

固体含量对细粒全尾矿浆流变特性的影响

吴蓬,孙绍康,刘庆,王俊祥,吕宪俊*

(山东科技大学 化学与生物工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:为了考察不同固体含量尾矿浆体的流变特性,对不同固体含量尾矿浆体的坍落度、扩展度、表观黏度及屈服应力等流变参数进行测定.结果表明:不同固体含量的尾矿浆体总体表现出屈服假塑性体流变特性,但当剪切速率高于一定数值时,又表现出宾汉流体流变特性;表观黏度随剪切速率的增大先急剧降低后趋于稳定,随固体含量增大至一定数值后迅速增大;屈服应力随固体含量的变化规律与表观黏度随固体含量的变化规律相似;尾矿浆体的表观黏度和屈服应力与坍落度呈负线性相关关系,与扩展度呈负对数相关关系,表观黏度和屈服应力可看作坍落度与扩展度的综合表现,可分别表现出因固体含量变化引起的浆体流变特性的改变.

关键词:流变特性;表观黏度;屈服应力;固体含量;剪切速率

中图分类号:TD989 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)03-0067-07

The Effect of Solid Content on Rheological Properties of Fine Full Tailings Slurry

WU Peng, SUN Shaokang, LIU Qing, WANG Junxiang, LYU Xianjun

(College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To investigate the rheological characteristics of tailing slurry with different solid contents, the rheological parameters such as slump, spread, apparent viscosity and yield stress of tailings slurry are measured. Results show that the tailings slurry with different solid contents exhibits the rheological characteristics of yield pseudoplastic fluid, but the rheological characteristics of Bingham fluid are observed when the shearing rate is higher than a certain value. The apparent viscosity decreases sharply with the increase of shearing rate and then tends to be stable, and then increases rapidly with the increase of solid content to a certain value. The variation of yield stress with solid content is similar to that of viscosity. The viscosity and yield stress of the tailings slurry have a negative linear correlation with the slump, and a negative logarithmic correlation with the spread. The viscosity and yield stress of the tailing mortar can be regarded as the comprehensive expression of slump and spread. The viscosity or yield stress can respectively show the change rule of rheological properties of the slurry caused by the change of solid content.

Keywords: rheological properties; apparent viscosity; yield stress; solid content; shearing rate

矿山尾矿是选矿厂在特定经济技术条件下,将矿石磨细,选取“有用组分”后所排放的废弃物,具有粒度细、产量大、污染环境等特点.目前矿山尾矿的主要处理方式尾矿库堆存和胶结充填,随着国家对环保要求的提高,胶结充填已成为大宗处理尾矿的主要途径.尾矿在处理过程中一般需要长距离管道输送,尾矿料浆的流变特性是输送设施和工艺参数选择的根本依据,也是管道输送水力坡度损失计算的理论依

收稿日期:2021-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674161);山东科技大学人才引进科研启动基金资助项目(2017RCJJ036);青岛西海岸新区2020年度科技专项资助项目(2020-2-3)

*通信作者,E-mail: lyuxianjun@126.com

据^[1-3],因此,研究尾矿料浆的流变特性具有重要意义。

表观黏度和屈服应力为表征料浆流变特性的基本参数。表观黏度是个动态变化的参数,通常采用剪切时间内的算术平均值来表征,屈服应力可通过流变仪直接测定,而坍塌度和扩展度能更为直观地表征料浆流动性^[4]。依据剪切应力随剪切速率变化规律的不同,可将流体分为牛顿流体和非牛顿流体,非牛顿流体又可分为宾汉塑性体、胀塑性体、假塑性体、屈服假塑性体和屈服胀塑性体^[5],如图1所示。

