

基于恒定剪切速率的分级细尾砂浆流变模型研究与应用*

王贤情¹, 王文¹, 盛佳^{1,2,3}, 卢振兴¹, 唐晓宇¹

(1.湖南科技大学 资源与环境安全工程学院, 湖南 湘潭市 411201;

2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;

3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:尾砂浆的流变特性是充填设计的重要参数,结合山东某金矿充填的具体工况,采用恒定剪切速率加载试验、料浆结构动力学理论对分级细尾砂浆流变特性进行研究,建立了恒定剪切速率作用下分级细尾砂浆的流变模型,并运用线性规划理论获得了恒定剪切速率为 2 s^{-1} 、 20 s^{-1} 、 80 s^{-1} 和 180 s^{-1} ,质量浓度为74%时的流变模型具体表达式。研究结果表明:分级细尾砂浆在恒定剪切速率加载过程中,所受剪切应力随时间的增长而逐渐减小并最终趋于稳定;分级细尾砂浆的流变模型为指数型函数,理论模型曲线与试验结果的决定系数 R^2 分别为0.9897, 0.9785, 0.9612和0.9583,模型曲线与试验结果拟合度较高;应用该模型对质量浓度为72%,灰砂比为1:4的尾砂浆流变行为进行验证,模型所得理论计算值与实测值之间的误差小于3%,研究结果可为同类型矿山充填设计提供参考。

关键词:充填采矿;分级细尾砂浆;恒定剪切速率;流变模型

中图分类号:TD926.4;TD853.34

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)06-0042-07

0 引言

近年来,充填采矿法作为绿色矿山的主要开采方式被广泛应用于各新建矿山^[1-3],其不仅能从根源上解决尾矿堆积与采空区带来的各种地质灾害^[4-5],还能将尾砂由固体废弃物转化为生产资源^[6-8]。充填料浆的流变特性作为影响料浆制备及输送的主要因素之一,是充填系统设计的重要参数^[9-10]。因此,国内外大量学者对充填采矿法进行了广泛的研究。张钦礼等^[11]利用主成分分析法确定了全尾砂膏体流变参数的主要影响因素,并采用改进的BP神经网络模型建立了流变参数优化预测模型。刘晓辉、

吴爱祥等^[12-13]以某铜矿全尾砂膏体为研究对象,基于结构动力学理论,提出了一种膏体流变测试的新方法。甘德清等^[14]以全尾砂浆应力增量为基础,对其触变性进行了定量分析,并建立了剪切力增量的回归函数。陈鑫政等^[15]以多个矿山的试验数据为基础,建立了以全尾砂膏体扩散度为自变量的屈服应力经验计算公式。张鲸波等^[16]以某铅锌矿全尾砂膏体为研究对象,探讨了膏体质量浓度、灰砂比及水化时间对其流变特性的影响规律,结果表明,膏体质量浓度对流变特性影响最为明显,灰砂比次之。刘志双等^[17]对尾砂级配、质量浓度和温度耦合作用下料浆的流变特性变化规律进行了研究,结果表明,温度与质量浓度对屈服应力的耦合作用最为显著,料浆温度越低,质量浓度越大,屈服应力增加越大。

上述学者主要针对全尾砂浆的流变特性变化规律及其影响因素等进行了研究,但随着选矿技术的进步,及矿山对实现无尾排放的需求,以细粒级尾砂作为骨料进行充填将成为充填采矿发展的新趋势。本文以200目作为分级界限,对山东某金矿全尾砂进行分级,开展恒定剪切速率作用下不同质量浓度的一200目尾砂浆流变特性研究,揭示其流变演化规律并建立在恒定剪切速率作用下尾砂浆的流变模型。以期为细粒级尾砂浆的输送及同类型矿山充填站的建设提供理论与试验参考。

1 试验材料与方法

山东某金矿将建成开采规模12 000 t/d,年产量

* 收稿日期:2023-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51774132);湖南省自然科学基金项目(2021JJ30265)。

作者简介:王贤情(1992—),男,湖南邵阳人,博士研究生,主要从事岩石力学与充填采矿等方面的研究工作,E-mail:499245341@qq.com。

通信作者:王文(1968—),男,湖南衡阳人,教授,主要从事岩石力学、边坡及地下工程施工监控和动态施工力学等方面的研究,E-mail:wanwen68@163.com。

