基于低活性矿渣的充填胶结剂配方试验研究*

王旭[1,2,3],张荣荣[2],王长军[1,2,3],余胜利[2]

(1.低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 上杭县 364204;
2.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭县 364200;
3.紫金(长沙)工程技术有限公司, 湖南 长沙 410114)

摘要:为了降低矿山充填成本,利用Timok金铜矿周边低活性矿渣及其他辅料,开展了充填胶结剂试验研究。采用正交试验得到最优配方为矿渣∶石灰∶烧碱∶脱硫石膏=81.5∶10∶1∶7.5。通过XRD和SEM分析方法研究了矿渣基胶结剂的水化机理。结合当地材料价格及加工成本测算矿渣基胶结剂的生产成本,并推荐其应用范围。研究结果表明,该矿渣基胶结剂的28 d胶结效果稍低于当地水泥,其矿渣基成本较当地水泥可下降30%。在Timok铜金矿,将胶结剂应用于分段空场嗣后充填法采场的充填,可使胶结成本下降13%,年节约充填成本128.1万欧元,具备一定的应用价值。

关键词:充填胶结剂; 低活性矿渣;正交试验;水化机理;尾砂

中图分类号:TD853.34;X75 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)01-0079-06

Experimental Study on the Formulation of Filling Binder Based on Low-Activity Slag

WANG Xu[1,2,3], *ZHANG Rongrong*[2], *WANG Changjun*[1,2,3], *YU Shengli*[2]

(1.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores, Shanghang County, Fujian 364204, China;
2.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang County, Fujian 364200, China;
3.Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to reduce the cost of mine filling, the experimental study of filling binder was carried out using low-activity slag and other auxiliary materials around Timok copper-gold mine. The optimal formulation obtained by orthogonal experiment is slag∶lime∶caustic soda∶desulfurization gypsum=81.5∶10∶1∶7.5. The hydration mechanism of slag-based binder was studied by XRD and SEM analysis methods. Combined with the local material price and processing cost, the production cost of slag-based filling binder was calculated, and its application range was recommended. The results show that the 28 d cementation effect of the slag-based binder is slightly lower than that of the local cement, and its cost can be reduced by 30% compared with the local cement. In Timok copper-gold mine, the application of slag-based binder to the filling of sublevel open stoping with subsequent filling method can reduce the cementing cost by 13%. The annual saving of filling cost is 1.281 million euros, which has certain application value.

Key words: Filling binder, Low activity slag, Orthogonal experiment, Hydration mechanism, Tailings

0 引言

水泥是一种重要的建筑材料,广泛应用于国民经济的各个领域。但是从能源、资源消耗及环境保护等方面分析,水泥的生产、使用及废弃全过程是一个不断破坏自然环境和人类生存空间的过程。因此,在满足经济建设对优质建筑材料需求的前提下,实现水泥行业的可持续发展,保护生态环境,研究和发展生态水泥势在必行。生态水泥的生产是利用各种废弃物作为原、燃材料,在生产和使用过程中,具有较好的生态环境协调性。所谓矿渣基生态水泥,就是以矿渣为主要组分的一类生态水泥的总称。

关于矿渣基生态水泥的研发,已有众多学者开展了研究。韩涛等[1-2]、靳秀芝等[3]研究了矿渣微粉

* **收稿日期**:2024-02-18

作者简介:王旭(1985—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事充填工艺、充填胶结剂及充填采矿法等方面的研究工作。E-mail:258805458@qq.com

细度对矿渣水泥强度的影响。BARNETT 等[4]研究了养护温度对矿渣砂浆强度发展的影响。SAJEDI 等[5]研究了化学激发剂对普通硅酸盐水泥-矿渣砂浆早期强度的影响。谭克锋[6]研究发现,以 Na_2CO_3 为激发剂可显著改善高掺矿渣水泥的力学的性能和耐久性。李茂辉[7]针对低活性酒钢水淬渣开发早强胶凝材料配方,获得的充填体 7 d 强度达 3.17 MPa。唐美红等[8]研究了 $Ca(OH)_2$ 的掺量及水玻璃的模数和掺量对矿渣胶结剂强度的影响。张西玲等[9]论述了矿渣活性的化学激发方法及内在机理。唐明浩等[10]阐述了影响矿渣活性的主要因素以及矿渣活性激发机理,并对矿渣混凝土的用途进行了总结。秦江浩[11]的研究表明,碱/石膏矿渣水泥胶凝体系兼具石膏矿渣水泥和碱矿渣水泥两者的优点。大量研究成果表明,机械激发、热激发、化学激发均是行之有效的激发方式,而碱和硫酸盐复合激发是相对高效的化学激发方式。