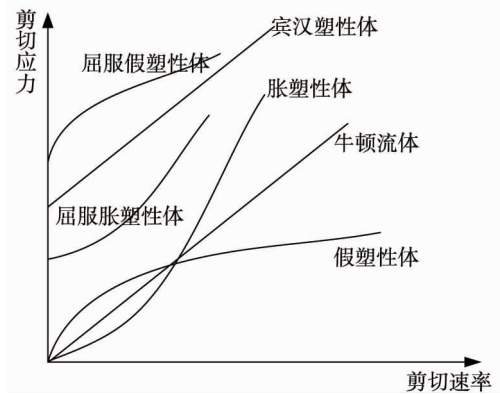


图1 不同流体类型

尾矿料浆的流变特性受诸多因素影响,主要包括其内部组成成分及物化性质,如固体含量(浆体中所含固体颗粒的质量分数,下同)、固体密度、颗粒级配和水化作用等,以及外部因素,如温度、剪切速率和剪切时间等^[6],而对流变特性影响较大的2个内部因素依次为固体含量和颗粒级配^[5,7]。判断流体类型是流变特性研究的基本内容,有研究者认为当尾矿浆体固体含量较低(一般55%以下)时,浆体剪切应力与剪切速率呈线性关系,表现出牛顿流体特性;当尾矿料浆固体含量在60%~75%时,浆体流变曲线随着剪切速率的增加可分为3个阶段的变化,即屈服假塑性体阶段、宾汉流体阶段和牛顿流体阶段;当尾矿料浆固体含量较高(一般75%以上)时,浆体表现出宾汉流体特性^[8-9]。付建勋^[10]、朱庚杰等^[11]则认为细粒级全尾料浆的流变行为符合Herschel-Bulkley(H-B)流变模型,与宾汉姆流变模型相比,具有更高的准确度,固体含量较低时属于屈服胀塑性体,固体含量较高时属于屈服假塑性体。尾矿料浆的屈服应力随着固体含量增加呈现正相关指数增长^[11-12],随剪切时间延长先增大后趋于稳定,随着尾矿粒径减小而增大^[12]。高固体含量尾矿料浆的表观黏度随剪切应变速率的增加而减小,减小到一定程度时趋于水平稳定,具有“剪切稀化”特征^[1,12-13],随尾矿浆体固体含量增加而呈指数增加^[11],随剪切时间延长先减小后趋于稳定,随着尾矿粒径减小而增大^[12]。尾矿料浆的坍塌度和扩展度随固体含量的增加呈逐渐减小的趋势^[9,14]。

膏体作为一种均相流尾矿料浆,表现出典型的非牛顿流体特性:不脱水、不分层、不离析,在尾矿胶结充填工艺中受到越来越多的重视。当剪切速率较低时,膏体表现出剪切稀化行为;随着剪切速率增加,膏体表观黏度趋于稳定,基本符合宾汉流体特性;当剪切速率超过某一阈值,膏体表现出剪切增稠行为^[6,15]。膏体屈服应力随固体含量增加而增大,当固体含量超过一定值时,屈服应力急剧增加,并且相同固体含量下细粒级含量越高屈服应力越大^[14,16-18]。膏体表观黏度随固体含量增大而增大,固体含量与塑性黏度之间的关系符合指数函数模型^[19]。温度对全尾矿膏体的流变特性有显著影响,而pH值对全尾矿膏体的流变特性的影响相对较小,相同pH值条件下较高温度会导致较大的屈服应力和表观黏度,但过高的温度(50℃)无法达到更高的表观黏度^[20]。

目前对于尾矿料浆流变特性研究虽有大量报道,但由于流变特性的影响因素较多,仍有大量科学问题需要解决。本文拟以某铁矿全尾矿为原料,借助坍塌度仪和旋转黏度计进行流变特性参数测定,得出剪切应力-剪切速率曲线、表观黏度-剪切速率曲线、坍塌度(扩展度)-固体含量曲线,并通过拟合得出相应料浆的坍塌度、扩展度与屈服应力及表观黏度之间的关系,分析固体含量对坍塌度、扩展度、表观黏度、屈服应力等流变参数的影响,阐明全尾矿浆体的流变特性,为全尾矿料浆输送提供重要的理论指导。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验用尾矿为某铁矿选矿厂排出的全尾矿,该尾矿的粒度较细,小于74 μm(200目)颗粒的质量分数占68.9%,小于37 μm(400目)的占48.9%,具体粒度组成如表1所示。

表1 尾矿的粒度组成

粒级/ μm	质量分数/%	
	区间含量	筛下累积含量
>250	10.2	100.0
150~250	9.1	89.8
109~150	5.3	80.7
74~109	6.5	75.4
43~74	13.2	68.9
37~43	6.8	55.7
<37	48.9	48.9

