

振动参数对筛分效率影响的实验研究

陈亚哲, 姚红良, 刘刚
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 选用经过干燥的硅粉、钼粉和锌粉物料作为典型物料研究对象,通过实验研究振动参数对颗粒筛分效率的影响. 首先,研究振动频率、偏心块夹角、料层厚度、不同物料性质对普通旋振筛筛分效率的影响,得出典型物料在普通旋振筛作用下的最佳振动参数;然后进行超声波振动实验,实验表明,超声波振动能够有效打散细粉物料颗粒团聚体,解决筛孔堵塞问题,显著提高了筛分效率. 根据实验结果可以获得硅粉物料颗粒在普通振动和超声波振动综合作用下的最佳组合参数.

关 键 词: 筛分效率;振动频率;最佳振动参数;超声波振动

中图分类号: TH 113 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)08-1122-05

Experimental Study on Influence of Vibration Parameters on Screening Efficiency

CHEN Ya-zhe, YAO Hong-liang, LIU Gang
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: CHEN Ya-zhe, E-mail: yzchen@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The effects of vibration parameters on particle screening efficiency were studied by using dried silicon powder, molybdenum powder and zinc powder as typical materials. Firstly, the effects of vibration frequency, angle of eccentric block, thickness of material layer and different material properties on the screening efficiency of common rotary vibrating screen were investigated, and the optimal vibration parameters of typical materials under the action of common rotary vibrating screen were obtained. Then, the ultrasonic vibration experiment was carried out. The experiment shows that the ultrasonic vibration could effectively disperse the particle aggregates of the fine powder materials, solve the problem of the screen hole blockage, thus improving the screening efficiency significantly. According to the experimental results, the optimum combination parameters of silicon powder particles under the combined action of ordinary vibration and ultrasonic vibration can be obtained.

Key words: screening efficiency; vibration frequency; optimal vibration parameters; ultrasonic vibration

目前国内外很多学者^[1-8]都用筛分效率评价筛分物料的分离程度,所以提高筛分效率一直是提高振动筛性能的核心目标之一. 理想的筛分过程是把给料中大于筛网尺寸和小于筛网尺寸的物料彻底分离,由于各种因素的影响并不存在理想筛分. 影响筛分效率的主要因素^[9]有振动频率、振幅、偏心块夹角、料层厚度,以及不同物料的性质等.

本文以硅粉、钼粉、锌粉等典型细粉(典型粒度为50\37 μm)为研究对象,通过实验研究振动参数对颗粒筛分效率的影响. 为了得到典型物料颗粒在普通振动与超声振动共同作用下筛分时的最佳振动参数,首先针对振动频率、偏心块夹角、料层厚度、不同物料性质这4个参数对普通旋振筛的筛分效率进行实验研究,得出典型物料在普通旋振筛作用下的最佳振动参数;然后在筛分过

程中增加超声波振动,考察超声波振动对筛分效率的影响.

1 实验设备及说明

实验设备如下:SYC-400-2S 旋振筛,超声波筛分系统,变频调速器,计算机, MotionProY3 型高速摄影机(美国 RedLake 公司),电子秤,秒表. 超声波筛分系统由超声波振动电源、HF 连接电缆、换能器、共振器组成. 高速摄影机的最高拍摄速度为 2 600 幅/s,拍摄好的图片通过数据线传入计算机. 通过自带的图像处理软件 Motion Studio 实现对物料的运动追踪,可以更加直观清晰地观察到颗粒的凝聚过程和超声波作用下团聚体的分散过程. 实验中变频调速器与电机相连,通过调节变频器上的供电频率来改变电机的转速,从而转换成相应的振动频率.

