难沉降细尾砂絮凝沉降特性与浓密机理研究*

庞建涛[1],李树建[1],彭亮[2],凡杰[2]

(1.云南磷化集团有限公司磷资源开发利用工程技术研究分公司, 云南 昆明 650699;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要:为定量评价絮凝剂的絮凝效果及絮团孔隙结构的变化规律,引入分形理论,分析了ZYD、JYC-1、JYC-2和ZYZ四种絮凝剂的分形维数及絮凝效果。利用三维重构和CT切片分析了不同絮凝剂内部的孔隙结构,揭示了尾砂絮凝沉降机理。通过开展静动态絮凝试验,确定最优絮凝剂类型及工艺参数,并推导料浆底流质量浓度与泥层高度之间的关系。结果表明:ZYZ型絮凝剂的分形维数最大,为1.842 3,絮凝沉降效果最佳;ZYZ型絮凝剂形成的絮团尺寸较大,沉降速度较快,且形成了较好的导水通道,浓密效果显著;通过静动态絮凝试验,确定了矿浆质量浓度20%、絮凝剂单耗20 g/t为最佳絮凝工艺参数,计算出若尾砂底流质量浓度要达到70%,需要沉降的泥层高度为731 mm。现场工业应用表明,浓密机放砂平均质量浓度为70%,泌水率≤5%,料浆流动性好,充填效果良好。

关键词:细尾砂充填;絮凝沉降;浓密机理;分形维数;絮凝剂

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0043-09

Flocculation and Settlement Characteristics and Thickening Mechanism of Difficult-to-Settle Fine Tailings

PANG Jiantao[1], *LI Shujian*[1], *PENG Liang*[2], *FAN Jie*[2]

(1.Phosphorous Resources Engineering Research Branch,
Yunnan Phosphate Chemical Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650699, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the flocculation effect of flocculants and acquire the change law of floc pore structure, fractal theory was introduced to analyze the fractal dimensions and flocculation effect of four flocculants, including ZYD, JYC-1, JYC-2 and ZYZ. The pore structures inside different flocculants samples were analyzed using three-dimensional reconstruction and CT slices, and the mechanism of tailings flocculation and settlement was revealed. Through the static and dynamic flocculation tests, the optimal flocculant type and process parameters were determined, and the relationship between the underflow mass concentration of slurry and the material layer height was deduced. The results show that ZYZ-type flocculant has the largest fractal dimension, which is 1.842 3, with the best flocculation settling effect. ZYZ-type flocculant forms flocs with larger size at a faster settling speed, and forms a better water-conducting channel, achieving a significant thickening effect. Through the static and dynamic flocculation tests, the slurry mass concentration of 20% and the flocculant unit consumption of 20 g/t were determined as the best flocculation process parameters. If the overflow mass concentration of slurry is up to 70%, the height of the sediment layer that needs to be settled is 731 mm. On-site industrial application shows that the average sand mass concentration of the thickener is 70%, the urination rate is no more than 5%, the slurry fluidity is good, and the filling effect is good.

Key words: Fine tailings filling, Flocculation and settlement, Thickening mechanism, Fractal dimension, Flocculant

0 引言

由于充填采矿法的减排性能和安全性能较好,其在矿业领域中得到广泛运用[1-3]。充填采矿法在降低矿石贫化、损失,给矿山企业带来良好的经济效益的同时,也给充填技术人员带来了新的挑战[4-5]。矿山企业利用充填采矿法"一废治三害"的特点开采一些低品位的矿石,尤其是贵金属矿,外加选矿设备

* **收稿日期**:2024-11-18
基金项目:中国博士后科学基金项目(2022MD713814);云南省博士后科学基金项目(2023T160555)
作者简介:庞建涛(1984—),男,陕西咸阳人,高级工程师,主要从事矿山充填采矿技术研究工作。E-mail:pjt405@163.com

的迭代更新,尾矿有向着细粒径发展的趋势。细尾砂颗粒细小,表面积大,容易吸收并保留水分,使得细尾砂在充填过程中难以脱水,出现尾砂浆底流质量浓度不高、溢流水跑混等问题,充填效果不佳,细粒径尾砂脱水问题将会限制矿山企业的发展[6-8]。

目前,关于细尾砂脱水的研究主要集中在以下方面[9-15]:改变细尾砂的化学性质、物理性质或表面形态来改善其脱水性能;采用不同的脱水方法或脱水条件来实现更高效的脱水。其中,改变细尾砂的化学性质、物理性质或表面形态被认为是提高其脱水性能的关键方法之一。例如,通过改变细尾砂表面的电性质,可以实现对水分的更强吸附,进而实现更高效的脱水。除此之外,也有研究人员尝试使用化学药剂来提高细尾砂的脱水性能,例如,聚合物、铝盐和硅酸盐等化学药剂被广泛应用于改善细尾砂的脱水性能。这些药剂可以与细尾砂颗粒表面的水分子发生作用,从而减少水分的吸附和保留。

基于此,本文从宏微观尺度评判不同絮凝剂类型与尾砂相互作用下的絮凝效果,引入二值化和分形理论,通过二值化处理 SEM 电镜图片,并利用分形理论定量计算不同类型絮凝剂絮凝效果。结合三维重构和 CT 扫描技术,分析絮凝剂样品孔隙率、孔隙数量和孔隙尺寸随样品高度的变化规律,从微观尺度定性分析不同絮凝剂的絮凝效果。最后,开展絮凝工艺参数优选试验,确定最优絮凝剂类型及工艺参数,并推导料浆底流质量浓度与泥层高度之间的关系。