1.2 试验方法

1) 坍落度及扩展度测定:将搅拌均匀的不同固体含量(质量分数为65%~80%)的尾矿料浆按照 GB/J 80—85《普通混凝土拌合物性能试验方法》的要求装入高30 cm,上口径10 cm,下口径20 cm的坍落度筒内,提起坍落度筒后,浆体由于自重作用而向四周扩展流动,高度随之下降,浆体坍落的高度即为坍落度,向四周扩展的程度为扩展度,取十字交叉方向上两个水平距离的平均值。

2) 尾矿浆体流变特性:采用 NXS-11A 型旋转黏度计,测定不同固体含量(质量分数为65%~80%)尾矿浆体在不同剪切速率下的剪切应力,绘制剪切速率与剪切应力的关系曲线,分析全尾矿浆体的流变特性。

2 试验结果与分析

2.1 固体含量对尾矿浆体坍落度及扩展度的影响

固体含量为65%~80%的尾矿料浆的坍落度及扩展度如图2所示。由图2可知:当尾矿固体含量低于76%时,随着固体含量增大坍落度变化不大;当固体含量高于76%时,随着固体含量增大坍落度急剧减小,这表明固体含量大于76%时料浆内部阻力迅速增大,流动性能急剧变差。当固体含量低于70%时,随着固体含量增大扩展度减小缓慢;当固体含量高于70%时,扩展度大幅度呈线性降低。

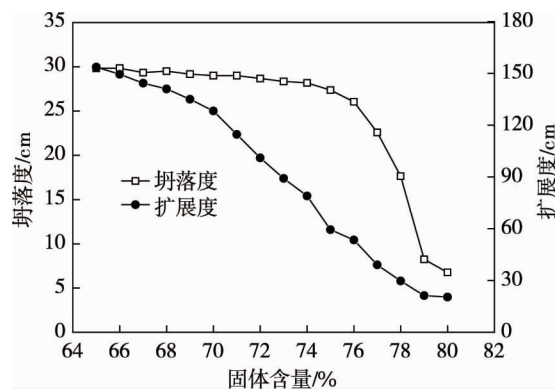


图2 不同固体含量尾矿浆体的坍落度与扩展度曲线

根据坍落度与扩展度随尾矿料浆固体含量的变化规律,把固体含量分为低固体含量区(65%~69%)、中固体含量区(70%~76%)和高固体含量区(77%~80%)。不同固体含量区坍落度与扩展度呈现不同的变化规律:在低固体含量区,随着固体含量的增大,坍落度和扩展度都有所降低,但降幅不大;在中固体含量区,随着固体含量的增大,坍落度降低幅度仍然较小,而扩展度大幅度降低;在高固体含量区,随着固体含量的增大,坍落度和扩展度都大幅度降低。

2.2 不同固体含量区尾矿浆体的流变特性

2.2.1 低固体含量区尾矿浆体的流变特性

在低固体含量区,不同固体含量尾矿料浆对应的剪切应力与剪切速率的关系、表观黏度与剪切速率的关系分别如图3和图4所示.由图3可知:低固体含量区浆体流变特性总体服从屈服假塑性体流变规律,当剪切速率为0时,存在一个初始剪切应力数值,该数值随着固体含量的增大而提高;剪切应力随着剪切速率的增大先迅速增大而后缓慢线性增大,相同剪切速率条件下剪切应力随着固体含量的升高而增大;当剪切速率高于 7 s^{-1} 时,剪切应力随剪切速率的增大呈线性增大,相关系数大于 0.986,表现出明显的宾汉流体特征.

