DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.01.014

# 新型翻袋式离心机的转鼓结构设计及优化

王雪°,申燚<sup>a,b</sup>,汪立文°,朱宇迪°,章立°

(江苏科技大学 a.机电与动力工程学院;b. 张家港江苏科技大学产业技术研究院,江苏 张家港 215600)

摘 要:翻袋式离心机因密闭作业、完全卸料等优点近年来得到广泛关注。为进一步提高该离 心机的分离效率,实现设备轻量化、高效化,对离心机的关键部件转鼓进行了设计优化。设计 转鼓结构,获得初始壁厚和开孔值,以此作为优化参数,以降低质量、提高过滤面积为目标,建 立多目标数学优化模型;在保证强度和刚度条件下,通过不同参数选取和优化来获得最优值。 数值分析结果表明,优化设计使转鼓质量降低了 13.25%,过滤面积提高了 56.28%,有效改善了 设备分离效率。 关键词:翻袋式离心机;转鼓;开孔;有限元优化 中图分类号:TQ051.84 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2020)01-0047-05

#### Design and Optimization of Drum Structure of New Invertible Filter Centrifuge

WANG Xue<sup>a</sup>, SHEN Yi <sup>a,b</sup>, WANG Liwen<sup>a</sup>, ZHU Yudi<sup>a</sup>, ZHANG Li<sup>a</sup>

(a. School of Mechanics and Power Engineering; b. Zhangjiagang Industrial Technology Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: The invertible filter centrifuge attracts extensive attention in recent years due to its advantages such as closed operation and complete unloading. To further improve its separation efficiency and make the equipment lighter and higher efficient, the drum design in the centrifuge should be optimized. Then, its structure is designed to obtain the initial wall thickness and opening value which are used as the optimization parameters used to establish a multi-objective mathematical optimization model, reduce the mass and increase the filtration area. Under the condition of ensuring the strength and stiffness, the optimal parameters are obtained by selecting different parameters. The data analysis results show that the drum mass is reduced by 13.25%, the area of filtration is increased by 56.28%, thus improving the separation efficiency of the equipment effectively.

Keywords: invertible filter centrifuge; drum; perforation; finite element optimization

# 0 引言

随着 GMP 和 FDA 等药品生产规范的执行,制药工业 生产要求越来越严格。翻袋式离心机因其密闭作业、完全 卸料等优点而得到广泛关注。转鼓是离心设备的关键部 件,在高速运转下承载着物料的过滤与分离,决定着离心 机的生产能力。一旦发生强度或刚度破坏将造成筒体崩 裂,引发安全事故。因此,国内外专家将离心机转鼓优化 作为离心设备的重点研究之一。周征等[1]针对卧式沉降 离心机,在有限元分析的基础上进行了转鼓厚度及局部部 位的优化:刘建华等<sup>[2]</sup>针对转鼓的特殊工况进行了线性 屈曲分析,寻找最大受力与变形;曹尉南等<sup>[3]</sup>运用多尺度 均匀化理论,用未开孔当量板代替真实开孔版,综合 AN-SYS 二次开发功能,完成了转鼓模型的结构优化;毛文贵 等<sup>[4]</sup>针对转鼓建立频响特性函数,进行模态分析,并求解 其危险点和振型,数据分析显示出壁厚在转鼓设计中的重 要性。现有转鼓设计与优化,多以厚度为变量,以轻量化 为单一优化目标,以刚度条件为必要条件而非充要条件,

优化效果不明显,且存在片面性。为此,文中针对新型翻 袋式离心机,以壁厚、开孔参数为优化变量,通过多目标优 化模型来获得转鼓最优设计参数,从而达到轻量化和高效 化的目的。

# 1 翻袋式离心机结构及工作原理

翻袋式离心机结构如图 1 所示。当转鼓以工作速度 运行时,离心力使物料均匀地分布在转鼓的滤布内,液相 被过滤,固相则于筛网上形成多层滤渣。卸料时,首先主 电机降速,然后辅助电机带动内轴推出推料盘。此时滤布 内外翻转,物料被翻转至滤布外侧并通过离心力甩出,实 现完全卸料<sup>[5-6]</sup>。全过程无需人工接触,完全符合药品工 业的安全、清洁生产要求。

# 2 翻袋式离心机转鼓结构设计

#### 2.1 壁厚设计

转鼓壁厚对转鼓性能影响很大,是离心设备最基础的

**基金项目**:2018年度张家港市产学研预研资金项目(18ZCXY05) 第一作者简介:王雪(1997—),女,学士,主要从事机械结构设计与优化。



1—推料盘;2—滤布;3—筛网;4—转鼓罩;5—转鼓;6—内轴;
 7—机壳;8—外轴;9—主电机;10—辅助电机;11—机架;12—出料罩。
 图 1 翻袋式离心机整体结构图

设计参数<sup>[4]</sup>,该值太小,容易造成强度不足,造成安全事故;该值过大,会加重质量,造成生产和运作资金升高、分 离效率降低。为此,文中先根据传统计算方法设计初始壁 厚<sup>[5]</sup>,再利用有限元优化,在强度和刚度条件约束下优化 出最佳壁厚。

初始壁厚设计计算如式(1)-式(3)所示。

$$\delta \geq \frac{\sigma_0}{2} \cdot \frac{\eta \cdot R \cdot K}{[\sigma] - \sigma_0 \cdot (1 - \lambda)} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{\rho_w}{\rho_0 \cdot (1 - \lambda)} \tag{2}$$

$$R = \frac{D}{2} \tag{3}$$

式中: $\delta$ 为转鼓壁厚, mm; $\sigma_0$ 为周向应力, MPa; $[\sigma]$ 为许 用应力, MPa; $\rho_w$ 为物料密度, kg/m<sup>3</sup>; $\rho_0$ 为材料密度, kg/m<sup>3</sup>; $\lambda$ 为开孔率,%;R为转鼓内半径, mm;D为转鼓直 径, mm;K为满载率,取 0.8。

# 2.2 开孔设计

转鼓开孔不仅会降低其承载力、减弱其强度,而且会破 坏转鼓的连续性,因而易造成应力集中。大量数值分析表明, 三角形排列开孔方式的转鼓强度刚度优于四边形排列<sup>[3]</sup>,圆 孔边缘应力集中程度最低,为此文中开孔如图2所示。



图 2 中, d 为开孔孔径, mm, t<sub>1</sub>为相邻两孔间轴向间距,

 $mm, t_2$ 为相邻两孔间斜向间距,  $mm, \theta$ 为孔连线夹角, (°)。

此外,为减小滤液流动阻力,便于物料甩出<sup>[7]</sup>,文中 采用倾斜孔结构,初始值取 15°。表 1 给出了不同圆孔形 的应力应变性能比较。由表 1 中可以看出,同等参数下直 孔与斜孔的应力应变相差不大,但斜孔会更利于滤液分 离。

项目	应力值	应变值	
开直孔	105.29/MPa	0.116 53/mm	
开斜孔	99.718/MPa	0.116 84/mm	
相差百分比	5.29/%	0.27/%	

为了进一步增加翻袋式离心机的过滤面积,提高分离 效率,文中以孔径、孔间距、孔夹角为开孔设计参数,首先 在传统弹性力学无力矩理论基础上,设计初始孔径值;然 后通过有限元求解来获得最佳开孔参数。

开孔率<sup>[8]</sup>计算如下:

削弱系数:
$$\kappa = 1 - \frac{\pi d^2}{4t_1 \cdot t_2 \cdot \sin\theta}$$
 (4)

开孔面积:
$$S=2\pi \cdot \frac{D}{2} \cdot h \cdot (1-\kappa)$$
 (5)

开孔率: 
$$\lambda = \frac{S}{2\pi D \cdot h}$$
 (6)

式中: κ为削弱系数, S为开孔面积, h为转鼓高度。

文中所设计翻袋式离心机转鼓的公称直径为 600 mm,由此计算转鼓初始参数。鼓壁厚度为 12 mm、开 孔直径 d 为 8 mm、孔轴向间距  $t_1$ 为 25 mm、孔斜向间距  $t_2$ 为 25 mm、孔夹角为 60°、开孔倾角为 15°,初始开孔率为 4.64%。

# 3 优化分析

## 3.1 多目标优化数学模型

以离心机的轻量化、高效化为优化目标,以转鼓壁厚  $\delta$ 、开孔孔径 d、孔间距  $t_1$ 和  $t_2$ 、孔连线夹角  $\theta$  为优化参数, 在满足强度与刚度的同时,建立如下翻袋式离心机转鼓优 化模型,在轻量化同时有着较大开孔率<sup>[9]</sup>。

$$y = f(\delta, d, t_1, t_2, \theta)$$
s.t.  $\sigma(\gamma) \leq \lceil \sigma \rceil$ ,  $k(\gamma) \leq \lceil k \rceil$ 

$$(7)$$

式中: $\sigma(y)$ 为转鼓最大应力;  $[\sigma]$ 为转鼓材料许用应力; k(y)为转鼓最大应变; [k]为转鼓材料许用应变。

### 3.2 有限元优化模型

转鼓材料选用不锈钢 0Cr17Ni12Mo2,弹性模量  $E = 1.93 \times 10^{11}$ ,密度  $\rho = 7930 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比取  $\varepsilon = 0.29$ 。常温下,材料的抗拉强度  $\sigma_b = 515 \text{ MPa}$ ,屈服强度  $\sigma_{0.2} = 205 \text{ MPa}_{\odot}$ 

首先对参数化模型的小尺寸结构进行简化<sup>[5]</sup>,然后 经过网格划分处理后,建立最终的有限元模型。

### 3.3 工况载荷及约束条件分析

通过分析该离心机的工作过程[10],选取转鼓闭合满

载时工况作为分析对象,此时所设计直径 600 mm 转鼓的 最大运转速度达 2000 r/min,滤布等造成液压力约 0.5 MPa。同时以切向自由的圆柱约束作轴承约束,以压 缩约束限制转鼓轴向位移。

#### 3.4 转鼓厚度优化分析

选择神经网络元模型,先进行最基本参数转鼓壁厚δ 优化分析,在壁厚保证的基础上进行最佳开孔参数优化, 并不断进行模型修正和增设样本点,从而提高最大应力应 变随样本点的拟合度。

转鼓优化前初始壁厚为 12 nm,转鼓质量 123.67 kg, 最大应力值 103.92 MPa,最大应变值 0.118 78 nm。图 3 为 壁厚分析,由图 3 中可以看出随着鼓壁厚度的增加,最大 应力值逐渐减小。在壁厚约 11 nm 时有极小值,约 13 nm 有极大值。从应力分析和材料利用角度考虑,最佳壁厚时 应在满足强度下取尽可能小的值,取值范围为 6 nm~ 11 nm。最大应变随着厚度的增加而减小,当壁厚增加至 8 nm,最大应变变化很小,壁厚的增加不能显著地减小应 变值,反而增加质量和功耗。当壁厚>6 nm,即能够满足 刚度条件。为了能在保证强度和刚度下,尽可能增加结构 开孔面积来提高过滤分离效率,综合分析后壁厚取 8 nm, 优化后转鼓质量为 110.75 kg,最大应力值为 125.11 MPa, 最大应变值为 0.121 88 nm。



#### 3.5 开孔参数优化分析

开孔参数优化建立在所优化的 8 mm 壁厚基础上,开 孔的初始参数为孔径 8 mm、轴向和斜向孔间距皆为 25 mm、孔间连线夹角 60°。由式(5)计算出初始的开孔过 滤面积为 48 138.55 mm<sup>2</sup>。

孔径大小是开孔参数中的主要因素,间接影响其他开 孔参数。在壁厚优化基础上先进行如图 4 所示的孔径大 小优化分析。由图 4 中可以看出,最大应力随孔径增大而 减小,在孔径为 12 mm,减小速度开始明显变大。由于开 孔造成应力集中,转鼓最大应力发生在开孔边缘处,孔径 越小,应力集中越明显。在一定范围内,适当增加孔径的 大小有利于应力减小。最大应变随孔径增大而增大,在近 12 mm 处为转变点。若开孔过大,则处于高速运转过程的 转鼓易产生变形。

综上分析,为保证转鼓的强度和刚度,孔径最优值取 12 mm,优化后的开孔面积为 108 311.74 mm<sup>2</sup>,最大应力值 为 119.25 MPa,最大应变值为 0.131 27 mm。

在 8 mm 壁厚, 12 mm 孔径的基础上, 基于多目标



神经网络元模型,进行孔间距 $t_1$ 、 $t_2$ 和孔夹角 $\theta$ 3个因 素综合分析,从而优化出开孔最优排列方式。转鼓质 量、最大应力、最大应变随开孔间距变化如图5所示, 随开孔夹角变化如图 6 所示。结合图形,将孔的轴向 间距 $t_1$ 、孔的斜向间距 $t_2$ 和开孔夹角 $\theta$ 综合分析可以得 出,开孔参数优化结果:轴向间距 t<sub>1</sub>为26.25 mm,斜向 间距 t<sub>2</sub>为 25.15 mm, 孔夹角为 55°, 开孔面积为 108406.26 mm<sup>2</sup>.应力、应变分别为117.33 MPa、0.130 51 mm。对优化 参数结果进一步取整后,轴向间距 t,取值 26 mm,斜向间 距t,取值25mm,而最大应力、应变最终分别为 120.75 MPa、0.135 59 mm。优化参数的最优值点如图 6 标 注在开孔夹角的二维分析图上。经过优化后,最终的转鼓 质量为 107.27 kg,减少了 16.40 kg,过滤面积为 110 105. 32 mm<sup>2</sup>,相比原来增加了 61 966.77 mm<sup>2</sup>。开孔率由 4.64% 提高至 10.62%,在保证强度、刚度的同时,降低了转鼓的 质量和运行能耗,有效提高了材料利用率和分离效率。总 体上,转鼓质量降低了 13.25%,开孔过滤面积提高了 56.28%











#### 模态分析 4

翻袋式离心机设计本身能够很好降低离心机的振动. 但不能保证不发生共振问题,因此需要进行模态分析。分 析计算转鼓的固有频率和振型,从而使设计避开共振。转 鼓的第1、3、6、8阶模态振型图如图7所示。

由于转鼓的周向运动,在切向方向上转鼓有1个旋转 自由度,所以第1阶固有频率理论为0,而因模型精度和 计算精度等影响,第1阶固有频率近似为0。所以,分析 结果的第2阶模态为转鼓的第1阶模态。由表2转鼓的 前8阶模态结果知,分析计算的临界转速远大于离心机的 最大工作转速 2000 r/min,其结果满足设计要求。



表 2 各阶模态分析结果

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
频率 f/Hz	215.95	216.82	218.00	218.04	313.63	462.44	462.45	815.31
临界转速 n/(r・min <sup>-1</sup> )	12 957.0	13 009.2	13 080.0	13 082.4	18 817.8	27 746.4	27 747.0	48 918.6

#### 结语 5

40

50

60 开孔夹角/(°) (b) 开孔夹角-应力关系

70

80

为了提高翻袋式离心机转鼓的性能,以壁厚、开孔参 数为优化参数,以轻量化、高效化为优化目标,借助有限元 平台建立数学模型,开展了转鼓的多目标优化,通过理论 计算和分析可以得出如下结论:

1) 在转鼓壁厚优化基础上,开展开孔参数对转鼓性 能的影响分析以及优化,有助于进一步提高转鼓的分离效 率;

2) 以强度和刚度为充要限制条件,通过多目标优化 转鼓设计参数,有助于降低转鼓质量,提高过滤面积,减少 运行能耗和制造成本;

3) 在数值优化分析过程中,同时发现改变转鼓筒体

加工方式或合理设置有预应力的加强箍,可进一步提高转 鼓性能。

#### 参考文献:

- [1] 周征, 王晓阳. 煤矿爆破震动中卧式沉降过滤式离心机转鼓 性能优化设计[J]. 科技通报, 2017, 33(1):133-136.
- [2] 刘建华,赵立宏,周其旺. 基于 ANSYS Workbench 的立式离 心机转鼓动力学分析[J]. 机械工程与自动化, 2013(1):56-57.
- [3] 曹尉南,谢桂兰,龚曙光,等.均匀化理论在开孔转鼓结构优 化中的应用研究[J].中国机械工程,2006,17(9):937-940.
- [4] 毛文贵,李建华,傅彩明,等.基于模态分析的转鼓优化设计[J].机械设计,2010,27(6):71-74.
- [5] 李焕. 利用 ANSYS 软件对翻袋式过滤离心机转鼓结构与轴 系振动的设计与计算[D]. 北京:北京化工大学, 2000.

