

# 流化床技术模拟方法研究

陈巨辉 王帅 于广滨/著

Numerical Simulation Method on Fluidized  
Bed Technology



科学出版社

# 流化床技术模拟方法研究

陈巨辉 王 帅 于广滨 著

国家自然科学基金青年科学基金项目（项目编号：51406045）

中国博士后科学基金一等资助项目（项目编号：2016M590122）

黑龙江省自然科学基金面上基金项目（项目编号：E201441）

哈尔滨市创新人才基金青年后备项目（项目编号：2015RAQXJ033）

哈尔滨理工大学青年创新拔尖人才计划项目（项目编号：201504）



资助出版

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍现阶段流化床技术的发展与应用,针对流化床内气固两相湍流与反应、颗粒运动耗散、气固相间作用等在模拟过程中遇到的复杂问题提出以颗粒动力学理论为基础的模拟方法。以颗粒动力学理论为基础,从Boltzmann方程出发推导表征颗粒速度脉动各向异性的颗粒速度脉动二阶矩模型,及表征颗粒旋转运动特性的粗糙颗粒动力学模型。同时给出气相湍流模拟方法、气固相间作用力和作用能量的模拟方法。基于所建立的模型,模拟研究流化床内气固两相流动特性、煤燃烧及煤-生物质联合燃烧特性、生物质气化特性。通过不同结构、不同工况、不同燃料等参数的模拟实例为读者清晰且全面地掌握流化床模拟研究方法提供良好的平台。

本书可供流化床技术领域的科研技术人员参阅,亦可作为能源化工等相关专业的本科生及研究生辅导教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

流化床技术模拟方法研究 / 陈巨辉, 王帅, 于广滨著. —北京: 科学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-03-048047-7

I. ①流… II. ①陈… ②王… ③于… III. ①流化床—技术—模拟方法—研究 IV. ①TQ051.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 079517 号

责任编辑: 杨慎欣 张 震 / 责任校对: 张怡君  
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http: //www.sciencep.com

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 15 3/8 插页: 1

字数: 304 000

定价: 96.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

随着经济的快速发展，因能源利用引起的环境污染日益严重。我国的煤炭利用效率仅为30%，然而燃煤释放的 $\text{SO}_2$ 占全国总排放的85%， $\text{NO}_x$ 占60%，粉尘占70%。燃煤造成的污染物排放已成为形成酸雨、雾霾等恶劣天气的主要原因，不但对交通、电力、工农业等方面造成严重的影响，还给人健康带来极大危害。因此，发展高效、低污染的洁净燃烧技术已成为当今社会持续发展的必然要求。流化床技术是目前国际上公认的商业化程度最好的洁净燃烧技术。与常规的煤粉锅炉相比，流化床锅炉具有燃料适应性好、燃烧效率高、污染物排放低和操作温度易控制等优势。流化床锅炉可以燃烧劣质煤种，甚至可以将农作物秸秆和生活垃圾等作为燃料变废为宝。流化床锅炉燃烧效率可以达到95%~99%，而且 $\text{NO}_x$ 的生成量较低，其他污染物如 $\text{CO}$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 的排放量也低于煤粉炉。流化床技术是今后发展的一个重要方向。

随着计算机技术的普及，数值模拟已成为流化床技术研究的一个重要手段。目前学者对燃烧过程研究较多，但大多数都只关心反应原理，在假设颗粒静止的稳态的基础上进行模拟预测。然而，流化床内气固两相流动与反应是一个复杂的动态过程，一方面，气体湍流流动、颗粒碰撞耗散以及气固相间多向耦合作用等多相流问题增加模拟的复杂性；另一方面，均相反应与气固异相反应同时存在，反应过程的吸放热温度变化，使得气固相间的流动与反应过程相互影响，对研究模型精度的要求更高。因此，流化床技术模拟方法相关的资料对发展和预测流化床技术具有重要的指导意义。

