

新型锤片式双轴打击式粉碎机的刀具设计与研制分析

张艺腾 刘瑞景 吴鹏 刘威

(北京中超伟业信息安全技术股份有限公司 北京 102200)

摘要: 锤片粉碎机是饲料加工业中不可或缺的一部分,它作为一种重要的饲料加工设备,其工作性能直接关系到饲料厂的能源效率。较传统单轴粉碎机而言,双轴粉碎机物料与物料之间剪切力更大,在等功率电动机情况下能够更大程度地增加产量。而锤片作为锤片式粉碎机直接打击物料的工具,又叫甩刀,其性能优劣直接影响饲料的粉碎结果是否达标,进而影响整个饲料的加工工序。基于此,本文首先根据灵敏度分析的结果确认锤片所需要优化的参数项目,然后根据BBD实验获得的样本点,建立最大响应面模型,再以二次响应面方程作为目标函数,利用遗传算法,通过Matlab软件得到适应函数最小值时的锤片结构参数值。实验结果表明,优化后锤片的长为178mm,宽为67mm,厚度为7mm,最大变形量降低了39.8%,锤片的性能得到了进一步的提高。

关键词: 锤片式双轴粉碎机; 锤片; 优化设计; 静力学分析

0 引言

当前市场上的锤片式粉碎机型号较多,一般都由锤片、转子、筛片、机壳、电动机等组成。其工作原理多是采用电动机驱动,转子转动,装在转子上的锤片将物料击碎,并将符合要求粒度要求的材料从筛板中取出,从而实现了完整的粉碎过程^[1,2]。与传统的单轴粉碎机相比,双轴粉碎机具有两个转子,充分地利用了粉碎腔的空间,增大了粉碎面积,对筛片进行了最大程度的保护,延长了筛片的使用寿命;同时,当材料进入这个范围时,会受到2倍的线速打击(200m/s),从而实现物料的瞬间粉碎^[3,4],使粉碎的物料变得更加细小。

而锤片作为重要的工作部件,它的外形尺寸直接关系到粉碎效果及制品质量。选择的锤片长度合适,对提升单位电量的产出是有利的,但是太长的话,又会使消耗的金属增多,单位电量的产出也会下降^[5]。锤片宽度一方面会直接影响到木材粉碎机的生产能力和效益,一般而言,锤片越宽,粉碎能力就越强,生产效益也就越高,但如果锤片过宽,粉碎的细度也会随之下降,可能达不到客户的要求;另一方面会影响锤片的使用寿命,当锤片宽度过严重时,粉碎时锤片与物料的接触面积减小,锤片重心向空端偏移,这会导致锤片在使用过程中的寿命较短,需要更频繁地更换^[6,7]。锤片的厚度与超微粉碎机的生

产能力有很大关系。一般认为,在一定的粉碎物料条件范围内,薄形锤片的生产能力比厚锤片高一些。因而,在设计中把锤片的厚度作为影响生产能力的重要参数^[8]。

基于此,本文以灵敏度进一步确定锤片结构的影响参数,并通过响应平面法、遗传算法对锤片结构进行优化。

1 锤片式双轴粉碎机

一组组锤片通过动力传导转动,达到一定转速后,将喂入的物料击碎(大破小),在风机的作用下,将粉碎后的物料透过筛网的孔排出机外,故被称为锤片式粉碎机^[9]。而双轴锤片式粉碎机的不同之处在于,它有两个同方向旋转的转子,如图1所示,当物料进入粉碎机内部后,首先会被送到转子上,在双转子的作用下,物料进行一系列的撞击、剪切和摩擦等作用,最终实现高效粉碎。

2 刀具的设计

优化设计是基于数学的最优化理论,将实际问题转化为数学问题,通过计算机求得对应问题的最小值,即最优解。优化实际问题时,需要确定设计变量和优化的目标函数,选择约束条件和合适的优化算法,通过计算机进行求解。

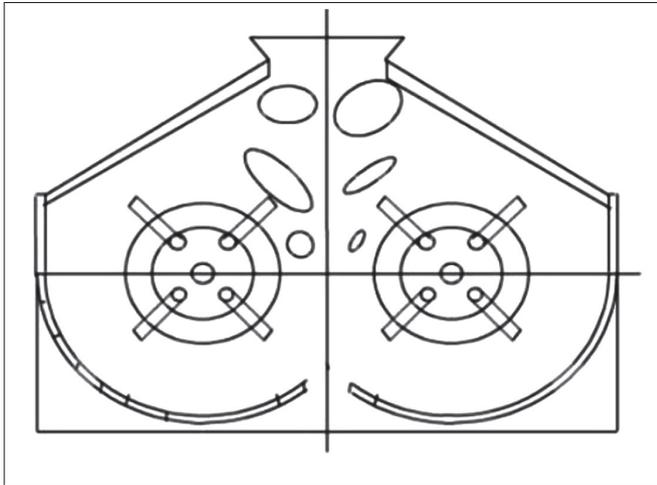


图1 锤片式双轴粉碎机示意图

2.1 锤片灵敏度计算

锤片的结构主要由锤片的长度、锤片的宽度、锤片的厚度、锤片孔直径，以及锤片孔中心点到边缘线的距离组成。对锤片的结构进行灵敏度检验，首先要确定锤片的结构范围，而后再利用有限元分析进行灵敏度的分析。锤片结构的仿真变化范围如表1所示。

表1 锤片结构的仿真变化范围

项	变化范围	初始值
锤片的长度 L/mm	170 ~ 190	180
锤片的宽度 K/mm	60 ~ 70	65
锤片的厚度 h/mm	130 ~ 150	140
锤片孔直径 d/mm	25 ~ 35	30.5
锤片孔中心点到边缘线的距离 g/mm	3 ~ 7	5

根据表1中的数据，采用有限元分析软件对其进行灵敏度分析，灵敏度的数值越大，则说明其对最大形变量的影响也就越大。具体实验结果如图2所示。

由图2可知，在最大形变量上，锤片的长度 L 、

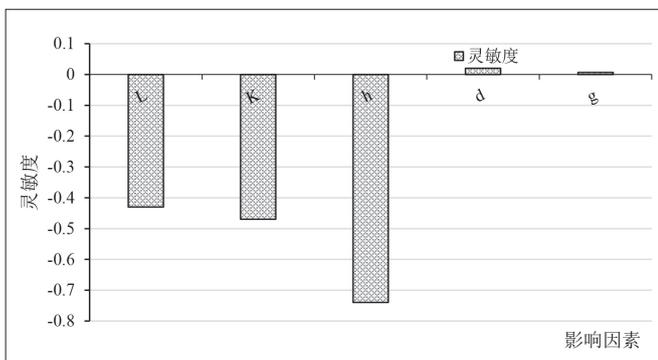


图2 灵敏度分析

宽度 K 、厚度 h 均呈现负效应，锤片孔径 d 、锤片孔中心点到边缘线的距离 g 则显示正效应。按照图2所示，灵敏度的排序情况为 $h > K > L > d > g$ ，但锤片孔径 d 、锤片孔中心点到边缘线的距离 g 的灵敏度趋近于零，故而在锤片的优化过程中，仅考虑锤片的长度 L 、锤片的宽度 K 、锤片度的厚度 h 。

2.2 优化设计

2.2.1 锤片结构的优化

本研究利用响应面方法，对锤片结构进行了优化设计。首先，采用响应面理论为基础，构建一种新颖的多目标优化模型。它的基本思想就是用函数拟合方法对加工参数与极限状态函数之间的输出与输入进行近似建模，来探究响应变量与因素之间的关系。通过选择合适的测试点及迭代方法，来保障优化模型的失效概率与真实的失效概率具有一定的近似精度。并采用BBD (Box-Behnken) 实验设计锤片3个结构参数的17个样本试验点，并统计各对照组的差异。其次，使用Design-Expert软件设计实验方案，以锤片的长、宽、厚度作为影响因子，在此基础上，利用有限元软件对最大变形进行仿真。模拟结果显示如表2所示。

表2 实验方案及结果

编号	锤片的长度 L/mm	锤片的宽度 K/mm	锤片的厚度 h/mm	最大变形量 μm
1	180	70	3	58.7
2	190	65	3	55.7
3	170	65	5	34.8
4	190	60	5	35.2
5	170	60	5	36.3
6	180	60	3	65.2
7	180	65	5	34.5
8	180	65	5	34.3
9	170	65	7	26.7
10	180	70	7	25.4
11	170	65	3	59.9
12	180	65	5	34.3
13	190	70	5	32.1
14	180	65	5	34.3
15	180	60	7	26.5
16	170	70	5	36.2
17	190	65	7	23.5

对表2的数据结果进行回归计算，得到锤片最大变形量的方差分析结果，如表3所示。

表3 锤片最大变形量方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	2862.2	9	318	67.4	<0.0001
A	18	1	18	3.8	0.092
B	0.8	1	0.8	0.2	0.685
C	2635.4	1	2635.4	558.6	<0.0001
AB	4	1	4	0.85	0.388
AC	4	1	4	0.85	0.388
BC	18.5	1	18.5	3.9	0.088
A ²	1.5	1	1.5	0.3	0.588
B ²	18.6	1	18.6	3.9	0.088
C ²	156.7	1	156.7	33.2	0.0007
残差	33	7	4.7		
失拟项	33	3	11		
标准差	0	4	0		
总和	2895.3	16			
$R^2=0.97$			$R_{Adj}^2=0.89$		

表3中，A表示锤片的长度，B表示锤片的宽度，C表示锤片的厚度，P值表示的是置信度区间。由表3可知，90%以上模型的P值<0.05，表明其置信区间都是显著的，而交叉项AB、AC、BC都对结果有较显著的反应，进一步表明了各因子间存在着一定的交互作用。同时，该模型的复合相关系数R²不论是校正前还是校正后都在0.85以上，说明该模型具有良好的拟合效果。

本文对锤片结构的优化，还需应用遗传算法进行优化设计。在进行遗传算法(GA)的优化设计之前，要利用构建的最大响应面模型对要输入GA中的个体进行求解，而在对其进行求解之前，要对响应面模型的精确度进一步确定，以3个样本点的Static模拟值作为真值与响应面模型的预测值进行对比。

如表4所示，响应面模型的精度验证结果表明，相对误差均不超过2.5%，可见，该方法的精度较高，通用性也较强，在锤片最大变形量预测中具有一定的适

表4 精度验证结果

	结构参数			最大变形量		
	L/mm	K/mm	h/mm	预测值/ μm	真实值/ μm	相对误差/%
点一	178	69	6.5	24	23.6	1.9
点二	180	60	7	26.5	26.8	1.1
点三	173	65	5.7	28.9	28.5	2.2

用性。

2.2.2 基于遗传算法的锤片结构优化设计

(1) 通过Matlab的最优解求解，根据方程(1)计算出当适应度函数呈最小值时对应的锤片长度、锤片宽度、锤片厚度。即以逐步回归法构建锤片的长度L、锤片的宽度K、锤片厚度h的二次响应方程如下：

$$B_{\max} = 50.35 + 3.06L - 6.3K - 19.35h - 0.02 \times K + 0.05L \times h - 0.215K \times h - 0.006L^2 + 0.084K^2 + 1.525h^2 \quad (1)$$

式中： B_{\max} - 锤片的最大变形量。

(2) 目标函数的约束条件如表5所示，仅在自变量的变化范围以内。

表5 约束条件

参数项	变化范围
L/mm	170 ~ 190
K/mm	60 ~ 70
h/mm	3 ~ 7

(3) 考虑到锤片的结构因素和水平，遗传算法的参数设定如表6所示。

表6 运行参数设置

参数	数值	参数	数值
种群大小	50	交配概率(两点交换)	0.8
最大迭代次数	100	变异概率(位变异)	0.1

为确保锤片最大变形量最小，则必须要选择一个合适的锤片结构参数组合。针对这一问题，利用遗传算法对其进行求解，通过比较优化目标函数，找到使其最大变形量最小的结构参数组合。最大变形量的数学模型是通过式(2)建立的，根据所得到的最佳锤片结构参数组合，再通过Matlab程序进行仿真实验和数据处理。在Matlab环境下运行后得到如表7所示结果。

$$f(x) = \min(B_{\max}) \quad (2)$$

锤片最大变形量的最小值在迭代次数达到64次后得到结果，如图3所示。

如图3、表7所示，优化后锤片的长度为178mm、宽度为67mm、厚度为7mm，最大变形量降至21.66，约降低了39.8%。最大变形量越低，表明锤片的性能就越好。

表7 GA 算法分析结果

参数	数值
最佳适应的函数的最大变形量 / μm	21.66
锤片的长 L/mm	178
锤片的宽 K/mm	66.76
锤片的厚度 h/mm	7

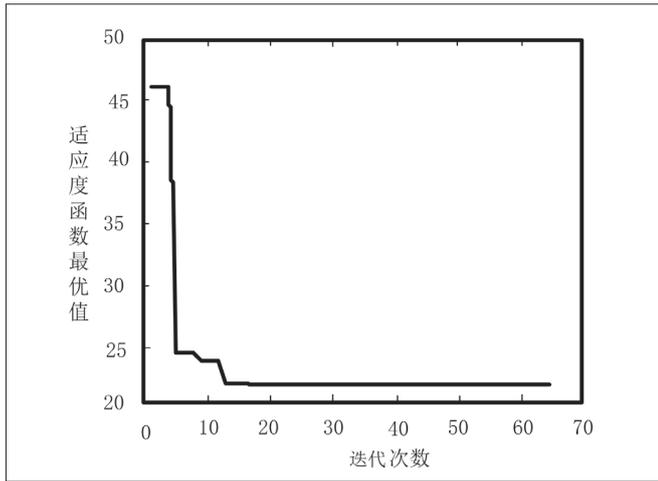


图3 适应度函数值与迭代次数间的关联

3 仿真验证

3.1 验证方案

依据本文对锤片参数的优化结果，生产出相应尺寸的锤片开展锤片破碎机锤片变形测试实验，以验证所建立的理论模型。从实验的可行性及经济性出发，采用应变片与应变计相结合的方式，对冲击锤在使用过程中的最优变形进行测量。

本次检测项目从转子锤的片受力特性出发，结合多路同步检测需求，以及桥式电路温度补偿需要，利用全桥电路和特殊的应变片进行测量，将其以 90° 间隔粘贴在锤片正面上。其中，连接线路如图4所示。

3.2 验证结果

依据上述测试步骤，通过应变仪检测所得结果显示的阻值，最大变形量的测试结果约为 $26.52\mu\text{m}$ ，与仿真结果误差在 14% 以内。同时，由于实验是根据模拟数据进行的，对锤片最大变形位置的判断存在一定的误差，但是这也在允许的范围内。因此，此仿真模拟用来指导实际的生产具有较高的可行性。

4 结语

本文首先通过灵敏度分析结果确定需要优化的锤片结构参数项，而后再以 BBD 实验所得的样本点构建

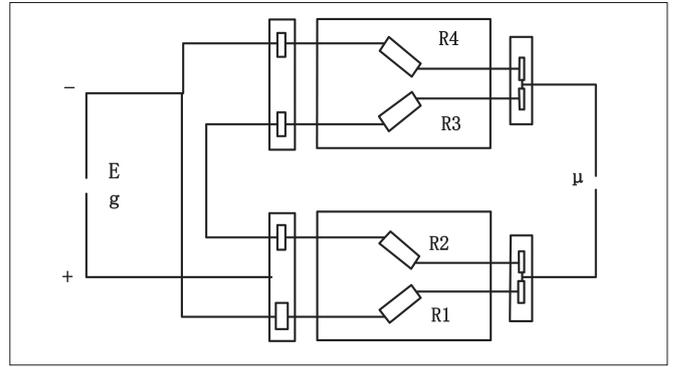


图4 连接线路示意图

最大响应面模型，最后以二次响应面方程作为目标函数，再利用遗传算法通过 Matlab 软件得到适应函数最小值的锤片结构参数值，优化后锤片的长为 178mm、宽为 67mm、厚度为 7mm，最大变形量降低了 39.8%，锤片的性能得到了进一步提升。且实验的验证结果也验证了其适用于指导生产的合理性。

参考文献:

[1] 贺殿民, 曹丽英. 锤片式饲料粉碎机物料流道内的流场仿真分析 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40 (7) : 68-72.

[2] 税加坤, 廖凯, 杨蹈宇, 等. 木桩粉碎机关键部件设计与工艺参数分析 [J]. 机械强度, 2021, 43 (6) : 1402-1408.

[3] 王迪, 田海清, 李大鹏, 等. 锤片式粉碎机不同筛片作用下流场特征分析与试验 [J]. 农机化研究, 2023, 45 (7) : 8-13.

[4] 徐伟, 曹春平, 孙宇. 锤片式粉碎机锤片结构参数优化设计 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (1) : 27-33.

[5] 张文顺, 陈家敏. 浅谈锤式粉碎机锤片断裂原因分析及预防 [J]. 中国机械, 2020 (2) : 139-140.

[6] 耿达, 项汉桢. 基于离散元法的立式粉碎机刀具数量分析与研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57 (5) : 13-16.

[7] CHEN PENGFEI, MI GUOFA, HUO XIAOYANG, et al. Design and property study of a new type centrifugal crusher wear block [J]. Integrated Ferroelectrics, 2019, 197 (1) : 83-98.

[8] HEMANT P. JAWALE, ANKUR JAISWAL, KAPIL N. BHASME. Design and analysis of three-axis cantilever type force sensor [J]. Military Operations Research, 2019, 16 (4) : 497-508.

[9] 汪路, 管会生, 彭雄飞, 等. 剪切式破碎机刀具参数的优化研究 [J]. 工程机械, 2022, 53 (09) : 51-58+9.

作者简介: 张艺腾 (1989.06-), 女, 满族, 辽宁大连人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机械设计。