

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2018.03.014

基于 Workbench 无气流引导式振动流化床模态及 谐响应分析

陈林才, 欧阳八生*

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:针对颗粒状烟花开苞药干燥的特殊性,介绍了一种采用热水循环加热的无气流引导式振动流化床的结构原理及相关参数.通过 Ansys workbench 对该振动流化床进行模态计算,得出其模态频率、振型、变形类型及位置,其结果可作为流化效率的优化分析依据.通过谐响应分析,得出在不同频率下的响应曲线,为结构设计避免产生共振提供参考,具有较高的指导意义.

关键词:开苞药;干燥;振动流化床;ansys workbench;模态分析;谐响应分析

中图分类号:TB24 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2018)03-0078-06

The Modal and Harmonic Response Analysis of a Non Airflow Guided Vibrating Fluidized Bed Based on Workbench

CHEN Lincui, OUYANG Basheng*

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hunan, Hengyang 421001, China)

Abstract: In view of the particularities of drying of granular fireworks, the article introduces the structure principle and related parameters of a non air flow guided vibratory fluidized bed heated by hot water. With the modal vibration fluidized bed by Ansys Workbench calculation, the results of the modal frequency and vibration type, deformation type and position can be used to optimize the flow of efficiency analysis basis; through harmonic response analysis, the response curve is obtained under different frequencies, and provides a reference for the structure design to avoid resonance. This article has more high instructional significance.

key words: dryness; drying; vibrated fluidized bed; Ansys Workbench; modal analysis; harmonic response analysis

收稿日期:2018-03-10

作者简介:陈林才(1991-),男,硕士研究生,主要从事先进制造技术方面的研究.E-mail:chenlc1991@foxmail.com.*

通信作者:欧阳八生(1963-),男,教授,主要从事于机械设计制造及自动化方面的研究.E-mail:bsouyang@163.com

0 引言

传统的烟花开苞药^[1]是由多种超细(粒径 $< 74\ \mu\text{m}$)的化工原料直接由手工混制而成的具有爆炸性能的粉末状混合物,其制造过程既不安全又不环保;新型的颗粒状烟花开苞药(粒度 $762\ \text{mm}\sim 1\ 016\ \text{mm}$),它是把各种超细原料与酒精胶溶液^[2]通过专业搅拌机湿式搅拌后,再进行滚挤造粒,最后经振动流化床干燥而得到,其制造过程有利于自动化设备安全和洁净生产。

目前国内外广泛应用的振动流化技术,基本以振动方式为主和热风引导辅助进行输送及干燥,在化工、食品、医药和饲料等行业得到了广泛的应用^[3]。由于现有的振动流化床^[4]主要是采用热风加热方式,具有较高的进风温度,造成床内的温度过高,对烟花开苞药不安全,容易引起爆炸;另一方面热风都会带有一定压力,使风速较快,极易把微细烟花开苞药颗粒吹起来产生扬尘,危险度极高,同时细粉颗粒容易被吸尘装置吸走,造成损失率很高。针对像烟花开苞药这种颗粒极细的物料,振动流化床存在沟流、死区和局部过热等问题^[5],而且当颗粒分布比较散的时候容易产生返混夹带现象^[6];另外,特别重要的是烟花开苞药是一种危险性极高的化学物料,其干燥过程需要极高的安全性和洁净性,因此,需要对传统的振动流化床结构和干燥方式进行合理设计,以满足特殊工况条件的要求。

影响振动流化床干燥效率因素有很多^[7],过去仅凭经验公式来确定,本文利用 Ansys 对流化输送过程进行有限元模拟分析,通过模态分析和谐响应分析^[8],可以确定振动流化床的固有频率

和振型^[9],从而使振动流化床的设计避免共振,找出合适的振动频率等相关参数,为振动流化床的优化设计提供了参考。

1 无气流引导式振动流化床的结构和原理

无气流引导式振动流化床的基本结构如图 1 所示。它由入料口、上盖、床体、热水循环加热系统、水末除尘装置、振动电机、隔振弹簧、出料口以及支架等部分组成。前后 2 个振动电机安装在床体中部,整个床体通过 4 个隔振弹簧与支架相连,上盖通过支架的 4 个支撑脚用螺栓固定。床体内部装有热水循环管路,其管道接口与热水循环加热系统相连,上盖几个排气口与水末除尘装置相接。

其工作原理如下:当振动电机起动,在电机激振力的作用下床体产生振动,物料由入料口进入流化床床体的送料板,随着流化床中的送料板一起振动而连续向前产生抛物跃动^[10],同时物料通过床体送料板底下热水循环进行加热,使物料中的酒精加热快速挥发并被抽气泵由排气口抽走,再经水末除尘装置净化后排出。物料在流化床中产生流化状态,有利于输送和充分干燥,物料经过一段连续的输送和充分干燥后,再经过一段冷水循环冷却至室温防止受潮,最后从出料口流出。

调整振动电机的安装角度 δ 以及偏心振锤的位置可以调整物料的振动方向和振动幅度 A ,改变振动电机的振动频率 ω 可以调整物料的振动频率,改变流化床的结构尺寸参数可以控制物料的流动速度,从而影响干燥效率,振动流化模型的工作原理可简化为如图 2 所示。

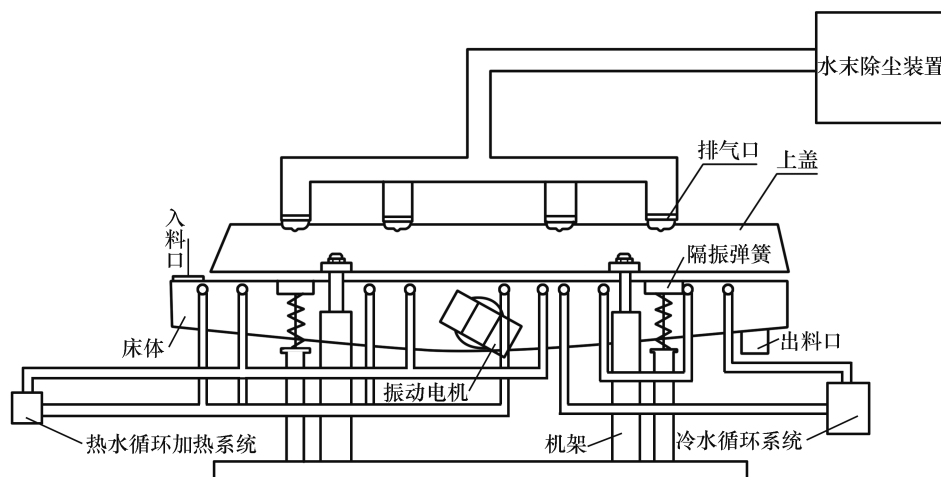
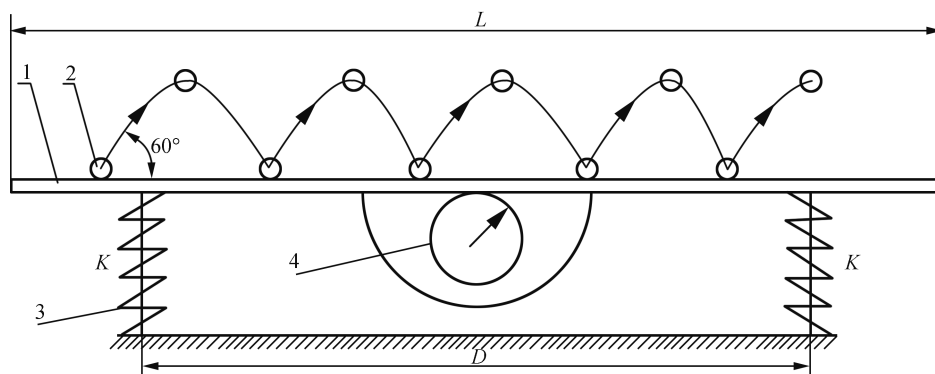


图 1 振动流化床结构简图

Fig.1 Structure of vibrated fluidized bed structure



1-送料板;2-烟花开苞药;3-隔振弹簧;4-振动电机。

图2 振动流化床的原理示意图

Fig.2 The Schematic diagram of a vibrated fluidized bed

2 仿真力学模型建立

2.1 工况条件分析

振动流化床要求的工作频率范围为 $0 \sim 80$ Hz, 参加振动的质量为 $4\,000$ kg, 驱动信号为正弦变化。振动流化床的相关参数列于表1。

表1 振动流化床的相关参数

Table 1 Related parameters of a vibrated fluidized bed

名称	数值
工作频率范围/Hz	$0 \sim 80$
弹簧刚度 $K/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	208.18
弹簧距离 D/mm	5 480
参加振动的质量/kg	4 000
送料板的尺寸(长宽厚)/m	$7\,500 \times 900 \times 300$
激振力 F/N	45 278

2.2 力学模型的建立

由图2可知,振动流化床的力学模型可简化成一块送料板(送料板的尺寸如图3所示)和四个弹簧,其它相关参数如表1。模型直接可以使用workbench的DM模块建立,由于送料板在厚度方向的尺寸远小于其在长度方向的尺寸,所以建立壳单元模型,模型如图4所示。

送料板所采用的材料为不锈钢(0Cr18Ni9), 密度为 $\rho = 7\,930 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 2.04 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比为 $\mu = 0.28$ 。

3 模态分析

3.1 模态分析的理论基础

模态分析可以帮助设计人员确定结构的固有频率和振型,从而避免结构产生共振。通过结构的

模态分析可以有效地选择合理的设计方案,对结构进行有效的验证^[11]。无阻尼模态分析是经典的特征值问题,动力学问题的运动方程为:

$$[M]\{x''\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

其中, $[M]$ 是结构质量矩阵; $\{x''\}$ 是节点加速矢量; $[K]$ 是结构刚度矩阵; $\{x\}$ 节点位移矢量。

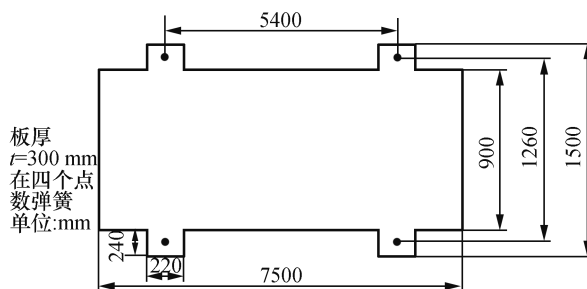


图3 送料板的尺寸

Fig.3 Size of feed plate

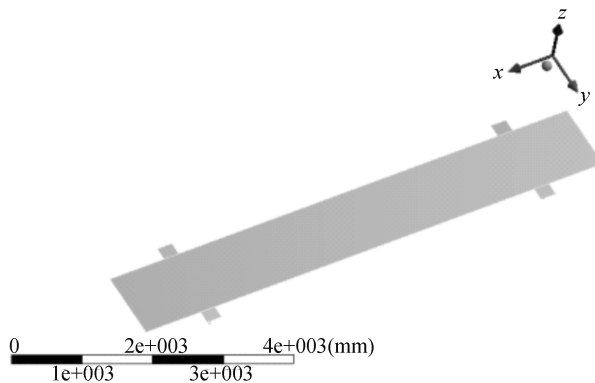


图4 壳单元模型

Fig.4 Shell element model

结构的自由振动为简谐振动,即位移为正弦函数:

$$x = x \sin(\omega t) \quad (2)$$

代入式(1)得:

$$([K] - \omega^2 [M]) \{x\} = \{0\} \quad (3)$$

式(3)为经典的特征值问题,此方程的特征值为 ω_i^2 ,其开方 ω_i 就是自振圆频率,自振频率为 $f = \omega_i / (2\pi)$.

特征值 ω_i 对应的特征向量 $\{x\}_i$ 为自振频率 $f = \omega_i / (2\pi)$ 对应的振型。 ω_i 为第 i 阶固有角频率,固有频率由系统的刚度矩阵 $[K]$ 和质量矩阵 $[M]$ 来决定的.所以提高固有频率就能提高振动流化床的单位质量刚度.

3.2 网格划分及施加约束

Workbench 中提供自动和手动划分两种划分方法,本模型采用手动划分方法,网格划分的尺寸为 0.1 m,单元数为 773,节点数为 865 个.

3.3 求解结果及分析

运用 Workbench 对送料板进行模态计算,得出其前十阶模态频率及振型,如表 2 所示.

表 2 前十阶模态频率及振型

Table 2 The first ten order modal frequencies and modes of vibration

阶次	频率/Hz	模态振型
1	1.05	送料板沿 Z 轴平移振动
2	1.32	送料板沿 Y 轴摆动,两端发生弯曲变形
3	2.05	送料板沿 X 轴摆动
4	27.50	送料板沿 Y 轴摆动,两端发生弯曲变形
5	75.90	送料板沿 X 轴摆动,两端发生弯曲变形
6	86.70	送料板沿 Y 轴摆动,两端发生弯曲变形
7	99.10	送料板沿 X 轴摆动
8	147.00	送料板沿 Y 轴摆动,两端发生弯曲变形
9	209.00	送料板沿 X 轴摆动
10	210.00	送料板沿 Y 轴摆动,中间发生弯曲

由于此振动流化床的工作频率是在 0 ~ 80 Hz,因此在计算中只提取前 5 阶模态数据进行分析.从表 2 可以看出,随着模态阶数的提高,振动流化床的固有频率越高,而且振动流化床的固有频率普遍比较高,在启动过程时振动电机的频率会慢慢加速到工作频率,但在这过程中,振动流化床的振动频率会经过固有频率(共振区),设备

会产生比较大的幅度的振动.振动流化床正常工作时的频率是在 10~80 Hz,所以设计振动流化床时,它的工作频率要避开 27.5 Hz 和 75.9 Hz,第 4 阶和 5 阶的模态云变如图 5 和图 6 所示.

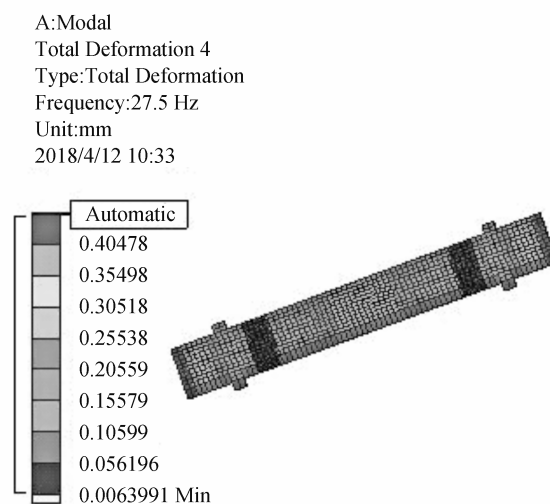


图 5 第四阶模态结果

Fig.5 Results of the fourth-step mode

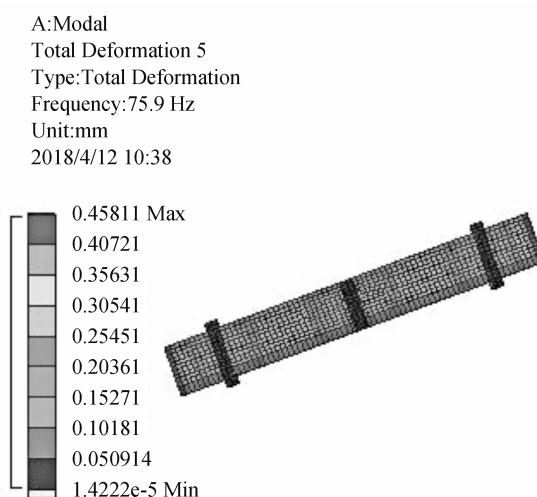


图 6 第五阶模态结果

Fig.6 Results of the fifth-step mode

4 谐响应分析

谐响应分析是一种频域分析,用于确定结构在已知频率和幅值的正弦载荷作用下的稳态响应^[12].谐响应分析可以计算出结构在多种频率下的响应,并得到这些值对频率的曲线.在这些曲线上能够找到“峰值”响应,并进一步确定峰值频率对应的应力,从而验证机械结构的设计是否能够

经受住不同频率下各种正弦载荷、能否避免结构产生共振或有效降低结构疲劳破坏^[13].本文中的送料板所受驱动载荷为正弦变化,因此 workbench 中的谐响应分析能反映振动流化床的受迫振动情况.

4.1 载荷及约束

如上述的模态分析的约束条件,将边界约束条件设置为送料板只能竖直运动(Z 轴方向),不能沿 X 或 Y 轴方向移动,约束方式为位移约束.

载荷:振动流化床的驱动载荷是通过振动电机产生的激振力传递到送料板上,然后通过减振弹簧对振动流化床进行减振.所载荷的加载位置为送料板底部,驱动力为正弦信号载荷,载荷大小为 45 278 N,载荷方向为与水平方向成 60° ,振动流化床的载荷及约束示如图 7 所示.

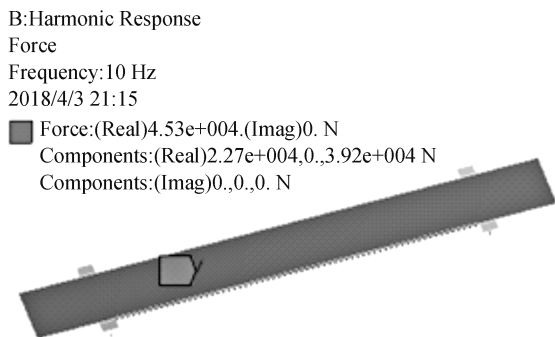


图 7 振动流化床的载荷及约束

Fig.7 The load and constraint of a vibrated fluidized bed

4.2 求解及结果分析

设定谐响应分析的范围为 $0 \sim 80$ Hz,谐响应分析的间隔频率为 80 Hz,结构的阻尼设为 $0.002 \text{ N} \cdot \text{s/m}$.根据上面的参数设定,得到相应的模拟仿真结果,在这里列出送料板的总变形、轴向的等效变形和频率响应的分析结果.结论如下:1)送料板的总变形量如图 8 所示,送料板的总变形在不同频率点处的差别不大,最大的总变形量为 $0.009 61 \text{ mm}$,最小的总变形量为 0.009 mm .此处的变形不是发生在指定方向上;2)在指定方向上(Z 轴)送料板的变形如图 9 所示.在 1 Hz 和 28 Hz 附近时,送料板在 Z 轴方向的变形有突变,说明在这个频率下的激振力能够引起振动流化床的共振,对设备造成非常大的伤害.由于振动流化床在启动过程中,振动电机的频率是从 0 转速慢慢加速到正常的工作转速,振动流化床的频率也会逐

渐增加,当达到 1 Hz 附近时,振动流化床经过共振区,设备产生的振幅很大,但因为振动电机的转速很快,因此振动流化床经过共振区的时间很短,对设备的损害有限.

因为振动流化床正常的工作频率是 $10 \sim 80 \text{ Hz}$,在实际工作过程中,应该避免此频率 (28 Hz) 的激振力,防止振动流化床发生共振.

