

## 铜尾矿对堆积结构优化的超高性能混凝土性能影响研究

马志强, 陈涛, 马怡彤, 王鑫鹏\*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:**为安全环保地解决铜尾矿堆存问题,采用堆积结构优化的超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)回收铜尾矿。研究表明铜尾矿的掺加会增加 UHPC 的堆积密实度。同时,研究了铜尾矿对 UHPC 的工作性能、力学性能、耐久性和水化产物的影响,并考虑了铜尾矿中重金属离子在 UHPC 中的浸出性能,为减少铜尾矿中重金属离子浸出,安全环保利用铜尾矿提供了思路。

**关键词:**铜尾矿;超高性能混凝土;堆积结构;浸出量

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)06-0001-09

## Study on the influence of copper tailings on the performance of ultra-high performance concrete with packing structure optimization

MA Zhiqiang, CHEN Tao, MA Yitong, WANG Xinpeng\*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

**Abstract:** To address the issue of copper tailings storage safely and environmentally, ultra-high performance concrete (UHPC) with packing structure optimization is used to recover copper tailings. The results show that the addition of copper tailings can increase the packing density of UHPC. Simultaneously, the study investigates the influence of copper tailings on the workability, mechanical properties, durability and hydration products of UHPC, and the leaching performance of heavy metal ions in copper tailings in UHPC is also considered. This study provides a way to reduce the leaching of heavy metal ions from copper tailings and to use copper tailings safely and environmentally.

**Key words:** copper tailings; ultra-high performance concrete (UHPC); packing structure; leaching amount

铜尾矿是铜矿石提取有价元素后形成的固废,每提取 1 t Cu 约产生 400 t 废石和尾矿<sup>[1]</sup>。当前,铜尾矿主要露天堆放或存储在尾矿库中,占用大量生活和农业用地。高含量重金属元素污染周围土壤和地下水,对生态环境构成威胁<sup>[1-2]</sup>,而且尾矿库溃坝频发,导致人员伤亡和经济损失<sup>[3]</sup>。因此,亟待寻求一种安全环保的方法回收铜尾矿。

超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)是一种基于致密颗粒堆积理论制备的具

收稿日期:2023-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008220);山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE045)

作者简介:马志强(1998—),男,江苏连云港人。硕士,研究方向为超高性能混凝土。E-mail:1019985675@qq.com。

\*通信作者:王鑫鹏(1989—),男,辽宁鞍山人。博士,副教授,主要从事超高性能混凝土、滨海长寿命混凝土等方面的研究。  
E-mail:wangxinpeng@qut.edu.cn。

有超高强度和耐久性的先进水泥基材料<sup>[4]</sup>,在公路桥梁、结构修复、港口等工程上具有应用前景。传统UHPC使用硅灰制备,然而硅灰的团聚问题<sup>[5]</sup>导致胶凝材料并不能达到理论设计的堆积结构优化效果。粉煤灰微珠可以更好地填充水泥颗粒间的孔隙,优化UHPC的堆积密实度。研究显示<sup>[6-7]</sup>,UHPC致密的堆积结构有利于强度和耐久性的提升,同时研究表明致密的UHPC基体可以降低重金属离子的浸出风险<sup>[8]</sup>。

基于此,本研究在之前的研究基础上<sup>[9]</sup>,优化了UHPC的堆积密实度,并探究铜尾矿对UHPC性能的影响。采用湿堆积密实度评价胶凝材料堆积结构,研究UHPC的工作性能、力学性能、耐久性、微结构和水化产物。同时,考虑到铜尾矿残留的重金属离子浸出风险,对制备的铜尾矿基UHPC的长期浸出性能进行评估。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

水泥:采用青岛山铝水泥有限公司生产的P·O 52.5普通硅酸盐水泥,密度为 $3150 \text{ kg/m}^3$ ,平均粒径为 $10.4 \mu\text{m}$ ,比表面积为 $360 \text{ m}^2/\text{kg}$ ;粉煤灰微珠:采用广州运宏粉煤灰综合开发公司生产的I级粉煤灰,密度为 $2520 \text{ kg/m}^3$ ,平均粒径为 $2.2 \mu\text{m}$ ;铜尾矿:采用的铜尾矿的平均粒径为 $4.66 \mu\text{m}$ ,比表面积为 $645 \text{ m}^2/\text{kg}$ ;砂:使用粒径范围为 $0.075\sim 0.6 \text{ mm}$ 的石英砂,密度为 $2.56 \text{ g/cm}^3$ ;减水剂:采用江苏南京苏博特公司制造的聚羧酸高效减水剂,固含量 $20\%$ ;水:采用符合混凝土用水标准的自来水。原材料的化学组成见表1,粒径分布如图1(a)所示,铜尾矿的X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)如图1(b)所示。

