

海底多金属硫化物采掘机构滚筒切削特性研究^①

吴卓, 郑皓, 刘效松, 李满红, 王建华

(长沙矿冶研究院有限责任公司 深海矿产资源开发利用国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 为提高采掘机构滚筒的工作性能, 采用离散单元法对不同工况下滚筒的切削过程进行了数值模拟。采用单因素分析法和正交试验法分析了切削厚度、转速、牵引速度对切削阻力、产能及比能耗的影响, 以滚筒的切削阻力和比能耗为评价指标, 利用矩阵分析法获得了最佳的滚筒工作参数。结果表明, 随着切削厚度增加, 切削阻力和产能均增大, 比能耗减小; 随着转速增加, 切削阻力和产能均减小, 比能耗增大; 随着牵引速度增加, 切削阻力、产能均增大, 比能耗减小。滚筒最佳工作参数为: 切削厚度 50 mm、转速 100 r/min、牵引速度 0.06 m/s。

关键词: 深海采矿; 采矿车; 海底多金属硫化物; 采掘机构; 滚筒; 离散单元法; 切削性能

中图分类号: TD857

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.001

文章编号: 0253-6099(2023)06-0001-05

Cutting Performance of Drum Cutter in Mining Mechanism for Seabed Polymetallic Sulphide

WU Zhuo, ZHENG Hao, LIU Xiaosong, LI Manhong, WANG Jianhua

(State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co Ltd, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: In order to improve the working performance of drum cutter in mining mechanism, the cutting process of drum cutter under different working conditions was numerically simulated by using discrete element method (DEM). The effects of cutting thickness, rotating speed and tractor speed on cutting resistance, productivity and specific energy consumption were investigated by single-factor analysis and orthogonal testing. With cutting resistance and specific energy consumption of the drum cutter as evaluation indexes, the best working parameters of the drum cutter were obtained by matrix analysis. The results show that as cutting thickness increases, both cutting resistance and productivity increase, while specific energy consumption decreases. With rotation speed increases, cutting resistance and productivity decrease, but specific energy consumption increases. And with tractor speed increases, both cutting resistance and productivity increase, while specific energy consumption decreases. It is concluded that the optimum working parameters of drum cutter are as follows: cutting thickness of 50 mm, rotation speed of 100 r/min, and tractor speed of 0.06 m/s.

Key words: deep sea mining; mining vehicles; seabed polymetallic sulfide; mining mechanism; drum roller; discrete element method (DEM); cutting performance

陆地矿产资源的不断开发使得矿产资源量日趋匮乏, 人们不得不把目光转向深海采矿。目前具有开采前景的海底矿产资源主要有多种金属结核、富钴结壳、多金属硫化物及富稀土沉积物等, 其中, 多金属硫化物因金属品位高、赋存深度较浅、距离陆地较近等优点成为深海采矿的重点对象^[1]。

海底多金属硫化物的开采首先是将其从矿床上剥离。国内外针对海底多金属硫化物的剥离提出了多种切削方法, 使用较多的是螺旋滚筒切削^[2-7]。滚筒是深海采矿设备中将多金属硫化物从矿床剥离的关键部件, 为提高滚筒工作性能, 国内外学者开展了大量研究, 主要集中在端盘截齿切向安装角、轴向倾斜角和二

① 收稿日期: 2023-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2803605, 2021YFC2801704)

作者简介: 吴卓(1997—), 男, 湖南常德人, 硕士, 主要研究方向为深海采矿水下装备。

次旋转角对截齿载荷的影响^[8],滚筒排布方式对截割性能的影响^[9],滚筒截割方向对载荷的影响^[10],两滚筒中心距、牵引速度、转速对破碎性能的影响^[11]等方面。滚筒工作性能除了受到结构参数的影响外,还受到工作参数的影响。本文采用棋盘式截齿排列的单滚筒,根据采矿车的实际作业工况进行数值模拟,分析不同切削厚度、转速、牵引速度对滚筒切削性能的影响,为采矿车开采工艺提供参考依据。