Timok 铜金矿体赋存集中,矿体上部断层裂隙较发育、矿体稳固性较差,必须针对不同矿岩条件选择不同的采矿方法回收高价值矿石资源,以期在保证采矿作业安全、减少损失贫化率的基础上实现矿体的集中强化开采。矿山选择上向进路充填法和分段空场嗣后充填法对矿体进行回采,所占比例分别为 36%和 64%。当地水泥价格较高,近年在 120～140 欧元/t 高位区间波动,全矿综合灰砂比约为 1∶10,年消耗水泥约 17.2 万 t,约合 2 064 万～2 408万欧元。因而针对当地水泥价格高导致充填成本居高不下的难题,根据 Timok 铜金矿尾砂的特点,以当地矿渣为主要原料开发水泥替代品[12-14],在满足采矿方法对充填体强度要求的前提下,尽量降低胶结充填成本[15-17]。

1 原材料的物化性能

1.1 尾砂粒度

采用 ANALYSETTE 22 激光粒度分析仪测试全尾砂的粒度分布,测得尾砂平均粒径为 32 μm,－200目含量达 89.1% ,尾砂粒度较细且含泥。含泥尾砂常用不均匀系数 C_u 表征其均匀程度,用曲率系数 C_c 表征粒径级配累计曲线是否连续,是否缺失中间粒径,根据相关规范规定:$C_u \geqslant 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$为级配良好,不同时满足则为级配不良。

通过对 Timok 铜金矿尾砂进行粒径测试,得到:$d_{10}=1.75$、$d_{30}=6.5$ 、$d_{60}=46$,则 $C_u = d_{60}/d_{10} = 26.28$,$C_c = (d_{30} \times d_{30})/(d_{60} \times d_{10}) = 0.52$,因此,可以认为该矿的尾矿粒度分布均匀,但缺少中间粒径,属于不良级配的尾砂。

1.2 尾砂化学成分

充填材料的化学成分及含量对充填体力学性能具有一定影响,其中有较大影响的化学成分主要有 Al_2O_3、CaO、MgO、SiO_2、S。Timok 矿全尾砂化学成分测定结果见表 1。从表 1 可以看出,尾砂中 Al_2O_3、TFe、CaO、MgO、SiO_2 含量均在正常范围内,但 S 的含量高达 12.62%,高硫尾砂极易引起充填体开裂,大幅降低充填体的后期强度[18-19]。

表 1 全尾砂的化学成分

Table 1 The chemical compositions of full tailings %

TFe	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	S	其他
9.35	1.53	0.32	10.58	51.09	12.62	14.51

1.3 水泥-全尾砂强度配比试验

配比试验所用材料为充填用全尾砂,胶结剂为充填站在用水泥。根据矿山日常充填配比及浓度,设计 4 种全尾砂充填料浆的灰砂比,分别为 1∶6,1∶8,1∶10,1∶15,全尾砂充填料浆质量浓度为 70%。试模规格为 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm,每组配比试验进行 7 d 和 28 d 两个龄期的强度测试。试验结果见表 2。

表 2 全尾砂胶结充填体配比试验结果

Table 2 Test results of mix propertion of cemented backfill with full tailings

灰砂比	质量浓度/%	充填体强度/MPa	
		7 d	28 d
1∶6	70	1.85	4.62
1∶8	70	1.32	3.19
1∶10	70	0.96	1.75
1∶15	70	0.57	0.67

