

息烽磷矿颗粒级配优选废石-料浆胶结充填实验

刘德峰¹, 熊志洋¹, 郑彦涛^{1,2}, 任金华³, 王良群², 朱复兴⁴

1. 武汉工程大学, 湖北 武汉 430073;
2. 贵州息烽磷矿有限责任公司, 贵州 贵阳 551100;
3. 贵州化工建设有限责任公司, 贵州 贵阳 550001;
4. 贵州紫金矿业股份有限公司, 贵州 黔西南州 562205

中图分类号: TD835.34 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)06-0103-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.06.007

摘要 为了降低充填成本和排土场废石堆积给矿山带来的安全隐患, 针对息烽磷矿采用废石-料浆胶结充填工艺, 通过响应曲面法、技术经济分析和微观结构表征相结合的研究手段, 分析主要影响因素敏感性, 优化充填配比参数, 揭示其水化产物作用机理。研究表明: 充填体单轴抗压强度的影响因素敏感程度的大小顺序为料浆质量浓度>水泥与粉煤灰质量比>灰石比, 在料浆质量浓度 55%、灰石比 7:20、水泥与粉煤灰质量比 87:100 的条件下, 充填体强度达到 10.60 MPa, 每年节约总成本超 131 万元/10 万 t 充填材料。优选的充填体孔隙结构被硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙(CH)及钙矾石(Aft)等水化产物与未参与水化反应的粉煤灰联合填充, 微观结构表现为致密, 具有较强的抵抗外界压缩破坏的能力。研究成果可为露天转地下的矿山充填安全开采提供理论依据和技术支撑。

关键词 胶结充填; 响应曲面法; 废石; 粉煤灰

引言

磷矿作为我国重要的战略资源之一, 在农业生产和化学工业中具有重要的地位^[1-3]。近年来, 随着磷矿需求量的不断增加, 磷矿的开采深度已逐渐由近地表向深部转移。为了控制采场地压活动、减少地表塌陷和降低排土场废石堆积给矿山带来的安全隐患, 充填采矿方法是目前最佳选择, 越来越受到政府和企业的高度重视, 已逐渐发展成为一种不可替代的安全、高效、绿色开采技术^[3-4]。

贵州息烽磷矿目前采用的是空场嗣后充填采矿法, 井上制备充填材料后经充填管道输送到采空区。其中充填材料由充填骨料(-16 mm 机制砂)、胶凝材料(P·O 42.5 水泥和粉煤灰)与水组成, 形成的充填体已满足强度要求, 基本实现了安全高效开采。然而, 该矿山仍然存在一些难题: (1) 充填材料成本高, 其中费用主要包括胶凝材料、搅拌、泵送等; (2) 露天开采堆积的废石体量大, 存在安全隐患、环境污染、占地等问题, 严重影响了绿色矿山建设。

国内外学者关于废石堆积及充填成本问题的研

究已取得了一些有意义的成果。于恩毅等^[5]研究了废石替代部分全尾砂骨料对充填体强度的影响, 发现当废石含量大于 40% 后, 充填体的强度会随废石用量的增加而增大。谭伟等人^[6]开展了废石胶结充填相似模拟实验, 指出充填体强度存在空间差异性, 即废石堆周围单轴抗压强度较大, 而其中间强度较小。张静等人^[7]针对矿山充填骨料不足、地表废石堆积过多等问题, 开展了充填配比优化实验, 确定了最佳充填配比为全尾砂配比 4:6, 灰砂比 1:12, 质量浓度 78%。全文慧等^[8]探究了采场废石粒径、含量及胶凝材料对废石-尾砂胶结充填体强度的影响, 发现废石的加入可以提高充填体的断裂性能, 尤其是细粒径废石颗粒。戚亮等人^[9]进行了全尾砂、尾砂-河沙及尾砂-废石为骨料的充填体力学特性实验, 指出尾砂-废石胶结充填体的强度最好, 有利于实现矿山的安全开采。由上述研究成果可知, 废石可以较好地提高充填体的强度及围岩稳定性, 然而有关通过颗粒级配优选废石作为骨料进行胶结充填配比的实验研究鲜见报道。另外, 对于降低充填成本问题, 通常采用配比参数优化实验, 再经过经济分析, 筛选最优配比。目前优化充填材料

收稿日期: 2024-08-18

基金项目: 黔科合成果项目([2023]一般 777); 国家磷资源开发利用工程技术研究中心开放基金(LKF202005)

作者简介: 刘德峰(1988—), 男, 安徽淮北人, 博士, 副教授, 主要从事矿山安全高效绿色开采理论及技术研究, E-mail: liudefengopp@126.com。

通信作者: 郑彦涛(1986—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地下矿山绿色高效开采工艺研究, E-mail: zyt2021best@163.com。

配比的方法通常有全面实验、正交实验、响应曲面法等^[10-11]。其中全面实验是把全部组合实验均实验一次,但该方法实验次数多、工作量大,仅适合影响因素水平较少的情况;正交实验的优点是实验次数少、效果好等,缺点是该方法不能确定水平之间的最佳值;而响应曲面法是根据因素水平进行响应曲面实验方案设计,根据室内实验结果确定影响因素敏感性分析,并结合多项式函数方程构建响应值之间的关系模型,具有能快速、形象、直观地获得最佳配比参数方案及预测模型等优势,得到了广泛应用。

鉴于此,针对息烽磷矿存在的技术难题,本文拟采用废石与料浆井下协同胶结充填工艺,利用响应曲面法对料浆质量浓度、水泥与粉煤灰质量比以及灰石比这三个关键因素的敏感性进行排序分析。通过建立充填体单轴抗压强度的回归模型,同时考虑经济成本,优化充填工艺参数。此外,利用 XRD 和 SEM 等分析仪器,深入探究优选充填体与胶凝材料的固化机理,旨在降低充填成本,同时减少矿山因废石堆积而带来的安全隐患,为实现露天转地下矿山的安全高效开采提供理论支撑和技术支持。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

充填料浆主要由 P·O 42.5 水泥、粉煤灰与自来水搅拌而成。利用标准筛分别对排土场废石进行筛分和称重,其中选取筛分后粒径范围为 0.075~16 mm 的废石作为充填骨料,该部分质量占比为 69.63%。其颗粒级配曲线及参数如图 1 所示。经研究发现,0.075~16 mm 粒径范围的废石颗粒可以替代目前在用的机制砂粗骨料^[12],+16 mm 与-0.075 mm 废石直接放入采空区与胶结充填材料协同充填。

