

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 10. 028

基于絮凝沉砂的立式砂仓面积最佳计算模式

王 石,张钦礼,王新民,李 帅
(中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘 要: 为探究全尾砂絮凝沉降条件下立式砂仓面积最佳计算模式,根据最理想沉砂条件和不同沉砂特点,从3种计算模式中确定出结果误差最小者.以某铅锌矿为例,进行细粒级全尾砂絮凝沉降试验,回归分析得到最佳沉砂条件下的沉降曲线,依此从3个角度分析立式砂仓面积计算模式的可靠性.最佳絮凝条件:相对分子量为 8×10^6 的阴离子聚丙烯酰胺(APAM),入料砂浆体积分数为7.80%,对应的絮凝剂单耗为 $17.66 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$.最佳立式砂仓面积为 36.06 m^2 ,托麦吉-菲契图解计算模式所得结果与其贴进度达97.04%.

关 键 词: 全尾砂;絮凝沉降;立式砂仓面积;回归分析;计算模式

中图分类号:TD 926.4 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)10-1501-06

Optimal Calculation Mode of Vertical Sand Silo Area Based on Flocculating Sedimentation

WANG Shi , ZHANG Qin-li , WANG Xin-min , LI Shuai
(School of Resources and Safety Engineering , Central South University , Changsha 410083 , China. Corresponding author : WANG Shi , E-mail : stonersxx@126. com)

Abstract : In order to explore the optimal calculation mode of vertical sand silo area under the condition of flocculating sedimentation of unclassified tailings , the minimized result error was determined through 3 calculation modes based on the ideal sedimentary condition and the different sedimentary characteristics. Took the case of a lead and zinc ore as an example : the flocculating sedimentation tests of fine unclassified tailings were conducted , then the slurry settlement curves under the best settling condition were obtained by regression analysis. The reliability of calculation modes for vertical sand silo area was analyzed. Results showed that the best flocculent condition is as follows : the relative molecular weight of APAM is 8×10^6 , the volume fraction of feeding slurry is 7.80% and the appropriate unit consumption of flocculants is $17.66 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$. The optimal area of vertical sand silo is 36.06 m^2 , which is 97.04% close to the result based on the Talmage-Fitch graphical method.

Key words : unclassified tailings ; flocculating sedimentation ; vertical sand silo area ; regression analysis ; calculation mode

随着对充填质量、环境保护、节约资源和降低成本越来越高的要求,添加絮凝剂对立式砂仓内全尾砂浆进行快速絮凝浓缩已成为矿山充填的重要环节^[1].该措施能保证放砂浓度和流量,提高尾砂利用率,降低溢流水含砂量,节约充填站基建和尾矿库维护费用^[2-3].然而,立式砂仓内全尾砂絮凝沉降具有细粒级尾砂含量高、过渡区时间短及沉砂受多因素影响等特点,立式砂仓面积的确

定必然存在难点.

针对立式砂仓面积的计算,相关学者已做了大量探索性研究.费祥俊^[4]进行了不同体积非均匀颗粒群体沉降试验研究,并将其与浓缩池面积的计算相结合,但未进行细粒级全尾砂浆试验且未考虑投放絮凝剂的情况;Eswaraiah等^[5]研究了不同离子型絮凝剂对铁矿全尾砂浆沉降特性的影响,但未用于砂仓面积的计算;王洪江等^[6]将全

收稿日期:2015-08-25
基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAB02B05).
作者简介:王 石(1987-),男,河南济源人,中南大学博士研究生;张钦礼(1965-),男,山东临朐人,中南大学教授,博士生导师;王新民(1957-),男,安徽安庆人,中南大学教授,博士生导师.

尾砂絮凝沉降试验运用到浓密机尺寸的设计中 , 但单位面积固体处理量的计算未考虑浓缩体下向排出速度 , 且忽略了全尾砂絮凝沉降压缩区时间短及压缩点试验结果模糊的缺点.

