

国家“九五”重点图书·能源高效、清洁利用丛书

气固分离理论及技术

岑可法 倪明江 严建华 华祥翔
骆仲泱 李 池 方梦翔
李 旭 天 光 高 程 乐 鸣
蒋 旭 光 程 乐 鸣 著

浙江大学出版社



国家“九五”重点图书●能源高效、清洁利用丛书

气固分离理论及技术

岑可法 倪明江 严建华
骆仲泱 李晓东 方梦祥 著
李绚天 池 涌 高 翔
蒋旭光 程乐鸣

浙江大学出版社

气固分离理论及技术

岑可法 倪明江 严建华
骆仲泱 李晓东 方梦祥 著
李绚天 池涌 高翔
蒋旭光 程乐鸣

责任编辑 陈子饶

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路20号 邮政编码310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

杭州金融管理干部学院印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787mm×1092mm 16开 45印张 1142千字

1999年3月第1版 1999年3月第1次印刷

印数 0001—1060

ISBN 7-308-02095-9/TK·011 定价:50.00元

07/11/38

内容提要

本书是一本气固分离领域的专著,它系统地阐述了气固分离的理论基础、分离机理、设计计算方法、各种分离技术及装置的原理、结构、运行影响参数。全书共分17章。第1、2、3章讨论了气固分离有关的颗粒特性、参数、效率及分离方式;第4、5章探讨了气固多相流在边界层和管内的流动及沉降规律;第6、7、8三章集中讨论气固惯性分离技术诸如重力分离、转折惯性分离以及绕流撞击分离;第9、10两章分别研究了常温及高温旋风分离技术;第11、12、13章阐述了布袋、颗粒层和高温陶瓷过滤技术;第14、15章专门讨论了电除尘和湿法除尘技术;第16章研究了复合多级气固分离原理和装置;最后一章讨论了除尘和脱硫相结合的气固分离装置。

书中汇集了作者多年来在该领域内的研究成果,并引用了国内外近年来在气固分离领域的概念、新成果和专利,使得本书更具有实用价值。

本书不但可供能源、环保、化工、建材、轻工、冶金等领域工程技术人员参考,同时也可作为研究生有用的参考书。

前 言

气固分离技术广泛应用于能源、环保、化工、建材、轻工、冶金等与国民经济密切相关的领域。由于工业流程的需要及科学技术的发展,先后出现了为数众多的气固分离技术和专利,从常温到高温,从低气固浓度到高气固浓度,从单级到多级,从单用途到多用途,林林总总,琳琅满目。

本书的目的就是结合作者多年来从事这一领域的研究成果,对现有的气固分离技术加以分类、总结,并遵循理论密切结合工程实践的原则,对典型的气固分离技术的理论基础、计算设计原理及结构应用特点紧密地有机联系,力图使之既有学术价值及相应的理论水平,又能指导工程实际应用。本书在安排上分成若干部份:第1至第5章是阐述气固分离的理论基础及分离原理,第6至第14章是各种干式气固分离技术的讨论,第15章探讨了湿式气固分离的方法,第16章是研究了复合多级分离的原理及方法,最后一章是讨论了和除尘、脱硫、余热回收多用途相结合的气固分离原理及装置。这样,使读者在读完本书以后,对整个气固分离有一个较完整的概念。

参加本书编写的有岑可法院士、倪明江教授、骆仲泱教授、严建华教授、李晓东副教授、方梦祥教授、李绚天副教授、池涌教授、高翔副教授、蒋旭光博士、程乐鸣博士。所有作者均具有博士学位。他们分别在气固分离机理及理论、气固惯性撞击分离、旋风除尘、高温气固分离、复合多级气固分离以及除尘、脱硫、余热回收相结合的气固分离技术方面进行过系统的研究。根据这些成果,结合作者近年来搜集到的相关的研究报告、论文、专利等加以整理、组织撰写成这一专著。在撰写过程中,作者对每一章节逐章逐节进行分析、讨论,相互启发,共同修改,因此可以说本书是一本集体完成的著作,同时在撰写时引用了浙江大学热能工程研究所同事们及研究生们的大量研究资料,为此作者要特别感谢樊建人教授、康齐福教授、施正伦高工、黄国权副教授、杨家林高工、罗卫红博士、周劲松博士、方建华博士、姚建奎硕士、周大冬硕士、曾克立硕士、李扬新硕士、沈耀良硕士、梁绍荣博士、邱坤赞博士等人的无私帮助。

