

液体介质对黄铁矿超细粉碎的影响

刘文萍^{1,2}, 尹周澜¹, 丁治英¹, 陈启元¹

(1. 中南大学 化学化工学院, 长沙 410083;

2. 吉首大学 化学化工学院, 吉首 416000)

摘要: 以水和乙醇为液体介质, 在一定的研磨条件下, 对黄铁矿粉体粒度和矿浆粘度随研磨时间的变化进行了研究, 并通过对黄铁矿粉体在水和乙醇中的润湿性、 ζ 电位、分散性的测定和扩展双电层(EDLVO)理论计算, 分析了引起这些变化的原因。结果表明: 在超细湿磨过程中, 矿浆粘度适当时, 才会获得较高的研磨效率; 液体介质对粉体颗粒的界面作用影响很大, 而粉体颗粒的界面作用决定了研磨过程中矿浆粘度的大小, 从而影响研磨效率。

关键词: 黄铁矿; 超细粉碎; 液体介质; 界面作用

中图分类号: TD 92

文献标识码: A

Influence of liquid medium on ultrafine grinding of pyrite

LIU Wen-ping^{1,2}, YIN Zhou-lan¹, DING Zhi-ying¹, CHEN Qi-yuan¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: With ethanol or water as liquid medium, the changes of particle size and slurry viscosity of pyrite powder with the grinding time on the same grinding condition were studied. The possible reasons were analyzed by the measurements of wettability, zeta potential, dispersibility of pyrite in water and ethanol and by the calculation of EDLVO theory. The results show that higher grinding efficiency can be obtained at an appropriate slurry viscosity in the ultrafine grinding process. Liquid medium may change the interface interaction of particles that predominates the slurry viscosity and thus the grinding efficiency.

Key words: pyrite; ultrafine grinding; liquid medium; interface interaction

黄铁矿粉体是一种催化活性高、廉价易得、对环境友好的煤直接液化用催化剂^[1-3]。理想的煤直接液化用催化剂除了要具有高活性和良好的键裂解选择性外, 还要有高表面积, 以促进催化剂与煤的相互接触, 增大二者之间相互作用程度, 因此煤直接液化用催化剂的研究重点是开发超细分散型催化剂, 减少加入量, 提高油收率^[4]。考虑到催化剂的制备要经济合理, 对煤直接液化用黄铁矿催化剂最好采用超细粉碎的方法制备。煤直接液化是在温度大于 400 °C 和氢气压力大

于 10 MPa 以及在溶剂和催化剂存在下对煤加氢裂解直接转化为液化油的工艺过程。鉴于煤裂解生成的产物主要是含多环芳烃的混合物, 根据“相似相溶”原理, 通常使用自身液化产生的重质液化油为溶剂, 含 2-4 环芳烃和氢化芳烃^[5]。若直接用溶剂油作为液体介质来超细湿磨黄铁矿, 使黄铁矿粉体粒度达到 1 μm 左右, 并在溶剂油中充分分散, 则黄铁矿催化剂的催化效果必定有所提高。

在矿物超细湿磨过程中, 以水为液体介质的工艺

应用最为普遍, 研究得较多, 而以有机物为液体介质的工艺研究得较少。为初步了解不同液体介质对黄铁矿超细粉碎的影响, 本文作者在相同的研磨条件下, 研究了两种液体介质——蒸馏水和无水乙醇对研磨过程中粉体粒度和矿浆粘度变化的影响, 并通过对黄铁矿粉体在蒸馏水和无水乙醇中的润湿性、 ζ 电位、分散性的测定和扩展双电层理论(EDLVO 理论)计算, 分析了引起这些变化的原因, 以期为进一步研究用溶剂油作为液体介质来超细湿磨黄铁矿提供理论依据及实践参考。

1 实验

1.1 原料

实验用天然黄铁矿原料的化学成分见表 1, 原料粉体 90% 小于 70 μm , 中位粒径为 10.541 μm 。无水乙醇为分析纯, 天津市大茂化学试剂厂生产。

