

全尾砂絮凝沉降规律及其机理

焦华喆¹⁾ 王洪江¹⁾ 吴爱祥¹⁾ 吉学文²⁾ 严庆文²⁾ 李祥²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 云南驰宏锌锗股份有限公司, 曲靖 654211

摘要 以某矿全尾砂和聚丙烯酰胺(PAM)为实验原料进行静态絮凝沉降实验, 研究给料浓度和絮凝剂单耗对尾矿最大沉降速度和静止沉降极限浓度的影响, 通过对实验数据回归分析得出简易的沉降速度模型. 将模型划分为六个阶段, 包括紊流影响段、加速沉降段、沉降末速段、干涉沉降区、压密沉降段和极限沉降段, 并利用两相流理论、絮凝理论对其合理性进行阐述. 实验结果证明: 在单耗一定(20 g t^{-1})时, 沉降速度与给料浓度负相关, 极限浓度与给料浓度正相关; 在给料质量分数 20% 时, 单耗临界值为 30 g t^{-1} ; 极限浓度与单耗负相关. 建议深锥浓密机给料质量分数 20%, 絮凝剂单耗 20 g t^{-1} .

关键词 尾砂; 絮凝沉降; 固液分离; 速度模型

分类号 TD926.2

Rule and mechanism of flocculation sedimentation of unclassified tailings

JIAO Hua-zhe¹⁾, WANG Hong-jiang¹⁾, WU Ai-xiang¹⁾, JI Xue-wen²⁾, YAN Qing-wen²⁾, LI Xiang²⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Yunnan Chihong Zinc & Germanium Co., Ltd., Qujing 654211, China

ABSTRACT Static flocculation and sedimentation experiments with polyacrylamide and unclassified tailings from a mine were completed to study the effects of feeding concentration and flocculants unit consumption on the maximum sedimentation velocity and limit concentration of tailings under static sedimentation. A simple model of sedimentation velocity was established through regression analysis on experimental data. The model was divided into six phases including turbulent flow affected segment, accelerating sedimentation segment, terminal velocity segment, interference sedimentation segment, dewatering sedimentation segment, and limit sedimentation segment. The rationality of the model was explained by the two-phase flow theory and the flocculation theory. The results show that at a certain unit consumption of flocculants (20 g t^{-1}), the sedimentation velocity is negatively correlated and the limit concentration is positively correlated to the feeding concentration. At the feeding concentration of 20%, the critical value of unit consumption is 30 g t^{-1} , and the limit concentration is negatively correlated to the unit consumption. A project was proposed that the feeding concentration is 20% and the unit consumption of flocculants is 20 g t^{-1} .

KEY WORDS tailings; flocculation sedimentation; solid-liquid separation; velocity model

随着经济的飞速发展和资源的大量消耗, 矿业正面对两大难题: 资源开采的深部化和地表尾矿废石的灾害化. 深部开采面临地压增大的情况甚至岩爆的可能, 而地表排放尾矿废石不仅会带来环境污染, 更会给生态造成长远的破坏^[1]. 对于这两大难题, 将尾矿制备成膏体充填井下采空区的方法是理想的解决方案. 同时, 膏体料浆具有可使用全尾砂、采场免脱水、凝结时间短以及远期强度高等优点, 使

膏体充填效果明显优于其他传统充填方式^[2]. 在膏体充填料制备工艺中全尾砂的脱水浓缩是关键, 也是难点^[3]. 深锥浓密机属于一段浓缩设备, 与传统的旋流器-浓缩机-二级浓缩设备相比, 具有流程简单, 系统稳定, 产出物浓度高等优点^[4]. 其工作原理为低浓度尾矿浆在机体上部中心进料筒中与絮凝剂溶液混合后, 尾砂颗粒形成较大尺寸絮凝团. 絮团沉降至深锥底部, 并在重力及搅拌作用下脱水压密,

收稿日期: 2009-07-06

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (No. 2006BAB02A01); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (No. NECT-07-0070); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50774011)

作者简介: 焦华喆 (1985-), 男, 博士研究生; 吴爱祥 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wuaixiang@126.com

形成高浓度的底流。絮凝剂在脱水流程中作用重大。

云南某矿采场回填采用全尾砂-水淬渣膏体泵送充填工艺。质量分数 18%~30%的选厂全尾砂浆经深锥浓密机絮凝浓缩后,制成质量分数 76%~78%的底流。底流放出后在地表加入水泥、水淬渣,经两级搅拌均匀,形成质量分数 77%~80%的膏体料浆。膏体通过管道泵送至井下充填采场。