1 矿山基本情况及尾砂特性

1.1 矿山基本情况

云南某矿山矿权面积 7.66 km^2,开采深度标高范围为+2 350~+1 620 m,一期选用露天采矿法,开采规模为 120 万 t/a;二期由于矿体倾角缓(平均 15°),平均厚度为 6 m,加上露天开采占地面积较大,对地表破坏较严重,所以二期矿山选择充填采矿法开采,开采规模为 200 万 t/a。矿山采用“全尾砂+胶凝材料”充填工艺,具体包括尾砂浓密、胶凝材料计量、均质搅拌、充填料浆制备及井下输送等环节,通过井下充填能有效缓解地表堆存压力,同时提高采空区稳定性和矿山安全性。

1.2 尾砂基本性质

为保证充填采矿法的顺利实施,需要对尾砂的基本性质进行系统研究,包括尾砂真密度、堆密度、孔隙率、粒径分布、自然安息角。通过这些基础数据的测定,为充填系统的设计和工艺优化提供科学依据,并为后续矿山充填系统的高效运行奠定基础。

(1) 全尾砂密度测定。全尾砂密度测定试验共进行 3 次,3 次试验结果取平均值,得到全尾砂的密度为 2.76 g/cm^3。

(2) 全尾砂容重测定。全尾砂密实容重和松散容重测定试验各进行 3 次,3 次试验结果取平均值,得到全尾砂的密实容重为 1.48 g/cm^3,松散容重为 0.92 g/cm^3。

(3) 全尾砂孔隙率。全尾砂在松散和密实两种状态下的孔隙率分别为 66.67%、46.38%。

(4) 全尾砂粒度分布。采用马尔文 3000 激光粒度测试仪对全尾砂粒度组成进行分析,分析结果如图 1 所示。

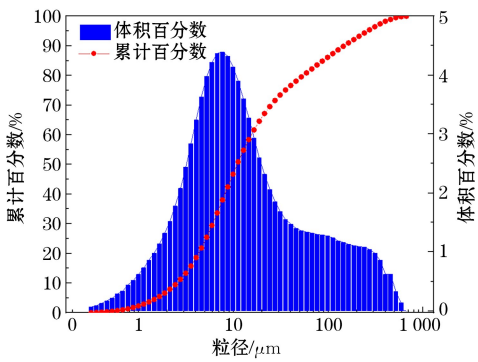


图 1 全尾砂粒径分析

Fig.1 Particle size of the unclassified tailings

由图 1 可知,尾砂粒径-200 目(<74 μm)颗粒占比约为 83%,中值粒径仅 10.903 μm,尾砂偏细。针对细粒级的尾砂,絮凝剂的选型直接影响絮凝沉降效果,絮凝效果不佳会造成尾砂底流质量浓度低、溢流水跑混等问题,影响充填效果。

2 孔隙分形特征

分形结构是指一种形态复杂、具有自相似性和层次性的结构,即使通过放大和缩小,也可以看到类似的形状和结构[16-18]。这种结构可以描述多孔介质内部孔隙分布规律,表达式如式(1)所示:

$$\begin{cases} N(r) \propto r^{-D_f} \\ \dfrac{1}{T_2} = \rho \dfrac{a}{r} \\ V_p = \sum_{i=1}^{n} V_{pi} \\ N_i = \dfrac{V_{pi}}{\frac{4}{3}\pi r_i^3} = \dfrac{V_{pi}}{36\pi (\rho T_{2i})^3} \end{cases} \tag{1}$$

式中:r 为孔隙半径,mm;$\propto$ 为正比于;$N(r)$ 为半径

大于 r 的孔隙总数;D_f 为分形维数;T_2 为横向松弛时间,s;ρ 是每个 T_2 对应孔径的表面弛豫率,为常数,在类似混凝土的多孔介质中,一般取 12;a 为几何常数,柱形孔隙取 2,球形孔隙取 3;V_p 为孔隙的总体积,cm^3;V_{pi} 为 T_2 谱中的第 i 个松弛时间对应的信号强度,mV;N_i 为半径 r_i 的孔隙总数。在三维空间中,分形维数在 2～3 之间时代表物体数量具有分形特征。

根据分形理论[19],半径大于 r_i 的孔隙总数 $N(r_i)$ 表示为:

$$N(r_i)=\sum_{j=1}^{n}N_j=\sum_{j=1}^{n}\frac{V_{pj}}{36\pi\ (\rho\ T_{2j})^3} \tag{2}$$

式中,$i+j=1$。联合式(1)和式(2),可得:

$$N(r_i)=\sum_{j=1}^{n}\frac{V_{pj}}{36\pi\ (\rho\ T_{2j})^3}\propto(3\rho\ T_{2i})^{-D_f} \tag{3}$$

为方便计算分形维数 D_f,对式(3)两边取对数,得:

$$\lg\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{V_{pj}}{(T_{2j})^3}\right)+\lg\frac{1}{36\pi\ \rho^3}= -D_f\lg(3\rho)-D_f\lg(T_{2i}) \tag{4}$$

