

基于正交实验金尾矿砂再生混凝土实验研究

李志强^{1,2}, 张轩硕¹, 卜娜蕊¹, 俞勇¹, 祝帆¹, 李堰江¹

(1. 河北建筑工程学院土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 河北省高校绿色建材与建筑改造应用技术研发中心, 河北省土木工程诊断改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要:为缓解天然砂石资源短缺, 采用正交实验对金尾矿砂再生混凝土进行力学研究, 选取水灰比、金尾矿砂取代率、再生粗骨料取代率和粉煤灰掺量四个影响因素, 得到了金尾矿砂再生混凝土抗压、抗拉强度两种性能指标, 并基于力学性能进行了配比优化组合研究。结果表明: 水灰比、粉煤灰掺量对两种评价指标影响显著, 其次是金尾矿砂取代率, 而二次破碎的再生粗骨料对二者影响较小。综合考虑配制金尾矿砂再生混凝土的较佳因素水平方案为水灰比 0.45、金尾矿砂取代率 30%、再生粗骨料取代率 30%、粉煤灰掺量 10%。通过对较佳配比浇筑的金尾矿砂再生混凝土与普通混凝土、再生混凝土的两种强度对比和微观分析可知, 金尾矿砂应用于再生混凝土中是可行的。

关键词: 再生混凝土; 金尾矿砂; 正交实验; 力学性能; 配比优化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.013

中图分类号: TD981; TU528 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 06-0073-06

随着我国金矿大规模的开发, 金尾矿的堆存量日渐增长^[1]。根据《全国矿产资源节约与综合利用报告(2019)》, 2018年我国金尾矿砂的利用率仅为 36.9%^[2]。另一方面, 随着我国新型城镇化速度的推进, 混凝土路面和废弃建筑物拆除和维修, 遗留下大量建筑垃圾废弃物。相关资料表明, 我国在 2006~2018 年, 建筑废弃物堆放量由 6.5 亿 t 增长到 21 亿 t^[3], 成为城市垃圾的主要源头。由于对这两种废弃物的利用率较低, 大量的废弃物只能露天堆放或者掩埋, 不仅浪费土地, 而且污染周围环境, 更不符合我国持续发展和绿色发展的要求^[4]。将金尾矿砂和建筑垃圾回收作为再生骨料应用于金尾矿砂再生混凝土的生产, 这种处理方式从环境保护角度出发, 必须对这两种废弃物进行处理, 避免二次污染; 从资源角度出发, 对这两种废弃物加以利用可变废为宝, 缓解我国天然砂石资源短缺的问题。

目前, 对于再生混凝土的研究已经相对完

善, 从再生骨料品质^[5]、再生骨料类型^[6]、再生骨料取代率^[7]及再生骨料的改性^[8]等众多因素来分析再生混凝土的性能。而相比于金尾矿砂在混凝土上的研究还很少, 基于此, 本课题通过正交实验方法, 以水灰比、金尾矿砂取代率、再生粗骨料取代率和粉煤灰掺量为正交实验的四个因素, 每个因素选择三个水平, 从而探究不同因素水平组合下对金尾矿砂再生混凝土基本力学性能的影响, 并且找到材料的较优配合比, 以期为金尾矿砂再生混凝土的综合利用提供参考。

1 实验概况

1.1 实验材料

金尾矿砂来源于河北张家口地区的尾矿砂, 细度模数 2.0, 采用 Smartlab9 型 X 射线衍射仪对金尾矿砂进行矿物成分分析, 结果见图 1, 从图 1 可知, 金尾矿砂中主要矿物为石英、钙长石、石墨等。采用 ARLAdvant X Intellipower TM3600X

收稿日期: 2021-08-17

基金项目: 河北省人力资源和社会保障课题 (A2016002028)

作者简介: 李志强 (1975-) 男, 教授, 研究方向为结构工程。

射线荧光光谱对金尾矿砂进行化学成分分析，对比结果见表 1。以金尾矿砂为原料用于建筑生产，须考虑尾矿砂的物化特性及放射性风险，检测结果见表 2、3。从表 2 中可看出，金尾矿砂的表观密度和吸水率略高于一般建筑用砂的表观密度（天然砂 2587.3）和吸水率（天然砂 1.85），但其他物理性能指标均符合规范要求。从表 3 中可看出，金尾矿砂中的放射性核素均低于建筑主体材料要求的天然核素并同时满足内照射指数 $I_{Ra} < 1.0$ 和外照射指数 $I_r < 1.0$ ；粗骨料：级配良好的天然骨料和再生骨料，再生骨料来源于原始强度为 C30 的混凝土试块，经过破碎、筛检、清洗，选取粒径为 5~20 mm 的再生骨料取代天然骨料，粗骨料的基本物理性质见表 4，天然砂为中砂，水泥为 P•O42.5 水泥，粉煤灰为某发电厂生产的 II 级粉煤灰，水。

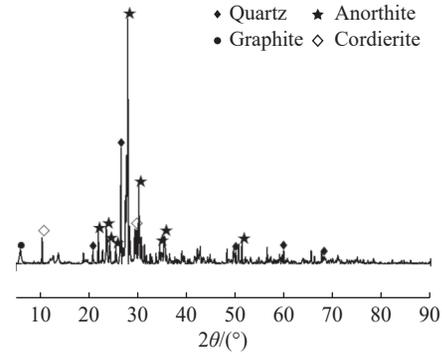


图 1 金尾矿砂 X 射线衍射分析
Fig.1 X-ray diffraction analysis of gold tailings sand

表 1 金尾矿砂主要化学成分/%
Table 1 Main chemical composition of gold tailings sand

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O
52.65	17.55	9.84	9.04	4.13	3.32	1.48	1.47

表 2 金尾矿砂物化特性检测结果

Table 2 Test results of physical and chemical properties of gold tailings sand

指标	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	云母含量/%	轻物质含量/%	氯离子含量/%	硫化物含量/%	有机物含量/%
测量值	2789.6	2.28	0.3	0.5	0.01	0.24	合格
规范标准	-	-	<2.0	<1.0	<0.06	<1.0	颜色不深于标准色

表 3 金尾矿砂放射性核素检测结果

Table 3 Radionuclide detection results of gold tailings sand

核素名称	比活度/(Bq·kg)	内照射指数 (I _{Ra})	外照射指数 (I _r)
²²⁶ Ra	1.8		
²³² Th	6.7	0.0	0.1
⁴⁰ K	245.4		

表 4 粗骨料的基本物理性质

Table 4 Basic physical properties of coarse aggregate

骨料类型	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	含水率/%	压碎指标/%
天然粗骨料	2659.6	1315.4	0.5	0.57	5.8
再生粗骨料	2510.2	1259.1	5.5	3.8	13.1

1.2 配合比设计

为研究金尾矿砂再生混凝土的性能，重点选用水灰比、金尾矿砂取代率、再生粗骨料取代率和粉煤灰掺量四个因素进行正交实验测试抗压强度和劈裂抗拉强度，采用 L₉ (3⁴) 正交。各因素取代率见表 5，配合比见表 6。

1.3 试件的制作与实验方法

金尾矿砂在试件制作过程中等量取代天然砂，同理再生粗骨料和粉煤灰等量取代天然骨料

和水泥，根据表 5 制作 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块，在标准养护室养护 28 d 后，用 WHY-2000 型压力试验机测试金尾矿砂再生混凝土的两种性能指标。

表 5 正交实验设计

Table 5 Orthogonal test design

水平	因素			
	水灰比 A	金尾矿砂取代率 B/%	再生粗骨料取代率 C/%	粉煤灰掺量 D/%
1	0.45	0	30	10
2	0.50	30	50	20
3	0.55	60	70	30

2 实验结果与分析

2.1 正交实验结果

根据上述实验设计方法，通过压力试验机测定出各配合比下两种性能指标强度值，见表 7。

2.2 正交实验极差分析

利用表 7 的结果，对两种指标进行极差分析，结果见表 8。

从表 8 立方体抗压强度的极差值可看出，水

表6 金尾矿砂再生混凝土材料配合比
Table 6 Mix ratio of gold tailings sand recycled concrete materials

编号	组别	材料用量/(kg·m ³)						
		水泥	水	天然砂	天然粗骨料	再生粗骨料	金尾矿砂	粉煤灰
Z-1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	390	201.2	637.8	793.9	340	0	43.3
Z-2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	346.6	204.8	446.5	567	566.9	191.3	86.7
Z-3	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	303.3	209.1	255.1	340	793.9	382.7	130
Z-4	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	273	204.8	653.4	580.8	580.8	0	117
Z-5	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	351	209.1	457.4	348.5	813.1	196	39
Z-6	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	312	201.2	261.4	813.1	348.5	392	78
Z-7	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	283.6	209.1	666.2	355.3	829	0	70.9
Z-8	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃	248.1	201.2	466.3	829	355.3	199.9	106.4
Z-9	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	319	204.8	266.5	592.1	592.2	399.7	35.5

表7 金尾矿砂再生混凝土正交实验强度值
Table 7 Orthogonal test strength value of recycled concrete with gold tailings sand

编号	组别	影响因素				实验结果	
		水灰比A	金尾矿砂取代率B/%	再生粗骨料取代率C/%	粉煤灰掺量D/%	28 d抗压强度/MPa	28 d劈裂抗拉强度/MPa
Z-1	A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	1 (0.45)	1 (0)	1 (30)	1 (10)	38.20	3.33
Z-2	A ₁ B ₂ C ₂ D ₂	1 (0.45)	2 (30)	2 (50)	2 (20)	37.07	3.21
Z-3	A ₁ B ₃ C ₃ D ₃	1 (0.45)	3 (60)	3 (70)	3 (30)	33.92	2.66
Z-4	A ₂ B ₁ C ₂ D ₃	2 (0.50)	1 (0)	2 (50)	3 (30)	33.80	2.6
Z-5	A ₂ B ₂ C ₃ D ₁	2 (0.50)	2 (30)	3 (70)	1 (10)	37.32	3.14
Z-6	A ₂ B ₃ C ₁ D ₂	2 (0.50)	3 (60)	1 (30)	2 (20)	35.53	2.68
Z-7	A ₃ B ₁ C ₃ D ₂	3 (0.55)	1 (0)	3 (70)	2 (20)	30.27	2.35
Z-8	A ₃ B ₂ C ₁ D ₃	3 (0.55)	2 (30)	1 (30)	3 (30)	30.01	2.42
Z-9	A ₃ B ₃ C ₂ D ₁	3 (0.55)	3 (60)	2 (50)	1 (10)	31.79	2.35

表8 实验结果极差分析结果
Table 8 Range analysis of test results

水平	立方体抗压强度				劈裂抗拉强度			
	A	B	C	D	A	B	C	D
K ₁	109.2	102.2	103.7	107.3	9.2	8.3	8.4	8.8
K ₂	106.6	104.4	102.6	102.9	8.4	8.8	8.2	8.2
K ₃	92	101.2	101.5	97.7	7.1	7.7	8.1	7.7
极差R	17.2	3.2	2.2	9.6	2.1	1.1	0.3	1.1

灰比所产生的影响较大，其次是粉煤灰掺量，金尾矿砂取代率和再生粗骨料取代率影响较小，也比较接近；从劈裂抗拉强度的极差值可看出，水灰比所产生的影响较大，其次是粉煤灰掺量和金尾矿砂取代率，而再生粗骨料的取代率影响可忽略不计。显然，无论是金尾矿砂再生混凝土还是普通混凝土，影响其强度值的较重要因素是水灰比。

为比较因素之间的差异对强度产生的影响，将四个因素三个水平变化情况绘制成图2和图3。

(1) 因素A（水灰比）的影响：水灰比对两种强度指标影响非常显著，两种强度指标随着水灰比的增大而降低。由于水灰比增大，水泥在水化过程中水分蒸发会产生大量的孔隙，使得密实度下降，然而二次破碎的再生骨料也会产生大量的缝隙，从而导致混凝土强度下降。从极差分析中可看出，当水灰比从水平1（0.45）变化至水平2（0.50），其抗压强度和劈裂抗拉强度分别下降了2.4%和8.5%；当水灰比从水平2（0.50）变化至水平3（0.55），其抗压强度和劈裂抗拉强度分

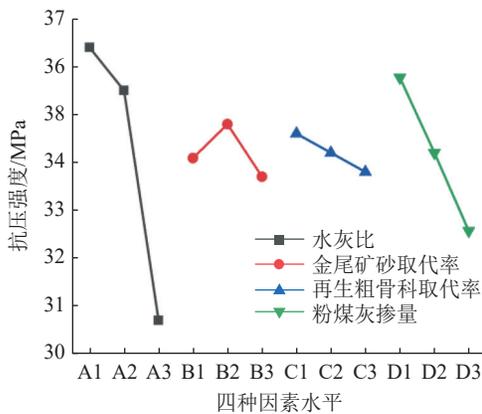


图 2 各因素不同水平抗压强度变化值
Fig.2 Variation value of compressive strength at different levels of each factor

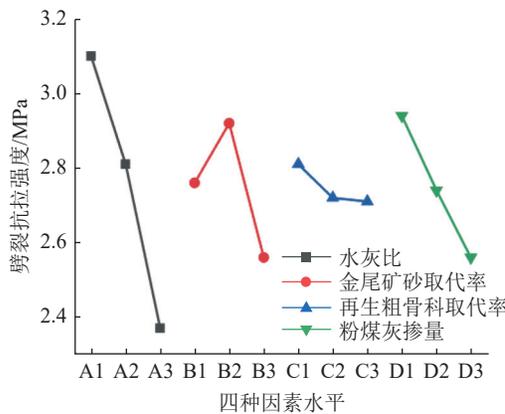


图 3 各因素不同水平劈裂抗拉强度变化值
Fig.3 Variation value of splitting tensile strength at different levels of each factor

别下降了 13.7% 和 15.4%。

(2) 因素 B (金尾矿砂取代率) 的影响: 随着金尾矿砂取代率的逐渐提高, 两种强度变化呈现为先升高后降低。当金尾矿砂从水平 1 (0) 变化至水平 2 (30%) 时, 其抗压强度和劈裂抗拉强度分别增加了 2.2% 和 5.9%; 当金尾矿砂从水平 2 (30%) 变化至水平 3 (60%) 时, 其抗压强度和劈裂抗拉强度分别下降了 3.1% 和 12.3%。分析主要原因: 由于尾矿砂粒径较细, 对混凝土的填充效应明显, 当取代率为 30% 时, 可改善混凝土的密实性和均质性。但当取代率过高时, 大量的细骨料被取代, 使得骨料级配不合理, 就会造成混凝土内部缺陷, 导致强度降低。此外, 由于尾矿砂颗粒表面的不规则、粗糙、有棱角, 可能会使混凝土抵抗变形能力增强, 强度提高。

(3) 因素 C (再生粗骨料取代率) 的影响: 两种强度指标会随着再生骨料的取代率增高而降

低。再生骨料在破碎过程中受到机械力作用, 骨料表面和内部会产生大量裂缝, 当再次受到荷载时, 裂缝会继续扩展, 使得再生混凝土强度降低。从极差分析中可看出, 从水平 1 (30%) 变化至水平 3 (70%) 时, 立方体抗压强度降低了 2.1%, 劈裂抗拉强度降低了 3.3%。通过以上分析, 在各项指标达到要求的条件下, 为缓解天然砂石资源短缺, 可将再生粗骨料的取代率由 30% 调整到 50%。

(4) 因素 D (粉煤灰掺量) 的影响: 对金尾矿砂再生混凝土两种强度指标影响较为显著, 两种强度指标随着粉煤灰掺量增大而降低。粉煤灰属于活性材料, 其活性远低于水泥活性。所以当粉煤灰取代水泥时, 水泥的用量会随这粉煤灰的增加而减少, 从而使水泥的水化速度减缓, 引起强度的降低。从极差分析中可看出, 当粉煤灰从水平 1 (10%) 变化至水平 2 (30%), 抗压强度和劈裂抗拉强度分别下降了 4.1% 和 6.8%; 当粉煤灰从水平 2 (20%) 变化至水平 3 (30%), 抗压强度和劈裂抗拉强度分别下降了 5.1% 和 6.1%。

2.3 方差分析

通过极差分析可明显得到各因素的主次关系, 但是也存在一定的局限性, 不能将实验中所产生的误差大小估算出来。为减小误差进行方差分析, 方差分析见表 9。

从表 9 方差分析结果中可得出, 影响抗压强度显著性的因素排序是水灰比 (A) > 粉煤灰掺量 (D) > 金尾矿砂取代率 (B) > 再生粗骨料取代率 (C); 影响劈裂抗拉强度显著性的因素排序是水灰比 (A) > 粉煤灰掺量 (D) > 金尾矿砂取代率 (B) > 再生粗骨料取代率 (C)。其中, 水灰比、粉煤灰掺量这两种因素对抗压、劈裂抗拉强度影响显著, 金尾矿砂取代率对劈裂抗拉强度较显著, 再生粗骨料对金尾矿砂再生混凝土的两种指标影响不大。综合两种分析方法, 可得到较佳配比为 $A_1B_2C_1D_1$, 即水灰比 0.45、金尾矿砂取代率 30%、再生粗骨料取代率 30%、粉煤灰掺量 10%。

3 方案优化验证

3.1 方案优化

通过正交实验的两种强度指标分析, 得到金

表9 金尾矿砂再生混凝土方差分析结果
Table 9 Variance analysis results of gold tailings sand recycled concrete

检验指标	方差来源	平方和	自由度	均方差	F	显著性
立方体抗压强度	A	170.734	2	85.367	356.930	***
	B	5.213	2	2.607	10.898	*
	C	2.473	2	1.236	5.169	*
	D	46.065	2	23.032	96.302	**
	误差	4.305	18	0.236		
	总计	228.79	26			
	劈裂抗拉强度	A	2.208	2	1.104	49.761
B		0.585	2	0.292	13.179	**
C		0.054	2	0.027	1.221	*
D		0.650	2	0.325	14.644	**
误差		0.399	18	0.022		
总计		3.896	26			

注：“*”为显著性影响程度等级

尾矿砂再生混凝土的较佳配比。为验证金尾矿砂再生混凝土的适用性，对金尾矿砂再生混凝土、再生混凝土和普通混凝土的两种强度指标作对比见表10。通过对两种强度指标对比发现，金尾矿砂再生混凝土与普通混凝土相比抗压和劈裂抗拉

强度分别上升了3.66%和13.16%；金尾矿砂再生混凝土与再生混凝土强度对比时，抗压和劈裂抗拉强度分别上升了10.93%和20.73%。由此可见，当掺入30%的金尾矿砂时，可有效提高再生混凝土的抗压和劈裂抗拉强度。

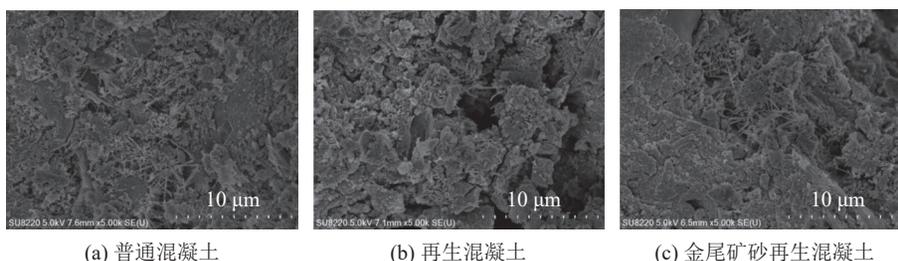
表10 金尾矿砂再生混凝土优化方案及结果
Table 10 Optimization scheme and results of gold tailings sand recycled concrete

混凝土类型	水灰比	金尾矿砂取代率/%	再生粗骨料取代率/%	粉煤灰掺量/%	28 d立方体抗压强度/MPa	28 d劈裂抗拉强度/MPa
普通混凝土	0.45	0	0	0	41.32	3.10
再生混凝土	0.45	0	30	10	38.20	2.83
金尾矿砂再生混凝土	0.45	30	30	10	42.89	3.57

3.2 微观验证分析

通过扫描电镜（SEM）对混凝土的形貌、密实性等微观结构进行研究。图4（a）普通混凝土内部有明显的细小裂纹，裂纹的产生是由水泥浆体的自收缩而造成的，如果砂子中含泥量较高，混凝土内水泥石更容易因为收缩过大而产生微裂纹。图4（b）再生混凝土内部有较大裂缝和贯穿

性孔洞，这些裂缝与孔洞的存在是由再生骨料自身特性造成的，裂缝和孔洞增多会影响结构的密实性，使得强度降低。图4（c）当掺量为30%的金尾矿砂与30%的再生骨料混合作为骨料时，较好的颗粒级配，弥补了再生骨料多裂纹、孔洞的缺点，改善了混凝土内部结构的密实性和均质性。



(a) 普通混凝土

(b) 再生混凝土

(c) 金尾矿砂再生混凝土

图4 混凝土微观结构
Fig.4 Concrete microstructure

3.3 金尾矿砂再生混凝土化学成分分析

为确保金尾矿砂再生混凝土在实际应用中对人体健康和地下水无影响,对金尾矿砂再生混凝土试件进行化学成分分析,结果见表 11。由表 11 可知,金尾矿砂再生混凝土主要化学成分为

SiO₂ 和 CaO, 其次为 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 和 K₂O, 均为硅酸盐矿物的基本特征。所以金尾矿砂作为细骨料用于建筑生产,不仅可以开发利用建筑垃圾和金尾矿,而且又能缓解天然砂石资源短缺的压力。

表 11 金尾矿砂再生混凝土化学成分/%
Table 11 Chemical composition of recycled concrete from gold tailings sand

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂
38.56	31.73	12.52	6.63	3.39	2.17	1.71	1.38	0.84

4 结 论

(1) 金尾矿砂再生混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强受水灰比、粉煤灰掺量、金尾矿砂取代率和再生粗骨料取代率的显著性依次降低。

(2) 金尾矿砂再生混凝土的较佳因素水平为 A₁B₂C₂D₁, 即水灰比 0.45、金尾矿砂取代率 30%、再生粗骨料取代率 30%、粉煤灰掺量 10%。

(3) 通过对普通混凝土、再生混凝土和金尾矿砂再生混凝土的强度性能和微观结构分析得到,当金尾矿砂取代率为 30%,金尾矿砂再生混凝土强度比基准混凝土强度有所提高,且混凝土内部结构更加密实。

参考文献:

[1] 孙晓刚,王海龙,邢军,等. TiO₂ 对黄金尾砂微晶泡沫玻璃非等温析晶活化能的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(1):151-156.
SUN X G, WANG H L, XING J, et al. Effect of TiO₂ on crystallization activation energy of gold tailings microcrystalline foam glass[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):151-156.
[2] 王海军,王伊杰,李文超,等. 《全国矿产资源节约与综合利用报告(2019)》[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(2):2.
WANG H J, WANG Y J, LI W C, et al. "National mineral resources conservation and comprehensive utilization report (2019)"[J]. China Land and Resources Economics, 2020, 33(2):2.
[3] 汪振双,冉春梅. 中国建筑垃圾排放量与行业经济增长脱钩关系时空演化分析[J]. 工程管理学报, 2020, 34(3):39-44.
WANG Z S, RAN C M. Spatiotemporal evolution analysis of the decoupling relationship between China's construction waste discharge and industry economic growth[J]. Journal of

Engineering Management, 2020, 34(3):39-44.

[4] 罗立群,张晓雪,林永峰,等. 江西金尾矿资源的性质与绢云母提取研究[J]. 矿产综合利用, 2021(3):1-8.

LUO L Q, ZHANG X X, LIN Y F, et al. Properties of gold tailing and sericite separation from gold tailing in Jiangxi province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(3):1-8.

[5] 郭远新,李秋义,岳公冰,等. 考虑粗骨料品质和取代率的再生混凝土抗压强度计算[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4):153-159.

GUO Y X, LI Q Y, YUE G B, et al. Calculation of compressive strength of recycled concrete considering coarse aggregate quality and replacement rate[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4):153-159.

[6] 马昆林,黄新宇,胡明文,等. 砖混再生粗骨料混凝土力学性能及工程应用研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8):2600-2607.

MA K L, HUANG X Y, HU M W, et al. Research on mechanical properties and engineering application of brick-concrete recycled coarse aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(8):2600-2607.

[7] 石宵爽,王清远,邱慈长,等. 不同再生骨料取代率的再生混凝土性能实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42:170-176.

SHI X S, WANG Q Y, QIU C C, et al. Experimental study on the performance of recycled concrete with different recycled aggregate replacement rates[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42:170-176.

[8] 甘福,周脉席,濮琦. 再生粗骨料及再生混凝土性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(9):102-107.

GAN F, ZHOU M X, PU Q. Research progress on properties of recycled coarse aggregate and recycled concrete[J]. Concrete and Cement Products, 2018(9):102-107.

(下转第 83 页)