

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.08.002

立式高湿盐泥粉碎机的结构参数研究^{*}

朱桂华^{1,2}, 唐浩亭^{1,2}, 易山圳^{1,2}, 何伟泽^{1,2}, 陈 勇^{1,2}

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南中大山水环保科技有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:针对高湿盐泥粉碎机易堵塞及粉碎效率低下问题,以自制立式盐泥粉碎机为研究对象,设计了双刀片、双链条及刀片链条组合式 3 种转子结构,采用试验的方法研究了 3 种转子结构在不同转速下对粒径分布以及粘壁厚度的影响。借助 MATLAB 软件,对数据进行了 $R-R$ 分布拟合,得到了粒径分布和粘壁厚度随转速和结构的变化曲线,分析了粉碎机结构对柔性粘壁拐点的影响。研究表明:随着转子转速的增加,粉碎粒度呈现先减小后增大的趋势,当转速为 1 200 r/min 时,粉碎效果最好;粘壁厚度随转速的增加而增加,双链条及刀片链条组合式转子结构的粘壁厚度稳定的时间分别为 240 min 和 300 min;拟合的 R^2 大于 0.9 占比为 83.3%,拟合结果可以用来预测颗粒的粒径分布;该结果对盐泥物料粉碎机的设计和应用有一定的参考价值。

关键词:粉碎机;高湿盐泥;粒径分布;粘壁特性; $R-R$ 拟合

中图分类号:TH69;TH122;TS362

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)08-0868-07

Structural parameters of vertical high-humidity salt mud crusher

ZHU Gui-hua^{1,2}, TANG Hao-ting^{1,2}, YI Shan-zhen^{1,2}, HE Wei-ze^{1,2}, CHEN Yong^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Zhong Da Shan Shui Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the problems of easy clogging and low crushing efficiency of the high-humid salty slurry crusher, the self-made vertical salty slurry crusher was taken as the research object and three rotor structures of double-blade structure, double-chain structure and blade-chain combined structure were designed. Experimental method was applied to study the influence of the rotor structure on the particle size distribution and wall-sticking thickness at different rotating speeds, and MATLAB was used to perform $R-R$ distribution of the obtained data. The variation curves of particle size distribution and wall thickness with speed and structure were obtained. The influence of the crusher structure on the inflection point of the flexible sticky wall was analyzed. The results indicate that with the increase of the rotor speed, the crushing particle size decreases first and then increases. When the rotating speed is 1 200 r/min, the crushing effect is the best. The thickness of the sticky wall increases with the increase of the speed, the wall-sticking thickness of double-chain structure and blade-chain combined structure eventually tend to stabilize and the stable time are 240 min and 300 min respectively. The fitted R^2 is greater than 0.9 and the ratio is 83.3%. The fitted results can be used to predict the particle size distribution of the particles. The research results have reference value for the design and application of the salty slurry crusher.

Key words: crusher; high wet salt mud; particle size distribution; stick wall characteristics; $R-R$ fitting

0 引 言

盐泥是制盐工业中卤水净化的产物,当前我国盐行业对盐泥的处理方式一般为回井和堆放。这样的处置方式不仅加剧了环境的污染,也浪费了盐泥的可利

用价值,因此需要一种新型工艺对盐泥进行无害化、资源化处理,笔者对该工艺中的一环^[1]进行研究。

含水率 15% 以上的块状物料被称为高湿物料,高湿物料因水分含量过高在进行粉碎时常常会粘结在粉碎设备上,导致电机负载加大,效率降低,甚至烧坏电

收稿日期:2019-11-21

基金项目:湖南省科技计划重点项目(2014SK2020)

作者简介:朱桂华(1962-),男,湖南娄底人,博士,副教授,主要从事机电一体化及环保设备、非标机械设计方面的研究。E-mail:zhuguishuaok@163.com

机,严重影响生产。在普通物料粉碎方面,学者们进行了大量的研究。曹丽英等^[2-3]研究了粉碎机筛片的结构参数和分离装置的气流速度对筛分效率之间的影响规律;王德福等^[4]得出了玉米秸秆的主要粉碎形式及合适的粉碎机运行参数;马彦军等^[5]建立了破碎函数的数学模型,为圆锥破碎机破碎过程中破碎生产率的动态优化提供了理论模型。

这些研究结果并不适用高湿物料的粉碎,主要是因为:(1)国内外研究的多数为含水率较低的物料,这类物料粘性小,几乎没有粘壁情况^[6];(2)国内外的成果主要集中在农业、饲料和岩石等行业^[7],没有盐泥粉碎方面的研究;(3)粉碎机的转子结构还停留在普通的刀片和锤片结构,没有用链条类的柔性结构进行试验分析;(4)当前物料粉碎的研究成果中,大多数通过定性分析的方法来指导粉碎机器的设计,统一适用的定量研究分析成果不多。

本文将自制立式盐泥粉碎机为研究对象,设计双刀片、双链条及刀片链条组合式3种转子结构,采用试验的方法研究3种转子结构在不同转速下对粒径分布以及粘壁厚度的影响。

1 盐泥物理特性及粉碎机结构

1.1 盐泥物理特性

盐泥资源化处理项目的工艺为:

(1)在盐泥储泥罐添加药剂和絮凝剂,令盐泥加速沉降;

(2)通过固液分离设备对盐泥进行深度固液分离,得到盐泥泥饼;

(3)利用粉碎机对盐泥泥饼进行粉碎制粒;

(4)对粉碎过后的盐泥颗粒进行烘干,使其成为燃煤脱硫剂。

盐泥物理特性参数如表1所示。

表1 盐泥物理特性及成分

物理特性	检测值
盐泥泥饼尺寸/mm	160 * 140 * 30
密度/(kg · m ⁻³)	2 238
含水率/(%)	26 ~ 32
普氏硬度	3.257

1.2 粉碎机结构的提出

盐泥粉碎机主要由电机、皮带轮、转子部件、粉碎室以及转子支撑架等组成。

笔者提出一种双刀片、双链条及刀片链条组合式3种转子结构。

其中,刀片链条组合结构如图1所示。

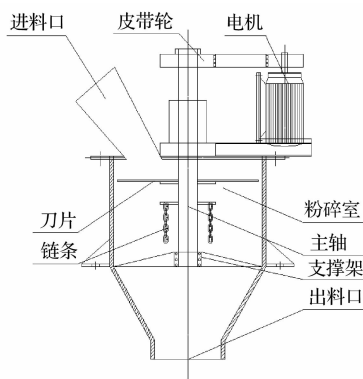


图1 刀片链条组合式粉碎机结构

2 盐泥粉碎及粘附机理分析

通过观察发现,盐泥粉碎的主要形式是打击粉碎和撞击粉碎,同时颗粒与颗粒之间也有接触力作用。打击粉碎是指高速旋转的刀片和链条打击盐泥泥饼发生的粉碎现象,撞击粉碎是盐泥经打击初碎后与壁面发生的粉碎现象^[8-9]。由于盐泥泥饼含水率较高且具有粘性,在撞击粉碎过程中有小部分盐泥颗粒会粘附在粉碎机壁上。

颗粒和刀片,颗粒和颗粒间的整体受力分析如图2所示。

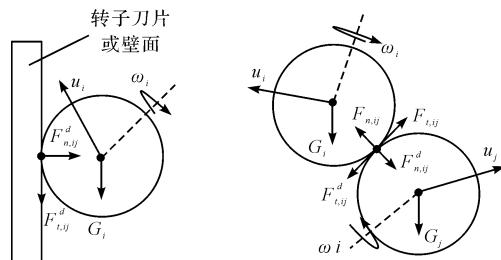


图2 整体受力分析图

$$F_{c,ij} = F_{n,ij} + F_{n,ij}^d + F_{t,ij} + F_{t,ij}^d \quad (1)$$

$$F_{n,ij} = \frac{3}{4} E^* R^{\frac{1}{2}} \delta_n^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$F_{n,ij}^d = -2 \left(\frac{5}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \beta (S_n m^*)^{\frac{1}{2}} v_n^{rel} \quad (3)$$

$$F_{t,ij} = -\delta_t S_t \quad (4)$$

$$F_{t,ij}^d = -2 \left(\frac{5}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \beta (S_t m^*)^{\frac{1}{2}} v_t^{rel} \quad (5)$$

式中: $F_{n,ij}$ —法向弹性力; $F_{t,ij}$ —切向弹性力; $F_{n,ij}^d$ —法向阻尼力; $F_{t,ij}^d$ —切向阻尼力; R_i —颗粒*i*半径; d_s —颗粒直径; v —泊松比; V_s —颗粒体积; δ_n —法向重叠量; δ_t —切向重叠量; S_n —法向刚度; S_t —切向刚度; β —阻尼系数; e —恢复系数; μ_r —滚动摩擦系数。

由图2可知:颗粒在运动过程中受重力 $G_{s,i}$ 和颗粒碰撞接触力 $F_{c,ij}$ 。根据牛顿第二定律可得,颗粒在*t*

时刻的运动状态方程^[10-11]为:

$$m_i \frac{du_{s,i}}{dt} = G_{s,i} + \sum_{j=1}^{k_i} F_{c,ij} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} I_i \omega_i = \sum_{j=1}^{k_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}) \quad (7)$$

式中: m —颗粒 i 的质量; $u_{s,i}$ —速度; I_i —颗粒 i 的转动惯量; ω_i —角速度; T_t —为切向力矩; T_r —滚动摩擦力矩; i —颗粒 i 接触对象编号; j —颗粒 j 接触对象编号。

2.1 打击粉碎

当盐泥泥饼由皮带机输送至进料口后, 高速旋转的刀片及链条和盐泥泥饼发生碰撞, 一部分盐泥泥饼经过打击后和壁面进行撞击, 另外一部分盐泥泥饼被击飞到刀片上部, 导致掉落下来发生二次碰撞。

不考虑粉碎室内的气流和转子的自重, 根据冲量-动量定理可知:

$$F \Delta t = m(v_1 - v_2) \quad (8)$$

$$F = \frac{m(v_1 - v_2)}{\Delta t} \quad (9)$$

式中: F —刀片对盐泥泥饼的打击力; Δt —打击时间; m —盐泥泥饼的质量; v_1 —刀片打击速度; v_2 —盐泥泥饼接触刀片时的速度。

打击力越大, 泥饼粉碎效果越好, 但粘壁厚度会相对增加。由式(9)可知, 打击力的大小和盐泥泥饼的质量、刀片的速度、盐泥泥饼的速度及打击时间有关。泥饼相对于刀片的速度越大, 打击力越大; 打击作用时间越短, 盐泥泥饼受到的打击力越大; 打击时间和盐泥的硬度有关, 硬度高则打击时间短。

另外, 第一次打击前盐泥还未破碎, 质量相对较大, 打击力大; 破碎后被击飞到上部等待第二次打击的泥饼质量减小, 打击力相对减小。

2.2 撞击粉碎

盐泥泥饼受刀片打击之后, 以较高的速度撞击粉碎机壁面, 当撞击力大于泥饼内聚力时泥饼会产生进一步破碎。

根据冲量-动量定理, 泥饼与壁面的撞击力为:

$$F_1 = \frac{m}{\Delta t_1} (1 + \lambda) v_n \cos \alpha \quad (10)$$

式中: F_1 —盐泥泥饼与壁面的撞击力; v_n —盐泥泥饼接触壁面时的速度; m —盐泥泥饼撞击前的质量; Δt_1 —撞击时间; λ —盐泥泥饼的弹性恢复系数; α —盐泥泥饼对壁面的入射角。

由式(10)可知, 盐泥泥饼与壁面发生撞击的撞击力和撞击前的速度 v_n 以及盐泥泥饼的弹性恢复系数有关。撞击速度 v_n 随着第一次打击力的增大而增大, 泥饼弹性恢复系数与其含水率和弹性模量有关。

2.3 粘结机理分析

由于盐泥含水率约为 30%, 且具有粘性, 在撞击粉碎的同时会有一小部分的盐泥颗粒粘结在粉碎室的壁面上。对于完全粘结在壁面上的盐泥小颗粒, 粘结过程遵循牛顿第二定律, 由于颗粒很小, 可将颗粒看作球体。

忽略重力及气流阻力等影响, 其粘结方程为:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = F_{ad} - F_c \quad (11)$$

式中: s —碰撞点指向球心的压缩位移; F_{ad} —颗粒和壁面粘性力; F_c —颗粒和壁面件的弹性力。

其中, 弹性力 F_c 与物料的弹性模量 E 和泊松比 μ 有关, 最大可压缩位移 S_{max} 受物料碰撞之前的速度 v 影响, 速度越大, 最大可压缩位移越大。因此, 减少碰撞前的速度能够很好地减小物料和壁面的粘结力。

3 试验方法

笔者通过调节变频器的频率对粉碎机主轴进行调速, 每次试验数据记录完毕之后更换对应的转子结构。本文主要考察转子结构和转子转速两个因素对物料的粉碎粒度和粘壁厚度影响。

根据上节理论分析和预实验的效果, 笔者最终确定了 3 种结构方式和 6 个转子转速的参数水平。

试验的因素水平表如表 2 所示。

表 2 试验因素水平表

序号	$r/(r \cdot \min^{-1})$	转子结构
1	900	A
2	1 000	B
3	1 100	C
4	1 200	
5	1 300	
6	1 400	

在项目现场, 笔者采用自行研制的立式粉碎机进行试验, 具体的试验步骤如下:

(1) 通过预实验, 确定可行的转子转速并制作数据记录表;

(2) 将制作好的转子结构安装至粉碎机, 调节变频器获得试验所需的转子转速;

(3) 设置合适的物料进给量和进料速度, 依次启动粉碎机和进料皮带机对物料进行粉碎作业。粉碎完成, 关闭电源;

(4) 每隔 0.5 h, 用游标卡尺测量粉碎室壁面物料粘结厚度, 并记录;

(5) 将粉碎过后的物料进行筛分并对每个筛分区间的颗粒进行称量。记录每次试验结果, 对试验数据

进行处理。

占比为评价指标表征粉碎机的性能,通过大量试验得到数据,同时剔除异常数据。

4 试验结果与分析

4.1 粒径分布

由于实际生产需要,笔者以 20 mm 以下粒径质量

径变化曲线如图 3 所示。

表 3 颗粒粒径质量分布

结构	$r/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	粒径分布/kg									
		$r=5\text{ mm}$ 以下	$r=5\text{ mm}$ ~8 mm	$r=8\text{ mm}$ ~10 mm	$r=10\text{ mm}$ ~12 mm	$r=12\text{ mm}$ ~15 mm	$r=15\text{ mm}$ ~18 mm	$r=18\text{ mm}$ ~20 mm	$r=20\text{ mm}$ ~25 mm	$r=25\text{ mm}$ ~30 mm	$r=30\text{ mm}$ 以上
双刀片	900	12.60	25.67	38.74	64.25	103.24	70.65	48.10	23.56	14.79	0.00
	1 000	17.63	31.26	56.84	112.53	70.65	45.69	34.68	24.13	13.69	0.00
	1 100	23.52	67.41	96.88	70.56	46.32	40.10	30.74	25.26	0.00	0.00
	1 200	36.41	106.56	87.53	63.93	34.54	29.95	20.79	15.62	0.00	0.00
	1 300	9.11	18.18	24.54	43.74	82.03	107.65	60.14	42.32	12.76	0.00
	1 400	9.87	27.10	35.11	39.51	52.23	75.86	104.23	48.56	15.98	0.00
双链条	900	11.17	17.69	24.54	31.98	42.45	63.81	74.56	98.72	21.56	16.88
	1 000	14.52	19.42	33.24	56.79	104.73	72.75	52.49	20.14	15.42	9.81
	1 100	15.73	20.03	35.27	112.33	76.97	52.93	40.72	29.95	18.18	5.78
	1 200	19.67	30.18	104.77	80.43	62.96	40.79	30.21	16.97	14.89	9.53
	1 300	20.76	25.47	30.49	53.72	70.14	107.59	48.67	26.64	11.35	7.94
刀片链条组合	1 400	14.32	24.18	27.63	34.54	43.16	57.78	103.45	54.62	23.60	20.61
	900	10.12	14.38	26.73	36.37	45.23	72.39	108.30	50.22	18.38	15.64
	1 000	16.83	21.57	44.36	108.12	77.43	50.52	49.60	23.14	10.55	5.43
	1 100	18.36	37.43	101.34	70.27	54.33	46.27	33.47	26.27	12.96	0.00
	1 200	24.16	110.39	78.18	62.39	40.72	37.86	27.49	16.48	5.26	0.00
	1 300	10.40	17.23	41.76	73.69	118.21	84.13	32.76	13.84	8.34	0.00
	1 400	16.48	22.48	32.61	39.47	58.56	101.54	68.37	35.26	21.19	0.00

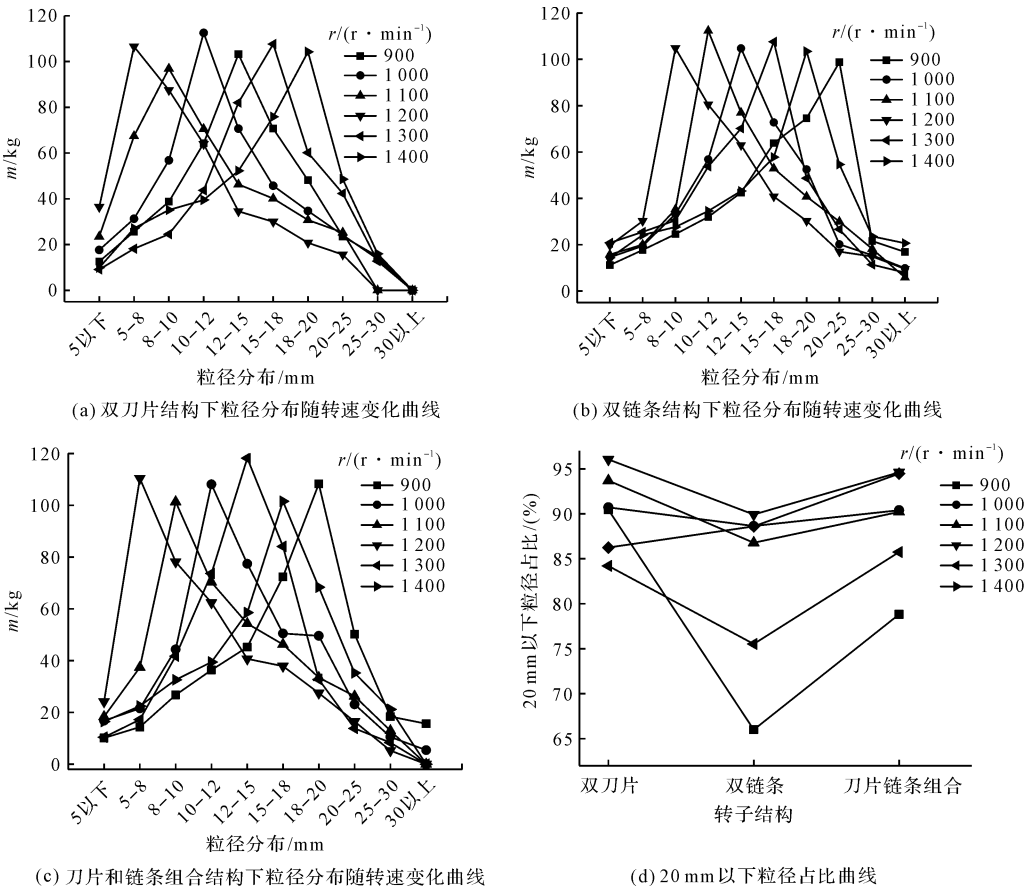


图 3 不同转子结构和转速下的粒径分布曲线

由图 3 可知:

(1) 转速对粒径分布的影响要大于转子结构对其的影响,随着转子转速的增加,粒度逐渐减小,粉碎效果越好;

(2) 以小于 20 mm 的粒径占总质量的比值为衡量指标,双刀片结构和刀片链条组合结构的粉碎效果优于双链条结构,随着转速的增大,小颗粒比重逐渐减小。1 200 r 时双刀片、双链条和刀片链条组合 20 mm 以下粒径占比分别为 96.0%、89.9% 和 94.6%,小颗

粒粒径比重最大,粉碎效果最佳;当转速超过 1 200 r/min 时,粉碎颗粒向大粒径方向偏移,这是由于转速过大,赋予第二次粉碎的颗粒能量就大,导致粉碎后的一部分小颗粒之间互相粘结,但再次粘结后的颗粒间粘结键强度远小于初始物料的粘结键强度。

4.2 粘壁厚度

由于盐泥泥饼是含水率为 25% ~ 30% 的粘性物质,在粉碎过程中会出现粘壁现象。

粉碎机粘壁厚度的试验数据如表 4 所示。

表 4 不同转子结构和转速下的粘壁厚度变化

结构	$r/(r \cdot \min^{-1})$	粘壁厚度/mm								
		$t=0 \min$	$t=60 \min$	$t=120 \min$	$t=180 \min$	$t=240 \min$	$t=300 \min$	$t=360 \min$	$t=420 \min$	$t=480 \min$
双刀片	900	0.00	10.32	18.92	21.66	25.78	30.12	36.40	39.94	41.82
	1 000	0.00	12.40	20.74	25.64	28.90	32.28	39.18	44.62	49.36
	1 100	0.00	15.14	25.32	30.72	33.86	36.24	43.74	48.96	53.70
	1 200	0.00	16.40	27.14	34.66	40.58	45.62	48.24	52.54	55.10
	1 300	0.00	18.68	28.32	35.46	42.24	48.20	53.30	57.26	60.32
	1 400	0.00	19.28	30.12	28.22	46.48	54.42	57.72	63.34	65.22
双链条	900	0.00	5.32	10.28	12.30	18.22	19.34	17.26	18.40	17.20
	1 000	0.00	6.10	11.46	13.08	20.36	20.98	21.02	19.54	20.60
	1 100	0.00	6.34	13.50	15.86	21.84	22.18	23.36	23.04	22.90
	1 200	0.00	8.14	15.82	18.34	22.80	24.06	25.58	24.86	25.42
	1 300	0.00	10.66	17.58	20.42	25.14	27.66	26.48	27.52	27.36
	1 400	0.00	11.20	19.42	22.60	28.56	30.12	29.42	30.04	30.28
刀片链条组合	900	0.00	9.12	13.44	19.26	21.68	26.72	27.10	26.38	25.66
	1 000	0.00	8.76	13.98	20.54	26.14	30.78	28.34	31.56	29.10
	1 100	0.00	11.62	15.68	21.92	28.30	32.64	30.48	31.80	32.46
	1 200	0.00	13.60	17.14	25.38	30.22	33.34	35.86	34.40	34.62
	1 300	0.00	16.40	19.22	26.80	34.12	36.38	37.80	35.96	36.90
	1 400	0.00	17.56	21.02	30.72	38.74	40.92	40.12	39.38	39.56

由表 4 可知:粘壁现象会使粉碎机的粉碎效率降低,甚至造成粉碎机停车。通过分析粘壁现象可以选择更好的结构和运行参数,有效地提高粉碎机的粉碎效率。

根据表 4 所得的试验数据,笔者绘制了粘壁厚度随转子结构和转子转速的曲线,如图 4 所示。

由图 4 可知:

(1) 粘壁厚度起初增速很大,随后逐渐减小。随着转速的增加,粘壁厚度也随之增加,与上节粘结机理分析相吻合。当转子结构为双刀片结构时,粘壁厚度一直增加,而双链条和双刀片结构则逐渐趋于稳定。相同转子结构,同一时刻,不同转速下,粘壁厚度最大差值分别为 23.40 mm、13.08 mm、17.06 mm;相同转速下,同一时刻,不同结构下,粘壁厚度最大差值分别为

24.62 mm、28.76 mm、30.08 mm、29.68 mm、32.96 mm、34.94 mm。从数据可以看出,结构不同,粘壁厚度差值越大,表明粉碎机转子结构对粘壁厚度的影响大于转子转速;

(2) 双刀片结构的粘壁厚度持续增长,而双链条结构和刀片链条结构的粘壁厚度逐渐趋于稳定,稳定的时间分别为 240 min 和 300 min,这是因为粘壁厚度与颗粒撞击壁前的速度有关,刀片为刚性打击装置,打击后的速度大,链条为柔性打击装置,在打击过程中末端的链节会绕链环进行转动,可以有效地降低撞击速度,抑制粘壁厚度无限制增长,因此,将粘壁厚度稳定的时间称之为柔性粘壁拐点。

该拐点对盐泥泥饼粉碎机的设计有重要的指导意义。

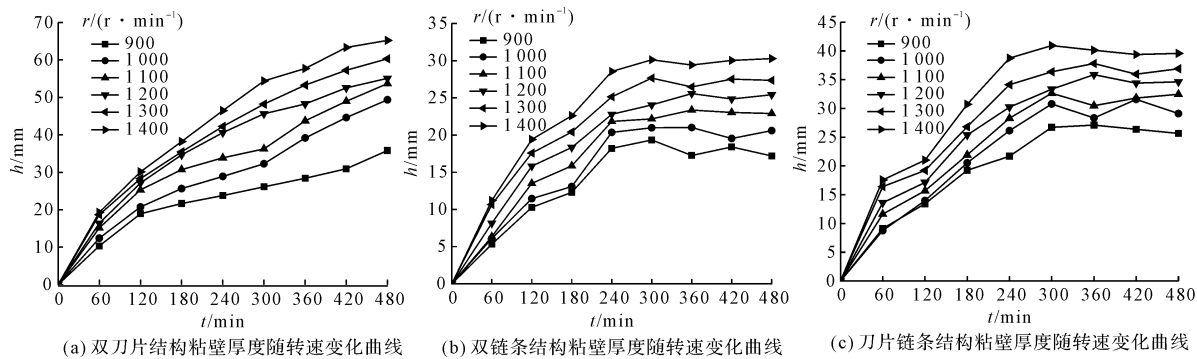


图 4 不同转子结构和转速下的粘壁厚度变化曲线

4.3 粒径分布选择函数

粒径分布函数能够有效地表征粉碎颗粒的分散程度,也可以预测粒径的分布范围^[12]。笔者利用 MATLAB 对得到的试验结果,按正态分布、对数正态分布和 $R-R$ 分布进行拟合。根据拟合所得到的数据发现,盐泥破碎后的粒径遵循 $R-R$ 分布函数。

由于篇幅有限,现只给出 $R-R$ 拟合函数、破碎程度指数 λ 、破碎程度指标数 n 以及回归值 R^2 。

$R-R$ 的函数表达式为:

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{d_{50}}\right)^n\right] \quad (12)$$

式中: $F(d)$ —累积量的百分数; d —粒径尺寸; d_{50} —粒径累计质量分布 F 为 50% 对应的粒径尺寸; n —破碎性指标^[13]。

为了便于数据分析和拟合,将式(12)改写为:

$$F^*(D) = \ln\{-\ln[1 - F(d)]\} = n \ln d + \lambda \quad (13)$$

$$\lambda = -n \ln(d_{50}) \quad (14)$$

式中: λ —破碎程度指数; n —破碎程度指标^[14]。

根据式(14)可得到 3 种结构下颗粒累计质量分数随转速的拟合函数及回归值 R^2 ,如表 5 所示。

表 5 粒径分布选择函数的拟合公式

结构	$r/(r \cdot \min^{-1})$	拟合表达式	R^2	n	λ
双刀片	1 200	$y = 0.403\ 94x - 0.284\ 36$	0.977 57	0.403 94	-0.284 36
	1 100	$y = 0.439\ 01x - 0.426\ 60$	0.971 26	0.439 01	-0.426 60
	1 000	$y = 0.467\ 96x - 0.559\ 79$	0.945 02	0.467 96	-0.559 79
	900	$y = 0.482\ 30x - 0.639\ 73$	0.927 84	0.482 30	-0.639 73
	1 300	$y = 0.488\ 91x - 0.705\ 24$	0.904 03	0.488 91	-0.705 24
	1 400	$y = 0.472\ 33x - 0.671\ 88$	0.908 80	0.472 33	-0.671 88
双链条	1 200	$y = 0.450\ 44x - 0.502\ 74$	0.957 21	0.450 44	-0.502 74
	1 100	$y = 0.471\ 43x - 0.609\ 99$	0.933 08	0.471 43	-0.609 99
	1 000	$y = 0.475\ 36x - 0.642\ 51$	0.920 46	0.475 36	-0.642 51
	1 300	$y = 0.466\ 72x - 0.616\ 84$	0.918 71	0.466 72	-0.616 84
	1 400	$y = 0.443\ 31x - 0.633\ 83$	0.899 24	0.443 31	-0.633 83
	900	$y = 0.446\ 49x - 0.665\ 53$	0.885 65	0.446 49	-0.665 53
刀片链条组合	1 200	$y = 0.419\ 30x - 0.351\ 90$	0.983 69	0.419 30	-0.351 90
	1 100	$y = 0.453\ 89x - 0.506\ 65$	0.962 45	0.453 89	-0.506 65
	1 000	$y = 0.472\ 93x - 0.599\ 03$	0.935 19	0.472 93	-0.599 03
	1 300	$y = 0.497\ 59x - 0.665\ 47$	0.917 81	0.497 59	-0.665 47
	1 400	$y = 0.469\ 74x - 0.648\ 96$	0.911 50	0.469 74	-0.648 96
	900	$y = 0.461\ 80x - 0.685\ 55$	0.890 53	0.461 80	-0.685 55

由表 5 可知:

(1) R^2 大于 0.9 的占比为 83.3%,拟合效果较好,拟合结果可以用来预测颗粒的粒径分布;

(2) 破碎程度通常用来表征粉碎后的小颗粒粒径占总破碎量的比例, λ 越大占比越大。3 种结构下,转速为 1 200 r/min 时, λ 值分别为 -0.284 36、-0.609 99

和 -0.351 90,小颗粒比重最大,粉碎效果最好;相同转速下,双刀片和刀片链条组合结构的粉碎效果相差无几,均优于双链条结构,与试验结果吻合。同种结构,不同转速 λ 差值最大为 0.420 88,相同转速,不同结构下 λ 差值最大为 0.218 38,说明转速对粉碎后的小颗粒分布的影响大于转子结构;

(3) 粉碎特性指标 n 用来表征粉碎后颗粒的均匀程度, n 值越大, 颗粒分布越均匀, 从表 5 中数据可以看出 3 种结构不同转速下的 n 值相差较小, 说明粒度均匀性相当。3 种结构下, 转速为 900 r/min、1 300 r/min 及 1 400 r/min 时, 粒度均匀性稍高于其他转速, 但平均粒度集中在 20 mm 以上, 和 4.1 所得出的随着转速的增加, 小颗粒会再次粘结的结论相吻合。

5 结束语

本文以自制的式盐泥粉碎机为研究对象, 设计了双刀片、双链条及刀片链条组合式 3 种转子结构; 在不同转速下, 采用试验法研究了 3 种转子结构对粒径分布以及粘壁厚度的影响, 得到以下结论:

(1) 转子转速对粒径分布的影响大于转子结构, 而转子结构对粘壁厚度的影响要大于转子转速。当转子结构为刀片链条组合式结构时, 20 mm 以下粒径占比均在 75% 以上, 和双刀片结构相差无几, 优于双链条结构; 双链条和链条刀片组合式结构的粘壁厚度随着时间的增长逐渐趋于稳定, 而双刀片则持续增加。综合粒径分布、20 mm 以下粒径占比及粘壁厚度的影响, 最终选定链条刀片组合式结构为盐泥粉碎机的转子结构;

(2) 随着转速的增加, 颗粒粒径分布随着转速的增大逐渐向小粒径方向偏移, 20 mm 以下粒径占比增加, 当转速为 1 200 r/min 时, 3 种结构 20 mm 以下粒径占比分别为 96%、90% 和 95%, 比重最大, 粉碎效果最好。转速超过 1 200 r/min 时, 由于盐泥具有粘性, 在粉碎过程中小颗粒会重新发生粘结, 20 mm 以下粒径占比增大, 笔者选定 1 200 r/min 为盐泥粉碎机工作时的运行参数;

(3) 柔性粘壁拐点: 由于双链条和刀片链条组合式结构中链条为柔性装置, 在打击过程中末端的链条会在一定的速度条件下绕链环进行转动, 可以有效地降低撞击速度, 抑制粘壁厚度无限制增长。因此在这两种结构下, 粘壁厚度随着转速的增大而增大, 最终趋于平稳, 平稳时间分别为 360 min、240 min 和 300 min;

(4) 通过 MATLAB 软件对数据进行分析, 选择合适的粒径分布函数, 并对函数进行拟合后发现, 盐泥破碎后的粒径遵循 $R-R$ 分布函数, 回归值 R^2 大于 0.9 的

占比为 83.3%, 拟合效果较好; 根据粉碎程度及粉碎特性指标 n 对粉碎后的粒径分布和均匀程度进行分析后发现和试验结果吻合, 因此, 该结果可以用来预测颗粒的粒径分布。

参考文献 (References):

- [1] 朱桂华, 彭南辉, 张傲林, 等. CDEC 污泥燃料化技术研发与应用[J]. 现代化工, 2019, 39(4): 188-191.
- [2] 曹丽英, 张跃鹏, 张玉宝, 等. 筛片参数优化对饲料粉碎机筛分效率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 284-288.
- [3] 曹丽英, 史兴华, 汪建新, 等. 锤片式饲料粉碎机分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 128-133.
- [4] 王德福, 王 沫, 李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 165-171.
- [5] 马彦军, 范秀敏, 何其昌, 等. 圆锥破碎机破碎质量的粒度和粒形数学建模[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 95-102.
- [6] 李 震, 韦安宁, 曹丽英, 等. 新型锤片式饲料粉碎机粉碎性能的试验研究与参数优化[J]. 饲料工业, 2019, 40(5): 6-10.
- [7] 赵小军, 康 鑫, 潘飞飞, 等. 孕镶金刚石钻头破碎花岗岩岩屑粒径分布研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(1): 84-88.
- [8] 田海清, 王海庆, 黄 涛, 等. 锤片饲料粉碎机组组合形筛片设计改善粉碎性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 45-52.
- [9] 邹鹏程, 张明星, 黄生龙, 等. 膨化黑米粉的粉碎分级实验[J]. 化工进展, 2018, 37(5): 1664-1669.
- [10] HOOMANS B P B. Granular dynamics of gas solid two phase flow[M]. Netherlands: Maastricht, 1999.
- [11] MONGENSEN F. A new method of screening granular material[J]. The Quarry Manger's Journal, 1965(10): 409.
- [12] 张季如, 胡 泳, 张弼文, 等. 石英砂砾破碎过程中粒径分布的分形行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 784-791.
- [13] 李建平, 郑克洪, 杜长龙. 煤和矸石的冲击破碎粒度分布特性[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 54-58.
- [14] 何月娥. 锤式粉碎机的性能与各参数的关系分析[J]. 农业工程学报, 1988, 4(3): 54-62.

[编辑: 程 浩]

本文引用格式:

朱桂华, 唐浩亭, 易山圳, 等. 立式高湿盐泥粉碎机的结构参数研究[J]. 机电工程, 2020, 37(8): 868-874.

ZHU Gui-hua, TANG Hao-ting, YI Shan-zhen, et al. Structural parameters of vertical high-humidity salt mud crusher[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(8): 868-874.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>