

根据细粒级物料的 性质设计合理跳汰曲线之初探

东北工学院 魏德洲 孙玉波

· 提要 · 本文从静态分层理论出发，通过对细粒物料跳汰过程的系统分析，提出了合理跳汰曲线的一般形式及其解析表达式；并以0~2毫米的石英和磁铁矿的人工混合料为处理对象，介绍了一种根据物料性质设计合理跳汰曲线的可行方法。新设计的周期曲线与普通的正弦周期曲线的对比试验结果表明，在物料性质和筛下水补加量完全一样、精矿产率基本一致的情况下，前者的最佳选别指标与后者的最佳选别指标相比，回收率提高了14.92%，精矿品位提高了7.03%。

· 关键词 · 静态分层理论，松散波，静力作用，动力作用。

前 言

机械传动式跳汰机虽然于上世纪四十年代就已问世，但直到今天还很少有人从事过合理跳汰周期曲线设计方法的研究。目前已定型生产的跳汰机所采用的周期曲线的类型非常有限，且没有一台是根据处理对象设计的，因而限制了跳汰机的有效应用范围。致使一些从理论上分析可以用跳汰机进行有效分选的细粒物料，在生产实践中却达不到预期的效果。由于细粒跳汰机的分选效果较差，所以即使轻矿物已单体解离，也不能利用它直接丢尾，还须用摇床进一步处理。这既增加了设备和辅助设施，又使管理复杂化，选矿成本也大为提高。造成这一现象的主要原因是没有根据物料性质的差异采用不同的跳汰周期曲线。为了寻求解决这一实际问题的途径，我们就如何根据细粒物料的性质设计适宜的周期曲线进行了一些初步的探讨。

一、周期曲线的一般形式

本世纪四十年代，德国学者麦依尔运用热力学第二定律对跳汰过程进行了分析。他

把床层视为一个整体，通过分析分层前后位能的变化，指出跳汰分层是一个位能降低的自发过程。从而揭示了物料在跳汰机中实现按比重分层的理论依据。此后，匈牙利选矿学者达尔扬分析了颗粒在分层过程中的受力情况，提出了按局部悬浮体密度分层的学说。这两位学者的理论观点构成了静态分层理论的主体。从静态分层理论出发，通过对细粒级物料跳汰过程的深入分析，使我们认识到，为了使跳汰床层尽可能地按比重分层，必须尽可能地避免水流的动力作用产生不利影响。但应该指出，水流的动力作用对物料按比重分层并非毫无用处，一方面要借助于它松散床层，为物料发生分层创造空间条件，另一方面，适宜的吸入作用还可以弥补细粒级分层的不足，提高跳汰分选的精确度。由此可见，欲使宽级别细粒级物料很好地按比重分层，必须在充分发挥床层内部静力作用的同时，合理地利用水流的动力作用。因此，合理的跳汰周期曲线应满足如下要求：

在水流上升期，水速应迅速增加，以便在一段较短的时间内把床层抬起到需要的高度。床层抬起以后，松散波（床层中出现的松散区域）开始从下向上传递，床层因内部

静压强不平衡发生按比重分层。在此期间，应尽量减小水流和床层表层的下降速度，延长床层的松散时间，以便使颗粒有更多的转移机会。随着时间的推移，床层自下而上逐渐恢复紧密，较粗颗粒之间发生相对转移的空间条件随之消失，它们之间的静压力差与机械阻力构成新的平衡体系。这时只有那些很细小的颗粒还有可能穿过较粗颗粒的间隙，实现相对转移。在这期间，水流应有适宜的下降速度，以提高微细粒级的回收率。下降水流作用一段时间后，床层变得相当紧密，在静力和动力作用下的分层都已完全停止，此时水流的下降速度即应迅速降为零，以缩短无用时间在周期中所占的比例，提高单位时间内颗粒发生相对转移的次数。

在上述分析的基础上，参考 I.H.C 一圆形跳汰机处理细粒含锡砂矿的成功经验和差动型跳汰机处理细粒级矿石的试验尝试，以及其它一些关于跳汰曲线的研究结果。我们认为，适合处理细粒级物料的周期曲线应具有图 1 的形式。图中的曲线共分四段：

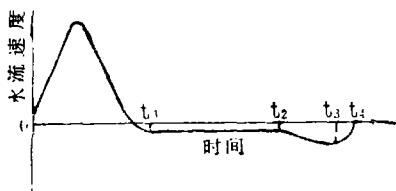


图 1 合理周期曲线示意图

$0 \sim t_1$ 段是水流迅速上升段，其作用是把床层在一段很短的时间内抬起到需要的高度。 $t_1 \sim t_2$ 段是水流等速下降段，它的作用是延长床层的松散时间，充分发挥床层内部的静力作用，保证物料按比重发生分层。 $t_2 \sim t_3$ 段是下降水速缓慢增加段，它的作用主要是产生适宜的吸入作用，帮助细小的重颗粒穿过床层的间隙进入底层。 $t_3 \sim t_4$ 段是下降水速迅速减小段，它的作用主要是使水流位移恢复到零，为下一周期作好准备。

二、周期曲线的解析表达式

图 1 所示的周期曲线是通过理论分析得出的，既没有涉及处理对象的性质，也没有包含数量关系。为了针对具体的处理对象得出相应的合理跳汰曲线，不仅需要有曲线的解析表达式，而且这个表达式还必须包含一些与物料的性质有关的参数。根据曲线的形状，考虑到便于求解，我们将曲线的解析表达式取为：

$$u_{\text{水}} = \begin{cases} A_1 \sin B_1 t + u_{\text{下}} & 0 \leq t < t_1 \\ k + u_{\text{下}} & t_1 \leq t < t_2 \\ A_2 \sin(B_2 t + \theta_1) + u_{\text{下}} & t_2 \leq t < t_3 \\ A_2 \sin(B_3 t + \theta_2) + u_{\text{下}} & t_3 \leq t < t_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $u_{\text{下}}$ 、 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 k 、 θ_1 、 θ_2 均是与物料性质有关的参数，其物理意义是：

$u_{\text{下}}$ —筛下补加水的适宜上升速度（厘米/秒）；

A_1 —由机械运动产生的最大上升水速（厘米/秒）；

A_2 —由机械运动产生的最大下降水速（厘米/秒）；

B_1 —体现上升水速变化快慢的参数；

B_2 —体现水流在加速下降阶段速度变化快慢的参数；

B_3 —体现水流在减速下降阶段速度变化快慢的参数；

k —由机械运动产生的、水流等速下降阶段的速度（厘米/秒）；

θ_1 、 θ_2 —初相角（弧度）。

式 (1) 是适合处理细粒级物料的跳汰周期曲线的通用表达式。在设计新型跳汰机时，根据处理对象的具体情况，通过一定的手段确定出各个参数的具体数值，并将其代入式 (1)，便可得到适合于处理该物料的跳汰周期曲线。

三、设计计算举例

处理对象确定以后，可以通过多种途径

使式(1)具体化。下边我们通过一个例子,介绍一种可行的方法。

1. 设计计算的原始数据及获得途径

由式(1)可求出床层的抬起高度为:

$$H = h \cos \left[\arcsin^2 \frac{(u_{\text{临}} - u_{\text{下}})}{h B_1} \right] + (u_{\text{下}} - u_{\text{临}}) \cdot \frac{1}{B_1} \left[\pi - 2 \arcsin \frac{2(u_{\text{临}} - u_{\text{下}})}{h B_1} \right] \quad (2)$$

式中 h 是由机械运动产生的水流的最大位移, $u_{\text{临}}$ 是抬起床层的临界上升水速。由式(2)可以看出,要解出式(1)的数字形式,必须知道床层的适宜抬起高度、由机械运动产生的水流的最大位移、筛下补加水的适宜上升速度和抬起床层的临界上升水速,这四者就是设计计算所需要的原始数据。

由于由机械运动产生的水流的最大位移受床层的适宜抬起高度制约,所以它可以由后者作适当修正而得到。其余三个原始数据与物料的性质密切相关,必须针对具体的处理对象,通过一定的模拟试验来确定。

本例的处理对象是0~2毫米的石英和磁铁矿的人工混合料,含铁13.84%,自然堆积松散度为0.460。首先选用与处理对象具有相同自然堆积松散度的1.0~1.2毫米的石英作模拟床层,选用0.2~0.3毫米的磁铁矿作为测定床层适宜抬起高度的穿透颗粒,在图2所示的装置上进行模拟测定。测得抬起床层的临界上升水速和床层的适宜抬起高度分别为1.02厘米/秒和0.63厘米/秒。然后用处理对象在普通的正弦周期跳汰机上进行

筛下补加水适宜上升速度的测定,其结果为

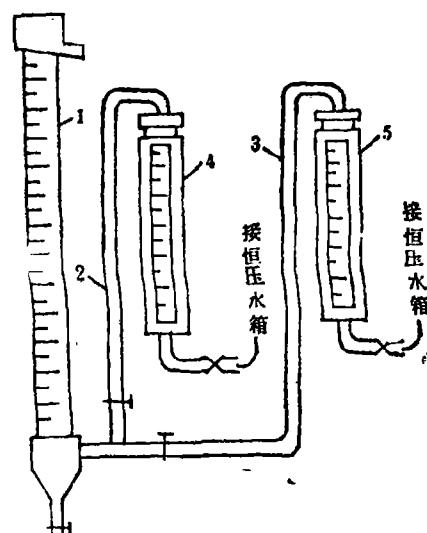


图2 模拟测定装置示意图

1—干涉沉降管; 2—续连供水管;
3—间断供水管; 4,5—转子流量计。

$$u_{\text{下}} = 0.2 \text{ 厘米/秒}.$$

2. 设计计算

首先参照床层的适宜抬起高度,取 $h = 0.7$ 厘米。然后以0.63、0.7、0.2和1.02分别代替式(2)中的 H 、 h 、 $u_{\text{下}}$ 和 $u_{\text{临}}$,并用二分法进行求解,即可求出 B_1 ,再用已知的参数值对未知参数进行适当计算。最后把所有参数值代入式(1)得:

$$u_{\text{水}} = \begin{cases} 14 \sin 40t + 0.2 & 0 \leq t < t_1 \\ k + 0.2 & t_1 \leq t < t_2 \\ 5.6 \sin(10t + \theta_1) + 0.2 & t_2 \leq t < t_3 \\ 5.6 \sin(80t + \theta_2) + 0.2 & t_3 \leq t < t_4 \end{cases} \quad (3)$$

根据图1中曲线的衔接关系,由式(3)可得到如下的边界条件:

(4)

$$14 \sin 40t_1 = k$$

$$5.6 \sin(10t_2 + \theta_1) = k$$

$$10t_3 + \theta_1 = \frac{3}{2}\pi$$

$$80t_4 + \theta_2 = \frac{3}{2}\pi$$

$$80t_4 + \theta_2 = \pi$$

$$\int_0^{t_1} 14 \sin 40t dt + \int_{t_1}^{t_2} k dt + \int_{t_2}^{t_3} 5.6 \sin(10t + \theta_1) dt + \int_{t_3}^{t_4} 5.6 \sin(80t + \theta_2) dt = 0$$

式(4)是一个不定方程组，求解时需要一个附加约束条件。我们从尽量增加每一周期内床层松散时间所占的比例出发，通过反复试算，求得 k 值为-0.56厘米/秒。把它代入式(4)进行求解得：

$$t_1 = 0.0795 \text{秒} \quad t_2 = 0.2090 \text{秒}$$

$$t_3 = 0.3561 \text{秒} \quad t_4 = 0.3757 \text{秒}$$

$$\theta_1 = 1.1518 \text{弧度} \quad \theta_2 = -23.7756 \text{弧度}$$

$$u_{\text{水}} = \begin{cases} 14 \sin 40t + 0.2 \\ -0.36 \\ 5.6 \sin(10t + 1.1584) + 0.2 \\ 5.6 \sin(80t - 23.7168) + 0.2 \end{cases}$$

3. 方法检验及分析

式(5)是我们根据处理对象设计出来的合理跳汰周期曲线，为了检验本文介绍的设计方法是否可行，我们按照式(5)所描述的周期曲线改制了一台由凸轮驱动的隔膜跳汰机，并用速度传感器、测振仪、光线示波仪等仪器对其隔膜的运动规律进行了细致的测定，结果表明，此设备的确再现了本文所设计的周期曲线。用这台设备选别石英和磁铁矿人工混合料的试验结果如图3所示。从图中可以看出，最佳分选指标所对应的冲次为160次/分，恰好是设计冲次。这表明以

由 t_4 求得跳汰冲次为159.70次/分，取冲次为160次/分，亦即 $t_4 = 0.3750$ 秒，代回式(4)重新求解得：

$$t_1 = 0.0795 \text{秒} \quad t_2 = 0.2083 \text{秒}$$

$$t_3 = -0.3554 \text{秒} \quad t_4 = 0.3750 \text{秒}$$

$$\theta_1 = 1.1584 \text{弧度} \quad \theta_2 = 23.7168 \text{弧度}$$

把求得的结果代入式(3)，即得到适合处理这种物料的跳汰周期曲线表达式：

$$0 \leq t < 0.0795$$

$$0.0795 \leq t < 0.2083$$

$$0.2083 \leq t < 0.3554 \quad (5)$$

$$0.3554 \leq t < 0.3750$$

床层的适宜抬起高度、抬起床层的临界上升水速、筛下补加水的适宜上升速度作为设计计算的基础数据是可行的。同时也表明我们采用的模拟试验是可靠的。

为了进一步检验本文所设计的周期曲线的合理性，我们用上述试料在改制的跳汰机和正弦周期跳汰机上进行了对比试验，其结果列于下表。表中正弦周期跳汰机的试验结果是从十二组七十五个试验中选出的一组最佳值。从表中可以看出，设计曲线的选别指标普遍高于正弦周期曲线的选别指标。在物料性质和筛下水补加量完全相同、精矿产率基本一致的情况下，设计曲线可以提高回收率14.92%，提高精矿品位7.03%。由此可见，本文设计的周期曲线确实是合理的。