表 1 黄铁矿的化学成分

Table 1 Chemical composition of pyrite(mass fraction, %)				
Fe	S	Si	Ca	Al
44.31	39.45	0.67	0.53	0.28
Ti	K	Co	Na	
0.12	0.10	0.07	0.007	

1.2 设备

实验所用设备为小型立式搅拌磨, 长沙矿冶研究院设计制造。该机由筒体、棒式搅拌器、传动装置和机架等组成。筒体有效内径为 8.0 cm, 有效容积为 0.5 L, 为防止铁污染, 磨机筒体及搅拌器均采用不锈钢制造, 且筒体附有冷却水夹套, 传动装置由调速电机及减速机组成, 电机功率 0.75 kW。工作时, 筒体固定不动, 筒内充满一定介质球, 棒式搅拌器在电机驱动下以中等速度旋转, 带动筒体内介质球作无规则的翻转运动, 物料在介质球间受到强大的摩擦力、挤压力和剪切力, 而被有效地研磨。

1.3 方法

实验时加黄铁矿原料 150 g, 加直径 2~3 mm 钢球 1 500 g, 然后分别加入 127 mL 无水乙醇或蒸馏水作为湿磨的液体介质, 转速固定为 600 r/min。研磨至一定时间后直接取样, 采用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定粉体粒度; 采用成都仪器厂生产的 NXS-11A 型旋转粘度计测定矿

浆粘度。

样品干燥后采用美国 Nicolet 公司生产的 AVATAR-360 型红外光谱仪进行红外光谱分析, KBr 压片法制备样品, 扫描波数范围为 400~4 000 cm^{-1} ; 采用法国 Jobinyvon 公司生产的 Labram-010 型激光拉曼光谱仪进行拉曼光谱分析, 仪器工作参数为: Ar^+ 激光器, 激光波长 514.532 nm, 扫描波数范围为 200~3 400 cm^{-1} , 扫描时间 30 s。

采用粉末垂直浸透速度法直接测量原料粉体在蒸馏水和无水乙醇中的润湿性。取黄铁矿粉体在蒸馏水和无水乙醇中研磨 4 h 的矿浆配成浓度为 3 g/L 的稀悬浮液, 用美国 Counlter 公司生产的 DELSA 440SX 型 Zeta 电位和粒度分布仪测定 Zeta 电位; 用萧山市分析仪器厂生产的 PHS-10B 型酸度计测定稀悬浮液的 pH 值; 用沉降法测定稀悬浮液的分散性。

2 结果与讨论

2.1 粒度分析

在同一研磨条件下, 粉碎后物料的粒度大小是评价粉碎效率的重要参数之一, 粒度越小, 粉碎效率越高。图 1 所示是在蒸馏水或无水乙醇介质中超细湿磨黄铁矿时, 粉体中位粒径随研磨时间的变化情况。由图可见, 粉碎初期, 以蒸馏水为液体介质的粉碎效率较高, 粉碎后期, 以无水乙醇为液体介质的粉碎效率较高, 且随研磨时间增加粒度差别越来越大。湿磨 3.5~4.0 h 时, 以蒸馏水为液体介质的黄铁矿粉体粒度基本不变, 而以无水乙醇为液体介质的粉体粒度仍在减小。

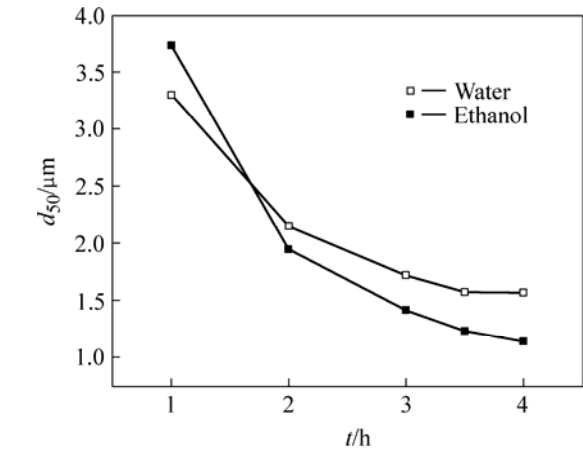


图 1 粉体中位粒径随研磨时间的变化
Fig.1 Curves of median diameter of particles with grinding time

