



多孔介质自然对流传热传质

Natural Convective Heat and Mass Transfer in
Porous Media

陈宝明 刘芳 云和明/著



科学出版社

多孔介质自然对流传热传质

Natural Convective Heat and Mass Transfer
in Porous Media

陈宝明 刘 芳 云和明 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

多孔介质的自然对流传热与传质问题与工农业生产及工程实际联系紧密,了解多孔介质内部结构特性及热质传递规律对相关领域的过程优化和效率提升有重要作用。本书重点关注全部填充及部分填充多孔介质封闭腔体内的自然对流传热传质问题。第2~4章探讨了多孔介质封闭腔体内的自然对流传热传质耦合效应的有限元数值求解及电化学实验研究方法,第5~7章探讨了部分填充多孔介质封闭腔体内的自然对流交界面滑移效应的有限元数值求解及交界面滑移效应的PIV实验测试研究,第8、9章介绍了多孔介质内部结构X-CT实验测试方法,并探讨了多孔介质的结构重构和LBM方法的数值求解。

本书既可作为本科院校学生及研究生参考用书,亦可供相关领域学者参考。

图书在版编目(CIP)数据

多孔介质自然对流传热传质=Natural Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media/陈宝明,刘芳,云和明著. —北京:科学出版社,2016. 12
ISBN 978-7-03-051105-8

I. ①多… II. ①陈…②刘…③云… III. ①多孔介质-对流传热②多孔介质-传质 IV. ①TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第305361号

责任编辑:刘翠娜 / 责任校对:桂伟利
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>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年12月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年12月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:300 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

多孔介质中的传递现象遍及自然界及工农业生产的各个方面,相关的传热传质学研究也已渗透到包括农业、能源、冶金、化工、材料、建筑、空间科学、环境科学、生命科学和医学等在内的科学和技术领域。多孔介质结构的复杂性和多相的存在,尤其是多孔介质内部流动、温度、浓度等各种物理场的耦合作用,产生诸如耦合扩散、相界面作用、界面滑移、毛细作用等各种复杂效应,对其传热传质过程产生重要的影响。

本书的第一著者从 20 世纪 90 年代初开始研究多孔介质中的传递问题,重点关注了多孔介质及其复合系统内部由于温度梯度和浓度梯度产生的自然对流及热质传递现象,曾承担多个多孔介质领域相关的国家自然科学基金项目,在数值模拟和实验研究方面进行了不懈的探索。多孔介质内传递现象的各种效应是复杂多变的,著者从自己涉猎的研究领域作一总结,理论分析、数值模拟和实验研究相结合,试图从宏观层面和孔隙尺度方面,分别利用有限元方法和格子玻尔兹曼方法,辅以电化学实验方法和 PIV 实验方法和 X-CT 测试技术,探讨多孔介质的耦合扩散效应、界面滑移效应及其对传热传质的影响。

本书主要包括三部分内容,第一部分为多孔介质内部由于存在温度梯度和浓度梯度所导致的双浮力自然对流及热质传递过程中的耦合效应问题,其中包括数值模拟研究进展,也包括电化学方法的实验研究。第二部分关注了部分填充多孔介质复合腔体内的自然对流,采用有限元数值模拟和 PIV 实验测试相结合的方法,研究多孔介质和流体空间交界面处的流体动力学特性及其对整个复合系统传热传质的影响,重点讨论交界面处界面滑移效应的问题。第三部分为借助 X-CT 技术进行的多孔介质的三维重构问题,以及基于多孔介质的实际骨架结构,采用格子玻尔兹曼方法进行数值模拟。

本书是著者及所在课题组多年来研究成果的总结,其主要内容取自于陈宝明教授的博士论文、刘芳的博士论文、云和明的研究成果、博士研究生耿文广的博士论文、硕士研究生张立强、王丽、芦凯、蔡鹏飞、邱伟国和张国庆的硕士论文及其发表成果。本课题组的硕士研究生宋林泉、张洋洋、马芳芳、郇凯凯、魏茂丰、李玮对本书的编排及校对工作付出了辛勤的劳动,没有他们的高效工作与全力支持,著者不可能顺利完成本书的撰写工作,在此一并表示感谢。

本书的研究工作获得了国家自然科学基金(59806008、50646022、51076086)的资助,在此一并致谢。

本书可以作为从事多孔介质传递现象领域研究的学者和学生的参考书,著者希望读者可以从本书中了解到一些有益的启示。限于作者的学识和水平,本书难免有不足之处,恳请读者批评指正。

陈宝明

2016年8月于济南

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 多孔介质的基本概念	2
1.1.1 多孔介质的定义	2
1.1.2 多孔介质的结构参数	3
1.1.3 流体属性	5
1.2 基本方程	7
1.2.1 渗流速度与连续性方程	7
1.2.2 动量方程	8
1.3 多孔介质中传递过程及其耦合机理	10
1.4 多孔介质与流体空间交界面处的滑移效应	12
参考文献	14
第 2 章 多孔介质传热传质耦合效应的机理和数学描述	16
2.1 多孔介质传热传质耦合效应	16
2.1.1 局域平衡假设	18
2.1.2 非平衡态区域的划分	18
2.1.3 二维体系内传热传质耦合	20
2.2 数学建模及求解方法	22
2.2.1 封闭腔体内自然对流传热传质耦合扩散效应的数学模型	22
2.2.2 数学模型的求解方法	25
参考文献	29
第 3 章 封闭腔体多孔介质自然对流的交叉耦合扩散效应数值模拟	31
3.1 稳态水平温度梯度和浓度梯度导致的自然对流传热传质	31
3.1.1 双浮升力自然对流机理分析	31
3.1.2 瑞利数、浮升力比数及刘易斯数对流动和传热传质的影响	32
3.1.3 瑞利数、浮升力比数和刘易斯数对边壁传热传质速率的影响	34
3.2 热附加扩散效应——索瑞特效应	39
3.2.1 索瑞特效应对传热传质的影响	39
3.2.2 索瑞特效应的的影响机理	42
3.3 扩散附加热效应——杜弗尔效应	52

3.3.1	杜弗尔效应对传热传质的影响	52
3.3.2	扩散附加加热效应的影响机理	56
3.4	考虑交叉耦合扩散效应传热传质的综合关联式	66
	参考文献	67
第4章	多孔介质自然对流传热传质的电化学测量	69
4.1	电化学方法原理及其实验系统	70
4.1.1	实验系统	70
4.1.2	实验原理及方法	73
4.1.3	实验步骤	75
4.2	温度场及浓度场测试及结果	76
4.2.1	多孔腔体内的温度场及浓度场分布	76
4.2.2	实验结果的误差分析	80
4.3	封闭腔体内自然对流传热传质测试结果及分析	83
4.3.1	封闭腔体内的温度测量	83
4.3.2	努塞特数随时间的变化	86
4.3.3	壁上舍伍德数的分布情况	86
4.3.4	实验结果与数值模拟结果的对比	88
	参考文献	89
第5章	部分填充多孔介质复合腔体内滑移效应的数学模型	91
5.1	部分填充多孔介质复合腔体内滑移效应的描述	91
5.1.1	多孔介质与流体空间交界面处的流体动力学特性	91
5.1.2	界面滑移条件的研究进展	92
5.2	部分填充多孔介质复合腔体内流动及传热的数学模型	95
5.2.1	微观尺度下质点的控制方程	96
5.2.2	基于体积平均法的控制方程	97
5.2.3	宏观尺度下的控制方程	112
	参考文献	120
第6章	部分填充多孔介质复合腔体内传热传质及交界面处滑移效应的分析	123
6.1	多孔介质复合腔体内数值模拟研究进展	123
6.2	部分填充多孔介质复合腔体内自然对流传热传质分析	127
6.2.1	典型工况	127
6.2.2	多孔介质结构特性的影响	127
6.2.3	流动参数的影响	134
6.2.4	交界面应力滑移条件对流动和传热传质的影响	140

6.3	填充规则型多孔介质复合腔体界面滑移效应的分析	145
6.3.1	滑移效应对流动的影响	147
6.3.2	滑移效应对传热的影响	149
6.4	部分填充实际多孔介质交界面处滑移效应分析	151
6.5	双层多孔介质与流体交界面处速度滑移系数的分析	155
6.5.1	多孔介质结构特性的影响	156
6.5.2	流体物性及流动参数的影响	159
	参考文献	161
第 7 章	部分填充多孔介质腔体交界面处的滑移效应实验研究	165
7.1	实验研究进展	165
7.2	PIV 测试原理及实验研究	166
7.2.1	PIV 测试原理及图像处理	166
7.2.2	实验方案	168
7.3	测试结果及处理分析	171
7.3.1	典型测试工况	171
7.3.2	黏性应力滑移系数的测试分析	174
7.4	实验结果与数值模拟对比	176
7.4.1	典型工况下的流线分布比较	176
7.4.2	不同高度处的速度分布比较	176
	参考文献	181
第 8 章	实际多孔介质结构的三维重构	183
8.1	X-CT 测试原理	183
8.2	多孔介质内部结构 X-CT 图像处理	185
8.2.1	多孔介质内部切片结构的 X-CT 扫描及图像处理	185
8.2.2	图像的去噪	186
8.2.3	空间平滑滤波	188
8.2.4	频率域滤波	188
8.2.5	图像增强	191
8.2.6	边缘获取	192
8.2.7	图像分割	192
8.2.8	最大类间方差法	195
8.3	三维多孔介质的重构	198
8.3.1	三维多孔介质孔隙结构的获取	198
8.3.2	三维多孔介质重构后的应用	202
	参考文献	204

第 9 章 基于 LBM 的多孔介质自然对流的介观模拟	205
9.1 格子玻尔兹曼方法	205
9.1.1 格子玻尔兹曼方法的研究进展	205
9.1.2 LBM 模型	207
9.1.3 热 LBM 模型	209
9.1.4 LBM 程序结构	211
9.1.5 LBM 在复合腔体内自然对流中的应用	211
9.2 二维多孔介质自然对流的 LBM 数值模拟	212
9.2.1 二维多孔介质/流体腔体内自然对流的 LBM 模型	212
9.2.2 流固耦合计算与验证	213
9.2.3 二维 LBM 模拟与实验结果的对比	216
9.3 真实三维多孔介质自然对流的 LBM 数值模拟	217
9.3.1 物理模型	217
9.3.2 算法与验证	217
9.3.3 真实多孔介质腔体 LBM 模拟结果	218
9.3.4 三维多孔介质腔体自然对流的研究	220
9.3.5 三维复合腔体多孔介质界面流动传热的研究	226
参考文献	231
基本符号表	233