深锥浓密过程中尾矿是连续进料,机体内部无法形成澄清的沉降液面,为了便于检测液面沉降速度,采用间歇进料的方式进行实验;深锥刮泥耙位于锥部,运动速度较慢,约为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [5],其运动对锥部以上料浆基本无影响,同时连接轴在轴向慢速的自转对于颗粒的沉降影响亦很小。因此采用间歇进料方式的无搅拌静态实验,能够反应沉降速度的基本规律。

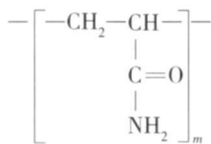
尾矿颗粒沉降至浓密机底部形成沉积层,其沉降效果用静水极限浓度表征。颗粒呈层状沉积,上下层孔隙不连通,使一部分水封闭在沉积层内。浓密机底部的刮泥耙和导流柱以 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的转速自转,既不会形成湍流将沉积层颗粒卷起,又可以打破颗粒与水的静力平衡,使孔隙连通,将封闭的水排出,形成高浓度的底流。更高的底流浓度是在静水极限浓度的基础上形成的,因此静水极限浓度具有重大意义。

本文通过室内全面实验和理论分析研究深锥浓密机中絮凝剂的添加量对尾砂沉降速度及沉降浓度的影响,并对实验结果进行了分析,建立无搅拌状态下静止沉降速度的模型。

1 絮凝沉降实验

1.1 实验材料

(1) 絮凝剂。本实验采用聚丙烯酰胺 (PAM) 阴离子型有机高分子絮凝剂 (品牌: SNF 型号: AN934 SH), 其分子结构式为:



所用絮凝剂为白色粉末状,无臭、无毒和无腐蚀性,水解体有轻微氨味,能以任何比例溶于水,相对分子持量为 $(6\sim 8) \times 10^6$ 。

(2) 全尾砂。密度为 $2.75 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,容重 $1.75 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$,孔隙率 36.6%,干尾砂 pH 8.74 尾砂浆 pH 7.16 弱碱性。由表 1 可知:全尾砂粒级不均匀

系数为 61.17 级配不合理;全尾砂中 $-20 \mu\text{m}$ 颗粒的含量为 38.23%,对应于膏体充填料中 $-20 \mu\text{m}$ 颗粒含量 15%~20%的要求, $-20 \mu\text{m}$ 颗粒含量偏高。

表 1 尾砂粒度分析
Table 1 Grain size distribution of tailings

粒级 /mm	比例 /%	
	个别	累计
+0.147	17.1	17.1
-0.147~+0.097	13.5	30.6
-0.097~+0.074	16.1	46.7
-0.074~+0.045	1.92	48.62
-0.045~+0.02	13.15	61.77
-0.02~+0.1	38.23	100
合计	100	

1.2 实验步骤

(1) 在烧杯中配置质量分数为 0.5% 的絮凝剂溶液;

(2) 在量筒中配置质量分数为 10%、20%、30% 和 40% 的全尾砂浆;

(3) 按 10、20、30 和 $40 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 的絮凝剂单耗标准用移液管将溶液加入全尾砂浆中 ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$, 每 1 千尾砂加入絮凝剂干粉的质量 (g));

(4) 用橡胶网孔搅拌棒搅拌,然后静置在实验台上,在不同时间点检测澄清液面沉降高度;

(5) 每种浓度的全尾砂浆做一组不添加絮凝剂的对比实验。

2 实验结果分析

根据传统浓密理论^[6],底流浓密效果与给料浓度、絮凝剂单耗等因素有关。实验考察指标为沉降速度和沉降浓度,影响因素为给料浓度、絮凝剂单耗。

2.1 全尾砂浆给料浓度对浓密效果的影响

絮凝剂单耗是指絮凝过程中每吨全尾砂所消耗的絮凝剂干粉质量。在 $20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 的絮凝剂单耗下考察料浆浓度对于沉降速度的影响。

2.1.1 沉降速度

在给定的絮凝剂单耗下,沉降速度变化如图 1 所示。实验结果表明:①絮凝沉降在实验开始的最初 2 min 内效果显著,沉降速度变化较大,呈先升后降的趋势;之后的大部分时间沉降速度较小,呈压密现象。②在相同絮凝剂单耗下,浓度越低,最大絮凝沉降速度越大,即沉降速度与浓度负相关。③当料浆质量分数为 10% 时,沉降速度最大达到

620 mm·min⁻¹ (10.3 mm·s⁻¹).

