

基于流变特性极差分析的碎石-全尾砂料浆配比优化研究*

凌斌辉

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410019)

摘要:为了解决矿山井下采空区多,尾矿和废石堆存空间不足的问题,探索一条“全废治三害”道路,开展了全尾砂、水泥和碎石膏体充填实验研究。实验研究了膏体质量浓度、灰砂比和废石掺量对膏体的塌落度、离析率、泌水率、凝结时间、单轴抗压强度、屈服应力和塑性黏度等指标的影响。根据矿山生产需要,从 $-20\ \mu\text{m}$ 细粒级含量、不均匀系数 C_U 、曲率系数 C_C 等方面对碎石掺量范围进行了界定,并通过极差分析研究了膏体质量浓度、灰砂比、碎石掺量对充填料浆屈服应力和塑性黏度的影响规律。研究发现,膏体质量浓度对料浆的屈服应力和塑性黏度影响最大,灰砂比次之,碎石掺量影响最小。最终确定最佳配比组合为膏体质量浓度77%,碎石掺量20%,灰砂比1:4,对应塌落度27.3 cm,14 d抗压强度6.4 MPa,屈服应力为112.01 Pa,塑性黏度为0.78 Pa·s。优化后的结果可为后续工业试验和实际应用提供参考。

关键词:膏体充填;碎石全尾砂;流变特性;极差分析;充填实验

0 引言

膏体流变学是膏体充填技术的重要理论基础^[1-2],充填料浆的流变行为演化对整个充填工艺的浓密阶段、搅拌阶段、输送阶段、充填阶段四个时期均会产生较大影响^[3-6]。由于受到料浆组分、粒径分布、料浆浓度、灰砂比、剪切环境、温度、pH等多种因素影响,料浆流变特性非常复杂^[1],即使仅从“料浆组分”这一单一影响因素来看,不同的材料组成会导致料浆的流变特性具有较大的差异。国内外学者针对分级尾砂、全尾砂、高延性水泥、高水速凝材料、胶固粉等材料下的流变特性展开了大量研究^[7-10],而针对废石-全尾砂流变特性的研究相对较少。随着“绿色矿山”治理理念的提出与实施^[11],国家在安全、环保等方面的监管变得愈发严格,新建排土场、尾矿库的审批工作变得愈发困难。将废石作为充填骨料输送至井下采空区,既可缓解井下采空区可能造成的地压灾害,又可以降低尾矿库和废石场对环境和生产安全造成的危害,对实现“全废治三害”具有非常重要的意义,因此有必要对此展开研究。

本文以国内某矿山充填系统工程为研究对象,针对不同膏体质量浓度、碎石掺量和水泥含量下的

料浆综合性能和流变特性各异的特点,首先通过 C_U 、 C_C 、 $-20\ \mu\text{m}$ 细粒级含量三项技术指标确定了合理的碎石掺量。然后采用正交设计实验,按照碎石掺量5%、10%、15%、20%;膏体质量浓度77%、78%、80%、81%;灰砂比1:4,1:6,1:8,1:10建立实验组,并通过极差分析,从屈服应力和塑性黏度两方面对其进行了定量和定性分析,揭示了相应的影响规律。最后通过塌落度、强度、屈服应力和塑性黏度等关键技术指标筛选出最优配比,旨在为后续的工业试验、充填系统设计以及设备选型提供基础资料。

1 实验材料及方案

1.1 充填材料密度测试

料浆组分包括全尾砂、P·O42.5水泥、碎石、水。采用四分法对各样品进行取样,分别测试各样品的容重、松散堆积密度、密实堆积密度。结果见表1。

1.2 充填材料粒级组成

(1)全尾砂、水泥粒级组成。采用激光粒度分布仪测定物料的粒级分布,测试结果如下:全尾砂 $d_{10}=5.385\ \mu\text{m}$, $d_{30}=23.325\ \mu\text{m}$, $d_{60}=79.862\ \mu\text{m}$,

* 收稿日期:2023-03-07

作者简介:凌斌辉(1988—),男,湖南长沙人,硕士,工程师,主要从事采矿技术工作,E-mail:ygasksk@163.com。

-200目(-74 μm)占比为57.68%,尾矿粒度较粗,但-20 μm的极细颗粒含量为27.14%,细粒含量满足膏体充填要求^[12], $d_{10} = 3.149 \mu\text{m}$, $d_{30} = 13.599 \mu\text{m}$, $d_{60} = 32.278 \mu\text{m}$,-200目(-74 μm)占比88.11%,-20 μm的细颗粒含量为41.65%。

