

全固废膏体关键性能指标的多目标优化

阮竹恩^{1,2)}, 吴爱祥^{1,3)}✉, 王贻明^{1,3)}, 王少勇^{1,3)}, 王建栋^{1,3)}

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学顺德研究生院, 佛山 528399 3) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: wuaixiang@126.com

摘 要 在全尾砂膏体充填的基础上提出了全固废膏体充填, 将全尾砂、废石、水淬渣等固废制备成膏体料浆充填至井下采空区, 实现采空区垮塌、尾矿库溃坝和废石场滑坡的协同治理, 达到“全废治三害”的效果。为此, 研究了固体质量分数、废石掺量和胶固粉耗量对全固废膏体的塌落度、屈服应力、单轴抗压强度和泌水率的影响。根据国家标准规定的技术指标范围, 对全固废膏体的关键性能指标进行了多目标优化。研究发现, 全固废膏体的关键性能指标和全尾砂膏体相似, 具有良好的流动性、输送性能与力学性能, 并具有一定的泌水性。固体质量分数、废石掺量和胶固粉耗量对全固废膏体的关键性能指标具有显著的影响, 其中固体质量分数对塌落度和屈服应力影响最大, 胶固粉耗量对单轴抗压强度和泌水率的影响最大。通过研究, 最终多目标优化所得最优参数是固体质量分数为 79.31%、废石掺量为 18.86%(质量分数)、胶固粉耗量(胶固粉质量与全尾砂和废石质量之和的比值)为 3 : 20, 对应的塌落度为 25.45 cm、屈服应力为 100.49 Pa、单轴抗压强度为 3.55 MPa、泌水率为 1.50%。多目标优化结果可为实际应用提供参考, 而总评归一值模型也可应用于其他矿山膏体的多目标优化。

关键词 全固废膏体充填; 总评归一值; 塌落度; 屈服应力; 单轴抗压强度; 泌水率

分类号 TD853

Multiple response optimization of key performance indicators of cemented paste backfill of total solid waste

RUAN Zhu-en^{1,2)}, WU Ai-xiang^{1,3)}✉, WANG Yi-ming^{1,3)}, WANG Shao-yong^{1,3)}, WANG Jian-dong^{1,3)}

1) School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Shunde Graduate School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528399, China

3) Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mines (Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: wuaixiang@126.com

ABSTRACT Tailings and waste rock produced in metal mines are the most common industrial solid wastes all over the world, resulting in serious environmental and safety issues. Cemented paste backfill (CPB) is widely used for tailings management and stope treatment. CPB of total solid waste (TSW-CPB) was proposed on the basis of CPB of full-tailings. In the TSW-CPB process, thickened full-tailings, waste rock, and slag are mixed to prepare a paste that is filled into the stope. TSW-CPB can avoid the collapse of a stope, failure of the tailings storage facility, and landslide of a waste-rock yard, achieving the goal of “total waste to cure three harms.” The effects of solid fraction (SF), waste rock dosage (WRD), and glue powder dosage (GPD) on the slump (S), yield stress (τ_0), uniaxial compressive strength (UCS), and bleeding rate (BR) were investigated through orthogonal experiments. According to the scope of technical indicators specified in the National Standard of the People’s Republic of China “Technical specification for the total tailings

收稿日期: 2021–08–15

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(52130404); 中国博士后科学基金资助项目(2021M690011); 北京市自然科学基金资助项目(8192029); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2021A1515110161); 北京科技大学顺德研究生院博士后科研经费资助项目(2021BH011)

paste backfill (GB/T 39489—2020),” the overall desirability function approach was used to conduct multiple response optimization of key TSW-CPB performance indicators. TSW-CPB was shown to have similar fluidity, transportation performance, mechanical properties, and bleeding performance to the CPB of full-tailings. The SF, WRD, and GPD affect the S , τ_0 , UCS, and BR of TSW-CPB considerably. The SF has the most important influence on S and τ_0 , while GPD has the most substantial impact on UCS and BR. Multiple response optimization yielded SF = 79.31%, WRD = 18.86%, and GPD = 3:20, with S = 25.45 cm, τ_0 = 100.49 Pa, UCS = 3.55 MPa, and BR = 1.50% as the corresponding responses. The optimal results can provide references for practical application, and the overall desirability function approach can be used in other mines to optimize multi objective CPB.