- [6] MAYER Gerd Ph (De), GERTEIS Hans. Invertible filter centrifuge: DE,10115381 [P]. 2002-10-24.
- [7] 马新龙. 双级活塞推料离心机转鼓开孔结构优化设计研究 [D]. 天津:天津大学, 2014.
- [8] 周连刚. 离心机转鼓开孔问题的研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- [9] VAN Quynh Le, KHAC Tuan Nguyen. Optimal design parameters of cab's isolation system for vibratory roller using a multi-objective genetic algorithm [J]. Applied Mechanics and Materials, 2018,457:81-85.
- [10] 范德顺, 李焕. 翻袋式离心机简介[J]. 过滤与分离, 2000, 10(3):35-37.

收稿日期:2018-11-16

(上接第25页)

$$\tan \theta = \frac{BD}{AB} = \frac{BC}{BE}$$
$$AD = \frac{BD}{\sin \theta} \quad CE = \frac{BC}{\sin \theta}$$

$$\tan \alpha = \frac{E'F}{A'F}$$
$$A'F = AD - CE = \frac{BD - BC}{\sin \theta} = \frac{CD}{\sin \theta}$$
$$E'F = CD$$
$$A'F \cdot \tan \alpha = A'F \cdot \sin \theta$$
$$\tan \alpha = \sin \theta$$

由此可得  $\alpha$  = 12.213°,旋转后如图中箭头所示。台阶 高度为 6 mm,因此平面度为:T = 6×sin0.112 = 0.011 mm,这 与三坐标测量台阶平面度 0.009 mm 非常接近,意味着台 阶处数据拟合精度高。

# 4 结语

 1)设计并制作标准圆柱用于误差表征,提出误差补 偿算法;通过测量及拟合,给出不同角度下误差补偿值在 -0.01mm~0.021mm之间,该值主要是卡盘跳动误差及尾 架偏差。

2)误差补偿前后分别对测量点云进行模型重构,结 果表明,补偿前测量偏差在0.0146mm~0.0193mm之间, 补偿后精度可达0.0055mm~0.0076mm。

3) 激光测量台阶平面度为 0.011 mm, 与三坐标测量 机所测 0.009 mm 相近, 表明该测量方法可行。

#### 参考文献:

[1] 郑相周, 傅国栋, 黄思, 等. 车床主轴回转精度测量系统的 研制[J]. 机械, 2011, 38(9): 77-80.

- [2] SHOJI N, TADAO T, ATSUSHI S. Evaluation method to determine radial accuracy of high-precision rotating spindle units[J].
   Precision Engineering, 1995, 17(4): 266-273.
- [3] ROBERT G, ERIC M, RYAN V. Techniques for calibrating spindles with nanometer error motion[J]. Precision Engineering, 2005, 29(1): 113-123.
- [4] DING L J, DAI S G, MU P A. CAD-Based Path Planning for 3D laser scanning of complex surface [J]. 2nd International Conference on Intelligent Computing, Communication & Convergence, 2016,92: 526-535.
- [5] 王禹, 袁楚明, 陈幼平. BP 神经网络在非接触测量路径规划 中的应用[J]. 机械与电子, 2012(9): 35-39.
- [6] 高瑞,李泷杲,黄翔,等.复杂曲面零件散乱点云特征点提取[J]. 航空制造技术,2017(13):60-65.
- [7] 沈琰辉, 刘华文, 徐晓丹, 等. 基于邻域离散度的异常点检测算法[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(12): 1763-1772.
- [8] LEE S H, SEO J K. Noise removal with gauss curvature-driven diffusion[J]. IEEE Transations on Image Processing, 2005, 14 (7):904-909.
- [9] KLAUS W, MATTHIAS F, FRANK H. Measuring large 3D structures using for portable tracking laser intererometers[J]. Measurement, 2012, 45(10): 2339-2345.
- [10] NISHIKAWA S, OHNO K, MORI M, et al. No-contact type on -machine measurement system for turbine blade [J]. New Production Technologies in Aerospace Industry-5th Machining Innovations Conference, 2014,24: 1-6.
- [11] YANG P C, LIU Y, FANG S P, et al. Interferogram stitching method in measuring the form deviation of curved surface with laser interferometry [J]. Optics Communications, 2017, 387: 303-309.

收稿日期:2019-04-15