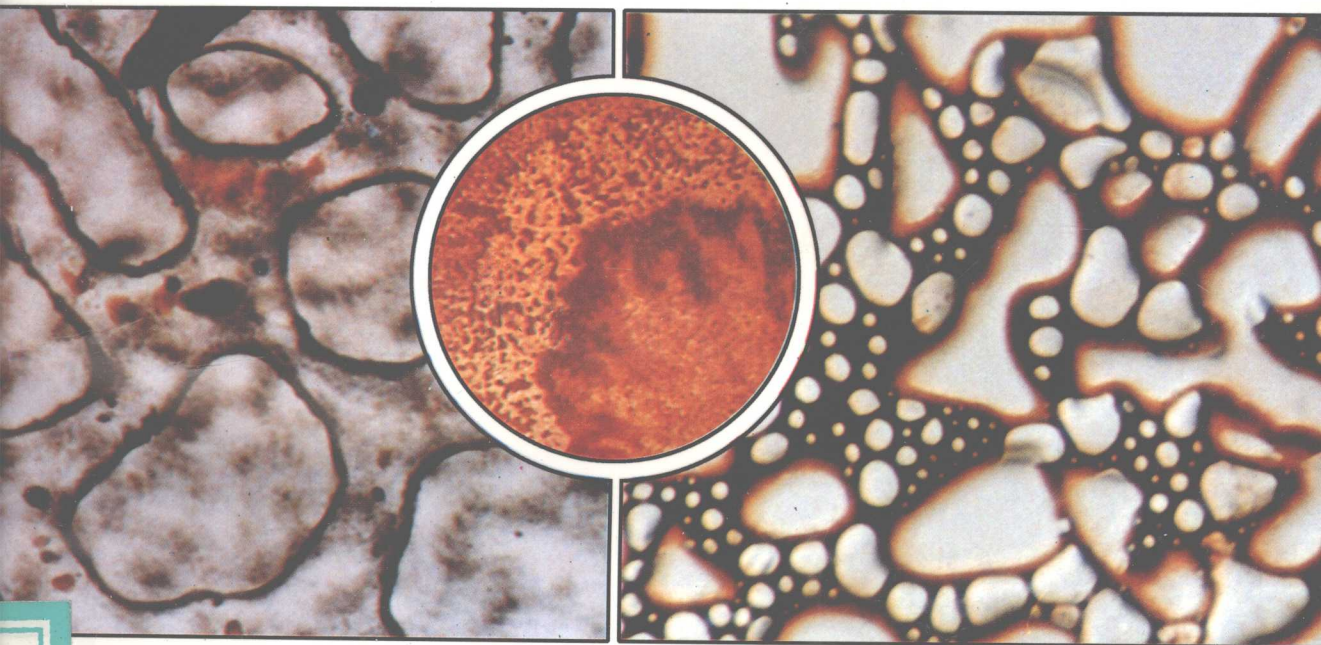


第五届全国渗流力学学术讨论会论文集

渗流力学进展



渗流流体力学研究所 编
大庆石油学院分院

石油工业出版社

第五届全国渗流力学学术讨论会论文集

渗流力学进展

渗流流体力学研究所 编
大庆石油学院分院

内 容 提 要

本书汇集了近年来渗流力学理论研究及其在有关科技领域中应用的优秀论文93篇。主要包括渗流理论、渗流力学计算方法、数值模拟方法、石油试井分析方法和实验渗流力学五个方面的研究成果。应用领域涉及石油天然气和煤层气勘探开发、水利水电工程、防止海水入侵工程、冰川冻土改造工程、土壤改良与保护及生物体渗流理论研究等,是渗流力学研究及其应用方面很有价值的参考资料。

本书可供从事渗流力学、石油天然气开发等科技领域中科研、教学、设计、生产人员和研究生及大专院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

渗流力学进展:第五届全国渗流力学学术讨论会论文集/
渗流流体力学研究所,大庆石油学院分院编. —北京:石油
工业出版社,1996.9

ISBN 7-5021-1772-5

I. 渗 …

II. ① 渗 … ② 大 …

III. 渗流力学—进展—学术会议—文集—中国

IV. 0357.3-53

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第13664号

石油工业出版社出版发行

(100011 北京安定门外安华里2区1号楼)

北京牛山世兴印刷厂排版印刷

787×1092毫米16开 33.25印张 840千字 印1-1000

1996年9月北京第1版 1996年9月北京第1次印刷

ISBN7-5021-1772-5/TE.1498

定价:40.00元

《渗流力学进展》编委会

主 任: 郭尚平

副 主 任: 张盛宗

委 员: (按姓氏笔划为序)

王乃举	王启民	孔祥言	李士伦	李思慎	李 湟
朱亚东	李锡冰	刘尉宁	刘慈群	刘育晋	沈平平
吴江航	陈永敏	张子香	金毓荪	周维泗	范 江
胡正平	胡雅初	秦同洛	萧树铁	桓冠仁	黄延章
韩大匡	曾宪义	葛家理	翟云芳	翟兴业	谭庆民

主 编: 陈永敏 范 江

责任编辑: 孙培国

序

90年代渗流力学的发展,以其理论内涵之深化,应用范围之广拓,技术手段之先进而呈现出勃勃生机。它已经成为人类开发石油、天然气资源,煤炭、煤层气资源,地热、地下水资源等诸多地下能源的重要理论基础。在防止海水入侵、地面沉降,兴建大型水利水电工程、河海工程、农林工程、冻土工程等工程技术中,在生物医疗、地震预报、环境保护等科学技术领域中,逐渐成为不可缺少的理论研究方法和工程设计基础。它的纵横迭起,正是科学技术成为第一生产力的生动写照,令世人瞩目。