图4和图5分别是正弦周期曲线和设计周期曲线的跳汰精矿中磁铁矿的粒度分析结果。对比两图可以看出，设计周期曲线的选别指标普遍较高的原因，主要是提高了中间粒级的回收率。这是因为，在宽级别细粒级物料的跳汰过程中，较粗的重颗粒与其周围介成构所质的部局悬浮体的密度较大，在床层松散期间，借自身的静压力很快就进入了底层，细小的重颗粒所受床层的机械阻力较

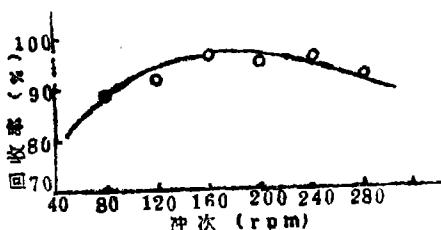


图3 回收率——冲次曲线

两种周期曲线的对比试验结果

跳汰曲线类型	冲 次 rpm	精矿指标 (%)			跳汰曲 线类型	冲 次 rpm	精矿指标 (%)		
		产 率	品 位	回 收 率			产 率	品 位	回 收 率
正 弦	71	30.04	31.32	67.71	本文设计	80	30.33	39.45	88.37
	100	30.07	34.37	74.60		120	30.00	42.22	91.27
	141	30.00	35.30	76.31		160	30.06	44.06	95.98
	200	30.07	37.03	81.06		200	30.03	43.54	94.61
	283	30.09	35.53	77.97		240	30.05	43.49	94.96
	400	30.02	31.61	68.93		280	30.06	41.64	90.93

注：筛下补加水的上升速度为0.2厘米/秒

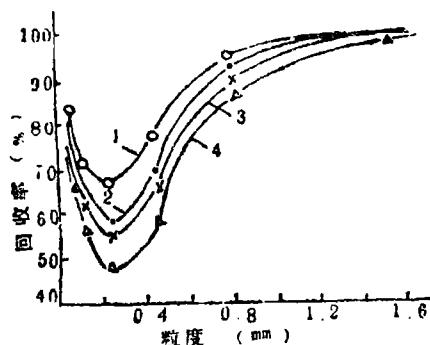


图4 正弦周期的跳汰产品粒度分析结果

冲次(次/分)：1—200；2—141；
3—100；4—71。

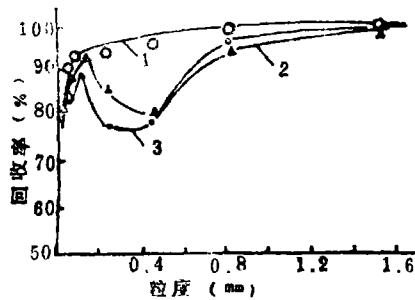


图5 设计周期的跳汰产品粒度分析结果

冲次(次/分)：1—160；2—280；
3—80。

小，容易在下降水流的吸入作用下，穿过床层的间隙进入底层，而那些中间粒级的重颗粒既不能借吸入作用进入底层，本身与周围介质构成的局部悬浮体的密度又小，因此分层速度比较缓慢。当采用正弦跳汰周期处理这些物料时，一方面由于下降水速太大，使得松

散的床层过早地恢复到紧密状态，床层内部的静力作用得不到充分发挥；另一方面，当冲程（受床层的适宜抬高高度制约）一定时，不能单独改变每一周期的松散时间和单位时间内颗粒的转移次数，因此，不能有效地回收中间粒级的重颗粒。本文所设计的周期曲线之所以能有效地回收中间粒级，一方面是因为它是根据物料性质设计的，具有针对性；另一方面，是因为它从根本上解决了正弦跳汰周期所存在的问题，既充分发挥了床层内部的静力作用，又合理地利用了水流的动力作用，在宽级别细粒级物料的跳汰过程中，实现了静力作用和动力作用的相互补充。

四、结语

我们从静态分层理论出发，借鉴已有的研究结果，提出的处理细粒级物料的合理跳汰周期曲线具有一定的通用性。针对具体的处理对象，可以采用本文介绍的方法进行设计计算。验证试验的结果表明，本文所提出的周期曲线形式是合理的，文中介绍的计算方法是可行的。利用这种方法完全有可能解决一些跳汰选矿生产中的实际问题，达到用细粒跳汰机取代一部分摇床的目的，以及进一步扩大跳汰机的应用范围。但由于我们开始这项研究的时间不长，本文仅是整个研究工作的第一步，还有许多具体问题有待今后进一步探讨和完善。