表1 原材料的化学组成

组成	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	LOI
水泥	63.37	21.77	4.97	3.49	0.66	0.10	2.62	2.03	0.99
粉煤灰微珠	7.80	56.50	24.50	4.30	3.28	1.40	0.65	1.30	0.27
铜尾矿	19.50	56.45	6.87	9.58	1.72	0.13	1.94	3.08	0.73
石英砂	0.02	90.65	6.42	0.36	1.70	0.08	0.15	0.25	0.37

注:LOI(Loss of Ignition)为烧失量。

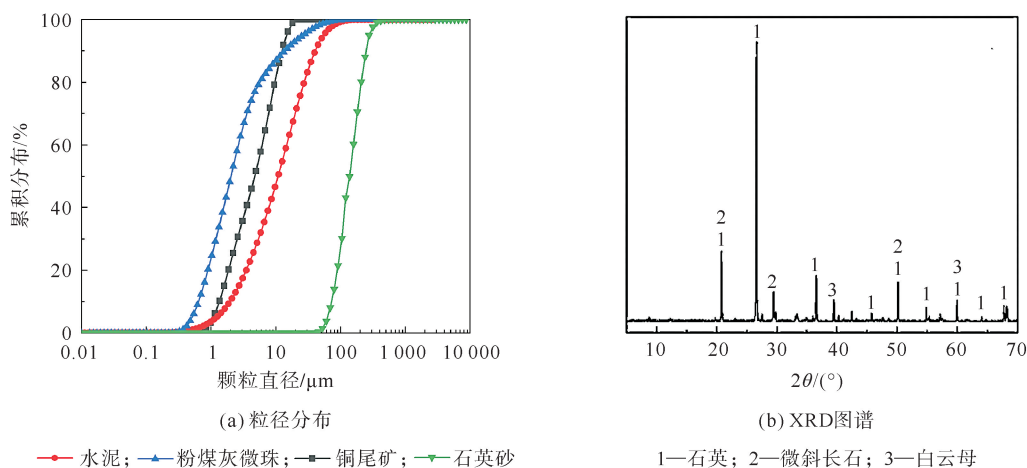


图1 原材料粒径分布与铜尾矿 XRD 图谱

### 1.2 配合比设计

由于粉煤灰微珠的填充,释放了更多的空隙中的水<sup>[10]</sup>,因而在极低的水胶比下材料可以形成浆体,通过之前的研究<sup>[9]</sup>,设计的配合比如表2所示。Ref. 为基准组,C10—C30 分别代表铜尾矿取代水泥的质量分数为 $10\%\sim 30\%$ 。

表 2 铜尾矿 UHPC 试验配合比

组别	水泥	粉煤灰微珠	铜尾矿	石英砂	kg/m <sup>3</sup>	
					水	减水剂
Ref.	840	560	0	1400	100	40
C10	756	560	84	1400	100	40
C20	672	560	168	1400	100	40
C30	588	560	252	1400	100	40

### 1.3 制备工艺

将水泥、粉煤灰微珠、铜尾矿和石英砂在砂浆搅拌机中均匀干拌 90 s;接着加入水和减水剂,慢搅(转速 140 r/min)至成浆后,快搅(280 r/min)60 s,将制备好的浆体装入模具中成型。拆模后将试件在标准养护条件下养护至规定龄期(3、7、28 d)进行测试。

### 1.4 试验方法

#### 1.4.1 堆积结构评价

新拌 UHPC 的堆积结构对硬化后材料性能有影响,通常采用堆积密实度作为量化指标评价新拌混凝土的堆积结构优劣。本研究采用湿堆积密实度测试方法<sup>[1]</sup>测试新拌浆体的堆积密实度。

#### 1.4.2 工作性能

本研究采用跳桌流动度对 UHPC 的工作性能进行测量,测试方法依照《水泥胶砂流动度测试方法》(GB/T 2419—2005)。

#### 1.4.3 力学性能

采用抗压强度和抗折强度评价 UHPC 的力学性能,测试方法依照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)。

#### 1.4.4 耐久性

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)采用电通量法评价 UHPC 耐久性。

#### 1.4.5 长期浸出评价

长期浸出试验可以研究铜尾矿在堆积结构优化的 UHPC 中重金属浸出行为,进而评价材料对环境的影响和应用方案的可行性。

参照荷兰标准《连续水槽浸出试验》(NEN 7375)对 UHPC 长期浸出评价。试验分为 6 个阶段更换浸提剂,如表 3 所示。浸提剂质量比为  $m(\text{HNO}_3) : m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 : 2$ ,  $\text{pH} = 3.75$ ,浸提剂与试块的液固比为 10 L/kg,分别连续浸泡试块。

