

# 富钴结壳振动剥离破碎的实验研究

邹湘伏, 何清华, 郭 勇, 朱建新

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘 要:** 在自行设计制造的矿岩振动剥离破碎试验台上, 引入振动加载环节, 对钴结壳的剥离破碎关键技术进行实验研究, 并对模拟钴结壳在有、无振动加载 2 种情况下的剥离破碎进行正交对比实验。研究表明, 通过正交对比实验发现振动加载降低了钴结壳的破碎“能耗”, 获得主要振动参数影响钴结壳剥离破碎的规律, 得到实验螺旋滚筒振动剥离破碎钴结壳的一组最优加载参数: 中偏心块加载, 刀具安装角度为 45°, 振动频率为 50 Hz, 平台移动速度为 0.6 m/min, 滚筒转速为 25 r/min; 施加合适的振动载荷, 螺旋滚筒切削破碎时的平均驱动油压下降 22.9%, 振动剥离破碎能有效地降低螺旋滚筒切削能耗。

**关键词:** 钴结壳; 振动; 剥离; 破碎; 螺旋滚筒

中图分类号: TD424; TD451

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)02-0327-05

## Experimental research on vibration removing and breaking of cobalt-rich crusts

ZOU Xiang-fu, HE Qing-hua, GUO Yong, ZHU Jian-xin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The key technology of removing and breaking of ocean cobalt-rich crusts was studied by experimentations with or without vibration loading on the vibration breaking experiment platform made by ourselves. The results show that the breaking energy consumption is reduced further. The rules of how the main vibration cutting parameters impact the removing and breaking of the crusts are obtained. A set of optimized vibration removing and breaking parameters are discovered through orthogonal experiments: middle eccentricity piece loading, cutter fitting angle 45°, vibration frequency 50 Hz, moving speed 0.6 m/min, rotation speed 25 r/min. The average driving pressure of the motor decreases by 22.9%. Adding appropriate vibration load can reduce the energy consumption of the spiral roller cutting head effectively.

**Key words:** cobalt-rich crusts; vibration; removing; breaking; spiral cutting roller

深海富钴结壳通常赋存于海底 0.8~3 km 的海山或海底高原的顶部和斜坡基岩上, 由于富含 Co 和 Pt 等稀贵金属, 因而其极具潜在开采价值。从 20 世纪 80 年代初德国针对富钴结壳开展调查以来, 各国便对海洋钴结壳的勘探与开采技术进行研究, 其中富钴结壳的剥离破碎便是首先要解决的一个关键技术问题。

国内外研究结果<sup>[1-16]</sup>表明, 以破碎“比能耗”为判断标准, 较好的剥离破碎方法为螺旋滚筒式截齿切削或拖头切削, 而以螺旋滚筒式截齿切削比能耗最低, 节能效果最显著。为了进一步降低“比能耗”, 本文作者针对国内外现有研究成果, 通过引入振动环节, 研究振动式螺旋滚筒截齿剥离破碎钴结壳规律。

收稿日期: 2007-05-10; 修回日期: 2007-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374071)

通信作者: 邹湘伏(1975-), 男, 湖南醴陵人, 博士, 讲师, 从事机电一体化及深海采矿方面的研究; 电话: 13548948198; E-mail: xfzou32@126.com

# 1 钴结壳单齿振动剥离破碎实验

## 1.1 实验对象

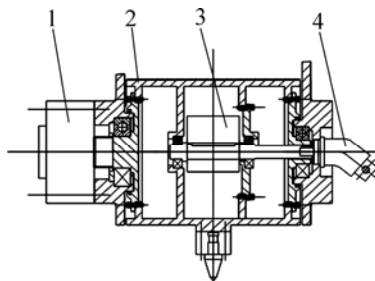
试验对象为模拟钴结壳,它由长沙矿冶研究院研制,其主要性能指标均达到海底真实钴结壳料的要求,因此,用模拟料代替真实料进行切削试验研究,解决了真实料难于获取和数量有限的实验难题。

## 1.2 实验平台

自行研制的钴结壳振动切削试验平台<sup>[17-18]</sup>,具有模拟振动式螺旋滚筒采矿头剥离破碎钴结壳工作情况的能力,可以研究在有、无振动情况下钴结壳的剥离破碎规律,能为评估钴结壳的剥离效率、剥离品质等提供试验依据。试验平台包括螺旋切削滚筒、振动机构、齿座、试样夹持进给台和数据测试系统等部分。

## 1.3 试验台工作原理

回转和振动机构为整个试验台的关键部件,其结构如图 1 所示,螺旋滚筒直径为 450 mm,宽度为 500 mm。采用单偏心块单轴式惯性激振,实现振动加载。大扭矩低速回转马达 1 带动螺旋滚筒 2 进行回转运动,



1—大扭矩马达; 2—螺旋滚筒; 3—偏心块;  
4—高速回转马达

图 1 回转和振动机构示意图

Fig.1 Sketch map of rotation and vibration machine

高速马达 4 带动偏心块 3 实现高速偏心圆周运动,在剥离破碎过程中,使螺旋滚筒作圆周切削运动的同时施加振动载荷。偏心块 3 非常关键,它直接影响激振力、振动的频率和振幅等参数。激振力的计算公式如下:

$$F = me\omega^2 \quad (1)$$

式中:  $F$  为激振力, N;  $m$  为偏心块的质量, kg;  $e$  为偏心块的偏心距, m;  $\omega$  为回转的角速度, rad/s。

根据整个螺旋滚筒的质量,要求激振力达到 10~15 kN,且要求滚筒的振动频率和振幅可变。为此,设计了不同质量和偏心距的偏心块进行切削实验。

## 1.4 实验过程

首先进行单齿滚筒剥离破碎钴结壳的试验。为了更好地对比有、无振动情况下钴结壳的剥离破碎效果,每次从模拟料的一端切削到另一端过程中,前半段无振动加载而后半段添加振动。通过大量切削实验,得到了单齿振动切削破碎情况下各工作参数的优化匹配关系。在此基础上,进行了螺旋滚筒的全齿切削破碎试验。为了减少试验次数,利用正交试验法对试验模型进行优化<sup>[19]</sup>,进行有、无振动情况下的对比试验。对于每个偏心块可调的参数为 4 个,每个参数取 3 个水平级别,设计正交表  $L_9(3^4)$ ,并分别安装 3 个不同偏心块进行切削试验。

## 1.5 试验数据统计

分析液压马达驱动螺旋滚筒剥离破碎钴结壳的工作原理可知,马达工作油压的高低可以直接反映切削力和切削力矩的大小。因而,对比有、无振动切削情况,切削力和切削力矩下降的比例与马达工作油压下降的比例是相等的。因此,比较各组振动切削参数对切削效果的影响只要比较大扭矩回转马达进出油压差的下降程度就可以了。经过测试、计算,统计的实验数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 大偏心块切削实验数据

Table 1 Cutting experimental data with big eccentricity piece

序号	刀具安装 角度 $\theta/^\circ$	频率 $f$ Hz	平台速度 $v$ / ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	滚筒转速 $r$ / ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	油压差 $p/\text{MPa}$		油压下降率/%
					振动	静态	
1	0	16	0.5	25	5.5	6.1	9.8
2	0	20	0.6	15	9.1	11.3	19.5
3	0	25	0.7	20	6.0	8.0	25.0
4	25	16	0.6	20	6.2	6.7	7.5
5	25	20	0.7	25	7.4	9.0	17.8
6	25	25	0.5	15	5.3	7.6	30.3
7	45	16	0.7	15	7.4	8.3	10.8
8	45	20	0.5	20	6.0	6.3	4.8
9	45	25	0.6	25	6.4	6.9	7.2

表 2 中偏心块切削实验数据

Table 2 Cutting experimental data with middle eccentricity piece

序号	刀具安装角度 $\theta/(\circ)$	频率 $f/\text{Hz}$	平台移动速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	滚筒转速 $r/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	油压差 $p/\text{MPa}$		油压下降率/%
					振动	静态	
1	25	50	0.6	25	5.8	9.0	35.6
2	25	40	0.5	20	8.0	9.4	14.9
3	25	30	0.7	15	7.7	9.2	16.3
4	45	50	0.5	15	7.1	9.3	23.7
5	45	40	0.7	25	6.7	9.0	25.6
6	45	30	0.6	20	8.5	11.5	26.1
7	0	50	0.7	20	6.7	9.0	25.6
8	0	40	0.6	15	8.4	9.6	12.5
9	0	30	0.5	25	8.7	11.7	25.6

在进行小偏心块试验时发现, 无论进行何种参数的匹配, 振动切削的效果都不明显, 因此, 经过多次试验验证小偏心块虽然可以达到相同的激振力, 但由于振幅太小, 对改善切削效果、降低工作油压效果不明显。因此, 这里未对小偏心块的试验数据进行列表。

分析比较上面的试验数据, 可以得到大偏心块和中偏心块对试验结果的不同影响程度, 如表 3 所示。

表 3 油压下降结果比较

Table 3 Comparison of decreased hydraulic pressure

	油压平均下降率/%	油压下降率最大值/%
大偏心块	14.7	30.3
中偏心块	22.9	35.6

由表 3 可知, 无论是从整体还是从最佳效果来看, 中偏心块对振动切削产生的效果最好。

## 2 正交试验数据分析

对中偏心块正交试验的 9 组结果进行计算, 可以初步估计出哪些属于重要因素, 以及各因素的优效水平级, 结果见表 4。表 4 中列出的  $K_1, K_2, K_3, k_1, k_2, k_3$  和  $R$ , 它们的含义及计算方法如下:

表中每列  $K_i(i=1, 2, 3)$  是由该列中对应的切削参数  $(\theta, f, v, r)$  在水平级  $i$  条件下获得的试验指标之和; 而  $k_i=K_i/n, n$  为对应试验总次数;  $R$  为极差,  $R=\{k_n\}_{\max}-\{k_n\}_{\min}, n=1, 2, 3$ 。

如第 1 列因素中刀具的安装角度  $\theta, K_1$  是由这一

列中  $\theta$  的水平级为 1 即  $\theta$  为  $25^\circ(25(1))$  对应的 3 组试验的试验指标之和;

$$K_1=35.6+14.9+16.3=66.8。$$

$$k_1=K_1/n=66.8/3=22.3。$$

$$R=\{k_n\}_{\max}-\{k_n\}_{\min}=k_2-k_3=25.1-21.2=3.9。$$

同理可以求得其他参数。

表 4 中偏心块振动切削正交试验结果

Table 4 Results of vibration cutting orthogonal experiment with middle eccentricity piece

实验次数	安装角度 $\theta/(\circ)$	频率 $f/\text{Hz}$	平台速度 $v/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	滚筒转速 $r/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	油压下降率/%
1	25(1)	50(1)	0.6(1)	25(1)	35.6
2	25(1)	40(2)	0.5(2)	20(2)	14.9
3	25(1)	30(3)	0.7(3)	15(3)	16.3
4	45(2)	50(1)	0.5(2)	15(3)	23.7
5	45(2)	40(2)	0.7(3)	25(1)	25.6
6	45(2)	30(3)	0.6(1)	20(2)	26.1
7	0(3)	50(1)	0.7(3)	20(2)	25.6
8	0(3)	40(2)	0.6(1)	15(3)	12.5
9	0(3)	30(3)	0.5(2)	25(1)	25.6
$K_1$	66.8	84.9	74.2	86.8	
$K_2$	75.4	53.0	64.2	66.6	
$K_3$	63.7	68.0	67.5	52.5	油压
$k_1$	22.3	28.3	24.7	28.9	平均
$k_2$	25.1	17.7	21.4	22.2	下降率
$k_3$	21.2	22.7	22.5	17.5	22.9%
$R$	3.9	10.6	3.3	11.4	

为了直观起见,用因素的水平作横坐标,油压平均下降率作纵坐标,得出因素与试验指标的关系直方图,如图 2 所示。

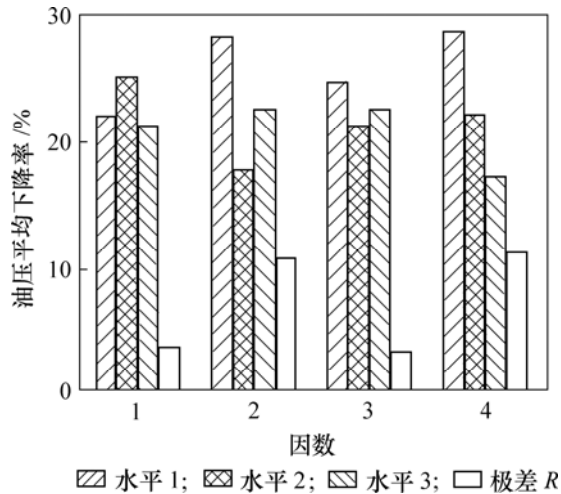


图 2 试验指标与 4 个因素的关系图

Fig.2 Relationship between experiment index and four factors

从表 4 和图 2 都可以看出,刀具安装角度  $\theta$  为  $45^\circ$ , 频率  $f$  为 50 Hz, 平台移动速度  $v$  为 0.6 m/min, 滚筒转速  $r$  为 25 r/min 时, 进出油口压差平均下降比例都最大, 把这 4 个最好的因素水平组合起来, 得到一组最佳的匹配参数  $\theta_2 f_1 v_1 r_1$ , 也就是刀具安装角度  $\theta_2$  为  $45^\circ$ , 频率  $f_1$  为 50 Hz, 平台移动速度  $v_1$  为 0.6 m/min, 滚筒转速  $r_1$  为 25 r/min。

因此,对钴结壳实施单齿振动切削,可以得到 4 个参数对振动切削影响程度由大至小依次为:

滚筒转速  $r \rightarrow$  频率  $f \rightarrow$  刀具安装角度  $\theta \rightarrow$  进给速度  $v$ 。

### 3 全齿螺旋滚筒振动切削试验

将上述单齿振动切削实验所获得的参数优化匹配结果,应用到全齿螺旋滚筒振动剥离破碎试验。完成了全齿螺旋滚筒有、无振动加载下的多次对比试验,得到了比较理想的试验结果。图 3 所示为某次试验驱动油压曲线,它可反映切削力的大小。其余多次试验均获得类似结果。

从全齿振动切削试验的数据曲线可以看出,添加振动与无振动相比,剥离破碎的马达驱动油压明显下

降,且其波动幅度也明显降低,这与单齿实验结果是一致的。

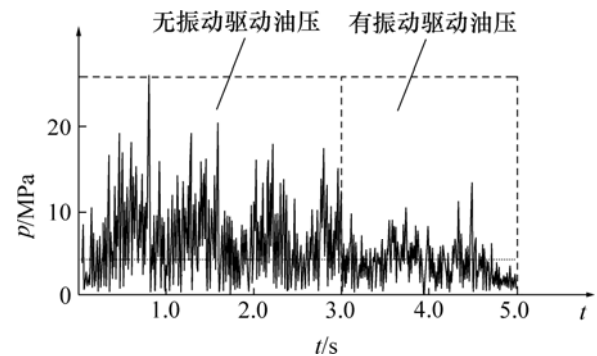


图 3 全齿振动切削试验驱动油压曲线

Fig.3 Driving hydraulic pressure under vibration cutting with full picker

## 4 结 论

a. 螺旋滚筒振动剥离破碎钴结壳能明显降低驱动马达的工作油压,且能有效降低油压波动幅度。

b. 恰当匹配振动切削参数能有效改善剥离破碎效果。在本实验中,采用中偏心块和对应的振动切削参数,即刀具安装角度  $\theta$  为  $45^\circ$ , 频率  $f$  为 50 Hz, 平台移动速度  $v$  为 0.6 m/min, 滚筒转速  $r$  为 25 r/min 时,与无振动切削相比,螺旋滚筒回转马达平均驱动油压下降 22.9%,节能效果十分显著。

c. 影响振动剥离破碎效果的因素由大至小依次为: 滚筒转速  $r$ , 频率  $f$ , 刀具安装角度  $\theta$  和平台移动速度  $v$ 。

### 参考文献:

- [1] 袁碧华. 钴结壳振动切削规律的试验研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2004.  
YUAN Bi-hua. Experimental research of vibration cutting rule of cobalt-rich manganese[D]. Changsha: School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, 2004.
- [2] 简 曲. 中太平洋富钴结壳的研究[J]. 矿业研究与开发, 1999, 19(1): 25-27.  
JIAN Qu. Research of cobalt-rich manganese crusts in central Pacific ocean[J]. Mining Research and Exploitation, 1999, 19(1): 25-27.
- [3] Hood M, Alehossein H. A development in rock cutting technology[J]. Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37: 297-305.

- [4] Yamazaki T, Sharma R. Distribution characteristics of Co-rich manganese deposits on a seamount in the central Pacific ocean[J]. *Marine Geo-resources & Geo-technology*, 1998, 16(4): 283-305.
- [5] Yamazaki T, Sharma R. Morphological features of co-rich manganese deposits and their relation to seabed slopes[J]. *Marine Geo-resources & Geo-technology*, 2000, 18(1): 43-76.
- [6] XING Pei-yuan, CHENG You-zhi, JIAO Zhi-qiang. Vibration cutting principles and tests[J]. *Journal of Wuhan University of Water Transportation Engineering*, 1990, 14(1): 56-62.
- [7] Latimer J, Kaufman R. Preliminary considerations for the design of cobalt crust mining system in the U.S. EEZ[M]. New York: Oceans, 1985: 378-399.
- [8] Lizasa K, Ishizaka O. A Kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera[J]. *Science*, 1999, 283: 975-977.
- [9] Glasby G P. Lessons learned from deep-sea mining[J]. *Science*, 2000(289): 551-553.
- [10] 沈裕军, 钟祥, 贺泽全. 大洋钴结壳资源研究开发现状[J]. *矿冶工程*, 1999, 19(2): 11-13.  
SHEN Yu-jun, ZHONG Xiang, HE Ze-quan. Present status of investigation and development of ocean cobalt crust resources[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1999, 19(2): 11-13.
- [11] 梁平, 石海林, 崔波, 等. 洋底富钴结壳的开采方法[J]. *金属矿山*, 2002(11): 20-22.  
LIANG Ping, SHI Hai-lin, CUI Bo, et al. Mining method of ocean floor cobalt-rich crust[J]. *Metal Mine*, 2002(11): 20-22.
- [12] Masuda Y. Crust mining plans of the Japan Resources Association[J]. *Marine Mining*, 1991(10): 95-101.
- [13] Chung J S. Deep-ocean mining: Technologies for manganese nodules and crusts[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1996, 6(4): 244-254.
- [14] 卜英勇, 李勇, 夏毅敏. 深海钴结壳采掘机器人滚筒式采集头优化设计[J]. *矿山机械*, 2002(12): 6-8.  
BU Ying-yong, LI Yong, XIA Yi-min. Optimized design on drum-type collection head of mining robot for deep-sea cobalt crust mining[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2002(12): 6-8.
- [15] 刘勇. 深海钴结壳螺旋滚筒切削采集法的理论与实验研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2002.  
LIU Yong. The theoretic and experimental research of the method for applying twist-roller to cut and collect deep-sea cobalt crust[D]. Changsha: School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, 2002.
- [16] 罗春雷, 胡均平, 刘伟, 等. 钴结壳开采装置及方法[J]. *中南工业大学学报: 自然科学版*, 2002, 33(6): 617-620.  
LUO Chun-lei, HU Jun-ping, LIU Wei, et al. Seabed cobalt shell exploitation equipment and method[J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science*, 2002, 33(6): 617-620.
- [17] 李晓豁. 掘进机截割头设计与研究[M]. 北京: 中国华侨出版社, 1997.  
LI Xiao-huo. Tunnel boring machine cutting header design and research[M]. Beijing: Overseas Chinese Press, 1997.
- [18] 荆元昌, 李润成. 振动切削截煤机理的研究[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(2): 153-157.  
JING Yuan-chang, LI Run-cheng. Research of vibration coal cutting mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(2): 153-157.
- [19] 徐德安. 运用正交试验法优化切削参数[J]. *机械工人: 冷加工*, 2000(9): 13-14.  
XU De-an. Optimizing of cutting parameters using orthogonal experiment[J]. *Machinist Metal Cutting*, 2000(9): 13-14.