

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.251

外加剂作用下细粒浓缩尾矿二次脱水规律研究

杨钢锋^a, 王 勇^{a,b}, 吴爱祥^{a,b}

(北京科技大学 a.土木与资源工程学院; b.金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:尾矿在立式砂仓或深锥浓密机等脱水工艺条件下仍达不到预期质量分数, 添加外加剂是实现二次快速脱水的有效手段。针对某铜尾矿较细、泌水能力差, 经过深锥浓密机脱水后质量分数仍不达标的问题, 通过添加 A 型外加剂、B 型外加剂进行二次脱水实验, 并以不添加外加剂作为对照。实验结果表明: 添加外加剂的料浆 1 h、2 h 泌水量明显大于不添加外加剂的料浆, 随着泌水时间的增加, 4 h 时添加与不添加外加剂的料浆泌水量基本持平。通过 3 种情况下脱水质量分数与脱水时间的回归方程, 获得了浓缩尾矿二次脱水数学模型, 即二次脱水质量分数与脱水时间呈指数函数关系。最后, 分析了外加剂对尾矿快速脱水和结构强化机理, 外加剂不仅可以快速提高尾矿脱水质量分数, 同时可增加尾矿稳定性, 具有潜在工程应用价值。

关键词:尾矿; 外加剂; 二次脱水; 泌水率; 机理

中图分类号:TD853; TD854 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2022)02-021-08

Study on the mechanism of secondary dewatering for fine thickened tailings containing admixture

YANG Gangfeng^a, WANG Yong^{a,b}, WU Aixiang^{a,b}

(a. School of Civil and Resource Engineering; b. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: When the tailings still do not reach the expected mass fraction under the dewatering process conditions by vertical sand silo or deep cone thickener, the addition of admixture in the tailings is an effective means to achieve secondary rapid dewatering. Taking the fine copper ore tailings whose bleeding ability was poor, and the mass fraction was still not up to standard after dewatering by the deep cone thickener as the example, the secondary dewatering experiment was carried out with three groups, one adding the A-type admixture another adding the B-type admixture, and the third one without adding admixture. The experimental results show that the bleeding amount of slurry with adding admixture is significantly greater than that without adding admixture after 1 h and 2 h. With the increase of bleeding

收稿日期: 2020-10-25 网络出版日期: 2021-04-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0603705); 国家自然科学基金资助项目(51804015)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFC0603705) and National Natural Science Foundation of China(51804015).

作者简介: 杨钢锋(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为全尾砂膏体充填, (E-mail)641042945@qq.com。

通讯作者: 王勇(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事全尾砂膏体充填及金属矿深部开采等方向的教学与研究工作, (E-mail)wangyong8551@126.com。

time, the bleeding amount of slurry with adding admixture and without adding admixture is basically equal at 4 h. Through the regression equation of dewatering mass fraction and dewatering time in three cases, the mathematical model of secondary dewatering of concentrated tailings was obtained, i.e. the relationship between the secondary dewatering mass fraction and the dewatering time is exponential function. Finally, the mechanism of rapid dewatering and structural strengthening of tailings by adding admixture were analyzed. Adding admixture not only increased the mass fraction of tailings, but also improved the stability of tailings, which has potential engineering application value.

Keywords: tailings; admixtures; secondary dewatering; bleeding rate; mechanism

随着矿产资源的需求量越来越大,国内矿产资源的大量开采导致尾矿库的负荷不断加大,堆积高度不断增加,这就对尾矿坝体的稳定性有了更高的要求^[1]。还有尾矿库本身无法彻底消除的安全隐患,威胁着矿山周边的安全^[2]。尾矿传统低质量分数湿排对尾矿坝体的稳定性极为不利^[3],同时对尾矿坝体的维护需要巨大的成本。排出尾矿质量分数越高,坝体稳定性就越好^[4],因此出现了高质量分数排放^[5]。尾矿高质量分数排放与传统的湿排区别在于含水量的不同,因此,脱水工艺成了高质量分数排放的关键环节^[6]。

