

# 助磨剂对钼矿磨矿动力学的影响<sup>①</sup>

史福潮<sup>1</sup>, 丁亚蓉<sup>2,3</sup>, 陈荣健<sup>1</sup>, 宋雪艳<sup>4</sup>, 杨聪仁<sup>3</sup>, 白鹏飞<sup>2,3</sup>, 马昆林<sup>2,3</sup>

(1.伊春鹿鸣矿业有限公司, 黑龙江 伊春 153000; 2.中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 3.中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 4.上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201206)

**摘要:**以伊春鹿鸣钼矿为研究对象,采用 $m$ 阶磨矿动力学模型探究了助磨剂三乙醇胺(TEA)、三异丙醇胺(TIPA)、聚丙烯酸(PAA)和聚羧酸醚(PCE)对钼矿磨矿动力学参数的影响。结果表明:未使用助磨剂时,随着磨矿介质充填率增大,磨矿产品-0.074 mm 粒级产率明显增多,磨矿动力学参数 $m$ 、 $k$ 值增大;磨矿介质充填率相同时,随着磨矿产品粒级减小, $m$ 值增大、 $k$ 值减小;与清水组相比,添加助磨剂 TEA、TIPA、PAA、PCE 的磨矿产品-0.074 mm 粒级产率分别增长了 6.19、2.40、3.62、1.89 百分点;添加 TEA 后的 $k$ 、 $m$ 值比清水组的 $k$ 、 $m$ 值大,且粒级较大时, $k$ 值较清水组下降幅度更大,粒级较小时, $k$ 值与粒度的关系曲线变得平缓, $k$ 值在磨矿初期起主导作用;添加助磨剂后,颗粒分散性增加,颗粒团聚明显减少。

**关键词:** 磨矿; 钼矿; 助磨剂; 磨矿动力学; 表面形貌; 磨矿效率; 磨矿介质; 介质充填率

中图分类号: TD952; TD921

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.014

文章编号: 0253-6099(2025)02-0080-05

## Effect of Grinding Aids on Grinding Kinetics of Molybdenum Ore

SHI Fuchao<sup>1</sup>, DING Yarong<sup>2,3</sup>, CHEN Rongjian<sup>1</sup>, SONG Xueyan<sup>4</sup>, YANG Congren<sup>3</sup>, BAI Pengfei<sup>2,3</sup>, MA Kunlin<sup>2,3</sup>

(1. Yichun Luming Mining Co., Ltd., Yichun 153000, Heilongjiang, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 3. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 4. Shanghai Pudong Architectural Design Research Institute Co. Ltd., Shanghai 201206, China)

**Abstract:** As for the molybdenum ores from Yichun Luming Mine, an  $m$ -order grinding kinetics model was used to explore the effects of four grinding aids, such as triethanolamine (TEA), triisopropanolamine (TIPA), polyacrylic acid (PAA) and polycarboxylic ether (PCE), on grinding kinetics of molybdenum ores. The results show that before addition of grinding aids, the proportion of the milled product in the size range of -0.074 mm increases significantly with the increase of the medium charge ratio, and the grinding kinetic parameters of  $m$  and  $k$  all increase; with the same medium charge ratio, the parameter of  $m$  increases and the parameter of  $k$  decreases as the grain size of milled product decreases. Comparatively, as for the samples milled with grinding aids of TEA, TIPA, PAA and PCE, the milling products in the size range of -0.074 mm increase by 6.19, 2.40, 3.62 and 1.89 percentage points, respectively. Compared to the system without grinding aids, an addition of TEA can lead to higher values of parameters of  $k$  and  $m$ , and larger particle size can result in great decline in the  $k$  value, while small particle size can bring a gentle  $k$ -grain curve, indicating the  $k$  value plays a dominant role at the initial grinding stage. After addition of grinding aids, the grains present improved dispersibility with significantly less agglomeration.

