

# 焦家金矿尾矿旋流器溢流流变特性研究

陈国栋<sup>1,2,3,4</sup>, 王志明<sup>1,2,3,5\*</sup>, 张超<sup>1,2,3</sup>, 王丽<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>山东省地质科学研究所, 山东 济南

<sup>2</sup>自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

<sup>3</sup>山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东 济南

<sup>4</sup>中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

<sup>5</sup>山东科技大学化学与生物工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2023年1月3日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月21日

## 摘要

以焦家金矿旋流器溢流的细粒尾矿为主要原料, 通过对尾矿开展化学成分分析、物相组成分析、粒度分布、密度、塌落度测定、料浆流动性试验等研究, 查明了尾矿的基本性质, 提出了适宜的输送工艺参数。高浓度尾砂料浆的流变特性服从屈服假塑形体流变规律; 当剪切速率达到 $20\text{ s}^{-1}$ 后, 尾砂料浆的流变特性都近似服从宾汉体流变规律。随着尾矿浓度的增大, 粘度及屈服应力逐渐增大, 而塌落度与扩展度都有减小的趋势, 最佳尾矿料浆适宜固结浓度为70%~72%。

## 关键词

微细粒尾矿, 流变特性, 塌落度, 扩展度, 充填倍线

# Study on Overflow Rheological Characteristics of Tailings Cyclone for Jiaojia Gold Mine

Guodong Chen<sup>1,2,3,4</sup>, Zhiming Wang<sup>1,2,3,5\*</sup>, Chao Zhang<sup>1,2,3</sup>, Li Wang<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization, MNR, Jinan Shandong

<sup>3</sup>Shandong Provincial Key Laboratory of Metallogenic Geological Processes and Resource Utilization, Jinan Shandong

<sup>4</sup>School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

<sup>5</sup>College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2023

\*通讯作者。

## Abstract

Takes the fine-grained tailings of cyclone overflow of Jiaojia gold mine as the main raw material, the basic properties of tailings were found out and the appropriate transportation process parameters were put forward through chemical composition analysis, phase composition analysis, particle size distribution, density, slump determination and slurry fluidity test. The rheological properties of high concentration tailings slurry obey the rheological law of yield pseudoplastic body. When the shear rate reaches  $20 \text{ s}^{-1}$ , the rheological properties of tailings slurry approximately obey Bingham fluid rheological law. With the increase of tailings slurry concentration, the viscosity and yield stress gradually increase, while the slump and extension degree have a decreasing trend. The optimal consolidation concentration of tailings slurry is 70%~72%.

## Keywords

Fine Tailings, Rheological Characteristics, Slump, Extension Degree, Stowing Gradient

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

山东省金尾矿资源丰富，主要有蚀变岩型、石英脉型、矽卡岩型、隐爆角砾岩型、次火山岩型、绿岩带型[1] [2] [3]。以焦家金矿为代表的蚀变岩型尾矿体量巨大，对尾矿进行大体量应用具有重大意义[4]。尾矿胶结充填[5] [6]是传统的尾矿处理工艺，为矿山的安全生产和环境保护提供技术保证。

流变学是研究物质流动与变形的科学[7] [8]，在流变学中，流体一般分为牛顿流体[9]和非牛顿流体[10]。料浆在剪切应力的作用下，其切变率与切应力间的关系称为流型。一般把切变率与切应力呈线性关系的流型的料浆称为牛顿体；切变率与剪切应力呈非线性关系的流型料浆称为非牛顿体。流体的不同类型见图 1。

