

# 超细磨矿物矿浆温度和浓度与黏度相关性分析<sup>①</sup>

杨 玮<sup>1,2</sup>, 王文涛<sup>1,2</sup>, 张伟晓<sup>3</sup>, 叶金秋<sup>1,2</sup>

(1.西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2.陕西省黄金与资源重点实验室, 陕西 西安 710055; 3.灵宝灵金科技有限公司, 河南 灵宝 472500)

**摘要:** 以 5~30  $\mu\text{m}$  石英与黄铁矿为研究对象, 在不同温度、不同矿浆浓度条件下进行黏度试验, 探究石英矿和黄铁矿在超细磨条件下的黏度变化规律。结果表明, 相同粒度条件下, 石英和黄铁矿的黏度都随矿浆浓度增大而增大, 粒度越细, 黏度增幅越大, 且石英黏度变化幅度比黄铁矿更明显; 相同矿浆浓度条件下, 石英和黄铁矿的黏度都随温度升高呈先降再升趋势, 且粒度越细影响越显著。回归分析结果表明, 石英和黄铁矿的黏度与矿浆浓度之间均符合指数拟合模型; 在超细磨过程中, 矿浆浓度不宜超过 40%, 矿浆温度宜控制在 50  $^{\circ}\text{C}$  左右, 该参数条件有利于提高磨矿效率。

**关键词:** 超细磨; 石英; 黄铁矿; 超细颗粒; 矿浆黏度; 矿浆温度; 矿浆浓度; 回归分析

中图分类号: TD921

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.010

文章编号: 0253-6099(2023)02-0044-04

## Correlation Analysis of Viscosity with Temperature and Concentration of Ultrafine Mineral Slurry

YANG Wei<sup>1,2</sup>, WANG Wentao<sup>1,2</sup>, ZHANG Weixiao<sup>3</sup>, YE Jinqiu<sup>1,2</sup>

(1. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Gold and Resources in Shaanxi Province, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. Lingbao Lingjin Technology Co Ltd, Lingbao 472500, Henan, China)

**Abstract:** Pure quartz and pyrite minerals in the size range of 5–30  $\mu\text{m}$  were taken in an experiment on viscosity under different pulp temperature and concentration conditions, for investigating the viscosity variation law of ultrafine particles. The results show that the viscosity for both minerals within the same size range increases along with the increase of pulp concentration, and the finer the particle, the greater the increasing rate. Furthermore, the viscosity variation of quartz is more remarkable. With the same pulp concentration, the viscosity of both minerals displays a declining-ascending trend as the temperature rises, which is more significant for finer minerals. The regression analysis shows that the correlation between viscosity and concentration of quartz and pyrite slurry are in line with the exponential fitting model. According to this analysis, the pulp concentration for ultrafine grinding should not exceed 40% and the optimum pulp temperature should be regulated at 50  $^{\circ}\text{C}$ , which is beneficial for improving grinding efficiency.

**Key words:** ultrafine grinding; quartz; pyrite; ultrafine particles; pulp viscosity; pulp temperature; pulp concentration; regression analysis

当前矿产资源趋于“贫、细、杂”, 为保证目的矿物单体解离与高效回收, 对磨矿细度要求越来越高。超细磨是达到磨矿细度要求的关键, 但矿物超细粉碎过程中, 矿物颗粒之间流动性变差, 矿浆黏度增大, 导致磨矿时间、成本增加且磨矿效率变低。因此探究超细

微粒矿物黏度变化情况、提高超细磨装备的磨矿效率和运行经济性成为当前研究人员关注的热点。

超细磨矿中研磨桶内微细颗粒与水形成的矿浆是一种非牛顿流体<sup>[1]</sup>, 此时黏度值很高, 矿浆的流变性发生了改变, 颗粒之间研磨效果降低。有学者研究了

① 收稿日期: 2022-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(52174261)

作者简介: 杨 玮(1971—), 男, 河南灵宝人, 博士, 教授, 主要研究方向为选矿、湿法冶金及资源综合利用。

通信作者: 王文涛(1997—), 男, 河南周口人, 主要研究方向为超细磨装备技术理论。

不同矿石在超细粉体状态下黏度变化情况,发现不同矿石在不同细磨条件下黏度变化受多因素影响,变化规律也各不相同<sup>[2-11]</sup>,且研究多基于矿石粒度 35  $\mu\text{m}$  以上的某种特定矿石(铁、黏土等)进行。本文选用矿石中常见的脉石矿物石英和金属矿物黄铁矿两种矿物,研究矿物经超细磨后在不同矿浆温度和矿浆浓度条件下的黏度变化特性,利用 Einstein 模型<sup>[12]</sup>、指数模型<sup>[13]</sup>对数据进行拟合和相关性分析,以探究矿浆温度和矿浆浓度对黏度的影响规律,为矿石的超细磨作业提供理论依据。

## 1 实验方法

纯矿物石英、黄铁矿和实际矿物金精矿均来自于灵宝灵金科技有限公司。实际矿物金精矿组成与相对含量如表 1 所示。

表 1 实际矿物金精矿组成与相对含量(质量分数) %

黄铁矿	磁黄铁矿	毒砂	石英	绢云母
46.19	3.47	5.48	11.32	5.68
绿泥石	绿帘石	石墨	其他硫化物	碳酸盐及其他
4.33	5.13	9.82	0.45	8.13

首先使用对辊破碎机将石英、黄铁矿纯矿物分别粉碎至 -2 mm 后按每份 500 g 装样,然后采用实验室自制 LJM3.5L 卧式超细磨机进行磨矿,磨机填充率 60%,矿浆浓度 50%,经过不同磨矿时间,分别将石英和黄铁矿纯矿物磨至 30  $\mu\text{m}$ 、20  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$  和 5  $\mu\text{m}$ ,将得到的石英矿浆烘干,对黄铁矿则进行 50  $^{\circ}\text{C}$  低温烘干。

采用邦西仪器科技(上海)有限公司生产的 NDJ-5S 数显黏度计测量黏度。在 500 mL 烧杯中配制质量浓度分别为 10%、20%、30%、40%、50%、60% 的矿浆。由于矿浆悬浮性较差,测量前用实验室搅拌机搅拌 3 min 使其完全分散,搅拌完后立即将转子浸入矿浆中进行测量,待示数稳定后读取数值,为防止实验误差,对每个矿浆测量 10 次黏度,取其平均值。采用恒温水浴锅加热的方式控制矿浆温度。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 石英和黄铁矿纯矿物黏度测量结果

不同条件下石英和黄铁矿的黏度测量结果如表 2~3 所示。分析表 2~3 数据可知,相同粒度条件下,石英与黄铁矿黏度都随矿浆浓度增大而增大,粒度越细,黏度增幅越大,且石英黏度变化幅度比黄铁矿更明显;相同矿浆浓度条件下,石英和黄铁矿黏度均随温度升高

呈先降再升趋势,粒度越细影响越显著;相同粒度和矿浆浓度条件下,随着温度从 40  $^{\circ}\text{C}$  升至 50  $^{\circ}\text{C}$ ,石英与黄铁矿黏度均呈下降趋势;温度由 50  $^{\circ}\text{C}$  升至 70  $^{\circ}\text{C}$ ,石英与黄铁矿黏度均呈上升趋势,且石英黏度的变化更显著。

表 2 石英黏度测量结果

矿浆温度/ $^{\circ}\text{C}$	矿浆浓度/%	不同粒度矿物黏度/( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )			
		5 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
30	30	10.50	6.89	4.87	5.87
	40	293.00	6.89	9.61	10.99
	50	380.00	37.25	21.62	15.94
	60	390.00	348.50	33.58	76.20
40	30	10.00	6.95	4.72	5.83
	40	287.00	12.01	10.43	10.79
	50	330.00	28.72	13.57	14.32
	60	377.00	338.3	30.80	68.55
50	30	9.80	6.95	4.32	5.16
	40	279.00	11.23	10.71	10.88
	50	280.00	27.17	13.45	15.75
	60	368.50	313.90	29.40	65.23
60	30	11.00	7.00	3.98	4.97
	40	308.00	10.37	11.70	11.95
	50	293.00	28.31	14.39	14.84
	60	420.00	365.43	31.33	81.03
70	30	11.50	7.04	4.01	4.70
	40	317.00	12.59	12.36	12.00
	50	297.00	29.35	13.55	15.80
	60	435.70	396.10	34.93	83.30