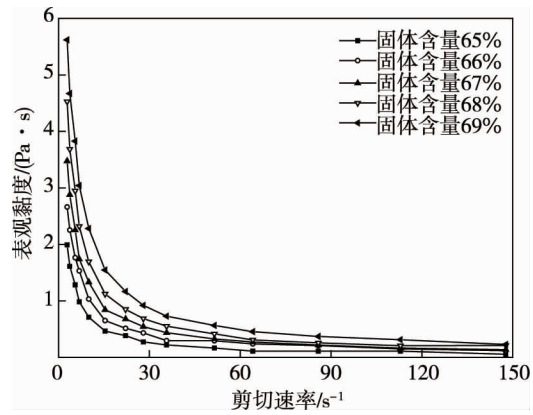
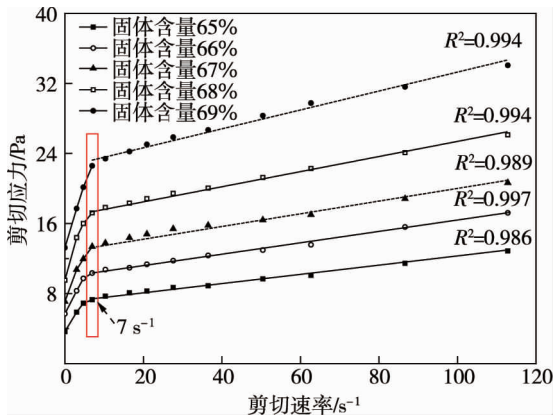


图3 低固体含量区尾矿浆体的剪切应力与剪切速率的关系曲线

图4 低固体含量区尾矿浆体的表观黏度与剪切速率的关系曲线

图4表明,尾矿浆体的表观黏度不是一个固定数值,与剪切速率明显相关,尤其当剪切速率较低时,这也说明尾矿浆体属于非牛顿流体特性.在低固体含量区,尾矿浆体表观黏度随剪切速率的增大,先急剧降低而后基本保持不变,说明当剪切速率高于一定数值时,表观黏度不再受剪切速率影响,表现出牛顿流体或宾汉流体特征.在相同剪切速率条件下,表观黏度随着固体含量的增大而增大.

2.2.2 中固体含量区尾矿浆体的流变特性

在中固体含量区,不同固体含量尾矿料浆对应的剪切应力与剪切速率的关系、表观黏度与剪切速率的关系如图5和图6所示.由图5可知:中固体含量区浆体流变特性总体服从屈服假塑性体流变规律,剪切应力随着剪切速率的增大而增大,在固体含量为 70%~73%时增大幅度较小,而固体含量为 74%~76%时增大幅度较大;在相同剪切速率条件下,剪切应力随着固体含量的升高而增大;当剪切速率高于 12.11 s^{-1} 时,剪切应力随剪切速率的增大而呈线性增大,相关系数大于 0.966,表现出明显的宾汉流体特征.图6表明,中固体含量区尾矿浆体表观黏度随剪切速率增大的变化规律与低固体含量区相同,均是先急剧降低后趋于稳定.

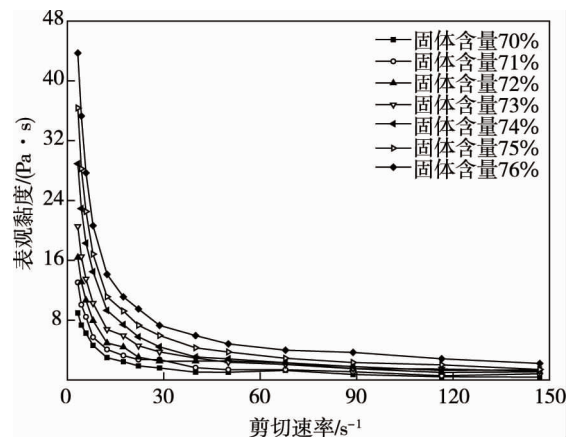
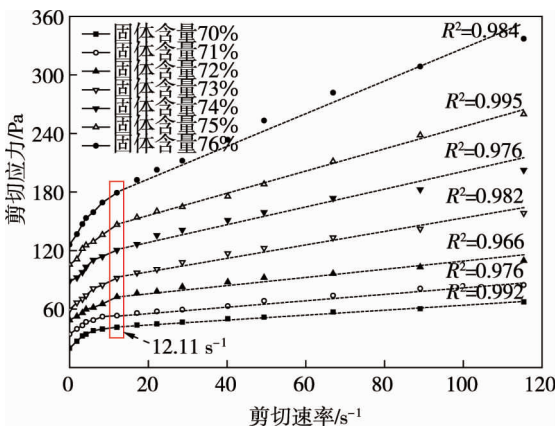


图5 中固体含量区尾矿浆体的剪切应力与剪切速率的关系曲线

图6 中固体含量区尾矿浆体的表观黏度与剪切速率的关系曲线

2.2.3 高固体含量区尾矿浆体的流变特性

在高固体含量区,不同固体含量尾矿料浆对应的剪切应力与剪切速率的关系、表观黏度与剪切速率的关系如图7和图8所示.由图7可知:高固体含量区浆体流变特性服从屈服假塑性体流变规律,剪切应力随着剪切速率的增大而明显增大;当剪切速率高于 23.50 s^{-1} 时,剪切应力随剪切速率的增大近似呈线性增大,相关系数大于0.981,表现出宾汉流体特征.图8表明,高固体含量区尾矿浆体表观黏度随剪切速率的增大的变化规律与低、中固体含量区变化规律相同,均是先急剧降低后趋于稳定.

