

无机/有机助磨剂对石英磨矿动力学模型参数的影响研究

田鹏程, 王泽红, 毛勇

东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD921¹.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0112-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.013

摘要 以石英为磨机给料,通过添加6种助磨剂(无机类助磨剂焦磷酸钠、硫酸铝以及三聚磷酸钠;有机类助磨剂丙三醇、柠檬酸以及乙基黄原酸钾)进行湿式磨矿试验,建立了助磨剂添加前后石英粉磨的 m 阶磨矿动力学模型,系统分析了助磨剂对模型参数和磨矿速率的影响。研究表明经过磨矿时间10 min后,用量0.5%三聚磷酸钠使得磨矿产品中 -0.074 mm含量增加7.44百分点,用量0.5%柠檬酸使得磨矿产品中 -0.074 mm含量增加7.00百分点;助磨剂改变了模型参数 k 和 m 的值,整体磨矿效果取决于 k 和 m 的综合效应;三聚磷酸钠作用下, $-1+0.45$ mm粒级石英磨矿速率的增量最大,柠檬酸作用下, $-0.45+0.18$ mm粒级石英磨矿速率的增量最大。

关键词 石英;助磨剂;动力学参数;磨矿速率

引言

粉磨过程作为矿物加工物料分离的准备作业,是一项必不可少的工作,其能耗高、效率低,尤其是对细磨和超细磨更是如此;另外磨矿作业的钢耗也非常大,因此提高磨矿效率、降低磨矿能耗和钢耗一直是业界研究的重要课题之一^[1-2]。磨矿动力学主要描述被磨物料磨碎速率与磨矿时间之间关系,通过分析磨矿动力学参数的变化规律以及建立相应的磨矿动力学模型来研究和分析磨矿规律,可找到提高磨矿效率的方法和手段^[3-6]。影响矿石磨矿效率的因素包括物料性质、磨机结构以及磨机工作条件等几方面,而助磨剂作为一种化学添加剂,一方面可吸附在颗粒表面,从而降低颗粒的强度和硬度,促进裂纹的产生和扩展,另一方面通过调节矿浆的流变学性质和颗粒的表面电性等,降低矿浆的黏度,促进颗粒的分散,从而提高浆料的可流动性,阻止颗粒在研磨介质及磨机衬板上的黏附以及颗粒之间的团聚,在上述两方面的共同作用下使磨矿效率得以改善^[5,7-12]。助磨剂的添加改变了矿石的磨矿动力学特性和模型参数,研究不同助磨剂对磨矿动力学特性的影响规律,对助磨剂的选择和应用具有重要意义。

关于助磨剂对磨矿动力学特性的影响,王力^[13]研

究了煤沥青在MC(萘系磺酸盐)、AZMN(自制的改性 α -甲基萘磺酸盐甲醛缩合物)两种助磨剂作用下的磨矿动力学方程式,分析了其研磨特性,确定了煤沥青水浆制备的磨矿工艺参数,并得出了两种助磨剂作用下任意时刻任一粒级的分布率。黄勇^[14]研究了水泥在TEA和TIPA两种单体助磨剂作用下的磨矿动力学,发现水泥的比表面积与粉磨时间的平方根符合线性关系,且加入TEA或TIPA后,水泥的比表面积大幅提高;高掺量的TIPA对比表面积和粒径分布的改善效果优于TEA。Choi^[15]采用搅拌球磨机对方解石进行超细粉碎试验,研究了助磨剂添加对磨后物料比表面积、研磨效率、粉碎系数 k 的影响,发现添加助磨剂的物料比表面积和粉碎系数 k 相对于不添加药剂分别增加了16%和34%。谢冬冬^[16]研究了NM-3、油酸钠、六偏磷酸钠、氟硅酸钠、乙酸铵和羧甲基纤维素钠等助磨剂对氧化铁矿石磨矿动力学的影响,通过建立 m 阶磨矿动力学方程、应用均匀实验设计方法确定了助磨剂最佳用量和配比并比较了不同种类助磨剂作用下各个粒级的磨矿效果,结果表明:添加乙酸铵和NM-3既增加了粗粒级颗粒的可磨性,又改善了矿浆流变性,从而显著提高粗粒级和细粒级的磨矿速率。

在矿物加工领域,石英是一种典型的中硬矿石,无论是作为脉石矿物被抛弃,还是作为非金属矿物原

收稿日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874073)

作者简介: 田鹏程(1997—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要从事矿物加工工程领域的研究, E-mail: 842538326@qq.com。

通信作者: 王泽红(1969—),男,山西永济人,副教授,博士,主要从事矿物加工工程领域的教学和科研工作, E-mail: wangzechong@mail.neu.edu.cn。

料被提纯,磨矿过程都是一项必不可少的工作。 m 阶磨矿动力学模型是常见的磨矿动力学模型,其动力学参数 k 、 m 在不同磨矿阶段的变化能反映磨矿过程的实际情况。本文以石英为磨机给料,系统研究了无机类助磨剂焦磷酸钠、硫酸铝、三聚磷酸钠以及有机类助磨剂柠檬酸、丙三醇、乙基黄原酸钾对石英助磨效果的影响,通过建立 m 阶磨矿动力学模型,探讨了助磨剂对石英磨矿动力学参数以及磨矿速率的影响,分析得到了助磨效果较好的助磨剂及其最佳用量,为石英磨矿助磨剂的选择和应用提供了依据。

