

絮凝剂残留对超细全尾砂似膏体流变特性的影响规律研究

王文波¹, 李 帅², 于 正², 李振龙³, 王洪涛^{3*}

(1. 河南省豫地科技集团有限公司; 2. 中南大学资源与安全工程学院; 3. 河南中矿能源有限公司)

摘要:超细粒径尾砂沉降速度慢、浓缩效率低、溢流水浊度高,必须添加絮凝剂加速细颗粒的沉降,因此絮凝剂会残留在浓缩后的似膏体中,导致其黏性增加、浓度偏低、易结块和管道输送阻力增大。综合运用理论分析和现场试验等研究手段,对絮凝剂残留与超细全尾砂似膏体流变特性的影响机理进行了深入研究,结果表明:絮凝剂修复或剪切破坏作用下,絮网结构会包罗或释放水分子引起自由水和毛细水之间的迁移和转化,这是超细全尾砂似膏体剪切流变特性产生变化的根本原因。通过优化絮凝剂选型,不仅大大降低了絮凝剂的用量,也显著改善了絮凝剂的不利影响。研究成果对于系统地发展似膏体剪切流变和管道输送理论与方法具有重要意义。

关键词:超细全尾砂;似膏体;絮凝剂残留;流变特性;管道输送;剪切流变

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)01-0064-05

doi:10.11792/hj20250110

引言

2021 年,河南中矿能源有限公司柿树底金矿(下称“柿树底金矿”)建成了低成本全尾砂全脱水似膏体充填系统,开展了复杂难采矿体空场采矿法转充填采矿法现场工业试验及老旧隐蔽采空区充填治理实践,由于尾矿中含有大量的细粒径成分,必须添加絮凝剂加速细颗粒的沉降,保障浓缩过程的稳定与高效。因此,絮凝剂不可避免地会残留在浓缩后的似膏体中,与其中的细粒径成分发生复杂的物理化学反应而形成稳定的絮网结构^[1],对似膏体的流变特性和管道输送特性产生影响。

柿树底金矿曾开展了多种絮凝剂的现场工业试验,最初选择分子量为 1 500 万的某厂家特制絮凝剂,达到了预期的高浓度底流和澄清的溢流效果。但是,也使得大量的絮凝剂残留在浓缩后的尾矿浆体中,导致其黏性增加,出现易结块和管道输送阻力增大等问题。针对出现的问题,通过絮凝剂作用机理分析和絮凝剂优选及效果分析,在现场开展了分子量为 1 000 万的阴离子型聚丙烯酰胺絮凝沉降的室内试验和现场工业试验,从而达到了降低整体充填系统运行能耗、增加系统可靠性的目的。

1 工程背景

1.1 矿山概况

柿树底金矿位于河南省洛阳市嵩县,矿区面积

19.883 km²,开采规模为 24 万 t/a。矿体赋存于含金构造蚀变带中,呈似层状、板状,走向长 400 m、倾向延伸 300~400 m、平均倾角 30°、平均厚度 3.39 m、平均金品位 1.5 g/t。多年来,矿山一直采用房柱采矿法开采,产生采空区体积已达到 80 万~90 万 m³,极易发生冒顶、坍塌等灾害。2021 年,柿树底金矿建成了低成本全尾砂全脱水似膏体充填系统,开展了复杂难采矿体空场采矿法转充填采矿法现场工业试验及老旧隐蔽采空区充填治理实践,开发了废石与尾矿改性作建筑材料、铺路、制砖等综合利用途径,实现了矿山固废 100% 综合利用^[2]。

1.2 超细全尾砂工程特性

柿树底金矿全尾砂矿物组成分析测定结果如表 1 所示。由表 1 可知,全尾砂中主要含有高岭土、石英、长石等泥质成分。这是导致全尾砂粒径超细的主要原因^[3]。全尾砂粒径分布如图 1 所示。由图 1 可知:柿树底金矿全尾砂中小于 5 μm 的颗粒占 21%,小于 38 μm 的颗粒占 59%, $d_{10}=2.233\text{ }\mu\text{m}$, $d_{50}=22.385\text{ }\mu\text{m}$,比表面积为 970 m²/kg,渗透系数和不均匀系数较小、级配较差。

