

铜尾矿流变特性与管道输送阻力计算

杨超¹⁾, 郭利杰¹⁾, 张林²⁾, 胡黎明²⁾✉, 许文远¹⁾

1) 北京矿冶研究总院, 北京 102628

2) 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

✉ 通信作者, E-mail: gehu@mail.tsinghua.edu.cn

摘要 流变参数是管道输送系统设计的基础,采用 RST-SST 型软固体流变仪进行尾矿浆体流变特性试验,确定了不同固相质量分数下尾矿浆体的屈服应力、黏度系数。当浆体固相质量分数大于 70% 后,屈服应力会随着固相含量的增加而显著上升。对矿浆进行剪切变稀试验发现,屈服应力可下降 40.9%。针对不同尾矿浆体开展标准坍落度试验,当固相质量分数小于 74% 时,尾矿浆具有良好的流动性及较大的坍落度。利用得到的尾矿浆体的流变特性参数,进行了临界流速、摩阻损失的计算,为尾矿管道输送系统设计提供参考。

关键词 采矿工程; 尾矿; 流变特性; 坍落度; 摩阻损失

分类号 TD50

Study of the rheological characteristics of copper tailings and calculation of resistance in pipeline transportation

YANG Chao¹⁾, GUO Li-jie¹⁾, ZHANG Lin²⁾, HU Li-ming²⁾✉, XU Wen-yuan¹⁾

1) Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 102628, China

2) State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

✉ Corresponding author, E-mail: gehu@mail.tsinghua.edu.cn

ABSTRACT Rheological characteristics are fundamental to pipeline system design. Rheological tests were conducted to obtain the yield stress and viscosity index at different mass fractions. Slump tests were conducted to investigate the mobility of tailings slurry. Results show that the yield stress increases with the increase of mass fraction, especially when mass fraction is greater than 70%. After stirring in a high-speed activation stirrer, the yield stress in 70% mass fraction is decreased by 40.9%. When the mass fractions are lower than 74%, high slump values are obtained. Based on the basic parameters obtained in the rheological tests, the key parameters of the pipeline system were calculated, including the critical flow rate and frictional resistance loss. These analyses results could serve as references for pipeline system design.

KEY WORDS mining engineering; tailings; rheological characteristic; slump test; frictional resistance loss

浆体管道水力输送具有连续作业、输运能力大、运输成本低等特点,是矿产资源运输的一种较适用和经济的运输方式^[1]。管道的水力输送设计,其关键在于输送过程中摩阻损失的计算。当矿浆固相含量较低时,尾矿浆体可按照固液两相流理论设计管道输送系统。当固相含量较高时,尾矿浆体属于非牛顿体,可基

于 Bingham 模型进行计算。

浆体流变特性参数包括屈服应力和黏度系数。不同学者根据工程需要,针对不同物料进行了大量关于尾矿浆体流变参数的试验研究。刘超等^[2]通过对乌山铜钼矿尾矿进行实验,分析了膏体浓度对泌水率、流变学等参数的影响。王新民等^[3]利用实验数据,建立金

川全尾砂膏体流变参数与固相质量分数等因素间数学关系. 王星等^[4]通过试验研究,分析了不同固相含量对赤泥的流变特性的影响. 刘桂华等^[5]研究了不同表面活性剂对尾矿浆体流变参数的影响. 廖威林与周小文^[6]研究了尾矿砂流变特性及其对溃坝尾砂下泄的影响. 张亮等^[7]分析了高浓度尾矿料浆的流变特性及其对管道输送阻力损失的影响.

工程中最早通常采用环管试验模拟生产实际情况,分析确定料浆的流变特性参数. 环管试验最大优点是充分考虑了浆体管道输送过程中各种因素的影响,试验过程和试验结果能够与工程实际基本吻合,但该方法试验成本高,仅用于大型高难度管道输送系统. 坍落度法最早是用来针对混凝土的和易性进行评估,其也可用于进行尾矿浆体的流变参数测定^[8],能比较直观地反应浆体的流动性,但该方法适用于固相含量较高的浆体,固相较少时误差较大. 沈慧明等^[9]进一步发展了利用小型圆柱坍落度检测尾矿膏体流变参数的方法. 本文采用目前国际上最先进的美国 Brookfield 公司的 RST-SST 型软固体流变仪针对尾矿浆体开展流变特性试验,同时对固相含量较高段浆体进行坍落度试验,分析了尾矿浆体的流变参数与料浆的固相质量分数之间的关系,并运用参数计算确定最佳的管道输送参数,该方法试验简单,结果相对可靠,可满足常规浆体输送系统设计的要求.