**Key words:** grinding; molybdenum ore; grinding aid; grinding kinetics; surface morphology; efficiency of grinding; grinding media; medium charge ratio

磨矿是高能耗作业,添加适量适配的助磨剂后能改善矿物颗粒表面性质<sup>[1-4]</sup>,减少颗粒团聚现象,增加

颗粒分散性,提高矿浆流动性,从而显著提高磨矿效率、减少能源和钢球消耗、降低企业生产成本<sup>[5-6]</sup>。磨

① 收稿日期: 2024-10-13

基金项目: 中铁资源科技项目(LM(2023)-F-055)

作者简介: 史福潮(1988—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事选矿技术工业应用研究。E-mail: 17871947823@163.com

通信作者: 丁亚蓉(1999—),女,甘肃兰州人,硕士研究生,主要研究方向为助磨剂对磨矿的影响及其应用。E-mail: 13919318514@163.com

矿动力学是磨矿过程中大于某粒度的粗粒级物料产率的变化与磨矿时间的关系函数<sup>[7]</sup>。本文以伊春鹿鸣钼矿为研究对象,采用三乙醇胺(TEA)、三异丙醇胺(TIPA)、聚丙烯酸(PAA)、聚羧酸醚(PCE)为助磨剂进行磨矿试验,研究上述4种助磨剂对钼矿磨矿效率的影响,并分析不同助磨剂对磨矿动力学参数的影响。

### 1 磨矿动力学方程

磨矿过程中,物料与钢球均做抛落式运动,磨矿过程是冲击力和磨剥力作用下矿物发生解离或褪去氧化表面形成新表面的过程,磨矿时,有用矿物与脉石矿物充分解离并达到适合选别的粒度,颗粒受到机械力作用发生塑性变形、晶面滑移,甚至产生位错、孪晶缺陷等<sup>[8]</sup>。

磨矿动力学研究中,假设粗粒级磨矿产品减少的速度与粗粒级质量成正比,很多情况下, $m$ 阶磨矿动力学方程更符合实际情况, $m$ 阶磨矿动力学方程式<sup>[8]</sup>为:

$$R = R_0 e^{-kt^m} \quad (1)$$

式中: $R$ 为研磨时间 $t$ 后粗粒级残留物质量分数,%; $t=0$ 时 $R=R_0$ ; $t$ 为磨矿时间,min; $k$ 为磨矿动力学的比例系数,由磨矿条件决定,反映磨矿产品的细度影响; $m$ 为磨矿动力学的阶数,与矿物颗粒本身强度及均匀性有关。结合分析 $k$ 和 $m$ 的影响更符合实际复杂的磨矿过程<sup>[9]</sup>。

对式(1)两边取对数,得:

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

式中: $m$ 为斜率, $m=1$ 时为一阶动力学方程; $\ln k$ 为截距。

对式(1)求时间 $t$ 的导数,求得磨矿速率公式为:

$$v_t = -R_0 k t^{m-1} m e^{-kt^m} \quad (3)$$

式中: $v_t$ 为 $t$ 时刻的磨矿速率,%/min。

## 2 试验

### 2.1 试验矿样

试验矿样取自伊春鹿鸣矿业有限公司,矿样为选矿厂具有代表性的球磨机给矿,矿样粒度组成见表1。试验用助磨剂详见表2。

### 2.2 磨矿试验

采用长沙顺泽矿冶机械制造有限公司 XMQ-240×90型锥形球磨机进行试验。球磨机处理量0.5~1.0 kg/h,容积6.25 L,筒体转速96 r/min。

表1 矿样粒度组成

粒级/mm	产率/%	正累计产率/%
-3+1	13.37	13.37
-1+0.5	19.54	32.91
-0.5+0.15	52.99	85.90
-0.15+0.074	6.81	92.71
-0.074+0.037	2.48	95.19
-0.037	4.81	100.00

表2 试验用助磨剂

试剂名称	品级	生产厂家
三乙醇胺(TEA)	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
三异丙醇胺(TIPA)	95%	上海麦克林生化科技股份有限公司
聚丙烯酸(PAA)	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
聚羧酸醚(PCE)	99%	山东优索化工科技有限公司

球磨试验使用钢球为磨矿介质,介质充填率 $\varphi$ 分别为20%和30%,研磨时间分别为0、3、4、5、6、7、8 min,给料粒度不大于3 mm,每次球磨给矿量500 g,磨矿浓度(质量分数)67%。采用湿式筛分法对磨矿产品进行粒度分析;采用扫描电镜(SEM)观察和分析使用助磨剂前后钼矿磨矿产品表面形貌。

## 3 结果与讨论

### 3.1 钼矿磨矿动力学方程及其参数求解

#### 3.1.1 介质充填率对磨矿动力学的影响

未添加助磨剂时,不同磨矿介质充填率下不同磨矿时间所得磨矿产品粒度分布情况见表3。由表3可知,

表3 不同磨矿介质充填率下的磨矿产品粒度分布情况

介质充填率/%	粒级/mm	不同磨矿时间下磨矿产品粒级产率/%						
		0	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min
20	-3+1	13.37	0.37	1.34	0.72	0.32	0.29	0.32
	-1+0.50	19.54	1.32	0.82	0.57	0.48	0.27	0.11
	-0.50+0.15	52.99	50.23	46.10	34.06	34.06	27.53	15.26
	-0.15+0.074	6.81	17.48	19.38	31.42	26.88	28.58	40.85
	-0.074+0.037	2.48	14.63	17.10	14.94	21.07	17.76	20.32
	-0.037	4.81	15.98	15.26	18.28	17.18	25.57	23.14
	-0.074	8.15	30.61	32.36	33.23	38.26	43.34	43.46
30	-3+1	13.37	0.66	0.54	0.17	0.16	0.12	0.26
	-1+0.50	19.54	0.26	0.25	0.01	0.05	0.06	0.02
	-0.50+0.15	52.99	27.98	18.26	10.50	3.38	5.45	0.99
	-0.15+0.074	6.81	26.54	29.04	33.17	34.50	22.24	19.66
	-0.074+0.037	2.48	24.73	26.85	30.89	27.91	34.21	43.78
	-0.037	4.81	19.82	25.07	25.26	34.00	37.91	36.85
	-0.074	8.15	44.56	51.92	56.15	61.92	72.12	80.62

随着磨矿时间增加,磨矿产品-0.074 mm 粒级产率逐渐增多;相同磨矿时间下,介质充填率 30%时-0.074 mm 粒级产率更高,磨矿效果更好。这主要是相同磨矿时间下,介质充填率高时,介质与钼矿颗粒碰撞概率更高,矿物受碰撞次数增加,破碎能量累积更多,破碎率增加。

未添加助磨剂时,使用式(2)计算得到磨矿介质充填率  $\varphi$  为 20%和 30%时的  $\ln[\ln(R_0/R_t)]$  与  $\ln t$  的关系曲线,如图 1 所示。由图 1 可见, $\ln[\ln(R_0/R_t)]$  与  $\ln t$  呈线性关系。 $\varphi$  为 20%和 30%时的磨矿动力学参数  $m$ 、 $k$  值如表 4 所示。由表 4 可见,介质充填率相同时,粒级越小, $m$  值越大而  $k$  值减小;相同粒级时, $\varphi = 30\%$

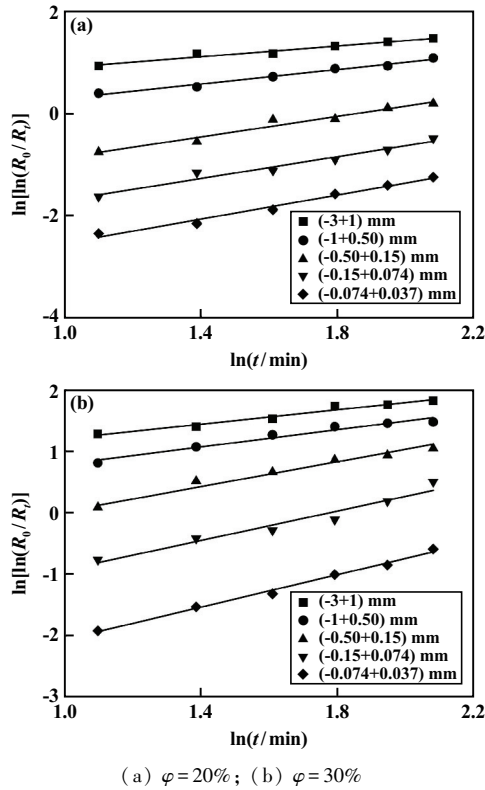


图 1 未添加助磨剂时  $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ - $\ln t$  关系曲线

Fig. 1  $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ - $\ln t$  relationship curve without grinding aids

表 4 未添加助磨剂时磨矿动力学参数

Table 4 Dynamic parameters of grinding without grinding aids

介质充填率/%	粒级/mm	$m$ (斜率)	$\ln k$ (截距)	$k$	$R^2$
20	-3+1	0.525 92	0.375 97	1.456 40	0.960 84
	-1+0.50	0.661 42	-0.410 87	0.663 07	0.983 04
	-0.50+0.15	1.004 20	-1.860 73	0.155 55	0.963 65
	-0.15+0.074	1.067 24	-2.760 87	0.063 23	0.963 05
	-0.074+0.037	1.179 03	-3.713 47	0.024 39	0.983 07
30	-3+1	0.586 69	0.610 20	1.840 80	0.969 66
	-1+0.50	0.700 30	0.083 17	1.086 73	0.961 32
	-0.50+0.15	1.010 66	-0.994 93	0.369 75	0.987 46
	-0.15+0.074	1.195 83	-2.127 28	0.119 16	0.951 12
	-0.074+0.037	1.319 99	-3.383 08	0.033 94	0.993 19

研磨条件下  $m$  和  $k$  值更大。随着磨矿时间增加, $m$  值逐渐增大, $k$  值逐渐减小。 $k$  值与颗粒细度有关,随着颗粒粒度逐渐减小, $k$  值逐渐减小。磨矿动力学参数  $k$  值的变化情况与矿石颗粒越细越难磨的规律一致;矿物颗粒粒度较大时,存在的裂缝数目多,研磨过程中,颗粒受钢球、衬板及颗粒间冲击力、磨剥作用后更容易破碎;矿物颗粒粒度减小后,颗粒表面晶格缺陷减少,裂纹数减少,不易破碎<sup>[10]</sup>。

3.1.2 助磨剂对磨矿动力学的影响

添加不同种类助磨剂,进行钼矿磨矿试验,介质充填率为 30%时助磨剂种类对磨矿产品各粒级产率的影响见表 5。添加助磨剂后,0.074~0.50 mm 各粒级产率均比不添加助磨剂时有所降低,且-0.074 mm 粒级产率均有不同程度增加,说明添加助磨剂有利于钼矿磨矿。

表 5 助磨剂种类对磨矿产品各粒级产率的影响

Table 5 Effect of grinding aid type on yields of grinding products

粒级/mm	不同种类助磨剂所得磨矿产品粒级产率/%					
	原矿	水	TEA	TIPA	PAA	PCE
-3+1	7.72	0.01	0	0	0.01	0
-1+0.50	22.37	0.11	0.04	0.09	0.11	0.10
-0.50+0.15	55.46	3.87	3.50	4.55	3.89	5.38
-0.15+0.074	6.30	33.90	28.07	30.77	30.18	30.34
-0.074+0.037	3.39	30.82	34.32	31.66	30.56	32.07
-0.037	4.75	31.37	34.06	32.93	35.25	32.01
-0.074	8.15	62.19	68.38	64.59	65.81	64.08

介质充填率 30%时,添加三乙醇胺 (TEA) 时的钼矿磨矿效果最好,因此,添加 TEA 进行磨矿动力学试验,得到添加助磨剂 TEA 的  $\ln[\ln(R_0/R_t)]$  与  $\ln t$  关系曲线如图 2 所示,相应的磨矿动力学参数  $m$ 、 $k$  值见表 6。与未添加助磨剂时相比, $m$  值增加、 $k$  值减小。

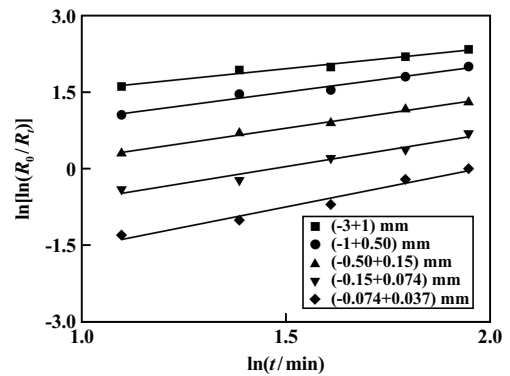


图 2 添加 TEA 时  $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ - $\ln t$  关系曲线

Fig. 2  $\ln[\ln(R_0/R_t)]$ - $\ln t$  relationship curve with TEA as a grinding aid

表 6 添加 TEA 时的磨矿动力学参数  $m$ 、 $k$  值 ( $\varphi = 30\%$ )

Table 6 Dynamic parameters of grinding with TEA as a grinding aid

粒度/mm	$m$ (斜率)	$\ln k$ (截距)	$k$	$R^2$
-3+1	0.709 96	0.911 53	2.488 13	0.968 72
-1+0.50	1.055 25	-0.088 11	0.915 66	0.974 08
-0.50+0.15	1.175 30	-0.973 22	0.377 86	0.994 25
-0.15+0.074	1.300 46	-1.908 21	0.148 35	0.965 16
-0.074+0.037	1.582 08	-3.116 75	0.044 30	0.968 68

无助磨剂及添加助磨剂的  $k$ 、 $m$  值变化情况如图 3 所示,对应的拟合方程详见表 7。由图 3 及表 7 可以发现,随着粒度减小,  $m$  值呈线性增加,且  $m$  (无助磨剂,  $\varphi = 20\%$ ) <  $m$  (无助磨剂,  $\varphi = 30\%$ ) <  $m$  (TEA,  $\varphi = 30\%$ ), 介质充填率增加,  $m$  值变大,随着粒度减小,  $k$  值总体下降, A、C 区域粒度范围内均为  $k$  (无助磨剂,  $\varphi = 20\%$ ) <  $k$  (无助磨剂,  $\varphi = 30\%$ ) <  $k$  (TEA,  $\varphi = 30\%$ ), B 区域粒度范围内  $k$  (无助磨剂,  $\varphi = 20\%$ ) <  $k$  (TEA,  $\varphi = 30\%$ ) <  $k$  (无助磨剂,  $\varphi = 30\%$ )。添加 TEA 后, A 区域  $k$  曲线更陡,且  $k$  (TEA,  $\varphi = 30\%$ ) 曲线变化更明显,说明粗粒级段  $k$  值起主要作用,即磨矿初期  $k$  值起主导作用,说明磨矿前期添加 TEA 主要起到降低磨矿颗粒表面硬度的作用,粒级减小后  $k$  曲线逐渐平缓,  $k$  值的影响作用逐渐减小,  $m$  值起主导作用。随着粒度减小,添加助磨剂与不添加助磨剂时的  $k$  值差距逐渐减小,说明粒级越大,磨矿速度差值越大,与文献[11]研究结果一致。

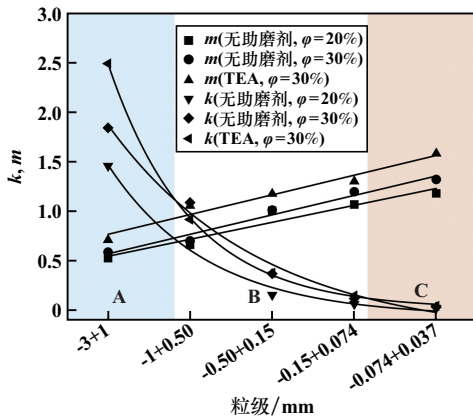


图 3 添加助磨剂前后  $k$ 、 $m$  值变化情况

Fig. 3  $k$  and  $m$  values before and after addition of grinding aids

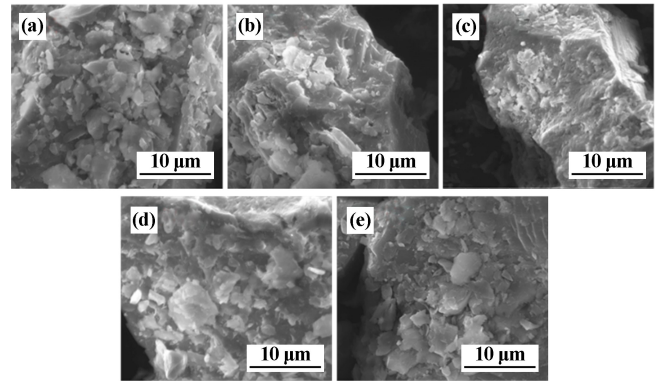
表 7 添加助磨剂前后  $k$ 、 $m$  拟合方程

Table 7  $k$  and  $m$  fitting equations before and after addition of grinding aids

试验条件	$m$ 拟合方程	$k$ 拟合方程
无助磨剂, $\varphi = 20\%$	$y = 0.373\ 95 + 0.171\ 2x$	$y = 3.494\ 22e^{-x/1.212\ 28} - 0.063\ 93$
无助磨剂, $\varphi = 30\%$	$y = 0.374\ 06 + 0.196\ 21x$	$y = 3.654\ 6e^{-x/1.874\ 53} - 0.274\ 93$
添加 TEA, $\varphi = 30\%$	$y = 0.567\ 78 + 0.198\ 95x$	$y = 6.649\ 94e^{-x/1.010\ 24} + 0.013\ 86$

### 3.2 助磨剂对钼矿磨矿产品颗粒微观形貌的影响

添加助磨剂前后磨矿产品 -0.074 mm 粒级钼矿颗粒的 SEM 图像如图 4 所示。由图 4 可见:不添加助磨剂时,小颗粒黏附于大颗粒表面,存在团聚现象;添加助磨剂后,钼矿颗粒明显分散;不添加助磨剂时,颗粒呈现不规则形状,且多棱角,表面凸起和块状较多;添加助磨剂后,颗粒表面出现凹槽,说明磨矿过程中添加助磨剂可显著减少团聚现象。



(a) 水; (b) TEA; (c) TIPA; (d) PAA; (e) PCE

图 4 添加助磨剂前后磨矿产品 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of grinding products before and after addition of grinding aids

图 5 为助磨剂减少矿物颗粒团聚示意图。助磨剂吸附在矿石颗粒表面,消除颗粒间键合力,颗粒间斥力增加,有效阻止团聚,降低矿浆黏度,改善磨矿效果,提高磨矿效率。

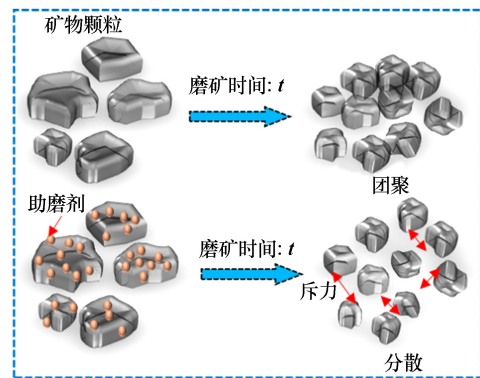


图 5 助磨剂减少矿物颗粒团聚示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a grinding aid in reducing mineral particle agglomeration

## 4 结论

1) 钼矿磨矿过程符合  $m$  阶磨矿动力学模型,介质充填率由 20% 增加至 30% 时,磨矿动力学参数  $k$ 、 $m$  值均增大;介质充填率相同时,粒级越小,  $m$  值越大,  $k$

值越小;介质充填率为30%时,-0.074 mm 粒级钼矿颗粒产率更大,增大介质充填率有利于提高磨矿效率。

2) 与清水组磨矿结果对比发现,添加助磨剂 TEA、TIPA、PAA、PCE 后,磨矿产品-0.074 mm 粒级产率均有不同程度增加,其中添加 TEA 的磨矿效果最好;添加助磨剂后,磨矿产品颗粒分散性增加,团聚现象显著减少。

3) 介质充填率30%、添加助磨剂 TEA 时,磨矿动力学参数  $m$  值增加、 $k$  值减小,粒级较大时, $k$  值下降幅度更大,粒级较小时, $k$  值与粒级关系曲线变得平缓, $k$  值在磨矿初期起主导作用。

### 参考文献(References):

- [1] FRANCO Z, KAREN S. Assessing the effect of alkanolamine grinding aids in limestone calcined clay cements hydration[J]. *Construction and Building Materials*, 2021,266,Part B:121293.
- [2] 刘宝,潘钢华,高敏,等. 助磨剂对铁尾矿助磨效果及混合水泥水化性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022,52(5):907-916.
- LIU Bao, PAN Ganghua, GAO Min, et al. Influence of grinding aid on the grinding effect of iron tailings and hydration properties of blended cement[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2022,52(5):907-916.
- [3] 赵瑞超,韩跃新. 绿泥石的球磨特性及其破裂参数[J]. *中国有色金属学报*, 2018,28(5):1076-1082.
- ZHAO Ruichao, HAN Yuexin. Ball grinding characteristic and breakage parameters of chlorite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018,28(5):1076-1082.
- [4] 赵前飞,佟琳琳,杨洪英,等. 磨矿介质对方铅矿氧化浸出行为的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022,43(12):1777-1783.
- ZHAO Qianfei, TONG Linlin, YANG Hongying, et al. Effect of grinding media on cyanide leaching behavior of galena[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2022,43(12):1777-1783.
- [5] 董耀武,孙振平,周晓阳,等. 三乙醇胺和三聚磷酸钠助磨剂对水泥颗粒表面性质的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022,25(7):722-729.
- DONG Yaowu, SUN Zhenping, ZHOU Xiaoyang, et al. Effect of triethanolamine and sodium tripolyphosphate as grinding aids on the surface properties of cement particle[J]. *Journal of Building Materials*, 2022,25(7):722-729.
- [6] 白鹏飞,杨聪仁,马昆林,等. 助磨剂影响矿物浮选的作用机理及研究进展[J]. *材料导报*, 2025,39(3):96-102.
- BAI Pengfei, YANG Congren, MA Kunlin, et al. Mechanism and research progress of the effect of grinding aids on mineral flotation[J]. *Materials Reports*, 2025,39(3):96-102.
- [7] HANSOL L, KWANHO K, HOON L. 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.
- [8] WANG B, WEI S C, WANG Y J, et al. High energy ball-milled nano-Ti polymer: Kinetic analysis and synergetic effect[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023,656,Part A:130305.
- [9] 王泽红,田鹏程,毛勇. 助磨剂丙三醇和焦磷酸钠对石英磨矿动力学参数的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023,44(7):1009-1018.
- WANG Zehong, TIAN Pengcheng, MAO Yong. Effects of grinding aids glycerol and sodium pyrophosphate on kinetic parameters of quartz grinding[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2023,44(7):1009-1018.
- [10] YIN Z X, WANG N, LI T Q, et al. Experimental investigation of the impact breakage characteristics between grinding media and iron ore particle in ball mills[J]. *Advanced Powder Technology*, 2023,34(4):103982.
- [11] 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 Dongdong, HOU Ying, GAI Zhuang, 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.
- 引用本文:史福潮,丁亚蓉,陈荣健,等. 助磨剂对钼矿磨矿动力学的影响[J]. *矿冶工程*, 2025,45(2):80-84.
- SHI Fuchao, DING Yarong, CHEN Rongjian, et al. Effect of grinding aids on grinding kinetics of molybdenum ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(2):80-84.