10 t 左右的超大型地下金矿,其产生空区体积约 4300 m³/d,日均尾砂产量约 11 300 t,其中-200 目尾砂所占比例约为 50%。矿山采用充填采矿法进行开采,日均充填尾砂量约为 5100 余 t。若采用全尾砂进行充填,则尾砂利用率为 45.1%。为提高尾砂综合利用率,矿山采用-200 目尾砂作为充填骨料进行充填,充填系统建设方案为:选厂总尾经高频振动筛分级后,粗颗粒尾砂(高频振动筛筛上尾砂)经进一步加工后作为建筑材料外售,而细粒级尾砂(高频振动筛筛下尾砂)则进入料浆池用于充填,尾砂利用率由 45.1% 提高到了 90.3%。

1.1 试验材料

对全尾砂进行筛分,保留 200 目以下的分级尾砂作为充填骨料进行尾砂浓密试验及充填体配比试验研究。

采用 BT-9300ST 激光粒度分布仪对该金矿尾砂进行粒级组成分析,测试得到分级后尾砂级配曲线如图 1 所示。

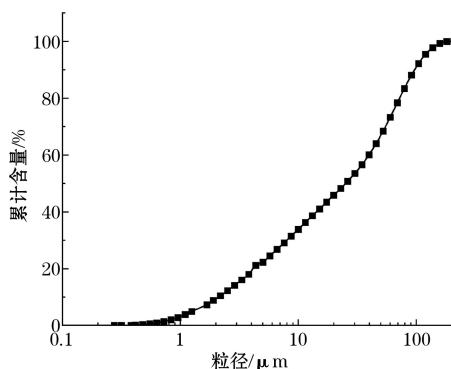


图 1 分级后的尾砂级配

Fig.1 Tailings grading of classification

1.2 加载方式

料浆的恒定剪切速率加载方式即在料浆加载过程中,试验仪器对测试料浆加载的剪切速率始终维持在一恒定值。在充填料浆自流输送过程中,由料浆重力势能提供的输送动力始终保持恒定,因而在输送管路相同的位置处,充填料浆所受到的剪切作用可认为基本维持不变。故而使用恒定剪切速率加载方式对试样进行流变测试,可用作模拟料浆自流输送过程中的运动状态。试验所获得的流变参数可为充填体自流输送系统设计提供参考数据。

1.3 试验仪器与试验方法

本次试验采用的流变仪可实现从低密度液体到

半固体的黏度测试,且用户可根据自身需求,选择控制剪切速率(CSR)和控制剪切应力(CSS)两种加载方式,同时可实现对物料的屈服应力、塑性黏度等流变参数的精确测量。由于桨式转子在插入测试物料过程中对试验样品扰动小,可有效避免测试物料产生滑移效应,因而本次试验采用桨式转子对料浆的流变特性进行测试。

将分级后的尾砂放入烧杯中配置成质量浓度为 68%、70%、72% 和 74% 的试验样品,配置好的试样固定在流变试验的操作台上,防止加载过程中试样随着转子一起旋转。

采用流变仪自带的 RheoWin 软件对试验过程中的剪切速率进行控制并记录试验过程中试样所受的剪切应力大小和黏度。

为获得不同剪切速率作用下料浆流变特性变化规律,对上述试样进行不同恒定剪切速率加载试验。试验过程中,施加在试样上的剪切速率分别设置为 2 s⁻¹、4 s⁻¹、6 s⁻¹、8 s⁻¹、10 s⁻¹、20 s⁻¹、40 s⁻¹、60 s⁻¹、80 s⁻¹、100 s⁻¹、120 s⁻¹、140 s⁻¹、160 s⁻¹、180 s⁻¹ 和 200 s⁻¹。每组剪切速率的加载时长统一设置为 600 s,每组剪切速率加载过程中保持外载恒定。每组试验加载完成后,需将流变仪上的转子取下进行清洗,防止上次试验中残留在转子上的骨料或水对下次试验的数据造成误差。清洗完成后的转子用纸巾擦干后方可进行再次试验。

