

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.03.012

金属矿尾砂浆压缩与剪切屈服应力的关系

焦华喆, 杨文博, 杨柳华, 陈峰宾, 王金星, 张文祥, 苏 芮

(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454150)

摘要:膏体流变学的研究是矿业浆体流变学的热点和难点。膏体技术包括脱水、搅拌、输送、堆存(充填)4个阶段,均涉及到非牛顿流体流变特性。在脱水阶段,全尾砂的压缩屈服应力影响了尾砂浆的脱水浓度,浓度是剪切屈服应力的宏观表现,继而影响了混合搅拌和管道输送过程中浆体的剪切屈服应力。所以,压缩屈服应力和剪切屈服应力之间的关系成为了膏体充填技术领域中的关键问题。在压滤理论指导下,开展相关实验,提出了全浓度范围内床层脱水阻力和浆体输送性能表征方法,以表征全尾砂浆的可浓密性能。对全尾砂高压作用下的可浓密性能进行测试,得到高压下全尾砂浆体的压缩屈服应力;使用控制剪切速率法(CSR)操作浆式流变仪检测剪切屈服应力;继而得到两者之间的关系为:浆体屈服应力为剪切应力,压缩屈服应力为压缩应力;浆体的压缩屈服应力、剪切屈服应力与浓度指数均呈指数关系。并且压缩屈服应力远大于剪切屈服应力,因此剪切作用更易破坏絮团,是脱水的主要外部动力,从而解释了搅拌脱水的力学机理。

关键词:全尾砂;絮团结构;压缩屈服应力;剪切屈服应力;膏体充填

中图分类号:TD861

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)03-099-10

Relationship between compression and shear yield stress of metal mine tailing mortar

JIAO Huazhe, YANG Wenbo, YANG Lihua, CHEN Fengbin,
WANG Jinxing, ZHANG Wenxiang, SU Rui

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454002, P. R. China)

Abstract: The study of paste rheology is a hot and difficult point in the rheology of mining slurry. Paste technology includes four stages: dehydration, stirring, transportation and storage (filling), and all the stages involve rheological properties of non-Newtonian fluids. In the dewatering stage, the compressive

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51834001);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助项目(212102310107, 212102310602);山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY05);河南理工大学杰出青年科学基金资助项目(J2020-3);中国博士后科学基金面上资助项目(2020M672226)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51834001), Key R & D and Promotion Projects (Scientific and Technological Breakthrough) of Henan Province (212102310107, 212102310602), Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province (2019SDZY05), Science Fund Project for Distinguished Young Scholars of Henan University of Technology (J2020-3), General Project of China Postdoctoral Science Foundation (2020M672226).

作者简介:焦华喆(1985—),男,河南理工大学副教授,主要从事矿山充填开采等方向研究,(E-mail)jiaohuazhe@126.com。

通讯作者:杨文博,男,硕士研究生,主要从事地下工程支护方向研究,(E-mail)1029559957@qq.com。

yield stress of the whole tailings affects the dewatering concentration of the tailings mortar, and the concentration is the macroscopic expression of the shear yield stress, which in turn affects the shear yield stress of the slurry during mixing and pipeline transportation. Therefore, the relationship between compressive yield stress and shear yield stress has become a key issue in the field of paste filling technology. Under the guidance of pressure filtration theory, relevant experiments were carried out, and the characterization methods of bed dehydration resistance and slurry transportation performance in the full concentration range were put forward to characterize the thickening performance of full-tail mortar. The thickening performance of the whole tailings under high pressure is tested, and the compression yield stress of the whole tailings mortar under high pressure is obtained. Using controlled shear rate method (CSR) to operate paddle rheometer to detect shear yield stress; Then the relationship between them is obtained as follows: the yield stress of slurry is shear stress, and the compression yield stress is compression stress; Compressive yield stress and shear yield stress of slurry are exponentially related to concentration index. And the compression yield stress is far greater than the shear yield stress, so the shear action is more likely to destroy flocs, which is the main external force of dehydration, thus explaining the mechanical mechanism of stirring dehydration.

Keywords: full tailings; floc structure; compression yield stress; shear yield stress; paste filling

在中国国民经济构成中,金属矿产资源为各行各业提供基础生产材料,占有及其重要的地位。矿床开采将地下资源转移到地表,不仅产生了大量的固体废物,而且由此产生的井下采空区和地表尾矿库也成为了金属矿山的两个重大危险源^[1]。

膏体填充法是将沉积在地表的固体废物变成膏体,回填到井下用来治理采空区塌陷问题,不仅提高了地下采矿作业的安全性,而且充分利用了地表废物,实现了“一废治两害”的目标。目前膏体流变学的研究是矿业浆体流变学的热点和难点。膏体技术包括脱水、搅拌、输送、堆存 4 个阶段,均涉及到非牛顿流体流变特性。在脱水阶段,全尾砂浆的压缩屈服应力和剪切屈服应力共同影响脱水效果^[2]。全尾砂重力浓密脱水工艺中,床层压缩过程是指沉降至容器底部的絮团进一步密实排水的过程^[3]。