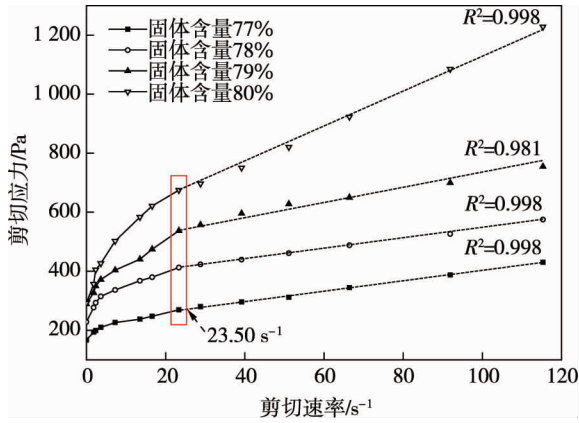


图7 高固体含量区尾矿浆体的剪切应力与剪切速率的关系曲线

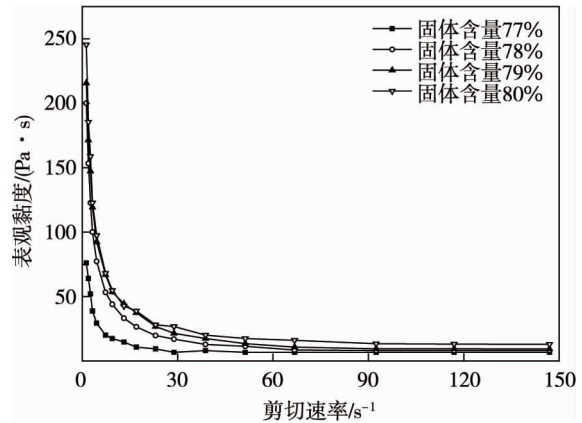


图8 高固体含量区尾矿料浆的表观黏度与剪切速率的关系曲线

综上所述,无论是低固体含量区、中固体含量区还是高固体含量区,尾矿浆体流变特性都服从屈服假塑性体流变规律.在低固体含量区(65%~69%),剪切速率高于 7 s^{-1} 时,尾矿浆体流变特性近似服从宾汉流体流变规律,线性相关系数在0.986以上;在中固体含量区(70%~76%),剪切速率高于 12.11 s^{-1} 时,尾矿浆体流变特性近似服从宾汉流体流变规律,线性相关系数在0.966以上;在高固体含量区(77%~80%),剪切速率高于 23.50 s^{-1} 时,尾矿浆体流变特性近似服从宾汉流体流变规律,线性相关系数在0.981以上.说明随着固体含量的增大,尾矿浆体服从宾汉流体流变特性所需要的剪切速率不断增大.对比图3、图5和图7可知,在相同剪切速率条件下,随着固体含量的升高,剪切应力增加幅度不断提高.

不同固体含量尾矿浆体的表观黏度均与剪切速率明显相关.随着剪切速率增大,表观黏度均先急剧降低而后基本不变,当剪切速率高于一定数值时,表观黏度不再受剪切速率影响,表现出牛顿流体或宾汉流体特征;在相同剪切速率条件下,表观黏度随着固体含量的增大而增大.这说明增大剪切速率可显著降低浆体的表观黏度,显著降低浆体的输送阻力损失,且固体含量越大,表观黏度降低的幅度越大,输送阻力损失的降低也越大.