1997年4月2日是浙江大学建校一百周年,仅以此书献给母校百年校庆。最后,限于作者的水平,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1996年10月于浙江大学求是园

本书主要符号表

A — 能量、差分方程的系数、化学组分	H_i — 高度比 $H_i = h_i/r_n$
a — 面积、分离器进口高度	H_z — 高度比, $H_z = h_z/r_n$
B — 宽度、耗煤量、叶片间距	H_{fu} — 燃料热值
b — 分离器进口宽度、平面射流宽度、过滤器 外围圆筒半径	h — 焓高度
C — 常数、浓度	h_i — 分离器筒体高度
C_{mv} — 单位体积质量浓度	h_z — 分离器锥体高度
C_{nv} — 单位体积个数浓度	I — 湍流强度
C_{ppm} — 体积浓度以 ppm 表示	i — 单位质量热焓电流、电晕电流
C_D — 阻力系数	i_l — 单位长度电流
C_u —Cunningham 修正系数	i_a — 单位面积电流
D — 直径(分离器,管)、扩散系数、过筛 累积百分数、电位移	J — 通量
D_B —Brown 扩散系数	K — 离子迁移率
D — 电位移	k — 蒸发常数反应率系数、湍流脉动动能热 容比 $k = c_p/c_d$
d — 粉尘颗粒直径(当 d 是变量时用 δ 代 替,微分量 $d\delta$)	L — 长度、湍流标尺
d_{c50} — 分离效率 50% 的临界粒径	l — 长度
d_{c100} — 分离效率 100% 临界粒径	l_m — 混合长度
E — 活化能、弹性模量、电场强度	M — 分子量、力矩
E_0 — 电晕区边沿电场强度	m — 质量
E_c — 沉降极电场强度	N — 旋转圈数、管排数、转速
e — 粗糙度高度	Nu —Nusselt 数
F — 体积力	NTU — 传递元数
F_c —Coulomb 力	n — 个数,颗粒数密度、旋涡指数、过滤元件 数、克分子数、占颗粒总数量的份额
f — 脉动频率、频率混合物分数、摩擦因素	P — 功率、压力特征值
f_z — 阻力	Pe —Peclete 数
f_w — 外力	p — 压力
G — 重力、重量流量	Δp — 压力损失
G_k — 湍流动能产生项	Pr —Prandtl 数
g — 重力加速度	Q — 体积、流量、热量
H — 高度 高度比 $H = h/r_n$	q — 电荷热流
	R — 湍流关联数、反应速率、半径、筛余累积 质量频率

Re —Reynolds 数	t — 时间
Ru — 统一气体常数	U — 内能、电位(压)
ΔR — 颗粒级差	u — 流速矢量、切向速度
r — 半径	u_w — 内筒处切向速度
r_0 — 电晕半径	u_w — 外筒处切向速度
r_x — 电极线半径	V — 体积
S — 旋流数、源项、熵	V_0 — 流体微团的体积
Stk —Stokes 数	v — 比容、气相速度、轴向速度、平均速度
St —Strouhal 数	W — 功率
Sc —Schmidt 数	w — 径向速度
S_1 — 管横向间距	w_s —Stokes 沉降速度
S_2 — 管纵向间距	w_k — 颗粒径向速度
s — 距离、化学当量比、单位质量熵	X — 污染质特性值的时间导数
T — 温度	Eu — 欧拉数