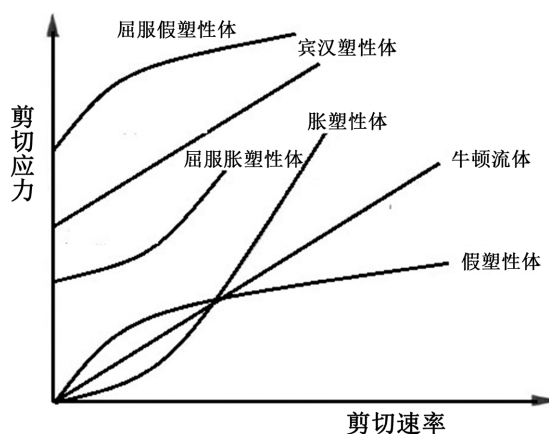


Figure 1. Different types of fluids

图 1. 流体的不同类型

尾矿的流变特性是充填管道设计的重要依据[11][12],粘度和屈服应力[13][14]是掌握尾矿流变特性的两项重要指标。徐文彬等研究了静置时间、级配对料浆流态变化的影响料浆的流变特性过程是多种模型复合特性的综合体现,随着剪切速率的增加,料浆流变曲线呈上凸状,表现出伪塑性体-宾汉姆体-伪塑性体[15]。DEN 研究发现固体物料比的变化能对膏体的流变性能影响较大[16];王少勇等依托闭路环管试平台,研究了料浆流速、物料级配、固相含量和管径对膏体管道输送压力损失的影响[17];张连富等研究了尾矿膏体屈服应力的演化规律,发现料浆浓度与屈服应力之间存在显著的线性关系[18][19];王石等研究了阴离子型聚丙烯酰胺对全尾膏体料浆流变特性的影响,并以此为基础推导构建了管道输送的沿程阻力计算公式[20]。S. Clayton 研究认为采用圆柱筒测定屈服应力比采用圆锥筒获得结果更有效,圆柱筒模型能更准确预测坍塌落度与屈服应力的关系,但该方法尚未实际推广[21]。Boylu 考察了颗粒粒度分布对水煤浆流变特性的影响,粗颗粒过多可能导致沉降,影响流变学参数的测定[22]。梁新民将采用 Fluent 软件建立的管道输送数值仿真模型与室内流变试验结果进行对比,表明模型精确度较高,仿真模型可节约矿山试验成本,仿真结果对于优化矿山充填系统具有重要的指导意义[23]。

前人在尾矿充填料浆流变特性和管输阻力计算模型方面进行了诸多研究,并取得了一部分理论成果,但不同矿山尾矿性质多变、粒度分布变化较大,具有一定的局限性,不适用于焦家尾矿。当料浆浓度高时,特别是细颗粒的含量较高时,其切变率与切应力的关系出现非牛顿流体特点。为了研究细粒尾矿料浆的流变模型,为充填提供依据,采用焦家金矿选厂细粒尾矿配制不同浓度的料浆,通过旋转粘度计测定尾矿料浆在不同剪切速率下的剪切应力,讨论流变性能对充填的影响。

## 2. 样品的采集、制备、表征

### 2.1. 样品的采集和制备

所采尾矿为焦家金矿业有限公司选厂选别尾矿经旋流器分级后的额溢流口产物。首先采用露天晾晒的方法进行干燥,然后混匀、缩分出各种分析检测用的样品,其余样品作为试验样品及备样。样品制备流程如图2所示。

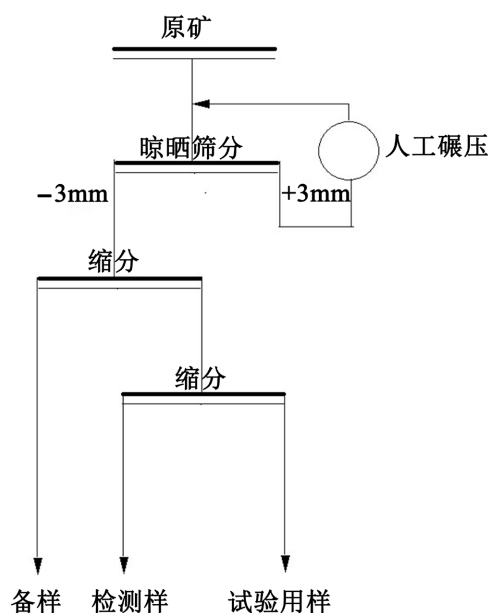


Figure 2. Process of sample preparation

图2. 样品制备流程

## 2.2. 样品的物理化学性质

### 2.2.1. 化学分析

原料化学分析结果如表 1 所示。

Table 1. Chemical analysis result of raw tailings

表 1. 原矿化学分析结果

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Ti <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	S
含量%	69.06	14.49	2.51	4.63	2.06	2.25	0.64	0.20	0.079	0.11	0.13