2.2 矿浆粘度分析

矿浆粘度的大小是矿浆中颗粒间及颗粒与液体介质间相互作用和聚集程度的标志。在设备和研磨条件一定时,矿浆粘度直接决定物料与研磨介质之间的相互撞击、剪切、摩擦和挤压作用的强度,因此任何影响矿浆粘度的因素都会影响研磨效率。矿浆具有合适粘度时,可保证物料在磨机内的合理分布,可调节物料之间的相互依存状态和物料与研磨介质之间的有效研磨,使颗粒与研磨介质之间具有强烈的作用力而颗粒间又没有聚集,从而得到较高的研磨效率^[6-7]。表 2 所列是用蒸馏水、无水乙醇超细湿磨黄铁矿时,矿浆粘度和粉体中位粒径随研磨时间的变化情况。

表 2 矿浆粘度和粉体中位粒径随研磨时间的变化

Table 2 Slurry viscosity and median diameter of particle at different grinding time

Grinding time/h	$\eta/(\text{mPa}\cdot\text{s})$		$d_{50}/\mu\text{m}$	
	Ethanol	Water	Ethanol	Water
0	3.0	8.4	10.541	10.541
1	6.0	365.4	3.736	3.297
2	6.6	838.5	1.947	2.150
3	11.6	1107.7	1.418	1.722
3.5	16.5	1203.9	1.231	1.573
4	21.2	1307.8	1.141	1.569

由表 2 可见,用无水乙醇为液体介质湿磨黄铁矿时,在整个研磨过程中矿浆粘度都很小,矿浆粘度随研磨时间的延长缓慢增大;而以蒸馏水为液体介质湿磨黄铁矿时,矿浆粘度随研磨时间的延长急剧增大。研磨 1 h 时,以水为介质湿磨黄铁矿所得粉体粒度较乙醇小,此时用水为介质的矿浆粘度较以乙醇为介质的矿浆粘度更有利于颗粒的细磨,研磨效率较大。研磨 2~3.5 h,水矿浆粘度急剧增大,粉体粒度继续减小,但比用乙醇为液体介质时减小得慢,说明此时以乙醇为介质的矿浆粘度较以水为介质时的矿浆粘度更有利于颗粒的细磨。研磨 4 h 时,以水为介质的矿浆粘度太大,颗粒的有效研磨难于进行,因此粉体粒度基本不变;而以乙醇为介质的矿浆粘度仍较小,粉体粒度仍在减小。由此可见,在本实验进行的高矿浆浓度下超细湿磨黄铁矿粉体时,以水为液体介质的体系有必要添加助磨剂来调节矿浆粘度,提高粉碎效率;而以乙醇为液体介质可以不需添加助磨剂调节矿浆粘度。

2.3 润湿性分析

用粉体垂直浸透速度法直接测量黄铁矿原料粉体

在无水乙醇和蒸馏水中的润湿性,在有限时间内记录不同时间液体润湿粉体的高度,然后代入下式^[8]获得接触角 θ :