从表 1 可以看出:不同灰砂比、不同龄期的试块强度具有明显的规律性,试块强度与龄期、水泥用量及质量浓度呈正相关。

1.4 矿渣活性分析

试验采用的矿渣来自河钢旗下的塞尔维亚钢铁厂(简称塞钢),取样测试其化学组成,计算代表矿渣活性的质量系数,并与国内其他来源矿渣对比,结果见表 3。

表 3 国内外钢铁厂矿渣化学成分

Table 3 Chemical compositions of slag from iron and steel plants at home and abroad

产地	化学成分/%									碱性系数	质量系数
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	MnO	TiO_2	其他		
塞钢	37.10	10.16	0.48	40.17	8.90	0.22	0.26	0.47	2.24	1.04	1.57
水钢	33.06	12.65	0.75	44.68	5.70	1.60	0.74	—	0.82	1.10	1.90
邯钢	33.91	12.77	0.45	38.63	10.59	—	—	—	3.65	1.06	1.83
三钢	28.82	13.40	0.98	38.82	6.41	2.46	0.42	0.54	8.15	1.07	1.77

质量系数是表征矿渣活性的重要指标,是矿渣活性成分(如 CaO、MgO、Al_2O_3)与惰性成分(如 SiO_2、MnO、TiO_2)的比值,矿渣质量系数通常大于 1.2。塞钢矿渣属于碱性矿渣[20-22],其质量系数为 1.57,与国内高活性矿渣仍有不小差距,属于低活性矿渣,激发难度大。

2 矿渣基胶凝材料配方正交试验

2.1 试验设计与试验步骤

矿山周边可获得石灰、烧碱、脱硫石膏 3 种固体激发剂以及矿渣,以这 4 种材料为基础开展配方试验。试验固定料浆质量浓度为 70%、灰砂比为 1∶8,设计三因素三水平正交试验。正交试验因素及水平设定见表 4,表中 A、B、C 分别代表石灰、烧碱和脱硫石膏的质量掺量。

表 4 正交试验因素水平

Table 4 Orthogonal test factor level

水平	影响因素		
	A/%	B/%	C/%
1	5	1	2.5
2	10	3	5.0
3	20	5	7.5

现场取样,在实验室内烘干尾砂、矿渣和脱硫石膏;用研磨机将石灰和矿渣磨细后过 200 目筛;按试验方案配料,制备料浆灌模,根据料浆沉降和凝固情况完成添模和刮模;试块初凝后,脱模后在温度为 24 ℃、湿度为 95%的条件下养护;养护至 7 d 和 28 d 龄期时,分别测试抗压强度。

2.2 试验结果分析

抗压强度测试结果见表 5。用水泥作为胶结剂时,试块的 7 d 和 28 d 强度分别为 1.32 MPa 和 3.19 MPa。从表 5 中可以看出,各矿渣胶结剂试块的 28 d 强度均小于 3 MPa,因此水泥的效果优于矿渣基胶结剂。由于正交试验的试验点分布比较均匀,而第 7 组试块的 28 d 强度最高,因此第 7 组可以作为最优配方的参考。

表 5 三因素三水平正交配方试验结果

Table 5 The results of three-factor and three-level orthogonal formula test

试验号	A/%	B/%	C/%	单轴抗压强度/MPa	
				7 d	28 d
1	5	1	2.5	0.55	1.87
2	5	3	5.0	0.45	0.60
3	5	5	7.5	0.55	1.76
4	10	1	5.0	0.72	1.82
5	10	3	7.5	0.87	1.86
6	10	5	2.5	0.48	1.41
7	20	1	7.5	0.73	2.55
8	20	3	2.5	0.68	2.14
9	20	5	5.0	0.42	0.22

对上述试验结果进行极差分析,结果见表 6。

表 6 各因素与单轴抗压强度极差分析

Table 6 Range analysis of various factors and uniaxial compressive strength

指标	特征项	水平值	影响因素		
			A/%	B/%	C/%
7 d 强度/MPa	均值	1	0.517	0.667	0.570
		2	0.690	0.667	0.530
		3	0.610	0.483	0.717
	极差	R	0.173	0.184	0.187
28 d 强度/MPa	均值	1	1.410	2.080	1.807
		2	1.697	1.533	0.880
		3	1.637	1.130	2.057
	极差	R	0.287	0.950	1.177