#### 1.4.6 孔结构

孔结构特征影响 UHPC 的力学性能、耐久性和长期浸出行为,采用压汞法评价铜尾矿对堆积结构优化 UHPC 的孔结构的影响。实验仪器为 AutoPore V 9600 全自动压汞仪,测试样品为养护 28 d 的净浆样品,测试前将样品放在无水乙醇中浸泡 24 h 用以终止水化,接着在  $(60 \pm 2)^\circ\text{C}$  下干燥 6 h。

#### 1.4.7 XRD 分析

采用 X 射线衍射技术对 UHPC 的物相组成进行分析,并通过热重分析不同掺量铜尾矿对堆积结构优化 UHPC 的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量的影响。物相分析采用型号为 D8 DISCOVER 的 X 射线衍射仪对样品进行测试,X 射线源为  $\text{CuK}\alpha$ ,扫描范围为  $5 \sim 70^\circ$ ,扫描步长为  $0.02^\circ$ ,速度为 0.30 s/步,工作电压为 40 kV,电流为 30 mA。

表 3 浸提剂更换周期

浸出阶段	浸提剂更换时间	
	累计时间/d	间隔时间/h
1	0.25	6
2	1	18
3	2.25	30
4	4	42
5	9	120
6	16	168

### 1.4.8 热重分析

热重采用型号为TAQ600的热差-热重同步热分析仪进行测试,取5~10 mg试样粉末放入坩埚中,试验气氛为 $N_2$ ,升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,升温区间为 $30\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆积密实度

图2为铜尾矿掺量对堆积结构优化的UHPC基体堆积结构的影响规律,结果显示,铜尾矿的掺入提升了UHPC的堆积密实度,优化了堆积结构。基准组堆积密实度为0.7362,随着铜尾矿掺量的增加分别增长了10.07%、13.31%和11.48%。堆积密度的提高可能是由于适当大小的铜尾矿颗粒的填充作用,它进一步填充了颗粒之间的空间。

### 2.2 工作性能

如图3所示,随着铜尾矿的增加,流动度明显下降,基准组流动度为265 mm,掺入铜尾矿后流动度呈线性下降,随着掺量的增加流动度分别下降了3.02%、5.66%和8.30%。虽然通过湿堆积密实度的结果可知,尾矿掺入后能够提升堆积程度,释放颗粒间被包裹的水来增加流动度,但是由于铜尾矿的高比表面积,使得这部分挤出的水难以形成较厚的水膜,导致颗粒间摩擦力增大,流动度下降<sup>[12]</sup>。

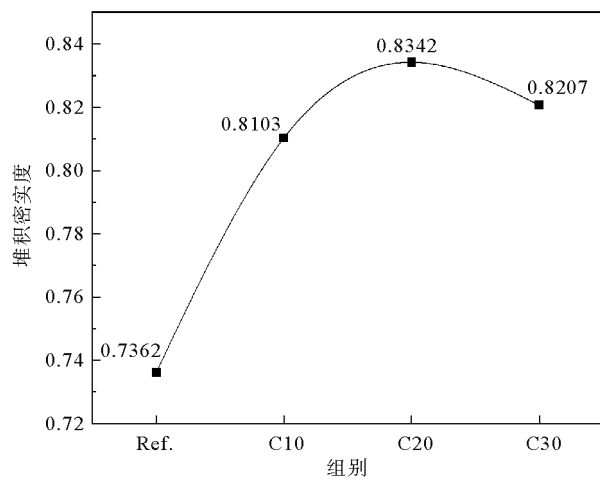


图2 铜尾矿掺量对堆积结构优化的UHPC堆积密实度的影响

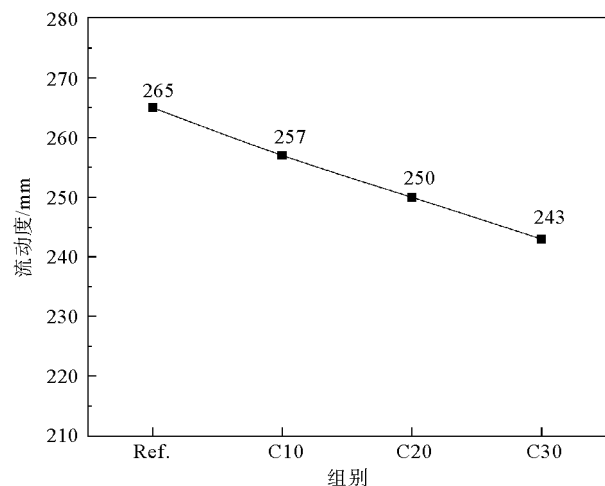


图3 铜尾矿掺量对堆积结构优化的UHPC流动度的影响

### 2.3 力学性能

试件标准养护3、7和28 d的抗压和抗折强度如图4所示。可以看出,随着铜尾矿掺量的增加,UHPC的强度逐渐降低。3 d时,基准组的抗压强度最高为54.7 MPa,随着掺量的增加抗压强度分别下降为41.7、34.9、27.9 MPa。7和28 d时,抗压强度显示出随铜尾矿掺量增加而降低的趋势。抗折强度的变化与抗压强度相似,所有掺入铜尾矿的组别抗折强度较基准组均有降低,以28 d抗折强度为例,基准组强度为15.0 MPa,而随着铜尾矿掺量的增加,抗折强度分别为14.8、14.1和12.8 MPa。