目前已有的研究进展表明:全尾砂浆重力浓密性能由沉降絮凝和床层压缩两个方面组成^[4]。絮凝沉降指的是由于固液密度差,固体颗粒在重力作用下向下沉降,从而在容器上部澄清层。絮凝沉降速度影响最大的是固液分离的效率^[5]。床层压缩过程是指沉降至容器底部的絮团进一步密实排水的过程^[6]。絮团沉降至容器底部时,在自然状态下进行堆积,堆积面积逐步升高形成床层。由于絮团堆积的不均匀性,造成床层孔隙率大,随着床层高度的升高,在重力作用下,床层下部絮团所受的重力作用大于床层上部絮团,因此,床层内部浓度是不均衡的,其浓度梯度导致床层上下部的渗透性不同,床层的渗透性又影响了浓度的进一步分布。在膏体输送过程中,其关键问题是阻力特性,以往的研究大多注重与从固液两相流的角度出发,考虑颗粒的沉降速度及对流扩散等因素^[7]。然而对于膏体来说,由于浆料中存在细颗粒的絮凝作用,因此在其内部有着一定强度的絮网结构,进而导致浆料流动特性的单一性变化,即由两相流呈现为结构流体^[8]。研究颗粒的物理与化学特性与其流变特性之间的内在关系,进而研究颗粒在管道中的输送方式,将为进一步研究管道阻力提供基础^[9]。压缩屈服应力的改变表征了浆体浓度的变化^[10],而在剪切屈服应力的研究过程中浆体的浓度是不发生变化的。目前的研究往往忽略了该特性,也是压缩屈服应力与剪切屈服应力最大的不同。压缩流变特性决定了能够达到的最大脱水浓度,剪切流变特性是影响耙架旋转和膏体底流排放的重要因素^[11]。同时浓度与流动性能相互影响,对立统一。但是目前关于压缩流变特性和剪切流变特性关系的研究几乎没有。

笔者从压缩屈服应力和剪切屈服应力两个方面出发,对床层压缩主要的力学过程进行了力学分析和数

学建模。并结合其物理意义,发展了全尾砂可浓密性能表征方法,利用压缩屈服应力和剪切屈服应力2个关键参数来表征全尾砂浆的浆体输送性能和床层脱水阻力,以便对沉降和压缩的统一表征。最终得出了结论:絮团网状结构的压缩屈服应力要远大于其剪切屈服应力,因此剪切作用能够更容易的破坏絮团结构,是脱水的主要外力部动力,从而解释了搅拌脱水的力学机理。

1 全尾砂浆的微观结构特性

在全尾砂可浓密性能表征研究中,絮团特征参数中最重要的是絮团结构的尺寸大小,絮团尺寸大小的变化伴随着絮团结构的变化。因此絮团尺寸影响沉降速度、絮团形状结构的强度影响底流浓度,全尾砂絮团的微观结构和力学行为是影响浓密效果的根本原因。

如图1所示,高浓度床层的微观结构是含有大量水的多孔网状结构,这种网状结构的存在影响了脱水速度和脱水浓度^[12]:

1)为了提高浓度,需要扰动网状结构,以便排除水分^[13];所以网状结构的强度是决定脱水浓度的关键参数;