利用 X 射线衍射技术(XRD)对充填材料进行矿

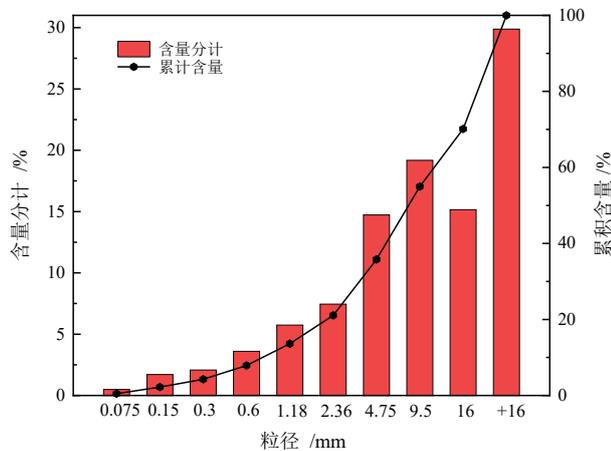


图 1 排土场废石颗粒级配曲线
Fig. 1 Particle size distribution curve of waste rock in the waste dump

物成分分析,测试结果如图 2 所示。由图 2 可知,水泥中含有 2CaO·SiO₂(硅酸二钙)、SiO₂(石英)、Fe₂O₃、Al₂O₃、MgO,其中硅酸二钙和石英含量较多。粉煤灰中含有 SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、MgO,其中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量较高,而 Fe₂O₃ 和 MgO 含量较低,水化活性低。此外,0.075~16 mm 骨料矿物成分主要为白云石 [CaMg(CO₃)₂] 与石英,白云石含量占比较高。

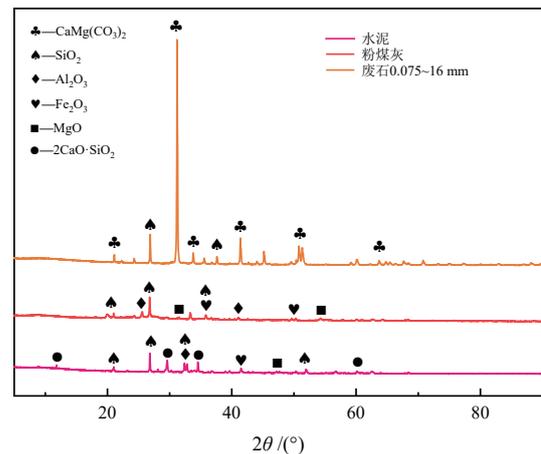


图 2 实验原料 XRD 分析结果
Fig. 2 XRD image of experimental raw materials

1.2 响应曲面法

为了查明料浆质量浓度(A)、灰石比(B)、水泥与粉煤灰质量比(C)等因素之间的交互作用,以及其对抗压强度影响的敏感程度,利用 Design-Expert 软件,通过 Box-Behnken 响应曲面分析法进行响应曲面实验,开展料浆质量浓度、灰石比、水泥与粉煤灰质量比三因素三水平中心复合设计实验。基于矿山现场充填配比参数(料浆质量浓度为 55%,灰石比为 0.45,水泥与粉煤灰质量比为 1.075),将其设为对照组,设计实验方案如表 1 及表 2 所示,以试块抗压强度为响应值,设计 3 因素 3 水平共 17 组实验。

表 1 Box-Behnken 实验设计因素与水平

Table 1 Experimental design factors and levels of Box-Behnken

因素	水平 1	水平 2	水平 3
A	51%	55%	59%
B	35 : 100	45 : 100	55 : 100
C	87 : 100	107.5 : 100	128 : 100

1.3 试件制作与单轴抗压强度测试

首先,将水泥、粉煤灰和水按表 2 设计比例混合后形成料浆;然后,将其与优选的 0.075~16 mm 废石混合搅拌后倒入 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 三联模具中成型,并在模具内壁涂上润滑剂,以便顺利脱模;接着,将脱模后的充填体放入养护箱内(温度 20±1 °C,

表 2 响应曲面法实验结果

Table 2 Experimental results of the response surface method

编号	A/%	B	C	抗压强度/MPa
1	51	0.35	1.075	8
2	59	0.35	1.075	10.9
3	51	0.55	1.075	7.25
4	59	0.55	1.075	12.6
5	51	0.45	0.87	7.3
6	59	0.45	0.87	9.9
7	51	0.45	1.28	8.25
8	59	0.45	1.28	11.7
9	55	0.35	0.87	10.6
10	55	0.55	0.87	9.15
11	55	0.35	1.28	10.4
12	55	0.55	1.28	9.2
13	55	0.45	1.075	9.7
14	55	0.45	1.075	10.1
15	55	0.45	1.075	10.6
16	55	0.45	1.075	10.9
17	55	0.45	1.075	10.4

湿度 $\geq 90\%$), 养护龄期到 28 d; 最后, 根据《普通混凝土力学性能实验方法标准》(GB/T 50081—2002), 利用微机控制电液伺服万能试验机分别对 17 组充填体进行单轴抗压强度实验。其中每组 3 个试件, 取平均值获得 28 d 龄期下 17 组充填体的单轴抗压强度。

2 实验结果及分析

2.1 单轴抗压强度影响因素敏感性分析及模型构建

2.1.1 响应曲面实验结果

基于响应曲面实验, 获得不同响应曲面实验方案

下充填体单轴抗压强度, 如表 2 所示。

由表 2 可知, 仅有第 2 组、第 4 组、第 8 组、第 9 组和第 11 组的充填配比方案达到对照组(矿山现场充填配比参数)充填体强度。与对照组相比, 这 5 组充填体的单轴抗压强度分别提高了 6%、23%、14%、3% 和 1%。

2.1.2 单轴抗压强度影响因素敏感性分析

利用 Design-Expert 软件, 获得料浆质量浓度、灰石比、水泥与粉煤灰质量比对抗压强度影响的三维响应曲面图, 如图 3~图 5 所示。通过对图 3~图 5 进行分析可分别判断灰石比-料浆质量浓度、灰石比-水泥与粉煤灰质量比、料浆质量浓度-水泥与粉煤灰质量比相互作用的显著性。

由图 3 可知, 等高线由蓝色逐渐演变成橙色, 且三维曲面弯曲很显著, 这表明灰石比和料浆质量浓度两者之间的相互作用明显。与灰石比相比, 料浆质量浓度变化带来的抗压强度曲面比较陡峭, 这表明料浆质量浓度较灰石比对抗压强度的影响更明显。由图 4 可知, 等高线颜色几乎没有发生变化, 且其三维响应曲面较平缓, 这表明灰石比与水泥和粉煤灰质量比之间的交互作用不显著。同时, 还可从图 4 中看出, 三维响应曲面中水泥与粉煤灰质量比较灰石比方向陡峭, 这说明水泥与粉煤灰质量比较灰石比对抗压强度的影响更为明显。由图 5 可知, 等高线颜色由蓝色快速变为绿色后再变为橙红色, 且其三维响应曲面较陡峭, 这表明料浆质量浓度与水泥和粉煤灰质量比之间的相互作用比较明显。同时, 还可以看到料浆质量浓度较水泥与粉煤灰质量比方向陡峭, 这说明料浆质量浓度较水泥与粉煤灰质量比对抗压强度的影响更为明显。综上可知, 各因素对充填体抗压强度的影响敏感程度由大到小依次为料浆质量浓度、水泥与粉煤灰