尾矿的脱水工艺按照使用设备和流程不同可分为一段式和多段式两种^[7]。根据国内目前尾矿脱水工艺的发展现状^[8-10],虽然多段式工艺对尾矿脱水的效果较好,但由于其工艺复杂,脱水成本高等诸多问题^[7],使用具有很大的局限性。立式砂仓^[11]是传统的一段脱水工艺,在中国矿山的实际应用较多,但普遍存在着放砂质量分数低的问题^[12],一段脱水后的尾矿质量分数达不到排放要求。近年来随着尾矿脱水技术的不断进步,深锥浓密机由于其生产能力大,工艺简单,能耗小,底流质量分数大等优点^[13],在国内外的细粒尾矿浓密脱水中得到了广泛的认可和应用^[14-16]。

由于细粒尾矿保水性好、泌水能力差^[17],即使尾矿料浆经过深锥浓密机脱水,依然存在质量分数不达标的情况。另一方面,脱水后的尾矿料浆仍然呈现为泥浆状,直接堆坝难度大。笔者以某铜尾矿为例进行研究,该尾矿较细,泌水能力差。尾矿料浆经过深锥浓密机浓密脱水后,排放至尾矿库的料浆质量分数为 62%,尾矿料浆中还存在大量的自由水。但是由于尾矿颗粒过细,其间的自由水如果依靠自然泌水,需要泌水时间长,水分泌出困难,或者泌出的同时就已经被蒸发,造成水资源大量流失。因此,尝试借助外加剂,在料浆排放至尾矿库之前添加,对细粒尾矿进行主动二次脱水,使得料浆质量分数快速提高,不仅提高回水率,同时也改善尾矿的颗粒黏结力,有利于尾矿堆积角形成和内部结构增强。

实验中选用巴斯夫 A 型和 B 型 2 种不同外加剂进行对比试验,分别对 A 型、B 型、不添加外加剂 3 种情况下尾矿料浆泌水性能进行测试,研究浓缩尾矿二次脱水规律,并对外加剂与尾矿作用机理进行分析,为浓缩尾矿进一步脱水提供依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料和装置

实验材料来自某铜矿选矿厂,该尾矿容重较小,孔隙率相对较大,理论饱和和质量分数低,基本物理性能如表 1 所示,表 1 中孔隙率和理论饱和和质量分数是根据尾矿真密度、容重计算得到^[18]。粒级测量采用人工筛分和激光粒度仪相结合的方式,测试结果如图 1 所示(其中累计含量指小于或等于该粒径大小的颗粒质量占颗粒总质量的比例)。该尾矿 74 μm 以下颗粒含量为 64%,属于细粒尾矿。

表 1 全尾砂基本物理性能

Table 1 Basic physical properties of total tailings

真密度/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	容重/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙率/%	理论饱和和质量分数/%
2.688	1.4	47.92	74.50

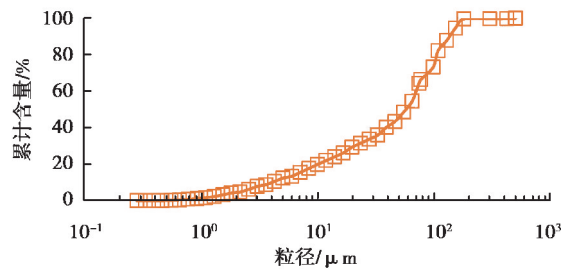


图 1 尾矿粒级组成

Fig. 1 Particle size distribution of tailings

A 型和 B 型外加剂采用巴斯夫专门针对尾矿二次脱水、地表排放的 WPA 系列析水剂,其中 A 型外加剂为白色黏稠状液体、B 型外加剂为黄褐色黏稠状液体。实验装置包括直径 110 mm、容量 500 mL 的烧杯,精度 0.1 g 的天平、1 000 mL 的量筒、移液管和计时秒表。

1.2 实验方法

根据某铜尾矿实际排放质量分数为 62% 左右,因此实验料浆质量分数也配置为 62%。配置好的料浆倒入烧杯内,分别测量 1, 2, 4 h 料浆泌水量,其中 1 h 和 2 h 料浆泌水量用来衡量料浆快速泌水的能力,而 4 h 泌水量用来测试评价其长期泌水效果。具体实验方法如下:

1) 按照配料要求称取全尾砂,使用量筒量取定量的水,倒入容器内进行搅拌,一次将不添加外加剂、添加 A 型外加剂、B 型外加剂 3 种情况所需的料浆配置好,并搅拌均匀,等质量分为 3 组。

2) 其中第 1 组料浆迅速倒入烧杯,料浆不要超出烧杯口,将烧杯稍微震动,使料浆表面平整。每隔一段时间,将泌出的水分取出,测量泌出水分的质量。该烧杯内料浆作为基准组,即不添加外加剂。

3) 第 2 组和第 3 组料浆分别加入 5 g A 型外加剂和 5 g B 型外加剂(根据前期探索实验和厂家建议,最终选择每组实验外加添加量为 5 g,添加量是尾砂干量的 5%),再次搅拌均匀,迅速倒入另外 2 个烧杯,料浆液面高度与基准组料浆保持一致。与基准组间隔相同时间,将泌出的水分取出,测量泌出水分的质量。

4) 按照式(1)计算不添加外加剂、添加 A 型外加剂、添加 B 型外加剂 3 种情况泌水率:

$$S = \frac{m}{M(1 - \rho_w)} \times \% \quad (1)$$

式中: S 为泌水率,%; m 为静置某一时间的泌水量, g; M 为料浆质量, g; ρ_w 为料浆初始质量分数, %。

2 结果与分析

2.1 外加剂作用下尾矿二次脱水规律

不添加外加剂、添加 A 型和 B 型外加剂情况下泌水率实验结果如表 2 所示。根据表 2, 绘制不同实验组别泌水率和质量分数随泌水时间变化情况如图 2~3 所示。由图 2 和图 3 可知, 添加外加剂的浆体初期(1 h、2 h)泌水量明显大于不添加的料浆。其中添加 A 型外加剂 1 h 泌水率达到 19.89%, 2 h 泌水率达到 28.26%, 分别比不添加外加剂时的泌水率 12.61%、22.02% 高出 7.28% 和 6.24%。添加 B 型外加剂 1 h 和 2 h 的泌水率分别比不添加时高出 7.9% 和 6.9%。对添加 2 种外加剂的 1 h 和 2 h 泌水率进行对比, 添加 B 型外加剂的泌水率略高于添加 A 型外加剂的泌水率, 但相差不大。总的来说, 添加外加剂对泌水性能改善较为明显。在 4 h 时, 3 种情况料浆的质量分数介于 71%~72% 之间, 这表明, 随着泌水时间的持续增加, 添加与不添加外加剂的泌水量逐渐趋于相等。

表 2 不添加外加剂、添加 A 型和 B 型外加剂泌水实验结果

Table 2 Bleed test results of 3 groups: without admixtures, with type A and B admixtures

实验组别	泌水率/%				质量分数/%			
	0 h	1 h	2 h	4 h	0 h	1 h	2 h	4 h
不添加外加剂	0	12.61	22.02	34.60	62.00	65.12	67.66	71.39
A 型外加剂	0	19.89	28.26	33.74	62.00	67.07	69.46	71.12
B 型外加剂	0	20.51	28.92	34.14	62.00	67.24	69.66	71.24

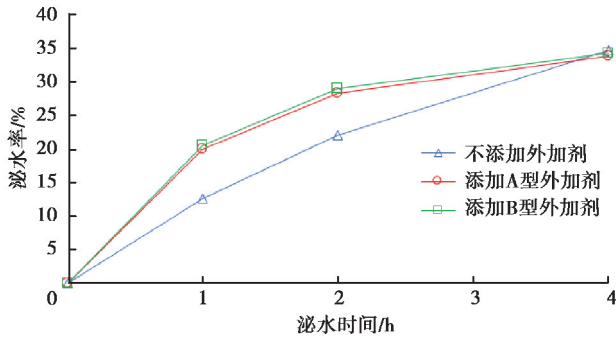


图 2 泌水率随泌水时间的变化

Fig. 2 Variation of bleeding rate with bleeding time

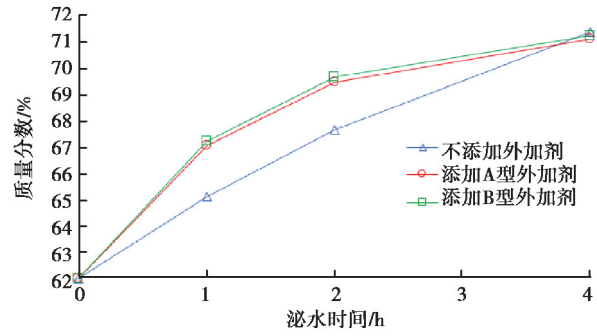


图 3 质量分数随泌水时间的变化

Fig. 3 Variation of mass fraction with bleeding time

泌出水分取出过程发现,同一泌水时间内添加外加剂的料浆形状容易固定,而不添加外加剂料浆仍然呈现“泥浆”状态,取出水分后放平烧杯,料浆形态差别明显,如图 4 所示。图 4(a)是不添加外加剂料浆的形态,可以看到取出泌出的水分后,料浆含水量仍然较大,具有较好的流动性,呈泥浆状态。图 4(b)是添加 B 型外加剂后料浆的形态,取出泌出的水分后,料浆形状比较固定,结构密实,形成了一定的堆积角度。

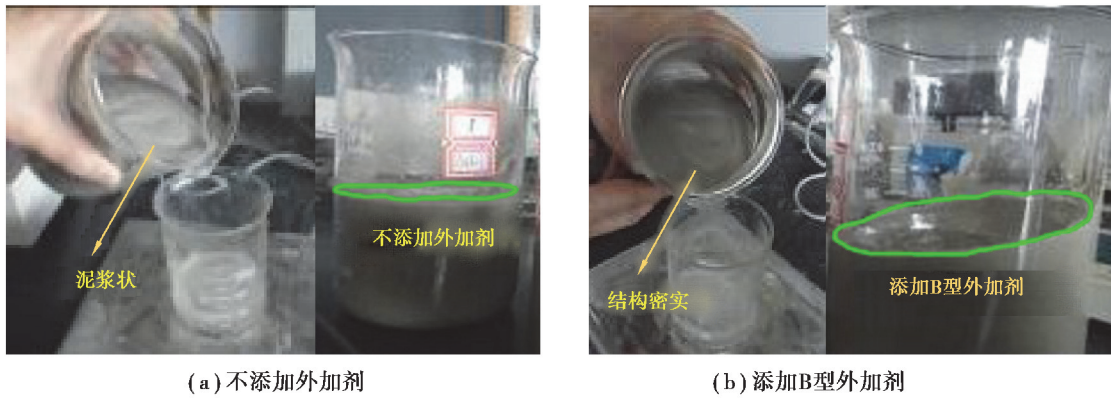


图 4 不添加外加剂和添加 B 型外加剂料浆取水形态对比

Fig. 4 Comparison of water form of groups without adding admixture and with adding type B admixture

2.2 浓缩尾矿二次脱水数学模型

根据表 2 不添加外加剂、添加 A 型和 B 型外加剂的实验结果,通过 Matlab 软件分别拟合出 3 组实验料浆质量分数随泌水时间的演化关系,见式(2)~(4)。

$$f_1(t) = -12.38e^{-\frac{t}{2.981}} + 74.20, \quad \text{复相关系数 } R^2 = 0.9925; \quad (2)$$

$$f_2(t) = -9.595e^{-\frac{t}{1.331}} + 71.60, \quad \text{复相关系数 } R^2 = 1.0000; \quad (3)$$

$$f_3(t) = -9.651e^{-\frac{t}{1.267}} + 71.65, \quad \text{复相关系数 } R^2 = 1.0000. \quad (4)$$

式中: $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ 分别表示不添加外加剂、添加 A 型、B 型外加剂的二次脱水时间为 t 的尾矿料浆质量分数。

由式(2)~(4)可以看出,当泌水时间为 0 时,质量分数为二次脱水前的初始质量分数的 62%;随着尾矿料浆泌水时间不断增加,二次脱水的质量分数接近于极限值。需要注意的是,当添加外加剂后,虽然由于负电荷间斥力作用,尾矿间的水会进一步快速脱出,但由于外加剂形成的絮网结构仍然会包裹一些水分。为此,添加外加剂的极限脱水质量分数分别为 71.60%(A 型)和 71.65%(B 型),比不添加外加剂的极限脱水质量分数 74.20%要小一些^[19]。需要注意的是,式(2)不添加外加剂的方程极限脱水质量分数 74.20%与表 1 中理论饱和质量分数 74.50%较为接近,进一步验证了回归方程的合理性。3 组实验质量分数随泌水时间变化拟合曲线如图 5 所示。

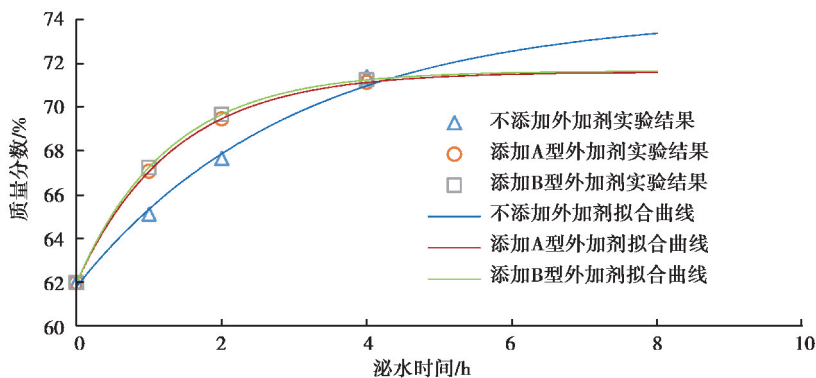


图 5 质量分数随泌水时间变化拟合曲线图

Fig. 5 Fit curve of mass fraction changes with bleeding time

实际上,由式(2)~(4)以及图 5 还可以看出,不论是否添加外加剂,浓缩尾矿二次脱水的规律较为相似,对其共性规律进行归纳,发现其均符合如下数学模型。

$$f(t) = -ae^{-\frac{t}{c}} + b, \tag{5}$$

式中: $f(t)$ 表示二次脱水时间为 t 的尾矿料浆质量分数; b 代表长时间脱水的极限质量分数; $b-a$ (指 b 减去 a)代表脱水时间为 0 时的浓缩尾矿初始质量分数; c 为回归常数,因尾矿种类、基本物化性能、外加条件等不同。

根据式(5),绘制浓缩尾矿二次脱水质量分数随泌水时间演化规律如图 6 所示。横坐标是泌水时间, h; 纵坐标是质量分数, %; 截距代表初始质量分数 $b-a$, 随着尾矿料浆泌水时间不断增加, 质量分数趋近于极限脱水质量分数 b 。

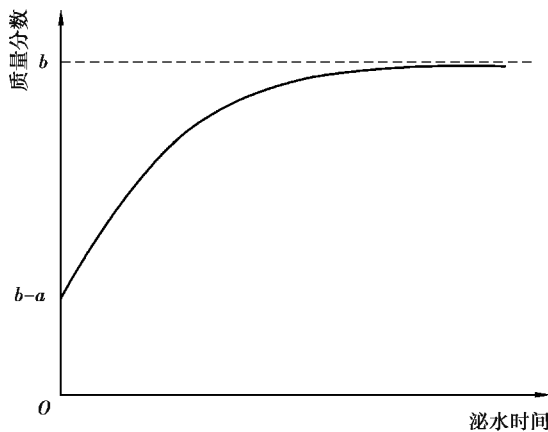


图 6 浓缩尾矿二次脱水质量分数随泌水时间演化规律

Fig. 6 Evolution law of mass fraction of secondary deep dewatering of concentrated tailings with bleeding time

3 外加剂对浓缩尾矿二次脱水作用机理及工程价值分析

3.1 外加剂与尾矿料浆作用机理

添加外加剂后可以明显改善尾矿的泌水性能,使得尾矿料浆中的自由水快速析出,达到提高料浆质量分数的目的。因此,分析所添加外加剂的作用机理对于外加剂更好地应用在工程实践中具有非常重要的意义。

3.1.1 快速脱水机理

在未添加外加剂的情况下,尾矿颗粒与水混合形成尾矿悬浮体系,体系中不同的矿物颗粒所带的电荷存在差异,相互吸引形成了包含大量水的絮凝结构。添加的外加剂对尾矿存在静电斥力和空间位阻 2 种作

用^[20],在这 2 种作用下,尾矿浆中的水分得以快速脱出。

1) 静电斥力作用。实验所添加外加剂属于阴离子型表面活性剂,其分子带有许多在尾矿中呈现负电性的基团,由于尾矿颗粒的表面带有正电荷,加入外加剂后,如图 7 所示,呈负电性的离子将尾矿颗粒包围,被负离子包围的尾矿颗粒相互之间带有同种负电荷,这些尾矿颗粒相互靠近时,由于静电斥力作用使尾矿颗粒相互排斥而远离,从而释放出自由水,起到减水的效果。

2) 空间位阻作用。阴离子型表面活性剂的主链和侧链上带有的带电基团使其能够吸附在尾矿颗粒的表面形成聚合物分子吸附层,如图 8 所示。当尾矿颗粒相互靠近时,这些吸附层会发生重叠,在尾矿颗粒间产生斥力作用,使尾矿颗粒相互远离,从而释放出自由水。

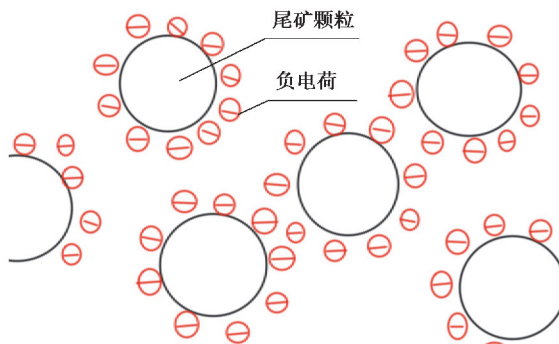


图 7 尾矿颗粒间的静电斥力作用

Fig. 7 Electrostatic repulsion between tailings particles

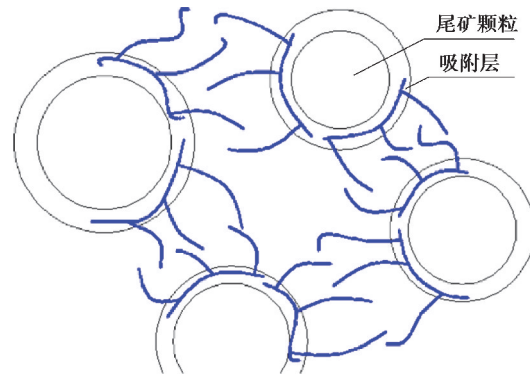
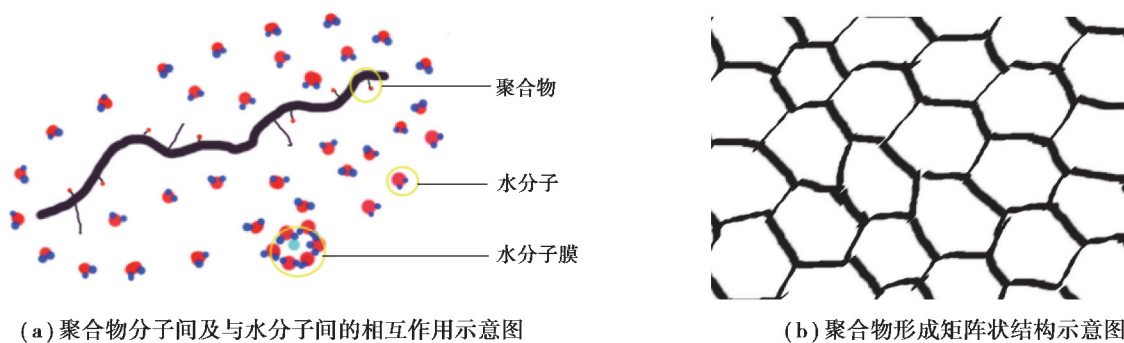