焦家金尾矿的主要化学成分为 Si、Al，并含少量 K、Na、Fe、Ca 等，其余元素含量较低。

### 2.2.2. 岩矿鉴定

岩矿鉴定结果如表 2 所示，该尾矿主要矿物为石英、斜长石、云母、钾长石，另含有少量的方解石，尾矿结晶度较好，活性差，综合利用性能差。

Table 2. Rock-mineral determination result of raw tailings

表 2. 岩矿鉴定结果

矿物名称	石英	斜长石	绢云母	钾长石	方解石	黑云母	黄铁矿	磁铁矿
含量%	35~40	25~30	10~15	10~15	4~6	少量	少量	少量

### 2.2.3. 密度

密度测定采用比重瓶法，结果如表 3 所示，平均密度为 2.62 g/cm<sup>3</sup>。

Table 3. Density result of tailings

表 3. 尾矿密度测定结果

测定序号	1	2	3	4	5	平均
真密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.61	2.61	2.62	2.62	2.62

### 2.2.4. 粒度

采用标准筛湿法筛分，对尾矿粒度进行了测定，尾矿粒度分布如表 4 所示。

Table 4. Size distribution of tailings

表 4. 尾矿粒度分布

尾砂粒级		质量含量/%	筛上累计/%	筛下累计/%
网目	粒径/ $\mu\text{m}$			
+100	+150	20.05	20.05	100.00
100~160	-150+96	12.02	32.07	79.95
160~200	-96+74	7.01	39.08	67.93
-200+325	-74+43	11.40	50.48	60.92
-325	-43	49.52	100.00	49.52
合计		100.00		

该尾矿-200目含量60.92%，-325目含量49.52%，总体属于细粒级尾矿，需进一步测定尾矿料浆在不同剪切速率下的剪切应力，确定尾矿的流变模型。

### 2.3. 试验方法

塌落度和扩展度测定试验按以下步骤开展：

1) 在刚性的水平地面上铺平PVC底垫，用水湿润塌落度筒及其他用具，用脚踩住塌落度筒两侧脚踏板，使塌落度筒在装料是保持位置固定。

2) 将制备的料浆用小铲分三层均匀装入桶内，捣实后每层高度为桶高的三分之一左右。每层用捣棒插捣25次。插捣应沿螺旋方向由外向中心进行，各次插捣应在截面上均匀分布。插捣筒边混凝土时，捣棒可以稍稍倾斜。插捣底层时，捣棒应贯穿整个深度，插捣第二层和顶层时，捣棒应插透本层至下一层的表面。浇灌顶层时，混凝土应灌到高出筒口。插捣过程中，如混凝土沉落到低于筒口，则应随时添加。顶层插捣完后，刮去多余的混凝土，并用抹刀抹平。

3) 清除筒边底板上的混凝土后，垂直平稳地提起坍落度筒。坍落度筒的提起过程应在5~10s内完成。

4) 提起坍落度筒后，量测筒高与坍落后混凝土试体最高点之间的高度差，即为该混凝土拌合物的坍落度值。坍落度筒提起后，如混凝土发生崩坍或一边剪坏现象，则应重新取样另行测定。如第二次试验仍出现上述现象，则表示该混凝土和易性不好，应予记录备查。

影响试验效果的关键因素是料浆均匀性。观察坍落后的混凝土试体的粘聚性及保水性。用捣棒在已坍落的混凝土锥体侧面轻轻敲打，如果锥体逐渐下沉，则表示粘聚性良好，如果锥体倒塌、部分崩裂或出现离析现象，则表示粘聚性不好。

坍落度筒提起后如有较多的稀浆从底部析出，锥体部分的混凝土也因失浆而骨料外露，则表明此混凝土拌合物的保水性能不好。如坍落度筒提起后无稀浆或仅有少量稀浆自底部析出，则表示此混凝土拌合物保水性良好。

## 3. 流变特性研究

### 3.1. 流变模型研究

为了研究尾矿料浆的流变模型，采用焦家金矿矿业有限公司金矿选矿尾矿配制不同浓度的料浆，通过旋转粘度计测定尾矿料浆在不同剪切速率下的剪切应力，根据试验结果绘制尾矿料浆的流变曲线，讨论尾矿的流变模型。不同浓度料浆的流变曲线见图3。