这主要是由于:①铜尾矿没有活性<sup>[13]</sup>,因此不能有效地参与混凝土的硬化过程,从而影响混凝土的强度;②铜尾矿中含有各种杂质,如硫化物、氧化物、氯化物等,这些杂质对混凝土的性能产生负面影响。但C20(堆积密实度最大组)的28 d抗压强度仍保持90 MPa以上,加入钢纤维后有制备UHPC的可行性。

### 2.4 耐久性

不同铜尾矿掺量对堆积结构优化的UHPC的电通量影响见表4。少量铜尾矿对UHPC抗氯离子渗透性能影响不大,含铜尾矿和不含铜尾矿样品表现相似。在7 d时,基准组电通量为222.6 C,随着铜尾矿掺量的增加,电通量分别增加到223.5和233.8 C;30%掺量时,电通量下降至213.8 C。28 d时,基准组

和不同掺量试样电通量值均为 0。原因可能为:①化学影响。铜尾矿含 CuO 等成分,可能与混凝土中的水泥及其他材料发生反应,影响混凝土整体性能,降低渗透性能。②颗粒填充效应。铜尾矿颗粒可能填充混凝土中孔隙,减少 Cl<sup>-</sup> 渗透,提高抗氯离子渗透性能<sup>[14]</sup>。

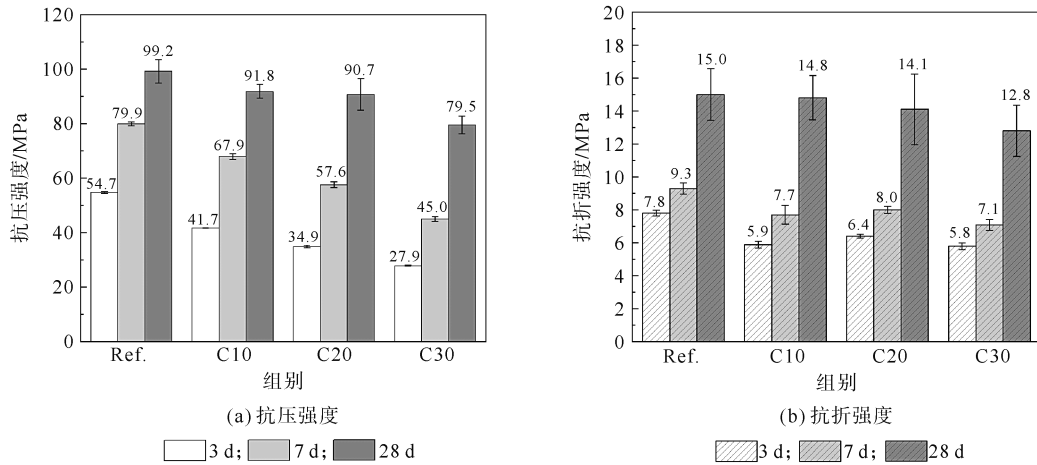


图 4 铜尾矿掺量对堆积结构优化的 UHPC 力学性能影响

表 4 不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的 UHPC 不同龄期电通量

组别	Ref.	C10	C20	C30
7 d	222.6	223.5	233.8	213.8
28 d	0	0	0	0

### 2.5 长期浸出评价

图 5 为各阶段浸出液中 Cu 和 Zn 的浓度。结果表明,所有元素的浸出浓度完全满足《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)中的要求,而且还满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的限值。

