

水泥改性黄金尾矿渣及其在道路底基层中的性能

孙星辰,王琨*,李强飞,谢丹丹,姜自玉

山东交通学院交通土建工程学院,山东 济南 250357

摘要:为评估黄金尾矿渣规模化应用于道路底基层的可行性,将水泥掺入黄金尾矿渣制备水泥改性黄金尾矿渣试件,水泥的质量分数 w 分别为0、3%、5%、7%,对水泥改性黄金尾矿渣试件分别进行直剪试验、固结试验、加州承载比(California bearing ration, CBR)试验、冻融循环试验,评估黄金尾矿渣作为道路底基层材料的可行性。结果表明:1)水泥改性黄金尾矿渣试件的正应力与抗剪强度均呈线性关系; w 相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度随正应力的增大而线性增大;正应力相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度随 w 的增大先增大后减小; $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度最大。2) w 相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的形变随固结时间的增加而缓慢增大;固结时间相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的形变随 w 的增大先减小后增大, $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件的形变最小。3)压实度相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的加州承载比随 w 的增大先增大后减小; w 相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的加州承载比随压实度的增大而增大; $w=5\%$ 、压实度为95%时,加州承载比最大。4)冻融循环试验中,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度和抗拉强度均随 w 的增大先增大后减小;在硫酸盐冻融条件下,未掺加水泥的黄金尾矿渣试件、 $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度均随冻融循环次数的增大而减小,后者降幅明显减小;增大硫酸盐质量分数会加剧水泥改性黄金尾矿渣试件的受侵蚀程度,降低水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度。 $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣可显著提高抗压强度、抗拉强度、抗变形和耐久性方面的性能,满足其在道路底基层的技术要求。

关键词:黄金尾矿渣;底基层;直剪试验;固结试验;CBR试验;水泥

中图分类号:U416.216;TV42+1.5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0083-07

引用格式:孙星辰,王琨,李强飞,等. 水泥改性黄金尾矿渣及其在道路底基层中的性能[J]. 山东交通学院学报,2025,33(5):83-89.

SUN Xingchen, WANG Kun, LI Qiangfei, et al. Cement-modified gold tailings and its performance in the base layer of roads[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 83-89.

0 引言

我国黄金行业每年产生的氰化尾渣总量约1亿 $t^{[1]}$,尾渣堆积占用大量土地资源,其中重金属成分在自然风化、雨水淋滤作用下逐渐释放到周围土壤和地下水中,造成持久性污染,不利于生态环境保护和行业的可持续发展 $^{[2-3]}$ 。因此,积极发展黄金尾矿渣的资源化利用技术,对减轻环境负荷、实现可持续发展具有重要意义 $^{[4-7]}$ 。

常智扬等 $^{[8]}$ 将胶凝材料和黄金尾矿按砂胶质量比1:1制备黄金尾矿再生骨料,将水泥掺入黄金尾矿再生骨料制备混合料,水泥质量分数为10%,碳化养护28d后混合料的抗压强度为52.5 MPa,为黄金尾矿规模化增值利用提供新方法。胡瑶瑶等 $^{[9]}$ 将水泥与黄金尾矿粉混合制备复合胶凝材料,水泥质量分数为30%,养护28d后胶凝材料的抗压强度仅比未掺加黄金尾矿粉的胶凝材料减小5.88%;水泥与黄金

收稿日期:2024-12-17

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022QF107)

第一作者简介:孙星辰(2000—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为路面材料,E-mail:1084196168@qq.com。

*通信作者简介:王琨(1978—),女,山东平原人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为道路结构与材料,E-mail:wangkun@sdjtu.edu.cn。