2 筛分效率的计算

本文采用目前广泛使用的汉考克效率和量效率公式进行筛分效率的求解. 实验时,选取筛孔孔径为规定粒度,即粒度大于筛孔孔径的物料透筛情况不予考虑,所以采用量效率公式. 在此公式中,筛分效率指的是实际进入筛下产物的质量与入料中真正所含筛下物的质量的比值:

$$\eta = \frac{m_{\text{scr}}}{m_{\text{in}} \cdot \frac{\alpha}{100}} \times 100\% = \frac{m_{\text{scr}}}{m_{\text{in}} \cdot \alpha} \times 10^4\% . \quad (1)$$

式中: η 为筛分效率(%); m_{scr} 为筛下产品的含量(g); m_{in} 为筛分机入料量(g); α 为入料中小于筛孔粒级的细颗粒含量(%). 式中的 m_{scr} , m_{in} 可由平衡关系得

$$\begin{aligned} m_{\text{in}} &= m_{\text{scr}} + m_{\text{res}} , \\ m_{\text{in}} \cdot \frac{\alpha}{100} &= m_{\text{scr}} + \frac{m_{\text{res}} \cdot \theta}{100} . \end{aligned}$$

整理得

$$\frac{m_{\text{scr}}}{m_{\text{in}}} = \frac{\alpha - \theta}{100 - \theta} . \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得

$$\eta = \frac{\alpha - \theta}{\alpha(100 - \theta)} \times 100\% . \quad (3)$$

式中: θ 为筛上物中小于筛孔粒级的细颗粒含量(%); m_{res} 为筛上物的质量(g).

3 振动参数对筛分效率的影响

3.1 振动频率对筛分效率的影响

振动频率是振动筛的重要参数,决定着颗粒在筛面上的跳动频率,与筛面接触碰撞的次数. 当振动频率较低时,筛面上的颗粒不能被抛起,容易堵塞筛孔,使得筛分效率低下;而当频率较高时,颗粒在筛面上的运动表现活跃,颗粒之间,颗粒与筛网之间的碰撞加剧,导致颗粒不会顺利地地下落,也可能使筛分效率低下. 为了更加准确地得到频率与筛分效率的关系,本文对振动频率对筛分效率的影响进行了实验验证,从而得到最佳振动频率下的筛分效率. 影响筛分效率的因素比较多,因此实验采用控制变量法,即其他参数均不变,只改变振动筛的振动频率.

参照仿真研究中的参数选取,将振动频率设为 20,25,30,35,40,45 和 50 Hz. 实验初始条件:振幅 3 mm,偏心块夹角 45°,物料为硅粉,物料厚度 8 mm,颗粒平均直径 44 μm .

用秒表计时,保证每组的测试时间都相同. 用电子秤称得一定的颗粒质量,从而保证每组实验的物料入料量中粒度大于筛孔孔径的物料与粒度小于筛孔孔径的物料质量比值一定,以减少其他因素对筛分效率的影响.

图 1 为 4 组不同振动频率下物料颗粒筛分时的运动状态图. 从图中可以看出频率为 25 Hz 时,物料颗粒堵孔明显,随着频率增加到 50 Hz 时,堵孔现象明显改善. 由振动强度公式可知,振动强度与振动频率的二次方成正比. 开始由于振动频率小,颗粒的振动强度小,颗粒之间难以松散,不容易分层,所以筛分效率低. 随着振动频率的增加,振动强度也增加,使得颗粒的松散度增加,颗粒与筛面的接触增加,大、小颗粒更容易分层,透筛性能改善. 使用筛分效率计算公式可得到每个振动频率下的普通旋振筛的筛分效率,结果如表 1 所示,可知,随着频率的增大,筛分效率也增大;二者关系与仿真结果^[10]基本吻合.

3.2 偏心块夹角对筛分效率的影响

由旋振筛的工作原理可知,由于振动筛电机上的上下偏心块质心与参振部分质心不重合,使得筛面上作用了一个旋转激振主矢和一个旋转激振主矩,导致筛面产生了旋转运动. 偏心块夹角即为电机上下偏心块的空间相位角,通过调节空间夹角,产生不同的激振力来改变物料颗粒的运动方向,因此,偏心块夹角是影响振动筛分效率的重

要参数. 为了获得最佳偏心块夹角下的筛分效率, 研究了偏心块夹角与旋振筛筛分效率的关系. 根据振动筛常用的偏心块夹角, 设偏心块夹角为

$15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}$ 和 90° . 实验初始条件: 振幅 3 mm, 振动频率 50 Hz, 物料为硅粉, 物料厚度 8 mm, 颗粒平均直径 $44\text{ }\mu\text{m}$.