表 1 柿树底金矿全尾砂矿物组成分析测定结果

Table 1 Mineral composition analysis results of ungraded tailings at Shishudi Gold Mine

成分	石英	黄铁矿	云母	高岭土	叶蜡石	石膏	长石
w/%	30.04	7.41	8.35	37.26	3.44	0.87	12.63

收稿日期:2024-06-12; 修回日期:2024-08-05

基金项目:湖南省科技创新计划资助项目(2023RC3035);国家自然科学基金项目(51804337)

作者简介:王文波(1972—),男,工程师,从事矿山地质及采矿工程技术方面的工作;E-mail:13783790967@139.com

* 通信作者:王洪涛(1972—),男,高级工程师,从事矿山地质及采矿工程技术方面的工作;E-mail:13525403202@163.com

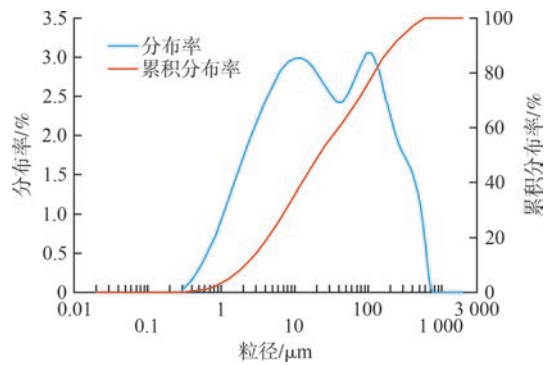


图 1 柿树底金矿全尾砂粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of tailings at Shishudi Gold Mine

1.3 充填工艺流程

柿树底金矿充填能力为 60 m³/h,选择某平硐口附近位置作为充填站站址,充填料浆可实现全程自流输送。充填工艺流程为:选矿厂产出浓度为 30 % 左右的全尾砂浆,经高频振动脱水筛筛分后,筛上粗料(占比约 30 %、含水率≤18 %)经溜槽和皮带进入堆场;筛下细料经浓密机浓密后进入陶瓷过滤机进行二次脱水,陶瓷过滤机脱水后的干尾砂(占比约 70 %、含水率≤15 %)进入尾砂堆场堆存。干尾砂经装载机转运至稳料仓,经仓底部的板带式给料机和皮带秤计量后由皮带输送至搅拌桶,与水泥和水充分搅拌后,制备成合格的充填料浆,经钻孔及井下充填管路输送至待充点^[4-5]。

1.4 絮凝剂残留对超细全尾砂似膏体的影响

由于柿树底金矿的尾砂粒径超细,必须在浓密机内添加絮凝剂来加速超细粒径尾砂的絮凝沉降,以获得高浓度底流和澄清溢流水。该矿山曾开展了多种絮凝剂的现场工业试验,最初选择分子量为 1 500 万的某厂家特制絮凝剂。添加该特制絮凝剂后,虽然达到了预期的高浓度底流和澄清溢流,但也导致大量的絮凝剂残留在浓缩后的尾砂浆体中,致其黏性增加,后续进一步脱水中出现了较为突出的结块现象(如图 2 所示)。因絮凝剂残留导致的尾砂结块现象严重影响了稳料仓下料的稳定性、给料计量系统的准确性和高速搅拌桶的搅拌效率,极易导致料仓堵塞、计量不准确和制备的似膏体充填料浆结块(如图 3 所示)等。由于大量的絮凝剂残留在超细全尾砂似膏体中,导致似膏体的黏性和稠度极高,在浓度为 58 %~60 % 时即达到似膏体状态(如图 4 所示)。

2 絮凝剂作用机理分析

絮凝剂是污水处理领域常用的药剂之一,其原理为:絮凝剂带有正(负)电性的基团和水中带有负(正)电性难于分离的一些粒子或者颗粒相互靠近、降低其电势,使其处于不稳定状态,并利用其聚合性

