

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.003

基于 LTNE 的饱和多孔介质 THMC 耦合模型数值研究

戴倩, 李培超*

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为探究多孔材料中流体流动和温度变化,课题组对溶质和溶剂在孔隙内发生的多物理场耦合问题进行研究。首先,基于局部热非平衡理论(LTNE),分析发生的 THMC 耦合反应,推导出其控制方程组;其次,将其物理模型简化为内含圆孔无限大平面,通过 COMSOL Multiphysics 软件,选用一维轴对称坐标系模拟仿真,研究多孔介质应力、孔隙流体压力、溶质摩尔分数和流固体温度分布规律;最后,分析各物理场参数影响。结果表明:随时间增加,各因变量峰值和谷值逐渐沿径向伸展,各物理场之间相互影响愈加深远;反应过程中需衡量参数取值。该研究既可为相关实验和解析方法提供参考,也可直接应用于实际工程中,有助于深入了解饱和和多孔介质热流固化完全耦合行为。

关键词:饱和多孔介质;局部热非平衡理论;一维对称轴;THMC 耦合模型

中图分类号:TK121 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)04-0011-07

Numerical Investigation on Coupled THMC Behavior of Saturated Porous Media under LTNE Condition

DAI Qian, LI Peichao*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to explore the fluid flow and temperature change in porous materials, the multi-physical field coupling between solute and solvent in pores was studied. Firstly, the governing equations of the coupled model based on local thermal non-equilibrium theory were derived by analyzing the THMC (thermal-hydraulic-mechanical-chemical) coupling reaction. Posteriorly, the physical model was simplified as an infinite plane with a circular hole and the simulation of the one-dimensional axisymmetric coordinate system was realized by COMSOL Multiphysics software, then the distribution rules of stress of porous elastomer, pore fluid pressure, solute concentration and solid and fluid temperature were studied. Finally, the influence of parameters upon the previous mathematical model was analyzed. The results show that with the increase of time, the peak and valley of each dependent variable gradually extend along the radial direction, and the influence of physical fields is more profound mutually; parameter values are measured during the reaction. The research can not only provide reference for relevant experimental and analytical method, but also can be directly applied to practical engineering, which is of benefit to provide deep insights into the fully coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical behavior of saturated porous media.

Keywords: fluid-saturated porous media; LTNE (Local Thermal Non-Equilibrium); one-dimensional axisymmetric; THMC (Thermal Hydrological Mechanical Chemical) coupling model

收稿日期:2022-01-10;修回日期:2022-04-10

基金项目:上海市自然科学基金(19ZR1421400)。

第一作者简介:戴倩(1994),女,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为多孔介质多物理场耦合。通信作者:李培超(1976),男,上海人,博士,副教授,主要研究方向为多孔介质多物理场耦合、渗流力学和多孔介质传热传质基础理论和数值模拟。E-mail:wiselee18@163.com

无论是生产还是生活中,多孔介质材料都十分常见,例如海绵、隔音泡沫及锂离子电池隔膜等。多孔介质是由固体骨架和孔隙空间组合构成的物质,孔隙一般由单相或多相流体共同填充。其研究和发展拥有较为悠久的历史^[1]。为简单起见,前人采用了一些通俗而经典的物理模型进行研究,如圆环^[2]、圆管^[3-4]、平板^[5]和无限大平面^[6]等,以软件辅助模拟,用公式推导分析,大大促进了多孔介质理论的进步。

对于多孔介质的研究,大多集中于多物理场(诸如应力应变场、流场、温度场、电化场等)耦合问题中。常见的有流固耦合^[7-8]、热流耦合^[9]和热流固耦合^[10-13]等数学模型。但更完善的为热流固耦合模型,常应用于生物医疗、海水入侵、水利工程和农田喷洒等领域。

诸多科研工作者对多孔介质热流固耦合数学模型进行了深入探讨和研究。孔祥言^[14]⁴⁰⁴建立了天然气水合物的部分耦合控制方程组,并考虑了渗透率和毛管力随饱和度的变化。Sun 等^[15]描述了热流固耦合力学行为,将模拟结果与测试数据进行了对比和分析,验证新开发代码的实用性。盛金昌等^[16]²⁴⁰着重考虑钻井过程中热流固耦合过程和井壁孔隙压力、温度、应力和离子溶质摩尔分数等变化,提供了更加精确的井壁应力分布。

研究多孔介质多物理场耦合问题的传统假设大都是基于局部热平衡理论即 LTE^[17-18],但当内部换热不均匀,固体骨架和孔隙流体的温度差值不可忽略时,局部热平衡理论不再适用,需运用更加合理的局部热非平衡理论即 LTNE^[19-20]来描述此类情形。例如,陈丽等^[21]⁷⁵⁰基于 LTNE 理论和加权平均温度的概念,把握化学-热-孔隙弹性模型的特点,应用 Laplace 变换法对多场耦合表达式进行无量纲化,并与 LTE 条件的相关结果进行图像对比,发现 LTNE 效应在 Biot 数为中等范围内不可忽略。

前文所述的多物理场耦合方式,多为部分耦合或弱耦合。鉴于此,课题组假设多孔介质中的孔隙流体为溶质(NaCl)和溶剂(H₂O)2种化学组分,构建更加完备的 THMC 强耦合数学模型。

1 数学模型

课题组将空间问题简化为平面问题,如图 1 所示。

采用内含一半径 $a=0.1\text{ m}$ 的圆孔无限大平面饱和多孔介质模型进行研究。其中,格子区域为饱和多孔介质无限大平面,表示以 r 的圆心为原点的径向坐标。简单起见,基本假设如下:①多孔介质为均匀且各项同性的介质,固体骨架变形符合小变形假设;②流体为单一的、稳定的和不可压缩的流体,流体流动遵从 Darcy 定律;③忽略自然对流、扩散和辐射换热的影响;④拉应力为正。

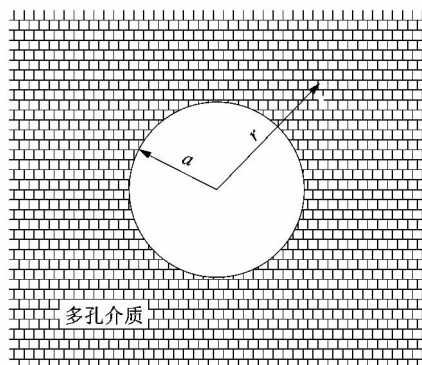


图 1 内含圆孔的多孔介质无限大平面示意图

Figure 1 Schematic diagram of porous medium infinite plane containing circular hole

1.1 控制方程

基于孔祥言^[14]《高等渗流力学》第 3 版(第 1,7,12 章),李培超等^[7]⁴²²饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型,陈丽等^[21]⁷⁵²化学-热-弹性模型和本课题组里岳飞龙饱和多孔介质单相热流固完全耦合模型,建立基于 LTNE 理论的 THMC 完全耦合的控制方程组。

为降低模型的复杂程度,加快软件的求解速率,将控制方程组简化为一维轴对称的情形进行求解,即将笛卡尔坐标转换为极坐标形式(自变量 x, y 和 z 转换成自变量 r)。

因此,关于一维轴对称坐标下的热流固完全耦合控制方程为:

$$(\lambda + 2G) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - \alpha \frac{\partial p}{\partial r} - \beta K \frac{\partial T_s}{\partial r} + \gamma \frac{\partial m}{\partial r} = 0; \quad (1)$$

$$a_m^{(s)} \left(\frac{\partial^2 m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m}{\partial r} \right) - C^{(s)} \frac{\partial m}{\partial t} + a_p^{(s)} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) -$$

$$b \frac{\partial p}{\partial t} + a_{T_s}^{(s)} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \beta_{T_s}^{(s)} \frac{\partial T_s}{\partial t} + a_{T_f}^{(s)} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) +$$

$$\beta_{T_f}^{(s)} \frac{\partial T_f}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & a_p^{(f)} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) - b \frac{\partial p}{\partial t} + a_m^{(f)} \left(\frac{\partial^2 m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m}{\partial r} \right) - \\ & C^{(f)} \frac{\partial m}{\partial t} + a_{T_f}^{(f)} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \beta_{T_f}^{(f)} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \\ & a_{T_s}^{(f)} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \beta_{T_s}^{(f)} \frac{\partial T_s}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & - (1 - \varphi) k_{T_s} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + d_{T_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + T_s^0 \beta K \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \\ & T_s^0 \beta_{T_s}^{(f)} \frac{\partial p}{\partial t} + T_s^0 \beta_{T_s}^{(s)} \frac{\partial m}{\partial t} + h (T_s - T_f) = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & - \varphi k_{T_f} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + d_{T_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + T_f^0 \beta_{T_f}^{(f)} \frac{\partial p}{\partial t} + \\ & T_f^0 \beta_{T_f}^{(s)} \frac{\partial m}{\partial t} + h (T_f - T_s) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ε 为多孔弹性体的应变, p 为孔隙流体压力, m 为溶质摩尔分数变化量, λ 为 Lamé 常数, G 为 Lamé 常数, K 为体积弹性模量, γ 为化力耦合参数, β 为体热膨胀系数, α 为 Biot 系数, T_s 为固体骨架温度, T_f 为孔隙流体温度, h 为流固界面换热系数, k_{T_s} 为固体导热率, k_{T_f} 为流体导热率。每一个物理场控制方程都含有一个主要因变量。

1.2 初始条件和边界条件

数学模型需要一定的定解条件方可求解, 即需建立初始条件和边界条件。

设定各物理场在 $a \leq r < \infty$ 区域范围内的初始条件为:

$$\left. \begin{aligned} & u(r, t) |_{t=0} = 0, \sigma_r(r, t) |_{t=0} = 0, m(r, t) |_{t=0} = 0; \\ & p(r, t) |_{t=0} = 0, T_s(r, t) |_{t=0} = 0, T_f(r, t) |_{t=0} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

各物理场的边界条件如下:

$$\left. \begin{aligned} & \sigma_r(r, t) |_{r=a} = 0, \sigma_r(r, t) |_{r \rightarrow \infty} = 0, t > 0; \\ & m(r, t) |_{r=a} = m_a H(t), m(r, t) |_{r \rightarrow \infty} = 0, t > 0; \\ & p(r, t) |_{r=a} = 0, p(r, t) |_{r \rightarrow \infty} = 0, t > 0; \\ & T_s(r, t) |_{r=a} = T_a H(t), T_s(r, t) |_{r \rightarrow \infty} = 0, t > 0; \\ & T_f(r, t) |_{r=a} = T_a H(t), T_f(r, t) |_{r \rightarrow \infty} = 0, t > 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

此处假设, m_a 和 T_a 分别为圆孔边界 $r = a$ 处溶质摩尔分数的变化增量和固体与流体的加载温度, $m_a = 1.8 \times 10^{-2}$, $T_a = 50^\circ \text{C}$, $H(t)$ 为 Heaviside 函数。

其中, 根据文献[22]第 12 页的内容, 整理推导出相关的耦合系数和参数方程如下:

$$\left. \begin{aligned} & V = \bar{m}^{(s)} V^{(s)} + \bar{m}^{(f)} V^{(f)}, \bar{m}^{(s)} + \bar{m}^{(f)} = 1; \\ & b = \frac{1}{M} = \frac{\alpha}{BK} \left(1 - \frac{4\eta B}{3} \right) - \frac{\alpha^2}{\lambda + 2G}, \eta = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \alpha; \\ & C^{(s)} = \frac{V}{\bar{m}^{(s)} V^{(s)}} \beta_c, C^{(f)} = - \frac{V}{\bar{m}^{(f)} V^{(f)}} \beta_c; \\ & a_p^{(s)} = \frac{(1 - \chi) V k}{V^{(s)} \mu}, a_p^{(f)} = \frac{V k}{V^{(f)} \mu}; \\ & a_m^{(s)} = \frac{(1 - \chi) V}{\bar{m}^{(s)} V^{(s)}} D^{(s)}, a_m^{(f)} = - \frac{V}{\bar{m}^{(f)} (V^{(f)})^2} \left[\chi R \bar{T} \left(\frac{k}{\mu} \right) + (1 - \chi) V^{(s)} D^{(s)} \right]; \\ & a_{T_s}^{(f)} = (1 - \varphi) \frac{V}{\bar{m}^{(f)} V^{(f)}} D_T^{(f)}, a_{T_f}^{(f)} = \varphi \frac{V}{\bar{m}^{(f)} V^{(f)}} D_T^{(f)}; \\ & a_{T_s}^{(s)} = (1 - \varphi) \frac{(1 - \chi) V}{\bar{m}^{(s)} V^{(s)}} D_T^{(s)}, a_{T_f}^{(s)} = \varphi \frac{(1 - \chi) V}{\bar{m}^{(s)} V^{(s)}} D_T^{(s)}; \\ & \beta_{T_s}^{(f)} = (1 - \varphi) (\alpha \beta + \varphi (\alpha^{(f)} - \beta)), \beta_{T_f}^{(f)} = \varphi (\alpha \beta + \varphi (\alpha^{(f)} - \beta)); \\ & \beta_{T_s}^{(s)} = (1 - \varphi) (\alpha \beta + \varphi (\alpha^{(s)} - \beta)), \beta_{T_f}^{(s)} = \varphi (\alpha \beta + \varphi (\alpha^{(s)} - \beta)); \\ & d_{T_s} = (1 - \varphi) \rho_s c_s, d_{T_f} = \varphi \rho_f c_f. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: φ 为多孔介质孔隙度, $\varphi = 0.14$; $V^{(s)}$ 为溶质偏摩尔体积; $V^{(f)}$ 为溶剂偏摩尔体积; $\bar{m}^{(s)}$ 为溶质摩尔质量

分数; $\bar{m}^{(f)}$ 为溶剂摩尔质量分数; M 为 Biot 模量; B 为 Skempton 系数; ν 为泊松比; χ 为反射系数; k 为渗透

率; μ 为动力黏度; $\bar{T}$ 为绝对温度; $D^{(s)}$ 为溶质扩散系数; R 为理想气体常数; $D_T^{(s)}$ 为溶质热耦合系数; $D_T^{(f)}$ 为溶剂热耦合系数; $\alpha^{(s)}$ 为固体体热膨胀系数; $\alpha^{(f)}$ 为流体体热膨胀系数; c_s 为固体比热容; c_f 为流体比热容; ρ_s 为固体密度; ρ_f 为流体密度。

2 数值方法

2.1 COMSOL Multiphysics 求解

COMSOL 内部已具有较为完善的模块,但功能最

强大的、运用最灵活的仍是其 PDE (偏微分方程) 模块^{[16]242}。PDE 模块可求解用户自定义所研究问题的复杂控制方程组,根据系统提供的假设方程输入,进行数值模拟。

2.2 参数取值

表 1 为模型中各物性参数取值,部分参数取自参考文献[16]~[17]和参考文献[21]~[22]。

表 1 固体和流体的物性参数

Table 1 Physical properties of solids and fluids

G/MPa	α	K/MPa	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	B	$\alpha^{(s)} \times 10^{-5}/\text{K}^{-1}$	$\alpha^{(f)} \times 10^{-4}/\text{K}^{-1}$	$\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_f/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	λ/MPa
759.4	0.966	1 102.9	0.001	0.92	1.8	3.0	2 710	1 113	596.7
$k_{Ts}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$k_{Tf}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c_s/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c_f/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\beta \times 10^{-5}/\text{K}^{-1}$	$k \times 10^{-19}/\text{m}^2$	M/MPa	ν	$R/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	$h/(\text{W} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1})$
1.30	0.58	768	4 180	1.8	1.0	10 905	0.22	8.314	68
γ/MPa	$\bar{T}/\text{K}$	χ	$m^{(s)}$	$m^{(f)}$	$D^{(s)} \times 10^{-9}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$V^{(s)} \times 10^{-5}/(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$	$V^{(f)} \times 10^{-5}/(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$	$D_T^{(s)} \times 10^{-12}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1})$	$D_T^{(f)} \times 10^{-11}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1})$
100	300	0.9	0.051 5	0.948 5	2.0	3.36	1.80	6.0	6.0

3 结果与讨论

3.1 验证

课题组将热流固化 4 场耦合退化为热流固化 3 场耦合,通过与陈丽等^{[21]758}的数据对比,验证本研究数学模型的可行性和数值结果的可靠性,如图 2 所示。图中数据一致性一定程度上说明本方案的可实施性。

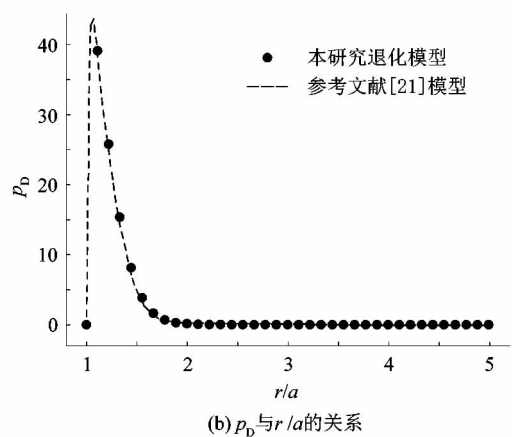
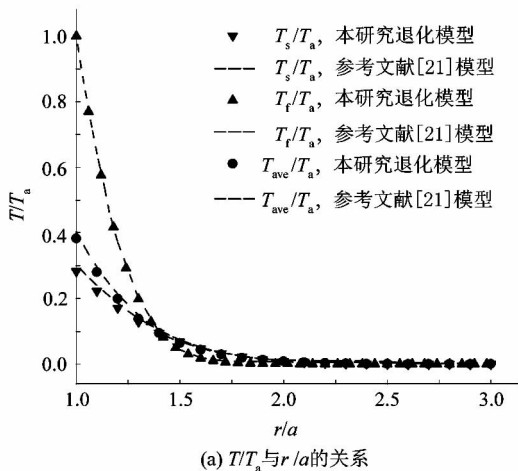


图 2 本研究退化模型与参考文献模型对比
Figure 2 Comparison of proposed degradation model and reference model

3.2 结果分析

课题组借助 COMSOL 软件平台得到多物理场耦合数值模拟结果。为更好呈现结果,课题组将因变量和自变量进行无量纲化处理。

$$c = \frac{1}{S} \left[\beta^{(sf)} - \frac{K\alpha\beta}{\lambda + 2G} \right], \beta^{(sf)} = \bar{m}^{(s)} (\beta_{T_s}^{(s)} + \beta_{T_f}^{(s)}) + \bar{m}^{(f)} (\beta_{T_s}^{(f)} + \beta_{T_f}^{(f)}), \varepsilon_D = \frac{\varepsilon}{cT_a}, m_D = \frac{m}{cT_a}, p_D = \frac{p}{cT_a}, \theta_s = \frac{T_s}{T_a}, \theta_f = \frac{T_f}{T_a} \quad (9)$$

式中: m_D 为量纲为一的摩尔分数变化量, p_D 为量纲为一的孔隙压力, ε_D 为量纲为一的应变, θ_s 为量纲为一的固体温度。

图 3 为化学场随时空变化分布图。溶质摩尔分数变化量分布不明显, 课题组截取部分数据放大研究(下文有关溶质摩尔质量分数变化量分布均采取局部放大图进行研究)。由图(b)可明显看出, 温度升高会引起溶质微妙变化, 故刚开始的边界处, 溶质摩尔分数变化量有所波动, 但波及范围较小, 后随时间递增和溶质扩散, 波及范围逐渐扩张。

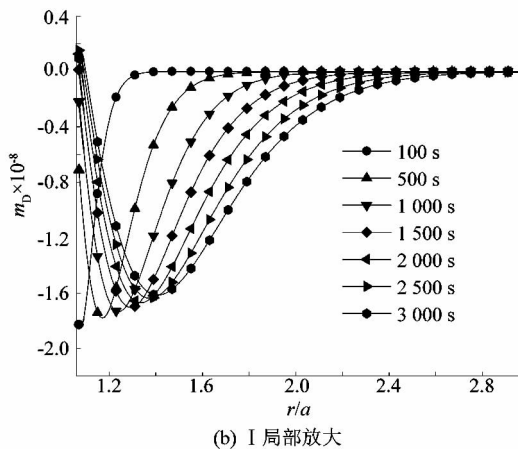
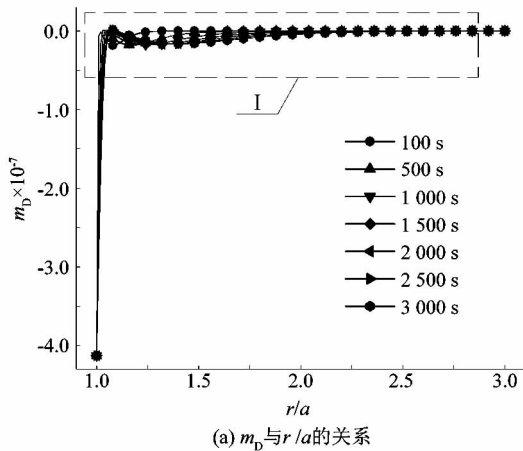


图 3 化学场随时空变化分布图

Figure 3 Diagram of chemical fields varying over time and space

3.3 参数分析

由于本研究控制方程中参数较多, 故选取有代表性的参数进行研究, 分析其对结果影响深浅。课题组选取 2 000 s 时, 研究渗透率 k , 固体导热率 k_{T_s} 和 Biot 系数 α 对多物理场耦合作用。

3.3.1 渗透率的影响

渗透率表征流体在多孔介质中渗透能力的大小。图 4 展示了不同渗透率对结果的影响, 从图中可以看出, 孔隙压力随着渗透率的增大先减小后增大。这是由于渗透能力越强, 流体流动性越好, 孔隙压力能够得到更快地释放, 故会出现渗透率越大孔隙压力越小的现象, 但到达一定位置后, 孔隙压力会回归之前状态。

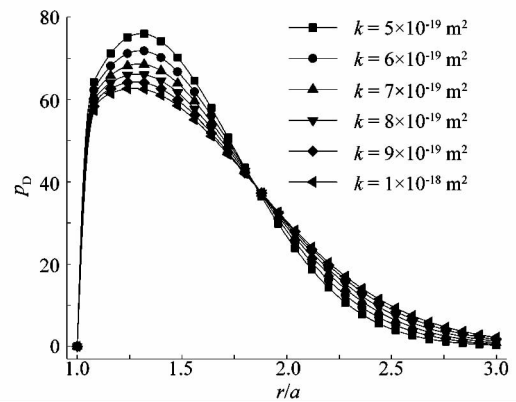
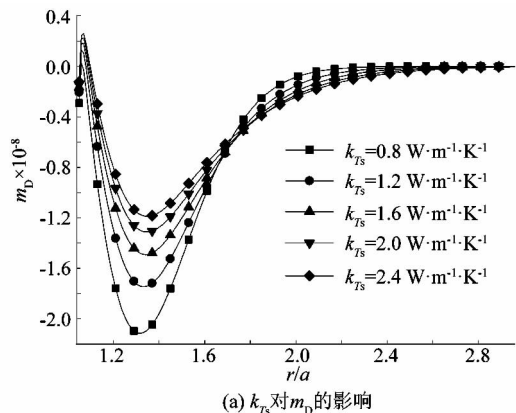


图 4 $t = 2\,000\text{ s}$ 时渗透率对孔隙压力影响

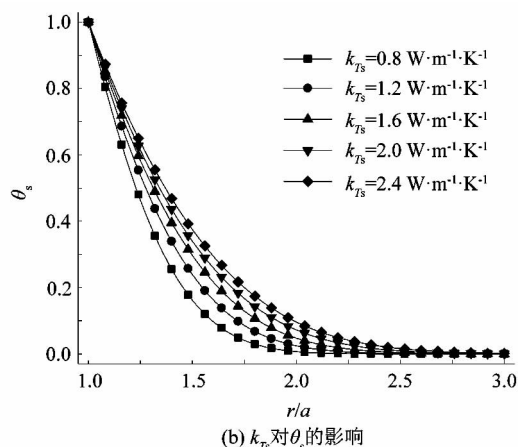
Figure 4 Influence of permeability on pore pressure at $t = 2\,000\text{ s}$

3.3.2 固体导热率的影响

导热率是材料最重要的热物性参数之一, 描述其导热性能。其对化学场和温度场的影响, 如图 5 所示。由图可知, 随固体导热率增加, 固体温度增加, 温度变化会使得溶质摩尔分数发生细微的变化。



(a) k_{T_s} 对 m_D 的影响

图5 $t = 2\,000\text{ s}$ 时固体导热率对 m_D 和 θ_s 的影响Figure 5 Influence of heat transfer rate to m_D and θ_s at $t = 2\,000\text{ s}$

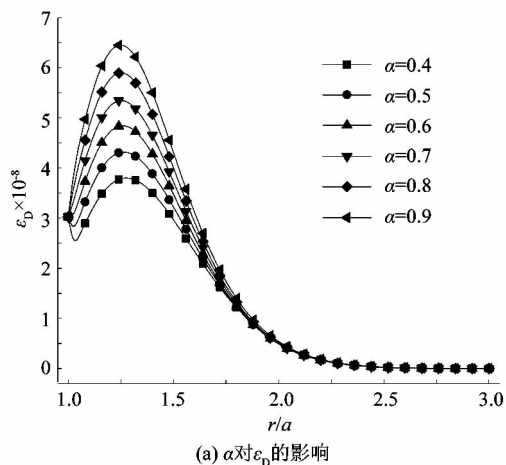
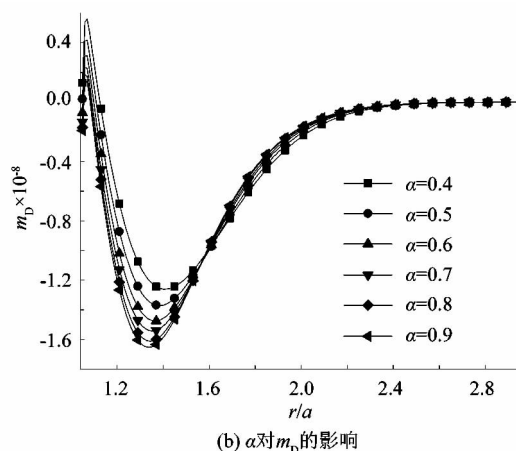
3.3.3 Biot 系数的影响

Biot 系数又称有效应力系数,描述因孔隙流体支撑载荷而引发骨架刚度变化程度。从图 6 可看出 Biot 系数对前几个物理场作用较明显,这是由于骨架刚度变化会引起应力场发生变化,从而引发其他物理场的变化,但应变对温度场贡献较小,Biot 系数对温度场影响微乎其微,故此未展示温度场的分布。

4 结论

课题组基于 LTNE 理论在多孔介质内发生 THMC 耦合行为的影响,得出结论如下:

1) 在设定的初边值条件下,随着时间的增加,各物理场相互作用和影响,变化范围逐渐扩大;尤其是化学场,其摩尔分数的影响由深到浅,但最终都将趋于稳定。

(a) α 对 ε_D 的影响图6 $t = 2\,000\text{ s}$ 时 Biot 系数的影响Figure 6 Influence of Biot coefficient at $t = 2\,000\text{ s}$

2) 各参数对 THMC 耦合模型影响深远,需选取适当参数进行研究(如对于参数取值,考虑是否会产生较高的热应力,防止结构破坏);与其他参数比较,导热率对温度的影响较大。

3) 圆孔边界 $0.1 \sim 0.2\text{ m}$ 处 THMC 耦合作用十分明显,说明流体在孔隙中释放的反应速率较快,并周向传播;且在此处,温度场对各物理场的贡献较显著,但反之影响较小。

参考文献:

- [1] DE BOER R. 多孔介质理论发展史上的重要成果[M]. 刘占芳, 严波, 译. 重庆:重庆大学出版社,1995:21-24.
- [2] WANG K Y, TAVAKKOLI F, VAFAI K. Analysis of gaseous slip flow in a porous micro-annulus under local thermal non-equilibrium condition-An exact solution[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89: 1331-1341.
- [3] LI P C, ZHONG J L, WANG K Y. Analysis of thermally developing forced convection heat transfer in a porous medium under local thermal non-equilibrium condition: a circular tube with asymmetric entrance temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 880-889.
- [4] YUE F L, LI P C, ZHAO C Y. Numerical investigation of thermally developing non-Darcy forced convection in a porous circular duct with asymmetric entrance temperature under LTNE condition[J]. Transport in Porous Media, 2021, 136: 639-655.
- [5] 杨晓, 刘雪梅. 多孔介质平板通道发展传热中非局部热平衡时的温度分布特征[J]. 应用数学和力学, 2006, 27(8): 978-986.
- [6] YANG Y, GUERLEBECK K, SCHANZ T. Thermo-osmosis effect in saturated porous medium[J]. Transport in Porous Media, 2014, 104: 253-271.
- [7] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型

- [J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2003,18(4):419-426.
- [8] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. *Journal of Applied Physics*,1941,12(2):155-164.
- [9] 吴贵福,杨印章,刘仁强. 多孔介质热流耦合传热模拟研究[J]. *当代化工*,2020,49(3):697-701.
- [10] 孔祥言,李道伦,徐献芝. 热-流-固耦合渗流的数学模型研究[J]. *水动力学研究与进展(A 辑)*,2005,20(2):269-275.
- [11] ZHANG Z,CHENG X. A fully coupled THM model based on a non-equilibrium thermodynamic approach and its application[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*,2017,41(4):527-554.
- [12] LU H Z,LIU T W. A coupling difference scheme of thermo-hydro-mechanical model on unsaturated porous media[J]. *Applied Mechanics and Materials*,2015,723:205-209.
- [13] 严俊,魏迎奇,蔡红. 非饱和多孔介质水-热-力耦合数学模型研究[J]. *水利学报*,2014,45(增刊2):152-160.
- [14] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 3版. 合肥:中国科学技术大学出版社,2020:400-405.
- [15] SUN X,LUO H,SOGA K. A coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical (THMC) model for methane hydrate bearing sediments using COMSOL Multiphysics[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering*,2018,19(8):600-623.
- [16] 盛金昌,刘继山,许孝臣. 页岩钻孔过程中的流固热化学耦合模型[J]. *工程力学*,2009,26(12):240-245.
- [17] ABOUSLEIMAN Y, EKBOTE S. Solutions for the inclined borehole in a porothermoelastic transversely isotropic medium[J]. *Journal of Applied Mechanics*,2005,72(1):102-114.
- [18] WU B S,ZHANG X,JEFFREY R G, et al. A semi-analytic solution of a wellbore in a nonisothermal low-permeability porous medium under non-hydrostatic stresses[J]. *International Journal of Solids and Structures*,2012,49(13):1472-1484.
- [19] 欧阳小龙. 多孔介质传热局部非热平衡效应的基础问题研究[D]. 北京:清华大学,2014:5-6.
- [20] 戴清晨,何录武. 热局部非平衡条件下含柱形空洞横观各向同性饱和多孔介质的热应力分析[J]. *力学季刊*,2014,35(1):1-9.
- [21] 陈丽,何录武. 饱和多孔介质化学-热-弹性模型及应用[J]. *力学季刊*,2018,39(4):750-761.
- [22] 张亚. 饱和多孔介质化学-热-流-固耦合理论和应用[D]. 上海:华东理工大学,2012,17-34.
- [23] 冯静安,唐小琦,王卫兵. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*,2017,35(1):52-56.

(上接第5页)

- [2] 王正虎,路彦景. 浆纱设备能耗分析与节能措施探讨[J]. *棉纺织技术*,2011,39(10):27.
- [3] 杨敏鸽,程水林,马沙沙,等. 一种用于棉纤维上浆的热熔浆料及其制备方法:CN110396819A[P]. 2019-11-01.
- [4] 赵海涛,杨敏鸽,许杨. 涤棉热熔浆料的制备[J]. *纺织导报*,2014(2):49-52.
- [5] 曹媛媛. 顺丁烯二酸共聚物合成及其在热熔浆料中的应用研究[D]. 西安:西安工程大学,2018:10-20.
- [6] 杨敏鸽,曹媛媛,王俊勃,等. 基于本体聚合的热熔性纺织浆料制备方法:CN108330687B[P]. 2020-09-18.
- [7] 杨敏鸽,王俊勃,赵川,等. 涤棉用纺织热熔浆料的制备方法:CN103898761A[P]. 2014-07-02.
- [8] 王绍斌,刘瑜,杨敏鸽,等. 精纺毛纱用热熔浆料的研究及性能测试[C]//中国毛纺织行业协会,西安工程大学,国际毛纺织组织(IWTO). 2006 中国国际毛纺织会议暨 IWTO 羊毛论坛论文集:上册. 西安:西安工程大学学报编辑部,2006:279-282.
- [9] 王俊勃,卫晋波,杨敏鸽,等. 一种基于热熔浆料的热熔浆纱机:CN112301584A[P]. 2021-02-02.
- [10] 洪仲秋. 上浆率的设定及其影响因素分析[J]. *棉纺织技术*,2007,35(10):18.
- [11] 张建春,兰锦华,黄柏龄. 热熔上浆小样工艺试验与样机研制[J]. *上海纺织科技*,1988(3):17-20.
- [12] 黄彦萍. 影响上浆质量的几个因素[J]. *棉纺织技术*,2018,46(7):13.
- [13] 荣瑞萍,陈益明,田培善. 浆液浓度、黏度与上浆率关系的实验和讨论[J]. *棉纺织技术*,1992(1):27.

(上接第10页)

- [5] XU Y,SUN Z J,HUANG S,et al. Dynamics characteristic analysis of the needle multi-linkage mechanism in a carpet tufting machine's driving system[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*,2016,117(3):103.
- [6] XU Y,SUN Z J,MENG Z,et al. Research on mechanism analysis and elimination method for the tufted carpet stop mark[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*,2014,105(3):66.
- [7] 张建军,黄庆学,马丽楠. 基于 MATLAB/Simulink 的四连杆机构动力学仿真及改进[J]. *太原科技大学学报*,2015,36(5):390-396.
- [8] 郭文静,辛舟,宋西华. 铝锭连铸机接锭装置的运动分析[J]. *机械制造*,2013,51(1):5-7.
- [9] 李园园,陈国平,高勇,等. 多间隙润滑空载四连杆机构动力学分析[J]. *南京航空航天大学学报*,2017,49(6):798-804.
- [10] TARI H,SU H J. A complex solution framework for the kinetostatic synthesis of a compliant four-bar mechanism[J]. *Mechanism & Machine Theory*,2011,46(8):1137-1145.