1 仿真模型的构建

1.1 滚筒模型处理

滚筒主要由筒毂、截齿、齿座组成,通过三维软件对滚筒模型进行绘制。滚筒截齿采用棋盘式排列,沿6条螺旋线排布截齿,每条螺旋线沿周向间隔120°,上侧3条螺旋线在下侧3条螺旋线基础上沿周向偏移60°对截齿进行排列,每条螺旋线上布置6个截齿,由两端向中间布置。每条螺旋线的初始位置前沿周向布置3个具有侧边角的截齿,使得每个工作面上均有3个截齿参与切削。滚筒截线距40 mm,螺旋升角20°,截齿安装角45°。棋盘式截齿排列展开图如图1所示,滚筒结构如图2所示。

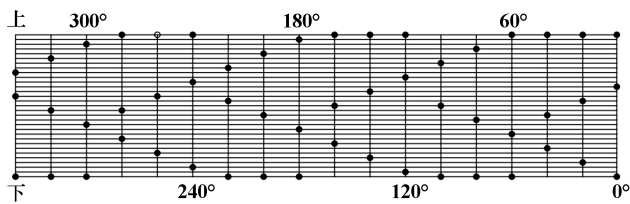


图1 棋盘式截齿排列展开图

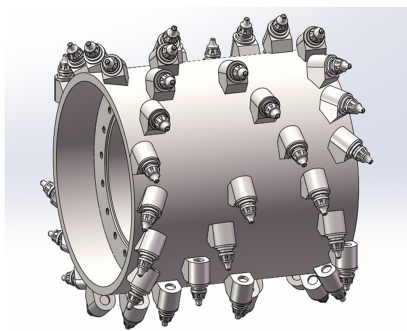


图2 滚筒结构图

1.2 切削模型的建立

将建立好的滚筒模型导入离散元软件中进行仿真分析时,为确保分析模型的精确性,需要对滚筒模型进行网格划分。建立多金属硫化物矿床模型,尺寸为1 200 mm×600 mm×200 mm,为符合实际工况,矿床截割出与滚筒切削直径具有相似形状的圆弧面。矿床

中多金属硫化物密度、弹性模量、泊松比、抗压强度、内聚力和内摩擦角分别为2 600 kg/m³、11.5 GPa、0.11、10.24 MPa、2.447 MPa、38.04°^[12]。多金属硫化物矿床由半径8 mm的颗粒粘结而成,建立过程中,采用Hertz-Mindlin粘结接触模型模拟多金属硫化物颗粒间的粘结,采用Hertz-Mindlin无滑动接触模型模拟颗粒与滚筒的接触。试验中得到的颗粒间粘结参数^[12]见表1。矿床生成完毕后的颗粒数量为35 125个,颗粒粘结键为163 981个。

表1 多金属硫化物离散元模型的粘结接触参数

颗粒粘结参数	单位	数值
单位面积法向刚度	N/m ³	2.5×10 ⁷
单位面积切向刚度	N/m ³	2.2×10 ⁷
单位面积法向应力	Pa	5×10 ¹⁰
单位面积切向应力	Pa	4.7×10 ¹⁰

滚筒切削模型如图3所示。滚筒通过直线进给和旋转运动对多金属硫化物进行切削。滚筒在对多金属硫化物进行切削时,破碎效果除了受滚筒本身结构、多金属硫化物物理力学特性影响外,还受滚筒工作参数的影响。本文主要从滚筒切削厚度、转速、牵引速度3个工作参数,通过切削阻力、产能和比能耗来评价滚筒的切削性能。

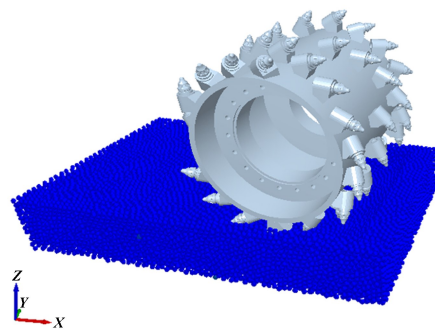


图3 滚筒切削模型

切削阻力是反映滚筒工作性能和设计切削设备的重要指标,可直接通过软件处理分析得出。

比能耗反映滚筒切削单位体积多金属硫化物时所消耗的能量,计算公式为:

$$H_w = \frac{t \times N \times \bar{T}}{9550 \times 3600 \times V} \quad (1)$$

式中 H_w 为比能耗,kW·h/m³; t 为多金属硫化物从矿体剥离的时间,s; N 为滚筒转速,r/min; \bar{T} 为滚筒扭矩均值,N·m; V 为多金属硫化物从矿体剥离的体积,m³。

产能是反映滚筒单位时间内能否达到生产需求的

关键指标,计算公式为:

$$Q = \frac{3600\rho V}{1000t} \quad (2)$$

式中 Q 为产能, t/h ; ρ 为海底多金属硫化物的密度, kg/m^3 。

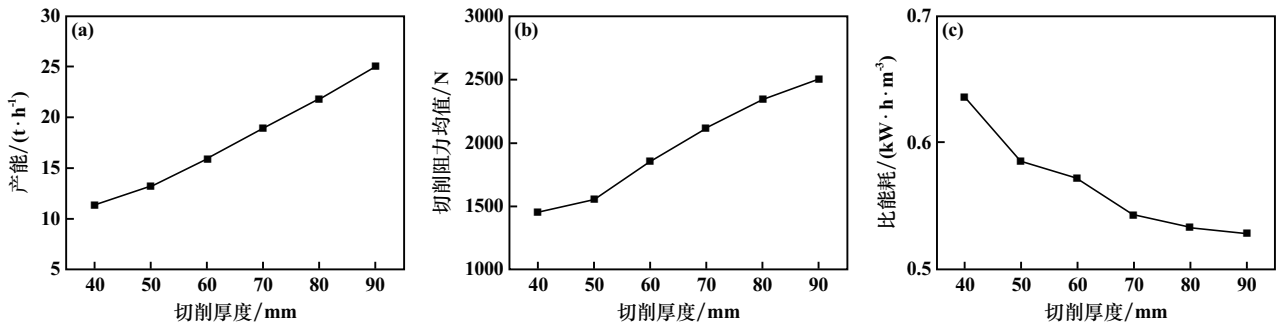
2 计算结果与分析

2.1 切削厚度对切削特性的影响

滚筒转速 90 r/min、牵引速度 0.1 m/s 条件下,分析了不同切削厚度对滚筒切削性能的影响,结果见图 4。从图 4 可以看出,随着切削厚度增加,产能近似成线性

增加。这是由于切削厚度增大,切削横截面积增大,随着滚筒不断向前进给,单位时间内剥离多金属硫化物的体积增大。切削阻力随切削厚度增大而增大。滚筒切削矿体的横截面积变大,大面积的向前进给切削会增大滚筒的切削阻力。比能耗随切削厚度增加而减小。由式(1)可知,比能耗与体积成反比关系,故在切削过程中,随着切削厚度增大,多金属硫化物颗粒从矿体剥离的体积逐渐增多,比能耗减小。

综合上述分析,切削厚度太大,滚筒受力过大,会加剧截齿磨损,影响使用寿命;切削厚度太小,产能会减小,滚筒比能耗会增大。切削厚度宜取 50~70 mm。



(a) 产能; (b) 切削阻力均值; (c) 比能耗

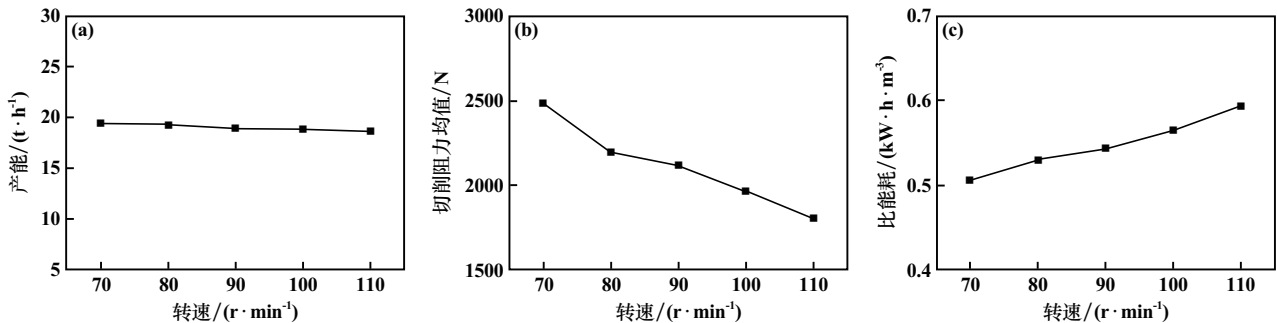
图4 切削厚度与切削性能的关系

2.2 转速对切削特性的影响

滚筒牵引速度 0.1 m/s、切削厚度 70 mm,转速对滚筒切削性能的影响见图 5。由图 5 可见,随着转速增加,相同牵引速度下滚筒向前切削矿体的位移量减小,剥离的体积减小,产能随之减小,但由于转速的增量较小,位移变化量较小,产能变化幅值较小。切削阻力均值随着转速增大而减小。滚筒转速较低时,单位时间内参与截齿的数量较少。截齿通过挤压来切削矿体,需要较大的切削力,随着转速增大,单位时间内参

与切削的截齿数量增多,截齿对矿体的瞬时冲击加剧,加速了矿体内部裂纹的扩展,切削阻力减小。比能耗随着转速增大而增大。比能耗同时受到转速、扭矩和剥离体积的作用,转速增加,扭矩减小,虽然滚筒剥离的体积变化很小,但比能耗增加。

综上所述,低转速虽然比能耗较小,但会增大滚筒的切削阻力,使截齿磨损加剧;高转速虽然切削阻力较小,但比能耗较大,会增大能量损耗。因此,适宜的转速为 80~100 r/min。



(a) 产能; (b) 切削阻力均值; (c) 比能耗

图5 转速与切削性能的关系

2.3 牵引速度对切削特性的影响

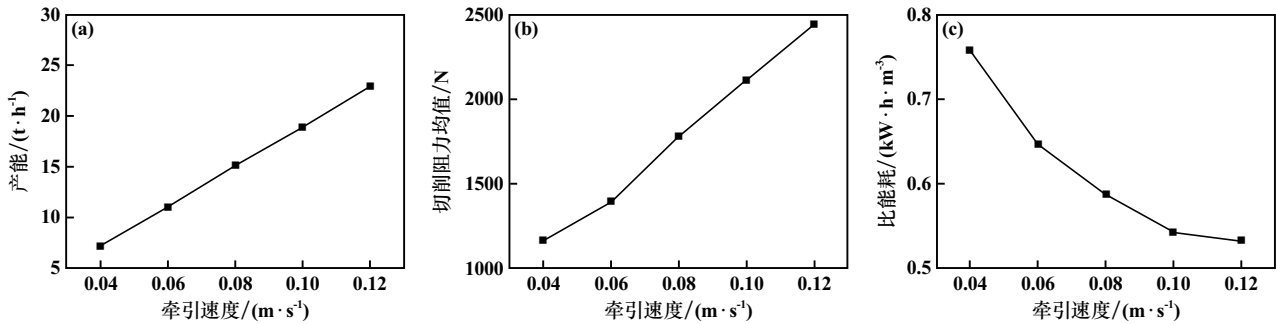
滚筒切削厚度 70 mm、转速 90 r/min,牵引速度对

滚筒切削性能的影响见图 6。由图 6 可见,随着牵引速度增加,产能和切削阻力均值增加,比能耗降低。牵引

速度增加,滚筒切削深度增大,被剥离的多金属硫化物体积量增大,产能和滚筒所受切削阻力增大,比能耗降低。

综上所述分析可知,低牵引速度时滚筒的切削阻

力和扭矩较小,但比能耗较大,产能也会减少;高牵引速度时比能耗较小,但切削阻力较大,不利于设备的稳定工作。适宜的牵引速度为0.06~0.10 m/s。



(a) 产能; (b) 切削阻力均值; (c) 比能耗

图6 牵引速度与切削性能的关系

2.4 正交试验

滚筒切削性能受到多因素耦合的作用,而基于单因素试验法分析切削厚度、转速、牵引速度对切削性能的影响难以得到滚筒的最优工作参数。根据单因素试验法分析得出的工作参数取值范围,选择切削厚度、转速、牵引速度三因素,每个因素选取3个水平,得到三因素三水平正交试验表如表2所示,正交试验结果见表3,极差分析结果见表4。

表2 三因素三水平正交试验表

水平因素	切削厚度(A)/mm	转速(B)/(r·min ⁻¹)	牵引速度(C)/(m·s ⁻¹)
1	50	80	0.06
2	60	90	0.08
3	70	100	0.10

表3 正交试验结果

试验编号	因素A	因素B	因素C	切削阻力/N	产能/(t·h ⁻¹)	比能耗/(kW·h·m ⁻³)
1	50	80	0.06	1 236.664 6	7.477 2	0.700 3
2	50	90	0.08	1 433.930 7	10.526 3	0.629 1
3	50	100	0.10	1 415.456 4	9.751 6	0.583 1
4	60	80	0.08	1 675.310 3	12.360 7	0.573 7
5	60	90	0.10	1 857.748 1	15.911 0	0.571 8
6	60	100	0.06	1 216.879 4	9.431 7	0.681 5
7	70	80	0.10	2 195.608 8	19.317 4	0.529 8
8	70	90	0.06	1 393.138 7	11.046 7	0.647 5
9	70	100	0.08	1 768.823 6	15.102 0	0.629 7

从表3~4可以看出,随着切削厚度增加,切削阻力逐渐增大、产能逐渐增大、比能耗逐渐减小;随着转速增加,切削阻力逐渐减小、产能逐渐减小、比能耗逐渐增大;随着牵引速度增大,切削阻力逐渐增大、产能逐渐增大、比能耗逐渐减小。

表4 极差分析结果

参数	切削厚度/mm	转速/(r·min ⁻¹)	牵引速度/(m·s ⁻¹)	
切削阻力	k_{11}	1 362.017 2	1 702.527 9	1 282.227 6
	k_{12}	1 583.312 6	1 561.605 8	1 626.021 5
	k_{13}	1 785.857 0	1 467.053 1	1 822.937 8
	R_1	423.839 8	235.474 8	540.710 2
产能	k_{21}	9.251 7	13.051 8	9.318 5
	k_{22}	12.567 8	12.494 7	12.663 0
	k_{23}	15.155 4	11.428 4	14.993 3
	R_2	5.903 7	1.623 3	5.674 8
比能耗	k_{31}	0.637 5	0.601 3	0.676 4
	k_{32}	0.609 5	0.616 1	0.610 8
	k_{33}	0.602 3	0.631 4	0.561 6
	R_3	0.035 2	0.030 2	0.114 9

为分析得到滚筒的最优工作参数组合,引入矩阵分析法对正交试验设计的9组方案进行分析。由于比能耗与剥离质量有关,引入矩阵分析法时只考虑切削阻力与比能耗这两种评价指标。构建滚筒切削阻力、比能耗与切削厚度、转速、牵引速度的各层结构矩阵以及滚筒切削阻力、比能耗的权矩阵,求得切削厚度、转速、牵引速度在各自三水平的权重,以确定最优工作参数组合。首先构建指标层矩阵,假设正交试验为 l 因素 m 水平正交试验,因素 A_i 的第 j 个水平试验指标平均值为 k_{ij} ,令 $K_i = k_{ij}$,建立矩阵(见式(3)),接着令 $T_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^m K_{ij}}$,建立因素层矩阵,见式(4)。若因素 A_i 的极差为 s_i ,令 $S_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^l s_i}$,建立水平层矩阵,见式(5),最后建立评价指标的权矩阵,见式(6)。

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ K_{12} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ & & \vdots & & \\ K_{1m} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & K_{2m} & 0 & \cdots & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{l1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{l2} \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & K_{lm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & 0 \\ & & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & T_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_l \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\omega = MTS = [\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_m]^T \quad (6)$$

式(6)中, $\omega'_i = K_{11} T_1 S_1$, 而 $K_{11} T_1 = \frac{K_{11}}{\sum_{j=1}^m K_{ij}}$, 该数值反

映的是因素 A_1 第一水平指标值在所有水平指标的占比情况;

$S_i = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^l s_i}$, 该数值反映的是因素 A_1 的极差在所有因素极差的占比情况;

两数值的乘积反映因素 A_1 第一水平对指标值的影响程度以及因素 A_1 的极差大小, 同理可求得其他因素水平。

通过上述公式可求出评价指标在各因素各水平下的权重。由权重大小计算出最优切削方案, 两种评价指标值越小越好。

权矩阵计算公式为:

$$\begin{cases} \omega_1 = M_1 T_1 S_1 \\ \omega_2 = M_2 T_2 S_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中 ω_1 为滚筒切削阻力权矩阵; ω_2 为滚筒比能耗权矩阵; M_1 为滚筒切削阻力均值矩阵; M_2 为滚筒比能耗均值矩阵; T_1 为三因素的滚筒切削阻力均值之和的倒数矩阵; T_2 为三因素的滚筒比能耗均值之和的倒数矩阵; S_1 为滚筒切削阻力的极差矩阵; S_2 为滚筒比能耗的极差矩阵。

为得出最优工作参数组合, 将两种评价指标的权矩阵取均值计算得到总权矩阵 ω :

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} 0.1017 \\ 0.1182 \\ 0.1333 \\ 0.0706 \\ 0.0648 \\ 0.0608 \\ 0.1221 \\ 0.1549 \\ 0.1736 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.0121 \\ 0.0116 \\ 0.0115 \\ 0.0098 \\ 0.0101 \\ 0.0103 \\ 0.0420 \\ 0.0380 \\ 0.0349 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0569 \\ 0.0649 \\ 0.0724 \\ 0.0402 \\ 0.0374 \\ 0.0356 \\ 0.0821 \\ 0.0964 \\ 0.1043 \end{pmatrix} \quad (8)$$

由上述计算结果可知, A_1 、 B_3 、 C_1 权重最小, 故最优方案为 $A_1 B_3 C_1$, 得到滚筒的最优工作参数为切削厚度 50 mm、转速 100 r/min、牵引速度 0.06 m/s。

3 试验验证

在实验室搭建了海底多金属硫化物切削试验系统, 试验系统主要包括海底多金属硫化物采掘一体化样机、控制平台和多金属硫化物模拟料, 如图 7 所示。

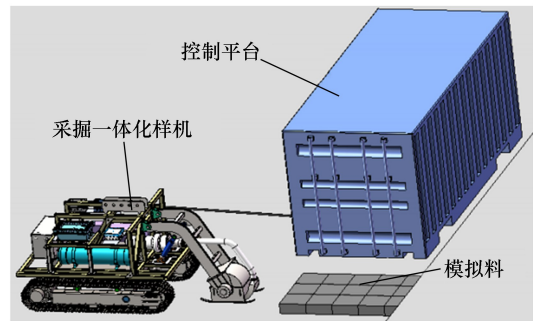


图7 海底多金属硫化物切削试验系统图

在进行切削试验时, 主要利用压力传感器和流量传感器对破碎马达的压力和流量进行实时监测, 通过换算分析得到滚筒在最优工况下的切削性能参数。

在切削厚度 50 mm、转速 100 r/min、牵引速度 0.06 m/s 工况下进行数值模拟与岸上切削试验, 得到的数值模拟和试验切削性能结果统计于表 5 中。结果表明, 仿真结果与试验结果吻合, 验证了仿真分析得到的最优工作参数是可靠的。

表5 最优工作参数下数值模拟与试验结果对比

类别	产能/(t·h ⁻¹)	切削阻力均值/N	比能耗/(kW·h·m ⁻³)
数值模拟	8.7178	1041.6913	0.6228
切削试验	7.6475	835.2268	0.7755

(下转第 10 页)

弗劳德数都降至 17 左右,但不同变径长度的下降速度不同。可以看到,变径长度越长,弗劳德数下降越慢;变径比越大,弗劳德数下降幅度越大。

4 结 论

采用 CFD-DEM 耦合数值模拟方法研究了变径长度和变径比对变径管中颗粒速度、压力损失和弗劳德数的影响规律,并得出了以下结论:

- 1) 变径管能有效降低颗粒速度。随着变径长度和变径比增大,变径管中颗粒速度先增大后减小。
- 2) 变径管能有效降低管道中的压力损失。增加变径长度和变径比,管道中压力损失均增加。
- 3) 变径长度不会影响变径后管道中弗劳德数的变化规律,只影响弗劳德数下降速度,变径长度越长,弗劳德数下降越慢;变径比越大,变径后管道中弗劳德数越小。

参考文献:

- [1] 王飞飞,田春艳,任青阳,等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):22-25.
- [2] 徐卫东,张永亮,陈晓利,等. 庙岭金矿采空区混合强度充填方法研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):14-18.
- [3] 景泽波. 煤矿采空区风力充填粉煤灰气力输送特性实验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
- [4] LI Z Q, CHU K W, PAN R H, et al. Computational study of gas-sol-

id flow in a horizontal stepped pipeline[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019;2545347.

- [5] 杨 伦,谢一华. 气力输送工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [6] 关佳斌,裴旭明,张琳荔. 粮食颗粒群密相变径气力输送的流动特性[J]. 中国粉体技术, 2018,24(2):38-43.
- [7] LIU Q, DUAN G B, LIU Z M. Flow resistance characteristics analysis of horizontal shrunk pipe in dense phase pneumatic conveying[J]. Advanced Materials Research, 2013,614-615:621-625.
- [8] 王 锐,段广彬,刘宗明. 浓相气力输送水平渐扩管流动分析[J]. 流体机械, 2012,40(7):7-10.
- [9] 阮晓东,赵文峰. 水平渐扩管后气固两相流流动特性的试验研究[J]. 热力发电, 2006(9):15-17.
- [10] Bae Y, Kim Y. Prediction of local pressure drop for turbulent flow in axisymmetric sudden expansions with chamfered edge[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014,92(2):229-239.
- [11] WU W X, LIU Z M, DUAN G B. Numerical simulation of dense phase pneumatic conveying gypsum in stepped pipeline[J]. Advanced Materials Research, 2011,306-307:1387-1392.
- [12] Meglinchey D, Cowell A, Crowe R. CFD investigation of dense phase pneumatic conveying at a pipeline enlargement[J]. Particuology, 2012, 10(2):176-183.
- [13] 杜 俊. 基于 CFD-DEM 方法的稀相气力输送数值模拟研究[D]. 武汉:武汉大学, 2015.
- [14] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

引用本文:侯艳君,王庆辉,周甲伟,等. 基于 CFD-DEM 的气力输送变径管中颗粒流动特性分析[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):6-10.

(上接第 5 页)

4 结 论

采用棋盘式截齿排列滚筒,基于离散单元法对不同工况下滚筒的切削过程进行数值模拟,结论如下:

- 1) 随着切削厚度增加,滚筒产能、切削阻力逐渐增大,比能耗逐渐减小。
- 2) 随着转速增加,滚筒产能逐渐减小,但减小幅值较小,切削阻力逐渐减小,比能耗逐渐增大。
- 3) 随着牵引速度增加,滚筒产能、切削阻力逐渐增大,比能耗逐渐减小。
- 4) 由矩阵分析法计算可知,滚筒最优工作参数为:切削厚度 50 mm、转速 100 r/min、牵引速度 0.06 m/s。

参考文献:

- [1] Miller K A, Thompson K F, Johnston P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. Frontiers in Marine Science, 2018,4:418.
- [2] Nautilus Minerals. Nautilus Minerals Annual Report 2015[R]. 2016.
- [3] Ishiguro S, Yamauchi Y, Odaka H, et al. Development of mining element engineering test machine for operating in seafloor hydrothermal deposits[J]. Mitsub Heavy Ind Tech Rev, 2013,50(10):21-26.

- [4] Spagnoli G, Miedema S A, Herrmann C, et al. Preliminary design of a trench cutter system for deep-sea mining applications underhyperbaric conditions[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016,41(4):930-943.
- [5] 刘少军,黄中华. 一种海底多金属硫化物切割装置[P]. 中国:CN102434164A. 2012-05-02.
- [6] 吴鸿云,高宇清. 深海多金属硫化物矿体截割机构[P]. 中国:CN202788853U. 2013-03-13.
- [7] 戴 瑜,朱 湘,刘少军. 一种海底大块状固体矿石高效截割破碎采集装置[P]. 中国:CN105735998A. 2016-07-06.
- [8] 李 艳,陆 鹏,李钰晴. 端盘截齿切削海底块状硫化物载荷特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50(11):2712-2721.
- [9] 李 艳,李钰晴,汪 振. 海底多金属硫化物采掘头滚筒排布方式[J]. 船舶工程, 2019,41(10):128-133.
- [10] 刘 伟,吴鸿云,江 敏,等. 深海多金属硫化物的螺旋滚筒截割载荷模拟[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(11):168-172.
- [11] LI Y, LI M D, DAI H, et al. Study on cutting-load characteristics of collecting cutter for seafloor massive sulfide[J]. IEEE Access, 2021,9:51925-51939.
- [12] HUANG Z H, LIU S J, XUY G, et al. Seafloor polymetallic sulfides mechanical property test[C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2014,1015:316-319.

引用本文:吴 卓,郑 皓,刘效松,等. 海底多金属硫化物采掘机构滚筒切削特性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):1-5.