

不同岩层倾角下岩体内部地下水渗流特征数值研究

潘建国¹, 谭力海², 盛佳³, 彭怀德²

(1. 中核地质勘查集团有限公司, 北京 100013;

2. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

3. 长沙矿山研究院有限责任公司 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要: 在不同岩层倾角下岩体内部地下水渗流特征的数值研究中, 较少考虑渗流场对内部孔洞、节理等缺陷的影响, 渗流场对岩体稳定性的影响, 以及渗流场-地应力场耦合下岩体失稳机制等问题。通过定义流体域, 可利用离散元软件 PFC 模拟地下水的渗流, 分析岩体工程地应力场-渗流场耦合作用下的流体-固体耦合渗流演化与岩体破坏行为, 并从宏观和微观角度对耦合作用下的岩体失稳机制进行研究。高应力场-低渗流场的耦合仿真研究结果表明, 渗流场可能诱导非均质或含缺陷岩体薄弱区域产生裂纹, 尖端裂纹的产生可导致岩体破坏, 但耦合作用下岩体的破坏演化和破坏模式与其在单独应力场中的情况存在差异。对于预设的裂纹, 渗流水压会抑制裂纹尖端拉裂纹的发展, 预设裂纹尖端破坏区域主要为压坏区域。在低水压渗流场下, 若水压不足, 破坏区域则停止扩张; 若破坏区域的渗流场已达到稳定状态, 破坏将会停止。由于渗流场的分布是非均匀的, 裂纹更可能在较高渗流水压区域出现。

关键词: 流体域; 岩体破坏; 应力场-渗流场耦合; 岩层倾角; 离散元软件; 岩体失稳; 仿真研究

中图分类号: P641.2; TD32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2025)04-0027-15

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.01.02

岩体是天然不连续、非均质的地质材料, 其渗流特性对隧道工程、水库坝基、深部矿山、水封洞库, 及核废料处置等地下工程的安全稳定性具有重要影响。在复杂的岩层地质条件下, 渗流路径的变化一般是非线性且不可预测的, 易诱发涌水、突水、边坡失稳等工程风险。因此, 系统揭示不同岩层倾角条件下岩体内部地下水渗流行为, 对保障地下工程安全具有重要意义^[1]。

目前, 针对裂隙岩体在复杂环境下的渗流响应问题研究较多。水力耦合试验发现裂隙网络的走向、倾角、连通性等几何特征, 以及糙度、孔隙度等水力性质可决定岩体的渗透行为^[2]。利用微观结构扫描与分形分析, 可知不同水压下煤岩渗透率的变化过程, 揭示了渗流的三阶段响应机制^[3]。在围压卸载条件下研究砂岩试样的渗流特性, 发现裂纹演化由渗流路径的转变与渗透率的非线性

增长主导^[4]。通过应力-渗流耦合试验可揭示软弱夹层对岩体渗透能力的调节作用, 发现倾角与渗流路径相关度较高^[5]。在三维应力条件下进行单断裂岩体不同倾角的灌浆渗流测试, 发现倾角越大, 单断裂试样的强度越低^[6]。通过深部煤岩多场耦合试验系统, 辨识应力-温度-渗流-扰动耦合条件下煤体损伤特征, 发现在多场作用下破坏类型的复杂程度显著增加^[7]。在循环冲击作用下, 通过 CT 扫描发现当裂缝扩展至网络连通阶段, 渗透率提高, 极易形成突水通道, 裂缝连通性是渗透率提升的关键^[8]。通过对弱胶结断层带的渗流试验和 CT 扫描, 发现 Talbot 幂指数等微观结构参数对渗透通道演化具有显著影响^[9]。针对热-水-力多场耦合下裂隙岩体的渗流行为, 提出渗透率“U”型变化趋势与温度、应力场联合调控机制, 进一步丰富了岩体渗流本构关系研究体系^[10]。

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(23B0442); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2024JJ6386); 金属矿山安全技术国家重点实验室(长沙矿山研究院有限责任公司)开放基金(kfkt2023-03)。

第一作者简介: 潘建国(1988—), 男, 甘肃庆阳人, 学士, 工程师, 主要从事工程管理工作。

通信作者简介: 谭力海(1988—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学研究。

数值模拟是研究岩体渗流的重要工具。在中大尺度范围内,岩体的节理裂隙具有可近似等效的分布特征,研究者常采用连续介质渗流模型结合有限元或有限差分法进行模拟^[11-18];但这些方法在用于处理考虑裂隙场动态发育的渗流问题时,存在局限性。为研究岩体渗流行为,引入了离散元颗粒流数值建模方法^[19-22]。

目前,岩体渗流行为的研究已从宏观结构分析深入到微观裂隙尺度,通过试验与模拟实现多物理场的动态耦合。但对于不同岩层倾角条件下岩体渗流行为的研究基本以完整岩样为研究对象,较少考虑渗流场与内部孔洞、节理等缺陷的相互作用,未能有效揭示岩层倾角变化带来的水力通道重构与渗流方向偏转等非线性效应。笔者通过构建包含不同岩层倾角的离散元数值模型,对组合岩层与含缺陷岩体的渗流特征进行分析,旨在为复杂地质环境下的地下工程渗流控制与灾害预测提供理论支撑与工程指导。

1 层状非均质应力场-渗流场耦合数值模型建立

1.1 水力耦合建模原理

岩石材料力学仿真模拟主要采用内置的线性平行粘结接触模型(PBM)^[23](图1)。其中粘结组件与线性组件平行,通过传递力与力矩,建立相接触颗粒间的力学联系。平行粘结可视为一组分布在以接触点为中心的接触面上的弹簧,其法向刚度和切向刚度保持恒定;这些弹簧与线性组件平行,作用在接触两端的力可导致相对运动并产生力和力矩。若最大法向应力或剪应力超过粘结组件中的相应强度,粘结组件将被破坏,此时颗粒间只存在线弹性接触,在颗粒层面表现为2个粘结颗粒间的断裂^[24]。PBM可较好地描述岩石或类岩石材料的力学行为,在岩石力学破坏的数值仿真研究中得到了广泛的应用^[25-30]。

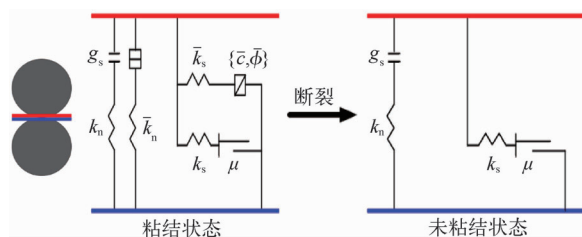


图1 平行粘结接触本构模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the parallel bond method contact constitutive model

岩体内部渗流场离散元数值建模基本原理如下^[31]:

1) 达西定律

法国工程师达西进行了水通过饱和砂的试验研究,发现了渗流量(Q)与上下游水头差($h_2 - h_1$)、垂直于水流方向的截面积(A)成正比,与渗流长度(L)成反比。

$$Q = KA \frac{(h_2 - h_1)}{L}. \quad (1)$$

达西定律适用于一定的雷诺数范围,目前地下水动力学理论大多是在达西定律基础上建立的。

2) 流动方程

在采用颗粒流离散元法进行渗流场仿真模拟时,需要在数值模型中引入流体域概念。流体域是一系列相互接触的颗粒围成的最小封闭区域。每个流体域中的水压会等效成体力,施加在组成该流体域的颗粒上,在渗流模拟过程中,流体域内部的水压会不断更新。2个相邻颗粒间的接触被定义为管道,2个相邻流体域间的渗透行为通过两者之间的管道进行。假设管道长度为 L ,孔径为 a 。那么,每单位时间、单位长度管道内通过的流量(q)为

$$q = ka^3 \frac{(p_2 - p_1)}{L}, \quad (2)$$

式中: k 为传导系数; p_1 与 p_2 分别为相邻2个流体域的水压; $(p_2 - p_1)$ 为相邻流体域之间的压力差。

3) 压力方程

在数值仿真过程中,每计算一段时间(Δt)后,对全局流体域进行更新。在本研究中, Δt 被定义为渗流计算时间步长,其大于等于数值模型整体计算时间步长。令 Δt 内单个流体域内流量变化总和为 $\sum q$,则流体域内水压变化量为

$$\Delta p = \frac{K_f}{V_d} (\sum q \Delta t - \Delta V_d), \quad (3)$$

式中: K_f 为流体的体积模数; V_d 为流体域表观体积。

4) 渗流求解

在每个渗流时间步长内,利用式(3)对每个流体域的相关数据进行交替求解和更新。假设某个流体域内存在的扰动压力为 Δp_p ,那么流体域内流量变化量为

$$q = Nka^3 \frac{\Delta p_p}{2R}, \quad (4)$$

式中: R 为流体域周围颗粒的平均半径; N 为连接到该流体域的管道数量。

流量变化导致的该流体域的压力变化为

$$\Delta p_r = \frac{K_f}{V_d} \sum q \Delta t_o \quad (5)$$

为了保证计算的稳定,流量变化导致的压力变化(Δp_r)必须小于扰动压力(Δp_p),即渗流时间步长应该满足

$$\Delta t > \frac{2RV_d}{NK_f k a^3} \quad (6)$$

1.2 数值模型建立

本研究共建立了5种二维数值模型(图2~图3)。数值试样尺寸均为10 cm×10 cm,模型颗粒尺

寸为0.08~0.12 cm,初始孔隙率为0.1,试样顶部水压设置为0.2 MPa,底部水压设置为0,试样两侧为非渗流边界。均质完整试样的岩层渗流传导系数为 2.77×10^{-4} cm/s;含双岩层的试样中岩层1与岩层2的渗流传导系数分别为 1.38×10^{-3} cm/s与 2.77×10^{-4} cm/s。水流从数值模型顶部向下渗流。均质完整试样中岩体材料的相关参数见表1。渗流模拟时岩体完整且不涉及岩石材料破坏状态,力学参数不影响渗流特征,因此在含双岩层试样中的岩层1与岩层2的模型参数一致,仅渗流传导系数不同。

