

搅拌槽内流体特征对絮凝特性的影响^{*}

牛福生^{1,2}, 李卓林¹, 张晋霞^{1,2}, 刘亚¹

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063009)

摘 要:在两种不同形状的搅拌槽中研究流体特征对微细粒赤铁矿絮凝特性的影响。试验结果表明:方形槽中,在转速 1 000 r/min、作用时间 4 min、轴向距离为 2 cm 的条件下能够形成粒径 35.37 μm 、分形维数 1.628 9、沉降速度 1.132 6 cm/s、密度 4.62 g/cm³、孔隙率 51.83% 的絮凝体;圆形槽中,在转速 1 100 r/min、作用时间 4 min、轴向距离 1.5 cm 的条件下能够形成粒径 35.67 μm 、分形维数 1.599 4、沉降速度 1.063 7 cm/s、密度 4.51 g/cm³、孔隙率 54.38% 的絮凝体。两者相比,方形槽中较小转速下就可获得更密实的絮凝体。

关键词:搅拌槽;絮凝体;流体特征;絮凝特性

中图分类号:TD923⁺.3 文献标识码:B 文章编号:1001-0076(2017)03-0042-05

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.03.008

The Influence of Fluid Flow Features on Flocculation Characteristics in Stirred Tank

NIU Fusheng^{1,2}, LI Zhuolin¹, ZHANG Jinxia^{1,2}, LIU Ya¹

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 2. Hebei Province Mining Industry Develops with Safe Technology Priority Laboratory, Tangshan 063009, China)

Abstract: The influence of fluid flow features on flocculation characteristics of fine hematite was investigated in two stirred tanks with different shapes. The result showed that in the square tank, under the conditions of rotating speed of 1 000 r/min, reaction time of 4 min and axial distance of 2 cm, the floc was formed with an average diameter of 35.37 μm , a fractal dimension of 1.628 9, a settling velocity of 1.132 6 cm/s, a density of 4.62 g/cm³ and a porosity of 51.83%. In the circular tank, under the conditions of rotating speed of 1 100 r/min, reaction time of 4 min and axial distance of 1.5 cm, the floc units was formed with an average diameter of 35.67 μm , a fractal dimension of 1.599 4, a settling velocity of 1.063 7 cm/s, a density of 4.51 g/cm³ and a porosity of 54.38%. In comparison, square tank could get the denser floc in low speeds.

Key words: agitating tank; floc; fluid flow features; flocculation characteristics

浮选是微细粒复杂难选矿石分选的一种重要的方法^[1]。对于浮选的研究主要集中在药剂制度、矿浆浓度、温度、充气量等影响因素^[2-4]。近年来,研

究学者发现,在浮选过程中,流体的变化也会对浮选产生较大的影响^[5],它不仅能够影响矿粒在矿浆中的分散,还能影响矿粒与气泡的作用。在絮凝-浮

* 收稿日期:2017-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助(51474087);河北省高校百名优秀创新人才支持计划(BR2-214)

作者简介:牛福生(1974-),男,教授,主要从事复杂难选矿选矿理论与工艺研究。

通讯作者:李卓林(1991-),男,硕士,主要从事复杂难选矿选矿方向的科研工作。

选中流体的变化不仅会影响絮凝体的形成,还会对絮凝体性质产生较大的影响。所以,在浮选过程中,流体的变化是不可忽视的^[6]。本文以微细粒赤铁矿为研究对象,研究了搅拌槽内流体变化对絮凝特性的影响,为后续研究提供理论基础。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

1.1.1 矿样制备

试验所用原料取自河北唐山某铁选厂重选精矿。矿样经“阶段磨矿—磁选—重选”工艺流程进行提纯。理论上认为矿物浮选粒度下限为 10 μm,若浮选矿物粒度低于 10 μm,浮选过程将不会进行,故制取的赤铁矿纯矿物经立式搅拌磨进行超细磨至 10.81 μm 备用(10.81 μm 是经过粒度测定仪测出的粒度平均值,本论文不涉及分粒级絮凝,故没有详细说明)。通过对赤铁矿纯矿物进行 XRD 分析(结果见图 1),可知赤铁矿纯矿物中杂质含量较少,纯度较高。

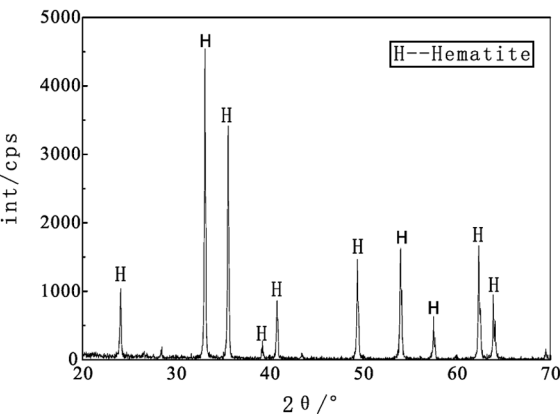


图1 赤铁矿纯矿物 XRD 分析结果

1.1.2 试剂

试验所用氢氧化钠购自天津市大陆化学试剂厂,为分析纯;糯玉米淀粉为食品级药剂。氢氧化钠与糯玉米淀粉以质量比 0.03 : 1 配置成浓度 1% 的苛性糯玉米淀粉溶液,配置溶液以及调节矿浆所用溶剂为蒸馏水。

1.2 试验方法

1.2.1 粒度测定

对于微细粒物料粒度的测定常采用的方法主要

有沉降天平法和激光粒度仪测定法,试验所选用方法为沉降天平法,具体操作如下:

(1)取 3 g 制备好的赤铁矿絮凝体置于 TZC - 4 颗粒测定仪自带沉降容器中;

(2)加入蒸馏水至为 105 mm 刻度处,进行适当的搅拌;

(3)设置沉降试验参数,在溶液搅拌完全后,开始进行沉降数据的采集,获得该粒度絮凝体的沉降曲线;

(4)经设备内置数据处理功能,对采集的数据进行处理,最终得出赤铁矿絮凝体的粒度大小及分布。

1.2.2 絮凝体分形维数测定

Gregory J 于 1989 年提出分形维数,根据分形维数的大小表征絮凝体的密实程度,分形维数越大,絮凝体越密实,反之则絮凝体密实程度越低。同时提出通过絮凝体的最大长度与投影面积之间的函数关系计算絮凝体分形维数,计算公式如下^[7]:

ln A = ln B + D_f ln L (1)

式中: A 为截面面积; B 为比例常数; L 为最长距离(也称为特征长度); D_f 为分形维数。

具体操作如下:

(1)用胶头滴管取适量絮凝体置于载玻片上,于阴凉干燥处自然风干,且要防止污染;

(2)将载玻片置于 PM6000 透光偏光显微镜下进行观察,并对絮凝体进行图像采集;

(3)采集好的图像经图像处理软件进行处理,求出阴影面积及最大长度,根据计算公式作图,求出直线斜率,即为絮凝体分形维数。

2 流体特征对絮凝特性的影响

在絮凝体的形成过程中,流体的影响不可忽视。而引起流体变化的因素主要有:搅拌速度、作用时间以及搅拌桨距槽底的轴向距离等。同时不同结构搅拌槽内部的流体也存在一定差异,也会对絮凝体的特性产生一定的影响。本文采用两种不同形状的搅拌槽分别研究不同流体状态对絮凝特性的影响。

2.1 方形搅拌槽

2.1.1 搅拌速度对絮凝特性的影响

固定搅拌时间为 3.5 min,搅拌桨距槽底的距离(以下简称“轴向距离”)为 1.5 cm,研究不同搅拌速度所引起的不同流体对絮凝特性的影响,结果如图

2 所示。

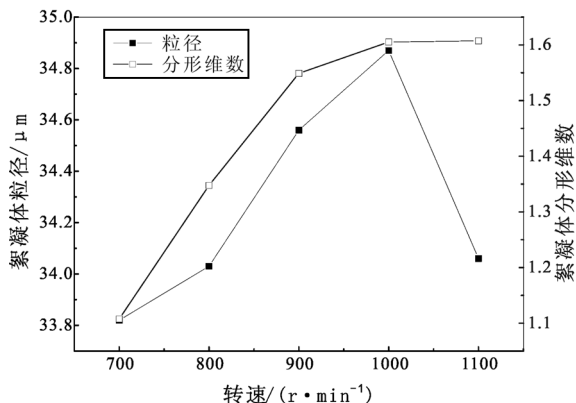


图2 搅拌速度对絮凝特性影响试验结果

根据试验结果可以得出,随着搅拌速度的提高,絮凝体粒径先升后降,而絮凝体的分形维数却逐渐升高,这说明搅拌速度的增大引起水流剪切力的增大,在较大剪切力下形成的絮凝体在结构上较密实,而过大的剪切力会使已经形成的絮凝体破裂,所以当搅拌速度超过一定值时絮凝体粒径会减小。由结果分析认为,当搅拌速度为 1 000 r/min 时最有利于絮凝体的形成,此时,絮凝体粒径为 34.87 μm ,分形维数为 1.605 3。

2.1.2 作用时间对絮凝特性的影响

在搅拌速度 1 000 r/min、轴向距离 1.5 cm 的条件下,研究作用时间对絮凝特性的影响。试验结果见图 3。

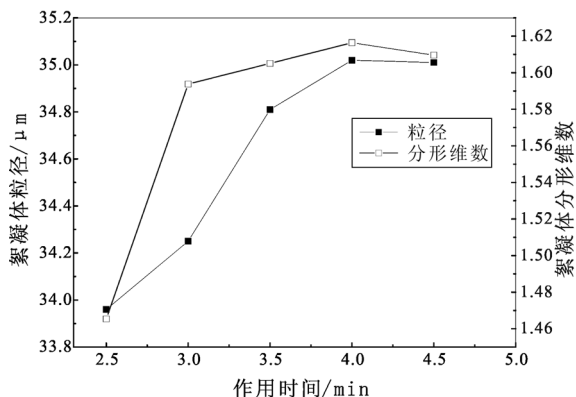


图3 作用时间对絮凝体影响试验结果

由图 3 可知,作用时间的延长有助于絮凝体的生长,但超过一定的时间后絮凝体的粒径与分形维数变化不明显。这表明絮凝体生长随时间变化而变化,当时间为 4 min 并继续延长时,絮凝体的生长达

到平衡,生长趋势不再明显。故形成絮凝体的作用时间以 4 min 最为适宜,此时,絮凝体粒径为 35.02 μm ,分形维数为 1.616 4。

2.1.3 搅拌桨距槽底轴向距离对絮凝特性的影响

在以上最佳试验条件下进行轴向距离对絮凝特性影响的试验,试验结果见图 4。

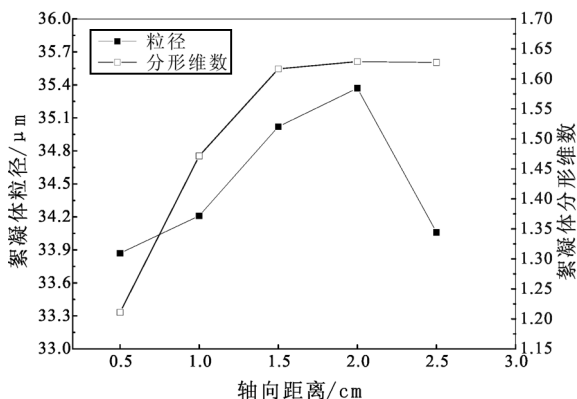


图4 轴向距离对絮凝体影响试验结果

由图 4 可知,随着搅拌桨距槽底轴向距离的不断加大,絮凝体的粒径先升高后降低,絮凝体分形维数逐渐升高,经分析认为,当搅拌桨距槽底轴向距离逐渐加大时,流体轴向速度趋于平均,颗粒间以及颗粒与药剂间的作用更为充分,使得絮凝体的粒径和密实程度都在提高,但是,当距离超过一定值时,由搅拌桨形成的涡流将很难作用到槽底矿浆或作用很小,这将直接影响絮凝体的生长。综合考虑认为,搅拌桨距槽底的轴向距离以 2 cm 最为合适,此时,絮凝体粒径为 35.37 μm ,分形维数为 1.628 9。

2.2 圆形搅拌槽

2.2.1 搅拌速度对絮凝特性的影响

在搅拌时间 3.5 min、搅拌桨距槽底轴向距离 1 cm 的条件下,研究搅拌速度变化所引起流体变化对絮凝特性的影响,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,随着转速的不断加大,絮凝体粒径先升后降,分形维数呈上升趋势。分析认为,圆形槽体壁面比较光滑,流体绕壁面运动,不会产生较大变化,故需加大搅拌速度,得到絮凝所需流体条件。所以,当转速为 1 100 r/min 时,絮凝体粒径达到最大 34.67 μm ,分形维数为 1.450 4。此时,比较适宜絮凝体的形成。

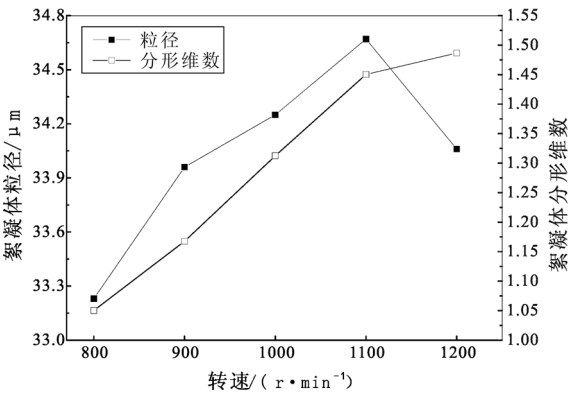


图5 搅拌速度对絮凝体影响试验结果

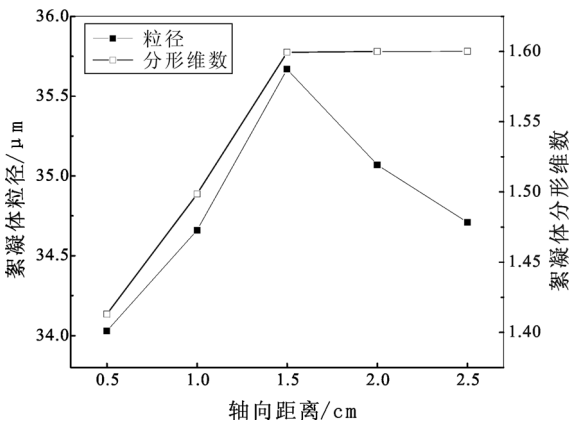


图7 轴向距离对絮凝体影响试验结果

2.2.2 作用时间对絮凝特性的影响

固定搅拌速度为1 100 r/min,搅拌桨距槽底轴向距离为1 cm,研究不同作用时间对絮凝体的影响。试验结果见图6。

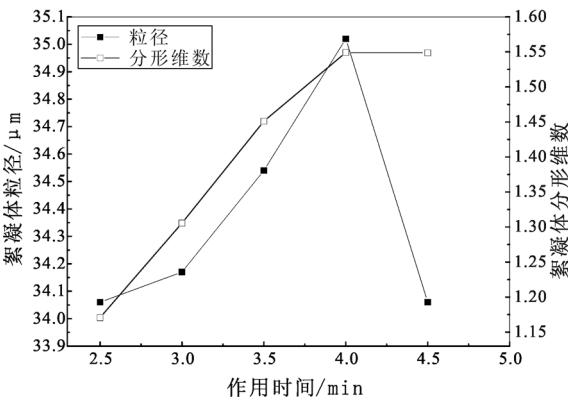


图6 作用时间对絮凝体影响试验结果

通过对试验结果进行分析可知,随着时间的增加絮凝体粒径先增加后增大,分形维数呈先增后降的趋势,这是由于颗粒间的碰撞概率与粘附概率对絮凝体的形成存在一定的影响,絮凝过程就是颗粒“聚集-破裂-聚集”的过程。随着作用时间的延长,絮凝体在水流剪切的作用下破裂,使得粘附概率较低,絮凝体密实程度下降,使得絮凝体粒径与分形维数下降。综合考虑认为,当作用时间为4 min时,最有利于絮凝体生长,此时絮凝体粒径为35.02 μm,分形维数为1.549 1。

2.2.3 搅拌桨距槽底轴向距离对絮凝特性的影响

在条件试验得出的最佳试验条件下进行搅拌桨距槽体轴向距离对絮凝体影响的试验,试验结果见图7。

由图7可知,当搅拌桨距槽底距离逐渐加长时,絮凝体粒径先升高,当超过一定距离后开始下降,而分形维数先升高后趋于平稳。研究认为,随着距离的加长,水流剪切力在轴向上发生不均匀变化,使得絮凝体粒径发生较大改变,而在水流剪切力变化过程中,絮凝体密实程度最终趋于平稳。综合考虑认为,当轴向距离为1.5 cm时,最适合絮凝体形成,此时,絮凝体粒径为35.67 μm,分形维数为1.599 4。

3 絮凝体特性研究

3.1 絮凝体沉降速度的测定

絮凝体的沉降速度对后续的浮选有着较大的影响。若颗粒沉降过快,则会快速沉至槽底,搅拌的作用将会大大被削弱,颗粒与浮选药剂不能充分作用,使浮选恶化,影响选别效果。

试验使用改进后的干涉沉降装置,首先打开水阀使水流量保持稳定,使用胶头滴管取少量赤铁矿絮凝体,加入到实验装置中,调节水流量,使絮凝体保持悬浮状态。此时,测量水流量 Q ,则絮凝体沉降速度 u 与水流量 Q 和沉降管截面面积 S 的关系为: $u = Q/S$,通过控制絮凝体处于悬浮状态的时间,取10个样点,求10个样点平均速度作为最终的絮凝体的沉降速度。

3.2 絮凝体的密度与孔隙率

絮凝过程就是微细颗粒集聚变大的过程。当多个微细颗粒积聚成一个絮凝体时,絮凝体的性质与实际颗粒相比将会发生加大变化。以絮凝体分形维数为基础,通过测定絮凝体的沉降速度,根据公式(2)和公式(3)计算出絮凝体的密度与空隙率^[8]。

$$\rho_1 = \rho_2 + \frac{12\xi_2 v \rho_2 u}{\xi_3 g l_0^{D_f-2} l^{4-D_f}} \tag{2}$$

$$e = 1 - \frac{12\xi_2 v \rho_1 u}{g \xi_3 \Delta \rho l_0^{D_f-2} l^{4-D_f}} \tag{3}$$

式中： ρ_1 为絮团密度， g 为重力加速度， ρ_2 为液体密度， ξ_3 为三维形状因子， l 为絮凝体特征长度， ξ_2 为二维形状因子， l_0 为初始颗粒特征长度， v 为水的

运动粘度， u 为絮凝体沉降速度， $\Delta\rho$ 为颗粒初始密度与液体密度差。

3.3 计算结果与分析

根据上述条件试验所得最佳试验条件下，进行絮凝体沉降速度、密度及孔隙率的测定，结果见表 1。

表 1 絮凝体性质测定结果

槽体形状	粒径/ μm	分形维数	沉降速度 / $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	密度 / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙率/%	备注
方形	35.37	1.628 9	1.132 6	4.62	51.83	$r = 1\ 000\ \text{r/min}; t = 4\ \text{min}; l = 2\ \text{cm}$
圆形	35.67	1.599 4	1.063 7	4.51	54.38	$r = 1\ 100\ \text{r/min}; t = 4\ \text{min}; l = 1.5\ \text{cm}$

由表 1 计算结果可知，方形槽与圆形槽在试验最佳条件以及所得絮凝体的性质特征上均存在不同程度的差异。在相同时间下，圆形槽需要更高的转速和较短的轴向距离。在形成的絮凝体的性质特征上，圆形槽虽然能形成粒径较大的絮凝体，但是其分形维数、沉降速度、密度及孔隙率均高于方形槽内形成的絮凝体。分析原因认为，首先，方形槽壁面产生阻碍，改变了流体径向的运动状态，而圆形槽壁面较光滑，对流体运动状态的改变较弱；其次，在搅拌过程中，通过观察可以看出，圆形槽在轴向上流体的改变要明显弱于方形槽。这两种因素使得在絮凝体生长过程中，在圆形槽内颗粒聚集后破裂的可能性将会降低，使得形成的絮凝体较大。但是，由于方形槽内流体改变较大，故其即使在较小的转速下仍能获得较密实的絮凝体，所以在方形槽中生成的絮凝体的分形维数、沉降速度、密度及孔隙率均较大。也就是说，方形槽中得到的絮凝体更为稳定。

4 结论

综上所述，在最佳条件下方形槽所需搅拌转速更小，轴向距离更大，这在较小的能耗下能够为絮凝体的形成提供较好的搅拌流场；且在两种形状搅拌在的最佳条件下所得絮凝体，方形槽中所得絮凝体结构更为密实，其他物理特性相对较好。综合考虑

认为，方形搅拌槽能够为絮凝体提供更好的流场环境。

参考文献：

[1] 朱阳戈. 微细粒钛铁矿浮选理论与技术研究[D]. 长沙：中南大学,2012.

[2] 王永龙. 微细粒胶磷矿浮选行为与机理研究[D]. 武汉：武汉科技大学,2014.

[3] 葛英勇,侯静涛,余俊. 微细粒矿物浮选技术进展[J]. 金属矿山,2010(12): 90-94,106.

[4] J. B. Yianatos. Fluid flow and kinetic modelling in flotation related processes: columns and mechanically agitated cells—a review[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(12): 1591-1603.

[5] Zhang M., Liu J. T., Zhai A. F., et al. Dynamic analysis of optimization packing in column flotation separation zone [J]. University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 343-346.

[6] 王泓皓. 宽粒级煤泥浮选机试验研究与流场分析[D]. 太原:太原理工大学,2013.

[7] Gregory. J.. Fundamentals of flocculation [J]. Critical review in environmental control, 1989, 19(3): 185-230.

[8] 王玉. 水处理絮凝体的分形与沉降特性试验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.