不同浓度尾砂料浆的流变特性都服从屈服假塑性体流变规律；当剪切速率达到一定程度后，尾砂料浆的流变特性都近似服从宾汉体流变规律。因此，在尾矿料浆浓度达到66%以上时，尾矿料浆可以看作是屈服假塑性流体，当尾矿料浆的剪切速率达到一定程度后，尾矿料浆可看作为宾汉流体。

### 3.2. 塌落度、扩展度试验

塌落度测定：采用标准的圆锥筒，桶高300mm、上口直径100mm、下口直径200mm，按建筑工程规范测定不同浓度尾砂胶结充填料浆的塌落度。当进行塌落度实验时，将搅拌均匀的料浆按照GBJ80-85《普通混凝土拌合物性能试验方法》装入桶内，提起塌落桶后，浆体由于自重作用使其向四周扩展流动，高度随之下降，浆体塌落的高度即为塌落度(图4(a))。塌落度越大，说明料浆的流动性越好。此外，浆体塌落后的扩展度(料浆塌落直径)也是影响流动性的一个重要参数(图4(b))。

充填料浆的流动性能用塌落度来表征最为直观。塌落度的力学含义是料浆因自重而塌落，又因内部阻力而停止的最终形态量。塌落度的高低直接反映了料浆的流动性特征与流动阻力的大小。相关研究表明，塌落度在200mm以上的膏体可以泵送，自流输送或长距离输送的塌落度值一般应达到250mm以上。

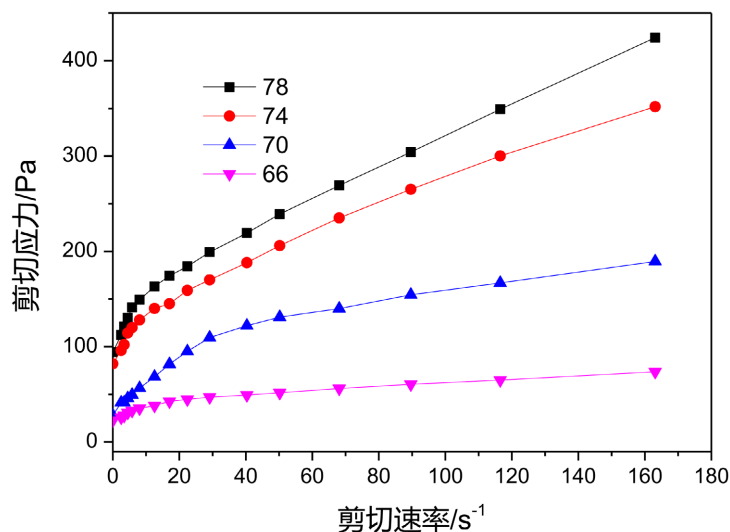


Figure 3. Rheological curve of slurry with different concentrations  
图 3. 不同浓度料浆的流变曲线

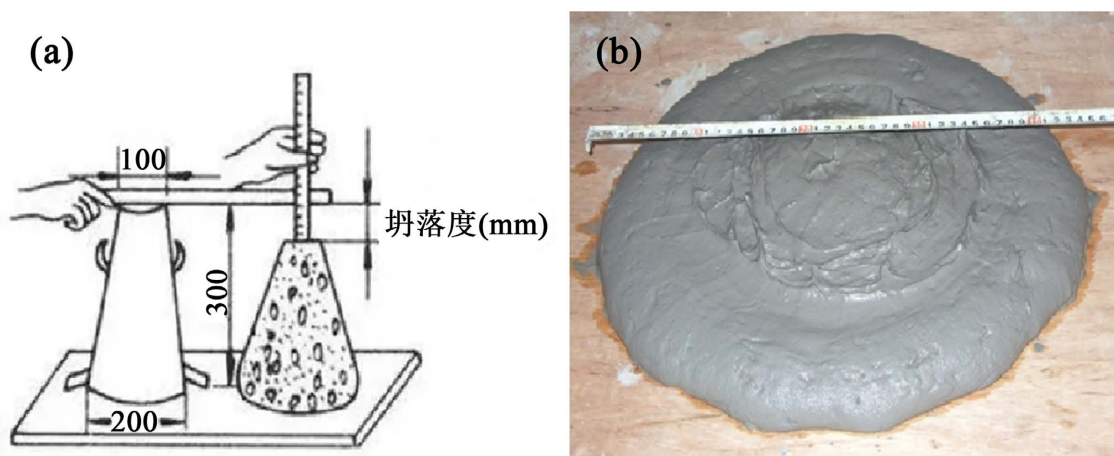


Figure 4. Instrumentation plan: (a) slump and (b) extension degree  
图 4. (a) 坍落度和 (b) 扩展度测量示意图

将焦家尾矿配制成浓度从 80% 到 70% 的料浆，每隔一个浓度配制一次，将搅拌均匀后的不同浓度的尾矿料浆按照 GB/T 8085《普通混凝土拌合物性能试验方法》装进桶高 30 cm，上口径 10 cm，下口径 20 cm 桶体内，提起坍落桶后，浆体因为自重的作用而向四周扩展流动，高度便会随之下降，料浆坍落的高度即是坍落度；料浆向四周扩展的距离即为扩展度，扩展度取两个垂直方向距离的平均值。尾矿料浆的坍落度及扩展度试验结果见图 5。

随着尾矿浓度的增大，坍落度与扩展度都有减小的趋势。当浓度低于 74% 时，坍落度的减小的趋势不明显，变化不大，当高于 74% 时，坍落度急剧变小。当浓度低于 70% 时，扩展度随着浓度的增大而有所减少，当浓度高于 70% 时，扩展度随着浓度增大而大幅度降低。

因此，尾矿料浆的流变性能存在两个临界浓度，即 70% 和 74%。当浓度低于 70% 时，随着浓度的增加，坍落度和扩展度变化不大；当浓度高于 74% 时，随着浓度的增加，坍落度急剧降低、流动性显著变差；当浓度为 70%~74% 时，随着浓度的增加，坍落度缓慢降低，扩展度降低较快。适宜的尾矿充填浓度应控制在 70%~74%。

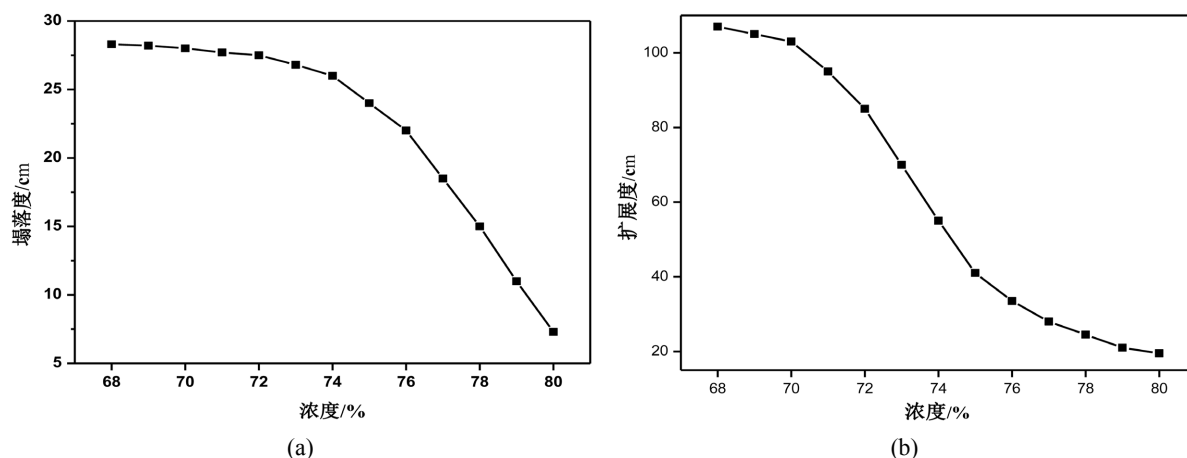


Figure 5. Variation curve of slump and extension degree with different slurry concentrations

图 5. 塌落度和扩展度随尾矿料浆浓度变化曲线

### 3.3. 粘度及屈服应力试验

充填料浆的流变特性除了能用塌落度和扩展度来表征, 还可以用屈服应力和粘度两个参数来表征。对于膏体状矿浆, 尾砂流变特性近似服从宾汉体流变规律, 即在静止状态下能形成具有一定刚度的三维结构, 能抵抗一定的剪切应力而不流动, 当切应力超过某一值时, 三维结构被破坏, 矿浆会发生流动。此时的切应力值为矿浆的屈服切应力。在高浓度矿浆水力管道输送时, 屈服应力的大小关系到管道输送系统的管道铺设坡度和输送之后重新启动的压力以及管径选取等。另外, 除了屈服应力, 由于矿浆粘度是矿浆密度、固体浓度、颗粒粒度和形状、物料粒度分布、矿浆温度和压力等因素的函数, 因此粘度也是矿浆流变特性的重要指标。

通过旋转粘度计测定不同剪切速率下矿浆的剪切应力, 然后对流变特性服从宾汉体流变规律(剪切应力与剪切速率的呈线性)的点进行拟合, 即可得到对应的屈服应力和塑性粘度, 实验首先对浓缩纯尾矿浆进行了测定, 所得结果见图 6。

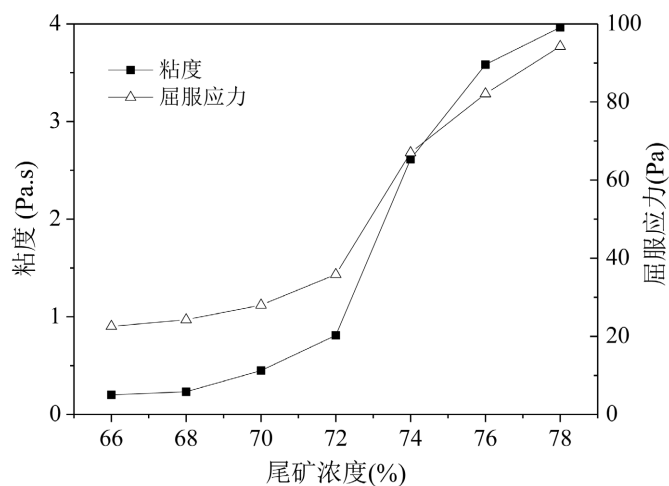


Figure 6. Yield stress and viscosity curves of pure tailing slurry

图 6. 纯尾矿浆屈服应力及粘度曲线

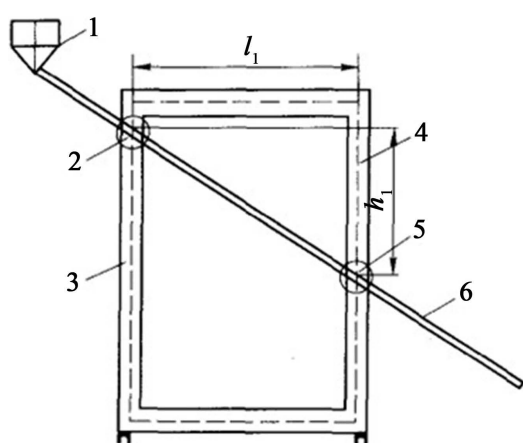
对于纯尾矿浆, 在 66%~72%浓度范围内粘度及屈服应力上升缓慢, 当浓度高于 72%后, 粘度及屈服

应力出现明显上升, 浓度高于 72% 后则出现急剧上升。说明料浆性质突变点在 72% 附近, 因此适宜的尾矿料浆输送浓度最高不应该高于 72%。

### 3.4. 流动性试验

#### 3.4.1. 流动性测试方法

为了考查影响料浆流动性的主要因素及影响规律, 采用倾斜管道测试装置(图 7), 对不同浓度、不同管径(40 mm 和 25 mm)、不同充填倍线下料浆的流速变化情况进行了测定。倾斜管为有机玻璃管, 长 2 m, 内径 42 mm, 壁厚 4 mm。盛料槽 2 个, 一个用于实验稳定后的流量测量, 一个用于实验稳定以前的料浆盛接。左端竖管上的托架可用于调节倾斜管的角度。测试时, 将制备好的膏体倒入进料漏斗, 要不断添加使漏斗内的膏体自由面保持在同一高度。



