

固废基充填胶凝材料配比优化与性能研究

尹韶宁,袁 鹏,潘 栋,汪 坤,孟 翔,吴佳炜

(建筑材料工业技术情报研究所,北京 100024)

摘要:为解决传统水泥成本高且对超细尾矿胶结效果欠佳的问题,针对陕西某钼矿尾矿充填需求,以钢渣、矿渣、脱硫石膏为主要原料,并复配性能调节剂,开发固废基充填胶凝材料。通过改变矿渣粉掺量和细度,开展固废基胶凝材料配方研究,并选取综合性能最优的配方进行充填体应用性能和胶凝材料水化产物微观形貌分析。结果表明:固废基充填胶凝材料最优配比为矿渣粉($407\text{ m}^2/\text{kg}$)60%、钢渣粉20%、脱硫石膏19.4%、性能调节剂0.6%。该配比下充填体各龄期抗压强度均优于P·O 42.5水泥组,28 d抗压强度最高可达水泥组2倍,且在胶砂比为1:7、1:15、1:16时,可分别满足不同充填区域的强度要求,同时具备良好的流动性和体积稳定性。充填体浸出毒性各项指标均低于GB 8978—1996限值,环境安全性良好,水化产物主要为针棒状钙矾石和纤维状C-S-H凝胶,两者交织形成致密结构。该研究开发的固废基充填胶凝材料实现了固体废弃物资源化利用,降低了充填成本,为矿山绿色高效充填提供了技术支撑。

关键词: 固废基充填胶凝材料; 钼矿尾矿; 力学性能; 应用性能; 微观形貌

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.011

中图分类号: TD853.34 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0087-07

随着矿山资源开采逐步向深部推进,且尾矿库容量日益逼近满库极限,充填采矿法已成为当前采矿领域应用广泛、效率显著的主流方法^[1-5]。该方法通过向采空区充填材料,既能有效控制围岩变形、保障采矿作业安全,又能显著提升矿产资源回采率。在充填材料体系中,虽然水泥作为传统胶凝材料应用最为普遍,但在实际使用中也存在明显局限性:一是水泥成本高,导致充填成本偏高;二是水泥生产过程碳排放量大、能源消耗高,不符合绿色发展需求;三是对于含泥量较高的超细尾矿,水泥胶结效果欠佳,若要达到设计胶结强度,需增加胶凝材料用量,最终增加充填成本^[6-9]。因此,开发低成本、高性能的新型充填胶凝材料以替代传统水泥,已成为提升矿山采矿经济效益的关键路径^[10-13]。

近年来,众多研究团队利用各类工业固废开发低成本充填胶凝材料,开展了大量的研究。汤畅等^[14]利用精炼渣、矿渣、转炉钢渣、脱硫石膏协同制备低成本充填胶凝材料,每立方米充填材料成本降低53.76%;肖柏林等^[15]以钢渣、矿渣和氟石膏制备充填胶凝材料,充填体强度远超水泥组;刘浪等^[16]采用改性镁渣混合粉煤灰作为胶凝材料替代水泥制备了一种新型充填材料,该充填材料具有良

好的流动性能、力学性能和稳定的环境性能;温震江等^[17]利用镍渣开发新型胶凝材料替代水泥进行充填,充填体强度满足设计要求。

本研究结合陕西某钼矿的超细尾矿充填需要,基于现有研究成果,以周边地区钢渣、矿渣和脱硫石膏等为原料,开发固废基充填胶凝材料替代水泥,并结合采场充填体强度指标要求,确定技术上可行、经济上合理的充填料浆关键技术参数,旨在为该矿后期的充填作业提供全面的技术支撑。

1 试验

1.1 试验原料

1) 钼矿尾矿。钼矿尾矿来自陕西某钼矿企业,含水率为15%,75 μm 以下颗粒含量为77%,属于超细尾矿^[18],其化学成分和矿物组成见表1和表2。

尾矿骨料的粒径级配是影响充填效果的重要因素之一。钼矿尾矿粒径级配组成采用激光粒度仪进行测试,结果见图1和表3。

该尾矿特征粒径 D_{10} 、 D_{30} 、 D_{60} 和 D_{90} 分别为6.641、21.914、64.781、137.267 μm ,不均匀系数 C_u 为9.75,曲率系数 C_c 为1.12。属于土力学规范中 C_u 大于5、

收稿日期: 2025-12-17; 修订日期: 2026-03-27

作者简介: 尹韶宁(1994—),男,湖南攸县人,工程师,研究方向:大宗工业固废资源化研究,E-mail: ysn2026@126.com;通信作者: 汪坤,高级工程师,E-mail: Sirwangkun@126.com

表1 尾矿化学成分

Table 1 Chemical composition of tailings (%)							
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
质量分数	39.02	6.16	15.61	1.49	6.12	0.21	4.37
成分	TiO ₂	BaO	SrO	MnO	SO ₃	LOSS	
质量分数	0.67	2.68	2.38	0.82	8.00	11.85	

表2 尾矿物相组成

Table 2 Mineral composition of tailings (% , mass fraction)					
序号	物相名称	测试结果	序号	物相名称	测试结果
1	石英	13 ± 2	6	钾长石	15 ± 2
2	方解石	24 ± 2	7	钠长石	1 ± 0.5
3	金云母	18 ± 2	8	高岭石	2 ± 1
4	羟铁云母		9	非晶相物质	22 ± 2
5	黄铁矿	5 ± 1			

注：金云母和羟铁云母总和为(18 ± 2)%。

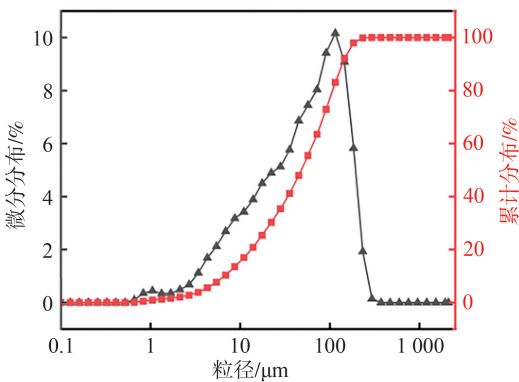


图1 尾矿粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of tailings

表3 尾矿粒径级配

Table 3 Particle size gradation of tailings						
项目	D ₁₀ /μm	D ₃₀ /μm	D ₆₀ /μm	D ₉₀ /μm	C _u	C _c
结果	6.641	21.914	64.781	137.267	9.75	1.12

注： $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ ， $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$ 。

C_c介于1~3之间的级配良好骨料。

2) 固废基充填胶凝材料。固废基充填胶凝材料由钢渣、矿渣、脱硫石膏、性能调节剂等原料组成。矿渣和钢渣来自陕西龙门钢铁有限责任公司。将矿渣以105℃烘干，并采用Φ500 mm×500 mm球磨机进行粉磨加工，得到比表面积为407 m²/kg和534 m²/kg的矿渣粉。将钢渣用颚式破碎机破碎到5 mm以下，以105℃烘干，并采用Φ500 mm×500 mm球磨机进行粉磨加工，去除难磨相，得到比

表面积为398 m²/kg钢渣粉。脱硫石膏来自陕西正元秦电环保产业有限公司，二水石膏含量为88.9%，以45℃烘干待用。性能调节剂由50%石灰、40%硫酸钠、10%甲基纤维素复合组成，起到激发固废基充填胶凝材料早期活性，增加充填材料稠度及减少泌水的作用。

按照相应的国家标准对矿渣粉和钢渣粉进行活性指数检测，结果见表4。比表面积为407 m²/kg的矿渣粉7 d和28 d活性指数远高于GB/T 18046—2017中S95矿粉的要求，28 d活性指数能达到S105矿粉的要求。比表面积为534 m²/kg的矿渣粉7 d和28 d活性指数均远高于GB/T 18046—2017中S105矿粉的要求。钢渣粉活性满足GB/T 20491—2017中Ⅱ级钢渣粉的要求。该检测结果可为固废基充填胶凝材料配方开发提供指导。

表4 活性检测结果

Table 4 Activity test results			
原材料	比表面积/(m ² /kg)	7 d活性指数/%	28 d活性指数/%
矿渣粉	407	93	114
	534	105	126
钢渣粉	398	63	70

1.2 试验方法

1) 样品制备。按照设定配比计算并称取所需各材料用量，然后倒入胶砂搅拌机中进行搅拌，得到充填材料料浆，随后将料浆倒入内壁涂好润滑油的70.7 mm立方体三联试模中。为避免因充填材料沉缩造成的试块高度不足70.7 mm，在试模上方放置浮模，料浆浇注至浮模上沿。用塑料袋将浇满料浆的试模密封，在温度为20℃和相对湿度为(90 ± 5)%的环境下养护24~48 h，然后取下浮模，刮平后带模继续养护至3、7、14、28 d后进行强度测试。

2) 抗压强度、扩展度、沉缩率测试。参照JC/T 2478—2018《矿山采空区充填用尾砂混凝土》中规定的方法，测试硬化充填体各个龄期的抗压强度以及新拌料浆的扩展度和沉缩率。

3) 充填体毒性浸出测试。按照《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》(HJ 557—2010)制备充填体浸出液，按照《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)规定的测定方法检测总汞、烷基汞、

总镉、总铬、六价铬、总砷、总铅、总镍、苯并芘、总铍、总银、总α放射性、总β放射性、总铜、总锌、氟化物、总锰、硫化物、总氰化物，并进行判定。

4) 微观形貌分析。选取合适的固废基胶凝材料配比制备净浆试块，水胶比为0.4，标准养护28 d，取块状样品用无水乙醇终止水化，烘干后使用飞纳Phenom XL G2型号台式扫描电镜进行水化产物微观形貌分析。

1.3 试验内容

经过大量前期试配，结合实际工程对充填材料流动性及强度的要求，确定试验基础配比的充填浓度为65%，胶砂比为1:4。根据固废基充填胶凝材料的开发经验，矿渣粉的掺量和细度对固废基充填胶凝材料的水化过程和力学性能都有重要影响。为此，以P·O 42.5水泥作为基准组，分别将407、534 m²/kg两种细度矿渣粉掺量设为50%、55%、60%、65%和70%，进行对比试验，详见表5。在此基础上，综合考虑充填材料抗压强度和原料成本，选择合适的配比进行应用试验研究，包括不同胶砂比下充填材料的抗压强度、扩展度和沉缩率，并对硬化充填体的浸出毒性及固废基胶凝材料水化产物的微观形貌进行分析。

2 结果与讨论

2.1 充填体抗压强度

按照各固废基充填胶凝材料配制的充填体经3、7、14和28 d养护后的抗压强度试验结果如图2所示。P·O 42.5水泥配制的充填体经3、7、14和28 d

表5 固废基充填胶凝材料配合比

Table 5 Mix component of solid-waste-based cementitious filling material (%)

编号	407 m ² /kg 矿渣粉	534 m ² /kg 矿渣粉	钢渣粉	石膏	性能 调节剂
A0	P·O 42.5水泥				
A1	50	—	30	19.50	0.50
A2	55	—	25	19.45	0.55
A3	60	—	20	19.40	0.60
A4	65	—	15	19.35	0.65
A5	70	—	10	19.30	0.70
A6	—	50	30	19.50	0.50
A7	—	55	25	19.45	0.55
A8	—	60	20	19.40	0.60
A9	—	65	15	19.35	0.65
A10	—	70	10	19.30	0.70

养护后抗压强度分别为2.4、3.8、4.5和5.4 MPa，固废基充填胶凝材料所配制的充填体各龄期抗压强度相较于P·O 42.5水泥均有所提升，尤其是7、14和28 d龄期的强度提升更为显著，最高强度可达水泥组的2倍。由此可见，固废基充填胶凝材料更适用于该尾砂充填场景。

随着矿渣粉掺量增加，两种细度矿渣粉所配制充填体的抗压强度的变化规律一致，即3 d和7 d龄期抗压强度先增加后降低，14 d和28 d龄期抗压强度则持续上升。综合分析早期和后期强度可知，矿渣粉掺量为60%时最优。提高矿渣粉的细度有助于提高充填体3 d和7 d的抗压强度，在相同的配比条件下，3 d和7 d龄期抗压强度最高分别提高2.2 MPa

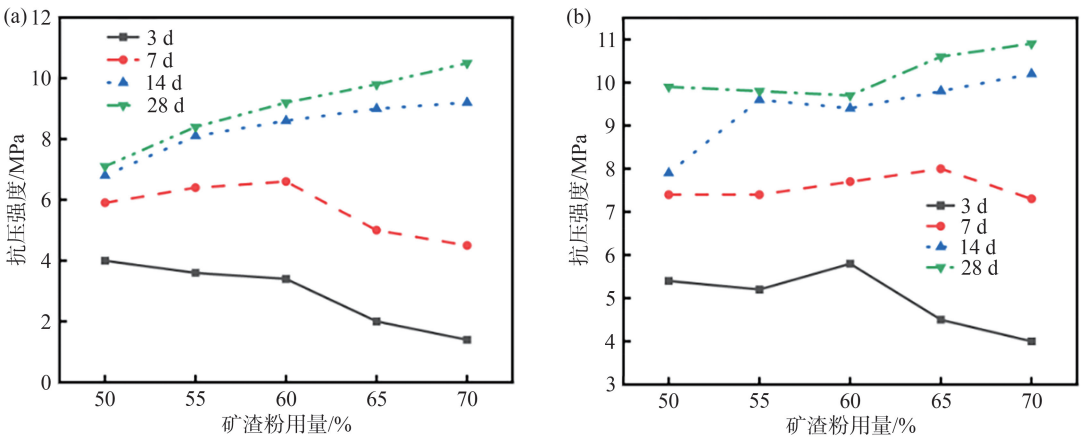


图2 充填体抗压强度：(a) 407 m²/kg矿渣粉；(b) 534 m²/kg矿渣粉

Fig. 2 Compressive strength of filling mass produced with different slag powders: (a) 407 m²/kg; (b) 534 m²/kg

和2.8 MPa。而14 d和28 d龄期抗压强度受细度影响较小,提升幅度明显降低。综合来看,固废基充填胶凝材料最佳配比为:矿渣粉(407 m²/kg)60%,钢渣粉20%,脱硫石膏19.4%,性能调节剂0.6%。

充填体抗压强度的高低与胶凝材料水化产物的数量和种类密切相关。对于固废基充填胶凝材料来说,其水化反应的核心驱动力源于矿渣粉、钢渣粉和脱硫石膏的协同作用。矿渣粉玻璃体结构在OH⁻离子环境下不断分解,为水化产物形成提供基础,生成的水化产物填充于颗粒间隙及原先自由水占据的空间,使充填体形成致密结构,最终在宏观上表现出良好的力学强度。从矿渣粉掺量的影响来看,在矿渣粉掺量为60%时,各组分的协同作用达到最优,能形成足量的水化产物,此时3 d和7 d龄期充填体抗压强度达到最高值。继续提高矿渣粉的掺量,钢渣粉的占比会低于15%,此时过量的矿渣粉因缺乏足够钢渣粉提供碱性激发环境难以发生充分的水化反应,导致水化产物生成量减少。而当矿渣粉掺量过低时,钢渣粉占比则相对过高,各组分的协同平衡被打破,同样会导致水化产物生成量不足,进而影响充填体强度。

2.2 固废基充填胶凝材料应用性能

根据采矿工艺要求:矿房及矿柱底部充填体占总充填量的15%,强度需要达到4~5 MPa;矿房其他部分及矿柱胶面充填体占总充填量的80%,强度需要达到1.5~2 MPa;矿柱其他部分充填体占总充填量的5%,强度需要达到0.5 MPa。因此,综合考虑充填材料抗压强度和原料成本,采用优选配方A3进行胶结充填应用试验,胶砂比分别为1:6、1:7、1:7.5、1:8、1:10、1:12、1:14、1:15、1:16和1:18,料浆浓度为65%。测试不同胶砂比情况下充填材料3、7、14和28 d龄期的抗压强度,测试结果见表6。

不同砂胶比情况下充填材料的抗压强度试验结果如图3所示,由图可知,在料浆浓度为65%时,满足矿房及矿柱底部充填体强度4~5 MPa要求的胶砂比为1:7,满足矿房其他部分及矿柱胶面充填体强度1.5~2 MPa要求的胶砂比约为1:15,满足矿柱其他部分充填体强度0.5 MPa要求的胶砂比为1:16。

同时,针对胶砂比为1:7、1:15和1:16的充填

表6 不同胶砂比充填材料抗压强度
Table 6 Compressive strength of filling materials with different cement-sand ratios

编号	胶砂比	抗压强度/MPa			
		3 d	7 d	14 d	28 d
B1	1:6	2.4	3.1	4.4	5.7
B2	1:7	1.8	2.7	3.7	4.5
B3	1:7.5	1.5	2.2	2.9	3.7
B4	1:8	1.2	1.6	2.6	3.3
B5	1:10	—	—	2.0	2.6
B6	1:12	—	—	1.7	2.4
B7	1:14	—	—	1.0	1.7
B8	1:15	—	—	0.9	1.6
B9	1:16	—	—	0.1	0.5
B10	1:18	—	—	—	0.2

注:“—”代表无强度。

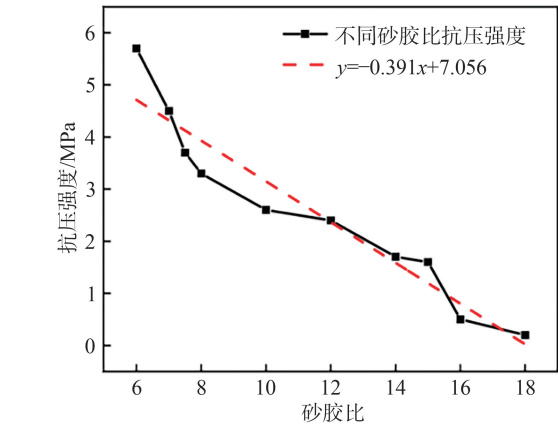


图3 不同砂胶比充填材料抗压强度
Fig. 3 Compressive strength of filling materials with different sand-cement ratios

材料,测试了扩展度(胶砂比1:7扩展度见图4)和沉缩率,结果见表7。根据JC/T 2478—2018《矿山采空区充填用尾砂混凝土》中扩展度和沉缩率等级分类,所测得扩展度和沉缩率等级分别为F2和S2,表明所测充填材料具备较好的流动性和较小的体积收缩率。

2.3 浸出毒性试验结果

固废基充填胶凝材料主要通过物理包裹、化学键合及沉淀反应,固化与稳定化尾矿中的重金属^[19],对铅、铜、锌、镉、砷等重金属具有较好的固化效果^[20-25]。为保证固废基充填胶凝材料使用时的环境安全性,仍需对其可能浸出的重金属含量进行测试。选用28 d龄期的胶砂比1:7的充填体试块进

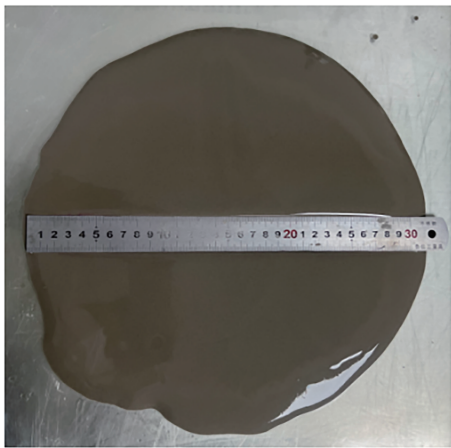


图4 1:7胶砂比充填材料扩展度

Fig. 4 Expansion degree of filling material with a cement-sand ratio of 1:7

表7 不同胶砂比充填材料性能

Table 7 Performance of filling materials with different cement-sand ratios

胶砂比	扩展度/mm	沉缩情况		
		沉缩前质量/g	沉缩后质量/g	沉缩率/%
1:7	320	867.9	837.8	6.0
1:15	330	879.1	853.8	5.1
1:16	330	882.3	859.1	4.6

行试验。由试验结果(表8)可知,充填体的浸出重金属浓度和放射性均低于GB 8978—1996《污水综合排放标准》的限值要求。

2.4 水化产物微观形貌分析

由固废基充填胶凝材料28 d龄期的水化产物微观形貌电镜图片(图5)可知,水化产物中大量针棒

表8 充填体浸出毒性试验结果

Table 8 Results of leaching toxicity test of filling material

编号	检测项目	检测结果	GB 8978 限值
1	总汞/($\mu\text{g/L}$)	<0.04	50
2	烷基汞/($\mu\text{g/L}$)	未检出	不得检出
3	总镉/($\mu\text{g/L}$)	0.79	100
4	总铬($\mu\text{g/L}$)	86.7	1 500
5	六价铬/($\mu\text{g/L}$)	103	500
6	总砷/($\mu\text{g/L}$)	31.9	500
7	总铅/($\mu\text{g/L}$)	9.46	1 000
8	总镍/($\mu\text{g/L}$)	584	1 000
9	苯并芘/($\mu\text{g/L}$)	<0.004	0.03
10	总铍/($\mu\text{g/L}$)	<0.04	5
11	总银/($\mu\text{g/L}$)	0.05	500
12	总 α 放射性/(Bq/L)	0.06	1
13	总 β 放射性/(Bq/L)	0.068	10
14	总铜/($\mu\text{g/L}$)	432	500
15	总锌/($\mu\text{g/L}$)	112	2 000
16	总锰/($\mu\text{g/L}$)	624	2 000
17	氟化物/(mg/L)	0.192	10
18	硫化物/(mg/L)	<0.01	1.0
19	氰化物/(mg/L)	<0.001	0.5

状的钙矾石和纤维状的C-S-H凝胶,通过相互穿插,紧密搭接在颗粒之间和空隙中,最终交织形成了致密的结构。在充填材料中,由于水胶比较高,其内部有较多的自由水和孔隙结构,为钙矾石的生长提供了有利条件,可有效填充孔隙,且在钙矾石形成过程中,会以结晶水形式消耗部分自由水,这在一定程度上提高了充填料浆的固体浓度^[10],进而显著提高充填体强度。

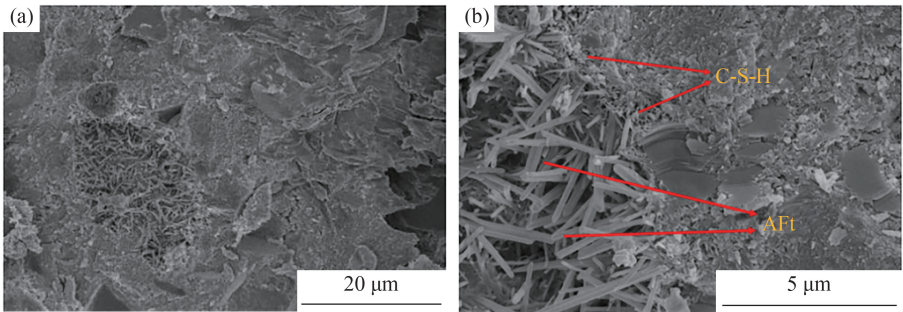


图5 固废基充填胶凝材料水化产物SEM图像:(a)放大倍数2 000 $\times$;(b)放大倍数10 000 $\times$

Fig. 5 SEM images of hydration products of solid-waste-based cementitious filling material: (a) 2 000 $\times$; (b) 10 000 $\times$

2.5 充填成本分析

充填胶凝材料费一般占充填成本的70%左右^[11, 14-15]。目前,尾矿胶结充填大多以水泥或胶固

粉作为充填胶凝材料。相较于水泥与胶固粉,固废基充填胶凝材料具有明显的成本优势。根据本研究对周边各种固废原料的价格调研和统计结果,固

废基胶凝材料的原料成本约为150元/吨,加上生产、人工、折旧、财务等成本,折合约270元/吨。P·O 42.5水泥和胶固粉终端价格约为350元/吨。若企业每年充填消纳约100万吨尾砂,按照使用水泥时平均胶砂比1:8,使用固废基充填胶凝材料平均胶砂比1:12计算,每年可节省充填成本超过2 000万元。

3 结 论

1)矿渣粉掺量和细度对充填体强度影响显著,矿渣粉掺量为60%时,早期和后期综合强度最优;提高矿渣粉细度可显著提升充填体早期抗压强度,但对后期强度影响较小。

2)基于最优配比:矿渣粉(407 m²/kg)60%、钢渣粉20%、脱硫石膏19.4%、性能调节剂0.6%,胶砂比1:7、1:15和1:16时,可分别满足矿山不同部位充填强度要求。充填体浸出液各项检测指标均低于GB 8978—1996《污水综合排放标准》限值,并可通过物理包裹、化学键合及沉淀作用实现对重金属的有效固化,环境安全性良好。

3)固废基充填胶凝材料28 d龄期水化产物主要为针棒状钙矾石和纤维状C-S-H凝胶,两者相互穿插搭接形成致密结构,是充填体具备优良力学性能的核心原因。

4)与P·O 42.5水泥相比,固废基充填胶凝材料具备明显的性能和成本优势。按现有条件核算,每年可为本研究所指企业节省充填成本约2 000万元。

参考文献:

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 陈鑫政, 郭利杰. 金属矿山充填技术工程实践与发展趋势[J]. 铜业工程, 2024(4): 130-141.
- [3] 杨宝贵, 杨海刚. 煤矿高浓度胶结充填体能量演化特征试验研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(3): 304-312.
- [4] Xue G L, Yilmaz E, Wang Y D. Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(8): 1455-1473.
- [5] 李猛, 刘硕, 胡国辉, 等. 微生物改性煤基固废充填材料性能及胶结机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 937-948.
- [6] 张振平, 刘经民, 陈智宏, 等. 某矿细粒级全尾砂充填材料性能研究及配比优化[J]. 铜业工程, 2024(5): 139-145.
- [7] 槐衍森. 矿山充填胶凝材料发展现状与方向[J]. 煤炭与化工, 2016, 39(2): 88-90.
- [8] Tariq A, Yanful E K. A review of binders used in cemented paste tailings for underground and surface disposal practices[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 131: 138-149.
- [9] Xu W B, Li Q L, Liu B. Coupled effect of curing temperature and age on compressive behavior, microstructure and ultrasonic properties of cemented tailings backfill[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117738.
- [10] 朱庚杰, 朱万成, 齐兆军, 等. 固废基充填胶凝材料配比分步优化及其水化胶结机理[J]. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1304-1315.
- [11] 温震江. 钢渣协同矿渣制备超细尾砂充填胶结料及应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [12] 刘浪, 袁毅, 王海社, 等. 镁-煤基全固废充填材料的强度特性及微结构演化研究[J]. 材料导报, 2026, 40(2): 108-118.
- [13] 巫侯琴, 王海涛, 田佳, 等. 锂辉石尾矿-冶炼渣充填材料制备与性能调控[J]. 中国有色金属学报, 2026, 36(1): 315-327.
- [14] 汤畅. 含精炼渣全固废胶凝材料协同超细尾砂制备胶结充填材料[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [15] 肖柏林. 钢渣矿渣制备胶结剂及其在全尾砂胶结充填的应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [16] 刘浪, 阮仕山, 方治余, 等. 镁渣的改性及其在矿山充填领域的应用探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3833-3845.
- [17] 温震江, 高谦, 杨志强, 等. 金川镍渣充填胶凝材料力学性能与水化机理[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 1074-1083.
- [18] 涂光富, 杨晓炳, 任建辉, 等. 中关铁矿超细全尾砂固结粉充填胶凝材料试验研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(1): 39-42, 47.
- [19] 刘龙, 华绍广, 杨晓军, 等. 固废基胶凝材料固化稳定化某铜矿重金属尾矿试验[J]. 现代矿业, 2022, 38(9): 9-12.
- [20] 吴盾, 陆建伟, 李书钦. 铅锌尾矿固废基胶凝材料固

化土壤重金属试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(2): 26-33.

[21] 俞泽恩. 固废基胶凝材料固化铋砷研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2024.

[22] 崔孝炜, 邓惋心, 谢宇轩, 等. 全固废胶凝材料协同固铋的试验研究[J]. 非金属矿, 2021, 44(2): 87-91.

[23] 崔孝炜, 狄燕清, 冷欣燕, 等. 全固废胶凝材料固化铅的试验研究[J]. 非金属矿, 2018, 41(6): 101-103.

[24] 鄢琪慧, 倪文, 高巍, 等. 矿渣-钢渣基胶凝材料固砷机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1544-1550.

[25] 阎爱云, 倪文, 黄晓燕, 等. 矿渣-钢渣基胶结剂固化一稳定化含铅尾砂[J]. 金属矿山, 2016(8): 180-184.

Optimization of Mix Proportion and Performance Investigation of Solid-Waste-Based Cementitious Filling Materials

Yin Shaoning, Yuan Peng, Pan Dong, Wang Kun, Meng Xiang, Wu Jiawei
(Institute of Technical Information for Building Materials Industry, Beijing 100024, China)

Abstract: To address issues of high cost of traditional cement-based filling materials and poor bonding of ultra-fine tailings as a component, a solid-waste-based cementitious material was developed for the backfill of a molybdenum mine in Shaanxi Province. Steel slag, slag, and desulfurization gypsum were used as main raw materials, formulated with a performance modifier. The formulation of the solid-waste-based cementitious material was studied by varying the content and fineness of slag powder. The optimal formulation was selected to investigate application performance of backfill bodies and micromorphology of hydration products of the cementitious material. Results showed that the optimal formula of the solid-waste-based cementitious filling material was 60% slag powder (407 m²/kg), 20% steel slag powder, 20% desulfurization gypsum, and 0.6% performance regulator. Under this ratio, compressive strength of backfill bodies at all curing ages was superior to that of P•O 42.5 cement, with 28-day compressive strength reaching up to twice that of the cement group. Moreover, when cement-sand ratios were 1:7, 1:15, and 1:16, respectively, strength requirements of different backfill zones were satisfied. Meanwhile, the material exhibited excellent fluidity and volume stability. Leaching toxicity indexes of all backfill bodies were lower than the limits specified in GB 8978—1996, indicating favorable environmental safety. Main hydration products were acicular-rod ettringite and fibrous gel-like C-S-H gel, which were interwoven to form a dense structure. The solid-waste-based cementitious filling material developed in this study had potentials of realizing resource utilization of solid waste and reducing backfill costs, providing technical support for green and efficient backfill of mines.

Key words: solid-waste-based cementitious backfill material; molybdenum mine tailings; mechanical property; application performance; microstructure morphology

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.011

引文格式: 尹韶宁, 袁鹏, 潘栋, 汪坤, 孟翔, 吴佳炜. 固废基充填胶凝材料配比优化与性能研究[J]. 铜业工程, 2026(4): 87-93.
Yin Shaoning, Yuan Peng, Pan Dong, Wang Kun, Meng Xiang, Wu Jiawei. Optimization of mix proportion and performance investigation of solid-waste-based cementitious filling materials [J]. Copper Engineering, 2026(4): 87-93.