KEY WORDS cemented paste backfill of total solid waste; overall desirability; slump; yield stress; uniaxial compressive strength; bleeding rate

全尾砂膏体充填技术因其安全、环保、经济、高效的优点已经广泛应用于国内外多座矿山,在尾矿处置、采空区治理等方面取得了较好的效果^[1-2]。在全尾砂膏体充填工艺过程中,来自选厂的低浓度全尾砂料浆通过深锥浓密机进行深度脱水获得高浓度的底流,再与水泥搅拌制备成不分层、不离析、不脱水的膏体料浆,最后通过管道输送至井下采空区进行充填,实现了“一废治两害”,即利用全尾砂这一固体废弃物治理了采空区垮塌和尾矿库溃坝两大灾害。我国学者围绕全尾砂浓密^[3-5]、膏体搅拌制备^[6-8]、膏体管道输送^[9-12]以及采场充填体力学性能^[13-16]等方面进行了广泛而深入的研究,取得了很好的研究成果,促进了全尾砂膏体充填技术的发展与应用。

据《中国矿产资源节约与综合利用报告(2015)》^[17]显示,我国废石堆存 438 亿吨,约为堆存尾矿的 3 倍,同样造成了严重的安全与环境问题。近年来开始将废石以粗骨料的形式加入到全尾砂膏体中,再进行采空区充填^[18-19]。为此,学者们围绕废石添加对膏体充填的影响进行了研究。分析了废石对膏体输送性能^[20]、抗离析性能^[21]和充填体力学特性^[22]的影响,发现添加废石有利于提高充填体的稳定性和降低充填成本。同时,以高炉水淬渣为原料的胶固粉也被广泛应用于矿山充填中,胶固粉与水泥相比在离析、泌水率、早凝早强等方面具有较好的性能^[23]。

为此,本文在全尾砂膏体充填的基础上,结合国内外研究现状,提出全固废膏体充填,即应用矿山的全尾砂、废石、水淬渣等全部固体废弃物进行膏体充填,将矿山的废石作为粗骨料添加到全尾砂料浆中,并应用胶固粉代替水泥,实现“全废治三害”。全废是指矿山全固废,三害是指采空区垮塌、尾矿库溃坝和废石场滑坡。结合国家标准《全尾砂膏体充填技术规范》^[24]中对膏体充填关键技术指标范围的规定,应用正交设计重点研究固

体质量分数、废石掺量和胶固粉耗量对全固废膏体的塌落度、屈服应力、单轴抗压强度和泌水率的影响,再应用总评归一值模型进行全固废膏体关键性能指标的多参数多目标优化。

1 实验材料与方案

1.1 实验材料

本文实验所用全尾砂和废石来源于某铅锌矿,用以水淬渣为原料制备的胶固粉作为胶凝材料。

全尾砂、废石和胶固粉的密度分别为 2.739、2.536 和 3.145 g·cm⁻³。

考虑粗骨料粒径对膏体料浆离析性能的影响^[25],本文所用的废石为粒径在 1 cm 以下的废石,应用筛分法确定其粒径组成,0.5 ~ 1 cm 的废石质量分数为 98.90%,废石粒级分布如表 1 所示。同时,采用欧美克 TopSizer 激光粒度分析仪分析全尾砂和胶固粉的粒径组成,所得粒径分布如图 1 所示。可以看出,胶固粉的粒径非常小,都在 100 μm 以下;全尾砂中-20 μm 和-200 μm 颗粒的质量分数分别为 27.14% 和 85.94%。

表 1 废石粒级分布

Table 1 Particle-size distribution of waste rock

Particle size/cm	Volume fraction/%
-0.5	1.10
0.5-0.6	12.71
0.6-0.7	8.87
0.7-0.8	6.80
0.8-0.9	14.83
0.9-1.0	55.69

实验过程中用实验室的自来水混合搅拌全尾砂、废石和胶固粉,按照膏体质量分数、废石掺量和胶固粉耗量制备全固废膏体。

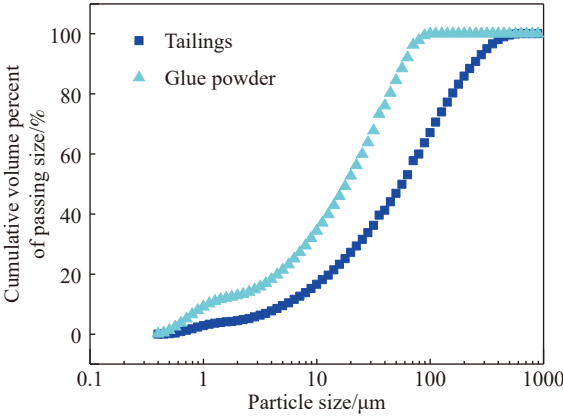


图 1 全尾砂和胶固粉粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of full-tailings and glue powder

1.2 实验方案

本文重点研究全固废膏体中固体质量分数(SF)、废石掺量(WRD)和胶固粉耗量(GPD)三个参数对全固废膏体的塌落度(S)、屈服应力(τ_0)、单轴抗压强度(UCS)和泌水率(BR)的影响。

SF 是指全固废膏体中所有固体(全尾砂、废石和胶固粉)的质量分数, WRD 是指废石的质量与全尾砂的质量之比, GPD 是指胶固粉质量与全尾砂和废石质量之和的比值。

