

## 炉渣胶凝材料配比优选及充填体性能

马麟<sup>1</sup>, 高天宇<sup>2</sup>

(1. 四川省冶金设计研究院, 四川 成都 610041; 2. 西部矿业股份有限公司, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。针对某铅锌矿全尾砂充填以水泥为胶凝材料成本过高和充填体后期强度低的问题, 采用丰富的炉渣固废资源, 开发低成本炉渣胶凝材料满足矿山充填体的质量需求。在对尾砂、炉渣和水泥熟料进行物化分析后, 通过充填料浆坍落度实验和炉渣胶凝材料配比探索实验, 确定满足流动性的料浆浓度为70%左右, 炉渣与水泥熟料比值为2~4为较优配比区间; 通过全面实验法探究了不同配比炉渣胶凝材料充填体强度, 充填料浆的泌水率和凝结特性。结果表明: 炉渣胶凝材料配比为炉渣添加量75%~80%, 水泥熟料添加量20%~25%, 充填体能够满足强度0.5~3.5 MPa, 充填料浆泌水率小于5%的充填质量要求。

**关键词:** 陶瓷及复合材料; 充填采矿法; 炉渣; 胶凝材料; 全尾砂

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.06.019

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 06-0127-08

矿产资源的开发利用在国民经济中起重要作用, 但近年来随着矿产资源的大量开采, 采空区数量急剧增加, 由此引发的地表沉降和围岩失稳等安全问题突出<sup>[1]</sup>。选矿技术快速发展使尾矿粒径越来越细, 以及排放量陡增, 给尾矿库的长期安全稳定带来巨大的挑战, 引发的生态破坏和环境污染等问题也日趋严重<sup>[2]</sup>。随着国家绿色矿山建设政策的贯彻落实, 对生态建设、环境保护和安全生产要求日益提高, 充填采矿法在金属非金属矿山被广泛应用<sup>[3]</sup>。充填采矿法不仅能有效解决采空区围岩变形、地表沉陷, 减少尾矿堆存带来的安全和环境污染问题而且有助于提高采矿的效率和矿石的回收率, 降低矿石的损失与贫化<sup>[4]</sup>。目前, 充填成本在采矿总成本中占有比例约为50%, 而胶凝材料费用在充填成本中占有比例超过70%, 严重影响了矿山企业的经济效益<sup>[5]</sup>。炉渣作为一种工业废渣, 具有一定的胶结特性, 在充填法中大量应用炉渣既能保护生态环境又能提升资源回收利用率降低充填成本<sup>[6]</sup>。近年来, 国内学者对炉渣胶凝材料开展了诸多研究<sup>[7-9]</sup>, 根据前人的理论分析, 得出碱性炉渣可以作为胶凝材料, 但是对于

炉渣作为胶凝材料的配比方案对尾砂充填体强度、泌水率和凝结时间的影响研究较少。基于此, 本文采用全面实验法开发了适合某铅锌矿山充填采矿的炉渣胶凝材料, 降低该矿的充填成本, 解决矿山水泥充填体后期强度不足引起的充填质量问题, 为其他矿山提供借鉴。

### 1 实验材料

#### 1.1 全尾砂

某铅锌矿全尾砂的比重为2.736 t/m<sup>3</sup>, 采用马尔文MS3000型激光衍射粒径分析仪分析全尾砂的粒径, 其粒径级配累计曲线见图1。由表1可知, 全尾砂不均匀系数 $C_u=20.17$ 大于5, 曲率系数 $C_c=1.22$ , 介于1~3之间, 表明全尾砂分布不均匀, 级配良好, 有利于提高充填体早期强度<sup>[10]</sup>。

#### 1.2 炉渣

炉渣由西宁特钢生产并粉磨后得出, 比表面积为640.3 m<sup>2</sup>/kg。由表2可知, 炉渣平均粒径为13.7 μm, 利用BRUKER S1 TITAN MODEL 600光谱分析仪对炉渣进行化学成分分析, 测定结果见表3。

收稿日期: 2021-08-24

作者简介: 马麟(1991-), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事充填胶凝材料方面的研究工作。

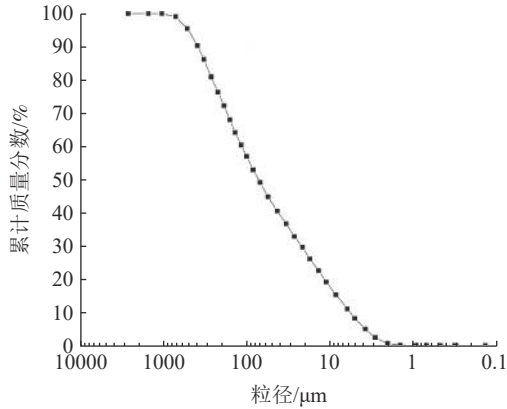


图 1 全尾砂粒径级配累计曲线

Fig.1 Grain size grading accumulative curve of the whole tailings sand

表 1 全尾砂颗粒级配常数

Table 1 Distribution constant of the whole tailings particle size

$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{30}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	Cu	Cc
6.02	29.92	76.1	121.4	410	20.17	1.22

注:  $Cu = d_{60}/d_{10}$ ;  $Cc = d_{30}^2/(d_{60}d_{10})$ <sup>[11]</sup>

表 2 炉渣粒径分布

Table 2 Distribution of slag particle size

粒级/ $\mu\text{m}$	-5	+5-10	+10-20	+20-30	+30-40	+40
产率/%	12.2	37.69	28.19	15.86	5.77	0.29
累计/%	12.2	49.89	78.08	93.94	99.71	100.00

表 3 炉渣化学成分/%

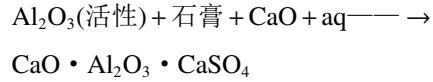
Table 3 Chemical composition of slag

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO
39.50	33.27	10.70	7.78	2.20	1.70	1.18	1.13

炉渣的成分中含有约 40% 的 CaO 以及 10% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等, 而这两种成分在前面的研究发现, 对胶凝活性影响较大, 炉渣的活性大小是影响胶凝材料配比的重要参数。由表 3 炉渣化学成分质量分数大小, 参考 GB/T 18046-2008 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》, 计算可得炉渣活性系数  $Ma=1.19$ 、碱度系数  $M=1.08>1$ 、质量系数  $K=1.63>1.2$ , 说明炉渣为活性较高的碱性矿渣。

炉渣的活性较高, 但是不容易被激发出来, 不易于与尾砂形成强度较高的充填体, 但是在碱性环境下, 炉渣活性很容易被激发出来, 炉渣中的 Al-O 结构打开, 在石膏的作用下, 表面到一定阶段形成低钙硅比的 C-S-H 层。因此本实验炉渣碱度系数为 1.08, 炉渣自身的碱性环境可以促进

炉渣的水化反应, 反应方程式如下:



### 1.3 水泥熟料

水泥熟料为炉渣的水化反应提供碱性环境, 以此激发炉渣的活性。将水泥熟料粉磨至适宜的粒径, 形成一定的颗粒级配, 增大水泥熟料的水化面积, 加速水化速度, 满足水泥浆体凝结、硬化要求。矿山自用水泥的粒径为 19.5  $\mu\text{m}$ , 比表面积为 521.5  $\text{m}^2/\text{kg}$ , 根据相关水泥行业标准, 且与矿山自用水泥进行对比, 确定水泥熟料磨料平均粒径为 21~23  $\mu\text{m}$ , 比表面积为 500  $\text{m}^2/\text{kg}$  左右。

## 2 炉渣胶凝材料配比实验研究

### 2.1 实验方案

由充填料浆坍落度实验和炉渣胶凝材料配比探索实验确定合理的料浆浓度和配比, 具体实验方案如下:

(1) 充填料浆坍落度实验。选定水泥及全尾砂作为充填料, 探索得到合适的充填料浆浓度, 方便进一步研究炉渣胶凝材料的配比。坍落度根据 GB/T 50080-2016 《普通混凝土拌合物性能实验方法标准》测定, 设计胶砂比为 1:4、1:8、1:12 和 1:16, 料浆浓度为 68%、70%、72%、74% 和 76%。

(2) 炉渣胶凝材料配比探索实验。以某铅锌矿全尾砂作为充填骨料, 根据矿山充填系统实际情况及充填料浆坍落度实验结果, 设计料浆浓度为 70%, 胶砂比为 1:8, 采用单因素实验法研究炉渣和满足粒径要求的水泥熟料配比与充填体强度的关系。实验采用 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 的标准三联试模, 制备不同配比炉渣胶凝材料充填试块, 在标准养护环境 (温度 20  $^{\circ}\text{C}$ , 湿度 95%) 下养护, 24 h 后脱模送入恒温恒湿养护箱, 养护龄期为 3、7 和 14 d 后, 采用 TYE-20 单轴压力机进行单轴抗压强度实验。同时设置矿山自用水泥作为对比实验, 得出满足矿山生产需求的炉渣胶凝材料配比区间。

### 2.2 实验结果及分析

(1) 由表 4 不同胶砂比、不同料浆浓度下尾砂料浆坍落度可知, 在相同胶砂比条件下, 坍落度随着料浆浓度的提高而降低。浓度 76% 以上

时，坍落度为 23~24 cm，流动性较差；浓度 68%~72% 时，料浆坍落度大于 27 cm，满足自流的流动性条件，且不离析。因为料浆质量浓度逐渐增加，固相量增加，全尾砂颗粒较细，比表面积增大，包裹全尾砂的水泥浆相对减小，导致流动性变差<sup>[12]</sup>。充填料浆浓度在 70% 左右，流动性能较好，具有很好的保水性及和易性，在管道和采场空区中不易产生离析，能够顺利地实现管道输送。

表 4 不同胶砂比不同料浆浓度下尾砂料浆坍落度  
Table 4 Slump of tailings slurry under different cement-sand ratio and slurry concentration

胶砂比	坍落度/cm				
	76%	74%	72%	70%	68%
1:4	23.4	27.4	28.0	28.5	29.1
1:8	23.3	26.9	27.8	28.3	28.8
1:12	23.1	26.5	27.3	28.0	28.5
1:16	23.0	26.4	27.2	27.8	28.4

(2) 由表 5 可知，龄期 3 d 时，炉渣与水泥熟料的比值越小，炉渣胶凝材料充填体强度越高。这是由于水泥中的 C<sub>3</sub>S 和 C<sub>3</sub>A 含量较高，水化速率较快，所以水泥含量越高，早期强度越大；龄期 7 d 和 14 d 时，随着水泥熟料占比减少，炉渣胶凝材料充填体强度先增大后减少，当炉渣与水泥熟料比值为 2 时，炉渣胶凝材料充填体强度达到较大值，当炉渣与水泥熟料添加比例为炉渣：水泥熟料=2~4 时，炉渣的活性能够完全被激发出来，炉渣胶凝材料强度效果较好。这是由于相较于水泥，炉渣作为一种低活性掺合料，其活性在掺量较低时能完全发挥出来。此时水泥水化能产生足够的 Ca(OH)<sub>2</sub>，能与炉渣中的活性 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 产生反应，生成无定形的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶。所以一定范围内随着水泥熟料占比

表 5 炉渣胶凝材料配比实验结果  
Table 5 Ratio test results of slag cementitious materials

组号	炉渣:水泥熟料	炉渣/%	水泥熟料/%	单轴抗压强度/MPa		
				3 d	7 d	14 d
1	1:4	20	80	0.673	1.131	1.732
2	1:2	33	67	0.490	1.142	1.750
3	1:1	50	50	0.320	1.165	2.269
4	2:1	67	33	0.297	1.238	2.809
5	4:1	80	20	0.283	1.052	2.640
6	水泥			0.539	1.022	1.580

的减少，炉渣掺量的增加，充填体强度逐渐增大。但炉渣掺量过高，水泥熟料占比过低时，水泥无法提供足够的 Ca(OH)<sub>2</sub>，反而造成水化反应程度的降低，无定形的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶生成量减少，使得充填体强度有所降低。

### 3 炉渣胶凝材料充填体特性研究

#### 3.1 实验方案

在炉渣胶凝材料配比实验基础上，开展炉渣胶凝材料充填体特性研究，开展炉渣胶凝材料充填体强度配比实验、充填料浆泌水率实验和充填料浆凝结特性实验，具体方案如下：

(1) 炉渣胶凝材料充填体强度配比实验：根据炉渣胶凝材料配比实验结果，采用全面实验法设计 4 种炉渣胶凝材料配比，设计胶砂比为 1:6、1:8、1:10、1:12，料浆浓度为 68%、70% 和 72%，并以矿山自用水泥和炉渣胶凝材料对比分析，研究充填体 3 d，7 d，28 d 的单轴抗压强度。

(2) 充填料浆泌水率实验：充填料浆泌水率实验以炉渣胶凝材料 2（炉渣占 75%，水泥熟料占 25%）作为实验对象，胶砂比选择 1:6、1:8、1:10、1:12 和 1:16，料浆浓度为 68%、70% 和 72%，研究不同浓度、不同胶砂对充填料浆泌水率的影响。泌水率根据 GB/T 50080-2016《普通混凝土拌合物性能实验方法标准》测定。

(3) 充填料浆凝结特性实验：选择炉渣胶凝材料 2（炉渣占 75%，水泥熟料占 25%）为胶凝材料，胶砂比选择 1:6、1:8、1:10 和 1:12，料浆浓度为 72%、70% 和 68%。凝结时间根据 GB/T 1346-2019《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》测定。

#### 3.2 实验结果及分析

1、通过炉渣胶凝材料充填体强度配比实验，得到不同胶砂比、不同浓度的 4 种胶凝材料各龄期充填体强度实验结果见表 6~10，变化规律见图 2~4。

(1) 龄期 3 d 时，胶砂比和浓度相同条件下水泥充填体 3 d 强度均比炉渣胶凝材料充填体 3 d 强度高。说明水泥中的 C<sub>3</sub>S 和 C<sub>3</sub>A 水化速率较快，充填体前期的水化效果更加明显，生成大量的水化产物 C-S-H 和 C-A-H，水泥充填体的强度增加更快，而炉渣的活性还处于低激发状态，水

表 6 炉渣胶凝材料 1 充填体强度配比实验  
Table 6 Strength ratio test of slag cementitious material 1 filling body

组号	胶砂比	浓度/%	炉渣/%	水泥熟料/%	单轴抗压强度/MPa		
					3 d	7 d	28 d
1	1:6	72	80	20	0.67	1.64	4.15
2	1:6	70	80	20	0.52	1.52	3.85
3	1:6	68	80	20	0.43	1.13	3.31
4	1:8	72	80	20	0.38	1.21	3.05
5	1:8	70	80	20	0.32	1.03	2.43
6	1:8	68	80	20	0.27	0.79	2.01
7	1:10	72	80	20	0.32	0.76	2.40
8	1:10	70	80	20	0.24	0.67	1.81
9	1:10	68	80	20	0.21	0.58	1.58
10	1:12	72	80	20	0.31	0.71	2.08
11	1:12	70	80	20	0.23	0.65	1.73
12	1:12	68	80	20	0.20	0.56	1.34

表 7 炉渣胶凝材料 2 充填体强度配比实验  
Table 7 Strength ratio test of slag cementitious material 2 filling body

组号	胶砂比	浓度/%	炉渣/%	水泥熟料/%	单轴抗压强度/MPa		
					3 d	7 d	28 d
13	1:6	72	75	25	0.70	1.73	4.39
14	1:6	70	75	25	0.51	1.58	3.51
15	1:6	68	75	25	0.42	1.22	3.14
16	1:8	72	75	25	0.37	1.22	3.14
17	1:8	70	75	25	0.32	1.07	2.41
18	1:8	68	75	25	0.27	0.82	1.98
19	1:10	72	75	25	0.31	0.84	2.92
20	1:10	70	75	25	0.27	0.67	2.12
21	1:10	68	75	25	0.22	0.57	1.79
22	1:12	72	75	25	0.28	0.77	2.10
23	1:12	70	75	25	0.26	0.61	2.01
24	1:12	68	75	25	0.21	0.53	1.57

表 8 炉渣胶凝材料 3 充填体强度配比实验  
Table 8 Strength ratio test of slag cementitious material 3 filling body

组号	胶砂比	浓度/%	炉渣/%	水泥熟料/%	单轴抗压强度/MPa		
					3 d	7 d	28 d
25	1:6	72	70	30	0.60	1.59	3.77
26	1:6	70	70	30	0.48	1.40	3.61
27	1:6	68	70	30	0.38	1.12	3.33
28	1:8	72	70	30	0.36	1.12	3.09
29	1:8	70	70	30	0.29	0.94	2.20
30	1:8	68	70	30	0.24	0.73	1.78
31	1:10	72	70	30	0.33	0.80	2.69
32	1:10	70	70	30	0.26	0.66	1.94
33	1:10	68	70	30	0.22	0.56	1.66
34	1:12	72	70	30	0.25	0.66	2.02
35	1:12	70	70	30	0.23	0.59	1.57
36	1:12	68	70	30	0.19	0.51	1.33

表 9 炉渣胶凝材料 4 充填体强度配比实验  
Table 9 Strength ratio test of slag cementitious material 4 filling body

组号	胶砂比	浓度/%	炉渣/%	水泥熟料/%	单轴抗压强度/MPa		
					3 d	7 d	28 d
37	1:6	72	65	35	0.66	1.62	4.05
38	1:6	70	65	35	0.56	1.43	3.61
39	1:6	68	65	35	0.47	1.08	3.01
40	1:8	72	65	35	0.36	1.08	3.05
41	1:8	70	65	35	0.31	0.92	2.41
42	1:8	68	65	35	0.26	0.68	1.99
43	1:10	72	65	35	0.31	0.82	2.75
44	1:10	70	65	35	0.30	0.63	2.37
45	1:10	68	65	35	0.23	0.54	1.89
46	1:12	72	65	35	0.25	0.69	1.90
47	1:12	70	65	35	0.23	0.53	1.62
48	1:12	68	65	35	0.21	0.48	1.43

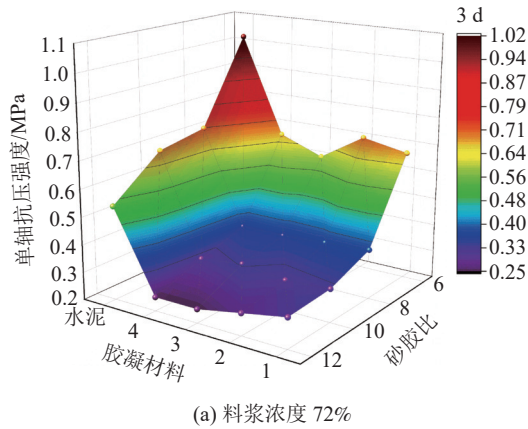
表 10 水泥胶凝材料充填体强度配比实验  
Table 10 Strength ratio test of cement cementitious material filling body

组号	胶砂比	浓度/%	单轴抗压强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d
49	1:6	72	1.02	1.65	2.65
50	1:6	70	0.89	1.47	2.32
51	1:6	68	0.67	1.12	2.01
52	1:8	72	0.71	1.28	1.68
53	1:8	70	0.54	1.06	1.46
54	1:8	68	0.48	0.83	1.06
55	1:10	72	0.68	0.87	1.31
56	1:10	70	0.49	0.75	1.15
57	1:10	68	0.41	0.67	0.86
58	1:12	72	0.54	0.66	0.94
59	1:12	70	0.44	0.57	0.76
60	1:12	68	0.37	0.49	0.65

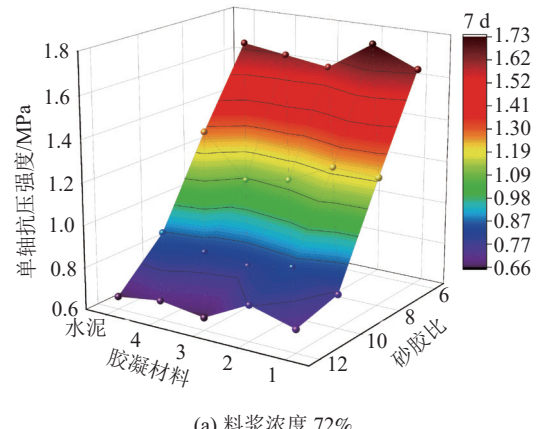
化效果不够明显，水化产物较少，宏观表现出抗压强度较低，但水泥充填与炉渣胶凝充填的本质是类似的都是通过水化反应提高充填体强度。

(2) 龄期 7 d 时，胶砂比和浓度相同条件下水泥充填体的 7 d 强度与炉渣胶凝材料充填体 7 d 强度相近，充填体的强度差维持在 0.16 MPa 以内。这是因为随着龄期的增加，炉渣的活性不断被激发，水化反应速度增加，其充填体生成大量的水化产物快速提升强度。

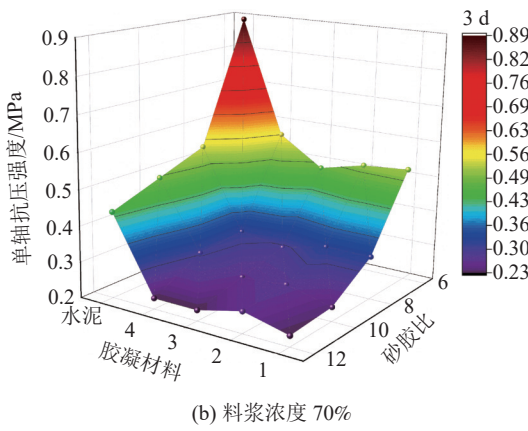
(3) 龄期 28 d 时，胶砂比和浓度相同条件下炉渣胶凝材料充填体 28 d 强度明显高于水泥充填



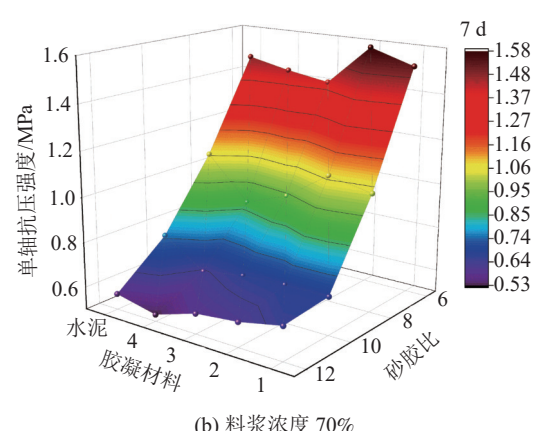
(a) 料浆浓度 72%



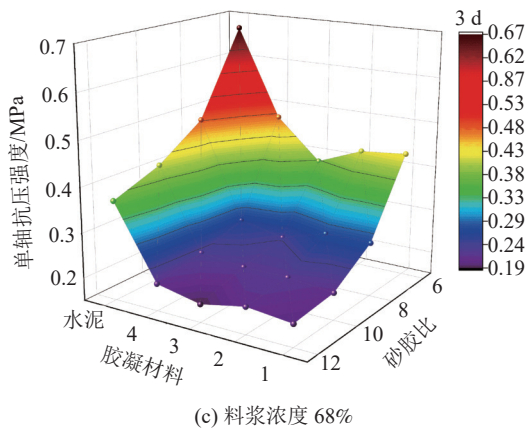
(a) 料浆浓度 72%



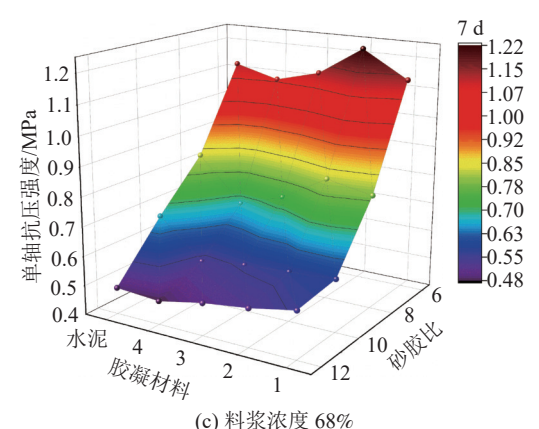
(b) 料浆浓度 70%



(b) 料浆浓度 70%



(c) 料浆浓度 68%



(c) 料浆浓度 68%

图2 不同胶凝材料不同胶砂比不同料浆浓度充填体 3 d 强度

Fig.2 3 d strength of backfill with different cementitious materials, different cementitious ratios and slurry concentrations

图3 不同胶凝材料不同胶砂比不同料浆浓度充填体 7 d 强度

Fig.3 7 d strength of backfill with different cementitious materials, different cementitious ratios and slurry concentrations

体 28 d 强度，炉渣胶凝材料充填体强度是水泥充填体强度的 1.5~2.6 倍。说明龄期 28 d 时，炉渣胶凝材料活性被完全激发，水化速度加快，其充填体水化反应产生大量胶凝产物，强度显著增加。这是因为炉渣在与水泥熟料充分混合后，水泥水化产物自身有一定的强度，加之水泥为炉渣提供碱性环境，促进了炉渣的进一步水化，水化

产物大量增加，强度随之增大。而水泥充填体的水化反应产物不及炉渣胶凝材料充填体，因而炉渣胶凝材料的充填体强度提升更显著。通过实验发现水泥充填体强度不能完全满足矿山采矿方法要求的充填体强度 0.5~3.5 MPa，而炉渣胶凝材料充填体强度能完全满足。

(4) 相同胶砂比时，料浆浓度从 68% 增加

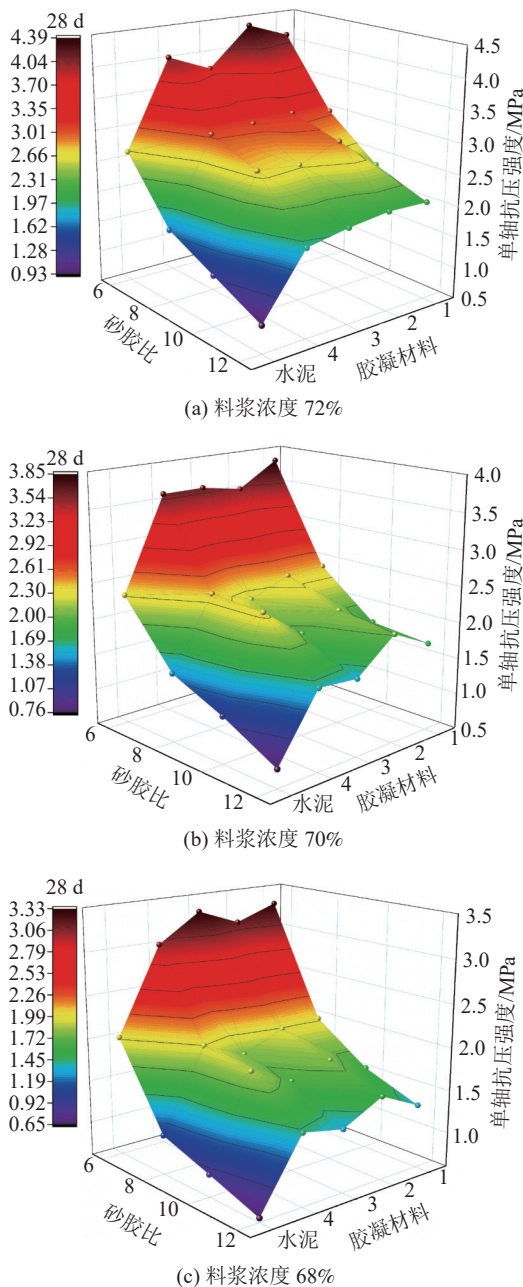


图 4 不同胶凝材料不同胶砂比不同料浆浓度充填体 28 d 强度

Fig.4 28 d strength of backfill with different cementitious materials, different cementitious ratios and slurry concentrations

到 72%，炉渣胶凝材料充填体强度逐渐增加。这是由于充填体的强度既取决于胶凝材料水化产物的强度，又取决于充填体内部的孔隙率。料浆浓度逐渐增加，充填体含水率相对越低，充填体因内部自由水蒸发而产生的孔隙越少，因此，强度逐渐增加。相同料浆浓度时，随着胶砂比从 1:12 增加到 1:6，炉渣胶凝材料充填体强度逐渐

增加。这是由于胶砂比越大，胶凝材料越多，生成的 C-S-H 和 C-A-H 等水化产物越多，因此，强度逐渐增大。龄期为 3 d 时，同胶砂比、同浓度条件下，4 种炉渣胶凝材料充填体强度相似，无明显差别。龄期为 7 d 和 28 d 时，相同胶砂比，炉渣胶凝材料 1 和 2 充填体强度总体较优，且能够满足矿山对充填体强度 0.5~3.5 MPa 要求。因此，矿山配比炉渣胶凝材料时，炉渣添加量区间为 75%~80%，水泥熟料添加量区间为 20%~25%，达到矿山对充填体质量要求。

2. 由图 5 胶砂比与泌水率的关系可知，相同胶砂比时，随着充填料浆浓度的减小，充填料浆泌水率逐渐增大；相同料浆浓度时，随着胶砂比的减小，充填料浆泌水率逐渐增大，因为全尾砂掺量的增加，使料浆颗粒之间的孔隙逐渐增加，且全尾砂颗粒的保水能力差，料浆的泌水率也相应增加。因此，在保证充填料浆顺利输送的前提下，提高充填料浆浓度，减小泌水率，防止充填体离析和液化。充填料浆质量浓度为 70%~72% 时，不同胶砂比的充填料浆泌水率均小于 5%，满足相关泌水率标准，表明全尾砂充填料浆的质量浓度合理，泌水率小，有利于矿山井下充填体整体质量和采空区充填接顶。

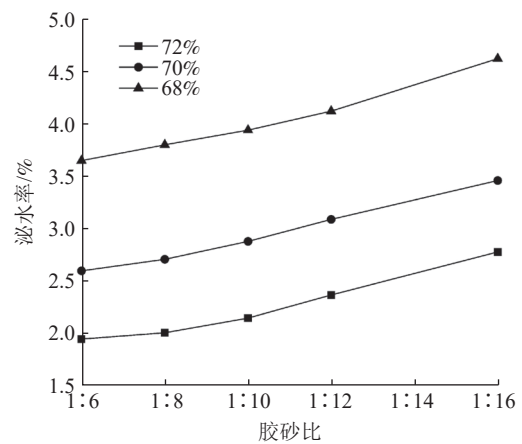


图 5 胶砂比与泌水率的关系

Fig.5 Relationship between cement-sand ratio and bleeding rate

3. 由表 11 充填料浆凝结时间可知，胶砂比同时，随着料浆浓度的增加，凝结速度加快；以胶砂比 1:6 为例，浓度从 68% 增加到 72%，初凝时间加快了 10.0%，终凝时间加快了 4.5%。浓度相同时，随着胶砂比的增加，料浆凝结速度也逐渐加快；以浓度 70% 为例，胶砂比从 1:12 增加

到 1:6, 初凝时间加快了 38.5%, 终凝时间加快了 27.1%。通过比较初终凝时间差可知, 同胶砂比, 不同浓度充填料浆的初终凝时间差较大值为 2 h; 同浓度, 不同胶砂比充填料浆的初终凝时间差较大值为 3.75 h; 图 6 给出了不同浓度充填料浆随胶砂比降低的凝结时间变化规律, 可以看出随着胶砂比降低, 凝结时间近似呈线性增加, 且相同胶砂比条件下, 不同浓度充填料浆凝结时间差距不大。由此可得胶砂比对充填料浆凝结性能的影响比料浆浓度大, 当实际工况需要缩短充填体凝结时间时, 可以适当提高胶砂比。

表 11 充填料浆凝结时间  
Table 11 Setting time of filing slurry

编号	胶砂比	浓度/%	初凝 时间点/h	终凝 时间点/h	初终凝 时间差/h
1		72	11.25	31.50	20.25
2	1:6	70	12.00	32.25	20.25
3		68	12.50	33.00	20.25
4		72	13.75	34.25	20.25
5	1:8	70	14.25	35.75	21.50
6		68	15.00	37.25	22.25
7		72	16.00	39.25	23.25
8	1:10	70	16.50	40.50	24.00
9		68	17.50	42.00	24.50
10		72	18.75	43.25	24.50
11	1:12	70	19.50	44.25	24.75
12		68	20.50	45.50	25.00

## 4 结 论

(1) 由全面实验法探究了 4 种炉渣胶凝材料充填体强度。龄期 3 d 时, 胶砂比和浓度相同条件下水泥充填体强度比 4 种炉渣胶凝材料充填体强度高; 龄期 7 d 时, 强度相近; 龄期 28 d 时, 情况相反, 且水泥充填体强度不能完全满足矿山充填质量要求。同胶砂比时, 炉渣胶凝材料 1 和 2 的充填体强度总体较优, 且能够满足矿山对充填体强度 0.5~3.5 MPa 的充填质量要求。

(2) 由充填料浆泌水率实验, 相同胶砂比时, 随着充填料浆浓度减小, 泌水率增大; 相同料浆浓度时, 随着胶砂比减小, 泌水率增大。浓度为 70%~72%, 胶砂比为 1:6~1:12 的充填料浆泌水率均小于 5%, 有利于矿山井下充填体整体质量和空区充填接顶。

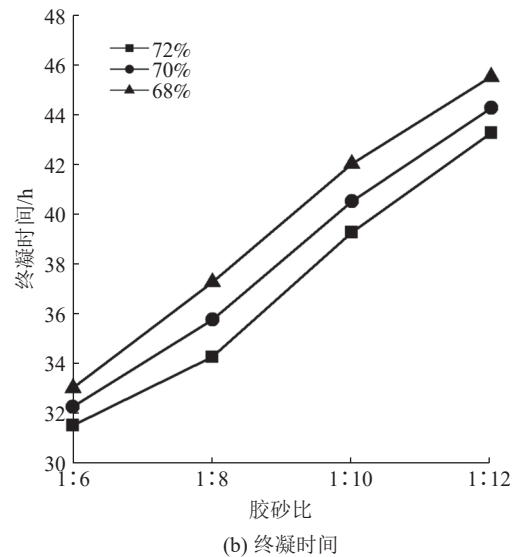
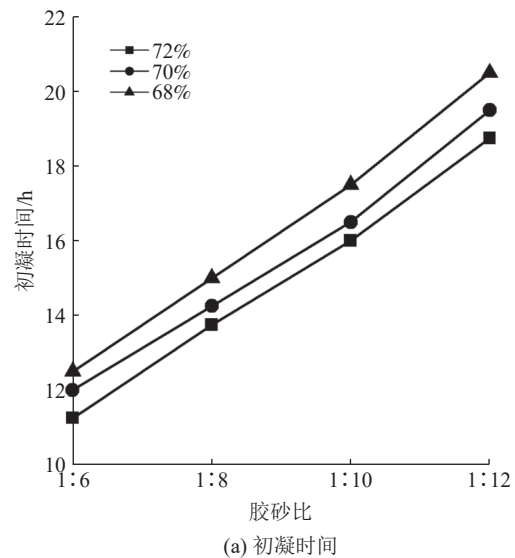


图 6 胶砂比与凝结时间的关系

Fig.6 Relationship between cement-sand ratio and setting time

(3) 通过比较初终凝时间差可知, 胶砂比对料浆凝结性能的影响比料浆浓度大, 矿山在实际生产中可以适当提高胶砂比缩短充填料浆的凝结时间。

## 参考文献:

[1] 张国胜, 高谦, 郭斌, 等. 全尾砂胶凝材料开发及泡沫砂浆充填试验研究[J]. *金属矿山*, 2020(12):74-80.  
ZHANG G S, GAO Q, GUO B, et al. Development of whole tailings cementitious material and experimental study on foam mortar filling[J]. *Metal Mine*, 2020(12):74-80.  
[2] 杨晓炳, 王永定, 高谦, 等. 利用脱硫灰渣和粉煤灰开发充填胶凝材料[J]. *矿产综合利用*, 2019(4):130-134.  
YANG X B, WANG Y D, GAO Q, et al. Research on a new

cementitious materials with desulphurization ash and fly ash[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(4):130-134.

[3] 胡敏, 彭丽, 郭娜, 等. 磷石膏-炭化污泥胶凝材料力学性能试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):196-201.

HU M, PENG L, GUO N, et al. Study on mechanical properties of phosphogypsum-carbonized sludge composite cementitious materials[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):196-201.

[4] 梁晓杰, 常钧, 吴昊泽. 钢渣粉粒度对复合胶凝材料水化性能的影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(3):180-186.

LIANG X J, CHANG J, WU H Z. Effect of particle size of steel slag powder on hydration performance of composite cementitious material[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):180-186.

[5] 何良玉, 谯理格, 赵日照, 等. 钢渣作胶凝材料和细集料制备高性能砂浆的研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):94-100.

HE L Y, JIAO L G, ZHAO R X, et al. Study on preparation of high performance mortar using steel slag as cementitious material and fine aggregate[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):94-100.

[6] 李夕兵, 刘冰. 硬岩矿山充填开采现状评述与探索[J]. *黄金科学技术*, 2018, 26(4): 492-502.

LI X B, LIU B. Review and exploration of current situation of backfill mining in hard rock mines[J]. *Gold Science and Technology*. 2018, 26(4): 492-502.

[7] 邢行, 杨仕教. 某铅锌矿超细全尾砂炼铅炉渣-水泥复合充填胶凝材料研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(7): 2232-2240.

XING X, YANG S J. Study on the composite filling

cementitious material for the lead smelting slag-cement with superfine full tailings in a lead zinc mine[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*. 2020, 39(7): 2232-2240.

[8] 李兵, 杨仕教, 王洪武, 等. 某冶炼厂炼铅炉渣制备胶凝材料的试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(3):583-588.

LI B, YANG S J, WANG H W, et al. Experimental research on producing cementing material using smelter's lead refinery slag[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 33(3):583-588.

[9] 杨超, 郭利杰, 李文臣. 铜镍冶炼渣新型充填胶凝材料制备及其力学性能研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(8): 50-54. YANG C, GUO L J, LI W C. Preparation of new cementitious backfill materials with copper and nickel smelting slag and its mechanical properties[J]. *Mining Research and Development*. 2020, 40(8): 50-54.

[10] 朱庚杰, 齐兆军, 寇云鹏, 等. 分级细尾砂胶结充填强度和料浆流变性能试验研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(4): 18-22.

ZHU G J, QI Z J, KOU Y P, et al. Experimental study on cemented backfill strength and slurry rheological properties of graded fine tailings[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*. 2020, 40(4): 18-22.

[11] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

LI G X. *Advanced Soil Mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House Co., Ltd. 2004.

[12] 陈杰, 梁杨芝, 王俊, 等. 高沙充填材料的输送性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 194-198.

CHEN J, LIANG Y Z, WANG J, et al. Research on transport characteristic of high sand content filling material[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*. 2020, 39(1): 194-198.

## Ratio Optimization of Slag Cementitious Material and the Properties of Filling Body

Ma Lin<sup>1</sup>, Gao Tianyu<sup>2</sup>

(1. Sichuan Metallurgical Design and Research Institute, Chengdu, Sichuan, China; 2. Western Mining Co., Ltd., Xining, Qinghai, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of ceramics and composites. To solve the problems of high-cost for cement cementitious material and low strength of cement filling body at the later stage in a lead-zinc mine, abundant slag solid waste resources were adopted and low-cost slag cementitious materials were developed in this paper to meet the quality requirement of mine fillings. After physical and chemical analysis of tailings, slag and cement clinker, the physical and chemical analysis of tailings, slag and cement clinker was carried out. Then, through the filler slurry slump test and the exploration test of the ratio of slag cementitious material, it is determined that the slurry concentration satisfying the fluidity is about 70%, and the ratio of slag to cement clinker is 2~4. The strength, bleeding rate and coagulation characteristics of filling body with different proportions of slag cementitious materials were investigated by comprehensive test. The results show that the ratio of slag cementitious material is 75%~80% slag and 20%~25% cement clinker, the filling body can meet the filling quality requirements of 0.5~3.5 MPa compressive strength and the filling slurry bleeding rate is less than 5%.

**Keywords:** Ceramics and composites; Backfilling mining method; Slag; Cementitious material; Whole tailings