DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.31

裂隙参数对岩体水流-传热温度影响的数值模拟分析

高俊义
(延安大学 建筑工程学院,陕西 延安 716000)

摘 要:在岩体多场耦合中,裂隙岩体的温度场一直是国内外学者研究的热点问题。基于裂隙岩体概念模型,应用3DEC程序计算不同裂隙参数下岩体的温度场、裂隙出水口水温的变化特征。结果表明:裂隙相同进水温度对岩体温度场影响微弱,进水温度高的裂隙主导岩体温度场,裂隙进水温度对模型达到稳态所需要的时间影响较小;裂隙水流速度越大和开度越大,则岩体相同高度处温度越高;端裂隙水流速度的减小和开度的减小延长了模型达到稳态所需要的时间;由于两条端裂隙的边际效应,使其参数对岩体温度场起主导作用;裂隙水温、流速、开度对岩体温度场影响的大小排序为水温>流速>开度。

关键词:裂隙参数;水流-传热;岩体温度;数值模拟
中图分类号:TV213;P641 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-643X(2019)06-0206-06

Numerical simulation analysis of the influence of fracture parameters on water flow and heat transfer temperature in rock mass

GAO Junyi
(*Architectural Engineering Institute, Yan'an University, Yan'an* 716000, *China*)

Abstract: The temperature field of fractured rock mass in the multi-coupling field is a hot topic. The temperature field and outlet temperature of fractured rock mass were calculated under different fractured parameters by 3DEC program based on the conceptual model of fractured rock mass, and the results showed that the same inlet temperature of the fracture has a weak influence on the temperature field of the rock mass. The temperature field of rock mass is dominated by the high fractures intake temperature, and the time required for the model to reach steady state is slightly affected by the intake temperature of fractures. The higher the water flow velocity and opening of the fracture, the higher the temperature of the rock mass of the same height. The reduction of the water flow velocity and the opening of the end fracture extend the time required for the model to reach steady state. The parameters of the two end fractures play a leading role in the temperature field of rock mass due to the marginal effect, and the influence on rock mass temperature field from high to low ranks: fracture water temperature > water flow velocity > fracture opening.

Key words: fracture parameters; water flow and heat transfer; rock mass temperature; numerical simulation

1 研究背景

裂隙岩体是天然岩体在构造、风化和卸荷等作用下产生大量裂隙的岩体。高地应力、高地温和高渗透水压力是深部岩体所处环境的基本特征,考虑到能够安全高效地开采地下深部资源,复杂裂隙岩体温度场的研究显得非常必要。

数十年来,对裂隙岩体热流耦合方面的研究主要集中在数学解析分析和数值模拟分析方面。Zhang等[1]构建了单裂隙岩体渗流-传热过程的控制方程。Rutqvist等[2]通过岩石与裂隙之间相互作用的均衡关系构建了热流耦合的数学模型。诸多学者采用数值程序构建了单裂隙岩体水流-传热模型,求解了裂隙岩体水热耦合作用的温度场[3-7],然而研究仅仅局限于单裂隙岩体层面,而对多裂隙岩体水流-传热模型未作研究。许增光等[8]构建了两条正交裂隙岩体水流-传热模型,在岩石温度和裂隙水温一定的前提下,仅仅计算了不同历时耦合作用的水流温度场。高

收稿日期:2019-05-07; **修回日期**:2019-07-22
基金项目:延安大学博士科研启动项目(YDBK2018-08)
作者简介:高俊义(1984-),男,山西吕梁人,博士,讲师,主要从事岩土工程研究与教学工作。

俊义等[9]、路威等[10]采用数值程序和数学解析构建了多裂隙岩体水流 – 传热模型,在热源位置一定的条件下,求解了裂隙岩体的温度场,而对裂隙的位置效应,以及裂隙水温、水流速度和开度对其温度场影响未作研究。部分学者开展了裂隙岩体在地热井参数、地热田成因机制以及地热流与深部地温分布特征和导热 – 对流型温度场垂向渗透系数的计算研究[11-14],同时开展了地热系统热固流耦合数值模拟、地热对井系统渗流传热耦合的等效模拟、高温地热开采热流固耦合模型和地热开采的裂隙渗透耦合模型研究[15-18],而对不同多裂隙参数对岩体水流 – 传热温度影响的复杂模型未作研究。综上所述,裂隙岩体热流耦合在地热开采领域,已经取得了一定的成果,而关于不同裂隙参数对岩体水流 – 传热温度影响的复杂模型的探究较少。然而实际的地热开采过程与裂隙参数息息相关,不同开采井(裂隙/断层)参数对岩体温度场的影响直接关系到地热开采的效率和安全性,基于此,开展裂隙参数对岩体水流 – 传热温度影响的研究工作显得尤为重要。

本文首先采用三维离散元程序 3DEC(three-dimensional distinct element code)建立 1m 间隔的 3 条竖裂隙岩体水流 – 传热模型;然后,在不同裂隙进水温度、不同裂隙水流速度和不同裂隙开度条件下,计算不同裂隙进水温度、不同裂隙水流速度和不同裂隙开度对岩体温度场及裂隙出水口水温的影响;最后,由计算结果对比分析,揭示了不同裂隙参数对岩体温度场及裂隙出水口水温影响的规律。研究结果可为地热的高效开采中竖井参数的优先选取提供参考价值。

2　数值模型的构建

2.1　模型的基本假定

本模型计算时假定:(1)热传导发生在固体与液体中。(2)忽略流体在固体中的渗透性,饱和液体在裂隙内流动,裂隙中的水流符合立方定律。(3)当裂隙内液体温度与固体接触壁面温度存在温差时,两者发生热流耦合作用。其数学模型如下:

① 饱和裂隙液体流量为:

$$q_f = -b\frac{\rho g e^3}{12\mu}J_f \tag{1}$$

式中:q_f为饱和液体流量,m^3/s;b 为裂隙宽度,m;ρ 为液体的密度,kg/m^3;g 为重力加速度,m/s^2;μ 为液体的动力黏度,Pa·s;J_f 为水力梯度;e 为裂隙开度,m。

② 固体的热能守衡方程为:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla \cdot q_s^T - A_s h(T_f - T_s) = 0 \tag{2}$$

式中:ρ_s 为固体的密度,kg/m^3;c_s 为固体的比热,J/(g·℃);T_s 为固体的温度,℃;q_s^T 为固体的热流密度,W/s^2;T_f 为液体的温度,℃;t 为固体的热传导时间,s;A_s 为每单位体积固体的接触面积,m^2;h 为固体与液体之间的对流换热系数,$W/(m^2 \cdot ℃)$。

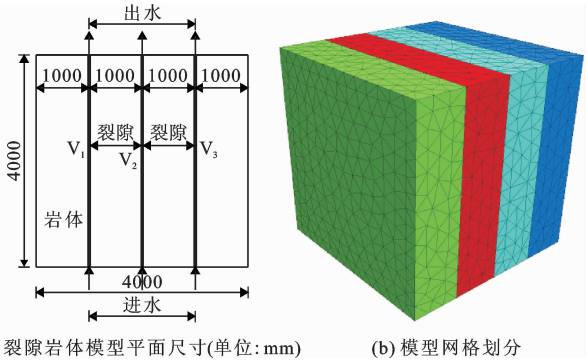
③ 裂隙液体的热能守衡方程为:

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \nabla \cdot q_f^T + \rho_f c_f q^f \cdot \nabla T_f + A_f h(T_f - T_s) = 0 \tag{3}$$

式中:ρ_f 为液体的密度,kg/m^3;c_f 为液体的比热,J/(g·℃);q_f^T 为液体的热流密度,W/s^2;q^f 为液体的单宽流量,m^2/s;A_f 为每单位体积液体的接触面积,m^2。

2.2　算例模型

假定某地水文地质条件为裂隙发育较好的岩体、地下水较为丰富,而且地热储量较大,具有很大的开采潜力。考虑水热性地热(地下 100 ~ 4 500 m),低温地热资源(<90℃),地热从竖井里抽取的过程中,涉及到竖井(裂隙/断层)的有关参数对裂隙岩体温度场的影响,本文假定算例模型尺寸为:4 000 mm(高度)×4 000 mm(宽度)×4 000 mm(厚度),边界条件为除裂隙进水单元和出水单元外,其他侧面均为绝热。不同裂隙模拟地热开采的竖井,模拟裂隙岩体的地热从下到上的抽取顺序,水流分别从模型下部各裂隙流进,从模型上部相应各裂隙流出。假设岩石与裂隙水初始水温为 20℃,裂隙参数对岩体水流 – 传热温度影响的数值模型尺寸和网格划分如图 1 所示。文中端裂隙均指 V_1 和 V_3,中裂隙均指 V_2,由于 V_1 和 V_3 成对称状态,故文中裂隙出水口温度 – 时间曲线以 V_1 为代表进行研究。



(a) 裂隙岩体模型平面尺寸(单位:mm)　　(b) 模型网格划分

图 1　裂隙岩体模型尺寸及其网格划分

2.3 参数与工况

数值程序模拟所选取的有效地质材料的热物理参数如表1所示。其中岩石与水的对流换热系数为20W/(m^2·℃)。

表1 岩石与水的热物理参数

材料	密度/(kg·m^{-3})	比热/(J·(g·℃)$^{-1}$)	热传导系数/(W·(m·℃)$^{-1}$)
岩石	2 700	0.8	2.3
水	1 000	4.2	0.6

地热从竖井里抽取的过程中,涉及到竖井的有关参数对裂隙岩体温度场的影响,开展3种计算工况,其中,工况1在裂隙进水速度和裂隙开度相同、岩体下部裂隙进水温度分别为60℃和50℃的条件下,计算分析裂隙进水温度对岩体温度场的影响;工况2在裂隙进水温度和裂隙开度相同,裂隙水流速度分别为1和0.5 mm/s的条件下,计算分析裂隙进水速度对岩体温度场的影响;工况3在裂隙进水温度和裂隙进水速度相同,裂隙开度分别为1.5和1 mm的条件下,计算分析裂隙开度对岩体温度场的影响。其中裂隙V_1和V_3设置相同的温度、水流速度和开度。分别设计在不同位置裂隙进水温度、裂隙进水速度和裂隙开度的条件下,计算分析各参数对岩体温度场的影响。数值模拟工况如表2所示。

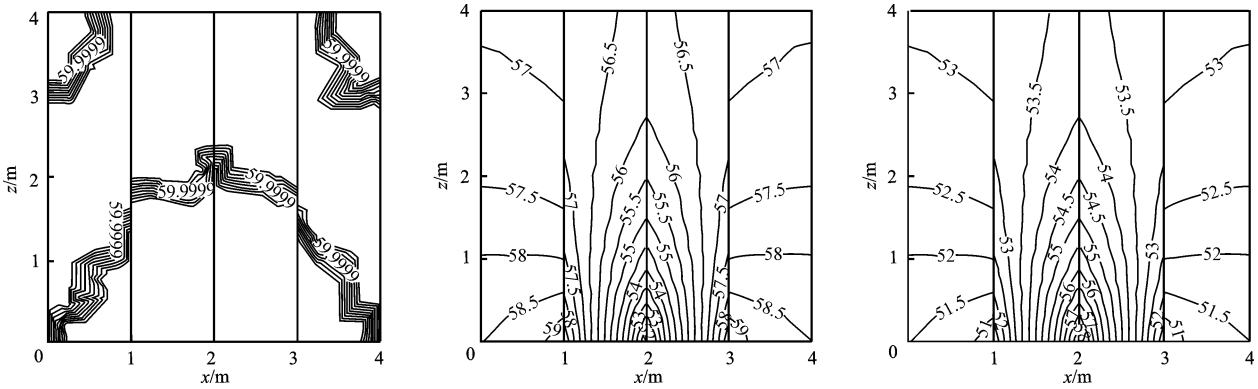
表2 数值模拟工况

计算工况	裂隙进水温度/℃		裂隙水流速度/(mm·s^{-1})		裂隙开度/mm	
	V_1(V_3)	V_2	V_1(V_3)	V_2	V_1(V_3)	V_2
1	60 60 50	60 50 60	1		1.5	
2	60		1 0.5	0.5 1	1.5	
3	60		1		1.5 1	1 1.5

3 结果分析与讨论

3.1 裂隙进水温度对岩体温度场的影响

在不同的裂隙进水温度下,且模型达到稳态时,岩体温度场如图2所示。



(a) 裂隙进水温度相同 (b) 中裂隙进水温度较低 (c) 端裂隙进水温度较低

图2 不同裂隙进水温度下岩体稳态温度场(单位:℃)

由图2(a)知,在相同的裂隙进水温度(60℃)下,且模型达到稳态时,岩体温度分布均匀,岩体温度(59.9999℃)接近裂隙进水温度(60℃),说明相同的裂隙进水温度对岩体温度分布影响较小。由图2(b)知,在中裂隙进水温度较低时,中裂隙温度从下到上呈现出越来越高的态势,端裂隙温度从下到上呈现出越来越低的态势,这是因为端裂隙进水温度(60℃)高于中裂隙进水温度(50℃),端裂隙水流与内侧岩石对流换热后把热量传到中裂隙处的缘故。由于端裂隙V_1和V_3的阻滞作用,使中裂隙V_2处等温线连续且呈现出倒"V"字型分布,端裂隙处等温线断续且呈现出内侧接近竖直线分布,外侧接近水平线分布。由图2(c)知,在端裂隙进水温度较低时,中裂隙温度从下到上呈现出越来越低的态势,端裂隙温度从下到上呈现出越来越高的态势,这与图2(b)中的现象正好相反,这是因为端裂隙进水温度(50℃)低于中裂隙进水温度(60℃),中裂隙水流与内侧岩石对流换热后将热量传到端裂隙处的缘故。岩体相同高度处,中裂隙处温度较高,端裂隙处温度较低,这是由于相同裂隙水流下,裂隙水温度越

高,裂隙水与岩石的对流换热作用越强的缘故。

在不同的裂隙进水温度下,裂隙出水口时间 - 温度曲线如图 3 所示。

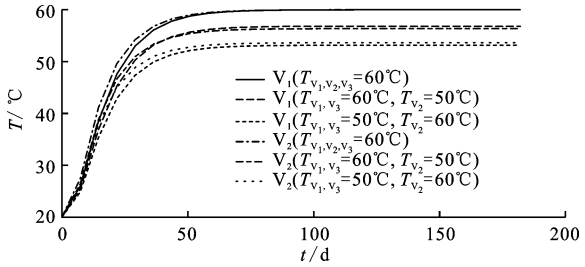
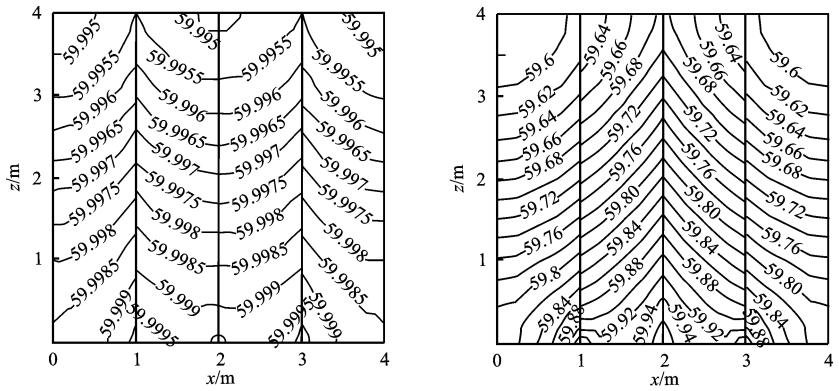


图 3　不同裂隙进水温度下裂隙出水口时间 - 温度曲线

由图 3 可知,0 ~ 10 d 裂隙出水口水温上升幅度较小,10 ~ 50 d 裂隙出水口水温上升幅度较大,50 d 后裂隙出水口水温已达到稳态。模型达到稳态后,在裂隙进水温度(60℃)相同时,裂隙出水口温度最高,接近裂隙进水口温度(60℃);在端裂隙进水温度较低时,裂隙出水口温度最低,与裂隙进水口温度(60℃)相差 8℃,其实这是裂隙进水温度两低(50℃)一高(60℃)低于两高(60℃)一低(50℃)的原因;在中裂隙进水温度较低时,裂隙出水口温度介于前两者之间。由图 2 和 3 可知,进水温度高的裂隙主导岩体温度场,并且裂隙进水温度对模型达到稳态所需要的时间影响较小,在实际工程中为提高热采效率,工程技术人员应注意竖井水温对岩体温度场和系统达到稳态所需时间的影响。

3.2　裂隙水流速度对岩体温度场的影响

在不同的裂隙水流速度下,且模型达到稳态时,岩体温度场如图 4 所示。



(a) 中裂隙进水速度较小　　(b) 端裂隙进水速度较小

图 4　不同裂隙水流速度下岩体稳态温度场(单位:℃)

由图 4(a)可知,在中裂隙进水速度较小,且模型达到稳态时,岩体的相同高度处,中裂隙处水温较低,端裂隙处水温较高,这是由于裂隙水流速度越小,则相同裂隙进水温度传输热量更慢的缘故。

由图 4(a)与 2(a)对比可知,即使中裂隙进水速度减小 50%,整个岩体温度场接近相同裂隙水流速度时的岩体温度场,由此说明中裂隙水流速度减小对岩体温度场影响较小。

由图 4(b)与 4(a)对比可知,端裂隙进水速度减小 50%,岩体温度场发生明显改变,即中裂隙等温线由“U”字型变为倒“V”字型分布,端裂隙等温线由倒“V”字型变为直线型分布,由此说明端裂隙水流速度减小对岩体温度场影响较大。由于裂隙水流速度越大,则裂隙水流传输热量越快,岩体相同高度处温度越高。

在不同裂隙水流速度下,裂隙出水口时间 - 温度曲线如图 5 所示。

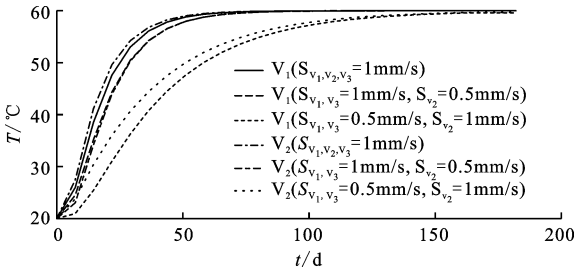
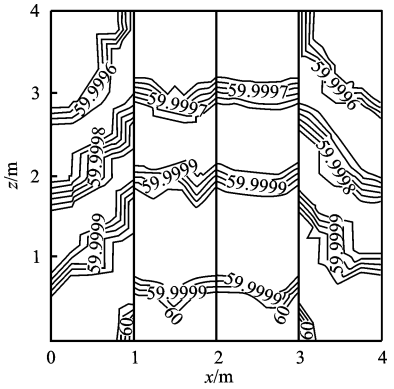


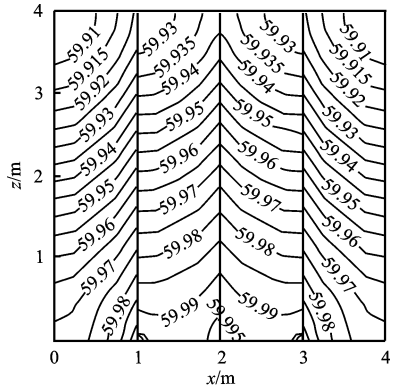
图 5　不同裂隙水流速度下裂隙出水口时间 - 温度曲线

由图 5 可知,裂隙水流速度相同和中裂隙水流速度较小两种工况下,裂隙出水口水温约 50 d 后达到稳态,端裂隙水流速度减小 50%,裂隙出水口水温需要 150 d 达到稳态,约是前两者达到稳态所需时间的 3 倍。结合图 4 进一步证明,端裂隙水流速度减小对岩体温度分布影响较大,即端裂隙水流速度减小延长了模型达到稳态所需要的时间。由图 4 和 5 知,水流速度越大,则裂隙水流传输热量越快,岩体相同高度处温度越高,端裂隙水流速度减小延

长了模型达到稳态所需要的时间,在实际工程中为提高热采效率,工程技术人员应注意竖井抽水速度的合理选取。



(a) 中裂隙开度较小



(b) 端裂隙开度较小

图6 不同裂隙开度下岩体稳态温度场(单位:℃)

由图6(a)与图2(a)对比可知,即使中裂隙开度减小33%,且模型达到稳态时,岩体温度场接近相同裂隙开度时的岩体温度场,由此说明中裂隙开度减小对岩体温度场影响较小;图6(b)与图6(a)对比可知,端裂隙开度减小33%,岩体相同高度处,中裂隙处温度高于端裂隙处温度,究其原因是裂隙开度减小意味着裂隙水流量减小,单位流量所携带的热量减小,继而裂隙水与其两侧岩石对流换热量减小的缘故。

在不同裂隙开度下,裂隙出水口时间-温度曲线如图7所示。

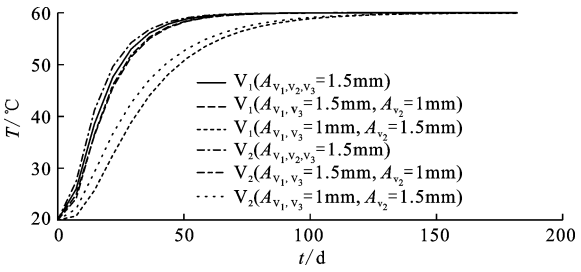


图7 不同裂隙开度下裂隙出水口时间-温度曲线

由图7可知,相同裂隙开度和中裂隙开度减小两种工况下,裂隙出水口水温约50 d后达到稳态,端裂隙开度减小33%,裂隙出水口水温需要130 d达到稳态,约是前两者达到稳态所需时间的2.6倍。结合图6进一步证明,端裂隙开度减小对岩体温度场影响较大,即端裂隙开度减小延长了模型达到稳态所需要的时间。由图6和7可知,裂隙开度越大,岩体相同高度处温度越高,端裂隙开度减小延长了模型达到稳态所需要的时间,在实际工程中为提高热采效率,工程技术人员应注意竖井开度的合理选取。

3.3 裂隙开度对岩体温度场的影响

在不同裂隙开度下,且模型达到稳态时,岩体温度场如图6所示。

文献[11]仅仅开展了抽水井落程、渗透系数与影响半径、供暖潜力方面对地热井参数的评价,文献[16]仅仅考虑了离散裂隙网络、对井和岩石之间的渗流-传热过程耦合,而均未考虑裂隙的位置效应,以及裂隙水温、水流速和开度对其温度场的影响,本文的研究填补了这个空白。

4 结 论

(1)裂隙相同进水温度对岩体温度场影响较小,进水温度高的裂隙主导岩体温度场,裂隙进水温度对模型达到稳态所需要的时间影响较小。

(2)由于裂隙水流速度越大,则裂隙水流传输热量越快,岩体相同高度处温度越高,端裂隙水流速度减小延长了模型达到稳态所需要的时间。

(3)裂隙开度越大,则岩体相同高度处温度越高,端裂隙开度减小延长了模型达到稳态所需要的时间。

(4)由于两条端裂隙的边际效应,使端裂隙进水水温、流速、开度对岩体温度场起主导作用。裂隙水温、流速、开度对岩体温度分布影响大小排序为水温>流速>开度。

参考文献:

[1] ZHANG K, WOODBURY A D. A Krylov finite element approach for multi-species contaminant transport in discretely fractured porous media[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(7): 705-721.

[2] RUTQVIST J, WU Y S, TSANG C F, et al., A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow heat

transfer and deformation in fractured porous rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002,39(4):429 - 442.
[3] 刘 波,金爱兵,高永涛,等. 基于 Morris 法的单裂隙岩体温度场参数灵敏度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1):152 - 157.
[4] 龙 伟,童富果,李 彪. 裂隙岩体水 - 岩耦合传热研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(3):28 - 31.
[5] 陈桂义,张登春,邹声华,等. 裂隙水作用下巷道围岩体温度场的数值模拟[J]. 矿业工程研究,2014, 29(2):24 - 28.
[6] 郑 鑫,郭 春,徐建峰. 单裂隙岩体的热流固耦合数值模拟与分析[J]. 现代隧道技术,2018,55 (S2) :1263 - 1268.
[7] 胡 剑,苏 正,吴能友,等. 增强型地热系统热流耦合水岩温度场分析[J]. 地球物理学进展,2014,29(3):1391 - 1398.
[8] 许增光,杨 荣,柴军瑞. 考虑岩体与裂隙水流热量交换作用的温度场有限元数值分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(4):69 - 72 + 78.
[9] 高俊义,项彦勇. 裂隙岩体交叉水流 - 传热对温度影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S2):598 - 604.
[10] 路 威,秦 景,朱俊臣. 裂隙岩体水流 - 传热模型的理论计算和参数分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(6):1396 - 1401 + 1420.
[11] 吴爱民,马 峰,王贵玲,等. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报,2018,39(5):523 - 532.
[12] 汪新伟,王婷灏,张 瑄,等. 太原盆地西温庄地热田的成因机制[J]. 地球科学,2019,44(3):1042 - 1056.
[13] 雷晓东,胡圣标,李 娟,等. 北京平原区西北部大地热流与深部地温分布特征[J]. 地球物理学报,2018, 61(9):3735 - 3748.
[14] 刘长吉,陈建生,白兰兰,等. 裂隙岩体地区导热 - 对流型温度场垂向渗透系数的计算及分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007, 26(4):780 - 786.
[15] 唐志伟,米倡华,张学峰,等. 增强型地热系统热固流耦合数值模拟与分析[J]. 北京工业大学学报,2016, 42(10):1560 - 1564.
[16] 李馨馨,李典庆,徐 轶. 地热对井系统裂隙岩体三维渗流传热耦合的等效模拟方法[J]. 工程力学,2019,36(7):238 - 247.
[17] 张 伟,孙 江,曲占庆. 高温地热开采热流固耦合模型及综合评价方法[J]. 地球物理学进展,2019,34 (2):668 - 675.
[18] 方艺蛟,刘卫群,王婴龙. 地热开采的裂隙渗透 T - H - M 耦合模型及模拟研究[J]. 可再生能源,2017,35(1):119 - 125.

(上接第 205 页)

[14] 张 雷,王宁伟,景立平,等. 电渗排水固结中电极材料的对比试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(9):1 - 11.
[15] 房营光,朱忠伟,莫海鸿,等. 碱渣土的振动排水固结特性试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(1):43 - 47.
[16] 丁 智,张 涛,魏新江,等. 排水条件对不同固结度软黏土动力特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(5):893 - 899.
[17] 苗永红,李瑞兵,陈 邦. 软土的振动排水固结特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(7):1301 - 1306.
[18] 沈 林,刘成彬,吴国强. 振动液化排水技术在地基处理工程中的应用[J]. 施工技术,2018,47(增):172 - 174.
[19] 徐华荣,刘 刚. 基于振动排水固结试验的软土动力特性研究[J]. 城市勘测,2019(2):196 - 198 + 203.
[20] 林雪松,陈殿强,王来贵. 尾矿砂二维非饱和渗流的实验研究[J]. 实验力学,2018,33(3):435 - 441.
[21] 林雪松,陈殿强,王来贵. 非饱和尾矿砂抗剪强度参数分布与安全影响[J]. 中国安全科学学报,2017,27(4):116 - 121.