S 由标准塌落度桶测得, τ_0 为采用 ICAR 流变仪测得的全固废膏体料浆的动态屈服应力, UCS 为全固废膏体在温度为 20 ℃、相对湿度为 90%±2% 的条件下养护 28 d 后所测得的单轴抗压强度, BR 为泌水量与全固废膏体质量的比值。ICAR 流变仪属于混凝土流变仪, 应用四叶桨式转子, 桨叶高度为 127 mm、半径为 63.5 mm, 测试容器半径为 143 mm, 适合测含有粗骨料的料浆的流变参数。ICAR 流变仪的具体测试方法在相关文献已详细介绍^[26]。

针对全固废膏体研究的多参数多目标优化, 本文采用正交实验设计分析各参数对各个目标的影响规律。基于前期探索实验, 每个参数各设置四个水平, 按照 $L_{16}(4^3)$ 正交实验表, 本文实验方案设计如表 2 所示。

表 2 $L_{16}(4^3)$ 正交实验表及实验结果

Table 2 Parameters and results of the $L_{16}(4^3)$ orthogonal experiment

Experiment number	Factors			Responses			
	SF/%	WRD/%	GPD	S /cm	τ_0 /Pa	UCS/MPa	BR/%
1	77 (Level 1)	5 (Level 1)	1 : 10 (Level 1)	28.1	59.439	1.4	13.69
2	77	10 (Level 2)	1 : 8 (Level 2)	27.9	62.236	1.6	11.83
3	77	15 (Level 3)	1 : 6 (Level 3)	28.0	82.282	2.7	5.60
4	77	20 (Level 4)	1 : 4 (Level 4)	28.3	91.606	2.6	0.44
5	78 (Level 2)	5	1 : 8	26.9	170.860	2.1	6.24
6	78	10	1 : 10	27.8	160.138	0.6	11.98
7	78	15	1 : 4	27.6	105.192	3.9	0.43
8	78	20	1 : 6	26.8	62.935	3.4	2.68
9	80 (Level 3)	5	1 : 6	25.4	269.683	5.1	0.21
10	80	10	1 : 4	25.7	224.236	6.3	0.42
11	80	15	1 : 10	26.5	149.413	1.5	5.12
12	80	20	1 : 8	26.1	116.081	3.6	1.48
13	81 (Level 4)	5	1 : 4	24.7	321.436	10.6	0.32
14	81	10	1 : 6	25.8	241.718	6.1	0.14
15	81	15	1 : 8	25.9	168.060	4.0	0.94
16	81	20	1 : 10	26.3	166.429	3.1	0.88

1.3 多目标优化方法

本文中有 S 、 τ_0 、UCS 和 BR 四个响应目标, 因此采用 Derringer 和 Suich 提出的总评归一值法进行多目标优化^[27]。在总评归一值法中, 通过求解总评归一值函数(OD)的最大值, 获得最优参数。

在本文 OD 函数中, 首先基于正交实验结果, 建立各个响应目标关于三个参数的二次多项式回归模型, 如式(1)所示。

$$y_m = \beta_{m0} + \sum_{i=1}^k \beta_{mi} x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{mii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{mij} x_i x_j \quad (1)$$

其中, y_m 为响应目标, 本文中 y_1 、 y_2 、 y_3 和 y_4 分别为 S 、 τ_0 、UCS 和 BR 的值; x_i 和 x_j 为影响参数, 本文中 x_1 为 SF、 x_2 为废石掺量 WRD、 x_3 为 GPD; k 为影响参数的个数, 本文中为 3; β_{m0} 、 β_{mi} 、 β_{mii} 和 β_{mij} 分别为常数项、一次项、相互作用项和平方项的回归系数。

然后采用单边变换函数对响应目标 y_m 转换成值为 0~1 的期望函数 d_m , 对于实际中期望越小越好的响应目标 y_m 采用式(2)进行转换, 而对于期望越大越好的响应目标 y_m 采用式(3)进行转换。

$$d_m = \begin{cases} 1 & y_m \leq y_{m,\min} \\ \left(\frac{y_m - y_{m,\max}}{y_{m,\min} - y_{m,\max}} \right)^w & y_{m,\min} < y_m < y_{m,\max} \\ 0 & y_m \geq y_{m,\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$d_m = \begin{cases} 0 & y_m \leq y_{m,\min} \\ \left(\frac{y_m - y_{m,\min}}{y_{m,\max} - y_{m,\min}} \right)^w & y_{m,\min} < y_m < y_{m,\max} \\ 1 & y_m \geq y_{m,\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $y_{m,\min}$ 和 $y_{m,\max}$ 分别为实验中响应目标 y_m 的最小值和最大值, w 为权重因子, 通常设置为 0.3^[28-29]。