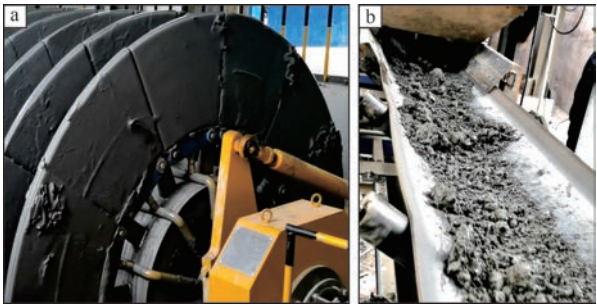


图 2 添加絮凝剂后超细粒径尾砂结块现象

Fig. 2 Agglomeration phenomenon of ultrafine tailings after adding flocculant



图 3 添加絮凝剂后料仓堵塞和充填料浆结块现象

Fig. 3 Silo blockage and filling slurry agglomeration after adding flocculant

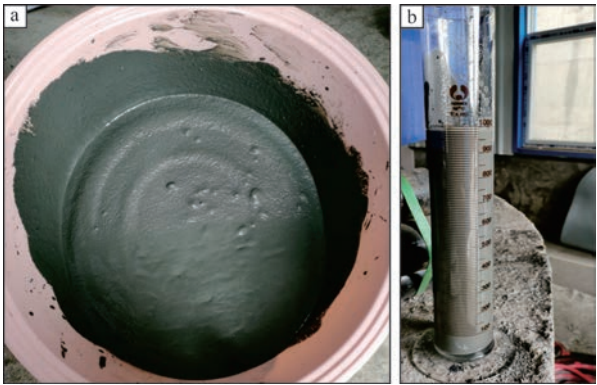


图 4 絮凝剂残留条件下的超细全尾砂似膏体

Fig. 4 Paste-like ultrafine tailings in the presence of flocculant residue

质使得这些颗粒集中,并通过物理或化学方法分离出来。随着矿石品位的普遍下降和选矿技术的不断进步,磨矿粒度越来越细,金属矿山尾矿中-74 μm 的占比普遍超过 80 %,平均粒径在 50 μm。过细的磨矿细度在大幅提高选矿回收率的同时,也给尾矿的浓缩脱水增添了难度。依靠传统的自然沉降,细粒径尾矿沉降速度慢、浓缩效率低、溢流水浑浊,必须添加絮凝剂加速细颗粒的沉降,保障浓缩过程的稳定与高效。

2.1 絮凝剂选型及絮凝沉降原理

絮凝剂的品种繁多,按照其化学成分总体可分为

无机絮凝剂和有机絮凝剂两大类。在矿山应用较多的主要为有机高分子絮凝剂——聚丙烯酰胺系列。常见聚丙烯酰胺为白色粉末状,可溶于水,水溶液为均匀透明的液体,水溶液黏度随聚合物分子量增加而提高。聚丙烯酰胺是长链(线)状聚合物,每个分子是由十万个以上的单体聚合物构成,分子链长而细且有许多化学活性基团,会弯曲或卷曲成不规则的曲线形状,就像梁桥一样搭在2个或多个细粒径尾砂颗粒上,活性基团与尾砂颗粒表面作用,从而将尾砂颗粒连接形成絮团,这种作用称为桥连作用^[6](如图5所示)。

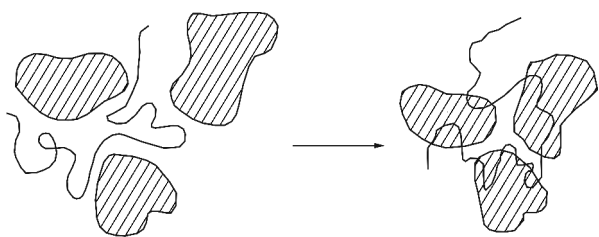


图5 絮凝剂长链(线)状分子的桥连作用

Fig. 5 Bridging effect of long-chain (linear) flocculant molecules

尾砂絮凝沉降过程中,絮凝剂的主要作用机理包括:

1) 双电层的压缩作用。有机高分子絮凝剂或无机絮凝剂电离产生的电荷会使细粒径尾砂的 Zeta 电位降低,进而压缩双电子层。

2) 吸附凝聚作用。由于絮凝剂水解产物特殊的电荷属性,会吸引和中和悬浮的异性细粒径颗粒,凝聚成大的颗粒。

3) 絮凝架桥作用。有机高分子絮凝剂溶于水后会水解生成长链聚合物,进而絮凝架桥形成絮网结构,吸引和网捕细粒径尾砂颗粒形成大的絮团,进而加速絮团尾砂沉降。因为阳离子高分子絮凝剂对尾砂颗粒的吸附具有降低表面电荷、压缩双电层的作用,因此阳离子高分子絮凝剂引起桥连作用所需的分子长度比非离子型高分子絮凝剂小一些,即相对分子质量低些;相反,阴离子型高分子絮凝剂对负电荷的尾砂颗粒,由于静电相斥作用,相对分子质量较大。

2.2 影响絮凝沉降作用效果的因素分析

影响超细尾砂絮凝作用的因素相对复杂^[7],主要包括:

1) 超细尾砂的粒径组成和颗粒级配。粒径组成和颗粒级配是尾砂最重要的物理特性参数,对絮凝剂的选型和用量及絮凝沉降效果影响作用也最大。一般情况下,尾砂中细粒径尤其是 $-15\ \mu\text{m}$ 的泥质成分越多,其絮凝用量越大、絮凝沉降速度越慢、浓缩成本越高。

2) 絮凝剂的分子量、用量和稀释浓度。一般情

况下,增大絮凝剂的用量和分子量,有利于超细粒径颗粒的絮凝沉降,提升絮凝效果;但是,过高的絮凝剂添加量不仅不利于提高絮凝效果,而且大量的絮凝剂残留在尾水中还会对选矿指标产生显著的影响。因此,矿山充填过程中高分子聚丙烯酰胺类絮凝剂的用量一般控制在 $5\sim 20\ \text{g/t}$ 。同时,絮凝剂一般为白色粉末状,必须用水充分溶解和稀释后才能使用,一般絮凝剂需要提前溶解和搅拌1 h以上才能使用,且必须稀释至5‰以下才能较好地发挥絮凝剂的吸附凝聚和絮凝架桥作用。

3) 浆体的 pH 和温度等参数。因 pH 会显著影响和改变超细粒径尾砂颗粒表面电荷和电位、絮凝剂的性质和作用,使得颗粒的表面斥力增加、絮凝困难,因此, pH 对絮凝作用的影响非常大。同时,尾砂浆体的温度过高或过低,均会对絮凝剂的作用效果产生不利的影响。但是,考虑到尾砂浆体的处理量极大,矿山充填成本又往往控制得较低,改变浆体的 pH 和温度等参数技术可行,但明显经济不合理。因此,可通过改变药剂类型、增加药剂的分子量和用量等措施来改善浆体的絮凝沉降效果。

4) 搅拌速度和时间。絮凝剂添加前需要充分溶解和长达1 h以上的搅拌,才能将数百万个长链(线)状聚合物分子充分伸展开来。絮凝沉降过程中适度的搅拌有利于尾砂和絮凝剂的充分混合与接触,但是过长时间和过快频率的搅拌不仅会使能耗增加,还会破坏已形成的絮团结构。

2.3 絮网结构破坏和修复作用演化过程

絮网结构在絮凝剂作用下的修复过程如图6所示。由图6可知:在絮凝剂数百万个长链(线)状聚合物分子的絮凝架桥作用下,尾砂中的细粒径被吸附凝聚形成大的絮体,粗颗粒则因很少与絮凝剂发生反应而零散地分布在絮体周边。由于絮凝剂分子链很长,在不断网捕细粒径尾砂颗粒的同时,形成的絮体体积会不断增大,最终形成稳定的絮网结构。

