

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19920121152732

UDC _____

廈門大學

硕士学位论文

基于数值模拟的旋风分离器适用性与结构
优化方法研究

Applicability and Structure Optimization of Cyclone
Separator Based on Numerical Simulation

吕智

指导教师姓名: 吴晓明 副教授

专业名称: 机械制造及其自动化

论文提交日期: 2015年4月

论文答辩时间: 2015年5月

学位授予日期: 2015年6月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2015年5月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

旋风分离器是一种利用气-固两相流体的涡旋运动使固体颗粒在离心力的作用下从气流中分离出来的设备，它具有结构简单、操作维护简便、制造安装价格低等优点，被广泛应用于石油、化工、冶金等领域。由于其内部流场具有强旋流湍流特征，气流和颗粒的运动十分复杂，传统的实验方法很难深入研究其内部流场规律和分离机理，随着计算流体动力学的发展，数值仿真分析成为研究旋风分离器的主要手段。

旋风分离器的工况和结构参数会对其性能产生决定性影响。对于一个给定的旋风分离器，其工况参数包括颗粒半径、颗粒密度和入口速度，由于工况参数可以在一定范围内变化，因此需要讨论分离器的适用性，为分离器在不同工作环境下工作参数的选择提供理论依据。

同时，在一定工况下旋风分离器的结构参数决定了其性能，因此基于多结构参数变化的性能优化成为受人关注的工程问题，由于分离器结构参数变量较多，理论上会产生多种组合结构形式，逐一研究势必造成工作量巨大，寻求多参数变化的结构优化方法具有重要意义。

为此本文主要进行了以下几个方面内容的研究：

1. 采用 $RNG k-\epsilon$ 模型计算旋风分离器内气相紊流，采用离散相模型(DPM)模拟固相流场颗粒轨迹，在此基础上，引入正交试验法讨论在不同颗粒粒径和颗粒密度条件下旋风分离器的进气口速度与分离效率之间的关系。

2. 研究与分离效率相关联的不同旋风分离器分割粒径，为此构造一种迭代格式，通过数值仿真和迭代计算，得出 4 种不同风速条件下 3 种不同旋风分离器的分割粒径。

3. 采用 RSM 模型对旋风分离器内气-固两相流进行数值分析，以回归正交试验法设计实验方案，在此基础上分别建立旋风分离器的压降和分离效率对其结构参数的回归数学模型。根据该数学模型以压降小，分离效率高为目标，进行多目标优化得到最优旋风分离器结构参数。

关键字：旋风分离器；数值模拟；分离效率；分割粒径

Abstract

Cyclone separator is a kind of equipment that uses rotary motion of gas-solid two-phase fluid to make the solid particle separated from the gas flow by centrifugal force. Their simple design, operational and maintenance conveniently, low manufacturing costs make them widely used in the fields of petroleum, chemistry, metallurgy. Because the internal flow has strong vortex turbulence characteristics, gas and particle motion in cyclone are extremely complex. It is difficult to research the distribution of internal flow field and separation mechanism with traditional experimental methods. With the development of Computational Fluid Dynamics, numerical simulation becomes the main means to study the cyclone separator.

Working condition and structure parameters of cyclone separator have decisive effect on its performance. For a given cyclone separator, its working condition parameters include particle radius, particle density and inlet velocity. We need to discuss the applicability of the separator because the working condition parameters can change within a certain scope, its can provide theoretical evidence to choose appropriate operating conditions under different working conditions.

At the same time, cyclone separator structural parameters under a certain working condition determines its performance, so performance optimization base on the change of structural parameters become a concern of engineering problem. Due to many variables of cyclone separator structural parameters, it can produce a variety of combination structure in theory, it brings large workload if research all combinations. It is of great significance to search a structure optimization of structural parameters variation method.

This paper mainly carried out several aspects research as following:

1. The RNG $k-\varepsilon$ model and discrete phase model (DPM) are used to simulate the turbulent flow of gas phase and particle trajectory of solid phase respectively in cyclone separator. Under the different particle size and particle density environment, the orthogonal test method was introduced to discuss the relationship between the

cyclone separator inlet velocity and separation efficiency.

2. Research cut-off size of different cyclone separator that is associated with separation efficiency, establish mathematical iteration format, through numerical simulation and iterative calculation, obtain three different cyclones cut-off size under the condition of four different velocity.

3. Reynolds stress model (RSM) is used to calculate the two phase flow field inside the cyclone separator. The experiment project is designed based on regression orthogonal test method, the regression models of pressure drop and separation efficiency of cyclone separator are established respectively using the test data. According to the regression models with low pressure drop, high separation efficiency as the goal, the optimal structure parameters of cyclone separator is obtained by multi-objective optimization.