由表 6 可得,7 d 强度极差 $R_C>R_B>R_A$,28 d 强度极差 $R_C>R_B>R_A$,根据各影响因素极差大小排序及均值趋势可得以下结论。

(1) 石灰添加量变化对试块强度的影响最弱。随着石灰添加量的增加,试块 7 d、28 d 强度先增大后减小,水平值为 2 时,试块 7 d 和 28 d 强度达到最大。推荐石灰的添加水平为 2,即 10%。

(2) 烧碱添加量变化对试块 7 d 和 28 d 强度的影响明显,随着烧碱添加量的增加,各龄期均值强度呈下降趋势。推荐烧碱添加水平为 1,即 1%。

(3) 脱硫石膏添加量变化对试块强度的影响最

大,随着脱硫石膏添加量增加,7 d、28 d 试块强度均先降低后增大,水平值为 3 时,试块均值强度最大。推荐脱硫石膏添加水平为 3,即 7.5%。

综上,推荐配方 $A_2B_1C_3$,即矿渣∶石灰∶烧碱∶脱硫石膏=81.5∶10∶1∶7.5。

2.3 最优配方验证

通过开展全尾砂浆试验,验证正交试验得到的最优配方胶结剂的胶结效果,并与水泥胶结效果对比。试验固定料浆质量浓度为 70%,灰砂比分别为 1∶6,1∶8,1∶10,1∶15。试验数据见表 7。

表 7 配方验证试验结果

Table 7 Results of formula verification test

灰砂比	胶结剂-全尾砂		水泥-全尾砂		百分比/%	
	Ⅰ 7 d/MPa	Ⅱ 28 d/MPa	Ⅲ 7 d/MPa	Ⅳ 28 d/MPa	Ⅰ/Ⅲ	Ⅱ/Ⅳ
1∶6	1.13	3.85	1.85	4.62	61	83
1∶8	0.90	2.90	1.32	3.19	68	89
1∶10	0.68	1.40	0.96	1.75	69	80
1∶15	0.27	0.56	0.57	0.67	61	84

由表 7 可以看出,最优配方的矿渣基胶结剂的胶结效果展现出良好的规律性,试块强度与龄期、胶结剂用量呈正相关;胶结剂试块 7 d 强度为 0.27~1.13 MPa,28 d 强度为 0.56~3.85 MPa,可满足采矿方法的需求。胶结剂的胶结效果不如水泥,7 d 强度仅能达到同配比同期水泥试块强度的 60%~70%,28 d 强度达同配比同期水泥试块强度的 80%~90%。

3 矿渣基胶结剂的水化机理分析

采用最优配方矿渣胶结剂以标准稠度用水量制成净浆试块,置于标准养护箱中养护 1 d 后脱模浸水养护,到规定的水化龄期,取出试块的一部分敲成小块,用无水乙醇浸泡终止水化,然后进行 X 射线衍射分析和 SEM 分析,结果分别如图 1、图 2 所示。

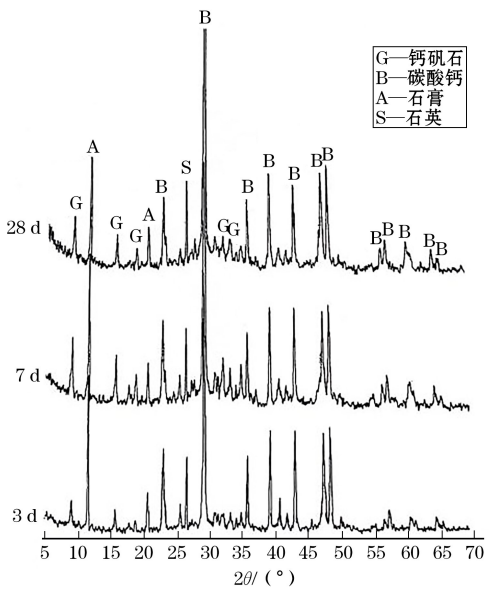
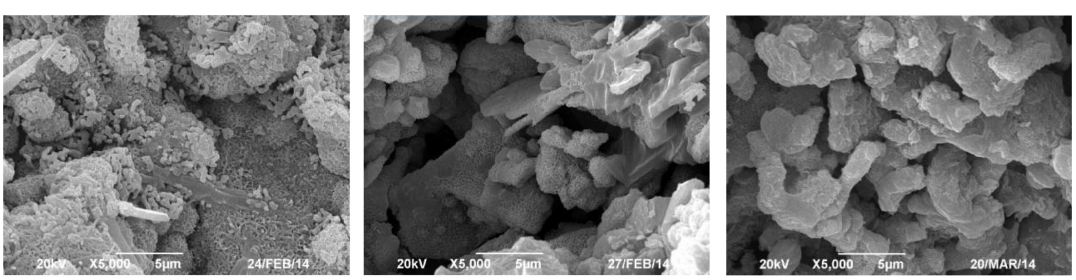