再基于各个响应目标的期望函数 d_m 的几何平均数, 建立 OD 函数如式(4)所示。

$$OD = (d_1 \cdot d_2 \cdots d_n)^{1/n} \quad (4)$$

其中, OD 的值为 [0, 1], n 是响应目标的个数。

最后应用 MATLAB 软件求解 OD 的最大值确定最优参数。

2 结果分析与讨论

2.1 正交实验结果

根据正交实验方案, 获得正交实验结果如表 2 和图 2 所示。

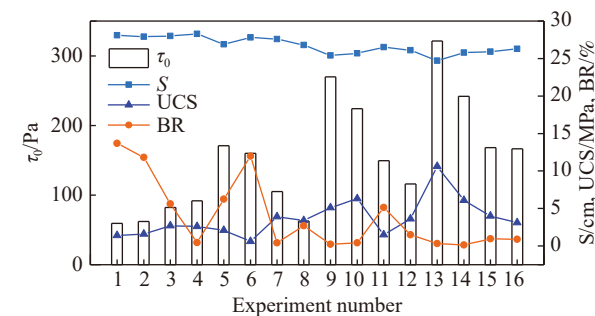


图2 正交实验结果的变化规律

Fig.2 Evolution of orthogonal experiment results

不同配比条件下全固废膏体的 τ_0 变化显著, 最小值和最大值分别为 59.439 Pa 和 321.436 Pa. 全固废膏体的 S 值变化不明显, 在 25~28 cm 的小范围内波动. 全固废膏体的 UCS 变化显著, 最大值达到了 10.6 MPa 而最小值仅为 0.6 MPa. 同时, 第 1 组实验中全固废膏体的泌水现象最明显, BR 达到了 13.69%; 而第 9 组实验中全固废膏体基本不泌水, BR 仅为 0.21%。

从图 2 可看出, UCS 的变化趋势基本和 τ_0 一致, 但是第 4、5 组实验之间和第 9、10 组实验之间的 UCS 的变化趋势却和 τ_0 相反; 同时, BR 的变化趋势基本和 τ_0 、UCS 相反, 第 4、5 组实验之间的变化趋势却和 τ_0 相同, 第 9、10 组实验之间的变化趋势却和 UCS 相同. UCS 和 BR 的变化趋势中出现“异常趋势”的原因可能是 WRD 和 GPD 交互作用的影响。

根据国家标准《全尾砂膏体充填技术规范》的规定^[24], 全尾砂膏体性能指标的建议范围如表 3 所示. 对比表 2 和表 3, 可以发现全固废膏体的 S 均大于 18 cm, 同时除了第 9、10、13 和 14 组实验外 τ_0 都小于 200 Pa, 说明本文中的全固废膏体具有较好的流动性与输送性能. 同时, UCS 均大于 0.2 MPa 且部分大于 5 MPa, 说明全固废膏体具有较好的力学性能. 但是, BR 均不在规定的范围内, 仍需要对 SF、WRD 和 GPD 进行优化。

表3 全尾砂膏体的性能指标范围

Table 3 Property range of full-tailings paste

S/cm	τ_0/Pa	UCS/MPa	BR/%
18~26	100~200	0.2~5	1.5~5

2.2 全固废膏体性能单目标优化分析

根据正交实验方案, 应用 Minitab 软件进行极差分析, 确定各个响应目标的主要影响参数、各参数对各响应目标的最优水平以及各个响应目标的最优参数组合. 极差分析结果如图 3 所示。

2.2.1 全固废膏体的塌落度优化分析

由图 3 可知, 全固废膏体的 S 随着 SF 的增大而先降低后升高, 在 SF=80% 处达到最小值 25.47 cm. 因为 SF 增大过程中, WRD 和 GPD 也在不断变化, 进而导致 S 随 SF 的变化规律和全尾砂膏体随固体质量分数的变化规律^[13,30] 不同. 添加废石后, 全固废膏体内颗粒之间的摩擦力发生改变, 导致 S 随着 WRD 的增大而先升高后降低, 在 WRD=15% 处达到最大值 27.05 cm. 同时, 虽然 S 随着 GPD 的增大先降低后增大, 但是 GPD>1:8 后 S 基本稳定在 26.5 cm 左右. S 与 GPD 的非线性关系与全尾砂