式中,$36\pi\rho^3$ 和 3ρ 为常数。

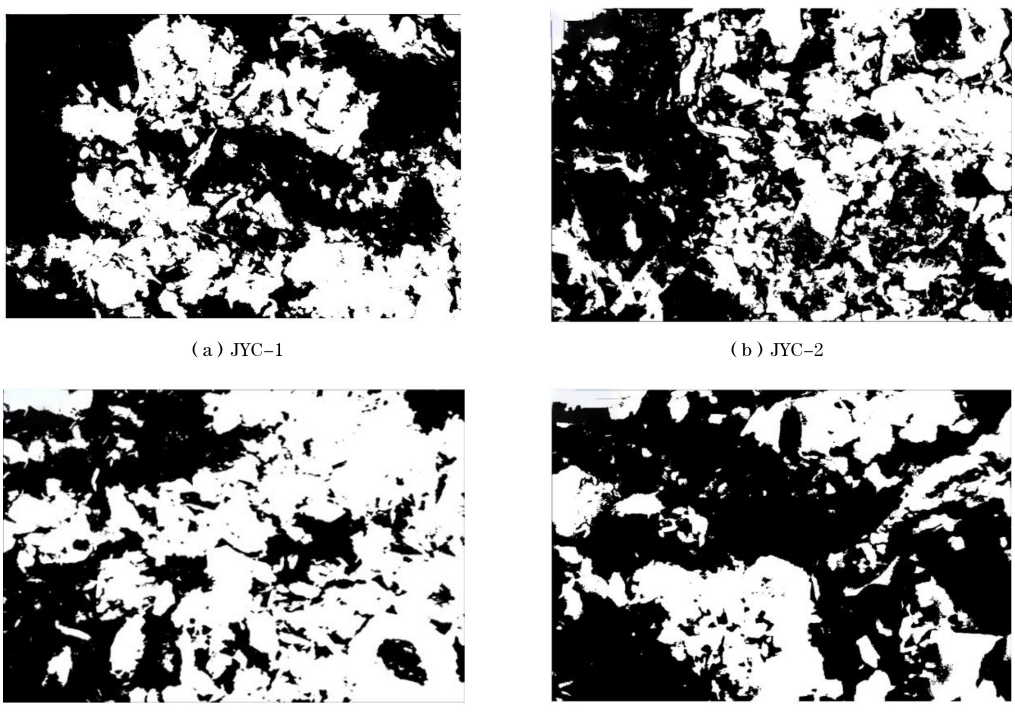
由式(4)可得出,在双对数坐标中,$N(r)$ 与 T_2 关系曲线的斜率即为分形维数。为此,可从定量的角度对不同絮凝剂类型作用细粒级尾砂孔隙结构进行量化分析。本文选取了 4 种絮凝剂进行试验,试验方案见表 1。

表 1 不同絮凝剂类型试验方案

Table 1 Experimental schemes for different flocculant types

絮凝剂类型	全尾砂质量浓度/%	絮凝剂单耗/(g/t)	絮凝剂浓度/%
JCY-1	15	15	0.005
JCY-2	15	15	0.005
ZYZ	15	15	0.005
ZYD	15	15	0.005

全尾砂絮团是由布朗运动和湍流作用引起的,这些作用使得尾砂颗粒与絮凝剂发生碰撞并结合,从而形成具有分形特征的不规则团状物。为评价不同类型絮凝剂的絮凝效果,引入分形理论,利用分形维数描述絮凝剂的结构特征。本研究对制备的 4 种絮凝剂样品进行扫描电镜试验,并将样品放大至 5 000 倍进行观察,然后利用二值化对 SEM 电镜图片进行处理,以突出图像中的物体边缘和细节,使观察者更容易识别和分析样品的形态和结构,如图 2 所示。最后,通过分形理论对 4 种絮凝剂的二值化图像进行定量计算,得到分形维数特征曲线,如图 3 所示。分形维数可用于描述不同絮凝剂的形态特征和聚集程度,分形维度越高,絮团聚集程度越高,形态越复杂;反之,分形维数越低,絮团聚集程度越低,形态越简单。