表1 充填材料密度测试

名称	容重/ (g·cm ³)	松散堆积密度/ (g·cm ³)	密实堆积密度/ (g·cm ³)
全尾砂	2.74	1.449	1.951
水泥	3.09	1.022	1.384
碎石	2.52	1.429	1.647

(2) 碎石粒度组成。碎石样品风干后,首先用10 000 μm的筛网剔除+10 000 μm的样品,然后将样品按从大到小的顺序依次通过小于10 000 μm的各级细筛,并记录各级含量,结果见表2。

表2 碎石粒度分布

粒度/μm	分计/%	累计/%
+10 000	45.261	45.261
+8000~-10 000	30.454	75.715
+7000~-8000	8.108	83.823
+6000~-7000	3.719	87.542
+5000~-6000	4.849	92.391
+2500~-5000	6.949	99.340
+1250~-2500	0.177	99.517
+315~-1250	0.035	99.552
-315	0.448	100.000

1.3 碎石掺量设计

(1) -20 μm含量分析:将碎石掺量比例按照5%、10%、20%、30%、40%与全尾砂进行混合,并计算全尾砂-碎石混合体中-20 μm细粒级含量,结果见图1。

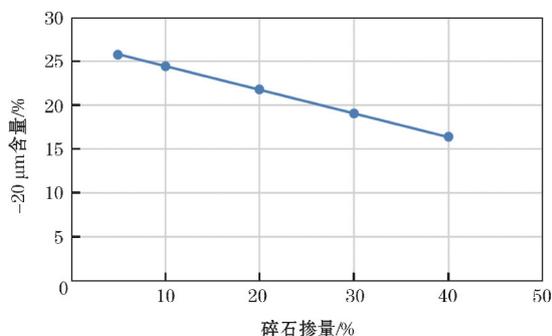


图1 不同碎石掺量下-20 μm细粒级含量

根据图1可知,碎石掺量在5%~40%范围内,

随着碎石掺量的增加,全尾砂-碎石混合体中-20 μm细粒级含量呈现单调递减的变化趋势,但-20 μm细粒级含量均大于15%,满足复合膏体充填要求^[12]。

(2) C_U 和 C_C 系数分析。根据不均匀系数 C_U 和曲率系数 C_C 表征物料粒度组成的均匀程度,分析结果见图2。

$$C_U = d_{60}/d_{30} \quad (1)$$

$$C_C = d_{30}^2/d_{10} \times d_{60} \quad (2)$$

式中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别是指累计含量为10%、30%、60%颗粒能够通过筛孔直径; C_U 反映颗粒级配的不均匀程度, $C_U \geq 5$ 时表示颗粒大小分布范围广,级配良好; C_C 反映粒径分布曲线上的颗粒级配整体形态,一般 $C_C = 1 \sim 3$ 时级配良好,密实程度比较好^[13]。

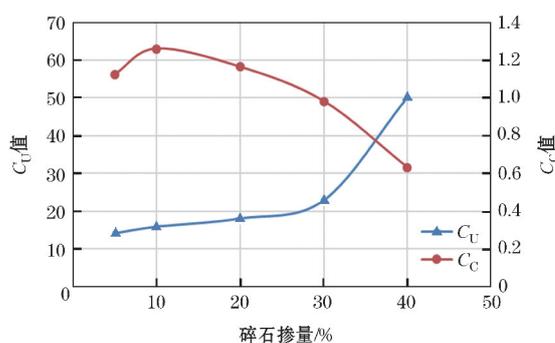


图2 不同碎石掺量下 C_U 和 C_C 值

由图2可知,随着碎石掺量的增加,全尾砂-碎石混合体的 C_U 值和 C_C 值表现出不同的变化规律。

C_U 值变化规律:不同碎石掺量的 C_U 值均大于5,说明混合体粒级分布较广,从增长趋势来看,随碎石掺量的增加, C_U 值呈现出递增趋势。其中碎石掺量从5%增加至30%时, C_U 值由14.12增加至22.88,增长较平缓;碎石掺量从30%增加至40%时, C_U 值从22.88增长至50.12,急剧增加。

C_C 值变化规律:碎石掺量为5%~25%时, C_C 值处于1~3之间,说明料浆粒径分布较为连续;碎石掺量为30%~40%时, C_C 值小于1,不满足混合体粒径分布连续性的要求。从增长趋势来看,碎石掺量从5%增加至10%时, C_C 值由1.12增加至1.26,碎石掺量从10%增加至40%时, C_C 值由1.26逐渐降低至0.63。

(3) 碎石掺量优化。综合分析-20 μm细粒级含量、 C_U 、 C_C 等关键指标的变化规律可知,碎石掺

量在 5%~40% 范围内, $-20\ \mu\text{m}$ 细粒级含量、 C_U 值均满足要求; 但碎石掺量为 30%~40% 时, C_C 值 < 1; 碎石掺量为 25% 时, C_C 值 > 1, 但考虑到实际生产与实验室有差距, 最终推荐碎石掺量为 5%、10%、15%、20%。

2 实验结果及分析

2.1 充填料浆的主要技术指标

为揭示不同膏体质量浓度、不同碎石掺量和不

同灰砂比下的料浆塌落度、离析率、泌水率、凝结时间、强度、屈服应力和塑性黏度等指标的变化规律, 设置质量浓度分别为 77%、78%、80%、81% 的四种料浆; 5%、10%、15%、20% 四种碎石掺量; 1:4, 1:6, 1:8, 1:10 四种灰砂比。由于考虑因素较多, 为减少工作量且能较为准确地反映指标变化规律, 采用正交实验, 测得各组的塌落度、离析率、泌水率、凝结时间、强度、屈服应力和塑性黏度等主要技术指标, 见表 3。

表 3 充填料浆主要技术指标

实验 编号	膏体质量 浓度/%	碎石 掺量/%	灰砂比	塌落度/ cm	离析率/ %	泌水率/ %	屈服应力/ Pa	塑性黏度/ (Pa·s)	$R_{3d}/$ MPa	$R_{7d}/$ MPa	$R_{14d}/$ MPa	$R_{28d}/$ MPa
1	77	5	1:10	27.5	11.45	5.25	43.36	0.27	0.5	1	1.8	1.9
2	77	10	1:8	28.2	18.55	4.33	74.32	0.22	0.6	1.3	2.4	2.6
3	77	15	1:6	28.3	18.68	5.24	89.97	0.25	1.1	2.4	3.5	4.5
4	77	20	1:4	27.3	4.35	4.74	112.01	0.78	2.6	4.3	6.4	8.1
5	78	5	1:8	27.0	15.22	10.95	191.54	1.38	0.9	2.1	3.3	3.8
6	78	10	1:10	27.8	13.28	11.55	136.89	1.00	0.6	1	1.8	1.9
7	78	15	1:4	27.5	15.12	7.95	131.21	0.87	1.5	3.6	5.5	5.6
8	78	20	1:6	27.9	11.82	11.54	118.78	0.82	1.2	1.9	3.6	3.8
9	80	5	1:6	25.9	11.48	9.22	266.66	1.63	1.4	2.8	5.7	5.9
10	80	10	1:4	26.1	11.45	5.13	299.80	1.71	2.1	4.5	6.5	8.1
11	80	15	1:10	27.2	12.43	11.54	195.34	1.38	0.6	1.2	2.3	2.4
12	80	20	1:8	27.0	12.55	11.12	194.52	0.88	0.8	1.7	2.7	3.3
13	81	5	1:4	24.0	4.85	0.35	392.99	2.30	2.9	5.8	8.5	9.2
14	81	10	1:6	24.5	7.52	0.96	299.06	1.68	1.7	3.6	5.3	7.4
15	81	15	1:8	25.6	9.56	3.15	228.89	1.36	1.1	2.1	3.7	4.9
16	81	20	1:10	26.1	11.56	6.54	197.81	1.02	0.6	1.4	2.4	2.8

根据膏体充填要求, 塌落度为 25~28 cm, 屈服应力小于 150 Pa 时, 料浆具有较好的流动性; 根据采矿工艺要求, 充填体 14 d 强度 (R_{14d}) 应大于 2 MPa。按上述条件对实验组合进行筛选, 第 4、7、8 组满足要求。

2.2 充填料浆屈服应力极差分析

由正交实验得到屈服应力实验数据, 通过极差分析得到的结果见表 4。表 4 中 K_1 为膏体质量浓度 77%、碎石掺量 5%、灰砂比 1:10 下的实验指标, 其余 K_n 值依次类推, 由此可以判断出各影响因子下的最差水平和最优水平。 K_{avg} 为对应 K_n 的平均值, $R = K_{\text{avg}}(\text{最大值}) - K_{\text{avg}}(\text{最小值})$, 表示各影响因子作用下屈服应力的变化范围, 其大小代表对影响因子对屈服应力的影响程度大小。

通过表 4 的分析数据可知: 单因子影响下, 充填料浆的屈服应力随着膏体质量浓度、灰砂比增大而不断增加, 表现为正相关, 随着碎石掺量的增加不断减小, 表现为负相关。各因子下 R 值差别较明显, 膏体质量浓度 > 灰砂比 > 碎石掺量, 说明质量浓度对充填料浆的屈服应力影响最大, 灰砂比次之, 碎石掺量影响最小。因此可推断出: 当膏体质量浓度为 77%, 灰砂比为 1:10, 碎石掺量为 20% 时, 充填料浆的屈服应力最小。

2.3 充填料浆塑性黏度的极差分析

由正交实验得到塑性黏度实验数据, 通过极差分析得到的结果见表 5, 表中符号及其代表的含义与表 4 相同。

通过表 5 中的分析数据可知: 单因子影响下, 充

填料浆的塑性黏度随着膏体质量浓度、灰砂比的增加不断增加,表现为正相关,随着碎石掺量增加不断减小,表现为负相关。各因子下 R 值差别较明显,膏体质量浓度 > 碎石掺量 > 灰砂比,说明膏体

质量浓度对充填料浆的塑性黏度影响最大,碎石掺量次之,灰砂比影响最小。因此可推断出:当膏体质量浓度为 77%,灰砂比为 1:10,碎石掺量为 20%时,充填料浆的塑性黏度最小。

表 4 充填料浆屈服应力极差分析

因子	K_n 值				K_{vag} 值				最佳水平	R
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4		
膏体质量浓度	319.66	578.41	956.32	1118.75	79.92	144.60	239.08	279.69	1	199.77
碎石掺量	894.54	810.07	645.41	623.12	223.64	202.52	161.35	155.78	4	67.86
灰砂比	573.39	689.27	774.47	936.01	143.35	172.32	193.62	234.00	1	90.66

表 5 充填料浆塑性黏度极差分析

因子	K_n 值				K_{vag} 值				最佳水平	R
	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4		
膏体质量浓度	1.52	4.08	5.59	6.36	0.38	1.02	1.40	1.59	1	1.21
碎石掺量	5.57	4.60	3.87	3.51	1.39	1.15	0.97	0.88	4	0.52
灰砂比	3.68	3.84	4.38	5.65	0.92	0.96	1.09	1.41	1	0.49

3 结论

(1) 对 $-20\ \mu\text{m}$ 细粒级含量、不均匀系数 C_U 和曲率系数 C_C 三个技术指标进行综合分析后发现,当碎石掺量为 5%、10%、15%、20%时,全尾砂-碎石料浆级配效果较好。

(2) 单因子影响下,膏体屈服应力和塑性黏度随着膏体质量浓度、灰砂比增加不断增加,表现为正相关,随着碎石掺量增加不断减小,表现为负相关。

(3) 不同因子对充填料浆屈服应力的影响程度有明显差别,其中膏体质量浓度对料浆屈服应力的影响最大,灰砂比次之,碎石掺量影响最小。

(4) 不同因子对充填料浆塑性黏度的影响程度有明显差别,其中膏体质量浓度对料浆塑性黏度的影响最大,碎石掺量次之,灰砂比影响最小。

(5) 通过对充填料浆塌落度、强度、屈服应力和塑性黏度等关键指标进行综合分析,选定膏体质量浓度 77%,碎石掺量 20%,灰砂比 1:4 为最佳配比组合,可为后续工业试验及生产实践提供参考依据。

参考文献:

- [1] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上):概念、特性与模型[J].工程科学学报,2020,42(7):803-813.
- [2] 吴爱祥,杨莹,程海勇,等.中国膏体技术发展现状与趋势[J].

工程科学学报,2018,40(5):517-525.

- [3] 杨柳华,王洪江,吴爱祥,等.全尾砂膏体搅拌技术现状及发展趋势[J].金属矿山,2016(7):34-41.
- [4] 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[J].工程科学学报,2016,38(10):1343-1349.
- [5] 刘晓辉.膏体流变行为及其管流阻力特性研究[D].北京:北京科技大学,2015.
- [6] JIAO H Z, WANG S F, YANG Y X, et al. Water recovery improvement by shearing of gravity-thickened tailings for cemented paste backfill[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,245:118882.1-118882.8.
- [7] 王洪江,杨柳华,王勇,等.全尾砂膏体多尺度物料搅拌均质化技术[J].武汉理工大学学报,2017,39(12):76-80.
- [8] 胡文静,刘音,刘国明,等.混合骨料级配不同浓度充填膏体流变性能影响试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(5):34-38.
- [9] 梁龙,张鑫,刘巧玲.浆体流变性能对超高延性水泥基材料性能的影响[J].材料导报,2023,37(5):101-107.
- [10] 阮竹恩,吴爱祥,王贻明,等.全固废膏体关键性能指标的多目标优化[J].工程科学学报,2022,44(4):496-503.
- [11] YIN S H, SHAO Y J, WU A X, et al. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019:119590.
- [12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.全国尾矿膏体充填技术规范:GB/T 39489—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [13] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTJ 3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.