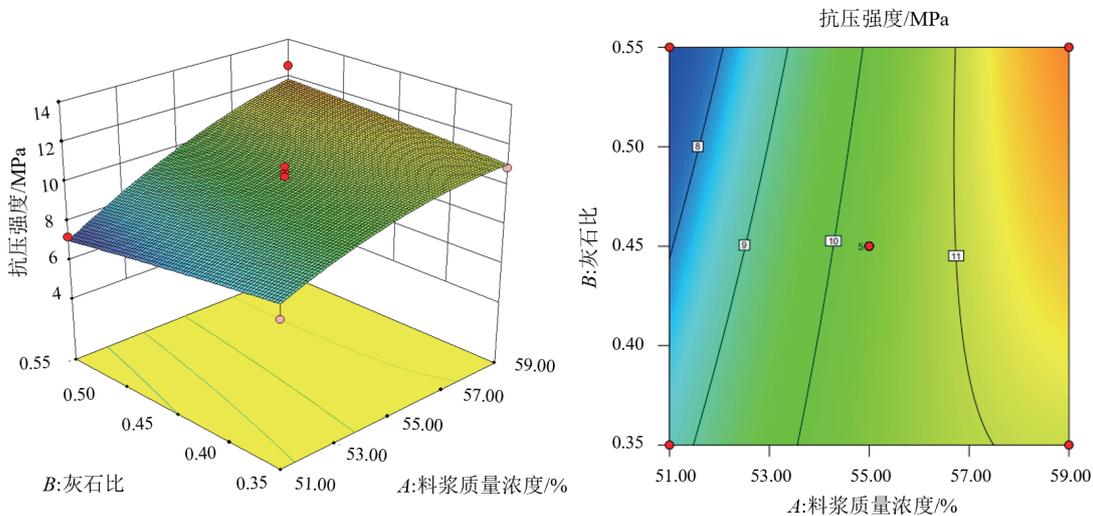


图 3 灰石比-料浆质量浓度的响应曲面与等高线

Fig. 3 Response surface and contour of ash-rock ratio-slurry concentration

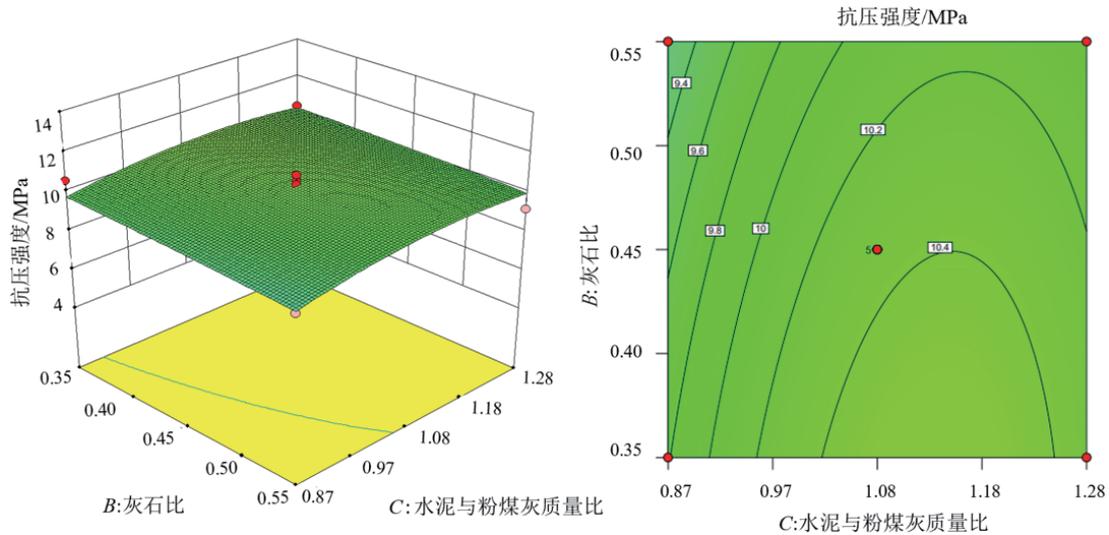


图 4 灰石比-水泥与粉煤灰质量比的响应曲面与等高线
Fig. 4 Response surface and contour of ash-rock ratio-cement to fly ash mass ratio

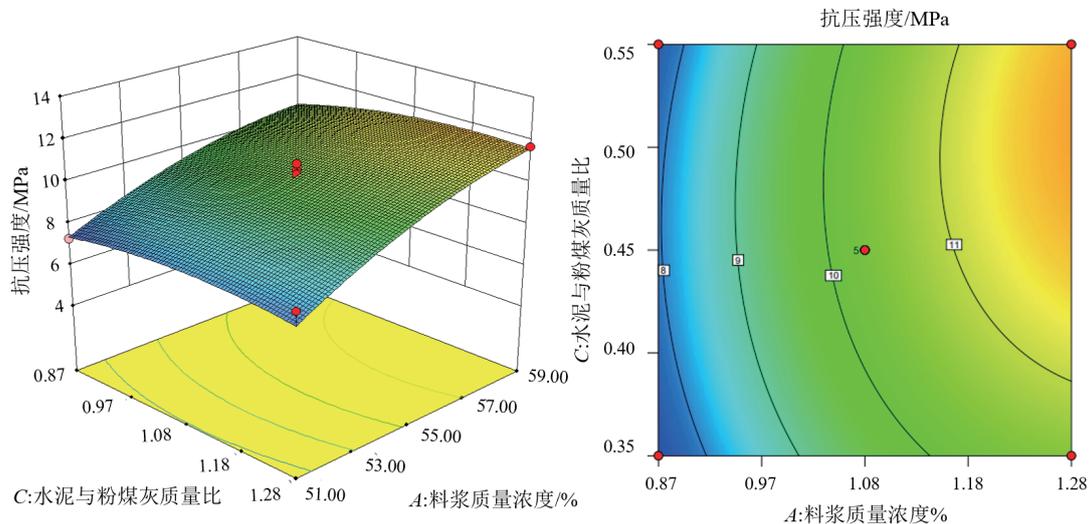


图 5 料浆质量浓度-水泥与粉煤灰质量比的响应曲面与等高线
Fig. 5 Response surface and contour of slurry concentration-cement to fly ash mass ratio