图 1 试样 XRD 衍射图

Fig.1 XRD diffraction pattern of the sample



(a) 水化 3 d (b) 水化 7 d (c) 水化 28 d

图 2 试样水化产物的 SEM 照片

Fig.2 SEM images of hydration products of the sample

由图 1 可知,矿渣基水泥石中的结晶相主要为石膏、钙矾石、碳酸钙和石英。试样水化第 3 天即开始出现钙矾石晶体的衍射峰,说明脱硫石膏早期即参与水化反应。不同龄期试样均发现石膏衍射峰的存在,说明石膏组分充足,可适当下调其含量。随着龄期增加,石膏衍射峰呈下降趋势,钙矾石衍射峰则逐渐增高,说明石膏在不断被化合成钙矾石。

由图 2 可知,水化到第 3 天时,试样中产生 C-S-H凝胶和针状钙矾石晶体,它们相互搭接形成空间网络结构,使水泥石具备一定强度,但尚有大量孔洞,结构稀松。水化第 7 天时,C-S-H 凝胶搭接更为致密,呈团状,水泥石中空隙大幅减少,大量的水化凝胶将矿渣颗粒包裹严密。水化到第 28 天时,C-S-H 凝胶量显著增加,水化产物相互交织、填充形成完整的网络结构,水泥石中的空隙被水化产物不断填充,同时未水化的矿渣颗粒被水化产物

严密包裹并充当骨架,使水泥石结构更加致密,强度显著提高。

综合以上分析,该矿渣基胶结剂的水化过程总结如下:早期水化产物主要是液相中形成的钙矾石和C-S-H凝胶,它们起到网络连接作用,使浆体失去流动性,开始凝结。随着水化龄期延长,矿渣在钙离子和硫酸根离子双重激发作用下水解,形成钙矾石和C-S-H凝胶,浆体不断密实,强度逐渐提高,此过程中消耗大量钙离子,pH逐渐下降。

4 技术经济性分析

根据最优配方各原料组分比例及市场价格,计算出矿渣基胶结剂的生产成本为89.1欧元/t。

当地普通水泥到矿价格为128欧元/t,矿渣胶结剂的生产成本仅为水泥价格的69.6%,具有一定的价格优势。

上述验证试验表明,最优矿渣基胶结剂的胶结性能不如水泥,矿渣基胶结剂试块7 d强度仅能达到同配比、同期水泥试块强度的60%~70%,按最不利比例60%计算,矿渣胶结剂试块达到水泥试块同等强度至少需增加40%的胶结剂用量,则矿渣胶结试块7 d强度与水泥试块强度持平时,其综合成本相当于水泥成本的1.16倍,较水泥成本增加了16%,显然矿渣基胶结剂不适合用于采充循环时间短的小体积采场,即不适合用于上向进路充填法采场的充填。

同样,最优矿渣基胶结剂试块28 d强度达同配比、同期水泥试块强度的80%~90%时,按最不利比例80%计算,矿渣胶结剂试块达到水泥试块同等强度至少需增加20%的胶结剂用量,则矿渣基胶结试块28 d强度与水泥试块强度持平时,其综合成本相当于水泥成本的0.87倍,较水泥成本下降约13%,显然,矿渣基胶结剂适合用于采充循环时间长的大体积采场,即适合用于分段空场嗣后充填法采场的充填。