**Figure 7.** Testing device of inclined tube: 1—charging hopper; 2—fixed ring; 3—bracket; 4—sliding device; 5—fixed device; 6—conveying tube

**图 7.** 倾斜管道测试装置: 1—受料漏斗, 2—固定盘, 3—支架, 4—滑动装置, 5—固定装置, 6—输送管

#### 3.4.2. 流动性试验结果

为了考察充填浓度、充填倍线对充填料浆流速的影响, 实验测定不同料浆浓度(78%、76%、74%、72%、70%、68%)、不同充填倍线条件下料浆的流动特性参数。

实验测定结果如表 5 所示。

**Table 5.** Result of inclined tube test

**表 5.** 倾斜管实验数据结果

浓度%	斜管倾角(°)	倍线	流量 m <sup>3</sup> /h	流速 m/s
74	9.22	6.24	0.06	0.013
	12.94	4.46	0.07	0.015
	16.57	3.51	0.12	0.025
72	5.41	10.61	0.14	0.028
	9.22	6.24	0.19	0.038
	12.94	4.46	0.25	0.051



## Continued

70	3.10	18.52	0.13	0.026
	5.41	10.61	0.20	0.040
68	3.10	18.52	0.56	0.113
	5.41	10.61	1.99	0.399

## 1) 料浆浓度对流速的影响

从表中可以看出,随着料浆浓度的增加,料浆的流动速度逐渐降低,当浓度超过 76%时,料浆呈膏状,靠自重不具备流动性;并且随着浓度的增加,流动速度的降低就越显著。管径为 42 mm (内径)、倍线 5.41 时,当浓度由 68%增加至 70%时,流速由 0.399 m/s 降低至 0.040 m/s,减低迅速;当浓度由 70%增加至 72%时,流速由 0.040 m/s 降低至 0.028 m/s,减低缓慢。因此,料浆的浓度是影响料浆流动性的重要因素。尤其是达到一定浓度(临界浓度)后,浓度的微小增大,可造成流速(流量)的成倍降低。

## 2) 充填倍线对流速的影响

试验表明,充填倍线也是影响料浆流速的主要因素。在相同浓度和管径下,随着倍线的增大,自流流速明显降低,而且随着浓度的增大,倍线的影响越显著。当浓度为 72%、管道直径 42 mm 时,倍线由 4.46 增大到 10.61,流速由 0.051 m/s 降低至 0.028 m/s;当浓度为 74%、管道直径 42 mm 时,倍线由 3.51 增大到 6.24,流速由 0.025 m/s 降低至 0.013 m/s。这主要是由于倍线的大小直接影响着料浆的静压头,随着倍线的增大,料浆的静压头逐渐降低。

从以上试验结果可以看出,影响充填料浆流速和流量的因素包括:料浆浓度、充填倍线。料浆浓度过大时会造成料浆流动性的明显变差;适当降低充填倍线,有利于减小料浆的流动阻力,获得较大的流量和流动速度。

## 4. 结论

1) 尾砂料浆的流变特性都服从屈服假塑性体流变规律;当剪切速率达到  $20 \text{ s}^{-1}$  后,尾砂料浆的流变特性都近似服从宾汉体流变规律。

2) 随着尾矿浓度的增大,粘度及屈服应力逐渐增大,而塌落度与扩展度都有减小的趋势。通过塌落度、扩展度及粘度、屈服应力的研究表明,在尾矿料浆中存在一个临界浓度,当浓度高于此浓度时,料浆的流动性能较差,但当浓度低于此浓度时,料浆的流动性忽然就变好。通过塌落度和扩展度获得的临界浓度处于较宽的范围,而通过屈服应力获得的临界浓度范围较窄,采用屈服应力测试结果更有利于选取临界浓度,最终推荐尾矿料浆适宜固结浓度为 70%~72%。

3) 影响充填料浆流速和流量的因素包括:料浆浓度、充填倍线。料浆浓度过大时会造成料浆流动性的明显变差;适当降低充填倍线,有利于减小料浆的流动阻力,获得较大的流量和流动速度。本次试验原料粒度组成固定,因此未考察粒度对充填特性的影响。