2.3 流变参数之间的关系

2.3.1 固体含量对尾矿浆体表观黏度、屈服应力的影响

为考察尾矿浆体的表观黏度和屈服应力随固体含量的变化规律,分别对剪切应力与剪切速率呈线性变化的数据点(服从宾汉流体流变规律的数据点)进行回归拟合,得到相应回归方程,其斜率为浆体的表观黏度,截距为浆体屈服应力,从而得出不同固体含量下尾矿浆体的表观黏度和屈服应力^[21],结果如图9所示.

图9表明,低固体含量区(65%~69%)表观黏度和屈服应力随固体含量的增大而变化不大,中固体含量区(70%~76%)表观黏度和屈服应力随固体

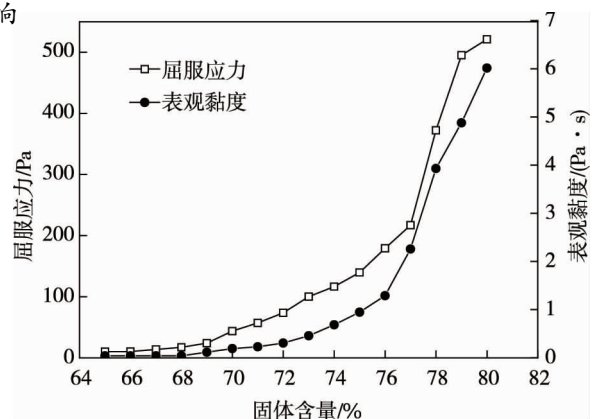


图9 尾矿料浆的表观黏度、屈服应力与固体含量的关系曲线

含量的增加而较大幅度的增大,高固体含量区(77%~80%)表观黏度和屈服应力随固体含量的增大而急剧增加.由此可知,表观黏度、屈服应力的变化规律与坍落度、扩展度综合表现出的规律是一致的,表明尾矿浆体的表观黏度、屈服应力与坍落度及扩展度之间有内在联系.

2.3.2 流变参数之间的数据拟合

为考察尾矿浆体的表观黏度、屈服应力与坍落度及扩展度之间的内在联系,绘制坍落度及扩展度与表观黏度、坍落度及扩展度与屈服应力的散点图,并对数据点进行回归拟合,相应的拟合曲线分别如图 10 和图 11 所示.

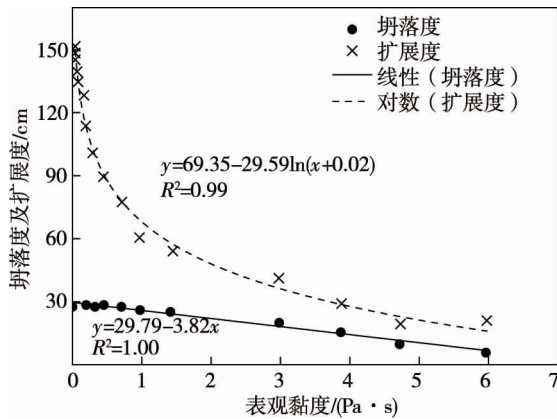


图 10 坍落度及扩展度与表观黏度的关系曲线

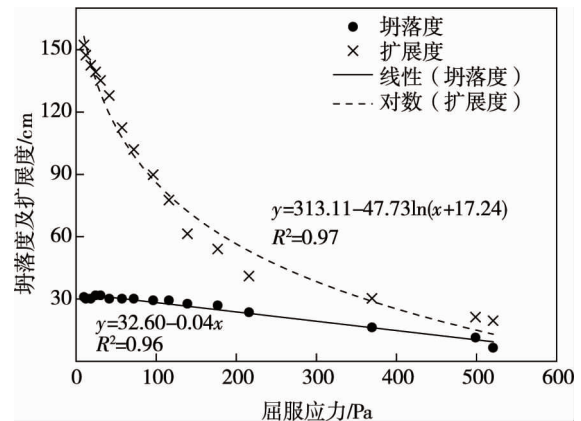


图 11 坍落度及扩展度与屈服应力的关系曲线

图 10 和图 11 的拟合结果表明:坍落度与表观黏度、屈服应力均呈负线性相关关系,相关系数分别为 1.00 和 0.96;扩展度与表观黏度、屈服应力均呈负对数相关关系,相关系数分别为 0.99 和 0.97,坍落度及扩展度与表观黏度的相关性高于与屈服应力的相关性.由此可知,表观黏度、屈服应力可看作坍落度与扩展度的综合表现,表观黏度或屈服应力可以分别表现出由固体含量变化引起的浆体流变特性的变化,而单一采用坍落度或扩展度不能表现出因固体含量变化所引起的浆体流变特性的变化.