$$\frac{L^2\eta}{\gamma_{lg}} = (r \cos \theta)t \quad (1)$$

式中 t 为润湿时间,单位为 s; L 为被润湿粉体柱的高度,单位为 cm; γ_{lg} 为液体的表面张力; η 为液体的粘度; r 为粉体柱中液体通道的平均半径。令 $M=L^2\eta/\gamma_{lg}$,以 M 对 t 作图可得图 2,直线斜率为 $r \cos \theta$,在无水乙醇和蒸馏水中 r 是相等的。由图 2 可见,黄铁矿粉体在无水乙醇中的 $\cos \theta$ 明显大于在蒸馏水中的 $\cos \theta$,即黄铁矿粉体在无水乙醇中的润湿性明显好于在蒸馏水中的润湿性。文献[9]也报道黄铁矿是弱亲水性矿物,接触角约为 70° 。这是因为黄铁矿具有较高的共价键成分,而矿物晶格结合的共价键成分愈强,晶格质点同水的作用愈弱,亲水性愈差;同时,机械活化过程中某些离子—共价键断裂后,晶体表面可以通过夺取相邻原子(离子)的电子等方式获得电荷补偿作用,补偿现象的发生往往导致表面疏水性的相对增加^[10]。

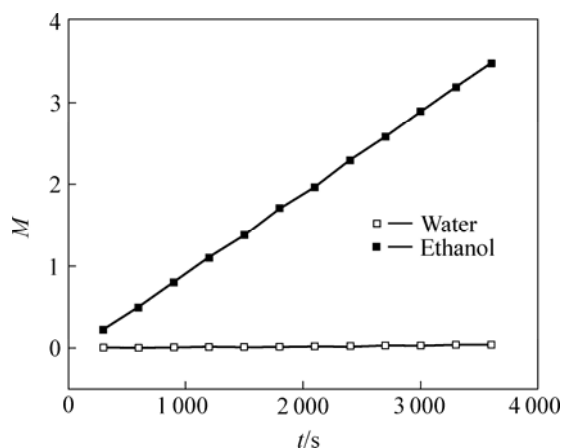


图 2 黄铁矿粉体在无水乙醇和蒸馏水中的润湿性

Fig.2 Wettability of pyrite powder in ethanol or water

2.4 红外、拉曼光谱分析

图 3 所示为黄铁矿粉体的红外光谱图。在 $\sim 420 \text{ cm}^{-1}$ 处出现归属于黄铁矿 S—S 键伸缩振动的最强吸收峰^[11]。由图 3 可见:以水为介质湿磨 3 h 后黄铁矿粉体的红外光谱分别在 $1\,127.36 \text{ cm}^{-1}$ 和 604.31 cm^{-1} 处出现了一个宽而强的吸收谱带,其中 $1\,127.36 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收谱带归属于 SO_4^{2-} 的伸缩振动频率, 604.31 cm^{-1} 处的吸收谱带归属于 SO_4^{2-} 的弯曲振

动频率^[12], 说明在水中湿磨时黄铁矿中的硫有部分被氧化成了硫酸根。以乙醇为介质湿磨 3 h 后黄铁矿粉体的红外光谱仅在 $1\,076.27\text{ cm}^{-1}$ 处出现了一个弱的吸收谱带, 说明黄铁矿在乙醇中湿磨时氧化程度比水中小。

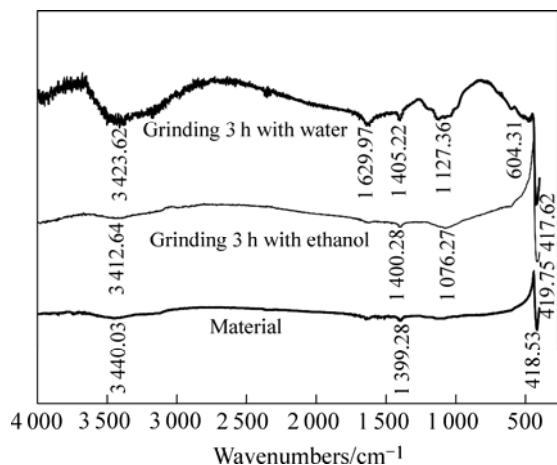


图 3 黄铁矿粉体的红外光谱图

Fig.3 IR-spectrum of pyrite powder

图 4 所示为黄铁矿粉体的拉曼光谱图。黄铁矿的拉曼光谱以 343 cm^{-1} , 379 cm^{-1} , 430 cm^{-1} 处的吸收峰为特征, 其中 379 cm^{-1} 处吸收峰最强, 归属于 $\text{Fe}-[\text{S}_2]$ 键的伸缩振动, 343 cm^{-1} 和 430 cm^{-1} 处吸收峰分别归属于 $\text{Fe}-[\text{S}_2]$ 键的伸缩振动以及 $\text{S}-\text{S}$ 键的伸缩振动^[13-14]。由图 4 可见, 以水和乙醇为介质湿磨 3 h 黄铁矿粉体的拉曼光谱除了黄铁矿的特征吸收峰外, 分别在 $1\,120.3\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,122.1\text{ cm}^{-1}$ 处有一吸收峰, 这一吸收峰归属于 SO_4^{2-} 反对称伸缩振动的特征吸收峰^[14-15], 这也说明黄铁矿在水和乙醇中湿磨有部分硫被氧化成了硫酸根。

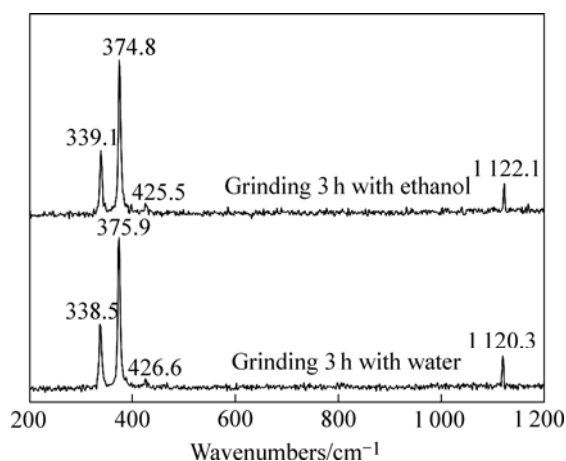


图 4 黄铁矿粉体的拉曼光谱图

Fig.4 Raman spectrogram of pyrite powder

2.5 ξ 电位分析

黄铁矿粉体颗粒在蒸馏水中 ξ 电位为 6.18 mV ; 在无水乙醇中 ξ 电位为 -52.2 mV 。黄铁矿粉体颗粒在蒸馏水中带正电, 可能是由于黄铁矿粉体表面在水中易氧化生成 FeSO_4 , 氢离子或氢氧根离子就成了电势决定离子, 黄铁矿粉体在水中的等电点 pH 值为 6.8 ^[9], 而以水为介质超细磨黄铁矿的 pH 值为 5.53 , 小于等电点, 此时氢离子是电势决定离子, 颗粒带正电。黄铁矿粉体颗粒在无水乙醇中带负电, 可能是由于在无水乙醇中 Fe^{2+} 比 S_2^{2-} 易于解离, 优先溶解, 矿物表面有过剩 S_2^{2-} 而带负电, 也可能是乙醇分子在黄铁矿表面定向吸附而使矿物表面带负电。

2.6 分散性分析

图 5 所示为黄铁矿粉体在无水乙醇和蒸馏水中的分散性比较。由图可见: 黄铁矿粉体在水中的聚沉速度很快, 2 h 内完全聚沉; 而黄铁矿粉体在无水乙醇中的聚沉速度较慢, 120 h 还没有聚沉完全, 这说明黄铁矿粉体在无水乙醇中的分散性远优于在蒸馏水中的分散性。

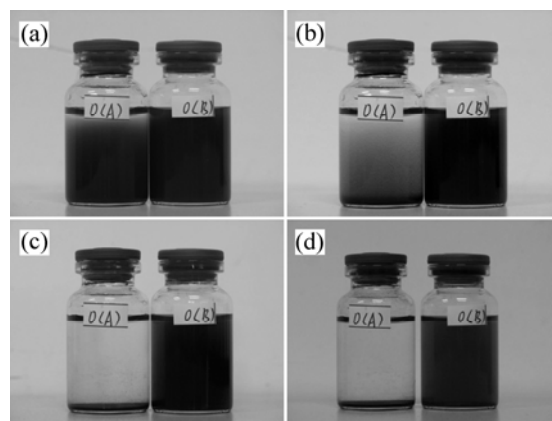


图 5 黄铁矿粉体在蒸馏水(0(A))和无水乙醇(0(B))中的分散性

Fig.5 Dispersibility of pyrite powder in water (0(A)) and ethanol (0(B)): (a) 0.5 h; (b) 1.0 h; (c) 2.0 h; (d) 120 h

2.7 颗粒在液体中的界面作用

粘度大小、润湿性、分散性等都与粉体颗粒在液体介质中的界面作用密切相关, 研究粉体颗粒在液体介质中的界面作用, 最常用的理论是扩展双电层理论 (EDLVO 理论)^[10, 16-17]。为了计算方便, 可将黄铁矿粉体近似看成半径为 R 的球形颗粒, 范德华相互作用能 V_w 为:

$$V_w = -\frac{AR}{12H} \quad (2)$$

式中 H 为两球形颗粒之间的距离, A 为矿粒的 Hamaker 能量常数, 单位为 J。

在水中, 半径为 R 球形颗粒的静电排斥能可以表示为

$$V_{el} = 2\pi\epsilon_a R\phi_0^2 \ln[1 + \exp(-\kappa H)] \quad (3)$$

式中 κ^{-1} 为 Debye 长度, 代表双电层的厚度; ψ_0 为表面电位, 在本文计算中用 ξ 电位近似代表, ϵ_a 是分散介质的绝对介电常数。

在非水介质中, 半径为 R 球形颗粒的静电排斥能可以表示为

$$V_{el} = \frac{\epsilon_a R^2 \xi^2}{2R + H} \quad (4)$$

半径为 R 的球形颗粒的溶剂化作用能 V_{ij} (或疏液作用能 V_{sy})可表示为

$$V = \pi R h_0 V^0 \exp\left(-\frac{H}{h_0}\right) \quad (5)$$

式中 h_0 为衰减长度; V^0 为作用能量常数, 与颗粒表面润湿性有关, 可计算为

$$V^0 = -4\left(\sqrt{\gamma_S^+} - \sqrt{\gamma_L^+}\right)\left(\sqrt{\gamma_S^-} - \sqrt{\gamma_L^-}\right) \quad (6)$$

式中 γ^+ 表示电子接受体表面能分量, γ^- 表示电子给予体表面能分量。当 $V^0 > 0$ 时, $V^0 = V_{ij}^0$, $V = V_{ij}$; 而当 $V^0 < 0$ 时, $V^0 = V_{sy}^0$, $V = V_{sy}$ 。

总的界面作用能为

$$V_t = V_w + V_{el} + V_{ij}/V_{sy} \quad (7)$$

按上述方法进行计算并作图^[9, 18], 可得黄铁矿粉体在水中的势能曲线如图 6 所示, 在乙醇中的势能曲线如图 7 所示, kT 是能量的单位, $1 \text{ kT} = 4.045 \times 10^{-21} \text{ J}$ 。从图 6 中可见: 以水为介质时, 黄铁矿粉体颗粒间距大于 8 nm 时, 范德华引力能占主导地位, 间距小于 5 nm 时, 疏水结构作用能占主导地位, 在整个作用距离上界面相互作用能都是吸引能大于排斥能, 因此黄铁矿粉体在水中易聚沉, 润湿性差, 分散性差, 湿磨时矿浆粘度随粉体粒度的减小急剧增大。从图 7 中可见: 以乙醇为介质时, 黄铁矿粉体颗粒在大于 0.5 nm 的作用距离上界面相互作用能都是排斥能大于吸引能, 间距大于 10 nm 时, 静电排斥能占主导地位, 间距小于 5 nm 时, 亲液溶剂化能占主导地位, 在间距为 1 nm 时, 还存在一个高达 250 kT 的势垒, 可阻碍颗粒聚集,

因此黄铁矿粉体在乙醇中润湿性好, 分散性好, 湿磨时矿浆粘度小。

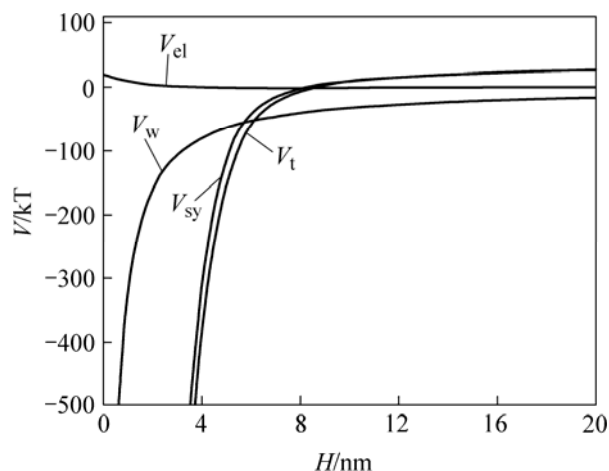


图 6 黄铁矿粉体在水中的势能曲线

Fig.6 Curves of potential energy of pyrite powder in water

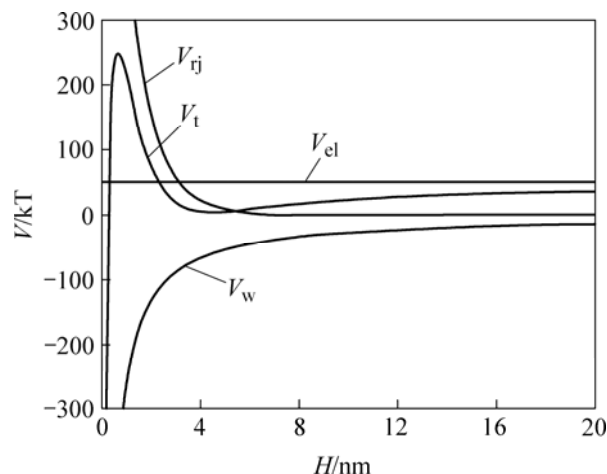


图 7 黄铁矿粉体在乙醇中的势能曲线

Fig.7 Curves of potential energy of pyrite powder in ethanol

3 结论

1) 在超细湿磨过程中, 矿浆粘度适当时, 才会获得较高的研磨效率。液体介质对粉体颗粒的界面影响很大, 而粉体颗粒的界面作用决定了研磨过程中矿浆粘度的大小, 从而影响研磨效率。

2) 黄铁矿粉体在乙醇中分散性好, 用乙醇为液体介质在高矿浆浓度超细湿磨黄铁矿粉体时, 矿浆粘度小, 不需添加助磨剂调节矿浆粘度即可达到较高的研磨效率; 黄铁矿粉体在水中分散性差, 用水为液体介质在高矿浆浓度超细湿磨黄铁矿粉体时, 矿浆粘度随研磨时间延长急剧增大, 有必要添加助磨剂调节矿浆