质量比、灰石比。

2.1.3 单轴抗压强度模型构建

通过 Design-Expert 软件,以充填体单轴抗压强度为响应值,对表 3 中的实验数据进行多元二次方程拟合,建立包含料浆质量浓度(A)、灰石比(B)、水泥与粉煤灰质量比(C)的充填体单轴抗压强度模型公式为:

$$\sigma = 10.34 + 1.79A - 0.21B + 0.32C + 0.61AB + 0.21AC + 0.062BC - 0.6A^2 - 0.051B^2 - 0.45C^2 \quad (1)$$

式中: σ 为单轴抗压强度, MPa。

对充填体单轴抗压强度模型进行显著性检验,回归模型相关分析结果如表 3 所示。

由表 3 可知,充填体单轴抗压强度的回归模型 F 值为 5.84, P 值为 0.014 8 < 0.05,这说明该模型显著^[13]。

表 3 充填体单轴抗压强度的回归模型方差分析结果
Table 3 Regression model analysis of variance results of uniaxial compressive strength of filling bodies

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	31.02	9	3.45	5.84	0.014 8
A	25.56	1	25.56	43.34	0.000 3
B	0.36	1	0.36	0.61	0.459 5
C	0.85	1	0.85	1.43	0.270 3
AB	1.50	1	1.50	2.54	0.154 7
AC	0.18	1	0.18	0.31	0.597 2
BC	0.016	1	0.016	0.026	0.875 3
A^2	1.52	1	1.52	2.58	0.152 2
B^2	0.011	1	0.011	0.019	0.894 9
C^2	0.86	1	0.86	1.45	0.267 1
残差	4.13	7	0.59		

相关性系数 $R^2 = 0.882 6$ 。

由 F 值检验结果可知, 对单轴抗压强度的影响因素的敏感程度由强到弱^[4] 依次为料浆质量浓度、水泥与粉煤灰质量比、灰石比, 这也验证了三维响应曲面实验分析结果。从图 6 可以看出, 通过相关性系数 R^2 检验可知抗压强度模型预测的试块抗压强度与实际实验值基本相吻合。这进一步证实通过响应曲面法建立的充填体单轴抗压强度模型基本合理且具有较高的准确性。

利用 Design-Expert 软件得到最佳配比参数为: 料浆质量浓度 56.44%、灰石比 0.35、水泥与粉煤灰质量比 1.28, 此时该模型理论计算得到的充填体单轴抗压强度为 11.05 MPa。为验证该强度模型的准确性, 选择料浆质量浓度 56%、灰石比 0.35、水泥与粉煤灰质量比 1.28 开展室内验证实验, 结果见表 4。由表 4 可知, 充填体单轴抗压强度实验值与响应曲面预测值误差为 5.52%, 这说明构建的充填体单轴抗压强度模型具有较高的准确性。

2.2 经济可行性分析

综上所述可知, 第 2、4、8、9、11 组充填材料配比方案的强度表明这几组方案从技术方面是可行的, 本文需要从经济方面对这 5 组与对照组进行对比分析, 筛选出满足矿山安全经济需求的充填材料配比方案。

本文主要计算依据水泥与粉煤灰的总成本, 已知当地水泥价格为 440 元/t, 粉煤灰价格为 100 元/t, 分别计算这 6 组每吨料浆的水泥和粉煤灰的消耗量及总成本, 如图 7 所示。

由图 7 对比分析可知, 与对照组相比, 仅有第 2 组、第 9 组和第 11 组较经济, 即这 3 组可以满足抗压强度的条件下同时节约水泥与粉煤灰的消耗成本。另外, 根据现场实施情况, 粗略估算每年充填需要消耗充填料浆约 10 万 t, 则这 3 组与对照组所消耗的水

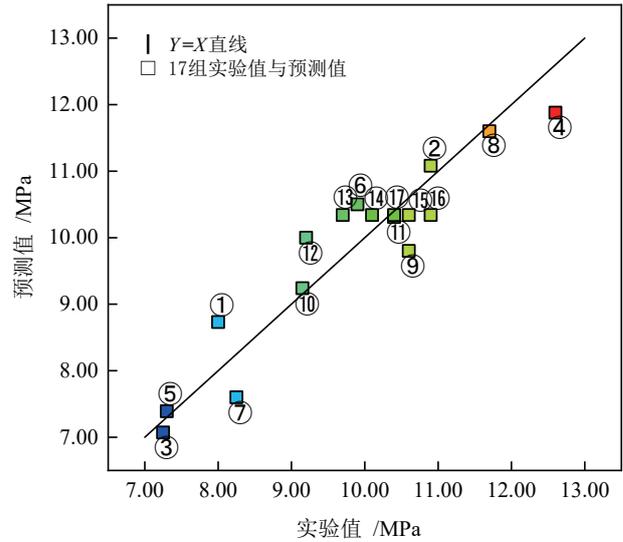


图 6 单轴抗压强度预测值与实验值对比

Fig. 6 Comparison of predicted and experimental values of uniaxial compressive strength

表 4 28 d 单轴抗压强度对比

Table 4 Comparison of 28 d uniaxial compressive strength

料浆质量浓度	灰石比	水泥与粉煤灰质量比	实验值/MPa	预测值/MPa
56%	0.35	1.28	10.43	11.04

泥和粉煤灰质量及其成本如图 8 所示。

由图 8 对比分析可知, 矿山在每年消耗充填料浆约 10 万 t 的条件下, 第 2 组、第 4 组和第 11 组这 3 组消耗总费用均比对照组少, 其中第 9 组节省总成本最多, 每年节省水泥和粉煤灰成本约 131 万元。

3 讨论与分析

为了揭示筛选的三组充填材料配比方案优于对照组的机理, 本文采用了 X 射线衍射仪和扫描电子显

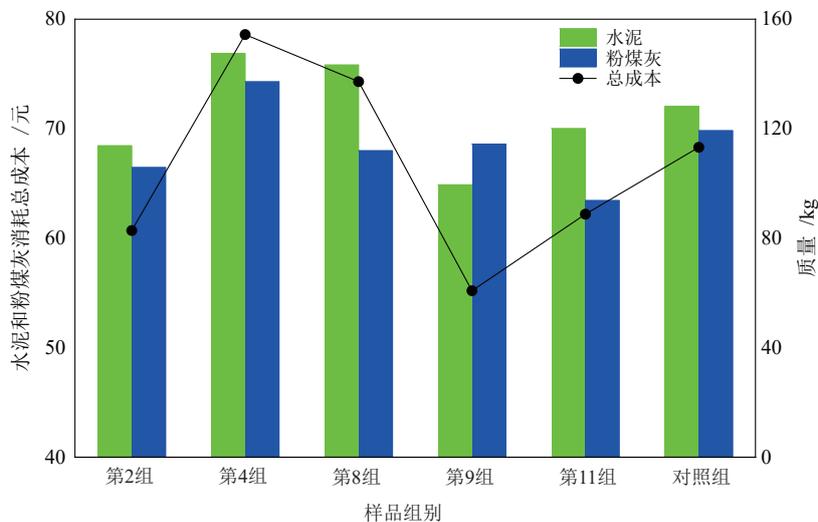


图 7 6 组每吨料浆的水泥和粉煤灰的消耗量及总成本

Fig. 7 Consumption and total cost of cement and fly ash per ton of slurry for 6 groups