Key Words: Cyclone Separator; Numerical Simulation; Separation Efficiency;
Cut-off size

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪 论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 旋风分离器概述	2
1.2.1 旋风分离器基本结构与工作原理.....	2
1.2.2 旋风分离的分离机理.....	3
1.3 国内外旋风分离器性能研究现状	4
1.4 本文主要研究内容及方法	6
1.4.1 研究内容.....	6
1.4.2 研究方法.....	7
第二章 旋风分离器数值模拟方法	8
2.1 概述	8
2.2 气体相的数值模拟计算方法	8
2.2.1 控制方程.....	9
2.2.2 湍流模型.....	9
2.2.3 离散格式.....	14
2.2.4 压力插补格式.....	15
2.2.5 压力与速度耦合.....	15
2.3 颗粒相的数值模拟计算方法	16
2.3.1 颗粒相的求解.....	16
2.3.2 DPM 模型.....	18
2.3.3 气体相与颗粒相的相互作用.....	19
2.4 本章小结	20
第三章 旋风分离器在不同工况下分离效率的仿真分析.....	22
3.1 概述	22

3.2 正交试验设计方法简介	22
3.2.1 正交表简介	22
3.2.2 正交实验设计步骤	23
3.2.3 极差分析法简介	24
3.3 旋风分离器物理模型与计算方法	24
3.3.1 物理模型	24
3.3.2 网格划分	25
3.3.3 边界条件	26
3.3.4 计算方法	27
3.4 数值仿真计算结果	28
3.5 正交试验法研究分离效率	29
3.5.1 因素水平选择	29
3.5.2 试验方案确定并仿真试验	30
3.5.3 仿真结果分析	30
3.6 本章小结	32
第四章 旋风分离器分割粒径 (d_{50}) 的预测方法	33
4.1 概述	33
4.2 旋风分离器理论分离模型	34
4.2.1 分割粒径 (cut-off size)	34
4.2.2 分离效率	34
4.2.3 分离效率和分割粒径经验模型	36
4.3 分割粒径新的预测方法	38
4.4 模型选择	39
4.4.1 物理模型	39
4.4.2 仿真计算方法	43
4.4.3 边界条件	43
4.5 仿真结果与比较	43
4.6 本章小结	45
第五章 基于回归正交试验的旋风分离器结构优化	47

5.1 概述	47
5.2 回归正交试验法简介	47
5.2.1 二次回归正交设计的基本方法.....	48
5.2.2 二次回归方程建立.....	50
5.2.3 回归方程及偏回归系数的方差分析.....	50
5.3 试验模型的建立	51
5.3.1 结构参数与评价标准确定.....	51
5.3.2 试验设计.....	52
5.3.3 计算方法.....	53
5.3.4 边界条件.....	53
5.4 数值仿真计算结果	54
5.4.1 压力场.....	55
5.4.2 速度场.....	57
5.5 回归分析与结构优化	58
5.5.1 欧拉数 Eu	58
5.5.2 分离效率 η	60
5.5.3 结构优化.....	62
5.6 本章小结	63
第六章 总结与展望	65
6.1 主要结论	65
6.2 工作展望	66
参 考 文 献	67
致 谢.....	73
攻读学位期间发表学术论文目录	74

Table of Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research Background and Significance	1
1.2 Summary of Cyclone Separator	2
1.2.1 Basic Structure and Working Principle of Cyclone Separator.....	2
1.2.2 Mechanism of Cyclone Separator.....	3
1.3 Cyclone Performance Numerical Research Status at Home and Abroad 4	
1.4 Main Research Contents and Methods in this Paper	6
1.4.1 Research contents.....	6
1.4.2 Research methods	7
Chapter 2 Cyclone Separator Numerical Simulation Method	8
2.1 Introduction	8
2.2 Gas Phase Numerical Simulation method	8
2.2.1 Governing Equation.....	9
2.2.2 Turbulence Model	9
2.2.3 Discrete Format.....	14
2.2.4 Pressure Interpolation Format.....	15
2.2.5 Pressurs and Velocity Coupling	15
2.3 Particle Phase Numerical Simulation method	16
2.3.1 Solution of the Particle Phase	16
2.3.2 DPM Model	18
2.3.3 Gas and Particle Phase Interactions	19
2.4 Chapter Summary	20
Chapter 3 Simulation Analysis of Separation Efficiency of Cyclone Separator under Different Conditions	22

