文章编号:1673-0062(2017)03-0039-06

岩体固液气三相多场耦合模型的构建

班改革,戴剑勇*

(南华大学 核资源工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘　要:基于理想模型的假设,将层状结构的非饱和岩体作为研究对象,从等效多相系统的守恒定律出发,建立了非饱和岩体的热流固全耦合模型,这些为研究多孔介质多场耦合提供了一个有效的方法,也为进一步研究温度场—渗流场—应力场耦合问题提供了理论支持,同时对我国垃圾填埋场、路基填土、堤坝防洪、核废料储存等领域工程设计和现场施工均发挥一定的指导意义.

关键词:非饱和岩体;弹塑性模型;热流固全耦合模型

中图分类号:TU45　　**文献标志码**:A

Construction of Coupling Model in Solid-liquid-gas Three Phase Rock Mass

BAN Gai-ge,DAI Jian-yong*

(School of Nuclear Resources Engineering,University of South China,Hengyang,Hunan 421001,China)

Abstract:Based on the idealized model hypothesis, this thesis established thermo-fluid-solid three field coupling model of the unsaturated rock mass from the conservation law of the equivalent multiphase system. Research results provided an effective method for the study of unsaturated porous media coupling problems and do a theory support for further study on coupling problem. Sometimes there was a guiding significance in engineering design and site construction to our country such as landfill, levee and the design and site construction of nuclear waste storage.

key words: unsaturated rock mass; elastic-plastic model; fully coupled thermo-hydro-mechanical model

0　引　言

热流固耦合模型在岩土力学领域的研究很早已经被关注.J.Ma,G.Zhao 等[1]推导出满足质量和动量守恒的损伤及完整两种状态下饱和多孔介质的控制微分方程,构建了完全耦合流变模型.Z.X.

收稿日期:2017-04-28

作者简介:班改革(1990-),男,硕士研究生,主要从事于土木工程城市地下空间工程规划与利用方面的研究.E-mail:3131534575@qq.com. *通讯作者:戴剑勇,E-mail:2419213308@qq.com

Sun,X.Zhang 等[2]基于热平衡理论,提出了一种考虑了THM(温度场、渗流场、应力场)耦合效应的采热过程模拟和分析的数值方法,并验证了该模型的有效性.H.R.Thomas 等[3]重点研究了三场耦合情况下对非饱和粘土变形的影响.罗彪等[4]利用APDL语言建立了单齿热力耦合分析的有限元参数化模型.孟陆波等[5]通过三轴卸荷试验,以高黎贡山隧道为例,采用数值方法,模拟出THM耦合作用下千枚岩隧道的大变形,结果表明地下水渗流方向影响地温分布,并存在着一种THM之间两两相互作用的耦合模式.张玉军等[6]发现孔隙率对岩体中THM耦合作用存在有限元分析方面的影响.Y.He,L.Yang[7]等提出了一个紧密耦合化学、力学、多相流的油藏模拟器框架,通过对油页岩地层近井变形的分析验证了所提出的框架具有有效性与合理性.M.Hu,J.Rutqvist 等[8]基于数值流形法构建了考虑离散断裂变形和裂缝流体流动的裂隙多孔岩石完全耦合模型.另有一些学者[9-11]在多场耦合数值模拟和实际应用方面也进行了研究.本文在前人研究基础之上,选择相应的假设前提下,结合耦合机理,依据弹塑性理论、流体力学理论,推导出岩体固液气三相THM耦合控制方程组,并对下一步的研究方向进行了设想和论证.

1 热流固(THM)耦合机理及典型的三场耦合作用模式

多场耦合作用是多个物理场之间相互发生的强烈作用,本文所研究对象为非饱和岩体介质.由于非饱和性,使得渗流场、温度场和变形场之间发生耦合作用,三场之间耦合机理是流体渗流速度的变化影响岩体骨架的形变,岩体骨架变形会引起岩体的渗透率和孔隙度发生变化,对流体渗流场产生影响.温度场的变化使得岩体中产生热应力、应变和热扩散,当温度达到一定值时,使流体产生相变,流体热扩散反过来影响温度场.应力的改变引起岩体内部结构、孔隙通道的形状大小和岩体微观颗粒分布发生改变,进而影响岩体的渗透性.THM耦合关系和特征如表1列出,对于三场耦合作用模式的研究,比较具有代表性的有Guvanasen 等[12]提出的热—液—力耦合作用模式,如图1所示.

