

無錫輕工業學院

碩士研究生學位論文

題目：淀粉生產用微型圓柱旋

流器基本性能的研究

研究生：袁惠新

指導教師：陸振曦、高福成

一九八七年五月二十日

硕士学位论文

题目: 淀粉生产用微型圆柱旋

流器基本性能的研究

英文并列题目: A STUDY OF PERFORMANCE OF THE MINIATURE
CYLINDRICAL HYDROCYCLONE USED IN THE STARCH INDUSTRY

研究生: 袁惠新 专业: 食品机械

研究方向: 食品机械原理

导师: 陆振曦 副教授 高福成 副教授

学位授予日期: _____

一九八七年 五 月二十日

无锡轻工业学院

地址: 无锡市青山湾

无锡轻工业学院研究生论文纸

摘要

本文研究了圆柱形旋流器的结构设计和基本性能。通过理论分析推出了圆柱形旋流器内主体部分速度场的近似描述，并通过理论分析和性能试验研究了用于选粉生产的圆柱形旋流器的压力降和边界粒渡，得到了压力降和边界粒渡的理论预测方程。结果表明，在实验范围内，压力降的理论值和实验值一致；当 $d_0/d_c \leq 0.3$ 时，边界粒渡理论式能对圆柱形旋流器的效率进行预测。

通过对比试验，对本研究条件下得到的最佳圆柱形旋流器和华北制药厂仿美的圆锥形旋流器进行了性能比较，结果表明：圆柱形旋流器比圆锥形旋流器分离能力要小些，但能耗小。圆柱形旋流器的结构设计很有潜力可挖。本文对此提出了新的设想。

ABSTRACT

A theoretical analysis of the velocity field and performance of the cylindrical hydrocyclone is presented. The development of a much simplified model for the flow in the main body of the cylindrical hydrocyclone is explained. The success of this simple rotational flow model describing the fluid velocity distribution allows an analysis of the pressure drop and cut size of the cylindrical hydrocyclone used in the starch industry to be carried out. The results are compared favourably with experimental data.

The contrast experiment is made to compare the performance of the cylindrical hydrocyclone with that of the commercial conical one. It is shown that the cut size of the cylindrical hydrocyclone is bigger than that of the conical one while the pressure drop of the cylindrical hydrocyclone is less than that of the conical one.

The design of the structure of the miniature cylindrical hydrocyclone has great potentialities. This present paper provides a new idea about that.

无锡轻工业学院研究生论文纸

目 录

摘要

前言

一、圆柱形旋流器的速控场及性能预测方程的推导

(一)速控场

(二)压力降

(三)边界控制

二、试验

(一)原料

(二)旋流器模型

(三)实验方法、仪器及设备

(四)实验过程、结果分析

(1)试验一：多因素正交试验

(2)试验二：最佳结构验证试验

(五)结果讨论

三、常数 α 和 n 的确定及理论关系式的验证

(一)常数 α 和 n 的确定

(二)理论关系式的验证

四、对比性试验

无锡轻工业学院研究生论文纸

(一) 方法

(二) 结果及讨论

结论

致谢

符号说明

参考资料

附录

装

订

线

无锡轻工业学院研究生论文纸

前言

旋液分离器(简称旋流器),作为一种有效的分离设备,是在第二次世界大战以后,首先在荷兰国^[17]鱼来矿厂成功地用于选矿。这使人们对旋流器产生了浓厚的兴趣,从而导致了^[18]对旋流器广泛的研究和应用。就分离对象来讲,它可用于固-液、固-固、液-液^[18]和气-液^[18]的分离过程;就工业应用而言,它可用于浓缩、澄清(如机器冷却液和生产用水的净化)、除石、去砂、洗涤^[17]等。除了用于分离外,旋流器也可用于混合,还可用于传热^[19]、传质、雾化等。在淀粉生产中,旋流器可用于除石、去砂、胚芽分离、浓缩和洗涤精制等。

我国在旋流器研究方面,起步较晚。鉴于食品工业,特别是淀粉生产工业发展的需要,在“七·五”计划中,旋流器已被列为食品工业重点攻关项目之一。

旋流器的结构比较简单。图1为一种圆柱形旋流器,它有一个切向入口和两个轴向出口——溢流口和底流口。圆柱形内腔是物料在其内高速

无锡轻工业学院研究生论文纸

旋转、分离的分离腔。

旋流器系利用离心力使料液中粒度和密度不同的两种物料获得不同的沉降速度而分离的设备。

对于图一

液分离用的旋流器，如图1

所示，料液以一定的速度从

切向入口进入旋流器，随后

在腔内高速旋转。粒度和密

度大的颗粒受到的离心力大，

从而沉降速度快，被甩向器

壁，并随转随降，作为底流

排出；而粒度

和密度小的颗粒受到的离心力小，从而沉降速度小，甚至被液流带向中心，随转随升，作为溢流排出。

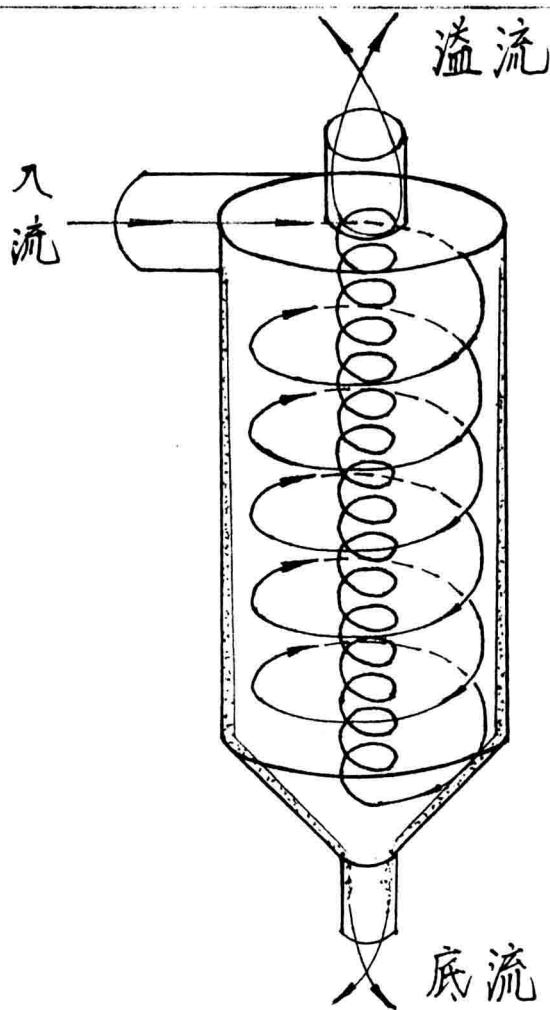


图1 旋流器工作原理图

无锡轻工业学院研究生论文纸

由离心沉降原理知, 颗粒在离心力场中受到的离心力为

$$G \propto \frac{V_p^2}{r}$$

在靠近圆柱壁面处

$$G \propto \frac{v_i^2}{r_c}$$

当入口速度 v_i 值一定时, 旋流器分离腔半径 r_c 越小, 离心力 G 就越大, 分离作用也越大。因此, 微型旋流器具有更大的分离能力。虽然单个的微型旋流器生产能力很小, 但可以通连并联一定数目的微型旋流器来达到所需的生产能力。

衡量旋流器性能的指标一般有两个: 能耗和分离效率。通常用压力降 Δp 来反映能耗, 用边界粒粒度 x_{50} 来反映分离效率。 x_{50} 越小, 分离效率越高, 反之, 分离效率越低。

旋流器与其它分离设备比较, 具有许多独特的优点。它没有传动件, 结构简单, 占用空间小, 分离效率高, 用途广, 比离心机能耗小, 且易于实现自动控制。

但是, 由于旋流器内流体流动的复杂性, 很难对旋流器进行理论研究。五十年代初, 凯萨尔 (Kel-

无锡轻工业学院研究生论文纸

sa11)^[1] 用实验曲线描绘了圆锥形旋流器内的速度场。五十年代末, 布鲁特利 (Bradley)^[2] 用平衡轨道理论, 在 $Q_i = 10 \text{ l/min}$ 的条件下, 推出了圆锥形旋流器边界粒度的理论表达式。六十年代初, 里特马 (Rietema)^[3] 根据凯萨尔的实验速度分布, 用“停留时间理论”导出了一个旋流器特性数 (characteristic cyclone number),

$$C_{y50} = \frac{\kappa_{50} \Delta p}{\mu} \cdot \frac{l (\Delta p)_t}{\rho Q_i} \quad (1)$$

并根据这一指标, 在实验中通过改变旋流器的几何比例而得到圆锥形旋流器的最佳结构。到八十年代初, 布罗 (Bloor)^[4] 推出了关于圆锥形旋流器速度场的数学表达式, 并用边界层理论研究圆锥形旋流器的分离效率。

前人对于旋流器的研究, 绝大部分是关于圆锥形旋流器的。至今, 尚未见到有关圆柱形旋流器的研究性资料。

本文试图以理论分析和实验研究相结合的方法, 对淀粉生产用微型圆柱形旋流器的基本性能进行初步的探讨。

首先, 将流体运动的连续性方程和运动方程用于圆柱形旋流器, 在合理的假设基础上, 求解

无锡轻工业学院研究生论文纸

微分方程，从而得到速效场的理论表达式；

第二步：根据求得的速效场，推导出压力降理论表达式；

第三步：用“停留时间理论”研究边界粒控，得出边界粒控的理论表达式；

第四步：通过对多种结构比例的圆柱形旋流器进行正交试验，确定圆柱形旋流器的最佳结构；

第五步：根据最佳结构和压力降实验数据，确定理论表达式中的入口速效损失系数和流型常数，并通过实验，验证此理论表达式；

第六步：对本研究条件下得到的最佳结构的圆柱形旋流器和华北制药厂仿制的圆锥形旋流器进行试验比较。

本文研究的边界粒控为凯萨尔边界粒控^{[8],[10]}，即凯萨尔效率 $E_K(x) = 0.5$ 所对应的粒控 x_{50} (如图 2 所示)。凯萨尔效率 E_K 的计算用“O-U组合法”(即用溢流和底流样品的分析结果计算分离效率)，因为用这种方法计算产生的误差比其他组合法都小^[5]。

对于某一粒级为 x 的颗粒，其分离效率为

无锡轻工业学院研究生论文纸

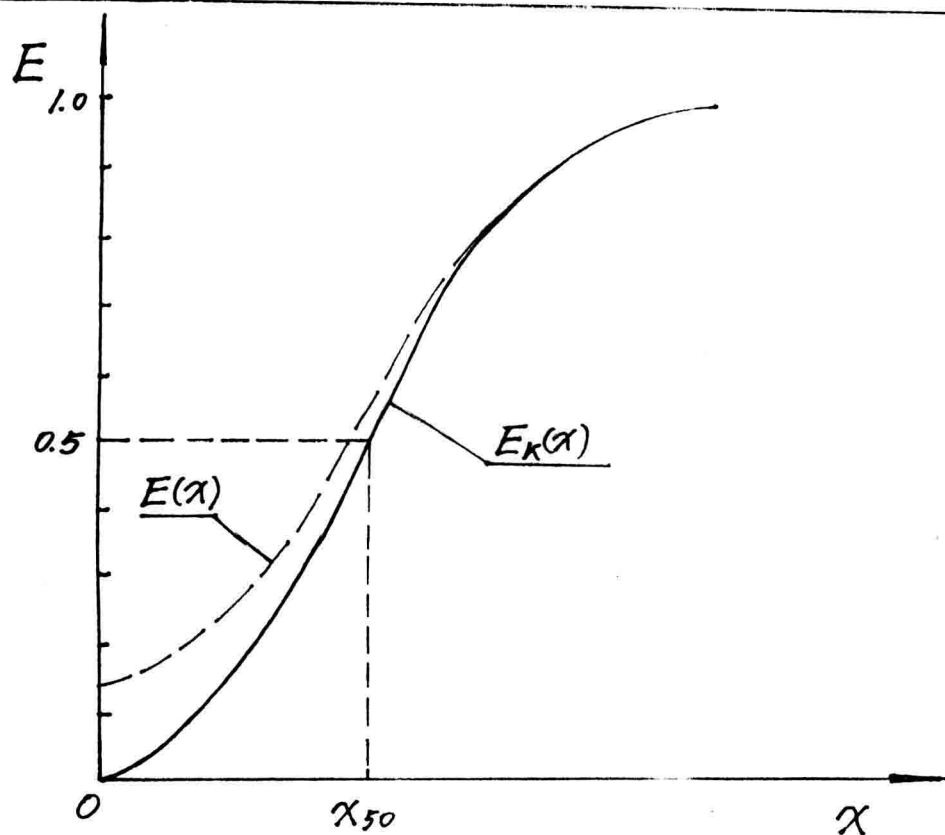


图2 旋流器效率曲线

$$E(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{E_T} - 1 \right) \frac{f_o(x)}{f_u(x)}}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{M_o f_o(x)}{M_u f_u(x)}} \quad (2)$$

式中

$$E_T = \frac{M_u}{M_i}, \text{ 为总效率;}$$

无锡轻工业学院研究生论文纸

M_i 、 M_o 、 M_u 分别为进料、溢流和底流中的固体质量流量;

$f_o(x)$ 、 $f_u(x)$ 分别为溢流和底流中固体颗粒的粒度频率分布.

考虑到底流分股对效率的影响, 对式(2)进行修正, 得到凯萨尔效率

$$E_K(x) = \frac{E(x) - R_f}{1 - R_f} \quad (3)$$

式中

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$$

将式(2)代入式(3), 并考虑到

$$S = \frac{Q_u}{Q_o}$$

$$M = Q \cdot C \quad (C \text{ 为悬液液浓度, } \text{kg/m}^3)$$

则

$$E_K(x) = S \left[\frac{S + 1}{S + \frac{C_o f_o(x)}{C_u f_u(x)}} - 1 \right] \quad (4)$$

无锡轻工业学院研究生论文纸

凯萨尔效率 E_K 是考虑离心作用时的分离效率, 因此, 亦称离心效率 (centrifugal efficiency)。本文是由实验数据 s 、 C_0 、 C_m 、 $f_0(x)$ 和 $f_m(x)$ 计算出 $E_K(x)$ 后, 用内插法求出 x_{50} 的实验值。

装

订

线

无锡轻工业学院研究生论文纸

一. 圆柱形旋流器的速控场和性能预测方程的推导

(一) 速控场

(1) 由流体运动基本方程得^[6]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho} \frac{DP}{Dt} + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{连续性方程}) \quad (1-1) \\ \frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{f} - \nabla P/\rho \quad (\text{运动方程}) \quad (1-2) \end{array} \right.$$

式中

$\vec{f}$ —— 单位质量的流体所受的外力 (质量力)

P —— 压力冲量, 对于理想流体

$$P = -p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2) 假设

① 流体为纯液体或浓度很小的悬浮液, 忽略固体颗粒对流体流动的影响;

② 流体不可压缩, 即 $\rho = \text{常数}$;

③ 流体为理想流体, 即 $\mu = 0$;

④ 旋流器内的流动为定常流动, 即 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$;

无锡轻工业学院研究生论文纸

⑤忽略质量外力, 即 $f=0$ 。

关于假设的合理性:

1) 本研究实验用悬浮液体积浓度 $C_v \approx 2\%$, 可以忽略颗粒对流体流动的影响^[5];

2) 由于在正常工作的旋流器内, 压力变化不是很大 ($< 10 \text{ kg/cm}^2$), 所以, 可认为液体的密度为常数^[6];

3) 本研究只考虑边界层以外的流体, 其速度梯度较小, 流体的粘性力与惯性力相比要小得多, 因此, 理想流体的假设对分析旋流器主体部分流体的主要特性影响不大。但考虑到实验用悬浮液的粘性 (粘度 0.8 CP 左右), 对理想流体假设的分析结果还要进行适当的修正;

4) 在正常工作条件下, 旋流器内的流动可以认为是定常流动;

5) 在一般工作条件下, 旋流器内流体所受的质量外力只有重力, 而离心力与重力之比, 即分离因素^[18]为

$$\alpha = \frac{\frac{V_p^2}{r}}{g}$$

对于微型旋流器, 分离因素 α 在 $3000 \sim 5000$ 以上, 换句话说, 离心力是重力的 $3000 \sim 5000$ 倍以上, 所以, 可忽略重力的影响。

无锡轻工业学院研究生论文纸

(3) 尾方程组的简化

根据假设③, 式(1-1)可简化为

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1-3)$$

根据假设③、⑤, 式(1-2)可简化为

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1-4)$$

而

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (1-5)$$

根据假设④, 有

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$$

则式(1-5)为

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$$

将此式代入式(1-4), 有

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1-6)$$

在柱坐标内展开式(1-6), 并考虑到旋流器内流场的轴对称性, 即 $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, 以及 $\frac{\partial v_{\varphi}}{\partial z} = 0$ ^[1], 有

$$\left\{ \begin{aligned} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_{\varphi}^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \end{aligned} \right. \quad (1-7)$$