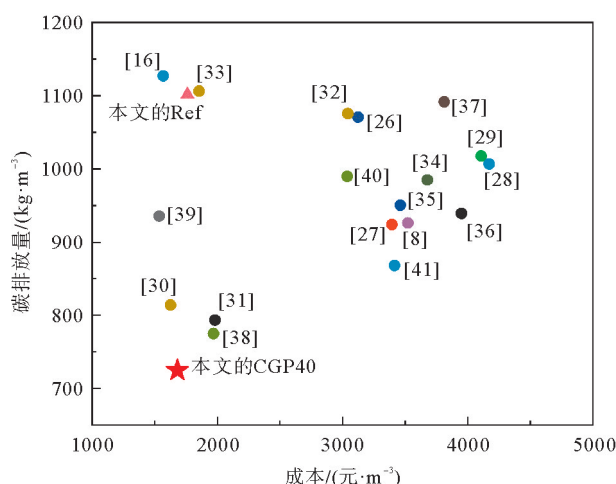


图 12 不同 UHPC 的成本与碳排放  
[n] 为参考文献序号

- [9] HOU D S, WU D, WANG X P, et al. Sustainable use of red mud in ultra-high performance concrete (UHPC): Design and performance evaluation[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 115:103862.
- [10] WANG X P, YU R, SHUI Z H, et al. Development of a novel cleaner construction product: Ultra-high performance concrete incorporating lead-zinc tailings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 172-182.
- [11] ARORA A, ALMUJADDIDI A, KIANMOFRAD F, et al. Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104: 103346.
- [12] MO Z, GAO X, SU A. Mechanical performances and microstructures of metakaolin contained UHPC matrix under steam curing conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268:121112.
- [13] WU N S, JI T, HUANG P, et al. Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 125881.
- [14] KANG S H, HONG S G, MOON J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 115: 389-400.
- [15] MOSABERPAHA M A, UMAR S A. Utilizing rice husk ash as supplement to cementitious materials on performance of ultra high performance concrete: A review[J]. *Materials Today Sustainability*, 2020, 7/8:100030.
- [16] HUANG H H, GAO X J, WANG H, et al. Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 149: 621-628.
- [17] 常纪文, 杜根杰, 杜建磊, 等. 我国煤矸石综合利用的现状、问题与建议[J]. *中国环保产业*, 2022(8): 13-17.  
CHANG Jiwen, DU Genjie, DU Jianlei, et al. Present situation, problems and suggestions on comprehensive utilization of coal gangue in China[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022 (8): 13-17.
- [18] 王鹏涛. 煤矸石综合利用的现状及存在的问题研究[J]. *科学技术创新*, 2019 (16): 182-183.  
WANG Pengtao. Study on present situation and existing problems of comprehensive utilization of coal gangue[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2019 (16): 182-183.
- [19] QUEROL X, IZQUIERDO M, MONFORT E, et al. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 75(2): 93-104.
- [20] 孙晓虎, 王丽萍, 景威. 煤矸石粉作混凝土掺合料的研究[J]. *四川水泥*, 2014 (9): 200-202.  
SUN Xiaohu, WANG Liping, JING Wei. Study on coal gangue powder as concrete admixture[J]. *Sichuan Cement*, 2014 (9): 200-202.
- [21] 王栋民, 王剑锋, 范兴旺, 等. 自燃煤矸石粉对混凝土耐久性的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(5): 839-843.  
WANG Dongmin, WANG Jianfeng, FAN Xingwang, et al. Impact of self-ignited coal gangue powder on the durability of concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(5): 839-843.
- [22] WONG H H C, KWAN A K H. Packing density of cementitious materials, part 1: Measurement using a wet packing method[J]. *Materials and Structures*, 2007, 41(4): 689-701.
- [23] MEHTA P K, MONTERIO P J M. *Concrete: Microstructure properties and materials*[M]. London: McGraw-Hill, 2006.
- [24] 吴中伟, 廉慧珍. *高性能混凝土*[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.  
WU Zhongwei, LIAN Huizhen. *High performance concrete*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999.
- [25] ZENG Q, LI K, FEN-CHONG T, et al. Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash[J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(1): 194-204.
- [26] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174:107021.
- [27] SHAFIEIFAR M, FARZAD M, AZIZINAMINI A. Experimental and numerical study on mechanical properties of ultra high performance concrete (UHPC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 156: 402-411.
- [28] WU Z M, SHI C J, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 103: 8-14.
- [29] TAYEH B A, AKEED M H, QAIDI S, et al. Ultra-high-performance concrete: Impacts of steel fibre shape and content on flowability, compressive strength and modulus of rupture[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01615.
- [30] LI P P, BROUWERS H, CHEN W, et al. Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242: 118112.
- [31] DING M X, YU R, FENG Y, et al. Possibility and advantages of producing an ultra-high performance concrete (UHPC) with ultra-low cement content[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273:122023.
- [32] LI Y R, ZENG X H, SHI Y, et al. A comparative study on mechanical properties and environmental impact of UHPC with belite cement and portland cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380:135003.