

裂隙水作用下巷道围岩体温度场的数值模拟

陈桂义, 张登春, 邹声华, 肖国清

(湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭, 411201)

摘要: 基于等效连续介质渗流模型及多孔介质多场耦合理论, 建立裂隙水作用下的巷道围岩体温度场计算的物理模型, 建立裂隙水渗流场、裂隙水温度场、岩体温度场耦合控制方程, 辅以边界条件参数, 以 FLUENT 软件进行数值模拟, 研究了裂隙水渗流作用下的矿井巷道围岩体温度场分布。结果表明, 裂隙水的迁移伴随着热量的交换, 裂隙水的作用改变了巷道围岩体的温度场分布; 定量分析了裂隙水渗流速度对两者温度场分布的影响, 在裂隙水流动方向上, 渗流速度愈小, 则裂隙水流温升愈大, 围岩温度温升愈大; 当裂隙水渗流速度大于 2×10^{-8} m/s 时, 其变化对巷道围岩体温度场分布有着显著的影响; 但渗流速度小于 2×10^{-8} m/s 时, 影响是微小的。

关键词: 裂隙水; 巷道围岩; 渗流速度; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TD742

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)02-0024-05

Numerical simulation of temperature field of roadway surrounding rock under the action of fracture water

CHEN Guiyi, ZHANG Dengchun, ZOU Shenghua, XIAO Guoqing

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the equivalent continuous medium model and the multi-field coupling theory, the physical model of temperature field calculation of roadway surrounding rock under the action of fracture water, the seepage field and temperature field of the rock, and the coupling control equation are established. Through the parameter of boundary conditions, the numerical simulation is carried out with software FLUENT. The temperature distribution of roadway surrounding rock under the action of fracture water is revealed. The analysis shows that the migration of fracture water accompanies the heat exchange and the action of fracture water changes the temperature distribution form of roadway surrounding rock. The influence of seepage velocity of fracture water on the temperature distribution of both fracture water and roadway surrounding rock is analyzed quantificationally. In the flow direction of fracture water, the smaller the seepage velocity is, the greater the temperature rise of fracture water and surrounding rock are. When the flow velocity is greater than 2×10^{-8} m/s, the changes of seepage velocity have a significant impact on the temperature distribution of roadway surrounding rock. However, when the flow velocity is smaller than 2×10^{-8} m/s, the effect is slight.

Key words: fracture water; roadway surrounding rock; seepage velocity; temperature field; numerical simulation

收稿日期: 2014-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51134005; 51274098); 湖南省自然科学基金资助项目(11JJ6031; 12JJ8009); 湖南省科技厅资助项目(2011FJ3077)

通信作者: 张登春(1972-), 男, 湖南祁阳人, 博士, 教授, 研究方向: 矿井降温与热环境控制. E-mail: dczhang2000@126.com

矿井开采深度的增加和机械化程度的不断提高,使得矿井热害日益突出,已成为制约矿井安全开采的重大问题之一^[1].深部开采过程中“三高一扰动”的复杂环境产生大量裂隙岩体,地下水会沿裂隙渗流,影响岩层温度场的分布.巷道围岩温度场的变化进而影响巷道内风流温度场的分布,影响井下工作环境.因此,研究深部矿井固(岩体)-流(裂隙水)温度场耦合传热作用对于巷道围岩温度场分析和深部矿井热害的防治是十分必要的.

裂隙水渗流场、温度场与岩体温度场是相互影响和作用的.一方面裂隙水流的迁移伴随着热量迁移,其直接影响围岩体的热量传递,从而影响围岩体的温度场分布;另一方面,岩体温度的改变可引起岩体渗透系数、裂隙水流温度场及水的粘度的变化,从而影响渗流场的分布,同时,温度势梯度还会引起裂隙水的流动.国外对裂隙岩体渗流的研究最早见于前苏联的专著《裂隙岩石中的渗流》^[2],典型代表有 Barenblatt, Warren, Snow, Louis 和 Wittke 等^[3];国内出版的系统性专著有许彦卿的《岩体水力学导论》^[4]、赵阳升的《矿山岩石流体力学》^[3]和张有天的《岩石水力学与工程》^[5]等.裂隙岩体的渗流理论,可分为3种类型^[6]:(1)等效连续介质渗流模型;(2)离散裂隙网络渗流模型;(3)混合渗流模型.在裂隙岩体热流固耦合研究方面,许多学者从不同的研究角度,提出了多种热流固耦合数学模型,如:Kolditz O, Kohl T. 等提出的固流热耦合数学模型^[7,8];赵坚进行了岩石裂隙的水力-热力特性试验研究^[9];柴军瑞提出了岩体渗流-应力-温度三场耦合的连续介质模型^[10];黄涛建立了岩体温度场与渗流场的耦合数学模型且应用于实际工程^[11];赵阳升建立了基质岩块-裂隙介质固流热耦合模型,并利用有限元软件 MFHDM100 进行了高温岩体地热环境分析^[12];张树光等对渗流和风流作用下的围岩温度场进行了有限元模拟计算^[13,14];赵延林等开发了双重介质热-水-力耦合分析的三维有限元计算软件^[15].

本文假定裂隙水渗流场为等效连续介质渗流模型,不考虑单个裂隙,裂隙岩体被看作多孔介质,提出了裂隙水渗流场、温度场及岩体温度场的三维耦合数学模型,利用 FLUENT 软件进行数值模拟,探讨了裂隙水渗流作用下的巷道岩体稳态温度场分布,并对岩体温度场分布的影响因素进行了分析.

1 裂隙水与岩体温度场的计算物理模型

计算区域取 25 m × 16 m × 200 m 的巷道围岩体,巷道断面为半圆拱形,断面高度为 5 m,直墙和拱高各为 2.5 m,巷道底板距围岩底部 3 m.裂隙带假定位于巷道轴向中心位置,其区域为 25.1 m × 16 m × 200 m,与水平面倾斜 5°,巷道拱顶距裂隙带的垂直高度为 5 m.采用混合网格,得到 928 186 个节点,5 019 086 个单元.其物理模型如图 1 所示,其 x 方向为巷道轴向方向.

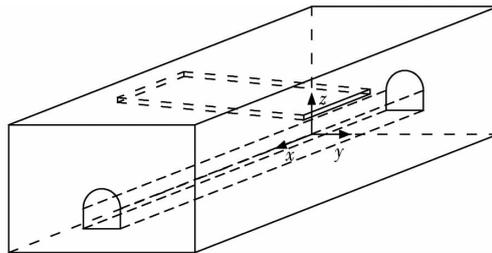


图1 巷道围岩体温度场计算物理模型

2 裂隙水与岩体温度场的数学模型

基于裂隙岩体渗流理论、传热学、多孔介质多场耦合理论^[16],建立巷道围岩体温度场、裂隙水温度场、裂隙水渗流场的三维耦合作用数学模型,并做如下假设:

- 1) 巷道围岩体为均质、各向同性、不可变形的介质,可简化为连续介质;
- 2) 假定裂隙水为不可压缩流体,无相变,忽略水的密度变化而造成的自然对流作用;
- 3) 渗流规律服从线性达西定律.

2.1 裂隙水渗流控制方程

依据多孔介质的渗流理论,裂隙水流连续性方程为

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \text{div}(\rho_w v) = 0. \quad (1)$$

式中, ρ_w : 水的密度, kg/m³; t : 时间, s; v : 速度, m/s. 若流体不可压,则密度 ρ_w 为常数,又本文数值模拟为稳态计算,则式(1)变为

$$\nabla \cdot v = 0. \quad (2)$$

裂隙水动量方程为

$$\frac{\partial(v_x v_i)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y v_i)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z v_i)}{\partial z} = \frac{\mu}{\rho_w} \left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} \right) -$$

$$\frac{1}{\rho_w} \nabla P + \frac{1}{\rho_w} S_i; \quad (3)$$

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho_w |v| |v_i| \right). \quad (4)$$

式中, $i: x, y, z; v_x, v_y, v_z$ 速度矢量 v 在 x, y, z 方向上的分量, m/s ; μ : 水的运动粘度, m^2/s ; P : 水流压强; S_i : 动量源项; $1/\alpha$: 粘性阻力系数, m^{-2} ; C_2 : 惯性阻力系数, m^{-1} .

2.2 裂隙水流温度场控制方程

由传热学理论知: 裂隙水流的温度场分布主要由水流热传导、热对流及岩体与水流之间的热量交换 3 方面因素控制, 基于上述考虑, 建立裂隙水流温度场控制方程^[13,15,17]:

$$\rho_w C_{pw} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \nabla^2 T_w - \rho_w C_{pw} \nabla \cdot (v_i T_w) + \frac{\lambda_r}{\delta} (T_r - T_w) = 0. \quad (5)$$

式中, C_{pw} : 水的定压比热容系数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_w : 水的温度, K ; λ_w : 水的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; λ_r : 岩体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; δ : 空隙宽度, m ; T_r : 岩体裂隙边缘的温度, K .

2.3 裂隙岩体流-热耦合温度场控制方程

$$\lambda_r \nabla^2 T - \rho_w C_{pw} \nabla \cdot (v T_w) = 0. \quad (6)$$

式中, T : 巷道围岩温度, K .

2.4 边界条件

裂隙带区域: 设置为多孔介质区域, 孔隙率为 0.2. 粘性阻力系数 $1/\alpha$ 和惯性阻力系数 C_2 可依据式(7)和式(8)计算^[18]. 已知裂隙介质各向同性, 故其各方向的渗透系数及惯性阻力系数相同.

$$\alpha = \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2}; \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^2}. \quad (8)$$

式中, D_p : 粒子平均直径; ε : 裂隙水在裂隙带所占的空间体积分.

围岩体区域: 设置材料为砂岩, 密度 $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$, 比热容 $C_p = 690 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 热传导系数 $\lambda_r = 2.035 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 初始温度场为 304.5 K .

裂隙水: 密度 $\rho_w = 998.2 \text{ kg/m}^3$, 比热容 $C_{pw} = 4182 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 热传导系数 $\lambda_w = 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 运动粘滞系数为 $\mu = 0.001003 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 初始温度为 293 K .

巷道围岩壁面: 定义材料为砂岩, 温度为 303 K .

围岩体底面: 定义材料为砂岩, 温度为 318 K ,

发热率为 120 W/m^3 .

裂隙岩体与围岩体交界面为耦合面, 边界定义为耦合即可, 其他壁面作为自由面处理.

3 数值模拟结果与分析

建立上述裂隙水作用下的巷道围岩体温度场数学模型, 改变裂隙带中水的渗流速度 ($2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, 每两个速度大小相差十个数量级), 另取无渗流工况进行数值计算, 分析可得裂隙水作用下的巷道围岩体温度场分布及其影响因素的作用效果.

3.1 巷道围岩体的温度场分布

裂隙水渗流速度 $v = 2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 时, 其作用下岩体稳定温度场分布如图 2 所示. 图中, 裂隙水沿 y 轴正方向流动, 由于水岩的热交换, 水流温度逐渐升高; 裂隙带邻近区域的岩体与裂隙水发生强烈的热交换, 其温度场分布与其他区域岩体不同. 裂隙带和裂隙水流的存在改变了围岩体的温度场分布.

当裂隙带无地下水渗流作用, 其巷道围岩体间的热量传递仅为热传导作用, 模拟得到此工况稳定温度场后, 取 $x = 80 \text{ m}$ 断面温度场分布如图 3 所示; 取裂隙水渗流速度 $v = 2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 时 $x = 80 \text{ m}$ 断面, 其温度场分布如图 4 所示. 对比可以看出: 裂隙水作用下巷道围岩温度场与无裂隙水作用下围岩温度场的分布形式不同, 无裂隙水渗流作用的围岩体温度场是对称分布的, 而裂隙水作用下的围岩体温度场分布是非对称的. 裂隙水流的温度在其流动方向上逐渐升高, 同时带走围岩体的热量, 最终两者在研究区域内温度相接近, 形成了温度场的平衡区. 由此表明: 裂隙水的迁移伴随着热量的交换, 在裂隙带及其与围岩体交界面, 水、岩发生强烈的对流换热, 进而改变围岩体的温度; 在热量交换平衡区域, 裂隙水温度与围岩体温度相同, 裂隙水的作用改变了巷道围岩体的温度场分布形式.

取围岩体内 $x = 70 \text{ m}, z = 13 \text{ m}, y = 0 \sim 25 \text{ m}$ 的直线上温度值, 比较其在无裂隙水渗流(记为工况 A)和有裂隙水渗流(记为工况 B)作用下的温度变化趋势, 如图 5 所示. A, B 曲线沿 y 轴正方向逐渐接近即两者的温度值沿 y 轴正方向逐渐接近. 直线上点 $y = 0$ 两者温差最大为 $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 之后逐渐减小为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 说明: 在起始端, 裂隙水与岩石发生强烈的热交换, 导致围岩温度降低; 随后, 由于水、岩温度

差减小,热交换减弱,裂隙水带走的围岩热量减少,围岩温度降低量变小.同时,也是由此原因,裂隙水作用下的巷道围岩温度场非对称分布.

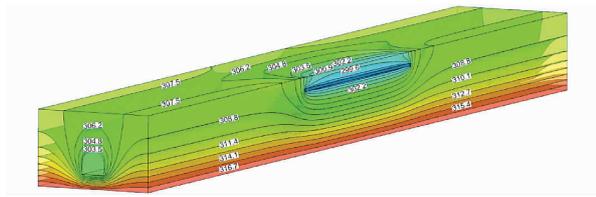


图2 围岩体温度场分布

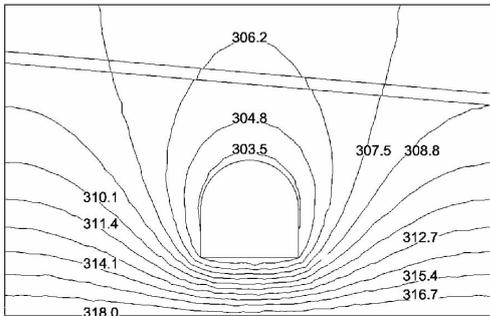


图3 无裂隙水作用下围岩断面温度分布图

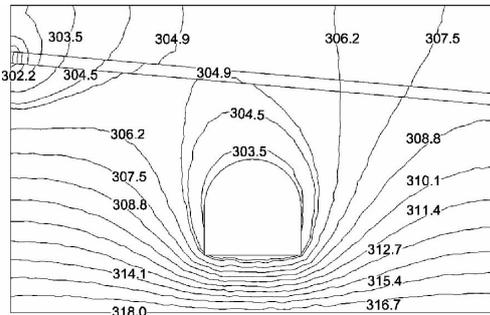


图4 $v = 2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 作用下的围岩断面温度分布图

3.2 裂隙水流速度对围岩体温度场分布的影响

改变裂隙水渗流速度($v = 2 \times 10^{-6}, 2 \times 10^{-8}, 2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$),分别取其 $x = 80 \text{ m}$ 处断面,得到的巷道围岩体温度场分布如图6~图8所示.对比图4和图6~图8可知:相同断面的同一位置,裂隙水渗流速度为 $v = 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 时,裂隙水流温度较低,围岩温度相对较低.在研究区域范围内,渗流速度为 $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 时,裂隙水温度为 304.8 K ;渗流速度为 $2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 时,裂隙水温度为 308.8 K ,较前者温度增大了近 $4 \text{ }^\circ\text{C}$;渗流速度仍逐渐减小,裂隙水温度变化已较小.等值线图中,裂隙带上下的围岩温度在渗流速度为 $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 时相对较低,而渗流速度愈小,同一位置的围岩温度相对较大;对比图7和图8知在渗流速度足够小时,巷道围岩出现相对较小的温度变化.这表明:在研究区域内,不同的裂隙水渗流速度带走了不同的围岩体热量,

渗流速度愈大,则裂隙水流温升愈小,但是带走围岩的热量愈多,从而使裂隙带附近围岩的温度愈低.故裂隙水与围岩体的温度场耦合作用受到裂隙水渗流速度的影响,伴随着渗流速度的减小,温度场的平衡区范围逐渐缩小.

取 $x = 70 \text{ m}, z = 13 \text{ m}, y = 0 \sim 25 \text{ m}$ 的直线,对比其在不同渗流速度下的温度变化,如图9所示.伴随着裂隙水渗流速度的增大,同一围岩位置的温度逐渐减小,温差约为 $2 \text{ }^\circ\text{C}$,同时表明:渗流速度越大,带走围岩体的热量越多,从而使巷道围岩温度越低.当渗流速度减小到 $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 乃至更小时,渗流速度对巷道围岩体温度场分布的影响是微小的.

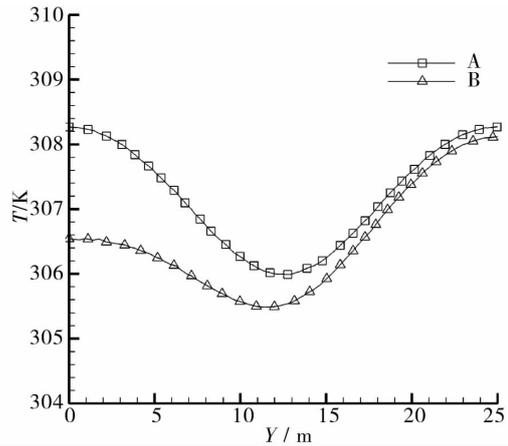


图5 截线上温度对比图

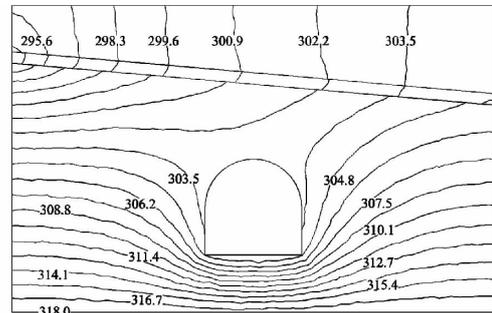


图6 $v = 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 作用下的围岩断面温度分布图

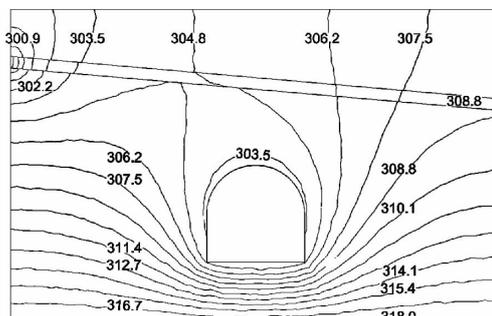


图7 $v = 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 作用下的围岩断面温度分布图

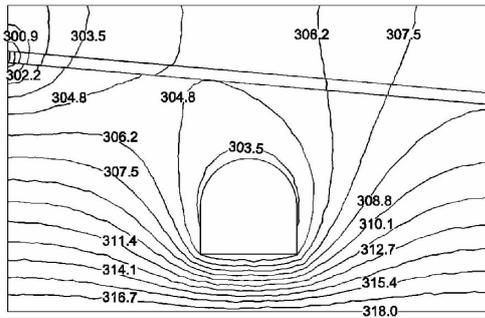


图8 $v=2 \times 10^{-9}$ m/s作用下的围岩断面温度分布图

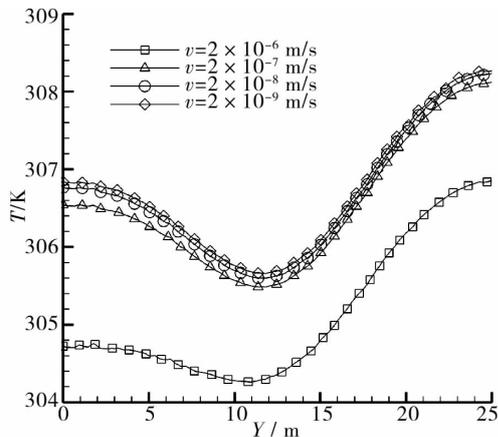


图9 裂隙水渗流速度对围岩温度的影响

4 结论

1) 建立裂隙水渗流场、温度场与围岩体温度场及两者温度场耦合的物理模型和数学模型,通过数值模拟与分析,可以揭示裂隙水作用下的巷道围岩体分布形式、裂隙水及其渗流速度对围岩温度场分布的影响。

2) 裂隙水的存在对围岩体温度场分布有重要影响。裂隙水的迁移伴随着热量的交换,从而改变了围岩体的温度场分布形式。在裂隙带附近,围岩体温度场的改变更为显著。沿着裂隙水流动方向,裂隙水流温度升高,水、岩温差减小,水、岩热交换逐渐减弱,围岩温度降低值也逐渐减小。

3) 裂隙水的渗流速度对裂隙水和围岩体温度场分布都有着重要影响。渗流速度逐渐减小,沿着裂隙水流动方向,裂隙水温度逐渐升高,围岩温度则相对逐渐升高,同时裂隙水与围岩体的温度场平衡区范围逐渐缩小。当渗流速度大于 2×10^{-8} m/s 时,渗流速度的变化对巷道围岩体温度场分布有着显著的影响;当渗流速度小于 2×10^{-8} m/s 时,渗流速度的变化对巷道围岩体温度场分布的影响是微小的。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 李地元,李夕兵,张伟. 裂隙岩体的流固耦合研究现状与应用展望[J]. 水利与建筑学报, 2007, 5(1): 1-4.
- [3] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1995.
- [4] 作彦卿,张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1995.
- [5] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005.
- [6] 宋晓晨,徐卫亚. 裂隙岩体渗流概念模型研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 226-232.
- [7] Kolditz O. Modeling flow and heat transfer in fracture rocks: conceptual model of a 3-D deterministic fracture network[J]. Geothermic, 1995, 24(3): 451-470.
- [8] Kohl T, Evans K F, Hopkirk R J, et al. Coupled hydraulic, thermal and mechanical considerations for the simulation of hot dry rock reservoirs[J]. Geothermic, 1995, 24(3): 345-359.
- [9] 赵坚. 岩石裂隙中的水流-岩石热传导[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 119-123.
- [10] 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, 2003(2): 18-20.
- [11] 黄涛,杨立中. 隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 554-558.
- [12] 赵阳升,王瑞凤,胡耀青,等. 高温岩体地热开发的块裂介质固流热耦合三维数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1751-1755.
- [13] 张树光,李志建,徐义洪,等. 裂隙岩体流-热耦合传热的三维数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2507-2511.
- [14] 张树光,李永靖. 裂隙岩体的流固耦合传热机理及其应用[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2012.
- [15] 赵延林,王卫军,曹平,等. 不连续面在双重介质热-水-力三维耦合分析中的有限元数值实现[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 638-644.
- [16] 赵阳升,杨栋,冯增朝,等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1321-1328.
- [17] 王瑞凤,赵阳升,胡耀青. 高温岩体地热开发的固流热耦合三维数值模拟[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(3): 275-278.
- [18] ANSYS. FLUENT 6.3 User's Guide[Z]. ANSYS, 2006.