尾矿粉混合制备胶凝材料,水泥质量分数为 10%,养护 28 d 后,胶凝材料的劈裂抗拉强度相对最高。于新等^[10]采用黄金尾矿砂全替代石英砂制备水泥基复合材料,在优化水胶比与粉煤灰的质量比后,抗压强度、抗拉强度分别增大 14.7%、27.9%,为低碳低成本水泥基复合材料开发提供新途径。孟文文等^[11]通过分析黄金尾矿综合利用与处置的政策形势及现状,总结黄金尾矿在金属回收、建筑材料生产、生态修复、井下填充和氰渣利用等方面的技术发展,为无废矿山建设、尾矿综合利用产业化、规模化发展提供参考。李进鹏等^[12]将碱熔后的黄金尾矿与高炉矿渣制备碱激发胶凝材料,黄金尾矿质量分数为 30%,养护 28 d 后,碱激发胶凝材料的抗压强度为 14.05 MPa,碱激发胶凝材料的水化产物以水化硅酸钙与水化硅铝酸钠为主,为黄金尾矿资源化利用提供有效方法。陆思诚等^[13]采用生命周期评价法构建含氰黄金尾矿无害化处理方案,定量评估尾矿压滤洗涤、滤渣处理和滤液处理的环境负荷及资源消耗,使用大量化学药剂可降低尾矿毒性,但整体环境负荷更高,导致环境影响转移问题。目前研究多聚焦于采用黄金尾矿渣制备水泥混凝土或烧结砖,但对水泥改性黄金尾矿渣在道路底基层中的性能及机理研究不足^[14-16]。水泥改性黄金尾矿渣可通过水化反应生成胶凝物质,改善尾矿渣的力学性能,但水泥在改性黄金尾矿渣的质量分数对水泥改性黄金尾矿渣的抗压强度和耐久性的影响尚不明确^[17-20]。

本文通过直剪试验、固结试验、加州承载比(California bearing ratio,CBR)试验及冻融循环等试验,定量研究水泥在混合物中的质量分数(0、3%、5%、7%)对水泥改性黄金尾矿渣力学性能与耐久性能的影响规律,明确水泥改性黄金尾矿渣作为道路底基层材料的适用性,以期为黄金尾矿渣的大规模资源化利用提供可靠的理论依据与工程参考。

1 材料

普通硅酸盐水泥的主要矿物成分为硅酸三钙(质量分数为 52%)、硅酸二钙(质量分数为 24%)、铝酸三钙(质量分数为 8%)和铁铝酸四钙(质量分数为 10%)。

工业处理后黄金尾矿渣的成分以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主,各成分的质量分数如表 1 所示,浸出液重金属的质量浓度如表 2 所示。由表 2 可知,重金属质量浓度均符合安全标准。

表 1 黄金尾矿渣各成分的质量分数

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
质量分数/%	71.32	12.47	0.98	0.22	4.78	6.11	4.12

表 2 黄金尾矿渣浸出液重金属的质量浓度

项目	质量浓度/(mg·L ⁻¹)						pH 值
	铜	锌	铅	汞	砷	镉	
浸出液	0.008	1.200	0.002	0.001	0.020	0.003	7.2
标准要求 ^[21]	<100.000	<100.000	<5.000	<0.100	<5.000	<1.000	6.0~9.0

黄金尾矿渣粒径小于 0.075 mm 的颗粒质量占比为 48.4%,筛余质量为 242.0 g;粒径等于 0.075 mm 的颗粒质量占比为 51.6%,筛余质量为 258.0 g,液限为 31.70,塑限为 8.62。

2 水泥改性黄金尾矿渣混合料试验与结果分析

根据文献[22]要求,将水泥掺入黄金尾矿渣制备水泥改性黄金尾矿渣试件,水泥的质量分数 w 分别为 0(对照组)、3%、5%、7%,最佳含水率为 14.5%,最大干密度为 1.79 g/cm³,对水泥改性黄金尾矿渣试件进行直剪试验、固结试验、CBR 试验、冻融循环试验,测试材料路用性能。

2.1 直剪试验

进行直剪试验,基于试验结果构建不同 w 下水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度-正应力曲线,如图1所示。

