

油气流—固耦合渗流研究进展

同登科, 杨河山, 柳毓松
(中国石油大学, 山东 东营 257061)

摘要:介绍了多孔介质流—固耦合渗流研究的重要意义,对多孔介质流—固耦合渗流研究进展加以综述和讨论,提出了进一步深入研究的方向,并着重讨论了近十年来油气流—固耦合多相渗流及其应用研究和各种耦合方法,为其他渗流工作提供一定的参考。

关键词:渗流力学;流—固耦合;数值模拟;多孔介质

中图分类号: TE 312

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)24-4594-09

ADVANCES IN RESEARCH ON FLUID-SOLID COUPLING SEEPAGE IN POROUS MEDIA

TONG Deng-ke, YANG He-shan, LIU Yu-song
(China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The important significance for the research on fluid-solid coupling seepage in porous media is introduced. Developments of the fluid-solid flow in the porous media are reviewed; and the further research directions are also presented. Particularly, studies on the fluid-solid coupling multiphase flow and its application and studies on various coupling methods in the last ten years are discussed. The fluid-solid coupling flow is concerned chiefly with flow of oil and gas through porous media. It is considered that the establishment and development of interaction coupling for multiphase fluids and multifield models and its numerical method have great meanings of the fluid-solid coupling mechanics.

Key words: seepage mechanics in porous medium; fluid-solid coupling; numerical simulation; porous medium

1 引言

天然岩体中存在着大量的孔隙或裂隙,这些缺陷不但大大地改变了岩体的力学性质,也严重影响着岩体的渗透特性。岩体孔隙中存在着流体,岩体的渗流场受环境的影响很大,而渗流场的改变反过来又对应力场产生影响,这就形成了应力场与渗流场的耦合。固相、液相和气相耦合成一种连续介质,应作为一个整体来考虑。然而传统的渗流力学只研

究液体在孔隙中的流动,而没有考虑固体的变形及流体流动和固体变形之间的相互作用。岩体变形和流体流动耦合在石油、土木、环境、地质和矿业工程等很多方面具有重要的意义。

油气储集层中的孔隙既是流体储存的空间又是流体运动的通道。油气的一次开采过程,实际是孔隙流体压力下降导致孔隙压缩,并在地应力的作用下将油气挤出储集层的过程。因此油气储集层的孔隙度及变形能力与油气的储集量及一次开采量直接相关。在一次开采后期,由于大量流体的采出,使

收稿日期: 2004-06-29; **修回日期:** 2004-11-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211708); 山东省自然科学基金资助项目(Y2003F01)

作者简介: 同登科(1963-),男,博士,1997年于石油大学(北京)获博士学位,现任教授、博士生导师,主要从事渗流力学及其应用方面的教学与研究工作。E-mail: tongdk@mail.hdpu.edu.cn.

得含油层的压力降低,引起上覆岩层的变形、压实和沉降,由此将带来严重后果,必须加以研究。在二次和三次开采过程中,驱替流体的高压不仅为油气的流动提供了驱动力,而且使孔隙空间得以扩张,提高了储集层的渗透能力,实现了增产的目的。因此研究驱替过程中的流-固耦合作用是提高油气采收率必须解决的问题。

此外,还有许多工程问题都与流-固耦合渗流有关。如采用水力压裂法提高油气产量和测量地应力,油井井眼附近的应力分布和井壁的稳定性的开发利用、核废料处理、水库诱发地震中的渗流、煤层瓦斯渗流与煤体力学的耦合等流-固耦合渗流问题具有典型意义,值得研究。特别是石油工程和煤层气开采工程中,几乎从钻井到开发各领域涉及到的具体问题都与流-固耦合渗流有关。

2 流-固耦合渗流国内外研究现状

2.1 流-固耦合渗流问题的 2 种研究方法

关于固体变形和流体相互作用的研究最早见诸于文[1]对有关地面沉降的研究。将变形、饱和的多孔介质中流体的流动作为流体-固体变形的耦合问题来看待,建立了一维弹性孔隙介质中饱和流体流动的固结模型,提出了著名的有效应力公式。迄今为止,该公式仍是孔隙介质和流体相互作用的基础公式。文[2]基于文[1]同样的物理假设,将 Terzaghi 的工作推广到三维固结问题。文[2]提出了在饱和流体的多孔介质中,流体流动与岩体变形的耦合过程的第一个相容理论模型,即孔隙弹性理论;同时假设岩体是均匀各向同性的线弹性、小变形的固体,流体是不可压缩的,得到了以岩体的位移和孔隙流体压力为未知量的线性偏微分方程组,可用来解决集中荷载和线性边界条件的依赖时间扩散型沉降问题。在此基础上,Biot 进一步研究各向异性弹性多孔介质的固结理论^[2-4]。文[5]通过所谓的 Skempton 孔隙压力参数 A 和 B 推导了总应力和孔隙流体压力间的关系。文[6]进一步发展了多相饱和渗流与孔隙介质耦合作用的理论模型。文[7]证明了 Biot 建议的有效应力原理比 Terzaghi 建议的更有一般性,更具有物理意义。文[8]对 Biot 理论进行了重新表述,认为孔隙改变应作为饱和多孔介质的本构变量,它同时依赖于孔隙压力和介质应力。文[9]将 Biot 的三维

固结理论应用到了横观各向同性的孔隙弹性介质中。文[10]考虑了几何非线性和材料非线性,并在 Biot 三维固结理论基础上提出了广义 Biot 公式。

研究流-固耦合渗流问题的另一种方法是所谓的混合物理论。这个理论是由 Truesdell 引入的^[11,12],使用迭加连续介质力学和体积分数的概念,考虑了质量、动量和能量相互作用,导出了每一组分的力场和热场方程,建立了混合物熵不等式的局部形式。文[13]发展了 Truesdell 早期的工作,不仅对混合物中的每一组分建立了守恒方程的积分形式,并从积分形式出发,推得了守恒方程的局部形式,而且考虑了角动量守恒。基于 Truesdell 和文[13]的工作,流体-流体和流体-固体混合物的非线性扩散理论得到研究^[14]。文[15]注意到不溶混的混合物的特点,考虑到多孔介质孔隙结构的影响,引入了有效变形和有效应力的概念,此处的有效应力、有效变形与文[1]有效应力原理中的有效应力含义不同,它反映了不溶混的混合物的局部结构,并建立了体积分数的概念。对于被单一流体饱和的各向同性的多孔介质,体积分数是多孔介质的孔隙率。孔隙改变应是混合物总体的本构变量,其本构关系既与流体有关又与固体有关。对于被多相流体饱和的多孔介质,体积分数是孔隙率和饱和度,是混合物的总体变量。其后,文[8]对 Biot 理论进行了重新表述,其观点与文[15]的观点不谋而合。但前者采用的是孔隙弹性理论。文[16]将孔隙率作为混合物每一点上的内部变量,利用混合物理论研究了可压缩多孔介质。文[17]从多孔介质的局部结构入手,建立了微观本构方程,并将孔隙率作为一个新的状态变量,应用混合物的连续介质理论,对饱和多孔介质进行了研究,提出了关于饱和多孔介质的一种改进混合物理论。文[18]把渗流过程看成混合物的非平衡输运过程,用现代连续统物理的混合物理论的基本观点和方法研究流体在多孔介质中的运动,考虑了物理不可混溶和组分间质量交换的影响,提出毛管压力方程和有效应力的关系,系统地阐述了多相渗流、双重介质渗流、非达西流动等基本渗流问题,得到了与经典渗流理论一致的结论,并给出了诸热力学耦合因素和非线性因素时渗透定律的一般形式。

文[19]称上述 2 种方法形成了 2 类不同的研究多孔介质的理论方法。一类是基于混合物的连续介质理论,另一类是基于带有微结构材料的孔隙弹性

连续介质理论。2 种方法可推导并得到本质上等价的方程,但是混合物理论被认为是推导多相介质平衡方程更为系统的方法^[20]。总体上, n 组分混合物构架中,固体作为这些组分之一,特别适合应用于相关的油气开采问题。

2.2 单重介质流-固耦合渗流问题

2.2.1 解析和半解析流-固耦合渗流模型

许多学者研究了井壁附近多孔介质与流体耦合作用的解析解,但是这些研究大多假设单相不可压缩流体、等温地层、流体稳态流动和现场静水应力条件。文[21]研究了当存在油气从饱和不可压缩流体渗透到弹性地层流入井筒时,井筒附近的应力状态;考虑了渗透率的径向变化,假设井轴周围的应力是对称的,但没有考虑塑性变形,得到了井眼附近弹塑性问题的解析解。Darcy 定律的流动条件下定量抽放与定压抽放的流-固耦合渗流问题的解析解也得到了研究。文[22]在稳态流动条件下,假设渗透率随径向距离的变化而变化,井轴周围的应力是对称的,发展了井壁附近弹塑性变形问题的解析解。文[23]考虑了 Mohr-Coulomb 应变阻尼材料稳态流动的孔隙弹性模型。文[24]利用孔隙弹性理论研究了非静水应力场中井眼附近流-固耦合问题的不稳定流动。这些研究都是针对单相流体在稳定流动条件下的各种流动解进行的。

2.2.2 流-固耦合渗流数值模型

具有共同理论基础和公式化的一套模型是由许多学者完成的^[18, 25, 26]。他们基于 Biot 孔隙弹性理论考虑了岩体和流体的压缩性、流体间的毛管力,假设多相流体渗流服从达西定律,孔隙压力按孔隙空间取平均处理,每个组分的饱和度是加权的或认为岩体具有完全湿润性,以致只有一种流体(通常是水)能与岩体接触,所以孔隙压力等于水的压力。所有这些模型都是采用有限元求解的,几个时间积分格式用来处理不稳定计算。这些模型考虑了饱和及不饱和的多孔介质及多孔介质中的动力学问题。在此基础上,文[25, 26]建立了变形多孔介质不溶混相两相流动模型,以广义 Biot 理论建立控制方程。初始未知量是固体骨架的位移、湿润流体的饱和度和压力。随后这个模型又被推广到多相流动^[27],利用广义 Galerkin 方法离散控制方程。其中,对于多孔介质两相流动和固体变形的耦合问题,控制方程是由 2 种流体的 2 个非线性质量守恒方程结合整个

混合物的一个动量平衡方程(运动动力学方程)及每种流体的达西流动方程和流体间的毛管压力一起构成完整的耦合方程组。在这些研究中,提出了时间域中的 2 种类型解:一种是无条件稳定的交错解^[27],另一种是无条件稳定的直接积分格式^[26]。交错解法只能用于流体和固体线性位移(4 节点)元,且计算更经济实用,而直接积分法则成功用于流-固网格。上述这些模型只用于一些非常简单的例子,还没有用于油藏模拟建模。文[28]将传统的流体流动模型推广到流体流动与地质力学耦合模型。不同岩石压缩率和有效应力原理的相容解释是必不可少的。在油藏工程中,总的压缩率通常作为边界条件的函数。在最简单的情形(各向同性均质材料)下,流体压力满足四阶方程,代替了传统的二阶扩散方程,对其极限情形包括不变形、不可压缩流体和固体常平均法向应力进行了分析。

另一类流-固耦合模型是由文[29, 30]提出的,与第一套模型的主要区别是控制方程的建立方法。前者是利用混合物理论直接导出了各相和混合物的质量守恒和动量平衡方程。另一方面,文[30]在模型中增加了累积流量项,动量方程惯性项则被忽略,从而证明了达西定律的合理性。但是该模型是按照绝对流体速度给出的,与文[26]认为的固体速度的相对流体速度相反。对于流体和油藏生产问题,假设岩体小变形,绝对流体速度被认为是绝对可靠的。然而当固体颗粒速度相对于流体速度足够大时,应该考虑流体和固体的相对速度,例如,动力学问题或塑性变形或有限变形。在 Lewis 模型^[29]的基础上,文[30]提出了变形饱和油藏三维三相流动数值模拟方法,并再次使用有限元。对服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性多孔介质,在假设小应变情况下,直接求解离散方程组的解。这个模型能捕获大量传统黑油模拟器的特征,其使用了油藏工程中的典型变量,即地层体积因子、气体溶解因子及毛管压力曲线和相对渗透率。另外,利用 Biot 孔隙弹性理论严格地考虑了多孔介质的变形。文[30]采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,用有限元方法首先计算了理想弹塑性孔隙介质中油-水-气三相耦合流动。但是计算仅考虑了固体形变与流体流动的耦合,而没有考虑到固体变形对介质流动参数的影响,因而还只是部分耦合,作为一个应用,研究了钻进问题。文[31]对油气藏中岩石变形和多相流体流动间的相

相互作用问题进行了讨论, 由于生产和流体注入引起孔隙压力和温度发生变化, 进而导致岩石变形, 因而在油藏建模中应考虑岩石变形。变形影响油藏岩石的渗透率和孔隙压缩率, 以及孔隙压力随孔隙体积的变化而变化, 进而提出了在变形多孔介质中对于多相流体流动的 Biot 型模型。基于这个模型, 岩石变形和多相流体流动应同时考虑为完全耦合过程, 只有对预定简单载荷条件才能看为解耦的。然而一般的油藏模拟器忽略或简化了地质力学方面对油藏生产率的影响, 油藏模拟器中只有惟一的地质力学参数——孔隙压缩率。

文[25, 29]采用的 2 种方法, 且包含着相同的项, 事实上, 对土柱两相流动问题, 2 种方法的结果非常一致。

第三类模型是热-流-固多相耦合模型。基于热量和质量交换的平衡方程和固体力学平衡方程, 流体流动方程, 能量方程和本构方程是通过体积速度(固体和流体间的相对速度)耦合的, 砂岩模拟为一个完全的弹塑性材料。以 Mohr-Coulomb 或 Drucker-Prager 准则作为屈服准则, 耦合模型采用显式交替求解方法或完全耦合同时求解法^[32-34]。在此基础上, 文[35]建立了流-固耦合多相组分渗流的数学模型。

在上述三类模型的基础上, 人们发展了多种耦合模型, 给出了固体变形和流体流动的不同耦合方法^[34, 36, 37]。第一种方法是解耦系统(只用油藏模型求解), 压缩率是经过改进的体积型的(自由变形或侧向约束)。第二种方法是利用油藏模拟预测整个压力史, 然后计算瞬时应力解, 这种耦合预测方法称为“显式耦合方法”, 有时也称为“一种方式的耦合方法”, 这是因为信息转换只有一种方式从油藏模拟器到地质力学模块, 意味着孔隙压力场的变化诱导着应力和应变的变化, 但应力、应变的变化不影响孔隙压力。第三种方法是迭代耦合方法^[38, 39], 油藏流动变量和地质力学变量是分别求解, 油藏模拟器和地质力学模块交替求解, 在每个时间步迭代耦合项, 耦合迭代是由基于最后两次迭代的压力解或应力解的变化作为收敛标准控制。第四种方法是完全耦合方法^[39-41]。流动变量如压力、温度和地质力学响应中的位移都是通过以压力、温度和位移为未知量的方程组进行求解的。由于整个系统是在同一个网格域上离散且同时求解的, 因此这种方法有时

也称为“隐式耦合方法”。在这些方法中, 对固体模拟又有两种方法; 有限元应力分析模拟器和有限差分模拟; 对流体有三种模拟方法, 有限元模拟、有限差分模拟和流线流体流动模拟。在完全耦合中只有有限元模拟器和有限差分模拟器。这些方法被用来研究临界态本构模型、弹塑性影响、应力迹线影响和渗透率变化^[41]。

上述四种方法有其各自的特点^[41-43], 第一种方法是较低级的耦合, 实际上现在基本不用。显式耦合方法吸引人的主要有 2 个: 一个是选择时间步来完成地质力学计算, 这是因为流体流动和固体变形耦合模型计算的大部分时间耗费在计算位移上; 另一个是使用这种技巧能非常直接地耦合已存在的孔隙流动模拟器或已存在的地质力学模拟器, 但其缺陷是计算的稳定性和精度, 因而耦合的显式性可能施加在时间步限制了计算速度。但对于许多沉降和断层动态问题需要的时间步较小, 可用显式耦合方法计算。

迭代耦合法诱人的是: 一是如果使用相同的收敛准则, 迭代耦合方法能产生与完全耦合方法相同的结果; 二是能非常直接耦合已存在的孔隙流动模拟器和已存在的地质力学模拟器, 但缺陷是迭代耦合方法在非线性迭代中可能只有一阶收敛性, 对于较为复杂的问题将需要大量的迭代计算, 因而适合较小规模问题的计算。完全耦合方法是几种技巧中最为稳定的, 且对于非线性迭代具有二阶收敛性, 缺陷是不能直接耦合已存在的孔隙流动模拟器或已存在的地质力学模拟器, 需要编制大量的程序, 对一些问题的计算比显式耦合法和迭代耦合方法慢, 因而对于解决压实驱动问题完全耦合方法更合适。

为了使流-固耦合模拟在计算中更加准确, 孔隙度模型被应用并得到了研究^[44], 同时给出了把孔隙度作为压力、温度和平均总应力函数的一个计算公式, 并提出了一种新的迭代耦合方法。这种方法不仅改进了耦合的精度而且减少了耦合迭代次数, 快速收敛的迭代耦合方法可用于大规模的复杂耦合问题, 其优点是地质力学模块能够与不同的油藏模拟器进行耦合。

地质力学和流体流动耦合模型的应用得到广泛的研究。利用流-固耦合方法研究压实驱动和上覆岩层沉降, 文[45]建立了渗流-变形-沉降耦合模型; 对渗流、变形和沉降过程进行仿真模拟, 从而

对地面沉降进行计算预测。同时,文[46]对应力敏感地层的试井进行了研究,文[47]利用耦合方法分析高温高压条件下断层活动。文[48~50]利用地质力学和油藏模拟的完全耦合模式对采油时应力、流体流动和油藏特性变化的影响进行了评价,认为地质力学和油藏流体生产间的耦合作用极大地影响着应力状态、储层特性和采油效率,而压实驱替机理对于提高采收率是重要的。考虑低渗透油藏渗流时启动压力梯度和低渗储层的流-固耦合特性,在黑油模型和弹性有限元模型基础上研制了低渗流-固耦合计算软件^[51]。油藏压裂后流-固耦合渗流问题得到进一步研究,同时考虑了岩石变形,地应力、孔隙度和渗透率变化。最后开发了在商业油藏模拟器(包括黑油模型、组分模型和热采模型)中耦合地质力学应力分析模块,可用来模拟井壁稳定性、产层出沙和断层模拟及大规模油藏模拟^[52]。

2.3 双重介质流-固耦合渗流进展

2.3.1 单相流动模型

考虑了流动区岩块变形的影响,建立了耦合流动——变形模型。假设介质完全饱和,孔隙体积的变化等于流体占据空间的压缩,忽略了大多数与地质力学耦合无太大关联的细节,假设固体是不可压缩的,且裂隙和岩块的孔隙体积压缩系数可由流体压缩系数表示,只是流体压力的函数,因此在流动方程中没有显式岩石压缩系数(固体、孔隙和体积),惟一的耦合项包含在固体速度的散度项里,导出的流动方程也耦合了固体位移方程^[53]。文[54]在文[2~4]的三维单相流体弹性孔隙介质理论及文[55]的双重孔隙介质数学模型的基础上,根据混合物理理论,将单孔隙介质弹性固体理论推广到双重孔隙介质,提出了模拟变形裂隙介质单相流体耦合双重介质模型。混合物理理论通常采用热动力学框架,从一般本构关系理论出发,获得固体的非线性控制方程,其线性化形式就是 Biot 方程的推广。在实际问题中如果非线性和热效应是重要的,那么基于混合物理理论的数学模型是非常重要的。文[56]进一步阐述了 Aifantis 理论,通过对 Biot 单重介质经典流动模型的恰当推广给出了裂隙基岩方程的又一推导。基于加权余方法的 Galerkin 格式发展了有限元方法,并利用数值方法求解了弹性双重介质固体问题的三个例子,一维柱,二维层和三维半空间问题。文[57]从能量变分原理出发,重新推导了弹性双重孔隙介

质的固结理论方程。文[58]基于双孔隙概念,提出了一组控制变形裂隙介质动态的耦合微分方程,这些方程的系数是变系数的,代替 Aifantis 模型中的常系数,同时考虑显式岩石压缩系数,并包含了岩石压缩系数和有效应力关系,但与假设的力学理论不一致。

从 Biot 的弹性孔隙介质固结理论扩展得到的 Aifantis 弹性双重孔隙介质理论,其未知变量是介质位移和流体压力,是一种基于应变的双重弹性孔隙介质理论。文[59]从文[8]的基于应力的孔隙弹性理论出发,推导了一组基于应力的弹性双重孔隙介质理论公式,其未知量为应力。文[60]从基于应变双重孔隙介质理论出发,得出了双重孔隙介质的有效应力原理,而文[61]从基于应力的双重孔隙介质理论得到相同的结果。文[62]从基于应力的弹性双重孔隙介质理论出发,推导了一维问题的解析解,并比较了两种理论的差异。当然,由于有限元是基于位移的数值计算方法,因而 Aifantis 的基于位移的弹性双重孔隙介质理论应用更为广泛。Aifantis 所提出的双重孔隙介质耦合模型的基本假设之一是,基质孔隙体积变形与裂隙体积变形是相互独立的、互不相关的,但与裂隙性介质总的体积变形又存在线性关系,这个假设只有在忽略孔隙与裂隙的压力差时才能得到保证,而压力差正是孔隙与裂隙流体交换的基础。文[63]从叠加原理和互易定理出发,推导了更为严密的弹性双重孔隙介质理论公式,进一步阐明了双重孔隙介质的物理意义。

文[64]提出了裂隙介质线性孔隙弹性响应的本构模型来确定双重孔隙度效应的影响。文[65]基于混合物理理论,进一步扩展了裂隙性介质理论模型,将文[66]的裂隙性介质的双重孔隙介质模型推广到三孔隙度、单渗透率、双渗透率等多孔隙多渗透率的耦合模型,并提出了相关于自然裂缝油藏特征的变孔隙度、变渗透率依赖于变形的系列渗流模型及识别参数的重要关系;利用有限元求解了双孔隙度/双渗透率模型。

文[67]以类似的基本假设为基础,提出了非均质变形介质有限元双孔隙度模型,只是使用了不同的公式。大多数表达式是基于对问题的物理解,缺乏严格的数学基础。当将其与等价的单重介质模型比较时,所得到的结果是有相当意义的,然而所得到的趋势与文[64]得到的结果截然不同。

基于 Biot 等温孔隙弹性理论、双孔隙度概念和传统的多孔流体流动模型,文[68]将传统的双孔隙度流体流动模型推广到流体流动与地质力学耦合模型,并提出了描述双重岩石体积变化新的关系式,这些关系式能在单孔隙度概念和双孔隙度概念间平稳、一致地转化且具有可测量定义的,当简化为单重介质时与已有模型完全一致。文[69]对近年来发展的地质力学与流体流动耦合双重介质模型进行了比较总结,通过比较对复杂的模型参数提供了重要理论依据。

2.3.2 多相流动模型

文[70]基于双孔隙度理论,发展了裂缝油藏多相流动模型。在这个模型中,平衡方程和连续方程均考虑了流体流动和固体变形耦合的影响。利用 Galerkin 有限元方法在时间和空间域上离散控制方程,导出的方程以固体位移和流体压力作为初始未知量,可用来确定其他油藏参数,如应力和饱和度等,但导致最终的方程具有高度非线性的。将此模型用于求解现场实例并与其他未耦合模型比较,可发现有很大的不同,所以耦合的影响必须加以考虑。文[71]考虑了双重介质中多相流动与固体变形的耦合作用,建立了包括基本概念(孔隙渗透饱和度、介质总体积、质量密度、流体速度和流体压力等表达式)和基本方程(流动方程、质量守恒方程、固体变形方程以及应力平衡方程等)在内的数学模型,但没有给出具体的数值解。对于双重介质多相流动与固体变形耦合作用研究论文为数不多,而模型的一般性和求解方法的通用性都未得到研究,更谈不上应用到实际问题。

3 存在的问题

利用流-固耦合方法进行渗流力学研究提高了人们就多孔介质变形对能源开发影响的认识,这是仅用传统单一流体渗流方法所不及的。而传统方法又是流-固耦合方法的特例,这说明流-固耦合渗流研究具有重要的理论意义和实际意义,并已得到了广泛的应用。然而,流-固耦合流动分析也存在一些亟待解决的问题,主要表现在以下几个方面:

(1) 对孔隙介质流-固耦合机理主要集中在宏观研究上,对微观研究较少。

(2) 应加强流-固耦合渗流模型商用软件的开发,

特别是利用已有的油藏模拟软件和应力分析软件,提高计算的运行速度,以便能模拟大规模的复杂问题。

(3) 为提高计算速度,应加强流-固耦合渗流并行计算技术研究。

(4) 应加强双重介质多相流体流-固耦合渗流模型研究,特别是对复杂模型的参数研究,便于测量,能够用于更广泛的工程问题。

(5) 应加强利用混合物理理论的基本观点和方法来研究双重介质多相渗流和热流-固三场耦合等问题。

(6) 需进一步开展岩石物性实验研究和现场开发资料的收集整理工作,这也是流-固耦合渗流理论研究的基础。

(7) 油-气-水多相渗流与岩层变形耦合作用的理论模型、定量数值求解方法及技术是石油地质力学领域流-固耦合研究的两个重要理论问题,应进一步将有限差分和有限元数值方法的优势和特点结合起来,发展一套功能完善、性能高效可靠的定量分析系统。

(8) 由于与原油产量直接相关的储层渗透率是石油工程师所关心的另一个问题,对于变形介质油藏,渗透率是应力敏感的。应力的变化引起孔隙度、渗透率的变化,应增加实验测试、数值模拟来预测在不同载荷下渗透率依赖应力关系。

(9) 煤层气流-固耦合渗流研究和应用方面的工作很少,亟待加强,特别是在煤体、煤层气和水耦合模型研究上及孔隙度和渗透率随煤体应力和流体压力的变化关系。

4 发展趋势

经过多年的努力,流-固耦合渗流理论得到了很大的发展,并已得到广泛的应用,但离商业化应用尚有一段距离,目前仍为地下能源开发工程研究的热点,其主要发展趋势有:

(1) 试验研究

针对不同的岩层,研究物性参数与应力的关系及流-固耦合微观渗流机理。

(2) 模型研究

针对油-气-水多相渗流与不同岩层变形耦合作用建立不同的理论模型,对不同的复杂模型的参

数研究及其便于测量,进而可应用于更广泛的工程问题。

(3) 数值方法研究

进一步将有限差分 and 有限元数值方法的优势和特点结合起来,发展快速可行的计算分析系统,加速解决实际问题的商用软件开发。

(4) 并行算法研究

并行计算在今后提高计算速度的研究方向。

(5) 应用研究

针对不同的实际问题,流-固耦合方法的应用研究,例如煤层气的流-固耦合方法研究,地热资源的利用等等。

(6) 多相介质、多场耦合研究场耦合研究

深部多相介质、多场耦合作用及其灾害发生机理与防治,高温、高压下矿岩固-液-气相互耦合作用与灾变动力学需进一步研究。

参考文献(References) :

- [1] Terzaghi V K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York : Academic Press , 1943. 1 - 10.
- [2] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. J. Appl. Phys. , 1941 , 12(2) : 155 - 164.
- [3] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid[J]. J. Appl. Phys. , 1955 , 26(2) : 182 - 185.
- [4] Biot M. A general solution of the equation of elasticity and consolidation for a porous material[J]. J. Appl. Phys. ,Trans. ,ASME , 1956 , 78 : 91 - 96.
- [5] Skempton A W. The pore pressure coefficients A and B[J]. Geotechnique , 1954 , 4(4) : 143 - 147.
- [6] Verrijt A. Elastic storage of aquifers[A]. In : Flow Through Porous Media[C]. New York : Academic Press , 1969. 331 - 376.
- [7] Nur A , Byrlee J D. An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids[J]. J. Geophys. Res. , 1971 , 76(26) : 6 414 - 6 419.
- [8] Rice J R , Cleary M P. Some basic stress diffusion solution for fluid-saturated elastic solid porous media with compressible constituents[J]. Rev. of Geophys. and Space Physics , 1976 , 14(2) : 227 - 241.
- [9] Savage W Z , Bradock W A. A model for hydrostatic consolidation of Pierre shale[J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. , 1991 , 28 : 345 - 354.
- [10] Zienkiewicz O C , Shomi T. Dynamic behavior of saturated porous media :the generalized Biot formulation and its numerical solution[J]. Int. J. Analy. Numer. Meth. Geomech. , 1984 , 8(1) : 71 - 96.
- [11] Truesdell C ,Toupin R A. The classical field theories of mechanics[A]. In : Flugge S ed. Handbuch der Physic , BdIII/1[C]. Berlin : Springer-Verlag , 1960. 226 - 793.
- [12] Truesdell C ,Noll W. The nonlinear field theories[A]. In :Flugge S ed. Handbuch der Physic , BdIII/3[C]. Berlin : Springer-Verlag , 1965. 601 - 602.
- [13] Kelly P D. A reacting continuum[J]. Int. J. Engng. Sci. , 1964 , 2(1) : 129 - 153.
- [14] Bowen R M. Incompressible porous media models by use of the theory of mixtures[J]. Int. J. Engng. Sci. ,1980 ,18(9) :1 129 - 1 148.
- [15] Morland L W. A simple constitutive theory for a fluid-saturated porous solid[J]. J. Geophy. Res. , 1972 , 77(5) : 890 - 900.
- [16] Bowen R M. Compressible porous media models by use of the theory of mixtures[J]. Int. J. Engng. Sci. , 1982 , 20(6) : 697 - 735.
- [17] Katsube N. The constitutive theory for fluid-filled porous materials[J]. J. Appl. Mech. , 1985 , 52(1) : 185 - 189.
- [18] 李 希 ,郭尚平. 渗流过程的混合物理论[J]. 中国科学(A 辑) , 1988 ,(2) :265 - 274.(Li Xi ,Guo Shangping. The theory of mixtures in the seepage course[J]. Science in China(Series A) , 1988 , (2) : 265 - 274.(in Chinese))
- [19] Bore D R , Ehler W. A historical review of the formulation of porous media theories[J]. Acta. Mech. , 1988 , 74 : 1 - 8.
- [20] Ehlers W , Kubik J. On finite dynamic equations for fluid saturated porous media[J]. Acta Mech. , 1994 , 105 : 101 - 117.
- [21] Paslay P R , Cheatham J B. Rock stresses induced by flow of fluids into boreholes[J]. SPEJ , 1963 , 3(1) : 85 - 93.
- [22] Rudnicki J W. Fluid mass sources and point sources in linear elastic diffusive solids[J]. Mechanics of Materials , 1986 , 5 : 383 - 393.
- [23] Wang Y , Dusseaut M B. Borehole yield and hydraulic fracture initiation in poorly consolidated rock strata—part II permeable media[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. , 1991 , 28(4) : 247 - 260.
- [24] Detournay E , Cheng A H D. Poroelastic solution of a plane strain point displacement discontinuity[J]. J. Appl. Mech. , 1987 , 54(4) : 783 - 787.
- [25] Li X , Zienkiewicz O C , Xie M. A numerical model for immiscible two-phase fluid flow in a porous medium and its time domain solution[J]. Int. J. Num. Meth. Eng. , 1990 , 30(6) : 1 195 - 1 212.
- [26] Li X , Zienkiewicz O C. Multiphase flow in deforming porous media and finite element solutions[J]. Computers and Structures , 1992 , 45(2) : 211 - 227.
- [27] Li X. Finite-element analysis for immiscible two-phase fluid flow on deforming porous media and an unconditionally stable staggered

- solution[J]. *Commun. Appl. Numer. Meth.*, 1990, 6(1): 125–135.
- [28] Chen H Y, Teufel L W, Lee R L. Coupled fluid flow and geomechanics in reservoir study: theory and governing equations[R]. SPE 30752, 1995.
- [29] Lewis R W, Sukirman Y. Finite element modeling of three-phase flow in deforming saturated oil reservoirs[J]. *Intern. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 1993, 17: 577–598.
- [30] Sukirman Y B, Lewis R W. Three-dimensional coupled flow: consolidation modeling using finite element method[A]. In: SPE28755, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference[C]. Melbourne, Australia: [s. n.], 1994. 155–164.
- [31] Gutierrez M, Lewis R W, Masters I. Petroleum reservoir simulation coupling fluid flow and geomechanics[J]. *SPE Reservoir Eval. and Eng.*, 2001, 13(3): 164–172.
- [32] Tortike W S, Ali F S M. A framework for multiphase non-isothermal fluid flow in a deforming heavy oil reservoir[A]. In: SPE16030, the Ninth SPE Symposium on Reservoir Simulation[C]. San Antonio, Texas: [s. n.], 1987. 62–87.
- [33] Fung L S K, Buchanan L, Wan R G. Coupled geomechanical-thermal simulation for deforming heavy-oil reservoirs[J]. *J. Cdn. Pet. Tech.*, 1994, 33(4): 22–28.
- [34] Koutsabeloulis N C, Hope S A. Coupled stress-fluid-thermal multi-phase reservoir simulation studies incorporating rock mechanics[A]. In: The SPE/SRMEurock'98[C]. Trunccheon, Norway: [s. n.], 1998. 449–454.
- [35] Ran Qiquan. Establishment of mathematical model for multiphase multicomponent flow coupled with reservoir deformation[J]. *China offshore Oil and Gas(Geology)*, 1996, 10(3): 172–177.
- [36] Settari A, Mourits F M. A coupled reservoir and geomechanical simulation system[J]. *SPE Journal*, 1998, 3(2): 219–226.
- [37] Settari A, Walters D A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction[J]. *SPE Journal*, 2001, 7(4): 334–342.
- [38] Minkoff S, Stone C, Bruyant S, et al. Coupled fluid flow and geomechanical deformation modeling[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003, 38(1/2): 37–56.
- [39] Yale D P. Coupled geomechanics-fluid modeling: effects of plasticity and permeability alteration[A]. In: SPE/ISRM78202, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference[C]. Irving, Texas: [s. n.], 2002.
- [40] Chin L Y, Raghavan R, Thomas L K. Fully coupled geomechanics and fluid-flow analysis of wells with stress-dependent permeability[J]. SPE58968, 2000, 5(1): 32–45.
- [41] Tran D, Settari A, Nghiem L. New iterative coupling between a reservoir simulator and a geomechanics module[A]. In: SPE78192, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference[C]. Irving, Texas: [s. n.], 2002. 362–369.
- [42] Thomas L K, Chin LY, Pierson R G, et al. Coupled geomechanics and reservoir simulation[A]. In: SPE77723, SPE Annual Technical Conference and exhibition[C]. San Antonio, Texas, USA: [s. n.], 2002.
- [43] Terry W, Xian C G, Fang Z, et al. Coupled geomechanical simulation for stress dependent reservoirs[A]. In: SPE79697, SPE Reservoir Simulation Symposium[C]. Houston, Texas, USA: [s. n.], 2003. 1–6.
- [44] Samier P, Onaisi A, Fontaine G, et al. Coupled analysis of geomechanics and fluid flow in reservoir simulation[A]. In: SPE79698, SPE Reservoir[C]. [s. l.]: [s. n.], 2002. 485–497.
- [45] Gutierrez M, Hansteen H. Fully-coupled analysis of reservoir compaction and subsidence[A]. In: SPE28900, EUROPEC'94[C]. London: [s. n.], 1994. 83–94.
- [46] Chin L Y, Raghavan R, Thomas L K. Fully coupled analysis of well responses in stress-sensitive reservoirs[A]. In: SPE48967, 1998 SPE Annual Technical Conference and Exhibition[C]. Orleans, Louisiana: [s. n.], 1998. 42–66.
- [47] Charlier R, Fourmaintraux D, Samier P, et al. Numerical simulation of the coupled behavior of faults during the depletion of a high-pressure/high-temperature reservoir[A]. In: SPE/ISRM78199, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference[C]. Irving, Texas, USA: [s. n.], 2002. 102–126.
- [48] Chin L Y, Thomas L K. Fully coupled analysis of improved oil recovery by reservoir compaction[A]. In: SPE56753, 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition[C]. Houston, Texas, USA: [s. n.], 1999. 485–497.
- [49] Coombe D, Tremblay B, Tran D. Coupled hydro-geomechanical modeling of cold production process[A]. In: SPE69719, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium[C]. Porlamar, Margarita Island, Venezuela: [s. n.], 2001. 176–187.
- [50] 薛世峰. 非混溶饱和两相渗流与变形孔隙介质耦合作用的理论研究及其在石油开发中的应用[博士学位论文][D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2000.(Xue Shifeng. Theoretical study on immiscible saturated two-phase flow in nonlinear deformable porous media and application to petroleum engineering[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2000.(in Chinese))
- [51] 刘建军, 刘先贵, 胡雅乃, 等. 低渗透储层流固耦合渗流规律的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 81–92.(Liu Jianjun, Liu Xiangui, Hu Yanai, et al. Study on fluid-solid coupling flow in low permeable oil reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics*

- and Engineering , 2002 , 21(1) : 81 – 92.(in Chinese))
- [52] 范学平, 徐向荣, 张士诚, 等. 用流固耦合方法研究油藏压裂后应力应变和孔隙特性[J]. 岩土力学, 2001 , 22(1) : 47 – 50.(Fan Xueping , Xu Xiangrong , Zhang Shicheng , et al. Analysis of changes of stress , strain , porosity and permeability in multiphase reservoir with fluid-solid coupled and geomechanical mathematical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics , 2001 , 22(1) : 47 – 50.(in Chinese)).
- [53] Duguid J O , Lee P C Y. Flow in fractured porous media[J]. Water Resources Research , 1977 , 13(2) : 558 – 566.
- [54] Aifantis E C. On the problem of diffusion in solids[J]. Acta Mech. , 1980 , 37 : 265 – 296.
- [55] Barenblatt G I , Zheltov I P. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks[J]. Prikl. Mat. Mekh. , 1960 , 24(5) : 852 – 864.
- [56] Khaled M Y , Beskos D E , Aifantis E C. On the theory of consolidation with double porosity III : a finite element formulation[J]. Int. J. Num. Ana. Meth. Geomech. , 1984 , 8 : 101 – 123.
- [57] Bekos D E , Aifantis E C. On the theory of consolidation with double porosity-II[J]. Int. J. Eng. Sci. , 1986 , 24 : 1 697 – 1 716.
- [58] Valliappan S , Khalili-Naghadeh N. Flow through fissured porous media with deformable matrix[J]. Int. J. Num. Meth. Eng. , 1990 , 29 : 1 079 – 1 094.
- [59] Berryman J G , Wang H F. The elastic coefficients of double porosity models for fluid transports in jointed rocks[J]. J. Geophys. Res. , 1995 , 100 : 24 611 – 24 627.
- [60] Tuncay K , Corapcioglu M Y. Effective stress principle for saturated fractured porous media[J]. Water Resources , 1995 , 31 : 3 103 – 3 106.
- [61] Wang H F , Berryman J G. On constitutive equations and effective stress for deformable double porosity media[J]. Water Resources Res. , 1996 , 32 : 3 621 – 3 622.
- [62] Lewallen K L , Wang H F. Consolidation of a double porosity medium[J]. Int. J. Solids Structures , 1998 , 35(34/35) : 4 845 – 4 867.
- [63] Khalili N , Valliappan S. Unified theory of flow and deformation in double porous media[J]. European Journal of Mechanics A/Solids , 1996 , 15(2) : 321 – 336.
- [64] Elworth D , Bai M. Flow-Deformation response of dual-porosity media[J]. Journal of Geotechnical Engineering , 1992 , 118(1) : 104 – 127.
- [65] Bai M , Elsworth D , Roegiers J C. Multiporosity/multipermeability approach to the simulation of naturally fractured reservoirs[J]. Water Resour. Res. , 1993 , 29(6) : 1 621 – 1 633.
- [66] Warren J E , Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Soc. Pet. Eng. J. , 1963 , 3(5) : 245 – 255.
- [67] Ghafouri H R , Lewis R W. A finite element double porosity model for heterogeneous deformable porous media[J]. Int. J. Analytc. Numer. Meth. Geomech. , 1996 , 20 : 831 – 844.
- [68] Chen H Y , Teufel W. Coupling fluid-flow and geomechanics in dual-porosity modeling of naturally fractured reservoirs[A]. In : SPE38884 , 1997 SPE Annual Technical Conference and Exhibition[C]. San Antonio , Texas : [s. n] , 1997. 211 – 238.
- [69] Chen H Y , Teufel W. Coupling fluid-flow and geomechanics in dual-porosity modeling of naturally fractured reservoirs model description and comparison[A]. In : SPE59043 SPE Annual Technical Conference and Exhibition[C]. Villahermosa , Mexico : [s. n.] , 2000. 747 – 777.
- [70] Lewis R W , Ghafouri H R. A novel finite element double porosity model for multiphase flow through deformable fractured porous media[J]. Int. J. Analytc. Numer. Meth. Geomech. , 1997 , 21 : 789 – 816.
- [71] 黎水泉, 徐秉业. 裂缝性油藏流固耦合渗流[J]. 计算力学学报, 2001 , 18(2) : 133 – 137.(Li Shuiquan , Xu Bingye. Flow through fissured reservoir with deformable media[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics , 2001 , 18(2) : 133 – 137.(in Chinese))

收稿日期：2004-06-29；**修回日期**：2004-11-15

基金项目：国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB211708)；山东省自然科学基金资助项目(Y2003F01)

作者简介：同登科(1963-)，男，博士，1997年于石油大学(北京)获博士学位，现任教授、博士生导师，主要从事渗流力学及其应用方面的教学与研究工作。E-mail：tongdk@mail.hdpu.edu.cn。