表1 均质完整试样数值模型参数

Table 1 Parameters of numerical models for homogeneous intact specimen

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	μ	E_c/GPa	k^*	$\bar{E}/\text{GPa}$	$\bar{k}^*$	$\bar{c}/\text{MPa}$	$\bar{\sigma}_t/\text{MPa}$
2.5	0.577	2.5	0.8	2.5	0.8	2.2	1.5

注: ρ —颗粒密度; μ —颗粒摩擦系数; E_c —线性接触有效变形模量; k^* —线性接触法向-切向刚度比; $\bar{E}$ —粘结接触有效变形模量; $\bar{k}^*$ —粘结接触法向-切向刚度比; $\bar{c}$ —粘结接触内聚力; $\bar{\sigma}_t$ —粘结接触抗拉强度。

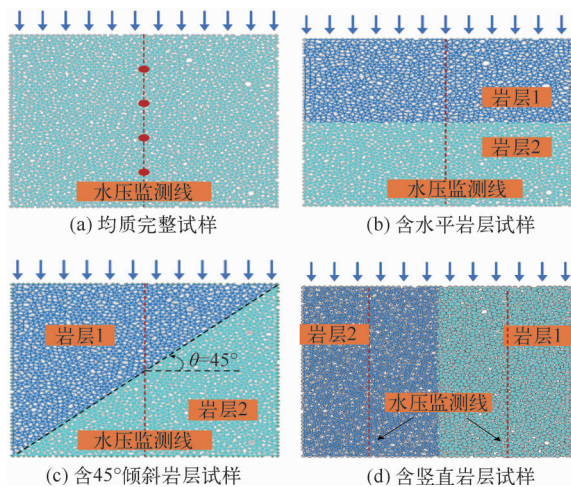


图2 试样渗流场数值模型

Fig. 2 Numerical models for seepage simulation

对于含裂纹的应力场-渗流场耦合模型,裂纹简化为长3 cm、宽0.3 cm、长轴线与水平线夹角为45°的矩形。单轴压缩测试表明:当不考虑渗流场时,试样中裂纹尖端起裂时轴向应力约为2.2 MPa。为探究渗流场对高应力场岩体可能存在的诱导破坏影响,将初始应力场设为2.0 MPa;顶部水压设为0.2 MPa。

为了监测渗流过程中试样内部的水压演化特

征,各模型均在试样中间沿竖直方向布置了一条或两条监测线。监测线起点为试样顶部中点(0,0),终点为试样底部中点(0,10),以cm为单位。为进一步监测具体位置的水压演化情况,每条监测线在2、4、6、8 cm处均布置了监测点(图2a)。

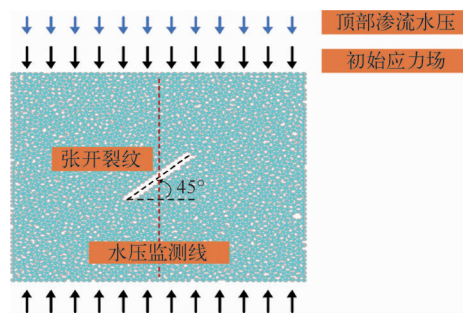


图3 应力场-渗流场耦合作用下含单条裂纹试样数值模型

Fig. 3 Numerical model of a specimen with a single crack under coupled stress-seepage fields

2 均质岩体渗流场演化规律

均质岩体模型内不同渗流时间下渗流压力空间分布曲线、不同位置渗流压力随时间的变化曲线、不同渗流时间下渗流压分布情况、不同渗流时间下数值模型力链分布情况见图4~图7。可以看出,在渗流初期(渗流时间为10 h),渗流水压

主要集中在试样顶部,试样中下部的水压接近于0,沿着渗流方向,监测线上的水压分布呈降低趋势,并逐渐接近于0。随着渗流时间的延长,水流不断向下渗透;当渗流时间达到290 h时,从试样顶部到试样底部的渗流方向上水压基本呈线性分布,等距监测点间的水压差基本相同。根据达西定律可知,在渗流稳定后,监测线的水压理论分布曲线是一条起点为0.2 MPa、终点为0 MPa的线

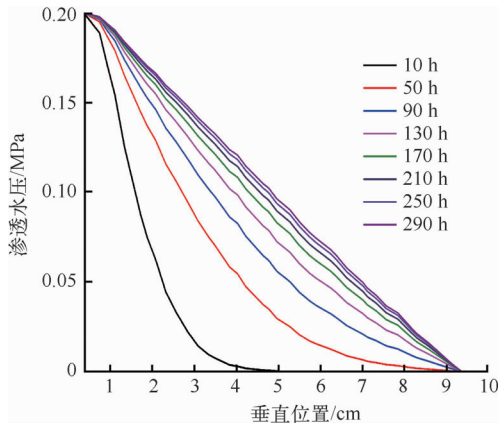


图4 均质岩体模型内不同渗流时间下渗流压力空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of seepage pressure at different seepage times in the homogeneous rock model

段。当渗流时间超过250 h时,监测线上的水压分布特征与理论值基本一致,说明此时试样内部各处的渗流水压已基本稳定(图6)。同时,由图6和图7可见,随着渗流时间的延长,试样内部孔隙水压也不断增加并从试样顶部到底部逐渐呈均匀线性降低的分布趋势。孔隙水压的增加导致水与岩体颗粒的相互作用增强,在水压较高区域,颗粒间的作用力更明显。

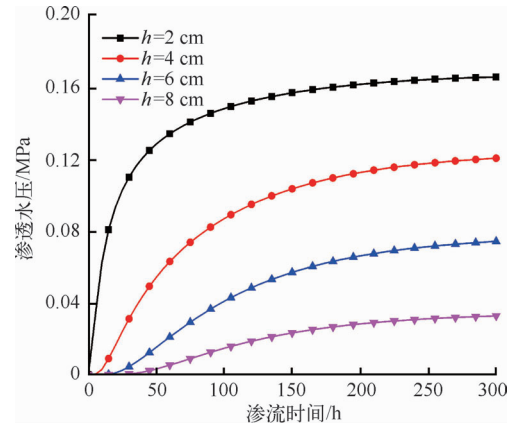


图5 均质岩体模型内不同位置渗流压力随时间变化

Fig. 5 Variation of seepage pressure over time at different locations in the homogeneous rock model

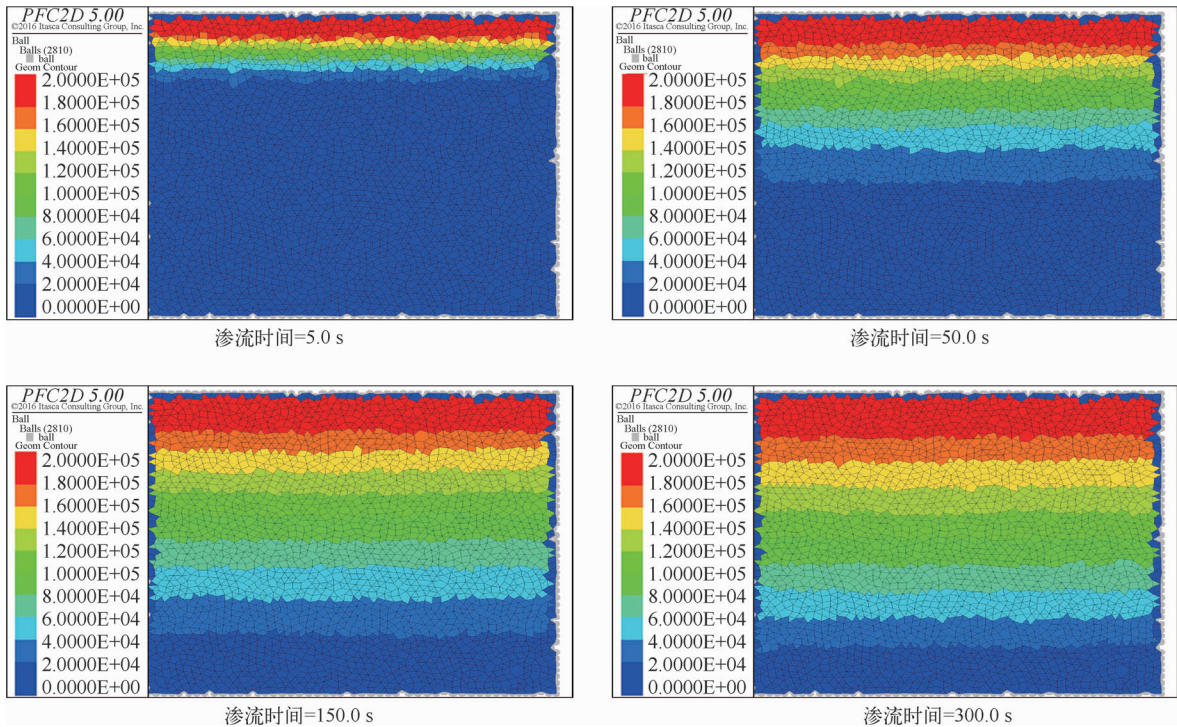


图6 均质岩体模型内不同渗流时间下渗流水压分布情况

Fig. 6 Seepage pressure distribution at different seepage times in the homogeneous rock model

