

## 细粒赤铁矿精矿絮凝沉降行为和动力学

董鑫<sup>1</sup>, 芦川<sup>2</sup>, 张芹<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 中国宝武钢铁集团有限公司武钢有限炼铁厂, 湖北 武汉 430080)

**摘要:** 这是一篇矿物加工工程领域的论文。本文以细粒赤铁矿精矿为研究对象, 探究了絮凝剂分子量、絮凝剂配制浓度、絮凝剂用量和矿浆温度对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降效果的影响, 同时通过动力学分析探究符合细粒赤铁矿精矿的絮凝沉降动力学模型。结果表明: 分子量为 900 万、配制浓度为 0.05% 和用量为 60 g/t 的 APAM 有好的沉降效果和较低的成本, 添加 APAM 会明显改善沉降效果, 高 APAM 分子量, 会得到快的沉降速度和低的最终底流浓度; 低 APAM 配制浓度, 会得到快的沉降速度和高的最终底流浓度; APAM 用量的增加使沉降速度变快、絮团粒径增大, 但二者增加速度均逐渐变缓, 最终底流浓度下降; 随着矿浆温度的升高, 沉降速度增加, 但增速不太明显, 最终底流浓度升高; APAM 对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降的动力学分析, 双曲线动力学模型方程取得了较好的拟合度, APAM 对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降动力学可以优先使用双曲线动力学模型  $1/(1-\frac{c}{c_0}) = \frac{k}{t} + b$  来描述。

**关键词:** 矿物加工工程; 细粒赤铁矿精矿; 絮凝沉降; 动力学; 絮团粒径

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.06.019

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 06-0124-07

**引用格式:** 董鑫, 芦川, 张芹. 细粒赤铁矿精矿絮凝沉降行为和动力学[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 124-130.

DONG Xin, LU Chuan, ZHANG Qin. Flocculation and settlement behavior and dynamic of fine-grained hematite concentrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 124-130.

我国铁矿资源丰富, 储存量多, 但我国铁矿石存在品位低、嵌布粒度细和矿物组成复杂的特点, 简称“贫”“细”“杂”, 且这类铁矿石占比大。为了更加有效地进行分选, 必须让其得到充分单体解离, 从而导致细粒矿物的增多<sup>[1]</sup>。但随着细粒矿物的增多, 会对后续的浓缩过滤产生不良的影响, 例如沉降时间长、过滤速率低、穿漏现象严重、滤饼含水率高等问题<sup>[2]</sup>。因此为解决这一问题, 通常加入絮凝剂, 如聚丙烯酰胺、明矾、聚合氯化铝、聚合氯化铁等, 通过絮凝剂的吸附架桥、电性中和、网捕卷扫等作用来改善沉降效果<sup>[3]</sup>。

研究发现, 细粒颗粒絮凝形成絮团需要满足两个条件, 一是颗粒之间必须产生碰撞, 二是必须有一定比率的颗粒碰撞使颗粒粘结在一起。影

响碰撞的因素有三种作用: 布朗运动、悬浮颗粒的不等速沉降和悬浮液体内的速度梯度<sup>[4]</sup>。胡宗岗等<sup>[5]</sup>以赤铁矿精矿为对象, 采用正交实验, 考查不同因素对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降的影响, 结果表明影响因素对平均沉降速度影响程度大小顺序为: 絮凝剂单耗>絮凝剂溶液浓度>入料浓度>絮凝剂分子量。周丹等<sup>[6]</sup>通过分析颗粒污泥沉降过程的特点, 采用颗粒物质干涉沉降规律对颗粒污泥沉降过程进行描述, 结合 Allen 阻力公式, 建立了颗粒污泥沉降动力学模型。陈洪松等<sup>[7]</sup>用吸管法研究了不同浓度 NaCl 对细颗粒泥沙静水絮凝沉降的影响, 结果表明细颗粒泥沙相对浓度随时间的变化符合双曲线动力学模式。关许为等<sup>[8]</sup>在比较一、二级动力学模式后认为: 二者都可用于絮

收稿日期: 2024-03-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (50974099)

作者简介: 董鑫 (2000-), 男, 硕士研究生, 从事细粒赤铁矿精矿絮凝沉降研究。

通信作者: 张芹 (1966-), 女, 教授, 硕士研究生导师, 从事矿物加工理论与工艺研究。

凝速率系数和平均沉降速度问题的研究，但二级动力学模式用于数据拟合的相关性更好。唐海香等<sup>[9]</sup>以煤泥水为对象，采用正交实验，探究了动力学因素对煤泥水的絮凝沉降效果影响很大。

大量资料探究了泥沙、污泥等细颗粒动力学，但有关细粒赤铁矿精矿相关研究资料较少。本研究将以细粒赤铁矿精矿为研究对象，探索不同条件—絮凝剂分子量、絮凝剂浓度、絮凝剂用量和矿浆温度对赤铁矿精矿絮凝沉降效果的影响，并对赤铁矿精矿絮凝沉降进行动力学分析。

1 实验材料

1.1 实验矿样

实验所用原料取自于宝武钢铁武汉工业港铁精矿，密度为 4 150 kg/m<sup>3</sup>，试样化学多元素分析见表 1。

表 1 试样多元素分析/%  
Table 1 Chemical multi-element analysis of samples

| TFe   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn    | P     | S     | Zn    | CaO   |
|-------|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 64.50 | 8.410            | 1.569                          | 0.150 | 0.042 | 0.021 | 0.004 | 0.012 |

将原理用 XMCQ-Φ290 mm × 90 mm 瓷衬球磨机磨至 -150 μm 备用，用湿筛的方法对铁精矿进行粒度分析，结果见表 2。

表 2 试样粒度分析  
Table 2 Particle size analysis of samples

| 粒级/μm   | 产率/%  | 累积产率/% |
|---------|-------|--------|
| +150    | 0.00  | 0.00   |
| -150+74 | 11.00 | 11.00  |
| -74+45  | 15.60 | 26.60  |
| -45+38  | 4.25  | 30.85  |
| -38     | 69.15 | 100.00 |

由表 1 可知实验矿样全铁品位为 64.32%，由表 2 可知实验矿样 -38 μm 粒级 69.15%，细粒矿物含量非常高。

1.2 实验药剂

实验所用絮凝剂为有机高分子阴离子型聚丙烯酰胺（APAM），选取三种不同分子量的聚丙烯酰胺，分别为 500 万、900 万和 1 300 万，分析级。

1.3 实验仪器

实验过程中主要使用的仪器与设备有纯水仪、250 mL 沉降瓶、数字搅拌器、200 mL 量筒、精密电子称、烧杯、秒表、分析天平、药匙等。

2 实验方法

2.1 沉降实验

用精密电子秤称取 12.5 g 矿样置于烧杯中，然后用量程为 200 mL 的量筒量取 180 mL 去离子水倒入烧杯中，再将数字搅拌器放入矿浆中，以 360 r/min 的转速搅拌 10 min，使得矿浆充分搅拌均匀。搅拌完成后迅速将矿浆倒入沉降瓶中，后加入一定量的絮凝剂溶液再定容至 250 mL，匀速上下翻转十次混合均匀，静置于水平实验台后开始计时，记录底层悬浊液高度及矿浆的沉降高度，并计算出悬浊液的浓度，计算公式见式（1）：

$$c = \frac{m_0 \cdot c_0}{m_0 - (v_0 - v)\rho_{\text{水}}} \times 100\%$$

(1)

式中，*c* 为记录点底流悬浊液浓度，g/L；*m*<sub>0</sub> 为初始矿浆质量，g；*c*<sub>0</sub> 为初始矿浆浓度，g/L；*v*<sub>0</sub> 为初始矿浆体积，mL；*v* 为记录点底流悬浊液体积，mL；*ρ*<sub>水</sub> 为水的密度，g/cm<sup>3</sup>。

3 实验结果与讨论

3.1 絮凝剂分子量对铁精矿沉降效果的影响

在絮凝剂配制浓度为 0.05%，用量为 60 g/t，温度为室温（20 ℃）的条件下，探究不同分子量大小的絮凝剂对铁精矿沉降效果的影响，结果见图 1。

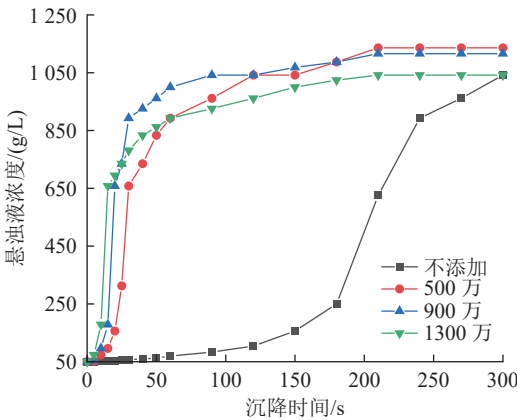


图 1 絮凝剂分子量大小对底流悬浊液浓度的影响  
Fig.1 Effect of molecular weight of flocculants on the concentration of underflow suspension

由图 1 可知，沉降 300 s 时，不添加 APAM 的底流浓度为 1 041.7 g/L，APAM 分子量为 500 万的底流浓度为 1 136.4 g/L，APAM 分子量为 900 万的底流浓度为 1 116.7 g/L，APAM 分子量为 1 300 万的底流浓度为 1 041.7 g/L，其曲线更靠左，到达 625 g/L 所用时间更短。随着 APAM 分子量的增加，沉降速度变快，最终底流浓度降

低, 阻滞空间会更大, 表明这会对后续过滤脱水产生不良的影响。这可能是因为 APAM 的长分子链中含有一定数量的极性基团, 能够吸附矿浆中的矿物颗粒, 使颗粒间链接架桥或通过电荷中和凝聚形成大的絮团。而高分子量的 APAM 的链会更长, 在与赤铁矿精矿作用时产生的絮团会更大, 得到的絮团结构会更加松散<sup>[10-11]</sup>。综合考虑, 选择分子量为 900 万的 APAM。

