

金川矿区深部巷道围岩流固耦合稳定性数值模拟

张春阳, 曹平, 靳瑾, 蒲成志, 孟京京

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 地下水渗流会影响巷道围岩力学性质, 本文结合流固耦合基本原理, 以金川二矿区深部巷道为例, 采用 MIDAS/GTS 建立了金川二矿区 1000m 水平某巷道流固耦合模型, 研究渗流对围岩应力场、围岩变形及开挖卸载影响。计算结果表明, 渗流作用对巷道围岩竖向应力的影响大于水平应力, 渗流也导致围岩最大、最小主应力比无水时偏大。渗流和无水状态下围岩变形空间分布具有相似性, 渗流对巷道围岩水平位移影响相对较小, 但对围岩竖向位移影响较大, 其中巷道拱部竖向位移明显大于无水状态, 渗流时拱部最大位移约为 8.2mm, 而无水时仅 2.3mm 左右。因此, 渗流效应将导致巷道顶板稳定性变差。开挖卸载对渗流场的影响表明, 开挖后巷道周边压力水头迅速降低, 孔隙水压力最小降为零, 且孔隙水压力也从水平层状分布变为沿巷道轮廓环形带状分布。

关键词 流固耦合; 渗流; 围岩应力场; 围岩变形; 开挖卸载; 孔隙水压力

中图分类号 TU457

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.33.004

Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction Stability for Jinchuan Deep Roadway

ZHANG Chunyang, CAO Ping, JIN Jin, PU Chengzhi, MENG Jingjing

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Groundwater flow would affect the mechanical properties of surrounding rock. In this paper, based on the fluid-solid coupling basic principles, and taking the Jinchuan second mining area deep roadway as an example, a 1000m level roadway fluid-solid coupling computational model is established, then the surrounding rock stress field, the deformation, and the excavation unloading under the seepage condition are simulated. It is shown that the effect of the vertical component of the roadway stress is greater than those of the horizontal components under the seepage condition, the maximum and the minimum principal stresses are larger than those under the anhydrous condition. The rock deformation spatial distributions are similar under the two conditions, the impact of the seepage on the vertical displacement is larger than that on the horizontal displacement. For example, the roadway arch vertical displacement is significantly greater than that under the anhydrous condition, the arch maximum displacement is approximately 8.2mm under the seepage condition, while that under the anhydrous condition is only about 2.3mm, therefore, the seepage effect will lead to the deterioration of the roadway roof stability. The excavation unloading effect on the seepage field is evident that the roadway surrounding pressure head decreases rapidly after the excavation, the minimum pore water pressure drops to zero, and the pore water pressure changes from a horizontally layered distribution to a zonal distribution along the roadway profile.

Keywords fluid-solid coupling; seepage; surrounding rock stress field; surrounding rock deformation; excavation unloading; pore water pressure

0 引言

巷道开挖常会遇到地下水, 含水区域巷道稳定性研究不仅需要考虑到围岩力学参数降低对巷道开挖和支护的影响, 同时也需考虑地下水渗流对围岩的力学作用。目前从流固耦合角度分析巷道稳定性的研究逐渐引起工程技术人员的重视。

关于流固耦合的研究, 汪斌等^[1]通过黄土坡滑坡前缘临江崩滑堆积体的流固耦合稳定性研究, 认为库水位下降产生的超孔隙水压力是滑坡变形和失稳的重要原因; 朱维申等^[2]分析了大岗山地下洞室群围岩支护结构流固耦合稳定性, 验证了支护效果的可靠性; 王怡等^[3]研究表明, 地下水渗流与应

收稿日期: 2013-06-17; 修回日期: 2013-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174228, 51274249); 湖南省博士生科研创新立项项目(CX2011B117)

作者简介: 张春阳, 博士研究生, 研究方向为采矿与岩土工程, 电子邮箱: zcl2722@163.com

力耦合效应使洞库围岩强度弱化,塑性区及洞周围岩变形均明显增大;李术才等^[4]结合离散介质流固耦合理论,分析石油洞库水封性和稳定性,为相关领域理论及工程实践研究提供指导;刘俊新等^[5]建立了非饱和水-气两相的流体-固体耦合方程,认为降雨强度和历时对边坡长期强度的影响最为明显;李宗坤等^[6]研究表明,渗流与应力相互作用对土石坝稳定性产生不利影响;徐文杰等^[7]研究了梨园电站大型土石混合体边坡水位骤降过程中流-固耦合及相应的稳定性变化特征,认为稳定系数下降速度随骤降幅度增大而增大;孙明等^[8]通过研究变形多孔介质油藏,建立了多相流体渗流的流固耦合渗流数学模型;张多新等^[9]建立了流固耦合(FSI)系统位移-压力(u_i, p)有限元格式,给出了流固耦合系统的动力特性方程,据此计算分析大型渡槽工程问题,认为采用上述方法提高了计算效率和精度;孙可明等^[10]建立了反映深部低渗透煤层特征和瓦斯流动特性的气水两相流流固耦合模型,将模型应用于深部低渗透井群开采煤层气研究;于沐等^[11]研究表明流固耦合结合强度折减法适用于分析重力坝坝基深层抗滑稳定性,认为流固耦合方法克服了传统分析中对水荷载假设过多的弊端。

上述研究表明,流固耦合作用对工程稳定性具有重要影响。金川深部部分围岩裂隙水发育,巷道稳定性差,本文以金川深部某巷道为研究对象,采用 MIDAS/GTS 建立模型,计算和分析复杂地质条件下深部巷道围岩流固耦合作用下应力、变形情况,为巷道支护设计提供依据。

1 MIDAS/GTS 流固耦合理论

模型采用稳定流分析,在稳定流条件下,通过岩土体积的渗流量是渗透系数、水力坡降以及横截面积间的乘积。当裂隙岩体中含水量未饱和时,孔隙中存在空气;随着饱和度降低,孔隙中空气影响作用加大。受表面张力影响,孔隙水压逐渐发展成张力,所以采用吸入压力概念描述负的孔隙水压。一般来说,吸入压力与裂隙岩体中水的饱和度成反比。MIDAS/GTS 中的流动基本方程式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中, H 为总水头, k_x 为 x 方向的渗透系数, k_y 为 y 方向的渗透系数, k_z 为 z 方向的渗透系数, Q 为流量, θ 为体积含水率, t 为时间。

方程假定在任意位置、任意时刻微小体积的流入和流出的变化量与体积含水率的变化量相同。即 x, y, z 方向的流量变化与流量之和、体积含水率的变化相同。当表述稳定流状态中流入和流出量随时间没有变化时,式(1)右边为0,即

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (2)$$

饱和、非饱和状态的应力状态使用 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 两个参数。此处 σ 为总应力, u_a 为孔隙大气压力, u_w 为孔隙水压力。

MIDAS/GTS 的渗流分析中假定总应力不变,即岩土介质

本身没有加载和卸载。因为没有加载,所以非稳定流流动过程中孔隙大气压力不变,即 $(\sigma - u_a)$ 为常量,对体积含水率的变化没有影响,所以体积含水率仅与 $(u_a - u_w)$ 的变化有关,因为 u_a 是常量,所以体积含水率变化仅与孔隙水压变化相关。

地下水渗透现象是由渗透区域周边边界水头差或流量引起的。地下水流动时水和裂隙岩体之间因摩擦产生渗透力,进而产生位移和应力。对孔隙水压积分得到渗透力。在 MIDAS/GTS 中利用渗流分析得到的孔隙水压力计算渗透力。将渗流分析得到的总水头减去位置水头而取得的压力水头与水的容重相乘就是孔隙水压。一般来说,渗透力集中在总水头变化较大的流出边界临近区域,该区域约束压力较小,抗剪强度和抗拉强度也相对偏小。同时对高应力环境下的岩体而言,因开挖卸载,围岩岩体体积膨胀,且原有裂隙张开度增大,加大了围岩渗透性,使围岩受到应力-渗流联合作用。

2 计算模型建立

选取 1000m 水平巷道建立模型,该巷道位于深部高应力区,岩性多样,围岩裂隙发育,岩体破碎,多为碎裂状,整体稳定性差,巷道变形严重。根据工程地质勘测资料,巷道围岩主要为含辉橄辉岩,穿插大理岩、花岗岩、混合岩等多种岩浆岩。模型巷道断面为直墙半圆拱,采用锚喷支护,巷道尺寸 4.6m×4.3m,计算模型如图 1,围岩力学参数如表 1。

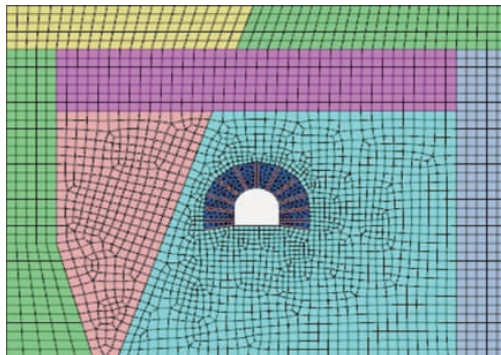


图 1 巷道数值模型

Fig. 1 Roadway numerical model

表 1 围岩主要力学参数

Table 1 Main mechanical parameters of surrounding rock

| 岩性 | 密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | 黏聚力 C/MPa | 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ | 抗拉强度 T/MPa | 弹性模量 E/GPa | 泊松比 ν |
|-------|--------------------------------|----------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 大理岩 | 2.74 | 10.64 | 33.72 | 1.21 | 15.68 | 0.22 |
| 花岗岩 | 2.71 | 11.10 | 49.00 | 9.80 | 17.00 | 0.25 |
| 富矿 | 3.09 | 10.80 | 41.40 | 0.69 | 14.25 | 0.28 |
| 贫矿 | 3.03 | 9.02 | 39.85 | 1.19 | 13.00 | 0.23 |
| 超基性岩 | 2.44 | 11.50 | 45.50 | 1.09 | 15.25 | 0.23 |
| 斜长角闪岩 | 2.82 | 12.11 | 35.22 | 1.30 | 19.28 | 0.29 |

由于巷道纵向较长,横断面相对很小,故在工程实际中,假定巷道在地层荷载作用下沿纵向长度方向没有位移,只有横向发生径向位移,从而在数值模拟时采用弹性理论中的平面应变模型进行建模分析。建模时考虑巷道开挖半径影响,宽度方向取单洞3倍洞径以上,模型宽度方向计算范围为50m;高度方向取巷道高度的两倍以上,加上巷道自身高度,模型高度为40m,则模型计算范围为50m×40m。

模型采用莫尔-库仑准则,假定岩体均质、连续分布,地层和材料应力应变均在弹性范围内变化。按照连续介质静力学模型中应力边界、位移边界、混合边界3种类型边界条件规定,结合实际情况,设定模型侧面和底面为位移边界,侧面限制水平移动,底部限制垂直位移,上边界为自由面。对计算区域进行围岩渗流场、应力场耦合分析时,还需要给定围岩渗透计算参数。根据裂隙调查和地勘报告资料选择模型渗透系数,如表2所示。假定巷道开挖前围岩饱和,渗流边界条件定义中,假定地下水位在模型顶部800m位置,固定空隙水压力为0,左右两边及底部边界为不透水边界。

表2 围岩渗透系数

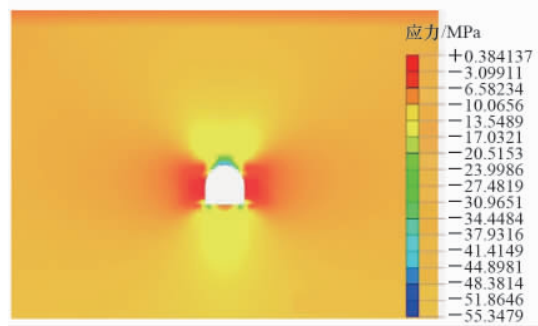
Table 2 Rock permeability coefficient

| 岩性 | 渗透系数/(m·d ⁻¹) | 岩性 | 渗透系数/(m·d ⁻¹) |
|-------|---------------------------|------|---------------------------|
| 贫矿 | 3.77×10 ⁻⁵ | 大理岩 | 5.73×10 ⁻⁶ |
| 富矿 | 9.56×10 ⁻⁶ | 花岗岩 | 6.31×10 ⁻⁷ |
| 斜长角闪岩 | 4.25×10 ⁻⁶ | 超基性岩 | 7.19×10 ⁻⁶ |

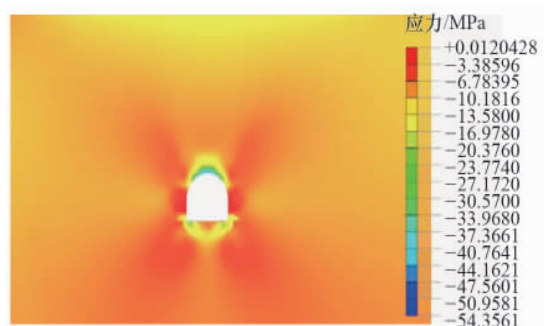
3 围岩应力场分析

开挖后巷道围岩水平 x 、竖向 z 应力分布如图2所示,由图可见,无论考虑岩体渗流与否,巷道开挖后都将引起周围围岩应力重分布,离巷道开挖区域越近表现越显著。沿巷道轮廓周边局部岩体存在应力集中,巷道周边表层围岩应力总体较小,可能是由于表层围岩开挖后变形较大,导致应力承受能力降低,应力朝内部围岩转移。无水与渗流条件下的应力对比发现,渗流作用下,巷道围岩应力重分布影响范围大于无水状态,且巷道围岩所受竖向应力也总体大于无水时。在无水条件下,巷道周边围岩最大水平应力约为55.3MPa,最大竖向应力约为65.1MPa,且巷道周边57.4%的围岩水平应力约为10.1~13.5MPa,69.2%的围岩竖向应力约为16.4~20.4MPa。渗流时巷道周边围岩最大水平应力约为54.3MPa,最大竖向应力约为72.5MPa,51.9%的围岩区域水平应力约为6.8~10.2MPa,而42.2%的围岩竖向应力约为27.2~31.8MPa。

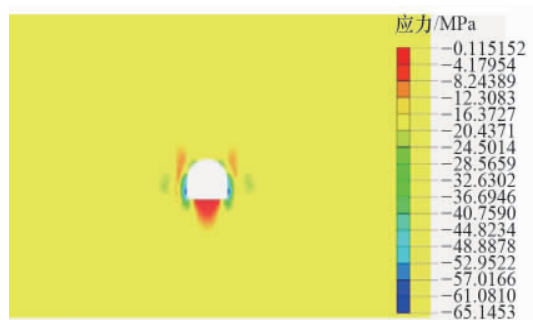
无水与渗流条件下水平、竖向应力对比分析可知,在渗流条件下,渗流场改变导致围岩内孔隙水压力及有效应力发生改变,深部巷道围岩水平应力反而略有降低。但是由于渗流条件下的竖向应力略大于无水时,因此,将导致巷道围岩竖向变形略偏大,尤其是顶板,不利于围岩稳定。



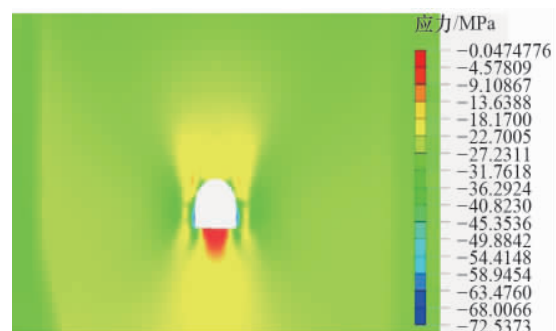
(a) 无水条件, x 方向
(a) Anhydrous conditions, x -direction



(b) 渗流条件, x 方向
(b) Seepage condition, x -direction

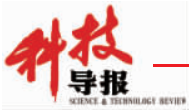


(c) 无水条件, z 方向
(c) Anhydrous condition, z -direction



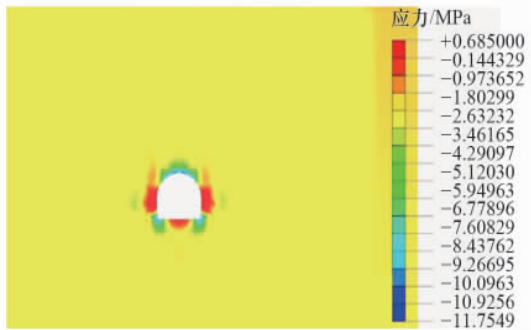
(d) 渗流条件, z 方向
(d) Seepage condition, z -direction

图2 开挖后巷道围岩应力分布
Fig. 2 Stress distribution of surrounding rock after excavation



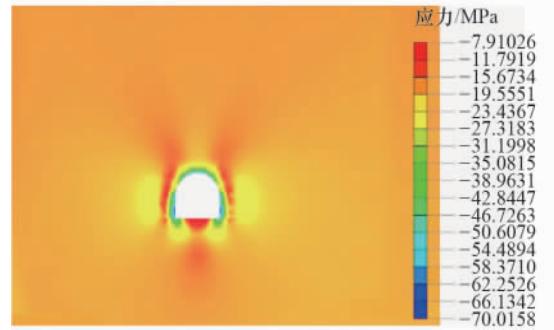
开挖后巷道周边最大、最小主应力分布如图 3 所示,拉应力为正、压应力为负。无水和渗流两种状态下的最大主应力在巷道底板及顶板存在应力集中,该位置的最大主应力值也最大,其中无水状态下最大值约为 12.6MPa,渗流状态下最大值约为 13.2MPa。此外,在巷道两帮及底板中部位置,最大

主应力存在最小取值,表现为拉应力,其值均约为 0.69MPa。同时,两种状态下的最大主应力分布存在差异,例如渗流条件下,巷道两帮一定深度范围内围岩存在应力集中。无水条件下 49.2%的围岩区域最大主应力约为 2.6~3.5MPa,渗流时 34.8%的围岩区域最大主应力约为 3.7~4.5MPa。



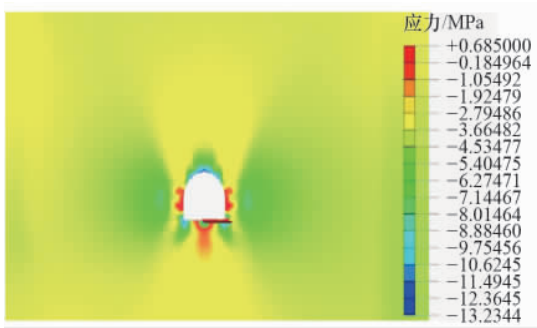
(a) 无水条件下最大主应力

(a) Maximum principal stress under anhydrous condition



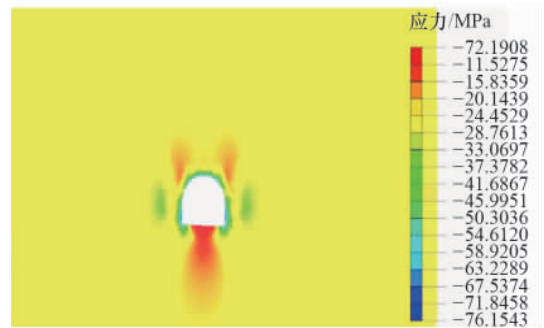
(b) 无水条件下最小主应力

(b) Minimum principal stress under anhydrous condition



(c) 渗流条件下最大主应力

(c) Maximum principal stress under seepage condition



(d) 渗流条件下最小主应力

(d) Minimum principal stress under seepage condition

图 3 开挖后巷道周边主应力分布

Fig. 3 Principal stress distribution of roadway surrounding after excavation

两种状态下的最小主应力在巷道周边表层围岩内也存在应力集中,其中无水与渗流条件下的最大值分别为 70.0 和 76.2MPa。无水条件下的应力最小值分布范围较大,主要位于巷道底板、两帮及拱部一定深度范围围岩,渗流条件下则分布在巷道底板及顶板局部区域,可见渗流条件下的最小主应力略大于自然状态。无水条件下 45.7%的围岩区域最小主应力约为 15.7~19.6MPa,渗流时 56.1%的围岩区域最小主应力约为 24.5~28.8MPa。

通过对比无水与渗流条件下围岩最大、最小主应力分布可知,由于地下水的的作用,导致围岩所受的主应力值总体比无水时偏大。由于金川巷道围岩在高地应力作用下变形较大、变形速度较快,而地下水渗流无疑进一步加剧了围岩变形,使巷道稳定性变得更差,因此,为了确保金川巷道围岩稳固,有效控制巷道较大变形,同时也为了降低地下水对围岩性质的弱化,需要适当采取排水措施。

4 围岩变形分析

围岩在自重应力、构造应力等原岩应力作用下,会产生初始位移,经历漫长地质年代,该部分位移已基本稳定,因此,巷道开挖分析前,应进行初始平衡计算,这样巷道开挖后得到的围岩位移场即为开挖卸载引起围岩变形的实际位移场。

开挖后,岩体水平、竖直方向位移分布如图 4 所示,其中竖直位移以向上为正,向下为负;水平位移以向右为正,向左为负。

由图 4 可知,无水和渗流两种状态下的水平位移相差不大,其中渗流时的水平位移略大于无水状态。最大位移发生在巷道两帮及拱脚部位,无水条件下的最大位移约为 70.0mm,渗流条件时约为 71.6mm。此外,两种状态下巷道周边围岩位移除两帮附近位移较大外,大部分区域围岩位移较小。无水状态巷道周边 58.3%的区域位移介于 0.12~8.7mm,而渗流时 63.0%的区域位移介于 0.27~8.6mm。

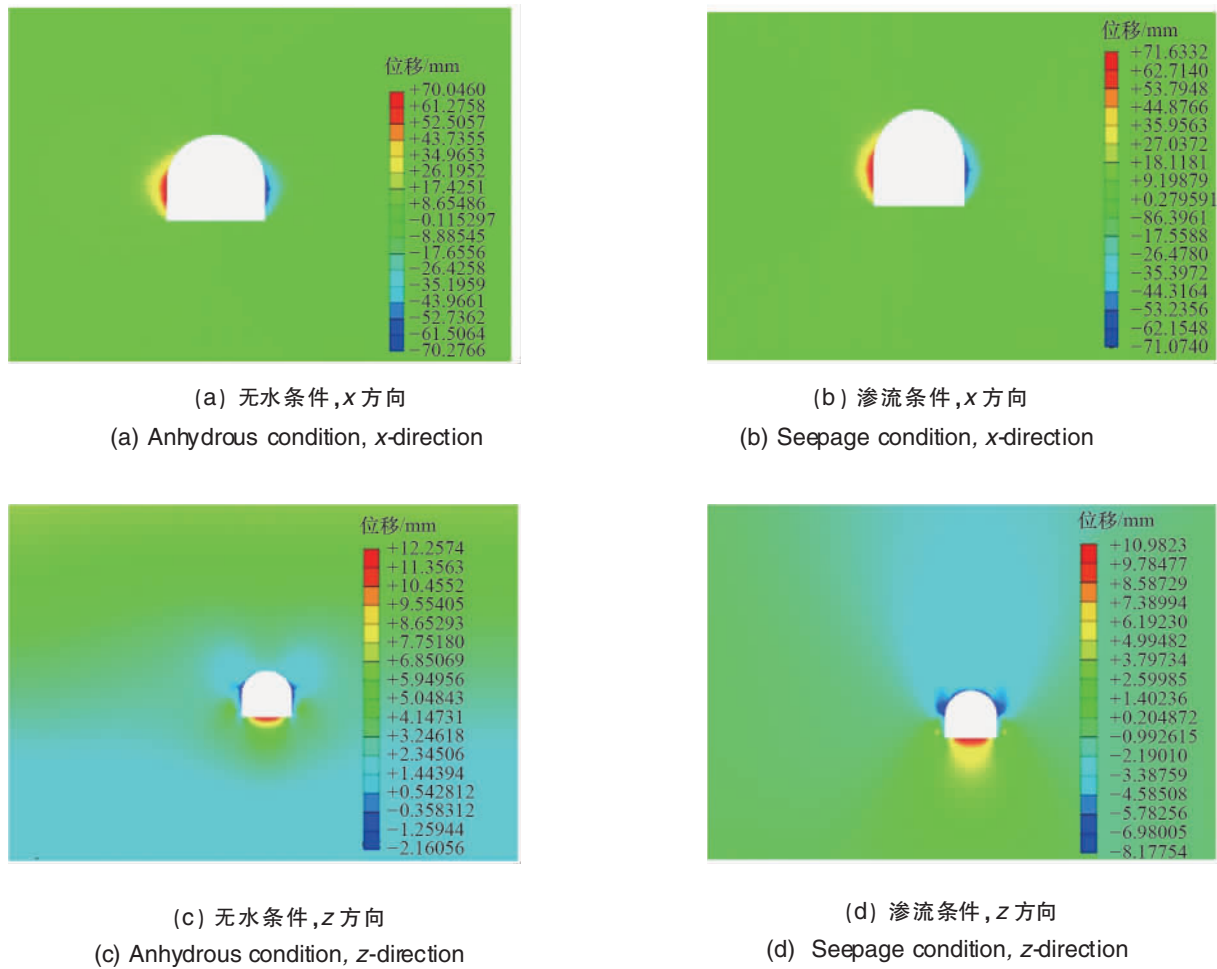


图 4 开挖后巷道围岩位移分布
Fig. 4 Displacement distribution of surrounding rock after excavation

图 4(c)和图 4(d)表明,渗流与无水条件下的巷道围岩竖向位移空间分布不仅具有相似性,而且也表现出较大差异。无论何种状态下,巷道围岩最大竖向位移都集中在巷道底板,其中无水时最大值约为 12.3mm,渗流时最大约为 11.0mm;但渗流状态下巷道拱部竖向位移明显大于无水状态下,其中渗流时最大位移约为 8.2mm,而无水时约为 2.3mm,可见渗流时巷道顶板围岩的稳定性较无水时明显降低。

综上所述,渗流对巷道围岩水平位移影响相对较小,而对围岩竖向位移影响较大,因此,巷道内地下水较发育时,除了采取排水措施外,还需要对巷道顶板进行适当加固,确保巷道稳定。

5 开挖卸载对渗流场影响

岩体开挖打破了开挖处原岩的应力状态,使开挖面上初始应力全部或部分卸除,改变了围岩边界条件和荷载条件。

由于巷道开挖的上述影响,导致围岩发生变形及内部应力调整和转移,围岩向巷道内部移动,同时形成开挖松动区,松动区围岩损伤并产生裂隙。此外,在深部高地应力作用下,由于开挖卸载作用,围岩裂隙张开度增大,进一步促使围岩裂隙起裂、扩展和贯通。由于围岩条件的改变,也将影响巷道内围岩的渗流特性,使渗流场发生改变。

图 5 为考虑渗流时,岩体开挖卸载前后围岩孔隙水压分布。由图 5(a)可见,巷道开挖前,围岩内孔隙水压力水平方向上分布较为均匀,大致为随深度增加而增大。但开挖后,打破了巷道内原有的孔隙水压力平衡,增加了地下水流动的自由面,导致开挖面及巷道周边压力水头迅速降低。由图 5(b)可见,巷道周边的孔隙水压力降幅最大,其中巷道表层围岩内最小值降为零,模型中孔隙水压力分布云图沿巷道轮廓呈环形带状分布。此外,通过对比分析还可发现,围岩开挖引起的渗流场受扰区大于受扰应力场和位移场范围。

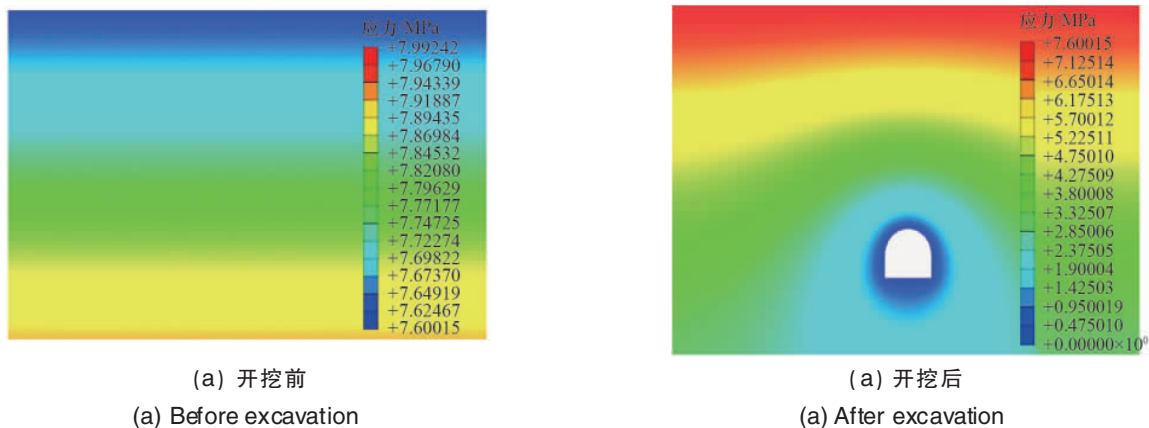
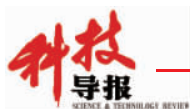


图 5 渗流条件下开挖前后岩体内孔隙水压分布云图
Fig. 5 Pore water pressure contours before and after excavation under seepage condition

6 结论

通过金川二矿区 1000m 水平巷道流固耦合稳定性数值模拟分析,得出如下结论。

(1) 应力场分析表明,渗流作用下巷道围岩应力重分布影响范围大于无水状态,渗流作用对巷道围岩竖向应力的影响大于水平应力,其中水平应力比无水条件下略有减小,但竖向应力因为渗流效应而增大。此外,渗流效应也导致围岩最大、最小主应力大于无水条件。可见,渗流作用给巷道稳定性带来不利影响。

(2) 围岩变形分析表明,两种状态下的位移场空间分布具有相似性,渗流对巷道围岩水平位移影响相对较小,渗流时围岩水平位移略大于无水状态。但渗流对围岩竖向位移影响较大,巷道拱部竖向位移明显大于无水状态,渗流时拱部最大位移约为 8.2mm,而无水时约为 2.3mm。可见,渗流将导致巷道顶板围岩稳定性变差,因此,需要考虑对巷道顶板进行适当加固。

(3) 开挖卸载对渗流场的分析表明,开挖后巷道周边围岩裂隙张开度增大,促使围岩裂隙起裂、扩展和贯通。开挖打破了岩体内原有的孔隙水压力平衡,增加了地下水流动的自由面,导致开挖面及巷道周边压力水头迅速降低,巷道周边浅层围岩孔隙水压力最小降为零。开挖后孔隙水压力也从水平层状分布变为沿巷道轮廓环形带状分布,开挖引起的渗流场扰动区大于受扰应力场和位移场。

参考文献 (References)

[1] 汪斌,唐辉明,朱杰兵,等. 考虑流固耦合作用的库岸滑坡变形失稳机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4484-4489.
Wang Bin, Tang Hui-ming, Zhu Jie-bing, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4484-4489.

[2] 朱维申,李晓静,杨为民,等. 大岗山水电站地下厂房稳定性的流固耦合计算分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 1-4.
Zhu Weishen, Li Xiaojing, Yang Weimin, et al. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 1-4.

[3] 王怡,王芝银,许杰,等. 地下储油岩库稳定性的三维流固耦合分析[J].

中国石油大学学报, 2009, 33(3):132-137.
Wang Yi, Wang Zhiyin, Xu Jie, et al. Journal of China University of Petroleum, 2009, 33(3): 132-137.

[4] 李术才,平洋,王者超,等. 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2161-2170.
Li Shucai, Ping Yang, Wang Zhechao, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2161-2170.

[5] 刘俊新,刘育田,胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 903-910.
Liu Junxin, Liu Yutian, Hu Qijun. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 903-910.

[6] 李宗坤,王鹏飞,赵凤遥. 基于流固耦合理论的土石坝稳定性分析[J]. 郑州大学学报, 2009, 30(3): 44-47.
Li Zongkun, Wang Pengfei, Zhao Fengyao. Journal of Zhengzhou University, 2009, 30(3): 44-47.

[7] 徐文杰,王立朝,胡瑞林. 库水位升降作用下大型土石混合体边坡流-固耦合特性及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1491-1498.
Xu Wenjie, Wang Lichao, Hu Ruilin. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1491-1498.

[8] 孙明,李治平,樊中海. 流固耦合渗流数学模型及物性参数模型研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(6): 115-119.
Sun Ming, Li Zhiping, Fan Zhonghai. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(6): 115-119.

[9] 张多新,王清云,白新理. 流固耦合系统位移-压力有限元格式在渡槽动力分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 125-130.
Zhang Duoxin, Wang Qingyun, Bai Xinli. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(1): 125-130.

[10] 孙可明,潘一山,梁冰. 流固耦合作用下深部煤层气井群开采数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 994-1001.
Sun Keming, Pan Yishan, Liang Bing. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 994-1001.

[11] 于沭,陈祖煜,贾志欣,等. 向家坝水电站坝基深层抗滑稳定性的流固耦合分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1): 11-17.
Yu Shu, Chen Zuyu, Jia Zhixin, et al. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(1): 11-17.

(责任编辑 王媛媛)