

文章编号: 1004-4051(2025)07-0295-11

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20250500

卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布特性研究

刘睿哲¹, 张小龙^{1,2,3}, 韩跃新^{1,2,3}

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 数字钢铁全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

3. 难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 随着嵌布粒度较粗的易选矿产资源的不断枯竭, 开发嵌布粒度较细的矿产资源成为必然趋势。细磨是实现嵌布粒度较细的矿产资源高效利用的必要途径, 卧式搅拌磨机作为一种新型高效的细磨设备, 已经在矿产资源细磨领域得到了广泛应用。针对卧式搅拌磨机磨矿过程影响因素多、磨矿产品粒度分布调控难度大的技术难题, 本文以鞍钢矿业弓长岭选矿厂磁选粗精矿为研究对象, 采用 GGS、RRB、S 累计粒度分布方程对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布进行拟合分析, 考察了卧式搅拌磨机给矿量、搅拌器转速、矿浆浓度、介质充填率等关键磨矿参数对其磨矿产品粒度分布特性影响规律。研究结果表明, 采用 RRB 累计粒度分布方程对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布进行拟合的效果较好; 磨矿产品均匀性指数随着给矿量的增加而降低, 随着搅拌器转速、矿浆浓度的增大呈先增大后减小的趋势, 随着介质充填率的增大而增大。磁选粗精矿卧式搅拌磨机磨矿四因素三水平正交实验结果表明, 影响卧式搅拌磨机磨矿产品均匀性的关键工艺参数按显著性大小依次为: 给矿量 > 搅拌器转速 > 矿浆浓度 > 介质充填率, 确定最佳磨矿条件为: 给矿量 12 kg/h、搅拌器转速 1 500 rpm、矿浆浓度 30%、介质充填率 70%, 该条件下磨矿产品均匀性指数达到 0.965。该研究结果为优化卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布调控提供了理论依据。

关键词: 卧式搅拌磨机; 粒度分布方程; 均匀性指数; 方差分析; 正交实验

中图分类号: TD92 **文献标识码:** A

Research on the particle size distribution characteristics of ore grinding products of horizontal stirring mill

LIU Ruizhe¹, ZHANG Xiaolong^{1,2,3}, HAN Yuexin^{1,2,3}

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. State Key Laboratory of Digital Steel, Shenyang 110819, China;

3. National-local Joint Engineering Research Center of High-efficient Exploitation Technology for Refractory Iron Ore Resources, Shenyang 110819, China)

Abstract: With the depletion of free-milling mineral resources with coarse dissemination size, dealing

收稿日期: 2025-03-19 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 52474285); 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项项目资助(编号: 2024ZD1003406); 辽宁省科技计划项目资助(编号: 2023-MSBA-199); 中央高校基本科研业务费项目资助(编号: N25LJR002)

第一作者简介: 刘睿哲(2001—), 男, 汉族, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 研究方向为卧式搅拌磨机细磨过程液固流动特性, E-mail: 2250719965@qq.com。

通讯作者简介: 张小龙(1991—), 男, 汉族, 内蒙古赤峰人, 博士生导师, 研究方向为低碳碎磨理论与技术、复杂难选矿产资源清洁利用, E-mail: zhangxiaolong@mail.neu.edu.cn。

引用格式: 刘睿哲, 张小龙, 韩跃新. 卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布特性研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(7): 295-305.

LIU Ruizhe, ZHANG Xiaolong, HAN Yuexin. Research on the particle size distribution characteristics of ore grinding products of horizontal stirring mill[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(7): 295-305.

with the fine-dissemination-size mineral resources becomes an inevitable trend. Fine grinding is an indispensable pathway in efficient utilizing of micro granular mineral resources. Horizontal stirring mill is a new effective fine grinding equipment and has a widely industrial application. However, the running processes of the equipment is affected by a lot of factors and it is difficult to control the particle size distribution of grinding products. In this paper, the rougher concentrate which is obtained from magnetic separation process of Gongchangling Concentrator of Ansteel Mining is take as a research object. The particle size distribution equations, such as GGS, RRB, and S, are employed in this study to investigate the particle size distribution of grinding products of horizontal stirring mill. Meanwhile, the effect of feed rate, blender speed, pulp density, and medium filling rate on particle size distribution characteristics of grinding products is researched in this study. The findings show that RRB is the best fitting equation to analysis the particle size distribution of griding product of horizontal stirring mill. There is a negative correlation between uniformity index of grinding products and feed rate. With the improvement of blender speed and pulp density, the uniformity index of grinding products first increases and then decreases. There is a positive correlation between uniformity index of grinding products and medium filling rate. According to the results of orthogonal experiment, the effect of the factors on the equality of the grinding products follower the order of feed rate > blender speed > pulp density > medium filling rate. A uniformity index of grinding products of 0.965 is obtained under the optimal condition: feed rate of 12 kg/h, blender speed of 1 500 rpm, pulp density of 30%, and medium filling rate of 70%. The research results provide a theoretical basis for optimizing the control of particle size distribution in the grinding products of horizontal stirring mills.

Keywords: horizontal stirring mill; particle size distribution function; uniformity index; variance analysis; orthogonal experiment

0 引言

随着矿产资源的开发利用,国内矿产资源嵌布粒度越来越细,需要对其进行细磨乃至超细磨才能实现有用矿物的单体解离^[1-3],传统的磨矿设备在细磨作业中存在过磨欠磨与能量利用率低等现象^[4-6],如华锡集团巴里选矿厂处理锡石多金属矿时,水分旋流器的沉砂与三个摇床的溢流中-0.074 mm 粒级含量超过 60%,锡金属分布率接近 80%^[7],说明原矿过磨现象十分严重,细粒级矿物颗粒无法回收;车河选矿厂在处理 92 号矿体矿石时,为保证锡石的回收率,减少锡石过磨现象,二段磨矿产品粒度为 0.3~0.5 mm,磨矿粒度过粗,导致硫化矿欠磨难浮,浪费药剂的同时,给硫化矿后续分离作业带来较大的困难^[8],改善过磨欠磨现象对后续有用矿物与脉石矿物的高效分离起到决定性作用。为此,许多学者对不同磨机的磨矿产品粒度分布特性^[9-11]展开了一系列的研究^[12-13]。张昆^[14]基于磨矿总体平衡动力学模型研究立式搅拌磨机的充填率、料球比和搅拌器转速对产品粒度分布的影响,研究结果表明,减小充填率、增大料球比、减小搅拌器转速有利于实现立式搅拌磨机窄级别磨矿;李国峰等^[15]研究了介质配比、矿浆浓度、料球比、充填率、搅拌器转速对搅拌磨机的磨矿产品粒度分布特性影响,并基于罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler Benne, RRB)粒度特性方程计算均匀性系数,