图 8 空间位阻作用

Fig. 8 Space steric hindrance effect

3.1.2 内部结构强化机理

添加外加剂后,通过外加剂内高分子量聚合物分子间及与水分子间的相互作用,在分子周围形成水分子膜,若干个由水分子膜包裹着的分子借助分子间作用力,形成空间分子网格结构,从而建立一个高度结构化的尾矿浆体系,在尾矿变形过程中,这样的尾矿浆体系像一个流动的矩阵,如图 9 所示,在带动其流动的同时,始终保持一定的匀质性和稳定性。因此,添加外加剂脱水后,使得尾矿结构更加密实,更加稳定,更有利于尾矿的堆积和筑坝,可以提高尾矿库的安全性。



(a) 聚合物分子间及与水分子间的相互作用示意图

(b) 聚合物形成矩阵状结构示意图

图 9 添加外加剂后尾矿浆结构强化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of strengthened tailings structure with adding admixture

3.2 工程价值分析

通过添加外加剂改善泌水性能,快速将料浆中自由水析出,对于浓缩尾矿进一步脱水具有明显效果,不仅是尾矿不能达到预期脱水质量分数的一种补救措施,同时还可以使得尾矿结构更加密实,增强细粒尾矿排放或堆坝的稳定性,具有较好的潜在工程价值,主要体现在以下 3 个方面。第 1,使用外加剂对尾矿进行快速

脱水,可以提高水的利用率,减少了水资源的浪费;第2,添加外加剂后易于尾矿排放堆积角的形成,可以在占地面积不变的情况下,增加尾矿库的库容;第3,由于尾矿结构的提升,可以适当提升堆积高度而不影响坝体稳定性,易于细粒全尾堆坝,从而减少部分筑坝成本。

4 结 论

1)通过3组脱水实验,不添加外加剂1h泌水率为12.61%,2h泌水率为22.02%,而添加A型外加剂和B型外加剂1h泌水率分别可达到19.89%和20.51%,2h泌水率分别可达到28.26%和28.92%,明显高于不添加外加剂。实验结果表明添加外加剂可以对细粒尾矿泌水性能进行改善,达到料浆内水分快速泌出的目的。

2)通过Matlab软件对实验结果进行拟合发现,浓缩尾矿二次脱水的规律较为相似,无论是否添加外加剂,其质量分数随泌水时间的变化均符合 $f(t) = -ae^{-\frac{t}{c}} + b$ 指数函数关系。初期脱水速度快,随着时间的变化脱水速度逐渐下降,最终尾矿的质量分数趋于某一恒定值。

3)对实验所添加外加剂的作用机理进行分析。实验所添加外加剂对尾矿存在静电斥力和空间位阻两种作用,可以达到快速泌水的目的。同时通过外加剂内高分子量聚合物分子间及与水分子间的相互作用,保持了尾矿浆体系的稳定性。添加外加剂对浓缩尾矿二次脱水,不仅可以提高回水率,还可增加尾矿库库容,有利于尾矿排放和堆坝,具有较好的潜在工程价值。

参考文献:

- [1] 刘婷, 马录录. 利用渗透试验浅谈尾矿坝稳定性[J]. 吉林地质, 2019, 38(1): 85-88.
Liu T, Ma L L. Discussion the stability of the tailings dam using the permeability test[J]. Jilin Geology, 2019, 38(1): 85-88. (in Chinese)
- [2] Li Q M, Yuan H N, Zhong M H. Safety assessment of waste rock dump built on existing tailings ponds[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(7): 2707-2718.
- [3] 张兴凯, 王启明, 相桂生. 金属非金属尾矿库安全现状及分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(2): 60-62.
Zhang X K, Wang Q M, Xiang G S. Analysis of current safety situation of metal and non-metal tailing pond[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2006, 2(2): 60-62.(in Chinese)
- [4] Cambridge M. The future of tailings disposal in Europe[J]. Minerals & Energy - Raw Materials Report, 2003, 18(4): 16-24.
- [5] 摩克逊 S. 尾矿坝时代的结束[J]. 周丛, 译. 水利水电快报, 1998, 19(5): 27-28.
Mokson S. The end of the tailing dam period[J]. Zhou C, trans. Express Water Resources & Hydropower Information, 1998, 19(5): 27-28. (in Chinese)
- [6] Jewell R J, Fourie A B. Paste and thickened tailings: a guide[M]. Perth: Australian Center for Geomechanics, 2003: 147-163.
- [7] 杨盛凯, 王洪江, 吴爱祥, 等. 尾矿高质量分数排放技术的发展概况及展望[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5): 28-33.
Yang S K, Wang H J, Wu A X, et al. General development and prospect of tailings high-density discharge technology[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(5): 28-33.(in Chinese)
- [8] 汪建新, 张艳萍, 郭喜平, 等. 铁精粉尾矿干排技术的发展现状及应用[J]. 现代矿业, 2016, 32(11): 51-55.
Wang J X, Zhang Y P, Guo X P, et al. Development progress and applications of iron concentrate powder tailings dry disposal technology[J]. Modern Mining, 2016, 32(11): 51-55.(in Chinese)
- [9] 周科平, 刘福萍, 邓红卫, 等. 尾矿干堆及脱水工艺研究应用与展望[J]. 科技导报, 2013, 31(9): 72-79.
Zhou K P, Liu F P, Deng H W, et al. Applications and prospects of dry tailings disposal and dehydration technology[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(9): 72-79. (in Chinese)