2 试验结果与分析

2.1 不同加载速率及质量浓度对分级细尾砂浆流变特性的影响

不同质量浓度分级细尾砂浆(下文简称尾砂浆)在不同剪切速率作用下,其恒定剪切速率加载试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知,总体而言,在恒定剪切速率的作用下,料浆的剪切应力随着剪切速率作用时长的增加而减小。当料浆质量浓度为 68% 时,恒定剪切速率作用下,料浆所受剪切应力的变化比质量浓度为 70%、72% 与 74% 的料浆小。这是由于组成料浆中的尾砂颗粒间距随着料浆质量浓度的增加而减小,料浆中尾砂颗粒间距越小,则颗粒间形成结构的难易程度越低,且其形成的结构承载能力随颗粒间距的减小而增高^[18],因而结构完整的料浆与结构完全破坏后的料浆所能承受的剪切应力差异越大。

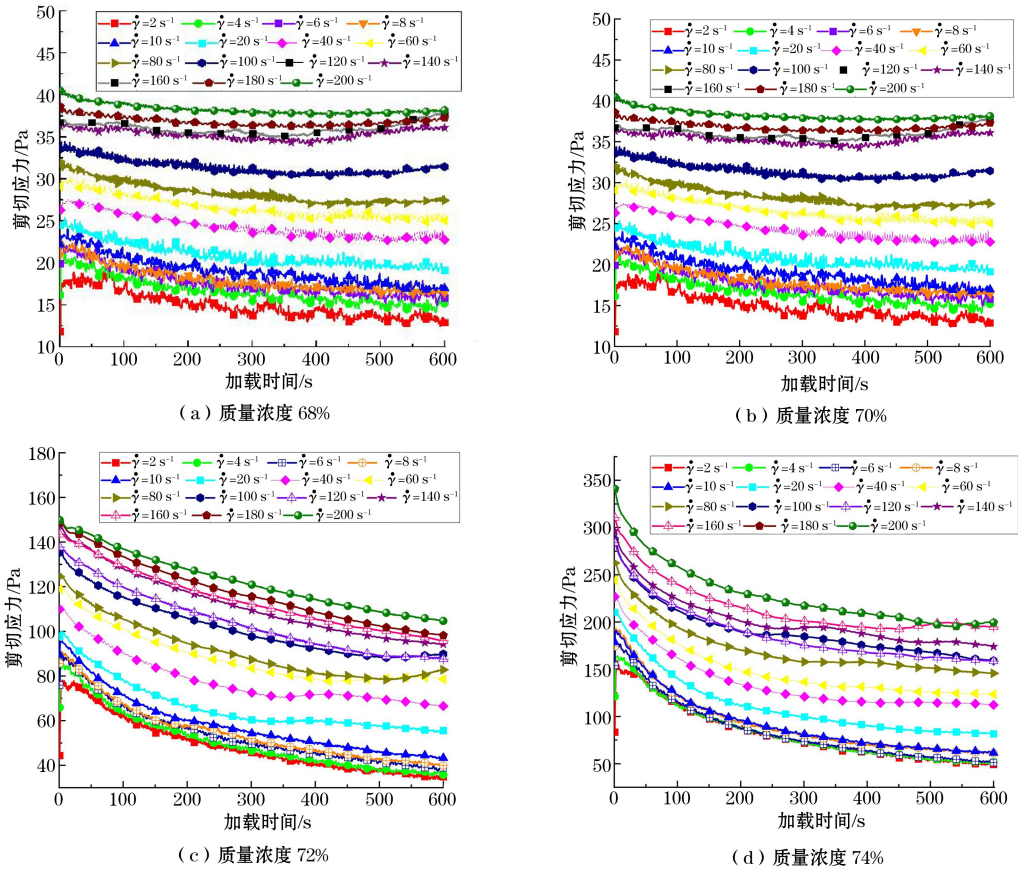


图2 不同质量浓度料浆剪切应力变化曲线

Fig.2 Shear stress curves of slurry with different mass concentrations

当作用在料浆上的剪切速率保持恒定时,料浆的内部结构随着剪切应力作用时间的增长而逐渐破坏。总体而言,当剪切速率的作用时长超过450 s时,料浆所受剪切应力值开始出现波动,这是因为此时料浆的内部结构处于破坏与修复的动态平衡状态。在矿山充填过程中,选矿厂流出的尾砂浆需经过稀释、浓密、搅拌等多道工序才会进入充填输送管路内,在进入输送管路前的这些工序中料浆在外界的扰动下,其内部结构已无限接近平衡态。故而可将料浆平衡状态下的流变参数作为管阻计算的基本参数。