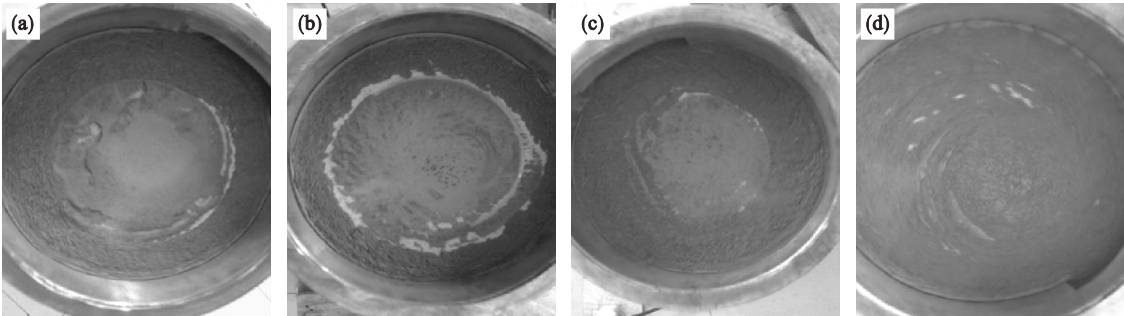


图 1 不同振动频率下颗粒运动状态
Fig. 1 Particle motion states under different vibration frequencies
(a)—25 Hz; (b)—30 Hz; (c)—35 Hz; (d)—50 Hz.

表 1 不同振动频率下的筛分效率							
Table 1	Screening efficiency under different vibration frequencies						
振动频率/Hz	20	25	30	35	40	45	50
筛分效率/%	23.35	26.07	30.86	32.35	34.0	36.14	37.71

图 2 和图 3 为不同偏心块夹角下颗粒的运动状态和轨迹特征. 由图 3 可知, 当偏心块夹角较小时, 物料由中心沿直线流向圆周方向, 只能进行初

略的筛分, 影响筛分效率; 当偏心块夹角较大时, 物料由四周向中心运动, 全部集中在筛子中央, 分布不均, 也会影响筛分效率. 由图 3 可知, 当偏心块夹角为 45° 时, 物料在筛面上分布均匀, 运动轨迹最长. 使用筛分效率计算公式得到每个偏心块夹角下的筛分效率如表 2 所示, 可见在夹角小于 45° 时, 筛分效率随着偏心块夹角的增加而提高; 夹角大于 45° , 筛分效率随着偏心块夹角的增加而降低; 当偏心块夹角为 45° 时, 筛分效率最高, 因此, 最佳偏心块夹角为 45° .

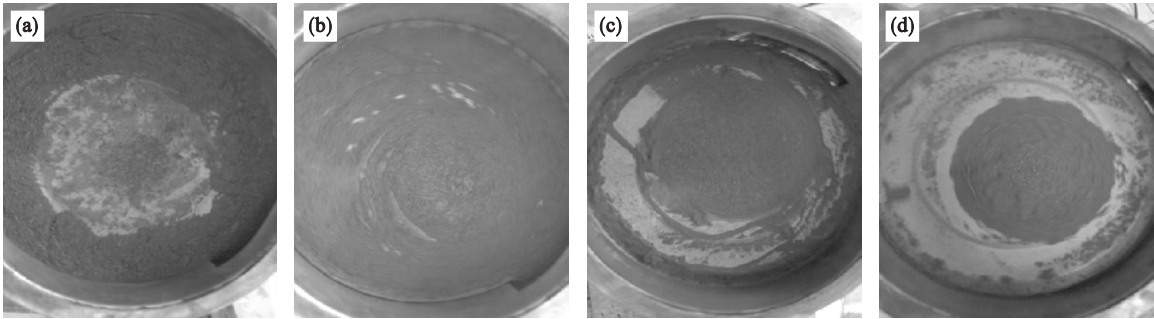


图 2 不同偏心块夹角下颗粒运动状态
Fig. 2 Particle motion states under different angles of eccentric block
(a)— 15° ; (b)— 45° ; (c)— 75° ; (d)— 90° .