(a) JYC-1 (b) JYC-2

(c) ZYZ (d) ZYD

图 2 不同絮凝剂类型 SEM 二值化图像

Fig.2 SEM binarized images of different flocculant types

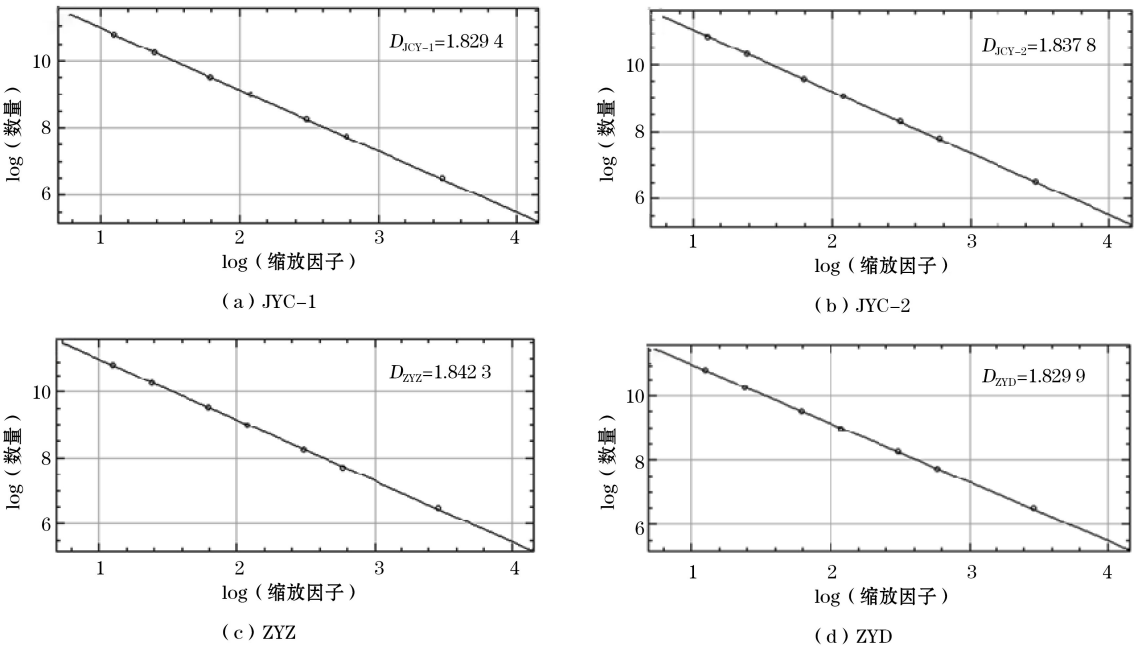


图 3 絮团结构分形维数特征曲线

Fig.3 Fractal dimension characteristic curves of the floc structure

通过图 3 可得，JCY-1 的分形维数 D_{JCY-1} = 1.829 4、JCY-2 的分形维数 D_{JCY-2} = 1.837 8、ZYZ 的分形维数 D_{ZYZ} = 1.842 3、ZYD 的分形维数 D_{ZYD} = 1.829 9。$D_{ZYZ} > D_{JCY-2} > D_{ZYD} > D_{JCY-1}$，ZYZ 型絮凝剂的分形维数最大，表明其絮团结构的聚集程度最高、形态最复杂。这意味着絮团内部颗粒之间的距离更近，絮团密度与液体密度之差也更大，沉降速度更快，因此具有更好的絮凝效果。相反，JCY-1 型絮凝剂的分形维数最低，聚集程度最低，形态最简单，因此其絮团内部颗粒之间的距离较远，沉降速度也较慢，其絮凝效果相对较差。根据分形维数计算结果，可以得出 4 种絮凝剂的絮凝效果排序为：ZYZ > JCY-2 > ZYD > JCY-1。

3 全尾砂絮凝形态细观分析

全尾砂絮团细观结构是影响浓密的主要原因，为了从微观角度探寻不同絮凝剂的脱水效果，以 ZYZ 和 ZYD 絮凝剂为例，引入阈值分割法[20]，将加有 ZYZ 和 ZYD 絮凝剂的全尾砂样本的孔隙和实体部分分离，并提取出孔隙部分进行三维重构。图 4 展示了经过阈值分割和三维重构后的图像，可以清晰地显示全尾砂的孔隙结构，有助于进一步研究材料的物理性质。

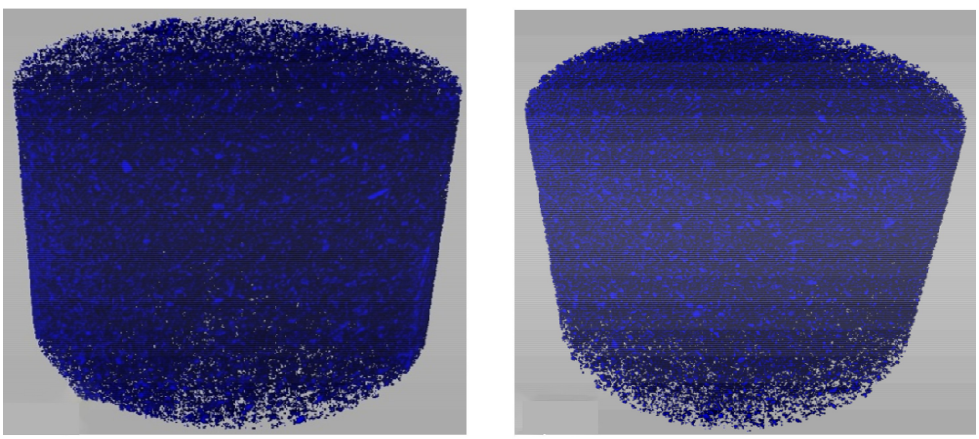


图 4 孔隙重构后图像

Fig.4 Images after pore reconstruction

为了研究样品高度对孔隙分布的影响，选取高度为 10 mm、直径为 10 mm 的 ZYD 尾砂样品进行分析。通过 CT 切片，选取了高度分别为 10 mm、8 mm、6 mm、4 mm、2 mm、0 mm 的孔隙切片（见图 5），研究发现样品孔隙分布特征随高度的变化而变化，底部孔隙与样品高度呈线性关系，孔隙随泥层高度升高逐渐变得越来越密集。此外，样品高度对孔隙形态的影响也很显著，底部孔隙的连通性较差，分布较分散，而顶部孔隙呈现出扁平面分布，孔隙之间的连通性较好。

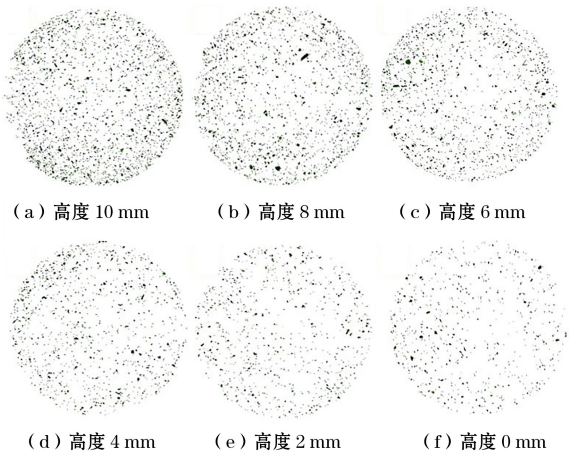


图 5　ZYD 尾砂样品不同高度处孔隙细观特征

Fig.5　Microscopic characteristics of pores at different heights of ZYD tailing samples

为了分析分别添加 ZYZ 和 ZYD 絮凝剂的全尾砂孔隙随高度的变化规律，并从细观角度揭示 ZYZ 型絮凝剂优于 ZYD 型絮凝剂的机理，分别绘制了样品高度与孔隙率、孔隙数量和孔隙尺寸的关系曲线，如图 6 至图 8 所示。