3.1 Introduction	22
3.2 Introduction of Orthogonal Design Method	22
3.2.1 Introduction of orthogonal Table	22
3.2.2 Procedure of Orthogonal Design	23
3.2.3 Introduction of Range Analysis	24
3.3 Cyclone Separator Physical Model and Calculation Method	24
3.3.1 Physical Model.....	24
3.3.2 Mesh Generation	25
3.3.3 Boundary Conditions	26
3.3.4 Calculation Method.....	27
3.4 Results of Numerical Simulation Calculation	28
3.5 Orthogonal Experiment Method to Study Separation Efficiency	29
3.5.1 Choice of Factors and Levels.....	29
3.5.2 Determination of Experiment Scheme and Simulation Experiment.....	30
3.5.3 Analysis the Simulation Results.....	30
3.6 Chapter Summary	32
Chapter 4 New Prediction Method about Cyclone Sepatation Cut-off Size(d_{50})	33
4.1 Introduction	33
4.2 Theory Separation Model of Cyclone Separation	34
4.2.1 Cut-off Size	34
4.2.2 Separation Efficiency	34
4.2.3 Empirical Model of Separation Efficiency and Cut-off Size	36
4.3 New Prediction Method about Cut-off Size	38
4.4 Model Selection	39
4.4.1 Physical Model.....	39
4.4.2 Simulation Calculation Method	43
4.4.3 Boundary Conditions	43
4.5 Simulation Results and Comparison	43

4.6 Chapter Summary	45
Chapter 5 Structural Optimization of Cyclone Separator Based on Regression Orthogonal Test	47
5.1 Introduction.....	47
5.2 Introduction of Regression Orthogonal Test Method.....	47
5.2.1 Basic Method of Quadratic Regression Orthogonal Design.....	48
5.2.2 Establish Quadratic Regression Equation.....	50
5.2.3 Analysis Regression Equation and Partial Regression Coefficient of Variance.....	50
5.3 Establish Test Model	51
5.3.1 Determination Structure Parameter and Evaluation Standard	51
5.3.2 Design Experiment.....	52
5.3.3 Calculation Method.....	53
5.3.4 Boundary Conditions	53
5.4 Results of Numerical Simulation Calculation	54
5.4.1 Pressure Field.....	55
5.4.2 Velocity Field	57
5.5 Regression Analysis and Structure Optimization	58
5.5.1 Euler Number Eu	58
5.5.2 Separation Efficiency η	60
5.5.3 Structure Optimization.....	62
5.6 Chapter Summary	63
Chapter 6 Conclusion and Prospect.....	65
6.1 Conclusion	65
6.2 Prospect.....	66
References	67
Acknowledgements	73
Achievements.....	74

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 课题背景及意义

旋风分离器的应用已超过一个世纪，它被广泛应用于工业粉尘净化方面。它是利用离心力的作用把颗粒物从气流中分离出来的设备，具有结构简单、操作维修方便和适用性强等特点。旋风分离器是一种非常重要的微细颗粒分离设备，它一般应用在食品工程、石油化工和环境保护等行业。同时旋风分离器也用在空气除尘方面，它在消除空气污染上起着至关重要的作用。

随着工业的快速发展和人们的生活水平日益提高，对分离器性能要求也在不断提高。性能要求涉及到两方面内容：一个是旋风分离器需要具有更强的捕捉微小粉尘的能力；一个是旋风分离器需要进一步减少压降。对于一般的普通旋风分离器而言很难满足这样的要求，因此，迫切需要研制出具有高分离效率且低能耗的高性能旋风分离器。

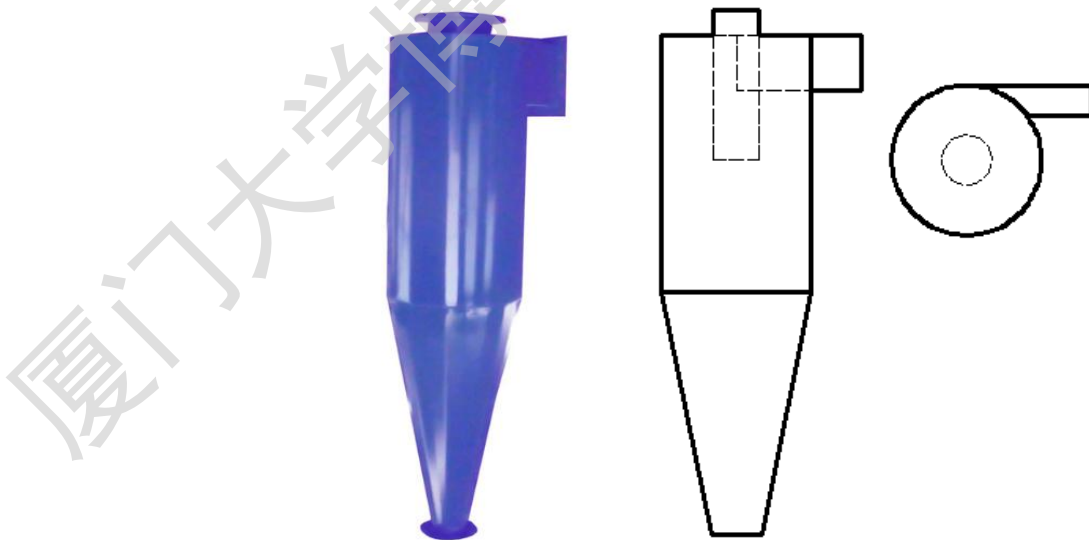


图 1-1 切向入口旋风分离器

然而旋风分离器中气-固分离过程是一种非常繁杂的过程，实验法和理论法很难研究出其分离机理，因此到目前为止依然不能了解其内部的分离规律，更不

用说如何从理论上建立一套数学模型可以来指导分离器研发设计。

近些年来，随着 CFD 技术的迅速发展，人们越来越多的使用 CFD 技术解决一些实际问题，于是 CFD 技术也被引入对旋风分离器的研究之中。由于其周期短、成本低、操作方便，且能充分体现分离器几何参数及操作条件对流场及分离效率的影响等优点。本文便是运用 CFD 技术对切向式旋风分离器（如图 1-1）进行模拟分析，研究其内部流场分布，固体颗粒的运动轨迹等；研究入口速度、颗粒粒径、密度等操作参数和排气管直径、排气管插入深度、筒体高度、锥体高度等结构参数对旋风分离器性能的影响，进而提出优化方案，得出最后最优模型。

1.2 旋风分离器概述

1.2.1 旋风分离器基本结构与工作原理

旋风分离器的结构示意图如下图 1-2 所示，它由进气管、排气管、筒体、锥体、排尘管等 5 个部分构成。

其工作原理是：当含尘空气进入旋风分离器的进气管，气流在旋风分离器壁面的约束下从直线运动转变为旋转运动，绝大多数旋转气流沿轴向向下作螺旋运动，这通常被称为外旋流。在旋转过程中含尘空气产生离心力，将粉尘颗粒甩向器壁，粉尘与壁面碰撞，能量慢慢消耗，最后跟着外旋流气流落到排尘口而被分离出来。螺旋气体向下流动到达锥体后，由“旋转矩”不变原理，锥体形状缩小会导致其切向速度增大。此外，外旋流在旋转过程中使周围气压升高，这样就在锥体中间形成低压区，因为低压区的吸附作用，当气流到达某一位置时，就朝着分离器中间逼近，会形成以相同的旋转方向从分离器底部到顶部的螺旋流动，这称为内旋流。最后，空气通过排气管排出，但还会有一小部分细颗粒没被分离出的也由此逃逸。

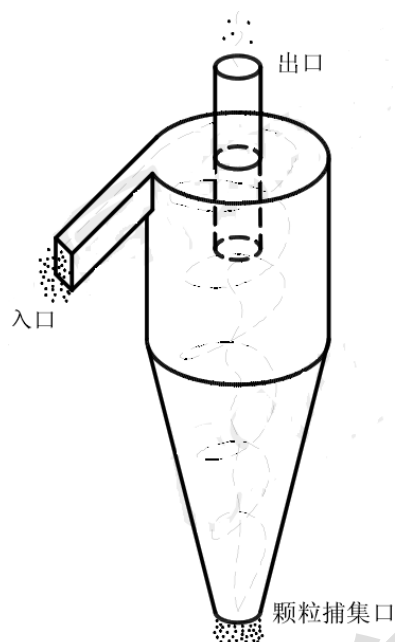


图 1-2 旋风分离器示意图

1.2.2 旋风分离的分离机理

在旋风分离器中，固体颗粒不仅受到离心力和气流拽力影响，还受到各种扩散效应和颗粒与壁面、颗粒之间的碰撞等影响，其内部的气流和颗粒的运动都非常复杂，到目前为止仍然没有准确可靠的且能反映各种影响因素的分离理论。因此，一些学者对旋风分离器的分离机理做出许多简化和假设，从而形成了不同的分离模型，当前较为经典的有以下三种：转圈理论、平衡轨道理论及边界层分离理论。

(1) 转圈理论（沉降分离理论）

该理论是 Rosin 等人^[1]在 1932 年提出的，基于重力沉降室分离理论发展而来的。认为粉尘颗粒从进气口进入分离器，既随着气流作旋转运动，又在离心力作用下向筒壁移动，这一过程和重力沉降室具有相同的分离机理。该理论认为如果粒子从离壁面最远的一点穿过气流而沉降于壁面所需时间，在气流从上到下旋转 N 圈的时间内，即被分离。该理论以层流沉降理论为依据，忽略了分离器内其他流动状态，这跟实际情况不相符。

(2) 平衡轨道理论（筛分理论）

平衡轨道理论是 Barth 等人^[2]提出，该理论建立在外旋流和内旋流力的平衡上。Barth 认为在旋风分离器内，每一个颗粒在径向上都受到向外的离心力和向

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.