弱胶结含水层开拓巷道泥石流形成模拟分析*

赵恰[1,2,3]

(1.低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室， 福建 上杭县 364204；
2.紫金矿业集团股份有限公司， 福建 上杭县 364200；
3.紫金(长沙)工程技术有限公司， 湖南 长沙 410036)

摘要：为研究弱胶结含水层井下开拓工程发生泥石流的机理，以新疆某矿弱胶结砂岩为研究对象，分析了其胶结特征与水理特性，利用孔隙率、膨胀率与渗透率数学模型，得出了矿山弱胶结含水层不同膨胀率条件下的渗透率。以此为基础，采用流固耦合模型分析了开拓工程处于不同埋深条件下，巷道松动圈围岩遇水膨胀过程中其周边塑性区及渗流场变化情况。研究表明：围岩遇水膨胀将增加含水层的透水性，提高其渗透率，当围岩膨胀率增加至30%时，巷道开挖后的单位涌水量将增加1.5～2倍，且随着开拓深度的增加，单位涌水量将大幅增加，为井下泥石流的发生提供充足的水源；弱胶结粉砂岩强度较低，开拓工程掌子面易形成塑性破坏区，且随着开拓深度的增加，巷道掌子面的塑性破坏越大，在地下水的侵蚀与冲刷条件下易崩塌、分解成为物源；井下裂隙发育区的围岩稳定性差，地下水渗流通道畅通、补给充分，在地下水作用下易膨胀垮塌、分解，并被地下水夹携而形成泥石流，为井下泥石流发生的重点区域。研究成果有助于进一步揭示弱胶结含水层井下开拓工程泥石流形成的机理。

关键词：弱胶结含水层；井下泥石流；膨胀率；渗透率；单位涌水量

中图分类号：TD853　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)04-0120-08

Simulation Analysis of Debris Flow Formation in Weak Cemented Aquifer Development Roadway

ZHAO Qia[1,2,3]

(1.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores, Shanghang, Fujian 364204, China;
2.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364200, China;
3.Zijin(Changsha) Engineering Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410036, China)

Abstract: In order to study the mechanism of debris flow in the underground development project of weak cemented aquifer, the weak cemented sandstone of a mine in Xinjiang was taken as the research object, and its cementation characteristics and water characteristics were analyzed. The mathematical models of porosity, expansion rate and permeability were used to obtain the permeability of weak cemented aquifer under different expansion rates. On this basis, the fluid-solid coupling model was used to analyze the changes of surrounding plastic zone and seepage field in the process of water expansion of surrounding rock of roadway loose circle under different buried depth conditions. The research shows that the water expansion of surrounding rock will increase the permeability of aquifer and improve its permeability. When the expansion rate of surrounding rock increases to 30%, the unit water inflow after roadway excavation will increase by 1.5 to 2.0 times, and with the increase of development depth, the unit water inflow will increase greatly, which will provide sufficient water source for the occurrence of underground debris flow. The strength of weak cemented siltstone is low, and it is easy to form a plastic failure zone on the tunnel face of the development project. With the increase of the development depth, the plastic failure of the tunnel face is greater, and it is easy to collapse and decompose into a source under the condition of groundwater erosion and scour. The stability of surrounding rock in the underground fracture development area is poor, the groundwater seepage channel is smooth and the supply is sufficient. It is easy to expand, collapse and decompose under the action of groundwater, and it is carried by groundwater to form debris flow, which is the key area of underground debris flow. The research results are helpful to further reveal the formation mechanism of debris flow in the underground development project of weak cemented aquifer.

Key words: Weak cemented aquifer, Underground debris flow, Expansion rate, Permeability, Unit water inflow

---

* **收稿日期**：2024-07-25
基金项目："十四五"国家重点研发计划项目(2022YFC2903902)
作者简介：赵恰(1984—)，男，陕西渭南人，硕士，高级工程师，主要从事矿山防治水技术研究工作。E-mail：309698171@qq.com