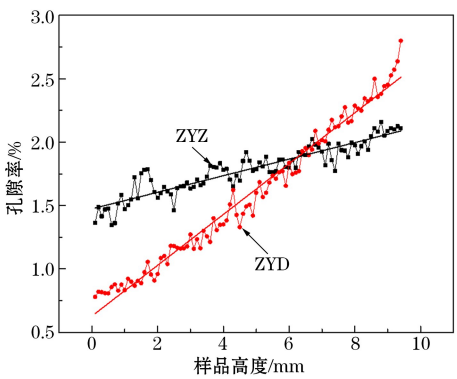


图 6　样品高度与孔隙率关系曲线

Fig.6　Relationship curves of sample height versus porosity

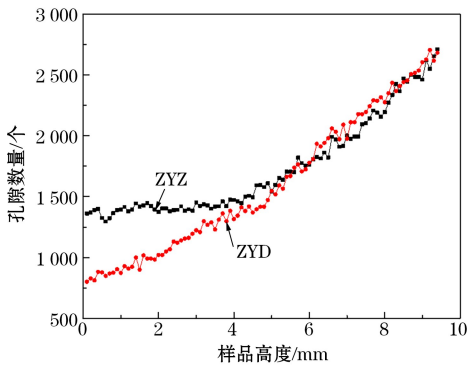


图 7　样品高度与孔隙数量关系曲线

Fig.7　Relationship curves of sample height versus pore number

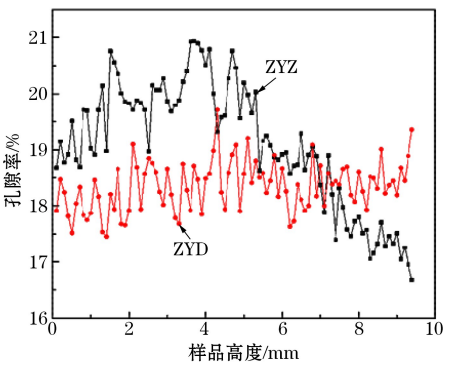


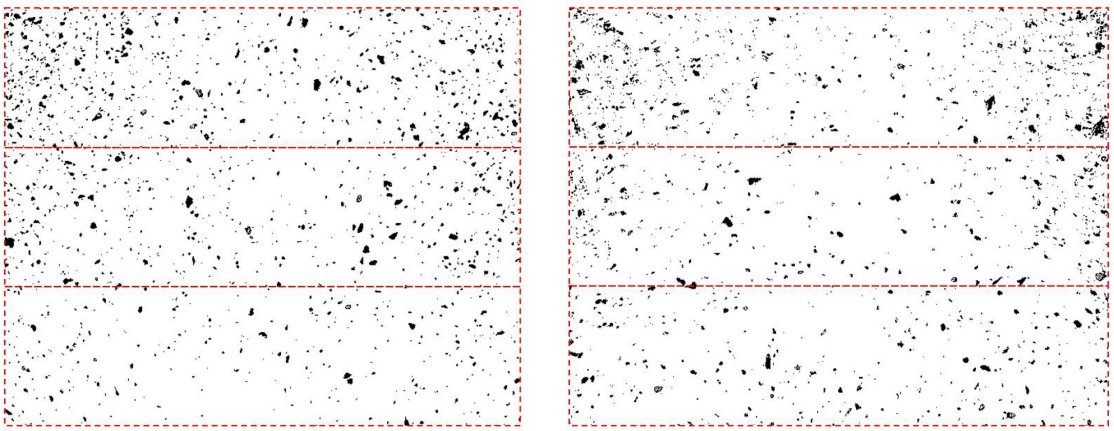
图 8　样品高度与孔隙尺寸关系曲线

Fig.8　Relationship curves of sample height versus pore size

由图 6 至图 8 可知，添加两种絮凝剂样品的孔隙率、孔隙数量均随着样品高度的增加而增大，且呈线性关系。通过对比 ZYZ 絮凝剂和 ZYD 絮凝剂两条曲线可知：当样品的高度小于 6.5 mm 时，添加 ZYZ 絮凝剂的孔隙率、孔隙数量及孔隙尺寸均大于 ZYD 絮凝剂；尤其在高度小于 4 mm 的范围内，添加 ZYZ 絮凝剂样品的孔隙数量相对稳定在 1 300 个左右，添加 ZYD 絮凝剂样品的孔隙数量随着高度的增加从 500 个逐渐增加到 1 300 个。这说明在样品高度小于 6.5 mm 时，ZYZ 絮凝剂形成的絮团尺寸较大，沉降速度也就越快，且孔隙率和孔隙数量大有利于形成较好的导水通道，便于水分子的逃逸，使得尾砂底流质量浓度较高，浓密效果显著。当样品高度大于 6.5 mm 时，添加 ZYZ 絮凝剂样品的孔隙率、孔隙尺寸均小于 ZYD 絮凝剂，但孔隙数量相当，且形成的絮团大小均质。这说明在样品高度大于 6.5 mm 时，ZYD 絮凝剂形成的絮团包裹的水分子不易从孔隙中逃逸，而尾砂沉降速度较慢，随着进砂量的不断增大，细粒级尾砂在没有絮团的裹挟下随

着溢流水一起溢出,造成溢流水跑混。综上所述,ZYZ 絮凝剂的絮凝效果优于 ZYD 絮凝剂。

良好的导水通道是提高底流质量浓度的关键,为了取得更好的浓密效果,得到稳定的高浓度料浆,必须形成良好的导水通道以将絮团内的水分子尽可能地排出。在分析 ZYD 絮凝剂的全尾砂底部孔隙与样品高度关系的基础上,为更好地了解絮团导水通道的形成过程,进一步分析了分别添加 ZYZ 和 ZYD 絮凝剂的全尾砂样品的孔隙纵剖面,如图 9 所示。



(a) ZYZ (b) ZYD

图 9 添加不同絮凝剂的全尾砂样品孔隙纵剖面

Fig.9 Pore longitudinal profiles of unclassified tailings

由图 9 可知,在絮凝剂样品的中上部,ZYD 和 ZYZ 絮凝剂样品的孔隙分布较为接近,二者在絮团外均能形成较好的导水通道。但在样品的底部,ZYZ 絮凝剂样品的孔隙分布较为均匀,形成的导水通道较好,水分子能从四面八方逃逸;而 ZYD 絮凝剂的孔隙分布较为分散,没有形成均匀的导水通道,右侧的导水通道好于左侧,说明底部右侧水分子能顺利排出,左侧的水分子排出受阻,这会导致底流放砂的质量浓度波动大,不利于形成均质的充填料浆。上述分析表明,ZYZ 絮凝剂的导水性能优于 ZYD 絮凝剂。

4 絮凝剂工艺参数优选

4.1 静态絮凝沉降试验

基于上述研究可知,ZYZ 絮凝剂的絮凝效果最佳,但价格较高,而矿山企业追求降本增效。因此,不仅需要选出最优的絮凝剂类型,还需要探寻 ZYZ 絮凝剂的最佳用量及取得最好絮凝效果的尾砂来料浓度。基于此,本文开展了静态絮凝沉降试验,选取最优 ZYZ 絮凝剂单耗和矿浆质量浓度,试验结果见表 2。

表 2 静态絮凝沉降试验结果

Table 2 Test results of static flocculation and settling

序号	絮凝剂单耗/(g/t)	矿浆质量浓度/%	沉降速度/(mm/min)	澄清层浊度/NTU
1	15	15	20.18	52.30
2	20	15	68.00	27.70
3	15	20	14.88	39.70
4	20	20	197.54	7.14

由表 2 可知,当絮凝剂单耗为 20 g/t 时,15% 和 20% 质量浓度的尾砂浆沉降速度较快,但 20% 质量浓度的尾砂浆的沉降速度是 15% 尾砂浆沉降速度的 3 倍,表明采用絮凝剂单耗为 20 g/t、矿浆质量浓度为 20% 的工况下进行絮凝沉降能快速提高浓密机内尾砂的泥层高度,从而获得高底流质量浓度,提高充填效率。基于此,絮凝剂单耗为 20 g/t、矿浆质量浓度为 20% 时的沉降效果最佳。但采用全尾砂充填,不仅要求底流质量浓度高,而且要保证底流质量浓度稳定,在快速提高泥层高度的同时,将泥层内部的水分子排出是得到稳定高浓度料浆的保证。为此,在沉降 20 h 后,对沉降的尾砂进行了扰动,破坏已有的絮团及絮网结构,让包裹在絮团及絮网内的水分子逃逸出来,从而保证获得稳定的高浓度,试验结果见表 3。

表 3 絮凝沉降平均质量浓度

Table 3 Average mass concentration of flocculation and settling

试验序号	絮凝剂单耗/(g/t)	矿浆质量浓度/%	平均质量浓度/%			
			2 h	3 h	20 h	絮凝扰动后沉降
1	15	15	53.83	55.95	58.93	63.05
2	20	15	58.09	58.56	60.07	66.53
3	15	20	59.29	59.29	61.26	64.32
4	20	20	59.03	60.24	64.29	68.39

由表 3 可知,絮凝剂单耗为 20 g/t 时,絮凝体扰动后二次沉降的矿浆平均质量浓度均高于絮凝剂单耗为 15 g/t 用量时的数值,絮凝效果与静态絮凝沉降结果保持一致。出现这种情况的原因如下:一方面由于尾砂偏细,而 15 g/t 絮凝剂用量偏少,形成的絮团及絮网结构没有将全部的尾砂包裹,细粒级的尾砂随着溢流水返回至选厂,导致沉降后平均质量浓度降低;另一方面,絮凝后残余细颗粒较多,而尾砂细颗粒表面带有相同电荷,细颗粒相互排斥,一部分细尾砂难以沉降,导致沉降后尾砂的平均质量浓度相对较低。

4.2 动态絮凝试验

在静态絮凝沉降试验的基础上,采用最优絮凝工艺参数(矿浆质量浓度 20%,絮凝剂用量 20 g/t)进行了动态絮凝试验。试验设置矿浆流量为 115.6 mL/min、矿浆质量浓度为 21.7%、絮凝剂浓度为 0.005%、絮凝剂流量为 10.68 mL/min,试验时间为 420 min。通过动态絮凝试验,得到了泥层高度、溢流浊度、底流质量浓度与沉降时间之间的关系,如图 10 和图 11 所示。

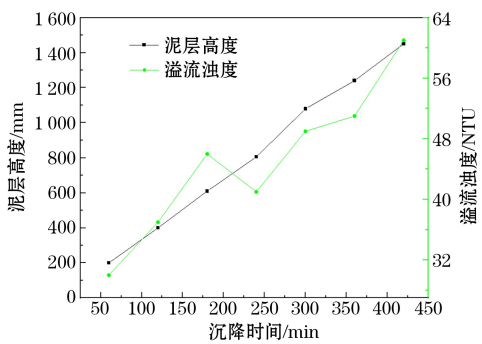


图 10 泥层高度和溢流浊度随沉降时间的变化

Fig.10 Variation of material layer height and overflow turbidity with settling time