Timok铜金矿的分段空场嗣后充填法采场年出矿量211.2万t,年产生空区体积70.4万m^3,充填综合灰砂比约为1∶12,年消耗水泥约7.7万t,约合985.6万欧元。若对这类采场改用矿渣基胶结剂代替水泥用于充填,则每年可节约成本128.1万欧元。

5 结论

(1) 基于低活性矿渣及当地可获得的激发材料,开展胶凝材料配方正交试验,得到一种大掺量低活性矿渣基胶结剂配方,矿渣掺量超过80%,矿渣基胶结剂早期(7 d)活性与当地水泥有较大差距,后期(28 d)活性接近当地水泥,达到水泥的80%~90%水平。

(2) 结合当地原材料价格,测算按最优配方生产矿渣基胶结剂的成本为89.1欧元/t,仅为当地水泥价格的69.6%,具有一定的价格优势。综合分析矿渣基胶结剂生产价格及胶结效果,判断其适用于占矿山出矿比例64%的分段空场嗣后充填法采场的充填,可使充填成本下降约13%,年节约成本达到128.1万欧元。

(3) 矿渣基水泥石中的结晶相主要为石膏、钙矾石、碳酸钙和石英。早期水化产物主要是液相中形成的钙矾石和C-S-H凝胶,它们起到网络连接作用,使浆体失去流动性并开始凝结。随着水化龄期延长,矿渣在钙离子和硫酸根离子的双重激发作用下水解,形成钙矾石和C-S-H凝胶,浆体不断密实,强度逐渐提高,此过程中消耗大量钙离子,pH逐渐下降。

参考文献(References):

[1] 韩涛,靳秀芝,崔冬梅.矿渣混合水泥粒度分布研究[J].中北大学学报(自然科学版),2010,02:188-192.
HAN Tao, JIN Xiuzhi, CUI Dongmei. Study of particle size distribution of slag blend cement [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2010(2): 188-192.

[2] 韩涛,赵宏杰,靳秀芝,等.矿渣颗粒对砂浆强度的影响[J].建材技术与应用,2010(5):3-6.
HAN Tao, ZHAO Hongjie, JIN Xiuzhi, et al. Effect of slag particles on the strength of mortar [J]. Research & Application of Building Materials, 2010(5): 3-6.

[3] 靳秀芝,赵宏杰,韩涛,等.矿渣粉细度分类与优化[J].中北大学学报(自然科学版),2010(3):269-274.
JIN Xiuzhi, ZHAO Hongjie, HAN Tao, et al. Classification and optimization of fineness of slag powder[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2010(3): 269-274.

[4] BARNETT S J, SOUTSOS M N, MILLARD S G, et al. Strength development of mortars containing ground grarrulated blast furnace slag: effect of curing temperature and determination of apparent activation energies[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 434-440.

[5] SAJEDI F, RAZAK H A. The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10): 1944-1951.

[6] 谭克锋.化学激发高掺量矿渣水泥性能的研究[J].房材与应用,1998(3):7-9.
TAN Kefeng. Study on the performance of chemical activated high content slag cement[J]Housing Materials & Applications,1998(3):7-9.

[7] 李茂辉.低活性水淬渣基早强充填胶凝材料开发与水化机理研究[D].北京:北京科技大学,2015.
LI Maohui. Research on the hydration mechanism and development of early strength filling materials base on the low active slag[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2015.

[8] 唐美红,周萍,丁琍.水玻璃激发矿渣胶凝材料的研究[J].粉煤灰,2002(5):22-26.
TANG Meihong, ZHOU Ping, DING Li. Study of slag cementitious materials agitated by sodium silicate[J]. Coal Ash,2002(5):22-26.

[9] 张西玲,姚爱玲.矿渣的活性激发技术及机理的研究进展[J].萍乡高等专科学校学报,2007(3):12-16.
ZHANG Xiling, YAO Ailing. Research progress on activation technology and mechanism of slag activity[J]. Journal of Pingxiang College,2007(3):12-16.

