富水岩溶含水层下开采隔水层厚度优化及稳定性分析*

向伟华[1,2],路燕泽[1,2],王社光[1,2],王宪朋[1,2],
甘德清[3,4,5],赵鹏飞[1,2],刘志义[3,4,5],王立杰[1,2]

(1.河北钢铁集团沙河中关铁矿有限公司, 河北 邢台市 054100;
2.河北省复杂铁矿低碳智能高效开采技术创新中心, 河北 邢台市 054100;
3.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
4.华北理工大学 矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北 唐山市 063210;
5.华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北 唐山市 063210)

摘要:为解决富水断层破碎带中大量的裂隙水导致采场突水失稳的难题,以中关铁矿北区采场为背景,开展水压监测试验,利用FLAC3D探究采场稳定性对水压变化的敏感程度,得出变化较为明显的水压梯度。然后,建立关于"水压-隔水层厚度"的数值模型,探究不同水压值与隔水层厚度对采场稳定性的控制效果,以顶板应力、位移、塑性区分布为指标,分析其稳定性及变化规律,得出水压与隔水层厚度的关系。结果表明:中关铁矿北区矿体属于典型的大水矿床,水压值位于0.1~2.0 MPa之间;当水压大于1.0 MPa时,水压对顶板稳定性的影响显著;综合应力、位移、塑性区变化趋势得出水压为0.1 MPa时,隔水层厚度需不小于1.8 m;水压为0.5 MPa时,隔水层厚度需不小于3 m;水压为1.0 MPa时,隔水层厚度需不小于4 m;水压为1.5 MPa时,隔水层厚度需不小于5.6 m;水压为2.0 MPa时,隔水层厚度需不小于7.1 m。模拟结果为该矿体不同水压值下隔水层厚度的确定提供了理论支撑。

关键词:大水矿床;破碎矿体;承压开采;隔水层厚度;数值模拟

中图分类号:TD322;TD74 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0109-09

Optimization of Waterproof Layer Thickness and Stability Analysis for Mining Under Water-Rich Karst Aquifers

XIANG Weihua[1,2], *LU Yanze*[1,2], *WANG Sheguang*[1,2], *WANG Xianpeng*[1,2],
GAN Deqing[3,4,5], *ZHAO Pengfei*[1,2], *LIU Zhiyi*[3,4,5], *WANG Lijie*[1,2]

(1.Shahe Zhongguan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Xingtai, Hebei 054100, China;
2.Hebei Technology Innovation Center for Low-Carbon, Intelligent and High-Efficiency Mining of Complex Iron Ores, Xingtai, Hebei 054100, China;
3.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
4.Collaborative Innovation Center for Green Development of Mineral Resources and Ecological Restoration, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
5.Hebei Provincial Laboratory of Mining Development and Safety Technology, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: In order to solve the problem of water inrush and instability of stope caused by a large amount of fissure water in the water-rich fault fracture zone, taking the stope in the northern area of Zhongguan Iron Mine as the background, the water pressure monitoring tests was carried out. The sensitivity of stope stability to water pressure change was explored by FLAC3D, and the water pressure gradient with obvious change was obtained. Then, a numerical model of "water pressure-waterproof layer thickness" was established to explore the control effect of different water pressure values and waterproof layer thicknesses on stope stability. The stability and variation rules were analyzed with the distribution of roof stress, displacement and plastic zone as indicators, and the relationship between water pressure and waterproof layer thickness was obtained. The results show that the ore body in the northern area of Zhongguan Iron Mine is a typical water-rich deposit, and the water pressure is between

* **收稿日期**:2025-02-20
作者简介:向伟华(1983—),男,湖南邵阳人,硕士,正高级工程师,从事采矿工程管理。E-mail:xwh570623@163.com
通信作者:王宪朋(1970—),男,吉林白山人,硕士,高级工程师,从事水文地质技术研究。E-mail:mwssbwzb2011@126.com

0.1 MPa and 2.0 MPa. When the water pressure is greater than 1.0 MPa, the influence of water pressure on the roof stability is significant. Based on the comprehensive analysis of the variation trends of stress, displacement and plastic zone, the following conclusions are drawn: when the water pressure is 0.1 MPa, the the waterproof layer thickness should not be less than 1.8 m; when the water pressure is 0.5 MPa, the waterproof layer thickness should not be less than 3 m; when the water pressure is 1.0 MPa, the waterproof layer thickness should not be less than 4 m; when the water pressure is 1.5 MPa, the waterproof layer thickness should not be less than 5.6 m; when the water pressure is 2.0 MPa, the waterproof layer thickness should not be less than 7.1 m. The simulation results provide theoretical support for determining the waterproof layer thickness corresponding to different water pressure values in this ore body.