### 3.2 絮凝剂配制浓度对铁精矿沉降效果的影响

在絮凝剂分子量为 900 万, 用量为 60 g/t, 温度为室温 (20 ℃) 的条件下, 探究不同絮凝剂配制浓度对铁精矿沉降效果的影响, 结果见图 2。

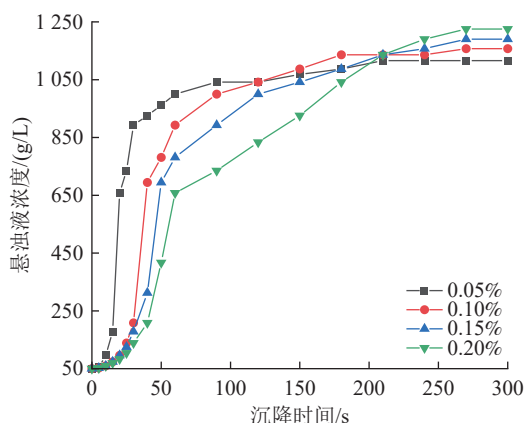


图 2 絮凝剂配制浓度对底流悬浊液浓度的影响

Fig.2 Effect of concentration of flocculants solution on the concentration of underflow suspension

由图 2 可知, 沉降 300 s 时, APAM 配制浓度为 0.05% 时底流浓度为 1 116.7 g/L, APAM 配制浓度为 0.10% 时底流浓度为 1 157.4 g/L, APAM 配制浓度为 0.15% 时底流浓度为 1 190.5 g/L, APAM 配制浓度为 0.20% 时底流浓度为 1 225.5 g/L。随着 APAM 配制浓度的增加, 沉降速度明显下降, 最终底流浓度则升高, 阻滞空间小, 表明这对后续的过滤脱水作业更有利。高分子絮凝剂溶液在一般的操作浓度下黏度比较高, 其均匀分布在整個悬浮液中需要一定的时间, 絮凝沉降作用的发生有一个滞后过程。当絮凝剂用量一定时, 达到最大固液分离的效率取决于絮凝剂溶与悬浮液的混合均匀程度。APAM 为高分子絮凝剂, 其溶液黏度很高, 在翻转过程中在矿浆中均匀分散需要一定时间, 低配制浓度的 APAM 溶液更加容易均匀分散在矿浆中, 提高了赤铁矿颗粒与 APAM 之间的作用效率, 而高配制浓度的 APAM 溶液由于没有分散更均匀, 部分赤铁矿颗粒未与 APAM 作

用, 沉降后得到的絮团孔隙率小<sup>[12]</sup>。综合考虑, 选用 0.05% 配制浓度的 APAM。

### 3.3 絮凝剂用量对铁精矿絮凝沉降效果的影响

在絮凝剂分子量为 900 万, 配制浓度为 0.05%, 温度为室温 (20 ℃), 探究不同絮凝剂用量对铁精矿沉降效果的影响, 结果见图 3。

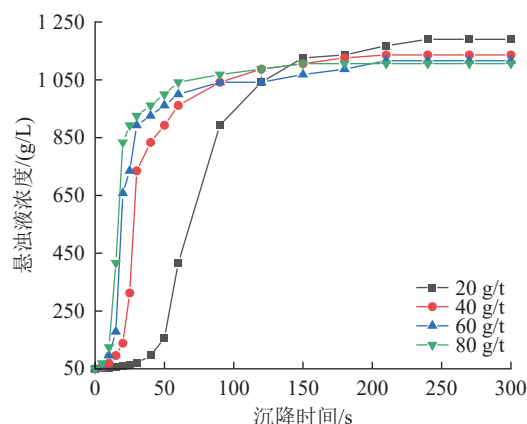


图 3 絮凝剂用量对底流悬浊液浓度的影响

Fig.3 Effect of dosage of flocculants on the concentration of underflow suspension

由图 3 可知, 沉降 300 s 时, 当 APAM 用量分别为 20、40、60、80 g/t 时, 其底流浓度分别为 1 190.5、1 136.4、1 116.7、1 106.9 g/L。APAM 用量的增加, 赤铁矿颗粒与 APAM 形成的絮团会变大, 从而使得沉降速度变快, 絮团之间会更加松散<sup>[13]</sup>, 最终底流浓度则降低, 阻滞空间变大, 表明这将不利于后续过滤脱水作业。絮凝剂用量越高经济成本越高, 综合经济成本和实验效果考虑, 选用 APAM 用量为 60 g/t。