0 引言

弱胶结地层为一种特殊的朱罗系和白垩系地层,广泛分布于我国西部地区[1]。从地质时期来看,弱胶结地层成岩时间短,具有特殊的胶结特性和水力特性,从大量工程实践成果来看,该类地层岩石普遍具有胶结差、黏聚力小、易风化和岩芯提取率低的特点。从岩石的力学性质角度来看,弱胶结地层岩石的力学强度普遍较低,且遇水以后岩石强度还将大幅下降,甚至表现出明显泥化崩解现象,特别是矿山、隧道等地下工程揭露富水及透水性强的弱胶结含水层时,极易出现突水、溃塌,甚至形成泥石流等安全事故[2-3]。国内外学者对弱胶结砂岩含水层开展了大量的研究,贺庆丰等[4]以红庆河煤矿弱胶结砂岩为研究对象,分析了不同含水率条件下弱胶结砂岩的岩石力学特性。李辉[5]模拟分析了富水弱胶结围岩的物理力学损伤机理,制定了富水弱胶结巷道的支护方案。李回贵等[6]以大柳塔煤矿弱胶结砂岩为研究对象,分析了含水率对弱胶结砂岩力学的影响规律。苗胜军等[7]通过单轴、三轴压缩试验研究分析了不同围压下岩石的力学性质,分析了多孔弱胶结粉砂岩的破裂影响机制,构建了压密-损伤本构模型。赵维生等[8]模拟分析了弱胶结软岩不同含水率条件下的巷道塑性变化特征。国内外对弱胶结砂岩的研究多从岩石力学角度出发,研究成果多集中在水对岩体的物理力学性质影响上,而针对弱胶结砂岩在水岩相互影响下渗流及岩体塑性变化而引发泥石流形成原理与条件的研究较少。

因此,本文以新疆某矿弱胶结砂岩为研究对象,分析了弱胶结砂岩胶结特征与水理特性,构建了孔隙率、膨胀率与渗透率数学模型,得出了弱胶结砂岩膨胀过程中的岩体渗透率,利用流固耦合模型,模拟分析了弱胶结砂岩含水层井下泥石流形成过程,为井下泥石流治理提供参考。

1 弱胶结砂岩胶结特征及其水力特性

1.1 弱胶结砂岩胶结特征

新疆某矿地层为一套海退砂-泥-碳酸盐岩建造,厚度 506.27 m,岩性为砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩,地层成岩时间晚,胶结强度低。依据砂岩组成主要矿物及特性,一般将组成矿物划分为骨架和胶结物两类[9-10]。矿山井下开拓工程布设在弱胶结砂岩中,掘进巷道揭露的弱胶结含水层如图 1 所示,通过对 1 950 m 中段和 1 900 m 中段岩样矿物成分分析得出,矿山弱胶结砂岩中的骨架部分主要由石英(45.5%)、长石(18%)、方解石(16.8%)、菱锌矿(4%)、黄铁矿(1.2%)、云母(4.2%)等组成;胶结物部分主要为高岭石和绿泥石等黏土矿物,故为以泥质胶结为主的弱胶结砂岩含水层。



(a) 弱胶结砂岩涌水



(b) 巷道揭露的弱胶结砂岩

图 1 巷道工程揭露的弱胶结砂岩

Fig.1 Weak cemented sandstone exposed by roadway engineering

1.2 弱胶结砂岩的水理特性

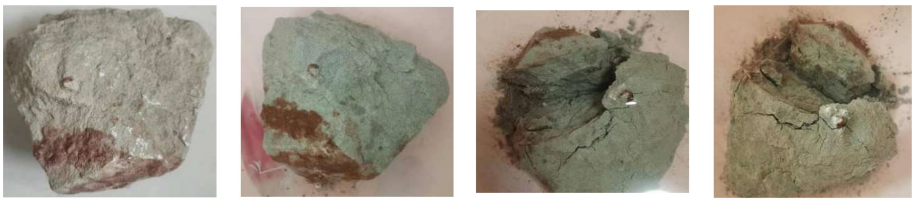
(1) 孔隙率。多孔介质孔隙率是指孔隙体积和多孔介质总体积的比值[11-12]。在矿山共取样 21 个,测得其孔隙率为 6.18%～23.90%,平均孔隙率为 16.37%,表现为高孔隙率的特征(孔隙率>10%),详见表 1。

表 1 弱胶结砂岩孔隙率统计

Table 1 Porosity statistics of weak cemented sandstone

编号	孔隙率/%	编号	孔隙率/%	编号	孔隙率/%
Sk-1	19.30	Sk-8	18.50	Sk-15	19.50
Sk-2	14.10	Sk-9	20.90	Sk-16	21.80
Sk-3	8.15	Sk-10	14.60	Sk-17	6.20
Sk-4	19.10	Sk-11	14.30	Sk-18	17.30
Sk-5	6.18	Sk-12	16.20	Sk-19	23.90
Sk-6	20.90	Sk-13	11.50	Sk-20	9.96
Sk-7	20.60	Sk-14	19.90	Sk-21	21.00

(2) 膨胀特性。将井下 1 900 m 中段所取弱胶结砂岩样浸泡入水中后,从岩样上冒出大量气泡,并发出滋滋声,呈现明显吸水现象。浸泡 4 h 时岩样附近水变得浑浊且有悬浮颗粒,说明胶结物质发生溶解现象,10～12 h 岩样出现掉渣和开裂现象,约 24 h 岩样发生崩解、碎裂,手搓成细碎颗粒(见图 2)。从浸水试验可以看出,弱胶结砂岩在饱水过程中,自身吸水膨胀变形,原本棱角分明的形状变得浑圆,分裂的细小碎粒被水溶蚀,从而变得疏松多孔,增加了渗流通道,将提高岩体的渗透率。将岩样水中膨胀增加的体积与原始体积相比得出岩石的自由膨胀率,试验测得矿山弱胶结砂岩的自由膨胀率 $\varepsilon_V=30\%$。



