

## 基于正交实验铜尾矿-铅锌尾矿制备骨料研究

李冠男, 王鑫鹏, 武迪, 侯东帅\*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

**摘要:**尾矿堆存存在侵占土地资源、生态环境破坏等诸多问题,从经济效益和生态环境方面考虑,亟待一种新型回收利用尾矿的方法。针对铜尾矿和铅锌尾矿难以大宗利用的难题,并为缓解建筑行业天然砂石骨料短缺的问题,提出基于多种尾矿的骨料建材化利用方案。基于正交实验建立铜尾矿和铅锌尾矿比例、水泥掺量、硅灰掺量 3 个影响因素和人造骨料单颗粒抗压强度的关联机制,求解得到铜尾矿-铅锌尾矿骨料较好的水平因素为水泥掺量 20%、硅灰掺量 10%、铜尾矿与铅锌尾矿比例 1:2,并对骨料浸出行为及混凝土应用进行系统评价。

**关键词:**人造骨料;浸出行为;正交实验;铜尾矿;铅锌尾矿

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2025)02-0032-08

## Study on the preparation of aggregate from copper tailings-lead-zinc tailings based on orthogonal experiment

LI Guannan, WANG Xinpeng, WU Di, HOU Dongshuai\*

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

**Abstract:** Tailing stacking has many problems, such as land occupation and ecological environment damage. Considering the economic benefits and ecological environment, a new method of recycling tailings is urgently needed. Aiming at the problem that copper tailings and lead-zinc tailings are difficult to be used in large quantities and in order to alleviate the shortage of natural sand and gravel aggregates in the construction industry, a utilization scheme of aggregate building materials based on various tailings is proposed. Based on the orthogonal experiment, the correlation mechanism between the three influencing factors of copper tailings and lead-zinc tailings ratio, cement content and silica fume content and the compressive strength of the single particle of artificial aggregate was established. The better horizontal factors of copper tailings-lead-zinc tailings aggregate are 20% cement content, 10% silica fume content, 1:2 copper tailings and lead-zinc tailings ratio, and the leaching behavior of artificial aggregate and the application of concrete were systematically evaluated.

**Key words:** artificial aggregate; leaching behavior; orthogonal experiment; copper tailings; lead-zinc tailings

收稿日期:2024-01-09

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

作者简介:李冠男(1998—),男,山东潍坊人。硕士,研究方向为超高性能混凝土。E-mail:1160863050@qq.com。

\*通信作者:侯东帅(1986—),男,山东东营人。博士,教授,主要从事建筑材料分子动力学、材料结构与性能的多尺度、新型磷酸镁基快硬性修复材料、超高性能混凝土的研发与应用等方面的研究。E-mail:dshou@outlook.com。

尾矿是一种有害的固体废弃物,其目标成分较低,无法投入生产<sup>[1]</sup>。堆存是现阶段处置尾矿常用的方式<sup>[2]</sup>,但堆存占大量土地资源且造成了严重的环境污染,危害当地的生态环境,对人类健康构成了巨大的威胁<sup>[3]</sup>。因此,亟待探寻尾矿安全、高效综合利用的办法。

尾矿建材化利用是目前研究的热点,林海威等<sup>[4]</sup>将铜尾矿磨细后代替砂掺入到透水混凝土中,并对混凝土性能进行系统表征。曾亮等<sup>[5]</sup>将铅锌尾矿代替粉煤灰制备混凝土并对其各项性能进行表征。ONU-AGULUCHI 等<sup>[6]</sup>利用铜尾矿潜在活性替代水泥并制备出生态混凝土。然而目前尾矿建材化研究大多基于单一品种尾矿,且配合比设计方法大多是将尾矿粉取代水泥。随着取代率的增高,混凝土机械性能劣化明显。为缓解这种材料资源压力,国家要求高质量发展,提高大宗固废材料的利用率,并鼓励制备砂石骨料、陶粒等制品用于建筑材料中,发展探索治理生态问题新技术。

基于此,本文综合利用铜尾矿、铅锌尾矿,以硅酸盐水泥、硅灰为黏结剂,通过造粒机制备人造骨料,采用正交实验建立铜尾矿-铅锌尾矿比例、水泥掺量、硅灰掺量与铜尾矿-铅锌尾矿骨料单颗粒抗压强度的关联机制,设计和优化人造骨料,并对其重金属离子浸出等性能进行表征。

## 1 原材料及实验方法

### 1.1 原材料

水泥:采用平均粒径为 10  $\mu\text{m}$ 、比表面积为 360  $\text{m}^2/\text{kg}$  的 P·O425 普通硅酸盐水泥,由青岛山铝水泥有限公司生产,水泥化学组成见表 1。硅灰:采用  $\text{SiO}_2$  含量为 94.65%、密度为 2200  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、比表面积为 18 816  $\text{m}^2/\text{kg}$  的硅灰,由成都东南星公司生产,硅灰化学组成见表 1。细骨料:采用表观密度为 2560  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、粒径范围为 0.075~0.6 mm 的石英砂,由湖南富仁公司生产。粗骨料:采用青岛地区破碎花岗岩石子,粒径为 5~20 mm,表观密度为 2876  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,堆积密度为 1577  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。减水剂:采用聚羧酸高效减水剂,固含量为 20%,由江苏南京苏博特公司生产。

铜尾矿:铜尾矿砂产自江西九江城门山矿区,比表面积为 654  $\text{m}^2/\text{kg}$ ,平均粒径为 4.66  $\mu\text{m}$ ,粒径分布见图 1。用球磨机将铜尾矿砂磨细,通过李氏比重瓶法测得铜尾矿粉密度为 3.13  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,铜尾矿的 X 射线衍射如图 2 所示,铜尾矿主要矿物为石英、微斜长石、白云母,铜尾矿化学组成见表 1。

铅锌尾矿:铅锌尾矿砂由广东龙门县上仓铅锌尾矿有限公司提供,粒径分布见图 3。用球磨机将铅锌尾矿砂磨细,通过李氏比重瓶法测得铅锌尾矿粉密度为 3.17  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,铅锌尾矿的 X 射线衍射如图 4 所示,铅锌尾矿主要物相成分以石英为主,其次为白云石、方解石,以及其他的无定型相,铅锌尾矿化学组成见表 1。

表 1 原材料的化学组成

原材料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CuO	ZnO	SrO	LOI
水泥	67.78	18.55	4.34	3.71	0.09	1.85	0.10	0	0	0	2.58
硅灰	0.69	95.56	0.34	0.18	0.11	0.89	0.52	0	0	0	0
铜尾矿	19.50	56.44	6.87	9.58	0.16	3.08	0.16	0.03	0	0.01	0
铅锌尾矿	29.21	17.66	3.43	24.00	0.30	2.28	0.09	0	0.61	0.05	0

注:LOI(Loss of Ignition)为烧失量。

### 1.2 配合比设计

本研究基于 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)正交实验对铜尾矿-铅锌尾矿骨料进行配合比设计,其中影响因素 A 为水泥掺量、影响因素 B 为铜尾矿与铅锌尾矿比例、影响因素 C 为硅灰掺量,每个因素取 3 个水平,A 因素水平设置为 5%、10%、20%,B 因素水平设置为 2:1、1:1、1:2,C 因素水平设置为 0、5%、10%。对每组配比进行 28 d 单颗粒抗压强度测试,正交配合比如表 2 所示,其中减水剂掺量参照原材料饱和减水剂掺量确定,拌和水掺量根据制丸机工作时浆体工作性能确定。

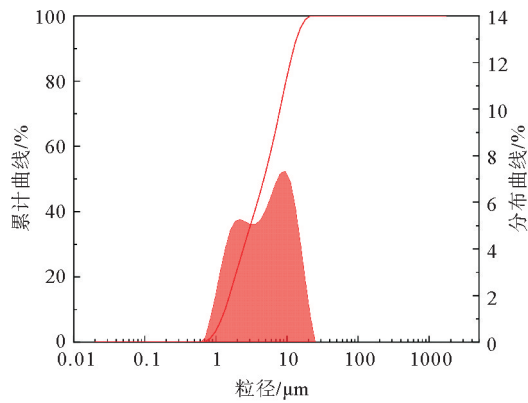


图1 铜尾矿粒径分布曲线

— 累计曲线; ■ 分布曲线

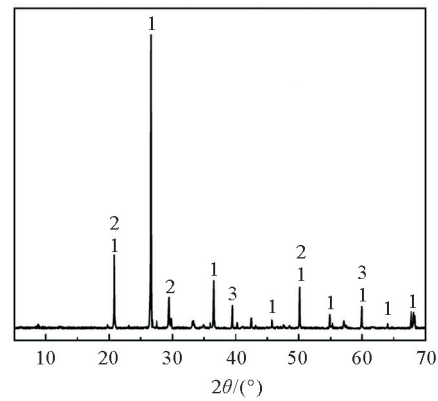


图2 铜尾矿XRD衍射分析图谱

1—石英; 2—微斜长石; 3—白云母

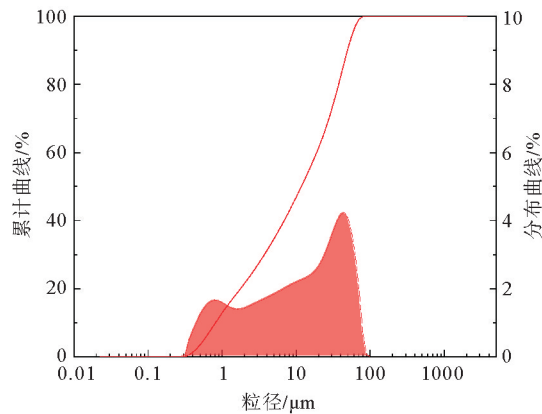


图3 铅锌尾矿粒径分布曲线

— 累计曲线; ■ 分布曲线

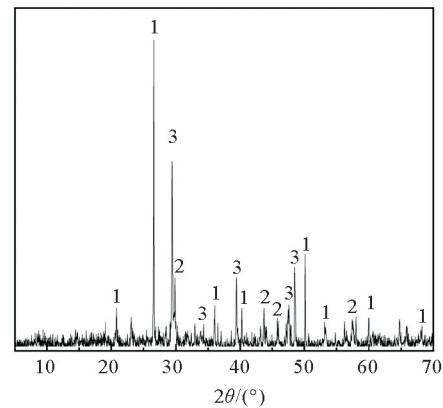


图4 铅锌尾矿XRD衍射分析图谱

1—石英; 2—白云母; 3—方解石

表2 铜尾矿-铅锌尾矿骨料配合比

kg/m<sup>3</sup>

编号	水泥	铅锌尾矿	铜尾矿	硅灰	减水剂	水
T1	19.5	247.0	123.5	0	7.9	35.8
T2	19.5	175.5	175.5	19.5	8.5	29.7
T3	19.5	110.5	221.0	39.0	9.1	30.0
T4	39.0	221.0	110.5	19.5	8.7	25.0
T5	39.0	156.0	156.0	39.0	9.3	26.8
T6	39.0	117.0	234.0	0	8.1	38.3
T7	78.0	182.0	91.0	39.0	9.7	31.0
T8	78.0	156.0	156.0	0	8.5	35.4
T9	78.0	97.5	195.0	19.5	9.1	26.5

### 1.3 制备工艺

骨料制备流程见图5, 首先将铜尾矿、铅锌尾矿、水泥、硅灰干料按比例放入搅拌机充分搅拌1 min后加入水、减水剂继续搅拌直至成浆, 将浆体放入制丸机, 用机器生产出直径为10 mm的球形骨料。骨料硬化后放入养护室养护28 d。实验使用的制丸机由温岭市奥力中药机械有限公司生产, 型号为AW-15S。

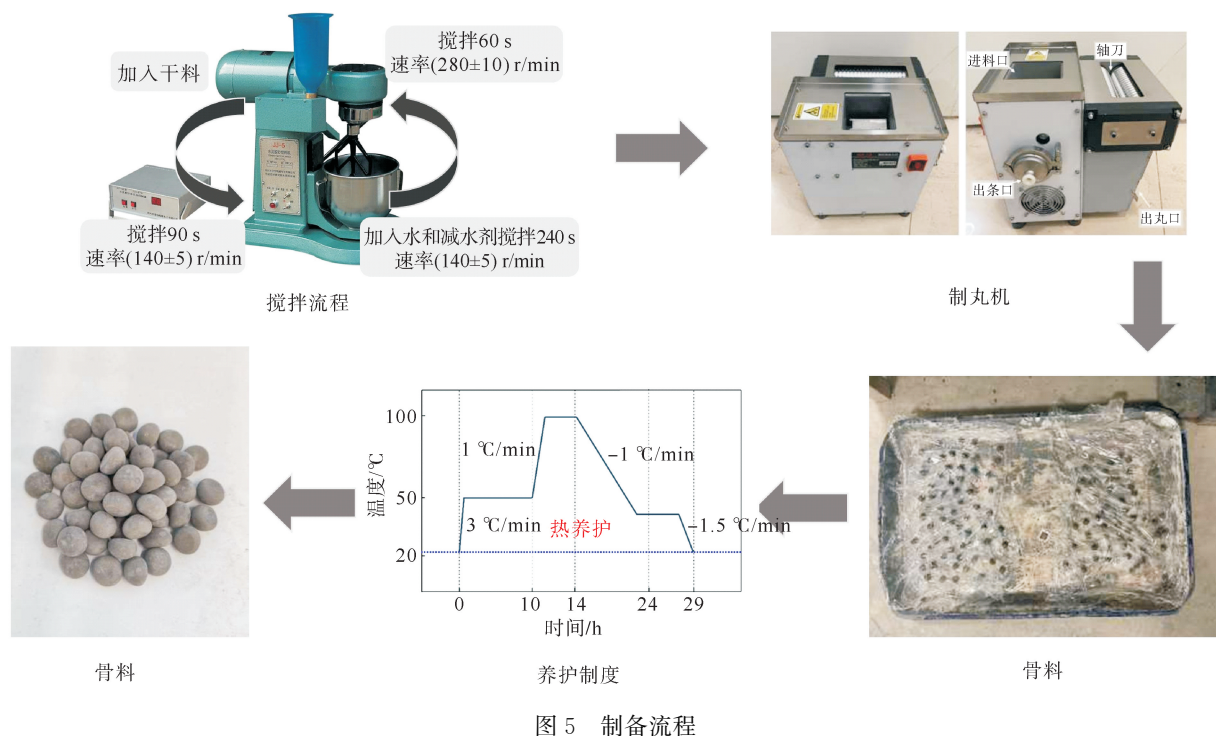


图 5 制备流程

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 单颗粒骨料强度

铜尾矿-铅锌尾矿骨料的单颗粒抗压强度测定参考 YASHIMA 等<sup>[7]</sup>研究的单颗粒强度测试方法。

### 1.4.2 骨料物理性能

铜尾矿-铅锌尾矿骨料吸水率按照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法》(JGJ 52—2006)进行测试。表观密度和堆积密度按照《轻集料及其试验方法》(GB/T 17431—2010)进行测试。

### 1.4.3 物相分析

采用 X 射线衍射仪对龄期为 28 d 的铜尾矿-铅锌尾矿骨料进行测试,机器型号为荷兰帕纳科 PANalytical X-pert 3 X 射线衍射仪,测试角度范围为  $5^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,扫描速率为  $4^{\circ}/\text{min}$ 。采用 TGA-DTA 分析仪进行热重分析,机器型号为德国耐驰 TG-209F3。测试气氛为空气,温度范围为室温至  $800^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

### 1.4.4 重金属浸出风险评估

试件养护至对应龄期后,采用《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557—2009)获得浸出液。将各组试样按固液比  $1:10$  浸泡在去离子水中,并放在振荡机上持续振荡 6 h,然后静置 18 h,将试样过滤得到浸出液。采用离子色谱仪测试各组浸出液中的重金属离子浓度,通过各重金属离子浓度来评估骨料浸出行为。

### 1.4.5 骨料混凝土制备可行性分析

对掺入铜尾矿-铅锌尾矿骨料的混凝土按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行抗压强度测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单颗粒骨料强度

根据骨料抗压强度结果对正交实验结果进行分析,如表 3 所示。

表3 铜尾矿-铅锌尾矿骨料正交实验单颗粒抗压强度

编号	组别	水泥掺量/%	尾矿比例	硅灰掺量/%	单颗粒抗压强度/MPa
T1	A1B1C1	5	1:2	0	1.5
T2	A1B2C2	5	1:1	5	1.8
T3	A1B3C3	5	2:1	10	1.9
T4	A2B1C2	10	1:2	5	4.0
T5	A2B2C3	10	1:1	10	3.7
T6	A2B3C1	10	2:1	0	2.7
T7	A3B1C3	20	1:2	10	9.1
T8	A3B2C1	20	1:1	0	5.4
T9	A3B3C2	20	2:1	5	4.9

铜尾矿-铅锌尾矿骨料正交实验抗压强度极差分析如表4所示,可以看出水泥掺量的极差最大,为172.2,说明水泥掺量对骨料单颗粒抗压强度影响最大;其次是硅灰掺量的极差,为97.9,说明硅灰掺量对骨料单颗粒抗压强度影响次之;尾矿比例极差最小,为30.5,说明尾矿比例对骨料单颗粒抗压强度影响最小。由表4可知,骨料抗压强度较好的水平因素为:水泥掺量20%、硅灰掺量10%、铜尾矿与铅锌尾矿比例1:2。

表4 实验结果极差分析

水平	影响因素		
	A	B	C
K1	54.2	148.4	78.8
K2	109.8	117.9	134.8
K3	226.4	124.0	176.7
极差	172.2	30.5	97.9

各因素对铜尾矿-铅锌尾矿骨料28d的抗压强度影响为:

1) 水泥掺量的影响。水泥掺量对铜尾矿-铅锌尾矿骨料28d抗压强度影响最为显著,随着水泥掺量的增多,铜尾矿-铅锌尾矿骨料单颗粒28d抗压强度不断提升,其主要原因是人造骨料主要依靠水泥来提供胶结能力将各个组分胶结为整体,产生强度<sup>[8]</sup>。

2) 铜尾矿与铅锌尾矿质量比的影响。随着铜尾矿比例的提高,铜尾矿-铅锌尾矿单颗粒骨料的28d抗压强度呈现先降低后提升的趋势。

3) 硅灰掺量的影响。硅灰掺量对28d抗压强度影响较为显著,骨料的28d单颗粒骨料的抗压强度随着硅灰掺量的提升不断提升。其主要原因是硅灰活性较高且具有颗粒粒径小、比表面积大等特点,硅灰的掺入能够极大地提升铜尾矿-铅锌尾矿骨料的堆积密实度<sup>[9]</sup>,可改善水泥基拌和物黏聚性和保水性,且硅灰含有的SiO<sub>2</sub>组分高度分散,能与Ca(OH)<sub>2</sub>反应生成C-S-H凝胶,硅灰具有优异的火山灰效应,能与水泥一同提供强度<sup>[10]</sup>。

## 2.2 骨料物理性质

骨料24h吸水率如图6所示,随着时间的延长骨料吸水率逐渐增加,且吸水速率随着时间的延长逐渐变慢,24h时骨料的吸水率为1.36%。表5为骨料的物理性质,其中N1为天然骨料,T7为铜尾矿-铅锌尾矿骨料,表5反映出铜尾矿-铅锌尾矿骨料吸水率大于天然砂石骨料,而其堆积密度和表观密度与天然骨料差别较小。

表5 骨料物理性质

编号	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	吸水率/%
N1	1562.37	2671.01	0.23
T7	1354.21	2580.07	1.36

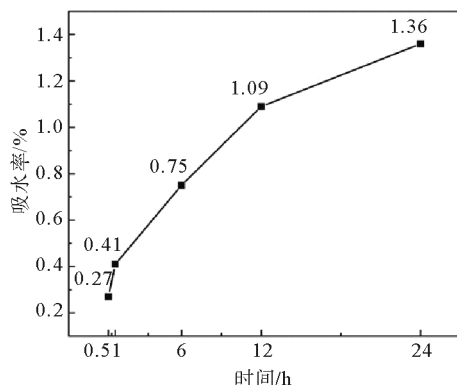


图6 24h吸水率

### 2.3 物相分析

铜尾矿-铅锌尾矿骨料 28 d XRD 图谱如图 7 所示,铜尾矿-铅锌尾矿骨料主要物相成分是方解石和石英,主要来源于原材料铜尾矿和铅锌尾矿,其次是钙矾石和波特兰石,由水泥水化产生。

铜尾矿-铅锌尾矿骨料的 TG 和 DTG 曲线见图 8。由图 8 可知,第 1 个吸热峰位于 60~150 °C,此时出现了大量的质量损失,主要原因是由于钙矾石以及 C-S-H 中的物理结合水和骨料中自由水的蒸发<sup>[11]</sup>;第 2 个峰位于 360~500 °C,与 Ca(OH)<sub>2</sub> 的脱羟基反应有关;第 3 个吸热峰位于 700~800 °C<sup>[12]</sup>,对应于 CaCO<sub>3</sub> 的脱碳反应。

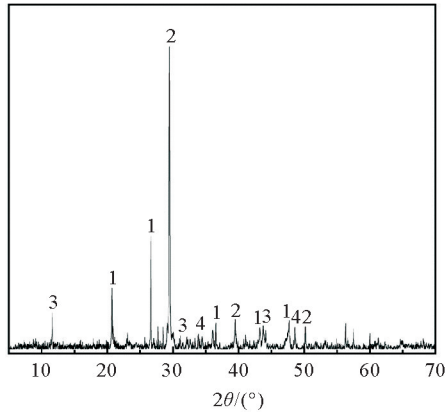


图 7 铜尾矿-铅锌尾矿骨料28 d XRD衍射分析图谱  
1—石英; 2—方解石; 3—钙矾石; 4—波特兰石

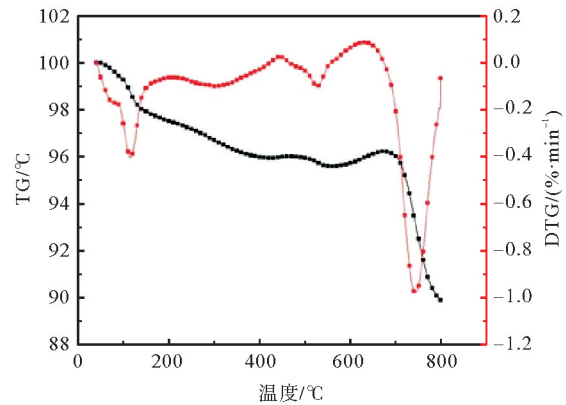


图 8 铜尾矿-铅锌尾矿骨料TG-DTG曲线  
—●— TG; —●— DTG

### 2.4 重金属离子浸出行为分析

考虑到铜尾矿、铅锌尾矿中有重金属离子浸出风险<sup>[13]</sup>,经化学成分分析,铜尾矿、铅锌尾矿中存在的有害重金属成分为 Zn、Cu、Pb、As、Cr<sup>[14]</sup>,分别对铜尾矿和铅锌尾矿混合尾矿原料、铜尾矿-铅锌尾矿骨料浸出液中的重金属离子浓度进行测试,结果如图 9 所示。结果表明,将铜尾矿、铅锌尾矿作为原材料制成的骨料满足《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557—2009)的要求,能够显著降低尾矿中重金属离子浸出风险。

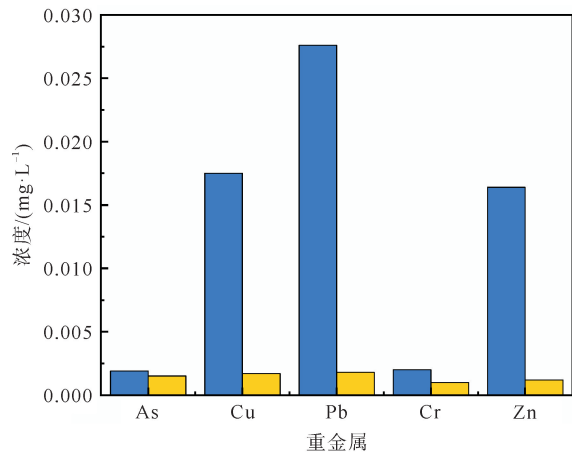


图 9 浸出液重金属离子浓度  
■ 尾矿原料; ■ 尾矿骨料

### 2.5 制备混凝土可行性分析

将铜尾矿-铅锌尾矿骨料代替天然砂石骨料制备混凝土试块,配合比如表 6 所示。将制备好的试块养护至 3、7、28 d,并进行抗压强度测试,结果见图 10,与掺入天然骨料混凝土相比,其抗压强度略有降低,随着试块龄期的增大,其抗压强度分别降低 36.9%、29.1%、26.0%。原因是铜尾矿-铅锌尾矿骨料的骨料强度较之天然砂石骨料略低<sup>[15]</sup>,人造骨料为直径 10 mm 球形骨料,形状较为单一,且人造骨料较之天然砂石骨料颗粒级配较差<sup>[16]</sup>。

表 6 混凝土配合比

	kg/m <sup>3</sup>						
混凝土类型	水泥	粉煤灰	细骨料	天然骨料	尾矿骨料	水	减水剂
普通混凝土	426	81	792	723	0	147	5
尾矿骨料混凝土	426	81	792	0	723	147	5

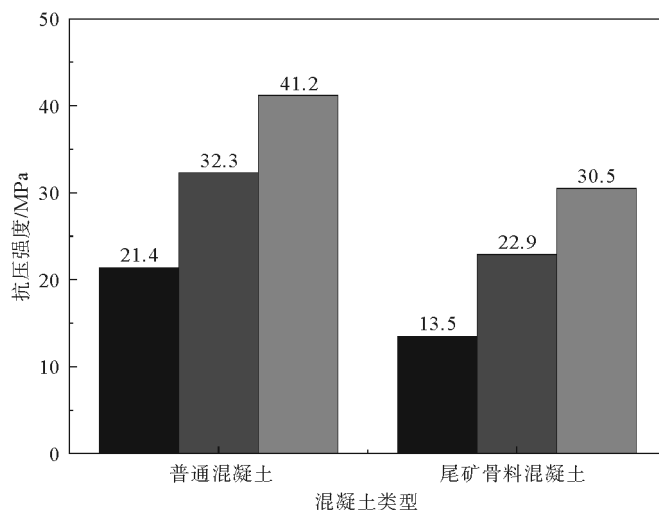


图10 混凝土抗压强度对比

■ 3 d; ■ 7 d; ■ 28 d

### 3 结论

本文探求多种尾矿固废方法,基于正交实验设计铜尾矿-铅锌尾矿骨料配合比,并研究骨料物理性能、热重分析、重金属离子浸出行为得出以下结论:

- 1) 铜尾矿-铅锌尾矿骨料抗压强度受水泥掺量、硅灰掺量、铜尾矿-铅锌尾矿比例影响的显著性依次降低。
- 2) 铜尾矿-铅锌尾矿骨料较好的水平因素为:水泥掺量 20%、硅灰掺量 10%、铜尾矿与铅锌尾矿比例 1:2。
- 3) 铜尾矿-铅锌尾矿骨料混凝土强度较之天然砂石混凝土略低,但能显著降低重金属离子的浸出风险。

#### 参考文献(References):

- [1] 张彪,姜春志. 铜尾矿资源综合利用及研究进展[J]. 世界有色金属,2019(18):125-126.  
ZHANG Biao,JIANG Chunzhi. Comprehensive utilization and research progress of copper tailings resources[J]. World Nonferrous Metals,2019(18):125-126.
- [2] 张润晖. 铜铅锌矿山尾矿现状与综合利用建议分析[J]. 世界有色金属,2018(17):103.  
ZHANG Runhui. Analysis of the current situation and comprehensive utilization suggestions of copper-lead-zinc mine tailings[J]. World Nonferrous Metals,2018(17):103.
- [3] 童小根,张凯峰,孟刚,等. 金尾矿复合砂对不同强度等级混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2023,42(9):3231-3239.  
TONG Xiaogen,ZHANG Kaifeng,MENG Gang,et al. Influence of gold tailing composite sand on properties of different strength grade concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(9):3231-3239.
- [4] 林海威,张水兵,谢建斌,等. 铜尾矿粉透水混凝土性能研究[J]. 混凝土,2018(5):157-160.  
LIN Haiwei,ZHANG Shuibing,XIE Jianbin,et al. Study on the properties of copper tailings powder permeable cement concrete[J]. Concrete,2018(5):157-160.
- [5] 曾亮,胡彪,石齐. 铅锌尾矿复合掺料大掺量应用于混凝土的试验研究[J]. 江西建材,2022(9):15-17.  
ZENG Liang,HU Biao,SHI Qi. Experimental research on the application of lead-zinc tailings composite admixture with large dosage to concrete[J]. Jiangxi Building Materials,2022(9):15-17.
- [6] ONUAGULUCHI O,OZGUR E. Reusing copper tailings in concrete:Corrosion performance and socioeconomic implications for the Lefke-Xeros area of Cyprus[J]. Journal of Cleaner Production,2016,112:420-429.
- [7] YASHIMA S,KANDA Y,SANO S. Relationships between particle size and fracture energy or impact velocity required to fracture as estimated from single particle crushing[J]. Powder Technology,1987,51(3):277.

- [8] 李若响,刘庆,冯艳斐,等.水玻璃改性水泥对细粒尾矿胶结性能的影响[J].矿产综合利用,2023(6):114-119.  
LI Ruoyun,LIU Qing,FENG Yanfei,et al. Effects of water glass modified cement on the performances of cemented fine tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(6):114-119.
- [9] 李志强,张轩硕,卜娜蕊,等.基于正交实验金尾矿砂再生混凝土实验研究[J].矿产综合利用,2022(6):73-78.  
LI Zhiqiang,ZHANG Xuanshuo,BU Narui,et al. Research on orthogonal test of mixture ratio of gold tailings recycled concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(6):73-78.
- [10] 雷英强,吴伟.高分散性硅灰对混凝土性能影响的研究[J].四川水力发电,2023,42(6):63-67.  
LEI Yingqiang,WU Wei. Study on the influence of highly dispersible silica fume on the concrete performance[J]. Sichuan Hydro-power,2023,42(6):63-67.
- [11] 陈美婵.工业固废制备泡沫混凝土质量问题及解决措施分析[J].广东建材,2021,37(3):7-9.  
CHEN Meichan. Analysis of quality problems and solutions of foamed concrete prepared by industrial solid waste[J]. Guangdong Building Materials,2021,37(3):7-9.
- [12] 邱冰,邱文俊,朱茂聪,等.活性矿物细粉及可再分散乳胶粉对快速修补砂浆早期性能的影响研究[J].混凝土世界,2023(10):48-52.  
QIU Bing,QIU Wenjun,ZHU Maocong,et al. The effect of active mineral fine powder and redispersible latex powder on the early performance of rapid repair mortar[J]. China Concrete,2023(10):48-52.
- [13] 郭万进,吴明海,王阳,等.我国铜尾矿资源化利用技术现状及进展[J].矿产综合利用,2023(5):127-134.  
GUO Wanjin,WU Minghai,WANG Yang,et al. Present situation and progress of resource utilization technology of copper tailings in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(5):127-134.
- [14] 王春淼.安徽铜陵典型尾矿库重金属迁移规律研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.  
WANG Chunmiao. Study on the migration law of heavy metals in the typical tailings pond in Tongling, Anhui[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2020.
- [15] 毛宁,金超,刘铁,等.废弃混凝土作骨料及掺合料对混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2023(11):98-102.  
MAO Ning,JIN Chao,LIU Tie,et al. Effect of waste concrete as aggregates and admixtures on performance of concrete[J]. China Concrete and Cement Products,2023(11):98-102.
- [16] 康一,夏之俊.再生混凝土立方体抗压性能试验研究[J].散装水泥,2023(5):188-190.  
KANG Yi,XIA Zhijun. Experimental study on compressive properties of recycled concrete cubes[J]. Bulk Cement,2023(5):188-190.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

---

### (上接第31页)

- [13] 任师训,叶德英,徐菁,等.基于小波包能量法的扣件式模板支撑架节点连接状态监测方法[J].青岛理工大学学报,2023,44(5):56-62.  
REN Shixun,YE Deying,XU Jing,et al. Connection state monitoring of fastener-style form work support frame nodes based on wavelet packet energy method[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(5):56-62.
- [14] 姜世宇,徐菁,任师训,等.基于压电阻抗和卷积神经网络的螺栓球节点健康监测[J].青岛理工大学学报,2023,44(2):43-50.  
JIANG Shiyu,XU Jing,REN Shixun,et al. Health monitoring of the bolted spherical joint based on piezoelectric impedance and convolutional neural network[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2023,44(2):43-50.
- [15] DU G F,HUO L S,KONG Q Z,et al. Damage detection of pipeline multiple cracks using piezoceramic transducers[J]. Journal of Vibration Engineering,2016,18(5):2828-2838.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)