### 3.4 矿浆温度对铁精矿沉降效果的影响

因为铁精矿浓缩过滤在浓缩机中进行, 矿浆温度容易因环境温度的改变而改变, 所以铁精矿浓缩脱水实际生产过程中应考虑温度的影响。在絮凝剂分子量为 900 万, 配制浓度为 0.05%, 用量为 60 g/t 的条件下, 探究不同矿浆温度对铁精矿沉降效果的影响, 结果见图 4。

由图 4 可知, 沉降 300 s 时, 矿浆温度为 10 ℃ 的底流浓度为 1 106.2 g/L, 矿浆温度提升到 20 ℃ 时底流浓度为 1 116.7 g/L, 矿浆温度提升到 30 ℃ 时底流浓度为 1 136.4 g/L, 矿浆温度提升到 40 ℃ 时底流浓度为 1 190.5 g/L, 矿浆温度提升到 50 ℃ 时底流浓度为 1 275.5 g/L。矿浆温度的升高降低了矿浆的粘性并加剧了赤铁矿颗粒的布朗运动, 促进了赤铁矿颗粒与 APAM 的碰撞几率, 有利于

APAM与赤铁矿颗粒形成絮团,从而使沉降速度变快,但增速不太明显,最终底流浓度升高,阻滞空间变小,表明这对后续过滤脱水作业更有利。温度对沉降速度没有明显的影响,但对最终底流浓度影响较大。

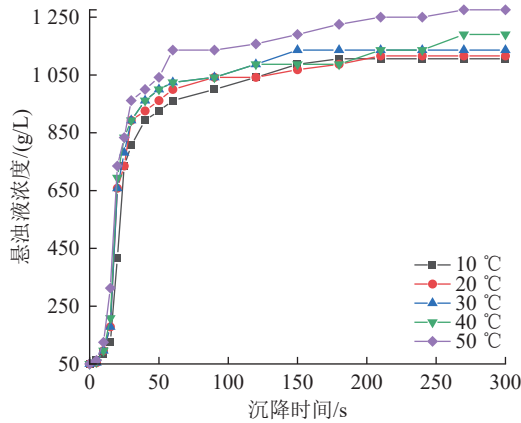


图4 温度对底流悬浊液浓度的影响  
Fig.4 Effect of pulp temperature on the concentration of underflow suspension

3.5 铁精矿絮凝沉降动力学模式研究

以不同絮凝剂用量对沉降的影响为例,绘制

沉降曲线,见图5。由图5可以看出赤铁矿精矿絮凝沉降在60 s前已经基本沉降完全,后面为沉降压缩点后的压缩层的压缩,故取沉降前30 s和60 s来研究细粒赤铁矿精矿絮凝沉降动力学。

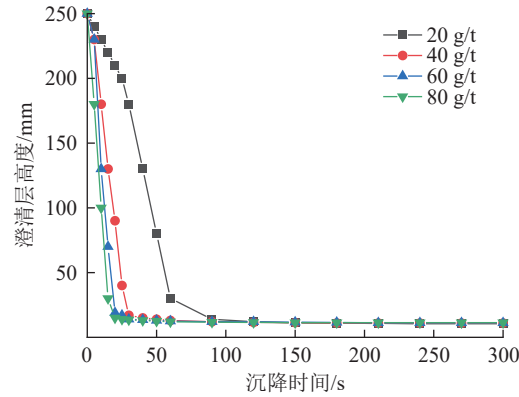


图5 不同絮凝剂用量沉降曲线  
Fig.5 Settling curves for different dosage of flocculants

就图1、图2、图3和图4各沉降时间与底流悬浊液浓度的关系曲线,采用一级动力学方程模型、二级动力学方程模型和双曲线动力学方程模型进行拟合,结果见表3和表4。

表3 沉降时间30 s动力学模型拟合参数  
Table 3 Settlement time of 30 s of the parameters for dynamic model

