

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.03.025

金尾矿粉对 C25 混凝土力学性能及 微观结构影响试验研究

牟宏霖, 李金勇

(南平武沙高速公路有限责任公司, 福建 南平 354200)

摘要: 为研究金尾矿粉取代水泥对低强混凝土力学性能的影响,通过金尾矿粉等质量取代 0~30% 水泥,研究其对 C25 混凝土凝结时间以及力学性能的影响,并采用扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)等手段表征硬化浆体的水化产物、微观形貌。结果表明,金尾矿粉作为辅助胶凝材料能延长 C25 混凝土的凝结时间,金尾矿粉掺量在 30% 范围内,坍落度和凝结时间均可满足普通硅酸盐水泥标准要求。C25 混凝土的抗压强度、轴心抗压强度、静弹性模量,均随着金尾矿粉掺量的增加,呈现出先增加后降低的趋势,在掺量 5% 时出现峰值。随着养护龄期的增加,金尾矿粉颗粒表面被水化产物覆盖,结构紧密孔隙较少,表现出良好的力学性能。但随着金尾矿粉替代率的增加,水化产物减少微观结构松散,力学性能降低。

关键词: 金尾矿粉; C25 混凝土; 力学性能; 微观结构

中图分类号: TV41

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)03-0189-07

Experimental Study on the Influence of Gold Tailing Powder on the Mechanical Properties and Microstructure of C25 Concrete

MU Honglin, LI Jinyong

(Nanping Wusha Expressway Co., Ltd., Nanping, Fujian 354200, China)

Abstract: In order to investigate the impacts of tailings powder substitution for cement on the mechanical properties of low-strength concrete, this work replaced 0~30% of cement by mass with tailings powder. Its effects on the setting time and mechanical properties of C25 concrete, and characterized the hydration products and microstructure of hardened paste was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results indicate that gold tailings powder, as an auxiliary cementitious material, can prolong the setting time of C25 concrete. Within the range of 30% gold tailings powder substitution, both slump and setting time meet the requirements of ordinary Portland cement standards. The compressive strength, axial compressive strength, and static modulus of elasticity of C25 concrete show a trend of initially increasing and then decreasing with increasing gold tailings powder content, with a peak observed at a substitution rate of 5%. SEM and XRD analyses reveal that with increasing curing age, the surface of gold tailings powder particles is covered by hydration products, resulting in fewer and more tightly packed pores, exhibiting favorable mechanical properties. However, as the substitution rate of gold tailings powder increases, the hydration products exhibit a looser microstructure, leading to a decrease in mechanical performance.

Keywords: gold tailing powder; C25 concrete; mechanical properties; microstructure

随着城市化进程的不断推进,混凝土作为一种多功能材料,广泛应用于土木工程各个领域。然

收稿日期:2023-11-20

修稿日期:2024-02-03

基金项目:福建省科技厅引导性项目(2022Y0079)

作者简介:牟宏霖(1986—),男,高级工程师,主要从事高速公路建设与管理研究。E-mail:muhl@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:李金勇(1973—),男,高级工程师,主要从事高速公路建设与管理研究。E-mail:2744048044@qq.com

而,混凝土材料的制备需要用到大量水泥、砂、石以及其它掺合料。其中,硅酸盐水泥是混凝土中最主要的胶凝材料^[1-3]。考虑到水泥行业面临着诸多问题,如能源的消耗、二氧化碳等温室气体的排放等,给水泥行业带来了新的挑战。探索使用各种固体废弃物作为混凝土材料的补充胶凝材料代替硅酸盐水泥显得至关重要^[4],也是实现“碳达峰,碳中和”的重要措施^[5]。与此同时,尾矿作为最常见的工业废弃物之一,其产量大且利用率低,除少量用于矿区回填和综合利用外,绝大多数的尾矿都堆放在尾矿库,尾矿的堆放给土地、资源、环境以及周围居民生命财产带来一系列重大问题^[6]。值得注意的是,尾矿的化学成分主要是 SiO_2 、 Al_2O_3 ,如果尾矿能表现出火山灰活性(即比强度大于 65%),他们可以用做混凝土中的补充胶凝材料^[7-9]。因此,尾矿粉具有作为补充胶凝材料的潜力,可以减少环境污染和尾矿的储存能力,减少水泥工业的二氧化碳排放^[10]。

根据之前许多学者的研究和测试结果,大量的尾矿粉会影响混凝土的和易性,降低混凝土强度,并对混凝土性能产生负面影响。Cheng 等^[11]研究了用铁尾矿粉当做补充胶凝材料替代水泥制作混凝土,研究表明,当铁尾矿粉替代率小于 40% 时,混凝土的抗压强度随水泥替代率的增加而降低。通过研究发现,在适量掺量下,经过活化处理的尾矿粉会对混凝土强度起到增强作用,从而整体上呈现出强度先增加后降低的情况。在抗压强度方面,使用铁尾矿粉作为矿物掺合料来部分替代混凝土中的水泥是可行的^[12-15]。Ghazi 等^[16]使用铜尾矿代替混凝土建筑中的部分水泥。随着置换率的增加,混凝土混合料的和易性变差,和易性损失增加,抗压强度降低。Liu 等^[17]研究了硅酸盐水泥-铜尾矿粉复合粘结剂的水化性能,结果表明,铜尾矿粉的加入改变了混凝土的孔隙结构分布,并随着铜尾矿粉含量的增加,最可几孔径也随之增大。

综上所述可以看出,适量掺入尾矿作为混凝土辅助胶凝材料,可以保证混凝土的抗压强度和耐久性,具有良好的工程应用前景。然而,在目前的研究中,学者们主要集中在中、高强混凝土性能的研究上,而对用尾矿粉部分替代水泥,制作 C25 混凝土相关性能的研究比较少。基于此,本研究将探讨金尾矿粉部分替代水泥对 C25 混凝土物理性能的影响规律。同时,利用 SEM 和 XRD 等微观分析技术,研究金尾矿粉对混凝土微观结构的机理影响。本研究的目标是在保证混凝土性能的前提下,为实现工

业废弃物的资源化再利用,提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 水泥:采用江西瑞金万年青水泥有限责任公司生产的 P·O42.5 级水泥,其性能指标如表 1。

表 1 水泥的性质

初凝时间 /h	终凝时间 /h	3 d 抗压强度 /MPa	3 d 抗折强度 /MPa	28 d 抗压强度 /MPa	28 d 抗折强度 /MPa
1.89	3.11	28.5	4.9	46.0	13.1

(2) 金尾矿粉:取自云南省临沧市地区,采用 XRF 衍射仪测得该金尾矿粉的矿物成分见表 2,而采用激光粒度仪器测定金尾矿粉的粒径分布,结果见图 1。

表 2 金尾矿粉的矿物成分 单位:%

SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	其它
80.70	0.10	0.22	14.44	0.19	0.12	2.56	0.56	1.11

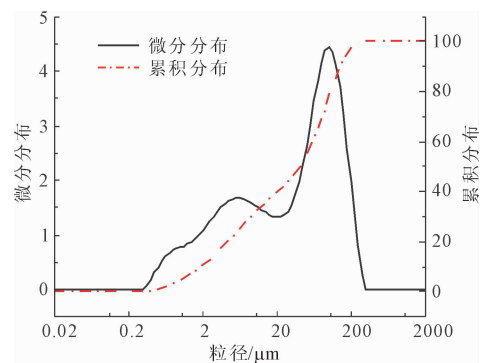


图 1 金尾矿粉的粒径分布

(3) 粉煤灰:采用 F 类 I 级粉煤灰,各项性能指标均满足国家标准。

(4) 细骨料:采用福建省宁化县安远乡中坑山石料场生产的机制砂,堆积密度为 $1\ 548\ \text{kg}/\text{m}^3$,表观密度为 $2\ 705\ \text{kg}/\text{m}^3$,含泥量为 3.8%。

(5) 碎石:采用福州市昌明搅拌站所提供的 5 mm~20 mm 集料,其性能指标如表 3 所示。

表 3 粗集料的物理性质

名称	针片状颗粒含量/%	压碎值/%	堆积密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	表观密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
碎石	7	13.5	1591	2705

(6) 外加剂:选用聚羧酸高性能减水剂,掺量 1.4%,减水率大于 25%。

1.2 试验方案

1.2.1 试验配合比设计

试验水胶比设计为0.5,利用金尾矿粉等质量

替代水泥,替代率分别为0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%,混凝土配合比如表4。

表4 混凝土配合比设计

编号	水泥 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	尾矿 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细集料 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗集料 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂 /%
GC1	330.0	0.0	58	736	1099	194	1.4
GC2	313.5	16.5	58	736	1099	194	1.4
GC3	297.0	33.0	58	736	1099	194	1.4
GC4	280.5	49.5	58	736	1099	194	1.4
GC5	264.0	66.0	58	736	1099	194	1.4
GC6	247.5	82.5	58	736	1099	194	1.4
GC7	231.0	99.0	58	736	1099	194	1.4

1.2.2 试件制作与试验方法

(1) 金尾矿分别过0.075 mm方孔筛除去大颗粒及可能含有的黏土杂质,在120℃下烘干8 h。将金尾矿粉按0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%等质量取代水泥制备复合胶凝材料,测试其凝结时间。

(2) 混凝土试块在浇筑24 h后脱模,并在标准养护条件下养护至规定龄期,按规范《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)进行性能测试,主要测试性能包括含气量、坍落度、7 d和28 d抗压强度、7 d和28 d抗折强度、28 d轴心抗压强度以及28 d弹性模量等。通过结合SEM和XRD等微观检测方法,对混凝土试件的水化产物和形态结构进行检测。

水量,当掺入量继续增加时,吸收的水分增加,增大内部摩擦,降低流动性。同时大量细微粉料也会聚集在一起,产生团聚效应,阻碍混凝土的流动。因此,当掺量超过15%时,混凝土拌合物会逐渐变得粘稠,坍落度也会逐渐降低。

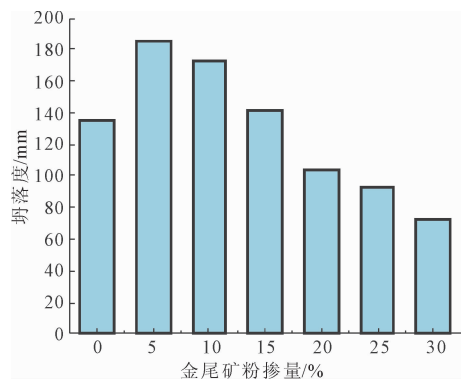


图2 金尾矿粉 C25 混凝土坍落度

2 试验结果与分析

2.1 金尾矿粉对C25混凝土拌合物性能的影响

不同掺量金尾矿粉制备C25混凝土拌合物的坍落度结果见图2所示。在相同水胶比条件下,在混凝土中添加金尾矿粉作为胶凝辅料会导致水灰比随着替代率的增加而降低,随着金尾矿粉含量的增加,混凝土拌合物的坍落度呈现出先增加后减少的趋势。当替代水平为5%时,坍落度达到最大值185 mm。然而,当替代水平达到30%时,坍落度下降到72 mm。这主要是金尾矿粉具有微填充效应,可以提高混凝土的流动性。掺入量小于15%时,随着金尾矿粉掺入,金尾矿粉可以填充水泥与骨料间的空隙,增加混凝土的流动性,从而改善混凝土的级配和工作性能。其中,金尾矿粉替代率为5%时,混凝土和易性最佳,表现出最大坍落度。然而,金尾矿粉本身需水量大,过多金尾矿粉会大大增加混凝土的需

2.2 金尾矿粉对水泥凝结时间的影响

掺金尾矿粉水泥凝结时间变化规律如图3所示。从图3中可以看到,随着金尾矿粉替代量的增加,硅酸盐水泥的凝结时间延长。当金尾矿粉的替代水平为5%、10%、15%、20%、25%和30%时,硅酸盐水泥的初凝时间分别为131 min、155 min、162 min、170 min、181 min和193 min。与纯水泥对照组初凝时间116 min相比,分别延长了15.48%、23.66%、29.77%、38.17%和47.33%。与此同时,终凝时间分别为189 min、204 min、221 min、235 min、247 min和253 min,与纯水泥对照组终凝时间168 min相比,分别增加了12.5%、21.43%、31.55%、39.88%、47.02%和50.6%。值得注意的是,所有试样的初凝时间都超过了45 min并且终凝

时间都不超过 600 min,表明金尾矿粉替代率在 0 ~ 30% 的范围内,复合水泥的凝结时间均满足《普通硅酸盐水泥》(GB 175—2007)的要求。

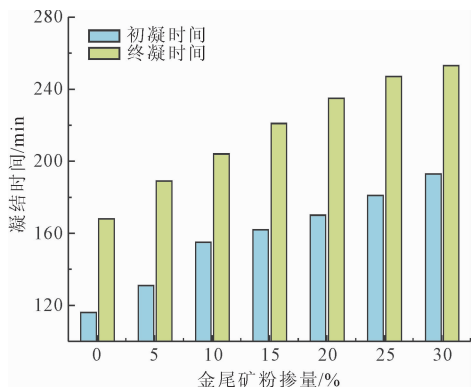


图 3 金尾矿粉 C25 混凝土凝结时间变化规律

2.3 金尾矿粉对 C25 混凝土力学性能的影响

不同金尾矿粉掺量对 C25 混凝土 7 d、28 d 抗压强度的影响如图 4 所示。

由图 4 可得,随着金尾矿粉替代量的增加,混凝土的抗压强度呈先上升后下降的趋势。具体来说,当金尾矿粉的掺量为 5% 时,7 d 的抗压强度达到峰值,与纯水泥对照组混凝土相比强度提高了 21.1%。28 d 抗压强度的变化趋势与 7 d 强度的变化趋势一致。此外,随着金尾矿粉替代水平的进一步提高,混凝土的抗压强度继续下降。当替代率达到 30% 时,混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度还在继续降低,此时与未掺金尾矿粉的混凝土相比,分别降低了 54.1% 和 25.1%。

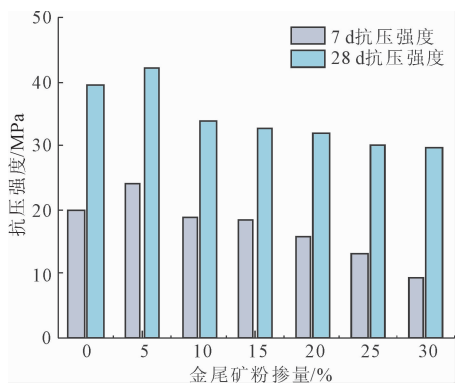


图 4 金尾矿粉 C25 混凝土 7 d、28 d 抗压强度

图 5 反映了金尾矿粉掺量对 C25 混凝土的抗折强度的影响规律。由图 5 可知,用不同替代率的金尾矿粉替代水泥,C25 混凝土 7 d 和 28 d 抗折强度随着金尾矿粉含量增加而呈现下降趋势。在标准条件下养护 7 d,金尾矿粉掺量 0、25% 的抗折强度值

分别为 4.5 MPa、4.0 MPa,抗折强度下降了 11%。当金尾矿粉掺量低于 25% 时,7 d 混凝土的抗折强度值下降缓慢,但在掺量达到 30% 时,混凝土抗折强度骤降,仅有 3.4 MPa。金尾矿粉掺量 5% 试块 28 d 抗折强度明显增加,其值为 6 MPa,相较于 7 d 时其抗折强度增长率为 25%,增长速度高于其他各组,说明此时产量效果最佳,同时也证明金尾矿粉在水化前期以填充效果为主,随着时间的推移,到后期才表现出补充胶凝材料的作用。

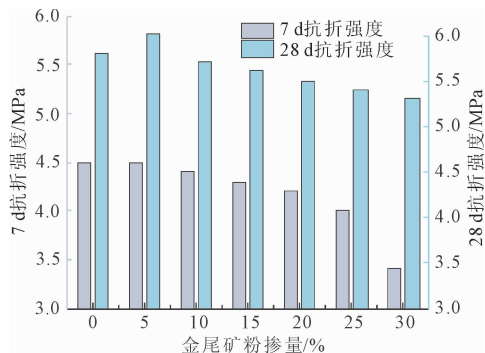


图 5 金尾矿粉 C25 混凝土 7 d、28 d 抗折强度

不同金尾矿粉掺量对 C25 混凝土 28 d 轴心抗压强度和静弹性模量的影响如图 6、图 7 所示。从图 6、图 7 中可以看出随着金尾矿粉掺量的增加,C25 混凝土 28 d 轴心抗压强度和静弹性模量呈现出先增加后下降的趋势。金尾矿粉掺量在 5% 时达到峰值,其轴心抗压强度值和静弹性模量值分别为 34.3 MPa、95 000 MPa。相较于基准对照组(金尾矿粉掺量 0)分别增长 10%、15.4%。然而,当金尾矿粉掺量较大时,会给混凝土带来负面影响,例如金尾矿粉掺量为 30% 时,其 28 d 轴心抗压强度和静弹性模量分别为 26.2 MPa、25 700 MPa,与对照组相比强度分别下降 16%、68.8%。

对上述机械性能变化背后原因的分析可归纳为几个因素:金尾矿粉具有一定活性,可与混凝土中其它材料发生化学反应生成铝酸盐,进而对提升混凝土强度具有一定作用^[18];同时,金尾矿粉颗粒较小,可作为充填物充填在混凝土内部孔隙中,提升了混凝土微观孔隙结构,使得混凝土整体性更好,进而混凝土强度有所提升。然而,当替代水平超过一定临界值时,金尾矿粉对水泥的大量替代会导致混凝土中水泥含量的持续减少,这会导致水泥水化产物含量的降低,过多的金尾矿粉颗粒无法被水泥基水化物质完全包裹,导致金尾矿粉颗粒与水泥基颗粒之间的粘结强度下降,最终会导致混凝土强度降低,过

量的金尾矿粉作为充填物也会破坏已经平衡的孔隙结构,使得混凝土强度下降。

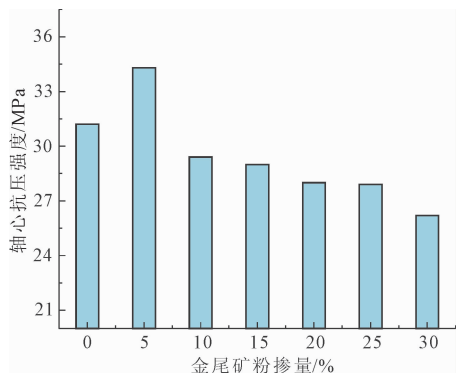


图 6 不同金尾矿粉掺量 C25 混凝土的 28 d 轴心抗压强度

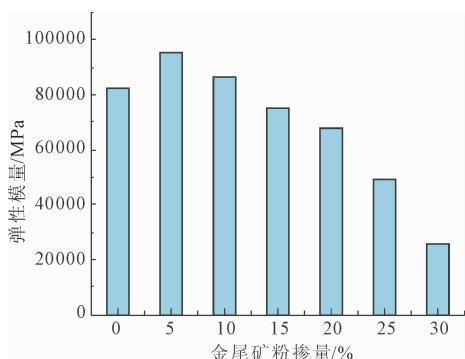


图 7 金尾矿粉 C25 混凝土 28 d 弹性模量

2.4 金尾矿粉对 C25 混凝微观结构的影响

图 8 是金尾矿粉对 C25 混凝土在 7 d 龄期的微观形貌。图 8(a)和图 8(b)展示了纯水泥和替代率 10% 金尾矿粉硬化后 C25 混凝土的微观结构。大量絮状水化硅酸钙凝胶(C-S-H)、六方片状氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)和未水化的水泥颗粒交错搭接,形成了连续的三维空间体,保证了混凝土前期的强度。图 8(c)显示了替代率 30% 金尾矿粉 C25 混凝土的微观结构。与纯水泥相比,替代率 30% 的水化产物整体结构松散,空隙分布不均。图 9 是 C25 混凝土在 28 d 龄期的微观形貌。随着水化时间的延长,从图中可以看到,试样水化产物中存在大量 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及大量针棒状钙矾石(Aft),水化产物得以填充内部孔隙,因此 28 d 时试样的微观结构变得更加紧凑。由图 9(b)可知,替代率 10% 金尾矿粉试样 28 d 微观结构中存在丰富的纤维状 C-S-H,在长期水化过程中 C-S-H 的不断生成可以填充不同大小颗粒间的孔隙,使得水化产物结合在一起,从而产生更致密、孔隙更少的微观结构。这也证明了金尾矿粉二次水化反应的存在。但是,随着金尾矿粉替代率的持续增加, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体逐渐减少,导致内部孔隙增加,结构整体性变差,从而宏观上表现出抗压强度降低。

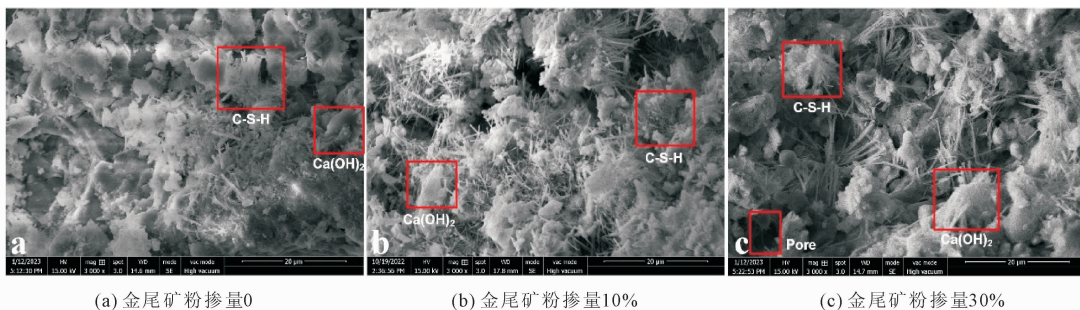


图 8 金尾矿粉不同掺量条件下试样 7 d 龄期 SEM 图

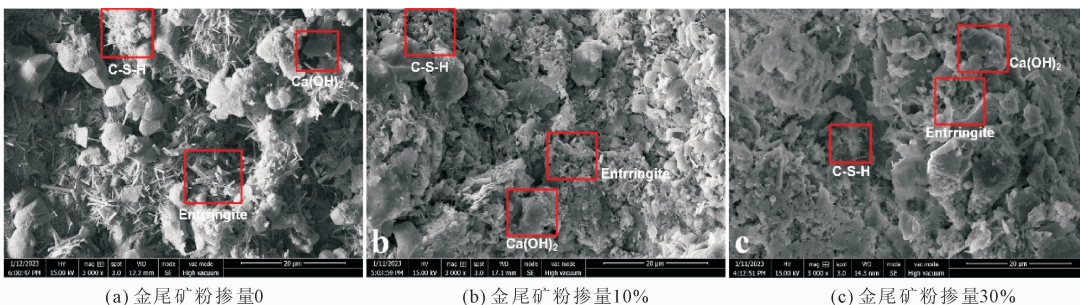


图 9 金尾矿粉不同掺量条件下试样 28 d 龄期 SEM 图

纯水泥和不同金尾矿粉替代率下,C25 混凝土硬化 7d 和 28 d 龄期的 XRD 图如图 10 所示。由图

10 可知,在不同养护龄期条件下,0、10% 和 30% 金尾矿粉掺量的试样物相成分相似,每种物相的相对

含量存在差别,其主要物相组分为 SiO_2 、 CaCO_3 结晶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体、C-S-H 凝胶、Ettringite 晶体以及未水化的水泥熟料。金尾矿粉掺量越多, SiO_2 在 $26^\circ \sim 27^\circ$ 范围内对应的衍射峰强度越高, CaCO_3 晶体的衍射峰强度逐渐减弱,并且在多个衍射角处出现水泥熟料 C_2S 、 C_3S 等物相,说明随着金尾矿粉掺量的增加,金尾矿粉并没有参与早期水化。此外,在水化的后期阶段,金尾矿粉未活化的性质导致其反应性降低,对水化反应的贡献减少,从而导致水泥浆

体水化程度降低,进而不利于强度发展。值得注意的是,在适当的掺量(5%)下,金尾矿粉在水泥水化的早期阶段起着至关重要的作用。它表现出微集料效应和稀释效应,加速了水泥水化过程,弥补了未经处理的金尾矿水胶活性低造成的混凝土强度损失。然而,随着金尾矿粉替代量的增加,粒度分布效应不足以抵消其低水胶活性造成的强度损失,因此,导致混凝土强度逐渐下降。

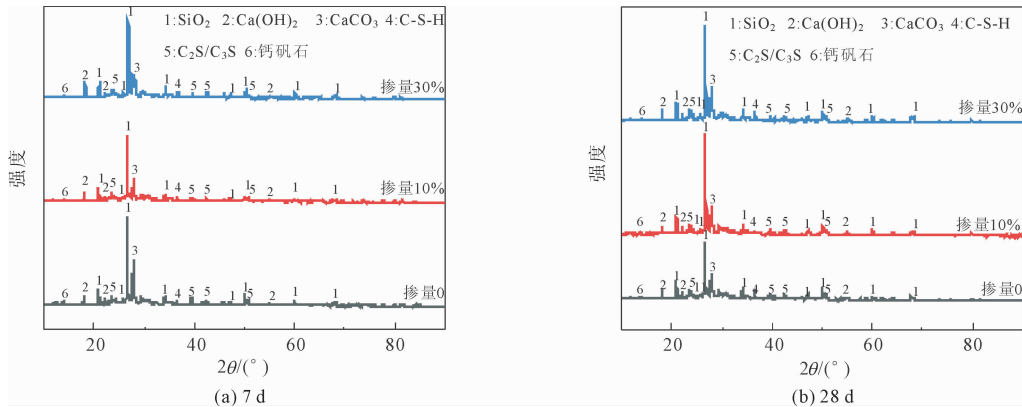


图 10 金尾矿粉不同掺量条件下试样 7 d 和 28 d 龄期的 XRD 图

3 结 论

(1) C25 混凝土的坍落度呈现出随着金尾矿粉替代量的增加而先增后减的趋势。最佳替代水平在 5%~10% 之间,超过 10% 时,坍落度会明显下降。

(2) 随着金尾矿粉掺量的增加,复合水泥浆体的凝结时间延长。在金尾矿粉取代量为 0%~30% 实验范围内,复合水泥的凝结时间满足普通硅酸盐水泥规范要求。

(3) C25 混凝土各项力学性能随着尾矿粉增加,均表现出先增加后减小的趋势,当金尾矿粉掺量为 5% 时性能最佳。

(4) 纯水泥和 10% 替代率试样中水化产物数量更多,密实度更高,并且金尾矿粉颗粒表面被水化产物覆盖结构更加致密,表现出比纯水泥更加优异的性能。金尾矿替代率为 30% 的试样水化产物结构较为松散,力学性能降低。

参考文献:

[1] Zhao Jiangshan, Ni Kun, Su Youpo, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties[J]. Construction and Building Materials, 2021,286:122968.
[2] 朱街禄,肖莉娜,宋军伟. 钨尾矿粉对水泥基材料性能

和微观结构的影响[J]. 非金属矿,2021,44(1):66-69.
[3] 胡明玉,朱晓敏,雷 斌,等. 大掺量粉煤灰水泥研究及其在工程中的应用[J]. 南昌大学学报(工科版),2004,26(1):34-39.
[4] 张思宇,施惠生,黄少文. 粉煤灰掺量对磷酸镁水泥基复合材料力学性能影响[J]. 南昌大学学报(工科版),2009,31(1):80-82.
[5] Hemalatha T, Ramaswamy Ananth. A review on fly ash characteristics-towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,147:546-559.
[6] Pan Xunzhang, Chen Wenying, Zhou Sheng, et al. Implications of near-term mitigation on China's long-term energy transitions for aligning with the Paris goals[J]. Energy Economics, 2020,90:104865.
[7] 陈兰兰,卢东方,王毓华. 黄金矿山尾矿的组成、危害及资源化利用技术 [J]. 矿产保护与利用,2020,40(5):161-169.
[8] Han Fanghui, Li Li, Song Shaomin, et al. Early-age hydration characteristics of composite binder containing iron tailing powder[J]. Powder Technology, 2017,315:322-331.
[9] 侯云芬,刘锦涛,赵思儒,等. 铁尾矿粉对水泥砂浆性能的影响及机理分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(5):1149-1157.

- [10] Saedi Alieh, Jamshidi-Zanjani Ahmad, Darban Ahmad Khodadadi. A review on different methods of activating tailings to improve their cementitious property as cemented paste and reusability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020,270:110881.
- [11] Cheng Yunhong, Huang Fei, Li Wenchuan, et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 118: 164-170.
- [12] 朴春爱,王栋民,张力冉,等. 化学-机械耦合效应对铁尾矿粉胶凝活性的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*,2016,24(6):1100-1109.
- [13] 张伟,刘梁友,李莉丽,等. 铁尾矿粉-粉煤灰-矿渣粉复合掺合料对混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐通报*,2016,35(11):3826-3831.
- [14] 张肖艳,宋强,李辉,等. 铁尾矿粉对 C40 混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐通报*,2013,32(12):2559-2563.
- [15] 商东波,杨四华,白少森,等. 铁尾矿粉掺量对混凝土强度的影响[J]. *水科学与工程学报*,2016(4):67-69.
- [16] Ghazi Ahad Barzegar, Jamshidi-Zanjani, Ahmad, Nejati Hamidreza. Utilization of copper mine tailings as a partial substitute for cement in concrete construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 317: 125921. .
- [17] Liu Shuhua, Wang Lu, Song Junwei, et al. Hydration properties of portland cement-copper tailing powder composite binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,251:118882.
- [18] Chen Bingjiang, Pang Lufeng, Zhou Zaibo, et al. Study on the hydration properties of a ternary cementitious material system containing activated gold tailings and granulated blast furnace slag[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,63:105574.

(上接第 181 页)

- [12] 玻璃纤维增强水泥性能试验方法:GB/T 15231—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [13] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [14] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [15] Hannant P J. *Fibre cements and fibre concretes*[J]. Wiley, 1978.
- [16] Maalej M, Li V C. Flexural/tensile strength ratio in engineered cementitious composites[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1994,6(4):513-528.
- [17] 包亦望,金宗哲. 脆性材料弯曲强度与抗拉强度的关系研究[J]. *中国建筑材料科学研究院学报*,1991,3(3):1-5.
- [18] 蔡向荣,徐世焯. UHTCC 薄板弯曲荷载-变形硬化曲线与单轴拉伸应力-应变硬化曲线对应关系研究[J]. *工程力学*,2010,27(1):8-16.