2)颗粒间距的减小,脱水速度下降,因此浓度开始上升,该浓度下的达西渗透阻力增加^[14];因此,网状结构的渗透能力是影响脱水速度的关键参数。

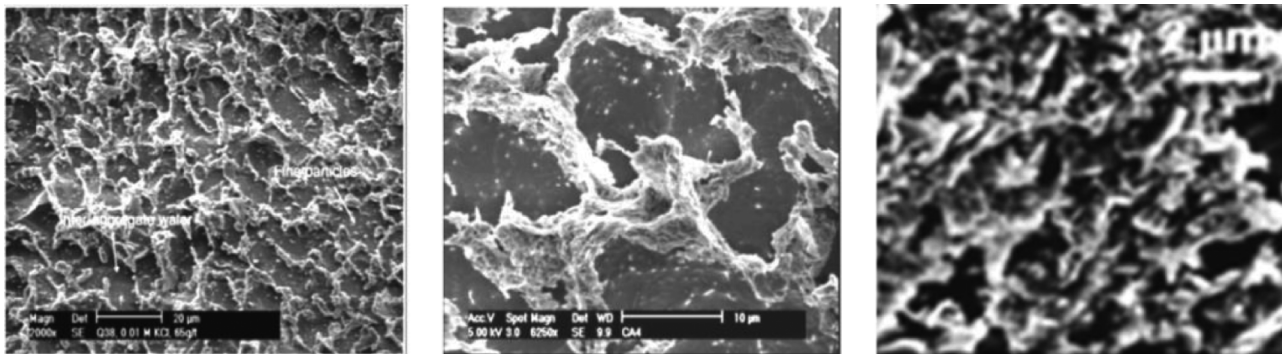


图1 未剪切絮团网状结构

Fig. 1 Mesh structure of unsheared flocs

1.1 压缩屈服应力

在絮凝剂的作用下,稳定的悬浮液中颗粒会与其他颗粒连结在一起,形成一个颗粒-絮团聚合体结构^[15]。当浓度达到一定高度时,就会形成一个渗透到整个悬浮液中的颗粒网状结构。此时,该网状结构具有固体的结构和性质。作用在颗粒上的压缩应力便可在整个网状结构的内部传递。在网状结构中引入固体压力的概念,且认为当足够小的情况下,网状结构将保持固体状态且能够抵抗外部压力,当外部压力上升至顶点,随后继续增加,便会破坏颗粒之间的连接,使颗粒重新排列,产生塑性变形,进而使其浓度升高。

因此,认为网状结构的压缩屈服应力随固体浓度的增加而增加,这是由于单位体积内颗粒数量越多,接触就会越多,从而造成网状结构强度越大。压缩屈服应力表征浆体的脱水阻力,即在一定压力或剪切力作用下,浆体可能达到的最大浓度。

1.2 凝胶浓度

底层物料的浓度随着压缩的进行而逐渐上升,当浓度达到顶点时,床层的内部絮状物连结在一起,形成一个网状结构,该结构可以抵抗外部的剪切作用并且强度较高,这个顶点就称之为凝胶浓度。

检测凝胶浓度就是对物料底部何时形成网状结构的研究,底部的颗粒将受上部物料重力产生的压应力。网状结构的强度随浓度的增高而增大,当网状结构强度与上部物料产生的压缩应力相等时,沉降停止。在沉降床层内部,固体浓度会随着深度的增加而增加。床层中的最大压缩应力也会随着初始浓度和高度的改变而改变,此时床层平均浓度也会发生改变。

1.3 剪切屈服应力

理论和实验研究表明,可以用宾汉姆模型或者 H-B 模型来表征全尾砂膏体的流变特性。认为膏体的应力—应变曲线为一条在切应力轴上有一截距 τ_0 的直线或曲线,剪切应力只有超过这一应力时才开始流动,膏体产生流动时的临界应力称为剪切屈服应力。全尾砂膏体在发生流动时,剪切应力—剪切速率之间的关系满足线性要求,便可采用宾汉姆模型来研究;但是当施加的外界剪切速率值较大时,呈现出类似于幂律流体等纯粘性非牛顿流体的行为,采用线性关系描述发生剪切流动阶段的膏体将不再合适。此时可使用三参数的 H-B 模型来描述,认为此类具有屈服应力的非牛顿流体其在超过屈服点之后,可以使用幂律流体的模型近似。当流动指数 $n < 1$ 时,膏体具有剪切变稀特性;当流动指数 $n > 1$ 时,膏体具有剪切增稠特性;当流动指数 $n = 1$ 时,曲线呈直线的形式,其斜率为膏体的塑性粘度系数,宾汉姆体模型为 H-B 模型的一种特征形式^[16],流变方程为

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}, \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; η 为塑性黏度,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} 。

2 高压下全尾砂压缩流变特性

2.1 多段压滤的理论基础和数学模型

采用理论分析的方法,利用压缩屈服应力参数开展高压下尾砂浓密性能的研究。多压力过滤过程有以下几个阶段:初始滤饼形成、滤饼压缩、滤饼生长。

2.1.1 滤饼开始形成

在初始压力 P_1 、初始浓度 φ_0 时,自上而下的形成一个平均浓度为 φ_1 的滤饼。在该压力下,滤液不断从底部滤布流出,滤饼厚度不断增加,平均浓度仍为 φ_1 。此浓度和压力下,滤饼比阻为 A_1 ,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P_1}{\eta A_1 B}, \quad (2)$$

式中: P_1 为初始过滤压力,Pa; η 为液体粘度,Pa·s; B 为滤饼厚度,m; A_1 为压力 P_1 时的滤饼比阻, m^{-2} ; t 为过滤时间,s。

时间从 t_0 至 t_1 ,滤液比容从 V_0 至 V 。得到

$$t - t_0 = \frac{\eta A_1}{2P_1} \frac{\varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} V^2, \quad (3)$$

式中: t 为过滤时间,s; t_0 为初始过滤时间,s。

假设: $(t_0, V_0) = (0, 0)$ 表示过滤初始状态

$$t = \frac{\eta A_1}{2P_1} \frac{\varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} V^2, \quad (4)$$

$$\frac{d(t/V)}{dV} = \frac{dt}{dV^2} = \frac{\eta A_1}{2P_1} \frac{\varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0}, \quad (5)$$