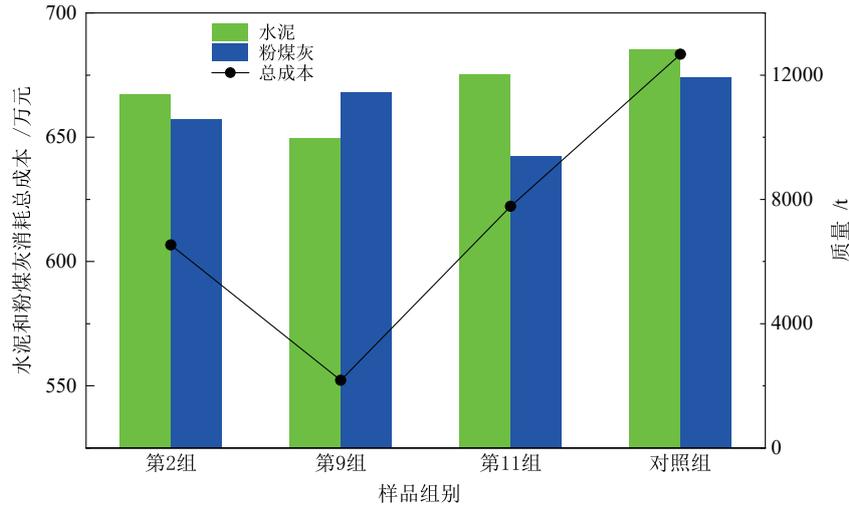


图 8 4 组料浆的水泥和粉煤灰的消耗量及总成本
Fig. 8 Consumption and total cost of cement and fly ash for 4 groups of slurry

显微镜对充填体分别进行物相组成和微观结构特征分析。

3.1 XRD 分析

由图 9 可看出, 28 d 龄期的 4 组颗粒级配优化废石-料浆胶结充填体主要含 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、 SiO_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 C-S-H 、 AFt 等矿物成分, 其中 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 与 SiO_2 含量较多。与对照组相比, 3 组优选方案中的第 2 组水泥水化产物钙矾石 AFt 和 C-S-H 的特征峰最为明显, 这说明该组料浆的水泥和粉煤灰水化反应^[15]过程更为充分, 并且与优选废石的胶结性更强, 这一点与其宏观抗压强度值的提高是吻合的。对于第 9 组和第 11 组, 虽然钙矾石 AFt 和 C-S-H 的特征峰也有所增强, 含量略有增加, 但这种增强并未导致抗压强度的显著提升, 只是相较于对照组有所提高。

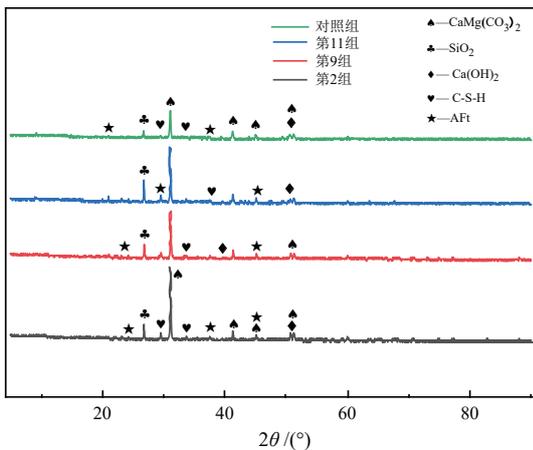


图 9 四组充填体 XRD 图谱
Fig. 9 XRD image of four groups of filling bodies

3.2 SEM 分析

利用 ZEISS Gemini 300 测试仪器分别对满足强度与经济要求的 3 组及对对照组进行 SEM 微观结构分

析, 获得 4 组充填体的微观结构图片, 见图 10~图 13。

图 10 为对照组充填材料水化 28 d 充填体的 SEM 微观结构。从图 10 中可以看出, 对照组的微观结构比优化的第 2 组、9 组、11 组这 3 组更粗糙, 粗骨料颗粒间的孔隙比较多, 胶凝材料水化反应生成的水化产物没有完全填充孔隙, 使其单轴抗压强度较低。同时, 还可以从图 10 中发现生成的水化产物主要为网状的 C-S-H 凝胶和针棒状的 AFt , 但没有较好地与其他水化产物和未反应的粉煤灰交织连接在一起填充填充骨料孔隙, 而是赋存在孔洞附近, 使得充填体结构不够致密, 影响最终的抵抗外部荷载压缩破坏的能力。

图 11 为第 2 组充填材料水化 28 d 充填体的 SEM 微观结构。从图 11 中可以看出, 第 2 组胶凝材料水化养护 28 d 后, 充填体内部结构比较致密, 仅有极少量的微孔洞。这是因为其颗粒间的孔隙结构被水泥和粉煤灰遇水发生水化反应产生的水化产物如硅酸钙 (C-S-H)、氢氧化钙 (CH) 及钙矾石 (AFt) 等及未参与水化反应的粉煤灰联合充填, 使得 28 d 后充填体的微观结构更加致密, 具有较强的抵抗压缩破坏的能力, 这也从微观角度揭示了其单轴抗压强度比对照组更强的原因。

图 12 为第 9 组充填材料水化 28 d 充填体的 SEM 微观结构。由图 12 可知, 充填体试件微观结构面较为平整, 但也存在一些微孔洞, 与第 2 组相比结构较疏松, 而与对照组相比, 其整体结构较致密。其颗粒孔隙主要被网状的水化产物 C-S-H 凝胶所覆盖, 并伴有少量的针状 AFt 及 CH 等。这些新生成的水化产物与部分粉煤灰相互交叉连接较好, 使得该组充填体单轴抗压强度与对照组相比略微提升。

图 13 为第 11 组充填材料水化 28 d 充填体的 SEM 微观结构。从图 13 中可以看出, 胶凝材料水化作用 28 d 后, 充填骨料中的孔隙绝大部分被生成的水化产