1 m 阶磨矿动力学理论基础

磨矿动力学表征了被磨物料磨碎速率与磨矿时间之间的关系,一般认为, m 阶磨矿动力学模型可用式(1)表示^[17]:

$$R = R_0 \exp(-kt^m) \quad (1)$$

式中, R —经过时间 t 后粗级别残留物的质量; R_0 —被磨物料中粗级别的原始质量; t —磨矿时间。

关于参数 k 和 m 的意义,一般认为与物料条件和磨矿条件有关。段希祥^[18]通过试验研究表明, m 主要反映物料性质的均匀性,而与物料强度几乎无关; k 与磨矿粒度、物料性质以及磨矿条件有关。侯英等人^[19]通过对磨矿动力学方程参数与磨矿时间的分析,认为在 $t \ll e^{1/k}$ 时, k 对 R 的减少起主要的作用,而在 $t \gg e^{1/k}$ 时, m 对 R 的减少起主要作用,在 $t = e^{1/k}$ 附近时, k 和 m 共同影响 R 的减少,即共同影响磨矿速度。

对式(1)两边取以 e 为底的对数,可转化为式(2):

$$\ln \ln \frac{R_0}{R} = m \ln t + \ln k \quad (2)$$

参数 k 、 m 可表示为被磨物料粒度 d 的函数,其关系式如式(3)和式(4)所示:

$$k(d) = A_0 + A_1 d^{X_1} \quad (3)$$

$$m(d) = C_0 + C_1 d^{X_2} \quad (4)$$

式中, A_0 、 A_1 、 C_0 、 C_1 、 X_1 、 X_2 为待定的参数。

对式(1)求时间 t 的导数,得到磨矿速率的表达式,如式(5)所示^[20]:

$$v = \frac{dR}{dt} = \frac{d(R_0 e^{-kt^m})}{dt} = -R_0 k t^{m-1} m e^{-kt^m} \quad (5)$$

式中, v 为 t 时刻的磨矿速率(单位时间内粗粒级累积产率的减少量),%/min; R_0 为给料中粗粒级的质量分数,%; t 为磨矿时间,min; k 和 m 为磨矿动力学参数,负号代表粗颗粒含量减少。

2 试验

2.1 试验原料和助磨剂

试验采用石英纯矿物作为试验原料,石英纯矿物取自河南铭海环保科技有限公司,其X射线衍射图谱

如图1所示。为保证原料性质的稳定性,避免不同矿物、不同粒度石英之间的相互影响以及对助磨剂应用效果的影响,本研究所用原料为粒度范围 $-2+0.074$ mm的石英砂纯矿物。原料的粒度特性曲线如图2所示。

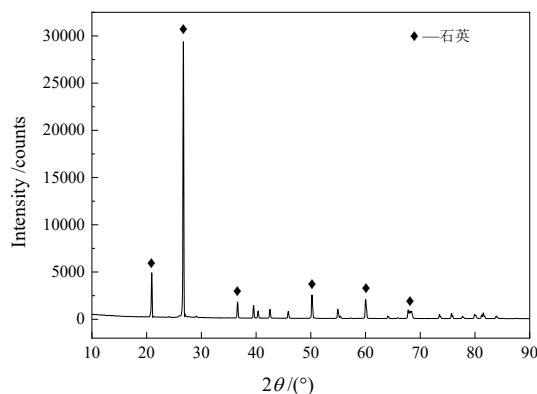


图1 石英X射线衍射图谱
Fig. 1 The X-ray spectra of quartz

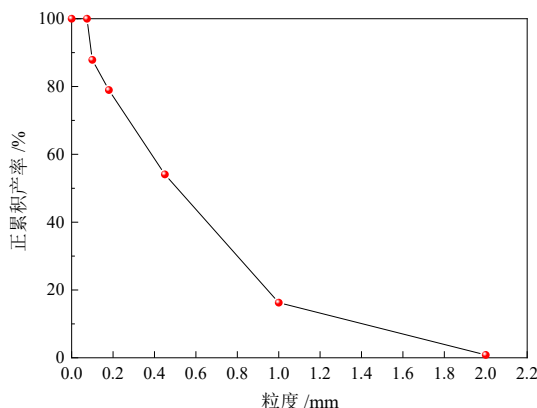


图2 原料的粒度特性曲线
Fig. 2 Particle size characteristic curves of raw materials

助磨剂的选择应综合考虑其化学特性、官能团的类型、分子量的大小等因素,同时还应当考虑对后续作业的影响、对环境的污染以及经济的合理性。本研究在综合考虑上述因素的基础上,结合课题组前期研究成果,确定所使用的石英助磨剂为:焦磷酸钠($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, 分析纯);硫酸铝($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, 分析纯);三聚磷酸钠($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, 分析纯);柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 分析纯);上述四种药剂均采购于天津瑞金特化学品有限公司;丙三醇($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$, 分析纯),采购于天津北辰方正试剂厂;乙基黄原酸钾($\text{C}_3\text{H}_5\text{KOS}_2$, 分析纯),采购于上海麦克林生化科技有限公司。

