

铜尾矿超细复合掺合料性能及应用研究

黄文辉¹, 尹韶宁², 汪 坤²

(1. 建筑材料工业技术监督研究中心, 北京 100024; 2. 建筑材料工业技术情报研究所, 北京 100024)

摘要: 为实现铜尾矿的规模化和高值化利用, 将铜尾矿与矿粉、粉煤灰进行复合, 并采用具有特殊级配研磨体的超细球磨机对其进行粉磨加工, 得到比表面积分别为 755 m²/kg 和 730 m²/kg 的铜尾矿超细复合掺合料, 研究其基本性能以及对混凝土工作性能、力学性能和耐久性能的影响。研究表明: 相较于常规细度的 S95 矿粉, 铜尾矿超细复合掺合料流动度比稍低, 具有较高的早期活性, 7 d 活性指数提高了 7%~10%, 28 d 活性指数略低于 S95 矿粉, 掺加粉煤灰后可提高其流动度比及 28 d 活性指数; 铜尾矿超细复合掺合料可替代 C30 混凝土原配比中的全部矿粉及 20 kg 水泥用量, 并且替代后可提高混凝土的抗压强度, 以及抗渗、抗碳化、抗冻融、抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀等多方面性能。本研究为铜尾矿的高附加值资源化利用提供了有效途径与理论支撑。

关键词: 铜尾矿; 超细复合掺合料; 混凝土; 力学性能; 耐久性能

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.007

中图分类号: TU528 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0057-06

铜尾矿是铜矿石选别铜精矿后排放的固体粉砂砾状废弃物^[1]。当前, 其主要处置方式为排放至尾矿库堆存, 综合利用率较低。铜尾矿主要由 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 等氧化物组成, 与火山灰材料的化学成分相似, 因此可作为辅助性胶凝材料用于水泥和混凝土中^[2-3]。目前, 关于铜尾矿的研究主要集中于将其用作砂浆和混凝土用细集料^[4-7]、水泥混合材料和矿物掺合料^[8-13]等方向。

近些年来, 随着粉体粉磨工艺的创新, 矿物掺合料超细化发展已成为行业研究新热点^[14], 将矿粉和粉煤灰复合并超细粉磨制备超细复合掺合料, 已受到众多企业和科研院所的广泛关注^[15-17]。经超细粉磨后, 矿物掺合料的比表面积显著提升, 在水泥和混凝土中可发挥更优异的活性效应和堆积填充效应。然而, 现有研究中, 关于铜尾矿和矿粉、粉煤灰等活性混合材料复配并粉磨至超细水平, 制备铜尾矿超细复合掺合料的相关报道尚较少。

本研究采用超细球磨机对掺有铜尾矿的复合掺合料进行超细粉磨, 制备铜尾矿超细复合掺合料, 并以该掺合料替代商品混凝土搅拌站制备 C30 混凝土配合比中的矿渣微粉。同时, 系统研究铜尾矿超细复合掺合料对混凝土工作性能、力学性能以及耐久性能的影响。本文旨在为铜尾矿的高值化利用提

供理论与技术支撑。

1 试 验

1.1 原材料

1) 铜尾矿: 来自江西德兴铜矿, 细度模数为 0.7, 颗粒粒径主要分布在 0.15~0.3 mm 之间, 约占全部粒径的 2/3。

2) 水泥: 唐山某水泥厂生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥。

3) 矿粉: 唐山某矿粉厂生产的 S95 矿粉, 比表面积为 435 m²/kg, 7 d 和 28 d 活性指数分别为 80% 和 100%。

4) 粉煤灰: 唐山某电厂 II 级粉煤灰, 45 μm 方孔筛筛余为 25.5%, 需水量比为 100%, 强度活性指数为 73%。

5) 砂石骨料: 承德铁尾矿废石经破碎筛分制备得到的机制砂和碎石。其中, 机制砂细度模数为 3.0; 碎石为 5~31.5 mm 连续级配。

6) 外加剂: 聚羧酸系减水剂, 固含量为 10%, 推荐掺量为 2.0%~2.5%。

主要原材料化学成分见表 1。

1.2 试验方法

1) 样品制备: 将铜尾矿过 0.15 mm 筛, 取筛下

收稿日期: 2025-12-11; 修订日期: 2026-03-10

作者简介: 黄文辉(1991—), 男, 河北雄县人, 本科, 工程师, 研究方向: 无机非金属材料, E-mail: 283265578@qq.com; 通信作者: 汪坤, 高级工程师, E-mail: Sirwangkun@126.com

