

文章编号: 1674-0262(2011)01-0012-06

多孔介质热流固耦合有限元分析

杨 通, 刘 峰

(河北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063009)

关键词: 多孔介质; ADINA; 热力采油; 耦合

摘 要: 探讨了应用有限元分析软件 ADINA 进行多孔介质热流固耦合的分析方法。以石油生产中的热力采油为例, 对多孔介质热流固耦合问题进行数值模拟。分析了在热力采油过程中由于注蒸汽以及流体流动等因素对储油层的影响。对开采选址与提高石油产量有一定的参考意义。

中图分类号: TE312 **文献标志码:** A

0 引言

在热流固耦合问题研究领域, 最早是对地热资源的开发研究, 探讨地热区域内地应力、温度变化和岩石渗透率变化的影响; 近年来, 国内学者研究了非等温条件下煤层中瓦斯渗流的规律, 并建立了数学模型, 考虑了温度变化对瓦斯渗流的影响^[1]。在多孔介质热流固耦合研究方面, 特别是在石油工程的研究过程中, Lewis^[5]等进行了非等温条件下油藏渗流的规律以及因石油开采而引起的地面下沉等问题的研究, 考虑了温度场的变化对油藏渗流和地面沉降的影响以及流体渗流对温度场的影响等; 但是, 这些研究都没有考虑温度场的变化对多孔介质变形的影响(即没有考虑温度与固体之间、温度与流体之间的耦合作用), 因此没有实现真正意义上的热-流-固三场耦合。

由于热流固耦合理论开展研究的时间比较晚以及自身的复杂性等原因造成了其还处于初期的探索阶段。所以现阶段对热流固耦合的研究主要是借鉴流固耦合理论思想和方程, 例如双向相互作用的思想对于研究热流固耦合有很大启发, 流固耦合理论中的岩石变形方程可以通过改变本构关系推广到热流耦合理论中的岩石变形方程等^[2]。

1 热流固耦合的两种模型

对于热流固耦合理论目前还处于探索阶段, 所以对该理论的深入研究主要以流固耦合理论为平台, 借鉴其中的一些思想和方程。现在对该问题的研究主要有两个方向, 并提出了两类模型^[3]:

第一类称为非完全耦合模型, 主要是以流固耦合理论为基础进行研究。在此模型中, 认为骨架温度的变化会引起岩体的体积热应变, 热应变与其他因素引起的岩体应变共同组成了固体骨架的总应变, 骨架的总应变引起了岩体的变形和流体渗流, 从而成为影响固体变形方程和流体渗流方程的重要因素。将这种模型称为非完全耦合模型是因为在模型中将温度当作假想的与其他力学载荷等效的载荷(即所谓的“热载荷”)加载到岩体的固相骨架上, 这种“热载荷”只是温度函数, 并没有体现多孔介质变形、流体渗流的耦合项, 也就是说在该模型中只有流体和固体两者之间的完全耦合, 而热应变方程只是温度的函数, 并没有实现完全耦合。此目的是为了简化热流固耦合模型, 且使模型求解简单, 便于解决实际问题。

第二类称为完全耦合模型^[4], 该模型认为温度场的变化会对多孔介质的变形以及流体的渗流造成影响,

收稿日期: 2010-04-22

并且还认为二者反过来也会对温度场造成影响。温度场和多孔介质变形、流体渗流之间的关系与流体渗流和多孔介质变形之间的双向相互作用类似, 温度场的变化与岩石变形之间也存在双向相互作用, 即热-固耦合效应, 一方面温度场的变化要产生热应力、热应变从而导致多孔介质的变形, 而另一方面, 多孔介质的变形反过来又要导致温度场的改变。这样, 流体渗流、固体变形以及温度场的变化三者同为基本变量, 从而形成热流固三者的完全耦合。

2 多孔介质热流固耦合模型建立

2.1 建模的基本假设

多孔介质热流固耦合模型的建立基于以下基本假设:

1) 多孔介质材料的性质和压力是均匀各向同性的, 并且在传热传质过程中不发生变化。即孔隙率和绝对渗透率等参数维持不变;

2) 比热、导热系数(固、液、气)均为常数;

3) 多孔介质内流体流动的速度小, 其动能和惯性的影响可不予考虑;

4) 固体相是一个固定的、不变形的骨架;

5) 流体始终充满多孔介质的孔隙结构。

2.2 建模的基本步骤

应用 ADINA 对多孔介质热流固耦合模型进行计算分析主要有: 建立模型、加载求解、分析计算结果三部分组成。具体的步骤如图1所示:

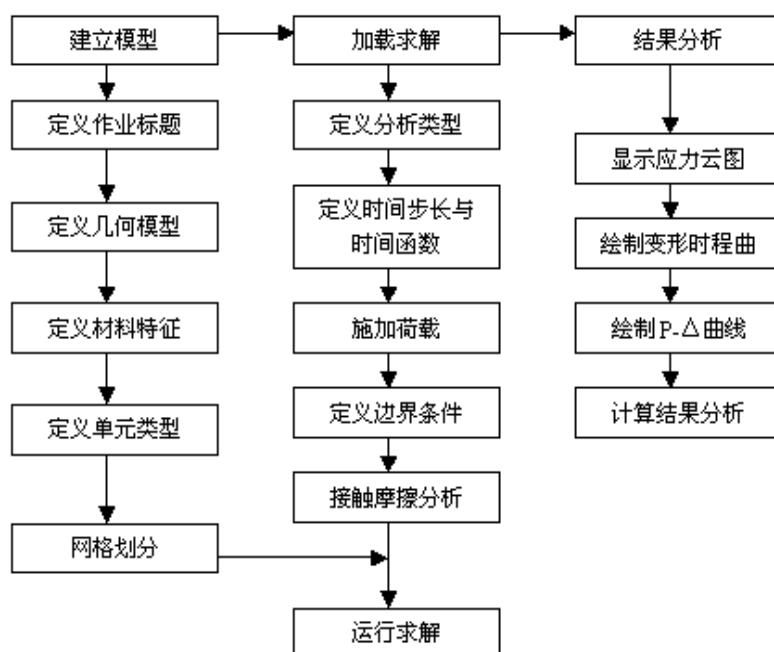


图1 ADINA分析流程图

2.3 建立模型

模型模拟的是石油工程热力采油过程, 几何模型为 $6\text{m} \times 4\text{m} \times 6\text{m}$, 分三个地层, 中间层为储油层, 为多孔介质属性。设有三口井, 其中一口作为热力采油主入蒸汽的入口, 其余两口井为出油口, 同时中间层的两侧也有流体压力存在, 由于压差的存在, 将导致中间层发生变形。模型采用流固耦合算法, 有结构和流体两个模型, 温度作为“热荷载”施加到模型上。

2.3.1 建立结构模型

在进行流固耦合计算时, 不管是流体模型还是结构模型都必须施加流固耦合边界, 模型中有三个流固

耦合边界条件,分别为中间地层的两侧和井的入口。模型中,因为要考虑温度的影响,即施加温度荷载,所以就必须指定模型在施加温度荷载之前的初始荷载。并且在划分网格之前需要定义网格密度,由于模型中各边的尺寸相差很大,所以应采用不同的方法进行划分。对模型中小尺寸的边利用指定划分分数的方法划分,而对其他边采用制定单元长度的方法划分。这样可以保证最后生成的网格比较均匀,既可以保证计算的精度,又充分利用了计算资源。最后建成的结构模型如图2所示:

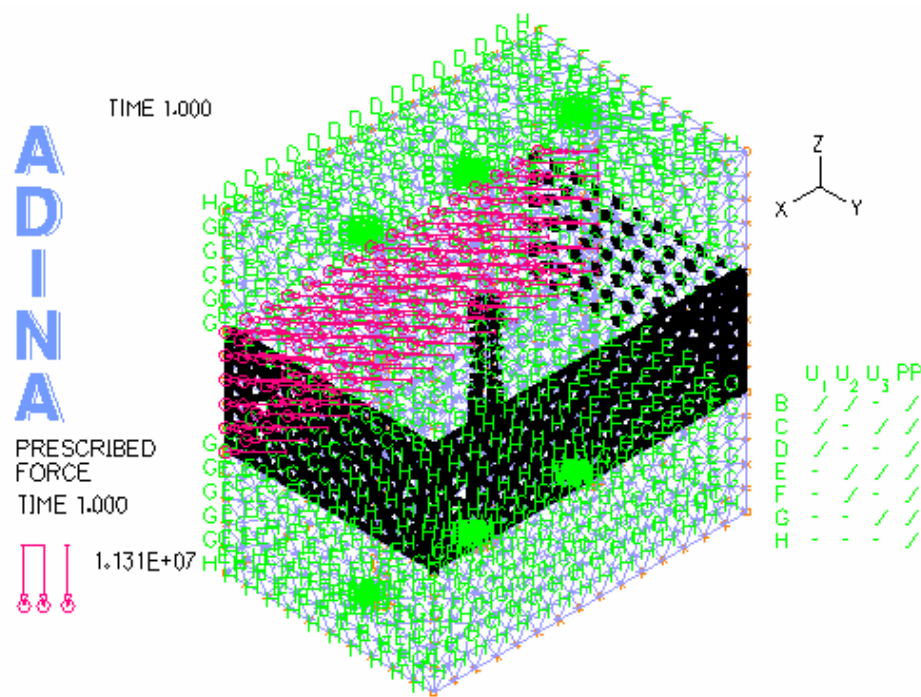


图2 结构模型

2.3.2 建立流体模型

流体模型中的几何模型与结构模型的相似,只是增加了流体。与结构模型中流固耦合边界不同,流体模型中的流固耦合边界应设置在流体上,并且与结构模型中的边界条件相对应。在流体模型中,主要考虑两种荷载,一个是拖拽力荷载,另一个是温度荷载。在流体模型中,当开口处施加压力边界时,最好施加拖拽力荷载,而不是压力荷载,否则将在边界处得到不合理的结果。流体和上下两个土层选用材料参数为常数的材料,中间土层采用多孔介质材料。材料具体的参数^[6,7]表1、表2所示:

表1 材料参数

材料类型	密度 / (kg/m ³)	粘度	比热容 (kJ/m ³ ·℃)	传导系数 (kJ/m·℃)	热膨胀系数
流体	1000	0.0010	4200	6.0	3.0 × 10 ⁻⁵
地层1	2800	0.0005	1200	7.2	2.1 × 10 ⁻⁵
地层3	1400	0.0003	1000	6.0	2.0 × 10 ⁻⁵

表2 多孔介质材料参数

材料类型	密度 / (kg/m ³)	比热容 (kJ/m ³ ·℃)	传导系数 (kJ/m·℃)	多孔系数	粘度	渗透系数 (m/s)
中间地层	2940	800	6	0.5	0.0002	4 × 10 ⁻⁶

流体模型的网格划分与结构模型相似, 对模型中小尺寸的边利用指定划分分数的方法划分, 而对其他边采用制定单元长度的方法划分。划分网格后的流体模型如图 3 所示:

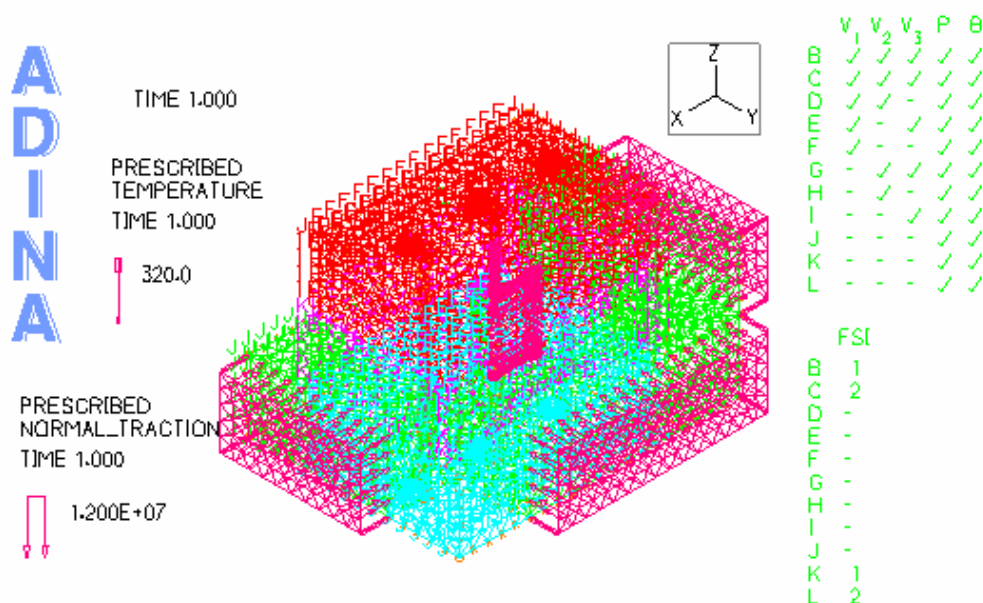


图3 流体模型

在 ADINA 软件中同时选中结构模型求解文件和流体模型求解文件进行求解。

3 模型中各个参数影响分析

3.1 流体压力对多孔介质的影响

在油气开采之前, 油层内岩体和流体都处于均匀受压状态, 各种压力是相互平衡的, 当油气投入开采之后, 油气层的压力不断下降, 上层岩层压力和油层内流体压力之间会形成压力差, 使岩体失去平衡而造成岩体颗粒变形, 排列更加紧密, 导致岩层孔隙体积的减少^[8]。由于空隙体积的减少, 将压缩孔隙中的流体使之向压力较低的方向流动, 这种压力差就是石油开采中将原油从地层中开采到地面的主要动力。本模型中, 选择了三个流体压力, 分别为: 4MPa、12MPa、20MPa。图 4 至图 6 为模型在以上三种流体压力作用下多孔介质地层位移、流速和流量的曲线。

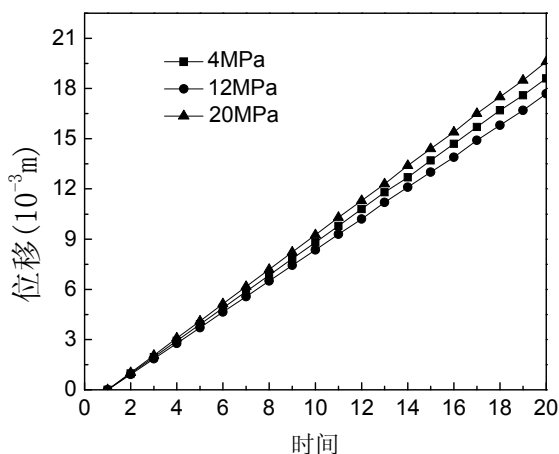


图4 最大位移的时程曲线

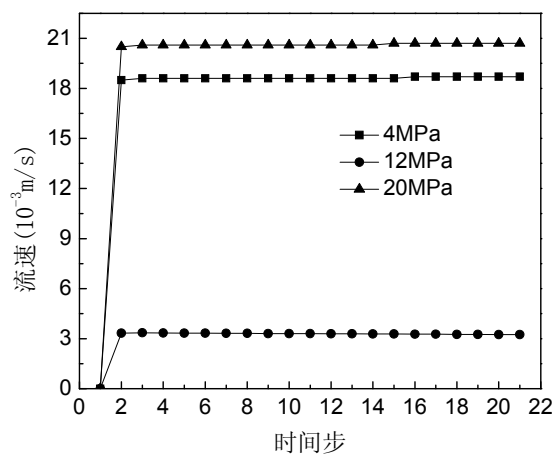


图5 流体速度的时程曲线

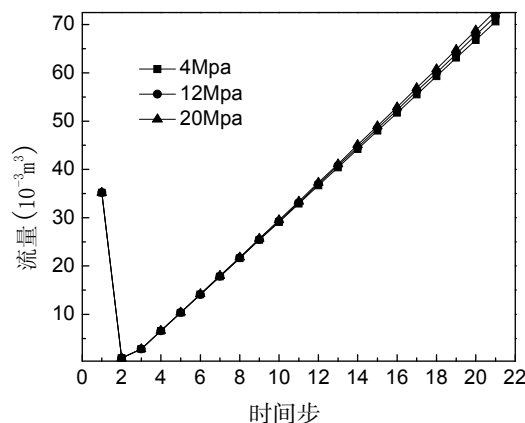


图6 流体流量的时程曲线

3.2 温度对多孔介质的影响

稠油与常规原油最大的不同就是粘度大^[10],所以在稠油开采时首先要解决的问题就是降低稠油的粘度,因此在热力采油过程中,通过专门的注汽井将高温高压蒸汽注入油藏,保持或增大油层的压力,石油藏具有较强的驱动力,以提高油藏的开采效率和开采率。在进行注汽过程中,大量温度较高的蒸汽注入油藏,将在井底产生压力场和温度场,使储油层原来的温度场与井底附近的孔隙压力场发生变化,由于注入的蒸汽温度远高于储油层自身温度,所以就会在井底周围产生一个热应力区,从而加热流体,改善流动性,为开采提供条件。模型中考虑了多孔介质地层在 100℃、320℃、500℃三种温度,图 7 至图 9 是三种温度下地层位移、流速和流量的变化关系。

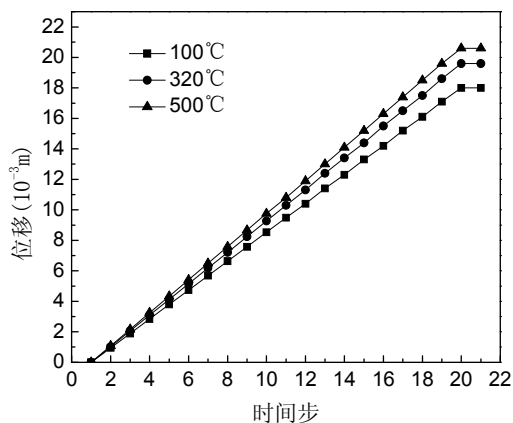


图7 最大位移的时程曲线

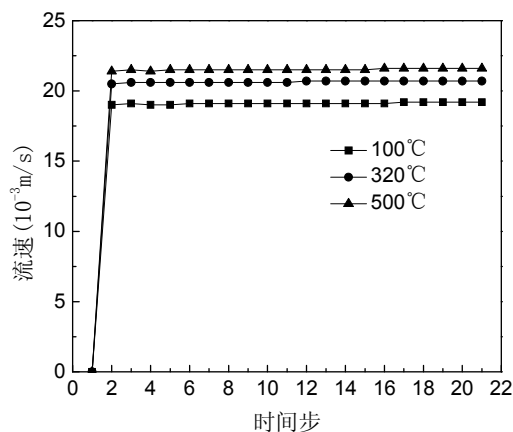


图8 流体速度的时程曲线

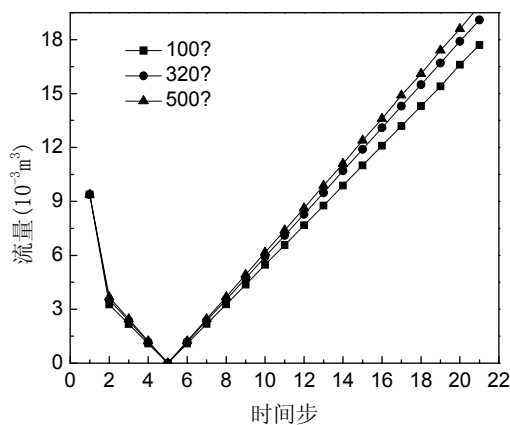


图9 流体流量的时程曲线

4 结果分析

以石油开采中的热力采油为例对多孔介质的热流固耦合进行了数值模拟, 分析了在石油生产中影响多孔介质地层的有关因素, 通过分析在各种影响因素作用下地层的有效应力、剪应力、应变、位移、流体流速和流量的时程变化曲线, 得到了以下结论:

1) 流体流动产生的压差是热力采油的主要动力^[9], 同样流体压力也会对多孔介质地层产生一系列影响。得到的结果是随着流体压力的增大, 地层的位移和流体流速曲线有增大的趋势, 流体压力为 20MPa 时最大, 4MPa 时最小, 当压力为 4MPa、12MPa 时, 曲线比较接近, 甚至有的曲线压力越小, 斜率愈大。在流体流量的时程曲线图中, 压力的变化对流量的影响很小, 甚至可以忽略, 并不会因为压力的改变而改变。

2) 流体温度对流体流速的影响比较大, 对其他各个量的影响不明显。这是由于温度的升高就降低了流体的粘性, 所以在相同流体压力作用下流体容易流动。

参考文献:

- [1] 王自明. 多孔介质流-固-热三场耦合数学模型及数值模拟[J]. 岩土力学及工程学报, 2006, 25 (1): 29-35.
- [2] 刘晓旭. 三场耦合的数学模型研究及有限元解法[D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
- [3] 李波, 李宁, 糕瑞花. 多孔介质的变形场-渗流场-温度场耦合有限元分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2001, 20 (4): 468-471.
- [4] 王自明. 油藏热流固耦合模型研究及应用初探[D]. 成都: 西南石油学院, 2002.
- [5] Gigliotti M, Vautrin A. Assessment of approximate models to evaluate transient and cyclical hygrothermoelastic stress in composite plates[J]. International Journal of Solids and Structures. 2007, 9(1): 733-759.
- [6] 武红岭, 王小凤, 马寅生. 多孔介质构造力驱油的固流耦合分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33 (1): 76-80.
- [7] 李淑霞, 陈明月, 郝永卯. 多孔介质中天然气水合物降压开采影响因素实验研究[J]. 中国石油大学学报, 2007, 31 (4): 56-60.
- [8] 杜平安. 有限元法原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [9] 王元妹. 多孔介质传热传质及热湿应力分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [10] 吕立华, 李明华, 苏岳丽. 稠油开采方法综述[J]. 内蒙古石油化工, 2005, 25 (2): 110-113.

Finite Element Analysis of Porous Media on Thermal Fluid-structural Interaction

YANG Tong, LIU Feng

(College of Civil and Architectural Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan Hebei 063009, China)

Key words: porous media; ADINA; heat oil; coupling

Abstract: The modeling methods of porous media on thermal fluid-structural interaction are discussed using finite element analysis software ADINA. The article uses finite element analysis software ADINA for porous media on thermal fluid-structural interaction to numerical simulation, and analyses the impact of the reservoir due to steam injection and fluid flow in the process of thermal oil. There is a referential meaning for the choosing of the oil exploration site and increasing production.