1996年9月在北戴河召开的“第五届全国渗流力学学术讨论会”旨在汇聚各方渗流力学科技工作者,交流近期优秀科研成果,探讨当今前沿研究课题,规划渗流力学发展为经济建设服务的远景战略。

此论文集汇编了这次学术讨论会中发表的93篇优秀论文。它们涉及到经典渗流理论(包括非线性科学的分形和混沌理论、数学模型的概括和新的解法等)、实验渗流力学(包括物理化学渗流、非牛顿渗流、非等温渗流、生物渗流等数学及物理模型和测试技术研究)和计算方法(包括新的计算方法,计算机输入输出的图形化、可视化技术等)。更可喜的是大部分论文反映了渗流力学在实际应用中的成果。总之,本论文集反映了近代渗流力学的发展、是本学科研究和应用的重要文献资料。我相信,它的正式出版将有助于渗流力学科研工作的发展,继续加强渗流力学的基础研究并重视科技成果的转化,以老、中、青三代英才的锦心秀手,再度谱写渗流力学的新华章。

第五届全国渗流力学学术讨论会的成功召开和本书的出版,对渗流力学的发展有重要的推动作用。借此机会,对渗流流体力学研究所和大庆石油学院分院为本次会议和本书的出版所做的工作表示由衷的感谢。

值本书出版之际,欣然纵笔,既是对本书之厚望,更是与全体同仁共勉。



一九九六年五月

目 录

渗流研究和应用的一些动态	1
分形油气藏渗流力学	13
渗流数学理论的某些新进展	18
核磁共振成像技术在石油勘探开发中的应用	25
非线性渗流对流传热的分叉解	33
LB 格子模型在渗流力学中的应用初探	39
油藏动力学非线性机理 I	
油藏动态系统的耗散结构特征及系统演化过程的动因	44
油藏动力学非线性机理 II	
油藏动态特征的非线性描述	48
生物渗流的多重介质模型	52
径向固结方程的近似解	64
广义翁氏模型的推导及应用	67
波动载荷作用下渗流问题的压力特性研究	76
挥发性油藏开发中的计算渗流力学应用	80
塑料排水板的渗流计算	85
三峡工程二期围堰渗流状况分析	90
三峡永久船闸陡高边坡内排水孔幕的渗流计算方法与研究	97
渗流作用下井筒周围岩石内弹塑性应力分布规律及井壁稳定条件	103
模型法计算油水两相相对渗透率曲线	109
煤层气渗流数学模型建立及其求解方法研究	113
地下储气库运行指标预测方法	118
纳扎洛夫公式在裂缝性油藏的应用	122
合理开采厚度的界限研究	128
突然卸载破坏的含气多孔介质渗流强化的一维分析	132
串漏垂向干扰试井的不稳定越流模型	138
利用早期资料评价地层特性的试井分析方法	151
裂缝性油藏交叉断层系统中变井储试井理论曲线的研究	158
拉普拉斯数值反演 Crump 方法的新进展	165
单脉冲试井中的解析方法	168
底水油藏中水平井试井分析	173
含水百分数对试井解释参数的影响	178
垂直裂缝井椭圆流模型近似解的进一步研究	182
多井干扰条件下的试井理论曲线研究	188
气水两相渗流理论及试井分析方法研究	194
自喷井不关井测压方法的研究及其应用	199

双孔复合圆形油藏的井底压力	206
油田和气田中分支水平井的压力分析	211
有直线断层或供给边界地层中一口水平井的压力动态研究	217
垂直裂缝井试井分析中应考虑的多因素	224
微粒运移堵塞引起地层损害数学模拟研究	233
开封市多层含水层系统中地下水渗流状态模拟与预报	237
油藏数值模拟的有限元法	242
自适应隐式求解黑油渗流方程组	247
二相—三相统一的相对渗透率数学模型	252
胜一区沙二1~3砂层组精细模拟研究	258
渤南低渗透人工裂缝驱油机理数值模拟研究	264
胜利乐安油田稠油油藏水平井热采数值模拟研究	270
流固耦合油藏数值模拟理论与方法研究	276
注采系统调整的数值模拟	281
海(咸)水入侵模型的参数试验研究与估值	286
海水入侵动态模拟研究	294
土壤水热耦合运动与耕地水分温度年变化规律	300
非均质土坝在渗流作用下地震加速度谱变异分析	305
聚合物驱技术经济优化模型	310
油层非均质特征及布井方式对聚合物驱后剩余油分布影响的数值模拟研究	315
聚合物防窜驱油数值模拟技术在大港油田港西四区的应用	320
考虑粘弹效应的聚合物驱油三维数值模拟研究	324
川东气田开发过程中气井渗透率变化的新探讨	329
分形图象处理技术在多相渗流实验中的应用	333
砂岩岩心孔隙结构的分形特征研究	341
淡水帷幕法防治海水入侵试验研究	345
砾岩油水相对渗透率曲线初探	350
三元复合驱油体系渗流行为研究	354
表面分子力对低渗多孔介质中液体渗流特征的影响	359
用物理方法改变油藏流体分布状况提高原油采收率的研究	367
溶致液晶用于驱油初探	371
多相渗流中流体成分对孔隙表面性质影响的研究	378
孔隙介质中微生物提高原油采收率的微观实验研究	384
渗吸机理的核磁共振成像研究	388
聚合物稀溶液结构力学特性及其在多孔介质中渗流规律的研究	394
负温土中的水分扩散率及其测定	400
确定聚合物驱渗流速度与剪切速率关系的新方法	407
石油羧酸盐三元复合驱油体系的流度及驱油的流度控制	412
用三角形毛管研究油藏岩石的毛管现象	417
塔里木盆地塔中石炭系砂岩储层敏感性研究	421

