

热-流-固耦合建模过程

党旭光, 朱庆杰, 刘 峰, 程 雨

(河北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063009)

摘 要: 热-流-固耦合作用是存在高度非线性的复杂耦合作用。有关这三场的耦合作用研究在地石油工程、热资源开发、地下核废料存储安全、采矿工程等很多领域有着非常重要的应用价值。由于研究对象的不同, 热流固耦合模型的形式存在差异, 建立符合实际问题的三场耦合模型十分困难, 文中在国内外学者对三场耦合模型理论研究的进展状况的基础上, 通过一个例子, 介绍了用 adina 建立模型的过程。

关 键 词: 三场耦合; Adina; 热流固; 建模

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Modelling process of thermo-hydro-mechanical coupling

DANG Xu-guang, ZHU Qing-jie, LIU feng, CHENG Yu

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

Abstract: Thermo-hydro-mechanical behaviour is highly nonlinear and complex. It has extremely important application value in concerning these three coupling functions researches in many domains, such as the petroleum engineering, the geothermal resources development, the underground nuclear waste storage security, the mining engineering, and so on. Because of the differences of the research object, the forms of the THM coupling models exist differences; it is difficult to build modes of THM that accord with actual problem. This article is based on the reaches of the scholars' models of THM, and the modelling process with ADINA are described in detail.

Key words: three coupling functions; ADINA; thermo-hydro-mechanical coupling; modelling

1 三场耦合理论模式介绍

在三场耦合尤其是三场耦合机制的研究过程中, 人们根据各自对三场耦合的认识提出了不同的三场耦合作用模式。1995 年前有关三场耦合作用模式的研究在场与场之间的联系关系上主要是以速度等变量为桥梁, 如 HART、Jing 提出的作用模式, 其中 Jing 主要描述的核储存库三场耦合模式, 后来作用模式发展为主体为物理现象, 它们之间的相互联系是以场作用或物理作用为桥梁的, 如 Guvanassen、柴军瑞的作用模式, 前者同样以核废料储库库围岩三场耦合作用研究为主, 后者为一般模式。

Jing 等^[1]描述了核废料贮库围岩裂隙岩体中的热-液-力耦合过程, 如图 1 所示。Hart 等^[2]提出了如图 2 所示的三场耦合作用模式。柴军瑞^[3]从岩体

渗流-应力-温度三者两两之间的相互关系出发, 建立了如图 3 的作用模式。图中: a 渗透水流对岩体固相的力学作用, 一般应用有效应力原理来反映^[4]; a' 为应力引起裂隙岩体空隙率和渗透特性变化, 目前有经验关系式(如 Lours 负指数关系式)和理论关系式(包括各种概化情况下和各种概化模型下的理论关系式)两大类表示方法^[5]; b 为温度引起热应变(力)及与温度有关的岩体固相力学特性变化; b' 为岩体固相力学变形引起热力学特性变化及岩体固相内部热耗散; c 为水流的热对流及与岩体固相的热交换; c' 为温度势梯度引起水份运动及与温度有关的水特性变化。

2 热流固耦合理论的提出

三场耦合理论是由流-固两场耦合理论发展而来的, 在流-固耦合理论中, 有的假设温度场是恒定的, 或

者是不考虑温度场的变化与流体流动、岩石变形间的耦合作用。但是,自然界中实际存在的流-固耦合系统的温度场一般都是变化的,尤其是大量存在着一些温度变化比较剧烈的流固耦合系统,比如地热利用系统、工程中的地下核废料储存处理系统、非等温煤层瓦斯渗流系统等,石油工业中的热力采油系统、高压注水采油系统等。对于这一类问题,若用流固耦合模型来模拟其中的渗流、变形、变温规律就不准确了,而应该考虑热流固耦合模型。

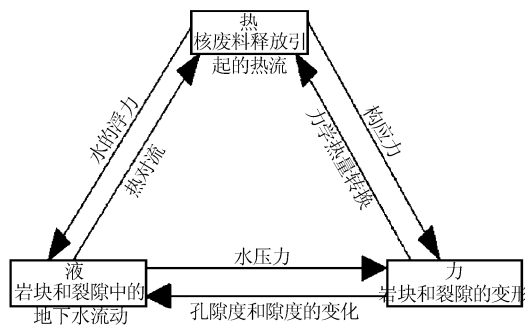


图1 裂隙岩体中的热液力耦合过程(据 Jing 等, 1995 年)
Fig.1 Thermal-hydro coupling process of fractured rocks

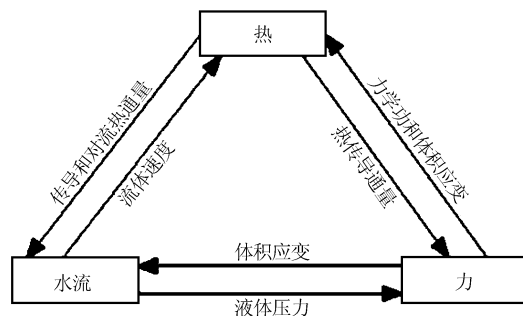


图2 三场耦合模式(Hart)
Fig.2 Three coupling functions model

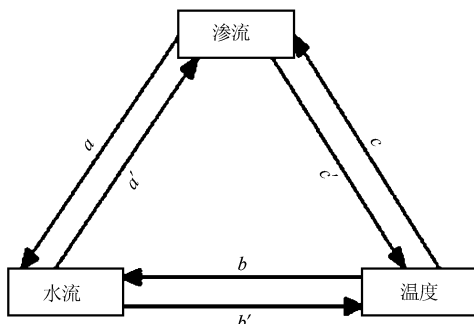


图3 渗流-应力-温度之间的相互关系图
Fig.3 The relationship of Seepage - Stress - Temperature

所谓热-流-固耦合,是指在由流体、固体和变化温度场组成的系统中三者之间的相互影响,相互作用含物理作用和化学作用,热-流-固耦合问题是

渗流、应力、温度三场同时存在时的基本问题。热-流-固耦合问题不仅仅是在流固耦合问题上附加一个体现温度变化的条件,而是将体现流体流动、固体变形、温度场变化的量如流体压力、固相质点位移、绝对温度同时视为基本变量,基本变量处于平等地位。在热-流-固耦合问题中,热效应与流体孔隙压力导致岩石变形岩石变形与流体渗流导致温度场变化岩石变形与热效应导致渗透特性和孔隙流体压力的改变从而影响流体渗流,以上3种效应是同时发生的。

3 建模过程

如图4所示的由刚性壁面和柔性半球形穹顶围成的封闭空间,封闭空间内是空气,穹顶附近的空气受热引起自然对流。空气参数: $\mu = 2.0 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, $\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$, $c_p = 1006 \text{ J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$, $k = 0.025 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$, $g = -9.8 \text{ m}/\text{s}^2$, $\beta = 0.0033 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $E = 6.9 \times 10^{10} \text{ N}/\text{m}^2$, $\nu = 0.33$, $\alpha = 2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $t = 0.0005 \text{ m}$, radius = 0.025 m , $k = 204 \text{ W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$, $Q = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

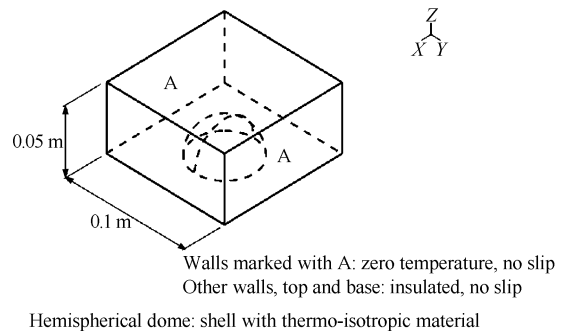


图4 模型物理条件
Fig.4 Physical parameters of the model

3.1 模型的建立

几何模型采用 ADINA -CFD 建模方式如图5所示,取穹顶的1/4进行分析,采用对称边界条件:面1,2,5,6无滑动,7在y方向不流动,3在x方向不流动,1是0温度面,面4上加受热条件

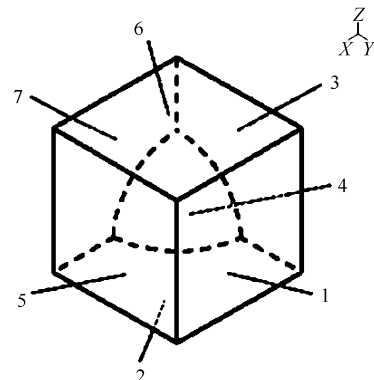
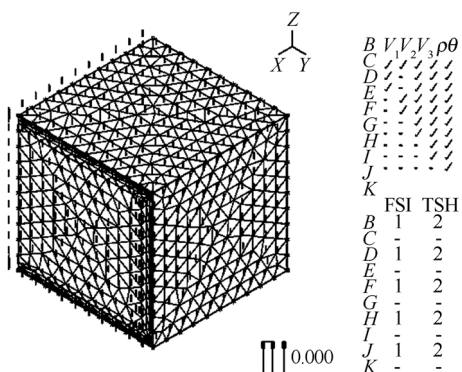


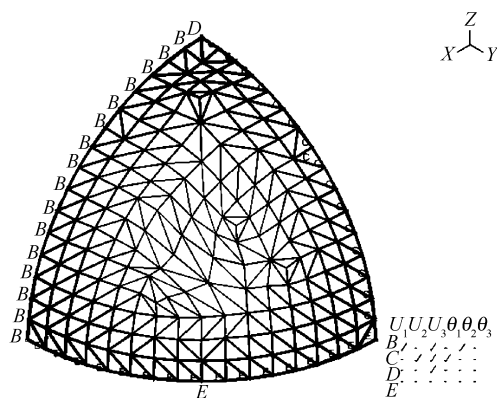
图5 模型基本条件
Fig.5 The basic condition of model

3.2 定义 FSI 和 shell-thermal 边界条件并调整网格 图形变为



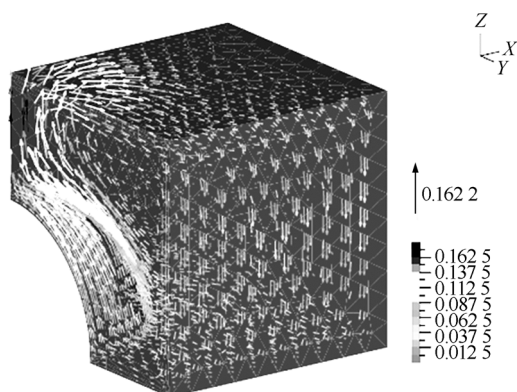
生成 ADINA-CFD 数据文件, 保存 ADINA-IN 数据库。

3.3 建立 ADINA 模型



黑色部分为 FSI 边界线

3.4 运行 ADINA-FSI, 并显示后处理 显示速度, 并旋转模型得到:



从图 8 中可以看出, 穹顶壳附近的流体上升, 零温度边界处的流体下降 (由于自由网格的划分和平台有关, 结果可能稍有不同)。

4 结 语

近些年来, 由于其应用范围不断扩大, 有关热-流-固耦合的研究已经取得了重要进展, 主要应用有: ①核废料地下贮存库的安全评估, ②盐碱介质中盐水和气体的非等温渗流, ③地热开发, 特别是热干岩石中地热的开发, ④深层油藏开发和热采, ⑤土壤中非等温渗流, 如地下贮存库中粘土缓冲区中耦合过程, 冻土带路基中的耦合过程等。

有关热-流-固耦合问题, 近年逐渐成为研究的热点之一, 在工程中有很大的应用价值, 尤其在石油开采领域的作用更为突出。

参 考 文 献

- [1] JING L, TSANG C. F., Stephansson O., DEXCOVALEX-an international co-operative research project mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. *Int. J. Rock. mech. Min. Sic. & Geomech. Abstr.* 1995, 32(5): 389—398.
- [2] HART R D, JOHN C M ST. Formulation of a fully-coupled thermal-mechanical-fluid model for non-linear geologic systems[J]. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sic&Geomech. Abstr.* 1986, 23(3): 213—224.
- [3] 柴军瑞. 岩体渗流-应力-温度三场耦合的连续介质模型[J]. *红水河卷*. 2003. 22(2): 18—20.
- [4] LESIS R W, SCHREFLER B A. The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media[M]. Chichester: Wiley. 1998.
- [5] 刘亚晨, 吴玉山, 刘泉声. 核废料贮存裂隙岩体耦合分析研究综述[J]. *地质灾害与环境保护*. 1990. 10(3): 72—78.