床层形成阶段,床层浓度与过滤时间的关系是线性的,而到了床层压缩阶段,床层浓度与过滤时间的关系是非线性的。无论是线性阶段还是非线性阶段,该曲线斜率代表了床层形成速度和床层压缩速度,斜率越小,速度越快。

2.1.2 滤饼压缩

在滤饼形成过程中

$$\frac{d(t/V)}{dV} = \frac{\eta A_2}{2P_2} \frac{\varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1} \left(1 - \frac{V_1^2}{V^2}\right) - \frac{t_1}{V^2}, \quad (6)$$

$$\frac{dt}{dV^2} = \frac{\eta A_2}{2P_2} \frac{\varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1} \left(1 - \frac{V_1^2}{V^2}\right), \quad (7)$$

式中: V_1 为时间 t_1 时的滤液比容; P_2 为第二过滤压力; A_2 为时间 $t_1 + t_2$ 时的滤饼比阻; φ_2 为压力 P_2 时对应的滤饼浓度。

2.1.3 滤饼生长

在滤饼生长过程中

$$\frac{d(t/V)}{dV} = \frac{\eta A_1}{2P_1} \frac{\varphi_0}{\varphi_2 - \varphi_0} \left(1 + \frac{\varphi_1(\varphi_2 - \varphi_0)V_1^2}{\varphi_2(\varphi_1 - \varphi_0)V^2} \right) - \frac{t_1^2}{V^2}, \quad (8)$$

$$\frac{dt}{dV^2} = \frac{\eta A_2}{2P_2} \frac{\varphi_0}{\varphi_2 - \varphi_0}, \quad (9)$$

式中: A_2 为压力 P_2 时的滤饼比阻;

在滤饼生长和过滤初始状态时,滤液流出速度梯度 $\frac{dt}{dV^2}$ 具有相同的数学方程;因此,滤饼生长过程中的 $\frac{dt}{dV^2}$ 梯度可以用于计算多段压滤过程中的渗透性能。

2.2 参数计算方法

压缩屈服应力计算:

在理论分析的基础上,基于初始固体浓度和可浓密性能测试结果,可确定每个压力对应的极限平衡体积浓度计算方法

$$\varphi_\infty = \frac{\varphi_0 h_0}{h_\infty}, \quad (10)$$

式中, h_0 为初始高度; h_∞ 为各压力作用下的最终滤饼高度。

对于测试的各压力阶段,最终固体浓度浆体的压缩屈服应力等于施加的外部压力。因此,可浓密性能实验中,每个压力值产生一组数据点: $(\varphi, P_y(\varphi))$ 。

2.3 实验方案

在压滤理论指导下,开展相关实验,对全尾砂高压作用下的浓密性能进行测试。利用压滤实验柱,开展多段压力过滤实验,检测不同压力作用下,滤液流出速度和各压力作用下滤饼浓度。过滤压力分别为 10 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa、50 kPa、70 kPa、100 kPa,絮凝剂单耗为 $0 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $10 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $20 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $30 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,如图 2 所示。

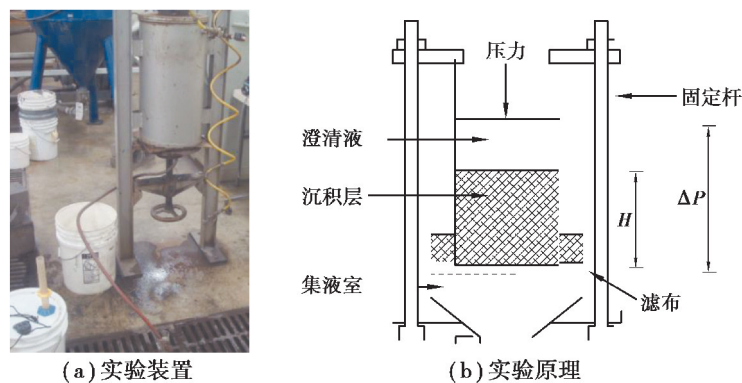


图 2 压滤实验柱

Fig. 2 Experimental column for filtration

2.4 全尾砂压缩屈服应力

基于前述分析,得到高压下全尾砂浆体的压缩屈服应力,如图 3 所示。

当砂浆浓度低于 0.3(53.7wt%)时,其网状结构所具有的压缩屈服应力为 0~21 kPa。当体积浓度增加至 0.38~0.54(62.3~76wt%)之间时,所对应的压缩屈服应力呈数量级增加,达到 15~100 kPa。意味着如果需要达到较高的浓度,则必须提供较大的压缩应力,以破坏底流中强度较大的网状结构^[17]。