## 致 谢

本项目得到山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室和自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室开放课题(No. Kfkt201812、No.KFKT202119)、山东省贵金属矿产成果集成及其尾矿综合利用研究项目(鲁勘字[2018] 10 号)的支持、山东省石墨尾矿综合利用研究(鲁自然资字[2022] 15 号)项目的支持。

## 基金项目

山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室、自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室开放课题(No. KFKT201812、KFKT202119)、山东省地质勘查项目《山东省石墨尾矿综合利用研究》(鲁自然资字[2022] 15 号)。

## 参考文献

- [1] 渠美云, 王志明, 董延钰. 利用三山岛金矿尾矿制备塑料母料[J]. 山东国土资源, 2020, 36(12): 60-64.
- [2] 渠美云. 焦炭金矿尾矿旋流器溢流胶结充填水化机理研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(8): 62-70.
- [3] 陈文韬. 综合物化探方法在山西东腰庄绿岩带型金矿外围找矿中的应用[J]. 山东国土资源, 2019, 35(11): 71-77.
- [4] 郭宝奎, 程光锁, 魏健, 等. 山东省贵金属矿产资源调查及其尾矿综合利用研究[R]. 济南: 山东省自然资源厅, 2020.
- [5] 张志明, 谢坪全, 李云鹏, 等. 尾矿膏体试验室制备及流变特性研究[J]. 现代矿业, 2022, 38(1): 158-160.
- [6] 姬宗皓, 韩梅, 孙高众. 煤炭充填开采技术在济宁煤矿的应用[J]. 山东国土资源, 2012, 28(4): 39-40.
- [7] 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): 663-668.
- [8] 孟婷婷, 马鹏. 平邑县安泰石膏矿采空区稳定性综合评价方法[J]. 山东国土资源, 2018, 34(7): 73-77.
- [9] 刘晓明, 艾志久, 黄俭波, 等. 非牛顿流体与牛顿流体在旋流器内的流场分析[J]. 石油机械, 2009, 37(3): 28-31.
- [10] 杨晓炳, 肖柏林, 高谦. 非牛顿流体充填料浆的管输摩擦阻力预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(6): 125-131.
- [11] 冯满. 尾矿浓缩和膏体尾矿的地面堆放[J]. 现代矿业, 2009(10): 82-86.
- [12] 王劫, 杨超, 张军. 膏体充填管道输送阻力损失计算方法[J]. 金属矿山, 2010(12): 33-36.
- [13] 郭亚兵, 陈洪江, 李亚红. 尾矿膏体流变学塌落度与屈服应力试验研究[J]. 矿山机械, 2016, 44(4): 81-85.
- [14] 于跃 郑伟钰, 程坤. 煤矿高浓度胶结充填料浆管道沿程阻力研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2): 72-75.
- [15] 徐文彬, 杨宝贵, 杨胜利, 等. 研石充填料浆流变特性与颗粒级配相关性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1282-1289.
- [16] Deng, X.J., Zhang, J.X., *et al.* (2017) Experimental Characterization of the Influence of Solid Components on the Rheological and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill. *International Journal of Mineral Processing*, **168**, 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.09.019>
- [17] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华. 膏体料浆管道输送压力损失的影响因素[J]. 工程科学学报, 2015, 37(1): 7-12.
- [18] 张连富, 吴爱祥, 王洪江. 泵送剂对高含泥膏体流变特性影响及机理[J]. 工程科学学报, 2018, 40(8): 918-924.
- [19] 张连富, 吴爱祥, 王洪江, 等. 尾矿膏体屈服应力演化规律[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1631-1636.
- [20] 王 石, 张钦礼, 王新民, 等. APAM 对全尾似膏体及其管道输送流变特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3271-3277.
- [21] Clayton, S., Grice, T.G. and Boger, D.V. (2003) Analysis of the Slump Test for On-Site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, **70**, 3-21. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00148-5)
- [22] Boylu, F., Dinçer, H. and Ateşok, G. (2004) Effect of Coal Particle Size Distribution, Volume Fraction and Rank on the Rheology of Coal-Water Slurries. *Fuel Processing Technology*, **85**, 241. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(03\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00198-X)
- [23] 梁新民, 王怀勇, 江国建, 等. 高浓度全尾砂充填料浆流变特性及管路输送沿程阻力损失研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(3): 47-53.