| 条件                  | 一级动力学模型方程 $\ln c=-kt+\ln c_0$ |                              |          | 二级动力学模型方程 $\frac{1}{c}=kt+\frac{1}{c_0}$ |          |                                                       | 双曲线动力学模型方程 $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{k}{t}+b$ |  |  |
|---------------------|-------------------------------|------------------------------|----------|------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--|--|
|                     | 动力学方程                         | R <sup>2</sup>               | 动力学方程    | R <sup>2</sup>                           | 动力学方程    | R <sup>2</sup>                                        |                                                |  |  |
| 絮凝剂<br>分子<br>量/万    | 0                             | $\ln c=0.004\ 1\ t+3.899\ 2$ | 0.944\ 6 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 1\ t+0.020\ 2$      | 0.952\ 6 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-706.860\ 0}{t}+19.143\ 6$ | 0.996\ 0                                       |  |  |
|                     | 500                           | $\ln c=0.086\ 2\ t+3.566\ 0$ | 0.929\ 3 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.020\ 8$      | 0.980\ 6 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-144.402\ 0}{t}+7.134\ 2$  | 0.906\ 5                                       |  |  |
|                     | 900                           | $\ln c=0.112\ 7\ t+3.672\ 4$ | 0.937\ 1 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.019\ 0$      | 0.894\ 1 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.573\ 7}{t}+3.484\ 1$   | 0.908\ 7                                       |  |  |
|                     | 1\ 300                        | $\ln c=0.101\ 5\ t+4.147\ 2$ | 0.849\ 5 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 6\ t+0.015\ 5$      | 0.761\ 0 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-12.656}{t}+0.564\ 4$      | 0.938\ 8                                       |  |  |
| 絮凝剂<br>浓度/%         | 0.05                          | $\ln c=0.112\ 7\ t+3.762\ 4$ | 0.937\ 1 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.019\ 0$      | 0.894\ 1 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.573\ 7}{t}+3.484\ 1$   | 0.908\ 7                                       |  |  |
|                     | 0.1                           | $\ln c=0.048\ 0\ t+3.720\ 8$ | 0.933\ 3 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 3\ t+0.021\ 3$      | 0.983\ 5 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-144.171\ 5}{t}+6.217\ 9$  | 0.961\ 7                                       |  |  |
|                     | 0.15                          | $\ln c=0.043\ 2\ t+3.755\ 9$ | 0.951\ 2 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 5\ t+0.021\ 1$      | 0.985\ 9 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-144.402\ 0}{t}+6.155\ 6$  | 0.960\ 5                                       |  |  |
|                     | 0.2                           | $\ln c=0.034\ 2\ t+3.800\ 5$ | 0.957\ 2 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 4\ t+0.020\ 9$      | 0.990\ 2 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-141.786\ 5}{t}+5.778\ 1$  | 0.959\ 0                                       |  |  |
| 絮凝剂<br>用量/<br>(g/t) | 20                            | $\ln c=0.010\ 3\ t+3.897\ 3$ | 0.970\ 6 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 2\ t+0.020\ 1$      | 0.984\ 6 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-126.464\ 9}{t}+1.218\ 8$  | 0.999\ 2                                       |  |  |
|                     | 40                            | $\ln c=0.087\ 5\ t+3.542\ 9$ | 0.905\ 3 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.020\ 7$      | 0.990\ 7 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.375\ 0}{t}+3.002\ 2$   | 0.966\ 2                                       |  |  |
|                     | 60                            | $\ln c=0.112\ 7\ t+3.762\ 4$ | 0.937\ 1 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.019\ 0$      | 0.894\ 1 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.573\ 7}{t}+3.484\ 1$   | 0.908\ 7                                       |  |  |
|                     | 80                            | $\ln c=0.112\ 6\ t+3.934\ 7$ | 0.916\ 1 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 6\ t+0.016\ 5$      | 0.830\ 9 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-15.643\ 0}{t}+0.685\ 1$   | 0.965\ 0                                       |  |  |
| 温度/℃                | 10                            | $\ln c=0.108\ 3\ t+3.586\ 7$ | 0.940\ 1 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.019\ 0$      | 0.935\ 4 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.647\ 0}{t}+3.364\ 1$   | 0.928\ 7                                       |  |  |
|                     | 20                            | $\ln c=0.112\ 7\ t+3.762\ 4$ | 0.937\ 1 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.019\ 0$      | 0.894\ 1 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.573\ 7}{t}+3.484\ 1$   | 0.908\ 7                                       |  |  |
|                     | 30                            | $\ln c=0.113\ 6\ t+3.668\ 1$ | 0.936\ 4 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.018\ 9$      | 0.890\ 6 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-69.506\ 0}{t}+3.493\ 1$   | 0.905\ 1                                       |  |  |
|                     | 40                            | $\ln c=0.114\ 3\ t+3.703\ 3$ | 0.935\ 4 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.018\ 4$      | 0.882\ 4 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-44.401\ 0}{t}+2.163\ 9$   | 0.923\ 7                                       |  |  |
|                     | 50                            | $\ln c=0.113\ 0\ t+3.849\ 7$ | 0.944\ 4 | $\frac{1}{c}=-0.000\ 7\ t+0.017\ 2$      | 0.846\ 3 | $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{-24.109\ 6}{t}+1.134\ 1$   | 0.938\ 6                                       |  |  |

表 4 沉降时间 60 s 动力学模型拟合参数  
Table 4 Settlement time of 60 s of the parameters for dynamic model

