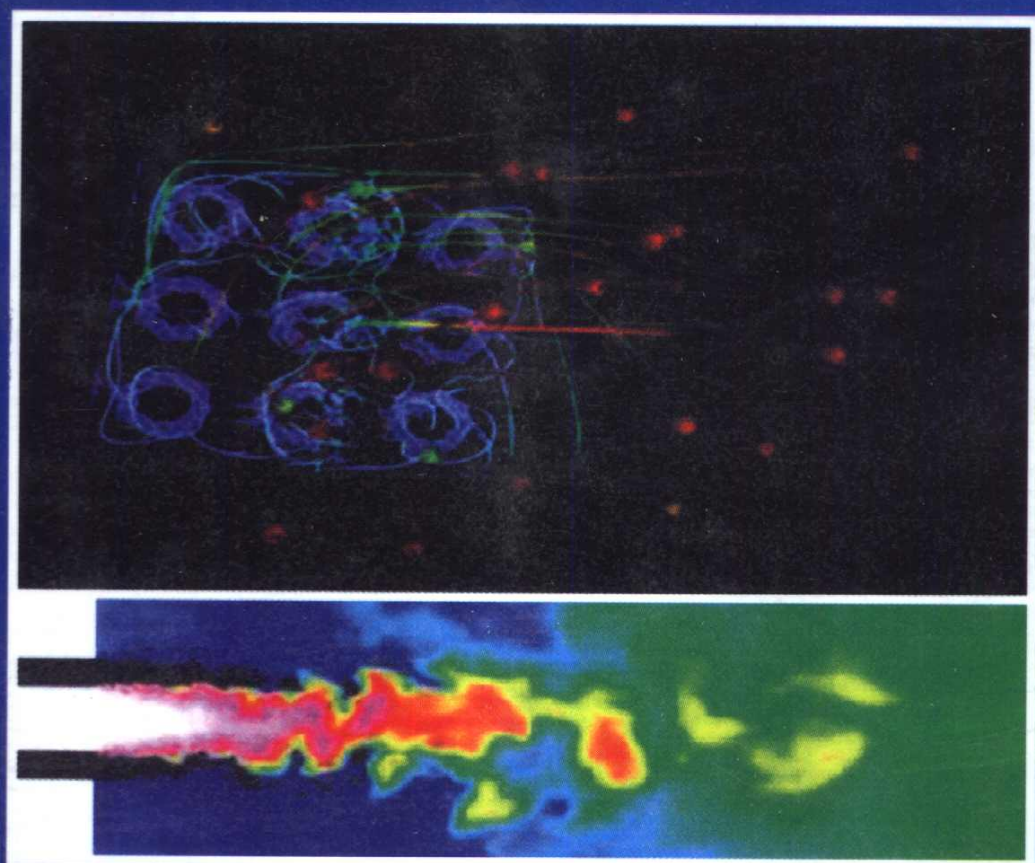


《近代空气动力学丛书》

多相湍流反应流体力学

Dynamics of Multiphase
Turbulent Reacting Fluid Flows

周力行 著



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

多相湍流反应流体力学/周力行著. —北京:国防工业出版社, 2002.1

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02660-3

I. 多... II. 周... III. 湍流 - 多相流体力学 - 研究 IV. V211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 069728 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10 $\frac{1}{8}$ 252 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1 - 1500 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

目 录

主要符号表	1
绪论	3
第 1 章 颗粒群基本性质和颗粒动力学	10
1.1 颗粒群/液雾的基本性质	10
1.2 颗粒/液滴阻力和传热传质	11
1.3 颗粒动力学	12
第 2 章 层流和湍流多相流动基本方程组	17
2.1 多相流动系统的控制体	17
2.2 体积平均概念及其关系式	18
2.3 各相内“细观”守恒方程组	19
2.4 层流/瞬态多相流动体积平均守恒方程组	20
2.5 稀疏湍流多相反应流动雷诺时平均方程组	25
2.6 湍流气液固三相流动质量加权平均方程组	27
2.7 湍流两相流动的 PDF 方程和统计平均方程组	31
2.8 两相雷诺应力和标量输运方程组	34
第 3 章 湍流气粒两相流动的若干实验现象	42
3.1 湍流气粒两相流动的测量	42
3.2 湍流两相射流	43
3.3 湍流突扩两相流动	46
3.4 湍流旋流两相流动	52
3.5 回流 - 旋流两相流动	66
第 4 章 单相湍流的封闭模型	74
4.1 单相湍流动能方程的封闭	75
4.2 $k - \epsilon$ 双方程模型及其应用	77

4.3	单相湍流的二阶矩封闭	81
4.4	雷诺应力和热流输运方程模型	84
4.5	代数应力和热流模型——扩展的 $k - \epsilon$ 模型	87
4.6	DSM, ASM 模型的应用及其和其他模型的比较	89
第 5 章	两相湍流及其相互作用的封闭模型	102
5.1	颗粒湍流脉动的 Hinze - Tchen 代数模型	104
5.2	统一二阶矩两相湍流模型	105
5.3	$k - \epsilon - k_p$ 和 $k - \epsilon - A_p$ 两相湍流模型	111
5.4	USM, $k - \epsilon - k_p$ 和 $k - \epsilon - A_p$ 两相湍流模型 的应用和检验	113
5.5	改进的二阶矩两相湍流模型	124
5.6	质量加权平均的二阶矩两相湍流模型	130
5.7	$k - \epsilon - PDF$ 与 DSM - PDF 两相湍流模型	139
5.8	颗粒湍流的 Monte - Carlo 模拟	151
5.9	两相湍流的非线性 $k - \epsilon - k_p$ 模型	157
5.10	颗粒相的拉格朗日(轨道)模拟	165
5.11	湍流两相流动的单流体模型	170
5.12	湍流两相流动的直接模拟和大涡模拟	171
5.13	气泡 - 液体两相湍流的二阶矩模拟	174
第 6 章	湍流和化学反应相互作用及其封闭模型	181
6.1	时均反应率	181
6.2	湍流反应的 EBU - Arrhenius 模型	182
6.3	湍流反应的二阶矩模型	185
6.4	湍流反应的简化 PDF - 快速反应和局部瞬时 平衡模型	200
6.5	湍流反应的简化 PDF - 有限反应率模型	209
6.6	湍流反应的 PDF 输运方程模型	216
6.7	湍流燃烧的直接模拟和大涡模拟	218
6.8	湍流两相燃烧的双流体模型	221
第 7 章	多相湍流反应流动的数值解法	225

7.1	多相湍流流动 E - L 模型的 PSIC 算法	225
7.2	多相湍流反应流动 E - E - L 模型的 LEAGAP 算法	229
7.3	多相湍流反应流动 E - E 模型的 PERT 算法	231
7.4	多相湍流反应流动 E - E 模型的 IPSA 算法	232
第 8 章	多相湍流反应流体力学的应用示例	235
8.1	油水旋流分离器内流动和分离	235
8.2	旋流煤粉燃烧器内两相流动	240
8.3	大速差射流燃烧室内两相流动和煤粉燃烧	246
8.4	四角喷燃炉内三维两相流动和煤粉燃烧	253
8.5	旋风除尘器内湍流流动	261
8.6	涡旋炉内煤粉燃烧	263
8.7	固排渣旋风炉内两相流动和煤燃烧	265
8.8	结束语	269
附录	层流多组分反应气体基本方程组	271
参考文献		283
主题词索引		295

CONTENTS

Nomenclature	1
Introduction	3
Chapter 1 Basic Properties of Particle Cloud and Particle Dynamics	10
1.1 Basic Properties of Particle Cloud/Liquid Spray	10
1.2 Particle/droplet Drag, Heat and Mass Transfer	11
1.3 Particle Dynamics	12
Chapter 2 Basic Equations of Laminar and Turbulent Multiphase Flows	17
2.1 The Control Volume in a Multiphase – Flow System	17
2.2 The Concept and Relationships of Volume Averaging	18
2.3 “Microscopic” Conservation Equations inside Each Phase	19
2.4 Volume – Averaged Equations of Laminar (Instantaneous) Multiphase Flows	20
2.5 Reynolds Time – Averaged Equations of Dilute Turbulent Multiphase Reacting Flows	25
2.6 Mass – weighed Averaged Instantaneous Equations of Turbulent Gas – Liquid – Solid Flows	27
2.7 The PDF Transport Equation and Statistically Averaged Equations	31
2.8 The Two – Phase Reynolds Stress and Scalar Transport Equations	34
Chapter 3 Some Experimental Facts of Turbulent	

Gas – Particle Flows	42
3.1 Measurement of Turbulent Gas – Particle Flows	42
3.2 Turbulent Gas – Particle Jets	43
3.3 Turbulent Sudden – Expansion Gas – Particle Flows	46
3.4 Turbulent Swirling Gas – Particle Flows	52
3.5 Recirculating and Swirling Gas – Particle Flows in Combustors	66
Chapter 4 The Closure Models of Single – Phase Turbulence	74
4.1 The Closure of Single – Phase Turbulent Kinetic Energy Equation	75
4.2 The $k - \epsilon$ Two – Equation Model and Its Application	77
4.3 The Second – Order Moment Model of Single – Phase Turbulence	81
4.4 The Closed Model of Reynolds Stress and Heat Flux Equations	84
4.5 The Algebraic Stress and Heat Flux Model – Extended $k - \epsilon$ Model	87
4.6 The Application of DSM, ASM Models and Their Comparison with Other Models	89
Chapter 5 The Closure Models of Two – Phase Turbulence	102
5.1 The Hinze – Tchen’s Algebraic Model of Particle Turbulence	104
5.2 The Unified Second – Order Moment Two – Phase Turbulence Model	105
5.3 $k - \epsilon - k_p$ 和 $k - \epsilon - A_p$ Two – Phase Turbulence Models	111
5.4 The Application and Assessment of USM, $k - \epsilon - k_p$ and $k - \epsilon - A_p$ Models	113
5.5 An Improved Second – Order Moment Two – Phase Turbulence Model	124

5.6	The Mass – Weighed Averaged USM Two – Phase Turbulence Model	130
5.7	The $k - \epsilon$ – PDF and DSM – PDF Two – Phase Turbulence Model	139
5.8	The DSM – Monte – Carlo Simulation of Swirling Gas – Particle Flows	151
5.9	The Non – Linear $k - \epsilon - k_p$ Two – Phase Turbulence Model	157
5.10	The Lagrangian Simulation of Particle Phase	165
5.11	The Single – Fluid Model of Turbulent Gas – Particle Flows	170
5.12	The DNS and LES of Turbulent Two – Phase Flows	171
5.13	The SOM Simulation of Bubble – Liquid Two – Phase Turbulence	174

Chapter 6 The Closure Models of Turbulence –

	Chemistry Interaction	181
6.1	The Time – Averaged Reaction Rate	181
6.2	The EBU – Arrhenius Model of Turbulent Reaction	182
6.3	The Second – Order Moment Models of Turbulent Reaction	185
6.4	The Simplified – PDF and Fast – Chemistry Model of Turbulent Reaction	200
6.5	The Simplified – PDF and Finite – Rate Model of Turbulent Reaction	209
6.6	The PDF Transport Equation Model of Turbulent Reaction	216
6.7	The DNS and LES of Turbulent Combustion	218
6.8	The Two – Fluid Model of Turbulent Two – phase Combustion	221

Chapter 7 The Solution Procedure for Multiphase Turbulent

Reacting Flows	225
7.1 The PSIC Algorithm for Eulerian – Lagrangian Models	225
7.2 The LEAGAP Algorithm for Eulerian – Eulerian – Lagrangian Models	229
7.3 The PERT Algorithm for Eulerian – Eulerian Models	231
7.4 The IPSA Algorithm for Eulerian – Eulerian Models	232
Chapter 8 The Application of Multiphase Turbulent	
Reacting Fluid Dynamics	235
8.1 Flows and Separation in Hydrocyclones	235
8.2 Gas – Particle Flows in a Swirl Coal Burner	240
8.3 Gas – Particle Flows and Coal Combustion in a Combustor with High – Velocity Jets	246
8.4 3 – D Gas – Particle Flows and Coal Combustion in a Tangentially Fired Furnace	253
8.5 Flows in a Cyclone Separator	261
8.6 Coal Combustion in a Vortex Combustor	263
8.7 Gas – Particle Flows in a Non – Slagging Cyclone Combustor	265
8.8 Concluding Remarks	269
Appendix: Basic Equations of Laminar Multi – Component	
Reacting Fluids	271
References	283
Index	295

主要符号表

拉丁字母符号

A 面积	反应级数, 摩尔浓度
B 指数前因子	Nu Nusselt 数
c 经验常数, 比热	p 压力, 概率密度分布函数
c_d 阻力系数	Pr Prandtl 数
D 扩散系数	Q 热量, 热效应
d 直径	q 热流
E 活化能	R 通用气体常数, 颗粒重量分数
e 内能	r 半径, 径向坐标
F 力, 书中定义的函数	Re 雷诺数
f 混合物分数	R_f 通量, Richardson 数
G 产生项, 总质量流	S 源项
g 重力加速度, 浓度脉动均方值, 质量流	Sc Schmidt 数
H 滞止焓	Sh Sherwood 数
h 焓	T 温度
J 扩散流	t 时间
k 湍流动能, 反应率系数	u, v, w 速度分量
l 湍流尺度, 长度	V 体积, 漂移速度
M 分子量	w 反应率
m 质量	x, y, z 坐标
N 颗粒数总通量, 颗粒数密度	X 综合质量分数, 摩尔分数
n 数密度脉动, 粒径分布指数,	Y 质量分数
	Z 书中定义的函数

希腊字母符号

α 体积分数	μ 动力粘性系数
---------------	--------------

ν	运动粘性系数	θ	无量纲温度
λ	导热系数	τ	剪切应力
ε	湍能耗散率, 黑度系数	σ	Stefan - Boltzmann 常数,
ϕ	通用因变量		广义 Prandtl 数

下角标

A, a	空气	k	k 组颗粒
c	原煤, 反应	l	液体
ch	反应, 焦炭	m	混合物
d	扩散	n	法向
e	有效, 出口	ox	氧, 氧化物
F, fu	燃料	p	颗粒, 一次
f	火焰, 流体	r	辐射
g	气体	s	s 组分, 二次
h	焦炭, 异相	T	湍流
hr	异相	v	挥发分
i, in	初始, 进口	w	水分, 壁面
i, j, k	坐标方向	∞	来流

绪 论

多相湍流反应流动广泛存在于热能、航天、航空、核能、化工、冶金、石油等工程中以及水环境和大气污染物排放中。早在 20 世纪 50 年代末, Von Karman 和钱学森就提出用连续介质力学来研究有反应流动和燃烧,称之为化学流体力学或反应流体力学(Dynamics of Chemically Reacting Fluids)。当时的内容是气体层流有反应流动。多相流体力学(Multiphase Fluid Dynamics)的称呼最早是由 S.L.Soo (苏绍礼) 在 20 世纪 60 年代末提出的,主要对象是无反应多相流动。经典的化学流体力学和多相流体力学都未能和湍流的研究相结合。周培源在 50 多年前倡议而到 20 世纪 70 年代由 Launder, Spalding 等人加以实现和发展的湍流模型或湍流模式理论(Theory of Turbulence Modeling),经过近 30 年的研究和应用,已成为目前解决工程中复杂湍流问题的经济而合理的方法。但是在流体力学界,湍流模型的研究往往局限于单相流动,很少涉及多相流动,或确切地说,未涉及颗粒相(或液滴,气泡)的问题。

自 20 世纪 80 年代初至今的 20 年来,本书作者把多相流体力学和单相湍流模型理论结合起来,提出多(两)相湍流模型的概念,又把无反应湍流模型理论和反应流体力学结合起来,研究多相湍流反应流动的规律,因此称之为多相湍流反应流体力学。其中系统地对多相湍流反应流动的理论、数值模拟、量测及其在燃烧中的应用进行了研究。先后对总体模型和基本方程,相间滑移和扩散的关系,相间能量的分配,颗粒反应经历和颗粒湍流脉动间,气体-颗粒和气泡-液体两相湍流脉动间,气相湍流和气相反应间,颗粒与壁面间等相互作用进行了研究,提出了一系列新理论,得出了新规律,据此建立了多种二维及三维湍流回流和旋流反应多相流

动的数值模拟软件。同时用激光多普勒(LDV)和相位多普勒仪(PDPA),颗粒图像测速仪(PIV)等测量法进行实验研究,对数值模拟结果进行了部分验证。研究成果已用于设计旋流燃烧器、水泥窑炉、旋流水力分离器,研制新型旋风除尘器、固排渣旋风炉等,取得实效。近年来国际上多相湍流和湍流反应流的研究也正在不断深入和扩大。本书就是基于作者的研究成果,同时又总结了国际上的有关研究成果而写出的。下面首先给出一些基本定义和描述。

1. 多相湍流流动

含有大量固体颗粒的气体或液体流动,含有大量液滴的气体流动,含有大量气泡的液体流动,含有大量气泡和颗粒的液体流动,以及含有大量油滴的水流动等可以统称为多相流动(multi-phase flow)。这个称呼已为近年来流体力学、工程热物理、热能、航空、航天、冶金、石油、化工、核能、水利等学术界和工程界取得共识。

人们常常按热力学上物态来规定“相”(phase)的概念,因此上述各种流动又称为气固(gas - solid 或气粒 gas - particle),液固(liquid - solid 或液粒 liquid - particle),气液(gas - liquid,含气雾 gas - spray 和气泡 - 液体 bubble - liquid),液液(liquid - liquid,如油水 oil - water)两相流动(two - phase flow),以及气固液、油水气等三相流动(three - phase flow)。也有时把这些流动称为悬浮流动(suspension flow)或者称为含离散介质的流动(dispersed flow)。另外也有非离散型的两相流动,如气液分层流、环状流等。不过,由力学的观点来看,不同速度,不同温度和不同尺寸的颗粒或液滴或气泡有不同的动力学特性,因此可以是不同的相。这就是当初 S.L.Soo (苏绍礼)在 20 世纪 60 年代末提出的“多相流体力学”(Multiphase fluid dynamics)这个概念的来源。总之,上面列举的这些流动的名称可以说是五花八门,表明了学术界和工程界对“两相”、“三相”、“多相”的概念有不同的理解。虽然如此,这并不妨碍大家对多相流动重要性的认识。在国内外,目前多相流已经成为机械工程、流

体力学、工程热物理(热科学)、航空、航天、化工、冶金、水利等学科中得到公认的独立三级分支学科。

多相流动广泛存在于自然界和工程中。可以毫不夸张地说,自然界和工程中 99% 以上的流动都是多相流动,单相流动只存在于极少数的情况,如超净环境中。人类所赖以生存的空气中有灰尘,水中有杂质,在远离星体的宇宙空间中有宇宙尘。我们所常见的诸如云和雾,风沙流,泥石流,含沙河流,生物体内血管流,以及工程中的气力和水力输送,粉尘分离和收集,液雾喷涂,喷雾干燥和喷雾冷却,液雾燃烧,煤粉燃烧,流化床,等离子体化工,炮膛内火药粒流动,固体推进剂火箭尾喷管流动,蒸汽轮机内湿蒸汽流动,气流纺纱,锅炉内和反应堆内汽水两相流动,石油管道内油水和油气水流动,炼钢炉内含气泡和夹杂颗粒的流动等,都是多相流动。

大多数工程装置,如水力管道、流体机械、换热器、化工反应器、燃烧室和炉内的流动,由于几何尺寸、流速范围以及各种障碍和突扩造成的分离,都是湍流流动,而且往往是有回流、旋流或浮力的复杂湍流流动。这就是我们为什么研究多相湍流流动的原因。

研究多相湍流流动基本上有两类不同的方法,一类是欧拉-欧拉法,或称多流体(双流体)方法,其中把连续相,即气体或液体当作连续介质,把分散相,即颗粒或液滴或气泡也当作拟流体或拟连续介质,两相在空间共存和相互渗透,两相都在欧拉坐标系内加以描述。另一类是欧拉-拉氏法,其中只把连续相当作连续介质,在欧拉坐标系内加以描述,把分散相则当作离散体系,也称为颗粒(液滴或气泡)轨道法,在拉氏坐标系内加以描述。在研究有化学反应的多相湍流流动时,近年来也探讨了诸如颗粒相的连续介质-轨道模型这类综合方法。早期的研究局限于探讨已知流场中的颗粒运动,称为单向耦合(one-way coupling),忽略颗粒对流场的作用。现代多相流体力学的主要特点之一就是全面考察流体和颗粒间的质量,动量和能量的相互作用或耦合作用,即双向耦

合(two-way coupling)。对稠密颗粒两相流,还要考虑颗粒-颗粒间相互作用,称为四向耦合(four-way coupling)。在多相湍流流动中,支配着这些耦合作用的是两相间的湍流相互作用以及颗粒间的碰撞。

2. 多相湍流反应流动和燃烧

不少情况下,多相湍流流动是非等温的,有传热传质,而且有化学反应发生,例如在化工反应器和各种固体和液体燃料燃烧过程中就是如此。有时还会有静电效应(如静电除尘器,静电喷漆,静电雾化等过程中,金属管道内含细粉尘的流动等),电磁效应(如等离子体喷枪和磁流体发电机中的两相流等)。液体燃料或煤粉燃烧是一种最典型的多相湍流反应流动。

燃烧是化学反应的一类特殊情况,即有强烈发光发热,产生火焰现象的化学反应。常见的是非金属和金属固体燃料,液体燃料或气体燃料的氧化反应。但是氯化,氮化等类氧化反应,有强烈放热效应的分解反应(如联氨的分解)以及替代反应如轻金属钠,钾等和水的反应,也可以看作燃烧。近年来研究的自蔓延燃烧的材料合成也是一种形式的燃烧。燃烧不仅是化学反应,而是反应和流动,传热传质相互作用的结果,正是这种相互作用控制着火和灭火,火焰传播,燃烧速率等规律。

燃烧所产生的火焰在外观上主要是高温燃烧产物,但是从科学意义上讲,火焰指的是温度和浓度发生急剧变化的区域。按照燃烧前燃料和氧化剂是否预先混合,火焰可以分成预混火焰和扩散火焰。火焰有自动传播的特性。火焰传播速度指火焰相对于冷的新鲜可燃混合物的速度。火焰传播可能有两种工况:传播速度为 $0.2 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 的缓燃和传播速度为 3000 m/s 左右的爆震。火焰还具有如下特性,如生碳,碳粒或烟粒辐射,层流预混火焰的电离以及湍流火焰的噪声等。

3. 多相湍流反应流动的不同流型

为了从物理上把握多相湍流反应流动的一般特征,必须要大致上判别其流动类型。为此须定义下列特征时间和无量纲数:

流动时间 (停留时间) $\tau_f = L/v$

颗粒脉动弛豫时间 $\tau_r = d_p^2 \rho_{pm} / (18\mu)$

颗粒平均运动弛豫时间 $\tau_{r1} = \tau_r (1 + Re_p^{2/3}/6)^{-1}$

流体脉动时间 (即扩散时间) $\tau_T = 1/u' = k/\varepsilon$

颗粒间碰撞时间 $\tau_p = 1_p / u'_p = (c\pi n_p r_p^2)^{-1} (u'_p)^{-1}$

流体反应时间 $\tau_c = w_s \infty Q_s / (\rho \infty c_p T \infty)$

Stokes 数 $St = \tau_{r1} / \tau_f$

Hinze - Tchen 数 $Ht = \tau_r / \tau_T$

Soo 数 $Sl = \tau_{r1} / \tau_p$

第一 Damkohler 数 $D_1 = \tau_f / \tau_c$

第二 Damkohler 数 $D_2 = \tau_T / \tau_c$

根据各种无量纲数的量级,可以判断多相湍流反应流动的几种极端情况的流型。如果 $St \ll 1$,说明颗粒追随流体很快,称为无滑移流或两相动力平衡流。反之, $St \gg 1$ 的流动,其中颗粒很难追随流体,称为强滑移流或两相冻结流。实际问题大多数处于此两者之间。如果 $Ht \ll 1$,说明颗粒很容易追随流体而脉动,称为扩散平衡流。反之, $Ht \gg 1$ 的流动,颗粒很难追随流体而脉动,称为扩散冻结流。实际问题也往往处于此两者之间。若 $Sl \ll 1$,说明颗粒 - 颗粒相互作用时间大大地超过颗粒 - 流体相互作用时间,可以忽略颗粒 - 颗粒间相互作用,称为稀疏流。反之, $Sl \gg 1$ 的流动,颗粒 - 颗粒相互作用时间大大小于颗粒 - 流体相互作用时间,称为稠密流。实际问题中不少情况如液雾和煤粉燃烧属于稀疏流,另一些情况如流化床则属于稠密流。若 $D_1 \ll 1$,说明反应和流动过程相比很慢,可以忽略不计,称为反应冻结流。反之, $D_1 \gg 1$ 的流动,反应和流动相比很快,可以达到平衡,称为反应平衡流。实际的燃烧室和炉内燃烧过程,大多数是 D_1 为 1 的数量级。对燃烧过程而言,若 $D_2 \ll 1$,说明反应比扩散慢得多,为反应动力学控制的燃烧,简称为动力燃烧。反之, $D_2 \gg 1$ 的流动,扩散比反应慢得多,为扩散控制的燃烧,简称为扩散燃烧。实际燃烧过程根据燃料和氧化剂是否预先混合,燃烧所处的压力、温度、

速度,往往处于二者之间。

4. 多相流动分散相总体模型的发展

描述气粒、液粒、气雾、液体-气泡等多相流动的主要问题在于分散相(颗粒相,液雾,气泡等)的模型。表 0-1 中列出了自 20 世纪 60 年代至今所发展的几种有代表性的分散相模型。20 世纪 50 年代~60 年代早期的颗粒相模型是单颗粒动力学模型,其中考察已知流场(例如均匀速度场和温度场)中单颗粒(离散体系)平均运动轨道(拉氏坐标),忽略颗粒对气体或液体流场的影响(单向耦合),也不考虑颗粒的脉动(扩散冻结)。这是一个十分简化的模型,和实际过程出入较大。显然,目前已经不实用。然而这个模型对了解颗粒运动的一些基本特点还是有帮助的。例如颗粒弛豫时间(Relaxation time),终端速度(Terminal velocity)等概念,以及 Tchen, Hinze 等人在此模型的基础上基于追随理论提出的颗粒湍流扩散系数的概念等。20 世纪 60 年代后期 S.L.Soo(苏绍礼)首次提出基于颗粒拟流体概念的小滑移模型,其中认为颗粒和流体间的速度滑移是颗粒扩散漂移产生的,滑移就是扩散的体现,因此本书作者称之为“小滑移模型”。此模型在欧拉坐标系内考察颗粒运动。由于研究中采用分析解,也忽略颗粒对流体流场的作用,因而是单向耦合。到了 20 世纪 70 年代初,由于单相流体计算流体力学数值模拟的方法推广到两相流动中,又退回去,提出了单流体或无滑移模型。该模型也是在欧拉坐标系内考察颗粒运动,把颗粒当作拟流体,但不考虑两相间速度和温度滑移,设颗粒和流体的速度和温度在空间中处处相等,即两相处于动力学平衡和热力学平衡,因此称为单流体或无滑移。该模型还假设颗粒的湍流扩散系数和流体组分的湍流扩散系数相等,即两相处于扩散平衡。这是另一种简化模型,在很多情况下也和实际过程相距甚远。目前也较少用于解决实际问题。自 20 世纪 80 年代至今则出现了颗粒轨道模型(颗粒拉氏模型)和双流体模型(颗粒欧拉模型)。颗粒轨道模型把颗粒作为离散体系,在拉氏坐标系中考察颗粒运动,并且考虑两相间的滑移。和单颗粒动力学模型不同之处是,近代的颗粒