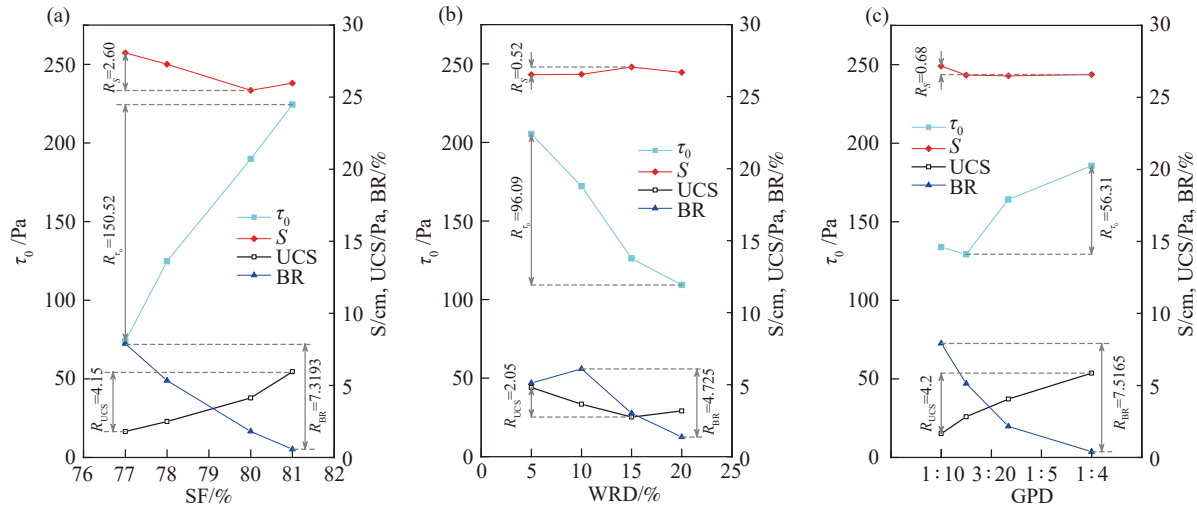


图3 基于极差分析的各响应目标随参数(a)SF,(b)WRD,(c)GPD的变化规律

Fig.3 Evolution of each response with (a) SF, (b) WRD, and (c) GPD by range analysis

膏体的 S 随着水泥耗量的增大而不断波动的现象相似^[13,30]。

通过比较极差大小可知, 参数 SF 的极差最大 (2.50)、WRD 的极差最小 (0.52), 说明三个参数中 SF 对 S 的影响最显著, 各参数对 S 的影响显著性顺序为: SF > GPD > WRD。对于全固废膏体, S 越大, 流动性越好。因此, 以 S 最大为目标进行分析, 在本文实验的范围内, 各参数的最优水平分别为: SF=77%、WRD=15%、GPD=1:10, 进而得到最优参数组合为 SF₁GPD₁WRD₃。

2.2.2 全固废膏体的屈服应力优化分析

全固废膏体的 τ_0 分别与 SF 和 WRD 呈正相关和负相关, 而随着 GPD 的增大先降低后增大。 τ_0 随着 SF 的变化规律和全尾砂膏体的 τ_0 相似^[31]。随着 SF 的增加, 全固废膏体内颗粒间的距离减小, 相互作用力增强, 从而导致 τ_0 增大。同时, 因为废石的粒径大于全尾砂, 比表面积较小, 因此保水性能较差, 从而导致添加废石越多, 屈服应力越低。但是, 因为 SF、WRD 和 GPD 三者的共同作用, 导致 τ_0 随着 GPD 并不呈现出单调递增或者单调递减的关系, 因为添加的废石改变了全固废膏体中固体颗粒的粒径分布, 进而影响流变特性^[32]。

通过极差分析可知, SF 对 τ_0 的影响最显著, 各参数对 τ_0 的影响显著性顺序为: SF > WRD > GPD。对于全固废膏体, τ_0 越大, 管道输送阻力越大, 不利于全固废膏体充填的成本控制与稳定性。因此, 以 τ_0 最小为目标进行分析, 各参数的最优水平分别为: SF=77%、WRD=20%、GPD=1:8, 进而得到最优参数组合为 SF₁WRD₄GPD₂。

通过坍塌度和屈服应力的分析可知, 坍塌度

和屈服应力有一定的关系。但因为坍塌度不仅仅与屈服应力有关, 还与全固废膏体的黏度相关, 因此屈服应力越大、并不意味着坍塌度越小, 不能简单地建立屈服应力与坍塌度之间的关系模型。

2.2.3 全固废膏体的单轴抗压强度优化分析

全固废膏体的 UCS 随着 SF 和 GPD 均近似呈正向线性关系, 这与全尾砂膏体的 UCS 的变化规律相同^[29-30]。因为 GPD 的增加导致水化产物的增多从而导致 UCS 增大。同时, 因为添加了废石后在废石表面形成界面过渡区, 导致 UCS 随着 WRD 的增大先降低。但是, 因为本文中多参数的共同作用, 以及废石颗粒矿物性质与表面形貌的影响^[33-34], 导致 UCS 并不随着 WRD 呈线性关系, 而是随着 WRD 的增大先降低, 在 WRD=15% 处降至最小之后略有上升。

通过极差分析可知, GPD 对 UCS 的影响最显著, 各参数对 UCS 的影响显著性顺序为: GPD > SF > WRD。对于全固废膏体, UCS 越大, 充填体的稳定性越好, 对于采空区的治理以及地压管理越有利。因此, 以 UCS 最大为目标进行分析, 各参数的最优水平分别为: SF=81%、WRD=5%、GPD=1:4, 进而得到最优参数组合为 GPD₄SF₄WRD₁。

2.2.4 全固废膏体的泌水率优化分析

全固废膏体的 BR 随着 SF 和 GPD 均近似呈负向线性关系, 而随着 WRD 的增大先增大后降低。泌水率主要与颗粒的保水性相关: 随着 SF 增大, 全固废膏体中的自由水含量相对减少, 保水性增加, 从而导致泌水率降低; 胶固粉的粒径小于尾砂, 比表面积大, 从而全固废膏体的保水性的增加随着 GPD 的增大而增大, 进而导致泌水率降低; 废石较