| 条件                 | 一级动力学模型方程 $\ln c = -kt + \ln c_0$      |                | 二级动力学模型方程 $\frac{1}{c} = kt + \frac{1}{c_0}$ |                | 双曲线动力学模型方程 $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{k}{t} + b$        |                |
|--------------------|----------------------------------------|----------------|----------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------|----------------|
|                    | 动力学方程                                  | R <sup>2</sup> | 动力学方程                                        | R <sup>2</sup> | 动力学方程                                                       | R <sup>2</sup> |
| 絮凝剂<br>分子<br>量/万   | 0 $\ln c = 0.005\ 4\ t + 3.882\ 1$     | 0.966 3        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 1\ t + 0.020\ 4$      | 0.979 2        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-667.834\ 9}{t} + 13.900\ 1$ | 0.987 7        |
|                    | 500 $\ln c = 0.056\ 8\ t + 3.969\ 4$   | 0.884 5        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.016\ 2$      | 0.770 5        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-61.288\ 0}{t} + 2.018\ 1$   | 0.918 4        |
|                    | 900 $\ln c = 0.054\ 8\ t + 4.417\ 1$   | 0.732 0        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.013\ 8$      | 0.607 6        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-59.988\ 6}{t} + 2.193\ 6$   | 0.858 4        |
|                    | 1 300 $\ln c = 0.043\ 7\ t + 4.881\ 6$ | 0.604 4        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 2\ t + 0.010\ 8$      | 0.478 1        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-10.993\ 1}{t} + 0.340\ 5$   | 0.886 3        |
| 絮凝剂<br>浓度/%        | 0.05 $\ln c = 0.054\ 8\ t + 4.417\ 1$  | 0.732 0        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.013\ 8$      | 0.607 6        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-59.988\ 6}{t} + 2.193\ 6$   | 0.858 4        |
|                    | 0.1 $\ln c = 0.057\ 5\ t + 3.642\ 4$   | 0.944 3        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 4\ t + 0.018\ 8$      | 0.897 8        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-59.988\ 6}{t} + 2.193\ 6$   | 0.858 4        |
|                    | 0.15 $\ln c = 0.053\ 7\ t + 3.627\ 4$  | 0.968 1        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 4\ t + 0.018\ 9$      | 0.921 4        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-129.025\ 3}{t} + 4.181\ 9$  | 0.932 3        |
|                    | 0.2 $\ln c = 0.044\ 9\ t + 3.660\ 1$   | 0.976 6        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.019\ 4$      | 0.959 8        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-127.943\ 5}{t} + 3.915\ 6$  | 0.935 5        |
| 絮凝剂<br>用量<br>(g/t) | 20 $\ln c = 0.003\ 10\ t + 3.611\ 9$   | 0.823 1        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.021\ 6$      | 0.956 9        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-130.129\ 4}{t} + 1.715\ 9$  | 0.997 3        |
|                    | 40 $\ln c = 0.059\ 1\ t + 3.930\ 4$    | 0.876 6        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.016\ 5$      | 0.780 7        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-61.922\ 0}{t} + 2.000\ 2$   | 0.934 3        |
|                    | 60 $\ln c = 0.054\ 8\ t + 4.417\ 1$    | 0.732 0        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.013\ 8$      | 0.607 6        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-59.988\ 6}{t} + 2.193\ 6$   | 0.858 4        |
|                    | 80 $\ln c = 0.050\ 1\ t + 4.730\ 8$    | 0.663 2        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.011\ 6$      | 0.533 5        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-13.749\ 5}{t} + 0.430\ 3$   | 0.9224         |
| 温度/℃               | 10 $\ln c = 0.0555\ t + 4.296\ 7$      | 0.775 8        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.014\ 0$      | 0.668 4        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-22.273\ 0}{t} + 0.630\ 4$   | 0.970 6        |
|                    | 20 $\ln c = 0.054\ 8\ t + 4.417\ 1$    | 0.732 0        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.013\ 8$      | 0.607 6        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-59.988\ 6}{t} + 2.193\ 6$   | 0.858 4        |
|                    | 30 $\ln c = 0.055\ 5\ t + 4.416\ 3$    | 0.733 8        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.013\ 8$      | 0.608 2        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-60.001\ 0}{t} + 2.195\ 5$   | 0.858 5        |
|                    | 40 $\ln c = 0.054\ 7\ t + 4.469\ 0$    | 0.720 2        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.013\ 4$      | 0.598 0        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-38.699\ 8}{t} + 1.361\ 9$   | 0.885 9        |
|                    | 50 $\ln c = 0.053\ 2\ t + 4.614\ 4$    | 0.716 8        | $\frac{1}{c} = -0.000\ 3\ t + 0.012\ 2$      | 0.554 7        | $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{-21.068\ 9}{t} + 0.713\ 9$   | 0.892 6        |

由表 3 可知在赤铁矿精矿絮凝沉降前 30 s 过程中, 双曲线动力学模型方程的拟合相关系数 R<sup>2</sup> 比二级动力学模型方程大, 较于一级动力学模型方程相差不大, 而且各沉降过程的 R<sup>2</sup> 基本都大于 0.9; 由表 4 可知在赤铁矿精矿絮凝沉降前 60 s 过程中, 双曲线动力学模型方程的拟合相关系数 R<sup>2</sup> 较于一级动力学模型方程和二级动力学模型方程, 其拟合相关系数 R<sup>2</sup> 都大于 0.85 且远大于其他两种模型。在两个时间段进行拟合时, 双曲线动力学模型方程相关性比其他两种动力学模型方程更好, 即双曲线动力学模型方程取得了比一级动力学模型方程和二级动力学模型方程更好的拟合度, 因此 APAM 对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降可以优先使用双曲线动力学模型来描述。

### 3.6 沉降速度与絮团粒径

沉降速度是衡量赤铁矿絮凝沉降的重要参数, 沉降速度的计量表准有三种: 中值、时间加权平均和重量加权平均, 本文采用时间加权平均沉降速度  $v$  来代表赤铁矿的沉降速度,  $v$  可表示为:

$$v = h/t \quad (2)$$

式中  $h$  为沉降高度, mm,  $t$  为该高度所对应的时间, s, 本文统一取澄清层从 250 mL 处到沉降筒 20 mL 处来计算平均沉降速度。进一步应用 Stokes 公式可以求得与沉降速度  $v$  所对应的平均粒径  $d$ 。 $d$  可表示为:

$$d = \frac{\mu v}{2kg(\rho - \rho_0)} \quad (3)$$

式中,  $h$  为取样点的深度, mm;  $\mu$  为水介质黏度, Pa·s;  $k$  为形状系数;  $g$  为重力加速度, m/s;  $\rho$  为铁精矿颗粒比重, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_0$  为水介质比重, kg/m<sup>3</sup>[14]。

以不同絮凝用量为例, 探究不同絮凝剂用量的沉降速度和絮团粒径的变化, 见图 6。

由图 6 可知, 絮凝剂用量从 20 g/t 增加到 80 g/t,  $v$  从 3.04 mm/s 增加到 12.47 mm/s, 增加了 9.43 mm/s,  $d$  从 0.344 mm 增加到 1.413 mm, 增加了 1.069 mm。随着絮凝剂用量的增加, 沉降速度和絮团粒径增加, 但增加速度逐渐变缓。

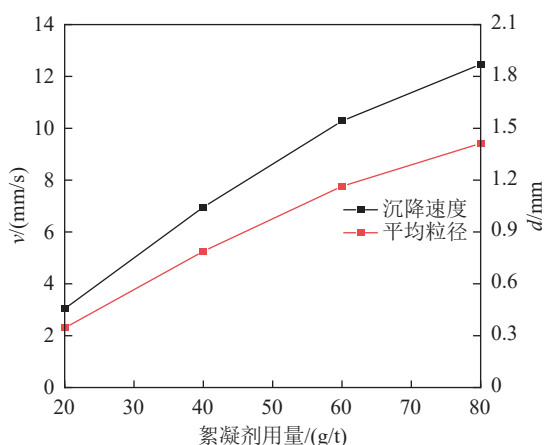


图6 沉降速度与絮团粒径的变化趋势  
Fig.6 Variation trend of settlement velocity and particle size of floc

## 4 结 论

(1) 絮凝剂的添加对赤铁矿精矿的沉降效果有很明显的改善，综合实验结果和经济价值考虑，APAM的使用选择分子量为900万、配置浓度为0.05%和用量为60 g/t。在此APAM使用条件和室温20℃条件下，会得到快的沉降速度和低的最终底流浓度，极大地改善了沉降效果，有利于后续过滤脱水作业。

(2) 通过APAM对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降的动力学分析，APAM对细粒赤铁矿精矿絮凝沉降动力学可以优先使用双曲线动力学模型  $1/(1 - \frac{c}{c_0}) = \frac{k}{t} + b$  来描述。

(3) 絮凝剂用量较少时，沉降速度慢、絮团粒径小，絮凝剂用量的增加能够促进絮团的增大，加快沉降速度，改善沉降性能。

## 参考文献：

- [1] 唐雪峰. 难处理赤铁矿选矿技术研究现状及发展趋势[J]. 现代矿业, 2014, 30(3):14-19.
- TANG X F. Research status and development trend of beneficiation technology on hematite[J]. Modern Mining, 2014, 30(3):14-19.
- [2] 刘焦萍, 黄春成. 铝土矿正浮选尾矿浆沉降新工艺研究[J]. 轻金属, 2006(5):8-13.
- LIU J P, HUANG C C. New process of tailing slurry settlement after the bauxite forward flotation[J]. Light Metals, 2006(5):8-13.
- [3] 郭艳, 杨艳玲, 李星, 等. 三种常见混凝机理为主导条件下

絮体特性研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1):150-155.

WU Y, YANG Y L, LI X, et al. Study on floc characteristics under three common coagulation mechanisms as dominant conditions[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1):150-155.

[4] 张庆河, 王殿志, 吴永胜, 等. 粘性泥沙絮凝现象研究述评(1): 絮凝机理与絮团特性[J]. 海洋通报, 2001, 20(6):80-90.

ZHANG Q H, WANG D Z, WU Y S, et al. A review of research on the flocculation phenomenon of cohesive sediments (1): flocculation mechanism and flocculation characteristics[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(6):80-90.

[5] 胡宗岗, 芦川, 张芹. 细粒赤铁矿精矿沉降效果影响因素实验研究[J]. 矿产综合利用, 2023(2): 56-62.