本项目尾矿库位于墨西哥奇瓦瓦州,主要产品为铜精矿和铅精矿. 尾矿经旋流器分级后中线法筑坝,溢流尾矿经浓缩至膏体状态后排往库内堆存. 本文针对不同矿浆固相质量分数(后文中也简称质量分数)确定流变参数,并推导出不同固相含量下矿浆的临界流速、工作流速,确定管道输送阻力,为矿山的排放设计提供科学依据.

1 尾矿料基本特性

通过对尾矿料开展密度、颗粒分析等基本性质试验,得到尾矿料的一些基本物理性质如表 1 所示. 表 1 中 d_{60} 、 d_{50} 及 d_{10} 代表尾矿样品的累计粒度分布百分数达到 60%、50% 和 10% 时所对应的粒径.

表 1 尾矿料基本物理性质
Table 1 Physical properties of tailings

$d_{60}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{10}/\mu\text{m}$	不均匀系数	真密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
49.4	34.0	4.0	12.42	2.77

2 流变试验

尾矿浆流变试验包括尾矿浆流变参数测试试验、浆体剪切变稀流变特性试验及浆体坍落度试验.

2.1 流变模型

流体在受到外部剪切力作用时发生流动变形,内部相应产生对变形的抵抗,并以内摩擦的形式表现出来. 这是流体的一种固有物理属性,称之为黏滞性或黏性. 根据不同的流变性能,可将流体分为牛顿流体和非牛顿流体. 牛顿流体的剪切应力与速度梯度呈线性关系:

$$\tau = \mu\dot{\gamma}. \quad (1)$$

式中: τ 代表剪切应力,Pa; μ 代表动力黏性系数,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} .

研究发现,对于固相含量较多的流体,如尾矿浆体,细颗粒会相互吸引形成紊团,随着固相含量的提高,紊团之间开始发生连接,形成松散的网状结构,称为紊团结构^[10-12]. 这种结构具有一定的抗剪强度,使得浆体具有一定的起始强度,称为屈服应力. 此时,可采用 Bingham 模型来描述其流变特性:

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}. \quad (2)$$

式中: τ_0 代表屈服应力,Pa; η 代表塑性黏度系数,Pa·s,是表征浆体内部结构阻碍流动变形大小的物理量. 当剪切应力高于屈服应力时,浆体流动时所产生的流动阻力大小由塑性黏度决定. 这两个流变参数值的变化主要受浆体的组成和浆体体系内的颗粒性质的影响.

2.2 试验仪器与试验标准

尾矿浆流变参数测试试验、浆体剪切变稀流变特性试验采用美国 Brookfield 公司的 RST-SST 型软固体流变仪进行,试验按照 ASTM C1752-11 标准执行.

浆体坍落度试验采用坍落度桶尺寸为:高 30 cm,上口直径 10 cm,下口直径 20 cm,试验按照 ASTM C143/C143M-12 标准执行.

2.3 试验参数

针对不同固相质量分数的尾矿浆进行流变参数测定试验,将搅拌好的砂浆放置在 RST-SST 型软固体流变仪下进行测试,剪切速率范围为 0 ~ 100 s^{-1} . 流变仪由低速档开始,逐渐增大,每秒记录一个读数,然后由统计软件显示出各剪切速率下对应的剪切应力,绘制出流变曲线.

对固相质量分数为 70% 的浆体进行剪切变稀流变特性试验,高速搅拌器的搅拌速度设置为 120、240、400、600、800 和 1000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,每次搅拌 3 min,流变仪剪切速率范围为 0 ~ 100 s^{-1} .

