

林瑞泰 著

多孔介质 传热传质引论

科学出版社

多孔介质传热传质引论

林瑞泰 著

科学出版社

1995

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

多孔介质传热传质是构成众多自然现象和生产技术的一个重要的基本过程。本书从纵向和横向将多孔介质传递过程的各方面研究成果加以分析和归纳，突出基本概念、基本理论和基本方法，揭示多孔介质各种传递现象的机理和规律，以形成内容较为全面且相互贯通的体系。

全书分为上、下两篇，共八章。上篇主要阐述有关多孔介质质量、动量、能量传递过程的基本原理和方法；下篇则就一些典型的实际应用加以讨论。书中力求反映最新的研究成果，注意理论探讨与实际应用紧密结合。思路清晰、重点突出、简练易懂是本书的特点。

本书可供在工程热物理、核能、太阳能与地热能、航空航天、化工、冶金、轻工、食品、地质、建筑、消防、环境、土壤及生物等部门中从事多孔介质中流动、传热和传质的研究、开发、设计、教学的科技人员和教师参考，也可供研究生和高年级大学生作为教材或参考书使用。

多孔介质传热传质引论

林瑞泰 著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1995年10月第 一 版 开本：850·1168 1/32
1995年10月第一次印刷 印张：11 插页：2
印数：1 600 字数：281 400

ISBN 7-03-004708-7/TK·17

定价：35.80 元

HK40/09

前 言

多孔介质是具有固体骨架的一种多相空间,多孔介质中质量、动量、能量的传递是构成众多自然现象和各种生产与技术的基本过程。人类很早就对多孔介质及其内外传递现象给予了关注、研究和利用,20世纪后半叶以来,初步形成了多孔介质流体动力学,后来又发表了以多孔物体干燥过程为基础的多孔介质中传热传质论述,继而在许多方面展开了研究与开发。迄今为止,多孔介质传递过程已涉及到:核反应堆冷却与绝热、煤炭的储存开发与燃烧、高温元件发散冷却、铸造砂型中传热传湿、热管多孔芯吸液与传热、多孔结构强化传热传质、化工填充床、太阳能与废热储能、航空航天器的热防护、石油热采、地热热储流动与传热、地下核废料热质扩散、环境工程中垃圾与污水处理、土地盐碱化与污染、火灾的消防、建筑与绝热材料中的传热传湿、物品干燥与保鲜、土壤内养分水分传递以及生物体内的传递现象等领域,并已取得不少成果。但因多孔介质传递现象复杂多变而导致研究难度很大,故这些研究成果存在着不可避免的局限性与分散性,从而未能形成具有普遍指导意义的理论与方法,也未形成内容完整、系统性强的全学科体系。

本书试图从学科交叉出发,对多孔介质传递过程各分支和各方面的研究成果,由纵向、横向进行归纳和综合分析,沟通各分支和各部分内容的内在联系;从基本概念、基本理论和基本方法上,对多孔介质的各种传递现象原理、模型、数学描述与计算和实验结果加以概括和剖析,以期形成内容较为全面且相互贯通的自身系统。

多孔介质传递过程的内容极其丰富,虽然作者在撰写中力求完整,但囊括所有内容既无必要也不可能。本书仅以引论的形式,

将基本内容和问题加以概要阐述。全书分为上下两篇，上篇为基础部分，下篇为应用部分。第一章，扼要地介绍了多孔介质传递科学的由来、发展与现状、研究内容与研究方法、基本参数与综合变量、基本特性、基本定律和基本方程。第二至四章分别阐述多孔介质中流体流动过程、传热过程和传质过程，以及其相互影响和耦合效应。第五至八章，阐述多孔介质传递原理及其分析方法在一些典型实际过程中的应用，包括多孔物料干燥过程、多孔填充床中的传递过程、地热热储中的流动与传热过程，以及利用多孔结构强化或削弱传热过程。全书从内容选取与安排上，力求反映最新研究与应用成果，注意将学术探讨与实际应用结合起来。在文字叙述上，力求思路清晰，主次分明，重点突出，结构严谨，简练易懂，以期使从事多孔介质传递过程研究与应用的不同知识层次的读者均能有所收益。

本书是在作者为研究生讲课的讲稿基础上撰写的。对于听课的研究生和教师的关心与支持，对于有关领导、专家、同行们的鼓励，作者在此一并表示感谢。书中错误与不妥之处，望读者批评指正。

作 者

1994年11月于天津大学

主要符号表

拉丁字母符号

<i>A</i>	面积 (m^2), 自由能 (J), 系数, 参数
<i>a</i>	热扩散系数 (m^2/s), 系数
<i>a_m</i>	(= <i>D</i>) 质量扩散系数 (m^2/s)
<i>a_p</i>	由压差驱动的质量扩散系数 (m^2/s)
<i>a_m^T</i>	由热量传递所引起的质量扩散系数 [$m^2/(s \cdot ^\circ C)$]
<i>a_v</i>	(= <i>ν</i>) 动量扩散系数 (m^2/s)
<i>B</i>	无因次量, 大气压 (mmHg), 宽度 (m), 参数
<i>Bi</i>	(= <i>aL/k</i>) Boit 数
<i>Br</i>	(= <i>$\mu\omega^2/k\Delta T$</i>) Brinkman 数
<i>Bu</i>	(= <i>$h_{ig}C_p\Delta p/C\Delta T$</i>) Bulygin 数
<i>b</i>	系数, 常数, 厚度 (m)
<i>C</i>	容积质量浓度 (kg/m^3), 比热容 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$], 声速 (m/s), 系数, 常数
<i>C_f</i>	摩阻因子, 流体比热 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$]
<i>C_m</i>	比质容 [$kg/(kg \cdot ^\circ M)$]
<i>C_p</i>	比质量容量系数 [$kg/(kg \cdot Pa)$], 定压比热 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$]
<i>C_v</i>	定容比热 [$J/(kg \cdot ^\circ C)$]
<i>Co</i>	(= <i>$(v_i^2/gk_i^3)^{1/3}\alpha_c$</i>) 凝结数
<i>D</i>	(= <i>a_m</i>) 质量扩散系数 (m^2/s), 参数
<i>Da</i>	(= <i>$K_{p,c}/\epsilon\omega l^2$</i>) Darcy 数
<i>d</i>	直径 (m), 指数
<i>E</i>	变量, 传递势, 平衡常数, 杨氏模量
<i>Ec</i>	(= <i>w_i^2/C_B</i>) Eckert 数
<i>Eu</i>	(= <i>$\Delta p\omega/\rho\omega^2$</i>) Euler 数

<i>e</i>	比变量
<i>F</i>	力, 角系数, 表面面积 (m^2), 参量
<i>Fe</i>	($=\Phi KoPn$) Fedorov 数
<i>Fo</i>	($=a\tau/l^2$) Fourier 数
<i>Fr</i>	($=w/\sqrt{wgL}$) Froude 数
<i>f</i>	摩擦因子, 阻力系数, 声波频率 (次/s), 汽泡频率 (个/s), 指数
<i>G</i>	质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 自由焓 (J), 温度梯度 ($^\circ\text{C}/\text{m}$)
<i>Gr</i>	($=\beta gL^3\Delta T/\nu^2$) Grashof 数
<i>Gu</i>	($= (T_a - T_b) / T_b$) Gukhman 数
<i>g</i>	重力加速度 (m/s^2)
<i>g_v</i>	内热源强度 (J/m^3)
<i>H</i>	焓 (J), 参数, 高度 (m), 宽度 (m), 厚度 (m)
<i>h</i>	比焓 (J/kg) 或 (J/kmol), 距离 (m)
<i>h_{fg}</i>	汽化潜热 (J/kg)
<i>i</i>	<i>x</i> 轴正向单位矢量
<i>J</i>	广义通量
<i>j</i>	<i>y</i> 轴正向单位矢量
<i>j_f</i>	由压差所驱动的质量流率或比流量 [$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
<i>j_m</i>	质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
<i>j_v</i>	动量传递率 (N/m^2)
<i>K</i>	水力传导系数 (m/s), 比热比(C_p/C_v), 总传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]
<i>Ki</i>	($=qL/k\Delta T$) Kirpichev 数
<i>Kn</i>	($=d_0/\lambda$) Knudsen 数
<i>Ko</i>	($=h_{fg}C_m\Delta\theta/C\Delta T$) Kossovich 数
<i>K_p</i>	多孔介质渗透率 (m^2)
<i>k</i>	导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]
<i>k</i>	<i>z</i> 轴正向单位矢量
<i>k_e</i>	有效导热系数 [$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$]
<i>k_m</i>	质传导系数 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{M})$]
<i>k_{m,q}</i>	($=k_m\delta/C_m$) 热质传导系数 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$]
<i>k_p</i>	渗透传质系数 [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]
<i>L</i>	长度 (m), 高度 (m), 定性尺寸 (m), 唯象系数

Le	$(=Sc/Pr)$ Lewis 数
Lu	$(=a_m/a)$ Luikov 数
l	长度 (m), 定性尺寸 (m)
M	质量 (kg), 质量流量 (kg/s), 分子量
m	质量 (kg), 指数, 一个蒸气分子的质量
N	分子数, 恒速干燥期干燥速度 (%/s)
Nu	$(=al/k)$ Nusselt 数
n	摩尔浓度 [kmol/m ³], 倍数
\mathbf{n}	法向单位矢量
P	无因次压力
PF	传质势
Pe	$(=wl/a)$ Peclet 数
Pr	$(=\nu/a)$ Prandtl 数
p	压力 (Pa)
ΔP	压差 (Pa)
p_c	临界或特征压力, 毛细压力 (Pa)
p_s	饱和压力 (Pa)
P_u	含湿量为 u 的物料结合水上方平衡水蒸气分压 (Pa)
Q	容积流量 (m ³ /s), 热流量 (J/s)
q	热流密度 (W/m ²)
R	半径, 尺寸, 厚度 (m), 气体常数 [J/(kg·K)]
Ra	$(=\beta\Delta TgK_l/av)$ Rayleigh 数
Rb	$(=\frac{\partial T}{\partial u} \frac{\Delta u}{\Delta T}/Ko)$ Rebinder 数
R_c	接触热阻 (m ² ·°C/W)
Re	$(=wl/\nu)$ Reynolds 数
Ri	$(=Fr^{-\frac{1}{2}})$ Richardson 数
R_m	通用气体常数 [=8314.3J/(kmol·K)]
R_u	$(=Eu^{-1})$ Ruark 数
r	半径 (m)
r_{ii}	冰的融化热 (J/kg)
r_0	毛细管半径 (m)
S	饱和度, 溶解度, 熵 (J/K), 面积 (m ²)

Sc	$(=\nu/D)$ Schmidt 数
Sh	$(=\alpha_m l/k_m)$ Sherwood 数
S_{ro}	残余饱和度
St	$(=Sh/ReSc)$ Stanton 数
Sr	$(=l/w\tau)$ Strouhal 数
T	温度 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
ΔT	温差 ($^{\circ}\text{C}$)
T_a	干球温度 ($^{\circ}\text{C}$)
T_b	湿球温度 ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	饱和温度 ($^{\circ}\text{C}$), 固体 (颗粒) 温度 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
ΔT_s	$(=T_i - T_s)$ 液体过热度 ($^{\circ}\text{C}$)
T_w	壁温 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
ΔT_w	$(=T_w - T_s)$ 壁面过热度 ($^{\circ}\text{C}$)
U	变换参数, 内能 (J), 润湿周长 (m)
u	质量浓度 (kg/kg)
V	容积 (m^3)
W	相对湿度百分比
W_{k1}	第一临界相对湿度百分比
w	流速 (m/s), 网眼宽度 (m)
w_m	质传播速度 (m/s), 质量流速 (m/s), 平均流速 (m/s)
w_t	热传播速度 (m/s)
X	广义驱动力, 无因次坐标, 特定坐标
x	坐标
y	坐标, 函数
Z	坐标, 参数
z	坐标

希腊字母

α	对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$], 百分份额
α_c	凝结换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]
α_m	对流传质系数 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{M})$]
$\alpha_{m,p}$	由压差引起的对流传质系数 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

$a_{m,u}$	以质量浓度 u 为传质势的对流传质系数 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{u})]$ (u 单位为 $[\text{kg} \text{ 传质物}/\text{kg} \text{ 干物料}]$)
β	体膨胀系数 ($1/\text{K}$), 升华潜热 (J/kg), 烧结多孔层几何因子, 辐射衰减系数
Γ	形状系数, 质量源或汇或由相变引起的质量变化 $[\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$
γ	角度, 辐射散射系数
Δ	特性尺寸 (m)
δ	($=a_m^r/a_m$) 两种质扩散系数之比 ($1/^\circ\text{C}$), 无穷小量, 厚度 (m)
δ_p	($=k_p/a_m\rho_s$) 渗透传质率与质量扩散率之比 ($1/\text{Pa}$), 多孔芯厚度 (m)
δ_s	多孔介质固相容积份额
ϵ	孔隙率, 黑度 (或发射率), 涡流动量扩散率
η	气相质扩散系数与总质扩散系数之比, 无因次量
$\eta_{z,\delta}$	汽膜厚度参数
θ^*	无因次传质势, 无因次温度
θ	润湿角, 传质势 ($^\circ\text{M}$), 无因次时间, 无因次温度
κ	辐射吸收系数
λ	分子自由程 (μm), 阻力系数, 波长 (μm), 指数
μ	动力粘度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$), 化学势 (J/kg), 泊松比
ν	运动粘度 (m^2/s) ($\nu = \mu/\rho$)
ξ	无因次参量, 黑度
Π	相变数, 颗粒形状系数
ρ	密度 (kg/m^3)
σ	表面张力 (N/m), 焓产率 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{K})]$, 切应力 (N/m)
σ_b	黑体辐射常数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$
τ	时间 (s), 光学厚度 (μm)
τ_{tm}	质扩散弛豫时间 (s)
τ_{Tq}	热传播弛豫时间 (s)
Φ	热耗散函数 $[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$, 液-汽相变系数
ϕ	传递势, 流动势 (m , 或 Pa , 或 m^2/s^2), 辐射源或汇, 相对湿度, 相对蒸气压, 容积比
χ	参数
$\tilde{\chi}$	参数漂移值

ψ	传质势, 流函数, 黑度, 容积质量浓度 (kg/m^3), 参数
$\bar{\psi}$	参数漂移值
ψ_c	重力与毛细力作用下的对流传质势 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{f})$], 其中 f 为单位重力与毛细力之和。
ψ_r	毛细势 (m^2/s^2)
Ω	比面
ω	弯曲率, 界面速度 (m/s)

下 角 标

av	平均
ax	轴向
b	气泡或沸腾
c	浓度, 临界, 过冷, 毛细
cd	导热
co	冷凝
ct	接触, 填充床
cv	对流
dif	分子扩散
e	有效或当量
ev	蒸发或沸腾
ex	外界
f	流体, 周围介质
g	气体 (相)
i	初始, 内部
in	进口, 内部
l	液体 (相)
m	质量, 传质
max	最大
min	最小
nw	非润湿流体
opt	最优
out	出口, 外部
p	多孔介质

q	热流
r	径向
rd	辐射
s	饱和, 固体 (相)
u	质量浓度
v	蒸汽, 空隙
w	壁面, 润湿流体
x	x 轴向
y	y 轴向
ν	动量
∞	无限远处

目 录

前言	i
主要符号表	vii

上篇 基础部分

第一章 导论	1
§ 1-1 多孔介质质量、动量、能量传递问题的由来与发展	1
§ 1-2 研究方法	7
§ 1-3 理想模型、基本定律、基本方程	15
§ 1-4 基本参数	39
§ 1-5 多孔介质传递过程的无因次综合变量	47
§ 1-6 多孔介质中传热传质问题的分类	52
第二章 多孔介质中流体流动过程	53
§ 2-1 序言	53
§ 2-2 单相均质流体通过多孔介质的稳态与非稳态层流流动	68
§ 2-3 混合流体通过多孔介质的层流流动	79
§ 2-4 多孔介质中流体具有相变时的流动	92
§ 2-5 多孔介质中由温度梯度、浓度梯度引起的流体流动	100
附录 关于式(2-45)及式(4-50)的推导	100
第三章 通过多孔介质的传热过程	109
§ 3-1 概述	109
§ 3-2 多孔介质中的导热过程	111
§ 3-3 多孔介质中的对流换热过程	128

§ 3-4	多孔介质辐射换热	144
第四章	多孔介质中的传质过程	152
§ 4-1	概述	152
§ 4-2	传质势与传质驱动力	157
§ 4-3	多孔介质传质无因次综合变量	164
§ 4-4	多孔介质中质量分子扩散过程	169
§ 4-5	多孔介质中对流传质过程	174
§ 4-6	多孔介质中对流传质的模拟方法	191
附录	化学势的引出	197

下篇 应用部分

第五章	多孔介质干燥过程	199
§ 5-1	简介	199
§ 5-2	多孔物料中湿量状态	202
§ 5-3	干燥特性曲线	209
§ 5-4	含湿多孔物料内外的传质传热过程	212
§ 5-5	干燥技术和干燥设备简介	230
第六章	多孔填充床中传递过程	243
§ 6-1	引言	243
§ 6-2	流体通过填充床多孔层的压力降	244
§ 6-3	多孔填充床内的传质过程	245
§ 6-4	多孔填充床内的传热过程	248
第七章	地热热储中流动与传热过程	259
§ 7-1	概述	259
§ 7-2	地热热储中的自然对流流动与传热过程	262
§ 7-3	地热热储中的混合对流与传热过程	267
§ 7-4	地热热储中的汽液两相对流与传热过程	272
第八章	利用多孔结构强化或削弱传热过程	280
§ 8-1	引言	280
§ 8-2	多孔层强化沸腾换热	280

§ 8-3 多孔结构强化凝结换热	291
§ 8-4 多孔体强化管内单相对流换热	295
§ 8-5 热管内多孔芯中的流动与传热问题	299
§ 8-6 多孔热绝缘层中的传热过程	312
参考文献.....	323
索引.....	330

上 篇 基础部分

第一章 导 论

在本章内,将概括地介绍多孔介质传递问题的由来与发展,有关多孔介质传递现象的基本概念、基本参数和基本过程,阐述其定义与分类、基本定律与基本方程、基本内容与研究方法,并对常用的一些无因次综合变量加以简介。

§ 1-1 多孔介质质量、动量、能量传递 问题的由来与发展

多孔介质质量动量能量传递问题涉及到许多领域,是构成众多自然现象的基本过程,其中包括核反应堆冷却、核物料在地下贮存中的放射、煤炭的储运与燃烧、高温元件的发散与烧蚀冷却、利用多孔介质强化传热传质、太阳能集热与蓄热、化学反应与催化填充床传热传质、地下冷热水勘探与开发、石油开采与清蜡降粘、土地盐碱化、建筑与保温材料中的传热传湿、物品(如农产品、木材、化工、纺织与轻工产品等)干燥、食品(如蔬菜、水果等)保鲜、植物体内及植物与土壤间的水分、养分传递,甚至动物或人体血液和组织液、水分、养分的扩散与输送等等。上述众多过程不仅包括与人类生存息息相关的能量开发与利用,也关

系到工农业生产和人类生活的方方面面，关系到高科技发展甚至涉及生命科学！由此可见，多孔介质传递过程对人类生存与发展有着不可忽视的重要影响。人们对多孔介质传递现象的关注与研究由来已久。最初开发的领域是地下水勘探与预测，早在1856年H. Darcy曾对法国Dijon城的地下水源进行了研究，提出了著名的适用于一定条件下多孔介质中流体流动的Darcy定律。因此可以说多孔介质传递科学是开发较早的科学技术领域之一。但在此以后的一个很长历史时期内，一直停留在土壤与岩层中水流动这一类单纯可实测的问题上。直到本世纪30年代以后，由于石油开采和运输业的迅速崛起，才加速了多孔介质流动学科的发展，并在50年代后逐渐形成了多孔介质流体动力学这一学科分支。同时，在本世纪50年代前后，Лыков等人对多孔物品的干燥原理与技术进行了较全面、系统、深入的研究，使人们对多孔介质传热传质过程的认识与控制达到了一个新的高度。随着化工、能源、原子能、航空与航天、热管、高温冷却、强化传热等近代工程技术的发展，及近代工农业生产的全面进步，又提出了大量更为复杂的多孔介质传递过程问题，从而更进一步促进了多孔介质传递科学的各种研究，使其成为当今世界科学技术发展长河中令人瞩目的热点。无论从历史发展到实际需要上，多孔介质传递学科的形成已成为必然趋势。

略加分析可以看出，该学科具有如下特点：

(1) 具有多学科交叉性质，它的内容涉及到渗透原理、毛细理论、流体动力学、表面学、不可逆热力学、微孔相变机理、微孔弯曲通道多相流理论、实验与模拟原理与方法，还与数理方法、概率论与数理统计、数值分析等数学分支有关。

(2) 经过多年积累与发展，该学科已具有相当的基础，但其研究成果多分散于各应用领域内，有一定的局限性，尚未形成成熟、系统、有着普遍指导意义的理论与方法。

(3) 多年来实际应用中所积累的大量问题，急需从理论高度上加以归纳、分析和解决，而任何理论研究均与开发应用紧密相