

(美) G. 鲁丁格 著

张远君 译 冯文阁 校

气体-颗粒流基础

国防工业出版社

气体-颗粒流基础

〔美〕 G. 鲁丁格 著

张远君 译

冯文渊 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书着重论述气体-颗粒两相流的基本理论，并简要地介绍两相流的试验和测量技术。主要内容包括单个颗粒动力学、气体-颗粒混合物热力学、流经管道的两相流、两相流动中的松弛过程、两相流中的压强波、边界层、射流以及动量传输等。

书中对于如何处理工程技术中的气体-颗粒两相流的许多课题，如重力沉降、两相流中的传热、喷管两相流以及粉末填充技术和两相流中各种参数的测量方法等都作了分析。

本书可供与两相流体力学有关专业的大专院校师生和科研、工程技术人员参考。

FUNDAMENTALS OF
GAS-PARTICLE FLOW
G. RUDINGER
ELSEVIER SCIENTIFIC
PUBLISHING COMPANY 1980

*

气体-颗粒流基础

〔美〕 G. 鲁丁格 著

张远君 译

冯文澜 校

责任编辑 林国方

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂ 印张5⁷/₈ 127千字

1986年4月第一版 1986年4月第一次印刷 印数：0,001—1,480册

统一书号：15034·2974 定价：1.25元

译者的话

本书全面系统并简要地阐述了气体-颗粒两相流的基本内容。作者既着重论述了基本理论，又介绍了试验和测量方法，对于如何处理工程技术中的气体-颗粒两相流的许多课题都作了分析。

气体-颗粒两相流是两相流体力学的一个重要分支，涉及的内容十分广泛。作者G. 鲁丁格能在较短的篇幅内清晰地讲述了这么多的内容，不仅反映了他本人在这方面的造诣较深，而且给广大读者带来了方便，这是值得称赞的。因此，本书具有全面系统和简明扼要的特点。书中着重阐述了气体-颗粒两相流的基本理论，如单个颗粒动力学、气体-颗粒混合物热力学、松弛过程、两相管流及两相流中的压强波等，主要讨论了解析解法。对初学者这本书的确是较好的入门工具。另外，作者还在各章节内，对许多研究课题都作了评述和提供了不少有价值的参考文献，因此这本书又是有志于深入研究的读者的指南。遗憾的是，由于篇幅所限，书中对于非定常流和二维两相流问题的数值解法虽然有些很简短的介绍，但是尚歉不足。

译者对原书中由于印刷和作者疏漏造成的错误都力求作了订正，在译文中不再逐一说明。

由于译者水平有限，译文中难免有不少缺点错误，热诚欢迎批评指正。

译者

序 言

在比利时布鲁塞尔附近的冯·卡门流体力学研究院于1976年开设了一门“气体-固体悬浮物”的课程。作为这门课程的一部分，我作了关于气体-颗粒流动基础的六次学术讲座。随后，粉末技术指南丛书的两位编辑J. C. 维廉斯博士和T. 艾伦博士建议把我的讲稿编辑出版，作为这一套专论丛书之一。我高兴地接受了他们的建议，将讲稿经过编辑、修改和充实内容后，写出了这本小册子。

这册专著具有入门性质，不要求读者具备任何气体-颗粒流动的初步知识。不过，设想读者比较熟悉流体力学，特别是可压缩流动的理论 and 试验技术。现在有大量的和十分分散的关于气体-颗粒流动的文献可供我们参考，这里只把那些特别适用于入门课程的一些资料选入这本小册子中。本书也列出了许多参考文献，其中对各种课题都有更详细的论述。但是，不可能提供包括一切有关的文献目录。对于参考文献的选择，不可避免地要受本人偏爱和经验的影响。

本书介绍的大多数内容是理论方面的，然而，也包括了一些试验技术方面的简要叙述。另外，在工程方面的一些应用也作为例子加以陈述。在本丛书的另外一些册子中，给出了多种多样的参考文献，其中对一些专门课题有更加广泛的论述。

于纽约州·布法罗

1980年2月 G. 鲁丁格

目 录

符号表	1
第一章 两相流动概述	6
第二章 松弛过程	15
2.1 单个颗粒的粘性阻力	15
2.2 气体-颗粒流动中的阻力	24
2.3 气体-颗粒的传热	27
2.4 平衡流动和冻结流动	30
第三章 单个颗粒动力学	31
3.1 重力沉降	31
3.2 在任意流动中的颗粒	34
3.3 在化学激光的喷管中作为示踪物的颗粒	37
3.4 横向喷入流速为恒定的流体中的颗粒	39
3.5 在旋转气体中的颗粒	44
3.6 在普朗特-迈耶(Prandtl-Meyer)膨胀中的颗粒	51
3.7 在振荡气流中的颗粒	53
第四章 气体-颗粒混合物热力学	58
4.1 密度和浓度	58
4.2 压强和状态方程	61
4.3 内能、焓和比热比	64
4.4 状态的等熵变化	66
4.5 声速	67
第五章 流经管道的定常流动	74
5.1 假设	74
5.2 基本方程	75

5.3	平衡的喷管流动	79
5.4	在不考虑颗粒容积的条件下流经喷管的非平衡流动	82
5.5	近似方法	86
5.6	在有限的颗粒容积情况下流经喷管的非平衡流动	92
5.7	喷管中的等温流动	97
5.8	喷入气流中的颗粒	102
第六章 压强波		106
6.1	压强波的类型	106
6.2	激波	107
6.2.1	在忽略颗粒容积情况下的正激波	107
6.2.2	在有限的颗粒容积情况下的正激波	115
6.2.3	弥散激波	118
6.2.4	斜激波	120
6.3	大振幅波	121
6.4	声波	127
第七章 气体-颗粒射流		132
第八章 边界层		143
8.1	层流边界层	143
8.2	利用湍流中的颗粒减少阻力	145
第九章 动量传输		147
第十章 试验技术		150
10.1	粉末加料器	151
10.2	测量仪器	153
10.2.1	颗粒流率	154
10.2.2	颗粒速度	158
10.2.3	颗粒浓度	164
10.2.4	颗粒温度	165
10.3	在激波管中测量颗粒的阻力系数	165
附加的证明		173
参考文献		175

符 号 表

本书采用的大多数符号都是在文献中常用的符号。这样选择出的符号比采用只求在书中完全统一但大家并不熟悉的符号要好。书中对使用次数很少的符号，在其出现的各章中加以说明。

A	横截面积
a	气相中的声速
C_D	颗粒的阻力系数
c	颗粒材料的比热
c_p	气相的定压比热
c_v	气相的定容比热
D	颗粒直径
d	管道直径，物体的典型尺寸
E	气相的内能
E_p	颗粒相的内能
e	卷吸系数，式 (3-61)
e_{rel}	相对卷吸系数，式 (3-62)
F	作用在单位质量气相上的外力
F_p	作用在单位质量颗粒相上的外力
$f(Re)$	对于斯托克斯(Stokes)阻力系数的修正因子，式 (2-5)
G	对于阻力系数的康宁亨木(Cunningham)修正系数，式 (2-14)

g	重力加速度
H	气相的焓
H_p	颗粒相的焓
h	传热系数
J	在横向流动中的射流动量通量比
K	速度比, $K = u_p/u$
K	复数波数, $K = k_1 + ik_2$
K_n	努森 (Knudsen) 数, $K_n = \lambda/D$
k	气相的热传导系数
k_p	颗粒材料的热传导系数
L	温度滞后参数, 式 (5-32)
L	长度
M	马赫数
\bar{M}	恒定比例滞后喷管两相流的有效马赫数, 式 (5-37)
m	颗粒的质量
\dot{m}	气体的流率
\dot{m}_p	颗粒的流率
Nu	努赛 (Nusselt) 数, $Nu = hD/k$
P	雷曼 (Riemann) 变量, 式 (6-36)
P	无因次压强, $P = p/p_r$
Pr	普朗特数, $Pr = \mu c_p/k$
p	压强
Q	雷曼变量, 式 (6-36)
q	总传热量
\dot{q}	向单位质量气体的加热速率
\dot{q}_p	向单位质量颗粒的加热速率

R	纯气体的气体常数
R, r	径向距离
R	无因次半径, 式 (3-47)
Re	雷诺数
s	气相的熵
T	气体温度
T_p	颗粒温度
t	时间
U	气体的无因次速度, $U = u/a_r$
U_p	颗粒的无因次速度, $U_p = u_p/a_r$
u	气体的速度分量
v	气体的速度分量
u_p	颗粒的速度分量
v_p	颗粒的速度分量
$u_{p,t}$	颗粒的最终沉降速度
V	速度
w	气相的分子量
w_p	“颗粒气体”的分子量, 式 (4-11)
X	无因次距离坐标, $X = x/\tau_v a_r$
x	距离坐标
y	距离坐标
Y	射流穿透到横向气流中的穿透深度
z	无因次距离, 式 (5-47)
α	穿透深度常数, 式 (3-22)
β	密度比, $\beta = \rho_r/\rho_p$
β	气体-颗粒射流的等价参数, 式 (7-10)
Γ	混合物的比热比, 式 (4-22)

- γ 气体的比热比, $\gamma = c_p/c_v$
 $\bar{\gamma}$ 恒定比例滞后的喷管两相流的等效比热比, 式 (5-36)
 δ 相对比热, $\delta = c/c_p$
 ξ 颗粒的容积分数
 η 装填比, $\eta = \dot{m}_p/\dot{m}$
 θ 角坐标
 θ 相对相角, 式 (3-35)
 θ 气体的无因次温度, $\theta = T/T_r$
 θ_p 颗粒的无因次温度, $\theta_p = T_p/T_r$
 κ 无因次群, 式 (5-49)
 λ 分子平均自由程, 光的波长
 λ_v 松弛长度, $\lambda_v = \alpha\tau_v$
 μ 气体的粘性系数
 ξ 颗粒相对于气体的加速度
 ρ 气体密度
 ρ_p 颗粒的材料密度
 ρ_r 在贮箱条件下的密度
 σ 气相的浓度
 σ_p 颗粒相的浓度
 τ_T 温度松弛时间, 式 (2-22)
 τ_v 速度松弛时间, 式 (2-7)
 ϕ 颗粒的质量分数
 ϕ 角坐标, 相角
 ψ 相角
 ψ 对于斯托克斯阻力及有限的颗粒容积分数的修正系数, 式 (2-17)

ω 角频率

导 数

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \quad \text{气相的随流导数}$$

$$\frac{D_p}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_p \frac{\partial}{\partial x} \quad \text{颗粒相的随流导数}$$

$$\frac{\delta^\pm}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial t} + (u \pm a) \frac{\partial}{\partial x} \quad \text{在特征线方向上的导数}$$

下 角 标

e	平衡状态
f	冻结状态
M	与混合物有关的参数
St	以斯托克斯阻力为基的参数
r	贮箱条件
0	起始条件
$*$	喉部的数值

第一章 两相流动概述

对于流体流动的研究，通常都从不可压流体——液体或低速气体的流动开始。在空间任意一点或任意时间的流体状态，即可由它们在当地的压强和速度完全确定下来，并且用两个方程就足以描述这类流动状态。这两个方程是质量守恒方程（连续方程）和描述在力的作用下流体微团运动规律的牛顿定律（动量方程）。除了研究非常大的流动系统（大气的流动、湖泊内和海洋内的流动）以外，温度变化和密度变化一般都是忽略不计的。

人们仿照对于不可压流体的研究，又懂得了如何处理可压的高速气体的流动。这种流动需要补充温度和密度这两个参数，才能完全确定其流动状态。为此，需要增加两个方程：能量守恒（能量方程）和压强、温度与密度之间存在的关系式（状态方程）。

在低温和中等温度情况下，与温度变化有关的能量变化，能在瞬间分配到分子的全部有关的自由度中。但是在高温情况下，这一点就不再正确了，例如，振动自由度比平动自由度达到平衡所需要的时间就要长得多。如果在这段时间内，流动发生显著变化，那末，对于这种气体就必须用一种以上的温度，如平动温度和振动温度等来表示其特征。这就要求有一些补充方程，以描述不同的自由度彼此趋向平衡的速率。

最后，还可能有另外的复杂现象出现，流动介质的不同部分不仅有不同的温度，而且还可能具有不同的速度。一般

把这类流动称为多相流动，其介质由气体和液体、气体和固体或液体和固体这些组分的混合物组成。通常仅仅含有两种相，如气体和小的固体颗粒，这类流动也称为两相流动。在这类流动中，颗粒几乎从来就没有均一的尺寸，而只具有某一尺寸分布。因为从后面的论述中将看到，颗粒的速度取决于颗粒的尺寸，所以颗粒相具有许多的速度。通常为简便起见，人们仅仅考虑一个平均尺寸，因此只讨论颗粒的一种速度。有时把颗粒分为少数几组不同的平均尺寸，那末，每组颗粒就只与其本身的速度有关。两种相可以是相同的化学物质，例如水和水蒸气，但是往往还含有不相同的物质，例如水和空气。不过除非必须考虑由于凝结、汽化或化学反应而引起的两相之间的质量传输，这种不同物质的差别是不重要的。在本书中，将不研究前面列举的一些质量传输过程。

在自然界中，经常发生两相流动。一些典型的例子是雨、雾、尘暴、烟和流砂。大多数的生物流体都属于这一类，例如，由液体和悬浮其中的各种固体颗粒组成的血液和牛奶。同样，大多数油漆都是固体染料在适当的液态基体中的悬浮物。在工业中或在家庭中，许多过程都要用到两相流动。如在咖啡渗滤壶中准备咖啡时，水蒸气和热水的混物流经咖啡颗粒的底床就是两相流动。在化学工业中，可以发现更大尺度的两相流动过程，如气体或液体流经固体颗粒的床，该床起一种过滤器的作用，或者与流体发生化学反应。

对于气体-颗粒流动有意义的颗粒尺寸范围由零点零几微米到若干毫米。一些典型尺寸列于表 1-1 中。

一个孤立的颗粒以某一沉降末速在流体中沉降，其沉降末速公式将在后面章节中推导。当流体以这一速度向上流动时就可以保持这个颗粒的悬浮状态。如果流体垂直地流经由

表1-1 一些典型颗粒及其尺寸范围

物 质	尺寸范围 (微米)
烟草产生的烟	0.01~1
油烟	0.03~1
细菌	0.3~50
煤烟	1~100
粉煤	3~600
飞灰	1~200
雾	2~80
喷雾的液滴	6~6000
杀虫剂	6~10
花粉	10~100
雨滴	600~6000

许多颗粒组成的一个床时,颗粒之间形成狭窄的流通通道,将迫使流体流经这些通道的速度增高,所以在某一流量下,流体可能使许多颗粒悬浮,而不能使一个孤立的颗粒悬浮。于是,由多颗粒组成的颗粒床就会膨胀,并且形成一个界限分明的悬浮颗粒区域。在这个区域内,颗粒迅速地而且无规则地局部运动。当任何颗粒被带到床的上部边界以外时,因流速减小不足以支撑其悬浮,就会落回到床上。我们把这样的系统称为流化床。这种作用经常在工业中被利用来促进热量传输或化学反应。流化床已经发展成为一种被广泛采用的专门技术(可参阅文献〔2, 3, 7〕)。

如果进一步增加流体的流量,床就膨胀一直到流体的速度大到足以把颗粒带走的程度。对于悬浮物的这类输运不仅限于垂直方向上的流动,人们已经建设了许多用来输运煤粉、水泥和输运另外一些适当材料的长管道。象在垂直管道中的流动情况一样,在这种管道中的颗粒也趋向于沉降,但是,如

果流速和湍流尺度足够大，颗粒将保持悬浮状态。克服重力以保持颗粒悬浮的能量，由湍流提供。这个相互作用代表一种损失机理，除了由于管道壁面摩擦引起的损失以外，它以沿管道长度的压力降低表现出来。如果颗粒被液体夹带，就把这类悬浮物称为浆。气动输运和液压输运的管道技术，现在已被广泛地应用，在题目为“固体颗粒的气动输运”这本书中，专门讨论了这种技术。但是，在本书中只包括其中某些方面的内容。

下面再介绍一些两相流的例子：如，灭火设备经常利用喷雾、泡沫或悬浮粉末形式的两相流动；又如，为了改善固体火箭推进剂的性能，往往在推进剂中加入细小的金属粉末，例如铝粉，这些添加剂在燃烧后会形成金属氧化物的小颗粒，这些小颗粒和已燃气体成为两相流从喷管排出，而这些小颗粒在排除物中可能占有相当大的质量百分数；还有煤粉燃烧也是一项众所周知的技术，利用两相流动使运载气体把煤粉喷入燃烧室；粉末状燃料和氧化剂也可以用在火箭中，或作为其他用途；尘埃爆炸在另一本书（“尘埃爆炸”）中讨论。其次我们还经常利用悬浮的颗粒不能随气体的流速方向的迅速改变而改变其方向的特性，在旋流室内把颗粒从某种气体中分离出来，这种旋流室称为旋风式分离器（参阅本丛书的“固体-气体分离”分册）。同样也利用这种特性对于颗粒进行“分类”，即利用使悬浮物流经适当形状的通道的方法，把颗粒分为不同尺寸的一些粒度级（可参阅文献〔2，3，4，7〕）。烟或另外一些固体小颗粒，长期以来都曾经被用于显示气体或液体的流动状况。据最新出版的一些文献中报导，小的固体颗粒正在被用作激光-多普勒测风速法的流动示踪物。

不希望发生的两相流的一些例子是烟雾、烟以及在大气

中和河流中的其它污染物。大气中的颗粒被喷气发动机吸入，由于颗粒冲击到高速旋转的压气机叶片上和涡轮叶片上，会引起叶片的严重剥蚀。

更多的一些例子将在后面几章中叙述，但是例子可以举出很多，几乎无穷无尽。这些流动的状态不仅在很大程度上取决于所含有的一些组成物——气体、液体和固体，也在很大程度上取决于这些组成物的相对浓度、相对速度以及流动方向。现在我们来研究液体垂流的一个例子，向该液体中加入越来越多的气体。起先，有很多小气泡均匀地弥散在液体中。如果加入更多的气体，一些小气泡就开始结合，直到形成许多大气泡，这些大气泡被液柱分开。当两种相所占有的容积变得相同时，就认为流动具有泡沫的特征。在更进一步增加气体分数的情况下，液体形成一个环带，直到最后气体变为连续相，全部液体却以细小球滴的形式弥散在气体中。对于这类流型，顾名思义，可称作诸如气泡流、柱状流、泡沫流、环状流和雾状流，然而不可能严格地划分出各个流型之间的边界。把带有固体颗粒的气体在水平流动中可能发生的一组流型示于图 1^[1]中。在此图中，混合物的组分保持不变，并且气体速度逐渐减小。其中的第一张图表示具有相当高的速度的湍流，其速度之高足以维持颗粒沿管道的所有截面均匀分布。随着速度的减小，重力的影响变得显著起来，颗粒的分布变得不均匀了。随着速度的进一步减小，颗粒开始沉降，形成波纹状的砂丘，这些砂丘把管道的横截面积占据得越来越多，直到最后，把管道堵塞。图中所示的描述各个流型的名称，可以用来表示不同流型所具有的特征，不同流型之间的分界仍然没有精确的描述。

看来很明显，包括所有流型的一种两相流动计算方法，即