对固相质量分数为 65% ~ 78% 的尾矿浆体进行坍落度试验.

2.4 试验结果

(1) 尾矿浆流变参数试验.

对不同质量分数的尾矿浆进行流变参数测定试验,针对流变曲线进行拟合,得出尾矿浆的流变参数,

结果如表 2 所示。

表 2 尾矿浆体流变参数
Table 2 Rheological test results

固相质量分数/%	流变方程
25	$\tau = 0.042\gamma$
35	$\tau = 0.0561\gamma$
45	$\tau = 0.0878\gamma + 0.3432$
55	$\tau = 0.0922\gamma + 0.4445$
60	$\tau = 0.1133\gamma + 0.6097$
65	$\tau = 0.2311\gamma + 2.635$
70	$\tau = 0.2618\gamma + 36.372$
72	$\tau = 0.3863\gamma + 64.462$
74	$\tau = 0.3795\gamma + 120.61$
76	$\tau = 0.4264\gamma + 181.9349$

绘制固相质量分数与屈服应力之间的关系曲线如图 1 所示。固相质量分数大于 65% 后,尾矿浆体开始具备明显的 Bingham 流体特征,屈服应力随着固相含量的增加逐渐增大。在开始阶段,屈服应力上升较为缓慢,从质量分数 70% 开始,上升速度明显加快,当质量分数达到 76% 时,屈服应力可达到 182 Pa。当屈服应力较大时,输送难度增加。

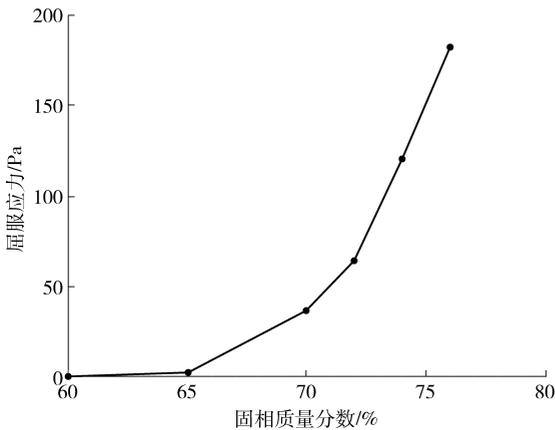


图 1 屈服应力与固相质量分数关系曲线

Fig. 1 Relationship between yield stress and mass fraction

(2) 浆体剪切变稀流变特性试验。

配置固相质量分数为 70% 的尾矿浆,在 120、240、400、600、800 和 1000 $r \cdot \min^{-1}$ 转速下,采用高速活化搅拌机对尾矿浆进行剪切搅拌,并对剪切后的浆体进行流变参数测试。将不同转速搅拌后的浆体的流变参数曲线进行拟合,结果如表 3 所示,屈服应力随转速的关系如图 2 所示。

可见,随着高速活化搅拌器的转速提高,尾矿浆的屈服应力明显降低,具有明显的剪切变稀现象。剪切过程使得尾矿浆体的结构遭到破坏,黏度迅速降低。

表 3 不同转速下的流变方程

Table 3 Rheological test results after stirring

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	流变方程
120	$\tau = 0.2618\gamma + 36.372$
240	$\tau = 0.2604\gamma + 22.6354$
400	$\tau = 0.2509\gamma + 22.0624$
600	$\tau = 0.15\gamma + 21.6805$
800	$\tau = 0.1551\gamma + 21.5495$
1000	$\tau = 0.1665\gamma + 21.4935$