Key words: Water-rich deposit, Broken ore body, Pressure mining, Waterproof layer thickness, Numerical simulation

0 引言

矽卡岩型铁矿床通常赋存于岩体与碳酸盐的接触带,因此多为大水矿床[1]。碳酸盐围岩中往往含有大量不同发育程度的溶隙、溶孔和溶洞,在开采时,极易引发突水事故,尤其在岩体质量较差的破碎岩体中,往往含有大量的导水裂隙,必须预先制订防治水方案。常见的治理方案包括:超前探放和留设隔水层。一般情况下,隔水层为完整性较好的岩体,能够有效地维持下覆采场的安全,但隔水层为矿体时,随着回采的进行,隔水层将作为回采矿房的直接顶板,受开挖及爆破影响,隔水层完整性遭到破坏。因此,隔水层厚度的选择影响着矿山安全生产和经济效益[2-3]。顶板隔水层厚度偏大,会造成资源的浪费;隔水层厚度偏小,则无法有效地阻碍开挖松动区与导水带贯通,从而容易产生冒顶、突水等事故。因此,针对不同水压条件优化隔水层厚度并分析其稳定性,是非常有必要的。

针对隔水层合理厚度的确定,许多学者开展了相应研究[4-9]。呼少平等[10]构建了矿压影响区和有效隔水区的煤柱数值计算模型,优化并确定了隔水煤柱的合理宽度。李竹等[11]通过理论分析及FLAC3D数值模拟,探明了不同煤柱宽度条件下隔水煤柱的阻水能力及其稳定性演化规律,提出了"渗水区+弹性压密阻水区+塑性区"3区联合型隔水煤柱宽度确定方法。金爱兵等[12]利用数值模拟研究煤柱支承压力分布规律和在上、下区段工作面回采期间的不同宽度煤柱应力及塑性变形,得到了合理的煤柱宽度。黄辉等[13]基于弹性力学理论和数值模拟研究采动缓倾斜底板应力分布及空间破坏特征,并提出考虑底板破坏空间特征的突水危险性评价方法。苏成志等[14]利用数值模拟对导水裂隙带进行了预测,得出了围岩最大破坏深度,进而优化了开采方式。邹光华等[15]利用数值模拟反演了开采时的应力变化,得到了过断层群时应降低采高以防止导水带贯通的结论。马海涛等[16]以应力应变为评价指标,利用数值模拟对某铁矿进行了突水安全性分析。查春雷等[17]利用数值模拟得到了开采时底板破坏深度及应力变化规律,预防了底板水害。姚宣成等[18]为探究突水溃砂的形成机理,从理论与数值模拟等多角度对裂纹的扩展规律进行了分析,得到了裂纹扩展预测模型。孟文庆等[19]采用相似试验与数值模拟等手段对含水层开采上限进行了研究,得到了开采安全高度,提高了产量。

综上所述,数值模拟技术可以较好地优化隔水层厚度并演化承压开采塑性区扩展规律。本文以中关矿体北区采场为研究对象,开展承压水下开采顶板隔水层厚度优化研究,该矿体水文地质条件较为复杂,属于典型的大水矿床[20],且围岩质量等级属于Ⅳ到Ⅴ级破碎岩体,因此需要对地下水进行治理。本文基于实测水压值,采用数值模拟方法分析采场稳定性与水压值的敏感程度,然后对不同水压、隔水层厚度条件下的回采稳定性进行分析,得出各水压值下的最佳隔水层厚度。

1 水压监测

1.1 测点布置

为探明中关铁矿-170 m水平的水压,对其进行水压监测。考虑设备安装难度,选择4个不同流量的典型出水点(见图1)安装YHY型矿用水压监测仪(误差≤±1%),进行长期监测。

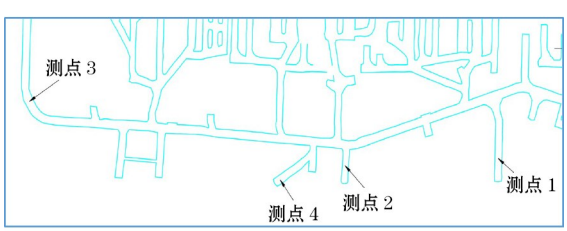


图1 监测点布置

Fig.1 Layout of monitoring points

1.2 监测结果

各测点的水压监测结果见表 1,水压(P_w)基本位于 0.1～2 MPa 之间。考虑地下水的赋存条件复杂,水压值多变,为简化模型,利用 FLAC3D 建立不同初始水压条件下的开采模型,探明采场稳定性对水压的敏感性。

表 1 各测点水压监测结果

Table 1 Monitored results of water pressure at each point

测点编号	水压值 P_w/MPa
1	0.113
2	0.681
3	1.153
4	1.923

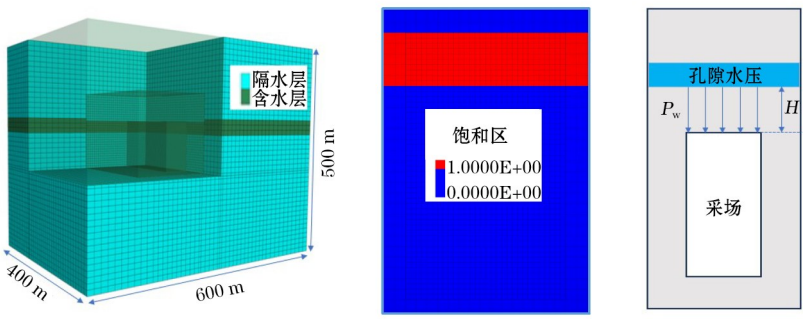
1.3 采场稳定性-水压敏感性分析

选用 FLAC3D 数值模拟软件,采用标准六面体网格,网格从中心向四周渐变稀疏,最小网格长度为 2 m。取 x、y、z 轴分别为矿体走向、倾向、高度,模型长 600 m,宽 400 m,高 500 m。模型底面和侧面施加法向位移约束,顶部施加均布荷载模拟采深,模型见图 2(a)。单元体采用摩尔-库伦本构模型,基于前期力学试验,根据修正后的 Hoek-Brown 强度准则计算模拟力学参数,见表 2。水压值按孔隙水压赋值,假设导水裂隙带位于矿房直接顶板上部,将采场顶板上部赋予孔隙水压,如图 2(b)所示,红色部分(颜色标识见电子版)表示饱和度为 1,表示存在水压。顶板承压示意如图 2(c)所示。

表 2 矿岩力学参数

Table 2 Mechanical parameters of ore and rock

密度/(kg/m³)	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比
3 900	1.17	4.31	50.7	19.69	0.22



(a) 数值模型 (b) 岩石饱和度示意 (c) 顶板承压示意

图 2 数值模型及顶板承压示意

Fig.2 Schematic diagrams of numerical model and roof pressure

基于现场水压监测结果,选取水压值分别为 0 MPa、0.1 MPa、0.2 MPa、0.5 MPa、1 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa,按采长 50 m、采宽 15 m、采高 60 m,隔水层厚度为 0.1 m,进行开挖计算。岩体位移能够较为直观地反映顶板岩体稳定性情况,以顶板最大位移量作为采场稳定性指标,各水压值开挖稳定后的顶板最大位移变化情况如图 3 所示。

由图 3 可知,水压的存在会显著增加顶板的最大位移量。顶板位移量与水压值呈正相关,顶板位移增量随水压增大而增大,且水压值为 0～1.0 MPa 时的顶板位移增量远小于水压值为 1.0～2.0 MPa 时的顶板位移增量。结合岩体极限位移判据,对于该矿体而言,水压的存在将使采场存在失稳风险,水压值为 0.1～1.5 MPa 时,对顶板稳定性影响较小,但需加强对顶板的监测与管理;水压值为 0.5～1.0 MPa 时,采场稳定性交差,采场可能存在失稳风险;水压值为 1.0～2.0 MPa 时,顶板变形量较大,采场失稳垮塌。基于此,下面选取典型水压值分别为 0.1 MPa、0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa、2.0 MPa 进行隔水层厚度的优化。

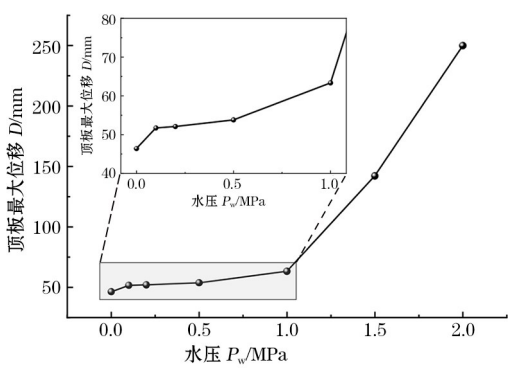


图 3 不同水压值下开挖时顶板位移量变化

Fig.3 Changes of roof displacement under different water pressures

2 顶板隔水层厚度数值模拟优化

2.1 模拟方案

顶板的稳定性除受水压值 P_w 影响外,还受顶板隔水层厚度 H(直接顶板距离含水层高度)影响。因此,本研究通过改变水压值、隔水层厚度(方案见表 3)对顶板应力、位移和塑性区进行对比分析,并对上文敏感性进行验证。

表 3 数值模拟方案

Table 3 Numerical simulation schemes

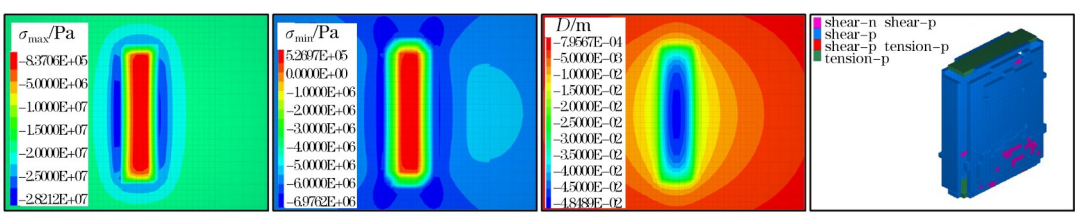
方案	水压值 P_w/MPa	隔水层厚度 H/m	方案	水压值 P_w/MPa	隔水层厚度 H/m
1	0.1	0	11	1.0	4
2	0.1	2	12	1.0	8
3	0.1	4	13	1.5	0
4	0.1	8	14	1.5	2
5	0.5	0	15	1.5	4
6	0.5	2	16	1.5	8
7	0.5	4	17	2.0	0
8	0.5	8	18	2.0	2
9	1.0	0	19	2.0	4
10	1.0	2	20	2.0	8

2.2 稳定性分析

顶板隔水层对采场的保护作用主要体现在顶板的应力、位移以及防止塑性区与裂隙导水带贯通,因此,选择顶板最大主应力 σ_{max}、顶板最小主应力 σ_{min}、顶板位移、采场塑性区作为稳定性分析依据。为方便描述破坏深度,本文塑性区判别选择 Average 判别法(即单元体中大于 50%的体积发生破坏时,认定单元体发生破坏。),Z_{max} 代表塑性区垂直最大深度,单位为 m。鉴于篇幅限制,本文仅展示不同水压梯度时最具代表性的隔水层厚度下的采场顶板模拟云图。