粗, 比表面积小, 保水性差, 同时由于多因素的作用, 从而导致 BR 随着 WRD 的增大先增大后降低。

通过极差分析可知, GPD 对 BR 的影响最显著, 各参数对 UCS 的影响显著性顺序为: $GPD > SF > WRD$ 。对于全固废膏体, BR 越大, 井下泌水越少, 井下环境污染越少。因此, 以 BR 最小为目标进行分析, 各参数的最优水平分别为: $SF=81\%$ 、 $WRD=20\%$ 、 $GPD=1:4$, 进而得到最优参数组合为 $GPD_4 SF_4 WRD_4$ 。

2.3 全固废膏体性能多目标优化分析

根据上述单目标优化分析可知, 不同响应目

标的最优参数组合各不相同, S 最大时 τ_0 并不是最小, τ_0 最小时 UCS 并不是最大, BR 最小时 UCS 也并不是最大。同时, 根据国家标准《全尾砂膏体充填技术规范》的规定^[24], 各个响应目标并非是越大越好或越小越好, 而是应该在一个区间范围内取一个最优值, 因此需要根据标准规定确定最优参数组合。但是, 从表 2 中可看出 BR 均不在规定的范围内, 不能找出符合规定的最优参数组合。为此, 本文采用总评归一值法进行多目标优化。

根据表 2 中的正交实验结果和式(1), 可得各响应目标的回归模型如式(5)~(8)所示。

$$y_1 = 1349.27 - 33.81x_1 + 2.96x_2 + 248.6x_3 - 0.22x_1^2 + 125.17x_3^2 - 0.04x_1x_2 - 3.76x_1x_3 - 0.23x_2x_3 \quad (R^2 = 0.9349) \quad (5)$$

$$y_2 = -24786.01 + 532.35x_1 + 242.65x_2 + 16310.01x_3 - 2.72x_1^2 + 0.16x_2^2 + 2884.99x_3^2 - 3.14x_1x_2 - 211.75x_1x_3 - 48.43x_2x_3 \quad (R^2 = 0.9559) \quad (6)$$

$$y_3 = 1203.35 - 30.08x_1 + 0.22x_2 - 665.63x_3 + 0.19x_1^2 + 0.02x_2^2 - 94.03x_3^2 - 0.01x_1x_2 + 9.23x_1x_3 - 0.32x_2x_3 \quad (R^2 = 0.9863) \quad (7)$$

$$y_4 = 1756.54 - 39.29x_1 + 4.71x_2 - 2000.96x_3 + 0.22x_1^2 - 0.03x_2^2 + 503.49x_3^2 - 0.05x_1x_2 + 22.22x_1x_3 + 1.03x_2x_3 \quad (R^2 = 0.9951) \quad (8)$$

根据表 3 中的全尾砂膏体的性能指标范围, S 在 18~26 cm 的范围内越大越好, τ_0 在 100~200 Pa 的范围内越小越好, UCS 在 0.2~5 MPa 的范围内越大越好, BR 在 1.5%~5% 的范围内越小越好, 因此根据响应目标 y_m 转换为期望函数 d_m 的方法, 建立各个响应目标的期望函数如式(9)~(12)所示。

$$d_1 = \begin{cases} \left(\frac{y_1 - 18}{26 - 18} \right)^{0.3} & 18 \leq y_1 \leq 26 \\ 0 & y_1 > 26 \text{ 或 } y_1 < 18 \end{cases} \quad (9)$$

$$d_2 = \begin{cases} \left(\frac{y_2 - 200}{100 - 200} \right)^{0.3} & 100 \leq y_2 \leq 200 \\ 0 & y_2 > 200 \text{ 或 } y_2 < 100 \end{cases} \quad (10)$$

$$d_3 = \begin{cases} \left(\frac{y_3 - 0.2}{5 - 0.2} \right)^{0.3} & 0.2 \leq y_3 \leq 5 \\ 0 & y_3 > 5 \text{ 或 } y_3 < 0.2 \end{cases} \quad (11)$$

$$d_4 = \begin{cases} \left(\frac{y_4 - 5}{1.5 - 5} \right)^{0.3} & 1.5 \leq y_4 \leq 5 \\ 0 & y_4 > 5 \text{ 或 } y_4 < 1.5 \end{cases} \quad (12)$$

进而建立本文的 OD 函数如式(13)所示。

$$OD = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4)^{1/4} \quad (13)$$

应用 MATLAB 软件求解 OD 的最大值, 得到本文的最优参数为: $SF=79.31\%$ 、 $WRD=18.86\%$ 、

$GPD=3:20$ 。在最优参数条件下, $OD=0.9678$, 对应的 $S=25.45$ cm、 $\tau_0=100.49$ Pa、 $UCS=3.55$ MPa、 $BR=1.50\%$ 。