2.2 尾砂浆流变模型分析

尾砂浆浆可视为非牛顿流体,当非牛顿流体仅受剪切应力作用时,其本构关系可写为:

$$\tau = \eta(\lambda, \dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中, τ 为层流剪切流流动方向上的剪切应力,Pa; $\eta(\lambda, \dot{\gamma})$ 为流体的塑性黏度,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为流体的剪切速率, s^{-1} 。

细粒级尾砂浆在受到外部荷载扰动时,常伴随着料浆内部细颗粒尾砂间形成的絮网状结构的破坏

与修复过程。在本次试验中,料浆流变特性的改变,即为料浆内部絮网状结构的破坏与修复的宏观表现。为对料浆流变模型进行描述,引入与料浆内部絮网状结构修复与破坏相关的参数结构变化参量 g 。参考 Moore 在研究高浓度悬浮液时,提出的高浓度悬浮液内部结构的破坏与修复机制,流体内部结构变化参量 g 可用如下形式表示。

当流体内部结构处于破坏状态时:

$$g(\lambda, \dot{\gamma}) = -b \cdot (\lambda - \lambda_{\min}) \quad (2)$$

当料浆内部结构处于修复状态时:

$$g(\lambda, \dot{\gamma}) = a \cdot (\lambda_{\max} - \lambda) \quad (3)$$

式中, λ_{\max} 为料浆内部结构系数可达的最大值,本文中取1; λ_{\min} 为料浆内部结构系数可达的最小值(内部结构修复与破坏平衡状态),本文中取0; a 为料浆内部结构的修复系数,其大小与料浆内颗粒性质和浓度及料浆剪切速率有关; b 为料浆内部结构的破坏系数,其大小主要取决于流体内部颗粒性质和浓度及流体剪切速率。

本文主要研究料浆内部结构以破坏为主的流变

模型,将 $\lambda_{\min}=0$ 代入式(2)可得料浆内部结构处于破坏状态时的方程为:

$$g(\lambda, \dot{\gamma}) = -b \cdot \lambda \quad (4)$$

恒定剪切速率加载试验过程中,对尾砂浆施加的剪切速率始终保持常量,因而在恒定剪切速率加载试验中,尾砂浆为时变性非牛顿流体。为对时变性非牛顿流体的本构关系进行描述,引入与时间有关的结构变化速率方程:

$$\frac{d\lambda}{dt} = g(\lambda, \dot{\gamma}) \quad (5)$$

联立式(4)与式(5)可得结构系数为:

$$\lambda = C \cdot e^{-b \cdot t} \quad (6)$$

式中, C 为待定系数; t 为加载时间。

而当剪切应力作用时间为0时,结构系数 $\lambda=1$,将此条件代入式(6)可得:

$$\lambda = e^{-b \cdot t} \quad (7)$$

Moore等在研究高浓度悬浮液时,认为流体结构系数的变化与流体剪切应力的变化存在如下关系:

$$\frac{\tau - \tau_{\text{eq}}}{\tau_{t=0} - \tau_{\text{eq}}} = \frac{\lambda - 0}{1 - 0} \quad (8)$$

式中, τ_{eq} 为料浆内部结构达到破坏与修复动态平衡时所受的剪切应力,Pa; $\tau_{t=0}$ 为流体内部结构未受扰动时(流体内部结构完整时)所受的剪切应力,Pa。

因而有:

$$\tau = \tau_{\text{eq}} + (\tau_{t=0} - \tau_{\text{eq}}) \cdot \lambda \quad (9)$$

将式(7)代入式(9)可得:

$$\tau = \tau_{\text{eq}} + (\tau_{t=0} - \tau_{\text{eq}}) \cdot e^{-b \cdot t} \quad (10)$$

式(10)即为在恒定加载剪切速率下,尾砂浆的本构模型。

采用恒定剪切速率加载试验数据对该本构关系的正确性进行验证。以试验数据中质量浓度为74%,加载剪切速率分别为 2 s^{-1} 、 20 s^{-1} 、 80 s^{-1} 、 180 s^{-1} 为例,对式(10)中的参数进行计算。由于试验设备及试验数据记录仪自身缺陷的原因,尾砂浆在其内部结构受到扰动的初始时刻对应的力学响应无法准确获得。料浆内部结构达到破坏与修复的动态平衡时,由于动态平衡的特性,料浆在处于此状态下时的力学响应也存在一定的波动。因而,采用规划求解的方式确定式(10)中 $\tau_{t=0}$ 、 τ_{eq} 和 b 的值。其求解过程如下:

确定规划求解的目标函数,规划求解的目标函数可视为在求解 $\tau_{t=0}$ 、 τ_{eq} 和 b 的过程中的限制条件,在本次求解过程中,将目标函数设定为:

$$f(x) = \sum (\tau_i - \tau'_i)^2 \quad (11)$$

式中, τ_i 为试验过程中尾砂浆实测力学响应,Pa; τ'_i 为通过式(10)计算所得尾砂浆理论力学响应,Pa。

在确定完目标函数时,分别设定 $\tau_{t=0}$ 、 τ_{eq} 和 b 的初始值,采用Excel中的规划求解程序,求解使目标函数 $f(x)$ 取最小值时,参数 $\tau_{t=0}$ 、 τ_{eq} 和 b 所对应的值,该值即为式(10)中待定参数的取值。

表1中的值为用规划求解得到的式(10)中对应待定参数的值。由表1可知,恒定加载剪切速率为 2 s^{-1} 时,尾砂浆所受初始剪切应力 $\tau_{t=0}=155.439 \text{ Pa}$,达到平衡状态时所受剪切应力 $\tau_{\text{eq}}=42.938 \text{ Pa}$,破坏系数 $b=0.0045$;恒定加载剪切速率为 20 s^{-1} 时,尾砂浆所受初始剪切应力 $\tau_{t=0}=207.865 \text{ Pa}$,达到平衡状态时所受剪切应力 $\tau_{\text{eq}}=82.773 \text{ Pa}$,破坏系数 $b=0.0074$;恒定加载剪切速率为 80 s^{-1} 时,尾砂浆所受初始剪切应力 $\tau_{t=0}=254.347 \text{ Pa}$,达到平衡状态时所受剪切应力 $\tau_{\text{eq}}=149.899 \text{ Pa}$,破坏系数 $b=0.0082$;恒定加载剪切速率为 180 s^{-1} 时,尾砂浆所受初始剪切应力 $\tau_{t=0}=301.64 \text{ Pa}$,达到平衡状态时所受剪切应力 $\tau_{\text{eq}}=193.587 \text{ Pa}$,破坏系数 $b=0.0086$;这表明相同质量浓度的尾砂浆,其所受初始剪切应力 $\tau_{t=0}$ 、达到平衡状态时所受剪切应力 τ_{eq} 和破坏系数 b 与加载剪切速率成正相关关系。

表1 不同剪切速率作用下流变模型参数值

加载剪切速率/ s^{-1}	$\tau_{\text{eq}}/\text{Pa}$	$\tau_{t=0}/\text{Pa}$	b
2	42.938	155.439	0.0045
20	82.773	207.865	0.0074
80	149.899	254.347	0.0082
180	193.587	301.640	0.0086

表2为不同加载剪切速率下,质量浓度为74%的料浆的流变模型,将其流变模型曲线与对应的试验结果点进行差异对比,得到如图3所示的料浆流变模型曲线。以图3中的试验点为标准,对流变模型曲线进行拟合优度分析。

表2 不同剪切速率作用下的流变模型

加载剪切速率/ s^{-1}	恒定加载剪切速率本构模型
2	$y = (155.439 - 42.938)e^{(-0.0045x)} + 42.938$
20	$y = (207.865 - 82.773)e^{(-0.0074x)} + 82.773$
80	$y = (254.347 - 149.899)e^{(-0.0082x)} + 149.899$
180	$y = (301.640 - 193.587)e^{(-0.0086x)} + 193.587$

对不同恒定加载剪切速率的料浆流变模型曲线的决定系数 R^2 进行计算, 恒定剪切速率为 2 s^{-1} 时, R^2 为 0.9897, 恒定剪切速率为 20 s^{-1} 时, R^2 为 0.9785, 恒定剪切速率为 80 s^{-1} 时, R^2 为 0.9612, 恒定剪切速率为 180 s^{-1} 时, R^2 为 0.9583。可见, 不同恒定加载剪

切速率作用下, 料浆的流变模型曲线决定系数值都接近 1。这表明各模型曲线的拟合度较高, 本文中建立的尾砂浆流变模型符合恒定剪切速率加载过程中尾砂浆的剪切应力变化规律, 可用该模型作为恒定剪切速率加载过程中尾砂浆的本构关系式对其进行描述。

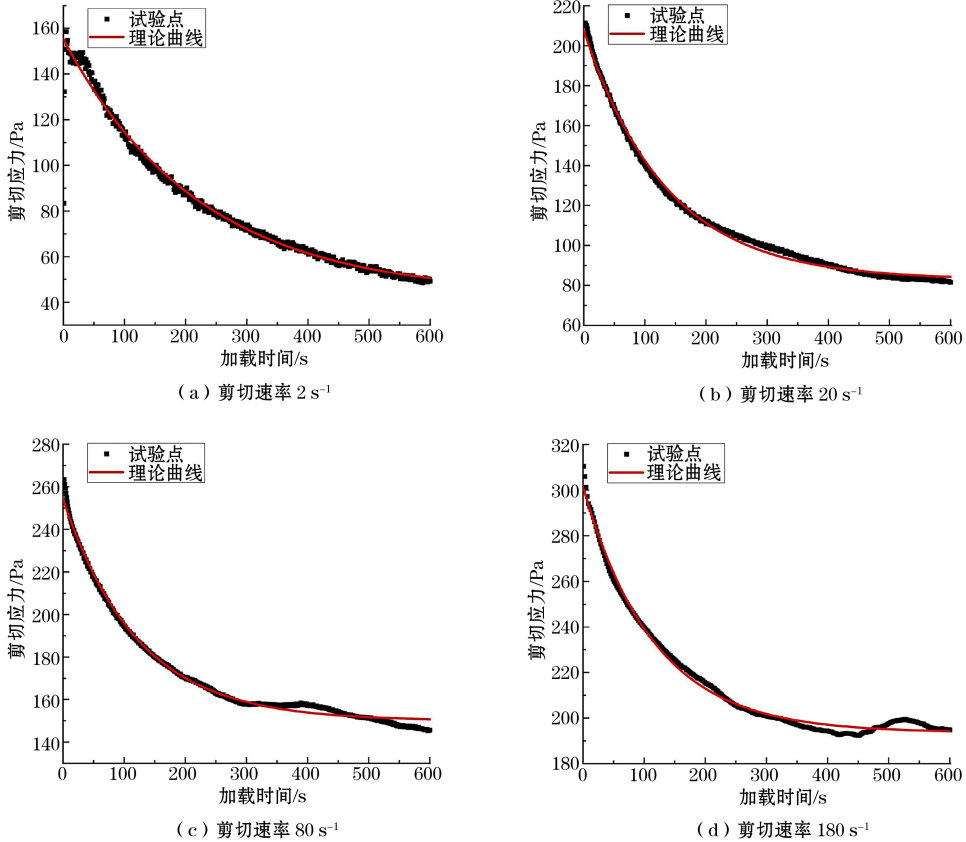


图 3 料浆流变模型曲线

Fig.3 Rheological model curves of slurry

3 工业实践应用

山东某金矿充填系统用于打底、分层浇面的充填料浆质量浓度为 72%, 灰砂比为 1:4。对该工况下的充填料浆进行恒定剪切速率作用下剪切应力测试试验, 并采用式(10)对测试结果进行计算, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 随着加载时间的增长, 分级细尾砂浆所受剪切应力逐渐减小并趋于稳定。若采用传统的宾汉姆模型对其流变特性进行描述, 则在恒定剪切速率作用下, 分级细尾砂浆所受剪切应力将为恒定值, 这与试验结果相差甚远。而采用式(10)对分级细尾砂浆流变特性进行描述时, 对图 4 中实测值与理论计算值的误差进行计算, 得到初始剪切应力理论计算值与实测值之间的最大误差为 3%, 平衡

状态时剪切应力理论计算值与实测值之间的误差为 2%。误差计算结果表明, 本文所建立的理论模型能较为准确地对分级细尾砂浆的流变行为进行描述, 计算结果完全能满足工业实践应用的需求。

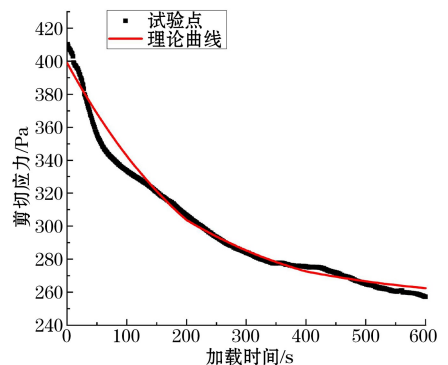


图 4 流变模型实践应用曲线

Fig.4 Engineering application curve of rheological model

4 结论

(1) 尾砂浆在恒定剪切速率作用下,达到内部结构破坏与修复动态平衡的时间为 450 s 左右,尾砂浆在达动态平衡后,其所受剪切应力会出现略微波动。

(2) 不同质量浓度的尾砂浆受恒定剪切速率加载作用时,力学响应程度不同。质量浓度越高,其力学响应程度越大。

(3) 相同质量浓度的尾砂浆在不同恒定剪切速率的作用下,其初始剪切应力 $\tau_{t=0}$ 、达到平衡状态时所受剪切应力 τ_{eq} 和结构系数 b 与加载速率成正相关关系。

(4) 建立了恒定剪切速率作用下尾砂浆的流变模型,流变模型为指数函数形式,理论模型曲线与试验结果点间的决定系数 R^2 分别为 0.9897, 0.9785, 0.9612 和 0.9583,模型与试验点间的拟合度较高。

(5) 应用本文建立的流变模型对质量浓度为 72%,灰砂比为 1:4 的充填料浆流变行为进行描述,模型所得剪切应力理论计算值与实测值之间的误差小于 3%。表明本文所建立的理论模型能较为准确地对分级细尾砂浆的流变行为进行描述,且能满足工业实践应用的需求。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.

[2] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
LI Xibing, ZHOU Jian, WANG Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.

[3] KHAYRUTDINOV A M, KONGAR-SYURYUN C, KOWALIK T, et al. Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite waste for non-waste geotechnology [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 867(1): 012018.

[4] 古德生,周科平.现代金属矿业的发展主题[J].金属矿山, 2012(7):1-8.
GU Desheng, ZHOU Keping. Development theme of the modern metal mining [J]. Metal Mine, 2012(7): 1-8.

[5] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.论科学采矿[J].采矿与安全工程学报,2008(1):1-10.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. On scientized mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008(1): 1-10.

[6] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报, 2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.

[7] 祝鑫,彭亮,仵锋锋,等.贵州某金矿超细尾砂充填工艺优选与应用[J].矿业研究与开发,2022,42(9):34-38.
ZHU Xin, PENG Liang, WU Fengfeng, et al. Preferential selection and application of ultra-fine tailings filling in a gold mine of Guizhou [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(9): 34-38.

[8] 邓玉彬,周益龙,林永生.我国下向分层充填采矿法现状及发展趋势[J].采矿技术,2021,21(2):9-12.
DENG Yubin, ZHOU Yilong, LIN Yongsheng. Present situation and development trend of downward slicing and filling mining method in China [J]. Mining Technology, 2021, 21(2): 9-12.

[9] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上):概念、特性与模型[J].工程科学学报,2020,42(7):803-813.
WU Aixing, LI Hong, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of researches on rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part I): concepts, characteristic and models [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(7): 803-813.

[10] GAO Rugao, ZHOU Keping, ZHOU Yanlong, et al. Research on the fluid characteristics of cemented backfill pipeline transportation of mineral processing tailings [J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(6): 4409-4426.

[11] 张钦礼,刘伟军,王新民,等.充填膏体流变参数优化预测模型[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(1):124-130.
ZHANG Qinli, LIU Weijun, WANG Xinmin, et al. Optimal prediction model of backfill paste rheological parameters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 124-130.

[12] 刘晓辉.膏体尾矿流变行为的宏观分析及其测定方法[J].金属矿山,2018(5):7-11.
LIU Xiaohui. Macro-micro analysis and test method of rheological behavior of paste tailings [J]. Metal Mine, 2018(5): 7-11.

[13] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(下):流变测量与展望[J].工程科学学报,2021,43(4): 451-459.
WU Aixing, LI Hong, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of researches on rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part II): concepts, characteristic and models [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(4): 451-459.

[14] 甘德清,常英杰,张友志,等.基于剪切应力变化量的全尾砂浆触变特性分析[J].金属矿山,2021(8):24-29.
GAN Deqing, CHANG Yingjie, Zhang Youzhi, et al. Analysis of thixotropic properties of unclassified tailing slurry based on variation of shear stress [J]. Metal Mine, 2021(8): 24-29.

- [15] 陈鑫政,杨小聪,郭利杰,等.基于扩散度的尾砂膏体流变特性[J].工程科学学报,2020,42(10):1299-1307.
CHEN Xinzhen, YANG Xiaocong, GUO Lijie, et al. Rheological properties of tailings paste based on a spread test[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(10): 1299-1307.
- [16] 张鲸波,严庆文,王洪江,等.某铅锌矿全尾砂膏体充填料浆流变性能研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):109-115.
ZHANG Jingbo, YAN Qingwen, WANG Hongjiang, et al. Research on rheological properties of whole tailings paste filling slurry in a mine [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 109-115.
- [17] 刘志双,郭利杰.多因素耦合条件下高浓度全尾砂浆体流变性能研究[J].中国矿业,2020,29(10):116-121.
LIU Zhishuang, GUO Lijie. Study on rheological properties of high concentration unclassified tailings slurry under multi-factor coupling condition[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(10): 116-121.
- [18] 李翠平,黄振华,阮竹恩,等.金属矿膏体流变行为的颗粒细观力学作用机理进展分析[J].工程科学学报,2022,44(8):1293-1305.
LI Cuiping, HUANG Zhenhua, RUAN Zhu'en, et al. Analysis of the research progress in the mechanism of particle mechanics action on the rheological behavior of paste in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(8): 1293-1305.

Research and Application of Rheological Model of Graded Fine-Tailings Slurry Based on Constant Shear Rate

WANG Xianqing¹, WAN Wen¹, SHENG Jia^{1,2,3}, LU Zhenxing¹, TANG Xiaoyu¹

(1.School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;

2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;

3.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The rheological properties of tailings slurry are important parameters in filling design. Based on the specific filling conditions of a gold mine in Shandong, constant shear rate loading tests and slurry structure dynamics theory were used to study the rheological properties of graded fine-tailings slurry. The rheological model of graded fine-tailings slurry under constant shear rate was established. The linear programming theory was used to obtain the specific expressions of the rheological model when the constant shear rate was 2 s^{-1} , 20 s^{-1} , 80 s^{-1} and 180 s^{-1} , and the mass concentration was 74%. The results show that the shear stress of the graded fine-tailings slurry gradually decreases with the increase of time and finally tends to be stable during the loading with constant shear rate. The rheological model of the graded fine-tailings slurry is an exponential function, and the decision coefficient R^2 between the theoretical model curve and the test results is 0.9897, 0.9785, 0.9612 and 0.9583, respectively. The model curve fits well with the test results. The model was used to verify the rheological behavior of graded fine-tailings slurry with mass concentration of 72% and cement-sand ratio of 1:4. The error between the theoretical calculation value and the measured value obtained by the model is less than 3%. The research results can provide a reference for the filling design of the same type of mines.

Key words: Backfill mining, Graded fine-tailings slurry, Constant shear rate, Rheological model