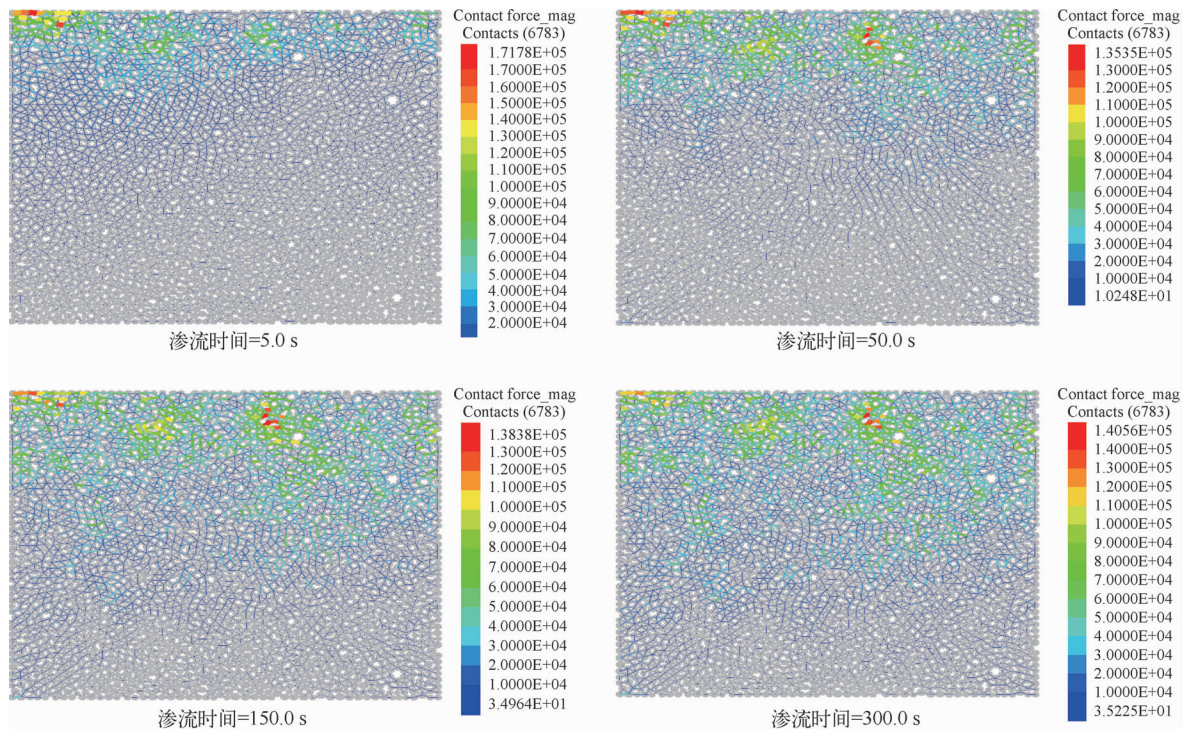


图7 均质岩体模型内不同渗流时间下力链分布情况

Fig. 7 Force chain distribution at different seepage times in the homogeneous rock model

3 非均质岩层渗流场演化规律

3.1 含水平岩层渗流场

当渗流场达到稳定后,在渗流方向上均质岩体的渗流水压呈线性分布;但当岩体中存在多组不同渗流性质的岩层时,水压分布规律发生了变化。含水平岩层试样内不同渗流时间下渗流压力空间分布与渗流场稳定后水压分布情况见图8。

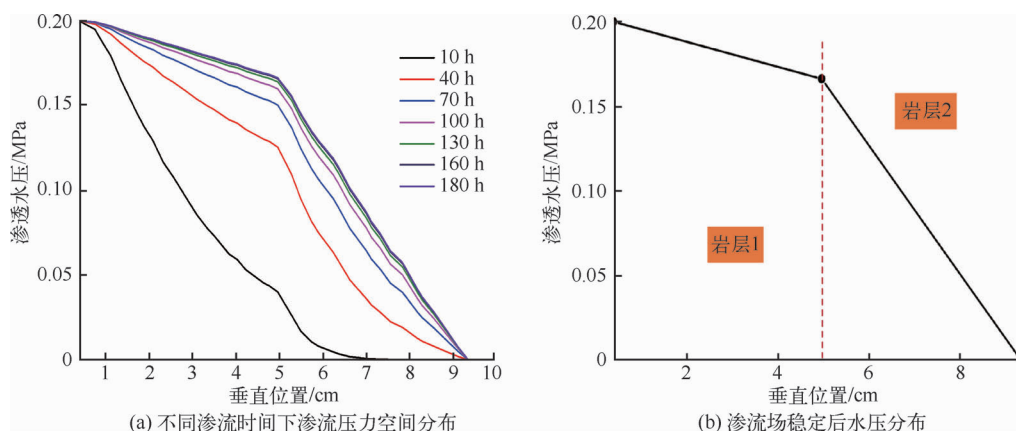


图8 含水平岩层试样内不同渗流时间下渗流压力空间分布与渗流场稳定后水压分布

Fig. 8 Spatial distribution of seepage pressure at different seepage times and the stabilized seepage pressure in the specimen with horizontal strata

由图8(a)可见,在渗流场演化过程中,岩层1与岩层2内的渗流场存在明显的差异;随着渗流时间的延长,在岩层1(渗流传导系数较大)内的水压分布曲线逐渐平衡;在岩层2(渗流传导系数较小)内的水压分布梯度逐渐增加。由图8(b)可见,当渗流场达到稳定后,渗流水压在岩层1与岩层2内均呈直线分布;但二者斜率不同,岩层1内的渗流场水压更均匀。

含水平岩层试样内不同位置渗流压力随时间的变化见图9。对比图5与图9可见,在均质岩体试样中,当渗流场达到稳定状态时,相邻监测点间的水压差基本一致,即水压沿着渗流方向呈线性降低特征(图5);而在多岩层非均质岩体中,当渗流场达到稳定状态时,等距监测点之间的水压差并不相等,岩层1内等距监测点间的水压差要明显低于岩层2内等距监测点间的水压差。

含水平岩层试样内不同渗流时间下渗流压分布情况见图10,含水平岩层试样内不同渗流时间下数值模型力链分布情况见图11。可以看出,水平岩层的渗流场是沿着垂直渗流方向逐层向下发展,任一时刻同一水平的渗流压力基本相同。在渗流初期,受渗流压力的影响,岩层顶部颗粒之间存在明显的相互作用力,而在岩体底部,颗粒间基本不存在相互作用力;随着渗流过程的进行,底部颗粒间的相互作用力逐渐增加,并趋于稳定,其分

布规律与渗流场水压保持一致。

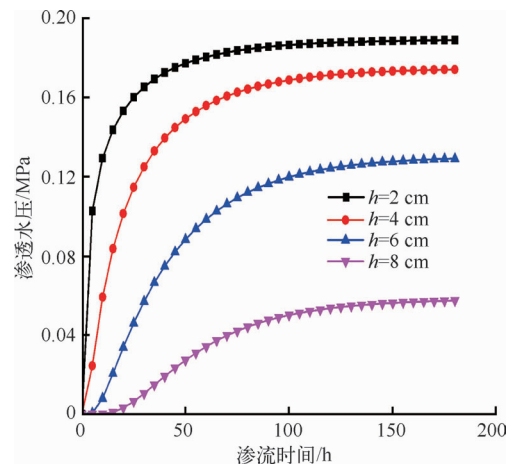


图9 含水平岩层试样内不同位置渗流压力随时间变化

Fig. 9 Seepage pressure distribution at different seepage times in the specimen with horizontal strata

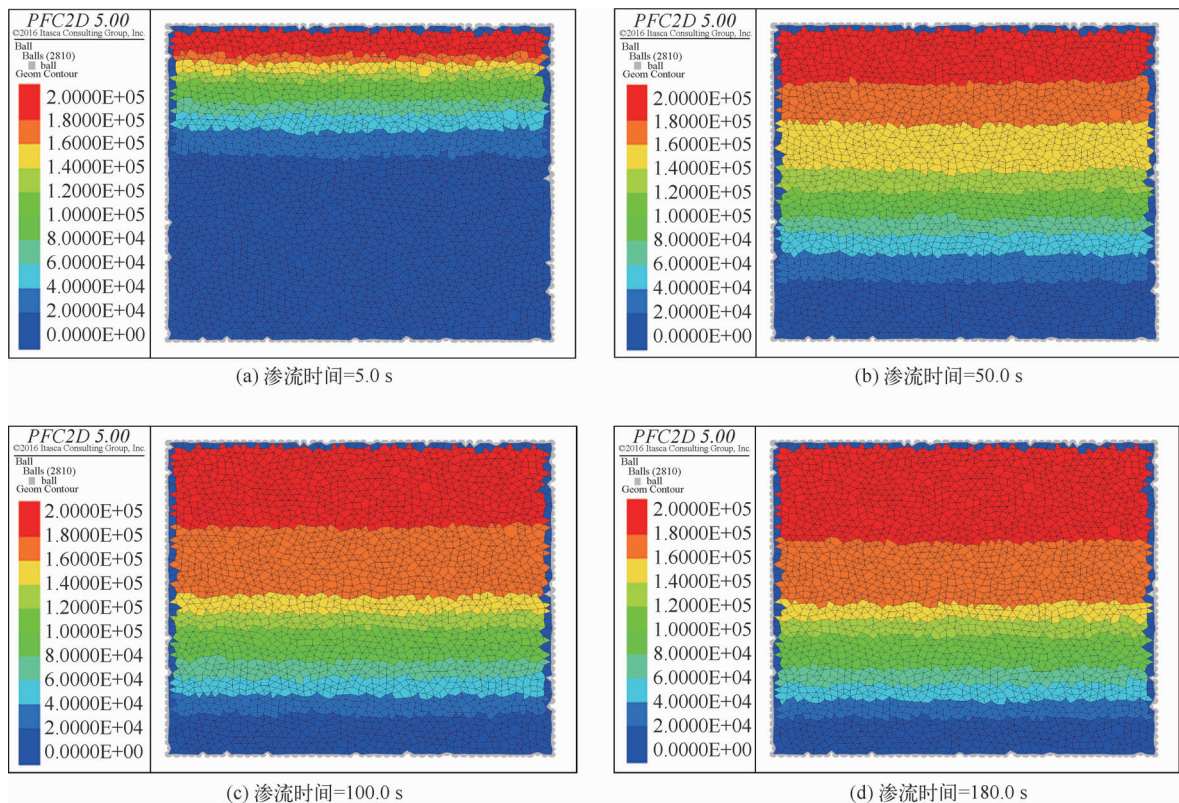


图10 含水平岩层试样内不同渗流时间下渗流压分布

Fig. 10 Seepage pressure distribution at different seepage times in the specimen with horizontal strata

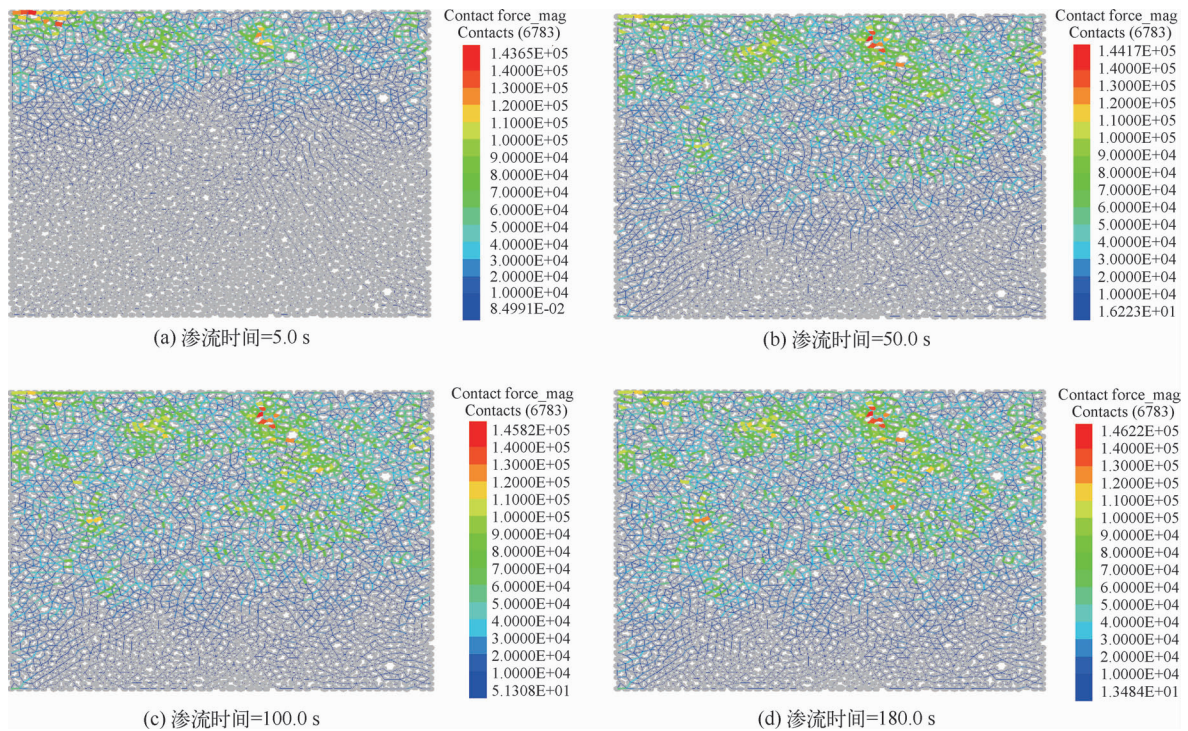


图 11 含水平岩层试样内不同渗流时间下力链分布

Fig. 11 Force chain distribution at different seepage times in the specimen with horizontal strata

3.2 含倾斜岩层渗流场

含倾斜岩层试样内不同渗流时间下渗流压力空间分布见图 12, 含倾斜岩层内不同位置渗流压力随时间变化见图 13。可以看出, 当两岩层为倾斜布置时, 不同岩层间的渗流场水压分布仍存在差异, 但与图 8 相比, 两岩层的渗流水压分布差异要明显减少; 与水平岩层相比, 在不同岩层中等距监测点之间的水压差更均匀。

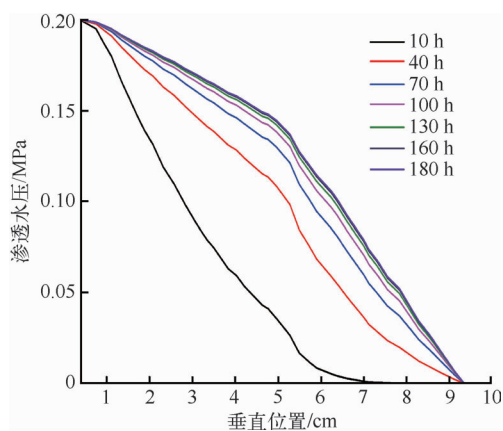


图 12 含倾斜岩层试样内不同渗流时间下渗流压力空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of seepage pressure at different seepage times in the specimen with inclined strata

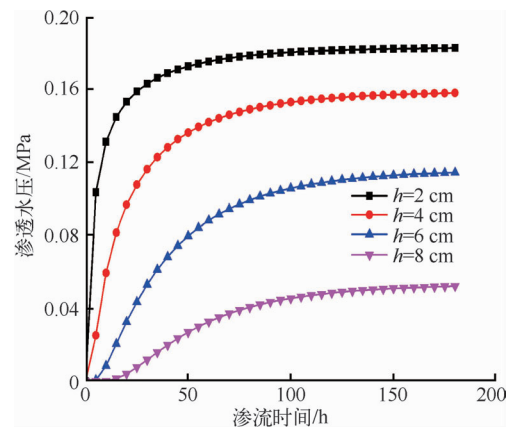


图 13 含倾斜岩层试样内不同位置渗流压力随时间变化

Fig. 13 Variation of seepage pressure over time at different locations in the specimen with inclined strata

含倾斜岩层试样内不同渗流时间下渗流水压分布见图 14。同水平段岩层交界面两侧的渗透水压存在明显差异, 岩层 2 的渗透水压要小于同水平岩层 1 的渗透水压。整体上, 在同一水平上, 岩层 1 内流体域随着距离交界面水平距离的增加而逐渐增加; 岩层 2 内流体域随着距离交界面水平距离的增加而逐渐减少, 说明随着距离的增加,

邻近岩层对渗流场的影响也在逐渐减少。总体上,岩体内渗流水压呈不对称“V”型分布。

含倾斜岩层试样内不同渗流时间下模型内力链分布情况见图 15。可以看到,岩层交界面右上

方区域,即岩层 1 区域内部颗粒间的相互作用力更为明显,但随着渗流时间的延长,在同一水平上,岩层交界面两侧水压的差异逐渐降低,其两侧区域的力链分布差异也相应减少。

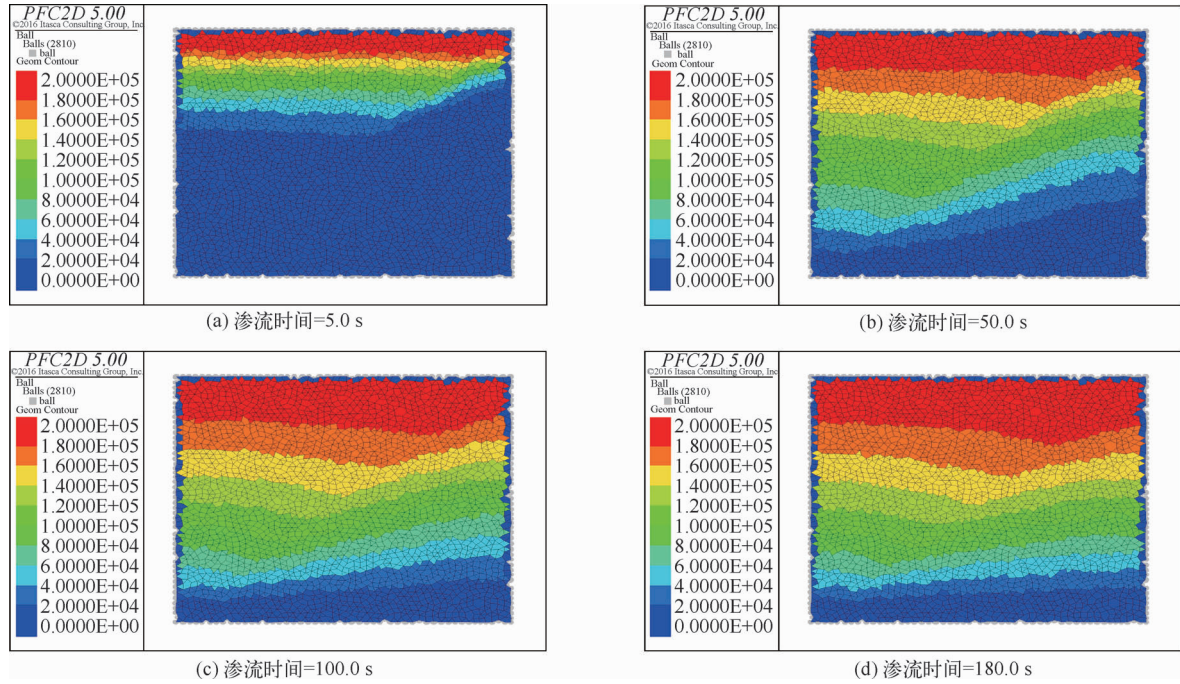


图 14 含倾斜岩层试样内不同渗流时间下渗流压分布

Fig. 14 Seepage pressure distribution at different seepage times in the specimen with inclined strata

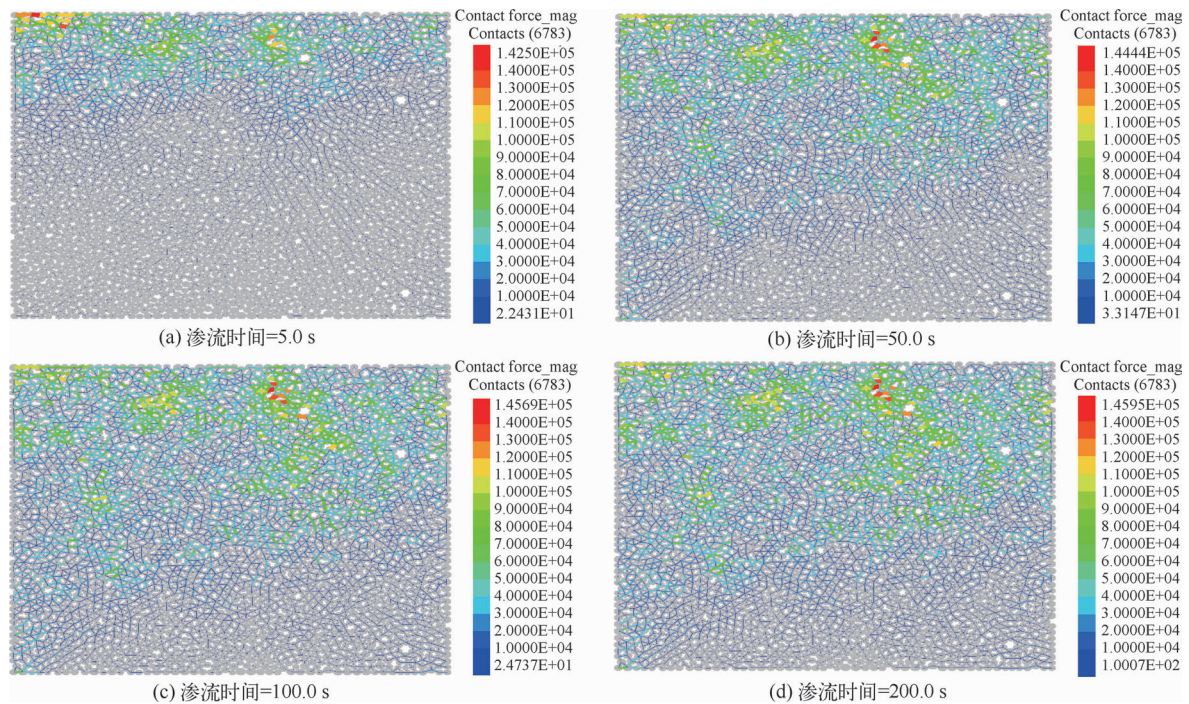


图 15 含倾斜岩层试样内不同渗流时间下力链分布

Fig. 15 Force chain distribution at different seepage times in the specimen with inclined strata

3.3 含垂直岩层渗流场

含垂直岩层试样内不同渗流时间下监测线渗流压力空间分布见图16,含垂直岩层试样内不同位置渗流压力随时间变化见图17。当岩层竖直布置时,即岩层走向与渗流方向平行时,不同岩层内部的渗流场存在明显差异。岩层1内部渗流场比岩层2内部渗流场达到稳定状态的时间更早。由图17可见,当渗流时间达到180 s时,岩层1内部等距监测点间的水压差已基本相同,水压基本呈线性分布,但此时岩层2内部等距监测点间的水压差还存在差异。

含垂直岩层试样内不同渗流时间下渗流压分布见图18,含垂直岩层试样内不同渗流时间下数值模型力链分布见图19。可以看出,岩层交界面两侧的渗流场在渗流初期存在显著差异,岩层1(右侧)初期的渗流速度明显大于岩层2(左侧)初期的渗流速度;但在渗流后期,随着岩层内部的渗流场逐渐达到稳定,两者的差异逐渐减少。当渗流时间达到180 s时,岩层2尚未完全达到渗流稳定状态,但总体上两岩层内同水平的流体域水压已经基本相同。力链分布的演化趋势与渗流场演化趋势基本一致。

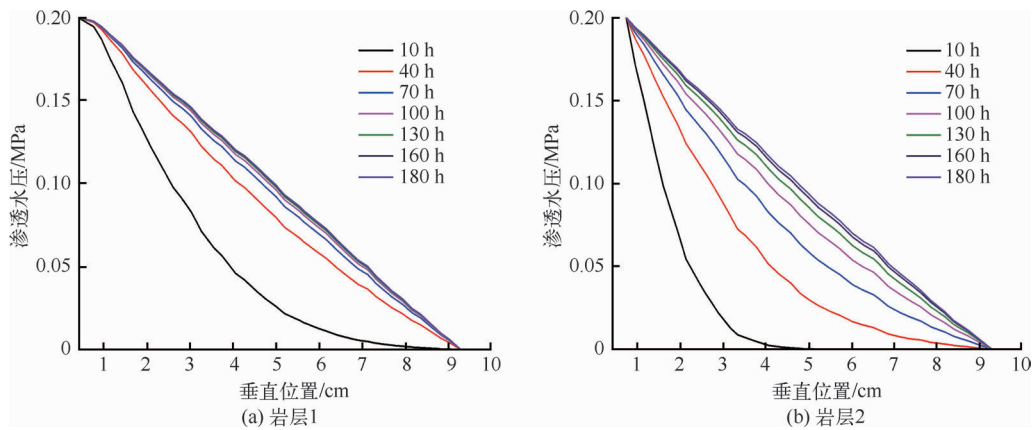


图16 含垂直岩层试样内不同渗流时间下监测线渗流压力空间分布

Fig. 16 Spatial distribution curves of seepage pressure along the monitoring line at different seepage times in the specimen with vertical strata

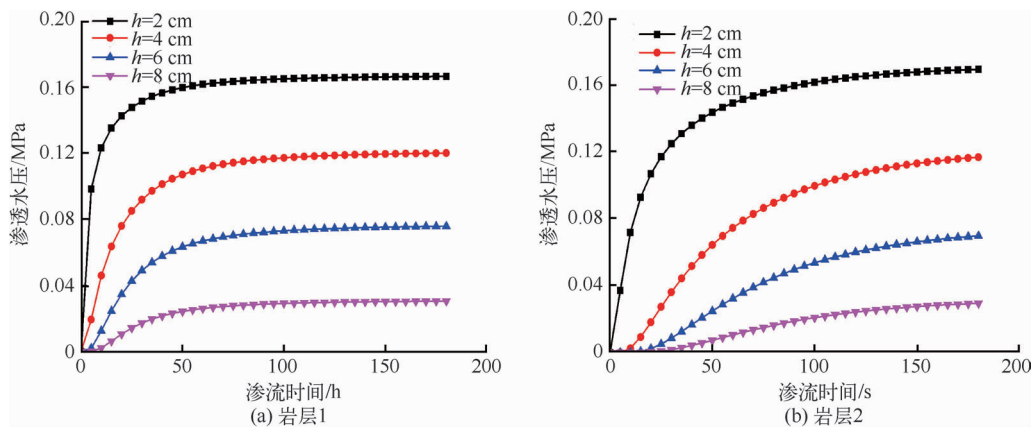


图17 含垂直岩层试样内不同位置渗流压力随时间变化

Fig. 17 Variation of seepage pressure over time at different locations in the specimen with vertical strata

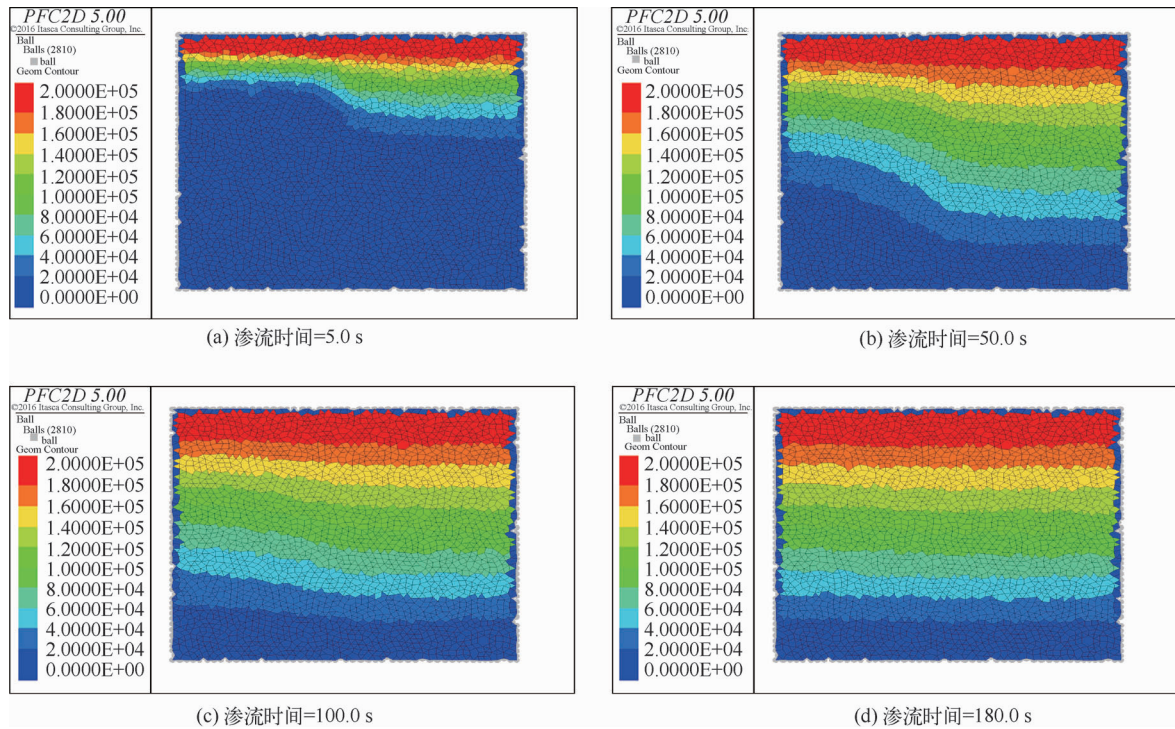


图 18 含垂直岩层试样内不同渗流时间下渗流压分布

Fig. 18 Seepage pressure distribution at different seepage times in the specimen with vertical strata

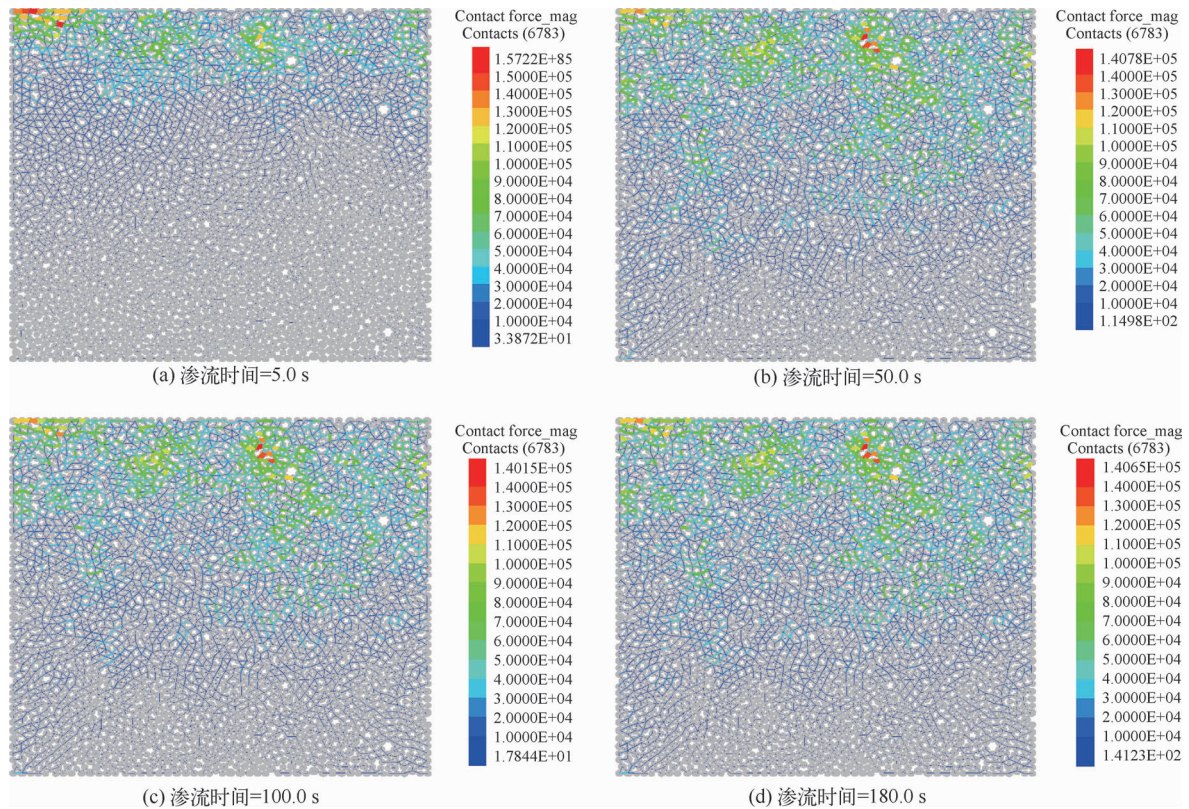


图 19 含垂直岩层试样内不同渗流时间下力链分布

Fig. 19 Force chain distribution at different seepage times in the specimen with vertical strata

4 含缺陷岩体应力场-渗流场耦合下力学行为

为研究渗流场对岩体破坏的影响,对含单条裂纹岩样在应力场-渗流场耦合下渗流场的演化过程与岩体破坏进行了模拟与分析。为了节约计算时间,模拟并未达到整体渗流场的稳定,而是在裂纹附近的局部渗流场接近稳定后便停止了计算。

含单条裂纹试样内不同渗流时间下监测线渗流压力空间分布见图 20,含单条裂纹试样内不同位置渗流压力随时间变化见图 21。可以看出,试样为均质岩体但存在预裂纹,与均质完整试样相比,在裂纹附近,监测线上的渗透水压分布受到明显影响,在裂纹附近曲线出现转折点。由于裂纹为大尺寸的流体域,在一个渗流时间步长内,其内部进出的水流量均会大于同水平的其他流体域;因此在渗流场稳定前,裂纹势必会对周围的渗流场分布产生影响。

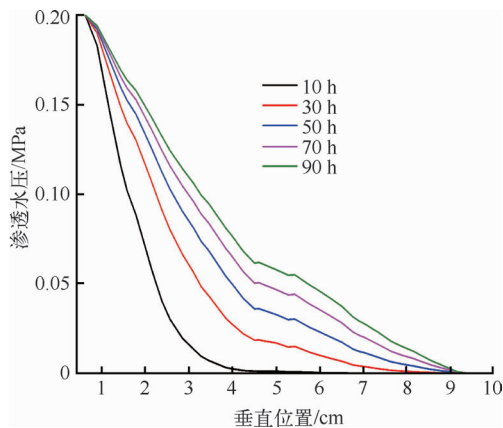


图 20 含单条裂纹试样内不同渗流时间下监测线渗流压力空间分布

Fig. 20 Spatial distribution of seepage pressure along the monitoring line at different seepage times in the specimen with a single crack

根据含裂纹不同渗流时间下渗流压分布(图 22)可见,在裂纹上方区域(水流的流入区域),渗流压力要小于同水平其他区域;而在裂纹下方区域(水流的流出区域),渗流压力要大于同水平其他区域。但由于裂纹较小,随着渗流时间的延长,其内部与附近区域的水压变化与周围流体域的水

压变化逐渐达到一致。因此,当整体渗流场达到稳定时,裂纹附近渗流水压与同水平渗流水压基本相同,裂纹的存在基本不影响稳定后整体渗流场。裂纹/孔洞的存在对其附近渗流场的具体影响因素可能包括裂纹/孔洞尺寸、岩体渗流性质以及外部水压等,在不同条件下,其影响也不同,需要针对具体工程问题进行分析。

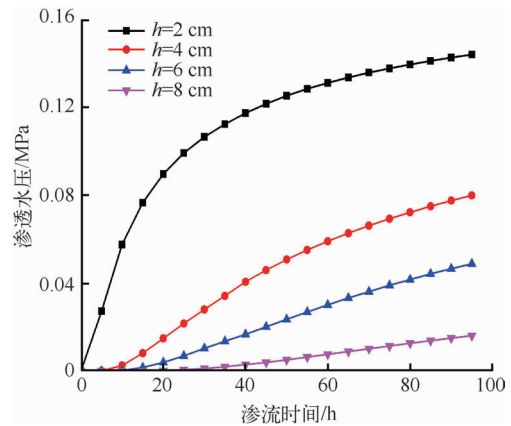


图 21 含单条裂纹试样内不同位置渗流压力随时间变化

Fig. 21 Variation of seepage pressure over time at different locations in the specimen with a single crack

当裂纹尖端附近应力集中区域内的渗透水压达到一定程度后,会诱发尖端裂纹的产生,形成破坏区域(图 22);但由于渗流场水压相对较小,并未导致试样的整体破坏。岩体在应力场-渗流场耦合作用下的破坏模式与单纯受力条件下的破坏模式也存在差异。从单轴压缩下含单条裂纹试样破坏模式(图 23)可以看出,在无渗流场的常规单轴压缩条件下,预制裂隙两端会延伸出平行加载方向的翼型拉伸裂纹,岩体试样内最终会形成贯通试样对角区域的裂隙带。而在应力场-渗流场耦合作用下,预制裂隙两端的初始裂纹并未沿加载方向发展为拉伸裂纹,而是在预制裂隙上端(孔隙水压较高的区域)形成了一个发散型的由孔隙水压主导的压裂破坏区域。这种破坏形态表明,渗流作用显著影响了裂纹的萌生与扩展路径。当渗流场产生的水压不足以驱动破坏进一步发展时,岩体内部不再产生新的裂纹。若此时破坏区域附近的渗流场已趋于稳定,岩体的破坏过程将随之停止。

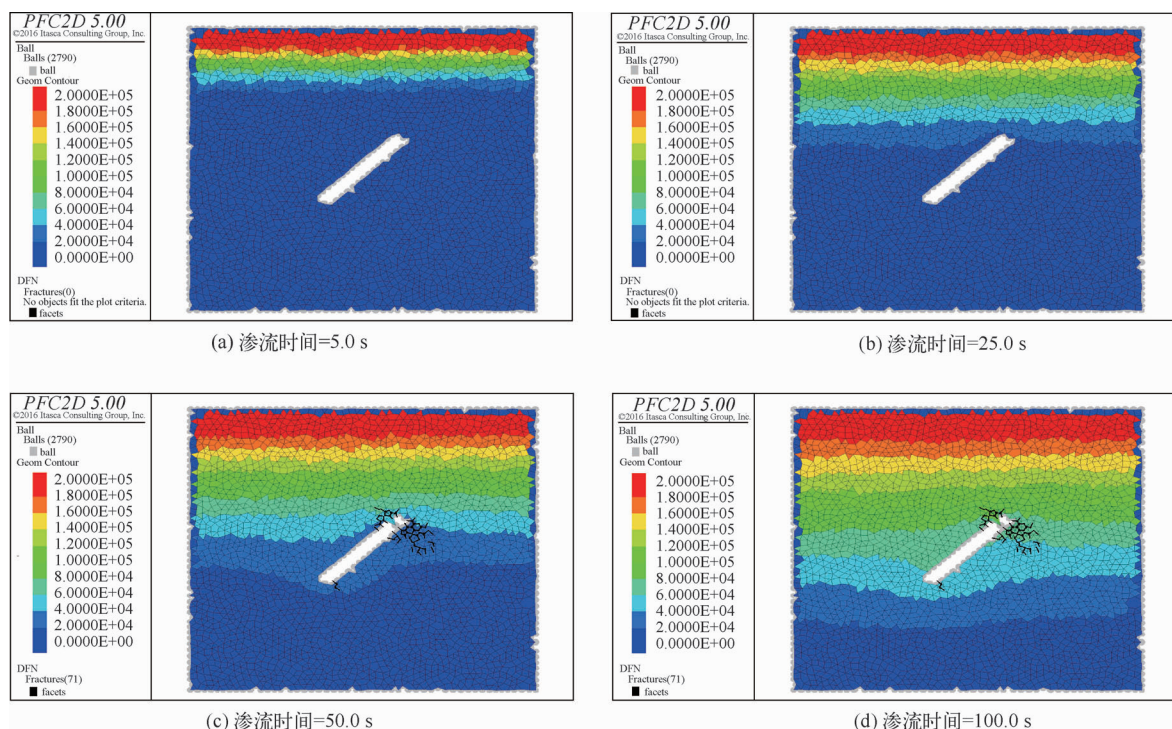


图 22 含单条裂纹试样内不同渗流时间下渗流压分布

Fig. 22 Seepage pressure distribution at different seepage times in the specimen with a single crack

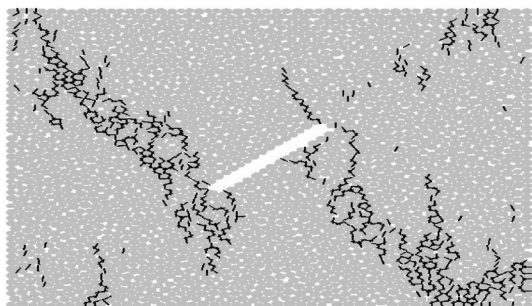


图 23 单轴压缩下含单条裂纹试样破坏模式

Fig. 23 Failure mode of the specimen with a single crack under uniaxial compression

5 结论

通过定义流体域,利用离散元软件 PFC 对地下水的渗流进行模拟,均质岩体内渗流模拟结果与达西定律一致,说明该方法的可靠性较好。基于该方法,对实际岩体工程地应力场-渗流场耦合作用下的流体-固体耦合渗流演化与岩体破坏行为进行模拟分析,并从宏观和微观角度对耦合作用下的岩体失稳机制进行研究。

由于渗流模拟中涉及时间因素,受计算机计

算能力限制,本研究对象为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 的岩样。但是,在不考虑宏观工程岩体中的局部小区域的非均质问题或缺陷问题,即假设宏观岩体局部完整均质的情况下,实际工程中对研究区域的渗流规律应与模拟小试样的完全一致,根据两者尺寸差距引入合适的放大系数即可。

与均质试样相比,当岩体内存在不同渗流性质的岩层时,其渗流场演化规律以及稳定渗流场内的水压分布情况会发生改变,其变化特征与岩层倾角相关。相邻两岩层渗流场相互影响,该影响随着流体域到岩层交界面的距离增加而降低。在渗透系数较低的岩层中,靠近交界面的区域渗透水压会高于本岩层内同水平的远离交界面的区域,而在渗透系数较高的岩层中,情况相反。

高应力场-低渗流场的耦合仿真结果表明,渗流场有可能诱导含缺陷岩体薄弱区域(如裂纹尖端)发生局部裂纹扩展。通常,破坏主要发生在应力集中区域;但在应力场与渗流场的耦合作用下,岩体的破坏演化过程及其破坏模式与单独受力条件下存在显著差异。对于预制裂纹,渗流水压会抑制裂纹尖端拉裂纹的发展,预设裂纹尖端破坏

区域主要为孔隙水压导致的压裂区域。在低水压渗流场条件下,当渗流水压不足以驱动破坏的进一步发展时,破坏区域的扩展将趋于停止。若此时破坏区域的渗流场已达到稳定状态,则破坏过程也将终止。此外,由于渗流场的分布具有非均匀性,裂纹更易在渗流水压较高的区域萌生和扩展,进一步影响岩体的整体破坏模式。

参考文献:

- [1] 陈卫忠,王鲁瑀,谭贤君,等.裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2021,40(10):1945-1961.
CHEN Weizhong, WANG Luyu, TAN Xianjun, et al. State-of-the-art and development tendency of the underground engineering stability of fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10):1945-1961(in Chinese).
- [2] ZHAO Y L, LIU Q, ZHANG C S, et al. Coupled seepage-damage effect in fractured rock masses: Model development and a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 144:104822.
- [3] 李伟,张博成,康健,等.围岩-水压耦合作用下煤岩渗流特性演化规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):1-7.
LI Wei, ZHANG Bocheng, KANG Jian, et al. Evolution law of coal rock seepage characteristics under the coupling effect of surrounding rock and water pressure[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(1):1-7(in Chinese).
- [4] 张江江,陈旭,黄超,等.围压卸载条件下砂岩损伤及渗透演化颗粒流模拟[J/OL].工程地质学报,1-16[2025-05-15]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2024-0332>.
ZHANG Jiangjiang, CHEN Xu, HUANG Chao, et al. Simulation of sandstone damage and permeation evolution particle flow under confining pressure unloading conditions[J/OL]. Journal of Engineering Geology, 1-16 [2025-05-15]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2024-0332>(in Chinese).
- [5] 宋勇军,王双龙,李蕾蕾,等.应力-渗流耦合作用下含软弱夹层砂岩渗透特性与力学行为研究[J/OL].工程科学与技术,1-16[2025-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240919.1631.001.html>.
SONG Yongjun, WANG Shuanglong, LI Leilei, et al. Research on the permeability characteristics and mechanical behaviors of sandstone with weak inter-layers under stress-seepage coupling[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 1-16 [2025-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240919.1631.001.html>(in Chinese).
- [6] ZHU H X, HAN L J. Experimental study on grouting seepage characteristics of single-fractured rock masses with different inclination angles under three-dimensional stress[J]. Geofluids, 2022.
- [7] 许慧聪,来兴平,单鹏飞,等.深部煤岩动力灾害多场耦合试验系统研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2025,44(4):926-939.
XU Huicong, LAI Xingping, SHAN Pengfei, et al. Development and application of multi-field coupling test system for deep coal and rock dynamic disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(4):926-939(in Chinese).
- [8] 王伟,刘泽,牛庆合,等.循环冲击作用下砂岩裂缝扩展及渗透率响应特征[J].爆炸与冲击,2025,45(6):78-91.
WANG Wei, LIU Ze, NIU Qinghe, et al. Fracture propagation and permeability response characteristics of sandstone under cyclic impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(6):78-91(in Chinese).
- [9] 黄震,汪振鹏,古启雄,等.弱胶结充填型断层破碎带岩体渗流特性研究[J/OL].煤炭学报,1-14[2025-05-15]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1381>.
HUANG Zhen, WANG Zhenpeng, GU Qixiong, et al. Research on seepage characteristics of rock mass in weakly cemented filling fault fracture zones[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-14 [2025-05-15]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1381>(in Chinese).
- [10] 刘新荣,张吉禄,周小涵,等.考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究[J].岩土力学,2024,45(12):3596-3612.
LIU Xinrong, ZHANG Jilu, ZHOU Xiaohan, et al. Deformation and seepage characteristics of precast fractured rock mass considering the influence of axial stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(12):3596-3612(in Chinese).
- [11] WANG Y X, CHAI J R, CAO J, et al. Effects of seepage on a three-layered slope and its stability analysis under rainfall conditions[J]. Natural Hazards, 2020, 102(3):1269-1278.

- [12] 蒋文健.考虑饱和-非饱和和渗流的水封石油洞库围岩水位变化分析[J].中国水运,2025(4):117-119.
JIANG Wenjian. Analysis of water level changes in surrounding rock of water-sealed oil caverns considering saturation-unsaturated seepage[J]. Zhong Guo Shui Yun, 2025(4):117-119.
- [13] 骆云婷.江西省前进水库大坝坝基岩石渗漏规律分析[J].水利科学与寒区工程,2025,8(3):117-121.
LUO Yunting. Analysis on rock seepage law of dam foundation of Qianjin reservoir in Jiangxi Province[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2025,8(3):117-121.
- [14] 李栋,周岳,王峰,等.隧道围岩节理裂隙变频渗流数值模拟研究[J].现代隧道技术,2024,61(5):146-155.
LI Dong, ZHOU Yue, WANG Feng, et al. Numerical simulation of variable frequency seepage flow in tunnelsurrounding rock joint fractures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(5): 146-155 (in Chinese).
- [15] 邓开颖,马绒康.不同孔隙水压力下的天然裂隙岩石流固耦合损伤探究[J].建材发展导向,2025,23(4):67-69.
DENG Kaiying, MA Rongkang. Investigation on fluid-structure coupling damage of natural fractured rocks under different pore water pressures[J]. Development Guide to Building Materials, 2025,23(4):67-69(in Chinese).
- [16] HU J, WEN H J, XIE Q L, et al. Effects of seepage and weak interlayer on the failure modes of surrounding rock: Model tests and numerical analysis[J]. Royal Society Open Science, 2019,6(9):190790.
- [17] 王卫军,赵延林,李青锋,等.矿井岩溶突水灾变机理[J].煤炭学报,2010,35(3):443-448.
WANG Weijun, ZHAO Yanlin, LI Qingfeng, et al. Disaster mechanism of karst water bursting in mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 443-448(in Chinese).
- [18] 胡千庭,刘继川,李全贵,等.煤层分段水力压裂渗流诱导应力场的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):761-769.
HU Qianting, LIU Jichuan, LI Quanguai, et al. Numerical simulation of seepage induced stress field in sectional hydraulic fracturing of coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4):761-769(in Chinese).
- [19] CHEN Z H, LI X B, DUSSEAUULT M B, et al. Effect of excavation stress condition on hydraulic fracture behaviour[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020,226:106871-106871.
- [20] DUAN K, LI Y C, YANG W D. Discrete element method simulation of the growth and efficiency of multiple hydraulic fractures simultaneously-induced from two horizontal wells[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021,7(1).
- [21] YANG W M, GENG Y, ZHOU Z Q, et al. DEM numerical simulation study on fracture propagation of synchronous fracturing in a double fracture rock mass[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020,6(2):19.
- [22] LIU G, SUN W C, LOWINGER S M, et al. Coupled flow network and discrete element modeling of injection-induced crack propagation and coalescence in brittle rock[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 843-868.
- [23] POTYONDY D O, CUNDALL P. A bonded-particle model for rock[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [24] ITASCA C. PFC: Particle flow code in 2 and 3 dimensions: Version 5.0: User's manual[Z]. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014.
- [25] ZHANG X P, LIU Q S, WU S C, et al. Crack coalescence between two non-parallel flaws in rock-like material under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2015, 199:74-90.
- [26] LI X B, LI C J, CAO W Z, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104:131-146.
- [27] ZHANG X P, WONG L N Y. Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: A numerical study based on parallel bonded-particle model approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012,45(5):711-737.
- [28] HUANG D, CEN D F, MA G W, et al. Step-path failure of rock slopes with intermittent joints[J]. Landslides, 2015,12(5):911-926.
- [29] ZHANG X P, WONG L N Y. Displacement field analysis for cracking processes in bonded-particle model[J]. Bulletin of Engineering Geology and the

- Environment, 2014, 73(1):13-21.
- [30] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 997-1010.
- [31] ITASCA Consulting Group Inc. PFC2D: Particle flow code in 2 dimensions: Ver. 4.0[Z]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2012.

Numerical Study on Groundwater Seepage Characteristics in Strata with Varying Dip Angles

PAN Jianguo¹, TAN Lihai², SHENG Jia³, PENG Huaide²

(1. CNNC Geological Exploration Group Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

3. National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China)

Abstract: In the numerical study of groundwater seep characteristics in rock mass under different rock dip angles, the influence of seep field on internal defects such as holes and joints, the influence of seep field on rock mass stability, and the instability mechanism of rock mass under the coupling of seep field and ground stress field were seldom considered. This study employed discrete element software (PFC) to define fluid domains, simulating fluid-solid coupling evolution and rock mass failure behavior under coupled geostress and seepage fields. Macroscopic and microscopic analyses were conducted to investigate instability mechanisms. The results indicate that the coupling of high-stress fields and low-seepage fields can induce crack propagation in weak zones, such as crack tips, leading to rock mass failure. Compared to stress fields alone, coupling effects exhibit distinct failure patterns. Additionally, under low water pressure, seepage pressure can suppress tensile crack propagation at crack tips, primarily resulting in compressive failure zones. This research provides theoretical insights for understanding seepage behavior and assessing rock mass stability in complex engineering conditions.

Key words: fluid domain; rock mass failure; stress-seepage coupling; dip angle of rock strata; discrete element software; rock mass instability; simulation research