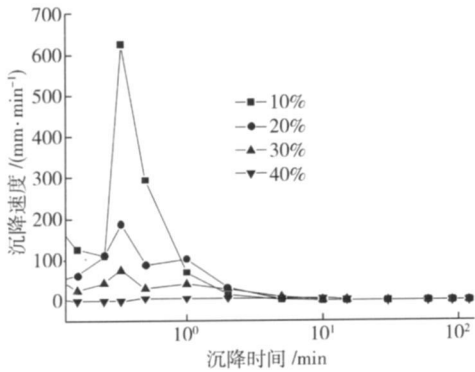


图 1 不同给料质量分数的沉降速度变化规律

Fig 1 Changes of sedimentation velocity at different feed concentrations

由表 2 可知, 给料质量分数每增加 10%, 沉降最大速度都要下降 50% 以上, 说明给料浓度对于沉降速度的影响是非常大的。

表 2 不同给料浓度时沉降最大速度表

Table 2 Maximum sedimentation velocity of different feeding concentrations

给料质量分数 / %	沉降最大速度 / (mm·min ⁻¹)	降幅 / %
10	620.0	—
20	187.5	69.7
30	87.5	53.3
40	12.5	85.7

根据科-克莱文杰稳态沉降模型^[7], 沉降速度越大, 固体通量越大, 浓密机处理能力也就越大, 因此追求较大的沉降速度。

2.1.2 沉降浓度

本实验取静水极限浓度, 沉降进行一定时间后, 液面固定于某高度不再下降, 尾矿沉降至极限状态, 此时量筒上部为澄清的水柱, 下部为沉降压实的尾矿, 此浓度即为极限浓度, 可根据下式计算^[8]:

$$C_{\text{极限}} = \frac{W_{\text{砂}}}{W_{\text{水}} - W_{\text{水}} + W_{\text{砂}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $C_{\text{极限}}$ 为静水极限质量分数, %; $W_{\text{水}}$ 为水的质量, g; $W_{\text{砂}}$ 为尾砂的质量, g; $W_{\text{水}}$ 为澄清水柱的质量, g

结果表明, 各组静止沉降极限浓度随给料浓度升高而升高, 即沉降浓度与给料浓度正相关, 见表 3。

2.1.3 工程建议

对于立式砂仓和普通浓密机, 底流质量分数 60% 左右就已经达标, 由表 2 和表 3 知, 沉降质量分数由 58.8% 上升至 62% 时, 最大沉降速度下降了

53.3%, 在沉降浓度增幅不大的情况下, 沉降速度大幅降低。沉降速度直接影响浓密设备的处理能力^[8], 因此进料质量分数维持在 20% 左右即能使沉降速度与沉降浓度均达到较好的效果。

表 3 不同给料浓度时沉降浓度

Table 3 Sedimentation concentration at different feeding mass contents

给料质量分数	沉降质量分数	增幅	%		
			给料质量分数	沉降质量分数	增幅
10	50.1	—	30	62.0	5.44
20	58.8	17.36	40	64.0	3.12

注: 增幅指下一行比上一行沉降质量分数增加的百分比。

2.2 絮凝剂单耗对浓密效果的影响

根据絮凝机理^[9], 絮凝剂添加量过少或过多都会产生絮凝失效。实际生产过程中, 全尾砂浆的质量分数范围为 18% ~ 35%, 对质量分数为 20% 的全尾砂浆进行的实验较有代表性。

2.2.1 沉降速度

实验结果如图 2 所示。图 2 表明: ① 与不添加絮凝剂相比, 添加絮凝剂后全尾沉降速度大幅增加, 最大增幅约为 5 倍; ② 絮凝剂单耗从 20 g·t⁻¹ 增加到 30 g·t⁻¹ 时最大沉降速度均为 187.5 mm·min⁻¹, 增加到 40 g·t⁻¹ 时最大沉降速度比 20 g·t⁻¹ 时下降 13.3%。说明对于该浓度浆体其絮凝剂单耗的临界值为 30 g·t⁻¹ 左右, 超过该值就会发生絮凝失效。