希腊字母符号表

α — 角度	χ — 电介质常数 $\chi = \epsilon/\epsilon_0$
β — 角度、电子被气体吸附前所需要的平均碰撞次数、松弛因子	λ — 气体分子平均自由程、导热系数、速度比、转速比
I — 环量	ν — 流体的运动粘度
γ — 重度	ξ — 以 v_j 为基准的压力损失系数、无因次出力
δ — 粉尘粒径,用于表示变化的粒径、厚度、特征长度、偏心距	π — 圆周率
δ_{ij} — 单位张量	ρ — 密度、比电阻
k — 常数	ρ_c — 电荷体密度
ϵ — 空隙率、介电系数	ρ_k — 颗粒密度
ϵ_0 — 真空中的介电系数	ρ_l — 流体密度
ζ — 以 v_c 为基准的压力损失系数	σ — 表面张力
μ — 流体动力粘度	ϕ, ψ — 耗散函数通用形式因变量、两相流中某一相的体积分
η — 除尘(分离)效率	τ — 剪应力、弛豫时间
η_m — 质量除尘效率	Φ — 速度势
η_a — 面积除尘效率	Φ_c — 电通量
η_n — 个数除尘效率	ψ — 角度、流函数
$\eta(\delta)$ — 分级除尘效率	Ω — 旋转矢量、旋流数
θ — 角度剩余温度	ω — 角速度

下角标

A — 空气、灰分	p — 颗粒、一次流
av — 平均值	n — 法线方向、筒内
c, cr — 对流、临界	o — 出口
d — 扩散	out — 外部
e — 外部	ox — 氧化剂
eq — 当量	pr — 燃烧产物
eff — 有效	r — 辐射、驰豫、回流、径向
F, fu — 燃料	s — 二次流、表面处
g — 气相	$stoich$ — 化学当量的
i, in — 内部、初始、入口	T, t — 湍流、切向、终端
i, j, k — 坐标方向	v — 挥发份
j — 气相某组合、交叉射流汇合点	w — 壁面处、水分
k — 颗粒群某尺寸组	∞ — 无穷远处
l — 层流	ϕ — 变量 ϕ 的
m — 轴线值、混合物	δV — 微元体积
max — 最大值	δA — 微元面积
min — 最小值	Z — 轴向

上标及上角标

— 平均值	* 猜想(初设)值
· 脉动值、修正量	· 时间变化率

目 录

1 影响气固分离的颗粒特性	1
1.1 颗粒粒径	1
1.1.1 用颗粒尺寸表示的粒径	1
1.1.2 颗粒的当量粒径	1
1.1.3 颗粒群的平均粒径	3
1.2 颗粒分布的表达方法	5
1.2.1 分散相颗粒分布的表达	5
1.2.2 固体颗粒粒径的分布函数	7
1.3 颗粒的形状	10
1.3.1 形状系数	10
1.3.2 形状指数	11
1.3.3 颗粒形状的数学描述	12
1.4 与气固分离过程有关的颗粒物理特性	14
1.4.1 固体颗粒浓度	15
1.4.2 气体密度、颗粒密度和气固多相流密度	16
1.4.3 比表面积	16
1.4.4 气固多相流的粘度	17
1.4.5 气固多相流的比热和导热系数	17
1.4.6 颗粒的润湿性	18
1.4.7 固体颗粒的燃烧性及爆炸性	18
1.4.8 颗粒的荷电性和比电阻	19
1.4.9 颗粒沉降的安息角与滑动角	20
1.4.10 颗粒的凝聚性	21
2 气固分离方式及其机理	22
2.1 气固重力分离机理	22
2.2 气固离心及惯性分离机理	24
2.2.1 离心式分离	24
2.2.2 惯性分离	25
2.2.3 准则关系式	25
2.3 拦截捕获机理	26
2.4 颗粒在气流中的荷电分离机理	27
2.5 不等温流动中颗粒受热泳力分离机理及光泳力分离机理	30
2.5.1 热泳力分离机理	30
2.5.2 光泳力分离机理	31

2.6	扩散泳力分离机理	31
2.7	微细颗粒的扩散分离机理	32
2.8	固体颗粒在湍流流动中的分离机理	34
2.9	颗粒的凝聚作用	35
2.9.1	由于颗粒运动产生的颗粒凝聚	35
2.9.2	利用液体使颗粒凝聚	37
2.9.3	声波的凝聚作用	37
2.10	气固分离的基本物理模型	39
2.10.1	塞状流分离型式	39
2.10.2	横混分离型式	39
2.10.3	全返混模型	39
2.11	气固分离器的分类	40
2.12	气固分离及除尘性能	41
2.12.1	评定分离器的指标	42
2.12.2	分离效率的计算	46
3	气固分离特性参数的测定及研究方法	48
3.1	气固多相流中颗粒粒径的测定	48
3.1.1	取样测量法	48
3.1.2	非接触式测量法	51
3.2	气固流动中颗粒速度的测量	52
3.2.1	接触式测量技术	52
3.2.2	非接触式测量技术	52
3.2.3	气固两相流动的可视化研究	53
3.3	气固多相流中颗粒浓度的测量	53
3.3.1	等速取样原理	54
3.3.2	不等速取样原理	54
3.3.3	等速取样器种类	57
3.4	粉尘比电阻的测定	62
3.4.1	平行圆盘法	62
3.4.2	探针法	63
3.4.3	同心圆筒电极法	64
3.4.4	点-板法	64
3.4.5	叉梳式比电阻测定仪	65
3.5	循环流化床锅炉循环倍率与分离效率的关系	66
3.6	气固分离除尘的相似放大问题	70
3.6.1	气固两相运动方程和相似准则数的导出	70
3.6.2	近似模化条件的确定	75
4	气固两相流边界层的流动规律及其对气固分离的影响	78
4.1	气固分离时的颗粒受力分析	78
4.1.1	惯性力	78

4.1.2	压力梯度力	78
4.1.3	阻力	79
4.1.4	颗粒旋转时的 <i>Magnus</i> 力	86
4.1.5	升力	86
4.1.6	虚拟质量力	87
4.1.7	<i>Basset</i> 力	87
4.1.8	热泳力	87
4.1.9	单颗粒的拉格朗日运动方程	87
4.1.10	小结	88
4.2	固相的存在对气固两相流流动特性的影响	89
4.2.1	对速度分布的影响	90
4.2.2	对湍流强度的影响	92
4.2.3	对频谱分布的影响	94
4.2.4	弛豫时间和特征尺度	95
4.2.5	小结	97
4.3	气固两相流层流边界层的流动规律	97
4.3.1	层流边界层	98
4.3.2	求解方法	100
4.3.3	颗粒扩散项对求解结果的影响	104
4.3.4	小结	106
4.4	气固两相流湍流边界层的流动规律	107
4.4.1	问题的提出	107
4.4.2	颗粒的跳跃	107
4.4.3	湍流边界层中的颗粒-湍流相互作用	110
4.4.4	欧拉频谱和拉格朗日频谱	115
4.4.5	小结	116
4.5	气固两相流在管内流动的边界层问题	116
4.5.1	基本问题	116
4.5.2	管内气固两相流的求解	117
4.5.3	管内气固两相流的分区	119
4.5.4	小结	122
4.6	气固两相流在边界层上的沉积	122
4.6.1	颗粒间的相互作用	122
4.6.2	高浓度气固两相流中颗粒间的碰撞	126
4.6.3	颗粒与壁面的碰撞	128
4.6.4	在壁面边界层内颗粒的沉降	132
4.6.5	小结	136
4.7	颗粒在旋风分离器内的运动及分离效率	136
4.7.1	旋风分离器中的流场	136
4.7.2	边界层	137
4.7.3	颗粒在旋转气流中的运动	137
4.7.4	模型计算结果	138
4.7.5	小结	143

5	颗粒在管内流动及其沉降过程	145
5.1	颗粒在管内流动及沉降的形式	145
5.1.1	颗粒在管内流动及沉降的形式分类	145
5.1.2	固体颗粒的沉降速度	148
5.1.3	气力输送的几个工艺参数	149
5.2	气固多相流在管内悬浮运动的机理及所需的能量	151
5.2.1	气固悬浮机理	151
5.2.2	气固悬浮所需的能量	152
5.3	气固多相流在水平管道内的加速、运动、沉降与分离	153
5.3.1	颗粒在水平管内运动速度的计算	153
5.3.2	颗粒群在水平管道内运动速度的计算	156
5.3.3	在水平管内流动时颗粒的沉降计算	160
5.4	气固多相流在垂直管道内加速、运动、沉降与分离	164
5.4.1	颗粒在垂直管道内运动速度的计算	164
5.4.2	颗粒群在垂直管道内运动速度的计算	165
5.4.3	在垂直管内流动时颗粒的沉降计算	168
5.5	气固多相流在斜管和弯管内流动时的分离和沉降	170
5.5.1	在斜管内流动时的计算	170
5.5.2	在弯管内流动时的计算	178
5.6	气固多相流管内流动防止沉降的最低速度和输送极限的确定	194
5.6.1	气固多相流临界最低输送速度的确定	194
5.6.2	气固多相流动的输送极限和最佳值	197
6	重力分离理论及其分离器	199
6.1	重力沉降理论及计算	199
6.2	重力沉降室的分离效率及压降	204
6.2.1	层流条件下的沉降	204
6.2.2	湍流条件下的沉降	205
6.2.3	沉降室的尺寸确定	205
6.2.4	重力沉降室的压降	207
6.3	重力沉降室的形式及结构	207
7	转折式气固惯性分离理论及技术	210
7.1	转折式气固惯性分离器形式	210
7.2	转折式气固惯性分离机理模型	210
7.2.1	忽略重力时的层流折转流动的塞流模型	210
7.2.2	湍流流动时的横混模型	213
7.2.3	非均匀颗粒分布的横混模型	214
7.3	U形转折式惯性分离器	216
7.3.1	U形转折式惯性分离器气固分离过程的数值模拟	216
7.3.2	U形分离器气相流动的数学模型及计算方法	217
7.3.3	U形分离器固相流动的数学模型及计算方法	219

7.3.4	<i>U</i> 形分离器的数值模拟计算结果	220
7.4	影响 <i>U</i> 形分离器中的气固惯性分离各种参数的试验研究	221
7.5	<i>U</i> 形惯性分离器的设计与应用	225
7.6	百叶窗式惯性分离器	227
7.7	百叶窗气固分离机理的理论分析	230
7.7.1	颗粒运动轨迹方法	230
7.7.2	分区横混模型	232
7.7.3	数值分析方法	237
7.8	百叶窗式分离器的性能及其影响因素	239
7.8.1	抽气式卧(立)式百叶窗分离器	239
7.8.2	无抽气式百叶窗分离器的试验研究	242
7.8.3	百叶窗式湿雾分离器的性能	246
7.9	百叶窗式惯性分离器的设计	247
7.9.1	设计步骤	248
7.9.2	百叶窗式分离器在设计和选用时应注意的问题	250
7.10	百叶窗式惯性分离器的应用	251
8	绕流撞击式气固分离理论及除尘技术	254
8.1	绕流撞击式气固分离器的分离原理及其类型	254
8.2	绕流撞击式惯性分离器气固分离机理的理论分析	257
8.2.1	撞击-拦击-沉降模型	258
8.2.2	撞击-离心分离模型	259
8.3	<i>U</i> 形槽钢惯性分离器	260
8.3.1	<i>U</i> 形槽钢分离器两相流场分析	261
8.3.2	<i>U</i> 形槽钢气固两相流湍流结构	265
8.4	<i>U</i> 型槽钢惯性分离器性能的影响因素	266
8.4.1	分离元件横向间距的影响	267
8.4.2	分离元件纵向间距的影响	267
8.4.3	分离元件排数的影响	268
8.4.4	气流速度的影响	269
8.4.5	入口颗粒浓度的影响	269
8.5	鳍片管束惯性分离器及其气固两相流动特性	270
8.5.1	鳍片管束惯性分离器的气固两相流动特性	271
8.5.2	鳍片管束分离器内气固流动特性的数值模拟	278
8.6	影响鳍片管束撞击式惯性分离器性能的因素	282
8.6.1	影响分离性能的因素试验研究	283
8.6.2	影响阻力特性的因素试验研究	288
8.7	鳍片管束撞击式惯性分离器强化传热性能和磨损特性	290
8.7.1	鳍片管传热性能及其与光管传热性能的比较	290
8.7.2	鳍片管上鳍片的温度分布规律	292
8.7.3	鳍片管气固分离器的磨损特性	293
8.8	槽形半圆管惯性分离器	294

8.8.1	绕流槽形半圆管流场分析	294
8.8.2	槽形半圆管分离器的试验研究	295
8.9	平板(圆柱)撞击式惯性分离器	297
8.9.1	顺列布置的平板撞击式分离器	297
8.9.2	错列布置的平板撞击式分离器	300
8.9.3	圆柱撞击式分离器	302
8.10	不同形式绕流撞击式气固惯性分离器的比较	304
8.10.1	气固两相流动特性的比较	304
8.10.2	流场对各分离元件磨损性能的影响	309
8.10.3	各分离器分离效率及阻力特性的比较	309
8.11	绕流撞击式气固分离器的设计及应用	310
8.11.1	绕流撞击式气固分离器的设计	310
8.11.2	绕流撞击式气固分离器的应用	312
9	气固旋风分离理论及除尘装置	318
9.1	旋风分离过程	318
9.1.1	旋风分离概说及分类	318
9.1.2	旋风分离过程	320
9.2	旋风分离器内气相流动特性	320
9.2.1	旋风分离器内气流实际流动过程	320
9.2.2	旋风分离器内气流流动数值计算	326
9.2.3	旋风分离器内压力分布及阻力损失计算	327
9.3	旋风分离器气固分离机理及分离效率计算	329
9.3.1	转圈理论模型	329
9.3.2	平衡轨道理论(称筛分理论)	331
9.3.3	边界层分离理论	332
9.3.4	旋风分离器总分离效率	333
9.4	旋风分离器内颗粒的运动规律	334
9.4.1	颗粒运动方程	334
9.4.2	颗粒运动的数值解	334
9.5	影响颗粒在旋风分离器内分离的各种因素	335
9.5.1	运行条件对分离器性能的影响	335
9.5.2	制造安装质量的影响	339
9.6	提高旋风分离器分离效率的有关方法和结构措施	339
9.6.1	改变进气口结构	340
9.6.2	改变圆筒体结构	346
9.6.3	改变圆锥体结构	348
9.6.4	改变排气管结构	351
9.6.5	改变排尘口结构	353
9.6.6	其它改变结构方法	355
9.7	降低旋风分离器阻力的方法和结构措施	359
9.7.1	竖直直流式旋风分离器	359
9.7.2	卧式旋风分离器	360

9.7.3	改变入口管结构	361
9.7.4	改变出口结构	363
9.7.5	在旋风风室内加入新的结构	363
9.7.6	惯性分离和旋风分离组合	364
9.8	减轻气固旋风分离器磨损的方法和措施	366
9.8.1	影响旋风分离器磨损的因素	366
9.8.2	减轻旋风分离器磨损的方法和措施	366
9.9	旋风分离器的设计	368
9.10	气固旋转分离理论及气固旋转分离器	371
9.10.1	气固旋转分离的原理	371
9.10.2	旋转分离器的气固分离理论	374
9.10.3	影响旋转分离器分离特性的各种参数	377
10	气固高温旋风分离及装置	383
10.1	概述	383
10.1.1	气固高温旋风分离的特点	385
10.1.2	影响高温旋风分离器性能的各种因素分析	386
10.2	常规高温上排气旋风分离器	396
10.2.1	常规高温旋风分离器的形式及结构特点	396
10.2.2	PV型高温旋风分离器	397
10.2.3	蒸汽(水)冷却高温旋风分离器	401
10.3	常规高温旋风分离器的设计及应用	403
10.3.1	常规高温旋风分离器的设计要点	403
10.3.2	高温旋风分离器的启停及适应变负荷特性	406
10.3.3	高温旋风分离器的保温及防腐措施	407
10.3.4	高温旋风分离器的应用概况	409
10.4	下排气旋风分离器	411
10.4.1	下排气式旋风分离器内气固流动特性	413
10.4.2	影响下排气旋风分离器分离特性的因素	417
10.4.3	下排气式旋风分离器中颗粒运动规律的数值模拟	420
10.4.4	下排气式旋风分离器的设计要点	423
10.5	方形高温上排气旋风分离器	425
10.5.1	方形高温上排气旋风分离器的结构特点	425
10.5.2	方形上排气旋风分离器的流动特性	426
10.5.3	分离器内气固两相流动的数值模拟	429
10.5.4	方形上排气分离器分离特性的影响因素试验研究	431
10.5.5	上排气方形旋风分离器的应用	433
10.6	方形下排气旋风分离器	434
10.6.1	方形下排气旋风分离器的结构特点	434
10.6.2	方形下排气分离器的流动特性	434
10.6.3	方形下排气旋风分离器分离特性的试验研究	435
10.7	卧式高温旋风分离器	438
10.7.1	常规逆流式卧式旋风分离器	438

10.7.2	带分离隔室内置卧式旋风分离器	442
10.7.3	卧式(水平)三旋涡旋风分离器	443
10.8	高温旋风气固内分离装置	446
10.8.1	旋涡流化床-内循环流化床	447
10.8.2	高温旋风气固内分离装置-圆柱形多人口旋风分离器	453
11	袋式除尘理论及设备	456
11.1	袋式除尘特点	456
11.1.1	袋式除尘原理	456
11.1.2	袋式除尘的指标特性	457
11.1.3	袋式除尘的应用范围	460
11.2	袋式除尘的分类	460
11.3	滤袋纤维对尘粒的捕获机理	462
11.3.1	气固多相流绕流纤维滤袋的流动过程	462
11.3.2	孤立捕集体的除尘机理	463
11.3.3	复合捕集物的捕集效率	469
11.3.4	袋式除尘器的除尘效率	471
11.4	典型袋式除尘器的结构和性能	472
11.4.1	简易清灰袋式除尘器	472
11.4.2	机械振动清灰袋式除尘器	473
11.4.3	逆气流清灰袋式除尘器	473
11.4.4	逆气流和机械振动并用清灰袋式除尘器	474
11.4.5	脉冲喷吹袋式除尘器	475
11.4.6	回转反吹扁袋除尘器	476
11.4.7	用静电强化的袋式除尘器	477
11.5	滤袋材质的要求	478
11.5.1	天然纤维滤料	479
11.5.2	无机纤维滤料	479
11.5.3	合成纤维滤料	480
11.5.4	毛毡滤料	480
11.6	袋式除尘器的设计	480
12	气固颗粒层过滤式分离器	483
12.1	颗粒层过滤器的除尘特点	483
12.1.1	颗粒层过滤器的除尘机理	483
12.1.2	颗粒层式过滤器的优缺点	484
12.2	颗粒层过滤器的结构型式	485
12.2.1	分类	485
12.2.2	固定床颗粒层除尘器	485
12.2.3	移动床颗粒层除尘器	488
12.2.4	流化床颗粒层除尘器	491
12.2.5	湿式颗粒层除尘器	492
12.3	颗粒层除尘器的设计	493

12.3.1	滤料选择	493
12.3.2	滤料粒度的选择	494
12.3.3	滤速选择	494
12.3.4	除尘效率	495
12.3.5	流阻计算	498
12.4	颗粒层除尘器的运行特性	499
12.4.1	料层阻力随时间的变化	499
12.4.2	反吹问题	499
12.5	颗粒床高温燃气过滤器	500
12.5.1	颗粒床高温燃气过滤器的结构型式	500
12.5.2	小结	503
13	高温陶瓷过滤器	504
13.1	高温陶瓷过滤器的应用	504
13.1.1	在燃煤联合循环发电系统中的应用	504
13.1.2	高温陶瓷过滤器的其它应用	507
13.2	陶瓷过滤器的工作原理	507
13.2.1	过滤机理	507
13.2.2	陶瓷过滤器的过滤元件	509
13.2.3	陶瓷过滤器的工作过程	511
13.3	影响高温陶瓷过滤器性能的各种因素分析	513
13.3.1	过滤器工作温度的影响	513
13.3.2	过滤器工作时间的的影响	513
13.3.3	过滤元件表观气速的影响	515
13.3.4	脉冲反吹清灰气流的影响	516
13.3.5	飞灰特性的影响	517
13.4	高温陶瓷过滤器的运行	518
13.4.1	高温陶瓷过滤器的运行情况	518
13.4.2	典型高温陶瓷过滤器介绍	520
13.4.3	高温陶瓷过滤器需进一步研究的问题	528
14	电除尘器	530
14.1	电除尘器的特点	530
14.2	电除尘器的基本类型	531
14.2.1	双区电除尘器	531
14.2.2	单区电除尘器	531
14.3	电除尘器原理	532
14.3.1	烟气在高电压下的电离	532
14.3.2	尘粒荷电过程	534
14.3.3	荷电尘粒的运动及沉降	537
14.3.4	除尘效率的计算	538
14.4	影响电除尘效率的各种因素	540
14.4.1	粉尘存在的影响	541