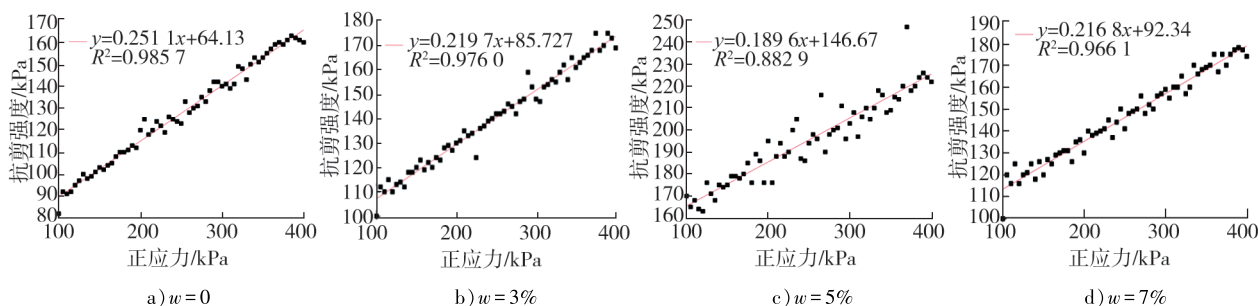


图1 不同 w 下水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度-正应力曲线

由图1可知:不同 w 下水泥改性黄金尾矿渣试件的正应力与抗剪强度均呈线性关系,拟合公式的决定系数 R^2 均大于 0.880 0,拟合关系较好; w 相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度随正应力的增大而线性增大;相同正应力下,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度随 w 的增大先增大后减小。 $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗剪强度最大,比对照组增大 35.2%。正应力与抗剪强度的拟合线性公式的斜率随 w 的增大先减小后增大。

w 分别为 0、3%、5%、7% 时,水泥改性黄金尾矿渣试件的黏聚力分别为 64.13、85.73、146.67、92.34 kPa。随 w 的增大,水泥改性黄金尾矿渣试件的黏聚力先增大后减小, $w=5\%$ 时,黏聚力最大,比对照组增大 128.7%。水泥的水化产物主要包括 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (C—S—H 凝胶,约占水泥水化产物质量的 70%,是抗压强度和抗拉强度的主要来源)、氢氧化钙、水化硫铝酸钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙固溶体等,这些水化产物交织形成致密的网状结构,牢固地粘结未水化的水泥颗粒和骨料,使水泥混凝土产生抗压、抗拉强度。过量水泥可能导致水化热不均,产生局部微裂纹或结构不均匀,削弱整体的胶结效果。

不同 w 下水泥水化产物与黄金尾矿渣微观结构示意图如图2所示。

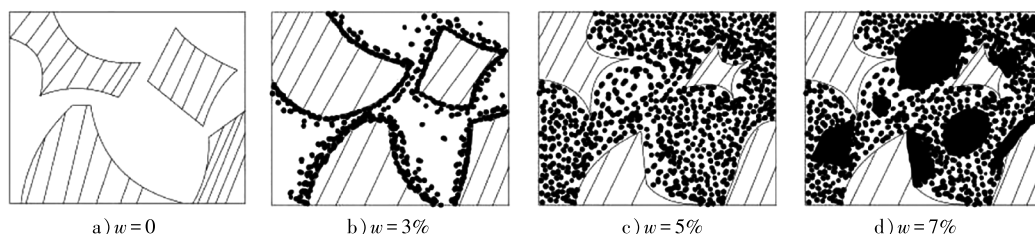


图2 不同 w 下水泥水化产物与黄金尾矿渣微观结构示意图

由图2可知: $w=3\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件发生水化反应后形成初步的水化产物,在尾矿颗粒间形成一定的黏结力,内部空隙减少; $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件水化产物分布均匀; $w=7\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件局部水化产物富集,内部结构不均匀。

