

基于正交设计和离散元法的半自磨机筒体衬板改型及工业应用

肖庆飞^{1,5}, 邵云丰^{1,5}, 周强^{1,2,3}, 刘向阳^{1,4}, 王庆凯^{2,3}, 张谦¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室, 北京 100083;
3. 矿冶过程自动控制技术北京重点实验室, 北京 100083;
4. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100083;
5. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD921⁺.4; TD453 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)04-0050-10
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.04.005

摘要 针对新疆某选厂 $\Phi 5.5\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 半自磨机筒体衬板易磨损、断裂等问题, 首先基于正交试验确定其筒体衬板的最优结构参数, 其次运用离散元法模拟现场半自磨机的运行过程, 对比研究在不同衬板结构参数下(提升条高度、宽度与面角)半自磨机内颗粒运动及内部碰撞能量的变化规律, 最后通过工业试验验证优化方案的可行性。研究结果表明: 适宜的提升条参数组合可有效优化磨机内颗粒的运动状态, 增加钢球—矿石、矿石—矿石的有用碰撞, 减少因无用碰撞引起的衬板或磨矿介质的损耗, 进而改善半自磨机的运行参数。经正交试验确定最优的衬板提升条参数组合为高度 190 mm、宽度 140 mm 和面角 60° 。由工业试验验证, 优化后的衬板使用寿命、磨机运转率与台效较优化前分别提高了 51 d、16.36 百分点、15.55 t/h, 磨机电耗较优化前降低了 6.07 kW·h/t。试验结果证明了正交设计法和离散元法的联合应用在半自磨机筒体衬板形状优化过程的可靠性及优越性。

关键词 半自磨机; 衬板改型; 正交设计; 离散元法

引言

半自磨机作为磨矿作业的重要机械设备, 与传统的棒磨、球磨设备相比, 具有单机处理能力大、工艺流程短、投资额低等优点^[1]。半自磨机筒体衬板作为半自磨机的重要部件, 既承担着传递能量的任务, 又保护筒体^[2]。然而对半自磨机筒体衬板重要结构参数的设计多依靠经验积累缺乏理论科学性, 易出现磨矿效率低、衬板及介质损耗量大等问题^[3]。据不完全统计, 我国用于生产磨机衬板所消耗的钢材高达 22 万 t/a, 由此带来的成本消耗达数十亿元, 成为选厂经营支出中不可忽视的部分^[4]。大量研究结果证实, 通过理论与技术创新, 衬板改型设计可以有效提高其使用寿命、磨矿效率、衬板利用率以及降低单位钢耗、单位电耗, 符合国家节能降耗的方针政策, 有助于实现

碳达峰、碳中和的目标要求^[5]。由于半自磨机衬板在磨矿过程中的重要作用, 长期以来, 通过研究衬板优化改型来提高半自磨机磨矿效率已成为半自磨机衬板理论研究领域的一个重点研究方向。

早在 20 世纪 80 年代, 国内外研究人员已对半自磨机筒体衬板改型进行了相关研究与应用, 借助 EDEM 等模拟仿真软件, 取得大量的研究成果^[6-10]。Powell 等^[11]基于离散元法研究半自磨机筒体衬板提升条的磨损规律, 提出了一种预测球磨机衬板磨损的简单模型, 为设计优化衬板提供了一种平衡衬板使用寿命和磨机性能的方法。Collinao 等^[12]利用磨机中不同类型(矿石—钢球、钢球—衬板)的 DEM 碰撞能谱信息和待磨矿石的力学性质, 提出了一种改进磨机衬板设计的新方法。结合工业实际案例发现, 对筒体衬板的设计优化可有效改善磨矿效果, 提升日产量并降

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(51964044); 云南省基础研究计划面上项目(202201AT070766); 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室开放基金项目(BGRIMM-KZSKL-2022-1); 矿物加工科学与技术国家重点实验室开放基金项目(BGRIMM-KJSKL-2023-09)

作者简介: 肖庆飞(1980—), 男, 云南昆明人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事碎磨理论与工艺的研究, E-mail: 13515877@qq.com。

通信作者: 周强(1991—), 男, 山东枣庄人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事碎磨理论及碎磨过程数值模拟研究, E-mail: zq1246051563@163.com。

低衬板损耗。杜强等人^[13]将离散元模拟与制造工艺相结合分析了衬板磨损的现状和原因,提出了应在不同的运行阶段,多次测量衬板磨损情况,发现筒体衬板的磨损规律,并针对性地对衬板性能进行改善。Cleary等^[14]由离散元仿真试验结果分析发现,衬板形状的微小差异可能会影响衬板的使用寿命和磨矿性能。用离散元法可以为衬板设计提供参考,估算衬板寿命,并使筒体衬板获得更好的性能。许磊等人^[15]通过对切向碰撞能量谱的分析得出,物料粒径对衬板磨损存在显著影响,粒径越大衬板越易磨损,且衬板提升条在上表面和右上角处的磨损最为严重,这为筒体衬板的改型优化提供了理论依据。

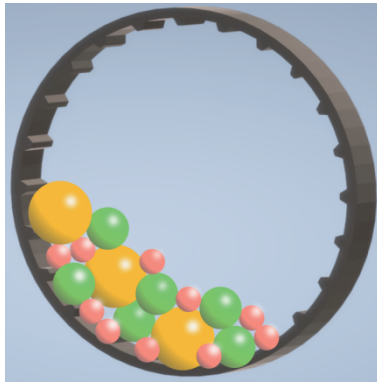
尽管国内外学者在衬板改型方面已经做了大量研究,但是将数值模拟结果用于工业实践的案例还鲜见报道。针对新疆某选厂中 $\Phi 5.5\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 半自磨机存在钢球直接冲砸衬板,导致衬板断裂、使用寿命短的问题,笔者首先基于正交设计法确定衬板提升条的优化参数组合,再采用SolidWorks三维建模与EDEM

仿真研究衬板不同提升条参数(高度、宽度与面角)对介质运动形态与碰撞能量分布规律的影响,最后将模拟仿真试验确定的最佳提升条参数组合用于工业试验。

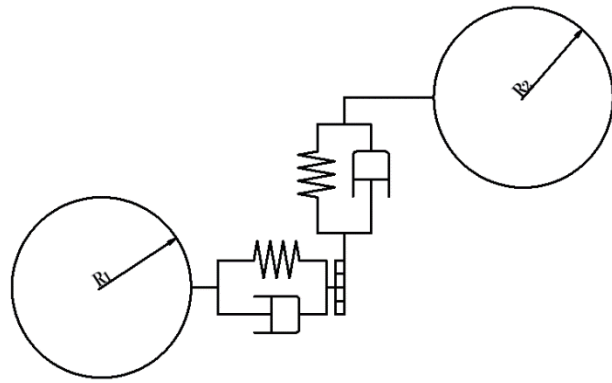
1 离散元法接触模型理论

在离散元仿真中,因Hertz Mindlin接触模型可与接触刚度随接触位移与接触力变化的非线性函数关系相匹配,且能够模拟颗粒间的冲击行为,这使Hertz Mindlin接触模型在无黏性散体颗粒的模拟试验中更具优势^[16]。本文的模拟仿真试验设置矿石间不存在黏结力,同时各颗粒模型单元间接触关系具有非线性和各向异性的特点,这与Hertz Mindlin接触模型的优势相契合。因此,本文选用Hertz Mindlin(no slip)接触模型。

其接触模型示意图如图1所示,设两颗粒半径分别为 R_1 、 R_2 ,如文献[17]中所述,当两个球形颗粒发生弹性碰撞时,可用公式(1)来计算两球形颗粒的法向力 F_n :



(a) 颗粒间相互接触示意图



(b) Hertz接触模型

图1 接触模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contact model

$$F_n = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: R^* —两球形颗粒的等效半径, $\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$;

E^* —等效弹性模量, $\frac{1}{E^*} = \frac{1-V_1^2}{E_1} + \frac{1-V_2^2}{E_2}$,其中 E_1 、 E_2 为颗粒1和2的弹性模量, V_1 、 V_2 分别是球形颗粒1和2泊松比;

α —法向重叠量。

用公式(2)可计算两颗粒间的法向阻尼力 F_n^d :

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} V_n^{\text{rel}} \quad (2)$$

式中: m^* —两个球形颗粒的等效质量, $m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$;

β —系数, $\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$;

S_n —法向刚度, $S_n = 2E^* \sqrt{R^* \alpha}$;

e —颗粒材料的恢复系数;

V_n^{rel} —两球形颗粒之间的法向相对速度。

用公式(3)可计算两颗粒间的切向力 F_t :

$$F_t = -S_t \delta \quad (3)$$

式中: δ —颗粒的切向重叠量;

S_t —切向刚度, $S_t = 8G^* \sqrt{R^* \alpha}$, G^* 为等效剪切模量, $G^* = \frac{2-V_1^2}{G_1} + \frac{2-V_2^2}{G_2}$;

G_1 和 G_2 —两个球形颗粒1、2的剪切模量。

用公式(4)可计算两颗粒间的切向阻尼力 F_t^d :

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} V_t^{\text{rel}} \quad (4)$$

式中: V_t^{rel} —两球形颗粒之间的切向相对速度。

2 试验方案的确定

本研究中,半自磨机使用的是T形筒体衬板,其结构通常采用三个参数表示,即提升条高度 h 、宽度 w 与面角 θ ,如图2所示。根据筒体衬板提升条参数

设计原则,并结合现场实际,确定衬板提升条参数优化设计的取值范围。其中提升条高度的设计一般选择物料直径作为参考依据,应与被提升物料最大直径相适宜,其设计范围为: $160\text{ mm}<h<220\text{ mm}$ ^[18];提升条面角的设计倾向于采用大面角,便于使磨机介质冲击到磨机载荷的低点,同时保证提升条之间的空间足够大而不积料,参考经典的提升条面角参数并结合已有研究成果,其设计范围为: $50^{\circ}<\theta<70^{\circ}$;提升条宽度的设计需保证相邻提升条之间不堆积、不卡夹矿石和钢球,降低矿石和钢球在提升条间距内的滑动,根据汪滋润推导出的计算公式并结合选厂实际,其设计范围为: $120\text{ mm}<w<160\text{ mm}$ ^[19]。另外由于现场提升条的间隙太小,导致提升条之间积料,弱化了冲击粉碎磨矿机制,本文依据澳大利亚的 Cadia Hill 选厂半自磨提升条组数的确定原则,即提升条的组数大约为磨机直径(用英尺表示)的 1.3 倍,本研究中的磨机直径为 5.5 m(约 18.05 英尺),需要的提升条组数为 24 组。

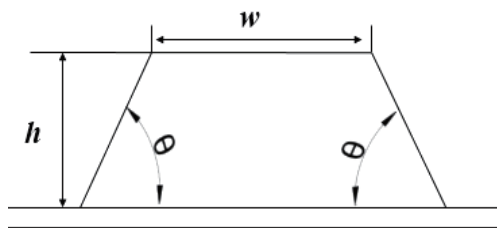


图 2 半自磨机 T 型衬板模型
Fig. 2 T-type liner model of SAG mill

2.1 正交试验

将需要研究的衬板提升条参数(高度 h 、宽度 w 及面角 θ)选定为正交设计的三个因素,且每个因素取 3 个水平,其因素的各个水平如表 1 所示。在选定正交设计表之后,按表 2 制订的试验方案开展试验研究,以获取各方案下的试验结果,并通过计算和分析获得最佳的衬板提升条参数组合。

表 1 因素水平
Table 1 Factor level

因素	水平		
	高度 A/mm	宽度 B/mm	面角 $C/(^{\circ})$
1	160	120	50
2	190	140	60
3	220	160	70

2.2 离散元模型与仿真试验

2.2.1 离散元模型的建立

(1) 矿石粒度组成与衬板参数确定

为保证离散元仿真试验的准确性与科学性,仿真

表 2 正交设计试验方案

Table 2 Orthogonal design experimental scheme

方案	参数		
	A	B	C
1	3	1	3
2	2	3	1
3	1	3	3
4	3	2	1
5	3	3	2
6	2	2	3
7	2	1	2
8	1	2	2
9	1	1	1

试验的矿石粒度组成应与该选厂实际给矿粒度组成相接近。在选厂取样时,共选取运行稳定阶段的代表性半自磨机给矿矿样 5 230.0 kg,并筛析所取矿样,确定矿样粒度组成,如图 3 所示。依照矿样的粒度组成,配置本文离散元模型中矿石的粒度组成,如表 3 所示。

(2) 离散元仿真参数设置

为使模拟仿真试验与实际运行工况相一致,需要

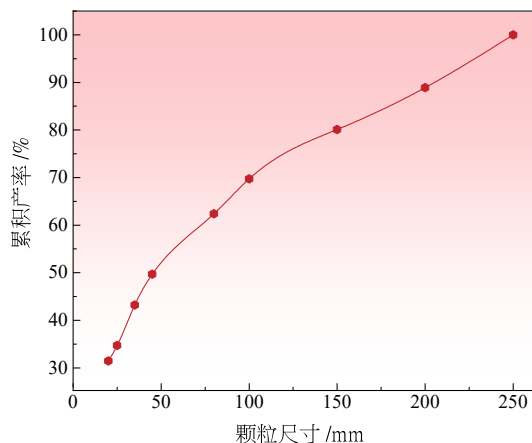


图 3 半自磨机给矿累积粒度分析曲线
Fig. 3 Cumulative particle size curve of feed of SAG mills

表 3 仿真试验矿石颗粒参数

Table 3 Simulation experiment ore particle parameters

颗粒尺寸 /mm	填充质量 /kg	单个颗粒质量 /kg	单个颗粒体积 /m ³	颗粒数量 /个
250	400.99	28.64	0.008 18	14
200	319.28	14.51	0.004 18	22
150	373.88	6.03	0.001 76	62
100	266.12	1.76	0.000 52	151
80	459.57	0.90	0.000 26	510
45	233.94	0.16	0.000 05	1 459
35	307.71	0.075	0.000 02	4 079
25	117.88	0.027	0.000 008	4 288
20	1 136.45	0.014	0.000 004	80 746
总计	3 615.82	—	—	91 331

对仿真试验中的参数(材料本征参数和基本接触参数)进行设定。本离散元仿真试验衬板与矿石本征参数如表 4 所示, 材料的基本接触参数如表 5 所示。

表 4 衬板与矿石本征参数
Table 4 Intrinsic parameters of liner and ore

名称	衬板	矿石
容重 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 800	3 360
静弹性模量 /Pa	1.82×10^{11}	3.31×10^{10}
泊松比	0.30	0.26

(3)其他参数的确定

结合选矿厂实际生产工况, 确定仿真模型中钢球的尺寸及质量配比为 $m(\Phi150):m(\Phi120)=1:2$, 磨机的转速率为 75%, 钢球及待磨矿石的总充填率为 25%,

表 5 材料的基本接触参数
Table 5 Coefficient of restitution of the materials

颗粒模型	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
钢-钢(钢球、衬板)	0.70	0.20	0.01
矿石-钢(钢球、衬板)	0.41	0.50	0.25
矿石-矿石	0.35	0.56	0.05

其中钢球的充填率为 10%, 待磨矿石的充填率为 15%。

2.2.2 离散元仿真试验

根据正交设计法确定的最优参数组合, 使用 SolidWorks 建模软件绘制半自磨机筒体衬板模型, 如图 4 所示。将绘制好的衬板模型导入 EDEM 软件, 并根据上述 2.2.1 中确定的离散元模型参数完成配置后, 进行仿真试验。

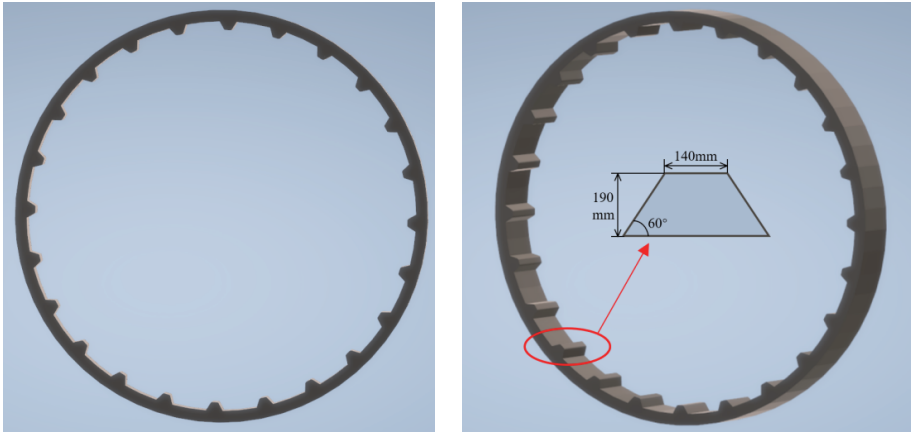


图 4 半自磨机筒体衬板模型
Fig. 4 Model of liners of SAG mill

本研究中所有的模拟仿真试验均选取磨机运行稳定的时间段, 对其磨矿能耗及运动状态进行比较分析, 验证不同提升条参数变化对磨矿过程的影响。

2.3 工业试验

将上述试验分析验证的衬板提升条优化方案, 在该选厂 $\Phi5.5\text{ m}\times1.8\text{ m}$ 半自磨机中开展工业试验。通过对衬板的使用寿命、磨机运转率、台效、电耗等重要运行参数的统计计算, 分析两方案的实际工业生产差异。

本次工业试验共计 3 个阶段, 分别为优化方案试用阶段、现场原方案衬板使用阶段和优化方案衬板使用阶段, 其具体的工业试验过程如图 5 所示。值得注意的是: 在工业试验中需保证待磨矿石性质基本不变且磨机的参数保持恒定, 只改变筒体衬板提升条参数。

以第三阶段试验开始的时间为分界点, 分别统计 2018 年 6 月~2019 年 7 月、2019 年 8 月~2019 年 12 月使用优化方案前后的工业试验数据并进行试验结果分析。

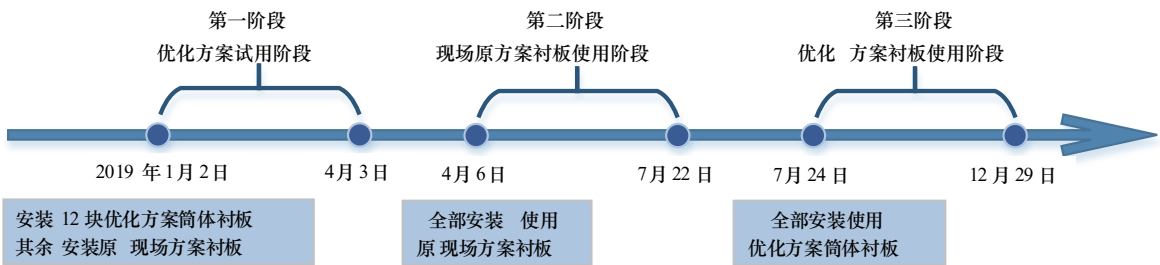


图 5 工业试验流程
Fig. 5 Flow of industrial experiments

3 结果与讨论

3.1 正交试验结果分析

以(介质+矿石)对衬板的累积碰撞能量与累积总碰撞能量的比值(衬板受撞能量占比)为指标,对试验结果进行定量计算分析,其试验结果如表6所示。

表6 试验结果
Table 6 Experiment results

方案	参数			衬板受撞 能量占比/%
	高度 A /mm	宽度 B /mm	面角 C /(°)	
1	3 (220)	1 (120)	3 (70)	3.85
2	2 (190)	3 (160)	1 (50)	3.62
3	1 (160)	3 (160)	3 (70)	3.87
4	3 (220)	2 (140)	1 (50)	3.77
5	3 (220)	3 (160)	2 (60)	3.20
6	2 (190)	2 (140)	3 (70)	3.38
7	2 (190)	1 (120)	2 (60)	2.83
8	1 (160)	2 (140)	2 (60)	3.07
9	1 (160)	1 (120)	1 (50)	4.12

3.1.1 方差分析

方差分析法是以构造 F 统计量,生成方差分析表,对因素效应的显著性作为检验最终目的的分析行为。本文选取的显著性水平 P 可以评价提升条参数对能耗的影响能否满足显著性要求的条件,对解决因素选择具有实际参考价值^[20]。

从表7看出, B 因素的 P 值 >0.05 ,说明提升条宽度对衬板能量损失没有显著影响; A 、 C 因素的 P 值 <0.05 ,说明提升条高度和面角是优化试验中的显著影响因素。又因为显著性随着 P 值的增大而降低,所以三个因素的显著性关系为 $C>A>B$ 。

表7 方差分析
Table 7 Analysis of variance

变量	离差平方和	自由度	均方差	F	显著性 P
修正模型	1.455	6	0.243	52.343	0.019
截距	111.725	1	111.725	24 113.288	0.000
高度 A	0.283	2	0.142	30.583	0.032
宽度 B	0.063	2	0.032	6.827	0.128
面角 C	1.108	2	0.554	119.619	0.008
误差	0.009	2	0.005	—	—
总计	113.189	8	—	—	—

3.1.2 极差分析

基于正交试验结果可计算出各因素对应的平均

值和极差 R ,其结果如表8所示。

极差是表征提升条参数对能耗影响强度的衡量方式,提升条参数对能耗的影响随着极差的增大而加深^[21]。由表8可知,三个因素的极差由大到小依次为提升条面角($R=0.81$)、高度($R=0.41$)、宽度($R=0.19$),说明提升条面角对试验指标的影响程度最高,提升条高度次之,提升条宽度最小。又因为矿石及介质对衬板的碰撞属于无用碰撞,应尽量避免因无用碰撞产生的能量损耗,所以提升条各参数的均值应尽量小。从表8中分析各参数的均值可知,提升条高度、宽度和面角均是 $\bar{K}_2$ 值最小,说明 $A_2B_2C_2$ 为最佳的影响因素水平。

表8 极差分析
Table 8 Range analysis

数值	参数		
	高度 A /mm	宽度 B /mm	面角 C /(°)
K_1	11.06	10.8	11.51
K_2	9.83	10.22	9.1
K_3	10.82	10.69	11.1
$\bar{K}_1$	3.69	3.6	3.84
$\bar{K}_2$	3.28	3.41	3.03
$\bar{K}_3$	3.61	3.56	3.7
R	0.41	0.19	0.81

通过上述方差和极差分析可知,面角对能耗的影响最大,其次为高度,宽度的影响最小。其最佳的优化方案参数组合为 $A_2B_2C_2$,即提升条高度为 190 mm、宽度为 140 mm、面角为 60°。

3.2 EDEM 仿真试验结果分析

3.2.1 不同方案下颗粒运动形态对比

截取优化方案(衬板提升条高度为 190 mm、宽度为 140 mm、面角为 60°)和现场方案(衬板提升条高度为 242 mm、宽度为 90 mm、面角为 90°)运行至稳定时,任一时刻(取 14.6 s 时)的颗粒运动形态,如图6所示。

对比观察图6中(a)、(b)两图可知:图(b)具有更好的碎磨作用。图(b)中磨机内载荷可被提升至适宜高度后下落,其载荷的运动轨迹更合理,可以冲砸到磨机底部理想的磨矿区域,避免了图(a)中直接冲砸衬板影响衬板使用寿命的现象。另外,图(a)中由于衬板提升条参数设置的缺陷,使得物料被提升得更高,不能直接冲砸到载荷区。且提升条间隙易存在卡夹物料的情况,降低提升条对物料的提升能力,可降低磨矿效果。根据上述离散元仿真结果和分析可知,优化方案对物料具有更好的处理能力,应淘汰选厂原有的衬板方案。

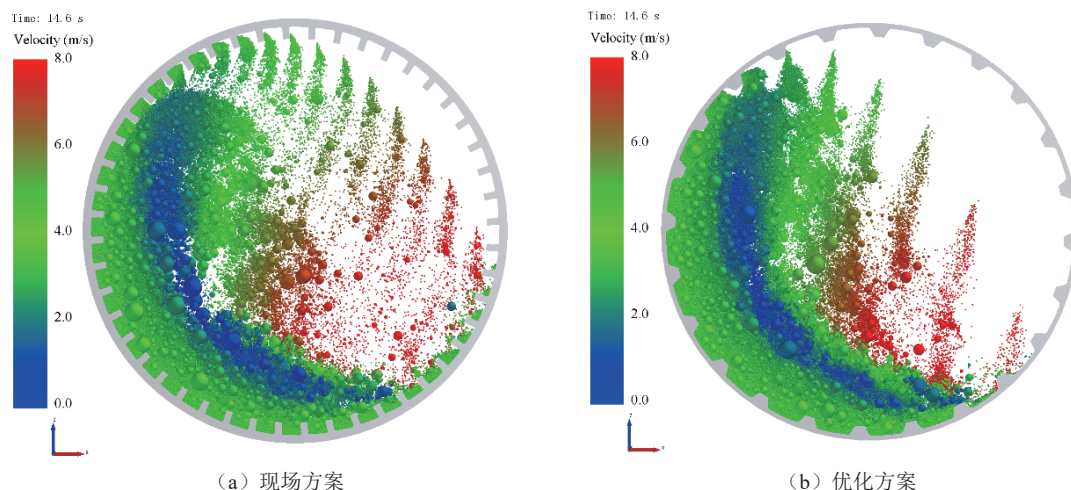


图6 运动形态对比

Fig. 6 Comparison of motion state

3.2.2 不同方案下载荷碰撞能量分析

文献 [1] 中指出,在半自磨机中起主要作用的是冲击粉碎,所以取 13.38~17.70 s 时间段内不同类型现场方案和优化方案的法向碰撞能量图谱进行分析,如图 7 所示。由(a)、(b)两图可知,优化方案的矿石对矿石及介质对矿石的法向碰撞能量显著高于现场方案,说明优化方案有更多的能量被用于进行矿石碎

磨的有效碰撞。由(c)、(d)两图可知,优化方案的(矿石+介质)对衬板及介质对介质的碰撞能量显著低于现场方案,说明优化方案可有效减少因无效碰撞带来的能量损失及衬板和磨矿介质的磨损。因此,优化方案对顽石的冲击破碎效果更好。

为更准确地比较两方案的性能优劣,可通过定量分析模拟仿真实验中不同类型累积碰撞能量的大小来比较。不同方案下具体的碰撞能量分布如图 8 所示。

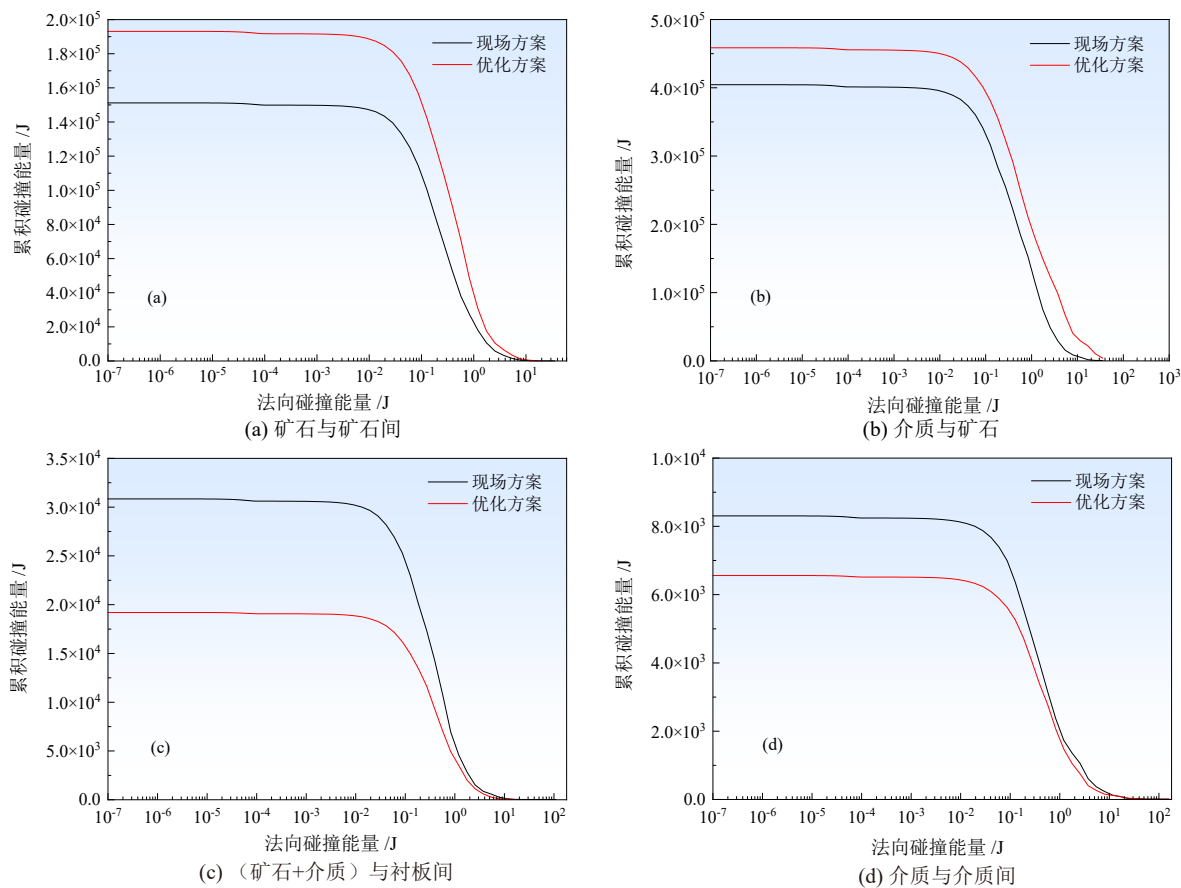


图7 不同方案下法向碰撞累积能量图谱

Fig. 7 Normal collision energy spectra under different schemes

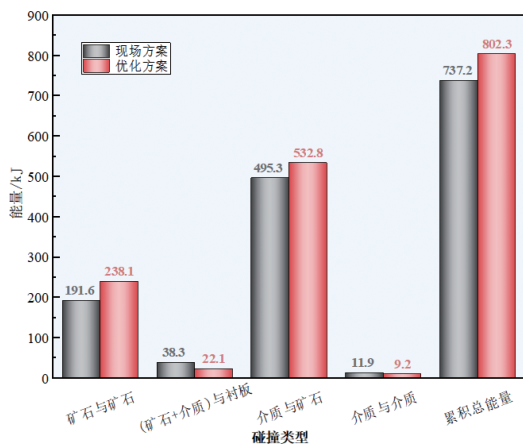


图 8 不同类型累积碰撞能量分布
Fig. 8 Cumulative collision energy of different types

由图 8 可知, 优化方案的累积总碰撞能量比现场方案高了 8.83%, 且(矿石+介质)与衬板、介质与介质

表 9 工业试验中筒体衬板使用寿命统计
Table 9 Statistics on the service life of liners in industrial experiments

方案	开始时间	整体更换时间	使用时间/d	年使用量/套	年成本/万元
现场方案	2019年4月6日	2019年7月22日	108	3.60	403.20
优化方案	2019年7月24日	2019年12月29日	159	2.26	325.44
优化方案与现场方案差值	—	—	+51	-1.34	-77.76

由表 9 可知, 优化方案整套筒体衬板的使用寿命为 159 d, 比现场原方案衬板的使用寿命延长了 51 d, 说明对筒体衬板提升条参数的优化可有效延长衬板的使用寿命, 每年可降低衬板的使用成本 77.76 万元。另外, 由于筒体衬板使用寿命的延长, 可有效延长衬板的更换周期, 减少因停机带来的生产效率降低和更换衬板的人工成本。

3.3.2 半自磨机运转率的试验结果分析

半自磨机运转率作为评价磨机工作效果的一个重要依据, 通过比较半自磨机的运转率可有效判断各试验方案的优劣^[23]。使用优化方案前后半自磨机的运转率结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 原现场方案与优化方案的半自磨机运转率均值分别为 75.96%、92.32%, 优化方案的磨机运转率比原现场方案提高了 16.36 百分点, 说明使用优化方案的磨机运转率更高, 优化方案更具优势、更能满足选矿厂生产需求。

3.3.3 半自磨机台效的试验结果分析

处理量可以在磨机给矿粒度及产品粒度基本相同的情况下, 直观快速地分析衬板优化前后磨矿效率的提高程度^[24]。使用优化方案进行工业试验前后半自磨机的台效如图 10 所示。

由图 10 可知, 使用优化方案前半自磨机的台效

的累积碰撞能量较现场方案分别低了 42.30%、22.69%; 矿石与矿石、介质与矿石的累积碰撞能量较现场方案分别高了 24.27%、7.57%。分析可知, 使用优化方案可获得更高的碰撞总能量, 且因无效碰撞所损耗的能量比现场方案低, 所以被用于碎矿作业的能量更多。因此优化方案更有优势, 可以用优化方案替换原现场方案用于生产运行。

3.3 工业试验结果分析

3.3.1 筒体衬板使用寿命的试验结果分析

通过比较提升条参数优化前后衬板的使用时间, 来判断衬板提升条参数的优化是否合理^[22]。以优化方案试验开始的时间为节点, 选取时间节点以前的现场方案和时间节点以后的优化方案进行对比, 分析比较衬板使用一个周期的时间, 其结果如表 9 所示。

均值仅为 38.82 t/h, 而使用优化方案的半自磨机处理能力达到了 54.37 t/h, 比原现场方案提高了 15.55 t/h, 预计未来一年因提高矿石处理量产生的总经济效益为 19 068.04 万元。

3.3.4 半自磨机电耗的试验结果与分析

半自磨机电耗是影响磨矿参数选择的重要技术和经济指标。当磨机运转后, 因矿石性质变化及衬板磨损等情况的发生, 易引起磨机电流波动。通过分析实际生产过程中半自磨机电耗的变化, 对筒体衬板的优化具有重要指导意义^[25]。使用优化方案前后半自

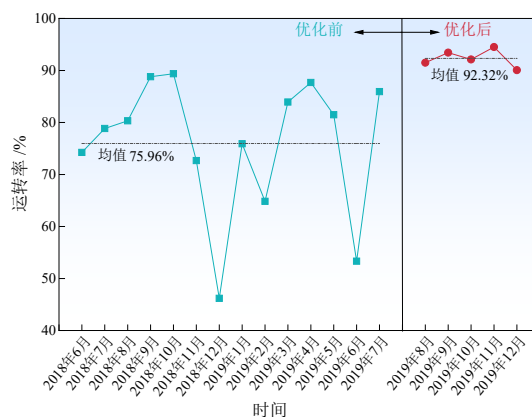


图 9 使用优化方案前后半自磨机运转率
Fig. 9 Operation rate of SAG mill before and after using the optimized solution

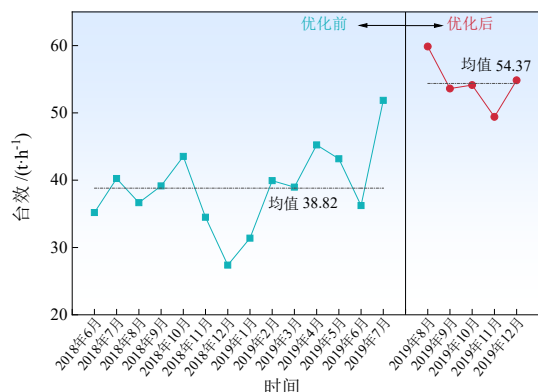


图10 使用优化方案前后半自磨机台效

Fig. 10 The efficiency of SAG mill before and after the industrial experiments

磨机的电耗如图11所示。

由图11可知,使用优化方案后磨机的电耗显著降低,由原现场方案的27.52 kW·h/t降至21.45 kW·h/t,降低了6.07 kW·h/t,预计年节约电费98.75万元。

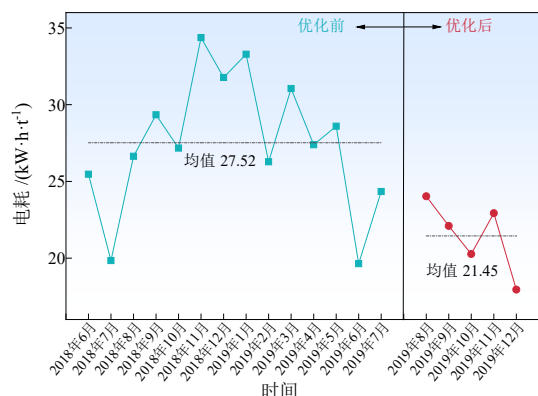


图11 使用优化方案前后半自磨机电耗

Fig. 11 The power consumption of SAG mill before and after the industrial experiment

3.3.5 小结

由工业试验结果分析,对筒体衬板形状的优化有助于提高磨矿作业性能指标,达到降本增效的目的。与原现场方案相比,使用优化方案后半自磨机运转率、台效、电耗和筒体衬板使用寿命都有显著改善,这与离散元模拟试验结果相一致。

4 结论

(1)对运用正交设计法确定的试验方案进行方差和极差分析,得出了最佳的衬板提升条参数组合为高度190 mm、宽度140 mm、面角60°。

(2)由离散元仿真试验得出:优化方案的累积总碰撞能量比现场方案高了8.83%,且(矿石+介质)与衬板、介质与介质的累积碰撞能量较现场方案分别低了42.30%、22.69%。说明优化方案的载荷运动状态更合理,有更多的能量被用于破碎矿石,消除了提升条

间夹带物料及冲击衬板的风险。

(3)由工业试验结果可知,采用优化方案后筒体衬板使用寿命延长了51 d,磨机运转率提高了16.36个百分点,磨机台效提高了15.55 t/h,磨机电耗降低了6.07 kW·h/t。

(4)试验结果表明,离散元仿真结果与工业试验结果具有较好的一致性。在半自磨机筒体衬板改型中,可优先进行离散元仿真验证试验可行性后,再进行现场工业试验和应用。

参考文献:

- [1] 黄国智,方启学,任翔,等.全自磨半自磨磨矿技术:第1版[M].北京:冶金工业出版社,2018:10-52.
HUANG G Z, FANG Q X, REN X, et al. Fully and semi-autogenous grinding: 1st ed[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018: 10-52.
- [2] XU L, LUO K, ZHAO Y Z. Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations[J]. *Powder Technology*, 2018, 329: 353-363.
- [3] WEERASEKARA N S, POWELL L S, CLEARY P W, et al. The contribution of DEM to the science of comminution[J]. *Powder Technology*, 2013, 248: 3-24.
- [4] 王莹.半自磨机衬板用耐腐蚀合金钢的研究[D].广州:暨南大学化学与材料学院,2018:1-11.
WANG Y. Research of corrosion-abrasion resistant alloy steels for semi-autogenous mill liner plates[D]. Guangzhou: Jinan University, College of Chemistry and Materials Science, 2018: 1-11.
- [5] 宗路,郭晋,蔡改贫,等.基于衬板参数的半自磨机破碎能耗分析[J].中国粉体技术,2018,24(3):81-87.
ZONG L, GUO J, CAI G P, et al. Analysis of crushing energy consumption of semi-autogenous mill based on liner parameters[J]. *China Powder Science and Technology*, 2018, 24(3): 81-87.
- [6] LVOV V, CHITALOV L. Semi-autogenous wet grinding modeling with CFD-DEM[J]. *Minerals*, 2021, 11(5): 1-12.
- [7] 刘建平.半自磨机筒体衬板结构的模拟优化研究[J].矿山机械,2021,49(12):27-32.
LIU J P. Research on simulation and structural optimization of shell liner of SAG mill[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2021, 49(12): 27-32.
- [8] XIE C H, ZHAO Y, SONG T, et al. Investigation of the effect of filling level on the wear and vibration of a SAG mill by DEM[J]. *Particuology*, 2021, 63: 24-34.
- [9] PEDRO P, RODRIGO M, ANDERSON S, et al. Surface breakage of fired iron ore pellets by impact[J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 735-743.
- [10] 孟庆霞,潘庆.基于离散元磨损模拟的半自磨机提升器结构优化[J].矿山机械,2020,48(11):37-40.
MENG Q X, PAN Q. Structural optimization on lifter of semi-autogenous grinding mill based on discrete element wear simulation[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2020, 48(11): 37-40.
- [11] POWELL M S, WEERASEKARA N S, COLE S, et al. DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 24(3): 341-351.
- [12] COLLINAO E, DAVILA P, IRARRAZABAL R, et al. Continuous improvement in SAG mill liner design using new technologies[J]. *XXVII International Mineral Processing Congress*, 2014, 68(10): 2061-2080.
- [13] 杜强.基于离散元的大型半自磨机筒体衬板磨损分析[J].矿山机械,2015,43(1):62-66.

- DU Q. Wearing analysis of shell liner in large SAG mill based on DEM[J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(1): 62-66.
- [14] CLEARY P W, OWEN P. Effect of liner design on performance of a HICOMR mill over the predicted liner life cycle[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 134: 11-22.
- [15] 许磊, 罗坤, 赵永志, 等. 物料粒径对半自磨机衬板磨损的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(12): 2255-2263.
XU L, LUO K, ZHAO Y Z, et al. Effect of particle size on liner wear in semi-autogenous mill[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2019, 53(12): 2255-2263.
- [16] YONG X, K. D. Kafui, C. Thornton, et al. Effects of material properties on granular flow in a silo using DEM simulation[J]. *Particulate Science and Technology*, 2002, 20(2): 109-124.
- [17] YANG D, B. FATAHI, H. KHABBAZ, et al. Influence of particle contact models on soil response of poorly graded sand during cavity expansion in discrete element simulation[J]. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(6): 1154-1170.
- [18] ROYSTON D. Semi-autogenous grinding (SAG) mill liner design and development[J]. *Minerals & Metallurgical Processing*, 2007, 24(3): 121-132.
- [19] 汪滋润. 黏结理论及离散元法在半自磨机衬板设计中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017: 41-45.
WANG Z R. Design of SAG mill liner based on bond theory and discrete element method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017: 41-45.
- [20] 郝拉娣, 于化东. 正交试验设计表的使用分析[J]. 编辑学报, 2005(5): 334-335.
- HAO L D, YU H D. On use of orthogonal experimental design[J]. *Acta Editologica*, 2005(5): 334-335.
- [21] 黄伯强, 李启才. 带交互作用的双因素方差分析的线性回归建模[J]. 统计与决策, 2021, 37(1): 10-15.
HUANG B Q, LI Q C. Linear regression modeling of two-factor ANOVA with interaction[J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(1): 10-15.
- [22] 贾永军. 延长半自磨机筒体衬板使用寿命的途径[J]. 中国矿山工程, 2019, 48(5): 44-46+55.
JIA Y J. Ways to prolong the service life of cylinder liner of semi-autogenous mill[J]. *China Mine Engineering*, 2019, 48(5): 44-46+55.
- [23] 金建国. 提高半自磨系统运转效率的分析及措施[J]. 铜业工程, 2012(1): 54-56+60.
JIN J G. The analysis and measures on increasing the running efficiency of semi-auto mill system[J]. *Copper Engineering*, 2012(1): 54-56+60.
- [24] 邓禾森. 冬瓜山铜矿提高半自磨机处理能力的生产实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2010(4): 36-38+42.
DENG H M. The industry practice on improvement treatment capacity of SAG mill in Dongguashan copper[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2010(4): 36-38+42.
- [25] 刘瑜. 柿竹园多金属矿1500吨/日选矿厂磨矿过程优化试验研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2015: 41-51.
LIU Y. Experimental study on grinding process optimization of Shizhuyuan 1500-tpd polymetallic mineral processing plant[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2015: 41-51.

Modification and Industrial Application of Liners of Semi-autogenous Grinding Mill Based on Orthogonal Design and Discrete Element Method

XIAO Qingfei^{1,5}, SHAO Yunfeng^{1,5}, ZHOU Qiang^{1,2,3}, LIU Xiangyang^{1,4}, WANG Qingkai^{2,3}, ZHANG Qian¹

1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, Beijing 100083, China;

3. Beijing Key Laboratory of Process Automation in Mining & Metallurgy, Beijing 100083, China;

4. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100083, China;

5. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, jointly established by the Ministry and the Province, Kunming 650093, China

Abstract: In order to solve the problem that the liners of $\Phi 5.5\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ SAG mill were easy to wear and fracture in a concentrator in Xinjiang. Firstly, the optimum structural parameters of cylinder liners were determined by the orthogonal test. Secondly, The discrete element method (DEM) was used to simulate the real operation of SAG mills. Based on the different structural parameters of cylinder liners (height, width and angle of lifter bars), the motion of particles and the change of collision energy in SAG mills were studied. Finally, the feasibility of the optimization scheme was verified by industrial tests. The results showed that a suitable parameters of the liners can effectively optimize the motion of particles in the mill, increase the effective collision of ball to ore and ore to ore, reduce the wear of liners or grinding media caused by invalid collision, and thus improve the operating parameters of the semi-autogenous mill. The optimum parameters of the lifter bars were determined by orthogonal experiment to be 190 mm in height, 140 mm in width and 60° in angle. The optimum parameters of liners were used to carry out industrial tests. The results showed that the optimized liner service life, mill operation rate and efficiency were increased by 51 days, 16.36% and 15.55 t/h, and the mill power consumption decreased by 6.07 kW·h/t. The results verified the reliability and superiority of the discrete element method and the orthogonal design method in the modification of the cylinder liners.

Keywords: semi-autogenous grinding; liner modification; orthogonal design; discrete element method

引用格式: 肖庆飞, 邵云丰, 周强, 刘向阳, 王庆凯, 张谦. 基于正交设计和离散元法的半自磨机筒体衬板改型及工业应用[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 50–59.

XIAO Qingfei, SHAO Yunfeng, ZHOU Qiang, LIU Xiangyang, WANG Qingkai, ZHANG Qian. Modification and industrial application of liners of semi-autogenous grinding mill based on orthogonal design and discrete element method[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 50–59.

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

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn