

核废料处置库近场岩石热应力半解析方法研究^{*}

张勇^{1,2,3}, 刘晓丽^{1,3}, 满轲^{4,5}

(1.清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点试验室,北京 100084; 2.神华集团有限责任公司
科技发展部,北京 100011; 3.煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 100011;
4.核工业北京地质研究院,北京 100029; 5.中核高放废物地质处置评价技术重点试验室,北京 100029)

摘 要:针对地下核废物处置库近场环境为饱和裂隙岩体时的情况,提出了一种由分布热源、饱和稀疏裂隙和岩石构成的简化概念模型,根据 Goodier 提出的热弹性位移势,采用拉普拉斯变换、格林函数法和数值积分等方法,计算求解概念模型中处置库近场岩石的温变热应力。并以实际算例分析分布热源作用下稀疏裂隙岩体受三维水流-传热过程影响的热应力特征以及裂隙水流速和分布热源间距对裂隙岩体热应力分布的影响。结果表明,裂隙水的流动传热作用将处置库近场岩石的热量向下游传递,从而降低了近场岩石的温度,减小了近场岩石中的热应力,裂隙水流速越快,对近场岩石中热应力的影响越明显;热源间距越小时,处置库近场岩石的热应力越大;当热源间距小于一定值时,不同热源间传热作用的叠加将使处置库近场岩石的热应力峰值急剧增大。

关键词:核废料处置库;裂隙岩体;饱和水流;三维传热;热应力

中图分类号:O319.56

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)03-0741-07

A Semi-analytical Analysis on Rock Thermal Stress for Nuclear Waste Repository Near Field

Zhang Yong^{1,2,3}, Liu Xiaoli^{1,3}, Man Ke^{4,5}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R. China;
2. Department of Science and Technology Development, Shenhua Group Co. Ltd., Beijing 100011, P.R. China;
3. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100011, P.R. China; 4. Division of Environment Engineering, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, P.R. China; 5. Key Laboratory of China National Nuclear Corporation on High Level Radioactive Waste Geological Disposal, Beijing 100029, P.R. China)

Abstract: Taking the nuclear waste repositories as the subject of study, a simplified model, taking into account of distributed heat source and saturated sparsely fractured rocks, is proposed for heat transfer-induced thermal stress in sparsely fractured rocks, and a semi-analytical method for thermal stresses of the simplified model is developed. The Goodier's thermoelastic displacement potential, Laplace transform, Green function and numerical integration are used in the semi-analytical method. Numerical examples are provided for the characteristics of heat transfer-induced thermal stress in sparsely fractured rock and the sensitivities to distance between the heat sources. The calculations

^{*} 收稿日期:2017-12-11(修改稿)

作者简介:张勇(1986-),男,湖南常德人,博士,主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail:zhangyong@bjtu.edu.cn

通讯作者:刘晓丽(1978-),男,山东泰安人,博士,副教授,主要从事水岩作用及地下工程方面的科研和教学工作。

E-mail:xiaoli.liu@tsinghua.edu.cn

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB035903,2011CB710606);国家自然科学基金优秀青年基金(51522903);国家自然科学基金(51479094,U1361103,51379104);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题(2015-KY-04,2016-KY-05)

show the following observations; the water flow in the fractures may decrease the rate of temperature rise in regions close to the distributed heat source and increase the rate of temperature rise in regions downstream away from the distributed heat source, and the influence on temperature, thermal stresses is more significant when the fracture water flow velocity becomes larger. In the near field of the nuclear waste repository, the normal primary temperature stresses increase as the distance between the heat sources decreases. If the distance between the heat sources decreases is too small, the peak of normal primary temperature stresses will be significantly enhanced as the heat transfer superposition of different heat sources.

Keywords: nuclear waste repository; fractured rocks; saturated water flow; 3D heat transfer; thermal stress

0 引言

高放射性核废物地质处置的目的在于实现核废物与人类和生态环境之间的长时间隔离,而处置过程中的安全性和合理性则取决于地下处置库以及其近、远场地质系统的综合阻隔能力与协调性。与一般地下工程相比,核废物处置库不仅要求在施工和运营期间地下工程能稳定,而且要求在封闭充填后长时间受温度与辐射的影响时不会出现功能失效。因此,核废料处置库的性能不仅受近场围岩的高应力场影响,还与温度场的分布有关。处置库近场围岩温度的升高会引起热膨胀、矿物脱水、地下水运动的改变、高放废物与地下水的作用增强等,这些变化会降低围岩的力学稳定性,减小近、远场地质系统阻滞和稀释核素迁移的能力,可能导致热力诱发的核素泄露。处置库近场围岩通常会含有原生及次生裂隙,裂隙水渗流与温度场、应力场之间的相互作用是影响岩体的稳定性和核素的迁移的重要因素^[1]。一方面,裂隙水的渗流运动促成了岩体与裂隙水体之间发生热传导的热量传递与交换,进而使核废料处置库近场岩体内的温度场得以重新分布;另一方面,温度环境的改变会影响近场岩体的物理力学性质,而且温度的变化将产生热应力作用,从而引起岩体原有应力场的变化。

目前,国内外学者对裂隙岩体中的多场耦合问题进行了大量研究,主要以数值模拟和试验方法为主。Tortike 等^[2-3]为了模拟石油的热采过程,建立了三维弹塑性水-热-力耦合模型,并采用有限元法进行求解,得到了油砂的应力分布、饱和度和岩体中的温度分布。Onofrei 等^[4]采用近似实际情况的物理模型试验来研究泥岩中核废料处置库工程屏障的水-热-力多场耦合现象,同

时使用 COMPASS (Code for Modelling Partly Saturated Soil) 程序模拟非饱和岩体的假设模型,探讨水-热-力多场耦合问题;在数值模拟过程中采用的参数均参考实际的核废料处置库工程屏障,使其符合实际情况。该研究将所观察的物理试验结果和数值模拟结果相互比较,提出了泥岩中核废料处置库工程屏障水-热-力耦合模型的理论概念和方法,以评估在泥岩中建设工程屏障的可行性。Gutierrez 等^[5]采用数值方法模拟了冷水注入油气层裂隙岩体时的水-热-力三场耦合过程,并分析了注水过程引起裂隙结构的变化及对石油开采效率的影响。Rutqvist 等^[6]在 Kamaishi 矿山中置入加热器来现场模拟核废料处置库的情况。试验现场主要为花岗闪长岩的裂隙岩体,另外还有少量膨润土。研究分析了该条件下的温度-应力-水力多场耦合 (THM) 现象,并采用有限元程序 AECB、CLAY、KIPH、LBNL 与现场观测结果作出比较。现场试验中发现,高温造成了大量水蒸气的产生,而水蒸气的流动使得泥岩缓冲材料产生膨胀,同时,缓冲材料周围的岩体也产生了热膨胀现象。根据程序模拟的温度场分布、膨胀土中地下水流体及岩体应力分布的结果与现场试验实测结果接近,表明数值模拟结果有较高的可信度。Ghassemi 等^[7]采用不连续位移法研究了地热开发过程中的流-固-热三场耦合作用,并分析了岩体中裂隙水压力和热应力对裂隙开度的影响。Zhou 等^[8]以地热开发为背景,考虑冷水注入单裂隙地热储层岩体的问题,提出了单裂隙岩体三维水流-传热过程中的裂隙水压力和热应力的计算方法,并分析了注水和抽水过程对岩石应力及裂隙开度等的影响。DECOVALEX 国际合作计划系统地研究高放射性核废料地质处置问题中的基础科学问题,主要内容是地质环境

中的水-热-力-化学多场耦合作用及其对高放射性核废料最终处置场址近场围岩的结构和环境安全的影响,研究重点是水-热-力-化学多场耦合作用的数学模型、数值计算方法、室内试验以及大型现场试验的研究、发展与验证^[9-11]。

针对地下核废物处置库近场环境为饱和裂隙岩体时的情况,提出了一种由分布热源、饱和稀疏裂隙和岩石构成的简化概念模型,根据 Goodier 提出的热弹性位移势,结合笔者之前研究的稀疏裂隙岩体三维饱和水流-传热模型中温度场的半解析计算方法^[12],采用拉普拉斯变换、格林函数法和数值积分等方法,计算求解概念模型中处置库近场岩石的温变热应力。并以实际算例分析分布热源作用下稀疏裂隙岩体受三维水流-传热过程影响的热应力特征,以及裂隙水流速和分布热源间距对裂隙岩体热应力分布的影响。

1 计算模型及求解

1.1 概念模型与控制微分方程

根据甘肃北山预选区的水文地质条件^[13-14],

考虑瑞典的 KBS-3 概念设计(如图 1),建立如图 2 所示的饱和稀疏裂隙岩体中地下核废料处置库的概念模型。该模型地质体为花岗岩,包含 3 条水平处置巷道。考虑到稀疏裂隙岩体中大的裂隙或断裂对裂隙岩体地区渗流场分布的形成起主导作用,在处置巷道下部设置两条大裂隙,而将岩体等效为连续介质。裂隙边界可为任意形状,裂隙水无相变,流场已知,且为稳态层流,裂隙计算长度均为 L_h ,裂隙 1 和裂隙 2 所在平面分别为 A_1 和 A_2 ,其裂隙水的单宽流量分别为 q_1 和 q_2 ;裂隙水质量密度为 ρ_w ,比热为 c_w 。假设岩石不透水,所在区域 Ω 无限大,岩石为均匀的各向同性弹性体,不考虑惯性力,岩石变形引起的裂隙开度变化不影响裂隙水流动,并忽略温度场变化而引起的岩石物理力学性质的变化。岩石质量密度为 ρ_r ,比热为 c_r ,岩石热传导系数为 λ_r ,剪切模量为 μ_r ,线性热膨胀系数为 α_r 。岩石内部存在分别沿 Γ_1 、 Γ_2 和 Γ_3 分布的线热源,其热流集度为 p_r 。裂隙水和岩石的初始温度为 T_0 。 l_1 和 l_2 分别处于裂隙 1 和裂隙 2 的中线位置,为模型中的观察线。

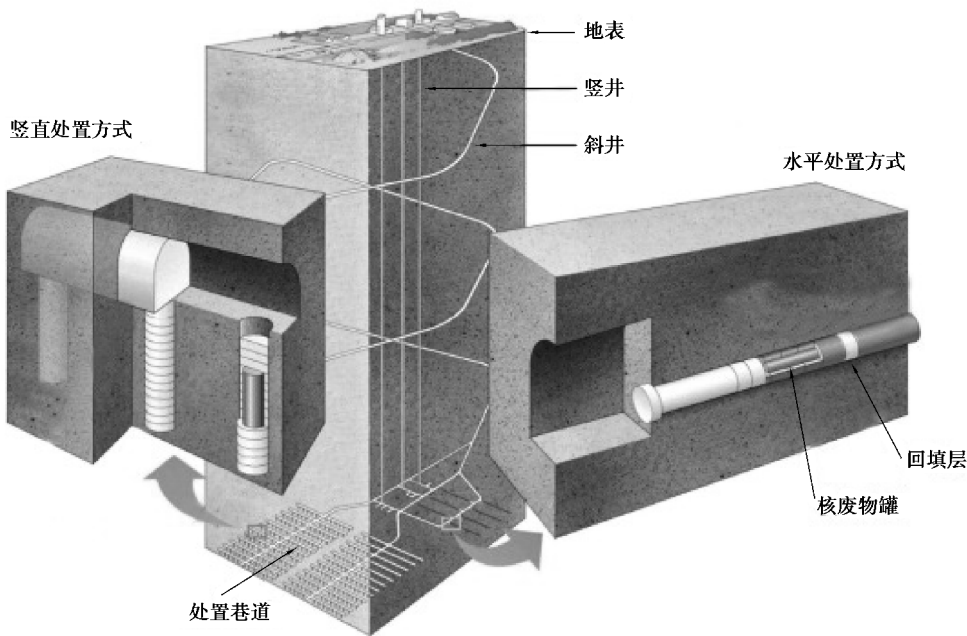


图 1 饱和稀疏裂隙岩体中地下核废物处置库概念模型

Fig. 1 Conceptual model of nuclear waste repository in saturated sparse fractured rock mass

本文主要考虑因温度场变化而产生的应力,因此不考虑体积力的作用,并忽略惯性力,则根据热弹性分析中的几何方程、运动方程和物理方程^[15],可以得到岩石的热弹性控制方程,采用张量符号法表示为:

$$\nabla_3^2 u_i + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial x_i} = 2\alpha_r \frac{(1+\nu)}{1-2\nu} \frac{\partial T_d}{\partial x_i} \quad (1)$$

式中: ∇_3^2 为三维拉普拉斯算子; e 为体积应变; T_d 为分布热源和裂隙水流动-传热作用下引起的温度增量,设裂隙岩体中的温度为 T ,则有:

$$T_d = T - T_0 \tag{2}$$

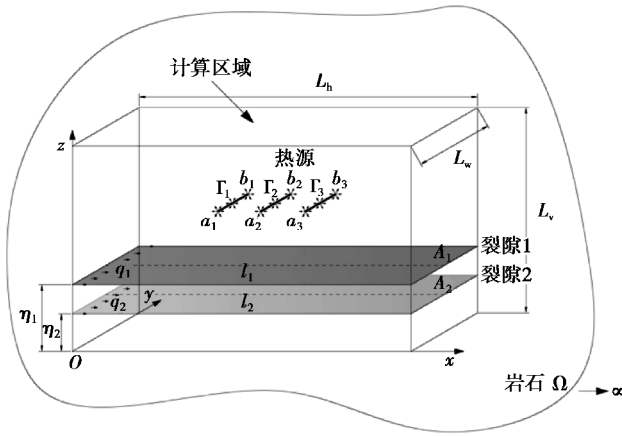


图 2 分布热源作用下稀疏裂隙岩体热应力计算模型

Fig. 2 Mathematical model of thermal stress in sparse fractured rock mass under distributed heat sources

1.2 半解析计算方法

求解热弹性控制方程并计算热应力的方法很多,本文采用 Goodier 提出的热弹性位移势法计算,该方法适用于一般热应力问题求解。岩体中由温度变化而引起的热弹性位移势为:

$$\Phi(x,y,z,t) = \sum_{k=1}^2 \int_0^t \int_{A_k} p_f^k(x',y',z',t') \Phi^*(x,y,z,x',y',z',t-t') dA_k dt' + \sum_{i=1}^3 \int_0^t \int_{\Gamma_i} p_r(x',y',z',t') \Phi^*(x,y,z,x',y',z',t-t') d\Gamma_i dt' \tag{6}$$

对式(6)中的时间 t 进行拉普拉斯变换,利用拉普拉斯变换的卷积定理进行简化,并将裂隙面 A_k 与岩石的热交换集度^[11, 15]进行拉普拉斯变换后

$$\widetilde{\Phi}(x,y,z,s) = \frac{\alpha_r(1+v)\rho_w c_w}{4\pi s \rho_r c_r(1-v)} \sum_{k=1}^2 \Lambda_k - \frac{\alpha_r(1+v)}{4\pi s \rho_r c_r(1-v)} \sum_{i=1}^3 \Lambda_{\Gamma_i} \tag{7}$$

式中

$$\Lambda_k = \int_{A_k} [q_k(x_k, y_k) \cdot \nabla_2 \widetilde{T}_d(x_k, y_k, \eta_k, s)] \left[\frac{1}{R_k} - \frac{1}{R_k} \exp(-\sqrt{\frac{s \rho_r c_r}{\lambda_r}} R_k) \right] dA_k, \quad (k=1,2)$$
$$\Lambda_{\Gamma_i} = \int_{\Gamma_i} \widetilde{p}_r(x', y', z', s) \left[\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_p} \exp(-\sqrt{\frac{s \rho_r c_r}{\lambda_r}} R_p) \right] d\Gamma_i, \quad (i=1,2,3)$$

式中: R_p 为分布热源积分点 (x', y', z') 与裂隙岩体中热应力计算点 (x, y, z) 之间的距离; R_k 为 A_k 上积分点 (x_k, y_k, η_k) 与热应力计算点 (x, y, z) 间的距离。

热弹性位移势的计算式(7)中积分式比较复杂,难以给出解析解答,可以采用数值方法计算。式(7)计算得到的热弹性位移势处于拉普拉斯变换域中,须采用拉普拉斯数值逆变换至时间域,这

$$\nabla_3^2 \Phi = \alpha_r \frac{1+v}{1-v} T_d \tag{3}$$

显然,对于图 2 所示的稀疏裂隙岩体三维饱和水流-传热概念模型,计算热应力前必须求解其温度场。该模型的温度场半解析计算理论在笔者之前的工作中进行了研究^[12, 16],此处不再赘述。

考虑岩石在 t' 时刻 (x', y', z') 位置处作用瞬时单位集度点热源,该点热源在 t 时刻 (x, y, z) 位置处产生的热弹性位移势为^[17]:

$$\Phi^*(x,y,z,x',y',z',t-t') = -\frac{\alpha_r(1+v)}{4\pi \rho_r c_r(1-v)R} \operatorname{erf} \left[\frac{R}{2} \sqrt{\frac{\rho_r c_r}{\lambda_r(t-t')}} \right] \tag{4}$$

$$\text{式中: } R = \sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2} \tag{5}$$

表示 (x, y, z) 与 (x', y', z') 间的距离。

图 2 所示模型中,岩石内任意点的热弹性位移势由热源和岩石-裂隙热交换共同影响。考虑到 t' 时裂隙面 A_k 与岩石的热交换集度为 $p_f^k(x', y', z', t')$,分布热源集度为 $p_r(x', y', z', t')$,根据式(4)可得岩石内任意点在 t 时刻的热弹性位移势为:

代入式(6),则稀疏裂隙岩体中任意点的热弹性势可以表示为:

部分的具体计算过程可参考笔者之前的研究^[16]。由于计算中得到的热弹性位移势为离散值,根据热弹性体的本构方程,可以利用差分方法计算岩石内任意点的热应力^[18]。

2 算例

2.1 计算参数

为了简化计算,忽略温度变化对裂隙水和岩石

物理参数的影响,对图2所示模型中的裂隙水和岩石物理参数取值为:岩石质量密度 $\rho_r=2\,600\text{ kg/m}^3$,岩石比热 $c_r=1\,000\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$,岩石热传导系数 $\lambda_r=2.60\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$,岩石剪切模量 $m=1.5\times 10^4\text{ MPa}$,岩石泊松比 $\nu=0.25$,岩石热膨胀系数 $\alpha_r=8.0\times 10^{-6}\text{ (1/}^\circ\text{C)}$,水的质量密度 $\rho_w=1\,000\text{ kg/m}^3$,水的比热 $c_w=4\,200\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$;裂隙分布和裂隙水流动参数取值:裂隙开度为5 mm,裂隙水流速为0.5 mm/s,裂隙长度为800 m,裂隙宽度为100 m,裂隙1位置参数 $h_1=15\text{ m}$,裂隙2位置参数 $h_2=10\text{ m}$;分布热源间距40 m,线热源 G_1 端点坐标为 $a_1(120\text{ m},40\text{ m},25\text{ m})$ 和 $b_1(120\text{ m},60\text{ m},25\text{ m})$,线热源 G_2 端点坐标为 $a_2(150\text{ m},40\text{ m},25\text{ m})$ 和 $b_2(150\text{ m},60\text{ m},25\text{ m})$,线热源 G_3 端点坐标为 $a_3(180\text{ m},40\text{ m},25\text{ m})$ 和 $b_3(180\text{ m},60\text{ m},25\text{ m})$ 。

2.2 热应力分布特征

图3、图4为岩石-裂隙交界面上不同时间的法向热应力分布。可以看出,经历相同的时间后,岩石-裂隙1交界面上的热应力等值线要更加密集,表明该位置处受分布热源的影响更为明显。在时

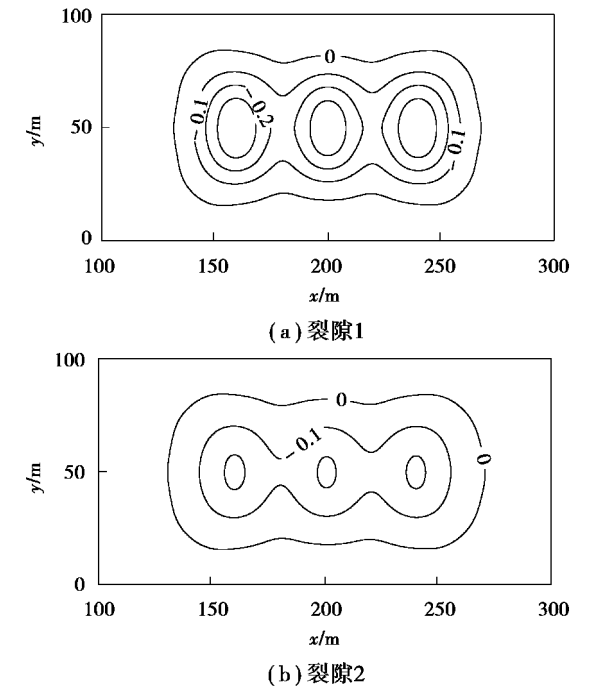


图3 岩石-裂隙交界面上法向 σ_{zz} 热应力分布(MPa)($t=1\text{ a}$)

Fig. 3 Normal thermal stress σ_{zz} distribution at the rock-fractured interface (MPa) ($t=1\text{ a}$)

间较短时,裂隙水流动对热应力的影响较小(如 $t=1\text{ a}$);随着时间的推移,裂隙水的流动传热作用使下游温度逐渐升高,从而引起下游位置热应力的增大,表现为热应力等值线向下游偏移(如 $t=20\text{ a}$)。

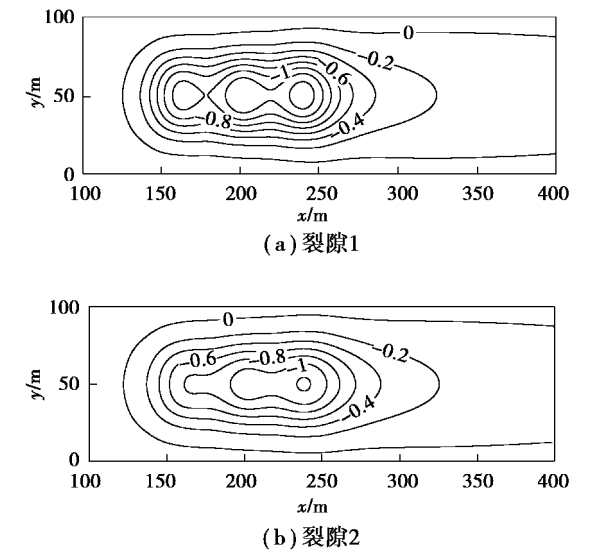
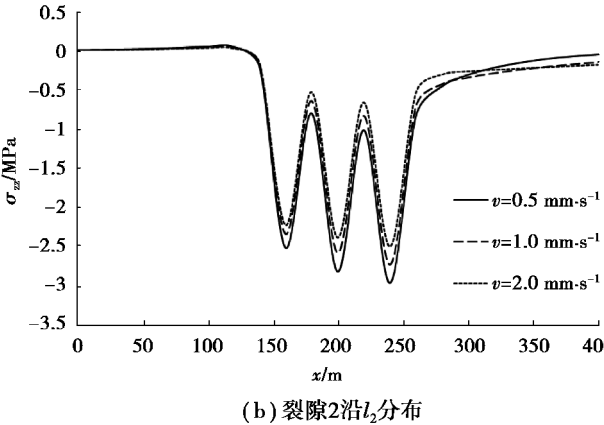


图4 岩石-裂隙交界面上法向热应力 σ_{zz} 分布(MPa)($t=20\text{ a}$)

Fig. 4 Normal thermal stress σ_{zz} distribution at the rock-fractured interface (MPa) ($t=20\text{ a}$)

2.3 裂隙水流速对热应力的影响

图5为 $t=20\text{ a}$ 时不同流速下沿 l_1 和 l_2 分布的热应力。可以看出,由于流向处置库近场的常温裂隙水对处置库近场有吸热降温作用,而流出处置库近场的高温裂隙水向下游传递热量,因此,裂隙水流动传热会显著减小处置库近场的热应力,裂隙水流速越大,裂隙水的对近场热应力的减弱作用也越明显。而且裂隙水的流动传热作用也使得裂隙上下游位置的热应力峰值要高于上游位置的热应力峰值。



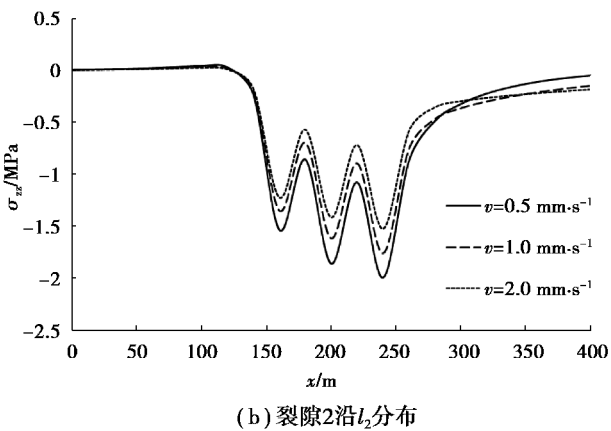


图 5 不同流速下裂隙-岩石交界面上的法向热应力 σ_{xx} 分布

Fig. 5 Normal thermal stress distribution at the rock-fractured interface with different flow rates

2.4 热源间距对热应力的影响

图 6 为 $t=20\text{ a}$ 时不同热源间距条件下沿 l_1 和 l_2 分布的热应力。可以看出,热源间距对处置库近场热应力分布的影响总体表现为:热源间距越小时,

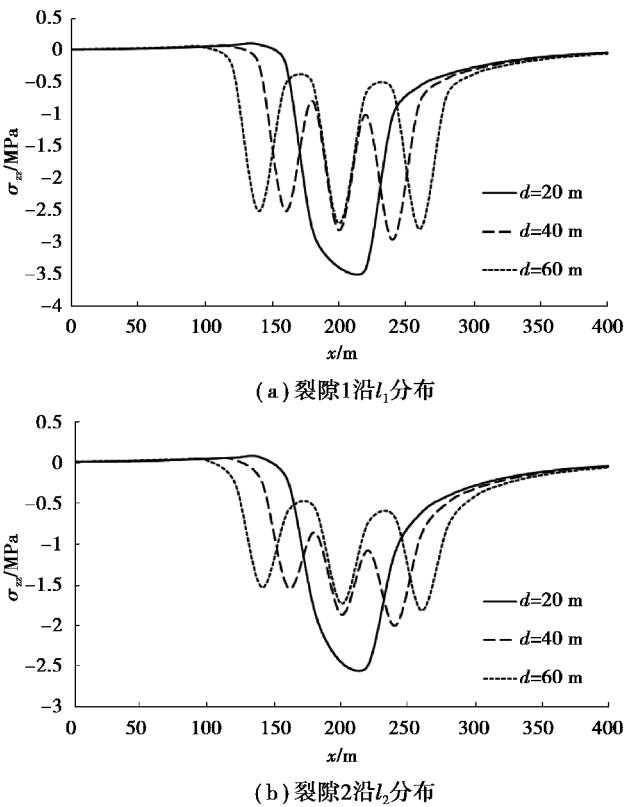


图 6 不同热源间距下裂隙-岩石交界面上的法向热应力 σ_{xx} 分布

Fig. 6 Normal thermal stress σ_{xx} distribution at the rock-fractured interface with different distances of heat sources

处置库近场热应力越大。当热源间距小于一定值时,不同热源间传热作用的叠加将使处置库近场的热应力峰值急剧增大。

3 结论

针对地下核废物处置库近场环境为饱和裂隙岩体时的情况,提出了一种由分布热源、饱和稀疏裂隙和岩石构成的简化概念模型,根据 Goodier 提出的热弹性位移势,采用拉普拉斯变换、格林函数法和数值积分等方法,计算分析了核废物处置库近场裂隙岩体的热应力分布特征,研究了裂隙水流速和分布热源间距对热应力的影响规律,得到如下结论:

(1)在经历相同的时间后,与热源更为接近的裂隙上的热应力等值线要更加密集,表明该位置处受分布热源的影响更为明显;在热源作用时间较短时,裂隙水流动对热应力的影响较小;随着时间的推移,裂隙水的流动传热作用使下游温度逐渐升高,从而引起下游位置热应力的增大。

(2)裂隙水的流动传热作用将处置库近场岩石的热量向下游传递,从而降低了近场岩石的温度,减小了近场岩石中的热应力,裂隙水流速越快,对近场岩石中热应力的影响越明显。

(3)热源间距越小时,处置库近场岩石的热应力越大;当热源间距小于一定值时,不同热源间传热作用的叠加将使处置库近场岩石的热应力峰值急剧增大。

参考文献 (References)

[1] 秦爱芳, 赵小龙, 王海堂.核废料处置库近场热-水力耦合性状[J].地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1201-1207. (Qin Aifang, Zhao Xiaolong, Wang Haitang. Coupled Thermo-hydro-mechanical properties in field near nuclear waste repository [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1201-1207. (in Chinese))

[2] Tortike W S, Ali S M F. Prediction of oil sand failure due to steam-induced stresses[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1991, 30(1): 87-96.

[3] Tortike W S, Ali S M F. Reservoir simulation integrated with geomechanics [J]. Journal of Canadian Petroleum

- Technology,1993,32(5):28-37.
- [4] Onofrei C, Gray M. Modelling hygro-thermo-mechanical behaviour of engineered clay barriers—validation phase[J]. Engineering Geology, 1996, 41 (1-4): 301-318.
- [5] Gutierrez M, Makurat A. Coupled HTM modelling of cold water injection in fractured hydrocarbon reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1997,34(3-4):111-113.
- [6] Rutqvist J, Börgesson L, Chijimatsu M, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine - comparison of field results to predictions of four finite element codes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2001,38(1):129-142.
- [7] Ghassemi A, Zhang Q. Poroelastostatic analysis of the response of a stationary crack using the displacement discontinuity method [J]. Journal of Engineering Mechanics,2006,132(1):26-33.
- [8] Zhou X X, Ghassemi A, Cheng A H D. A three-dimensional integral equation model for calculating poro- and thermoelastostatic stresses induced by cold water injection into a geothermal reservoir[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2009,33(14):1613-1640.
- [9] Jing L, Tsang C F, Stephansson O. DECOVALEX—An international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32 (5): 389-398.
- [10] Tsang C F, Stephansson O, Kautsky F, et al. Coupled THM processes in geological systems and the decovalex project [J]. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2004,2(4):3-16.
- [11] Tsang C F, Jing L, Stephansson O, et al. The DECOVALEX III project: A summary of activities and lessons learned [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2005,42(5):593-610.
- [12] Zhang Y, Xing Y Y. A semi-analytical modeling approach for three-dimensional heat transfer in sparsely fractured rocks with water flow and distributed heat source [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38 (11): 1149-1171.
- [13] 陈伟明,王驹,金远新,等.高放废物地质处置北山预选区茈茈槽岩块地质特征[J].世界核地质科学,2009,26(2):109-113.(Chen Weiming, Wang Ju, Jin Yuanxin, et al. Geological feature of Jijicao block in Beishan pre-selected area for the disposal of high level radioactive waste[J]. World Nuclear Geoscience,2009,26(2):109-113.(in Chinese))
- [14] 郭永海,王驹,王志明,等.高放废物处置库甘肃北山预选区地下水位动态特征[J].铀矿地质,2010,26(1):46-50.(Guo Yonghai, Wang Ju, Wang Zhining, et al. Groundwater regime feature in Beishan pre-selected area for the disposal of high level radioactive waste[J]. Uranium Geology,2010,26(1):109-113.(in Chinese))
- [15] 王洪纲.热弹性力学概论[M].北京:清华大学出版社,1989.(Wang Honggang. Fundamental theory of thermo-elasticity [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1989.(in Chinese))
- [16] 张勇,项彦勇.分布热源作用下单裂隙岩体三维水流-传热的半解析计算方法[J].岩土力学,2013,34(3):685-695.(Zhang Yong, Xiang Yanyong. A semi-analytical approach for calculation of displacement and stress in the processes of 3-D water flow and heat transfer in saturated sparsely fractured rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (3): 685-695. (in Chinese))
- [17] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of Heat in Solids[M].New York: Oxford University Press,1959.
- [18] 陆明万.弹性理论基础(下册)(第二版)[M].北京:清华大学出版社,2001.(Lu Mingwan. Elastic theory foundation (Volume II) [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2012.(in Chinese))