

多孔介质热流固耦合问题及研究进展

刘 峰, 朱庆杰, 程 雨, 党旭光

(河北理工大学 建筑工程学院, 唐山 063009)

摘 要: 渗流场、温度场、变形场之间存在复杂的耦合作用, 即热-流-固耦合作用。热-流-固耦合问题涉及许多领域, 它的研究越来越受到人们的重视。介绍了多孔介质热-流-固耦合研究的基本方法和原理, 对多孔介质热-流-固耦合的研究进展加以综述和讨论, 并提出了进一步研究的方向。

关 键 词: 热-流-固耦合; 多孔介质; 理论模型; 数值解

中图分类号: TU 973+.256

文献标识码: A

Problems of fluid-solid-heat coupling for porous media and its research progress

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

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

Abstract: Seepage field, temperature field, deformation field are coupled, namely fluid-solid-heat coupling, which is highly complex. Fluid-solid-heat coupling issue involves many areas, its research is receiving increasing attention. The importance of research for the porous medium fluid-solid-heat coupling is expounded; and the research progress of porous media fluid-solid-heat coupling, is discussed and summarized; finally, the direction of further study is forward.

Key words: fluid-solid-heat coupling; porous medium; theoretical model; numerical solution

1 引 言

目前, 多孔介质中变形场、渗流场、温度场以及这三场耦合作用对工程的影响问题是能源开发与运输、核废料的处理及寒区的岩土工程等迫切需要研究的重要课题。对这个问题的研究经历了由非耦合研究到耦合研究的历程, 非耦合研究没有考虑流体渗流与岩石变形之间的相互作用, 流固耦合研究考虑了流体渗流与岩石变形间的双向相互作用^[1], 所建立的流固耦合模型较之非耦合模型更深入准确地揭示了流体渗流岩石变形的规律。但在流固耦合理论中, 没有考虑温度场变化与岩石变形、流体流动间的耦合作用, 然而, 自然界中实际存在的流固耦合系统的温度场通常是变化的, 如工程中的地热利用系统、石油工业中的热力采油系统等。对于这类问题, 若仍用流固耦合模型来模拟其中的渗流、变形规律显然就不准确了, 因为在这类问题中: 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, 即热流固耦合^[2]。

近年来, 热流固耦合问题越来越受到人们的重视, 这方面的研究涉及许多领域。如地热利用、地面沉降、水库诱发地震、煤层瓦斯渗流与突出、非等温煤层瓦斯渗流和地下核废料储存中的热流固耦合问题^[3]。本文主要介绍了多孔介质热流固耦合的研究方法和理论进展。

2 基本方法和原理

2.1 热流固耦合问题的研究原理

天然的岩体状态的复杂性导致了热流固耦合问题赋存环境的复杂性, 因此, 对由岩体和流体组成的复杂几何区域的研究也应抽象和简化, 并根据具体情况分别对待。在自然界中真正连续的物质是不

存在的。在多孔介质中, 由于孔隙结构的复杂性, 其大小、几何形状、延伸方向与排列顺序等在微观上没有一定规律, 孔隙的内表面也极不规则, 况且, 由于热流固耦合作用的影响, 介质要变形, 故流体流动的孔隙通道也在不断地变化, 这样确定边界条件本身是很困难的^[4]。即使能够在微观水平上描述和求解一定初始条件下多孔介质中流体的流动问题, 这样的解也没有实际价值。因此, 必须排除从微观上去研究和解决多孔介质的热流固耦合问题。为了克服这一问题, 对多孔介质热流固耦合问题的研究应和经典的岩石力学和渗流力学的研究方法一样, 必须从宏观的水平对其进行分析, 这种方法称之为宏观连续介质方法。

在这种方法中, 假设所研究的对象在几何空间上是连续介质, 可以用每一点处的运动变量来反映它的特性, 并且这些变量在每个时刻都可以确定, 它们都是空间坐标和时间的函数。将这一方法推广, 就可以用来研究热-流体-固体组成的多相系统。在连续介质方法中, 将固体相和流体相视为相互重叠在一起的连续体, 用一个理想的连续系统代替原来的多孔介质系统。在这个连续介质系统中, 任何性质都可以用连续变量来表示。

引入孔隙率和表征体积单元 (REV) 后, 实际的多孔介质就被假想的连续介质代替, 在这种假想的连续介质中, 可以对任何一数学点规定任意一种性质。对于热流固耦合问题, 一般采用宏观连续介质法建立其控制方程, 即系统中的每一相流体都充满整个孔隙介质区域, 区域内的每一相流体和每一点都包含固相介质, 相关的控制变量 α 在研究的某一点 P 周围的表征体积单元内就是一个平均变量 $\bar{\alpha}$ ^[5]。其中表征体积单元的特征长度 l 应满足下式:

$$d \ll l \ll L \quad (1)$$

式中: d 为空间变量出现明显变化时的微观特征长度; L 为宏观平均变量发生明显变化时的多孔介质区域内的宏观特征长度。

基于以上思想, 就可以综合利用岩石力学、渗流力学和热力学的分析方法, 并考虑热流固耦合作用来研究热流固耦合问题, 建立耦合方程。

2.2 热流固耦合问题的两种研究方法

2.2.1 非完全耦合

该理论认为, 多孔介质固相骨架的改变会导致骨架的热应变, 这种应变在温度改变量较大时比较显著。热应变与其他因素引起的应变迭加起来组成了骨架的总应变, 总应变是影响固相变形和流体渗流的重要因素, 当温度变化引起的应变速率比较小

时, 可以将温度场的影响看成一种与其他力学荷载等效的荷载即“热荷载”加载到多孔介质的固相骨架上。由于“热荷载”只是温度的函数, 并没有考虑固体变形、流体流动的影响, 即在这种理论的模型中只有渗流方程和变形方程的耦合, 而热应变方程并没有与前两者耦合, 所以称为非完全耦合^[6]。

该理论的模型包括流体耦合渗流方程、热应变方程、固体耦合变形方程, 并假设固体骨架具有弹性变形特性。耦合渗流方程是考虑固体变形影响时的流体渗流方程, 它不但考虑流体在流动, 而且也考虑了固体骨架的运动, 两者相互制约。流体速度与固相质点速度的关系为

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_s + \mathbf{v}_l \quad (2)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为流体的绝对速度; $\mathbf{v}_s$ 为固体质点的绝对速度; $\mathbf{v}_l$ 为流体的相对速度。

结合达西定律、能量守恒定律以及流体的源汇项, 得到耦合渗流方程为

$$\nabla \left[\frac{KK_r \rho}{\mu} \nabla (p - \gamma D) \right] - \nabla (\phi S \rho \mathbf{v}) + q = \frac{\partial (\phi \rho S)}{\partial t} \quad (3)$$

式中: ∇ 为 Hamilton 算子; K 为绝对渗透率; K_r 为相对渗透率; ρ 为密度; μ 为黏度; p 为流体压力; γ 为流体的重率; D 为流体深度; ϕ 为孔隙度; S 为流体饱和度。

当温度变化引起的应变速率较小时, 可以把温度变化引起的应力看作“热荷载”加载到固相骨架上。热应变方程的表示为

$$\{R\}^e + \iiint [B]^T [D] [\varepsilon_0] dx dy dz = [K]^e \{\delta\}^e \quad (4)$$

式中: $\{R\}^e$ 为外力的等效节点力; $[B]^T$ 单元应变矩阵; $[D]$ 为单元本构矩阵; $[\varepsilon_0]$ 为单元热应变; $[K]^e$ 为单元刚度矩阵; $\{\delta\}^e$ 为节点虚位移。其中热荷载的表达式为

$$\{H\}^e = \iiint [B]^T [D] [\varepsilon_0] dx dy dz \quad (5)$$

式中: $\{H\}^e$ 为热荷载矩阵。

Terzaghi 有效应力原理认为, 孔隙流体压力 p 使岩石骨架产生均匀的体积应变, 而固相骨架的主要应变由有效应力控制, 该原理可以表示如下:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + p \delta_{ij} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为全应力张量; $\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力张量; δ_{ij} 为 Kronecker 函数。

流体耦合渗流方程中含有体现固相骨架变形的项, 这些相必须联立固体耦合变形方程才能求解; 而固体耦合变形方程中含有体现流体孔隙压力和温

度场变化的项, 这些项必须联立流体耦合渗流方程和热应变方程才能求解。

2.2.2 完全耦合

该理论认为, 温度场的变化会影响固相变形和流体渗流, 还认为固相变形和流体渗流反过来也会影响温度场的变化。与流体渗流和固相变形之间的双向相互作用类似, 温度场的变化和固相变形之间也存在着相互作用, 即热-固耦合效应, 也就是说, 温度场变化引起的热应力、热应变导致了固体的变形; 另一方面, 固体的变形又引起了温度场的改变。在该理论中, 渗流、变形、变温三者同为基本变量, 流体渗流方程、固体变形方程和温度场方程完全耦合^[6]。

该理论的模型包括耦合温度场方程、流体耦合渗流方程、固体耦合变形方程和热应变方程, 并假设固体骨架具有弹性变形特性。在该理论中, 固体的变形是一种能量的转换, 热的平衡和功的平衡需要综合考虑, 所以耦合的温度场方程应将岩石的变形考虑进去, 这样温度场方程里就有了体现固体变形的项, 耦合温度场方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{k}{\rho c_v} \nabla^2 T + \frac{\beta T}{\rho c_v} \varepsilon_{kk} = 0 \quad (7)$$

式中: T 为温度改变量; t 为时间; k 为导热系数; β 为热应力系数; ε_{kk} 为体积应变。

固体耦合变形方程为

$$(\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial x} + G \nabla^2 \mu + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} - \beta \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$(\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial x} + G \nabla^2 v + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} - \beta \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$(\lambda + G) \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial x} + G \nabla^2 \omega + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} - \beta \frac{\partial T}{\partial z} + [(1 - \phi) \rho_s + \phi s_0 \rho_0 + \phi s_w \rho_w] g = 0 \quad (10)$$

式中: λ 、 G 均为拉梅系数; ρ_s 为固体骨架密度; g 为重力加速度。

由于温度场方程和流体渗流方程都受到固体变形的影响, 所以都含有固体变形的耦合项, 同样固体耦合变形方程中也含有体现流体渗流影响的耦合项和体现温度场变化影响的耦合项, 只有联立这三个方程才能求解。

3 存在的问题

非完全耦合理论中固体为弹塑性, 求解相对比较容易, 但温度场没有完全意义上的耦合, 而完全

耦合理论中实现了热-流-固完全意义上的耦合, 但固体为弹性求解比较困难。因此, 可以看出, 任何一种理论都不可以, 也不可能把所有的因素都考虑进去, 非完全耦合是简化的热流固耦合, 该理论模型的求解相对容易, 便于解决实际问题。完全耦合理论更接近于实际, 但其模型很难建立, 并且求解很困难。

4 发展展望

热流固三场耦合问题近年来越来越受到人们的重视, 并逐渐成为人们研究的热点, 其研究不仅有重大的理论意义, 而且具有广泛的实际应用价值。但三场耦合问题涉及到的内容多、范围广、耦合机制复杂, 要想比较全面地解析热流固三场耦合理论和正确求解其数值模型, 还需要做很多工作。其主要发展趋势有:

(1) 加强热流固耦合理论中流体-温度场两场耦合理论的研究。

(2) 加强岩石在具有弹塑性、黏弹性、蠕变等非线性变形特性的完全耦合模型的研究。

(3) 由于受模型中参数多样性、复杂性和非线性特征的影响, 应加强对可靠、稳定的数值算法的研究。

参考文献

- [1] 刘善利. 饱和岩体热流固耦合模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] GUVANASEN V, CHAN TIN. A three-dimensional merical model for thermo-hydromechanical deformation with hysteresis in a fractured rock mass[J]. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 2000, 37(1/2): 89—106.
- [3] 梁冰, 刘建军, 范厚彬, 等. 非等温条件下煤层中瓦斯流动的数学模型及数值解法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(1): 1—5.
- [4] CHARLIER R, FOURMAINTRAUX D, SAMIER P, et al. Numerical simulation of the coupled behavior of faults during the deletion of a high-pressure/high-temperature reservoir[C]// *Rock Mechanics Conference*. Irving Texas: [s. n.] 2002: 102—126.
- [5] 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.
- [6] 王自明, 杜志敏. 变温条件下弹塑性油藏中多相渗流的流固耦合数学模型与数值模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(6): 68—72.