- [10] 吕宪俊, 连民杰. 金属矿山尾矿处理技术进展[J]. 有色矿冶, 2004, 20(S1): 11-14.
Lü X J, Lian M J. Recent progress on tailings disposal technology in metal mines[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy[J]. 2004, 20(S1): 11-14. (in Chinese)
- [11] 孙凯年. 尾砂充填系统及立式砂仓[J]. 有色矿冶, 1985(1): 15-17.
Sun K N. Tailings filling system and vertical sand silo[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 1985(1): 15-17. (in Chinese)
- [12] 崔仑, 王剑波, 孙豁然, 等. 提高立式砂仓放砂质量分数的研究[J]. 黄金, 1998, 19(6): 20-22.
Cui L, Wang J B, Sun H R, et al. Study on improving the density of discharged sand pulp from silo[J]. Gold, 1998, 19(6): 20-22. (in Chinese)
- [13] Tao D, Parekh B K, Zhao Y, et al. Pilot-scale demonstration of Deep ConeTM paste thickening process for phosphatic clay/sand disposal[J]. Separation Science and Technology, 2010, 45(10): 1418-1425.
- [14] Jiao H Z, Wu A X, Wang H J, et al. The solids concentration distribution in the deep cone thickener: a pilot scale test[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, 30(2): 262-268.
- [15] Ruan Z E, Wang Y, Wu A X, et al. A theoretical model for the rake blockage mitigation in deep cone thickener: a case study of lead-zinc mine in China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019: 1-7.
- [16] Tao D, Parekh B K, Zhao Y M, et al. Pilot-scale demonstration of deep coneTM paste thickening process for phosphatic clay/sand disposal[J]. Separation Science and Technology, 2010, 45(10): 1418-1425.
- [17] 王勇, 王洪江, 吴爱祥, 等. 细粒尾矿泌水特性及其影响因素[J]. 黄金, 2011, 32(9): 51-54.
Wang Y, Wang H J, Wu A X, et al. Research on fine tailings bleeding characteristics and the influencing factors[J]. Gold, 2011, 32(9): 51-54. (in Chinese)
- [18] 王勇, 王洪江, 吴爱祥. 基于高径比的深锥浓密机底流质量分数数学模型[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(8): 113-117.
Wang Y, Wang H J, Wu A X. Mathematical model of deep cone thickener underflow concentration based on the height to diameter ratio[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(8): 113-117. (in Chinese)
- [19] 王勇, 吴爱祥, 王洪江, 等. 絮凝剂用量对尾矿浓密的影响机理[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11): 1419-1423.
Wang Y, Wu A X, Wang H J, et al. Influence mechanism of flocculant dosage on tailings thickening[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11): 1419-1423. (in Chinese)
- [20] 孙振平, 吴乐林, 胡匡艺, 等. 保坍型聚羧酸系减水剂的研究现状与作用机理[J]. 混凝土, 2019(6): 51-54, 60.
Sun Z P, Wu L L, Hu K Y, et al. Research status and acting mechanism of slump retention type polycarboxylate plasticizer[J]. Concrete, 2019(6): 51-54, 60. (in Chinese)

(编辑 张 苹)