借鉴前人研究成果 , 结合最佳沉砂条件下的沉降曲线 , 运用凯奇^[7]、费祥俊^[4]和托麦吉 - 菲契^[8] 3 种计算模式进行立式砂仓面积对比计算. 在试验和计算过程中 , 甄选了最佳絮凝剂类型 , 获得了最佳入料砂浆及对应的最佳絮凝剂单耗 , 考虑了多因素对压缩点时间的影响.

1 絮凝沉降试验

1.1 物料性能

试验物料为某铅锌银矿选厂的全尾砂 , $d < \text{pH} < 7$, 属中性偏酸性. 该矿全尾砂粒径组成见表 1. 由表 1 可知 , 全尾砂粒度偏细 , 0.075 mm 以下颗粒达 69.1% , 中值粒径 d_{50} 仅为 0.049 mm , 且不均匀系数较大 (12.7).

表 1 全尾砂粒径组成						
Table 1 Particle size composition of unclassified tailings						
粒径 mm	>0.5	$0.5 \sim 0.25$	$0.25 \sim 0.075$	$0.075 \sim 0.05$	$0.05 \sim 0.005$	<0.005
质量 分数/%	0	1.3	29.6	18.1	40.7	10.3

1.2 絮凝剂种类确定试验

结合该矿全尾砂特性 , 选取聚合氯化铝 (PAC) 和阴离子聚丙烯酰胺 (APAM) 两类絮凝剂. PAC 通过改变颗粒之间的范德华作用能和双电层静电排斥能达到絮凝沉降的目的 ; APAM 絮凝机理是“ 桥架作用 ” , 在中性偏酸性溶液中其絮凝作用明显高于非离子和阳离子聚丙烯酰胺^[9-10].

在烧杯中配置 1% PAC 溶液及 0.1% 相对分子量分别为 5×10^6 、 8×10^6 和 1.2×10^7 的 APAM 溶液 , 在 5 个 1 000 ml 量筒中配置体积分数为 10.54% 的全尾砂浆 , 用移液管向前 4 个量筒中分别转移 $40 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ PAC 和 $20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 相对分子量分别为 5×10^6 、 8×10^6 和 1.2×10^7 的 APAM , 做絮凝沉降试验 , 并与未添加絮凝剂的砂浆作比较. 试验结果如图 1 所示.

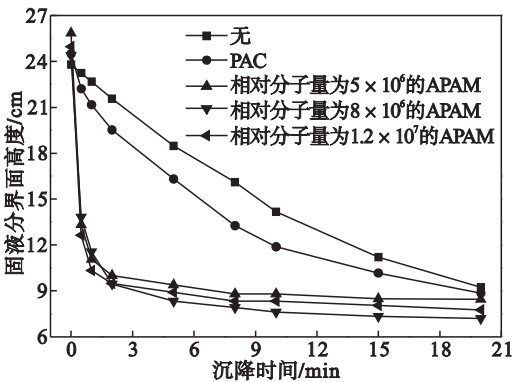


图 1 不同絮凝剂砂浆的沉降曲线
Fig. 1 Sedimentation curves of slurry with different flocculants

由图 1 可知 , 两类絮凝剂都能改善全尾砂浆的沉降效果 , PAC 的絮凝曲线表现出线性函数特征 , APAM 则表现出指数函数特征. 3 种添加 APAM 的砂浆的沉降高度达到 15 cm 时 , 所需时间为 1.1 ~ 1.3 min , 添加 PAC 的砂浆却需 16 ~ 18 min , APAM 絮凝效果明显优于 PAC. 相同沉降时间内 , 添加相对分子量为 8×10^6 APAM 的砂浆的沉降高度高于其他 2 种 , 约为 0.4 ~ 1.3 cm. 最终推荐相对分子量为 8×10^6 的 APAM 作为絮凝剂.

1.3 入料体积分数与絮凝剂单耗的关系

在一定单耗范围内增加絮凝剂可以改善沉降效果. 然而 , 当单耗达到某一值时继续增加 , 颗粒表面的吸附空位减少且胶体颗粒表面电荷逆转 , 颗粒间斥力增大 , 结合键减弱 , 原有颗粒间的吸附架桥作用被弱化 , 进而导致沉降效果变差^[11]. 且随着砂仓入料体积分数的增加 , 絮凝效果有先变好后变差的现象. 低体积分数的絮凝剂絮凝效果不佳的主要原因是絮凝剂分子间距过大 , 无法进行协同絮凝 , 致使形成的絮体过小而未沉降^[12].

在烧杯中配置 0.1% 相对分子量为 8×10^6 的 APAM 溶液 , 在 5 个 1 000 ml 量筒中配置体积分数为 5.87% 的全尾砂浆 , 按单耗 10、15、20 和 $25 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$, 将不同量的絮凝剂用移液管转移到量筒中进行试验 , 并与未添加絮凝剂作比较. 同理 , 在 1 000 ml 量筒中配置体积分数为 10.54% 和 15.99% 的全尾砂浆 , 按单耗分别为 10、20、30 和 $40 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 添加絮凝剂 , 对体积分数为 5.87%、10.54% 和 15.99% 的全尾砂浆进行沉降试验. 试验结果如图 2 所示.

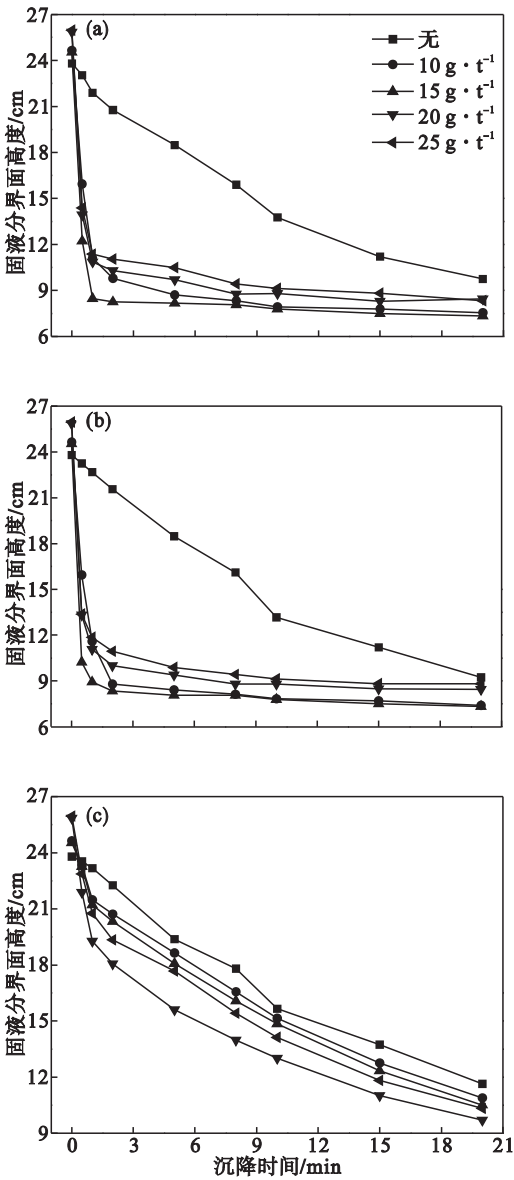


图 2 砂浆的沉降曲线

Fig. 2 Sedimentation curves of slurry

(a)—5.87% ;(b)—10.54% ;(c)—15.99% .

由图 2 可知 ,无絮凝剂时 ,15.99% 的砂浆比 5.87% 的在沉降 1 min 时少沉降 1.30 cm ,即体积分数越高 ,砂浆沉降速度越慢 ;体积分数分别为 5.87% ,10.54% 及 15.99% 的砂浆在平均沉速最大时对应的絮凝剂单耗分别为 15 20 及 30 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$,即当砂浆体积分数增大时 ,需增加絮凝剂投入量以保证沉降效果 ;1 min 时 ,体积分数 15.99% 砂浆的最大平均沉速度比 5.87% 的小 0.158 3 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,即体积分数越大 ,砂浆沉降速度越慢 .

1.4 最佳絮凝剂单耗及入料体积分数的确定

令 $v_{\max i}$ 为砂浆最大平均沉速 ,则 $v_{\max 1}$, $v_{\max 2}$, $v_{\max 3}$ 分别为 5.87% ,10.54% 及 15.99% 砂浆的最大平均沉速 ;令 J_i 为絮凝剂单耗 ,则 J_1 , J_2 , J_3 分

别为 5.87% ,10.54% 及 15.99% 砂浆的絮凝剂单耗 .各砂浆的最大平均沉速回归方程(回归精度 $R_1=0.9543$, $R_2=0.9680$, $R_3=0.9467$)如图 3 所示 .由图 3 可知 ,5.87% ,10.54% 砂浆的絮凝效果明显好于 15.99% 的 .

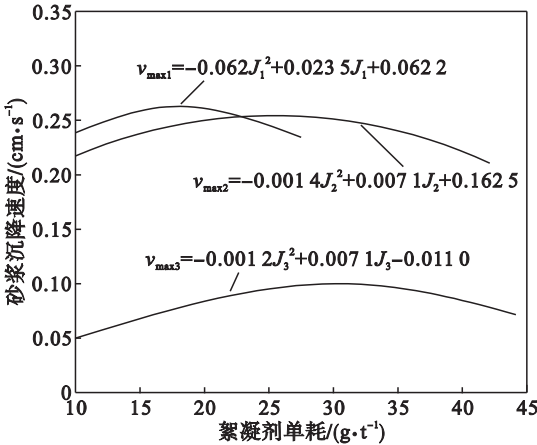


图 3 砂浆最大平均沉速回归曲线

Fig. 3 Regression curves of maximum average sedimentation velocity of slurry

各 $v_{\max i}$ 对 J_i 求导并取零可得表 2 .

表 2 不同体积分数砂浆对应的最佳絮凝情况
Table 2 Optimal flocculating situations for slurry with different volume fraction

入料体积分数	最佳絮凝剂单耗	最大平均沉速
%	$\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$	$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$
5.87	17.029 0	0.262 3
10.54	25.357 1	0.252 5
15.99	30.416 7	0.100 2

由表 2 可知 ,砂浆最大平均沉速与最佳絮凝剂单耗及入料体积分数分别存在一定关系 ,进行回归分析可得各自的回归方程 :

$$v_{\max i} = -0.00216J_i^2 + 0.0904J_i - 0.6506 , \quad (1)$$

$$v_{\max i} = -0.00255C_v^2 + 0.0398C_v + 0.1166 . \quad (2)$$

式中 : C_v 为体积分数 % .对式 (2)求导并取零 ,得最佳入料体积分数为 7.80% ,此时对应的 $v_{\max i} = 0.2719 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.将 $v_{\max i} = 0.2719 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 代入式 (1)中 ,可得最佳絮凝剂单耗为 17.66 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$ 或 24.172 4 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$.考虑矿山的经济效益 ,取 17.66 $\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$.

2 最优计算模式

2.1 凯奇计算模式

单位面积固体处理量 $G(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ 表示砂仓某一层单位面积的固体通过量 .设 S_v 为沉淀

层某一层悬液体积分数 S_{vd} 为砂仓底流体积分数 (30.16%)。砂仓任一层固体速度有两个分量,一是浑液面沉速 v ,另一是浓缩体下向排出速度 U ,均以 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 计。则

$$G = S_v(v + U)\gamma_s. \tag{3}$$

式中 γ_s 为尾砂密度 $2.83 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。在稳定运行状态下,任一时刻通过砂仓中任一层固体量与仓底排出量相等,即

$$G = S_{vd}U\gamma_s. \tag{4}$$

由式 (3) 和式 (4) 消去 U 得

$$G = \frac{S_v v \gamma_s}{1 - S_v/S_{vd}}. \tag{5}$$

因此,砂仓的面积为

$$A = \frac{Q}{G} = \frac{Q}{600v\gamma_s} \left(\frac{1}{S_v} - \frac{1}{S_{vd}} \right). \tag{6}$$

式中 Q 为选厂尾砂产量 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于 γ_s 、 S_{vd} 已知,须确定 v 与 S_v 的关系,才能得到砂仓面积 A 。

作入料砂浆体积分数为 7.80% (即 $S_{v0} = 7.80\%$) 及絮凝剂单耗为 $17.66 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 的沉降区和过渡区的沉降曲线,并回归公式,其沉降曲线见图 4。

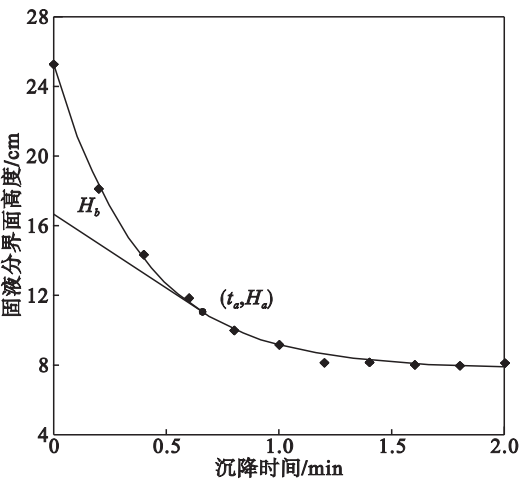


图 4 最佳沉降曲线
Fig. 4 Optimal sedimentation curve

回归方程 ($R = 0.999$) 为

$$H = 7.821 + 17.295e^{-2.554t}. \tag{7}$$

对 H 求导得浑液面沉降速度

$$v = -44.171e^{-2.554t}. \tag{8}$$

通过曲线上任意一点 (t_a, H_a) , 以 v 为斜率做切线与 y 轴交于点 H_b :

$$H_b = 7.821 + 17.295e^{-2.554t_a} + 44.171t_a \cdot e^{-2.554t_a}. \tag{9}$$

由式 (5) 可得点 (t_a, H_a) 处的 G :

$$G = \frac{S_{vb}v_a\gamma_s \times 600}{1 - S_{vb}/S_{vd}} =$$

$$= \frac{75\,000.66}{0.0195e^{2.554t_a} + 18.8362t_a + 7.3753}. \tag{10}$$

根据式 (10), 由于 t_a 和 $e^{2.554t_a}$ 均为单调递增函数, 则 G 为单调递减函数, 即过渡区沉降时间的最大值 t_u (过渡区与压缩区的交界点, 试验中多次测量取平均值) 为固体处理量的最小值 G_{\min} 。由于 Q 已知, 则可求 A 。

2.2 费祥俊计算模式

费祥俊利用悬液在量筒中的沉降试验, 进行了一些简化处理^[4]。根据沉降试验结果的浑液面高度与时间的关系, 可得

$$G = \frac{H_u S_{vd} \gamma_s A}{A t_u} = \frac{H_0 S_{v0} \gamma_s}{t_u}. \tag{11}$$

式中 H_u 、 t_u 为对应 S_{vd} 的浆面高度和沉降时间; H_0 为初始液面高度。此外, 假定 $S_v = S_{v0}$, 结合式 (5) 可得

$$v = \frac{H_0}{t_u} \left(1 - \frac{S_{v0}}{S_{vd}} \right). \tag{12}$$

已知 $H_0 = 25.10 \text{ cm}$, 则 $H_u = 7.81 \text{ cm}$, 将沉降曲线画在双对数 ($\lg H - \lg t$) 纸上, 可得压缩点 C 及相应的 t_c 值 $t_c = 0.78 \text{ min}$ 。如图 5 所示, 过压缩点 C 做沉降曲线的切线交排矿浓度线 H_u 于点 B , B 点对应的沉降时间为所求的 t_u 。其他参数已知, 则可求 A 。

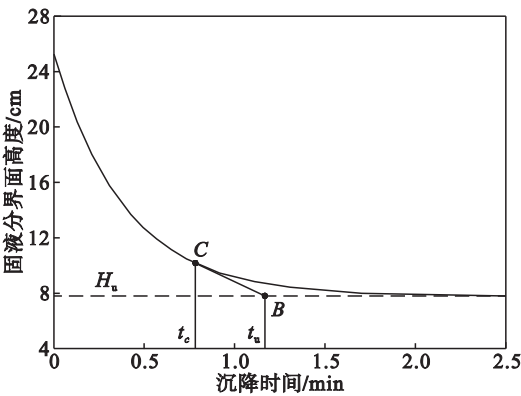


图 5 t_u 的确定
Fig. 5 Determination of t_u

2.3 托麦吉-菲契图解计算模式

托麦吉-菲契图解法通过对沉降曲线上任意一点界面浓度的图解^[8], 得到单位物料量所需的最大沉降面积 A_{\max} ($\text{min} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 及 A 的算法:

$$A_{\max} = \frac{t_u}{H_0 C_f}, \tag{13}$$

$$A = \frac{Q A_{\max}}{600}. \tag{14}$$

式中 C_f 为入料固体质量浓度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。由式

(13)和式(14)可得 A 的求法归结为 t_u 的图解法.基于多种图解方法优选最佳 t_u ,如图6所示.最后,取 t_{u1} 、 t_{u2} 及 t_{u3} 的最大值为 t_u .

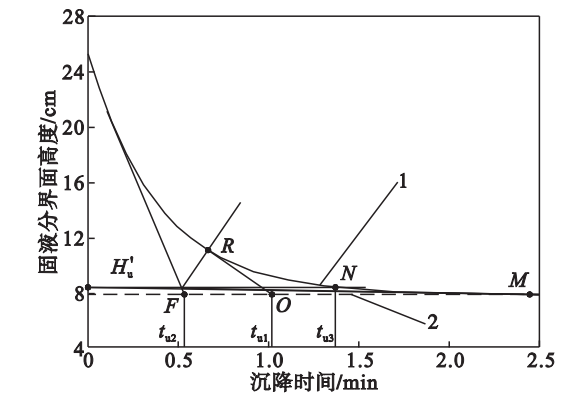


图 6 t_u 的图解法确定

Fig. 6 Graphical determination on t_u

1—沉降曲线;2— H_u 线.

2.4 最佳计算模式的确定

添加絮凝剂后,药剂对尾矿颗粒作用形成包裹层,使砂浆能迅速达到压缩沉降,增加了压缩区的高度.压缩区过高增大了尾砂板结的风险,工程上采用风水联动造浆技术,利用高压打破压缩区的静态平衡,扩大造浆面积和流态化区域,保证放砂浓度和流量.结果导致实际沉降曲线压缩区浓度比静态试验低.此外,在实际连续排料的过程中,沉砂还会受砂浆纵横向流动的干扰和进出料方式位置等因素的影响,这些都将导致实际压缩点时间略大于静态试验结果.由此,引入实际最佳沉降时间 t'_u ,利用经验公式对砂仓面积进行修正:

$$t'_u = (1 + \frac{S_{vd}}{S_{v0}} \cdot \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} H(t) - H_u}{\lim_{t \rightarrow \infty} H(t)}) t_u. \quad (15)$$

代入数据可得 $t'_u = 1.0354 t_u$.该矿选厂生产能力为 $2\,500\text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,即 $Q = 1.04 \times 10^6\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.结合式(6)和式(14)可得表3.

表 3 砂仓面积对照表

Table 3 Comparison of vertical sand silo areas

计算模式	$\frac{t_u}{\text{min}}$	$\frac{\text{砂仓面积}}{\text{m}^2}$	$\frac{t'_u}{\text{min}}$	$\frac{\text{砂仓面积}}{\text{m}^2}$
凯奇	1.05	38.11	1.09	39.12
费祥俊	1.19	31.01	1.23	32.10
托麦吉-菲契	1.37	35.70	1.42	36.96

取改进后3种计算模式所得砂仓面积的均值(36.06 m^2)为最佳砂仓面积,则凯奇、费祥俊、托麦吉-菲契所得结果与最佳值的误差分别为8.49%、10.98%、2.96%.托麦吉-菲契图解计算

模式所得结果误差最小,贴近度高(97.04%).

3 多矿山实例验证

为检验托麦吉-菲契图解计算模式是否准确,选取国内3个具有代表性的使用立式砂仓充填的矿山,基于其全尾砂特性重建试验,计算确定砂仓面积,并与其现面积进行对比,见表4.

表 4 多矿山砂仓面积对比表

Table 4 Comparison table of vertical sand silo areas of different mines

矿山	$\gamma_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	d_{50}/mm	$\frac{\text{设计面积}}{\text{m}^2}$	$\frac{\text{计算面积}}{\text{m}^2}$	面积比
冬瓜山铜矿	2.97	0.036	50.24	44.34	1.13
凡口铅锌矿	2.89	0.017	63.59	55.80	1.14
石人沟铁矿	2.70	0.049	78.50	67.29	1.17

由表4可知,托麦吉-菲契图解计算面积比矿山设计面积小8%~10%,这种情况的产生原因如下:①某些矿山的全尾砂难取,试验选用性质接近的全尾砂代替;②试验某些指标的选取与现场实际应用存在差别,如入料砂浆体积分数;③计算所得结果为最佳理想值,一般会低于设计值.为保证立式砂仓的可靠和满足设计要求,设计中会对计算值进行放大取整,系数取1.1~1.2,计算结果值满足该要求.因此,推荐用托麦吉-菲契图解计算模式进行最佳立式砂仓面积计算.

4 结 论

1) 试验对比得该矿最佳絮凝剂类型为相对分子量 8×10^6 的APAM,结合多体积分数多絮凝剂单耗试验,回归分析得最佳入料体积分数为7.80%,对应的最佳絮凝剂单耗为 $17.66\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$.

2) 引入 $t'_u = 1.0354 t_u$,对实际压缩点时间略大于静态试验结果进行修正.修正后的最佳砂仓面积为 36.06 m^2 ,托麦吉-菲契图解计算模式所得结果与其贴近度达97.04%.经多矿山实例验证,结果比较吻合.

参考文献:

[1] Bouzalakos S, Dudeney A W L, Chan B K C. Formulating and optimizing the compressive strength of controlled low-strength materials containing mine tailings by mixture design and response surface methods[J]. Minerals Engineering, 2013, 53: 48-56.
[2] Lorenzo F, Angiolo F, Fabio R. Flow of a Bingham-like fluid

in a finite channel of varying width :a two-scale approach [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 2012 ,177/178(4) :76 – 88.

[3] Wang Y ,Gao B ,Yue Q ,et al. Effect of viscosity ,basicity and organic content of composite flocculant on the decolorization performance and mechanism for reactive dyeing wastewater[J]. *Journal of Environmental Sciences* , 2011 ,23(10) :1626 – 1633.

[4] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京 :清华大学出版社 ,1994 :105 – 114.
(Fei Xiang-jun. Hydraulics of transporting slurry and granular material[M]. Beijing :Tsinghua University Press ,1994 :105 – 114.)

[5] Eswaraiiah C ,Biswal S K ,Mishra B K. Settling characteristics of ultrafine iron ore slimes[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials* 2012 ,19(2) :95 – 99.

[6] 王洪江 ,陈琴瑞 ,吴爱祥 ,等. 全尾砂浓密特性研究及其在浓密机设计中的应用[J]. 北京科技大学学报 ,2011 ,33(6) :676 – 681.
(Wang Hong-jiang ,Chen Qin-rui ,Wu Ai-xiang ,et al. Study on thickening properties of unclassified tailings and its application to thickener design[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* 2011 ,33(6) :676 – 681.)

[7] Kynch G J. A theory of sedimentation[J]. *Transactions of the Faraday Society* ,1952 ,48 :166 – 176.

[8] Talmage W P ,Fitch E B. Determining thickener unit areas [J]. *Industrial & Engineering Chemistry* ,1955 ,47(1) :38 – 41.

[9] Jung J ,Jang J. Soil-water characteristic curve of sediments containing a polyacrylamide solution[J]. *Géotechnique Letters* 2016 ,6(1) :89 – 94.

[10] Sadeghi S H ,Hazbavi Z ,Younesi H ,et al. Trade-off between runoff and sediments from treated erosion plots and polyacrylamide and acrylamide residues[J]. *Catena* ,2016 ,142 :213 – 220.

[11] Swift T ,Swanson L ,Bretherick A ,et al. Measuring poly (acrylamide) flocculants in fresh water using inter-polymer complex formation [J]. *Environmental Science : Water Research & Technology* 2015 ,1(3) :332 – 340.

[12] 何丽莉 ,徐新阳. 煤矸石酸溶法制得聚合氯化铝铁钙的形态[J]. 东北大学学报(自然科学版) ,2013 ,34(10) :1477 – 1480 ,1484.
(He Li-li ,Xu Xin-yang. Morphology of PAFCC prepared by coal gangue leaching method[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* ,2013 ,34(10) :1477 – 1480 ,1484.)

(上接第 1500 页)

[4] 杨根兰 ,黄润秋 ,蔡国军 ,等. 岩石破坏前后曲线分类及脆—延转换围压研究——蚀变岩常规三轴压缩试验[J]. 岩土力学 2008 ,29(10) :2759 – 2764.
(Yang Gen-lan ,Huang Run-qiu ,Cai Guo-jun ,et al. Conventional triaxial compression test of altered rock—study of classification of strain-stress curve before and after destruction and brittle-ductile diversion confining pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics* , 2008 ,29 (10) :2759 – 2764.)

[5] Yagiz S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test[J]. *Tunneling and Underground Space Technology* 2009 ,24(1) :66 – 74.

[6] Hucka V ,Das B. Brittleness determination of rocks by different methods [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* ,1974 ,11(10) :389 – 392.

[7] Altindag R. The correlation of specific energy with rock brittleness concept on rock cutting[J]. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* ,2003 ,103(3) :163 – 171.

[8] Morley A. Strength of materials[M]. London :Longman Green ,1944 :71 – 72.

[9] Heteny M. Handbook of experimental stress analysis[M]. New York :John Wiley ,1966 :23 – 25.

[10] Ramsay J G. Folding and fracturing of rocks[M]. London :McGraw – Hill ,1967 :44 – 47.

[11] Obert L ,Duvall W I. Rock mechanics and the design of structures in rock[M]. New York :John Wiley ,1967 :78 – 82.

[12] 尤明庆. 岩石力学的性质[M]. 北京 :地质出版社 ,2007 :113 – 114.
(You Ming-qing. Mechanical properties of rock [M]. Beijing :Geology Publishing House 2007 :113 – 114.)

[13] 赵兴东 ,唐春安 ,李元辉 ,等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩土力学与工程学报 ,2005 ,25(sup2) :3673 – 3678.
(Zhao Xing-dong ,Tang Chun-an ,Li Yuan-hui ,et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2005 ,25(sup2) :3673 – 3678.)

[14] Yuan S C ,Harrison J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 2004 ,41 :679 – 686.

[15] 侯振坤 ,杨春和 ,郭印同 ,等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学 2015 ,36(9) :2541 – 2550.
(Hou Zhen-kun ,Yang Chun-he ,Guo Yin-tong ,et al. Experimental study of anisotropic properties of Longmaxi formation shale under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2015 ,36(9) :2541 – 2550.)