(a) 试验前 (b) 开始浸水 (c) 浸水 12 h (d) 浸水 24 h

图 2 不同浸泡时间下弱胶结砂岩水理特征

Fig.2 Hydrological characteristics of weak cemented sandstone under different soaking time

2 弱胶结砂岩膨胀率与渗透率数学模型构建

渗透率是表征岩体传导地下水能力的参数,其大小与岩体的孔隙率等自身特性密切相关,而弱胶结砂岩遇水具有膨胀性,其体积增加将改变导水性能,因此其体积应变状态将影响渗透率。Kozeny-Carman 假设通道为一束等长度的毛细管,构建了渗透率与孔隙率、孔隙体积之间的函数关系[13-16],如式(1)所示。

$$k=\frac{\varphi}{k_z S_p^2} \tag{1}$$

式中:k 为渗透率;φ 为孔隙率;k_z 为 Kozeny 常数,一般取 5;S_p 为比表面积,$S_p=A_s/V_p$;A_s 为岩土颗粒的总表面积;V_p 为岩土孔隙体积。

设初始状态为 $P=P_0$、$T=T_0$ 时刻,则变化后的渗透率 k 与原始渗透率 k_0 的比值为:

$$\frac{k}{k_0}=\frac{\dfrac{\varphi}{k_z S_p^2}}{\dfrac{\varphi_0}{k_z S_{p0}^2}}=\frac{\varphi S_{p0}^2}{\varphi_0 S_p^2} \tag{2}$$

假设从初始状态 0 时刻,增加到 Δt 时刻,岩土总体积 V_b 的变化量为 ΔV_b,颗粒吸水膨胀体积变化量为 ΔV_r,则岩土中体积的变化量 ΔV_b 减去吸水颗粒体积的变化量 ΔV_r,即为孔隙体积的变化量 ΔV_p:

$$\Delta V_p=\Delta V_b-\Delta V_r \tag{3}$$

因此,变化后的孔隙率为:

$$\varphi=\frac{V_p+(\Delta V_b-\Delta V_r)}{V_b+\Delta V_b} \tag{4}$$

变化后的比表面积(S_p)为:

$$S_p=\frac{A_s}{V_p+(\Delta V_b-\Delta V_r)} \tag{5}$$

将式(3)、式(4)和式(5)代入式(2),并整理得到式(6):

$$\frac{k}{k_0}=\frac{V_p+\Delta V_p}{V_b+\Delta V_b}\frac{(V_p+\Delta V_p)^2 V_b A_s^2}{A_s^2(1+\beta)^2 V_p V_p^2} \tag{6}$$

总体积的变化可用体积应变表示:

$$\Delta V_b=\varepsilon_V V_b \tag{7}$$

将式(7)与式(6)联立,考虑到比表面积变化可以忽略,则可得出弱胶结砂岩渗透率与体积应变之间的关系表达式为:

$$\frac{k}{k_0}=\frac{1}{1+\varepsilon_V}\left(1+\frac{\varepsilon_V}{\varphi_0}\right)^3 \tag{8}$$

3 弱胶结含水层开拓工程泥石流形成过程及其机理分析

相关研究表明:井下泥石流其实质是大量的岩石碎屑、泥砂与水的混合物组成的黏性流体,在地下水水流作用下突然爆发的迅速流动现象。因此它的形成有 3 个条件:(1)物源,有大量的固体细颗粒物质,如岩体碎屑、粉砂等;(2)载体,较为充足的地下水水流;(3)通道,补给渗流通道[17-21]。本次基于矿山岩石力学特性及其水理特性研究成果,采用 FLAC3D 软件构建弱胶结砂岩开拓工程流固耦合模型,研究其开挖条件下的渗流场变化及塑性破坏变形特征,模拟分析开挖条件下泥石流形成原理及条件。

3.1 弱胶结砂岩流固耦合数值模型构建

3.1.1 计算方案

矿山采用胶带斜井+斜坡道开拓,设计采用进路充填法回采,开采规模 10 000 t/d,其中一期工程布设在 1 850～2 000 m 标高,矿山通过斜坡道首先

开拓 1 950 m 中段和 1 900 m 中段,一期工程开拓系统如图 3 所示。本次通过 FLAC3D 软件构建新疆某矿流固耦合模型,针对一期开拓工程,分析在弱胶结砂岩含水层中 1 900 m 和 1 950 m 中段开拓过程中,松动圈 2.0 m 范围内围岩膨胀率分别为 0、10%、20%和 30%条件的巷道周边塑性区及渗流场变化情况,数值模拟方案见表 2。

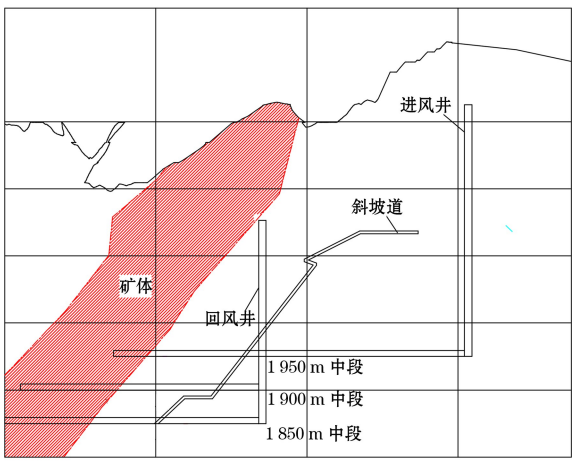


图 3 矿山一期开拓系统剖面图

Fig.3 Sectional drawing of the first-stage development system of the mine

表 2 数值模拟计算方案

Table 2 Numerical simulation calculation scheme

计算步骤	开采范围	备注
1	—	初始平衡计算
2	1 950 m 中段巷道掘进	松动圈围岩遇水膨胀后的渗流及塑性变形模拟
5	1 900 m 中段巷道掘进	

3.1.2 计算参数

矿区初始地下水位在 2 100 m 标高,初始孔隙率 $\varphi_0=16.37\%$,初始渗透率 $k_0=9.26\times10^{-7}$ cm^2,巷道规格 4.3 m×3.8 m,井下巷道开拓为悬臂式掘进机连续开挖,每次开挖厚度为 5 m。将初始孔隙率 φ_0 和初始渗透率 k_0 代入式(8),可得出松动圈内弱胶结砂岩不同膨胀率 ε_V 条件下的渗透率 k,计算结果见表 3。岩体的物理力学参数见表 4。

表 3 不同膨胀率条件下的渗透率

Table 3 Permeability under different expansion rates

膨胀率/%	渗透率/cm^2
0	9.26×10^{-7}
10	3.59×10^{-6}
20	8.68×10^{-6}
30	1.66×10^{-5}

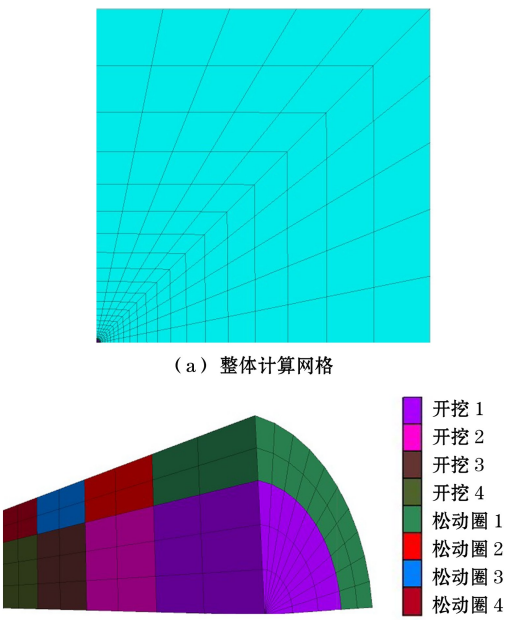
表 4 岩体物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of rock mass

密度/(kg/m^3)	黏聚力 c_{rm}/MPa	内摩擦角 φ_{rm}/(°)	岩体抗拉强度/MPa	泊松比	岩体弹性模量/GPa
2 626	0.5	36	0.30	0.25	2.70

3.1.3 数值模型建立

假设弱胶结砂岩含水层为均质各向同性,开挖前在模拟范围内的地下水水力坡度为零。为了更加详细地反映巷道开挖过程中周边变化情况,模型对巷道及松动圈进行加密处理,同时考虑到对称性,为提高计算速度,减少计算时间,取 1/2 进行研究,则最终建立的模型范围 x 方向长度为 400 m,y 方向长度为 20 m;z 方向为中段标高至地表。1 900 m 中段模型单元总数约为 2 000 个,节点总数约为 2 484 个,如图 4 所示。



(a) 整体计算网格

(b) 巷道及松动圈网格

图 4 数值分析模型

Fig.4 Numerical analysis model

3.2 弱胶结砂岩膨胀过程中地下水流场变化分析

各中段开挖后,松动圈区域内弱胶结砂岩膨胀率为 0、10%、20%和 30%时的稳定地下水流场如图 5、图 6 所示。从模拟结果可以看出,中段巷道开挖后,巷道成为了地下水的排泄点,巷道周围水压明显降低,含水层承压水头面由初始的水平面变成了一个以巷道为中心的水压降落漏斗。同时随着弱胶结砂岩膨胀率的增加引起渗透率提高,意味着透水性增强,为地下水的充足补给提供更为畅通的通道,

受此影响,围岩渗流场水力梯度进一步下降,巷道周边的低压区逐步扩大,疏水影响范围增大;随着中段下降,地下水水压增加,深部中段相较于上部中段,弱胶结砂岩膨胀率所引起的水力梯度下降幅度更大,将对周围的地下水进一步袭夺,相应的巷道的单位涌水量也随之增加。

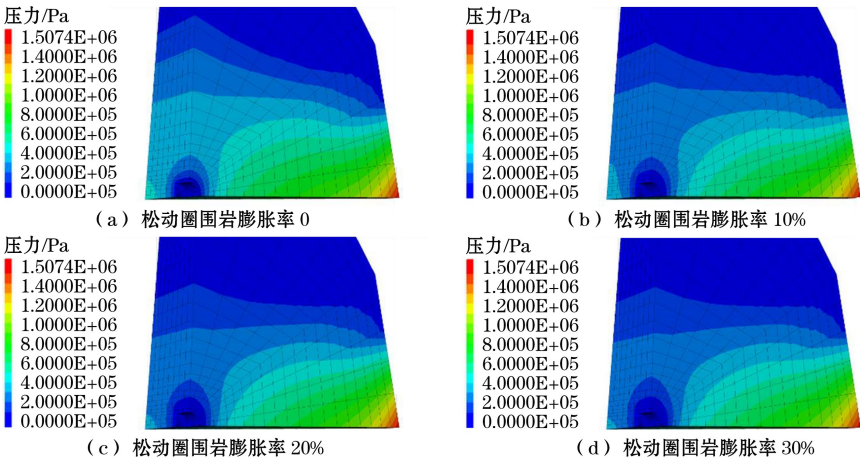


图 5 1 950 m 中段裂隙水压力云图

Fig.5 Cloud maps of fissure water pressure in the middle section of 1 950 m

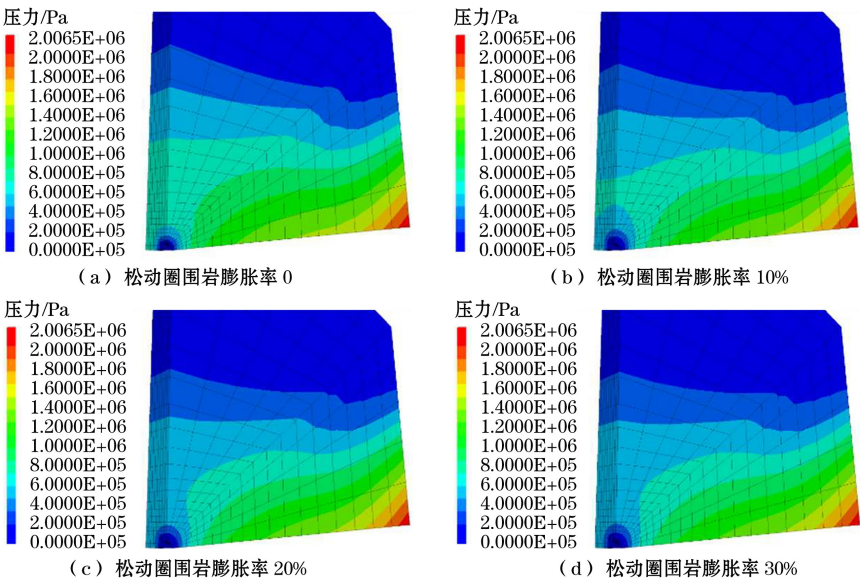


图 6 1 900 m 中段裂隙水压力云图

Fig.6 Cloud maps of fissure water pressure in the middle section of 1 900 m

3.3 弱胶结砂岩膨胀过程中单位涌水量预测

各中段开挖后松动圈围岩膨胀过程中的巷道单位涌水量预测如图 7 所示。各中段开挖后受地下水侵蚀引起松动圈围岩膨胀性增大,导致巷道单位涌水量大幅增加,根据模拟预测,当松动圈区域弱胶结砂岩的膨胀率达到 20%时,巷道的单位涌水量将翻倍;当松动圈区域弱胶结砂岩的膨胀率达到 30%,巷道开挖后的单位涌水量将增加 1.5～2 倍。