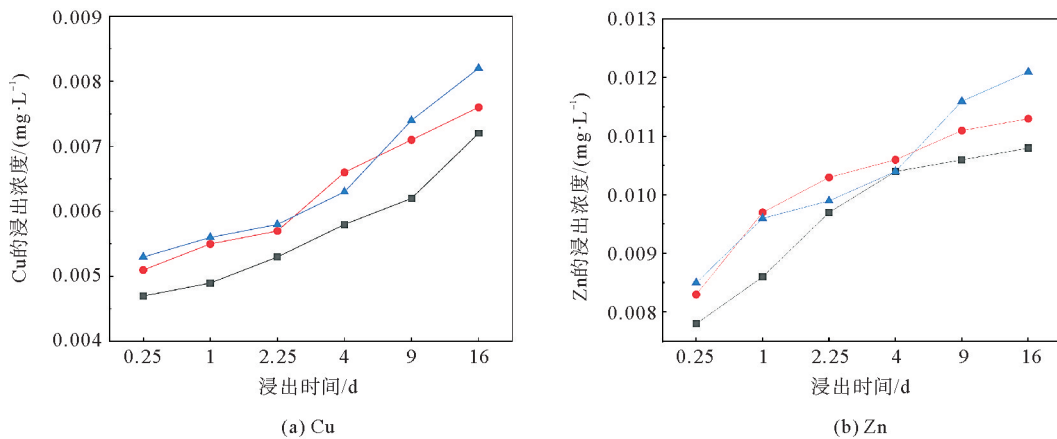


图 5 各浸出阶段浸出液中 Cu 和 Zn 的浸出浓度

—■— C10; —●— C20; —▲— C30

试块中 Cu 和 Zn 各浸出阶段单位面积累积释放量,根据式(1)和式(2)计算:

$$E_i^* = \frac{V \times C_i}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon_n^* = \sum_{i=1}^n E_i^* \quad (2)$$

式中:  $E_i^*$  为单位面积下浸出阶段  $i$  的元素浸出量,  $\text{mg}/\text{m}^2$ ;  $V$  为浸出液体积,  $\text{L}$ ;  $C_i$  为样品浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $A$  为浸出试验试块的表面积,  $\text{m}^2$ ;  $\epsilon_n^*$  为单位面积下元素累积释放量,  $\text{mg}/\text{m}^2$ 。

根据式(1)和式(2)计算得到单位面积累积释放量如图6所示。由图6可知, Cu和Zn累积释放量随浸出时间的变化规律, 在前4 d浸出速率增长较快, 4 d后浸出量增加速率减缓。

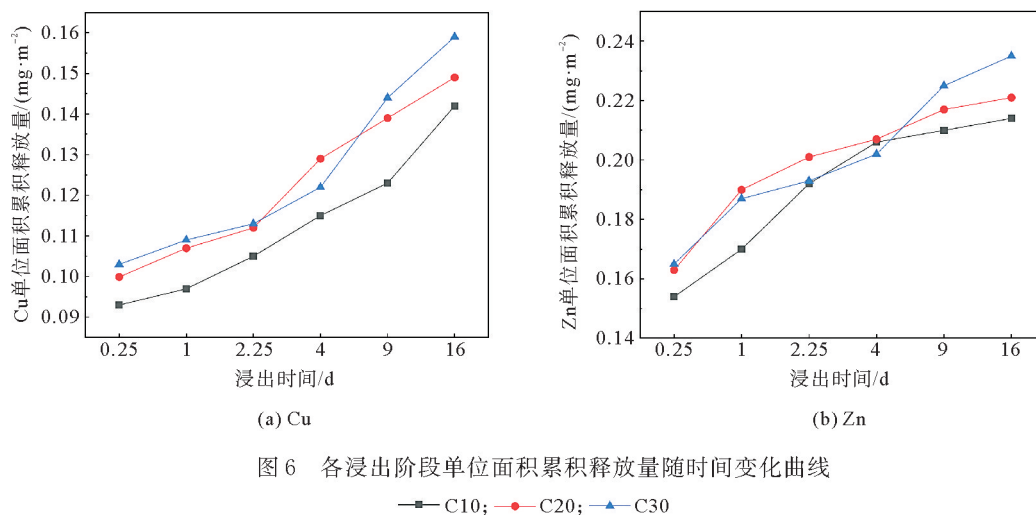


图6 各浸出阶段单位面积累积释放量随时间变化曲线

—■— C10; —●— C20; —▲— C30

## 2.6 孔结构

图7和表5展示了不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的UHPC孔径分布曲线和孔结构参数。结果表明, 铜尾矿在不同掺量下对UHPC堆积结构的影响不同。总孔隙率随着铜尾矿的增加呈现先降低后上升的趋势, 最可几孔径在20%铜尾矿掺量时最小。这可能是因为在20%掺量下, 堆积密实度明显提高, 优化了初始孔隙结构, 使后续水化过程中保持了优异的孔隙结构。