为了验证所确定最优参数的准确性, 在最优参数条件下进行验证实验, 所得结果为 $S=25.8$ cm、 $\tau_0=106.137$ Pa、 $UCS=3.3$ MPa、 $BR=1.64\%$ 。因此, 模拟优化结果和实际结果相比, 误差均在 $\pm 10\%$ 以内, 说明多目标优化所得结果是可信的。

需要说明的是, 在本文中式(5)~(8)的各项系数以及多目标优化所得结果的精度均为两位小数, 在应用 MATLAB 进行实际求解时为了减小计算过程取近似值产生的计算误差, 设置的精度为 14 位小数。

3 结论与展望

本文在全尾砂膏体充填的基础上提出了全固废膏体充填, 分析了固体质量分数、废石掺量和胶固粉耗量对全固废膏体的塌落度、屈服应力、单轴抗压强度和泌水率的影响, 在结合国家标准规定的范围应用总评归一值模型进行全固废膏体关键性能指标的多目标优化, 主要结论如下:

(1) 全固废膏体的关键性能指标和全尾砂膏体相似, 一定条件下具有良好的流动性与输送性

能,同时全固废膏体的力学性能也可在较大范围内调整以适应不同的充填要求,并且泌水性随物料配比的变化较大。

(2)对全固废膏体的 S 、 τ_0 、UCS 和 BR 四个响应目标,影响最显著的参数和最优参数组合各不相同,无法通过单目标优化确定满足各个响应目标均最优的参数组合。

(3)本文提出的应用总评归一值模型可以进行全固废膏体关键性能指标的多参数多目标优化,可为实际应用及其他矿山膏体的多目标优化提供参考。

本文初步对全固废膏体的关键性能指标进行了优化,由于全固废膏体的充填材料涉及多种固废、固废颗粒尺寸涉及多个数量级、性能涉及多个指标要求,因此未来还需考虑废石的种类与形貌、固废颗粒的粒级组成等更多参数对全固废膏体的线缩率、凝结时间等更多的性能指标的影响。

参 考 文 献

- [1] Wu A X, Yang Y, Cheng H Y, et al. Status and prospects of paste technology in China. *Chin J Eng*, 2018, 40(5): 517
(吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等. 中国膏体技术发展现状与趋势. 工程科学学报, 2018, 40(5): 517)
- [2] Qi C C, Fourie A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Miner Eng*, 2019, 144: 106025
- [3] Wu A X, Ruan Z E, Bürger R, et al. Optimization of flocculation and settling parameters of tailings slurry by response surface methodology. *Miner Eng*, 2020, 156: 106488
- [4] Wu A X, Yang Y, Wang Y M, et al. Mathematical modelling of underflow concentration in a deep cone thickener and analysis of the dynamic compaction mechanism. *Chin J Eng*, 2018, 40(2): 152
(吴爱祥, 杨莹, 王贻明, 等. 深锥浓密机底流浓度模型及动态压密机理分析. 工程科学学报, 2018, 40(2): 152)
- [5] Wang Y, Wu A X, Ruan Z E, et al. Reconstructed rheometer for direct monitoring of dewatering performance and torque in tailings thickening process. *Int J Miner Metall Mater*, 2020, 27(11): 1430
- [6] Yang L H, Wang H J, Wu A X, et al. Shear thinning and thickening of cemented paste backfill. *Appl Rheol*, 2019, 29(1): 80
- [7] Li X, Li C P, Yan B H, et al. Analysis of the influence factors of paste stirring based on discrete element method. *Met Mine*, 2021, 3: 19
(李雪, 李翠平, 颜丙恒, 等. 基于离散元的膏体搅拌影响因素分析. 金属矿山, 2021, 3: 19)
- [8] Yang L H, Wang H J, Wu A X, et al. Thixotropy of unclassified pastes in the process of stirring and shearing. *Chin J Eng*, 2016, 38(10): 1343
(杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂膏体搅拌剪切过程的触变性. 工程科学学报, 2016, 38(10): 1343)
- [9] Liu X H, Wu A X, Yao J, et al. Resistance characteristic and approximate calculation of paste tailings slip flow inside pipe. *Chin J Nonferrous Met*, 2019, 29(10): 2403
(刘晓辉, 吴爱祥, 姚建, 等. 膏体尾矿管内滑移流动阻力特性及其近似计算方法. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2403)
- [10] Cheng H Y, Wu S C, Li H, et al. Influence of time and temperature on rheology and flow performance of cemented paste backfill. *Constr Build Mater*, 2020, 231: 117117
- [11] Liu L, Fang Z Y, Qi C C, et al. Numerical study on the pipe flow characteristics of the cemented paste backfill slurry considering hydration effects. *Powder Technol*, 2019, 343: 454
- [12] Qi C C, Chen Q S, Fourie A, et al. Pressure drop in pipe flow of cemented paste backfill: Experimental and modeling study. *Powder Technol*, 2018, 333: 9
- [13] Deng X J, Zhang J X, Klein B, et al. Experimental characterization of the influence of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill. *Int J Miner Process*, 2017, 168: 116
- [14] Wu A X, Wang Y, Wang H J, et al. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill. *Int J Miner Process*, 2015, 143: 65
- [15] Jiang H Q, Fall M, Cui L. Freezing behaviour of cemented paste backfill material in column experiments. *Constr Build Mater*, 2017, 147: 837
- [16] Cao S, Zheng D, Yilmaz E, et al. Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects. *Constr Build Mater*, 2020, 256: 119408
- [17] Xue Y Z, Wang H J, Tang J X, et al. *The Report of Saving & Comprehensive Utilization in China*. Beijing: Geological Publishing House, 2015
(薛亚洲, 王海军, 汤家轩, 等. 中国矿产资源节约与综合利用报告. 北京: 地质出版社, 2015)
- [18] Yao H H, Cai L B, Liu W, et al. Current status and development of comprehensive utilization of waste rock in metal mines in China. *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31(6): 1649
(姚华辉, 蔡练兵, 刘维, 等. 我国金属矿山废石资源化综合利用现状与发展. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1649)
- [19] Wang H J, Wu A X, Xiao W G, et al. The progresses of coarse paste fill technology and its existing problem. *Met Mine*, 2009(11): 1
(王洪江, 吴爱祥, 肖卫国, 等. 粗粒级膏体充填的技术进展及存在的问题. 金属矿山, 2009(11): 1)
- [20] Zhang X X, Qiao D P, Sun H S. Simulation on conveying characteristics in pipe about high-density slurry with waste rock-tailing. *Chin J Nonferrous Met*, 2019, 29(5): 1092
(张修香, 乔登攀, 孙宏生. 废石-尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟. 中国有色金属学报, 2019, 29(5): 1092)
- [21] Li H, Wu A X, Wang H J, et al. Static and dynamic anti-