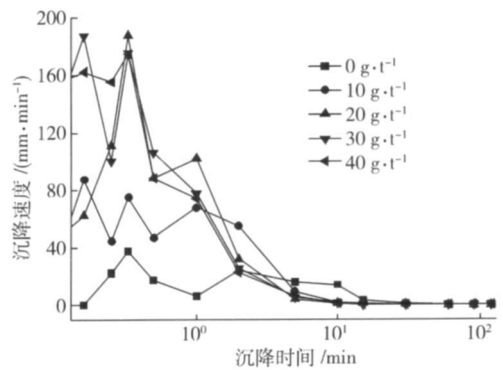


图 2 不同絮凝剂单耗时沉降速度变化规律

Fig 2 Changes in sedimentation velocity at different unit consumptions of flocculants

2.2.2 沉降浓度

由图 3 可知, 随单耗的上升, 极限浓度呈下降趋势。浆体中絮凝剂分子链含量增加造成浆体黏度的上升, 黏度的上升使水的运动阻力增加, 水与颗粒间的静力平衡更加难打破, 被封闭的水更难排出, 从而造成沉降浓度的降低。

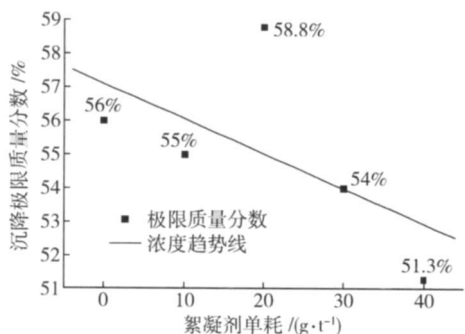


图 3 质量分数 20%料浆的沉降浓度

Fig 3 Sedimentation concentration at a feeding concentration of 20%

2.2.3 工程建议

当给料质量分数 20%, 絮凝剂单耗 20 g t⁻¹时, 沉降最大速度达到 187.5 mm·min⁻¹, 静水极限质量分数达到 58.8%, 在实验中二参数均处于较高水平, 且从经济上较合理, 由此建议深锥浓密机给料质量分数为 20%左右, 絮凝剂单耗 20 g t⁻¹.

3 沉降速度模型建立

3.1 沉降速度曲线回归

在前述实验中, 液面沉降速度呈先升后降趋势, 各组实验中, 给料质量分数 20%、单耗 20 g t⁻¹沉降速度曲线较有代表性. 利用 Origin 软件中非线性曲线拟合模块对该曲线进行回归拟合. 由于曲线存在峰值, 因此在选择回归模型时, 应选择能够描述曲线峰值和趋势的函数. 最终选择 Giddings 方程. 回归结果见图 4.

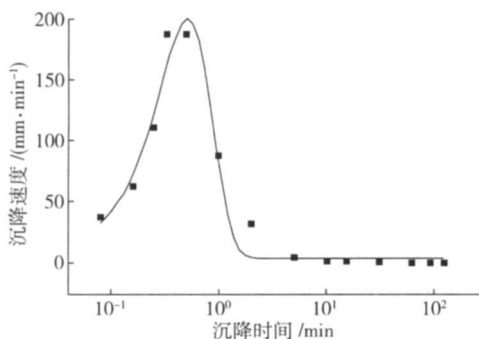


图 4 沉降速度曲线回归结果

Fig 4 Regression curve of sedimentation velocity

Giddings 方程:

$$y = a + \frac{d}{c} \sqrt{\frac{b}{x}} I \left(\frac{2\sqrt{bx}}{c} \right) e^{-\frac{x}{c}} \quad (2)$$

式中, I 为一阶第 1 类修正 Bessel 函数, 如下式所示:

$$I(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \frac{1}{\Gamma(k+2)} \left(\frac{x}{2} \right)^{2k+1} \quad (3)$$

式中, y 为沉降速度, mm·min⁻¹; x 为沉降时间, min; a 、 b 和 c 分别为待回归系数. 本次拟合结果的复相关系数 $R^2 = 0.96812$ 说明该回归显著, 具有较高的精度.

3.2 沉降模型

结合上述分析, 易归纳出较简单的絮凝沉降模型, 曲线如图 5 所示.