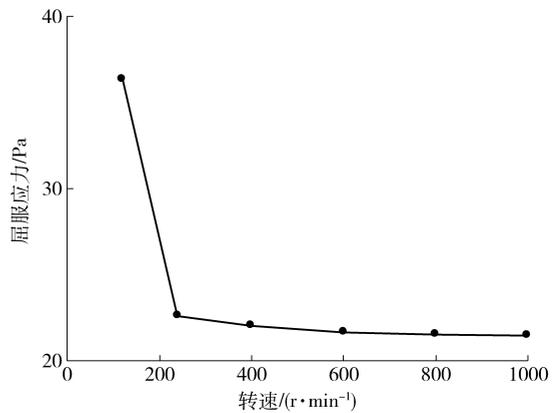


图 2 屈服应力与转速关系

Fig. 2 Relationship between yield stress and rotation speed

剪切速率越高,则浆体受到的外力作用越强,结构破坏越充分。当转速从 120 $r \cdot \min^{-1}$ 提高到 240 $r \cdot \min^{-1}$ 后,屈服应力下降了 37.8%,再提高转速,其屈服应力基本保持不变。当转速从 400 $r \cdot \min^{-1}$ 提高到 600 $r \cdot \min^{-1}$,塑性黏度系数有了较大下降。屈服应力最大下降达到 40.9%,黏度系数最大下降了 42.7%。因此,在浆体进入管道输送系统前,可设置搅拌装置,降低其黏度,进一步减少输送过程中的能耗损失。

(3) 浆体坍塌度试验。

一般认为,泵送膏体坍塌度应为 15 ~ 20 cm^[13-14],自流输送料浆坍塌度为 23 ~ 27 cm^[15-16]。根据金川镍矿、铜绿山铜矿等矿山实践经验,结合矿山胶结充填理论,认为当胶结料浆坍塌度范围在 25 ~ 28 cm 时,均具有较好的流动性^[17]。

试验得到的尾矿浆体坍塌度整理如表 4 所示。可见,当料浆的固相质量分数在 74% 以下时,尾矿料浆均具有较好的流动性,可用于自流输送。

表 4 坍塌度试验结果

Table 4 Slump test results

固相质量分数/%	65	70	72	74	75	76	78
坍塌度/cm	28.8	27.6	27.1	26.5	25.4	22.6	17.5

2.5 试验结果总结

(1) 对于墨西哥巴霍拉齐铜矿尾矿料,可以使用

Bingham 模型来描述其高质量分数段矿浆的流变特性.

(2)料浆的固相质量分数对于料浆屈服应力的影响较为显著,当固相质量分数达到 70% 之前,屈服应力上升较为缓慢,之后,料浆的屈服应力会随着固相含量的增加而显著增加.

(3)经过快速剪切搅拌后,尾矿浆体的结构遭到破坏,屈服应力出现大幅降低.

(4)料浆的固相质量分数小于 74% 时,坍塌度较大,料浆的流动性较好.

3 管道输送阻力计算

在尾矿基础参数试验及矿浆流变试验的基础上,可计算分析尾矿浆管道输送临界流速与摩阻损失等关键工艺技术参数,进而确定尾矿管道输送工艺参数,为尾矿管道输送系统设计提供参考.

3.1 临界流速计算

根据工程经验及设计规范,对于尾矿粒径 $d < 0.5 \text{ mm}$ 的复合流态尾矿浆体,其管道输送临界流速采用刘德忠公式与 E. J. 瓦斯普公式进行计算具有较好的适用性. 对此本项目采用刘德忠公式与 E. J. 瓦斯普公式分别进行计算,对比后取大值作为临界流速. 刘德忠公式见公式(3),E. J. 瓦斯普公式见公式(4),取二者的较大值.

$$V_c = 9.5 \left[gD \left(\frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_l} \right) \omega \right]^{1/3} \varphi^{1/6} \left(\frac{\omega_s}{\omega} \right)^{1/6}, \quad (3)$$

$$V_c = 3.113 \varphi^{0.1858} \left[2gD \left(\frac{\rho_g - \rho_k}{\rho_k} \right) \right]^{1/2} \left(\frac{d_{85}}{D} \right)^{1/6}. \quad (4)$$

其中: φ 为尾矿浆体体积分数; ρ_k 为尾矿浆体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_l 为尾矿浆体细颗粒似均质部分密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_g 为固体颗粒的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ω 为尾矿颗粒在似均质部分加权平均沉速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ω_s 为尾矿在水中加权平均沉速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; D 为管道内径, m ; d_{85} 代表尾矿样品的累计粒度分布百分数达到 85% 时所对应的粒径, μm ; g 为重力加速度, $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

通过对不同固相质量分数、不同管径下的临界流速进行计算,可以为后续分析提供基础. 部分计算结果如表 5 所示.