目前专门应用于流化床技术模拟方法的书籍凤毛麟角，针对流化床技术发展迅速以及相关技术人员渴望对流化床结构、工作过程及流动与反应特点进行深入了解的需求增加，本书从2009年年初开始着手编写，旨在用简单易懂的文字介绍流化床技术，用科学的语言描述流化床技术的模拟方法、研究思路及模拟过程。本书分为两篇，第一篇（第1章~第4章）是基础知识部分：第1章介绍流化床技术的概念、分类及应用，总结国内外专家、学者对流化床技术的研究现状，介绍基于双流体的流化床内气固流动与反应过程的常见模拟方法；第2章以颗粒动力学为理论基础，推导描述流化床内颗粒速度脉动各向异性的二阶矩理论模型，及描述流化床内颗粒旋转运动的粗糙颗粒动力学理论模型，完善颗粒动力学理论；第3章介绍常用的大涡模拟方法，分析大涡模拟过滤后的亚格子流动模型与亚格

子反应模型特点；第4章介绍相间作用力模型和相间作用能量模型的发展。第二篇（第5章~第8章）是应用实例部分：第5章从理论出发详细推导气相大涡模拟-颗粒相二阶矩双流体模型；第6章应用所建立的双流体模型分别对低质量流率和高质量流率提升管内气固两相流动特性进行数值模拟；第7章应用所建立的双流体模型结合燃烧化学反应动力学，分别对煤燃烧和煤-生物质联合燃烧的气固两相流动与反应特性进行数值模拟；第8章应用所建立的双流体模型，考虑高颗粒浓度下的摩擦应力影响，结合气化化学反应动力学，对生物质气化的气固两相流动与反应特性进行数值模拟。通过对流化床内气固流动与反应模型的推导和对不同结构、不同工况、不同燃料等参数的气固流动与反应过程的模拟研究，使读者对流化床模拟研究有一个清晰的认识，更好地掌握流化床数值模拟方法。本书可供流化床技术领域的科研技术人员参阅，亦可作为能源化工等相关专业的本科生及研究生辅导教材。

本书由陈巨辉、王帅及于广滨三人合著，陈巨辉负责全书的策划统稿和结构安排。本书撰写历时七年，积累作者多年的研究成果，并介绍国内外先进的研究方法。在此，衷心感谢哈尔滨工业大学陆慧林老师对我的指导和教诲；感谢哈尔滨工业大学王帅等师兄对本书的支持和帮助；感谢哈尔滨理工大学于广滨等同事对本书做出的贡献；感谢一直与我共事科研工作的殷维杰、孟诚、李欣、董喜欣等同学！本书得到国家自然科学基金青年科学基金项目（项目编号：51406045）、中国博士后科学基金一等资助项目（项目编号：2016M590122）、黑龙江省自然科学基金面上基金项目（项目编号：E201441）、哈尔滨市创新人才基金青年后备项目（项目编号：2015RAQXJ033）、哈尔滨理工大学青年创新拔尖人才计划项目（项目编号：201504）的资助，在此表示衷心感谢！尽管作者花费大量时间撰写、校对本书，书中仍难免有错误，望读者见谅。随着知识的不断更新，本书再版时作者将对其内容进行修改和补充。

陈巨辉

2015年12月31日

# 目 录

## 前言

## 第一篇 基础知识

1 流化床技术	3
1.1 流化床技术概述	3
1.2 流化床技术分类	5
1.2.1 按分离器工作温度分类	5
1.2.2 按分离器结构形式分类	7
1.2.2.1 采用旋风分离器的循环流化床锅炉	7
1.2.2.2 采用惯性分离器的循环流化床锅炉	8
1.2.2.3 采用组合系统的循环流化床锅炉	9
1.2.2.4 旋涡燃烧分离器的循环流化床锅炉	9
1.2.3 按有无外置式换热器分类	9
1.2.4 按物料循环倍率分类	10
1.2.5 按固体物料循环方式分类	11
1.2.6 按炉膛压力分类	13
1.2.7 按工质蒸汽压力分类	13
1.2.8 按锅炉水循环的方式分类	15
1.3 流化床反应器内气固特性研究	17
1.3.1 流化床反应器内气固流动特性研究	17
1.3.2 流化床反应器内气固燃烧特性研究	19
1.3.3 流化床反应器内气固气化特性研究	20
2 流化床内颗粒动理学理论研究	22
2.1 颗粒动理学理论概述	22
2.2 颗粒动理学理论的发展	23
2.2.1 颗粒二阶矩理论	23
2.2.2 粗糙颗粒动理学理论	23