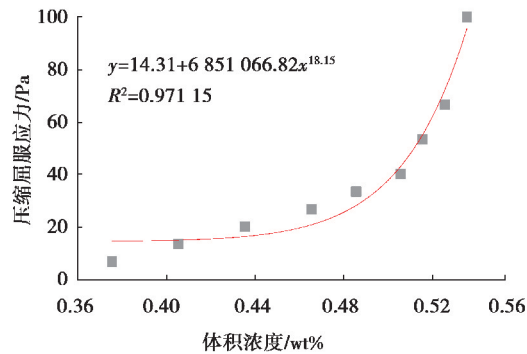


图 3 高压下压缩屈服应力变化曲线

Fig. 3 Compressive yield stress variation curve at high pressure

3 剪切屈服应力测试

压缩和拉伸是剪切排水的两种基本模式,而产生排水的外力在于耙架提供的压缩应力和剪切应力^[18]。利用压缩屈服应力表征网状结构的抗压强度,利用剪切屈服应力表征网状结构的抗剪强度。压缩屈服应力随浓度的增加呈指数形式上升。

3.1 桨式流变仪检测原理

检测方法如图 4 所示。屈服发生在由桨叶转子旋转产生的圆柱形表面附近,避免了壁滑效应,使浆体本身屈服^[19]。

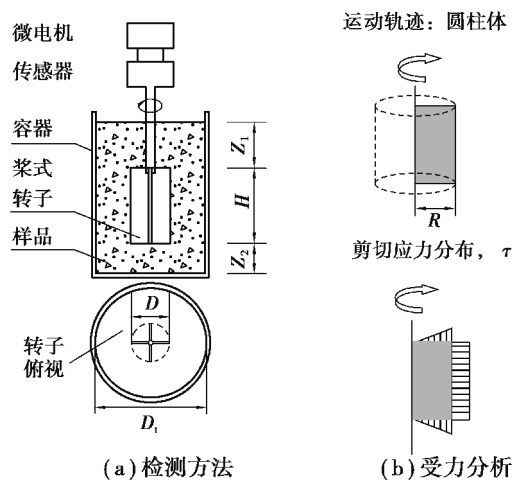


图 4 桨式转子检测方法与受力分析

Fig. 4 Paddle rotor inspection method and force analysis

桨叶克服了浆体的屈服应力开始旋转,随着桨叶的旋转,在浆体周围一定范围内发生剪切作用,在旋转时扭矩与应力的关系如公式(11)所示。

$$T = \left(\frac{1}{2} \pi D^2 H + \frac{1}{6} \pi D^3 \right) \tau_y, \quad (11)$$

式中, T 为桨叶所受扭矩; τ_y 为浆体的屈服应力; D 为剪切圆柱体直径; H 为剪切圆柱体高度。

3.2 Controlled Shear Rate 法 (CSR)

将桨叶完全侵入至浆体中,以相同的速度旋转,将检测出来的扭矩作为时间函数。图 5 为剪切应力-时间曲线。从图中可以看出, C-D 区间包含了扭矩最大值,一旦屈服面的形状参数和剪切应力分布明确,就可以计算出屈服应力。

从图 5 可以看出有着 2 个屈服应力,分别发生在粘弹性终止阶段和应力-时间曲线的峰值处,分别成为静态屈服应力($\tau_{y(s)}$)和动态屈服应力($\tau_{y(d)}$)。

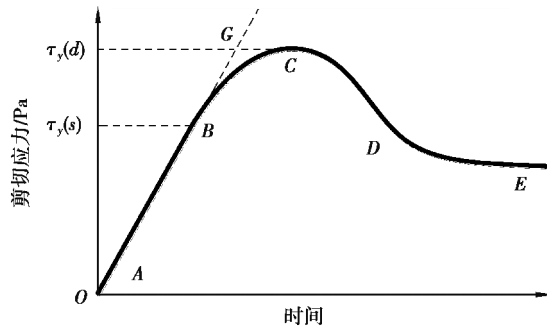


图 5 应力-时间曲线

Fig. 5 Stress-time curve

3.3 实验方法

本试验采用流变仪进行检测,选用转子尺寸为 $H=4\text{ cm}, D=2\text{ cm}$ 。选用 500 ml 的烧杯作为实验容器, $D_t=8.5\text{ cm}, Z_1=5.5\text{ cm}, Z_2=2\text{ cm}$ 。实验采用会泽铅锌矿尾砂,平均粒径 $98\text{ }\mu\text{m}$,粒度较细。物料浓度分别为 0.539(76 wt%), 0.568(78 wt%), 0.597(80 wt%), 0.628(82 wt%)。

3.4 实验结果

将转子插入到位后,分别以 $0.05\text{ s}^{-1}, 0.5\text{ s}^{-1}, 1\text{ s}^{-1}$ 的剪切速率检测料浆的流变参数,得到的剪切应力-时间曲线如图 6 所示。由图可知,剪切速率越高,得到的曲线波动越大。