3 结论

1) 全尾矿浆的流变特性总体服从屈服假塑性体流变规律,但当剪切速率高于一定数值时,又表现出宾汉流体的流变特性,并且尾矿浆体的表观黏度与剪切速率明显相关,存在明显的“剪切稀化”行为,增大剪切速率可显著降低浆体的表观黏度.

2) 全尾矿浆的表观黏度、屈服应力与坍落度呈负线性相关关系,与扩展度呈负对数相关关系,表观黏度或屈服应力可看作坍落度与扩展度的综合表现,在表征固体含量对浆体流动性影响的过程中可以分别用表观黏度或屈服应力进行表征.因此,在推荐矿浆输送过程中适宜的固体含量时,可推荐表观黏度或屈服应力迅速增大之前的固体含量.

3) 该全尾矿浆输送过程中适宜的固体含量为 74%~76%,此条件下表观黏度和屈服应力都保持相对较低的数值,浆体具有很好的流动性,同时又保持浆体中具有较高的固体含量.

参考文献:

- [1] 罗涛,张亮,姜亮亮,等.高浓度全尾砂料浆流变特性参数试验及管道输送研究[J].有色金属科学与工程,2015,6(4): 86-90.
- [2] 陈洪彬,英培壮,吕宪俊.微细铁尾矿的流变特性和输送阻力研究[J].中国金属通报,2020(2):285-286.

- [3] 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.
- [4] 王富林,杨仕教,苏帅,等.高浓度全尾砂充填料浆流变特性试验研究[J].长江科学院院报,2019,36(2):87-96.
- [5] 薛娜.超细铁尾砂充填料浆流变特性研究[D].唐山:华北理工大学,2019.
- [6] 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.
- [7] 翟永刚,吴爱祥,王洪江,等.全尾砂膏体料浆的流变特性研究[J].金属矿山,2010(12):36-38.
- [8] 郑昭炀.铜铁尾矿库尾砂流变特性与溃坝动力特性研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- [9] 陈洪彬,英培壮,吕宪俊.某铁矿尾矿分级浓缩及流变特性研究[J].世界有色金属,2020,541(1):201-203.
- [10] 付建勋,贺茂坤.细粒级全尾砂基础特性及其流变试验研究[J].中国矿山工程,2020,49(1):68-72.
- [11] 朱庚杰,齐兆军,寇云鹏,等.分级细尾砂胶结充填强度和料浆流变性能试验研究[J].矿冶工程,2020,40(4):18-22.
- [12] 王晓光.尾矿流变特性及影响因素的试验研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [13] 杨超,郭利杰,张林,等.铜尾矿流变特性与管道输送阻力计算[J].工程科学学报,2017,39(5):24-29.
- [14] 罗龙波,保文俊,刘殿华.武山铜矿全尾砂膏体流变特性试验研究[J].铜业工程,2020(6):16-20.
- [15] 谢盛青,段文权,吴世剑.某铁矿全尾砂膏体充填料浆流变特性试验研究[J].中国矿山工程,2020,49(3):26-30.
- [16] 杜加法,刘晓光,王京生,等.基于L管实验的全尾砂膏体流变特性研究[J].金属矿山,2020(8):20-24.
- [17] 曹士凯,王世博,赵金田.基于流变特性分析的膏体充填尾砂级配优化研究[J].矿业研究与开发,2020,40(10):98-101.
- [18] 马浩吉,王贻明,王元青,等.西藏甲玛铜矿全尾砂膏体充填料浆流变特性研究[J].金属矿山,2017(11):48-53.
- [19] 侯永强,尹升华,戴超群,等.尾矿膏体流变特性和管输阻力计算模型[J].中国有色金属学报,2021,31(2):510-519.
- [20] ZHANG Q L, LI Y T, CHEN Q S, et al. Effects of temperatures and pH values on rheological properties of cemented paste backfill[J]. Journal of Central South University, 2021, 28: 1707-1723.
- [21] 任晓枫.旋转粘度计测定浆体流变参数的计算方法[J].水利学报,1995(9):75-81.