2.2 试验和产品分析方法

本研究粉磨试验所使用的磨机为实验室 XMQ- $\Phi 150 \times 50$ 锥形球磨机(武汉探矿机械厂),有效容积 1 L,转速为 112 r/min,功率为 0.25 kW。试验过程中所使用的磨矿介质为钢球,其直径及配比为 $m(\Phi 15 \text{ mm}) : m(\Phi 20 \text{ mm}) : m(\Phi 30 \text{ mm}) = 40\% : 40\% : 20\%$;经过前

期试验探索,得出试验的最佳磨矿条件如表1所示,根据磨矿条件和原料粒度组成,结合式(6)可知批次磨矿加入的物料质量为202.64 kg。

表1 磨矿条件参数

Table 1 Parameters of grinding condition

湿式磨矿参数	参数取值
转速率/%	80
介质充填率/%	45
料球比	0.75
磨矿浓度(质量百分比)/%	70

$$W = V \times \varnothing \times 38\% \times \varnothing_m \times \delta_{\text{物}} \quad (6)$$

式中: V ——磨机有效容积, L;

$\varnothing$ ——磨矿介质充填率, %;

$\varnothing_m$ ——料球比(物料体积与介质钢球间隙体积之比), %;

$\delta_{\text{物}}$ ——物料松散密度, g/cm³。

试验原料和磨矿产品的粒度组成采用湿式振筛机测定:按照筛孔大小顺序放置标准筛,将待筛试样倒入最上层筛内,加入水至完全浸没试样;选好振幅档次,进行湿法筛分20 min;筛分结束后,关闭开关和进水阀门。将每个筛上物料冲洗在不锈钢盆内,置于80℃左右的烘箱中烘干后称量筛上物料的质量,计算粒级产率。

3 试验结果与讨论

3.1 无助磨剂 m 阶磨矿动力学模型的建立

根据原料粒度分布特性,将5个粒级(-2+1 mm、-1+0.45 mm、-0.45+0.18 mm、-0.18+0.1 mm和-0.1+0.074 mm)的磨机给料(石英)按图2的比例混合均匀后进行球磨机分批湿式磨矿试验,根据试验结果建立 m 阶磨矿动力学模型。设定磨矿时间分别为1、3、5、7和10 min,将所得磨矿产品分别进行筛分、烘干后称量、计算,得到磨矿产品中各粒级的筛上累积产率,结果如表2所示。利用软件将各粒级、各时刻的磨矿产物进行 $\ln[\ln(R_0/R_t)] = m \ln t + \ln k$ 拟合,绘制出不同粒级的 $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ 与 $\ln t$ 的关系曲线,如图3所示。

由图3可以看出,各粒级石英物料经过磨矿试验后,累积产率的双对数函数与磨矿时间对数函数之间的关系近似呈直线,拟合度 $R^2 > 0.95$,符合 m 阶磨矿动力学模型的规律。因此,可用回归分析的方法计算不同粒级的磨矿动力学参数 k 和 m 的值。通过拟合曲线得出不同粒级 k 和 m 的值如表3所示。

根据式(3)和式(4),对表3中的 k 、 m 值进行拟合,并将拟合结果带入式(1),即可得到未加助磨剂时石英磨矿的 m 阶磨矿动力学模型,如式(7)所示。

表2 不同磨矿时间下磨矿产品的粒度分布

Table 2 Particle size distribution of grinding products in different time

粒级/mm	不同磨矿时间下磨矿产品的各粒级含量/%					
	0 min	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min
-2+1	16.15	11.70	9.32	6.25	4.22	4.02
-1+0.45	57.64	48.89	41.82	31.66	24.89	23.28
-0.45+0.18	85.04	79.08	72.76	63.95	56.90	52.54
-0.18+0.1	94.65	91.27	87.37	81.72	76.19	73.31
-0.1+0.074	100.00	96.60	94.65	89.55	86.41	83.74

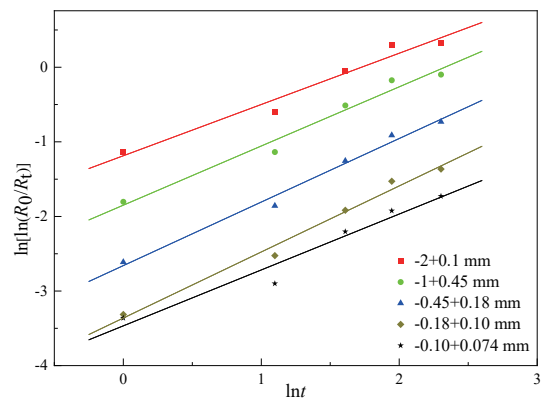


图3 不同粒级的 $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ 与 $\ln t$ 的关系曲线

Fig. 3 $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ of different grain sizes and $\ln t$

表3 各粒级的 m 阶磨矿动力学方程参数 k 和 m

Table 3 Parameters k and m of m -order grinding kinetic equation for each grain size

粒级/mm	k	m	R^2
-2+1	0.307 8	0.650 9	0.967 0
-1+0.45	0.158 6	0.761 5	0.973 4
-0.45+0.18	0.070 4	0.830 3	0.985 2
-0.18+0.1	0.034 9	0.858 7	0.987 4
-0.1+0.074	0.031 4	0.729 9	0.953 6

$$R_t = R_0 \exp \left[\left(0.0123 - 0.3181d^{0.7993} \right) t^{(0.6810 - 0.0630 \ln d)} \right] \quad (7)$$