HU Z G, LU C, ZHANG Q. Experimental research on influence factors of fine-grained hematite flotation concentrate based on orthogonal test [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(2): 56-62.

[6] 周丹, 张涛. 颗粒污泥沉降动力学模型研究[J]. 环境污染与防治, 2008(3):36-38.

ZHOU D, ZHANG T. Research on the settling dynamic model of granular sludge[J]. Environmental Pollution and Control, 2008(3):36-38.

[7] 陈洪松, 邵明安. NaCl对细颗粒泥沙静水絮凝沉降动力学模式的影响[J]. 水利学报, 2002, 33(8):63-67.

CHEN H S, SHAO M A. Effect of NaCl concentration on dynamic model of fine sediment flocculation and settling in still water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(8):63-67.

[8] 关许为, 陈英祖. 长江口泥沙絮凝静水沉降动力学模式的试验研究[J]. 海洋工程, 1995(1):1005-9865.

GUAN X W, CHEN Y Z. Experimental study on the dynamic model of sediment flocculation and static water settlement in the Yangtze River Estuary[J]. The Ocean Engineering, 1995(1):1005-9865.

[9] 唐海香, 庞鼎峰, 吴大为. 动力学因素对煤泥水絮凝沉降效果的影响[J]. 煤炭工程, 2006(8):78-80.

TANG H X, PANG D F, WU D W. The influence of dynamic factors on the flocculation and sedimentation effect of coal slurry water[J]. Coal Engineering, 2006(8):78-80.

[10] 李冬梅, 金同轨, 李志生, 等. 高分子絮凝剂质量浓度对泥沙絮体分形结构的影响[J]. 广东工业大学学报, 2006, 23(3):40-45.

LI D M, JIN T G, LI Z S, et al. The effect of polymer

flocculant mass concentration on the fractal structure of sediment flocs[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2006, 23(3):40-45.

[11] R. K. DWARI, S. I. ANGADI, S. K. TRIPATHY. Studies on flocculation characteristics of chromite's ore process tailing: Effect of flocculants ionicity and molecular mass[J]. *Colloids and Surfaces, A. Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 537: 467-477.

[12] 陈婉琦, 张芹, 王天正, 等. 絮凝剂对细粒铁精矿沉降效果的影响[J]. *金属矿山*, 2015(10):95-99.

CHEN W Q, ZHANG Q, WANG T Z, et al. The influence of flocculants on the settling effect of fine-grained iron

concentrate[J]. *Metal Mine*, 2015(10):95-99.

[13] 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(11):1419-1423.

WANG Y, WU A X, WANG H J, et al. The influence mechanism of flocculant dosage on tailings thickening[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2013(11):1419-1423.

[14] 从金瑶, 彭佳志, 涂博, 等. 六偏磷酸钠对铁尾砂絮凝沉降行为的影响及机理[J]. *金属矿山*, 2022(8):138-145.

CONG J Y, PENG J Z, TU B, et al. The influence and mechanism of sodium hexametaphosphate on the flocculation and sedimentation behavior of iron tailings[J]. *Metal Mine*, 2022(8):138-145.

## Flocculation and Settlement Behavior and Dynamic of Fine-grained Hematite Concentrate

DONG Xin<sup>1</sup>, LU Chuan<sup>2</sup>, ZHANG Qin<sup>1</sup>

(1.College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2.China BAOWU Steel Group Corporation Limited, Wuhan 430080, Hubei, China)

**Abstract:** This is an article in the field of mining processing engineering. The article takes fine-grained hematite concentrate as the research object, explores the effects of the molecular weight of flocculant, the concentration of flocculant, the dosage of flocculant, and slurry temperature on the flocculation and settlement effect of fine-grained hematite concentrate. At the same time, through dynamic analysis, the flocculation and settlement dynamic model that conforms to fine-grained hematite concentrate is explored. The results show that APAM with a molecular weight of 9 million, a preparation concentration of 0.05%, and a dosage of 60 g/t has a good settling effect and lower cost. The addition of APAM significantly improves the settling effect, while high APAM molecular weight results in fast settling speed and low final underflow concentration. Low APAM concentration results in fast settling speed and high final underflow concentration. Increasing the APAM dosage results in a faster settling speed and an increase in floc particle size, but both rates of increase gradually slow down, ultimately resulting in a decrease in underflow concentration. As the temperature of the slurry increases, the settling speed increases, but the growth rate is not very significant, and the concentration of underflow increases. The dynamic analysis of flocculation and settlement of fine-grained hematite concentrate by APAM shows that the hyperbolic dynamic model equation has achieved good fitting. APAM can prioritize using the hyperbolic dynamic model  $1/(1-\frac{c}{c_0})=\frac{k}{t}+b$  to describe the flocculation and settlement dynamic of fine-grained hematite concentrate.

**Keywords:** Mining processing engineering; Fine-grained hematite concentrate; Flocculation and settlement; Dynamic; Flocculent particle size