图 10 中可以看出,泥层高度随时间呈线性变化。但随着沉降时间的增加,溢流浊度出现先增大、后减小、再逐渐增大的趋势,出现这种现象的原因为:当泥层高度增加到一定的高度时,会逐渐挤占澄清液的空间,澄清液的空间内无法存储多余的尾砂,致使尾砂逃逸,从而导致溢流浊度下降,如果能够及时排出底流,维持泥层高度,溢流浊度会逐渐稳定,达到污水综合排放标准要求。

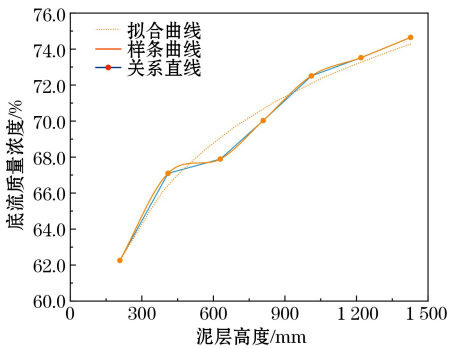


图 11 底流质量浓度和泥层高度之间的关系

Fig.11 Relationship between bottom flow concentration and material layer height

从图 11 可以看出,底流质量浓度随着沉积泥层高度的增加逐渐增大,并且两者呈对数关系增长,底流质量浓度和泥层高度之间的关系式为:

$$C=0.064\ 2\ln d+0.276\ 6 \tag{5}$$

式中:C 为底流百分比浓度;d 为沉积泥层的高度,mm。

通过式(5)可以计算出在相同处理量的情况下,获得底流质量浓度为 70%的料浆,则需要沉降泥层高度为 731 mm,该方法为矿山充填工艺提供了理论支撑。

5 工业应用

云南某矿充填站建设区域地面标高+2 114.00 m,地表充填管线布置区域标高约为+2 109.00~+2 168.00 m,充填系统建设完成后,根据静动态絮凝试验结果对充填系统进行了调试。调试之前,首先进行了各个子系统的单机运行调试,然后再继续进行整套系统的完整调试。

充填系统调试期间,选厂尾砂浆来料质量浓度为 20%,絮凝剂类型为 ZYZ 型,单耗为 20 g/t,浓度为 0.005%,浓密 12 h 后开始放砂充填,在一个正常充填作业班次内(8:30—18:30),每隔 20 min 对尾砂浆放砂质量浓度进行取样测试,结果如图 12 所示。在实际充填作业过程中,溢流水澄清,浓密机放砂平均质量浓度为 70%,泌水率≤5%,料浆流动性好,充填系统 24 h 连续运行稳定,充填体强度满足

采矿要求,充填效果良好。

采用充填采矿法开采矿石 200 万 t/a,可创造产值 34 228.44 万元,每年可减少约 80 万 t 尾矿的地表排放,按尾矿库建设和维护费用 20 元/t 计算,可节省排尾费用 1 600 万元/a。充填采矿法还能有效降低地表环境破坏和生态风险,助力矿山绿色可持续发展,经济效益和社会效益显著。

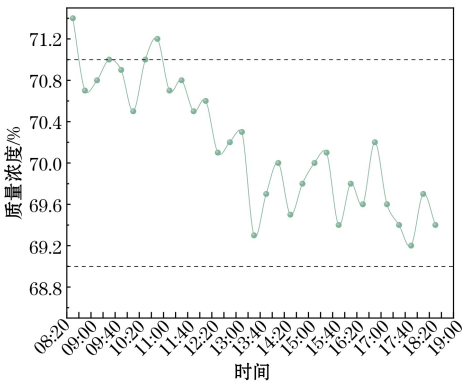


图 12 放砂质量浓度

Fig.12 Sand mass concentration

6 结论

(1) 基于分形理论原理,利用分形维数定量表征絮凝剂的絮凝效果,通过计算 4 种絮凝剂的分形维数,得到 ZYZ 型絮凝剂的分形维数最大,为 1.842 3,说明其絮凝效果最佳,且 4 种絮凝剂的絮凝效果排序为 ZYZ>JCY-2>ZYD>JCY-1。

(2) 以 ZYZ 和 ZYD 絮凝剂为例,引入三维重构和 CT 切片技术,从微观角度分析了 2 种絮凝剂的孔隙率、孔隙数量及孔隙尺寸随样品高度的变化规律,结果表明,ZYZ 型絮凝剂的絮凝效果优于 ZYD 絮凝剂。

(3) 通过静动态絮凝试验确定了 ZYZ 絮凝剂的最优工艺参数,得到了底流质量浓度与泥层高度的函数关系,计算了在相同处理量的情况下,矿山底流质量浓度要达到 70%,需要沉降的泥层高度为 731 mm,并进行了现场工业应用,结果表明,浓密机溢流水澄清,放砂平均质量浓度为 70%,泌水率≤5%,料浆流动性好,充填效果良好。

参考文献(References):

[1] 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.
YANG Liuhua, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Status and development tendency of the full-tailings paste mixing technology[J].Metal Mine,2016(7):34-41.

[2] 冯帆,孟宪伟,李鹏杰,等.下向进路分层无分段巷道充填法采场间柱回采技术研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):1-4.
FENG Fan, MENG Xianwei, LI Pengjie, et al. Technical research on the recovery of rib pillar in the stope of downward drift layered and non-segmented roadway filling method[J]. Mining Research and Development,2023,43(2):1-4.

[3] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1652-1666.
WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill:transformative technology for green mining in metal mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(5):1652-1666.