w 分别为 0、3%、5%、7% 时,水泥改性黄金尾矿渣试件的内摩擦角分别为 14.1° 、 12.4° 、 10.7° 、 12.2° ,内摩擦角随 w 的增大先减小后增大。 $w=0$ 时,黄金尾矿渣颗粒松散,颗粒间以机械摩擦为主,内摩擦角较大; w 分别为 3%、5% 时,水泥水化生成的 C—S—H 凝胶与钙矾石填充颗粒间隙,提高密实度,但柔性胶结体替代了部分颗粒间的刚性接触,内摩擦角减小;当 $w=7\%$ 时,过量水泥引发局部水化产物富集,形成不均匀刚性胶结体,同时过量水化热诱发的微裂纹改变局部颗粒接触状态,内摩擦角增大。

2.2 固结试验

试验温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度大于 95% 标准条件下养护水泥改性黄金尾矿渣试件。养护后进行固结试验,施加荷载 400 kPa,不同固结时间、 w 下水泥改性黄金尾矿渣试件形变如表3所示。

表 3 施加荷载 400 kPa 时不同固结时间、 w 下水泥改性黄金尾矿渣试件的形变

固结时间/min	形变/mm			
	$w = 0$	$w = 3\%$	$w = 5\%$	$w = 7\%$
0	0.560	0.305	0	0.109
0.25	0.790	0.490	0.061	0.251
1.00	0.811	0.501	0.070	0.262
2.25	0.823	0.510	0.077	0.270
4.00	0.835	0.520	0.080	0.279
6.25	0.841	0.525	0.082	0.280
9.00	0.850	0.530	0.085	0.285
12.25	0.851	0.532	0.088	0.287
16.00	0.855	0.539	0.090	0.291
20.25	0.861	0.540	0.091	0.295
25.00	0.865	0.542	0.093	0.297
30.25	0.868	0.550	0.102	0.298
36.00	0.870	0.551	0.104	0.299
42.25	0.872	0.553	0.105	0.300
60.00	0.880	0.560	0.109	0.305
总形变	0.880	0.560	0.109	0.305
仪器形变	0.070	0.060	0.040	0.050
试件总形变	0.810	0.500	0.069	0.255
校正后的总形变	0.850	0.550	0.071	0.260

由表 3 可知: w 相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的形变随固结时间的增加而缓慢增大;固结时间相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的形变随 w 的增大先减小后增大, w 分别为 3%、5%、7%时,水泥改性黄金尾矿渣试件的最终形变比对照组分别减小 36.4%、87.6%、65.3%, $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件抗剪性能最优。

对照组的黄金尾矿渣试件固结效果较差,试件内部有较大空隙,结构松散,形变较大,不符合路用材料的要求。 $w=3\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件内部被少量的水化产物填充颗粒间空隙,起到一定的胶结作用,提高材料的密实度,试件的整体稳定性有所提高; $w=5\%$ 时,尾矿渣颗粒间的胶结作用更明显,水化产物有效填充颗粒间的空隙,形成致密的固结体;过量水泥($w=7\%$)因水化热释放不均引发微裂纹,不利于形成密实结构。

2.3 CBR 试验

进行 CBR 试验前,将不同压实度的水泥改性黄金尾矿渣试件完全浸入温度为 25 ℃ 的清水中,浸泡 4 d 后进行 CBR 试验。施加荷载,使贯入杆以 1 mm/min 的速度匀速压入试件,记录贯入量为 5 mm 时的单位压力,与标准碎石的压力对比,不同压实度 E_{DC} 、 w 下 CBR 试验结果如表 4 所示。

由表 4 可知:压实度相同时,水泥改性黄金尾矿渣试件的加州承载比随 w 的增大先增大后减小; w 相同时,水泥改

表 4 CBR 试验结果

$w/\%$	加州承载比/%		
	$E_{DC} = 91\%$	$E_{DC} = 93\%$	$E_{DC} = 95\%$
0	2.6	3.3	4.1
3	27.8	49.2	60.2
5	59.6	78.9	84.7
7	56.9	73.1	80.1