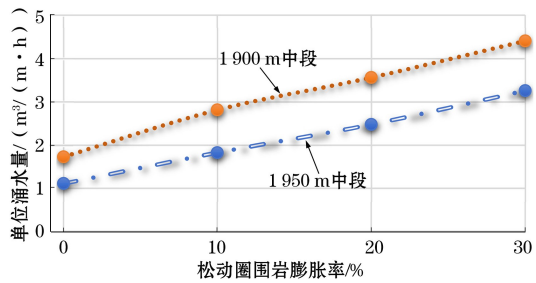


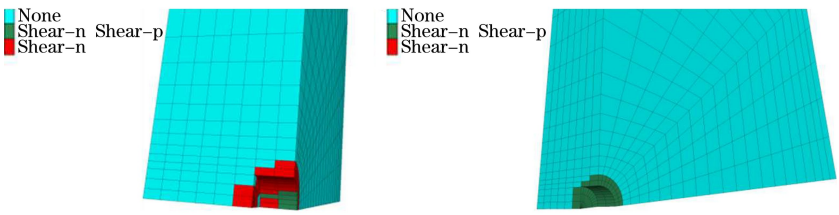
图 7 各中段单位涌水量预测曲线

Fig.7 Prediction curves of unit water inflow in each middle section

地下水水压的增加会提高地下水的势能,因此当地下水水压增加时会引起巷道涌水量的增加。根据模拟预测,在松动圈未发生膨胀时,1 900 m 中段相较于 1 950 m 中段的单位涌水量增加 0.62 $m^3/(m \cdot h)$;松动圈区域弱胶结砂岩膨胀率达到 30%时,1 900 m 中段相较于 1 950 m 中段的单位涌水量增加 1.15 $m^3/(m \cdot h)$,弱胶结砂岩膨胀所引起的单位涌水量增加量是未发生膨胀的 1.85 倍。

3.4 流固耦合条件下塑性变形模拟分析

图 8 为各中段巷道开挖后的围岩塑性破坏模拟结果。从图 8 可以看出,在 1 950 m 和 1 900 m 中段巷道开挖后在掌子面和巷道周边均发生了塑性破坏,存在垮塌风险,且随着开拓中段深度的增加,塑性破坏范围进一步扩大,失稳范围增加,并且弱胶结砂岩在地下水作用下易分解崩塌,成为细碎颗粒,此时将为井下泥石流的形成提供了物源。



(a) 1 950 m 中段松动圈围岩塑性变形　(b) 1 900 m 中段松动圈围岩塑性变形

图 8 各中段巷道开挖后的围岩塑性变形

Fig.8 Plastic deformation of surrounding rock after excavation of different middle section roadways

3.5 开拓巷道揭露情况分析

2020 年 3 月矿山开始一期工程基建工作,其中斜坡道主要位于泥质页岩隔水层中,各平巷均位于弱胶结砂岩含水层中,基建工程采用悬臂式掘进机凿岩,锚网喷短掘短支,避免巷道发生变形破坏。随着悬臂式掘进机掘进,巷道底板及时铺设混凝土盖板路面,同时在巷道中部留设排水沟,掌子面每次掘进约 5 m,利用矩形排水沟测量巷道新揭露区域的涌水量。根据观测资料,1 950 m 中段掘进新揭露区域的单位涌水量为 1.15～1.30 $m^3/(m \cdot h)$(见图 9(a)),1 900 m 中段掘进过程中新揭露区域的单位涌水量为 1.80～1.93 $m^3/(m \cdot h)$。由于巷道掘进采用悬臂式掘进机凿岩,对围岩的扰动较小,因此认为巷道新揭露区域围岩松动圈处于未膨胀至略膨胀状态,即膨胀率 $\varepsilon_V < 10\%$,此时实测值与流固耦合模型预测涌水量较为接近,说明模拟结果较为可靠。

随着开拓中段深度的增加,在地下水水压与膨胀率双重因素下,开拓巷道的单位涌水量大幅增加,将为井下泥石流的形成提供充足的水源载体;根据岩样浸水试验数据,矿山弱胶结砂岩膨胀率 $\varepsilon_V > 20\%$时,岩石将在局部发生开裂,同时受地下水水压影响,地下水所具有的较强的侵蚀与冲刷能力,易导致掌子面塑性区弱胶结围岩分解、崩塌,并形成细碎颗粒,将为井下泥石流提供物源基础,此时开拓中段掌子面极易形成井下泥石流事故。矿山在 1 900 m 中段掘进至码头门 65～70 m 时,巷道揭露层间裂隙发育区,此时巷道实测单位涌水量达到了 3.72 $m^3/(m \cdot h)$。依据流固耦合模型模拟分析成果,此时巷道揭露区域围岩松动圈膨胀率 $\varepsilon_V > 20\%$,意味着该段巷道顶板弱胶结砂岩因膨胀而发生局部破坏,同时该段层间裂隙发育,地下水补给畅通,进一步受地下水侵蚀、冲刷破坏,巷道顶板出现大范围垮塌,垮塌体遇水碎裂、分解成粉砂状,并在地下水水流的夹携之下,发展成为井下泥石流(见图 9(b)),故流固耦合模型基本反映了巷道泥石流的成因与发展过程,可为后期治理提供技术支撑。



(a) 1 950 m 中段平巷涌水　(b) 1 900 m 中段平巷泥石流

图 9 各中段巷道涌水、涌泥实况

Fig.9 Actual situation of water inflow and mud gushing in each middle roadway

4 结论

本文通过对矿山弱胶结砂岩成分及水理特性分析,掌握了其物质成分及其膨胀特性,同时通过数学推导构建了弱胶结砂岩孔隙率、膨胀性与渗透率之

间的数学模型,得出了新疆某矿弱胶结砂岩膨胀过程中的岩体渗透率。以此为基础,通过 FLAC3D 流固耦合分析得出以下结论。

(1) 基于 Kozeny-Carman 渗流公式构建了孔隙率、膨胀率与渗透率数学模型,并计算得出新疆某矿弱胶结含水层不同膨胀率条件下的渗透率,结合 FLAC3D 软件构建了矿山弱胶结粉砂岩流固耦合模型,分析了弱胶结粉砂岩含水层中不同埋深条件下,开拓工程松动圈围岩遇水膨胀过程中周边塑性区及渗流场变化情况。

(2) 弱胶结砂岩膨胀提高了岩体的渗透率,增强了岩体透水能力,当围岩膨胀率增加至 30%时,巷道开挖后的单位涌水量将增加 1.5~2 倍。

(3) 开拓巷道深度增加引起水压及单位涌水量的增大,而弱胶结砂岩的膨胀将进一步增加单位涌水量,当松动圈区域弱胶结砂岩膨胀率达到 30%时,相较于未膨胀的条件,其所引起的单位涌水量增加量是未膨胀的 1.85 倍,将为井下泥石流的发生提供地下水补给通道和充足的地下水载体。

(4) 开拓工程将在掌子面形成塑性破坏区,且随着中段深度的增加,巷道掌子面和松动圈围岩的塑性破坏越大,将为井下泥石流的形成提供物源条件。

(5) 弱胶结含水层因膨胀提高了其透水性,提高了巷道单位涌水量,且地下水易侵蚀、分解塑性区岩石,诱发泥石流。矿山实践表明,模型较为全面地反映了弱胶结含水层泥石流发生的原因与条件,对矿山后期泥石流治理提供参考。

参考文献(References):

[1] 原泽文.伊犁一矿水文地质特征及水害防治技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
YUAN Zewen. Study on hydrogeological characteristics and water disaster prevention technology of Yili No.1 Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2019.

[2] 赵维生,梁维,许猛堂,等.围岩吸水对泥质弱胶结岩石巷道稳定性的影响[J].矿业研究与开发,2020,40(7):32-36.
ZHAO Weisheng, LIANG Wei, XU Mengtang, et al. The influence of water absorption of surrounding rock on the roadwav stability of weakly consolidated argillaceous rock [J]. Mining Research and Development,2020,40(7):32-36.

[3] 吕玉广,赵仁乐,彭涛,等.侏罗纪巨厚基岩下采煤突水溃砂典型案例分析[J].煤炭学报,2020,45(11):3903-3912.
LYU Yuguang, ZHAO Renle, PENG Tao, et al. A typical case analysis of water-sand inrush in mining under thick overburden rock in Jurassic coalfield[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(11):3903-3912.

[4] 贺庆丰,孙利辉,宋家乐,等.不同含水率下弱胶结岩石力学特性研究[J].煤炭与化工,2022,45(5):10-12+17.
HE Qingfeng, SUN Lihui, SONG Jiale, et al. Research on mechanical properties of weakly cemented rock under different water content[J]. Coal and Chemical Industry, 2022,45(5):10-12+17.

[5] 李辉.富碱性水弱胶结软岩巷道围岩控制机理与应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
LI Hui. Research on control mechanism and application of weakly cemented soft rock roadway with alkaline water-enriched[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2020.

[6] 李回贵,李化敏,许国胜.含水率对弱胶结砂岩力学特征的影响规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):60-66.
LI Huigui, LI Huamin, XU Guosheng. Influence of water content on mechanical characteristics of weakly cemented sandstone [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering,2021,3(4):60-66.

[7] 苗胜军,杨鹏锦,黄正均,等.多孔弱胶结岩石破裂的围压影响机制及压密-损伤本构模型[J].中国矿业大学学报,2023,52(2):229-240.
MIAO Shengjun, YANG Pengjin, HUANG Zhengjun, et al. Effects of confining pressure on failure mechanism of porous and weakly cemented rock and compaction-damage constitutive model[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(2):229-240.

[8] 赵维生,梁维,王海,等.地层含水率对弱胶结软岩巷道围岩稳定性的影响:以内蒙古五间房西一煤矿为例[J].中国矿业,2020,29(11):154-159.
ZHAO Weisheng, LIANG Wei, WANG Hai, et al. Influence of moisture content on surrounding rock stability of weakly consolidated soft rockroadway : a case study of Xiyi coal mine of Wujianfang in Inner Mongolia[J]. China Mining Magazine,2020,29(11):154-159.

[9] 王开林.神东矿区弱胶结砂岩的宏细观结构及力学特征研究[D].焦作:河南理工大学,2018.
WANG Kailin. Research on mechanical and Macro-meso structure characteristics of the weakly cemented sandstone in Shendong coal field[D]. Jiaozuo: Henan University of Science and Technology,2018.

[10] 孙利辉,纪洪广,杨本生.西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J].煤炭学报,2019,44(3):866-874.
SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in western representative mining area[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(3):866-874.

[11] 刘钦,孙亚军,徐智敏,等.侏罗系弱胶结砂岩孔隙介质特征及其保水采煤意义[J].煤炭学报,2019,44(3):858-865.
LIU Qin, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Pore media characteristics of Jurassic weak cemented sandstone and its significance for water preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(3):858-865.

[12] 李回贵,李化敏,许国胜.神东矿区不同埋深弱胶结砂岩的孔隙结构特征研究[J].中国矿业,2021,30(9):126-131.
LI Huigui, LI Huamin, XU Guosheng. Pore structure characteristics of weakly cemented sandstone with different buried depths in Shendong Mining Area[J]. China Mining Magazine,2021,30(9):126-131.

[13] 刘钦.哈密矿区侏罗系弱胶结砂岩结构及渗流模型研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
LIU Qin. Study on the structure and seepage model of Jurassic weak cemented sandstone in Hami Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2018.

[14] 刘玉,李顺才,马立强,等.水沙混合物非 Darcy 裂隙渗流试验研究[J].煤炭学报,2018,43(8):2296-2303.
LIU Yu, LI Shuncai, MA Liqiang, et al. Experimental study on non-Darcy seepage of water and sediment in fractured rock[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(8):2296-2303.

[15] 张天军,孟钰凯,庞明坤,等.有效应力对孔周破裂煤体渗透率演化规律的影响[J].煤炭科学技术,2023,51(增刊 1):122-131.
ZHANG Tianjun, MENG Yukai, PANG Mingkun, et al. Effect of effective stress on the evolution of permeability patterns in perforated fractured coal bodies[J]. Coal Science and Technology,2023,51(Suppl.1):122-131.

[16] 张景科,刘盾,马雨君,等.弱胶结砂岩水岩作用机制:以庆阳北石窟为例[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(7):1019-1032+1064.
ZHANG Jingke, LIU Dun, MA Yujun, et al. Water-rock mechanism of weakly consolidated sandstone:a case study of qingyang north grottoes [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(7): 1019-1032+1064.

[17] 吕玉广,肖庆华,程久龙.弱富水软岩水-沙混合型突水机制与防治技术:以上海庙矿区为例[J].煤炭学报,2019,44(10):3154-3163.
LYU Yuguang, XIAO Qinghua, CHENG Jiulong. Mechanism and prevention of water-sand inrush in soft rock with weakly abundant water: a case study in Shanghai temple mining area[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(10):3154-3163.

[18] 石磊.弱胶结地层条件下工作面溃水溃砂规律模拟研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):347-353.
SHI Lei. Numerical simulation study on law of water and sand inrush in working face under condition of weakly cemented stratum[J]. Coal Science and Technology,2020,48(7):347-353.

[19] 李安云,康鑫,李森,等.富水弱胶结砂岩破坏特性与优化措施[J].科学技术与工程,2024,24(13):5336-5343.
LI Anyun, KANG Xin, LI Sen, et al. Failure characteristics and optimization measures of weakly consolidated sandstone with rich water[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(13):5336-5343.

[20] 纪洪广,蒋华,宋朝阳,等.弱胶结砂岩遇水软化过程细观结构演化及断口形貌分析[J].煤炭学报,2018,43(4):993-999.
JI Hongguang, JIANG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Analysis on the microstructure evolution and fracture morphology during the softening process of weakly cemented sandstone[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(4):993-999.

[21] 夏阳,刘洪林,亓建,等.构造应力作用下弱胶结巷道围岩控制技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):156-164.
XIA Yang, LIU Honglin, QI Jian, et al. Research on surrounding rock control technology of weakly cemented roadway under tectonic stress[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):156-164.