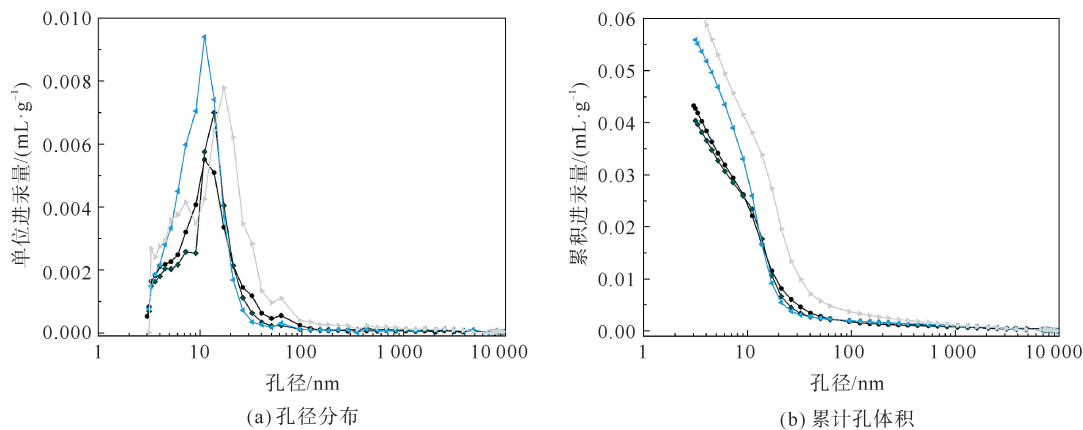


图7 铜尾矿掺量对堆积结构优化的UHPC孔结构的影响

—●— Ref.; —■— C10; —▲— C20; —□— C30

表5 总孔隙率和孔径分布

组别	孔径分布/%			最可几孔径/nm	临界孔径/nm	总孔隙率/%
	凝胶孔 ( $<10$ nm)	中毛细孔 ( $10\sim50$ nm)	大毛细孔 ( $50$ nm $\sim 10$ $\mu\text{m}$ )			
Ref.	2.27	2.08	0.30	11.1	21.1	5.55
C10	1.82	2.26	0.26	13.7	21.1	5.01
C20	3.20	2.51	0.24	11.0	21.1	7.26
C30	2.78	3.49	0.62	17.1	40.3	7.89



通过表 5 可知,虽然总孔隙率增加,但是孔径小于 50 nm 的孔隙率占比在 70%以上。按孔径对混凝土强度的影响,混凝土中的孔可分为无害孔(<20 nm)、少害孔(20~50 nm)、有害孔(50 nm~0.2 μm)和多害孔(>0.2 μm),其中无害孔和少害孔的孔径小于 50 nm<sup>[15]</sup>。因此,真正劣化孔结构并且引起强度和耐久性降低的最不利因素为有害孔和多害孔含量的增加。

### 2.7 XRD 分析

图 8 为不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的 UHPC 在 28 d 龄期下的 XRD 图谱。可以看出,材料的水化产物类型并未随着铜尾矿的作用而发生改变。通过图谱发现,28 d 主要的水化产物的物相依然是衍射峰在 9°的钙矾石(Ettringite, PDF # 83-371 1289)、18 和 34°的氢氧化钙(Portlandite, PDF # 04-0733)。值得注意的是,Ca(OH)<sub>2</sub> 的衍射峰值强度并未发生明显的变化,表明铜尾矿几乎没有火山灰活性,不影响水化产物的产生。此外,在 32、34 和 41°均发现 C<sub>2</sub>S(PDF # 83-0460)和 C<sub>3</sub>S(PDF # 85-1378)的衍射峰,这是由于 UHPC 的水胶比较低,存在大量未水化的水泥。

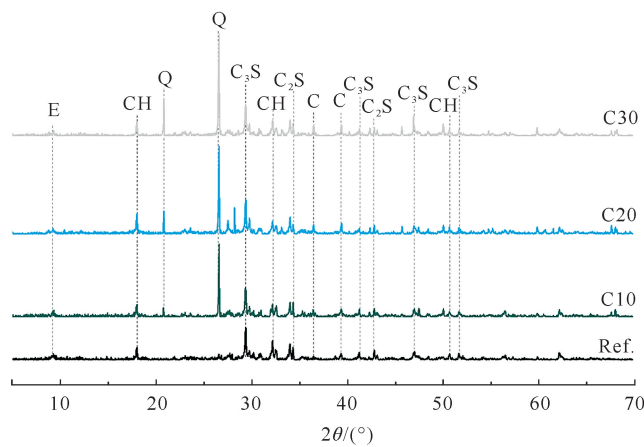


图 8 不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的UHPC在28 d时XRD图谱

E—钙矾石; C—方解石; Q—石英; C<sub>2</sub>S—硅酸二钙; C<sub>3</sub>S—硅酸三钙; CH—氢氧化钙

### 2.8 热重分析

图 9 显示了不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的 UHPC 28 d 时的 TG 和 DTG 曲线。在所有的样品中均出现了 3 个失重峰,分别是:①60~200 °C, C-S-H 和钙矾石中自由水和结合水的蒸发;②410 °C 左右, Ca(OH)<sub>2</sub> 的分解;③650~750 °C, CaCO<sub>3</sub> 的脱碳<sup>[16]</sup>。