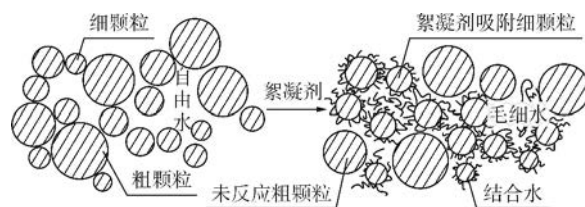


图6 絮网结构在絮凝剂作用下的修复过程示意图

Fig. 6 Repair process of floc network structure under flocculant action

絮网结构在剪切作用下的破坏过程如图7所示。由图7可知:絮凝架桥和吸附凝聚作用下形成的絮网结构只是一个相对稳定的结构,在外界剪切力的持续

作用下,絮网结构会因长链(线)状分子的断裂而分裂成小的絮体,原先凝聚在一起的细粒径尾砂颗粒也会分散开来,形成许多小的絮团。

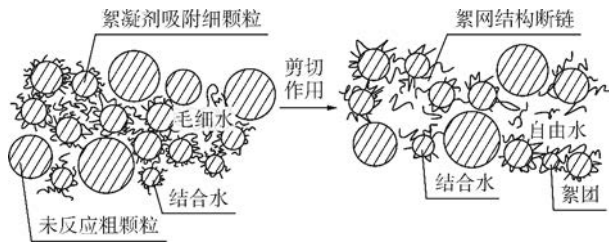


图 7 絮网结构在剪切作用下的破坏过程示意图
Fig. 7 Destruction process of floc network structure under shear effect

当不断提高剪切力或持续增加剪切时间的情况下,絮网结构会持续受到破坏,不断分裂成小的絮团和絮体,但最终会达到一个相对稳定的破坏状态,即继续增加剪切力和剪切时间,也不会再分裂生成更小的絮团和絮体。当停止剪切作用后,絮凝剂的修复作用将开始发挥主导作用,断裂的长链(线)状聚合物分子开始重新搭接和吸附,小的絮团和絮体也开始逐渐重新吸附凝聚形成大的絮体,并最终在形成相对稳定的絮网结构后,不会再修复形成更大的絮网结构。这便是絮网结构破坏和修复作用演化过程^[8]。

2.4 自由水和毛细水动态转化过程

絮凝剂絮凝架桥和吸附凝聚作用下形成的絮网

结构十分发育,在网捕细粒径尾砂颗粒生成絮体和絮团的同时,也吸附和包罗了大量的水分子。基于细粒径尾砂颗粒的双电子层结构,在静电作用下,吸附层内水分子紧密地排列在尾砂颗粒表面形成结合水,扩散层内的水分子附着力稍弱形成毛细水。因此,添加絮凝剂后的超细尾砂似膏体黏性和稠度明显增加,这是絮网结构吸附和包罗了大量水分子所导致的。在持续施加剪切力的作用下,随着絮网结构持续受到破坏,不断分裂成小的絮团和絮体,原先吸附和包罗的大量水分子也开始被释放出来,使得超细全尾砂似膏体黏性和稠度明显降低。

絮凝修复和剪切破坏作用下絮网结构动态变化过程如图 8 所示。由图 8 可知:超细全尾砂似膏体中含有大量的细粒径成分,单位体积内固体颗粒的表面积较大,极易在残留絮凝剂的作用下,发生电中和、吸附搭桥、卷扫网捕等一系列物理化学变化,形成稳定的絮网结构。在管道输送过程中,絮网结构会受到管壁的持续摩擦作用而发生剪切破坏。在一定的剪切速率条件下,絮网结构系数随着剪切时间的增加而逐渐减小,并最终趋于平衡。此时,絮凝剂修复作用和剪切破坏作用达到动态平衡,自由水和毛细水之间的迁移和转化也达到稳定状态,浆体的流变特性趋于稳定^[9-12]。

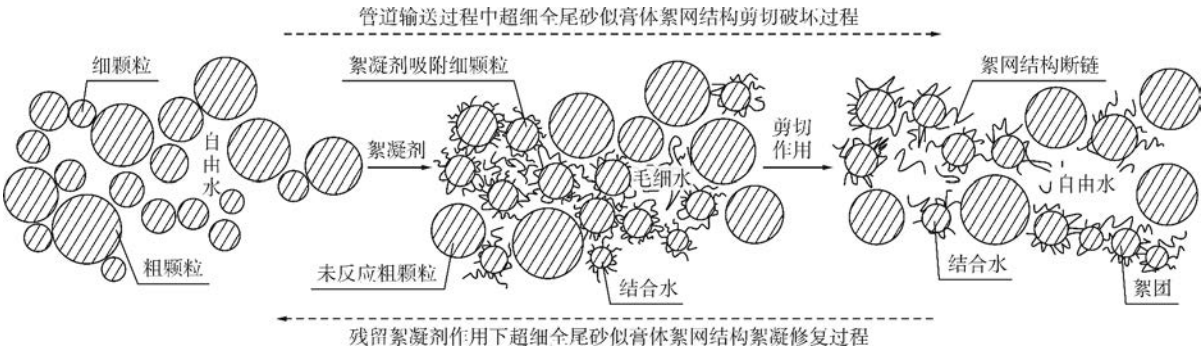


图 8 絮凝修复和剪切破坏作用下絮网结构动态变化过程

Fig. 8 Dynamic changes in the floc network structure under flocculation repair and shear destruction

3 絮凝剂优选及效果分析

3.1 絮凝剂类型和添加量优选

在现场以矿山常用的聚丙烯酰胺为例,开展了絮凝沉降的室内试验和现场工业试验。试验结果表明:分子量为 1 000 万的阴离子型聚丙烯酰胺对超细全尾砂表现出较好的效果,不仅溢流水澄清度较高(如图 9 所示),而且用量较小。根据矿山的生产实际情况,添加 1 000 万的阴离子型聚丙烯酰胺后,获得最佳絮凝剂添加量为 5 g/t、添加浓度为 5 ‰。

3.2 优选絮凝剂对尾砂特性的影响

在对絮凝剂的类型和用量进行优化后,絮凝剂残



图 9 絮凝剂活化加药装置及澄清的溢流水

Fig. 9 Flocculant activation dosing device and clarified overflow water

留在尾砂中的量大大减少,尾砂结块现象得到有效缓解,陶瓷过滤机不再出现明显的黏性结块,稳料仓堵塞的问题也得到了解决,经高速活化搅拌后充填料浆内不再有明显的结块(如图10所示)。由于尾砂的黏性大大降低,重新进行了充填配比试验,结果发现:在其他条件相同的情况下,黏性较低的尾砂浆体的充填浓度可进一步提高至70%,即浓度为70%的尾砂浆体是比较适宜的似膏体充填浓度。由此可见,絮凝剂对充填料浆的似膏体状态产生了十分明显和重要的影响^[13-14]。

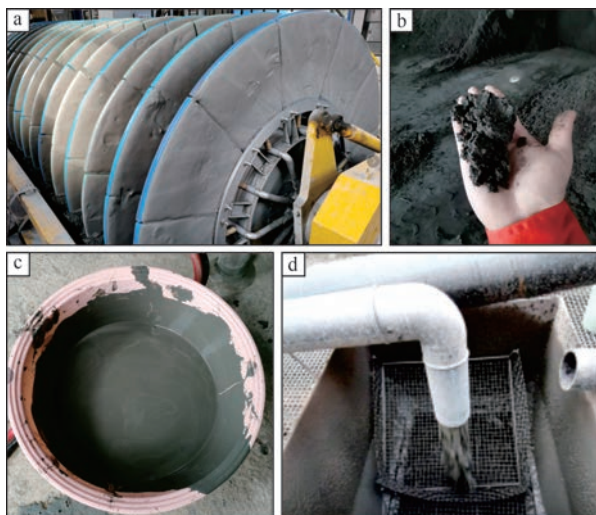


图10 少量絮凝剂残留情况下黏性大大降低的超细全尾砂
Fig. 10 Ultrafine tailings with significantly reduced viscosity in the presence of minimal flocculant residue

3.3 优选絮凝剂对似膏体管道输送特性的影响

在自流输送条件下,若垂直管道的高度为 h ,水平管道的长度为 l ,取局部阻力及出口损失之和为管道沿程阻力的15%,则根据能量守恒原理,可得:

$$\rho h = 1.15i(h+l) \quad (1)$$

式中: ρ 为充填料浆密度(t/m^3); h 为垂直管道的高度(m); i 为管道沿程阻力(Pa/m); l 为水平管道的长度(m)。

由式(1)可以得出,在充填料浆特性、充填系统一定情况下,自流充填的最大充填倍线^[15-16]为:

$$N = \frac{h}{h+l} = \frac{\rho}{1.15i} \quad (2)$$

式中: N 为最大充填倍线。

在对絮凝剂的类型和用量进行优化后,超细全尾砂似膏体的流变特性得到有效改善,结块现象大大减少,因此其管道输送特性也得到了有效优化。经现场实测,在相同的充填条件下,改善后的浆体出矿流速高达3.2 m/s,在首充采空区充填结束后,最大的自流充填倍线可达6~7。

4 结 论

1) 基于常用絮凝剂的工程特性,研究了絮网结构破坏和修复作用演化机理,分析了自由水和毛细水动态转化过程。结果表明,絮凝剂修复或剪切破坏作用下,絮网结构会包罗或释放水分子引起自由水和毛细水之间的迁移和转化,这是超细全尾砂似膏体剪切流变特性产生变化的根本原因。

2) 基于柿树底金矿的现场试验,验证了絮凝剂残留是导致超细全尾砂似膏体黏性增加、浓度偏低、易结块和管道输送阻力增大的原因;通过优化絮凝剂选型,不仅大大降低了絮凝剂的用量,也显著改善了絮凝剂的不利影响。

[参 考 文 献]

- [1] 李振龙,李帅,王新民,等.柿树底金矿空场法转充填法及绿色矿山建设实践[J].世界有色金属,2020(9):200-201.
- [2] 王振闽,李振龙,李帅,等.机械化上向水平分层充填法在低品位缓倾斜多层金矿脉开采中的应用[J].中国矿业,2021,30(11):87-93.
- [3] LI S, YU Z, HU B, et al. Effect of flocculants residue on rheological properties of ultra-fine argillaceous backfilling slurry[J]. Materials, 2022, 15(18):6485.
- [4] 中南大学,河南中矿能源有限公司.中小型地下矿山传统开采模式转型及绿色无尾矿山建设关键技术研究科技成果技术开发报告[R].长沙:中南大学,2023.
- [5] 张云韦,郭利杰,周光信,等.基于矿冶固废的膏体充填工艺及其应用[J].黄金,2021,42(8):32-35.
- [6] HAN C, TAN Y, CHU L, et al. Flocculation and settlement characteristics of ultrafine tailings and microscopic characteristics of flocs[J]. Minerals, 2022, 12:221.
- [7] JIAO H, CHEN W, WU A, et al. Flocculated unclassified tailings settling efficiency improvement by particle collision optimization in the feedwell[J]. Journal of Mineral Metallurgy and Materials, 2022, 29(12):2126-2135.
- [8] WU S, XIE X, LI H, et al. Guangle. Selection of optimal flocculant for effective harvesting of the fucoxanthin-rich marine microalga isochrysis galbana[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(3):1579.
- [9] WU C, DUAN M, XIE Q. Study on the effect of preozonation on the flocculation capacity and floc structure of polysilicate aluminum ferric[J]. Industrial Water Treatment, 2011, 31(6):21-23.
- [10] LI S, ZHAO Z, YU H, et al. The recent progress China has made in the backfill mining method, part II: The composition and typical examples of backfill systems[J]. Minerals, 2021, 11(12):1362.
- [11] LI S, YU Z, YU H, et al. The recent progress China has made in high-concentration backfill[J]. Sustainability, 2022, 14(5):2758.
- [12] 谢佩,戴惠新,赵明珠.尾砂物理特性对其絮凝沉降性能影响规律的研究[J].黄金,2023,44(8):52-57.
- [13] 胡亚军,陈彦亭,赖伟,等.超细全尾砂似膏体绿色胶凝充填关键技术研究[J].黄金,2023,44(5):12-15,20.
- [14] 朱安,邱贤阳.全尾砂膏体充填早期强度提升措施及微观机理分析[J].黄金,2024,45(1):1-5.
- [15] 李帅.超细粒径尾矿干堆工艺与技术[D].长沙:中南大学,2017.
- [16] 湖南中大设计院有限公司.河南中矿能源有限公司嵩县柿树底金矿全尾砂充填系统工程初步设计[R].长沙:湖南中大设计院有限公司,2019.

(下转第81页)

- [9] 韦四江,勾攀峰,于春生.大断面破碎硐室围岩蠕变模拟及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):489-494.
- [10] 程燕学.大断面硐室锚喷注联合支护技术[J].煤炭科学技术,2016,44(2):128-132.
- [11] 程燕学,郑新旺.大断面强流变软岩硐室群失稳机理及加固技术研究[J].能源技术与管理,2013,38(5):21-23.
- [12] 王峰,余庆,张建.深部大断面软岩硐室支护技术优化及应用[J].煤炭科学技术,2016,44(2):133-138.
- [13] 冯月新,尹乾,许国安.大断面软岩硐室稳定性控制技术[J].煤炭科学技术,2016,44(1):90-94.
- [14] 翟新献,秦龙头,赵高杰,等.大断面硐室顶板卸压机理及其应用技术研究[J].煤炭科学技术,2015,43(10):1-6.
- [15] 翟新献,涂兴子,李如波,等.平煤八矿硐室围岩控制联合支护技术研究[J].煤炭技术,2018,37(5):1-3.
- [16] 杨仁树,薛华俊,郭东明,等.复杂岩层大断面硐室群围岩破坏机理及控制[J].煤炭学报,2015,40(10):2 234-2 242.
- [17] 岳中文,杨仁树,闫振东,等.复合顶板大断面煤巷围岩稳定性试验研究[J].煤炭学报,2011,36(增刊1):47-52.
- [18] 司林坡,王晓卿.基于数值模拟的煤矿井下超大断面硐室支护优化[J].煤炭科学技术,2022,50(3):61-68.
- [19] 康红普,林健,杨景贺,等.松软破碎井筒综合加固技术研究与实践[J].采矿与安全工程学报,2010,27(4):447-452.

Excavation sequence and support parameter optimization for large-section chambers in deep mining

Li Hongye¹, Yang Yaping¹, Luo Huanzhen¹, Zhang Xizhi¹, Shi Ming¹, Wang Gang¹, Chen Xun²

(1. Mining Engineering Branch of Jinchuan Group Engineering Construction Co., Ltd.;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology)

Abstract: To address the stability challenges when large-section chambers are excavated in deep mining, this study employed numerical simulations to investigate excavation sequences and optimize support parameters for large-section chambers. A distribution and excavation model for large-section chambers was established, and 16 excavation schemes were designed based on principles such as "roof first, then walls" "walls first, then roof" and "simultaneous walls and roof" as well as the cutting approach of integrated excavator on mine site. The study analyzed the effects of 5 different support types and optimized support parameters based on the simulation results. The findings indicate that the "roof first, then walls" excavation sequence results in minimal disturbances when considering factors like plastic zone changes, surrounding rock convergence, and excavation equipment. Bolts, cables, and concrete lining significantly enhance chamber stability and load-bearing capacity; however, deformation persists in the wall, middle, and middle areas of floors of the chamber. It is recommended to increase the density of bolts and cables and supplement with grouting for reinforcement.

Keywords: deep mining; large-section; chamber; stability; numerical simulation; excavation sequence; support

(上接第 68 页)

Study on the influence of flocculant residue on the rheological properties of ultrafine ungraded tailings paste-like slurry

Wang Wenbo¹, Li Shuai², Yu Zheng², Li Zhenlong³, Wang Hongtao³

(1. Henan Yudi Science and Technology Group Co., Ltd.;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University;

3. Henan Zhongkuang Energy Co., Ltd.)

Abstract: Ultrafine tailings exhibit slow settling rates, low thickening efficiency, and high overflow water turbidity, necessitating the use of flocculants to accelerate fine particle sedimentation. However, flocculant residues remain in the thickened paste-like slurry, increasing its viscosity, reducing its concentration, promoting agglomeration, and raising pipeline transport resistance. This study employed theoretical analysis and field experiments to explore the mechanism by which flocculant residue influences the rheological properties of ultrafine ungraded tailings paste-like slurry. Results indicate that under flocculant restoration or shear damage, the floc network structure either encapsulates or releases water molecules, inducing migration and transformation between free and capillary water. This phenomenon is the fundamental cause of changes in the shear rheological properties of ultrafine ungraded tailings paste-like slurry. By optimizing flocculant selection, the study achieved a significant reduction in flocculant dosage and effectively mitigated its adverse effects. The findings hold substantial significance for systematically advancing the theory and methods of paste-like slurry shear rheology and pipeline transport.

Keywords: ultrafine ungraded tailings; paste-like slurry; flocculant residue; rheological properties; pipeline transport; shear rheology