

## 旋风除尘器结构尺寸优化设计

孙志国 许琦

(盐城工专化学工程系, 盐城, 224003)

**摘要** 正确评价和设计性能优良的旋风除尘器对满足生产工艺要求, 节约能源和环境保护等意义十分重大。从结构尺寸优化设计来寻求旋风除尘器最大分离效率, 为除尘器结构设计和性能综合评价提供依据。

**关键词** 旋风除尘器 分级效率 复合形

**分类号** X78

### 前言

旋风除尘器是一种效率较高、适用范围较广的分离设备, 广泛用于石油、化工、建材、食品等工业方面。但因旋风除尘器内两相流的运动规律及气固两相分离机理十分复杂, 影响旋风除尘器性能的因素很多, 致使旋风除尘的设计尚带有一定经验性, 有时设备制作费用和操作费用加大了, 分离效果还不甚理想。

本文在文献[1]处理方法的基础上, 采用复合形优化设计方法, 研究了在工业操作工况下, 旋风除尘器效率最大时的最佳尺寸比, 按优化结构尺寸比制作的旋风除尘器, 其分离效率达到最高, 并与常规设计进行比较分析, 为设计出高效、低能耗的除尘器探索有效途径。

### 一、优化设计的数学模型

评价旋风除尘器主要从技术性能( $Q$ 、 $\eta$ 、 $\Delta P$ )和经济指标(基建投资、占地面积、使用寿命)二方面来衡量, 其中对性能影响较大的主要是分离效率和压力损失这一对矛盾。因此, 在结构设计中把  $\eta_r/\Delta P \rightarrow \max$  作为追求的目标, 用  $OP$  表示目标函数。

#### 1. 设计变量与目标函数

本文研究的旋风除尘器为标准切向进口型且不装挡板, 主要结构尺寸见图1:

下面先建立目标函数表达式, 对于浓度较高的含尘气流, 主要考虑分离效率, 由于气流中粉尘颗粒直径有一个分布区域, 一般采用分级效率。1973年累思—里兹特(Leith—Licht)根据边界层捕集分离理论推导出了下列除尘器的分级效率公式

$$\eta_r = 1 - \exp[-2(C\psi)^{\frac{1}{2n+2}}] \quad (1)$$

式中:  $C$  为旋风除尘器尺寸比函数, 无因次系数。

$$C = \frac{\pi D_c^2}{ab} \left\{ 2 \left[ 1 - \left( \frac{D_d}{D_c} \right)^2 \right] \left( \frac{1}{D_c} - \frac{a}{2D_c} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{1 + H'_c - H_c}{D_c} \right) \right\}$$

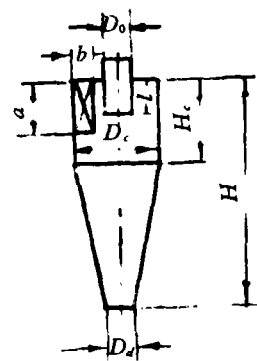


图1

$D_0$ —排气管直径;

$D_c$ —圆筒部直径;

$a$ —进口高度;  $b$ —进口宽度;

$H$ —总高度;  $H_c$ —圆筒高度;

$H'_c$ —假想圆筒高度;

$l$ —排气管在圆筒内部长;

$D_d$ —排料口直径。单位: m

$$\left[1 + \frac{D'}{D_c} + \left(\frac{D'}{D_c}\right)^2\right] + \frac{H_c}{D_c} - \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^2 \frac{H'_c}{D_c} \frac{1}{D_c} \} \quad (2)$$

$D'$  为该点圆锥部分直径(m);  $H'_c$  为自然返回高度(m)。

$$\psi = \frac{(\rho_1 - \rho)d^2 V_j (n+1)}{18\mu D_c}; \text{修正的无因次惯性参数} \quad (3)$$

$\rho_1, \rho$  为固体颗粒及气体的密度( $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ );  $\mu$  为气体的粘度( $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ );  $V_j$  为气体的进口速度(m/s);  $d$  为粉尘颗粒直径(m);  $n$  为速度分布指数, 取  $n=0.7$ 。

由分级效率公式可见: 当  $C\psi \rightarrow \max$  时效率最大, 但因  $\psi$  中含有  $V_j$ , 而  $V_j$  又和气体流量  $Q$  以及含尘气流入截面尺寸有关  $V_j = Q/ab$ , 为使尺寸  $ab$  全部归并到  $C$  系数中去可作如下处理:

(1) 将  $V_j = Q/ab$  和压力降  $\Delta p = 16(ab/D_0^2)\rho V_j^2/2g$  (该式由西菲尔德—拉普尔于 1939 年得出) 合并得

$$D_c^2/ab = P(D_0/D_c)^2 \quad (4)$$

式中  $P$  为压力损失特征系数,  $P = \frac{gD_c^4 \Delta P}{8\rho Q^2}$ 。

$$(2) \text{ 令 } C\psi = C \frac{D_c^2}{ab} \cdot \psi \frac{ab}{D_c^2}, \text{ 再令 } \frac{D_c^2}{ab} = K$$

$$\text{则} \quad C\psi = CK \cdot \psi \frac{1}{K} \quad (5)$$

现在任何固定的  $\psi/K$  值, 代表了一定性质的粉尘和运载介质的流动情况, 以及一定类型的旋风除尘器。当  $CK$  最大时, 除尘器效率最高。故令  $OP = CK$  可作为优化设计时的目标函数, 将无因次系数  $C$  的表达式代入目标函数  $OP$  中, 并由实验得几何尺寸的极限条件

$$\frac{H}{D_c} = 5.0; \frac{H_c}{D_c} = 3.0; \frac{D_d}{D_c} = 0.375, \text{ 最后导出目标函数 } OP \text{ 式}^{[1]}:$$

$$OP = C \frac{D_c^2}{ab} = \pi P^2 \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^4 \left\{ 2\left(1 - \frac{D_0}{D_c}\right)^2 \left[ 5 - 2.3P^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^{\frac{5}{3}} - \frac{1}{P \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^2 \left[ 1 - \left(\frac{D_0}{D_c}\right) \right]} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2}{3} [1 + 0.375 + 0.375^2] + \left[ 1 - \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^2 \right] [2.3P^{\frac{1}{3}} \left(\frac{D_0}{D_c}\right)^{\frac{5}{3}}] - 2 \right. \right\} \quad (6)$$

经过变换, 在目标函数  $OP$  中, 仅有  $D_0/D_c$  和  $P$  两个参变量, 可作为结构尺寸优化设计变量。

## 2、约束条件

(1) 为防止气流短路流入排气管, 除尘器尺寸受公式  $\frac{a}{D_c} \leq \frac{1}{D_c} \leq \frac{H_c}{D_c}$  限制<sup>[2]</sup>。由此可得  $P$  的约束条件

$$5 < P < 140 \quad (7)$$

(2) 为提高除尘效率<sup>[1][2][4]</sup>  $0.2 < \frac{D_0}{D_c} < 0.8$

## 二、优化设计方法

本文研究的目标函数表明是工程低维问题, 因而采用算法简单, 结果可靠, 收敛速度快的复合形方法, 其程序框图见图 2<sup>[3]</sup>。

设计变量  $X(1) = P$ ,

$$X(2) = D_0/D_c$$

优化结果  $L = 10$

(循环次数);

$$X(1) = 31.822070$$

$$X(2) = 0.673648$$

$$OP = 1428.072。$$

### 三、优化设计与常规工程设计比较

已知条件<sup>[4]</sup>: 常温常压含尘空气; 处理气量  $Q$  为  $1300\text{m}^3/\text{h}$ ; 粉尘密度  $\rho_1$  为  $200\text{kgs}^2/\text{m}^4$ ; 空气密度  $\rho$  为  $0.1316\text{kgs}^2/\text{m}^4$ ; 空气粘度  $\mu$  为  $1.8E-0.6\text{kgs}/\text{m}^2$ ; 进口速度  $V_1$  为  $18\text{m}/\text{s}$ ; 平均粒径  $d$  ( $\mu\text{m}$ ): 2, 4, 7.5, 15, 25, 35, 45, 55, 65; 粒径分布  $f(\%)$ : 3, 11, 17, 27, 12, 9, 5, 7.5, 6.4, 6.6。

常规设计结果:

$$D_0/D_c = 0.5$$

$$a = 0.2\text{m}; b = 0.1\text{m}$$

$$D_c = 0.4\text{m}$$

$$D_0 = 0.2\text{m}$$

$$H = 1.4\text{m}$$

$$H_c = 0.6\text{m}$$

$$l = 0.16\text{m}$$

$$\Delta P = 170\text{mmH}_2\text{O}$$

$$\eta = 91.6\%$$

优化尺寸:

$$D_0/D_c = 0.673648; a = 0.22841282; b = 0.08782895; D_c = 0.5382468; D_0 = 0.3625889;$$

$$H = 2.691234; H_c = 1.61474; l = 0.6604028; \Delta P = 52.064\text{mmH}_2\text{O}; \eta = 94.66362\%。$$

由上述两组不同尺寸的旋风除尘器计算结果可见, 在同样工况条件下, 优化后的旋风除尘器其压力有较大的下降, 只有常规设计的 30%, 而旋风除尘器的效率却提高 3%。

(下转第 64 页)

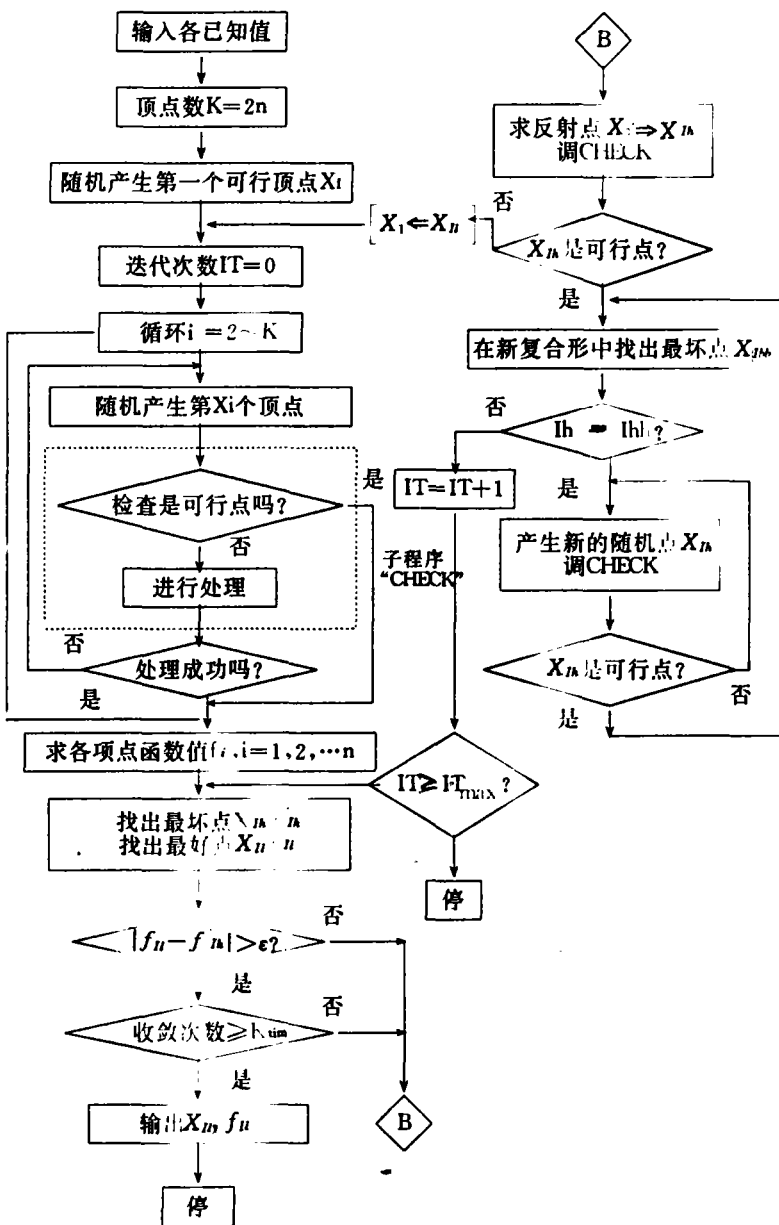


图2

静定结构内力一章,理论力学和材料力学已为我们提供了基本理论和计算方法,学生接受起来并不困难,甚至有人觉得内容有些重复,但是他们一动手做题又常常出错。因此,这部分内容我们安排了以练为主,辅以讨论,用一节课时间绘静定结构内力图 12 题、改错 8 题,通过反复训练,使大家掌握基本方法、总结内力图基本规律,从而达到熟悉、正确、快速地绘静定结构内力图的目的。在用图乘法求位移一章中,我们也将最容易出错的地方编选了相应的题目进行单项练习。

对于结构力学某些杆件数目不多的题目,可在计算之前让学生凭概念和直觉迅速勾勒出结构的弯矩图,然后再计算对照,这样做对培养学生敏锐的力学感觉、加强基本功训练是很有帮助的。

#### 四、安排综合练习题

每学期安排一次综合练习题,可以作为实践性教学环节的补充,也是课堂学习的扩展和深化。

综合练习题是由习题向实际设计和研究课题的过渡,其对象是整体结构或主体结构,要考虑的范围和内容比习题广泛和复杂。综合练习题是结构力学基础理论教学与工程实际问题的结合,也是书本知识与工程实际问题的初步结合,做综合练习题,能使使学生不仅从书本上学习,而且也从工程实践中学习。综合练习题的内容可做如下考虑:

在结构力学超静定结构的各种计算学完之后,可选择平面桁架的设计、平面刚架的设计,吊车梁的

设计和排架的设计与研究为题目,要求学生从结构类型的选择、荷载因素的确定以及到力学分析的方法都先自己动手,各人自选方案和方法,然后再集体讨论,归纳出各种方案、方法的优缺点。在结构矩阵分析、算法语言学完之后,可选择直接刚度法计算平面刚架(FORTRAN 语言);平面桁架计算程序、平面刚架优化设计等题目,引导学生编好计算程序、上机进行计算,这样可以提高对结构的分析能力和运算能力。

实践证明,要上好习题讨论课,对教师本身素质的要求也是很高的。

首先要求教师必须认真负责,深入掌握教材内容,收集学生在课外作业及答疑中共同存在的问题,选择典型的、恰如其分的、概念性强的讨论题,拟定出引导讨论的方案。

其次教师应该熟悉同学,大致了解每个同学的学习情况,在讨论时要注意创造一个良好的课堂气氛,鼓励学生大胆发言,教师则不断提出启发性的问题加以引导,要使学生感到轻松自如、兴趣盎然。每一个教师都应该是一名优秀的课堂讨论的“主持人”。

教师还应该经常深入施工现场、设计、科研领域,必要的时候可以参加课程设计、毕业设计这些教学环节,这样可以进一步认识所教知识的应用情况,也可以从这些环节中提炼出更深入、更实际的课堂讨论题材来,使我们的教学水平更上一层楼。

(上接第 33 页)

#### 四、结论

本文基于旋风除尘器的基本理论导出了优化设计目标函数,借助计算机采用优化设计,得出最佳尺寸比,并和常规工程设计计算进行对比,优化结果是明显的。本文尚未对优化模型进行工程验证性试验,其实用性有待今后进一步研究。

#### 参考文献

- 1 陈明绍,吴光兴等. 除尘技术的基本理论与应用. 中国建设工业出版社. 1981
- 2 嵇敬文编. 除尘器. 中国建设工业出版社. 1981
- 3 黄少昌,曹为宁等. 计算机辅助机械设计技术基础. 清华大学出版社. 1988
- 4 化工设备设计全书. 除尘设备设计. 上海科学技术大学出版社. 1985