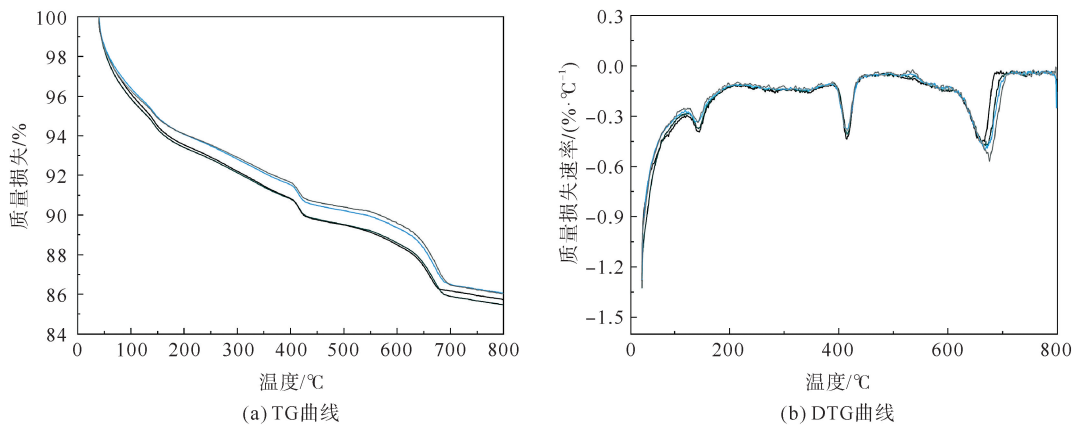


图 9 不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的UHPC在28 d时热重曲线

— Ref.; — C10; — C20; — C30

对于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量,根据质量损失速率曲线,使用式(3)对每个样品进行量化<sup>[17]</sup>。

$$m_{\text{CH}} = W_{\text{CH}} \times \frac{M_{\text{CH}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} + W_{\text{CC}} \times \frac{M_{\text{CH}}}{M_{\text{CO}_2}} \quad (3)$$

式中: $m_{\text{CH}}$  为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量; $W_{\text{CH}}$  和  $W_{\text{CC}}$  为质量损失速率曲线中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和  $\text{CaCO}_3$  的失重质量; $M_{\text{CH}}$ 、 $M_{\text{H}_2\text{O}}$  和  $M_{\text{CO}_2}$  分别为  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的摩尔质量。

计算结果如表 6 所示,可以发现,随着铜尾矿的加入和掺量的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的质量分数并没有明显的变化,该规律与 XRD 结果呈现的规律一致,造成这一现象的原因是加入的铜尾矿几乎没有火山灰活性。

表 6 不同铜尾矿掺量下堆积结构优化的 UHPC 在 28 d 时  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数 %

组别	Ref.	C10	C20	C30
质量分数	7.65	8.47	8.86	8.78

### 3 结论

1) 铜尾矿掺入能够有效提升 UHPC 的堆积密实度,当铜尾矿掺量为 20% 时堆积密实度提升 13.31%。堆积结构优化的 UHPC 流动度在掺入铜尾矿后逐渐降低。此外,由于铜尾矿优异的填充作用,补偿了其低活性导致的强度劣化,掺量 20% 时 UHPC 28 d 抗压强度仅下降了 8.57%,同时具有优异的抗氯离子渗透性能(28 d 电通量为 0 C)。

2) 依据标准 NEN 7375 对铜尾矿基 UHPC 中重金属离子的长期浸出行为进行评价,各阶段的浸出液均满足《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)、《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的限值,表明本研究所设计的铜尾矿基 UHPC 能够有效地在长期服役过程中对铜尾矿中有害成分进行固化,防止有害成分浸出。

3) 孔结构结果表明虽然铜尾矿取代水泥后由于稀释效应导致水化产物生成量减少,总孔隙率增加,但掺量 20% 时孔径与基准组相似,处于无害孔的范围内。由于铜尾矿几乎没有火山灰活性,XRD 结果显示  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的衍射峰值强度并未发生明显的变化,并且由于 UHPC 的水胶比较低,存在大量未水化的水泥。此外,通过热重曲线计算  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量,结果显示,随着铜尾矿掺量的增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量并没有明显的变化,该规律与 XRD 结果呈现的规律一致。