表1 原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of raw materials (% , mass fraction)

原材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O
铜尾矿	72.90	9.34	2.88	3.45	0.77	0.35	2.13	4.34	0.23	0.44
水泥	20.89	4.78	63.99	3.47	—	2.03	3.56	—	—	0.59
矿粉	28.98	14.34	39.80	1.42	1.78	2.56	7.13	0.45	0.02	0.39
粉煤灰	47.98	36.45	5.92	4.56	1.56	0.98	0.91	0.65	0.45	0.32

细粒级铜尾矿作为原料。将该铜尾矿与S95矿粉按照1:1复配得到1#混合料。将铜尾矿与粉煤灰、S95矿粉按照1:1:2复配得到2#混合料。采用具有特殊研磨体级配的 $\Phi 500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 试验用球磨机对1#和2#混合料进行超细粉磨,时间均为30 min,得

到两种铜尾矿超细复合掺合料,其比表面积分别为 $755\text{ m}^2/\text{kg}$ 和 $730\text{ m}^2/\text{kg}$,粒度分布见图1。

2)按照中国建筑材料联合会团体标准T/CBMF 194—2022《超细复合矿物掺合料》规定的方法,测试铜尾矿超细复合掺合料的流动度比及活性指数。

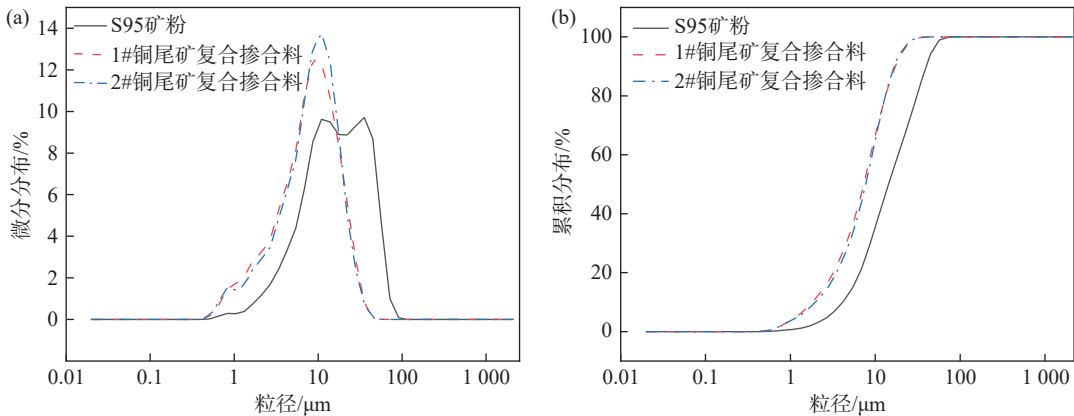


图1 铜尾矿复合掺合料粒度分布:(a)微分分布;(b)累积分布
Fig. 1 Particle size distribution of copper tailings composite admixture: (a) Differential distribution; (b) Cumulative distribution

3)按GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试混凝土的坍落度及坍落度经时损失、扩展度及扩展度经时损失。按GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中规定的方法成型、养护和进行抗压强度试验,试块为边长100 mm的立方体。按GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中规定的抗水渗透试验(逐级加压法)、抗氯离子渗透试验(电通量法)、碳化试验、抗硫酸盐侵蚀试验、抗冻试验(快冻法)测试混凝土的抗渗等级、抗氯离子渗透性、抗碳化能力、抗硫酸盐侵蚀性、抗冻性。