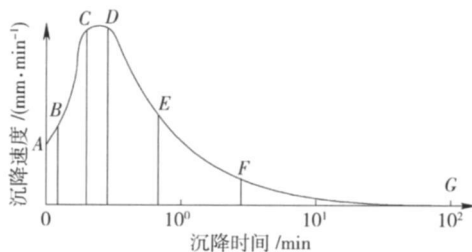


图 5 沉降速度模型

Fig 5 Sedimentation velocity model

3.3 阶段划分及分析

将絮凝沉降过程中速度的变化划分为六个阶段.

3.3.1 湍流影响段

如图 5 中的 AB 段所示. 实验初期, 为使絮凝剂分子与矿粒充分搭接絮凝, 搅拌强度高, 料浆运动剧烈, 澄清液面受湍流的影响, 波动沉降. 根据絮凝动力学原理^[19], 静置之初颗粒受湍流影响, 属于同向絮凝. 本段发生在静置之初的 1~2 s.

3.3.2 加速沉降段

如图 5 中的 BC 段所示. 量筒内湍流能量减弱变为层流, 颗粒密度大于水的密度, 即 $\rho_s > \rho_1$ 时, 颗粒做下沉运动, 受力如图 6 所示.

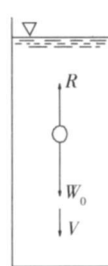


图 6 沉降颗粒受力图

Fig 6 Force on a settling particle

向下力 W_0 如下式:

$$W_0 = W_s - W_f = \frac{\pi}{6} g (\rho_s - \rho_1) d^3 \quad (4)$$

式中, W_0 为颗粒所受向下的力, N ; W_s 为颗粒的重力, N ; W_f 为颗粒所受的浮力, N ; ρ_s 为颗粒密度, kg m⁻³; ρ_1 为水的密度, kg m⁻³; d 为颗粒直径, m; g 为重力加速度, m s⁻².

由 W_0 得出球形颗粒在流体中的下降加速度 g_0 为:

$$g_0 = \frac{g}{\rho_s} (\rho_s - \rho_l) \quad (5)$$

式中, g_0 为下降加速度, $m \cdot s^{-2}$. 颗粒沉降的运动阻力 R 为:

$$R = \varphi \rho_l d V^2 \quad (6)$$

式中, R 为颗粒运动阻力, N ; φ 为颗粒的阻力系数; V 为颗粒沉降速度, $m \cdot s^{-1}$.

由 R 得出阻力加速度 a_k :

$$a_k = \frac{6\varphi \rho_l V}{\pi \phi_s} \quad (7)$$

式中, a_k 为阻力加速度, $m \cdot s^{-2}$.

颗粒在流体中的沉降总加速度 $\frac{dV}{dt}$

$$\frac{dV}{dt} = g_0 - a_k = \frac{g}{\rho_s} (\rho_s - \rho_l) - \frac{6\varphi \rho_l V}{\pi \phi_s} \quad (8)$$

式中, $\frac{dV}{dt}$ 为颗粒沉降总加速度, $m \cdot s^{-2}$.

由式 (8) 可以看出, 球形颗粒的加速度等于颗粒在流体中的重力加速度与阻力加速度之差. 当颗粒开始下沉时加速度最大, 当颗粒运动速度逐渐增加时, 阻力也随着增加, 从而使运动加速度减小.

給料浓度对该阶段的持续时间存在一定的影响. 对于一般颗粒而言, 如 $\rho_s = 3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$, d 分别为 $81, 234 \mu m$ 的颗粒, 在常水中沉降的加速阶段约为 0.01 和 0.1 s ^[11], 可以忽略不计, 而本实验中加速阶段持续 $5 \sim 10 \text{ s}$. 这是由于多颗粒同时下沉, 会引起同体积水的上升, 上升水流会阻碍其他颗粒的沉降, 延长加速过程.

3.3.3 沉降末速段

如图 5 中 CD 段所示. 沉降一段时间后, 当运动速度的增加使阻力加速度与向下的加速度相等时, 加速度为零, 速度达到最大, 此速度即为颗粒的沉降

末速. 因此可推导出沉降末速的一般公式 (将絮团简化为圆球形颗粒), 见下式:

$$V = \sqrt{\frac{\pi d(\rho_s - \rho_l) g}{6\varphi \rho_l}} \quad (9)$$

式中, V 为沉降末速, $m \cdot s^{-1}$.