#### 参考文献(References):

- [1] 罗冰,王梓龙,杜娟. 基于循环经济的铜尾矿综合利用浅析[J]. 矿业研究与开发,2019,39(3):137-140.  
LUO Bing,WANG Zilong,DU Juan. Analysis on comprehensive utilization of copper mine tailings based on recycle economy[J]. Mining Research and Development,2019,39(3):137-140.
- [2] SANGHOOR Lee. Geochemistry and partitioning of trace metals in paddy soils affected by metal mine tailings in Korea[J]. Geoderma,2006,135(10):26-37.
- [3] LUIS Moreno,LVARS Naretnieks. Long-term environmental impact of tailings deposits[J]. Hydrometallurgy,2006,83(1/2/3/4):176-183.
- [4] 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)之一 钢-混凝土复合模式的现状、问题及对策与 UHPC 发展历程[J]. 混凝土世界,2013(10):56-69.  
ZHAO Jun,LIAN Huizhen,JIN Jianchang. A new mode of steel-concrete composite:Ultra-high performance concrete (UHPC/UHPFRC) Part 1 The status quo, problems and countermeasures of steel-concrete composite mode and the development history of UHPC[J]. China Concrete,2013(10):56-69.
- [5] CHEN Yuxuan,LI Shaohua,BRAHIM Mezari,et al. Effect of highly dispersed colloidal olivine nano-silica on early age properties of ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Composites,2022,131:104564.
- [6] 刘潇,范定强,胡锋,等. 基于 D-最优设计方法预测超高性能混凝土的湿堆积密实度及力学性能[J]. 节能,2020,39(7):99-104.  
LIU Xiao,FAN Dingqiang,HU Feng,et al. Prediction of wet packing density and mechanical properties of ultra-high performance con-



- crete based by D-Optimal design method[J]. *Energy Conservation*, 2020, 39(7): 99-104.
- [7] 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)之三 收缩与裂缝, 耐高温性能, 渗透性与耐久性, 设计指南[J]. *混凝土世界*, 2013(12): 60-71.  
ZHAO Jun, LIAN Huizhen, JIN Jianchang. A new mode of steel-concrete composites: Ultra-high performance concrete (UHPC/UHPFRC) Part 3 Shrinkage and cracking, high temperature resistance, permeability and durability, design guidelines[J]. *China Concrete*, 2013(12): 60-71.
- [8] ZHU Yuanyuan, RONG Zhidan, JIAO Maopeng, et al. Valorization and enhancement mechanism of ferrochrome slag as aggregate for manufacturing ultra-high performance concrete (UHPC)[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 144: 105295.
- [9] HOU Dongshuai, ZHANG Min, MA Zhiqiang, et al. Comparative optimization of densified system of ultra-fine particles (DSP) and Horsfield filling toward UHPC fabrication[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 144: 105267.
- [10] CHEN Jiajian, NG Pui Lam, LI Leogu, et al. Production of high-performance concrete by addition of fly ash microsphere and condensed silica fume[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 172: 165-171.
- [11] WONG Henry, ALBERT Kwok Hung Kwan. Packing density of cementitious materials: Part 1 Measurement using a wet packing method[J]. *Materials and Structures*, 2007, 41(4): 689-701.
- [12] QIU Jingping, GUO Zhenbang, YANG Lei, et al. Effects of packing density and water film thickness on the fluidity behaviour of cemented paste backfill[J]. *Powder Technology*, 2020, 359: 27-35.
- [13] 施麟芸, 匡敬忠, 刘松柏, 等. 铜尾矿建材化应用研究现状及矿物组成影响作用规律[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(10): 3511-3524.  
SHI Linyun, KUANG Jingzhong, LIU Songbai, et al. Research status of building material application of copper tailings and influencing rules of mineral composition[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 41(10): 3511-3524.
- [14] ZHANG Yuxing, SHEN Weiguo, WU Miaomiao, et al. Experimental study on the utilization of copper tailing as micronized sand to prepare high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244: 118312.
- [15] 毕雯惠, 朱亚光, 徐培蓁, 等. 浮选脱碳粉煤灰砂浆性能试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2023, 44(2): 1-8.  
BI Wenhui, ZHU Yaguang, XU Peizhen, et al. Study on the performance of flotation decarburized fly ash mortar[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2023, 44(2): 1-8.
- [16] 曹永丹, 曹钊, 张金山. 煅烧煤矸石对硅酸盐水泥胶砂力学性能及微观结构的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(2): 356-362.  
CAO Yongdan, CAO Zhao, ZHANG Jinshan. Effect of calcined coal gangue on the mechanical property and microstructure of hydrated Portland cement[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(2): 356-362.
- [17] 赵燕茹, 刘明, 王磊, 等. 碳化高温后普通混凝土抗压强度及孔结构演化规律[J]. *材料导报*, 2022, 36(19): 110-117.  
ZHAO Yanru, LIU Ming, WANG Lei, et al. Evolution law of concrete strength and pore structure after carbonization at high temperature[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(19): 110-117.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)