性黄金尾矿渣试件的加州承载比随压实度的增大而增大; $w=5\%$,压实度为 95%时,加州承载比最大,试件内 C—S—H 结构增强颗粒嵌锁作用; $w=7\%$ 时,胶结体脆性增大,试件承载能力下降。 w 对水泥改性黄金尾矿渣的加州承载比有积极影响,但存在上限,超过上限后加州承载比缓慢减小。

2.4 冻融循环试验

对 w 分别为 0、3%、5%、7%时,黄金尾矿渣试件进行耐久性评估。冻融循环 250 次,冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,融化温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,冻融循环周期为 24 h,冻融循环结束后测试试件的抗压强度和抗拉强度,分析掺加水泥对黄金尾矿渣试件抗冻融性的影响规律。不同 w 下,冻融循环后水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度和抗拉强度如表 5 所示。

由表 5 可知:水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度和抗拉强度均随 w 的增大先增大后减小, w 分别为 3%、5%、7%时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗拉强度比未掺加水泥的黄金尾矿渣试件分别增大 23.0%、44.7%、27.8%,抗压强度比未掺加水泥的黄金尾矿渣试件分别增大 24.9%、52.5%、43.5%。 $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度和抗拉强度最优。

将未掺加水泥的黄金尾矿渣试件和 $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件进行硫酸盐-冻融耦合试验,硫酸盐质量分数分别为 0、10%、20%,分别冻融循环 0、50、100、150、200、250 次。不同盐冻融条件下,2 种黄金尾矿渣试件的抗压强度随冻融循环次数变化的曲线如图 3、4 所示。

表 5 不同 ω 下冻融循环后水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度和抗拉强度

$w/\%$	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
0	3.78	30.1
3	4.65	37.6
5	5.47	45.9
7	4.83	43.2

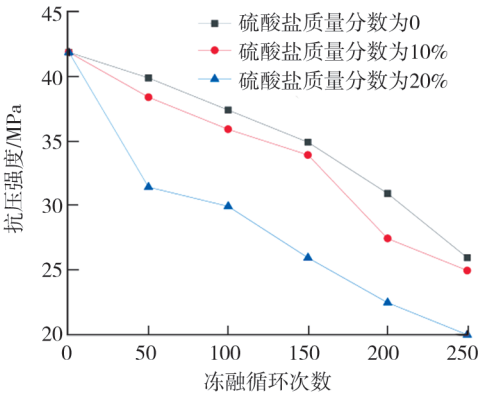


图 3 未掺加水泥的黄金尾矿渣试件在硫酸盐冻融循环下的抗压强度

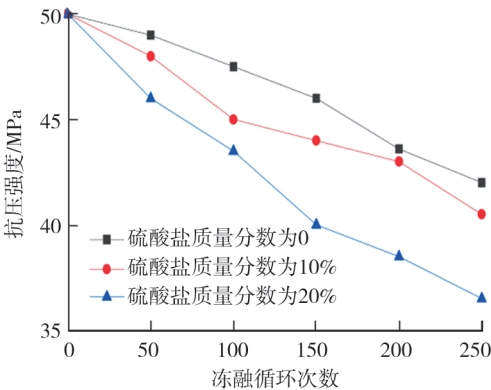


图 4 $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件在硫酸盐冻融循环下的抗压强度

由图 3、4 可知:在硫酸盐冻融条件下,未掺加水泥的黄金尾矿渣试件、 $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度均随循环次数的增大而减小,后者降幅明显减小,冻融过程引发孔隙率累积效应,冰晶膨胀压力导致微裂纹扩展,形成渐进式疲劳损伤,材料承载性能劣化。

硫酸盐质量分数为 20%时,经 250 次冻融循环后,未掺加水泥的黄金尾矿渣试件、 $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度分别为 20.0、36.6 MPa,比冻融前分别减小 52.3%、26.8%,表明掺加水泥可提高黄金尾矿渣的抗盐侵蚀和抗冻融能力;硫酸盐质量分数为 10%、20%时,未掺加水泥的黄金尾矿渣试件的抗压强度比硫酸盐质量分数为 0 时分别减小 40.4%、52.3%, $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度比硫酸盐质量分数为 0 时分别减小 38.0%、16.0%;在不同硫酸盐溶液质量分数下, $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度的降幅比未掺加水泥的黄金尾矿渣试件小。C—S—H 凝胶抑制硫酸盐与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成石膏,减小膨胀应力。

硫酸盐-冻融耦合试验结果表明,增大硫酸盐质量分数会加剧水泥改性黄金尾矿渣试件的受侵蚀程度,降低水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度。

3 结论

通过直剪试验、固结试验、加州承载比试验、冻融循环试验,研究水泥改性黄金尾矿渣中不同水泥质量分数 w 对其力学性能的影响。

1) $w=5\%$ 时,可显著优化黄金尾矿渣作用于底基层的性能,抗剪强度、抗压强度和抗拉强度最大,形变最小,压实度为95%时加州承载比最大。水化生成的C—S—H凝胶与钙矾石形成均匀胶结网络,黏聚力增至146.67 kPa,比未掺水泥的黄金尾矿渣增大128.7%。

2) $w=7\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件内水化产物分布不均,加州承载比与抗压强度比 $w=5\%$ 的水泥改性黄金尾矿渣试件小,掺加过量水泥会降低材料路用性能。

3) $w=5\%$ 时,水泥改性黄金尾矿渣试件在冻融与硫酸盐侵蚀下表现优异,硫酸盐质量分数为20%、冻融循环250次时,水泥改性黄金尾矿渣试件的抗压强度为36.6 MPa,比盐冻融试验前减小26.8%,降幅比未掺水泥黄金尾矿渣试件明显减小,抗盐冻融能力显著提高。

水泥改性黄金尾矿渣满足路用性能要求,可作为道路底基层材料进行规模化使用。未来可继续研究黄金尾矿渣的其他改性方式,形成可持续发展产业。

参考文献:

- [1] 雷雪男.“氟”舟已过万重山:《国家危险废物名录》移除两项“氟化尾渣”纪实[N].中国黄金报,2025-01-07(4).
- [2] 迟崇哲,刘影,王超,等. 有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J]. 黄金, 2024,45(12):8-12.
- [3] 宿佩君,王书云,王凡,等. 大掺量黄金尾矿烧结黏土砖组分比例研究[J]. 市政技术, 2024, 42(11): 47-52.
- [4] 任珩,李沛霖,李金璐. 基于黄金尾矿处理与综合利用研究的文献计量分析[J]. 黄金科学技术, 2024, 32(5): 939-948.
- [5] 张啸,王璜琪,王栋民. 黄金尾矿制备水泥和混凝土的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2022,41(9):3121-3128.
- [6] 阙涛,王凯,王业飞,等. 黄金尾矿砂对微表处混合料性能的影响研究[J]. 交通科技, 2024(2): 147-152.
- [7] 高晓杰,马骁,徐亚娟,等. 秦岭金矿四范沟尾矿制砖试验研究[J]. 黄金, 2024, 45(3): 85-90.
- [8] 常智杨,秦辉,周雪,等. 黄金尾矿再生骨料的制备工艺优化与性能研究[J]. 水泥,2025(4):74-78.
- [9] 胡瑶瑶,卜令来,王凯,等. 掺黄金尾矿粉水泥基复合胶凝材料的制备及性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(10):99-103.
- [10] 于新,王龙,何平平,等. 以黄金尾矿砂为细骨料的工程水泥基复合材料性能研究[J]. 硅酸盐通报,2025,44(7): 2566-2577.
- [11] 孟文文,李鹏. 黄金行业尾矿处置政策与综合利用实践[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(6):1023-1034.
- [12] 李进鹏,刘辉,温晓东. 碱激发黄金尾矿制备胶凝材料的试验研究[J]. 黄金, 2023, 44(12):18-22.
- [13] 陆思成,黄仁东,石英. 黄金尾矿两种无害化处理方案生命周期评价[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(5): 845-855.
- [14] 王晓宇,李健,张伟屹,等. 黄金尾矿/粉煤灰制备相变储能材料及其性能研究[J]. 矿产保护与利用,2023,43(6): 72-78.
- [15] 林泽宇,刘心中,李镇宏,等. 黄金尾矿替代细骨料制备混凝土试验研究[J]. 中国建材科技, 2024, 33(2):59-63.
- [16] CONSOLI N C, DALLA R A, SALDANHA R B. Variables governing strength of compacted soil-fly ash-lime mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011,23(4):432-440.
- [17] 杨玮,叶金秋,龙涛,等. 选冶联合回收某高硫黄金尾矿中金的试验研究[J]. 黄金科学技术,2023,31(1):113-122.
- [18] 李文洁,孙晋方,侯彬. 黄金尾矿掺量对冻融循环和硫酸盐侵蚀作用下混凝土抗劣化性能的影响[J]. 金属矿山, 2024(5):325-330.
- [19] 孙百川,杨瑞东,郑禄林,等. 黔西南地区金矿尾矿(渣)潜在资源评价及处理建议[J]. 黄金科学技术,2022,30(3): 470-482.
- [20] 袁玲,孟扬,左玉明. 黄金矿山尾矿资源回收和综合利用[J]. 黄金,2010,31(2):52-56.
- [21] 中华人民共和国环境保护部. 黄金行业氰渣污染控制技术规范:HJ 943—2018[S]. 北京:中国环境出版社, 2018.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2020.

Cement-modified gold tailings and its performance in the base layer of roads

SUN Xingchen, WANG Kun^{}, LI Qiangfei, XIE Dandan, JIANG Ziyu*

School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To assess the feasibility of using gold tailings on a large scale as a subbase material for road subgrades, cement is mixed with gold tailings at different mass ratios w (0%, 3%, 5%, 7%) to prepare specimens of gold tailings. The specimens undergo direct shear tests, consolidation tests, California bearing ratio (CBR) tests, and freeze-thaw cycling tests to evaluate the feasibility of gold tailings as a base material for roads. The results indicate: 1) The normal stress and shear strength of cement-modified gold tailings samples are linearly related. At the same w , the shear strength of the cement-modified gold tailings specimens increases linearly with the increase of normal stress; under the same normal stress, the shear strength of the cement-modified gold tailings specimens initially increases and then decreases with the increase of w ; the specimen with $w=5\%$ exhibits the highest shear strength. 2) At the same w , the deformation of the cement-modified gold tailings specimens gradually increases with the extension of consolidation time; with the same consolidation time, the deformation of the cement-modified gold tailings specimens initially decreases and then increases with the increase of w . The deformation of the specimen made with $w=5\%$ cement-modified gold tailings is the smallest. 3) At the same compaction degree, the California bearing ratio of the cement-modified gold tailings specimens increases initially and then decreases with the increase of w ; at the same w , the California bearing ratio of the cement-modified gold tailings specimens increases with the increase of compaction degree; the maximum California bearing ratio is observed at $w=5\%$ and a compaction degree of 95%. 4) In the freezing and thawing test, the compressive strength and tensile strength of cement-modified gold tailings specimens first increase and then decrease with the increase of w ; under sulfate freeze-thaw conditions, the compressive strength of gold tailings specimens without cement addition and those with 5% cement-modified gold tailings decreases with the increase of freeze-thaw cycle times, while the latter shows a significantly reduced decline; increasing the sulfate mass fraction exacerbated the erosion of the cement-modified gold tailings specimens, reducing their compressive strength. The cement-modified gold tailings with $w=5\%$ can significantly improve compressive strength, tensile strength, deformation resistance, and durability, meeting the technical requirements for use as road base materials.

Keywords: gold tailings; subbase; direct shear test; consolidation test; CBR test; cement

(责任编辑:王惠)