[10] 唐明浩,姜志炜,张士萍,等.矿渣活性研究现状及发展[J].建材发展导向,2020,18(4):4-7.
TANG Minghao, JIANG Zhiwei, ZHANG Shiping, et al. Research status and development of slag activity[J]. Development Guide to Building Materials,2020,18(4):4-7.

[11] 秦江浩.碱/石膏矿渣复合胶凝体系性能研究[D].大连:大连理工大学,2020.
QIN Jianghao. Study on performance of alkali/gypsum slag composite gelling system[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2020.

[12] 俞新月.不同温度条件下矿渣水泥的水化反应机理研究[J].散装水泥,2023(6):194-196.
YU Xinyue. Study on hydration reaction mechanism of slag cement under different temperature conditions[J]. Bulk Cement,2023(6):194-196.

[13] 胡瑛莉,胡景宣.镁矿渣水泥基材料的浆-骨界面作用机制研究[J].金属矿山,2023(12):240-244.
HU Yingli, HU Jingxuan. Study on the mechanism of cement-bone interface of magnesium slag cement-based materials[J]. Metal Mine,2023(12):240-244.

[14] 廖宜顺,汪凯,李豪.大掺量磷石膏矿渣水泥的水化历程与长期强度研究[J].硅酸盐通报,2023,42(12):4408-4415.
LIAO Yishun, WANG Kai, LI Hao. Hydration process and long-term strength of gypsum slag cement with high content of phosphogypsum[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(12):4408-4415.

[15] 王新宇.极细粒级尾砂充填高效低成本胶结剂研究[D].长沙:长沙矿山研究院,2023.
WANG Xinyu. Study on high-efficiency and low-cost cementing agent for ultra-fine grade tailings backfill[D]. Changsha:Changsha Mining Research Institute,2023.

[16] 黄明发.大型矿山低成本胶结充填关键技术研究与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(1):20-25.
HUANG Mingfa. Research and application of key technology of low cost cemented filling in large mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(1):20-25.

[17] 黄威龙.低成本矿山充填胶凝材料开发及其管输特性研究[D].广州:广州大学,2018.
HUANG Weilong. Development on low cost mine filling cementitious material and study on its pipeline transportation characteristics[D]. Guangzhou: Guangzhou University,2018.

[18] 何磊,马维清,焦志慧,等.极细高硫尾砂胶结充填料配比优化实验研究[J].中国矿业,2022,31(增刊1):388-391.
HE Lei, MA Weiqing, JIAO Zhihui, et al. Experimental study on optimization of cemented filler ratio of very fine high sulfur tailings[J]. China Mining Magazine,2022,31(Suppl.1):388-391.

[19] 郭进平,强浩,王小林,等.高硫尾砂胶结充填体强度影响因素实验研究及应用[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(6):859-864.
GOU Jinping, QIANG Hao, WANG Xiaolin, et al. Experimental study and application of factors affecting the strength of high sulfur tailings cemented backfill[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition),2019,51(6):859-864.

[20] 陈伟华,胡久荣,黄婷.碱性高炉矿渣处理模拟酸性矿井水的试验研究[J].上饶师范学院学报,2017,37(6):54-58.
CHEN Weihua, HU Jiurong, HUANG Ting. Experimental study on treatment of simulated acid mine water by alkaline blast furnace slag[J]. Journal of Shangrao Normal University,2017,37(6):54-58.

[21] 陈伟华,齐丹玮,胡久荣.碱性高炉矿渣制备多孔混凝土掺合料及其净化酸性水的试验研究[J].地球与环境,2017,45(6):643-648.
CHEN Weihua, QI Danwei, HU Jiurong. Experimental study on preparation of porous concrete admixture by alkaline blast furnace slag and its purification of acidic water[J]. Earth and Environment,2017,45(6):643-648.

[22] 于博伟,杜延军,刘辰阳,等.活性MgO碱性激发粒化高炉矿渣固化黏土的抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].岩土力学,2015,36(增刊2):64-72.
YU Bowei, DU Yanjun, LIU Chenyang, et al. Study of durability of reactive magnesia-activated ground granulated blast-furnace slag stabilized soil attacked by sulfate sodium solution[J].Rock and Soil Mechanics,2015,36(Suppl.2):64-72.