表 3 黄铁矿黏度测量结果

矿浆温度/ $^{\circ}\text{C}$	矿浆浓度/%	不同粒度矿物黏度/( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )			
		5 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
30	30	6.05	7.41	9.40	5.99
	40	53.00	17.27	28.55	10.18
	50	84.67	43.20	36.45	14.14
	60	132.60	77.02	64.20	27.68
40	30	5.98	8.05	8.94	5.85
	40	49.74	17.69	25.07	10.01
	50	82.54	61.50	32.00	14.95
	60	128.20	75.69	60.00	24.15
50	30	5.92	8.90	7.70	5.67
	40	47.68	19.63	21.69	10.52
	50	80.18	59.75	32.40	14.95
	60	126.15	72.89	59.25	23.33
60	30	5.80	9.65	7.71	5.67
	40	48.84	25.16	19.59	10.25
	50	100.40	65.75	31.96	14.55
	60	164.30	83.16	57.05	23.59
70	30	5.68	9.29	7.57	5.83
	40	63.50	18.05	18.95	10.10
	50	113.00	67.74	36.30	14.91
	60	181.20	87.63	58.20	23.37

随着温度升高,浆体体积膨大,浆体中固体颗粒间距增加,各离子自由运动幅度增大,相互吸引力减少,黏度降低。但当温度超过 50 ℃ 以后,矿物颗粒大小直接影响矿浆黏度。颗粒越细,比表面积增大,颗粒间吸附作用增强,黏度增加。在超细磨矿过程中,随着粉磨的进行,矿石颗粒与研磨介质发生激烈碰撞摩擦,研磨桶内矿浆温度升高,研磨桶表面温度可达 50 ℃ 以上,黄铁矿和石英黏度增加,矿浆在研磨桶内的流动性变差,进而使得研磨时间增长,研磨效率降低,不利于矿石的高效粉碎。

石英和黄铁矿在卧式超细磨机中的磨矿曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,矿石细度由 30 μm 降到 10 μm 这个过程仅用了 1.1 min,但矿石粒度降到 5 μm,磨矿所需时间增长到 8 min。从图 1 也可以看出,石英比黄铁矿难磨,所消耗的磨矿时间也更长,此时研磨筒温度为 63 ℃。从这些情况来看,随着温度升高,矿浆黏度升高。所以在进行超细磨矿时,研磨矿浆温度不宜过高,研磨桶内适宜的工作温度应低于 50 ℃,防止温度过高影响研磨效果。

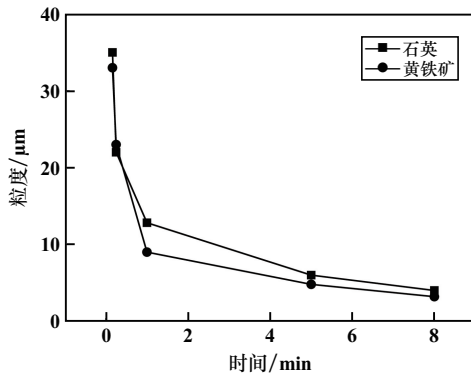


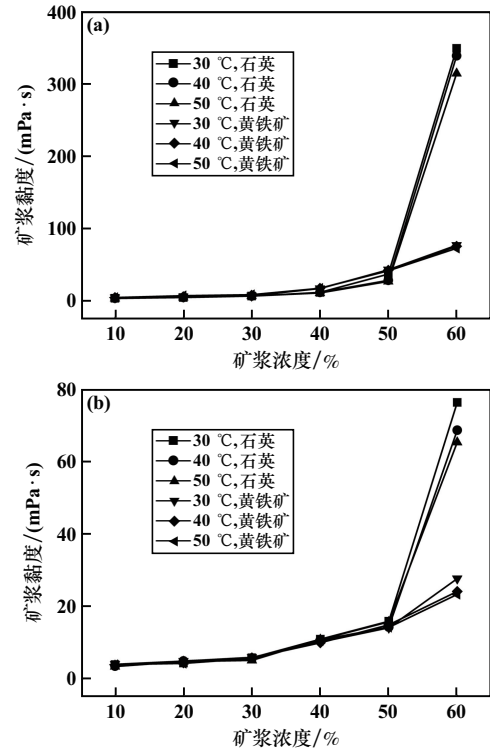
图 1 石英矿和黄铁矿的磨矿曲线

## 2.2 相关性分析

### 2.2.1 纯矿物矿浆浓度与黏度的相关性

石英和黄铁矿纯矿物矿浆浓度与黏度的关系如图 2 所示。由图 2 可以发现,黏度随着浓度增加呈指数形式上升。随着矿浆浓度提高,浆体中固体颗粒含量增加,体系中溶剂量相对变少,溶液作为颗粒之间的自由相,在浆体流动时可以起到润滑作用。液相分子的相对减少,导致矿浆流动时的润滑作用降低,阻力增加,表现为黏度增加。