2.3	颗粒动理学理论在流化床中的应用	25
3	流化床内气相大涡模拟方法研究	27
3.1	大涡模拟方法概述	27
3.2	亚格子流动模型研究	28
3.3	亚格子反应模型研究	29
3.4	大涡模拟方法在流化床中的应用	31
4	流化床内气固相间作用研究	33
4.1	气固相间一阶作用力模型研究	33
4.2	气固相间二阶作用脉动能量模型研究	34
4.3	气固相间作用模型在流化床中的应用	34

## 第二篇 应用实例

5	气相大涡模拟-颗粒相二阶矩模型	39
5.1	引言	39
5.2	气相大涡模拟模型	39
5.2.1	气相可解尺度质量守恒方程	39
5.2.2	气相可解尺度动量守恒方程	41
5.2.3	气相可解尺度能量守恒方程	42
5.2.4	气相可解尺度组分守恒方程	43
5.2.5	气相亚格子流动模型的封闭	44
5.2.6	气相亚格子反应模型的封闭	46
5.3	颗粒相速度脉动二阶矩模型	48
5.3.1	颗粒速度各向异性分布函数	48
5.3.2	颗粒相流动控制方程	49
5.3.3	颗粒相反应控制方程	51
5.4	气体-颗粒相间作用模型	53
5.4.1	相间曳力模型	53
5.4.2	气固相间二阶关联项模型	54
5.5	壁面边界条件	56
5.6	本章小结	57

<b>6 流化床内气固两相流动特性的模拟</b> .....	58
6.1 引言.....	58
6.2 低质量流率提升管流动特性分析.....	58
6.2.1 模拟工况及条件.....	58
6.2.2 模拟结果与 Jiradilok 等实验对比.....	60
6.2.3 瞬时流动特性分析.....	62
6.2.4 浓度与速度特性分析.....	65
6.2.5 气相亚格子湍动能与耗散分析.....	67
6.2.6 颗粒相速度脉动二阶矩分析.....	69
6.2.7 气相与颗粒相雷诺应力型二阶矩分析.....	75
6.3 高质量流率提升管流动特性分析.....	77
6.3.1 模拟工况及条件.....	77
6.3.2 模拟结果与 Herbert 等实验数据对比.....	78
6.3.3 瞬时流动特性分析.....	79
6.3.4 气相亚格子模型比较.....	82
6.3.5 气固相间二阶关联模型比较.....	87
6.3.6 颗粒碰撞弹性恢复系数影响.....	91
6.3.7 气体表观速度的影响.....	94
6.3.8 颗粒质量流率的影响.....	97
6.4 本章小结.....	102
<b>7 流化床内燃烧过程特性的模拟</b> .....	103
7.1 引言.....	103
7.2 流化床洁净煤燃烧特性分析.....	103
7.2.1 煤颗粒燃烧过程反应模型.....	103
7.2.1.1 煤热解反应模型.....	104
7.2.1.2 碳燃烧反应模型.....	105
7.2.1.3 挥发分燃烧反应模型.....	106
7.2.1.4 NO <sub>x</sub> 排放过程反应模型.....	107
7.2.1.5 脱硫过程反应模型.....	110
7.2.2 模拟工况及条件.....	111
7.2.3 模拟结果与 Topal 等实验数据对比.....	112
7.2.4 煤颗粒燃烧过程瞬时结果分析.....	114
7.2.4.1 瞬时浓度与速度分布.....	114



7.2.4.2	瞬时颗粒相组分质量分数分布 .....	116
7.2.4.3	瞬时气相组分摩尔分数分布 .....	117
7.2.4.4	瞬时气相与颗粒相温度分布 .....	121
7.2.5	煤颗粒燃烧过程时均结果分析 .....	123
7.2.5.1	时均浓度与速度分析 .....	123
7.2.5.2	时均颗粒相速度脉动二阶矩分析 .....	125
7.2.5.3	时均颗粒相雷诺应力型二阶矩分析 .....	128
7.2.5.4	时均碳燃烧结果分析 .....	130
7.2.5.5	时均挥发分燃烧结果分析 .....	132
7.2.5.6	时均 NO <sub>x</sub> 排放结果分析 .....	135
7.2.5.7	时均脱硫结果分析 .....	138
7.2.5.8	时均气相与颗粒相温度分析 .....	141
7.3	煤-生物质混合燃烧特性分析 .....	143
7.3.1	模拟工况及条件 .....	143
7.3.2	单纯煤燃料模拟结果及分析 .....	144
7.3.3	煤与稻壳混合燃烧模拟结果及分析 .....	150
7.4	循环流化床反应器二氧化碳捕集特性分析 .....	152
7.4.1	模拟工况及条件 .....	152
7.4.2	实验对比 .....	153
7.4.3	模拟结果分析与讨论 .....	154
7.5	本章小结 .....	156
<b>8</b>	<b>流化床内气化过程特性的模拟 .....</b>	<b>158</b>
8.1	引言 .....	158
8.2	Gerber 等的生物质气化过程模拟研究 .....	158
8.2.1	生物质气化过程反应模型 .....	158
8.2.1.1	生物质热解反应模型 .....	159
8.2.1.2	焦油热解反应模型 .....	160
8.2.1.3	水气转换反应模型 .....	160
8.2.1.4	燃气氧化反应模型 .....	161
8.2.1.5	碳的气化反应模型 .....	161
8.2.2	模拟工况及条件 .....	162
8.2.3	模拟结果与 Gerber 等实验对比 .....	165
8.2.4	生物质气化过程瞬时结果分析 .....	166

8.2.4.1	初始流化特性分析	166
8.2.4.2	瞬时浓度分布	171
8.2.4.3	瞬时气相组分摩尔分数分布	172
8.2.4.4	瞬时气相与颗粒相温度分布	178
8.2.5	生物质气化过程时均结果分析	180
8.2.5.1	时均浓度与速度分析	180
8.2.5.2	时均颗粒相速度脉动二阶矩分析	184
8.2.5.3	时均气相与颗粒相雷诺应力型二阶矩分析	189
8.2.5.4	时均焦油热解过程分析	192
8.2.5.5	时均燃气氧化分析	193
8.2.5.6	时均碳颗粒燃烧和气化过程分析	198
8.2.5.7	时均气相与颗粒相温度分析	202
8.3	Loha 等的生物质气化过程模拟研究	203
8.3.1	模拟工况及条件	203
8.3.2	与 Loha 等实验结果的对比	204
8.3.3	流动特性分析	205
8.3.3.1	床料流动模型分析瞬时特性	205
8.3.3.2	颗粒速度分布时均特性	207
8.3.4	反应模拟结果分析	208
8.3.4.1	瞬时气相各组分浓度分布	208
8.3.4.2	时均气相各组分浓度分布	210
8.3.4.3	生物质颗粒浓度分布与温度场的关系	210
8.3.4.4	化学反应速率分布	212
8.3.5	不同生物质气化模拟结果及分析	213
8.4	本章小结	215
参考文献		217
附录 气相亚格子湍动能方程的推导过程		234
彩色图版		

# 第一篇

---

# 基础知识

---



# 流化床技术

## 1.1 流化床技术概述

我国是能源大国，但考虑综合能源的种类、地理、人口等因素的影响，我国能源从结构和数量上都存在着先天的“瑕疵”。近年来发展的氢能、地热能、核能等新能源具有高效节能的特性，但由于受现今技术水平和能源属性的限制，无法得到大面积推广<sup>[1]</sup>。因此，大力发展流化床技术，运用先进理论的研究成果，建造高参数、大容量、低污染的锅炉机组，是解决当下经济发展、能源利用与环境保护之间矛盾的有效方法。

流化床最早的工业应用是在 1922 年，德国科学家 Winkler 利用流化技术进行煤的燃烧气化，随后美国和欧洲相继开展相关的研究工作<sup>[2]</sup>。20 世纪 60 年代之后，随着包括中国在内的很多国家对流态化技术进行深入的研究，流化床技术得到快速的发展，并逐步实现商业化。流化床燃烧技术是以流态化技术为基础，燃料在流化状态下进行燃烧的一种技术。流化床锅炉理论技术和制作工艺已基本成熟，相对于其他炉型其制造和运行成本都比较低，能在保证高效燃烧的基础上显著降低大气污染物的排放，具有低温燃烧、良好的煤种适应性、低污染物排放、床内传热能力强、负荷调节范围广等技术优势，同时适宜商业化推广，符合现今我国国情的需要。循环流化床锅炉的发电热效率可以达到 43.2%，比目前我国发电厂平均效率高 12%，与传统的燃气蒸汽联合循环发电热效率相比毫不逊色，却可以大大降低成本<sup>[1]</sup>。

我国是国际上早期开展流化床燃烧技术研究工作的国家之一，1965 年我国建成第一台以油页岩为燃料的工业鼓泡流化床锅炉，此后此项技术在我国得到很好的推广。20 世纪 80 年代中期我国开始投入科研力量积极开发流化床燃烧技术，清华大学、中科院热物理研究所等科研机构与国内的锅炉企业合作，在燃烧、传热、流态化、脱硫等方面取得累累硕果，并逐步实现大面积推广及商业化。目前我国已有千余台循环流化床锅炉投入使用，但大多数是容量在

20.83~61.11kg/s 的中小型锅炉<sup>[3]</sup>。随着国内研究流态化工作的不断深入, 东方锅炉厂于 2013 年自主设计开发 600MW 超临界流化床锅炉并在四川白马电站成功投运, 此举标志着我国已掌握超临界流化床锅炉的研发、制造、调试等过程中相应的技术<sup>[4]</sup>。600MW 超临界机组与同等级亚临界机组相比, 发电效率可提高 3%, 达到 41%, 每千瓦时煤耗可由 324g 减少到 300g, 经济性和环保效益显而易见<sup>[1]</sup>。

流化床燃烧设备一般由布风装置、燃烧室、飞灰分离收集装置和返回装置组成, 部分循环流化床锅炉外部还带有热交换器<sup>[5]</sup>。在流化床锅炉运行过程中, 大颗粒在燃烧室的下部, 小颗粒在燃烧室的上部。根据流化床的发展历程, 流化床燃烧技术可分为鼓泡流化床和循环流化床。在燃料的适应性、燃烧效率等方面, 循环流化床燃烧技术比鼓泡流化床向前推进一步, 在钙硫比为 2 左右时可达 85%~90% 的脱硫效率, 对环境保护极为有利<sup>[5]</sup>。以电站用循环流化床直流锅炉为例简述其基本的工作过程, 燃料煤由煤场经运煤系统进入燃料储存仓, 由燃料储存仓进入磨煤机, 煤被磨煤机加工成粒度小于 6mm 的煤粒后被风吹入炉膛。为保护环境, 减少硫化物的排放, 需同时将石灰石加入炉膛 (一般为保证脱硫效果将炉内的温度控制在 850℃ 左右)。进入煤粒燃烧反应过程, 燃烧过程中, 大量颗粒因气流的作用离开炉膛进入旋风分离器, 燃烧不完全的燃料颗粒和大颗粒在分离器的作用下被分离出来, 重新送回到锅炉炉膛或经外置式换热器再重新进入炉膛。经旋风分离器分离出来的烟气沿烟管进入尾部烟道与布置在尾部烟道的过热器、省煤器、空气预热器中的工质进行充分的换热, 再经过除尘装置除尘 (烟气达到国家规定的控制标准), 在引风机的作用下排入大气环境中<sup>[2]</sup>。

20 世纪 70 年代, 德国鲁奇公司第一个申请循环流化床的专利权<sup>[3]</sup>, 1979 年, 芬兰 Ahlstrom 公司交付世界上第一台循环流化床锅炉, 此后, 流化床技术以其优越的环保特性、燃料适应性和良好的负荷调节性, 被称为“清洁燃烧”的高新技术。我国是世界上流化床锅炉数量最多、总装机容量最大、技术发展最快的国家<sup>[6]</sup>。我国的循环流化床燃烧技术共有自主开发、国外引进及引进技术的消化吸收三个主要来源<sup>[1]</sup>。高效率、低污染是电厂和锅炉生产厂商追求的主要目标, 流化床锅炉燃烧技术的污染控制成本较低, 具有一定的技术优势。但是, 由于其目前采用的蒸汽参数相对不高, 在达到较高发电效率方面不具有优势。

国内外专家普遍认为, 循环流化床锅炉未来将朝着大型化、超临界方向发展。在能源清洁高效利用领域研究流化床锅炉技术主要包括两个方面: 增加使用功能和提高单机容量。同时, 运用循环流化床燃烧技术改造现有锅炉, 是应对当前环境的有效办法, 并且在技术上是可行的、合理的。循环流化床能够节约煤炭资源, 燃用劣质燃料, 对环境污染小, 进一步推广循环流化床锅炉技术以解决我国当前

能源短缺、环境污染严重等问题，具有重要的现实意义<sup>[7]</sup>。

流化床技术是一种先进的燃烧技术，世界各国纷纷进入研究流化床燃烧技术的领域，使流化床燃烧技术得到充分的发展。德国、美国、法国以及芬兰均开发了各自的 CFB（circulating fluidized bed）锅炉技术。20 世纪末，国际主要的流化床锅炉厂商之间进行商业兼并，导致不同流派的流化床燃烧技术相互结合与渗透，逐渐形成美国 Foster Wheeler 公司和法国 Alstom 公司两大流化床锅炉技术集团<sup>[7]</sup>。

## 1.2 流化床技术分类

随着流化床技术的不断发展和完善，为适应市场的需要，出现不同结构和运行参数的流化床产品，以及多种分类标准，具体如下<sup>[8]</sup>。

### 1.2.1 按分离器工作温度分类

在循环流化床锅炉中分离器的主要任务是将飞灰中的大量未燃尽固体燃料分离出来，再送入炉膛继续燃烧，进而减少固体不完全燃烧带来的损失。根据分离器工作温度的不同分为采用高温分离器的循环流化床锅炉、采用中温分离器的循环流化床锅炉和采用低温分离器的循环流化床锅炉。

采用高温分离器的循环流化床锅炉的分离器工作温度为一般为 850~900℃，芬兰 Ahlstrom 公司生产的 Pyroflow 型循环流化床即为采用高温分离器的锅炉，德国 Lurig 公司和美国 Foster Wheeler 公司大多生产采用高温分离器的锅炉。采用中温分离器的循环流化床锅炉的分离器工作温度一般为 400~600℃，德国 Babcock & Wilcox 公司生产的 Circofluid 型循环流化床、浙江大学和杭州锅炉厂共同研制的 NG-35/3.82 循环流化床都采用中温分离器。采用低温分离器的循环流化床锅炉的分离器工作温度一般为 200~300℃，低温分离器单独使用时，大多用于鼓泡流化床的飞灰回燃装置，也可与高温分离器构成组合分离器。中国科学院工程热物理研究所与杭州锅炉厂共同研制的 NG-75/3.85-M1 型循环流化床和 Babcock&Wilcox 公司的部分产品采用的就是组合分离系统。图 1-1、图 1-2 所示为采用高温分离器的循环流化床锅炉，图 1-3 为采用中温分离器循环流化床锅炉。

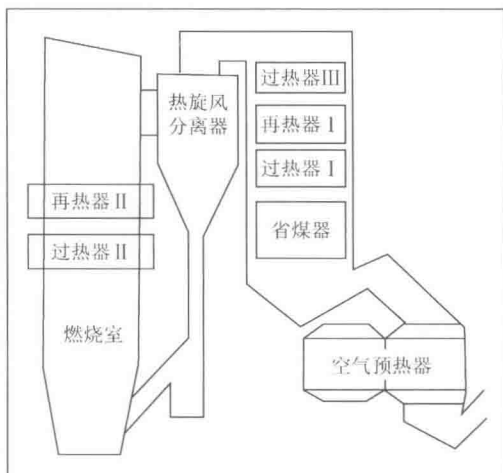


图 1-1 Pyroflow 型 CFB 示意图



图 1-2 Foster Wheeler 生产的锅炉

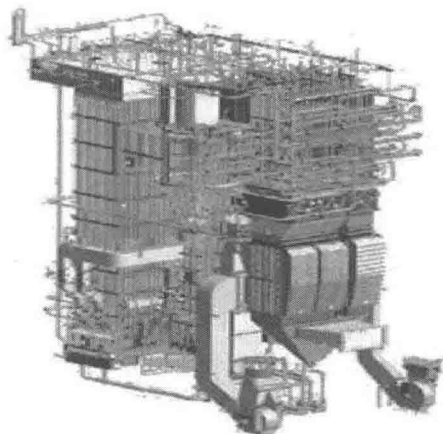


图 1-3 中温分离器



## 1.2.2 按分离器结构形式分类

分离器的结构形式对分离器的分离效率有重要的影响，为适应不同品质燃料的特性，循环流化床中分离器的形式很多，按照分离器结构形式对流化床分类，可分为采用旋风分离器的循环流化床锅炉、采用惯性分离器的循环流化床锅炉、采用组合系统的循环流化床锅炉和采用旋涡燃烧分离器的循环流化床锅炉。

### 1.2.2.1 采用旋风分离器的循环流化床锅炉

旋风分离技术在理论和实践上都较为成熟，且效率高，因此得到广泛的应用。随着技术的不断创新，旋风分离器从有无冷却方面可分为绝热型旋风分离器、水冷型旋风分离器 and 气冷型旋风分离器。水冷型旋风分离器由 Foster Wheeler 公司开发成功，水冷型旋风分离器主要优点在于能减少高温分离器的热损失、保护分离器的金属表面。但水冷型旋风分离器的稳定性与水循环的可靠性有关，为克服稳定性的弊端，Foster Wheeler 公司又开发了气冷型旋风分离器。由于结构的原因旋风分离器一般造价较高，为此 Ahlstrom 公司研制了方形旋风分离器 Pyroflow Compact 型循环流化床锅炉，清华大学与四川锅炉厂共同研制的方形旋风分离器也已投入使用，不但使成本大幅降低，而且在分离效率上与前者大致相同。图 1-4 为旋风分离器，图 1-5 为用旋风分离器的循环流化床锅炉。

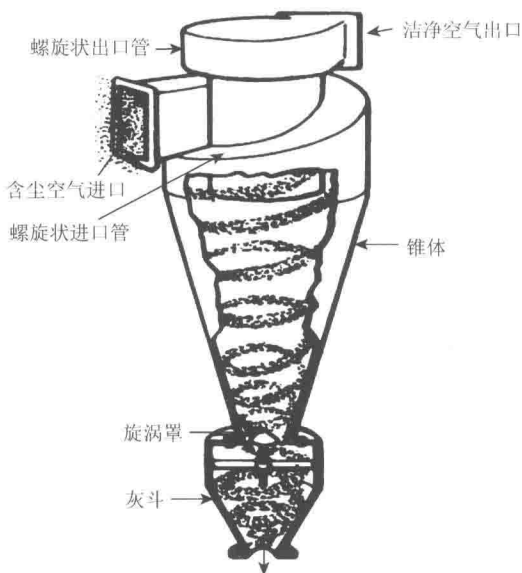


图 1-4 旋风分离器