高凝油油藏注水开发中的冷伤害研究	425
在硫酸盐渍土中掺和氯化钠抑制盐胀的最佳含量	429
应用微观模拟技术研究复合驱驱油特征	434
低孔特低渗储层岩心相对渗透率特征研究	441
井筒储存的实验研究	446
碱水驱油动态过程中油水界面张力的变化	450
一个计及水平排渗体性能的渗透稳定准则	457
突变载荷下一维含气多孔介质破坏后渗透率变化的实验分析	460
裂缝型低渗透砂岩油藏水驱油机理研究	465
生物表面活性剂发酵液驱油体系特性研究	472
延迟交联聚合物在孔隙介质中的渗流规律及剪切损失	476
聚合物冻胶堵水调剖机理研究	481
生物流体渗流的基本规律和渗透系数	486
粘性指进的实验和 Monte Carlo 随机数值模拟的一些研究结果	492
非牛顿流体通过人工裂缝场时对其影响因素的研究	497
多裂缝不稳定渗流规律研究	501
双层系统煤层气越流耦合模型及数值模拟	507
双重介质中非牛顿幂律流体压力分析	517
气水交替混相驱中水封现象的数值模拟	520

渗流研究和应用的一些动态

郭尚平 张盛宗 桓冠仁 胡雅初 王为民

石油勘探开发科学研究院

近十多年来,渗流研究和应用的发展较快,在研究的深度、应用的广度和新方法新技术的采用方面都有进展。当前,渗流研究和应用已涉及多个产业部门和多种工程技术。这些部门和工程中的渗流研究和应用都有相当的进展,开展渗流研究和应用的单位也比以前更多。要全面地综述这一时期的渗流研究进展概况是很困难的,要对渗流物理、渗流化学、渗流生物学和渗流力学做一个系统地评述也是很困难的。本文只就渗流研究和应用的一些方面的动态做简要的介绍。

一、微 渗 流

这里所说的微渗流指以下两类渗流:在较微细的尺度上研究渗流,可称微观渗流;流场变化幅度微小的渗流,可称微动态渗流。

1. 微观渗流

传统的渗流研究是宏观研究,即以岩石或土壤的样品以及地层或土壤为研究对象。这种研究无疑是必要的和重要的。不足之处是通过宏观研究不知道或不确切知道多孔介质内部的物理、化学、生物学和力学的细节,因此不可能知道或不确切知道很多重要的渗流机理和规律。微观研究可弥补宏观研究的不足。宏观研究和微观研究相辅相成可使渗流研究进一步深化,使渗流应用有更扎实的理论基础。

当前的微观研究可分三个层次:孔群层次、孔隙层次和晶间层次。

(1) 孔群层次的渗流研究

通过孔群层次研究可了解很微小的像素元(Voxel)内的情况。像素元的尺寸一般是 0.1×0.1 或 $0.4 \times 0.4 \text{mm}^2$ 。这样尺寸的像素元内一般大体有孔隙数十至数百条。从一个像素元观测到的情况是一群孔隙的综合平均情况。进行孔群层次的无损微观研究的手段当前主要是X射线层析成像仪(X-CT)和核磁共振成像仪(NMRI或MRI)。前者的工作原理是X射线透射过被测物体时,因后者各处有密度差异,X射线的衰减程度不同,由此可以检测被测物体的内部结构。因此,X-CT的较好功能是无损检测多孔介质样品的孔隙、裂隙分布等内部结构。MRI的工作原理是先获得被测物体的核磁共振信息,再用计算机以傅立叶变换重建法等方法成像。

MRI的功能比X-CT强得多。当前用MRI已可进行下述多种无损研究:多孔介质的孔隙和裂隙系统的二、三维分布、多孔介质的孔隙度和渗透率分布、多孔介质表面润湿性检测、多相系统各相的分布和饱和度(因为可对 ^1H , ^{13}C , ^{19}F , ^{23}Na , ^{31}P 等同位素分别成像,原则上可同时分辨三相以上的多相渗流时各相的情况)、流体的“原位”粘度变化、多相流体渗流实况检测、流体之间以及流体与岩石表面间的相互作用等。实验观测可在高温高压条件下进行,便于模拟真实的地层环境。可见,应用这类可视的、无损的检测手段,可以进行与多个产业部门和多

种工程技术有关的渗流问题的孔群层次研究。

X-CT 用于渗流研究最早是在 80 年代初, MRI 用于渗流研究是从 1986 年开始的。目前, MRI 技术在工农业中的应用主要在石油部门, 多数单位是借用医疗单位的设备。医用核磁设备的性能和功能都不能满足工业应用的需要。专门配有工业核磁成像设备的单位在国际上也很少, 主要原因是价格高昂。壳牌公司有磁场强度 2.0T、空腔直径 30cm 的成像设备; 美国石油及能源研究所有谱仪改制的成像仪; 加拿大石油开采研究所(与七家公司集资合购)有 2.3T, 30cm 的成像仪; 英国 Nottingham 大学和美国 Chevron 公司均有小型成像仪。有高场强、大空腔核磁成像设备的单位不多。

在我国, 开展核磁共振成像工业应用的单位不多, 当前只有渗流流体力学所和中科院武汉物理所有此设备。渗流所 1987 年开始探索 X-CT 和 MRI 在渗流研究中的应用, 并于 1992 年引进一台 4.7T, 40cm 的大口径高场强核磁共振成像设备, 自己开发成功适于渗流研究和地质勘探资源开发等应用的专用硬件和软件, 并在多孔介质物理参数、多相渗流、物理化学渗流以及岩心分析、注水驱油、高含水期物理方法提高采收率和三次采油提高石油采收率等方面获得一些成果。从硬件配置, 专用软件、硬件开发, 在渗流和有关工程技术问题上的应用等方面评论, 我国孔群层次研究大体相当于国际先进水平。

(2) 孔隙层次的渗流研究

孔隙层次渗流研究的目的主要是尽可能确切的阐明孔隙或裂隙内渗流过程中的物理、化学、生物学和力学的细节、机理和规律。当前的研究方法主要有二, 即物理模拟实验和数学数值方法。

物理模拟主要是藉显微技术观测透明的二维模型内的细节、机理和规律, 并用录相和摄影等手段记录。我国起步较早, 于 70 年代后期开始这项工作, 80 年代初即已发表微观渗流成果。80 年代中期已开发成功, 有 11 项技术配套的模拟和测试技术, 可以较好地模拟天然孔隙、裂缝介质的拓朴结构、孔隙表面粗糙度和润湿性以及高温高压下的复杂流动, 还可以模拟一些矿物成分如粘土矿物的影响等, 可以进行微量多相流体各相流量的计量。

应用这项模拟测试技术已经在多相渗流、非牛顿流体渗流、物理化学渗流和非等温渗流等方面进行了比较系统的研究, 新发现了一些渗流机理和规律, 对以前大约知道, 但不具体、不系统和不确定的一些机理和规律进行了具体化、完善化和系统化。例如, 发现了水油二相渗流时的“小孔包围大孔”机理, 后者可能是在宏观上相当均质的油层中也有相当多的残余油的一个重要原因。又如, 原来认为聚合物驱油只能提高波及系数, 不能提高洗油系数, 但孔隙层次实验表明, 聚合物不但能提高波及系数, 也能提高洗油系数。这一发现对工业上注聚合物提高石油采收率提供了一个重要的新的科学依据。

近十多年来, 孔隙层次的微观研究在国内外都受到越来越多的重视。在我国, 不少石油研究院所已将这一层次的微观研究视为常规手段, 与宏观实验配套进行。从孔隙层次微观研究的硬件开发和微观渗流理论的总体水平来看, 我国暂时居国际前列。

孔隙层次微观研究的另一途径是数学数值手段, 国内外都已开始此项研究。美国 1994 年用格子气(Latticegas)方法模拟天然气岩石孔隙中的二相渗流, 计算出相对渗透率曲线和残余油饱和度, 其计算结果与物理模拟结果对比, 虽然在定量上还有较大误差, 但定性是符合的。我国中科院力学所与渗流所正在合作开展这方面的研究。

(3) 晶格层次微观研究

晶格层次微观渗流研究当前的手段是分析谱仪。例如, 渗流所用红外光谱等仪器实验观测

发现,表面活性剂渗流吸附时,主要是吸附在蒙脱石的晶格层间,而在蒙脱石表面的吸附是次要的。

综上所述可以看出,微观渗流研究近十多年来发展较快。物理模拟的孔群层次研究在定性定量方面都较好,物理模拟的孔隙层次研究的定性较清楚但定量解释有待提高。孔隙层次微观研究的数学数值工作刚刚起步,有待加强。特别值得强调的是微观和宏观研究的结合,微观研究的结果如何上升到宏观应用,宏观研究如何考虑微观研究发现和总结的细节机理和规律。宏观微观研究的有机结合才能更好地促进渗流研究的深化及其在实际中的应用。

2、微动态渗流

自然界存在各种类型流场变化幅度微小的地下渗流,我们暂称之为微动态渗流。这是一个值得重视的领域。

(1) 出现微渗流的情况

我们通常涉及的地下渗流中,渗流动态变化总是较显著的;微动态渗流的动态变化则是相当轻微的。微动态渗流出现在什么情况下?现举例述之。

固体潮 月球等星体的运行对地球的引力不断变化,使地球不断变形,使地球的固体部分也发生潮汐作用,这称为固体潮。深井水位受固体潮汐的影响,反映为每一昼夜出现两上波峰和两个波谷,变化幅度一般为 12~18 cm,最大可至 24~30 cm,朔望两日的波幅最大。

地震活动 地质构造活动和地震孕育过程使深井地下水位动态异常。我国地下水位观测可测出 0.02 cm 的波动幅度和几秒的波动周期。

荷载变化 饱和流体的地层上方的荷载变化导致该地层中渗流动态微细变化。引起荷载变化的因素很多,如气压波动、降水降雪、海洋潮汐、地面水体和上覆的饱和流体地层的流量变化、高速的大量注水采油,甚至火车通过时的震动等等,都可引起深层渗流场的微细波动。

(2) 微动态渗流的研究具有重要意义

深层渗流微动态可为人类提供重要信息。以地下深层水来说,它有三个特点:分布范围极广(无论纵向分布还是横分布,地下水都遍布于地壳各处);易于流动;压缩系数相对较小,较难压缩。所以,地下水稍受激励就有明显响应,反映相当灵敏,因而深层地下水就是重要的地下信息的载体。以地震为例,地震预报是人类最关心的、急需解决的重大问题之一,而地下水渗流微动态就能提供地震前兆信息。新构造运动和地震孕育过程必然引起地层岩体受力变形,导致孔隙流体的流场变化。观测和研究这种渗流微动态与地震的关系,就能找到预报地震的方法。联合国教科文组织召开的地震预报科学讨论会(1979 年巴黎)所列三项首要地地震预报研究项目之一就是地下水动态。实际上,自 60 年代以来我国以地下水渗流微动态异常为基础的成功的地震前预报已有多次。全球每年发生地震约有 1500 万次,造成破坏的也有 800 次,其中 7 级以上造成严重灾害的地震约 10 次。本世纪前 80 年全球发生造成伤亡的地震 623 次,死亡 120 万人。同一时期,我国发生的死亡千人以上的大地震 31 次,共死亡 61 万人,经济损失数百亿元。可见,如果微动态渗流研究单只为地震预报做出贡献,其重要意义也就不小了。

微动态渗流主要涉及深层的和封闭的地下环境。据估计,地下 60 km 处还可能有液态水,岩石圈中水的藏量约相当于大洋水量,甚至在上地幔中也可能有水存在。但是,人类迄今研究较多的只是大气圈、地表水圈、岩石圈上部 and 生物圈这四圈的交替循环的水。而后者只占总水量的很小部分。虽然地下深部的渗流问题与当前人类的生产和生活活动可能还无直接关系,但从长远来看,人类的视野和活动必会向地壳深处延伸。

将地下微渗流动态问题和其他相关学科如地球动力学、地球物理学、地球化学和地震学等

结合研究,交叉渗透,可能会为人类的将来做出较好贡献。

(3) 微动态渗流是比较复杂的渗流

如果说以前一般是将渗流力学单独考虑,则微动态渗流就要求将渗流力学与岩石力学、弹性力学等结合研究。还要考虑一些往往是几种因素同时影响地下渗流微动态的复杂因素,例如,与地震孕育因素同时起作用的至少还有固体潮汐和气压波动;深井内的动态是面积很大的区域的渗流动态的反映;地层各处的物理参数随地层岩体的应力—应变过程而不断变化,等等。由于这种类型的渗流动态化是微量变化,所以,虽然有关地质物理参数的变化幅度很小,其影响却是不能忽视的。

在渗流微动态研究方面,已经做过一些工作,但不处于起步阶段。已做的工作主要是观测性的和经验性的,基础性的理论性的工作亟待加强。

二、流固结合的渗流问题

流固结合的渗流问题的重要性日益增大。很多领域的渗流问题是流固结合问题,其中一部分是流固耦合问题。前面论述的微动态渗流问题也是流固结合问题。

有关的渗流人员已经做了不少工作,有的还在考虑流固结合或耦合的同时又考虑温度场、地电场以及其他物理—化学因素。这方面的渗流问题涉及很广,作者只论述几个问题以引起同行的注意。

1. 地面沉降中的渗流问题研究急需加强

地面沉降是世界上普遍存在的一种环境灾害。以前,威尼斯、东京和上海等城市地面沉降是世界有名的。现在的情况严重得多。如美国加利福尼亚多处出现地面沉降。我国至少已有 36 座城市出现严重的地面沉降,其中包括上海、天津、西安、无锡、常州、苏州、泰安等城市。这类地面沉降的原因主要是不合理地抽取地下水引起孔隙流体压力下降,导致岩层或土层变形。

有些城市地面沉降程度极为严重。天津市沉降范围很大。据 1985 年资料,市内年平均沉降速率已超过 50 mm,个别地区达 140 mm。1959—1985 年的累积沉降量一般已达 2 m。

上海市自 1921 年发现地面沉降到 1965 年,最大累积沉降量达 2.63 m。1963 年起限制地下水抽用量,1965 年起进行开采层次调整和人工回灌。自从采取防治措施后,市区地面沉降渐趋稳定。但市区冬灌夏采,水位不断起落,地面冬升夏沉,又出现水位每米等同升降一次产生残余变形 26% 等问题,使市区地面沉降控制困难更大。预计至本世纪末上海市区将扩大至 260 km²,生活和生产用水都会增加,这又给地面沉降防治带来新困难。

30 年来,我国在地面沉降防治方面做了一些渗流研究及应用的工作。但投入力量较少,需要加强。

涉及地面沉降的渗流问题是流固耦合问题,要将渗流力学与岩土力学等紧密结合起来才能较好地解决问题。需要研究的问题有两类。有基础性问题,需要做一些实验和理论分析,也有大量的应用性研究。例如,采水灌水工程的层位组合、井网井位布局、采灌量的规划、动态预测和动态分析以及治理过程中的层位、井位和采灌量调整等,都需要相应的渗流研究和计算分析。

2. 水库诱发地震中的渗流问题

条件不同,水库诱发地震的机制不同。有的是水库大量蓄水的载荷效应使库下岩体中孔隙水压增加,导致岩体中某些部分构造应力提前释放,地震活动加剧。有时是因库水沿岩体层

理、节理及各种层次的裂隙渗入岩体深部,孔隙水压增加,提高了岩体局部的应力积累,进行能量释放而发生地震。黄河龙羊峡水库和陕西三原县冯村水库等地震均为上述机制的实例。有时,与上载负荷变化和入渗水影响的同时,还存在固体潮效应,龙羊峡水库地震与朔、望固体潮的关系就相当明显。

我国资料表明,中国总震例数的 50% 为外部成因的水库诱发地震。将渗流力学与岩土力学结合起来,研究水库诱发地震的渗流问题是有重要意义的。这方面的渗流理论及应用的研究都很薄弱。

3. 煤层渗流

煤层内瓦斯渗流与煤体力学的耦合研究对煤炭开采有重要意义。由于我国煤藏量极为丰富,我国能源结构中煤占绝对优势的状况在可预见的未来也很难改变,由此可见,加深煤层渗流研究的重大意义。

与煤层开采有关的渗流是复杂的渗流问题,难度较大。除流固耦合必须考虑外,还要考虑很多因素,诸如煤层多是孔隙—裂隙多重介质、煤的孔隙和裂隙表面极不规则、煤层多孔介质中除瓦斯外有时还有水、瓦斯在煤孔隙裂隙表面上的吸附和解吸机制很为复杂,其它物理场如地电场、温度场的影响有时不能忽视,等等。复杂因素的影响使煤层渗流的问题往往是复杂的非线性问题,渗流基本规律也往往是非达西律。

由于我国与煤层渗流有关的单位和科技人员的努力,科研及应用的进展都较显著,在上段所谈的各种渗流问题方面几乎都有成果,其中包括煤和瓦斯突出方面的研究成果。

4. 石油开采中的流固耦合渗流

实验研究表明,交变载荷作用下,多孔介质和流体处于不断地膨胀和收缩过程。不稳定渗流过程和岩石应力—应变过程相互影响,其结果是在产出液中油的比例升高,水的比例减小,有利于提高石油采收率和产量。并且声波和电脉冲等都可产生交变载荷。

室内实验和矿场实验表明,以不同的频率和幅度不断改变注水压力和流量,使油层中的压力场和速度场不断变化,也能够有效地提高原油产量和采收率。

上述石油渗流问题是流固耦合问题,但作为流固耦合问题来研究和计算的工作还少见。考虑到我国的年产油量的绝大部分都是在高含水条件下获得的,上述问题及其他类似问题作为流固耦合问题进行研究是必要的。

除上述四项工程领域存在流固结合问题值得研究外,还有不少领域也存在同类问题值得研究。例如,黄土地区的地面裂隙(如郑州)和岩溶塌陷(我国 22 个省区已发现岩溶塌陷 800 多处)等,相当部分都存在需要研究的渗流问题,值得渗流研究人员给予必要的关心。

三、溶质运移渗流

1. 溶质运移渗流的生产应用背景

溶质运移渗流与多个领域有关,举例简述如下。

(1) 地下水污染防治

地下水是我国水资源的重要组成部分,特别是北方地区,地下水往往是生活用水和工农业生产用水的主要水源。但是,随着工农业发展和人口增加,地下水污染十分严重。地下水污染有几种来源:垃圾场的垃圾不合理填埋,使垃圾自身分解并经降水淋滤产生渗出液,渗入与地表有水力联系的地下含水层;河湖渠水受工业和生活污染后渗入含水层;大面积使用农药和化肥

以及引污废水农灌,使污染水渗入含水层。地下水污染后可能含有各种有机和无机化合物、金属元素或离子,如氯化物、硝酸盐、硫酸盐、铬、镉、铜、铅、镍、铁、锌等,也可能含有细菌和病毒,还可能发生核废料引起的放射性污染等。工业使用的化合物已达 1200 多种,所以工业污染十分严重。地下水的不合理开采也导致地下水污染,如河北平原和鲁北平原,除地下淡水外还有咸水、高碘水、高氟水。无规划无调控地任意采水使劣质水层与淡水层串通,水质恶化后导致高碘病和氟病。

(2) 海水入侵和咸水入侵的防治

海水入侵和咸水入侵都是含盐浓度高的水入侵地上淡水层。前者是海水侵入滨海地区地下淡水层;后者发生在内陆,即地质历史上形成的海相沉积层内的咸水侵入淡水层。海水入侵最早发现于荷兰、德国、威尼斯等地区,时间是上世纪末。我国最早发现海水入侵的地区是大连,时间是 60 年代。以后,很多地区相继发现海水入侵,较严重区是大连、上海、天津、秦皇岛、北戴河、福山、龙口和莱州等地。海水、咸水入侵给工农业生产、城市发展和人的生活造成很大危害。海水含盐度一般为 35‰,密度为 1.025g/cm^3 。正常情况下,海水和滨海地区地下水层内的淡水之间存在平衡状态。当地下水抽汲量超过补给量,其水头下降至低于邻近的海水水头时,海水即向地下水层入侵,使地下水水质恶化,特别是氯离子含量上升。氯离子含量一般是研究海水入侵的指标。

(3) 土壤盐碱化防治

含盐浓度高的水在土壤中渗流和聚集引起土壤盐碱化。盐碱化防治是关系农业发展和国计民生的重大问题之一。

(4) 三次采油

为提高石油采收率和产量,往油层内注入表面活性剂等溶液驱油。这种条件下的溶质运移渗流研究和应用对石油生产有重要意义。

2. 溶质运移渗流的理论和应用

上述问题的渗流研究和应用有几十年甚至上百年的历史。例如,海水入侵地下淡水的渗流问题,早在 1889—1901 年就由荷兰和德国的学者推出了用地下水位计算海水—淡水界面的计算式。上述四个领域的渗流问题,其核心都是溶质运移问题,考虑溶质运移的渗流问题是较复杂的和难度较大的问题。

大约自 70 年代以来,研究溶质运移渗流的研究人员比较承认的理论是水动力弥散理论及以水动力弥散遵循 Fick 扩散定律为基础的,由 Bear 建立的对流弥散方程(以下简称 Fick 对流弥散方程)。认为,水动力弥散首先是机械弥散,并同时存在分子扩散。所谓水动力弥散是指多孔介质中的微观渗流速度的变化导致溶质分散。

前述四个应用领域研究溶质运移渗流问题时,由于具体情况不同,处理方法各有差异。但共同点是大多以上述对流弥散方程为基础,以数值方法求解;对少数问题,如二维恒定溶质运移弥散问题有解析解。

Fick 对流弥散方程虽然被较普遍地采用,但还存在不少问题,妨碍其实际应用。问题之一即是水动力弥散问题。在 Fick 对流弥散方程中的弥散系数所含的弥散率是最关键的一个参数,对溶质运移起重要作用。弥散率与孔隙介质的几何特征密切相关。对弥散率的测定发现,室内实验测得的弥散率比现场实验测定的值小得多,其差别竟达 2~3 个数量级。在现场实验结果中,溶质运移距离越大,测得的弥散率越大,当距离达到某一数值后,弥散率才趋于一个定值。由上述实验结果可认为,当溶质运移距离增大时,弥散率值相应增大。

但问题还更为复杂。有的实验表明,弥散率的增长规律不是单纯的持续上升趋势,而是有时存在降低趋势。有的实验结果又显示弥散率不随溶质运移距离增大而上升。不少室内实验还表明,层间渗透率非均质使弥散率值显著增长,非均质类型和非均质程度都影响弥散率。更有甚者,室内实验还表明,弥散率随渗流流体温度的升高而增长。

关于现行的溶质运移的理论基础之一的水动力弥散遵循 Fick 扩散定律的问题,也有不同的研究结果。有的室内实验结果是渗流速度增大会使水动力弥散不服从 Fick 扩散定律;随机模拟(认为多孔介质各种非均质特征符合随机分面布)研究也表明,水动力弥散只在溶质运移大于某一距离之后才会遵循 Fick 扩散定律,在该距离之内则不符合 Fick 定律。

上述各种研究结果暗示存在下述问题:

1) 按现行的水动力弥散概念和理论,似乎应理解为水动力弥散是由孔隙介质的微观非均质和流场的微观分散引起的,即水动力弥散概念是一种微观概念(或者说,是“细观概念”)。但从上述多种研究结果看,水动力弥散不只是微观概念,也应是宏观概念。例如,它既受孔隙介质的微观特征影响,也受宏观特征影响。

2) 在多孔介质物理性质方面,除原已考虑的因素外,似乎考虑孔隙形状、孔隙表面粗糙度、孔隙表面润湿性、岩石的矿物组成如粘土矿物的影响等。

3) 影响水动力弥散的因素不只是多孔介质的物理性质,还应考虑压力梯度分布及温度分布等因素。

4) 水力弥散在什么条件下遵循 Fick 扩散定律及水力弥散在不同条件下遵循什么不同的规律。

现行的以 Fick 扩散定律为基础的对流弥散方程在什么条件下适用,在其他条件下的对流弥散方程还应建立。

对水动力弥散的概念和理论的完善以及对对流扩散方程进一步探讨,必将推进溶质运移渗流理论的深化,并为其应用奠定更扎实的基础。

四、生物渗流

生物渗流,从广义上讲是指人体、动物体和植物体内的生物流体以及非生物多孔介质内的含有微生物的流体的渗流。

将渗流力学与生命科学交叉渗透开展生物渗流研究,这是在我国开始的。他们论证表明,人和动物体内多种微细管道系统属多孔介质,其中的流动属渗流,可作为渗流进行研究。然后,他们用模拟实验和动物实验研究生物渗流的基本规律,发现像人血、羊血、马血、兔血和肝胆汁等生物流体的渗流基本规律在大多数情况下不遵循传统的达西定律,而是遵循非达西定律。他们还提出了生物多重介质渗流模型的思想及数学模型。开展生物渗流研究的单位有渗流流体力学所、北京大学(力学系)和中国医学科学院(血液研究所)。他们目前侧重研究人体和动物体内的渗流以及非生物多孔介质中的微生物渗流。很需要尽快开展植物渗流研究。在进行基础研究的同时应当争取尽快地结合实际,以便为人类健康事业和农林业的发展做出一点贡献。

五、现代非线性科学理论在渗流研究中的应用

现代非线性科学发展很快,非线性连续介质力学的发展也很快。当前,应用现代非线性科

学理论研究解决渗流问题的的工作似嫌缓慢,值得重视和加强。

下面仅就分析、分叉和混沌理论在渗流方面的应用问题介绍一些情况。

1. 分析 Fractal 理论

分形是非线性特征的几何表现。按照欧几里德几何学,物质的空间分布是以整数幕次表征,即一、二或三维体系。1982年,美国数学家 Mandelbrot B.B. 将非整数维即分维引入自然现象的描述,并称这类体系为“分形”。分形的特点为空间分布是间断的、非均匀的、不光滑的、处处不可微分的,具有尺度变换的自相似性,即局部为整体成比例性缩小的特性。数学上的自相似性是很典型的。自然界的自相似性可能不那么明显,但存在统计性的自相似性。分形理论是研究分形的几何特征、数量表征及其普适性的现代非线性科学理论。在应用分形理论研究问题时,不能应用微分学,因此,用计算机进行数值计算就显得特别重要。

多孔介质的宏观特征和微观特征都具分形特征,所以在多孔介质的渗流力学的研究及应用中,分形理论将会发挥重要作用。

1985—1986年以来,各个产业部门和各种工程技术中的渗流研究都比较注意引入分形理论。研究的侧重点是用分形几何描述多孔介质的物理特征,例如,孔隙形状及结构、岩体和煤体的裂隙壁面和孔隙壁面的不规则性、裂缝网络的分布、孔隙度和渗透率等参数的非均质分布等。另一种工作是用分形理论研究和定量描述两相渗流时的粘性指进,多半是以实验数据为基础,个别工作是以逾渗理论为基础。稍后,开始用分形理论研究单相弱弹性流体渗流、不混溶的和混溶的两相流体渗流、溶质粒子弥散过程和气泡生长机理以及裂隙介质渗流和双重介质渗流等。

在渗流领域应用现代非线性科学理论进展较好的方面,应算分形理论的应用。但总的说来,只是刚起步,应用分形理论的渗流研究成果取得明显实际意义的还少见。所以无论从渗流的基础研究和应用研究方面考虑,都需要加强分形研究。

2. 分叉 (Bifurcation) 理论

分叉是指某一非线性系统当参数为临界值时其平衡状态发生变化的现象,现代分叉理论实验上大多涉及多参数。分叉理论的出现早在 19 世纪末,当时庞加莱 (H. Poincare) 研究天体演化时就提出了“分叉”概念。线性系统对其参数变化的响应一般是光滑的,但非线性系统参数的变化可能导致系统行为定性的变化。分叉理论就是研究非线性系统的定性行为与其参数变化的关系。对力学来说,稳定性的研究是很重要的,要研究分叉前后解的稳定性。因为,诸如什么时候平衡态失稳和分叉后哪个平衡态是稳定的等问题是力学研究必须考虑的。

研究较多的、与渗流有关的分叉问题是多孔介质体的热对流问题。1967—1972 年, Elder J. W., Beed J.L., Straus J.M. 和 Horne R.N. 等发表了多孔体内热对流分叉的文章,以后陆续发表了一些论文。我国空气动力研究与发展中心、吉林大学数学系、中国科技大学力学系和渗流流体力学研究所也先后开展了与渗流有关的分叉研究。

他们研究的物理模型多是底部加热的、流体饱和的、水平放置的多孔介质层。后者的垂直截面或是正方形的,或是矩形的。沿长轴方向或是有限的,或是无限的。多孔介质是均质的、不可压缩的。边界是不渗透的,侧壁边界是绝热的。流体为单相牛顿流体,遵循达西渗流定律。

作为表征量的参数都采用瑞利数 (Rayleigh 数),也可采用平均卢梭数 (Nusselt 数),而瑞利数和卢梭数间有相关关系。瑞利数是由气体的导热系数、热膨胀系数、粘性系数、比热、密度、重力加速度和上下表面温差值等构成的无量纲的综合参数。

研究的内容围绕如下两个问题:参数变化引起的分叉过程和机理及稳定性分析。其次,也

研究了几何尺寸(多孔介质体的高宽比)的影响以及流动模式的转换等。已经研究了二维和三维、定常和不定常问题。研究方法为解析法和数值方法。

已经获得的主要结论大体是控制方程中的瑞利数是多孔介质热对流的重要参数、特征参数,上下表面温差小时,多孔体内的气体处于稳定的静止状态,只存在静态传热,此时的解为平凡解,即平风的静态传热解,上下表面温差增至较大数值、瑞利数达到临界值时,非线性方程解出现分叉,多孔体内的流态出现回流,导致平凡解失稳。分叉临界瑞利数不止一个,而是多个。随着瑞利数的逐步增大,会依次出现一、二、三……个临界数,相应地相继出现方程的第一、二、三、……级分叉解,而多孔体内的流态相应地依次出现单回流、双回流、三回流……。数值解已经预测出第一、二、三个临界瑞利数。各家的解析获得的第一个瑞利数与数值解十分一致。有的作者的解析解预测的第二个瑞利数与数值解已较好地接近。但解析解的第三个瑞利数值与数值解的结果还相差较远,有待进一步努力。

渗流分叉的研究有重要的理论意义和应用前景。例如,多孔介质体内的热对流研究就与多个产业部门有密切关系,如石油热法开采、地下热能开发、雪层内质量传输、冰丘冰凌和雪崩的形成和核废料处理等。化学工业和航空航天部门对多孔材料日益增多的需求也需要研究多孔介质内热对流分叉理论及其应用。

由于问题的难度较大和参与的单位还不多,渗流分叉理论的研究还嫌进展缓慢,运用理论解决实际工作更需作大的努力。

3. 混沌(Chaos)理论

混沌是发生在确定性系统中的类似随机的无规则运动。混沌现象的发现是从劳伦兹(Lorenz E.N.)1963年研究大气环流引起的。按照一般的观念,对确定性方程,参数又不带随机性,其解必然是确定性的。但劳伦兹发现,他所研究的确定性方程在时间超过一定界限后,其解呈现随机的不确定状态。这就是混沌。不过,这些解是有界的,是在一些特殊的区域内随机地游动。这些特殊的游动区域即是所谓的奇怪吸引子。

混沌系统有一个特点,即对初值极为敏感。

由于参数影响系统的行为,所以可以利用参数的变化探索发生混沌的途径。

从人类的角度看,混沌现象有的是有利的,有的是有害的。这了避免有害的混沌运动,近些年来不少人在研究控制混沌的理论和方法。控制混沌运动的目的就是要将混沌运动转化为规则运动。首先受到注意的控制混沌运动的方法就是利用系统对参数变化的敏感性及奇怪吸引子的不稳定周期轨道的稠密性。

按照上述的混沌概念,渗流混沌的研究可以说还是空白,当然有值得研究的问题。譬如,单以地下渗流来说,现代渗流涉及的数学模型许多都是非线性系统。多项工程技术和生产实际需要的计算预报多半是以这些非线性方程为基础。这些系统的行为在某些条件下是否会出现混沌?在什么条件下出现混沌?诸如此类问题的研究不但在理论上是需要的,在实际应用方面也是需要的。如果发现存在混沌,且后者又不利于我们的工作时,还可进一步研究控制这种渗流混沌的方法。总之,对渗流混沌的研究应当给予足够的重视。

六、计算渗流力学

应用计算机进行渗流问题的数值计算和模拟从70年代即已开始,但比较普遍地开展计算渗流工作,在国内外都是80年代。如今在国内外有关的产业部门和工程技术领域,计算渗流力