粘度, 提高粉碎效率。

REFERENCES

- [1] Hirano K, Kouzu M, Okada T, Kobayashi M, Ikenaga N, Suzuki T. Catalytic activity of iron compounds for coal liquefaction[J]. Fuel, 1999, 78(14): 1867-1873.
- [2] Hirano K, Kanda Y. Study on industrial catalyst for bituminous coal liquefaction[J]. Fuel Processing Technology, 2001, 72(1): 35-45.
- [3] 陈明秀, 史士东, 何平. NEDOL 模式下神华煤液化试验中的催化剂活性比较[J]. 洁净煤技术, 2002, 8(4): 24-29.
CHEN Ming-xiu, SHI Shi-dong, HE Ping. Comparison of catalyst activity in Shenhua coal liquefaction test under NEDOL model[J]. Clean Coal Technology, 2002, 8(4): 24-29.
- [4] 申峻, 王志忠. 煤直接液化催化剂研究的新进展[J]. 煤炭转化, 1999, 22(1): 6-9.
SHEN Jun, WANG Zhi-zhong. New developments of direct coal liquefaction catalyst[J]. Coal Conversion, 1999, 22(1): 6-9.
- [5] 张银元, 赵景联. 煤直接液化技术的研究与开发[J]. 山西煤炭, 2001, 21(2): 32-36.
ZHANG Yin-yuan, ZHAO Jing-lian. Research and development of direct coal liquefaction technology[J]. Shanxi Coal, 2001, 21(2): 32-36.
- [6] HE Ming-zhao, WANG Yan-min, Forssberg E. Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review[J]. Powder Technology, 2004, 147(1): 94-112.
- [7] 郑水林. 超细粉碎[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999: 79-127.
ZHENG Shui-lin. Ultrafine Grinding[M]. Beijing: China Building Material Industry Press, 1999: 79-127.
- [8] 曾凡, 胡永平, 杨毅, 任守政, 杨玉芬. 矿物加工颗粒学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 164-165, 181-206.
ZENG Fan, HU Yong-ping, YANG Yi, REN Shou-zheng, YANG Yu-fen. Theory of Mineral Process Grain[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2001: 164-165, 181-206.
- [9] Sharma P K, Rao K H. Adhesion of *Paenibacillus omyxa* on chalcopyrite and pyrite: surface thermodynamics and extended DLVO theory[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2003, 29(1): 21-38.
- [10] 卢寿慈, 翁达. 界面分离理论及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 26-87, 130-164.
LU Shou-ci, WENG Da. Theory and Application of Interfacial Separation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 26-87, 130-164.
- [11] 贾建叶. 黄铁矿的中远红外谱及其对含金性的评价[J]. 西北地质, 1996, 17(3): 59-65.
JIA Jian-ye. IR-spectra of pyrite and evaluating content of gold with it[J]. Northwest Geologic, 1996, 17(3): 59-65.
- [12] 法默. 矿物的红外光谱[M]. 应育浦, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 84-85.
Farmer V C. IR-spectra of Mineral[M]. YING Yu-pu, transl. Beijing: Science Press, 1982: 84-85.
- [13] 贾建业, 朱自尊, 潘兆麟, 兰斌明. 含金黄铁矿的拉曼光谱特征及其找矿意义初探[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(6): 575-578.
JIA Jian-ye, ZHU Zi-zun, PAN Zhao-lu, LAN Bin-ming. Raman spectral characteristics of gold-bearing pyrite and discussion about their prospecting significance[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(6): 575-578.
- [14] Toniazio V, Mustin C, Portal J M, Humbert B, Benoit R, Erre R. Elemental sulfur at the pyrite surfaces: speciation and quantification[J]. Applied Surface Science, 1999, 143(3): 229-237.
- [15] 杨玉萍, 郑海飞. 常温和压力 0.1~1 300 MPa 下硬石膏的拉曼光谱研究[J]. 矿物学报, 2005, 25(3): 299-203.
YANG Yu-ping, ZHENG Hai-fei. Research on raman spectra of anhydrite at pressure of 0.1-1 300 MPa and room temperature[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005, 25(3): 299-203.
- [16] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 66-98.
REN Jun, SHEN Jian, LU Shou-ci. Science and Technology of Particle Dispersing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 66-98.
- [17] 邱冠周, 胡岳华, 王淀佐. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1993: 26-184.
QIU Guan-zhou, HU Yue-hua, WANG Dian-zuo. Interactions between Particles and Flotation of Fine Particles[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1993: 26-184.
- [18] 顾帼华, 锁军, 柳建设, 钟素姣. 黄铁矿微生物浸出体系中的表面热力学和扩展 DLVO 理论[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1462-1467.
GU Guo-hua, SUO Jun, LIU Jian-she, ZHONG Su-jiao. Surface thermodynamics and extended DLVO theory on bio-leaching of pyrite mineral[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1462-1467.

(编辑 何学锋)