到目前为止,大部分黏度计算公式通过 Einstein 模型演变而来,但这些公式大多只适用于悬浮有毫米级粒子的固液混合物,并未考虑其他因素对两相流体黏度的影响,特别是在超细微粒状态下,这些黏度公式



(a)  $d_{90} = 10 \mu\text{m}$ ; (b)  $d_{90} = 30 \mu\text{m}$

图 2 石英和黄铁矿纯矿物矿浆浓度与黏度的关系

已不适用。本文结合实验数据提出一个适用于超细微粒状态的黏度计算公式:

$$y = ae^{-x/b} + c \quad (1)$$

式中  $y$  为黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $x$  为矿浆浓度, %;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  均为模型参数。具体参数拟合结果如表 4 所示。

表 4 参数拟合结果

矿石类型	矿石粒度/ $\mu\text{m}$	矿浆温度/ $^{\circ}\text{C}$	模型参数			$R^2$
			$a$	$b$	$c$	
石英	10	30	$2.31246 \times 10^{-4}$	-4.222 11	5.106 2	0.999 8
		40	$4.00257 \times 10^{-5}$	-3.765 63	5.481 1	0.999 8
		50	$6.56742 \times 10^{-5}$	-3.905 81	5.636 4	0.999 8
	30	30	$1.47000 \times 10^{-3}$	-5.566 07	5.609 7	0.994 9
		40	$9.23110 \times 10^{-4}$	-5.428 04	5.750 1	0.994 9
		50	$4.32000 \times 10^{-3}$	-6.291 16	5.229 4	0.994 8
黄铁矿	10	30	1.15479	-13.858 5	0.897 5	0.993 7
		40	7.478 70	-12.530 4	2.340 1	0.996 7
		50	9.079 00	-13.256 7	1.872 1	0.995 9
	30	30	0.267 81	-13.374 6	3.725 2	0.994 6
		40	0.858 05	-18.456 8	2.079 9	0.997 8
		50	0.930 54	-19.166 4	1.995 7	0.994 8

从表 4 可知,通过数据拟合,石英和黄铁矿黏度与矿浆浓度之间具有指数函数关系,且拟合相关系数保持在 0.993 以上,拟合准确度较高,能很好地反映黏度与矿浆浓度的相关性。另外,不同矿浆温度条件下拟合公

式参数不同,较为准确地显示了在超细颗粒状态下公式的适用性。分析结果表明,进行超细磨矿作业时,矿浆浓度应小于50%,适宜的磨矿浓度宜在40%左右。

### 2.2.2 金精矿实际矿物矿浆浓度与黏度相关性

为了探究式(1)是否具有普适性,采用某金精矿实际矿物进行了黏度测量,结果如图3所示。对曲线进行拟合,得到矿物粒度30 μm时的黏度拟合公式为:

$$y = 1.1e^{x^{9.6}} - 9.1 \quad (2)$$

矿物粒度10 μm时的黏度拟合公式为:

$$y = 10e^{x^{13}} - 41 \quad (3)$$

随着矿浆浓度增加,实际矿物黏度呈指数变化。从拟合结果可以发现,矿浆温度30~50℃、矿物粒度30 μm和10 μm时都可用此黏度公式计算矿物黏度,相关系数在0.99以上。在进行相似矿物粉磨时,通过此模型可以了解黏度变化情况,对相似矿物在超细磨时矿物研磨效果具有一定参考意义。