- segregation property characterization of coarse-grained paste backfill slurry. *J Central South Univ Sci Technol*, 2016, 47(11): 3909
(李红, 吴爱祥, 王洪江, 等. 粗粒级膏体充填材料静态抗离析性能表征. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3909)
- [22] Sun W, Wang H J, Hou K P. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas. *J Clean Prod*, 2018, 171: 567
- [23] Wu A X, Jiang G Z, Wang Y M. Review and development trend of new type filling cementing materials in mines. *Met Mine*, 2018, 3: 1
(吴爱祥, 姜关照, 王贻明. 矿山新型充填胶凝材料概述与发展趋势. 金属矿山, 2018, 3: 1)
- [24] General Administration of Quality Supervision, People's Republic of China. GB/T39489—2020 *Technical Specification for the Total Tailings Paste Backfill*. Beijing: Standards Press of China, 2020
(国家市场监督管理总局. GB/T39489—2020 全尾砂膏体充填技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2020)
- [25] Yang L H, Wang H J, Wu A X, et al. Gradation optimization of unclassified tailings paste with Gobi aggregates. *Chin J Nonferrous Met*, 2016, 26(7): 1552
(杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂戈壁集料膏体充填粒级优化. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1552)
- [26] Durgun M Y, Atahan H N. Rheological and fresh properties of reduced fine content self-compacting concretes produced with different particle sizes of nano SiO₂. *Constr Build Mater*, 2017, 142: 431
- [27] Derringer G, Suich R. Simultaneous optimization of several response variables. *J Qual Technol*, 1980, 12(4): 214
- [28] Castro I A, Silva R S F, Tirapegui J, et al. Simultaneous optimization of response variables in protein mixture formulation: Constrained simplex method approach. *Int J Food Sci Technol*, 2003, 38(2): 103
- [29] Mondal B, Srivastava V C, Mall I D. Electrochemical treatment of dye-bath effluent by stainless steel electrodes: Multiple response optimization and residue analysis. *J Environ Sci Heal A*, 2012, 47(13): 2040
- [30] Yin S H, Wu A X, Hu K J, et al. The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill. *Miner Eng*, 2012, 35: 61
- [31] Li J J, Yilmaz E, Cao S. Influence of solid content, cement/tailings ratio, and curing time on rheology and strength of cemented tailings backfill. *Minerals*, 2020, 10(10): 922
- [32] Wang S Y, Wu A X, Ruan Z E, et al. Rheological properties of paste slurry and influence factors based on pipe loop test. *J Central South Univ Sci Technol*, 2018, 49(10): 2519
(王少勇, 吴爱祥, 阮竹恩, 等. 基于环管实验的膏体流变特性及影响因素. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(10): 2519)
- [33] Vishalakshi K P, Revathi V, Sivamurthy Reddy S. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete. *Eng Fract Mech*, 2018, 194: 52
- [34] Jia J Y, Gu X L. Effects of coarse aggregate surface morphology on aggregate-mortar interface strength and mechanical properties of concrete. *Constr Build Mater*, 2021, 294: 123515