2.2.1 水压为 0.1 MPa 时不同隔水层厚度下的顶板稳定性分析

图 4 为隔水层厚度 2 m、水压 0.1 MPa(方案 2)时的顶板主应力、位移及塑性区分布特征。不同隔水层厚度条件下,顶板-侧帮交汇处形成 28.123～28.486 MPa 应力集中区,其宽度方向应力梯度显著大于长度方向,呈现典型几何形状效应;顶板中部形成 0.477～0.541 MPa 的应力释放区,且在采场宽度方向相邻矿房顶板形成“半圆形”应力释放区;顶板位移呈现 48.220～51.748 mm 椭圆型分布,处于稳定至不稳定之间,采场可能发生失稳现象;顶板主要表现为拉伸破坏,顶板与两帮交汇处仅表现为拉伸破坏,最大破坏深度均小于 3 m。随着隔水层厚度的增加,剪切破坏单元数量大幅度降低。



(a) 顶板最大主应力 (b) 顶板最小主应力 (c) 顶板竖向位移 (d) 采场塑性区

图 4 方案 2 开挖时顶板主应力、位移及塑性区分布

Fig.4 Distribution of principal stress, displacement and plastic zone of the roof during excavation for Scheme 2

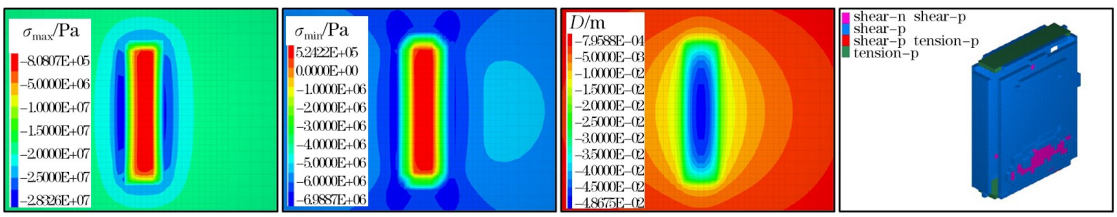
2.2.2 水压为 0.5 MPa 时不同隔水层厚度下的顶板稳定性分析

图 5 为隔水层厚度 4 m、水压 0.5 MPa(方案 7)时的顶板主应力、位移及塑性区分布特征。不同隔水层厚度条件下,顶板与侧帮交汇处形成 28.173～28.517 MPa 的应力集中区,且宽度方向的集中现象明显大于长度方向,具有较为明显的形状效应;顶板中部形成 0.316～0.547 MPa 的应力释放区,且在采场宽度方向相邻矿房顶板形成“半圆形”应力释放区;顶板位移呈“椭圆形”分布,大小为 48.331～53.853 mm,处于稳定至不稳定之间,采场可能发生失稳现象;当 $H=0.1$ m、$Z_{max}<5$ m 时,顶板主要表现为拉伸破坏,且在顶板与两帮交汇处存在剪切-拉伸破坏。当 $H>2$ m、$Z_{max}<3$ m 时,顶板与两帮交汇处仅表现为拉伸破坏。随着隔水层厚度的增加,剪切破坏数量大幅度降低。

2.2.3 水压为 1.0 MPa 时不同隔水层厚度下的顶板稳定性分析

图 6 为隔水层厚度 4 m、水压 1.0 MPa(方案 11)时的顶板主应力、位移及塑性区分布特征。不同隔水层厚度条件下,顶板与侧帮交汇处形成 28.297～28.561 MPa 的应力集中区,且宽度方向的集中现象明显大于长度方向,具有较为明显的形状效应;顶板中部形成 0.205～0.549 MPa 的应力释放区,且在采场宽度方向相邻矿房顶板形成“半圆形”应力释放区;顶板位移呈“椭圆形”分布,大小为 48.573～

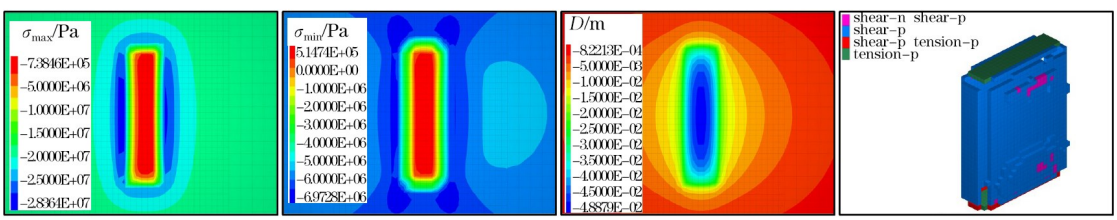
63.389 mm，处于稳定至不稳定之间，采场可能发生失稳现象；当 $H=0.1$ m、$Z_{max}<5$ m 时，顶板主要表现为拉伸破坏，且在顶板与两帮交汇处存在剪切-拉伸破坏。当 $H=2$ m、$Z_{max}<5$ m 时，顶板与两帮交汇处仍表现为较多的剪切-拉伸破坏。当 $H>4$ m、$Z_{max}<3$ m 时，顶板与两帮交汇处仅表现为拉伸破坏。随着隔水层厚度的增加，剪切破坏数量大幅度降低。



（a）顶板最大主应力　（b）顶板最小主应力　（c）顶板竖向位移　（d）采场塑性区

图 5　方案 7 开挖时顶板主应力、位移及塑性区分布

Fig.5　Distribution of principal stress, displacement and plastic zone of the roof during excavation for Scheme 7



