基于正交试验的尾砂废石复合胶结充填体强度研究*

张耀平[1,2],朱训文[1],雷大星[2],刘波[2],邹雄刚[2]

(1.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州市 341000;
2.赣南科技学院 资源与土木工程学院, 江西 赣州市 341000)

摘要:为解决某矿山固废堆积严重、充填体整体强度低等问题,以尾砂、废石为充填骨料,并添加聚丙烯纤维制备充填料,通过正交试验,探究了灰砂比、废石级配指数、纤维掺量对充填料浆坍落度和充填体强度的影响,并确定最佳充填材料配比。结果表明:影响充填料浆坍落度的主次因素依次为废石级配指数、纤维掺量、灰砂比,而影响充填体28 d抗压、抗拉强度的主次因素则依次为灰砂比、纤维掺量、废石级配指数;灰砂比减小和废石级配指数增大均削弱充填体强度,纤维掺量为0.6%时,充填体强度最大;构建了主要因素耦合影响下的充填体强度及坍落度的拟合函数,根据拟合函数建立了主要因素与充填体性能各指标之间的影响关系三维模型图,均符合 $Z=Ax^2+By^2+Cx+Dy+Exy+F$ 的关系;基于正交试验和矿山实际需求,得到最优充填材料配比参数:灰砂比1∶5、废石级配指数0.8、纤维掺量0.6%,在此条件下,充填料浆的流动性和充填体强度均能满足矿山的充填要求,且充填材料的成本相对较低。

关键词:尾砂废石复合胶结充填体;充填体强度;正交试验;拟合函数;最优配比

中图分类号:TD853.343 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0093-07

Research on Strength of Tailings Waste Rock Composite Cemented Backfill Based on Orthogonal Test

ZHANG Yaoping[1,2], *ZHU Xunwen*[1], *LEI Daxing*[2], *LIU Bo*[2], *ZOU Xionggang*[2]

(1.School of Resources and Environmental Engineering,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Gannan University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: In order to solve the problems of serious accumulation of solid waste and low overall strength of backfill in a mine, tailings and waste rocks were used as filling aggregate, and polypropylene fiber was added to prepare filling material. Through orthogonal test, the effects of cement-sand ratio, waste rock gradation index and fiber content on the slump of filling slurry and the strength of backfill were investigated, and the optimum ratio of filling material was determined. The results show that the primary and secondary factors affecting the slump of filling slurry are waste rock gradation index, fiber content and cement-sand ratio, while the primary and secondary factors affecting the 28 days compressive and tensile strength of backfill are cement-sand ratio, fiber content and waste rock gradation index. The decrease of cement-sand ratio and the increase of waste rock gradation index will weaken the strength of backfill. When the fiber content is 0.6%, the strength of backfill is the largest. The fitting function of the strength of backfill and the slump under the influence of the coupling of the main factors was constructed. According to the fitting function, the three-dimensional model diagram of the influence relationship between the main factors and the performance index of backfill was established, which conformed to the relationship of $Z=Ax^2+By^2+Cx+Dy+Exy+F$. Based on the orthogonal test and the actual needs of the mine, the optimal ratio parameters of the filling material are obtained: cement-sand ratio of 1∶5, waste rock gradation index of 0.8, and fiber content of 0.6%. Under this condition, the fluidity of filling slurry and the strength of backfill can meet the filling requirements of the mine, and the cost of the filling material is relatively low.

Key words: Tailings waste rock composite cemented backfill, Backfill strength, Orthogonal test, Fitting function, Optimal ratio

* **收稿日期**:2024-08-26
作者简介:张耀平(1974—),男,江西赣州人,博士,教授,主要从事岩石力学、采矿工艺等方面的研究。E-mail:zyp2005csu@126.com
通信作者:朱训文(2000—),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事岩石力学与工程方面的研究。E-mail:2805241424@qq.com

0 引言

随着金属矿山开采活动的持续进行,尾砂和废石的处理成为了一个亟待解决的问题。尾砂与废石的堆放不仅占据了大量土地资源,还会对周边自然环境造成一定污染[1]。为了推动矿山的绿色与可持续发展,减轻固废对环境的压力,对尾砂和废石进行资源再利用显得十分重要[2-4]。将尾砂和废石为充填骨料,既能解决固体废弃物地表堆积引发的环境问题,又能改善充填体的整体强度,为地下矿山的开采活动提供安全的作业环境[5]。

国内外众多学者围绕尾砂与废石的资源化再利用展开了深入的探索与研究,并取得了很多有益的成果[1-8]。杨啸等[2]对不同粒径骨料充填体开展了力学试验,发现小粒径混合骨料能提升充填体早期强度,大粒径骨料则对充填体后期强度更有益。张静等[3]将废石和全尾砂作为充填骨料,研究了两种骨料不同配比下的充填体力学强度特性,并确定了最佳骨料配比。WANG Yu 等[6]对废石胶结充填体抗压强度以及损伤演化机理进行了研究,发现废石之间的联锁效应能显著增强充填体整体刚度和强度。LI Guangzhi 等[8]研究了骨料粒径分布对废石胶结充填体动态抗压性能的影响,得出 Talbot 指数为 0.4 和 0.6 时充填体具有良好的抗压性能。

在金属矿山深井开采中,充填体因表层拉应力剧增,容易出现裂缝,这对井下采场构成了安全风险。为了应对这一挑战,众多学者深入探究了纤维对尾砂胶结充填体力学性能的改善作用[9-16]。赵康等[10]开展了不同纤维增强尾砂胶结充填体的力学性能试验,发现混合纤维在阻止裂纹扩展方面的效果要显著优于单一纤维。严荣富等[12]对聚丙烯纤维增强充填体性能开展了试验研究,发现纤维掺量为 0.5 kg/m^3 时,充填体在开裂应变方面表现最佳。ZHANG Xiangdong 等[14]对掺纤维充填体力学特性进行研究,发现充填体强度随着纤维添加量的逐渐增加呈现出先增强后减弱的变化趋势,添加 6‰ 的 9 mm 纤维时,充填体整体强度达到峰值。XUE Gaili 等[15-16]在 SHPB 冲击加载条件下,深入分析聚丙烯纤维对充填体动态力学性能的调控作用,并观察到纤维能够有效遏制大裂纹的蔓延。以上学者在充填体添加料方面取得了丰富的成果,然而对纤维增强混合骨料胶结充填体方面的研究则鲜有报道。

针对某矿山固废排放量大,充填成本高以及充填体抗拉强度不足等问题,本文以尾砂和废石作为充填骨料,并添加适量的聚丙烯纤维,利用正交试验探究灰砂比、废石级配指数、纤维掺量对充填体坍落度和充填体 28 d 强度的影响,并通过构建模型系统地分析主要影响因素与关键指标值之间的内在联系,研究这些因素对指标值的具体影响。最后,综合试验结果与矿山需求,确定了最优充填配比参数,以期为矿山充填生产提供理论支撑。

1 正交试验

1.1 试验材料

试验中的尾砂、废石均取自安徽某矿山,水泥为复合硅酸盐水泥(P·C 32.5),外加材料为 6 mm 长的聚丙烯纤维。

利用 XRF 技术分析尾砂与废石的化学成分,结果见表 1。由表 1 可知,尾砂和废石的主要成分相似,但含量有一定差别。尾砂的粒径分布见表 2,其颗粒不均匀系数为 14.23,表明该尾砂颗粒分布较均匀;曲率系数为 1.13,说明细颗粒含量分布较集中,尾砂粒度细且级配良好[17]。试验中,采用直径为 50 mm 的圆柱形模具,并限制废石最大粒径为 10 mm,以消除粗颗粒对充填体的尺寸效应。废石的粒径分布见表 3。试验将粒径为 10 mm 以下的废石筛分为 5 个粒径区间,采用 Talbot 级配理论对废石进行分级[18],得到废石的级配指数 n 为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8。试验选用单丝束状聚丙烯纤维,其物理性质参数见表 4,密度为 0.91 g/cm^3,直径为 31 μm,具备高强度、优良弹性和耐腐蚀性。

表 1 尾砂和废石化学成分

Table 1 Chemical composition of tailings and waste rocks

%

材料	SiO_2	CaO	TFe	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	其他
尾砂	42.25	11.88	11.70	27.35	4.40	0.29	2.13
废石	48.31	19.26	5.70	16.35	8.40	1.29	0.69

表 2 尾砂粒径分布

Table 2 Particle size distribution of tailings

粒径/μm	累计占比/%	粒径/μm	累计占比/%
−5	22.53	−100	77.70
−10	31.47	−200	87.84
−20	49.39	−250	90.67
−35	59.55	−500	98.71
−50	65.73	−1 000	100.00

表 3 废石粒径分布

Table 3 Particle size distribution of waste rocks

粒径/μm	累计占比/%	粒径/μm	累计占比/%
2	26.3	8	71.1
4	34.5	10	85.1
6	49.7	12	100.0

表 4 聚丙烯纤维物理性能

Table 4 Physical properties of polypropylene fiber

抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	密度/(g/cm³)	纤维直径/μm	熔点/℃	燃点/℃	抗酸碱性
≥400	≥3.85	28	0.91	31	180	590	高

1.2 试验方法

1.2.1 试验方案

当尾矿与骨料配比为 5∶5、聚丙烯纤维掺量为 0.25%～0.75%时,能增强充填体的抗压强度[12,19]。因此试验确定采用尾砂与废石配比为 5∶5、料浆质量浓度为 74%,废石采用 4 种级配指数(0.2,0.4,0.6,0.8)进行分级,并添加长度为 6 mm 的聚丙烯纤维,其添加量为骨料和水泥总质量的 0.2%～0.8%。以 28 d 抗压强度、抗拉强度及坍落度为评价指标,设计三因素(灰砂比、废石级配指数、纤维掺量)四水平正交试验(见表 5)。

表 5 正交试验方案

Table 5 Schemes of orthogonal test

水平	因素		
	灰砂比(A)	废石级配指数 n(B)	纤维掺量(C)/%
1	1∶4	0.2	0.2
2	1∶5	0.4	0.4
3	1∶6	0.6	0.6
4	1∶8	0.8	0.8

本次试验采用的模具为圆筒体,直径为 50 mm,高度分别为 50 mm 和 100 mm。试块的制备严格遵循《黄金矿开采工程岩石物理力学性质试验技术规范》(YS/T 3011—2012),其中高度为 50 mm 的充填体试样用于抗拉试验,高度为 100 mm 的充填体试样用于抗压试验。当试样制备完成后,将其置于温度为(20±1) ℃、相对湿度大于 95%的养护箱中养护 24 h,脱模编号后继续养护至 28 d 龄期。

1.2.2 试验测试

(1) 坍落度测试。使用坍落度桶测量充填料浆坍落度,将充填料浆分三层装入坍落度桶并捣实均匀,然后提起坍落度桶,测量坍落高度,并计算坍落度。

(2) 单轴抗压强度测试。采用 WDW-20 万能试验机,以 0.5 mm/min 的加载速率对充填体进行单轴压缩试验,试验中持续均匀加载直至试样破坏,记录每组试样的加压载荷并取平均值。

(3) 劈裂试验。采用 WDW-20 万能试验机,以 0.25 mm/min 的加载速率对充填体进行抗拉强度测试。试验中持续均匀加载直至试样破坏,记录每组试样的测试结果并取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

坍落度作为衡量充填材料屈服应力的关键指标,可反映充填料浆的流动性[20],而料浆的流动性对于矿山充填管道输送系统的高效运行至关重要。试验首先测定充填料浆的坍落度,随后在试件经过 28 d 的标准养护后测定其抗压与抗拉强度,具体测试结果见表 6。

表 6 正交试验结果

Table 6 Results of orthogonal test

编号	A	B	C/%	坍落度/cm	28 d 抗压强度/MPa	28 d 抗拉强度/MPa
1	1∶4	0.2	0.2	22.5	5.667	1.090
2	1∶4	0.4	0.4	23.1	5.769	1.079
3	1∶4	0.6	0.6	25.1	5.732	1.158
4	1∶4	0.8	0.8	24.3	5.456	0.887
5	1∶5	0.2	0.4	22.0	5.520	0.962
6	1∶5	0.4	0.2	24.6	5.235	0.739
7	1∶5	0.6	0.8	23.8	5.180	0.890
8	1∶5	0.8	0.6	26.2	5.244	0.984
9	1∶6	0.2	0.6	21.6	4.273	0.967
10	1∶6	0.4	0.8	22.8	3.823	0.784
11	1∶6	0.6	0.2	26.4	3.046	0.521
12	1∶6	0.8	0.4	26.9	3.380	0.686
13	1∶8	0.2	0.8	21.6	3.326	0.744
14	1∶8	0.4	0.6	24.1	3.443	0.788
15	1∶8	0.6	0.4	25.7	2.643	0.579
16	1∶8	0.8	0.2	27.3	2.210	0.316

2.2 结果分析

2.2.1 极差分析

对试验结果进行极差分析,结果见表 7,由表 7 可知,坍落度影响因素的排序为:废石级配指数(B)>纤维掺量(C)>灰砂比(A)。28 d 抗压、抗拉强度影响因素的排序为:灰砂比(A)>纤维掺量

(*C*)>废石级配指数(*B*)。由此可知,废石级配指数对坍落度的影响最为显著,灰砂比对试件 28 d 抗压、抗拉强度的影响最为显著。

表 7 正交试验结果的极差分析

Table 7 Range analysis of orthogonal test results

影响因素	坍落度/cm	28 d 抗压强度/MPa	28 d 抗拉强度/MPa
灰砂比(*A*)	0.900	2.751	0.447
废石级配指数(*B*)	4.375	0.624	0.223
纤维掺量(*C*)	1.950	0.634	0.308

各因素对充填体性能指标的影响见图 1。由图 1 可知,充填料浆坍落度随灰砂比的降低而增大,随废石级配指数的增大而增大,纤维掺量增加则会导致坍落度减小。28 d 的充填体抗压和抗拉强度均随着灰砂比的减小而减小,随着废石级配指数的增加而减小;当纤维掺量增加时,28 d 抗压、抗拉强度先增大后减小,纤维掺量为 0.6%时强度达到最大值,适量的纤维掺入能增强充填体黏聚力,构建稳固细密的骨架结构,并能有效抵御硫酸盐侵蚀,从而显著提升充填体的整体强度。

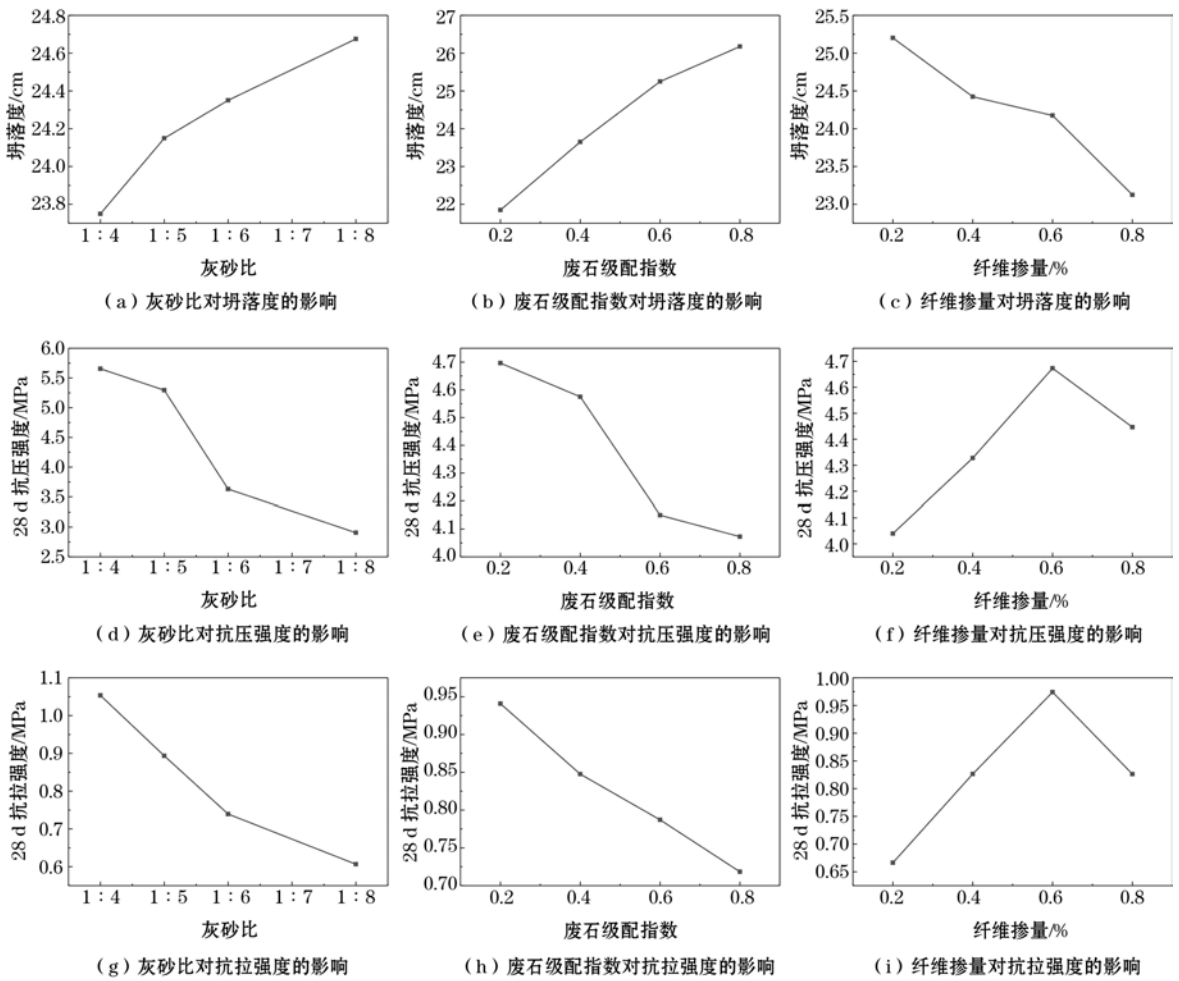


图 1 各因素对充填体性能指标的影响

Fig.1 Effect of various factors on the performance indicators of backfill

2.2.2 方差分析

方差分析结果显示(见表 8),各因素对坍落度、28 d 抗压和 28 d 抗拉强度具有显著差异。以坍落度为评估标准,其废石级配指数(*B*)与纤维掺量(*C*)的 *P* 值均小于 0.05,表明这两个因素是坍落度的显著影响因素;而灰砂比(*A*)的 *P* 值大于 0.05,表明灰砂比为非显著性影响因素。对于 28 d 抗压强度,灰砂比(*A*)、废石级配指数(*B*)及纤维掺量(*C*)的 *P* 值均小于 0.05,显示这三者均为显著影响因素。对于 28 d 抗拉强度,灰砂比(*A*)与纤维掺量(*C*)的 *P* 值均小于 0.05,表明它们是显著影响因素;而废石级配指数(*B*)的 *P* 值大于 0.05,说明废石级配指数为非显著性影响因素。

表 8　正交试验结果的方差分析

Table 8　Variance analysis of orthogonal test results

目标参数	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
坍落度/cm	A	1.797	3	0.599	5.106	0.107	不显著
	B	43.297	3	14.432	123.046	0.001	显著
	C	8.812	3	2.937	25.043	0.013	显著
	误差	0.352	3	0.117	—	—	—
28 d 抗压强度/MPa	A	20.802	3	6.934	839.675	0.001	显著
	B	1.130	3	0.377	45.594	0.005	显著
	C	0.834	3	0.278	33.681	0.008	显著
	误差	0.025	3	0.008	—	—	—
28 d 抗拉强度/MPa	A	0.447	3	0.149	37.991	0.007	显著
	B	0.107	3	0.036	9.078	0.051	不显著
	C	0.190	3	0.063	16.094	0.024	显著
	误差	0.012	3	0.004	—	—	—

2.3　充填体性能与主要影响因素的相关性分析

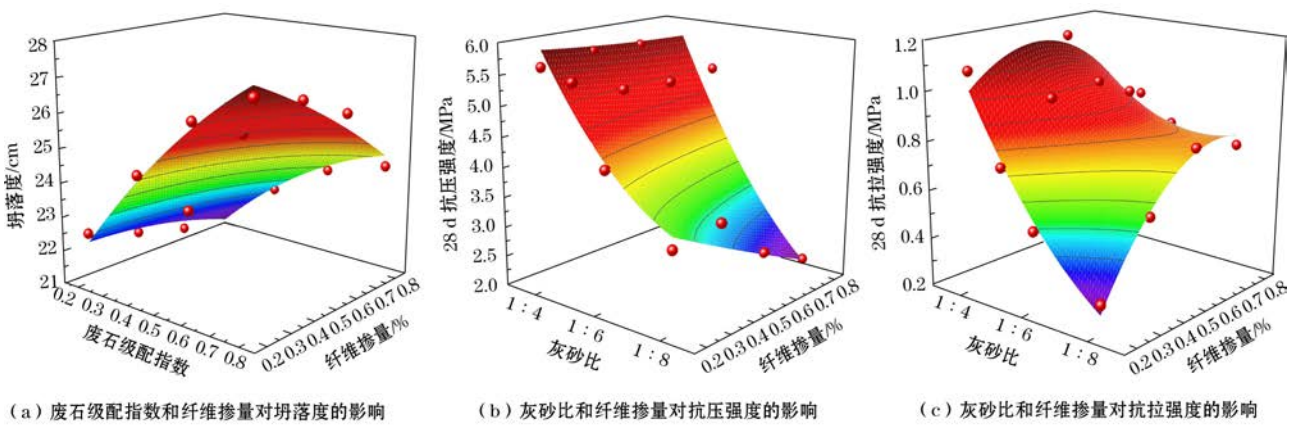
针对充填体性能主要影响因素与各性能指标之间的关系，利用 Origin 构建了相应的拟合函数，见式(1)至式(3)，并深入分析这些影响因素对充填体性能的影响，对极差分析结果进行进一步的验证。图 2 展示了各性能指标与主要影响因素之间的相互关系。

$$Z_1=19.338+15.150\,x_1+1.963\,y_1-5.000\,x_1^2-2.188\,y_1^2-5.950\,x_1\,y_1 \quad (1)$$

$$Z_2=10.917-1.571\,x_2+1.283\,y_2+0.089\,x_2^2+0.320\,y_2^2-0.478\,x_2\,y_2 \quad (2)$$

$$Z_3=2.325-0.483\,x_3+0.859\,y_3+0.021\,x_3^2-1.925\,y_3^2+0.240\,x_3\,y_3 \quad (3)$$

式中：Z_1 为坍落度指标值，cm；Z_2 为 28 d 抗压强度，MPa；Z_3 为 28 d 抗压强度，MPa；x_1 为废石级配指数；x_2 和 x_3 均为灰砂比；y_1，y_2 和 y_3 均为纤维掺量，%。



(a) 废石级配指数和纤维掺量对坍落度的影响　(b) 灰砂比和纤维掺量对抗压强度的影响　(c) 灰砂比和纤维掺量对抗拉强度的影响

图 2　主要影响因素对充填体性能的影响

Fig.2　Effects of main factors on the performances of backfill

如图 2(a)所示，当纤维掺量固定时，料浆坍落度随着废石级配指数 n 的增大而提高；当废石级配指数 n 固定时，料浆坍落度随着纤维掺量的增大而减小；当 $n=0.8$、纤维掺量为 0.2%时，料浆坍落度出现最大值。如图 2(b)和图 2(c)所示，当纤维掺量为0.2%时，28 d 抗压强度和 28 d 抗拉强度均随着灰砂比的增大而增大，而当纤维掺量为 0.8%时，充填体强度相比于纤维掺量为 0.6%时大幅降低，说明此时纤维的增加给充填体强度带来不利影响。当灰砂比为 1∶4 且纤维掺量为 0.6%时，充填体强度达到最大值。这些结果与极差分析得到的结果基本一致。

2.4　充填方案优选

根据相关研究，充填料浆的坍落度保持在 23.0～27.5 cm 时，能满足料浆自流输送的要求[21-22]。考虑到案例矿山目前采用的下向进路式充填采矿法，要求充填体的 28 d 抗压强度不低于 5 MPa，28 d 抗拉强度不低于 0.9 MPa。经筛选，表 6 中的 2 号、3

号和 8 号配比方案可同时满足坍落度和充填体强度的要求。鉴于案例矿山堆积的尾砂和废石亟待利用,充填成本主要受到胶凝材料用量的影响。在相同的料浆质量配置下,配比方案 8 所使用的胶凝材料用量最低,因而具有相对较低的材料成本。综上可得,当灰砂比为 1∶5、废石级配参数 n 为 0.8、纤维掺量为 0.6%时,料浆坍落度为 26.2 cm,充填体 28 d 抗压强度达到 5.244 MPa,28 d 抗拉强度达到 0.984 MPa,可满足矿山充填要求。

3 结论

矿山在应用充填采矿法开采时,充填体的性能直接关系到井下作业的安全与效率。通过正交试验,本文系统探讨了灰砂比、废石级配指数以及纤维掺量对充填料浆坍落度及充填体强度的影响,得出以下结论。

(1) 废石级配指数对料浆坍落度的影响最大,纤维掺量的影响次之,灰砂比的影响则较小。对充填体强度影响最大的因素是灰砂比,其次为纤维掺量,废石级配指数的影响最小。灰砂比低、废石级配指数高时,坍落度较大;随着纤维掺量的增加,坍落度减小。灰砂比降低、废石级配指数增大使得充填体强度降低;纤维掺量在 0.6%时,充填体强度最大,而纤维掺量超过 0.6%以后,充填体强度呈降低趋势。

(2) 本文构建了主要因素耦合影响下的充填体强度及坍落度的拟合函数,依据拟合函数建立了主要因素与充填体性能指标之间的影响关系三维模型图,均符合 $Z=Ax^2+By^2+Cx+Dy+Exy+F$ 的关系,由拟合函数和三维模型图得出的结果与极差法得到的结果基本一致,验证了正交试验结果的准确性,同时为尾砂废石复合胶结充填体的参数设计提供了理论指导。

(3) 根据试验结果和矿山实际需求,确定最优材料配比,即灰砂比为 1∶5、废石级配指数为 0.8、纤维掺量为 0.6%。在此最优材料配比条件下,料浆的坍落度为 26.2 cm,充填体 28 d 抗压强度达到 5.244 MPa,28 d 抗拉强度达到 0.984 MPa,可满足矿山充填要求,且充填材料的成本较低。

参考文献(References):

[1] 姚宣成,刘中柱,罗平框,等.奥尔托喀讷什锰矿粗骨料胶结充填体试验研究及配比优化[J].金属矿山,2023(4):37-44.
YAO Xuancheng, LIU Zhongzhu, LUO Pingkuang, et al. Experimental study on coarse aggregate cemented backfill of ortokanesh manganese ore[J]. Metal Mine,2023(4):37-44.

[2] 杨啸,杨志强,高谦,等.混合充填骨料胶结充填强度试验与最优配比决策研究[J].岩土力学,2016,37(增刊 2):635-641.
YANG Xiao, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Cemented filling strength test and optimal proportion decision of mixed filling aggregate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Suppl.2):635-641.

[3] 张静,刘再涛,李永新,等.全尾砂和废石联合胶结充填体最佳配比及应用[J].矿冶工程,2020,40(3):10-14+19.
ZHANG Jing, LIU Zaitao, LI Yongxin, et al. Optimum proportion of total tailings and waste rock for cemented backfill and its practical application[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2020,40(3):10-14+19.

[4] 尹升华,刘家明,邵亚建,等.全尾砂-粗骨料膏体早期抗压强度影响规律及固化机理[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(2):478-488.
YIN Shenghua, LIU Jiaming, SHAO Yajian, et al. Influence rule of early compressive strength and solidification mechanism of full tailings paste with coarse aggregate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2020,51(2):478-488.

[5] HANE Ibrahima, BELEM Tikou, BENZAAZOUA Mostafa, et al. Laboratory characterization of cemented tailings paste containing crushed waste rocks for improved compressive strength development[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2017,35(2):645-662.

[6] WANG Yu, XIAO Yonggang, HOU Zhiqiang, et al. In situ X-ray computed tomography (CT) investigation of crack damage evolution for cemented paste backfill with marble waste block admixture under uniaxial deformation[J]. Arabian Journal of Geosciences,2020,13(19):S12517.

[7] WU Jiangyu, YIN Qian, GAO Yuan, et al. Particle size distribution of aggregates effects on mesoscopic structural evolution of cemented waste rock backfill[J].Environmental Science and Pollution Research,2021,28(13):16589-16601.

[8] LI Guangzhi, SHI Xinshuai, NING Jianguo, et al. Particle size distribution of aggregate effects on the dynamic compressive behavior of cement waste rock backfill[J]. Engineering Fracture Mechanics,2023,292:109596.

[9] 阮竹恩,吴爱祥,付豪,等.秸秆纤维对含硫尾砂膏体充填体单轴抗压强度的影响机理[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):837-848.
RUAN Zhuen, WU Aixiang, FU Hao, et al. Influence mechanism of straw fiber on uniaxial compressive strength cemented paste backfill body of sulfur-bearing tailings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(3):837-848.

[10] 赵康,宋宇峰,于祥,等.不同纤维作用下尾砂胶结充填体早期力学特性及损伤本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(2):282-291.
ZHAO Kang, SONG Yufeng, YU Xiang, et al. Study on early mechanical properties and damage constitutive model of tailing-cemented backfill with different fibers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(2):282-291.

[11] 杨晓炳,侯永强,尹升华,等.纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学性能及能量分配演化特征[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4435-4448.
YANG Xiaobing, HOU Yongqiang, YIN Shenghua, et al. Mechanical properties and energy distribution evolution characteristics of fiber-reinforced cemented sulfur tailings backfill[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(11):4435-4448.

[12] 严荣富,刘家明,尹升华,等.聚丙烯纤维和粗骨料对尾砂胶结充填体延性和流动性的影响(英文)[J].Journal of Central South University,2022,29(2):515-527
YAN Rongfu,LIU Jiaming,YIN Shenghua,et al. Effect of polypropylene fiber and coarse aggregate on the ductility and fluidity of cemented tailings backfill[J].Journal of Central South University,2022,29(2):515-527

[13] ZOU Shizhuo, GUO Wanhong, WANG Shuo, et al. Investigation of the dynamic mechanical properties and damage mechanisms of fiber-reinforced cemented tailing backfill under triaxial split-hopkinson pressure bar testing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27:105-121.

[14] ZHANG Xiangdong, LI Jiaze, PANG Shuai, et al. Mechanical properties and interface microscopic characterisation of fibre-reinforced slag-fly ash geopolymer agglutinated iron tailings filling materials [J]. Materials Today Communications,2023,36:106650.

[15] XUE Gaili, EROL Yilmaz, FENG Guorui, et al. Reinforcement effect of polypropylene fiber on dynamic properties of cemented tailings backfill under SHPB impact loading. [J]. Construction & Building Materials, 2021, 279:122417.

[16] XUE Gaili, EROL Yilmaz, SONG Weidong, et al. Fiber length effect on strength properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings backfill specimens with different sizes [J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118113.

[17] DAS Bm. Advanced soil mechanics[M]. New York: CRC Press,2013.

[18] 冯梅梅,吴疆宇,陈占清,等.连续级配饱和破碎岩石压实特性试验研究[J].煤炭学报,2016,41(9):2195-2202.
FENG Meimei, WU Jiangyu, CHEN Zhanqing, et al. Experimental study on the compaction of saturated broken rock of continuous gradation [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(9):2195-2202.

[19] YI Xingwen, MA Guowei, FOURIE A. Compressive behaviour of fibre-reinforced cemented paste backfill [J]. Geotextiles and Geomembranes,2015,43(3):207-215.

[20] HU Jianhua, KUANG Ye, ZHOU Tan, et al. Influence of air entraining agent on strength and microstructure properties of cemented paste backfill[J].IEEE Access,2019, 7:140899-140907.

[21] 邓代强,高永涛,吴顺川.基于坍落度测试的粗骨料充填料浆流动性检验[J].北京建筑工程学院学报,2009,25(1):30-33.
DENG Daiqiang, GAO Yongtao, WU Shunchuan. Liquidity detection based on the slump testing of coarse aggregate filling material[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2009,25(1):30-33.

[22] 宋晓雨,王公忠,周银波.泵送矸石膏体充填材料配比实验[J].煤,2019,28(2):6-8+13.
SONG Xiaoyu, WANG Gongzhong, ZHOU Yinbo. Experimental study on the matching ratio of pumped gangue paste[J]. Coal,2019,28(2):6-8+13.