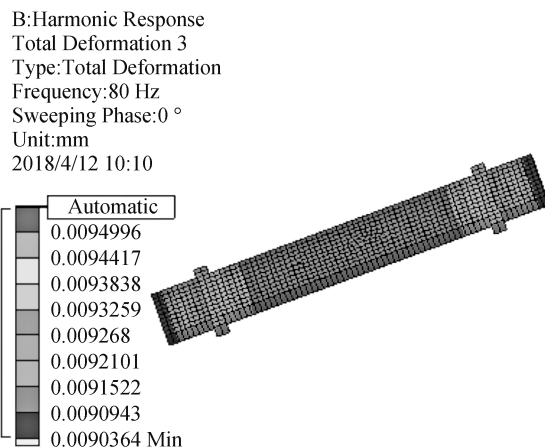


图 8 送料板的总变形

Fig.8 Total deformation of the feeding plate

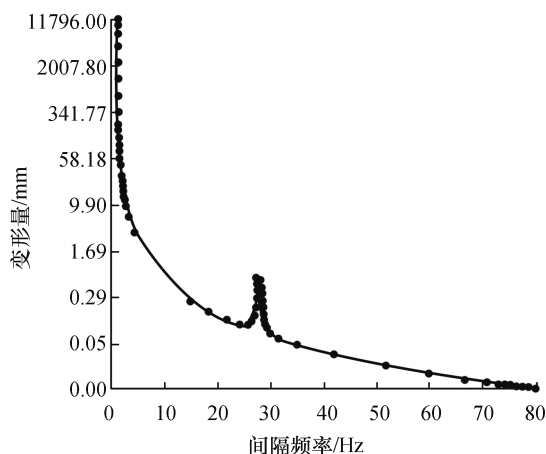


图 9 送料板在 Z 轴方向的变形量

Fig.9 Deformation of the feeding plate in the direction of Z axis

5 结 论

1)运用 Workbench 对振动流化床进行模态分析和谐响应分析,得出了其前 10 阶的模态分析图,得出了比较合理的、符合工程性的数据,同时为振动流化床的结构改进提供了更合理经济的依据.

2) 对振动流化床进行谐响应分析, 根据响应频率-变形曲线可以分析出频率对振动流化床的振幅的影响, 最终分析得出频率在 28 Hz 附近时, 送料板在 Z 轴方向的变形有突变, 说明在这个频率下的激振力能够引起共振, 因此, 在实际使用过程中, 应该避免此频率(28 Hz)的激振力, 防止振动流化床发生共振。

参考文献:

- [1] 周兆宏. 礼花弹微烟装药的点传火技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [2] KUMAR M, VARSHNEY L, FRANCIS S. Radiolytic formation of Ag clusters in aqueous polyvinyl alcohol solution and hydrogel matrix[J]. Radiation physics & chemistry, 2005, 73(1): 21-27.
- [3] 王艳, 吴厚材. 振动流化床的特性与使用[J]. 橡塑技术与装备, 2009, 35(6): 33-38.
- [4] PAUL W C, MATTHEW D S, ROB D M. Separation performance of double-deck banana screens-part 2: quantitative predictions[J]. Minerals engineering, 2009, 22(14): 1230-1244.
- [5] 张琦, 王国恒. 一种新型干燥装置-脉冲流化床干燥器[J]. 工业炉, 2005, 27(2): 9-10.
- [6] 许伟伟, 金有海, 王建军. 两种不同入口形式的旋风分离器内流动分布的对比研究[J]. 流体机械, 2009, 37(10): 1-6.
- [7] LI J, LIU C S, ZHAO Y M, et al. Dynamic characteristics and experimental study on a novel structure of vibrating fluidized bed[J]. Journal of china coal society, 2013, 38(10): 1882-1887.
- [8] LASCU C, ASIMINOAEI L, BOLDEA I, et al. Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(2): 337-347.
- [9] 高天浩, 闫银发, 李法德, 等. 振动流化床茶叶干燥机设计[J]. 农业工程, 2015, 5(6): 81-87.
- [10] SONG Y, JIANG X H, SONG J, et al. Dynamic analysis of a chaotic vibrating screen[J]. Procedia earth and planetary science, 2009, 1(1): 1525-1531.
- [11] 周小燕, 李兵, 孔芬霞, 等. 基于 ANSYS Workbench 柴油机后处理装置的模态分析[J]. 机电工程, 2011, 28(8): 928-930.
- [12] 黄志新. ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016: 262.
- [13] 张营, 姜昱祥, 王金生. 基于 Ansys Workbench 的室内清洁车清洁架的模态与谐响应分析[J]. 内燃机与配件, 2017(13): 16-18.

(责任编辑: 龙威)