将表3中 k 、 m 值带入式(5)中,即可求得石英各粒级的磨矿速率,结果如图4所示。

由图4可知,各粒级石英磨矿速率的变化趋势基本相同,即随着磨矿时间增加,各粒级石英的磨矿速率均逐渐减小,且磨矿前期($t < 5$ min)减小幅度明显大于后期;不同粒级石英磨矿速率下降的幅度不同:粗粒级下降的幅度较大,细粒级下降的幅度较小。这是因为在磨矿初始阶段,粗粒级含量大,颗粒中存在裂缝及缺陷较多,物料强度和硬度较小,容易被磨碎,磨矿速率较大^[21];随着磨矿过程的进行,颗粒变小,其内部的裂缝和缺陷减少,颗粒的硬度和强度增大,可磨性下降,同时由于颗粒变小,矿浆的黏度逐渐增大,颗粒更容易黏附在钢球和衬板上,对下落钢球产生较大的缓冲作用,削弱了钢球对固体颗粒的冲击力,从而

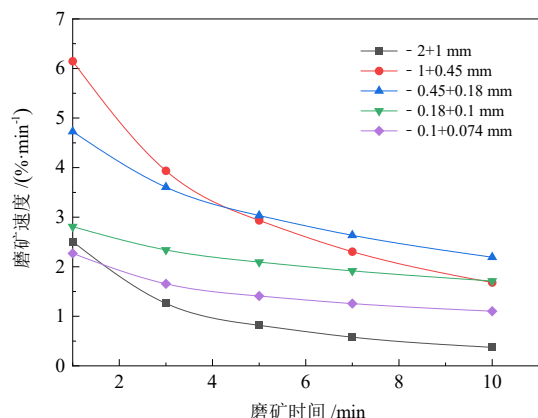


图4 各粒级物料磨矿速率与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between grinding speed and grinding time with different size

导致磨矿速率降低。

3.2 助磨剂对磨矿产品中-0.074 mm 粒级含量的影响

在表1所示的最优磨矿条件下,设定磨矿时间为10 min,分别加入添加量为0.1%、0.3%、0.5%和0.7% (相对于磨机给料的质量分数)的六种助磨剂进行磨矿试验,考察助磨剂种类及其用量对石英磨矿效果的影响,试验结果如图5所示。

由图5可以看出,助磨剂的种类及其用量均对石英粉磨效果产生了不同程度的影响。在未添加助磨剂的情况下,磨矿10 min后产品中-0.074 mm的含量为16.26%。与未加助磨剂相比,六种助磨剂作用后,磨矿产品中-0.074 mm的含量均有所增加,即六种助磨剂均对石英的粉磨效果产生了积极的作用;针对每一种助磨剂,随其用量的增加,磨矿产品中-0.074 mm粒级的含量虽有所波动,但整体均呈现先增加后减小的趋势,即每种助磨剂均有一个最佳用量(焦磷酸钠0.7%、硫酸铝0.5%、三聚磷酸钠0.5%、柠檬酸0.5%、丙三醇0.7%和乙基黄原酸钾0.5%)。

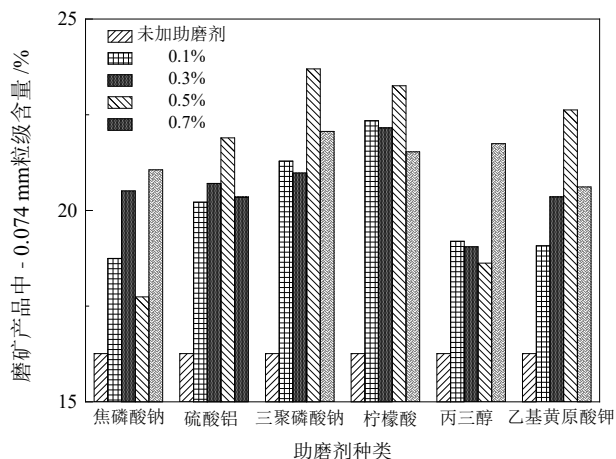


图5 助磨剂用量对磨矿产品中-0.074 mm 含量的影响

Fig. 5 Effects of grinding aid dosage on -0.074 mm content in grinding products

丙三醇0.7%和乙基黄原酸钾0.5%),在该用量下,磨矿产品中-0.074 mm粒级的含量最高,磨矿效果最好。在所选的无机类助磨剂中,助磨效果最好的是三聚磷酸钠,当三聚磷酸钠添加量为0.5%时,其磨矿产品中-0.074 mm粒级含量达到了23.70%,与未加助磨剂相比提高了7.44个百分点;在所选的有机类助磨剂中,助磨效果最好的是柠檬酸,当柠檬酸添加量为0.5%时,其磨矿产品中-0.074 mm粒级含量达到了23.26%,与未加助磨剂相比提高了7.00个百分点。