可以看出, 沉降末速的大小与阻力系数 φ 有关, 而 φ 受雷诺数 Re 影响. 对于层流、过渡流和紊流三种不同的状态, 前人提出了相应的沉降末速特殊公式, 即斯托克斯公式、阿连公式和雷廷格公式^[11]. 同时沉降末速还受含砂浓度、边界条件等多因素的影响.

沉降末速的持续时间受含砂浓度和容器尺寸的共同影响. 根据两相流理论, 对于单个颗粒, 达到沉降末速后, 会以该速度沉降至容器底部. 但是, 对于多颗粒沉降, 一部分颗粒先沉降到底部形成沉积液面, 其余颗粒沉降到与沉积液面接近时, 进入干涉沉降段 (DE 段). 自此, 颗粒失去沉降末速, 减速沉降. 若容器垂直方向较短, 则颗粒很快沉降到底部; 若沉降颗粒多, 则沉积液面上升速度快, 两种情况均使持续时间缩短. 因此容器垂直方向越长, 給料浓度越低, 颗粒沉降末速持续时间越长.

3.3.4 干涉沉降段

如图 5 中 DE 段所示. 干涉的情况有多种, 本段考虑的是颗粒沉降时排水引起的上升水流使沉降阻力增大的情况. 实验开始后, 容器内形成两个液面, 澄清液面 (A-A) 和沉积液面 (B-B), 如图 7 (b) 所示. 澄清液面下降, 沉积液面上升, 当两液面接近时, 颗粒间距减小, 浓度上升, 此时颗粒受颗粒沉降而引起的上升水流的影响显著, 处于过渡状态, 如图 7 (c) 所示. 沉降速度在几秒钟内急剧降低. 该阶段以两液面重合为终点.

由实验数据知, 本实验 120 min 内, AD 段在不到 1 min 内完成, 时间较短. 相对于整个容器, 从运动

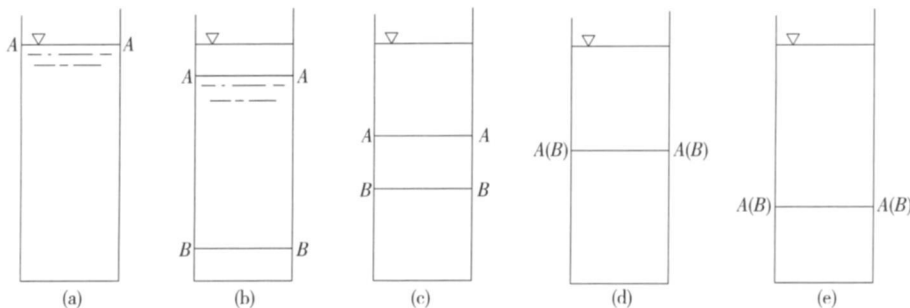


图 7 全尾砂双液面沉降. (a) 初始状态; (b) 双液面状态; (c) 过渡状态; (d) 压密排水状态; (e) 极限沉降状态

Fig 7 Subsidence of unclassified tailings with a dual level (a) initial state (b) double level state (c) transition state (d) compaction drainage state (e) ultimate settlement state

距离和运动时间两方面考虑, 在定性的范围内, 絮团尺寸对于运动影响较小. 因此在前四阶段将絮团简化为圆球形密实颗粒.

3.3.5 压密沉降段

如图 5 中 EF 段, 本段以双液面重合开始, 如图 7(d) 所示. 容器底部较高浓度区的自由水主要以两种形式存在^[12]: ①位于絮团间的水. 与絮团尺寸相比, 絮团间距较大, 位于其中的水具有一般水的通性, 在重力作用下呈渗透状态移动, 可称之为重力水. ②位于絮团内部的水. 由于絮团内部空间较小, 这部分水可以理解为毛细水. 毛细水的运动是毛细力和重力共同作用下的运动, 可以从上向下, 也可从下向上, 可传导静压力.

在重力作用下, “颗粒”沉降继续进行, 逐渐将絮团之间的这部分“重力水”挤出. 由于含水量低, 上升水的绕流所造成的紊流扰动减弱, 排水过程趋于缓慢, 仅靠絮团的重力作用将水排出, 故而沉降速度大幅降低.