[4] 刘志义,李国斌,甘德清,等.阶段空场嗣后充填采矿法采场长度优化及工程应用[J].矿业研究与开发,2023,43(11):12-17.
LIU Zhiyi, LI Guobin, GAN Deqing, et al. Stope length optimization and engineering application of stage open stope with subseqauent filling ining method[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):12-17.

[5] 李伟明,曹艳武,刘胜.多变产状矿体复合型充填采矿法研究[J].矿业研究与开发,2023,43(7):1-4.
LI Weiming, CAO Yanwu, LIU Sheng. Study on compound mining method of ore body with variable occurrence[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):1-4.

[6] 颜丙乾,杨鹏,吕文生.三山岛金矿采场充填脱水工艺改进措施[J].金属矿山,2015(3):48-52.
YAN Bingqian, YANG Peng, LYU Wensheng. Improvement measures of stope filling dewatering process in Sanshandao Gold Mine[J].Metal Mine,2015(3):48-52.

[7] LU Q Y, YAN B, XIE L, et al. A two-step flocculation process on oil sands tailings treatment using oppositely charged polymer flocculants [J]. Science of the Total Environment,2016,565:369-375.

[8] LIU Z X, DANG W G, LIU Q L, et al. Optimization of clay material mixture ratio and filling process in gypsum mine goaf [J]. International Journal of Mining Science and Technology,2013,23(3):337-342.

[9] 张雷,郭利杰,许文远,等.细尾砂在矿山充填应用中关键工艺与材料的研究进展[J].材料导报,2023,37(23):106-116.
ZHANG Lei, GUO Lijie, XU Wenyuan, et al. Research on crucial technological and material issues of applying fine tailings to mine filling:a review[J].Materials Reports,2023,37(23):106-116.

[10] 王洪江,杨亚楠,郭佳宾.基于双重絮凝的超细尾砂浓密脱水性能及絮凝机制[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3597-3608.
WANG Hongjiang, YANG Ya'nan, GUO Jiabin. Thickening dehydration performance and flocculationmechanism of ultrafine tailings based on dual flocculation [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2023,54(9):3597-3608.

[11] 陈秋松,张钦礼,王新民,等.磁化水改善全尾砂絮凝沉降效果的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):4256-4261.
CHEN Qiusong, ZHANG Qinli, WANG Xinmin, et al. Experimental study on effect of magnetized water on flocculating sedimentation of unclassified tailings[J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,46(11):4256-4261.

[12] 卞继伟,王新民,肖崇春.全尾砂动态絮凝沉降试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(12):3278-3283.
BIAN Jiwei, WANG Xinmin, XIAO Chongchun. Experimental study on dynamic flocculating sedimentation of unclassified tailings[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(12):3278-3283.

[13] 张晓波,曹伟,姜群,等.尾砂浓缩-脱水及零排放技术研究[J].采矿技术,2022,22(2):181-184.
ZHANG Xiaobo, CAO Wei, JIANG Qun, et al. Research on tailings concentration-dehydration and wastewater zero discharge technology[J]. Mining Technology,2022,22(2):181-184.

[14] 李公成,王洪江,吴爱祥,等.全尾砂无耙深锥稳态浓密性能分析[J].工程科学学报,2019,41(1):60-66.
LI Gongcheng, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Analysis of thickening performance of unclassified tailings in rakeless deep conethickener [J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(1):60-66.

[15] 张爱卿,王贻明,孙会熙,等.强化非胶结充填体脱水试验及其规律研究[J].化工矿物与加工,2018,47(10):50-54.
ZHANG Aiqing, WANG Yiming, SUN Huixi, et al. Research on strengthening of dehydration test and law fornon-cemented backfill [J]. Industrial Minerals & Processing,2018,47(10):50-54.

[16] 王永福,郭毅,王少雷,等.基于分形理论的承压破碎矸石非Darcy渗流特性研究[J].煤矿安全,2024,55(9):149-156.
WANG Yongfu, GUO Yi, WANG Shaolei, et al. Study on non-Darcy seepage characteristics of load-bearing crushed gangue based on fractal theory[J]. Safety in Coal Mines, 2024,55(9):149-156.

[17] 李志华,耿倩,杨科,等.综采工作面垮落带注浆充填开采覆岩采动裂隙定量表征试验研究[J].中国矿业,2024,33(2):159-167.
LI Zhihua, GENG Qian, YANG Ke, et al. Quantitative characterization of mining-induced cracks in overlying strata of grouting filling mining in caving area of fully mechanized mining face[J].China Mining Maganine,2024,33(2):159-167.

[18] 代革联,常宝天,牛超,等.西南金刚煤矿岩溶陷落柱发育规律研究[J].煤炭技术,2022,41(6):54-58.
DAI Gelian, CHANG Baotian, NIU Chao, et al. Study on development law of karst collapse column in Jin'gang Coal Mine in southwest zone[J].Coal Technology,2022,41(6):54-58.

[19] 苗柯韩,黄勇,马晓凡,等.基于分形理论的岩体粗糙裂隙中溶质运移预测模型研究[J].岩土力学,2024,45(9):2527-2538.
MIAO Kehan, HUANG Yong, MA Xiaofan, et al. Predictive model for solute transport in a rough rock fracturebased on fractal theory[J].Rock and Soil Mechanics, 2024,45(9):2527-2538.

[20] 张田,田勇,王子,等.基于清晰度评价的自适应阈值图像分割法[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(9):1231-1238.
ZHANG Tian, TIAN Yong, WANG Zi, et al. Adaptive threshold image segmentation based on definition evaluation [J].Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020,41(9):1231-1238.