3.3 助磨剂对m阶磨矿动力学参数的影响

根据图5得到的各种助磨剂最佳用量,添加各助磨剂最佳用量后,磨矿产品的粒度分布如表4所示。

采用与3.1小节中同样的方法求得各助磨剂最佳用量条件下的石英m阶磨矿动力学模型,如表5所示。

六种助磨剂在各自最佳用量条件下,对石英粉磨m阶磨矿动力学模型参数k和m的影响如图6所示。

由图6可知,无论是否添加助磨剂,k值均与物料的粒度相关,随物料粒度的减小,k值逐渐减小;m值的表现则较为复杂。不同助磨剂对石英粉磨m阶磨矿动力学模型参数k和m均产生了不同程度的影响:应用助磨剂后整体而言k值均减小,且助磨剂对粗粒级的影响大于细粒级;m值与无助磨剂相比均有所增大。另外,根据k、m值的变化规律还可以看出,最终磨矿效果既不取决于k值,也不取决于m值,而是取决于各粒级k和m的综合效应。

各助磨剂根据最佳用量作用后石英的m阶磨矿动力学方程式,绘制了不同磨矿时间(1 min、3 min、5 min、7 min、10 min)条件下+0.074 mm粒级的产率 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 与磨矿时间的关系曲线如图7所示。

由图7可以看出,无论使用哪种助磨剂,石英磨矿产品中+0.074 mm粒级的含量均随磨矿时间的增加而降低,在磨矿初期,粗颗粒含量的减少较快,随着磨矿时间的延长,粗颗粒含量的减小趋势变慢。相比较而言,在各种助磨剂的最佳用量下,无机类助磨剂三聚磷酸钠和有机类助磨剂柠檬酸对石英磨矿过程的助磨效果优于其他助磨剂。

3.4 助磨剂对磨矿速率的影响

由图4可知,在本研究磨矿时间范围内,-1+0.45 mm和-0.45+0.18 mm粒级石英的磨矿速率相对最大,因此,采用与3.1中同样的方法求解不同助磨剂在最佳用量条件下-1+0.45 mm和-0.45+0.18 mm粒级石英的磨矿速率,其结果如图8所示。

由图8可以看出,添加最佳用量的不同助磨剂后,-1+0.45 mm和-0.45+0.18 mm粒级石英磨矿速率整体变化仍符合磨矿规律:随着磨矿时间增加,磨矿速率逐渐减小,且相较未加助磨剂的磨矿速率,添加助磨

表 4 助磨剂作用后磨矿产品粒度组成

Table 4 Particle size distribution of grinding products with grinding aids in different time

粒级/mm	用量0.7%焦磷酸钠作用后不同磨碎时间的磨矿产品各粒级累计含量/%					用量0.5%硫酸铝作用后不同磨碎时间的磨矿产品各粒级累计含量/%				
	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min
-2+1	14.17	8.94	5.82	4.53	2.12	12.20	8.46	5.55	3.47	1.59
-1+0.45	50.91	38.10	28.90	22.80	12.63	51.75	41.69	30.54	19.72	9.49
-0.45+0.18	80.47	70.60	61.08	54.72	41.51	81.19	71.24	63.95	52.60	38.28
-0.18+0.1	91.52	86.02	79.77	74.95	64.57	93.49	87.34	82.57	74.80	63.79
-0.1+0.074	97.52	94.01	88.63	85.55	78.94	98.95	94.70	91.07	85.75	78.10
-0.074	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

粒级/mm	用量0.5%三聚磷酸钠作用后不同磨碎时间的磨矿产品各粒级累计含量/%					用量0.5%柠檬酸作用后不同磨碎时间的磨矿产品各粒级累计含量/%				
	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min
-2+1	12.36	7.76	5.57	3.32	1.53	12.97	9.21	4.94	3.67	1.63
-1+0.45	51.43	37.35	27.31	19.03	8.33	49.80	39.16	22.82	18.91	9.10
-0.45+0.18	78.66	69.47	60.55	51.50	36.08	79.48	70.11	56.28	50.31	35.97
-0.18+0.1	90.71	85.49	79.51	73.47	62.27	91.17	85.03	76.94	71.81	61.56
-0.1+0.074	96.41	93.83	89.37	85.00	77.74	97.52	93.54	88.24	84.33	76.30
-0.074	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

粒级/mm	用量0.7%丙三醇作用后不同磨碎时间的磨矿产品各粒级累计含量/%					用量0.5%乙基黄原酸钾作用后不同磨碎时间的磨矿产品各粒级累计含量/%				
	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min	1 min	3 min	5 min	7 min	10 min
-2+1	12.59	8.93	5.54	3.59	2.26	13.80	9.39	4.83	4.20	1.49
-1+0.45	51.00	38.04	30.90	22.73	14.62	52.48	42.35	30.11	24.60	7.68
-0.45+0.18	80.14	71.06	63.76	55.15	44.49	80.23	72.51	63.85	57.11	36.66
-0.18+0.1	91.22	86.96	81.79	76.05	67.43	91.51	87.98	80.91	77.33	62.46
-0.1+0.074	97.35	94.53	90.80	88.96	78.26	97.27	95.23	89.86	87.75	77.37
-0.074	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表 5 助磨剂作用下的 m 阶磨矿动力学模型

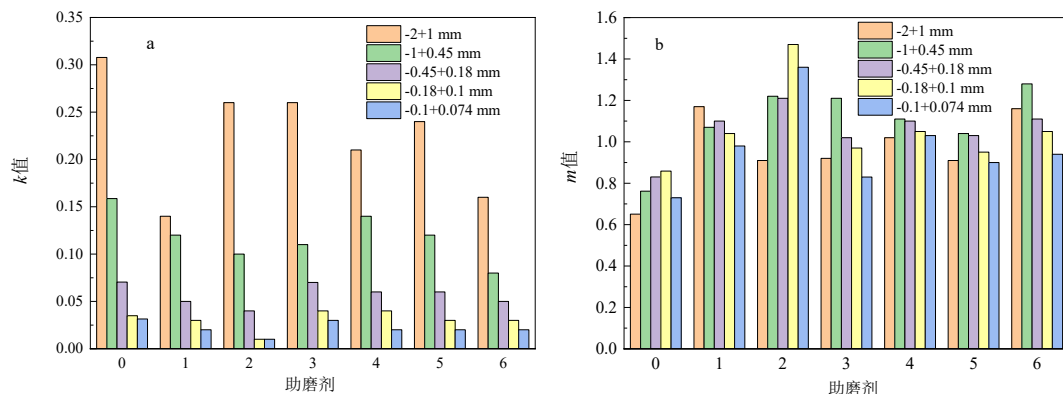
Table 5 M-order grinding kinetic models with grinding aids

助磨剂及用量	m阶磨矿动力学模型
焦磷酸钠 (0.7%)	$R_t = R_0 \exp \left[\left(0.1125 - 0.2986d^{0.3174} \right) t^{1.1543 + 0.0570 \ln d} \right]$
硫酸铝 (0.5%)	$R_t = R_0 \exp \left[- \left(0.0019 + 0.2619d^{1.2122} \right) t^{0.9714 - 0.1773 \ln d} \right]$
三聚磷酸钠 (0.5%)	$R_t = R_0 \exp \left[- \left(0.0267 + 0.2368d^{1.1815} \right) t^{1.0646 + 0.0504 \ln d} \right]$
柠檬酸 (0.5%)	$R_t = R_0 \exp \left[\left(0.0923 - 0.3043d^{0.3741} \right) t^{1.0664 + 0.0018 \ln d} \right]$
丙三醇 (0.7%)	$R_t = R_0 \exp \left[\left(0.0054 - 0.2471d^{0.8031} \right) t^{0.9808 + 0.0089 \ln d} \right]$
乙基黄原酸钾 (0.5%)	$R_t = R_0 \exp \left[- \left(0.0044 + 0.1551d^{0.7683} \right) t^{1.2457 + 0.0927 \ln d} \right]$

剂后的磨矿速率均有不同程度的增大。由图(a)可以看出,添加三聚磷酸钠(0.5%)后,-1+0.45 mm 粒级石英的磨矿速率曲线最高,即磨矿速率最大,这说明三聚磷酸钠对该粒级的助磨效果最佳;由图(b)可以看出,添加柠檬酸(0.5%)后,-0.45+0.18 mm 粒级石英的磨矿速率曲线最高,磨矿速率最大,说明柠檬酸对该粒级的助磨效果最佳。

4 结论

(1)在本研究助磨剂用量范围内,所选六种助磨剂均对石英磨矿具有助磨作用,且每种助磨剂均存在一最佳用量,在该用量条件下,石英的磨矿效果最好,其中无机类助磨剂三聚磷酸钠和有机类助磨剂柠檬酸均在用量为 0.5% 时获得最佳的磨矿效果,即与未



0—无助磨剂; 1—0.7% 焦磷酸钠; 2—0.5% 硫酸铝; 3—0.5% 三聚磷酸钠; 4—0.5% 柠檬酸; 5—0.7% 丙三醇; 6—0.5 乙基黄原酸钾

图6 助磨剂对石英粉磨 m 阶磨矿动力学模型参数 k 和 m 的影响

Fig. 6 Effects of grinding aids on parameters k and m of m -order grinding kinetic model of quartz grinding

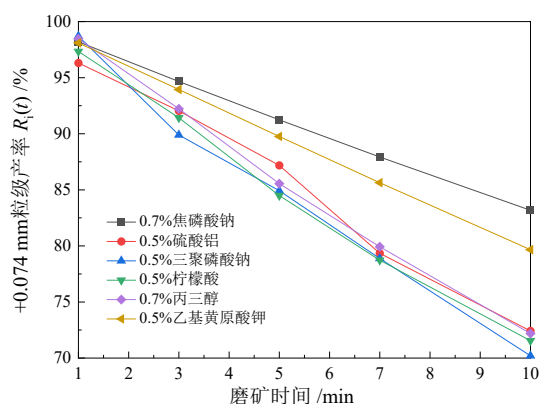


图7 +0.074 mm 粒级的产率与磨矿时间的关系

Fig. 7 The relationship between the yield of +0.074 mm particle size and grinding time

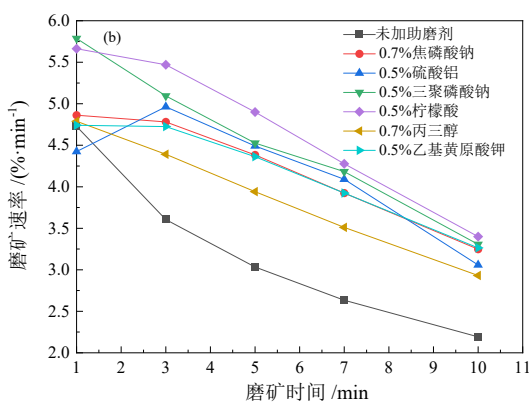
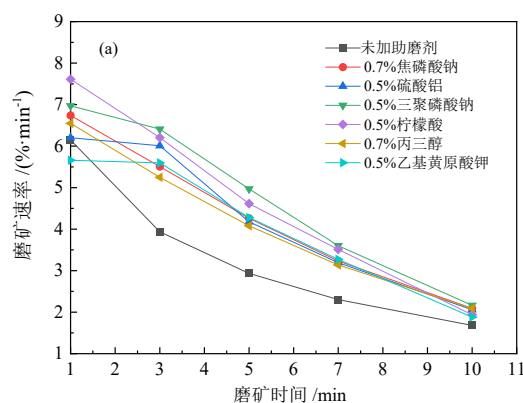


图8 助磨剂对-1+0.45 mm 和-0.45+0.18 mm 粒级磨矿速率的影响

Fig. 8 Effects of grinding aids on grinding rate of -1+0.45 mm and -0.45+0.18 mm particle size

参考文献:

- [1] 韩跃新. 磨矿原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2022: 120-131.
HAN Y X. The principle of grinding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2022: 120-131.
- [2] NOMURA S. Analysis of the ball mill grindability to improve the simplified grinding model[J]. *Powder Technology*, 2022, 405: 117551.
- [3] 田鹏程, 王泽红, 毛勇. 磨矿动力学研究现状及应用[J]. *中国矿业*, 2022, 31(7): 112-121.
TIAN P C, WANG Z H, M Y. Research status and application of

加助磨剂相比, 磨矿产品中-0.074 mm 粒级的含量提高最多。

(2) 无论是否添加助磨剂, k 值均与物料的粒度相关, 随物料粒度的减小, k 值逐渐减小; m 值的表现则较为复杂。不同助磨剂对石英粉磨 m 阶磨矿动力学模型参数 k 和 m 均产生了不同程度的影响, 整体表现为 k 值降低, m 值增大; 磨矿效果取决于 k 和 m 的综合效应。

(3) 应用助磨剂后, 石英各粒级的磨矿速率均增大, 其中 0.5% 用量的三聚磷酸钠和 0.5% 用量的柠檬酸分别对-1+0.45 mm 粒级石英和-0.45+0.18 mm 粒级石英磨矿速率的影响最大。

grinding kinetics[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(7): 112-121.

- [4] NICOLETTA A M, ANGELA B, MARCELLO F, et al. Modeling grinding kinetics of fat based anhydrous pastes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 268(C).
- [5] LEE H, KIM K, LEE H. Analysis of grinding kinetics in a laboratory ball mill using population-balance-model and discrete-element-method[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(11): 2517-2526.
- [6] AUSTIN L G, LUCKIE P T. Methods for determination of breakage distribution parameters[J]. *Powder Technology*, 1972, 5(4): 215-222.
- [7] CAYIRLI S. Analysis of grinding aid performance effects on dry fine

- milling of calcite[J]. [Advanced Powder Technology](#), 2022, 33(3): 103446.
- [8] BOZKURT V, OZGUR I. Dry grinding kinetics of colemanite[J]. [Powder Technology](#), 2007, 176(2/3): 88–92.
- [9] NURETTIN A T, OKAY A, AHMET H B. The effects of grinding aids on modelling of air classification of cement[J]. [Construction and Building Materials](#), 2018, 160.
- [10] 侯英, 印万忠, 朱巨建, 等. 不同碎磨方式下紫金山金铜矿石的磨矿动力学行为[J]. [中南大学学报\(自然科学版\)](#), 2017, 48(5): 1127–1133.
- HOU Y, YIN W Z, ZHU J J, et al. Grinding kinetic behaviors of Au-Cu ore from Zijinshan by different comminuting processes[J]. [Journal of Central South University \(Science and Technology\)](#), 2017, 48(5): 1127–1133.
- [11] 周意超, 赵汝全, 吴彩斌, 等. 磨矿浓度对磨矿产品粒度组成特性的影响[J]. [有色金属科学与工程](#), 2016, 7(5): 93–97.
- ZHOU Y C, ZHAO R Q, WU C B, et al. Effect of grinding concentration on product size distribution characteristics[J]. [Nonferrous Metals Science and Engineering](#), 2016, 7(5): 93–97.
- [12] HASEGAWA M, KIMATA M, SHIMANE M, et al. The effect of liquid additives on dry ultrafine grinding of quartz[J]. [Powder Technology](#), 2001, 114(1): 145–151.
- [13] 王力, 张常法, 张军, 等. 助磨剂对煤沥青磨矿动力学的影响[J]. [山东科技大学学报\(自然科学版\)](#), 2008(5): 23–26.
- WANG L, ZHANG C F, ZHANG J, et al. The effects of grinding agents on the grinding kinetics of coal tar pitch[J]. [Journal of Shandong University of Science and Technology\(Natural Science\)](#), 2008(5): 23–26.
- [14] 黄勇, 史才军, 王小刚, 等. TEA和TIPA对水泥粉磨动力学的影响[J]. [硅酸盐通报](#), 2013, 32(10): 2114–2120.
- HUANG Y, SHI C J, WANG X G, et al. Effect of TEA and TIPA on the grinding kinetics of cement[J]. [Bulletin of the Chinese Ceramic Society](#), 2013, 32(10): 2114–2120.
- [15] CHOI H, LEE W, KIM S. Effect of grinding aids on the kinetics of fine grinding energy consumed of calcite powders by a stirred ball mill[J]. [Advanced Powder Technology](#), 2009, 20(4): 350–354.
- [16] 谢冬冬, 侯英, 盖壮, 等. 助磨剂对氧化铁矿石磨矿动力学行为的影响[J]. [中南大学学报\(自然科学版\)](#), 2020, 51(2): 279–286.
- XIE D D, HOU Y, GAI Z, et al. Influence of grinding aids on grinding kinetics of oxidized iron ore[J]. [Journal of Central South University\(Science and Technology\)](#), 2020, 51(2): 279–286.
- [17] L. G A. A discussion of equations for the analysis of batch grinding data[J]. [Powder Technology](#), 1999, 106(1): 71–77.
- [18] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 197–199.
- DUAN X X. [Crushing and grinding](#)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 197–199.
- [19] 侯英, 丁亚卓, 印万忠, 等. 磨矿动力学参数对磨矿速度的影响[J]. [东北大学学报\(自然科学版\)](#), 2013, 34(5): 708–711.
- HOU Y, DING Y Z, YIN W Z, et al. Influence of grinding kinetics parameters on grinding speed[J]. [Journal of Northeastern University\(Natural Science\)](#), 2013, 34(5): 708–711.
- [20] 张志鹏, 周强, 肖庆飞, 等. 基于磨矿动力学某铜矿磨矿介质配比优化试验研究[J]. [矿产保护与利用](#), 2023, 43(1): 66–72.
- ZHANG Z P, ZHOU Q, XIAO Q F, et al. Experimental study on optimization of grinding medium ratio of some copper mine based on grinding kinetics[J]. [Conservation and Utilization of Mineral Resources](#), 2023, 43(1): 66–72.
- [21] GUPTA V K. Effect of particulate environment on the grinding kinetics of mixtures of minerals in ball mills[J]. [Powder Technology](#), 2020, 375: 549–558.

Study on the Effect of Inorganic/organic Grinding Aids on the Kinetic Model Parameters of Quartz Grinding

TIAN Pengcheng, WANG Zehong, MAO Yong

School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: Quartz was used as the feed material of the mill, and six grinding aids (inorganic grinding aids: sodium pyrophosphate, aluminum sulfate, and sodium tripolyphosphate; organic grinding aids: glycerol, citric acid, and potassium ethylxanthate) were added to conduct a wet grinding test. The m-order grinding kinetic model of quartz grinding before and after the addition of grinding aids was established, and the effects of grinding aids on the model parameters and grinding rate were systematically analyzed. It was shown that after 10 min grinding, the amount of 0.5% sodium tripolyphosphate increased the -0.074 mm content of the grinding products by 7.44 percentage points and the amount of 0.5% citric acid increased the -0.074 mm content of the grinding products by 7.00 percentage points. The grinding aids changed the values of model parameters k and m . The overall grinding effect depended on the combined effect of k and m . The increment of $-1+0.45$ mm quartz with sodium tripolyphosphate grinding rate is the largest, and the increment of $-0.45+0.18$ mm with citric acid grinding rate is the largest.

Keywords: quartz; grinding aids; grinding kinetics; grinding efficiency

引用格式: 田鹏程, 王泽红, 毛勇. 无机/有机助磨剂对石英磨矿动力学模型参数的影响研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 112-119.

TIAN Pengcheng, WANG Zehong, MAO Yong. Study on the effect of inorganic/organic grinding aids on the kinetic model parameters of quartz grinding[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 112-119.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



作者简介:

田鹏程(1997—),男,山西朔州人,硕士研究生。2020年6月毕业于太原理工大学能源与动力工程专业,2020年9月于东北大学攻读硕士学位(资源与环境专业),师从王泽红副教授,主要从事粉磨技术和粉体工程的基础理论研究。



通信作者简介:

王泽红,矿物加工工程博士,东北大学资源与土木工程学院矿物工程系副教授,博士生导师;辽宁省第五批“百千万人才工程”千人层次人选,沈阳市拔尖人才;曾赴澳大利亚南澳大学 Ian Wark 研究所从事博士后研究工作。主要研究方向:矿物加工理论与工艺、粉体工程与矿物材料、选矿过程数学模型与模拟。承担国家“863”计划、国家自然科学基金、省科技攻关及基金课题以及横向课题数十项。曾获辽宁省科技进步二等奖、中国有色金属建设协会优秀工程咨询成果二等奖等;发表学术论文近百篇,主编出版《选矿数学模型》《选矿厂设计》《矿物材料》等专著,参编《选矿工程师手册(第一分册)》、《矿产资源高效加工与综合利用》(下册)以及《现代选矿技术手册》(第1册:破碎筛分与磨矿分级)等专著。