研究结果表明在介质配比 $m(\phi 5\text{ mm}):m(\phi 3\text{ mm})=2:3$ 、矿浆浓度 65%、料球比 0.6、充填率 70%、搅拌器转速 450 r/min 时,磨矿产品粒度较细且分布相对均匀;同样基于 RRB 方程计算均匀性系数,程显^[16]研究了搅拌器转速、充填率和料球比对卧式搅拌磨机磨矿产物均匀性系数的影响,研究结果表明当搅拌器转速为 1 367.88 r/min、填充率为 0.67、料球比为 0.9 时,均匀性系数取得最佳值 0.491。

卧式搅拌磨机是一种新型高效的细磨设备,目前有关其磨矿产品粒度分布特性的研究相对较少,为探究关键磨矿因素(给矿量、搅拌机转速、矿浆浓度和介质充填率)对卧式搅拌磨机产品粒度分布特性的影响,本文首先利用 Gates-Gaudin Schumman(GGS)、Rosin-Rammler Benne(RRB)、Swrebec(S)三种粒度方程对不同给矿量条件下卧式搅拌磨机磨矿产品的粒度分布进行拟合,并提出磨矿产物均匀性参数作为卧式搅拌磨机磨矿产品均匀性的评价指标,并探究各关键磨矿因素对卧式搅拌磨机磨矿产物粒度均匀性影响规律。

1 实验原料与方法

1.1 化学组成

样品为鞍钢集团矿业弓长岭有限公司磁选粗精矿。为确定磁选粗精矿化学成分进行多元素分析,结果见表 1。由表 1 可知,全铁含量为 48.51%;主要

杂质成分为 SiO_2 , 含量为 29.29%; 其他杂质 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 含量分别为 1.22%、1.10% 和 0.57%; P、S 含量较低。

表 1 磁选粗精矿的多元素分析结果

Table 1 Multi element analysis of magnetic separation rougher concentrate

单位: %								
成分	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S
含量	48.51	19.80	29.29	0.57	1.10	1.22	0.02	0.08

1.2 铁的化学物相分析

为进一步确定磁选粗精矿中铁的物相组成, 进行铁物相检测分析, 结果见表 2。由表 2 可知, 矿样中主要铁矿物为磁性铁矿物, 铁分布率为 95.57%; 硅酸铁矿物中铁、赤褐铁矿物中铁、碳酸铁矿物中铁、硫化铁矿物中铁含量相对较少, 分布率分别为 2.70%、1.01%、0.54%、0.18%。

表 2 铁化学物相分析结果

Table 2 Chemical iron phase analysis of magnetic separation rougher concentrate

单位: %						
磁性铁 铁物相	碳酸铁 矿物中铁 (CFe)	赤褐铁 矿物中铁 (OFe)	硫化铁 矿物中铁 (SFe)	硅酸铁 矿物中铁 (SiFe)	全铁 (TFe)	
含量	46.36	0.26	0.49	0.09	1.31	48.51
分布率	95.57	0.54	1.01	0.18	2.70	100.00

1.3 矿物组成

为确定磁选粗精矿的矿物组成, 采用 BPMA 对其矿物组成及含量进行测定, 测定结果见表 3。由表 3 可知, 矿样中主要铁矿物为铁氧化物(磁铁矿/赤铁矿)。脉石矿物主要为石英, 其次为辉石、石榴子石和阳起石等。

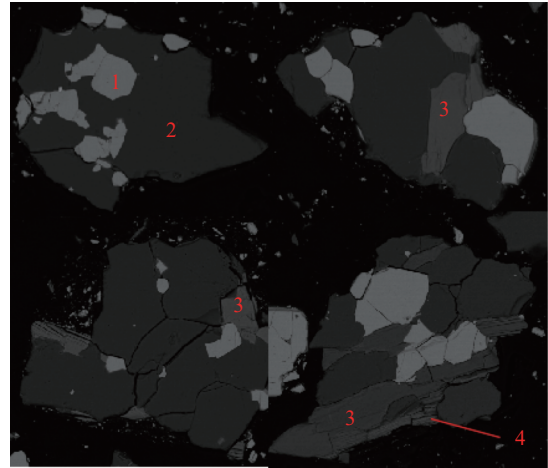
表 3 矿石矿物组成及相对含量

Table 3 Mineral composition and relative content of magnetic separation rougher concentrate

单位: %			
矿物名称	含量	矿物名称	含量
磁铁矿/赤铁矿	54.08	石榴子石	2.69
石英	32.59	阳起石	1.91
辉石	5.02	其他	3.71

1.4 磁铁矿/赤铁矿的嵌布特征

磁选粗精矿中最主要的含铁矿物为磁铁矿/赤铁矿, 也是回收铁的主要对象。磁铁矿/赤铁矿主要与石英和辉石紧密共生, 少量与阳起石等共生, 且包裹现象严重, 如图 1 所示。需要将原矿细磨方能使目



1-磁铁矿/赤铁矿; 2-石英; 3-辉石; 4-阳起石。

图 1 磁铁矿/赤铁矿与脉石矿物共生

Fig. 1 Coexistence of magnetite, hematite and gangue minerals

标矿物与脉石矿物充分解离。

2 实验设备与方法

实验所用到的设备见表 4。

表 4 实验主要设备仪器

Table 4 Main test instruments in the experiments

设备名称	设备型号	生产厂家
卧式搅拌磨机	ALC-1 L	浙江艾领创矿业科技股份有限公司
软管泵	IHP15Z	合肥华运机械制造有限公司
多功能真空抽滤机	XTLZ-Φ260/Φ200	武汉探矿机械厂
电热鼓风干燥箱	DGF30/4-IIA	南京试验仪器厂
激光粒度分析仪	Mastersizer 2000	Malvern Panalytical

首先向磨机中加入球径约为 2 mm 的陶瓷介质球(充填率分别为 50%、55%、60%、65%、70%), 并通过主机控制屏控制给矿量(6 kg/h、12 kg/h、18 kg/h、24 kg/h、36 kg/h)及搅拌器转速(1 000 rpm、1 250 rpm、1 500 rpm、1 750 rpm、2 000 rpm), 随后取 2 000 g 磁选粗精矿与水置于搅拌桶内混合成不同浓度的矿浆(浓度分别为 25%、30%、35%、40%、45%, 本研究所采用的卧式搅拌磨机其磨矿浓度一般不能超过 45%), 经软管泵给入 ALC-1 L 卧式搅拌磨机, 磨矿产品经过滤烘干后使用 Mastersizer 2000 激光粒度仪对其粒度进行分析检测, 基于 RRB 粒度方程计算磨矿产品均匀性指数, 经比较确定最佳条件。

具体实验设备及步骤如图 2 所示。

3 结果与讨论

3.1 累积粒度分布方程拟合度的对比分析

物料的粒度累积方程中的参数可以反映其粒度的均匀性, 目前已有十几种粒度累积方程, 如 A.M. 高登粒度方程、C.E. 安德列耶夫粒度方程、Gaudin-



图 2 实验流程

Fig. 2 Test flow

Melody(GM)方程、Gates-Gaudin Schumman(GGS)方程、Rosin-Rammler Benne(RRB)方程、Swrebec(S)方程等^[17-19]。不同的方程对不同方式得到的物料粒度分布曲线的拟合效果不同,研究发现 GGS 方程更适合破碎得到的物料,RRB 方程、S 方程等更适合细磨得到的磨矿产品。为量化卧式搅拌磨机磨矿产品粒度的均匀性,本研究采用目前研究较多的 GGS 方程、RRB 方程、S 方程等三种不同粒度方程,见式(1)~式(3),并分别对不同给矿量下卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布进行拟合。

表 5 累积粒度分布方程

Table 5 Cumulative particle size distribution equation		
方程名称	累积粒度分布方程	$R(x_e)/\%$
GGS	$R = 100 - 100(x/x_e)^n$ (1)	100.00
RRB	$R = 100 \exp[-(x/x_e)^n]$ (2)	63.21
S	$R = 100 - \frac{100}{1 + \left[\ln(\frac{x_{\max}}{x}) / \ln(\frac{x_{\max}}{x_e}) \right]^n}$ (3)	50.00

注: x 为颗粒直径或筛孔宽, μm ; R 为粒度大于 x 的正累积产率, %; x_e 为方程中的特征粒度, μm 。

GS 方程、RRB 方程、S 方程的表达式见表 5。

为定量描述物料粒度分布均匀性, OHENOJA 等^[20]、JANKOVIC^[21] 等和 MUCSI 等^[22] 采用粒度分布宽度值 W 作为物料分布均匀性指标, 计算见式(4)。

$$W = \frac{x_{90} - x_{10}}{x_{50}} \quad (4)$$

式中, x_{10} 、 x_{50} 、 x_{90} 分别为筛下累积粒度分布含量为 10%、50%、90% 时, 对应的颗粒粒度大小, μm 。

根据表 5 中的累积粒度分布方程可知, 通过单一粒度的筛下累积含量, 可以推导出此时粒度分布特性。以筛下累积含量作为变量, 三种粒度大小的方程式表达式见式(5)~式(7)。结合式(4), 建立磨矿产物粒度分布宽度 W 与累积粒度分布方程中参数 n 之间的关系式, 见式(8)~式(10), 见表 6。

由表 6 可知, GGS 方程和 RRB 方程的粒度分布宽度值 W 仅与累积粒度分布方程中的参数 n 有关, 而根据 S 方程推导得到的粒度分布宽度方程式中有两个参数 n 和 $x_{\max}/x_e$, 需同时判定两个参数的变化, 才能确定物料粒度分布的均匀性。

表 6 推导得颗粒粒度大小的方程与粒度分布宽度方程

Table 6 Derive the equation for particle size and the equation for particle size distribution width

方程	颗粒粒度大小/ μm	粒度分布宽度
GGS	$x = \frac{x_e(R - 100)^k}{100^k}$ (5)	$W = \frac{(9/10)^k - (1/10)^k}{(1/2)^k}$ (8)
RRB	$x = x_e \left[\ln \left(\frac{100}{R} \right) \right]^k$ (6)	$W = \frac{(\ln 10)^k - [\ln(10/9)]^k}{(\ln 2)^k}$ (9)
S	$x = x_{\max} \exp \left[\left(\frac{100}{100 - R} - 1 \right)^k \ln \left(\frac{x_e}{x_{\max}} \right) \right]$ (7)	$W = \left(\frac{x_{\max}}{x_{50}} \right)^{1 - (1/9)^k} - \left(\frac{x_{\max}}{x_{50}} \right)^{1 - 9^k}$ (10)

注: $k=1/n$ 。

针对不同给矿量下卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布,利用 GGS 方程、RRB 方程、S 方程等三种不同粒度方程对检测结果进行拟合,得到 RRB 方程对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度拟合程度最佳,因此,选择

该方程对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度的均匀性进行评价。

不同给矿量下卧式搅拌磨机磨矿产品的筛下累积产率见表 7,针对该数据拟合结果如图 3 所示。

表 7 给矿量对磨矿产品筛下累积产率的影响

粒度/ μm	筛下累积产率/%				
	6 kg/h	12 kg/h	18 kg/h	24 kg/h	36 kg/h
0.356	0	0	0	0	0
0.564	0.49	0.73	0.25	0.32	0.39
0.893	1.53	2.16	0.89	0.94	1.14
1.416	2.89	3.96	1.72	1.73	2.13
2.244	5.27	6.67	2.93	2.94	3.61
3.557	9.70	11.09	4.90	4.91	5.90
5.637	17.31	17.62	7.84	7.75	9.24
8.934	29.75	26.82	11.87	11.52	13.71
14.159	47.61	39.77	17.35	16.52	19.47
22.44	67.76	56.57	24.94	23.25	26.98
35.566	84.25	74.09	35.22	32.00	36.81
56.368	93.84	87.43	48.87	44.61	49.75
89.337	98.04	94.27	65.78	65.2	66.62
141.589	99.67	96.94	82.37	89.83	85.38
224.404	99.99	98.97	94.73	100	98.64
355.656	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

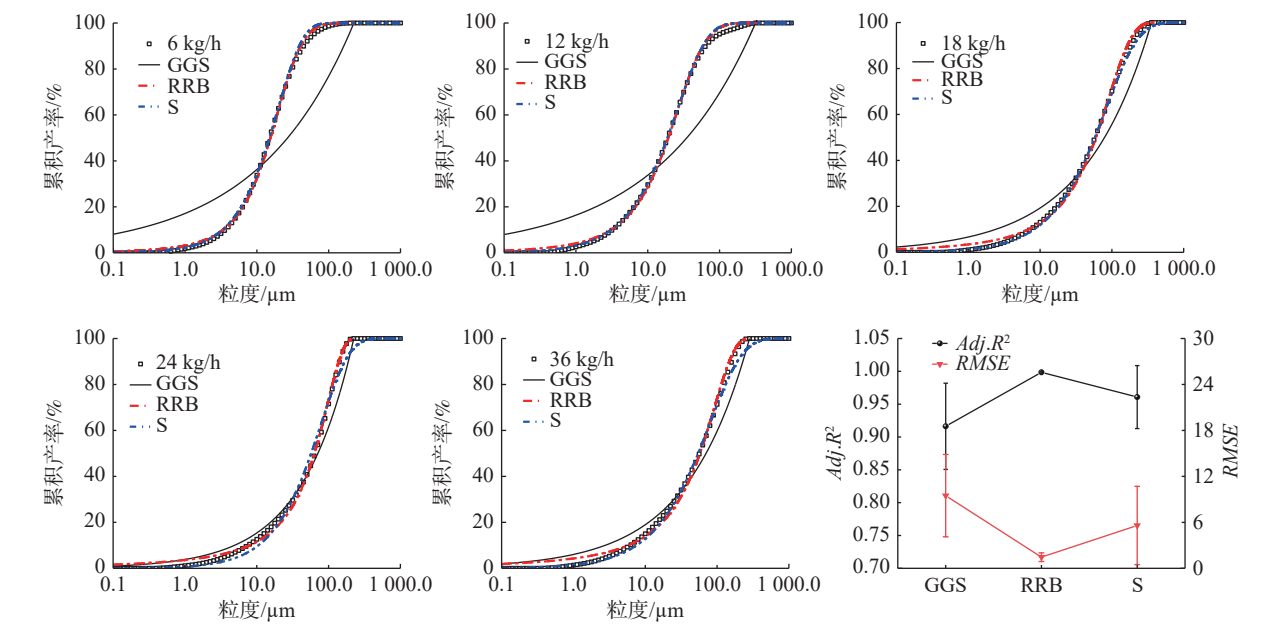


图 3 三种方程对磨矿产品粒度的拟合及其 $Adj.R^2$ 和 $RMSE$

Fig. 3 The fitting of three equations to the particle size of the grinding products of the horizontal stirring mill and its $Adj.R^2$ and $RMSE$

由图 3 可知,当给矿量较大,矿浆在磨机内停留时间较短,磨矿产品粒度较粗时,RRB 方程与 S 方程的拟合效果较好;而给矿量较小,矿浆在磨机内停留

时间较长,磨矿产品粒度较细时,RRB 方程的拟合效果要明显优于 S 方程。因此,本文选用 RRB 方程对卧式搅拌磨机磨矿产物的粒度分布进行拟合。

将式(2)中的 x_e 视为常数 b 并对等式两边同时取对数,可得表达式,见式(11)。

$$\ln\left(\ln\frac{100}{R}\right) = n(\ln x + \ln b) \quad (11)$$

式中, $b=1/x_e$ 。

由式(11)可知, n 越大时,磨矿产物粒度分布越窄, n 越小时,磨矿产物粒度分布越宽。因此,便得到了较为合理的卧式搅拌磨机磨矿产物粒度分布均匀性评价指标,以下称 n 为卧式搅拌磨机磨矿产物均匀性指数。

3.2 磨矿产品粒度分布均匀性影响研究

3.2.1 给矿量

卧式搅拌磨机给矿和排矿几乎同时进行,难以预测磨矿时间,因此,提出通过给矿量替代磨矿时间,即给矿量越大,磨矿时间越短,反之磨矿时间越长。

图4为不同给矿量下卧式搅拌磨机磨矿产品不同粒级的体积分布率、累积产率、产率及粒度特性拟合曲线。当给矿量为36 kg/h时,矿物颗粒停留在磨机内部的时间过短,无法得到充分的研磨,因此,

图4(a)中,其峰值最靠右,约为100 μm ;而给矿量为24 kg/h时,矿物颗粒在磨机内部停留的时间足以将较大的颗粒磨至100 μm 以下,而小颗粒无法得到充分的研磨,因此,小颗粒含量与36 kg/h相差较小,而大颗粒却更为集中,而当给矿量不超过18 kg/h时,矿物颗粒在磨机内部停留时间充足,使颗粒被逐渐磨细,小颗粒的体积分布率也随之提高,结合图4(d)与表8可知,24 kg/h产物与36 kg/h产物均匀性指数相差最大,也可以很好地印证这一点。同时,随着给矿量减小,磨矿时间增加,产物均匀性指数逐渐升高,当给矿量为6 kg/h时,磨矿产物均匀性指数最优为0.946。由于给矿量为12 kg/h与6 kg/h磨矿产物均匀性指数仅相差0.012,但其处理量是6 kg/h的两倍,结合生产实际,选取给矿量12 kg/h为最佳条件。

3.2.2 搅拌器转速

图5为不同搅拌器转速下,卧式搅拌磨机产品不同粒级的体积分布率、累积产率、产率及粒度特性拟合曲线。随着搅拌器转速不断增大,大颗粒含量逐渐降低,小颗粒含量逐渐升高,粒级累积产率及体

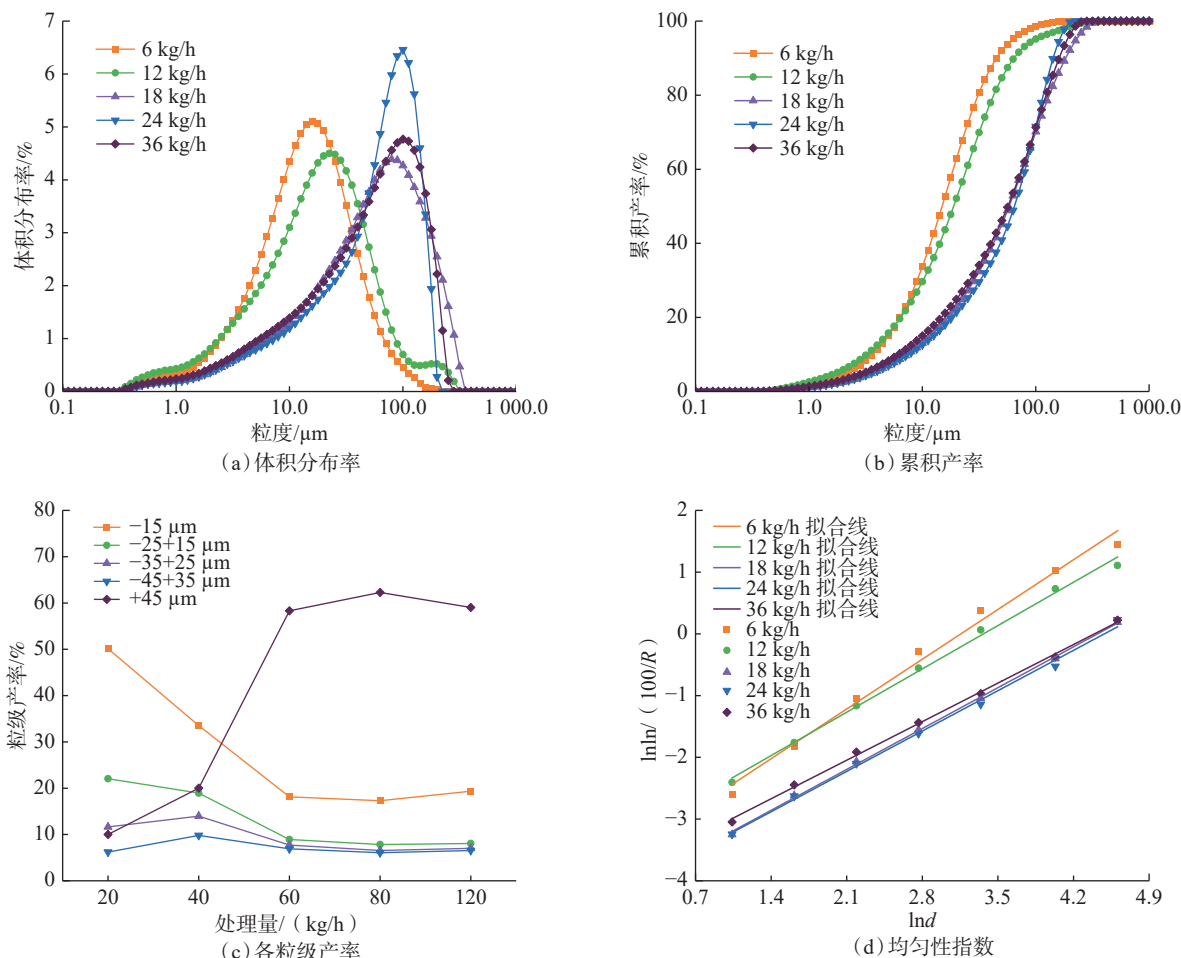


图4 给矿量对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度分布特性的影响

Fig. 4 The effect of feeding rate on the particle size distribution characteristics of the grinding products

表8 给矿量对磨矿产物的均匀性指数影响

Table 8 The effect of feeding rate on the uniformity index of the grinding products

给矿量/(kg/h)	均匀性指数 n	R^2
6	0.946	0.999
12	0.934	0.995
18	0.892	0.997
24	0.880	0.995
36	0.834	0.998

积分分布率峰值所对应的颗粒粒度逐渐减小,这是因为更多的能量被用来研磨矿物颗粒,使产物粒度越来越细,而当搅拌器转速超过 1 500 rpm 时,在体积分布率的小粒级部分出现了第二个峰值,且 2 000 rpm 的峰值要明显大于 1 750 rpm,此时过大的机械能使矿物颗粒被过度研磨,产生了过磨现象,同时结合图 5(d)与表 9 可知,当搅拌器转速为 1 500 rpm 时,磨矿产物的均匀性指数峰值为 0.934,这也印证了上述观点。

3.2.3 矿浆浓度

与普通的球磨机及搅拌磨机相同,卧式搅拌磨

机的矿浆浓度决定了其处理量、矿浆黏度、矿浆密度等一系列性质,这使其对磨矿产物的性质也会产生非常大的影响。但作为开路磨矿设备及自身卧式结构设计,其排矿过程需要借助水流作用,因此,其磨矿浓度相比于球磨机和搅拌磨机较低。图 6 为不同矿浆浓度下,卧式搅拌磨机产品不同粒级的体积分布率、累积产率、产率及粒度特性拟合曲线。由图 6 可知,随着矿浆浓度不断升高,体积分布率及累积产率逐渐右移,磨矿产物粒度逐渐变粗,证明此时的充填率无法有效处理更多的矿物颗粒,但当矿浆浓度达到 45% 时,过多的介质颗粒会在彼此之间发生研磨现象,磨矿效果反而得到提升。结合图 6(d)和表 10 可知,这种研磨对磨矿产物的均匀性的影响是呈负相关的,所以当矿浆浓度为 30% 时磨矿产物的均匀性指数峰值为 0.934。

3.2.4 介质充填率

图 7 为不同充填率下,卧式搅拌磨机产品不同粒级的体积分布率、累积产率、产率及粒度特性拟合曲线。由图 7 可知,随着充填率的不断增大,体积分布率及累积产率曲线逐渐左移,其产物粒度逐渐变

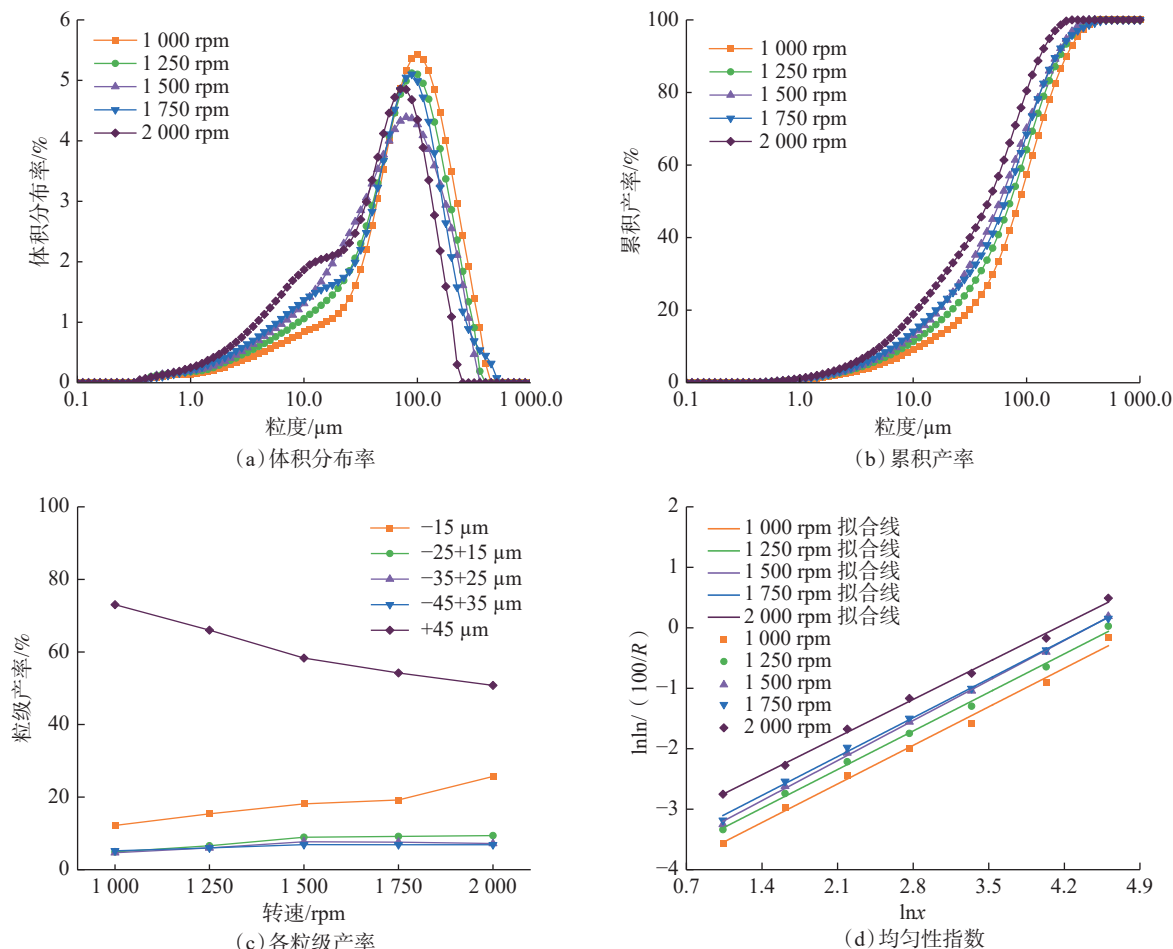


图5 搅拌器转速对磨矿产品粒度分布特性的影响

Fig. 5 The effect of blender speed on the particle size distribution characteristics of the grinding products

表9 搅拌器转速对磨矿产物的均匀性指数影响

Table 9 The effect of blender speed on the uniformity index of grinding products

搅拌器转速/rpm	均匀性指数 n	R^2
1 000	0.911	0.993
1 250	0.913	0.997
1 500	0.934	0.995
1 750	0.918	0.998
2 000	0.890	0.997

细。同时结合图7(d)与表11可知,随着充填率变大,产物均匀性逐渐增大,在70%时达到峰值为0.965。

3.2.5 四因素三水平正交实验

为探究卧式搅拌磨机的给矿量、搅拌器转速、矿浆浓度、充填率对产物粒度的均匀性的影响程度,并确定最优工艺参数,本文采用正交实验极差法和方差法进行分析。设充填率、矿浆浓度、给矿量、搅拌器转速为因素A、因素B、因素C、因素D。因素A取三个水平,分别记为 $A_1=50\%$ 、 $A_2=60\%$ 、 $A_3=70\%$;因素B取三个水平分别记为 $B_1=25\%$ 、 $B_2=30\%$ 、 $B_3=35\%$;因素C取三个水平,分别记为 $C_1=6\text{ kg/h}$ 、 $C_2=$

12 kg/h、 $C_3=18\text{ kg/h}$;因素D取三个水平,分别记为 $D_1=1\ 250\text{ rpm}$ 、 $D_2=1\ 500\text{ rpm}$ 、 $D_3=1\ 750\text{ rpm}$ 。在水平组合 (A_i, B_j, C_k, D_l) 下样本相互独立且 $X_{ijkl} \sim N(\mu_{ijkl}, \sigma_2)$, $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, k=1, 2, 3, D=1, 2, 3$ 。以产物粒度均匀性指数 n 为评价指标的各因素正交实验结果见表12。

在不考虑各因素的交互作用条件下,根据表12实验结果,计算各因素各水平下以产物粒度均匀性指标为实验指标的指标总和及其极差 R ,见表13。

由表13可知,充填率、矿浆浓度、给矿量、搅拌器转速的极差值 R 分别为0.006、0.053、0.088、0.063。极差越大,影响程度越强,起主要作用;极差越小,影响程度越弱,起次要作用。采用极差法分析可以得出,不同因素对产物粒度均匀性指数影响程度的大小为: $C>D>B>A$ 。

由表4中四因素三水平进行方差分析,各因素离均差平方和表达式见式(12)。

$$S_J = nm \left[\sum (x - \bar{x})^2 \right] \quad (12)$$

总离均差平方和表达式见式(13)。

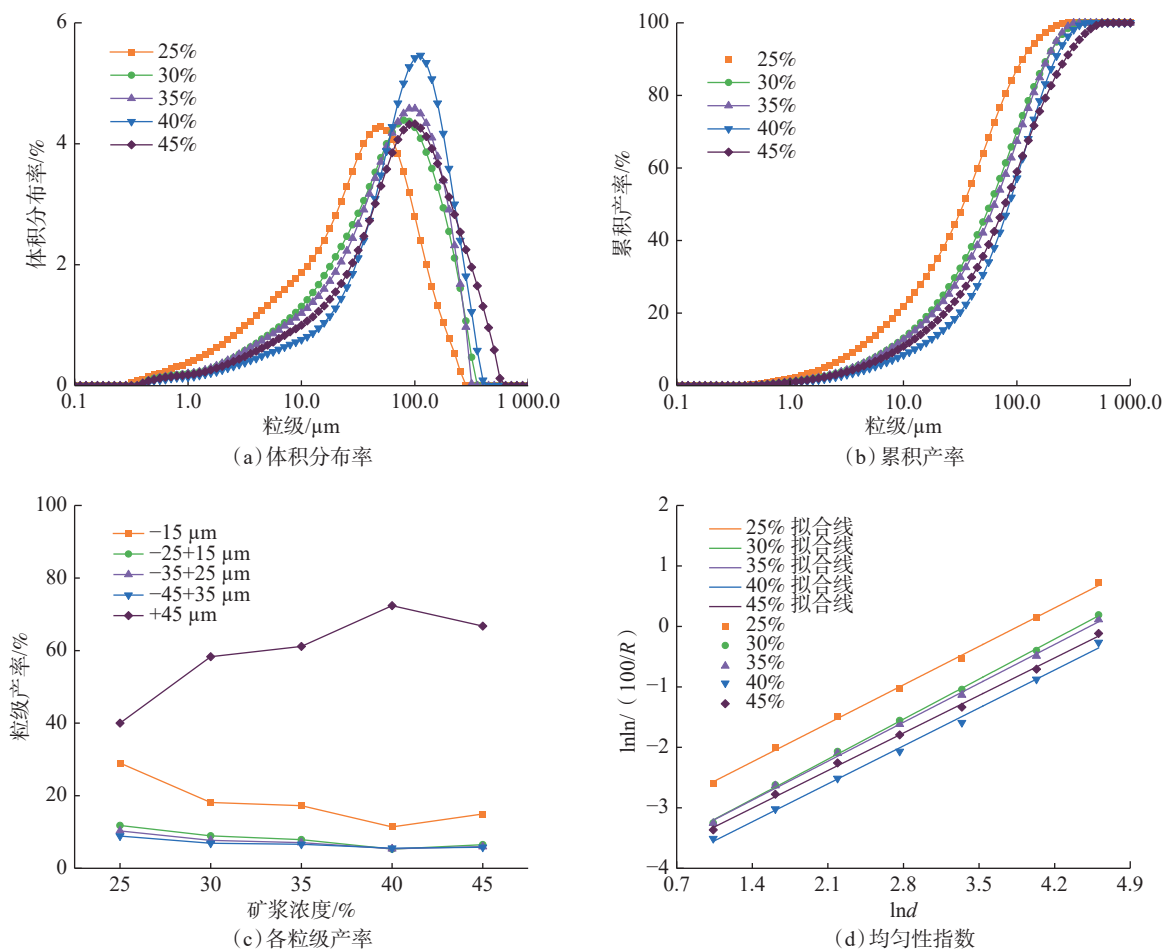


图6 矿浆浓度对磨矿产品粒度分布特性的影响

Fig. 6 The effect of slurry density on the particle size distribution characteristics of the grinding products

表 10 矿浆浓度对磨矿产物的均匀性指数影响

Table 10 The effect of slurry density on the uniformity index of grinding products

矿浆浓度/%	均匀性指数 n	R^2
25	0.909	0.999
30	0.934	0.995
35	0.920	0.998
40	0.897	0.996
45	0.887	0.998

$$S = \sum (x - \bar{x})^2 \quad (13)$$

第二类误差表达式见式(14)。

$$S_e = \sum S_j - S \quad (14)$$

自由度表达式见式(15)。

$$f = n - 1 \quad (15)$$

均方表达式见式(16)。

$$M_{S_j} = \frac{S_j}{f} \quad (16)$$

F 值表达式见式(17)。

$$F = \frac{M_{S_j}}{S_e} \quad (17)$$

根据式(12)~式(17), 得出实验结果方差分析, 见表 14。

由表 14 可知, 四种影响因素对应的 F 值分别为: 0.030 2、3.178 1、7.914 0、4.837 3。查表可知 $F(2, 18) = 3.555$, 由于 $F_C > F_D > F(2, 18) > F_B > F_A$, 因此, 四种因素中, 给矿量对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度均匀性影响最大, 其次是搅拌器转速, 再次是矿浆浓度, 而充填率对卧式搅拌磨机磨矿产品粒度均匀性影响相对较小。

综上所述, 确定卧式搅拌磨机磨矿的最优工艺参数为: 给矿量为 12 kg/h, 矿浆浓度为 30%, 搅拌器转速为 1 500 rpm, 充填率为 70%。在上述条件下测量 9 组磨矿产品的均匀性指数见表 15, 该条件下得到的磨矿产品其均匀性指数平均值为 0.965。

4 结 论

1) 采用 GSS 方程、RRB 方程、S 方程对不同给矿量下卧式搅拌磨机磨矿产品筛下累积产率进行拟

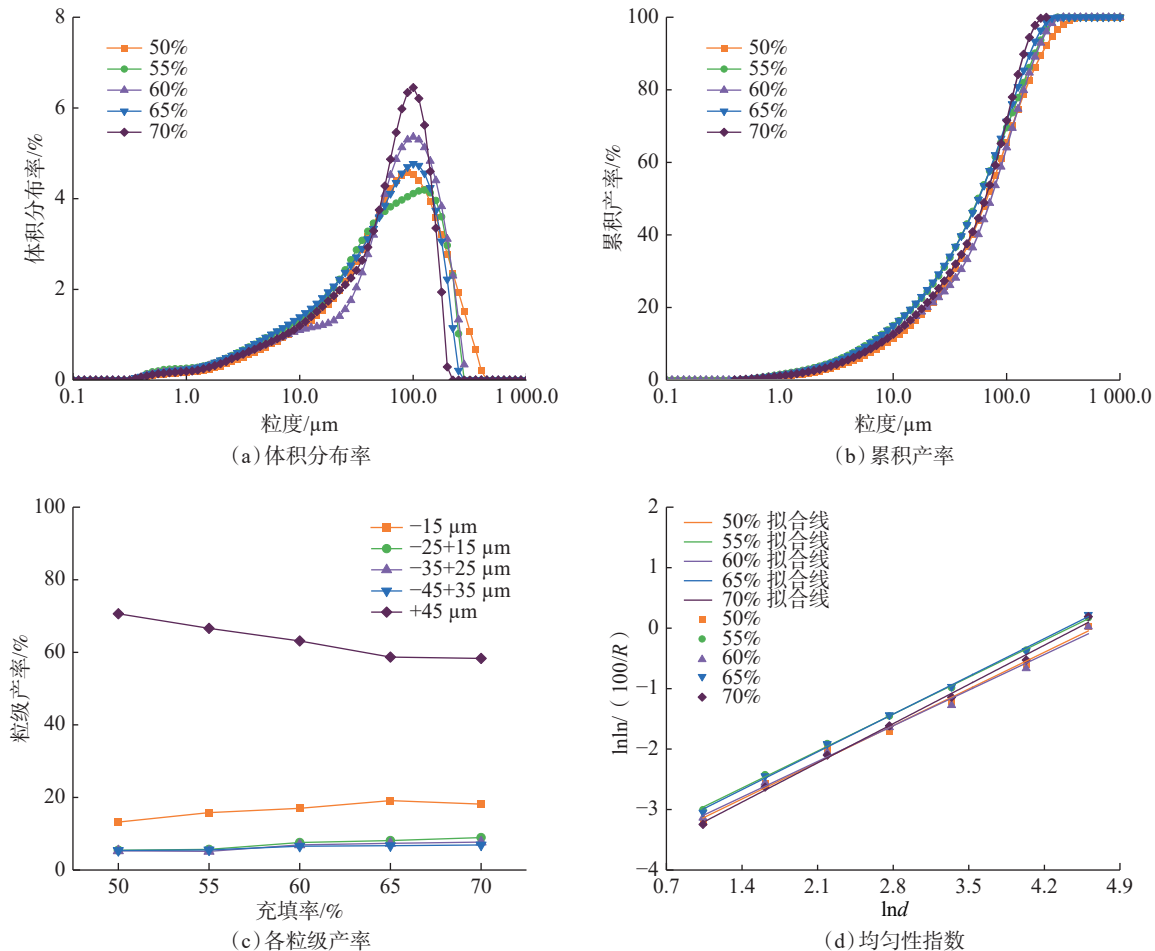


图 7 介质充填率对磨矿产品粒度分布特性的影响

Fig. 7 The influence of medium filling rate on the particle size distribution characteristics of the grinding products

表 11 介质充填率对磨矿产物的均匀性指数影响
Table 11 The effect of medium filling rate on the uniformity index of grinding products

充填率/%	均匀性指数 n	R^2
50	0.934	0.995
55	0.940	0.998
60	0.931	0.993
65	0.953	0.998
70	0.965	0.999

合,结果表明,RRB 方程可以更好地描述卧式搅拌磨机磨矿物粒度组成。

2)卧式搅拌磨机磨矿物粒度均匀性随给矿量增加逐渐减小,当给矿量为 6 kg/h 时达到峰值为 0.946;随搅拌器转速、矿浆浓度先增大后减小,当搅拌器转速为 1 500 rpm、矿浆浓度为 30% 时达到峰值为 0.934;随介质充填率逐渐增大,当介质充填率为 70% 时达到峰值为 0.965。

表 12 各因素正交实验结果
Table 12 Orthogonal experimental results of various factors

因素	A/%	B/%	C/(kg/h)	D/rpm	实验结果			
	充填率	矿浆浓度	给矿量	搅拌器转速	1	2	3	平均
1	50	25	18	1 500	0.928	0.974	0.994	0.966
2	50	30	6	1 750	1.136	1.194	0.998	1.109
3	50	35	12	1 250	0.918	0.937	0.962	0.939
4	60	25	6	1 250	0.978	1.005	0.990	0.991
5	60	30	12	1 500	1.020	1.096	1.012	1.043
6	60	25	18	1 750	1.004	0.965	0.949	0.973
7	70	25	12	1 750	0.935	0.992	1.046	0.991
8	70	30	18	1 250	0.988	0.928	0.940	0.952
9	70	35	6	1 500	1.067	1.039	1.056	1.054

表 13 实验结果极差分析
Table 13 Analysis of range of experimental results

因素	A	B	C	D
K_1	1.005	0.982	1.051	0.961
K_2	1.002	1.035	0.991	1.021
K_3	0.999	0.989	0.963	1.024
K_1^2	1.009	0.965	1.106	0.923
K_2^2	1.004	1.071	0.982	1.042
K_3^2	0.998	0.977	0.928	1.049
R	0.006	0.053	0.088	0.063

3)给矿量、搅拌器转速、矿浆浓度及介质充填率四种参数对卧式搅拌磨机磨矿产品均匀性影响显著性大小为:给矿量>搅拌器转速>矿浆浓度>介质充填率。ALC-1 L 卧式搅拌磨机磨矿最优工艺参数为:给矿量为 12 kg/h、矿浆浓度为 30%、搅拌器转速为 1 500 rpm、充填率为 70%,此条件下得到的磨矿产品其均匀性指数为 0.965。

表 14 实验结果方差分析
Table 14 Analysis of variance of experimental results

因素	平方和	自由度	均方	F	显著性
充填率	0.000 6	2	0.000 2	0.030 2	不显著
矿浆浓度	0.059 8	2	0.029 9	3.178 1	显著
给矿量	0.149 0	2	0.074 5	7.914 0	特别显著
搅拌器转速	0.091 1	2	0.045 5	4.837 3	特别显著
误差	0.188 3	18	0.009 4		

表 15 卧式搅拌磨机连续运转磨矿产物均匀性指数
Table 15 Uniformity index of grinding products produced by continuous operation of horizontal stirring mill

序号	1	2	3	4	5
n	1.026	0.974	0.950	0.963	0.950
R^2	0.998	0.999	0.998	0.999	0.999
序号	6	7	8	9	均值
n	0.971	0.944	0.957	0.953	0.965
R^2	0.999	0.999	0.998	0.998	0.999

参考文献(References):

[1] 浦绍广,黄志良,王佳才,等.福泉某混合型胶磷矿工艺矿相学研究[J].中国矿业,2024,33(11):221-228.
PU Shaoguang, HUANG Zhiliang, WANG Jiakai, et al. Study on process mineralogy of a mixed collophanite in Fuquan[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(11): 221-228.

[2] 柏帆,王树林,龙辉,等.贵州省某高品位钙质磷矿工艺矿物学研究[J].中国矿业,2023,32(9):159-165.
BAI Fan, WANG Shulin, LONG Hui, et al. Technological mineralogy study on the high-grade calcareous phosphate ore in Guizhou Province[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(9): 159-165.

[3] 陈继佳,李文博.含稀土萤石铁尾矿的工艺矿物学研究[J].中国矿业,2022,31(3):67-72.
CHEN Jijia, LI Wenbo. Process mineralogy study on iron tailings containing rare earth and fluorite[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 67-72.

[4] 李海森,孟庆有,袁致涛.立式搅拌磨机磨矿机理研究进展[J].中国矿业,2022,31(5):107-113.
LI Haisen, MENG Qingyou, YUAN Zhitao. Research progress on

- grinding mechanism of vertical stirring mill[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(5): 107-113.
- [5] 雷存友,余浔,冯裕果. 碎磨工艺现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(5): 15-19.
- LEI Cunyou, YU Xun, FENG Yuguo. Present status and development trend of comminution process[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2019(5): 15-19.
- [6] 郭旺. 搅拌磨机窄级别磨矿与粒度分布预测模型研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [7] 吴伯增. 大厂贫锡多金属硫化矿选矿关键技术研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [8] 吴传坤,黄闰芝. 锡多金属硫化矿减少锡石过粉碎工艺技术实践[J]. *中国矿业*, 2016, 25(6): 118-121.
- WU Chuankun, HUANG Runzhi. Technology practice on decreasing over crushing of cassiterite on tin polymetallic sulfide ore[J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(6): 118-121.
- [9] 闫培培,张兴芳,樊民强. 一种包含偏斜系数的粒度特性方程[J]. *中国粉体技术*, 2013, 19(3): 58-61.
- LAN Peipei, ZHANG Xingfang, FAN Minqiang. Particle size distribution functions containing a skew coefficient[J]. *China Powder Science and Technology*, 2013, 19(3): 58-61.
- [10] 王自亮. 粉尘粒度分布规律的计算与分析[J]. *煤炭工程师*, 1994(6): 22-26.
- WANG Ziliang. Calculation and analysis of dust particle size distribution[J]. *Coal Engineer*, 1994(6): 22-26.
- [11] 郭小骐,邵全渝,张国祥. 原矿及破碎产品标准粒度特性方程的研究[J]. *有色冶金设计与研究*, 1997(4): 7-11.
- WU Xiaoqi, SHAO Quanyu, ZHANG Guoxiang. Study on standard particle size characteristic equation of raw ore and crushed products[J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 1997(4): 7-11.
- [12] ULUSOY U, IGATHINATHANE C. Particle size distribution modeling of milled coals by dynamic image analysis and mechanical sieving[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 143: 100-109.
- [13] BU X N, CHEN Y R, MA G X, et al. Differences in dry and wet grinding with a high solid concentration of coking coal using a laboratory conical ball mill: breakage rate, morphological characterization, and induction time[J]. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30(11): 2703-2711.
- [14] 张昆. 立式搅拌磨机窄级别磨矿工艺参数优化机制研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- [15] 李国峰,李椿楠,栗艳锋,等. 搅拌磨机磨矿工艺参数对产品粒度特征的影响[J]. *金属矿山*, 2022(7): 212-218.
- LI Guofeng, LI Chunnan, LI Yanfeng, et al. Effect of grinding process parameters of stirring mill on particle size characteristics of products[J]. *Metal Mine*, 2022(7): 212-218.
- [16] 程显. 卧式搅拌磨机工作参数对其磨矿效果的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [17] 陈炳辰. 磨矿原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [18] GONZÁLEZ-TELLO P, CAMACHO F, VICARIA M J, et al. Analysis of the mean diameters and particle-size distribution in powders[J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2010, 27(5-6): 158-164.
- [19] BU X N, CHEN Y R, MA G X, et al. Wet and dry grinding of coal in a laboratory-scale ball mill: particle-size distributions[J]. *Powder Technology*, 2020, 359: 305-313.
- [20] OHENOJA K, ILLIKAINEN M. Effect of operational parameters and stress energies on stirred media milling of talc[J]. *Powder Technology*, 2015, 283: 254-259.
- [21] JANKOVIC A, SINCLAIR S. The shape of product size distributions in stirred mills[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(15): 1528-1536.
- [22] MUCSI G, RÁCZ Á. Grinding kinetics of red grape seed residue in stirred media mill[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(10): 2564-2571.