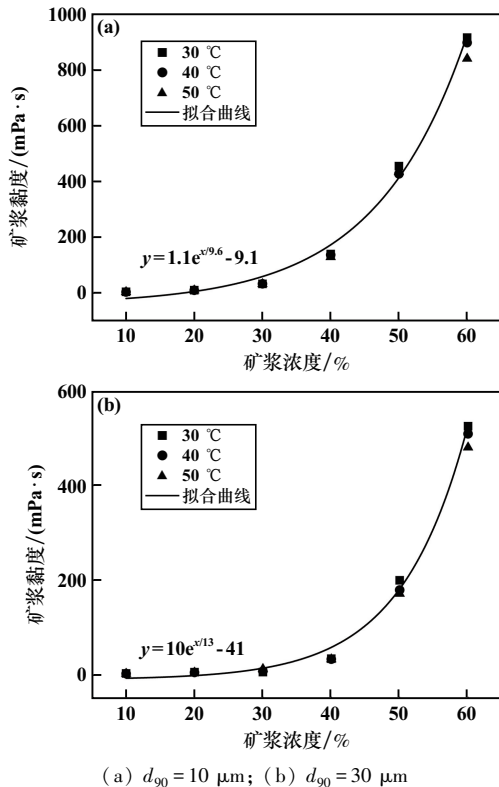


图3 实际矿物金精矿黏度与矿浆浓度的拟合曲线

## 3 结 论

1) 相同矿石粒度和矿浆浓度条件下,温度在40~50℃时,石英与黄铁矿黏度随温度升高呈下降趋势;温度高于50℃时,石英与黄铁矿黏度随温度升高呈上升趋势,且粒度越细,黏度变化越显著,这是由于升高

温度和减小矿物颗粒粒度时,比表面积增大,颗粒间吸附作用增强,黏度增加。

2) 磨矿过程中,矿浆温度超过50℃后,矿浆黏度升高,导致矿浆流变性变差,恶化磨矿效果。超细磨设备应设计冷却系统,降低设备工作温度、提高磨矿效率。

3) 石英与黄铁矿黏度与矿浆浓度呈指数函数关系;矿浆浓度小于30%时,石英与黄铁矿黏度变化不大;矿浆浓度大于30%时,黏度开始增加;矿浆浓度大于40%时,黏度显著升高,流变性变差,不利于磨矿。随着粒度减小,黏度相应增加,粒度越细,黏度增幅越大,且石英黏度的变化幅度比黄铁矿更明显。

4) 通过实际矿物验证了黏度与矿浆浓度拟合公式的普适性。拟合公式可为矿浆流场仿真模拟提供相应的黏度值,以提高仿真的可靠性,且对优化磨矿作业条件、提高磨矿效率具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 李葵英. 界面与胶体的物理化学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [2] 汪 彬,李茂林,崔 瑞,等. 鄂西高磷鲕状赤铁矿矿浆粘度影响因素研究[J]. 金属矿山, 2011(6):109-112.
- [3] 蔡 爽,蔡 威,滕桂平,等. 矿浆浓度及粒度组成对某锌浸出渣分离粒度及磨矿参数的影响[J]. 矿产综合利用, 2018(4):46-49.
- [4] ZHANG Ming, PENG Yongjun. Effect of clay minerals on pulp rheology and the flotation of copper and gold minerals[J]. Minerals Engineering, 2015,70:8-13.
- [5] NIU J, WANG B, FENG C, et al. Experimental Research on Viscosity Characteristics of Grouting Slurry in a High Ground Temperature Environment[J]. Materials, 2020,13(14):1-23.
- [6] 雷绍民,龚文琪. 硬质高岭土超细磨矿过程中的流变性[J]. 矿冶工程, 2002(3):57-59.
- [7] 龙海潮,夏建新,曹 斌,等. 粗细物料配比对浆体流变特性影响研究[J]. 矿冶工程, 2017,37(2):6-9.
- [8] 罗仙平,张博远,张 燕,等. 微细粒辉石矿浆流变性特征及对浮选的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2022,51(3):503-512.
- [9] 胡家城,余晓光,石 晴,等. 蛇纹石浓度对黄铜矿矿浆流变性和浮选的影响[J]. 金属矿山, 2020(12):125-129.
- [10] 苗海龙,邱正松,李自立,等. 重晶石粉颗粒级配对高密度钻井液性能影响的实验探讨[J]. 当代化工, 2021,50(5):1090-1093.
- [11] 曹华德,曹 斌,夏建新. 颗粒物料浆体流变特性变化及其机理分析[J]. 矿冶工程, 2014,34(2):1-4.
- [12] Woolard E W. Investigations on the Theory of the Brownian Movement[M]. Dover Publications Inc, 1956.
- [13] 凌智勇,孙东健,张忠强,等. 温度和颗粒浓度对纳米流体黏度的影响[J]. 功能材料, 2013,44(1):92-95.

引用本文: 杨 玮,王文涛,张伟晓,等. 超细磨矿物矿浆温度和浓度与黏度相关性分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):44-47.