表 5 临界速度计算结果

Table 5 Critical flow rates in tailings slurry pipelining

固相质量 分数/%	D/mm						
	500	550	600	650	820	920	1020
25	1.873	1.873	1.873	1.873	1.874	1.874	1.874
30	1.867	1.868	1.868	1.868	1.869	1.870	1.870
35	1.795	1.796	1.796	1.796	1.872	1.797	1.798
60	1.364	1.365	1.365	1.365	1.366	1.367	1.368
65	1.172	1.173	1.173	1.173	1.174	1.174	1.174

临界流速随管径的增大而增大,随固相质量分数的增大而减小. 根据计算的临界流速,可以设计选择管道工作流速,根据浆体管线设计,管道工作流速与临界流速关系应为 $V = 1.1 \sim 1.15 V_c$, V 为管道工作流速, V_c 为管道临界流速.

3.2 管道输送摩阻损失计算

通过浆体流态判别,该项目浆体属于复合流态,管道复合流态摩阻损失按下式计算:

$$i_k = i_1 + \Delta i_2. \quad (5)$$

其中, i_k 按照 Darcy-Weisbach 公式进行计算:

$$i_1 = \lambda \frac{V^2 \rho_k}{2gD\rho_0}. \quad (6)$$

ρ_k 为浆体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_0 为水密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Δi_2 按照 E. J. 瓦斯普-R. 杜兰德公式进行计算:

$$\Delta i_2 = K \cdot i_1 \left[\frac{gD \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} - 1 \right)}{V^2} \right]^{1.5} \varphi C_D^{-0.75}, \quad (7)$$

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{gd_i \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} - 1 \right)}{\omega_i^2}. \quad (8)$$

式中, i_k 为复合流态摩阻损失; i_1 为似均质部分摩阻损失; Δi_2 为非均质部分摩阻损失; C_D 为尾矿颗粒在载体似均质部分沉降阻力系数; d_i 为复合流态中似均质部分浆体所占比例对应的粒径, μm ; ω_i 为尾矿在载体似均质部分沉速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; λ 为达西摩阻系数; K 为似均质部分所占比例调整系数,复合流态可根据似均质部分占的比重多少酌量选取,若均质部分占比较多,可取 $K = 150$,若非均质部分占比较多,可取 $K = 82$.

根据巴霍拉齐铜矿尾矿排放方案,可计算不同管径、固相质量分数、工作流速条件下的摩阻损失. 分两组进行计算,分别为高质量分数段摩阻损失和低质量分数段摩阻损失计算.

仅以管道内径 $D_1 = 650 \text{ mm}$ 和 $D_2 = 1020 \text{ mm}$ 的计算结果为例,说明计算结果以及摩阻损失与工作流速关系曲线如表 6 和图 3,表 7 和图 4 所示.

表 6 管径 $D_1 = 650 \text{ mm}$ 摩阻损失计算结果

Table 6 Frictional resistance loss of tailings slurry with $D_1 = 650 \text{ mm}$ in steel pipes

固相质量 分数/%	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$					
	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2
60	0.0092	0.0102	0.0113	0.0124	0.0136	0.0160
65	0.0115	0.0128	0.0141	0.0155	0.0170	0.0200

随着工作流速的上升,摩阻损失也逐渐增加. 在相同流速下,摩阻损失也随着固相含量的增加而增加. 根据尾矿产量,可确定在使用不同管径下矿浆的工作

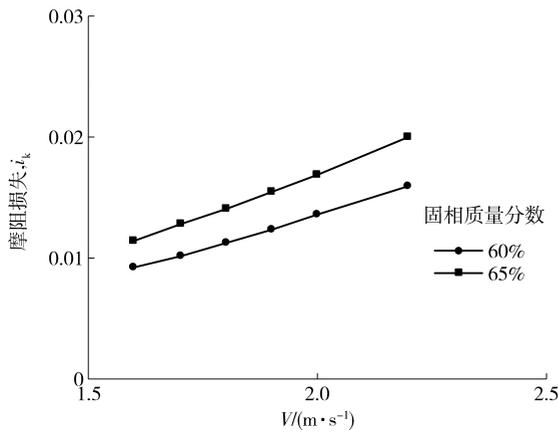


图3 $D_1 = 650$ mm 管道计算的 $i_k - V$ 曲线

Fig. 3 $i_k - V$ curves with $D_1 = 650$ mm

表7 管径 $D_2 = 1020$ mm 摩阻损失计算结果

Table 7 Frictional resistance loss of tailings slurry with $D_2 = 1020$ mm in steel pipes

固相质量 分数/%	$V/(m \cdot s^{-1})$					
	1.8	1.9	2.0	2.2	2.4	2.6
25	0.0040	0.0044	0.0049	0.0058	0.0068	0.0078
30	0.0043	0.0048	0.0052	0.0062	0.0073	0.0084
35	0.0046	0.0050	0.0055	0.0065	0.0076	0.0088

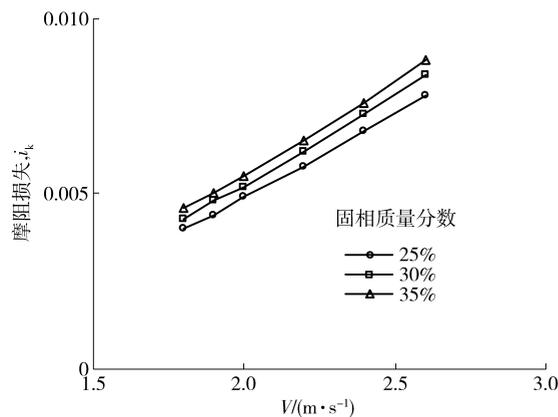


图4 $D_2 = 1020$ mm 管道计算的 $i_k - V$ 曲线

Fig. 4 $i_k - V$ curves with $D_2 = 1020$ mm

流速,计算得到不同输送方案下对应的摩阻损失,为确定采用单条大管径输送 ($D_2 = 1020$ mm) 和多条管径 ($D_1 = 650$ mm) 方案的经济对比提供了基础参数。

4 结论

从流变试验、坍塌度试验以及管道参数计算,可得到下列结论。

(1) 使用 Bingham 模型可以较好描述尾矿的流变特性。当尾矿固相质量分数达到 70% 后,尾矿浆体的屈服应力随固相含量的增加而急剧上升。

(2) 尾矿浆体具有明显剪切变稀现象,屈服应力可减小 40.9%,黏度系数最大可减小 42.7%。

(3) 尾矿固相质量分数小于 70% 时,尾矿浆体具有较好的流动性,坍塌度值较大。

(4) 根据流变试验及坍塌度试验结果,选厂尾矿采用低质量分数排放时,输送至分级站的料浆质量分数在 25% ~ 35% 较为合理,并计算了相应的输送参数,为输送管道的设计提供了相应的参数;选厂尾矿采用高质量分数直排尾矿库时,料浆质量分数在 60% ~ 65% 较为合理,并计算了相应的输送参数,为输送管道的设计提供了相应的参数。

(5) 采用流变仪测定尾矿浆体的流变参数,计算尾矿的临界流速、不同管径、不同流速下浆体管道输送的摩阻损失,从而为确定采用单条大管径输送 ($D_2 = 1020$ mm) 和多条管径 ($D_1 = 650$ mm) 方案的经济对比提供了基础参数,可为同类项目设计提供经验参考。

参 考 文 献

- [1] Li A, Cao S R, Liu H B, et al. Critical flow rate for slurry pipeline transportation. *Min Metall Eng*, 2016, 36(1): 26
(李安,曹书荣,刘宏波,等. 浆体管道输送临界流速的研究. 矿冶工程, 2016, 36(1): 26)
- [2] Liu C, Wang H J, Wu A X, et al. Determination of concentration range of fine unclassified tailings paste in copper-molybdenum mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2015, 34(Suppl 1): 3432
(刘超,王洪江,吴爱祥,等. 铜钼矿细粒全尾膏体浓度范围确定. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3432)
- [3] Wang X M, Xiao W G, Wang X W, et al. Study on rheological properties of full tailing paste filling slurry of Jinchuan Mine. *Min Metall Eng*, 2002, 22(3): 13
(王新民,肖卫国,王小卫,等. 金川全尾砂膏体充填料浆流变特性研究. 矿冶工程, 2002, 22(3): 13)
- [4] Wang X, Zhao X Y, Qu Y Y, et al. Experimental research on particle characteristics and rheological properties of high concentration red mud. *Met Mine*, 2008(1): 107
(王星,赵学义,瞿圆媛,等. 高浓度赤泥颗粒特性和流变特性的试验研究. 金属矿山, 2008(1): 107)
- [5] Liu G H, Huang Y J, Zhang M, et al. Influence of surfactants on the rheological properties of Bauxite tailings. *Min Metall Eng*, 2009, 29(2): 25
(刘桂华,黄亚军,张明,等. 表面活性剂对铝土矿选矿尾矿流变性的影响. 矿冶工程, 2009, 29(2): 25)
- [6] Liao W L, Zhou X W. Study on the rheological characteristic of tailing slurry and its influence on tailing flow after dam-break. *Chin J Undergr Space Eng*, 2015, 11(Suppl 1): 282
(廖威林,周小文. 尾矿砂流变特性及其对溃坝尾砂下泄影响研究. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊1): 282)
- [7] Zhang L, Luo T, Zhu Z C, et al. Study on the rheological characteristics of high-concentration filling mixture and its resistance loss in pipeline transportation. *Chin Min Maga*, 2014, 23(Suppl 2): 301

- (张亮, 罗涛, 朱志成, 等. 高浓度充填料浆流变特性及其管道输送阻力损失研究. 中国矿业, 2014, 23(增刊 2): 301)
- [8] Gawu S K Y, Fourie A B. Assessment of the modified slump test as a measure of the yield stress of high-density thickened tailings. *Can Geotech J*, 2004, 41(1): 39
- [9] Shen H M, Wu A X, Jiang L C, et al. Small cylindrical slump test for unclassified tailings paste. *J Central S Univ Sci Technol*, 2016, 47(1): 204
(沈慧明, 吴爱祥, 姜立春, 等. 全尾砂膏体小型圆柱塌落度检测. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1): 204)
- [10] Wu A X, Liu X H, Wang H J, et al. Calculation of resistance in total tailings paste piping transportation based on time-varying behavior. *J China Univ Min Technol*, 2013, 42(5): 736
(吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 等. 考虑时变性的全尾膏体管输阻力计算. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 736)
- [11] Han W L. The stress relaxation model of fine particle slurry. *J Sediment Res*, 1991(3): 87
(韩文亮. 细颗粒浆体的应力松弛模型. 泥沙研究, 1991(3): 87)
- [12] Wu A X, Liu X H, Wang H J, et al. Microstructural evolution characteristics of an unclassified tailing paste in constant shearing. *Chin J Eng*, 2015, 37(2): 145
(吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 等. 恒定剪切作用下全尾膏体微观结构演化特征. 工程科学学报, 2015, 37(2): 145)
- [13] Belem T, Benzaazoua M. Design and application of underground mine paste backfill technology. *Geotech Geol Eng*, 2008, 26(2): 147
- [14] Kwak M, James D F, Klein K A. Flow behaviour of tailings paste for surface disposal. *Int J Miner Process*, 2005, 77(3): 139
- [15] Cooke R. Design procedure for hydraulic backfill distribution systems. *J S Afr Inst Min Metall*, 2001, 101(2): 97
- [16] Ouellet S, Bussière B, Aubertin M, et al. Microstructural evolution of cemented paste backfill; mercury intrusion porosimetry test results. *Cem Concr Res*, 2007, 37(12): 1654
- [17] Sun D M, Ren J H, Jiao H Z, et al. Study on the properties of the unclassified tailings cemented backfill materials in a mine. *Met Mine*, 2012(3): 6
(孙德民, 任建华, 焦华喆, 等. 某矿全尾砂胶结充填物料性能研究. 金属矿山, 2012(3): 6)