3.3.6 极限沉降段

如图 5 中 FG 段所示. 根据传统高分子絮凝理论^[12], 该段在重力和布朗运动的共同作用下, 逐渐将絮团间的毛细水挤出, 使颗粒沉降接近或达到极限沉降浓度. 该段液面沉降速度接近于零, 长时间持续观察才能检测到液面的下降. 当达到理论极限浓度时, 沉降结束.

3.4 小结

本模型从实验现象和数据出发, 结合固液两相流理论中颗粒沉降理论总结而来, 且通过后续实验证明具有可重现性; 模型的建立和阶段划分与实验现象和理论分析在一定程度上能够相互验证, 具有一定的理论价值.

对模型的阶段划分, 在不同的阶段分别结合了两相流理论、高分子絮凝理论中的经典学说进行分析; 但为便于力学分析, 在控制误差的前提下, 将全尾砂颗粒絮团简化为圆球形密实颗粒, 因此上述分析与实际情况并不能完全符合. 笔者在以后研究中将结合高分子絮凝动力学, 综合分析絮团直径、强度、不规则程度和絮毯效应等因素在两相流颗粒沉降中的影响.

4 结论

(1) 相同单耗下, 给料浓度越低, 沉降速度越大, 当给料质量分数 10% 时, 沉降速度最大达到 $10.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 给料质量分数 20% 能够达到较好的沉降效果.

(2) 相同给料浓度下, 沉降速度和沉降浓度与絮凝剂单耗正相关. 质量分数 20% 料浆的絮凝剂单耗临界值约为 $30 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$; 当单耗 $20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 时, 沉降速度最大且成本低, 适合现场使用.

(3) 建立沉降速度随时间变化的简单模型, 将沉降过程划分为六个阶段: 紊流影响段, 加速沉降段, 沉降末速段, 干涉沉降区, 压密沉降段以及极限沉降段. 经实验和理论分析证明该模型及划分方法具有一定的理论价值.

参 考 文 献

- [1] Yuan X L, Xu K C. Advances in solid waste treatment and disposal technology for China's metal mines. *Met Mine* 2004 (6): 46 (袁先乐, 徐克创. 我国金属矿山固体废弃物处理与处置技术进展. *金属矿山*, 2004 (6): 46)
- [2] Sivakugan N, Rankine R M, Rankine K J et al. Geotechnical considerations in mine backfilling in Australia. *J Cleaner Prod* 2006 14 (12): 1168
- [3] Chen S W, Chen Q P. Principle, structure and application of HRC high pressure thickener. *Met Mine* 2002 (12): 33 (陈述文, 陈启平. HRC 高压浓缩机的原理、结构及应用. *金属矿山*, 2002 (12): 33)
- [4] Usher S P, Scales Peter J. Steady state thickener modeling from the compressive yield stress and hindered settling function. *Chem Eng J* 2005 15 (8): 253
- [5] Yang S Z, Sun D K, He F Z. *Solid-Liquid Separation*. Beijing: Metallurgical Industry Press 2008 (杨守志, 孙德堃, 何方箴. 固液分离. 北京: 冶金工业出版社, 2008)
- [6] Bigger R, Danasceno J JR, Karlsen I K H. A mathematical model for batch and continuous thickening of flocculated suspensions in vessels with varying cross section. *Int J Miner Process* 2004 73 (9): 183
- [7] Tiller F M, Chen W. Limiting operating conditions for continuous thickeners. *Chem Eng Sci* 1988 43 (7): 1695
- [8] Liu X H, Wu A X, Wang H J et al. A primary discussion on the thickening law of paste filling. *Met Mine* 2009 (9): 38 (刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 等. 膏体充填尾矿浓密规律初探. *金属矿山*, 2009 (9): 38)
- [9] Besra L, Sengupta D K, Roy SK et al. Influence of polymer adsorption and conformation on flocculation and dewatering of kaolin suspension. *Sep Purif Technol* 2004 37 (3): 231
- [10] Yu X, Somasundaran P. Kinetics of polymer conformational changes and its role in flocculation. *J Colloid Interface Sci* 1996 3 (2): 770
- [11] Tong Q L. *Theoretical Basis of Two-Phase Flow*. Beijing: Metallurgical Industry Press 1982 (佟庆理. 两相流动理论基础. 北京: 冶金工业出版社, 1982)
- [12] Tripathy T, Bhagat R P, Singh R P. The flocculation performance of grafted sodium alginate and other polymeric flocculants in relation to iron ore slime suspension. *Eur Polym J* 2001 1 (1): 12