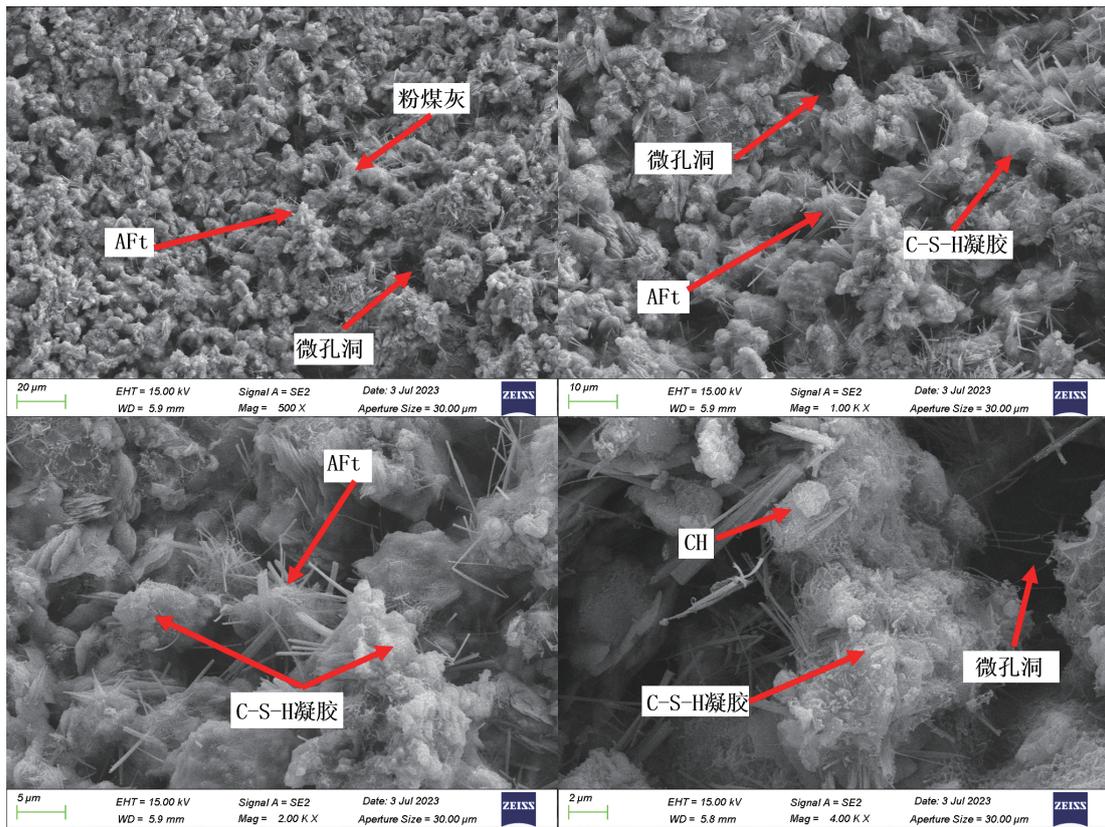


图 10 对照组充填体微观结构
Fig. 10 Microstructure of the filling bodies in the control group

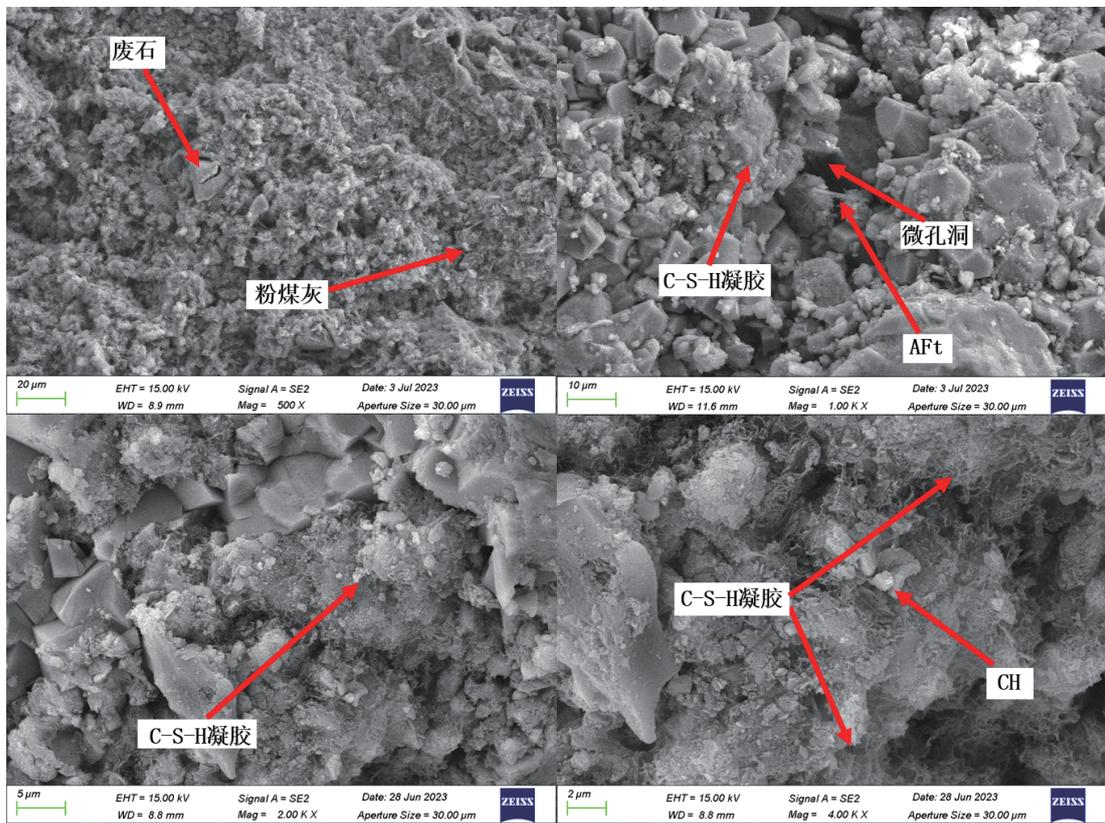


图 11 第 2 组充填体微观结构
Fig. 11 Microstructure of Group 2 filling bodies

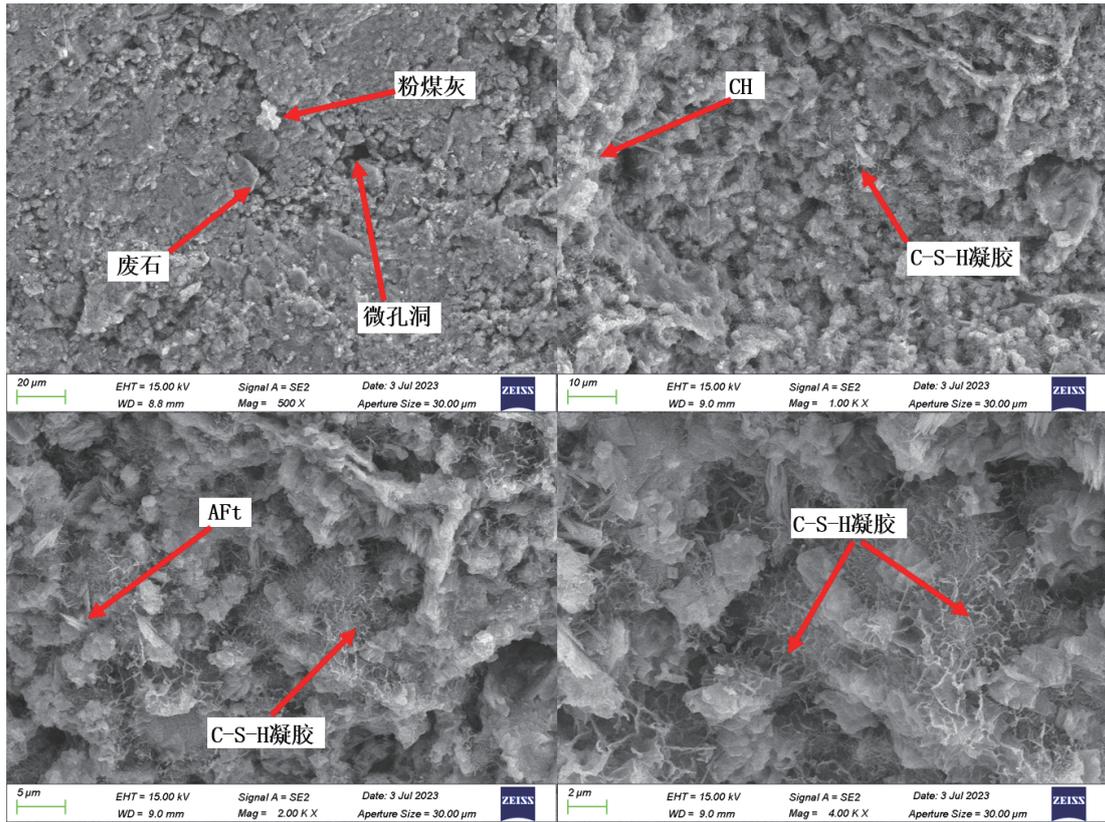


图 12 第 9 组充填体微观结构
Fig. 12 Microstructure of Group 9 filling bodies

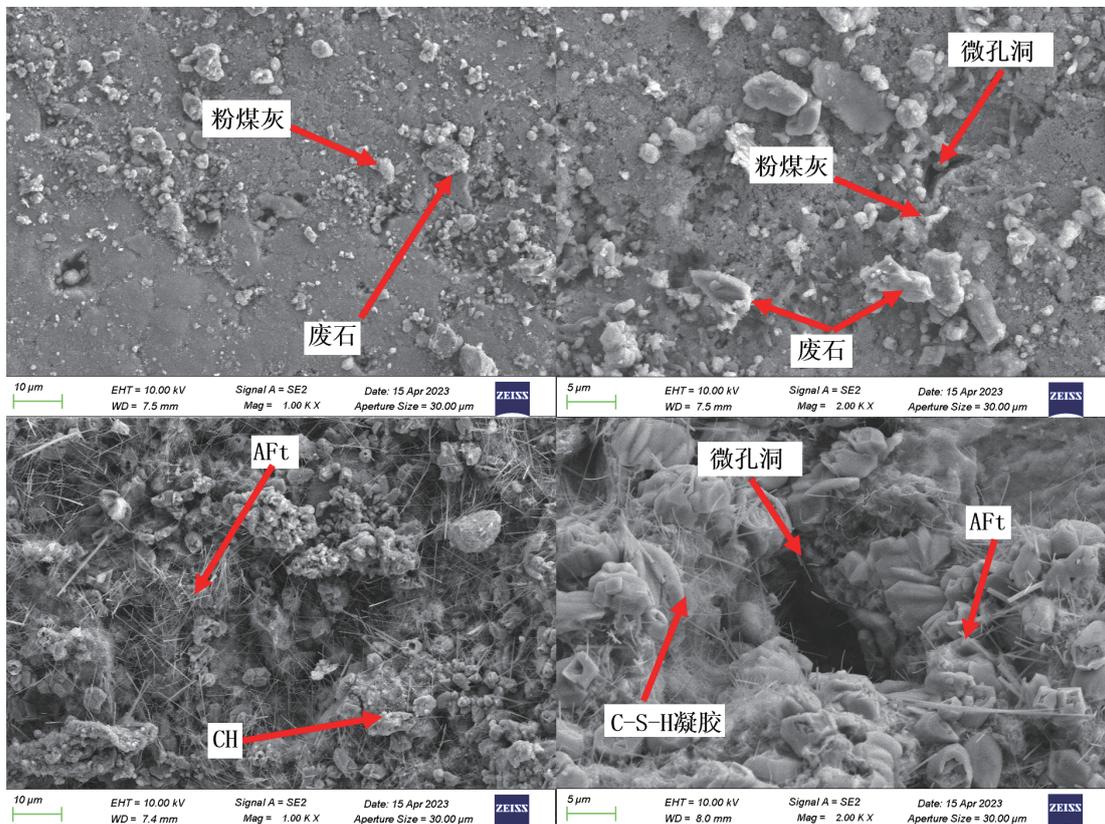


图 13 第 11 组充填体微观结构
Fig. 13 Microstructure of Group 11 filling bodies

物所充填, 其中包含较多的针状 AFt、少量的 C-S-H 凝胶和 CH。然而, 在粗颗粒之间也可能因为水化作用不充分导致形成较多的 AFt, 使得部分孔隙没有被填充, 从而形成较大尺寸的孔隙, 进而使其抵抗外部荷载的能力较弱, 但高于对照组。

4 结论

(1) 对充填体单轴抗压强度影响敏感程度高低顺序依次为料浆质量浓度、水泥与粉煤灰质量比、灰石比。通过多元二次回归分析建立的充填体单轴抗压强度模型可靠性较高, 可为优化废石-砂浆胶结充填材料配比参数提供理论参考。

(2) 采用优化颗粒级配废石-料浆井下协同胶结充填工艺除了可以节约破碎、泵送成本外, 最主要的能降低胶凝材料成本。其中最优的充填配比参数为: 料浆质量浓度 55%、灰石比 7: 20、水泥与粉煤灰质量比 87: 100, 可节约 131 万元/10 万 t 充填材料。

(3) 优选的废石-料浆胶结充填体的微观结构较为致密, 孔隙比例较少, 具有较强的抵抗外界压缩破坏的能力。本研究成果可为减少排土场废石堆积而带来的矿山安全隐患提供理论依据。

参考文献:

- [1] 侯杰, 雷琼. 我国磷矿资源开发利用现状分析[J]. *磷肥与复肥*, 2024, 39(5): 29-31+34.
HOU J, LEI Q. Analysis of the current status of development and utilization of phosphate resources in China[J]. *Phosphate and Compound Fertilizers*, 2024, 39(5): 29-31+34.
- [2] 赵玉凤, 李文超, 王海军. 中国磷矿资源开发利用现状与思考[J]. *产业创新研究*, 2021(16): 62-63+69.
ZHAO Y F, LI W C, WANG H J. Current status and reflection on the development and utilization of phosphate resources in China[J]. *Industrial Innovation Research*, 2021(16): 62-63+69.
- [3] 邓久帅, 王亮, 王若含. 绿色矿山资源与环境平衡体系研究: 资源平衡篇[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(2): 130-135.
DENG J S, WANG L, WANG R H. Research on the balance system of green mining resources and environment: Resource balance chapter[J]. *Green Mines*, 2024, 2(2): 130-135.
- [4] 崔文瑞, 郑海平, 赵小五, 等. 中国绿色矿山建设进展研究及思考[J]. *能源与节能*, 2024(5): 57-60.
CUI W R, ZHENG H P, ZHAO X W, et al. Research and reflection on the progress of green mining construction in China[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2024(5): 57-60.
- [5] 于恩毅, 黄旭东, 王珍岐, 等. 废石掺量对胶结充填体强度及变形破坏的影响[J]. *金属矿山*, 2020(8): 44-48.
YU E Y, HUANG X D, WANG Z Q, et al. The influence of waste rock content on the strength and deformation failure of cemented filling materials[J]. *Metal Mines*, 2020(8): 44-48.
- [6] 谭伟, 高忠, 黄明清, 等. 废石胶结充填相似模拟试验及其强度异质分布[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(6): 45-50.
TAN W, GAO Z, HUANG M Q, et al. Similarity simulation test and strength heterogeneity distribution of waste rock cemented filling[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(6): 45-50.
- [7] 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 J, LIU Z T, LI Y X, et al. The optimal ratio and application of fully tailings and waste rock combined cemented filling material[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2020, 40(3): 10-14+19.
- [8] 全文慧, 朱万成, 牛雷雷. 废石尾砂胶结充填体断裂特性试验研究[J]. *金属矿山*, 2021(12): 118-123.
TONG W H, ZHU W C, NIU L L. Experimental study on fracture characteristics of waste rock tailings cemented filling body[J]. *Metal Mines*, 2021(12): 118-123.
- [9] 戚亮, 李峥, 黄彦森. 不同骨料类型对充填体强度性能的影响及配比优化[J]. *金属矿山*, 2022(12): 52-58.
QI L, LI Z, HUANG Y S. The influence of different types of aggregates on the strength performance of filling materials and the optimization of proportioning[J]. *Metal Mines*, 2022(12): 52-58.
- [10] 吴鹏, 王贻明, 吴爱祥, 等. 基于全面试验的钒铁矿开采充填材料配比优化研究[J]. *金属矿山*, 2016(10): 5-10.
WU P, WANG Y M, WU A X, et al. Research on optimization of filling material proportions for vanadium iron ore mining based on comprehensive experiments[J]. *Metal Mines*, 2016(10): 5-10.
- [11] SHI Y B, YE Y C, HU N Y, et al. Experiments on material proportions for similar materials with high similarity ratio and low strength in multilayer shale deposits[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(20): 9620.
- [12] 刘德峰, 崔晨冉, 郑彦涛, 等. 废石颗粒级配优化对充填材料性能的影响机制[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, 76(5): 93-102.
LIU D F, CUI C R, ZHENG Y T, et al. The influence mechanism of particle grading optimization of waste rock on the performance of filling materials[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2024, 76(5): 93-102.
- [13] 陈久昌, 姚清霞, 邱建民, 等. 响应曲面法优化 MgO 沉淀离子型稀土矿浸出液工艺[J]. *中国稀土学报*, 2020, 38(5): 646-654.
CHEN J C, YAO Q X, QIU J M, et al. Optimization of MgO precipitation ion type rare earth ore leaching solution process using response surface methodology[J]. *Chinese Journal of Rare Earth*, 2020, 38(5): 646-654.
- [14] 刘立新, 黄彪林, 黄李金鸿, 等. 响应曲面法优化金精矿生物氧化渣非氰浸金过程[J]. *矿冶工程*, 2022, 42(4): 100-105.
LIU L X, HUANG B L, HUANG L J H, et al. Optimization of non cyanide leaching process of gold concentrate bio oxidized slag using response surface methodology[J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2022, 42(4): 100-105.
- [15] 李林香, 谢永江, 冯仲伟, 等. 水泥水化机理及其研究方法[J]. *混凝土*, 2011(6): 76-80.
LI L X, XIE Y J, FENG Z W, et al. Cement hydration mechanism and its research methods[J]. *Concrete*, 2011(6): 76-80.

Experimental Study on Particle Grading Priority of Waste Rock–Slurry Bonding Filling in Xifeng Phosphate Mine

LIU Defeng¹, XIONG Zhiyang¹, ZHENG Yantao^{1,2}, REN Jinhua³, WANG Liangqun², ZHU Fuxing⁴

1. Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, Hubei, China;

2. Guizhou Xi feng Phosphate Rock Corporation Limited, Guiyang 551100, Guizhou, China;

3. Guizhou Chemical Construction Co., Ltd., Guiyang 550001, Guizhou, China;

4. Guizhou Zijin Mining Co., Ltd., Southwest Guizhou Prefecture 562205, Guizhou, China

Abstract: To reduce the cost of filling and the potential safety hazards caused by the accumulation of waste rock in the waste dump, the waste rock–slurry cemented filling process is adopted in Xifeng Phosphorite Mine. Through a combination of research methods such as the response surface method, technical and economic analysis and microstructure characterization, the sensitivity of the main influencing factors was analyzed. Besides, the filling ratio parameters were optimized, and the mechanism of the hydration products was revealed. The research results indicated that the sensitivity of the influencing factors of the uniaxial compressive strength of the filling body is in the order of slurry concentration > cement to fly ash mass ratio > ash to rock ratio. Under the conditions of 55% slurry concentration, ash-to-rock ratio of 7 : 20, and cement-to-fly ash ratio of 87 : 100, the strength of the filling body reaches 10.60 MPa, saving a total cost of over 1.31 million yuan/100,000 t of filling material per year. The pore structure of the optimized filling bodies is filled with hydration products such as calcium silicate (C–S–H), calcium hydroxide (CH) and alumina (AFt) in combination with fly ash that is not involved in the hydration reaction. The microstructure is dense and has strong resistance to external compression damage. The research results can provide a theoretical basis and technical support for the safe mining of open-pit to underground filling.

Keywords: cemented filling; response surface method; waste rock; fly ash

引用格式: 刘德峰, 熊志洋, 郑彦涛, 任金华, 王良群, 朱复兴, 息烽磷矿颗粒级配优选废石-料浆胶结充填实验[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(6): 103–112.

LIU Defeng, XIONG Zhiyang, ZHENG Yantao, REN Jinhua, WANG Liangqun, ZHU Fuxing. Experimental study on particle grading priority of waste rock–slurry bonding filling in xifeng phosphate mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(6): 103–112.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn