

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界面滑移效应的有限元数值求解及界面滑移效应的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、郜凯凯、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	壁面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

第 1 章 绪 论

多孔介质中动量、能量和质量的传递现象遍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许多科学和技术领域,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,是形成交叉和边缘学科的一个潜在生长点。

土壤是自然界中典型的多孔介质,是人类赖以生存和发展的基础。对土壤的开发和利用可以说自古代就开始了。土壤学和地下水文学的建立标志着对土壤开始了科学探索。随着科学的不断发展,利用现代科学技术和方法,研究土壤水分、植物生长中水分的迁移以及肥料的有效吸收,对农业的合理种植、灌溉、施肥及土壤改良都将产生积极的影响。

在人类和动植物的躯体内,存在着各种各样的多孔介质,动物的皮肤与身体器官和植物的根、茎、枝及叶都是多孔组织。人体和动物体内微细管道内的流动可视为渗流流动。近年来,生物体内流体的流动与传热传质的研究,利用传热传质特性对特殊环境下人体生命保障及生物体内疾病诊断的研究,得到了长足的发展,并已经形成生物医学传热的分支学科。

地下岩层中的水和石油、天然气与多孔结构或者裂隙构成了一个非常复杂的多相流动体系。油气的开采,尤其是页岩油的开采利用,促使石油工程界较早地开展了多孔介质传热传质的研究。

地热能作为一种替代化石燃料的能源得到了越来越多的开发和利用,依据其地质条件和热力学条件等,地热资源可用于发电、建筑采暖和工业供热,其有效开发利用促进了多孔介质传热传质的研究。

土壤的冻融是土壤力学的主要研究方向之一,严寒地区交通干线路基的铺设、桥梁的架设、输油管道的架设、水利工程设施的施工、工业及民用建筑物的建造及农作物的生长都将受到土壤冻融特性的影响,并直接涉及固液相变过程的热质传递特性。冰川的迁移及雪崩现象也同样与固液相变过程中的传热传质相关。

在环境工程中,地下水的污染问题引起了普遍关注,工业生产的各种有害废水废液被注入地下或排至江河湖泊,由于地下水层中存在温度梯度,而有害物和周围环境间存在浓度梯度,从而导致自然对流和传热传质的双扩散效应,造成地下水资源的污染。另外,利用土壤作为一种天然的过滤介质,可对工业排水或含有杂质的流体进行过滤净化,可以有效地控制水的污染,并可作为生产过程中的过滤器。

动力工程中采用的热管技术、单相或多相发散冷却技术、强化传热技术和太阳

能储热技术、工业流化床及填充床技术、多孔物料的干燥原理与技术,以及核反应堆工程和仓储工程中,都会涉及多孔介质中的传热传质。

在建筑热工中,建筑物的围护结构和保温材料均属多孔介质,其中的热质传递特性将直接影响到对建筑物的能耗以及使用者的舒适程度。地下建筑由于利用土壤作为一种天然的隔热体,可达到冬暖夏凉的目的。太阳能农业温室中的蓄热层或土壤以及太阳能建筑内多孔集热墙,尤其是被动式太阳能采暖墙等,均为典型的多孔介质复合系统,能明显改善建筑物内的空间环境,提高能源利用效率。

在冶金工业二元合金的熔化和凝固过程中,多孔介质与流体共存直至成型。金属凝固过程中,成长的晶核部分为多孔介质,在液固交界面处的两相共存区,因温差作用引起金属液体的运动形成自然对流,成为影响铸造质量的重要因素。

综上所述,多孔介质复合系统内的传热传质问题涉及众多领域,其中由于温度梯度引起的自然对流极为常见,有时候伴随着浓度梯度存在的双扩散自然对流的耦合效应,更涉及多孔介质骨架与流体之间的界面作用、多孔介质区域与纯流体区域之间的交界面作用等,形成了复杂的传热传质过程,对其传递机理及其特性的研究,可以为相关工程实际提供控制和优化的理论依据,具有重要的科学意义和应用价值。

1.1 多孔介质的基本概念

1.1.1 多孔介质的定义

多孔介质是由多相物质所占据的空间^[1,2],也是多相物质共存的一种组合体,从任一相来说,其他相均弥散在其中,故也可称多孔材料为弥散材料。在多相物质中一定有固体相,通常称之为固体骨架,没有固体骨架的空间部分称为孔隙或空隙,它由液体或气(汽)体或气液两相占有。固体骨架分布于多孔介质占据的整个空间内,多数空隙是相互连通的,称其为有效空隙,那些互不连通或虽连通但流体很难流通的则称为死端空隙。显然流体可通过有效空隙从多孔介质的一端渗透到另一端,因此多孔介质也称为可渗透材料。典型的多孔介质有土壤、沙、砂岩、金属泡沫、海绵、面包、人体肝脏等。

物质内部性质均匀一致的某种聚集体称为相。在多孔介质的传热与流动分析和研究过程中,经常需要区别单相系统和多相系统。单相系统是指多孔介质的空隙全部被一种单一流体(如水或者空气)或几种完全相容的流体所占据(如淡水和盐水)。多相系统则是指两种或更多的互不相溶的流体占据多孔介质的空隙空间。互不相溶的流体之间有明确的分界面(如水和油)。通常多相系统的流体相中只能有一相为气体,因为气体与气体之间总是完全互溶的。多孔介质的固体骨架在形

式上可以被看做不参与流动的固相。

1.1.2 多孔介质的结构参数

1. 孔隙率

孔隙率(porosity)是指多孔介质内微小空隙的总体积与该多孔介质总体积的比值,有些文献亦称空隙率,通常有以下三种表达方式^[1]。

(1) 体积孔隙率 ϵ_v (volumetric porosity), 定义为

$$\epsilon_v = \lim_{(\Delta V)_i \rightarrow (\Delta V)_0} \frac{(\Delta V_v)_i}{(\Delta V)_i} \quad (1.1)$$

式中, $(\Delta V_v)_i$ 和 $(\Delta V)_i$ 分别为多孔介质中第 i 个单元体体积和总体积单元中的空隙体积; $(\Delta V)_0$ 为表征体元(REV)。

在某点 P 附近取一个小范围 $(\Delta V)_i$, 它远比整个流体区域尺寸小, 但比单个空隙空间大得多, 包含足够多的空隙。逐步缩小 $(\Delta V)_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots$), 使 $(\Delta V)_i$ 逐渐接近于 $(\Delta V)_0$ (图 1.1), 孔隙率的变化越来越小, 当 $(\Delta V)_i = (\Delta V)_0$ 时, $(\Delta V)_i$ 已经接近于一个空隙的体积, 如果再减小, 孔隙率将会出现波动, 且 $(\Delta V)_i$ 越小, 孔隙率的波动越大。当 $(\Delta V)_i \rightarrow 0$ 时, $\epsilon_v = 0$ 或 1。因此定义 $(\Delta V)_0$ 为 P 点处的 REV, 即组成连续多孔介质的基本质点单位。显然, 对 REV 来说, 若在此体元内增加或减少几个空隙, 其孔隙率不会有显著变化, 这就是 REV 的重要特征。

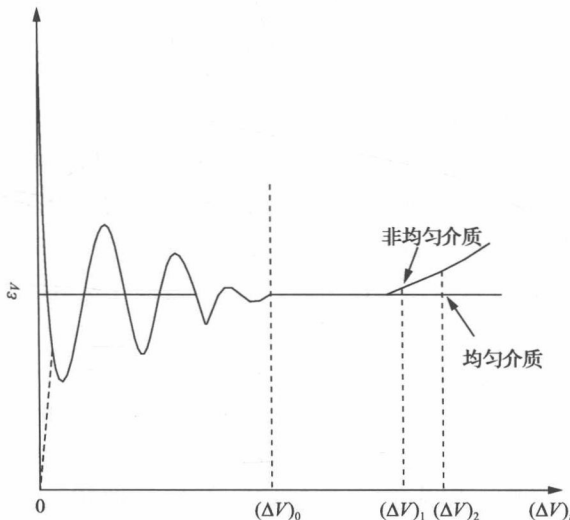


图 1.1 ϵ_v 随 $(\Delta V)_i$ 的变化规律

(2) 面孔隙率 ϵ_S (areal porosity), 定义为

$$\epsilon_S = \lim_{(\Delta A)_i \rightarrow (\Delta A)_0} \frac{(\Delta A_V)_i}{(\Delta A)_i} \quad (1.2)$$

式中, $(\Delta A_V)_i$ 和 $(\Delta A)_i$ 分别为多孔介质中第 i 个截面单元面积和总面积单元中的空隙面积; $(\Delta A)_0$ 为表征面元 (REA)。式 (1.2) 表明, 面孔隙率 ϵ_S 是多孔介质 REA 上空隙截面积与总截面积之比。由于 ϵ_S 在各个不同方向的截面上可能有所不同, 故在使用面孔隙率时, 往往需说明其所在截面的法线方向, 故又称 ϵ_S 为定向面孔隙率。一般说来, 作为一级近似, 可认为 $\epsilon_S = \epsilon_V$ 。

(3) 线孔隙率 ϵ_L (linear porosity), 定义为

$$\epsilon_L = \lim_{(\Delta L)_i \rightarrow (\Delta L)_0} \frac{(\Delta L_V)_i}{(\Delta L)_i} \quad (1.3)$$

式中, $(\Delta L_V)_i$ 和 $(\Delta L)_i$ 分别为第 i 段线段中空隙所占线长和总线长; $(\Delta L)_0$ 为表征线元 (REL)。式 (1.3) 表明, 线孔隙率 ϵ_L 是多孔介质 REL 上空隙所占线长与总线长之比。可以证明, ϵ_L 的平均值也等于 ϵ_V 。

2. 比面

比面 Ω (specific surface) 定义为固体骨架总表面积 A_S 与多孔介质总容积 V 之比, 即

$$\Omega = \frac{A_S}{V} \quad (1.4)$$

式中, Ω 为多孔体比面, (m^2/m^3) 或 ($1/\text{m}$); A_S 为多孔体面积或多孔体孔隙的总内表面积, m^2 ; V 为多孔体外表体积, m^3 。

多孔材料的比面定义也可以理解为多孔材料单位总体积中空隙的隙间表面积。细颗粒构成的材料较粗颗粒材料将显示出更大的比面积, 即多孔体比面越大, 通常其骨架的分散程度越大, 颗粒越细。比面 Ω 无论对于多孔介质的吸湿、干燥, 还是传热过程, 都是十分重要的结构参数, 它也是与多孔材料的流体传导性即渗透率有关的一个重要参数。

3. 迂曲度

一般来说, 多孔介质空隙连通道是弯曲的。显然, 其弯曲程度将对多孔介质中的传递过程产生影响。对多孔介质的这一结构特性用迂曲度 τ (tortuosity) 表示

$$\tau = \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \quad (1.5)$$

式中, L_c 、 L 分别为弯曲通道真实长度与连接弯曲通道两端的直线长度。按此定义, τ 必小于 1, 但也有文献将其定义为

$$\tau' = \left(\frac{L_c}{L}\right)^2 \quad (1.6)$$

显然, 此时 τ' 必大于 1。

上述结构参数均与多孔介质固体颗粒尺寸及其分布、空隙尺寸及其分布有关。

4. 固体颗粒尺寸

多孔介质固体颗粒尺寸 (particle size)、形状和大小通常都是多种多样的, 因此准确地确定固体颗粒尺寸是相当困难的。在工程应用中, 多通过实际测量法确定, 颗粒尺寸取决于测量方法。目前主要有两种测量方法: 其一是比重计分析法, 将与颗粒在水中的下降速度相同的同种材料圆球尺寸加以测量去确定, 这种方法适用于较小颗粒的测量。其二是筛选法, 利用不同尺寸方形孔网筛子过筛, 其所测量的是能够通过筛网的颗粒, 最后以网眼尺寸为当量直径表述颗粒尺寸。二者都是将颗粒折算成圆球的当量直径 d_p 表示。

1.1.3 流体属性

1. 流体速度

流过多孔介质空隙中的流体具有一定的速度 w_f , 而 w_f 与多孔结构、流体和固体物性及运行参数有关。在 REA 内平均的流体速度 $\langle w_f \rangle$ 为

$$\langle w_f \rangle = \frac{1}{(\Delta A_V)_0} \int_{(\Delta A_V)_0} w_f dA \quad (1.7)$$

上式表明, $\langle w_f \rangle$ 是在 REA 内沿法线方向的平均速度。式中, $(\Delta A_V)_0$ 为 REA 内空隙面积。

$$\overline{w_f} = \frac{1}{(\Delta V_V)_0} \int_{(\Delta V_V)_0} w_f dV_V \quad (1.8)$$

为 REV 内平均速度。式中, $(\Delta V_V)_0$ 为 REV 内空隙容积。

2. 渗透率

渗透率 K (permeability) 由达西 (Darcy) 定律所定义, 表示多孔介质对流体的传输性, 即在一定流动驱动力推动下, 流体通过多孔材料的难易程度。

Darcy 渗流定律 (简称 Darcy 定律) 是法国水文工程师 Darcy 在 1856 年为解决城市供水问题而进行的未胶结砂水流渗滤试验时所得出的, 可用下式来表达:

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.9)$$

式中, $\frac{\partial p}{\partial x}$ 为流动方向上的压力梯度; K 为渗透率; μ 为流体黏度; u 为流体在空隙中的流速。

由 Darcy 定律可以看出, 渗透率与多孔介质的另一个参数——孔隙率之间不存在固定的函数关系。

因渗透率具有面积的因次, 我们可以将渗透率理解为多孔介质中空隙通流面积的大小和空隙弯曲程度。通常孔隙率越高, 多孔介质孔道面积越大, 流动越容易, 渗透性越好。

渗透率可分为如下三类:

(1) 绝对渗透率。通常是以空气通过多孔介质来测定渗透率值, 由实验确定。显然, 空隙大小及其分布对其具有决定性影响。因此, 又称为固有渗透率。

(2) 相(有效)渗透率。所谓相渗透率是指多相流体共存和流动时, 其中某一项流体在多孔介质中通过能力的大小。例如, 当研究含湿非饱和多孔介质时, 流体为气液两相, 则分别对应两个相渗透率, 即气相渗透率 K_g 和液相渗透率 K_l 。

(3) 相对渗透率。在实际应用中, 为了应用方便(将渗透率无因次化), 以及便于对比出各项流动阻力的比例大小, 引入了相对渗透率的概念, 即相渗透率与绝对渗透率的比值。例如, 液相相对渗透率可以下式表示为:

$$K_d = \frac{K_l}{K} \quad (1.10)$$

3. 水力传导系数

水力传导系数 k (hydraulic conductivity) 是描述多孔介质流体传输能力的另一个特性参数, 它与绝对渗透率之间的关系可用下式表达:

$$k = K/\mu \quad (1.11)$$

在多孔介质流体力学中, 经常以 k 代替 K , 这样一来, 可以把 Darcy 定律表示成与导热方程类似的形式, 即通量和驱动力的关系为

$$j_f = -k \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1.12)$$

式中, j_f 为单位面积流过多孔介质的容积流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ 为流动方向上的水力梯度, 其中 ϕ 为流体的流动势, $\phi = p/\rho g + z$, ϕ 亦可取为 $p + \rho g z$, 其中 z 为重力方向的高度。若 ϕ 的表达式取得不同, 则 Darcy 定律的表达式也有所不同。

4. 饱和度

多孔材料中的空隙,可以一部分被液体占有,另一部分则被空气或其他气体占有;或者由两种或两种以上互不相溶的液体共同占有。这样一来,每种流体所占据空隙容积的多少就成为多孔材料的一个重要特性参数。

在多孔材料中某特定流体所占据空隙容积之百分比,称之为饱和度 s_w (saturation),即

$$s_w = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1.13)$$

式中, V_w 为流体占据多孔材料空隙的容积; V_v 为多孔材料空隙的总容积。

当多种流体共同占有多孔材料的空隙时,有

$$\sum_{i=1}^n s_{w,i} = 1 \quad (1.14)$$

流体饱和度可用各种试验方法,如体积平衡法、直接称量法、电阻法和 X 射线吸收法确定。

5. 毛细压力

当两种互不相溶的流体相互接触时,它们各自的内部压力在接触面上存在着不连续性,两压力之差称为毛细压力 p_c (capillary pressure),其大小取决于分界面的曲率,即

$$p_c = \sigma_{12} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (1.15)$$

式中, σ_{12} 为互不相溶流体 1、2 之间的表面张力; r, r' 为界面两个主曲率的半径。对于一个由固体表面所构成的毛细管,其内部若有两种相互接触但互不相溶的流体,其接触界面切线与指向液体的固体表面切线的夹角称为接触角 θ , 由下式确定:

$$\cos\theta = (\sigma_{s1} - \sigma_{s2}) / \sigma_{12} \quad (1.16)$$

式中, σ_{s1} 和 σ_{s2} 分别为流体与固体界面上的表面张力。

1.2 基本方程

1.2.1 渗流速度与连续性方程

引入笛卡儿参考坐标系,基于 REV 概念构建一个多孔介质连续性方程^[3]。

从包含固体和流体介质中的容积单元 V_p 获得的平均值与从仅包含流体的介质容积单元 V_f 所获得的平均值不同,通常我们定义 V_p 容积内的平均流速为渗流速度,或者 Darcy 速度。

一旦需要处理连续性问题,可以应用常见的符合守恒定律的微分方程。连续性方程通常被表述成质量守恒方程

$$\epsilon \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1.17)$$

式中, ρ_f 为流体密度。该公式认为在介质的 REV 容积内,流体的质量增加率 $\partial(\epsilon \rho_f)/\partial t$ 等于容积内的净质量通量 $-\nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v})$, ϵ 不依赖于时间 t 的变化。

1.2.2 动量方程

多孔介质内的动量类似于 Navier-Stokes 方程,在此,给出已有的不同形式的动量方程。为简化起见,动量方程的表述中忽略了重力的影响。

1. Darcy 定律

Darcy 对法国第戎供水系统的水力学研究以及对均匀介质中稳态不定向流动的研究揭示了流速与供水压力变化之间存在着一个比例关系,可以表述为式(1.11)的形式。

2. Darcy 扩展定律

1) 速度与惯性效应

许多早期多孔介质对流的研究者跟随 Wooding^[4],应用了如下形式的扩展方程

$$\rho_f \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p - \frac{\mu}{K} \mathbf{v} \quad (1.18)$$

当应用 Dupuit-Forchheimer 关系式时,可变为

$$\rho_f \left[\epsilon^{-1} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \epsilon^{-2} (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p - \frac{\mu}{K} \mathbf{v} \quad (1.19)$$

该方程通过与 Navier-Stokes 类比获得。Beck^[5]指出包含 $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ 项会导致微分方程的阶数升高, Nield^[6]建议与本质速度相关的旋转项应该删除。若忽略 $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ 项,方程(1.19)可以变为

$$\frac{\rho_f}{\epsilon} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p - \frac{\mu}{K} \mathbf{v} \quad (1.20)$$