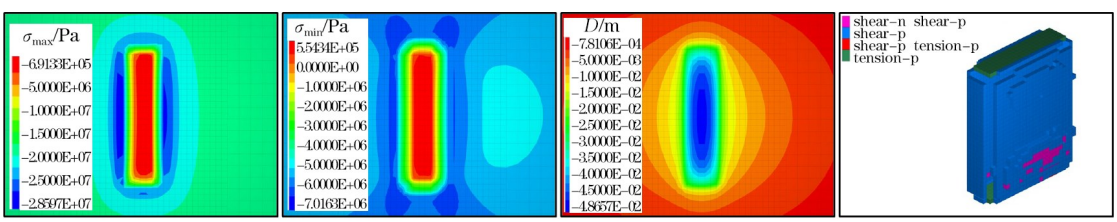
（a）顶板最大主应力　（b）顶板最小主应力　（c）顶板竖向位移　（d）采场塑性区

图 6　方案 11 开挖时顶板主应力、位移及塑性区分布

Fig.6　Distribution of principal stress, displacement and plastic zone of the roof during excavation for Scheme 11

2.2.4　水压为 1.5 MPa 时不同隔水层厚度下的顶板稳定性分析

图 7 为隔水层厚度 8 m、水压 1.5 MPa（方案 16）时的顶板主应力、位移及塑性区分布特征。不同隔水层厚度条件下，顶板与侧帮交汇处形成 28.775～28.597 MPa 的应力集中区，且宽度方向的集中现象明显大于长度方向，具有较为明显的形状效应；顶板中部形成 0.167～0.554 MPa 的应力释放区，且在采场宽度方向相邻矿房顶板形成“半圆形”应力释放区；顶板位移呈“椭圆形”分布，大小为 48.657～142.25 mm，处于稳定至不稳定之间，采场可能发生失稳现象；当 $H=0.1$ m、$Z_{max}<5$ m 时，顶板主要表现为拉伸破坏，且在顶板与两帮交汇处存在剪切-拉伸破坏。当 $H=2$ m、$Z_{max}<5$ m 时，顶板与两帮交汇处仍表现为较多的剪切-拉伸破坏。当 $H>4$ m、$Z_{max}<3$ m 时，顶板与两帮交汇处仅表现为拉伸破坏。随着隔水层厚度的增加，剪切破坏数量大幅度降低。



（a）顶板最大主应力　（b）顶板最小主应力　（c）顶板竖向位移　（d）采场塑性区

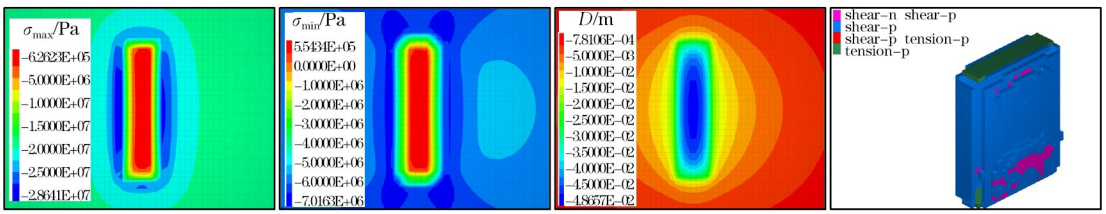
图 7　方案 16 开挖时顶板主应力、位移及塑性区分布

Fig.7　Distribution of principal stress, displacement and plastic zone of the roof during excavation for Scheme 16

2.2.5　水压为 2.0 MPa 时不同隔水层厚度下的顶板稳定性分析

图 8 为隔水层厚度 8 m、水压 2.0 MPa（方案 20）时的顶板主应力、位移及塑性区分布特征。不同隔水层厚度条件下，顶板与侧帮交汇处形成 28.453～29.027 MPa 的应力集中区，且宽度方向的集中现象明显大于长度方向，具有较为明显的形状效应；顶板中部形成 0.846～0.605 MPa 的应力释放区，且

在采场宽度方向相邻矿房顶板形成“半圆形”应力释放区;顶板位移呈“椭圆形”分布,大小为48.925～∞ mm,处于稳定-不稳定-失稳之间,采场可能发生失稳现象;当 $H=0.1$ m、$Z_{max}<5$ m 时,顶板主要表现为大范围拉伸破坏,且在顶板与两帮交汇处存在大量剪切-拉伸破坏区。当 $H=2$ m、$Z_{max}<7$ m 时,破坏区域大幅降低。当 $H=4$～8 m、$Z_{max}<3$ m 时,顶板与两帮交汇处仅表现为剪切破坏。随隔水层厚度的增加,剪切破坏数量大幅度降低。



(a)顶板最大主应力 (b)顶板最小主应力 (c)顶板竖向位移 (d)采场塑性区

图 8 方案 20 开挖时顶板主应力、位移及塑性区分布

Fig.8 Distribution of principal stress, displacement and plastic zone of the roof during excavation for Scheme 20

3 不同水压条件下隔水层厚度优选

为更直观地对比各方案应力、位移、塑性区变化情况,提取采场顶板上部 0.1 m 切片处各方案的最大主应力的最大值、最大主应力的最小值、顶板最大沉降量、塑性区破坏深度等指标,探究在不同水压值条件下隔水层厚度对各指标的影响,对比分析水压与隔水层厚度对顶板破坏的交互作用。

3.1 应力集中变化

图 9 展示了不同水压条件下各方案最大主应力的最大值随隔水层厚度的变化曲线。分析表明,最大主应力的大小受水压与围岩的耦合作用影响,当采场处于稳定状态时,其值与隔水层厚度及水压均呈正相关关系。当水压为 0.1～0.5 MPa 时,应力集中程度随隔水层厚度增加而显著增强,水压变化对顶板稳定性的影响较弱,表明此时应力演化主要由围岩应力场主导。当水压升至 1.0～2.0 MPa 时,隔水层厚度在 0～4 m 区间内,随隔水层厚度增大应力集中速率达到峰值,同时水压对顶板的控制作用逐渐减弱,说明该阶段水压主导应力演化;当隔水层厚度增至 4～8 m 时,应力集中速率趋于稳定,水压敏感性显著降低,系统重新回归围岩承载主导机制。临界厚度 4 m 的划分揭示了水-岩耦合作用的相变特征,该参数对隔水层设计与稳定性控制具有重要的工程意义。

综合应力集中随隔水层厚度与水压改变的变化情况可知:当水压较大时(>1.0 MPa),应力集中随隔水层厚度增加呈现先降后升的非单调特性,存在 2～6 m 的临界厚度阈值区间;在薄隔水层(<4 m)条件下,应力集中随水压增大,曲线斜率的正负存在显著临界阈值(1.0～1.5 MPa)。从应力集中的角度出发,方案 2～4、6～8、10～12、15、16、19、20 的采场顶板具有较好的稳定性。

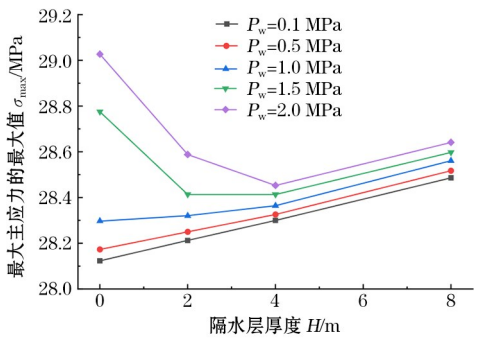


图 9 不同水压条件下最大主应力的最大值随隔水层厚度变化曲线

Fig.9 Variation curves of the maximum value of major principal stress with waterproof layer thickness under different water pressure conditions

3.2 应力释放变化

图 10 为不同水压条件下各方案最大主应力的最小值随隔水层厚度变化曲线。由图 10 可知,应力释放随隔水层厚度增加由与水压呈负相关逐渐转变为正相关。隔水层厚度为 0～2 m 时,应力释放程度与水压值呈负相关,且应力释放变化率随水压增加而增加。隔水层厚度为 2～4 m 时,随厚度增加,应力与水压值由负相关逐渐转为正相关。隔水层厚度增加至 6～8 m 时,应力值虽有增加,但变化不明显,且应力与水压值保持正相关关系。因此,在隔水层厚度较小时,应力释放程度主要受水压值影响,阻碍顶板卸压,不利于采场保持稳定。隔水层厚度较大时,水压对顶板的直接作用减弱,影响较小。从应力释放的角度出发,方案 1～12、15、16、19、20 的采场顶板具有较好的稳定性。

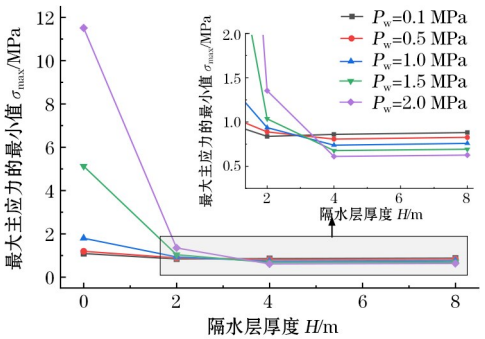


图 10　不同水压条件下最大主应力的最小值随隔水层厚度变化曲线

Fig.10　Variation curves of the minimum value of major principal stress with waterproof layer thickness under different water pressure conditions

3.3　顶板位移量

图 11 为不同水压条件下各方案的顶板最大沉降量随隔水层厚度变化曲线。从整体上看，顶板最大沉降量与隔水层厚度呈负相关，与水压呈正相关，顶板最大沉降量随隔水层厚度增加而减小，随水压增加而增加。由岩体极限位移判据(50 mm)可知，方案 2～4、6～8、10～12、15、16、19、20 的采场顶板具有较好的稳定性。

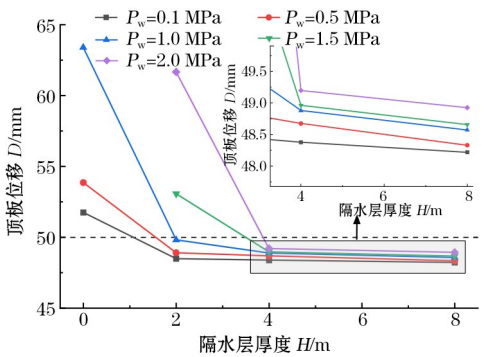


图 11　顶板最大沉降量随隔水层厚度变化曲线

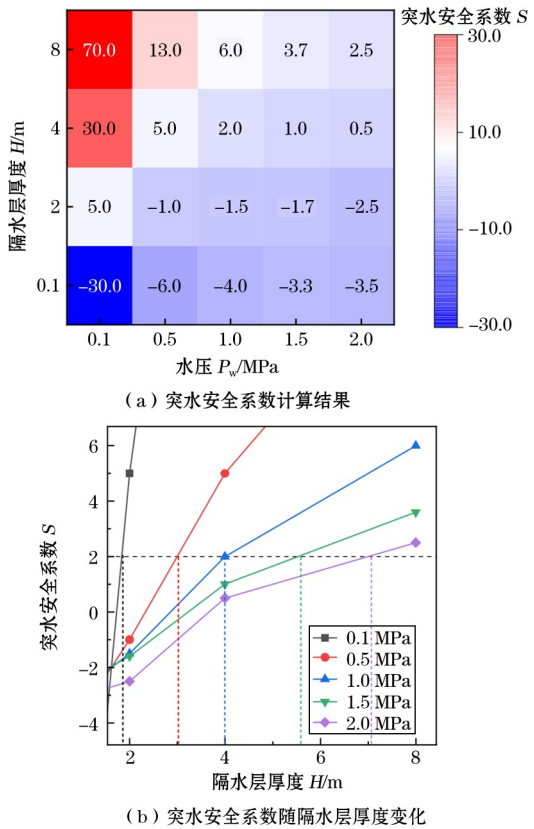
Fig.11　Variation curves of the maximum roof settlement with waterproof layer thickness

3.4　塑性区

采场开挖引发的围岩塑性破坏区若与含水裂隙带贯通，将形成渗流通道导致顶板突水，为直观地显示破坏区与裂隙带的贯通情况，定义突水安全系数 S，当 S 大于 2 时，表明基本无突水风险，突水安全系数随隔水层厚度与水压变化情况如图 12 所示。

$$S=\frac{H-Z_{\max}}{P_w}$$

图 12(a)为突水安全系数计算结果，为得到更为准确的隔水层厚度，假设相邻厚度之间呈线性关系，绘制折线图(见图 12(b))提取其临界厚度。水压为 0.1 MPa：隔水层厚度小于 1.8 m 时，塑性区深度大于隔水层厚度，采场存在突水风险；隔水层厚度大于 1.8 m 时，塑性区深度小于隔水层厚度，采场稳定性较好。因此，隔水层厚度需不小于 1.8 m。同理可得水压为 0.5 MPa 时，隔水层厚度需不小于 3 m；水压为 1.0 MPa 时，隔水层厚度需不小于 4 m；水压为 1.5 MPa 时，隔水层厚度需不小于 5.6 m；水压为 2.0 MPa 时，隔水层厚度需不小于 7.1 m。



(a) 突水安全系数计算结果

(b) 突水安全系数随隔水层厚度变化

图 12　突水安全系数随隔水层厚度与水压的变化

Fig.12　Variation of water inrush safty factor with the waterproof layer thickness and water pressure

4　结论

(1) 根据现场实际水压监测数据结果，－170 m 水平水压大小位于 0.1～2.0 MPa 之间。水压的存在对采场稳定性存在一定影响：水压值位于 0.1～0.5 MPa 时，对顶板稳定性影响较小，但需加强对顶板的监测与管理；水压值位于 0.5～1.0 MPa 之间时，采场稳定性较差，可能存在失稳风险，需进行排水卸压或增加隔水层厚度；水压值位于 1.0～2.0

MPa 时,顶板变形较大,应卸压后再进行开采。

(2) 由各方案应力、位移、塑性区分布云图可知,水压可以改变顶板的应力分布,水压增大使顶板最大主应力显著增加,应力释放区域增加,同时加剧顶板破坏区发展,不利于采场保持稳定;增加顶板承压层厚度,可以平衡最大主应力,使其保持在稳定范围,减少应力释放区扩展,同时阻止塑性区扩展至导水裂隙带,降低突水风险。

(3) 综合应力、位移、塑性区随水压、顶板变化趋势得出:水压为 0.1 MPa 时,隔水层厚度需不小于 1.8 m;水压为 0.5 MPa 时,隔水层厚度需不小于 3 m;水压为 1.0 MPa 时,隔水层厚度需不小于 4 m;水压为 1.5 MPa 时,隔水层厚度需不小于 5.6 m;水压为 2.0 MPa 时,隔水层厚度需不小于 7.1 m。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等.金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山,2021(1):1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine,2021(1):1-13.

[2] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(16): 2803-2813.

[3] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.

[4] 刘伟韬,赵吉园,孔德斌,等.基于非线性渗流理论的破裂岩体突水危险性量化方法[J].煤炭学报,2024,49(11):4520-4541.
LIU Weitao, ZHAO Jiyuan, KONG Debin, et al. A quantitative method for water inrush risk from fractured rocks based on nonlinear seepage theories[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(11):4520-4541.

[5] 陈海富,范立民,李小龙,等.特厚煤层限厚与充填协同分层开采覆岩导水裂隙发育规律研究[J].煤炭工程,2024,56(5):129-137.
CHEN Haifu, FAN Limin, LI Xiaolong, et al. Development law of water conducted fissure in overburden rock during the collaborative slicing of thickness-limiting and filling in extra-thick coal seams[J]. Coal Engineering,2024,56(5):129-137.

[6] 尹希文,于秋鸽,张玉军,等.坚硬顶板厚隔水层条件下底板突水致灾机理及全周期治理技术[J].煤炭科学技术,2023,51(增刊 1):318-327.
YIN Xiwen, YU Qiuge, ZHANG Yujun, et al. Mechanism and whole cycle control technology of water inrush from coal seam floor on condition of hard roof and thick waterproof layer[J]. Coal Science and Technology,2023,51(Suppl.1):318-327.

[7] 张金金,杜航,张嘉晨,等.浅埋煤层综放开采导水裂隙发育特征及隔水层稳定性研究[J].煤炭工程,2024,56(1):78-85.
ZHANG Jinjin, DU Hang, ZHANG Jiachen, et al. Development characteristics of water flowing fracture and stability of aquiclude in longwall top-coal caving of shallow coal seam[J]. Coal Engineering,2024,56(1):78-85.

[8] 李江华.弱胶结巨厚砂砾岩含水层离层突水机制研究[J].煤炭科学技术,2024,52(2):209-218.
LI Jianghua. Study on separated layer water burst mechanism for weakly cemented giant thick glutenite[J]. Coal Science and Technology,2024,52(2):209-218.

[9] 李回贵,苏德国,孙维,等.黔北煤田灰岩含水层对开采 13 号煤层的影响研究[J].矿业安全与环保,2023,50(6):130-135.
LI Huigui, SU Deguo, SUN Wei, et al. Study on the influence of limestone aquifer on the mining No.13 coal seam in Qianbei coalfield[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2023,50(6):130-135.

[10] 呼少平,胡俭,姬中奎,等.张家峁矿近水体煤层群隔水煤柱合理宽度确定[J].西安科技大学学报,2024,44(2):256-267.
HU Shaoping, HU Jian, JI Zhongkui, et al. Determination of reasonable width of water-proof coal pillar in coal seams near the waterbody in Zhangjiamao Mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2024,44(2):256-267.

[11] 李竹,樊建宇,冯国瑞,等.隔水煤柱采动渗流耦合失效特征及其合理宽度[J].煤炭学报,2023,48(11):4011-4023.
LI Zhu, FAN Jianyu, FENG Guorui, et al. Failure characteristics and reasonable width of water-resisting pillar under the coupling effect of mining and weepage[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(11):4011-4023.

[12] 金爱兵,张舟,郭健康,等.山西某煤矿综放工作面隔水煤柱合理尺寸的确定[J].矿业研究与开发,2023,43(3):39-44.
JIN Aibing, ZHANG Zhou, GUO Jiankang, et al. Determination of reasonable size of waterproof coal pillar in fully mechanized caving face of a coal mine in Shanxi[J]. Mining Research and Development,2023,43(3):39-44.

[13] 黄辉,宋喜东,虎晓龙,等.缓倾斜煤层采动底板破坏空间特征研究及应用[J].矿业安全与环保,2024,51(5):83-88.
HUANG Hui, SONG Xidong, HU Xiaolong, et al. Research on spatial failure characteristics of mining floor in gently inclined coal seams of underground coal mining and its application[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(5):83-88.

[14] 苏成志,齐跃明,景佳俊.临湖铁矿开采采场围岩裂隙演化规律及防治水技术研究[J].金属矿山,2023(12):196-203.
SU Chengzhi, QI Yueming, JING Jiajun, et al. Research on the evolution laws of surrounding rock fractures and water control techniques in a lakeside iron ore mining[J]. Metal Mine,2023(12):196-203.

[15] 邹光华,张超,田多,等.综放工作面过断层群上覆岩层导水通道形成机理研究[J].金属矿山,2021(5):65-70.
ZOU Guanghua, ZHANG Chao, TIAN Duo, et al. Study on the formation mechanism of water conducting channel of overburden strata crossing fault group in fully mechanized caving face[J]. Metal Mine,2021(5):65-70.

[16] 马海涛,李迎佳,王云海.港里铁矿水下开采流固耦合数值模拟与风险分析[J].金属矿山,2014(2):36-39.
MA Haitao, LI Yingjia, WANG Yunhai, et al. Fluid-solid coupling numerical simulation and risk analysis of underwater mining of Gangli Iron Mine[J]. Metal Mine, 2014(2):36-39.

[17] 查春雷,袁二军,史立群,等.缓倾斜煤层开采底板破坏深度数值分析研究[J].中国矿业,2024,33(8):169-175.
ZHA Chunlei, YUAN Erjun, SHI Liqun, et al. Numerical analysis of floor failure depth in gently inclined coal seam mining[J]. China Mining Magazine,2024,33(8):169-175.

[18] 姚宣成,刘家明,弓昊.深埋薄基岩厚煤层开采顶板突水溃砂通道形成机理研究[J].矿业研究与开发,2022,42(12):70-77.
YAO Xuancheng, LIU Jiaming, GONG Hao. Study on formation mechanism of water inrush and sand break channel in roof during the mining of deep buried thin bed rock and thick coal seam [J]. Mining Research and Development, 2022,42(12):70-77.

[19] 孟文庆,赵光明,许文松,等.厚松散含水层下开采上限试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(6):5-10.
MENG Wenqing, ZHAO Guangming, XU Wensong, et al. Experimental research on mining upper limit under thick loose aquifer[J].Mining Research and Development, 2021, 41(6):5-10.

[20] 夏冬,袁雪涛,常宏.中关铁矿堵水帷幕内外水位变化规律[J].金属矿山,2016(5):31-35.
XIA Dong, YUAN Xuetao, CHANG Hong. Variation law of water level around the grouting curtain in Zhongguan lron Mine[J]. Metal Mine, 2016(5):31-35.