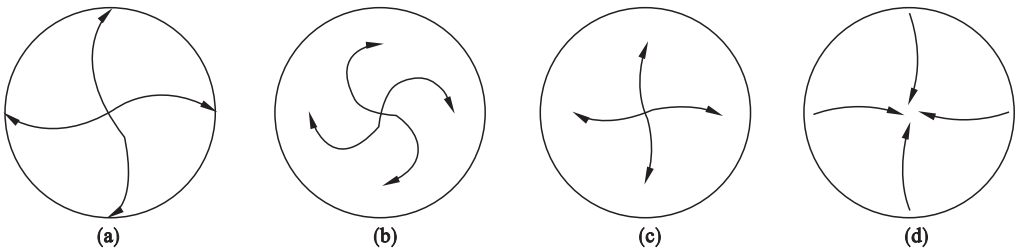


图 3 不同偏心块夹角下颗粒的运动轨迹
Fig. 3 Particle motion trajectory under different angles of eccentric block
(a)— 15° ; (b)— 45° ; (c)— 75° ; (d)— 90° .

表 2 不同偏心块夹角的筛分效率

Table 2 Screening efficiency under different angles of eccentric block

偏心块 夹角/(°)	15	30	45	60	75	90
筛分效 率/%	23.27	31.12	37.71	32.50	28.83	25.46

3.3 物料厚度对筛分效率的影响

物料层厚度也是影响筛分效率的一个重要参数,合适的物料厚度只能通过重复的实验来确定.当筛面倾角比较小、振动筛体振幅比较大的情况下,物料层可以稍厚一点.理论上,筛分产量决定物料厚度,但在实际筛分过程中,往往会存在筛面进料不均的问题,使得物料颗粒有可能集中在筛面的一侧,导致局部料层过厚,从而影响物料颗粒的透筛.为了研究物料厚度对筛分效率的影响,设物料厚度为 4,6,8,10,12,14 和 16 mm,实验初始条件:振幅 3 mm,振动频率 50 Hz,偏心块夹角 45°,物料为硅粉,颗粒平均直径 44 μm.

使用筛分效率计算公式可得到每个物料厚度下的筛分效率,结果如表 3 所示.可以看出,物料厚度小于 12 mm,筛分效率随着物料厚度的增加而提高,物料厚度大于 12 mm,筛分效率随着物料厚度的增加而降低.由物料颗粒松装密度特性可知,当物料厚度较小时,物料的松装密度较小,物料颗粒不容易透筛,筛分效率低;随着物料厚度的增加,物料的松装密度增加,则物料颗粒容易分层和透筛,筛分效率较高.物料层太厚,物料颗粒间不易松散,堵塞筛孔,料层上部的小颗粒难以通过筛孔,从而导致分层和透筛困难,筛分效率低.

表 3 不同物料厚度下的筛分效率

Table 3 Screening efficiency under different particles thickness

物料厚 度/mm	4	6	8	10	12	14	16
筛分效 率/%	32.42	35.21	37.71	40.28	43.40	41.78	36.85

3.4 不同物料对筛分效率的影响

影响筛分效率的物料特性主要包括:物料的松散状况、物料类型和颗粒形状、物料颗粒组成及含水率.

物料颗粒筛分过程的分层和透筛基本上是按照颗粒体积的大小进行的,因此物料的松散状况与筛分效率直接相关;本节主要研究不同物料的松散状况对筛分效率的影响.为了保证更加准确的实验结果,选取硅粉、钼粉和锌粉作为实验物

料,颗粒均为球形,平均粒径均为 44 μm;物料经过干燥处理,不考虑其含水率.物料性质如表 4 所示.

对三组不同物料进行筛分实验,实验初始条件:振幅 3 mm,振动频率 50 Hz,偏心块夹角 45°,物料厚度 12 mm,颗粒平均直径 44 μm.在规定的时

间之后,统计筛下的物料颗粒,使用筛分效率计算公式,计算出每组的筛分效率如表 5 所示.

由表 5 可知,在相同的振动频率和筛分时间条件下,钼粉的筛分效率高于锌粉,锌粉的筛分效率高于硅粉.因此,可以得出结论:当物料颗粒的松散密度较大时,颗粒团聚体更容易分散,从而颗粒更容易透筛,筛分效率高;松散密度较小的物料颗粒不容易透过筛网,故筛分效率低.