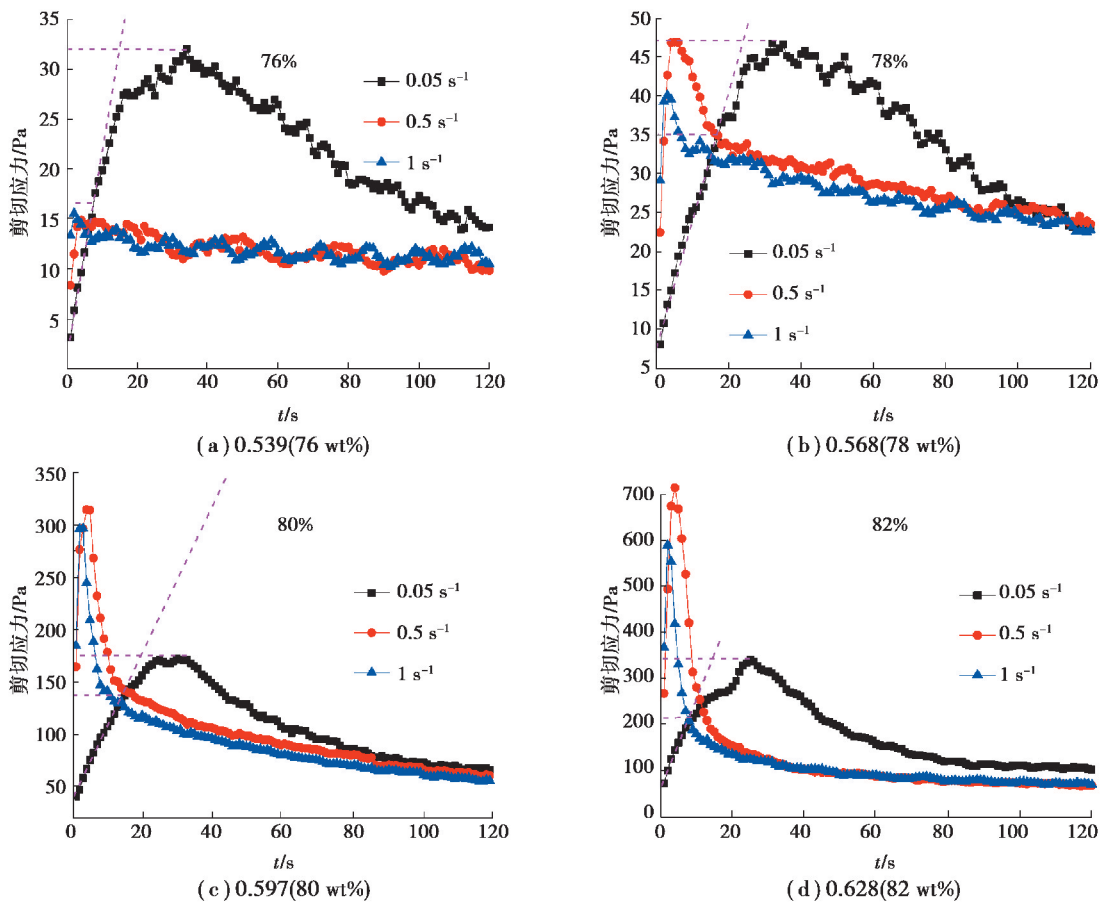


图 6 不同剪切速率时剪切应力-时间曲线

Fig. 6 Shear stress-time curves at different shear rates

当采用较高的剪切速率检测时,高浓度料浆和低浓度料浆的流变曲线表现出不同的形式。如图 6(a),图 6(b)所示, 0.5 s^{-1} 和 1 s^{-1} 的峰值应力远高于 0.05 s^{-1} 的结果。从图 6(c),图 6(d)可以看出 0.5 s^{-1} 和 1 s^{-1} 的峰值应力低于 0.05 s^{-1} 的结果,说明剪切速率越大,峰值越小。

4 压缩屈服应力和剪切屈服应力的关系

将前述实验结果进行综合对比,绘制相同浓度下浆体剪切屈服应力和压缩屈服应力关系曲线,如图 7 所示。

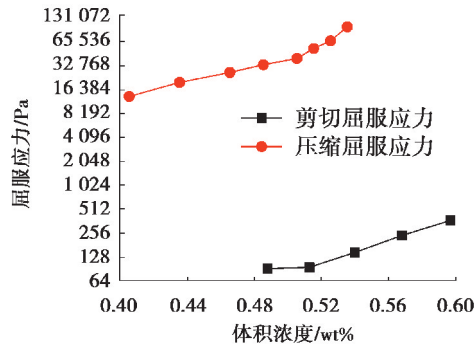


图 7 浆体屈服应力和压缩屈服应力关系

Fig. 7 Relationship between slurry yield stress and compressive yield stress

由图可知,浆体屈服应力为剪切应力,压缩屈服应力为压缩应力;浆体的压缩屈服应力、剪切屈服应力与浓度均呈指数关系。压缩屈服应力远大于剪切屈服应力。

因此,在相同条件下,剪切作用更易破坏絮团,是脱水的主要外部动力。在无耙的情况下,在浓密机内部仅有侧壁高度产生的重力压应变,而无侧向剪切应力,因此需要大大提高浓密机高度,形成深锥,以提供足够的压力破坏絮团。在任何耙架转速下,压缩屈服应力都随底流浓度的增大而增大。在实际工程中,浓密机的设计的核心内容在于两个关键参数:设备直径和搅拌扭矩。浓密机直径选择过小会造成处理能力、底流浓度不达标;过大则会造成投资浪费。深锥浓密机的优势在于由于床层高度大、导水杆数量多,从而易于获得高浓度的底流,但会带来不利表现就是搅拌耙架扭矩过大。为此,在工程实践中可通过设置耙架或增加浓密机高度的方法来提高底流浓度。

产生上述现象的原因是颗粒群——液体散结构的物理力学特点决定的。根据吴爱祥等人的研究,散体结构的抗压强度大于其抗剪强度。其中,抗剪强度受多因素支配,包括:颗粒间的摩擦、剪胀等,如图 8 所示。

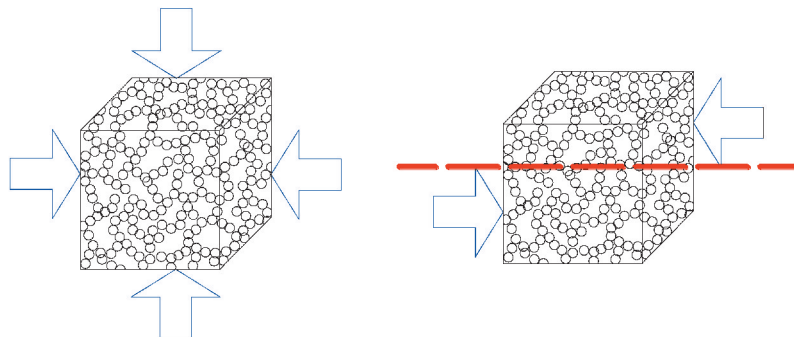


图 8 絮团网状结构受力分析

Fig. 8 Force analysis of the floc mesh structure

通过观察可知,浆体的压缩屈服应力、剪切屈服应力均随浓度的增加呈指数上升,为

$$P_y(\varphi) = b_2 \left(\frac{\tau_y(\varphi) - a_1}{b_1} \right) \frac{c_2}{c_1} + a_2, \quad (12)$$

式中: $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ 为回归系数。

当 $c_1 = c_2$ 时,压缩屈服应力和剪切屈服应力呈线性相关的关系。

5 结 论

在数学、力学分析的基础上,建立了床层压缩的相关数学模型,提出沉降——压缩综合实验方法,并开展相关室内实验,获得相关参数及其变化规律,研究全尾砂浆的可浓密性能:

1) 压缩屈服应力表征床层脱水阻力,剪切屈服应力表征浆体输送性能;

2) 压缩屈服应力随着浓度的上升呈指数形式上升。当砂浆浓度低于 0.3(53.7 wt%) 时,其网状结构所具有的压缩屈服应力为 0~21 Pa。当体积浓度增加至 0.38~0.54(62.3~76 wt%) 之间时,所对应的压缩屈服应力呈数量级增加,达到 15~100 kPa。

3) 浓度 0.4(64.3 wt%) 为全尾砂重力浓密的阻力拐点,如果要达到较高的浓度,则必须提供较大的压缩应力,以破坏底流中强大的网状结构。

絮团网状结构的压缩屈服应力远大于剪切屈服应力,因此剪切作用更易破坏絮团,是脱水的主要外部动力,从而解释了搅拌脱水的力学机理。若无耙,则需要大大提高浓密机高度,形成深锥以提供足够的压力破坏絮团。

参考文献:

- [1] 王丽,李宗泽,陈结,等.废弃煤矿采空区抽水蓄能水库初步可行性研究[J].重庆大学学报,2020,43(04):47-54.
Wang L, Li Z Z, Chen J, et al. Preliminary feasibility study for pumped storage reservoirs in abandoned coal mining areas [J]. Journal of Chongqing University, 2020,43(4):47-54.(in Chinese)
- [2] Qi C C, Andy F. Cemented paste backfill for mineral tailings management: review and future perspectives[J]. Minerals Engineering,2019,144(5):
- [3] 李公成,王洪江,焦华喆,等.稳态浓密机全尾砂脱水规律物理模拟[J].中国有色金属学报,2019,29(3):649-658.
Li G C, Wang H J, Jiao H Z, et al. Physical simulation of the full tailing sand dewatering law in a steady-state thickener[J]. Chinese Journal of Non-Ferrous Metals, 2019,29(3):649-658.(in Chinese)
- [4] 樊攀峰,戴相宇,王果,等.全尾砂固结脱水关键技术探讨[J].有色金属(矿山部分),2015,67(3):57-61.
Fan P F, Dai X Y, Wang G, et al. Exploring key technologies for consolidation and dewatering of full tailings[J]. Non-ferrous Metals (Mining Segment), 2015, 67(3): 57-61.(in Chinese)
- [5] 祝丽萍,倪文,张旭芳,等.赤泥—矿渣—水泥基全尾砂胶结填充料的性能与微观结构[J].北京科技大学学报,2010,07(7):838-842.
Zhu L P, Ni W, Zhang X F, et al. Properties and microstructure of red mud-slag-cement-based all-tailed sand cementitious fillers[J]. Journal of the University of Science and Technology Beijing, 2010, 7 (7): 838-842.(in Chinese)
- [6] 周华强,全永红,郑保才,等.膏体充填原材料水分与配比计量误差分析[J].采矿与安全工程学报,2007,3(3):270-273.
Zhou H Q, Quan Y H, Zheng B C, et al. Analysis of moisture and proportioning measurement errors in paste filling raw materials[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 3(3): 270-273.(in Chinese)
- [7] 费祥俊.浆体管道的不淤流速研究[J].煤炭学报,1997,22(5):532-536.
Fei X J. Study of non-silting flow rates in slurry pipes[J]. Journal of Coal, 1997, 22(5): 532-536.(in Chinese)
- [8] 吴爱祥,刘晓辉,王洪江,等.结构流充填料浆管道输送阻力特性[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(12):4325-4330.
Wu A X, Liu X H, Wang H J, et al. Structural flow-filled slurry pipeline transport resistance characteristics[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2014, 45(12): 4325-4330.(in Chinese)
- [9] 焦华喆,王树飞,陈新明,等.全尾砂压实区孔隙结构几何特征及剪切演化规律[J].有色金属工程,2019,9(10):95-101.
Jiao H Z, Wang S F, Chen X M, et al. Geometrical characteristics of the pore structure and shear evolution of the full tailing sand compacted zone[J]. Non-ferrous Metal Engineering, 2019,9(10):95-101.(in Chinese)

- [10] 王洪江,周旭,吴爱祥,等.膏体浓密机扭矩计算模型及其影响因素[J].工程科学学报,2018,40(6):673-678.
Wang H J, Zhou X, Wu A X, et al. Model for calculating the torque of a paste thickener and its influencing factors[J]. Journal of Engineering Science, 2018,40(6):673-678.(in Chinese)
- [11] Nehdi M, Rahman. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34: 1993-2007.
- [12] Marjorie J Vold. Computer simulation of floc formation in a colloidal suspension [J]. Journal of Colloid Science, 1963, 18(7): 684-695.
- [13] 焦华喆,王树飞,吴爱祥,等.剪切浓密床层孔隙网络模型与导水通道演化[J].工程科学学报,2019,41(8):987-996.
Jiao H Z, Wang S F, Wu A X, et al. Pore network modelling and hydraulic channel evolution in sheared dense beds[J]. Journal of Engineering Science, 2019,41(8):987-996.(in Chinese)
- [14] Wallevik J. E. Relationship between the Bingham Parameters and slump[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 1214-1221.
- [15] 吴爱祥,孙业志,刘湘平,等.散体动力学理论及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2002:57-59.
Wu A X, Sun Y Z, Liu X P, et al. Dispersion dynamics theory and its applications[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 57-59.(in Chinese)
- [16] Rudman M, Paterson D A, Simic K. Efficiency of raking in gravity thickeners [J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 95: 30-39.
- [17] Alderman N J, Meeten G H. Vane rheometry of bentonite gels[J]. Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1991, 39:291-299.
- [18] 焦华喆,王树飞,吴爱祥,等.膏体浓密床层孔隙结构剪切演化与连通机理[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(5):1173-1180.
Jiao H Z, Wang S F, Wu A X, et al. Shear evolution and connectivity mechanism of the pore structure of a dense bed of paste[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2019,50(5):1173-1180.(in Chinese)
- [19] 王新民,张国庆,赵建文,等.深锥浓密机底流浓度预测与外部结构参数优化[J].重庆大学学报,2015,38(6):1-7.
Wang X M, Zhang G Q, Zhao J W, et al. Deep cone thickener bottom flow concentration prediction and optimization of external structure parameters[J]. Journal of Chongqing University, 2015,38(6):1-7.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)