表1 THM耦合关系和特征表

Table 1 The coupling relationship and characteristics table

THM 耦合关系		耦合特征
T-H	耦合	流体密度、黏度和浮力随温度变化、流体相变与热扩散等
T-M	耦合	岩体的热应力应变、抗剪强度变化、裂隙节理张闭与损伤
H-M	耦合	结构面的应力应变、损伤、破坏对结构面水力传导率的影响

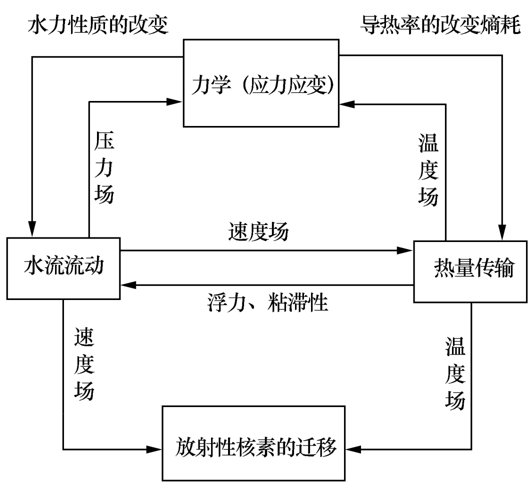

图1 热—液—力耦合关系

Fig.1 Relationship of coupled thermal-liquid-force

2 岩体固液气三相THM耦合控制方程组的构建

基于耦合机理,假设岩体介质为含有孔隙水、气的非饱和弹塑性多孔介质,且岩体骨架发生的变形为小变形,热传导过程服从Fourier导热定律.在岩体变形运动和流体渗流运动惯性力及流体的体积力忽略不计,地下水密度ρ_w和岩体骨架的密度ρ_s满足$\rho_w=(P,T)$、$\rho_s=\rho_s(P,T)$.在前人的研究基础及上述假设,我们应用弹塑性理论、流体力学理论,推导出考虑了温度场、渗流场的影响及忽略应力改变导致的岩体骨架的变形的非等温条件下非饱和岩体骨架的连续性方程、变形场控制方程、渗流场控制方程及非饱和岩体在变形场—渗流场作用下的温度场的控制方程,构建出岩体固液气三相THM耦合模型.

1)　流体的渗流场控制方程

根据岩体的地质成因与结构特征,渗透介质类型和渗流分析模型具体划分如表 2 所示.

表 2　岩体渗透介质类型

Table 2　The permeability of rock mass media type

岩体结构类型	渗流分类	渗透介质类型	渗流分析模型
部分碎裂结构	孔隙流	多孔介质	连续介质力学
层状、碎裂结构	准孔隙流	准多孔介质	等效连续介质力学
层、块状结构	裂隙流	面状流不连续介质	网络渗流分析
岩溶化地层	管道流	管状流不连续介质	水力学分析
岩溶化地层	洞穴流	洞穴状不连续介质	水力学分析

本文流体满足广义 Darcy 定律:

$$v = -k(H)\nabla(H+h) - D_t K\Delta T_1 \qquad (1)$$

式中,v 为渗流速度向量;$k(H)$ 为非饱和岩体渗透系数张量;∇为哈密顿算子;H 测压水头;h 相对于基准面的高度;D_t 为温度梯度下的水流扩散率;ΔT_1 为水温.

非饱和岩体周围环境中水流实际速度用下列式得出,n 为孔隙度.

$$v_w = \frac{v}{n} \qquad (2)$$

岩体周围环境中水流相对于非饱和岩体骨架的运动速度为

$$v_{rw} = v_w - v_s \qquad (3)$$

岩周围环境中气体相对于岩体骨架的运动速度为

$$v_{rg} = v_g - v_s \qquad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中 v_s、v、v_w、v_g、v_{rw},v_{rg}分别为岩体介质速度及水、气相对于岩体的运动速度;n 为岩体的孔隙率.

由式(2)~式(4),结合非饱和多孔介质能量守恒方程,得出了非饱和岩体有效应力如式(5)所示.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \alpha\delta_{ij}(s_w p_w + s_g p_g) \qquad (5)$$

式中 σ_{ij}为多孔介质的总应力分量;σ'_{ij}为多孔介质平均应力分量;α 为比奥系数,这里 $0<\alpha<1$;δ_{ij}为克罗内克符号,有 $\delta_{ij}=\begin{cases}1 & i=j\\ 0 & i\neq j\end{cases}$;$s_g$、$s_w$ 分别为气相和液相饱和度,且满足饱和度约束方程 $s_g+s_w=1$;p_w、p_g 分别为孔隙水压力和孔隙气压力,单位为 Pa.

令非饱和岩体的等效密度为 $\bar{\rho}$,则 $\bar{\rho}=n(s_g\rho_g+s_w\rho_w)+(1-n)\rho_s$,$\rho_w$、$\rho_g$ 和 ρ_s 分别为岩体中液相、气相和岩体骨架的密度;依据多孔介质流体动力学知识,液气固三相连续性方程如式(6)所示.

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial(\rho_w v_{rw})}{\partial z} + f_w(t) = \dfrac{\partial(n\rho_w s_w)}{\partial t} \\ -\dfrac{\partial(\rho_g v_{rg})}{\partial z} + f_g(t) = \dfrac{\partial(n\rho_g s_g)}{\partial t} \\ -\dfrac{\partial(\rho_s v_s)}{\partial z} + f_s(t) = \dfrac{\partial[(1-n)\rho_s]}{\partial t} \end{cases} \qquad (6)$$

式(6)中 V_{rw}、V_{rg}、V_s 为液体、气体和固体骨架的相对流速,单位为 m/s;$f_g(t)$、$f_w(t)$、$f_g(t)$为固、液和气源项;n 为孔隙率,其余符号同上.

由式(6)结合前人[13-15]推导非饱和岩体的控制方程组过程中所给出的地下水连续性方程式(7)进行改进可得地下水的连续性方程如式(8)所示:

$$\frac{\partial(\rho_w n s_w)}{\partial t} + \nabla\cdot(p_w n v_{rw}) = \frac{\partial(\rho_w n s_w)}{\partial t} + n\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial\rho_w}{\partial P}\Big|_T\frac{\partial p}{\partial t} + n\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial\rho_w}{\partial T}\Big|_P\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \qquad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho_w n s_w)}{\partial t} + \nabla\cdot(p_w n v_{rw}) = -\frac{\partial(\rho_w v_{rw})}{\partial z} + f_w(t) + n\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial\rho_w}{\partial P}\Big|_T\frac{\partial p}{\partial t} + n\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial\rho_w}{\partial T}\Big|_P\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \qquad (8)$$

可令

$$\frac{\partial\rho_w}{\partial P}\Big|_T = \rho_w\alpha_w \qquad (9)$$

$$\frac{\partial\rho_w}{\partial P}\Big|_P = \rho_w\beta_w \qquad (10)$$

其中 α_w 为水的体积模量的倒数;β_w 为水的热膨胀系数的负数.

由式(9)、式(10)代入式(8)可得

$$-\frac{\partial(\rho_w v_{rw})}{\partial z} + f_w(t) + n\alpha_w\frac{\partial p}{\partial_t} + n\beta_w\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \qquad (11)$$

将式(3)代入式(11),可得

$$-\frac{\partial\left[\rho_{w}(v_{w}-v_{s})\right]}{\partial z}+f_{w}(t)+n\alpha_{w}\frac{\partial p}{\partial t}+n\beta_{w}\frac{\partial p}{\partial t}=0 \tag{12}$$

利用物质导数 $\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{D}{Dt}-V\cdot\nabla$,$\nabla$为哈密顿算子.将式(11)化简为

$$V\cdot\nabla[\rho_{w}(v_{w}-v_{s})]-\frac{D(\rho_{w}v_{w}-\rho_{w}v_{s})}{Dz}+f_{w}(t)+(n\alpha_{w}+n\beta_{w})\left[\frac{Dp}{Dt}-V\cdot\nabla p\right]=0 \tag{13}$$

同理,可以得到非饱和多孔岩体介质连续性方程为

$$V\cdot\nabla(\rho_{s}v_{s})-\frac{D(\rho_{s}v_{s})}{Dz}+f_{s}(t)+(n\alpha_{s}+n\beta_{s})\left[\frac{Dp}{Dt}-V\cdot\nabla p\right]=0 \tag{14}$$

结合式(13),式(14)得到

$$V\cdot\nabla(\rho_{s}v_{s})-\frac{D(\rho_{s}v_{s})}{Dz}+f_{s}(t)+\frac{(\alpha_{s}+\beta_{s})}{(\alpha_{w}+\beta_{w})}\times\left[\frac{D(\rho_{w}v_{w}-\rho_{w}v_{s})}{Dz}-V\cdot\nabla(\rho_{w}(v_{w}-v_{s}))-f_{w}t\right]=0 \tag{15}$$

由 $\rho_{w}=\rho_{w}(P,T)$,$\rho_{s}=\rho_{s}(P,T)$ 可知,考虑温度和压力影响时,地下水的密度增量可表示为

$$\frac{\partial\rho_{w}(P,T)}{\partial t}=\rho_{w0}\beta_{wP0}\frac{\partial p}{\partial t}-\rho_{w0}\beta_{wT0}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{16}$$

式(16)中 ρ_{w0}、β_{wP0} 和 β_{wT0} 为常数,0 代表为参考值.

同理,非饱和多孔岩体介质密度可表示为

$$\frac{\partial\rho_{s}(P,T)}{\partial t}=\rho_{s0}\beta_{sP0}\frac{\partial p}{\partial t}-\rho_{s0}\beta_{sT0}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{17}$$

将式(15)、式(16)代入式(14),得到流体渗流场控制方如式(18):

$$\rho_{1}\left(\alpha\frac{\partial\varepsilon v}{\partial t}+\left[n\beta_{lp}+\frac{(a-n)}{K_{s}}\right]\frac{\partial p}{\partial t}-\left[(1-n)\beta_{sT}-\rho_{w}(1-\alpha)\beta_{TD}\right]\frac{\partial T_{s}}{\partial t}-n\beta_{lT}\frac{\partial T_{1}}{\partial t}\right)=-\nabla\cdot(\rho_{1}q_{r}) \tag{18}$$

容易看出式(18)中 $-\left[(1-n)\beta_{sT}-\rho_{w}(1-\alpha)\beta_{TD}\right]\frac{\partial T_{s}}{\partial t}-n\beta_{lT}\frac{\partial T_{1}}{\partial t}$、$\left[n\beta_{lp}+\frac{(a-n)}{K_{s}}\right]\frac{\partial p}{\partial t}$ 考虑了温度影响,代表温度项和压力项.

2) 固液气三相岩体的变形场控制方程

由静力平衡方程

$$\Delta\cdot\sigma_{ij}+\bar{\rho}g_{i}=0 \tag{19}$$

其中 g_{i} 为重力加速度分量;$\bar{\rho}$ 为非饱和岩体的等效密度,$\bar{\rho}=n(s_{a}\rho_{a}+s_{w}\rho_{w})+(1-n)\rho_{s}$.

根据广义弹塑性力学理论和非饱和岩体的物理性质,本文视非饱和岩体为弹塑性材料,应力应变关系可表达式为

$$d\sigma'_{ij}=d\sigma_{ij}-C_{ijkl}\,d\varepsilon_{kl,T}=C_{ijkl0}\left(d\varepsilon_{kl}-d\lambda\frac{\partial g}{\partial\sigma_{kl}}\right)-C_{ijkl}\,d\varepsilon_{kl,T} \tag{20}$$

式(20)中 σ'_{ij} 为有效应力张量分量;σ_{ij} 为总应力张量分量;C_{ijkl} 为岩体弹塑性的常数;$d\varepsilon_{kl,T}$ 为岩体温度应变增量;C_{ijkl0} 为岩体塑性常数参考值;$d\varepsilon_{kl}$ 为岩体应变总增量;$d\lambda$ 为待定张量且非负;$d\lambda\frac{\partial g}{\partial\sigma_{kl}}$ 为塑性应变增量.

考虑温度影响时,岩体应变总增量为

$$d\varepsilon_{kl}=d\varepsilon_{kl,e}+d\varepsilon_{kl,q}+d\varepsilon_{kl,T} \tag{21}$$

式(21)中 $d\varepsilon_{kl,e}$、$d\varepsilon_{kl,q}$、$d\varepsilon_{kl,T}$ 分别为弹性应变增量、塑性应变增量和温度应变增量,表达式如下:

$$\begin{cases}d\varepsilon_{kl,e}=C^{e}_{ijkl0}d\sigma_{ij}+\frac{\partial}{\partial T}(C^{e}_{ijkl0})\,dT\sigma_{ij}\\ d\varepsilon_{kl,p}=d\lambda\frac{\partial g}{\partial\sigma_{kl}}\\ d\varepsilon_{kl,T}=\alpha_{T}dT\delta_{kl}\end{cases} \tag{22}$$

式(22)中 C^{e}_{ijkl0} 为弹性应变张量,dT 为温度增量;α_{T} 为温度膨胀系数;δ_{kl} 为 Kronecker 符号.

岩体标准塑性常数 C_{ijkl0} 和非负张量 $d\lambda$ 表达式如下:

$$C_{ijkl0}=C^{ep}_{ijkl0}+\frac{1}{H}H^{*}_{ij}H_{kl} \tag{23}$$

$$d\lambda=\frac{1}{H}\frac{\partial f}{\partial\sigma_{ij}}C_{ijkl0}\,d\varepsilon_{kl} \tag{24}$$

式(23)、式(24)中 C^{ep}_{ijkl0} 为弹塑性刚度张量,H_{kl}、H^{*}_{ij}、H 取值如式(25)

$$\begin{cases}H_{kl}=\frac{\partial f}{\partial\sigma_{rs}}C_{rskl}\\ H^{*}_{ij}=C_{ijmn}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{mn}}\\ H=\frac{\partial f}{\partial\sigma_{ij}}C_{ijkl}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{kl}}\end{cases} \tag{25}$$

将式(22)~式(25)代入式(21)得到

$$d\sigma'_{ij}=\left(C^{ep}_{ijkl0}+\frac{1}{\frac{\partial f}{\partial\sigma_{ij}}C_{ijkl}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{kl}}}\left(C_{ijmn}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{mn}}\right)\frac{\partial f}{\partial\sigma_{rs}}C_{rskl}\right)\cdot$$

$$(C^{e}_{ijkl0}\,\mathrm{d}\sigma_{ij}+\frac{\partial}{\partial T}(C^{e}_{ijkl0})\,\mathrm{d}T\sigma_{ij}+\alpha_T\,\mathrm{d}T\delta_{kl})-C_{ijkl}\alpha_T\mathrm{d}T\delta_{kl} \tag{26}$$

将式(5)、式(26)代入(19)得式(27)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{(C^{ep}_{ijkl0}+\frac{1}{\frac{\partial f}{\partial\sigma_{ij}}C_{ijkl}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{kl}}}(C_{ijmn}\frac{\partial g}{\partial\sigma_{mn}})\frac{\partial f}{\partial\sigma_{rs}}C_{rskl}-C_{ijkl}\alpha_T\,\mathrm{d}T\delta_{kl})(C^{e}_{ijkl0}\,\mathrm{d}\sigma_{ij}+\frac{\partial}{\partial T}(C^{e}_{ijkl0})\,\mathrm{d}T\sigma_{ij}+\alpha_T\,\mathrm{d}T\delta_{kl})\right\}+\Delta\cdot[\alpha\delta_{ij}(s_w p_w+s_a\frac{\rho_a RT}{\mu'})]+[n(s_w\rho_w+s_a\rho_a)+(1-n)\rho_s]g_i=0 \tag{27}$$

式(27)为包含有温度变量、流体参数项的含有固液气三相岩体骨架变形场控制方程.

3)固液气三相岩体的温度场控制方程

岩体内部温度的上升是由三部分引起的,一是通过岩体骨架传递的热量,二是渗流携带的热量,三是源汇项,岩体本身传导的热量可以用传热学中 Fourier 定律来表示,其一般形式为

$$q_1=-\lambda\frac{\partial T}{\partial x} \tag{28}$$

渗流携带的热量表示为

$$q_2=C_w\gamma_w\partial T \tag{29}$$

式(27)、式(28)中,q_1 为岩体本身传导的热量,其单位为 W/m^2;λ 为导热系数,单位为 W/(m·K);T 为温度,单位为 K;x 为导热面上的坐标,单位为 m;q_2 为渗流携带的热量;C_w 为水的比热容;γ_w 为水容重;v 为 Darcy 流速.

根据单位时间单位体积岩体温度升高吸收的热量等于单位时间单位体积流入岩体的热量守恒,源汇项作用采用 Q_r 表示,可以得到:

$$C_s\gamma_s\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial q_1}{\partial x}+\frac{\partial q_2}{\partial x}+Q'_r \tag{30}$$

式中 C_s 为岩体的比热容;γ_s 为岩体的容重.

将式(18)、式(27)求导后代入式(30),结合式(1),经过整理可以得到

$$C_s\gamma_s\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z})+Q'_r-C_w\gamma_w\cdot\left\{\frac{\partial[(-K_x\Delta(H+h)-D_t\Delta T_1)T]}{\partial x}+\frac{\partial[(-K_y\Delta(H+h)-D_t\Delta T_1)T]}{\partial y}+\frac{\partial[(-K_z\Delta(H+h)-D_t\Delta T_1)T]}{\partial z}\right\} \tag{31}$$

式(31)中岩体温度场分布 $T=T(x,y,z,t)$ 受流体渗流场速度分布 $v=v(x,y,z,t)$ 的影响,而渗流场水头分布又决定渗流场速度分布,且由 $H=z+h=z+\int_{pw0}^{pw}\frac{\mathrm{d}p_w}{r_w(p_w,T_w)}$ 可知,$H=H(p_w,T_w)$,所以式(31)为反映了渗流场和应力场影响.

综合上述过程,推导式(15)、式(24)、式(31)构成了含有固液气三相的非饱和岩体热流固(THM)耦合控制方程组.

3 结论

本文基于一定的假设和本构方程,将层状结构的非饱和岩体作为研究对象,从等效多相系统的守恒定律出发,构建了非饱和岩体的热流固全耦合模型.构建出的考虑了温度场、应力场和渗流场三场耦合效应的固液气三相非饱和岩体介质耦合控制方程组模型,仍然是基于小变形情况下的弹塑性模型,没有考虑大变形的情况.同时,由于岩石力学问题本身具有不确定性,进一步研究可以在本研究基础上,采用模糊数学分析方法开展进一步的研究和扩展.

参考文献:

[1] MA J, ZHAO G, KHALILI N. A fully coupled flow deformation model for elasto-plastic damage analysis in saturated fractured porous media[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 76(2): 29-50.

[2] SUN Z X, ZHANG X, XU Y, et al. Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model[J]. Energy, 2017, 120(4): 20-33.

[3] THOMAS H R, HE Y, ONOFREI C. An examination of the validation of a model of the hydrothermomechanical behavior of engineered clay barrier[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Aeromechanics, 2015, 22(1): 49-71.

[4] 罗彪,叶江,李威,等.齿轮稳态温度场及热变形研究[J].南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(4): 38-43.

[5] 孟陆波,李天斌,杜宇本,等.THM 耦合作用下千枚岩隧道大变形机理[J].中国铁道科学, 2016, 37(5): 66-73.

[6] 张玉军,琚晓冬.孔隙率对岩体中 THM 耦合作用的弹塑性有限元分析[J].地下空间与工程学报, 2016, 12

(2):426-435.
[7] HE Y,YANG L,YANG J.Governing equations for coupled thermo-hydro-mechanical behaviors in unsaturated rock mass[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2006,41(4):419-423.
[8] HU M,RUTQVIST J,WANG Y.A numerical manifold method model for analyzing fully coupled hydro-mechanical processes in porous rock masses with discrete fractures[J].Advances in Water Resources,2017,102(2):111-126.
[9] 张长亮,涂维,罗志光,等.裂隙岩体固—水—气三相不耦合装药爆破数值模拟分析[J].公路交通科技,2017,34(4):58-65.
[10] 常博,陈建强,刘军,等.急倾斜含瓦斯煤层 THM 多场耦合机理及应用[J].西安科技大学学报,2016,36(6):793-800.
[11] SPOHN H,STOLTZ G.Nonlinear fluctuating hydrodynamics in one dimension:the case of two conserved fields[J].Journal of Statistical Physics,2015,160(4):1-24.
[12] GUVANASEN V,CHAN T.A three-dimensional numerical model for thermo-hydro-mechanical deformation with hysteresis in a fractured rock mass[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2000,37(1/2):89-106.
[13] 胡少华,章光,赵顺利,等.孔隙水压力作用下热处理北山花岗岩变形特性试验研究[J].岩土工程学报,2016,38(2):330-335.
[14] 黎力,李治刚,奚弦,等.采空区自然发火多场耦合数值模拟研究[J].中国矿业,2017,26(3):157-160.
[15] 贺玉龙,杨立中,杨吉义.非饱和岩体三场耦合控制方程[J].西南交通大学学报,2006,41(4):419-423.

(上接第 33 页)

[12] 王翠玲,刘长礼,张云,等.PTA 生产废液在包气带中迁移的模拟研究[J].中国环境科学,2014,34(7):1824-1830.
[13] 张志军,刘玄钊,李亚俊,等.毛细水带分层取样试验装置:201310003611.7[P].2013-05-01.
[14] 张乃英,范广鹏.ICP-MS 测定土壤中铀和钍[J].微量元素与健康研究,2010,27(6):41-42.
[15] 董斌,张喜发,李欣,等.毛细水上升高度综合试验研究[J].岩土工程学报,2008(10):1569-1574.
[16] 王冰,赵勇胜,屈智慧,等.深度及含水率对包气带砂层中柴油降解作用的影响[J].环境科学,2011,32(2):530-535.