表 4 颗粒物料参数

Table 4 Particle material parameters

物料	颜色	松散密度 kg·m ⁻³	原生密度 kg·m ⁻³
硅粉	灰色	833.6	2 560
钼粉	褐色	1 200	6 340
锌粉	淡黄色	1 068	5 600

表 5 不同物料的筛分效率

Table 5 Screening efficiency of different materials

原材料	硅粉	钼粉	锌粉
入料颗粒数量	1 200	1 200	1 200
筛分效率/%	32.67	33.92	33.08

4 超声波振动对筛分效率的影响

通过上述实验研究,得出了筛分硅粉物料的最佳参数:振动频率 50 Hz,偏心块夹角 45°,物料厚度 12 mm.在选用最佳参数进行普通振动筛分的基础上加入超声波振动.由超声波振动原理,超声波振动电源产生的高频电能通过换能器转换成高频低幅正弦形式的纵向振动波;这些超声波振动均匀地作用在筛面上,使得筛面作同等频率的振动.

根据超声波振动电源的工作特性,超声波振动电源的可调范围为 10 ~ 30 μm.实验参照仿真参数^[10]设振动幅值为 10,15,20,25 和 30 μm.实验初始条件:振幅 3 mm,振动频率 50 Hz,偏心块夹角 45°,物料为硅粉,物料厚度 12 mm,颗粒平均直径 44 μm.对不同组实验筛下物料颗粒进行统计,使用筛分效率计算公式,计算出每组的筛分效率如表 6 所示.

表 6 不同超声波振幅下的筛分效率
Table 6 Screening efficiency of different ultrasound amplitude

超声波振幅/ μm	10	15	20	25	30
筛分效率/%	86.50	86.83	87.26	88.07	87.64

由表 6 可知,加入超声波振动后,筛分效率显著提高,在实验上验证了超声波振动能有效地分散团聚体,使物料颗粒更容易分层和透筛,解决了细粉物料筛分堵孔问题.

5 结 语

本文主要是对超声波辅助筛分机理的实验验证,结果表明,超声波振动能够有效地打散细粉物料颗粒团聚体,从而解决筛孔堵塞问题,显著地提高了筛分效率.同时,以硅粉物料为例对振动参数对筛分效率的影响进行了实验研究,获得了硅粉物料在普通旋振筛振动与超声波振动共同作用下的最佳组合参数:振动频率 50 Hz,偏心块夹角 45° ,物料厚度 12 mm,超声波振幅 25 μm .

参考文献:

[1] Djoković J M, Tanikić D I, Nikolić R R, et al. Screening efficiency analysis of vibrosieves with the circular vibrations [J]. *Civil and Environmental Engineering*, 2017, 13 (1): 77 – 83.

[2] Wang G F, Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation [J].

Mining Science and Technology (China), 2011, 21 (3): 451 – 455.

[3] Bellocq B, Ruiz T, Delaplace G, et al. Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 195: 235 – 246.

[4] Akbar J, Nezhad V S. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear [J]. *Powder Technology*, 2016, 297: 126 – 143.

[5] Chen Y H, Tong X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2010, 20 (4): 615 – 620.

[6] Grozubinsky V, Sultanovitch E, Lin I J. Efficiency of solid particle screening as a function of screen slot size, particle size, and duration of screening; the theoretical approach [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1998, 52 (4): 261 – 272.

[7] Dong K J, Esfandiary A H, Yu A B. Discrete particle simulation of particle flow and separation on a vibrating screen; effect of aperture shape [J]. *Powder Technology*, 2017, 314: 195 – 202.

[8] Xiao J Z, Tong X. Characteristics and efficiency of a new vibrating screen with a swing trace [J]. *Particuology*, 2013, 11 (5): 601 – 606.

[9] 张路霞, 李云峰. 振动筛筛分效率的影响因素分析 [J]. 煤矿机械, 2008, 29 (11): 74 – 76.
(Zhang Lu-xia, Li Yun-feng. Analysis of influence factor in shaker screening efficiency [J]. *Coal Mine Machinery*, 2008, 29 (11): 74 – 76.)

[10] 刘刚. 细粉物料超声辅助筛分的机理研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
(Liu Gang. Screening mechanism of ultrafine particles with ultrasonically assistance [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)