1.3 试验配合比

在北京某搅拌站实际生产用原材料和混凝土配比的基础上开展混凝土试验。前期探索试验的验证结果表明(表2),1#和2#铜尾矿超细复合掺合料在

保证混凝土抗压强度的前提下可完全替代C30混凝土中的矿粉,同时降低水泥用量。因此,本文将1#和2#铜尾矿超细复合掺合料分别完全替代C30混凝土中的S95矿粉后,再继续替代20 kg水泥,研究铜尾矿超细复合掺合料对混凝土综合性能的影响,混凝土配合比见表3。

表2 前期探索试验结果

Table 2 Results of preliminary experiments

项目	类型	28 d抗压强度/MPa
C30基准组	—	44.7
	完全替代矿粉	45.3
1#料组	完全替代矿粉后继续替代10 kg水泥	47.5
	完全替代矿粉后继续替代20 kg水泥	48.8
	完全替代矿粉	47.1
2#料组	完全替代矿粉后继续替代10 kg水泥	48.9
	完全替代矿粉后继续替代20 kg水泥	50.5

表3 混凝土配合比

Table 3 Batching proportion (kg/m³)

类型	水泥	粉煤灰	矿粉	1#料	2#料	水	砂	石子	外加剂
基准组	220	86	54	—	—	175	792	1 050	7.95
1#料组	200	86	—	74	—	175	792	1 050	7.95
2#料组	200	86	—	—	74	175	792	1 050	7.95

2 结果与讨论

2.1 铜尾矿超细复合掺合料基本性能分析

将两种铜尾矿超细复合掺合料与水泥按照1:1制备胶砂试体，并测试其流动度比和活性指数，以S95矿粉作为对比组，结果见表4。

表4 铜尾矿超细复合掺合料基本性能

Table 4 Basic properties of copper-tailings-based ultrafine composite admixtures

类型	流动度比/%	活性指数/%	
		7 d	28 d
S95矿粉	100	78	102
1#料	93	88	95
2#料	98	85	100

1) 流动度比

由表4可知，1#和2#铜尾矿超细复合掺合料的流动度比均小于S95矿粉，且1#超细复合掺合料流动度比仅为93%，较S95矿粉降低了7%；掺加部分粉煤灰后的2#超细复合掺合料流动度比提高至98%。这是因为超细复合掺合料的流动度比的变化取决于两方面的作用：一是超细粉磨后的复合掺合料比表面积得到较大提升，导致其所需润湿水增加，会降低流动度；二是更小粒径的超细复合掺合料可以填充在水泥颗粒之间，有效调节胶凝材料的均匀度，颗粒级配更加良好，从而使复合胶凝体系自由水增加，提高其流动度。因此，铜尾矿掺量过高时，由于铜尾矿粉表面粗糙，且本身含有少量泥质物质，会吸收较多的水分，使得胶砂流动性变差。而超细复合掺合料中掺加适量的粉煤灰时，由于粉煤灰发挥了滚珠润滑作用，可提高胶砂的流动度。

2) 活性指数

1#和2#铜尾矿超细复合掺合料的7 d活性指数均高于S95矿粉，其中1#料的活性指数比S95矿粉高10%。可见，掺入适量的铜尾矿粉可提高复合掺

合料的早期活性。原因是矿粉和粉煤灰等活性较高的掺合料经过超细粉磨后，能发挥优异的活性效应和填充效应。铜尾矿粉作为一种活性低的惰性材料，经超细粉磨后虽然活性提升的幅度较小，但其对水化动力学的影响较大，主要归因于其堆积填充及成核点的作用，在水化早期促进了水泥的水化^[18]。

1#和2#铜尾矿超细复合掺合料28 d活性指数均低于S95矿粉。原因是后期铜尾矿粉反应微弱，不能提供足够的水化产物来维持反应强度，导致后期活性较低。

2#铜尾矿超细复合掺合料28 d活性指数高于1#料，可见掺加部分粉煤灰可提高掺合料28 d的活性指数。这是因为在水化后期，粉煤灰与水泥水化产生的高钙硅比的C-S-H凝胶发生二次水化反应，进一步生成强度更高、稳定性更优的低钙硅比的C-S-H凝胶^[19]，从而提高了活性。

2.2 铜尾矿超细复合掺合料对混凝土性能的影响

铜尾矿超细复合掺合料对混凝土工作性能的影响见表5。与未掺加铜尾矿超细复合掺合料的基准组相比，C30混凝土的初始坍落度和扩展度都略微降低，坍落度和扩展度在混料后1 h时损失略微增加。这是由于铜尾矿超细复合掺合料相较于矿粉比表面积更高，对减水剂具有更强的吸附作用，导致发挥减水作用的减水剂减少。

表5 铜尾矿超细复合掺合料对混凝土工作性能的影响

Table 5 Influence of copper-tailings-based ultrafine composite admixtures on workability of concrete

类型	坍落度/mm		扩展度/mm	
	初始	混料后1 h时	初始	混料后1 h时
基准组	225	215	580	560
1#料组	215	200	560	530
2#料组	215	200	565	540

铜尾矿超细复合掺合料对混凝土抗压强度的影响如图2所示。在降低水泥用量的情况下，混凝

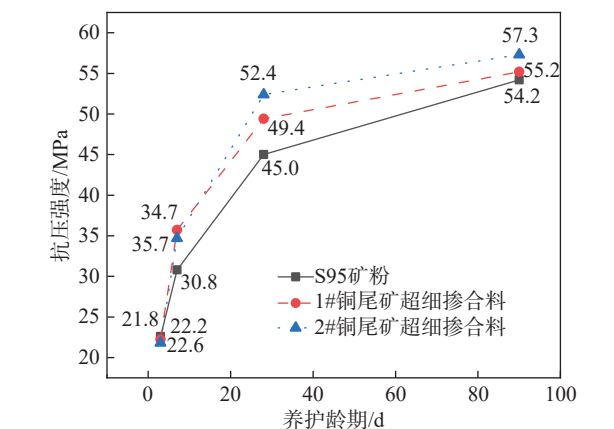


图2 铜尾矿超细复合掺合料对混凝土抗压强度的影响
Fig. 2 The impact of copper-tailings-based ultrafine composite admixtures on compressive strength of concrete

土的3 d抗压强度与基准组相当,表明铜尾矿复合掺合料早期的填充效应显著,这归因于未反应的铜尾矿超细复合掺合料填充于混凝土孔隙中^[20],提高了混凝土密实度,从而保证了混凝土的早期强度;7 d、28 d和90 d抗压强度较基准组分别提高3.9~4.9 MPa、4.4~7.4 MPa和1.0~2.1 MPa,这归因于经过超细粉磨后的铜尾矿基复合掺合料,增加了SiO₂、Al₂O₃等活性氧化物的溶出,增大了火山灰效应

表6 铜尾矿超细复合掺合料对混凝土耐久性能的影响

Table 6 The impact of copper tailings composite admixture on durability of concrete

类型	抗渗等级	抗氯离子渗透性	抗碳化能力	抗硫酸盐侵蚀性 (循环120次)	抗冻融性(循环300次)	
		电通量/C	28 d碳化深度/mm	耐蚀系数/%	质量损失率/%	相对动弹性模量/%
基准组	P10	1 124	10.1	88	4.5	72
1#料组	P12	950	7.5	103	2.1	80
2#料组	P12	840	7.3	105	1.5	85

2.3 性能及成本分析

铜尾矿超细复合掺合料具有高细度、高活性、需水量较大等性能特点。在掺合料中掺加部分粉煤灰,有利于改善其需水性,提高后期活性。将其应用于混凝土时,可替代矿粉,降低水泥用量,同时能有效提升混凝土的强度和耐久性。该掺合料作为一种优异的功能性复合掺合料,在矿粉资源紧张但铜尾矿资源丰富的地区,具备良好的工程推广与应用价值。

铜尾矿超细复合掺合料具有较高的附加值,其生产成本见表7。其成本主要由原材料成本和加工

和反应接触面积,且大大提前了铜尾矿超细复合掺合料二次水化反应的时间,从而提高了混凝土早期和后期的强度。

混凝土的抗渗性、抗氯离子渗透性、抗碳化能力、抗硫酸盐侵蚀性、抗冻融性均与混凝土的密实度有关。一般来说,混凝土密实度越高,抵抗有害介质侵蚀的性能越好。掺入超细复合掺合料可明显降低混凝土孔隙率^[21],改善其微观结构,使混凝土整体结构更加致密,从而提高混凝土强度和耐久性。

铜尾矿超细复合掺合料对混凝土耐久性的影响试验结果见表6。掺加铜尾矿超细复合掺合料后,混凝土的抗渗等级由P10提高至P12,6 h电通量由1 124 C降低至950 C和840 C,抗氯离子渗透性等级由“低”降至“很低”,28 d碳化深度明显降低,降低幅度为26%左右。在抗硫酸盐侵蚀试验中,干湿循环120次时,基准组耐蚀系数低于100%,而试验组均高于100%,耐蚀系数分别提高了15%和17%,抗硫酸盐侵蚀性能得到了大幅提升。在抗冻融试验中,试验组的质量损失率低于基准组,相对动弹性模量高于基准组,抗冻性也得到了提升。

成本两部分构成。产品售价参考矿粉的市场价格制定。因此,矿粉价格越高,其产生的经济效益越显著。

表7 铜尾矿超细复合掺合料生产成本

Table 7 Production cost of copper-tailings-based ultrafine composite admixture

项目	原材料成本/(元/吨)			加工成本/ (元/吨)	生产总成本/(元/吨)
	铜尾矿	矿粉	粉煤灰		
单价	0	200	50	—	—
1#料	0	100	—	40	140
2#料	0	100	12.5	40	152.5

3 结 论

1)与常规细度的S95矿粉相比,铜尾矿超细复合掺合料具有更高的早期活性:7 d活性指数提高了7%~10%;28 d活性指数略低于矿粉,掺加部分粉煤灰后可提高28 d活性指数。

2)铜尾矿超细复合掺合料可完全替代C30混凝土中的矿粉,以及一部分水泥。掺入掺合料的混凝土,其坍落度和扩展度与基准组相当,抗压强度整体呈现增加的趋势,抗渗性能、抗氯离子渗透性能、抗碳化能力、抗硫酸盐侵蚀性能、抗冻融性能均得到改善。

3)铜尾矿超细复合掺合料兼具技术性能优势和经济优势,可广泛应用于普通混凝土、高性能混凝土工程中,为混凝土行业降本增效、消纳固废提供了新方案,市场应用前景相当可观。

参考文献:

- [1] Gordon R B. Production residues in copper technological cycles [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 36(2): 87-106.
- [2] 赵阳光, 陈云, 汪超玲. 尾矿砂在混凝土中的应用研究进展 [J]. 新型建筑材料, 2025, 52(9): 127-130.
- [3] 李炳蓉, 于虎, 林清泉, 等. 循环经济模式下铜尾矿资源综合利用研究进展 [J]. 铜业工程, 2025(3): 93-105.
- [4] 张晋梅, 刘君, 刘仲洋. 铜尾矿砂对C50混凝土力学性能和耐久性的影响 [J]. 新型建筑材料, 2019, 46(8): 83-85, 96.
- [5] 童小根, 邵炜, 张凯峰, 等. 铜尾矿复合砂在C30混凝土中的应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49(8): 116-120, 128.
- [6] 吕娜, 李笑, 梁霄龙, 等. 3D打印铜尾矿砂混凝土的物理力学性能分析 [J]. 金属矿山, 2023(10): 253-258.
- [7] 李冠男, 王鑫鹏, 武迪, 等. 基于正交实验铜尾矿-铅锌尾矿制备骨料研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2025, 46(2): 32-39.
- [8] Onuaguluchi O, Eren Ö. Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 723-727.
- [9] Huang X Y, Ni W, Cui W H, et al. Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 1-5.
- [10] 徐伟, 鲁亚, 石齐, 等. 铜尾矿掺合料在预拌混凝土中应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48(8): 12-15.
- [11] 施麟芸, 刘松柏, 张立明. 铜尾矿渣复合掺合料的活性影响规律及其机理分析 [J]. 混凝土, 2019(5): 70-73.
- [12] 李昊. 铁、铜尾矿超细粉掺合料对混凝土性能的研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2025.
- [13] 卢霄, 李宁, 史平, 等. 铜尾矿粉和低品位硅粉对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025(2): 91-96.
- [14] 尹韶宁, 吴小媛, 袁鹏, 等. 粉煤灰-矿粉复合超细粉制备及其在水泥中的应用试验研究 [J]. 水泥, 2020(6): 1-4.
- [15] 王明荃, 尹韶宁, 潘栋, 等. 超细复合掺合料在水泥和不同强度等级混凝土中的应用研究 [J]. 水泥, 2023(11): 6-10.
- [16] 杨泽波, 刘勇, 陈清蓉, 等. 混凝土用矿物掺合料超细化作用机理 [J]. 材料导报, 2023, 37(增刊1): 151-155.
- [17] 程福星, 肖蓟, 万鹏程, 等. 机械活化方式对超细矿物复合掺合料活性的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3280-3285.
- [18] 李巧玲. 铜尾矿粉在水泥基材料中的作用机理 [D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [19] 魏风艳, 吕忆农, 兰祥辉, 等. 粉煤灰水泥基材料的水化产物 [J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(1): 52-56, 62.
- [20] 尹道道, 秦哲焕, 郭城瑶, 等. 超细复合掺合料对混凝土性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(5): 78-82.
- [21] 张雪丽, 侯付闯. 多元复合超细掺合料制备混凝土内部结构研究 [J]. 混凝土, 2023(10): 116-119.

Performance and Application of Ultrafine Composite Admixture Based on Copper Tailings

Huang Wenhui¹, Yin Shaoning², Wang Kun²

(1. *Technical Supervision & Research Center for China Building Materials Industry, Beijing 100024, China*; 2. *Institute of Technical Information for Building Materials Industry, Beijing 100024, China*)

Abstract: To achieve large-scale and high-value utilization of copper tailings, copper tailings were compounded with mineral powder and fly ash, and then ground by an ultra-fine ball mill with special grinding media to obtain copper-tailings-based ultrafine composite admixtures with specific surface areas of 755 m²/kg and 730 m²/kg, respectively. Basic properties of these admixtures and their effects on workability, mechanical properties and durability of concrete were studied. Results showed that compared with conventional fineness S95 mineral powder, flow ratio of copper-tailings-based ultrafine composite admixtures was slightly lower, but they had higher early activity. 7-day activity index was increased by 10% and 7%, respectively, and 28-day activity index was slightly lower than that of S95 mineral powder. Addition of fly ash can improve flow ratio and 28-day activity index. In C30 grade concrete, copper-tailings-based ultrafine composite admixtures can completely replace original slag powder in mix proportion and further reduce cement dosage by 20 kg. Compressive strength of the concrete showed an increasing trend. Impermeability, chloride ion penetration resistance, carbonation resistance, sulfate resistance and freeze-thaw resistance of the concrete were all improved. This study provided an effective approach and theoretical support for high-value-added resource utilization of copper tailings.

Key words: copper tailing; ultrafine composite admixture; concrete; mechanical property; durability

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.007

引文格式: 黄文辉, 尹韶宁, 汪坤. 铜尾矿超细复合掺合料性能及应用研究[J]. 铜业工程, 2026(4): 57-62.

Huang Wenhui, Yin Shaoning, Wang Kun. Performance and application of ultrafine composite admixture based on copper tailings [J]. Copper Engineering, 2026(4): 57-62.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc