

## 离心选矿机中石英砂运动轨迹的研究

李修智<sup>1</sup>, 杨波<sup>1,2</sup>, 陈俊良<sup>1</sup>, 支京豪<sup>1</sup>, 肖日鹏<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650032; 2. 昆明理工凯吉思科技有限公司, 云南 昆明 650032)

**摘要:** 针对现有离心选矿机不能连续排矿的问题, 通过自制小型实验室用离心选矿机进行实验研究。通过分析矿物颗粒在离心选矿机中的运动轨迹和沉降时间与排除时间的对比, 论证了矿物颗粒可在离心转鼓旋转一圈内完成沉降并将矿物颗粒排出, 为连续排矿的可能性提供了理论基础。石英砂实验结果表明, 在不同的分选参数下, 石英砂矿物颗粒的运动轨迹也不同。

**关键词:** 离心选矿机; 石英; 运动轨迹

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.02.031

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 02-0180-05

离心选矿机主要是利用离心力来强化重选的设备, 主要类型有卧式离心选矿机和立式离心选矿机等<sup>[1]</sup>。其结构简单、占地面积小, 处理能力是自动溜槽的数倍<sup>[2]</sup>。是一种处理微细粒矿泥的有效设备, 对 37 ~ 19 μm 粒级回收率高达 90% 左右, 因为矿粒在离心选矿机中的分选是借离心力和横向流膜的联合作用, 所以其富集比高于重力溜槽<sup>[3]</sup>。但是, 离心选矿机的缺点也很明显, 其耗水耗电量比溜槽大; 鼓壁坡度不能调节, 生产过程为间断作业, 不能连续给矿<sup>[4-5]</sup>。

### 1 实验装置、试样和实验方法

#### 1.1 实验装置

自行设计和制作了一台小型立式离心选矿机。它由分选转鼓、机架、电机、主轴、固定接矿槽、移动接矿槽、洗涤水管和给矿管组成<sup>[3-6]</sup>。

机架左边安装有竖直倒立的小型电动机, 电动机转轴上安装有皮带轮。离心选矿机安装在机架右边, 其主轴下端也安装有皮带轮, 电动机通过皮带与离心选矿机主轴连接<sup>[7-8]</sup>。电动机直接与变

频器连接, 可通过变频器来控制电动机转速。分选转鼓的半锥角适当放大, 其直径为 26 cm, 高度为 20 cm, 为了考查转鼓面粗糙度对石英颗粒运动的影响, 还制造了另一个备用转鼓。给矿管直径为 2 cm, 下端接有给矿嘴, 其安装方向能使矿浆沿着分选鼓的切向方向给入。洗涤水管直径为 2 cm, 竖直安装, 通过下端开口将洗涤水给入到分选鼓底部。固定接矿槽为圆环形, 外环直径为 40 cm, 内环直径为 30 cm, 内环壁高度为 6 cm, 外环壁高度为 20 cm。特殊设计的移动接矿槽长度约为分选转鼓 1/4 的圆弧槽, 上半部分有一开口, 下端排矿口与软管相连, 自成单独排矿系统。在备用分选转鼓内壁先涂上一层薄薄的固化剂树脂, 然后将粒度 -43 μm 石英砂均匀地喷在鼓内壁上, 等树脂固化干燥后, 将转鼓内壁表面上没有固化的石英砂吹掉, 即可完成对分选面粗糙度的改造。

#### 1.2 实验样品

实验所用石英样品取自建材市场建筑用石英砂, 粒度较粗, 其中含有少量沙泥<sup>[9-14]</sup>, 其密度见表 1。

收稿日期: 2019-10-23; 改回日期: 2019-11-28

作者简介: 李修智 (1993-), 男, 硕士研究生在读, 研究方向为矿物加工工程。

通讯作者: 杨波 (1964-), 男, 研究生, 副教授, 主要从事微细粒级矿物回收, 重选设备及工艺研发。

表1 石英砂密度测定结果/(g·cm<sup>-3</sup>)  
Table 1 Quartz sand mass determination results

第一次	第二次	第三次	第四次
2.68	2.63	2.69	2.67

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品粒度测定

采用百特激光粒度分析仪对实验用样进行粒度测定<sup>[8]</sup>。测定时搅拌强度为800 r/min和搅拌时间为3 min。由于矿物颗粒较细,可加入分散剂测定。

#### 1.3.2 石英运动轨迹测定法

石英运动轨迹测定是在自制实验室小型离心选矿机上进行,称取适量石英样品,加水调浆,根据实验所需,对各个分选参数进行调整。将移动接矿槽接出的产品过滤、烘干和称重,并计算其产率。

## 2 实验结果

### 2.1 石英砂给矿点实验

#### 2.1.1 中心给矿

称取500 g石英砂,添加2000 mL水置于搅拌桶中。开启设备,调节变频器使分选转鼓转速为672 r/min,分选转鼓稳定运行后,从分选转鼓的中心匀速给入矿浆,待矿浆给入完毕,从分选转鼓的中心加入适量的洗涤水,清洗分选转鼓内壁,待分选转鼓上的矿浆排干,停止给入洗涤水。待设备停止运转后,将移动接矿槽接出的产品过滤、烘干、称重,并计算产率。改变移动接矿槽的位置进行5次上述实验,结果见表2。

表2 中心给矿实验结果  
Table 2 Test results of center feed

实验次序	1	2	3	4	5
截取的石英砂重量/g	123.7	124.8	123.4	125.3	124.6
石英砂产率/%	24.68	24.70	24.75	24.91	25.01

由表2可以看出,改变移动接矿槽的位置时,每次截取的石英砂的重量相差不大;即在相等的弧长上截取石英砂的重量几乎是相等的。其原因可能是:在中心给矿时,分选转鼓不同位置上的排矿量基本上相等的,移动接矿槽截取的矿样量满足如下关系:

$$Q = LQ_0 / \pi D \quad (1)$$

式中:Q-截取的矿样重量;L-移动接矿槽的截取弧长;Q<sub>0</sub>-给矿重量;D-分选转鼓直径<sup>[15]</sup>。

#### 2.1.2 转鼓边上给矿

称取500 g石英砂,添加2000 mL水,置于搅拌桶中。开启设备,调节变频器使分选转鼓转速为672 r/min,分选转鼓稳定运行后,从分选转鼓距离大头端深度3 cm处均匀给入矿浆,从分选转鼓的中心加入适量的洗涤水,清洗分选转鼓内壁,待分选转鼓上的矿浆排干,停止给入洗涤水。待设备停止运转后,将移动接矿槽接出的产品过滤、烘干、称重,并计算产率。改变移动接矿槽的位置进行5次实验,其结果见表3。

表3 边上给矿实验结果  
Table 3 Test results of edge feed

实验序号	1	2	3	4	5
截取的石英砂重量/g	30.6	438.5	6.5	3.8	2.3
石英砂产率/%	6.12	87.7	1.3	0.76	0.46

由表3可知,当从转鼓侧边给矿时,矿浆不是从分选转鼓大头端圆周上均匀排出,而是集中在某一段圆弧上排出,而且给矿深度不一样,在大头端圆周的排矿分布也不一样。

### 2.2 不同条件对石英砂运动轨迹的影响实验

#### 2.2.1 石英砂粒度

当转鼓运动一周时,在圆周的某一段弧长内有95%左右的矿物颗粒被排出,该弧长对应距离给矿点位置的点称为95%排矿量点。用95%排矿量点与给矿点之间的距离来评价石英砂的运动轨迹。石英砂是从集中排矿弧段排出,进行不同的给矿粒度实验可研究给矿粒度对其排出轨迹的影响<sup>[6, 16-18]</sup>。

分别称取500 g的+45 μm、-45+19 μm和-19 μm三个粒级石英砂样品。在矿浆浓度为20%,给矿深度为5 cm,分选转鼓转速672 r/min,洗涤水量为1900 mL/min,给矿时间为固定的情况下,找出该粒级的石英砂试样在分选转鼓内壁上运动螺旋线及其最远端集中排矿点。其实验结果见表4~6。

表 4 +45 μm 粒级石英砂实验结果  
Table 4 Test results of +45 μm class quartz

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.1	27.6	27.3	27.0	26.6
截取的石英砂重量/g	493.1	489.7	486.3	480.9	392.6
产率/%	98.62	97.94	97.26	96.18	78.52

表 5 -45+19 μm 粒级石英砂实验结果  
Table 5 Test results of -45+19 μm class quartz

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.7	29.2	29.0	28.8	28.5
截取的石英砂重量/g	489.7	485.4	483.9	480.8	411.3
产率/%	97.94	97.08	96.78	96.16	82.26

表 6 -19 μm 粒级石英砂实验结果  
Table 6 Test results of -19 μm class quartz grain-grade real

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.7	29.4	29.1	28.3	28.0
截取的石英砂重量/g	480.1	437.9	378.6	261.2	201.1
产率/%	96.02	87.58	75.72	52.24	40.22

由上述三个表的数据可知，不同粒度给矿所对应的 95% 排矿量点距给矿点的距离与其粒度有关，给矿粒度越细，95% 排矿量点距给矿点越远。

### 2.2.2 给矿浓度<sup>[19-20]</sup>

给矿浓度在离心选矿机的分选过程中是很重要的，它影响着矿浆的黏度，从而影响矿粒的松散分层<sup>[20-21]</sup>。固定条件为：给矿深度为 5 cm，分选转鼓转速为 672 r/min，洗涤水量为 1900 mL/min。称取 500 g 石英砂两份，分别加水(1500 和 2500) mL，此时，矿浆浓度分别为 25% 和 16.67%。实验结果见表 7、8。

表 7 给矿浓度为 25% 实验结果  
Table 7 Test results of 25% density feed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	31.3	31.0	30.5	30.2	29.9
截取的石英砂重量/g	494.6	490.2	488.2	480.5	405.8
产率/%	98.92	98.04	97.64	96.10	81.16

表 8 给矿浓度为 16.67% 实验结果  
Table 8 The results of 16.67% density feed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.5	29.0	28.6	28.1	27.7
截取的石英砂重量/g	495.1	492.8	490.6	481.4	419.3
产率/%	99.02	98.56	98.12	96.28	83.86

由上表可知，给矿浓度分别为 25% 和 16.67% 的矿浆，其 95% 排矿量点 L 的值分别为 30.2 和 28.1 cm，即矿浆浓度越大，其 95% 排矿量点距给矿点距离就越近。

### 2.2.3 给矿量

给矿量的大小不仅影响到矿粒在转鼓内壁上的分布及运动轨迹，而且直接决定离心选矿机的处理能力<sup>[22]</sup>。

固定条件为：给矿深度为 5 cm，分选转鼓转速为 672 r/min，矿浆浓度为 20%，洗涤水量为 1900 mL/min。实验中，给矿量的大小采用在给矿阀门打开不同程度来控制。实验结果见表 9~11。

表 9 大给矿量实验结果  
Table 9 Test results of large-scale feed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.1	28.5	28.0	27.4	27.1
截取的石英砂重量/g	493.2	489.9	485.3	479.5	425.8
产率/%	98.64	97.98	97.06	95.90	85.16

表 10 中给矿量实验结果  
Table 10 Test results of middle-scale feed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.5	29.3	29.0	28.7	28.4
截取的石英砂重量/g	494.1	490.2	485.6	480.5	428.8
产率/%	98.82	98.14	97.12	96.10	85.76

表 11 小给矿量实验结果  
Table 11 Test results of small-scale feed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	31.2	30.9	30.5	30.2	29.8
截取的石英砂重量/g	491.3	488.4	483.1	476.2	404.4
产率/%	98.26	97.68	96.62	95.24	80.88

综合上述三个表格可知，在一定范围内，给矿量越大，其 95% 排矿量点距离给矿点越近。

### 2.2.4 洗涤水量

水是重力选矿的重要介质，对分选过程具有重大影响<sup>[10-11]</sup>。适量的洗涤水是矿粒有效分选的重要保证<sup>[16-17, 19]</sup>。

实验固定条件为：给矿深度为 5 cm，转鼓转速 672 r/min，矿浆浓度为 20%，给矿量中等。洗涤水量分别为 1200 和 2400 mL/min。结果见表 12、13。

表 12 1200 mL/min 洗涤水实验结果  
Table 12 Test results at 1200 mL/min washing water

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	31.6	31.2	30.6	29.9	29.7
截取的石英砂重量/g	494.2	491.3	485.4	476.9	424.1
产率/%	98.84	98.26	97.08	95.38	84.82

表 13 2400 mL/min 洗涤水实验结果  
Table 13 Test results at 2400 ml/min washing water

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	28.5	28.2	27.9	27.5	27.1
截取的石英砂重量/g	492.3	488.3	482.6	479.0	415.5
产率/%	98.46	97.66	96.52	95.80	83.10

由上述表可知，洗涤水量与 95% 排矿量点距给矿点距离成反比关系。

### 2.2.5 转鼓转速

转鼓转速实验固定条件为给矿深度为 5 cm，矿

浆浓度为20%，洗涤水量为1900 mL/min，中间给矿量。转鼓转速分别设定为（532和784）r/min，实验结果见表14、15。

表14 转速为532 r/min 实验结果  
Table14 Test results at 532 r/min speed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	32.7	32.2	31.6	31.3	31.0
截取石英砂重量/g	493.9	489.3	482.9	477.1	405.9
产率/%	98.78	97.86	96.58	95.42	81.18

表15 转速为784 r/min 实验结果  
Table 15 Test results at 784 r/min speed

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	29.3	29.0	28.5	28.2	27.9
截取的石英砂重量/g	489.5	486.1	481.9	477.5	396.3
产率/%	97.90	97.22	96.38	95.50	79.26

由上述结果可知，在一定范围内，转鼓转速越大，95%排矿量点距离给矿点也越远。

### 2.2.6 转鼓粗糙度

离心选矿机实质上是一种斜面流膜选矿设备，斜面的粗糙度对矿物的分选是有影响的<sup>[19]</sup>。用特制的粗糙度大的分选转鼓进行了转鼓粗糙度实验<sup>[14-18]</sup>。固定条件为，给矿深度为5 cm，分选转鼓转速为672 r/min，矿浆浓度为20%，洗涤水量为1200 mL/min，给矿量为中等，实验结果见表16。

表16 石英砂涂层分选转鼓实验结果  
Table16 Test results of quartz sand coating drum

截取弧长/(L·cm <sup>-1</sup> )	32.4	32.1	31.5	30.8	30.4
截取的石英砂重量/g	494.6	491.0	486.4	477.6	407.7
产率/%	98.92	98.20	97.28	95.52	81.54

由上表可知，用石英砂涂层的分选转鼓时<sup>[19]</sup>，其95%排矿量点距给矿点距离为L=30.8 cm处，而其他条件相同，用未经石英砂涂层的分选转鼓时，其L=28.7 cm。

## 3 结 论

(1) 在向分选转鼓中心给矿时，分选转鼓不同位置上的排矿量基本上相等的；而从转鼓侧边给矿时，矿浆不是从分选转鼓大头端圆周上均匀排出，而是集中在某一段圆弧上排出，而且给矿深度不一样，在大头端圆周的排矿分布也不一样<sup>[20]</sup>。

(2) 从转鼓侧边给矿时，随着实验条件的不同，95%排矿量点距给矿点的距离也不相同，其距

离与分选鼓转速和分选转鼓粗糙度成正相关关系，与给矿粒度、给矿浓度和给矿量成反相关关系<sup>[21]</sup>。

### 参考文献：

- [1] 姚栋, 杨波, 肖日鹏, 等. 悬振锥面选矿机在微细粒矿物分选中的应用[J]. 矿山机械, 2017, 45(3): 51-55.
- [2] 彭会清, 李广, 胡海祥, 等. 螺旋溜槽的研究现状及展望[J]. 江西有色金属, 2009, 23(3): 26-29+37.
- [3] 陈名瑞. 锯齿波跳汰机选钨生产实践[J]. 有色冶金设计与研究, 1997(2): 13-16.
- [4] 文书明. 国内外重选设备的进展[J]. 国外金属选矿, 1998(4): 46-48+7.
- [5] 魏镜弢, 杨波. 微细粒重选技术研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2001(1): 46-47+63.
- [6] 范培强, 谢贤, 宋强, 等. 国内高纯石英砂选矿与深加工研究现状[J]. 矿冶, 2018, 27(3): 18-22.
- [7] 黄枢. 薄流膜选矿理论的最新发展[J]. 金属矿山, 1984(9): 25-32.
- [8] 郭瑞建. 现代重、磁、电选工艺与设备的发展现状[C]. 山西省金属学会·晋琼粤川鲁冀辽七省金属(冶金)学会第二十一届矿业学术交流会议论文集[C]. 山西省金属学会: 山西省金属学会, 2014: 5.
- [9] 周海玲, 高孝钱, 吴小俊, 杨文燕, 郑翠红. 石英粉去除铝、

钾、钠的研究 [J]. 矿产综合利用, 2012(3):30-33.

ZHOU H L, GAO X Q, WU X J, et al. Study on removal of aluminum, potassium and sodium by quartz powder [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(3):30-33.

[10] 陈可标. 海南某贫铁矿选厂离心机选矿工业试验 [J]. 现代矿业, 2016, 32(10): 216-217+224.

CHEN K B. Industrial test of centrifuge beneficiation in a lean iron ore concentrator in Hainan [J]. Modern Mining, 2016, 32(10): 216-217+224.

[11] GUO B C, ZHAO Y B, WU W et al. Research on the preparation technology of polyaniline nanofiber based on high gravity chemical oxidative polymerization [J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2013, 70.

[12] 孙良全, 龙忠银. 重选设备研发现状与发展趋向的探讨 [J]. 矿业快报, 2008(6): 5-7.

SUN L Q, LONG Z Y. Research on research status and development trend of gravity concentration equipment [J]. Mining Bulletin, 2008(6): 5-7.

[13] K·卡斯蒂尔, 杨虹军, 刘汉钊, 等. 离心重选设备的评述 [J]. 国外金属矿选矿, 2003(11): 4-6+44.

K·Castile, YANG H J, LIU H Z, et al. Review on centrifugal gravity equipment [J]. Foreign Metal Mineral Processing, 2003(11): 4-6+44.

[14] 游志程, 陈禄政, 谢海云, 等. 旋流连续离心分选机选矿试验研究 [J]. 矿山机械, 2017, 45(02): 41-45.

YOU Z C, CHEN L Z, XIE H Y, et al. Experimental study on mineral concentration of cyclonic continuous centrifugal separator [J]. Mining Machinery, 2017, 45(02): 41-45.

HUANG S. Latest development of thin-flow film beneficiation theory [J]. Metal Mine, 1984(9): 25-32.

[15] 翟宏新. 中国贫铁矿选矿的新型工艺和设备研究 [J]. 矿山机械, 2006(10): 48-53+5.

ZHAI H X. Research on the new technology and equipment for beneficiation of lean iron ore in China [J]. Mining & Processing

Equipment, 2006(10): 48-53+5.

[16] 程尚栩, 苗雪原, 薄雷明. 高纯石英砂工艺流程分析研究 [J]. 中国高新技术企业, 2013(28): 13-15.

CHENG S X, MIAO X Y, BO L M. Study on process flow analysis of high-purity quartz sand [J]. China High-tech Enterprises, 2013(28): 13-15.

[17] 吴浩, 黄万抚, 邱峰, 等. 悬振锥面选矿机处理钨细泥 [J]. 矿产综合利用, 2016(6): 43-48.

WU H, HUANG W F, QIU F, et al. Treatment of fine tungsten slime by suspension vibration cone concentrator [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2016(6): 43-48.

[18] 岳丽琴. 高纯石英制备技术评述 [J]. 矿产综合利用, 2014(1): 16-19.

YUE L Q. Review on the preparation technology of high purity quartz [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(1): 16-19.

[19] 姚亚东, 王树根. 矿物的表面结构和表面性质 [J]. 矿产综合利用, 1998(4): 36-40.

YAO Y D, WANG S G. Surface structure and surface properties of minerals [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1998(4): 36-40.

[20] 方启学, 徐玉琴, 卢寿慈, 等. 微细矿粒分散与选择性聚团及分选的关系研究 [J]. 矿产综合利用, 1997(3): 1-7.

FANG Q X, XU Y Q, LU S C, et al. Study on the relationship between the dispersion of fine ore particles and selective agglomeration and separation [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1997(3): 1-7.

[21] 李肖, 徐彪, 胡敏捷, 等. 本溪某铁尾矿制备高纯石英砂试验 [J]. 现代矿业, 2018, 34(4): 106-108+114.

LI X, XU B, HU M J, et al. Experiment on preparation of high purity quartz sand from an iron tailings in Benxi [J]. Modern Mining, 2018, 34(4): 106-108+114.

## Study on the Movement Track of Quartz Sand in Centrifugal Separator

Li Xiuzhi<sup>1</sup>, Yang Bo<sup>1,2</sup>, Chen Junliang<sup>1</sup>, Zhi Jinghao<sup>1</sup>, Xiao Ripeng<sup>1,2</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology School of Land and Resources Engineering, Kunming, Yunnan, China; 2. Kunming Science & Technology Kunming, Yunnan, China)

**Abstract:** In view of the problem that the existing centrifuges cannot be continuously discharged, the centrifuges are used for experimental research through self-made small laboratories. By analyzing the movement trajectory and settling time and exclusion time of mineral particles in the centrifuge, the experiment demonstrates that the mineral particles can settle and discharge the mineral particles in a circle of centrifugal drum rotation, which provides a theoretical basis for the possibility of continuous ore discharge. The results of quartz sand mineral test show that the centrifuge can concentrate on ore, and under different sorting parameters, the trajectory of quartz sand mineral particles is different.

**Keywords:** Centrifugal separator ; Quartz ; Path of particle