晒旗河磷矿岩爆防治注水参数优化*

王其虎[1,2],李炎[1],姚团[1,2],伍蒙[1],骆效兵[3],黄兆云[4]

(1.武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
2.湖北省工业安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430081;
3.湖北省应急救援中心, 湖北 武汉 430081;
4.湖北景深安全技术有限公司, 湖北 宜昌市 443000)

摘要:湖北宜昌晒旗河磷矿目前已进入深部开采,掘进工作面岩爆灾害频发,在工作面采用注水软化围岩,以防治岩爆,合理的注水参数影响岩爆防治效果。对不同含水状态下的磷块岩进行单轴压缩试验,基于岩石强度脆性系数,分析了含水率与磷块岩岩爆倾向性的关系;采用数值模拟探究了工作面注水围岩含水率分布特征,确定了晒旗河磷矿掘进工作面最优注水参数。结果表明:当磷块岩含水率达到0.424%时,磷矿层处于中等岩爆倾向,并且再注水后强度脆性系数随含水率变化的程度不再明显;当注水时间为1 h、钻孔深度为10 m时,有效湿润距离增长率最大,注水效果最优。研究结果可为改善磷块岩注水工艺参数、降低磷矿岩爆风险提供一定参考。

关键词:磷块岩;岩爆防治;含水率;注水时间;钻孔深度

中图分类号:TD313 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)01-0009-08

Optimization of Water Injection Parameters for Prevention and Control of Rock Burst in Shaiqihe Phosphate Mine

WANG Qihu[1,2], *LI Yan*[1], *YAO Nan*[1,2], *WU Meng*[1], *LUO Xiaobing*[3], *HUANG Zhaoyun*[4]

(1.School of Resources and Environmental Engineering,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;
2.Industrial Safety Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430081, China;
3.Hubei Provincial Emergency Rescue Center, Wuhan, Hubei 430081, China;
4.Hubei Jingshen Security Technology Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: The Shaiqihe Phosphate Mine in Yichang, Hubei has entered deep mining, and rock burst disasters are frequent in the excavation working face. Water injection was used to soften the surrounding rocks in the working face to prevent rock burst, and reasonable water injection parameters affected the prevention and control effectiveness of rock burst. The uniaxial compression tests of phosphorite under different water-containing states were carried out. The relationship between water content and rock burst tendency of phosphorite was analyzed based on the rock strength brittleness coefficient. Numerical simulation was used to explore the distribution characteristics of water content in the surrounding rocks of the working face during water injection, and the optimal water injection parameters for the excavation working face of the Shaiqihe Phosphate Mine were determined. The results show that when the water content of the phosphorite reaches 0.424%, the phosphate rock layer is in a moderate rock burst tendency, and the change in strength brittleness coefficient with water content is no longer significant after water injection. When the water injection time is 1 hour and the drilling depth is 10 meters, the growth rate of effective wetting distance is the highest, and the water injection effect is the best. The research results have certain guiding significance for improving the water injection process parameters of phosphate rock and reducing the risk of phosphate rock burst.

Key words: Phosphorite, Prevention and control of rock burst, Water content, Water injection time, Drilling depth

---

* **收稿日期**:2024-03-15
基金项目:湖北省重点研发计划项目(2020BCA082);湖北省应急管理厅重点项目(SJZX20211004)
作者简介:王其虎(1987—),男,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事矿山安全研究。E-mail:wangqihu@wust.edu.cn
通信作者:李炎(1999—),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事矿山岩石安全研究。E-mail:18335570015@163.com

0 引言

鄂西地区大部分磷矿逐步进入深部开采,岩爆的危害日益严重,岩爆防治成为该地区磷矿安全生产的重要任务。实践表明,磷矿层注水可以有效降低磷矿岩爆倾向性和危险性。而注水参数的选择对岩爆注水防治效果具有显著影响。当前,鄂西地区磷矿注水参数的选择往往依靠工人经验,容易因注水不足,达不到有效防控岩爆的目标,或因过度注水,影响了围岩稳固性,优化工作面岩爆注水防治工艺参数对提高岩爆防治效率具有重要意义。

学者们在合理选取注水参数方面做了大量研究工作。杨科等[1]采用数字散斑技术,揭示了不同含水率下砂岩裂纹扩展及破坏规律,获得了循环载荷下不同含水砂岩微观劣化机制。邓飞等[2]通过对比分析不同含水状态砂岩的损伤特征,研究了含水率对砂岩损伤特征的影响。刘保国等[3]开展了不同渗透水压力与三轴压缩作用下的页岩试验,建立了考虑渗透压作用的页岩全应力-应变损伤本构模型。姚强岭等[4]进行了不同含水饱和度、不同岩性含煤岩系的单轴压缩试验和变角剪切试验,分析了不同含水饱和度含煤岩系的力学特性、变形破坏机理和声发射特征。于岩斌等[5]进行了不同孔隙水压的煤岩渗透特性试验,研究了孔隙水压对渗透性能以及体积应变的作用效果。王行等[6]采用动静压混合式注水方法进行注水设计,增加注水钻孔的成孔率和钻进长度。杨明等[7]通过分析煤层注水过程中不同注水压力及围压对煤体初始孔隙结构的影响,从孔径分布、孔隙度和孔隙体积角度分析煤体孔隙的动态演化过程。王刚等[8]采用超声波自激发技术监测不同注水条件下煤体投射超声波的特征参数,分析了注水条件与纵波波速、幅度和衰减系数等特征参数的关系。WANG 等[9]在常温、常压下对不同含水煤体进行超声波试验,分析了波速与含水饱和度等的关系。王和堂等[10]建立了难注水煤层加注流-热-固多场耦合作用模型,分析难注水煤层加注过程多场耦合演化规律。罗丹旋等[11]开展了不同饱水度红色粗晶花岗岩的岩爆试验,探讨了岩石饱水度与岩爆弹射动能的定量关系以及水对岩爆的影响机制。

目前众多学者基于数值模拟软件对注水参数开展了研究,但这些研究多聚焦于页岩和煤岩等的注水软化[12-14],针对含水率对磷块岩岩爆倾向性的影响及注水参数优化的研究较少。本文在前人的研究基础上,以湖北宜昌晒旗河地下磷矿为研究对象,通过对不同含水率磷块岩试样进行单轴压缩试验,基于岩石强度脆性系数法,分析含水率与磷块岩岩爆倾向性的关系;并采用数值模拟方法探究工作面注水围岩含水率分布特征,对关键注水参数进行优化,为实际生产中岩爆注水防治工艺参数的确定提供科学依据。

1 工程概况与岩样制备

晒旗河磷矿矿体属缓倾斜薄矿体,矿体倾角5°~15°,矿体赋存标高为-140~+130 m。最大埋深 800 m,当前埋深 600 m。埋深 400 m 左右时工作面常发生轻微的岩爆,埋深 550 m 时岩爆开始明显加重,从听到岩爆响声变为响声伴随顶板脱落。在开拓巷道过程,当遇到构造带或断距超过 2 m 以上的断层时,岩爆现象明显加重。岩爆现象特征包括:长时间的响声伴随顶板脱落现象;有间断的清脆的岩层断裂声;局部有约 5~10 cm 大小的中间厚边缘薄的岩片弹出或冒烟,弹射距离 2 m 以上;矿柱龟裂,矿房切割巷碎石弹射、发出响声;围岩表面岩体突然冒落,爆裂岩块多呈薄碎屑状、片状、透镜状或板状。目前工作面埋深大多已超过 600 m,对施工人员存在较大的安全威胁。

因此,对湖北宜昌晒旗河磷矿井下岩爆易发的+80 m 工作面围岩进行采样,取样深度约为地表以下 600 m,岩性主要为泥质条带磷块岩。试件加工方法为:首先在岩爆易发现场采用水钻法钻取岩芯,根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),将磷块岩岩芯加工成 Φ50 mm×100 mm 的标准圆柱磷块岩试样,将试件加工打磨成端面不平行度小于 0.02 mm 的标准试件,以消除端部效应。

2 磷块岩含水率与岩爆倾向性关系分析

2.1 不同含水率磷块岩岩样制取

(1) 孔隙率测量。设置 3 个平行试验组 L-1、L-2和 L-3 组,利用氦孔隙度仪 phi220 分别测得 3 组岩样的孔隙率为:L-1 组 0.611%、L-2 组 0.625% 和 L-3 组 0.504%。

(2) 使用恒温干燥箱对 3 组磷块岩试样进行烘干,得到干燥磷块岩试样(含水率为 0),质量为 m_{dry}。

(3) 采用真空抽气装置制备得到饱和水磷块岩试样[15],质量为 m_{sat},通过式(1)计算,得到饱和含

水率为 w_{sat}：

$$w_{sat}=\frac{m_{sat}-m_{dry}}{m_{dry}}\times 100\% \quad (1)$$

式中：m_{dry}为干燥磷块岩试样质量，g；m_{sat}为饱和磷块岩试样质量，g；w_{sat}为饱和含水率，%。

(4) 选取饱和水磷块岩试样放入恒温干燥箱内，设定温度为 65 ℃进行干燥，并每间隔 1 h 测一次磷块岩质量，当测得磷块岩质量接近设定含水率下的质量时，缩短干燥、称重试样时间间隔，直至磷块岩试样达到预先设定的含水率[16]。反复称重，直至岩样质量 m_{equ}几乎不变，得到介于干燥和饱和水状态之间的岩样，含水率 w_{equ}[17]的计算公式为：

$$w_{equ}=\frac{m_{equ}-m_{dry}}{m_{dry}}\times 100\% \quad (2)$$

为了充分体现磷块岩试样的含水率变化情况，每个试验组内均包括干燥状态(A)、饱和含水率(E)和 3 种未饱和含水率(B、C、D)共计 5 种不同含水率试样，见表 1。

表 1　磷块岩试样的含水率

Table 1　Moisture content of phosphorite samples

试件编号	干重/g	湿重/g	含水率/%	平均含水率 w/%
L-1(A)	522.531	—	0.000	0.000
L-2(A)	541.391	—	0.000	
L-3(A)	536.782	—	0.000	
L-1(B)	534.656	535.556	0.168	0.182
L-2(B)	529.345	530.377	0.195	
L-3(B)	531.451	533.762	0.184	
L-1(C)	526.833	528.540	0.324	0.316
L-2(C)	545.912	547.593	0.304	
L-3(C)	538.957	540.298	0.320	
L-1(D)	537.417	539.997	0.480	0.460
L-2(D)	523.108	525.404	0.439	
L-3(D)	525.628	527.380	0.463	
L-1(E)	518.492	521.463	0.573	0.578
L-2(E)	529.870	532.953	0.587	
L-3(E)	526.433	528.941	0.574	

2.2　不同含水率磷块岩强度及变形特性

采用 YZW-30A 微机控制电子伺服试验机进行单轴压缩加载，加载方式为位移控制，加载速率为 0.004 mm/s。

2.2.1　含水率对磷块岩抗压强度与变形特性的影响

水的存在降低了磷块岩的单轴抗压强度和弹性模量。饱和状态下磷块岩的单轴抗压强度、弹性模量分别为干燥状态岩样的 53.5%和 86.0%，见表 2。含水率与岩石单轴抗压强度和弹性模量近似呈线性关系，分别如图 1 和图 2 所示。

表 2　不同含水状态下磷块岩单轴抗压强度与弹性模量

Table 2　Ultimate compressive strength and elastic modulus of phosphorite under different water-containing states

试件编号	含水率/%	单轴抗压强度/MPa	弹性模量 E/GPa
L-1(A)	0.000	84.6	4.61
L-1(B)	0.168	70.3	4.42
L-1(C)	0.324	63.4	4.27
L-1(D)	0.480	53.6	4.13
L-1(E)	0.573	45.1	3.92
L-2(A)	0.000	84.9	4.26
L-2(B)	0.195	71.6	4.08
L-2(C)	0.304	62.8	3.96
L-2(D)	0.439	52.9	3.83
L-2(E)	0.587	46.3	3.62
L-3(A)	0.000	85.2	4.37
L-3(B)	0.184	74.1	4.21
L-3(C)	0.320	65.4	4.09
L-3(D)	0.463	56.1	3.96
L-3(E)	0.574	44.8	3.84

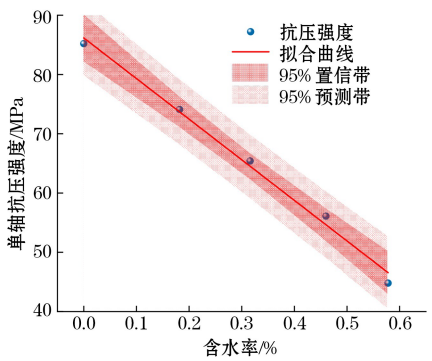


图 1　含水率与单轴抗压强度拟合关系

Fig.1　Fitting relationship between moisture content and uniaxial compressive strength

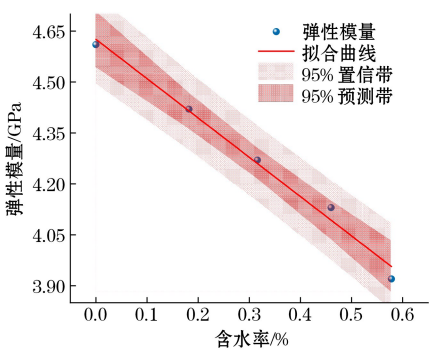


图 2　含水率与弹性模量拟合关系

Fig.2　Fitting relationship between moisture content and elastic modulus

2.2.2　含水率对磷块岩抗拉强度的影响

采用实验室自主研制的巴西劈裂装置结合加载

试验机对不同含水状态下的磷块岩进行抗拉强度测试。饱和状态下磷块岩的抗拉强度为干燥状态岩样的42.1%,含水率与磷块岩抗拉强度近似呈线性关系,对磷块岩含水率与抗拉强度进行拟合,拟合曲线如图3所示。

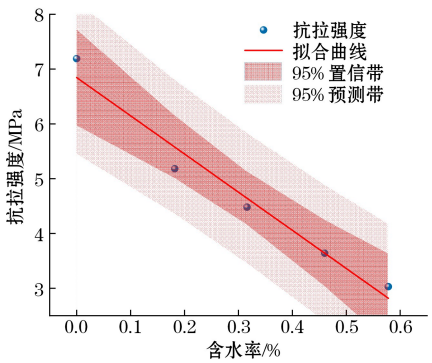


图3 含水率与抗拉强度拟合关系

Fig.3 Fitting relationship between moisture content and tensile strength

2.3 基于强度脆性系数法的磷块岩岩爆倾向性分析

为了评估晒旗河地区磷矿深部开采岩爆发生的可能性以及烈度等级,采用强度脆性系数判据来评判磷块岩岩爆倾向性[18-20]。岩石的单轴抗压强度σ_c与抗拉强度σ_t之比称为强度脆性系数B,计算公式见式(3),它反映了岩石的脆性程度,而岩石的脆性破坏是岩爆发生必不可少的先决条件之一,岩爆倾向性指数在很大程度上取决于岩石的脆性。

$$B=\sigma_c/\sigma_t \tag{3}$$

该方法的判别指标为:$B>40$,无岩爆;$26.7<B\leqslant40$,轻微岩爆;$14.5<B\leqslant26.7$,中等岩爆;$B\leqslant14.5$,强烈岩爆。

根据不同含水状态下磷块岩的单轴抗压强度与抗拉强度测试结果,评估晒旗河矿区磷块岩基于强度脆性系数判据的岩爆倾向性,见表3。

表3 基于强度脆性系数判据的岩爆倾向性判别

Table 3 Results of discriminating rockburst tendency based on the criterion of strength brittleness coefficient

磷块岩含水率w/%	σ_c/MPa	σ_t/MPa	B	岩爆倾向
0.000	84.9	7.19	11.8	强烈岩爆
0.182	72.0	5.18	13.9	强烈岩爆
0.316	63.9	4.48	14.4	强烈岩爆
0.460	54.2	3.64	14.9	中等岩爆
0.578	45.4	3.03	15.0	中等岩爆

磷块岩含水率w与强度脆性系数B近似呈对数函数关系,对磷块岩含水率w与强度脆性系数B进行拟合,结果如图4所示。

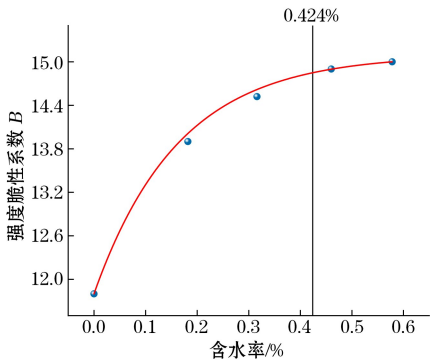


图4 含水率与强度脆性系数拟合关系

Fig.4 Fitting relationship between moisture content and strength brittleness coefficient

经函数拟合得到ExpAssoc型方程,拟合度$R^2=0.996\ 86$,拟合函数为:

$$B=11.8+1.648\ 49\left(1-e^{-\frac{w}{0.163\ 91}}\right)+1.65\left(1-e^{-\frac{w}{0.163\ 91}}\right) \tag{4}$$

随着磷块岩含水率w的不断变大,强度脆性系数B逐渐增大,反映出岩爆倾向性由强烈岩爆倾向降低至中等岩爆倾向。当磷块岩含水率达到0.424%时,此时磷矿层处于中等岩爆倾向,并且再注水后强度脆性系数B随含水率w的变化程度不再明显。因此,在晒旗河矿+80 m工作面注水时,综合考虑降低岩爆倾向性和控制成本,当工作面围岩含水率达到0.424%时,可达到最优注水防控岩爆效果。

3 基于数值模拟的磷矿层工作面注水参数优化

注水时间、注水压力、钻孔深度与钻孔直径是影响围岩含水率分布和注水软化效果的重要参数,晒旗河磷矿采用的钻孔设备与注水设备已确定注水压力与钻孔直径,因此本文重点对注水时间与钻孔深度开展研究。结合现场注水软化工程经验,初选注水时间和钻孔深度的合理范围,再经过数值模拟,确定晒旗河磷矿+80 m工作面岩爆防治的最优注水时间与钻孔深度。

3.1 工作面注水数值模型构建

基于COMSOL软件,在晒旗河磷矿+80 m工

作面推进方向上选取 40 m 进行磷矿层注水模拟，工作面埋深为 594 m，上覆岩体荷载 16 MPa。为了便于模拟，作出如下假设：

(1) 将磷块岩视为均匀一致的多孔介质；

(2) 注入磷块岩中的水视为不可压缩流体；

(3) 底部边界为固定边界，即底部边界水平位移为零，垂直位移为零；左右边界水平位移为零；工作掘进面为自由边界。

构建的数值模型长 40 m，宽 40 m，巷道宽 4 m，长 10 m。垂直工作面钻注水孔，孔径为 0.2 m。数值模拟所选取的岩体力学参数见表 4。

表 4　模型参数

Table 4　Model parameters

流体密度/(kg/m³)	流体黏度/(Pa·s)	磷矿岩密度/(kg/m³)	磷矿层渗透率/%	自然含水率/%	重力加速度/(m/s²)
1 000	0.098	2 860	0.017 6	0.32	9.82

3.2　不同注水参数下工作面围岩含水率分布规律

3.2.1　不同注水时间下含水率分布规律

对不同注水时间 t(0.5 h、0.75 h、1 h、1.25 h、1.5 h)下的含水率进行计算，注水压力设定为 1 MPa。不同注水时间下工作面围岩含水率分布云图如图 5 所示。

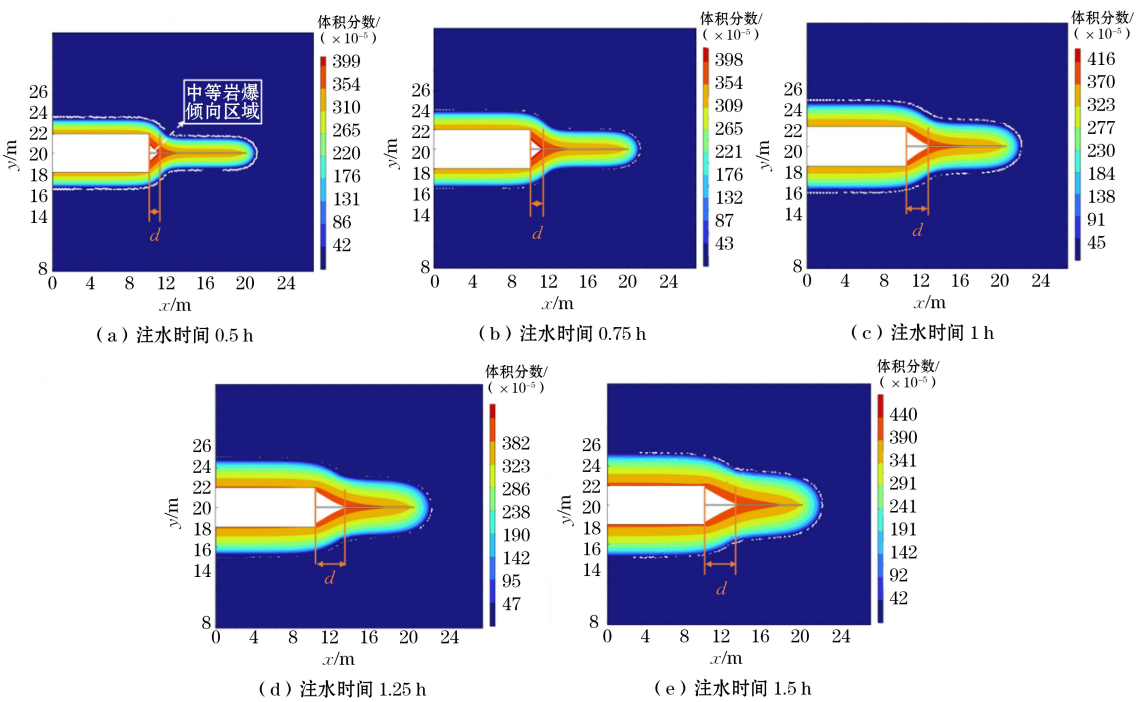


图 5　不同注水时间下围岩含水率分布

Fig.5　Moisture content distribution of surrounding rock under different water injection time

当磷块岩含水率 $w=0.424\%$ 时，掘进工作面注水防控岩爆效果最佳，因此将含水率 $w=0.424\%$ 设定为岩爆防治含水率临界值。图 5 中巷道前白色三角区域为磷块岩含水率 $w\geqslant 0.424\%$ 的中等岩爆倾向区域，同时，将此区域远端边界与掌子面的距离定义为注水后的有效湿润距离，用 d 表示。不同注水时间与有效湿润距离间的关系呈指数型变化趋势，对注水时间 t 与有效湿润距离 d 进行拟合，拟合结果如图 6 所示。

经函数拟合得到 Boltzman 型方程，拟合度 $R^2=0.995\ 6$，拟合函数为：

$$d=\frac{0.625\ 84-3.278\ 81}{1+e^{(t-0.964\ 83)/0.210\ 58}}+3.278\ 81 \qquad (5)$$

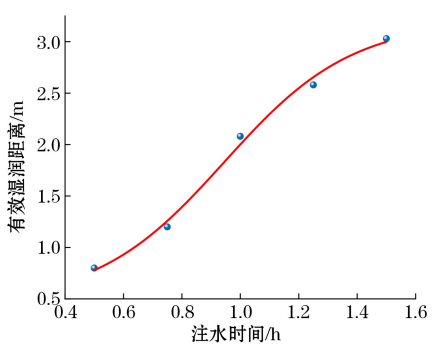


图 6　注水时间与有效湿润距离的拟合关系

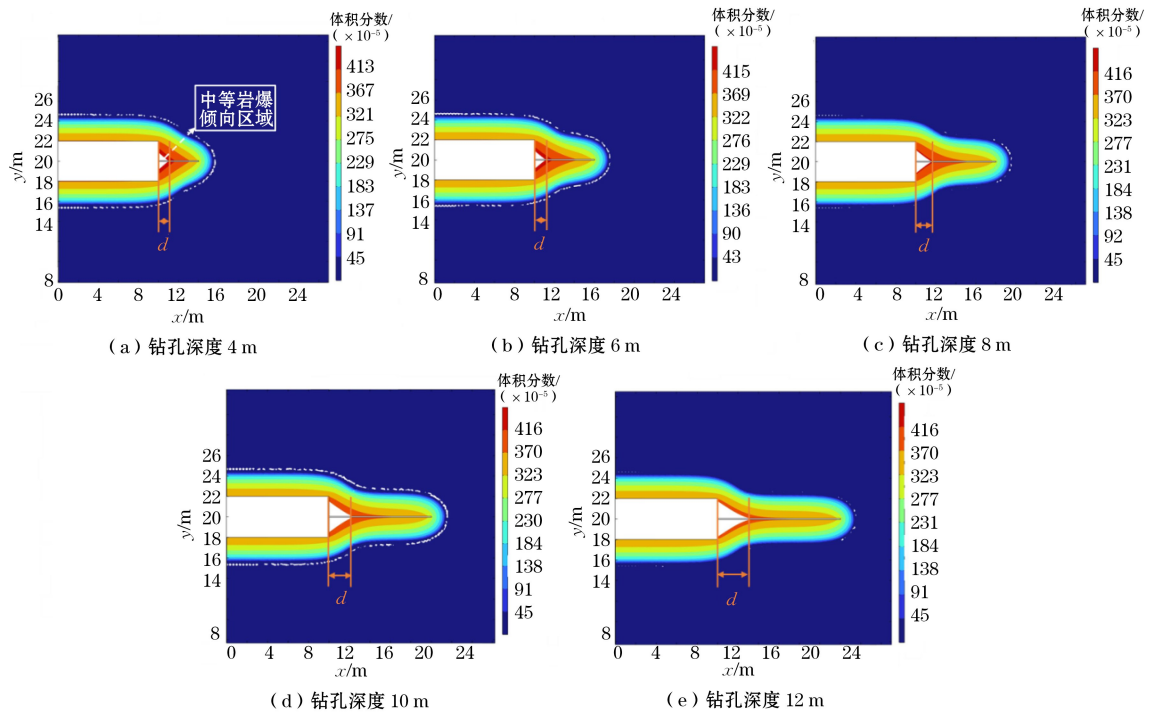
Fig.6　Fitting relationship between injection time and effective wetting distance

磷矿层的注水时间越长，则有效湿润距离 d 越

大。当注水时间 t 为 1.25 h 时,有效湿润距离达到 2.7 m,有效湿润范围直径为 4.84 m,而工作面高为 4.8 m,可看出磷矿层在竖直方向上过度受到注水的影响,造成竖直方向上的磷矿岩长时间处于过饱水状态,不利于掘进后巷道的稳定性。当注水时间由 1 h 增加至 1.25 h 时,有效湿润距离增长率最大,因此在巷道工作面掘进时,注水时间取 1 h,此时有效湿润范围直径为 4.2 m,注水效果最优。

3.2.2　不同钻孔深度下含水率分布规律

对不同钻孔深度 r(4 m、6 m、8 m、10 m、12 m)下磷矿层注水有效湿润范围进行数值模拟,孔径为 0.2 m,注水时间设定为 1 h,注水压力设定为 1 MPa。不同钻孔深度工作面围岩含水率分布云图如图 7 所示。不同钻孔深度 r 与有效湿润距离 d 之间的关系呈指数型变化趋势。对钻孔深度与有效湿润距离进行拟合,拟合结果如图 8 所示。



(a) 钻孔深度 4 m　(b) 钻孔深度 6 m　(c) 钻孔深度 8 m

(d) 钻孔深度 10 m　(e) 钻孔深度 12 m

图 7　不同钻孔深度下围岩含水率分布

Fig.7　Moisture content distribution of surrounding rock under different borehole depths

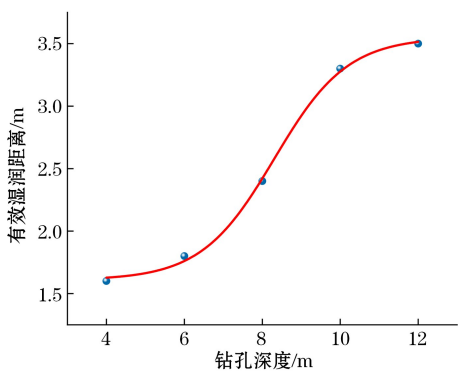


图 8　钻孔深度与有效湿润距离的拟合关系

Fig.8　Fitting relationship between borehole depth and effective wetting distance

经函数拟合得到 Boltzmann 型方程,拟合度 $R^2=0.995\ 25$,拟合函数为:

$$d=\frac{0.607\ 74-2.551\ 66}{1+e^{(r-8.308\ 74)/0.938\ 24}}+2.551\ 6 \tag{6}$$

当钻孔深度在 10 m 以上时,钻孔深度对有效湿润距离的影响不再显著。从工作面竖直方向来看,+80 m 工作面高为 4.8 m,此时有效注水湿润范围过大,会对上下顶底板的稳定性产生不良影响。由图 8 可知,在钻孔深度由 8 m 升至 10 m 时,有效湿润距离增长率最大,因此在对+80 m 工作面进行注水时,钻孔深度取 10 m。

在+80 m 工作面采取 10 m 的钻孔深度,进行 1 h 的注水工程,采用微震监测系统实时在线监测岩体微震信息,通过分析工作面微震事件的活动特征,对+80 m 工作面注水效果进行评价。注水前后工作面微震事件个数与能量序列如图 9 所示。

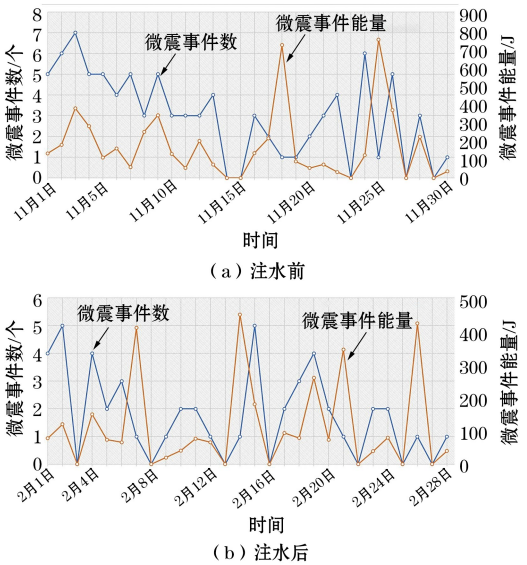


图 9　注水前后微震事件个数与能量序列对比

Fig.9　Comparison of the number of micro seismic events and energy sequence before and after water injection

通过比较注水前和注水后工作面微震事件个数与能量序列可知，在采用注水时间 1 h 和钻孔深度 10 m 的参数进行注水后，微震事件个数与能量均出现不同程度的降低，反映出岩体释放的弹性应力波减少，弹性波能量降低，达到了有效防治岩爆的效果。

4　结论

（1）饱水状态下磷块岩的单轴抗压强度、弹性模量和抗拉强度分别为干燥状态岩样的 53.5%、86.0% 和 42.1%。当磷块岩含水率达到 0.424%时，磷矿层处于中等岩爆倾向，并且再注水后强度脆性系数 B 随含水率 w 的变化程度不再明显。

（2）注水时间、钻孔深度分别与有效湿润距离呈 Boltzmann 型函数关系，结合有效湿润距离的变化程度与工程实际情况，确定注水的最优参数为注水时间 1 h、钻孔深度 10 m。

（3）晒旗河磷矿受钻孔设备与注水设备影响，注水压力与钻孔直径已经确定。今后在其他矿山可以对注水时间、注水压力、钻孔深度与钻孔直径等关键注水参数进行协同优化，能够更有效地降低岩爆风险。

参考文献(References)：

[1]　杨科，张寨男，池小楼，等.循环载荷下含水砂岩裂纹演化与损伤特征试验研究[J].岩土力学，2022，43(7)：1791-1802.
YANG Ke，ZHANG Zhainan，CHI Xiaolou，et al. Experimental study on crack evolution and damage characteristics of water bearing sandstone under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics，2022，43(7)：1791-1802.

[2]　邓飞，韩晓亮，罗福友，等. 不同含水状态砂岩损伤分析研究[J]. 有色金属科学与工程，2014，5(6)：95-99.
DENG Fei，HAN Xiaoliang，LUO Fuyou，et al. Damage analysis of sandstone in different moisture state[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering，2014，5(6)：95-99.

[3]　刘保国，于明圆，孙景来，等. 水-力耦合作用下页岩力学特性及其损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报，2023，42(5)：1041-1054.
LIU Baoguo，YU Mingyuan，SUN Jinglai，et al. Study on mechanical properties and damage constitutive model of shale under hydro-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(5)：1041-1054.

[4]　姚强岭，王伟男，李学华，等. 水-岩作用下含煤岩系力学特性和声发射特征研究[J]. 中国矿业大学学报，2021，50(3)：558-569.
YAO Qiangling，WANG Weinan，LI Xuehua，et al. Study of mechanical properties and acoustic emission characteristics of coal measures under water-rock interaction[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2021，50(3)：558-569.

[5]　于岩斌，蒋宇静，程卫民，等. 煤层高压注水渗透特性试验研究[J].采矿与安全工程学报，2015，32(1)：144-149.
YU Yanbin，JIANG Yujing，CHENG Weimin，et al. Experimental study on permeability properties of coal seam under high pressure water injection[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2015，32(1)：144-149.

[6]　王行，袁丕海，任仲涛，等. 煤层注水技术应用与效果分析[J]. 煤炭技术，2020，39(11)：97-99.
WANG Hang，YUAN Pihai，REN Zhongtao，et al. Application and effect analysis of water injection technology in coal seams[J]. Coal Technology，2020，39(11)：97-99.

[7]　杨明，韩龙祥，张铁岗，等. 变压注水环境下煤体孔隙动态演化规律研究[J]. 煤炭学报，2024，2(26)：1-9.
YANG Ming，HAN Longxiang，ZHANG Tiegang，et al. Study on the dynamic evolution of coal pore under variable pressure water injection environment[J]. Journal of China Coal Society，2024，2(26)：1-9.

[8]　王刚，李胜鹏，刘义鑫，等.真三轴下注水条件对煤体超声波传播特性影响规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2022，41(11)：2225-2239.
WANG Gang，LI Shengpeng，LIU Yixin，et al. Influence of water injection on ultrasonic propagation characteristics of coal under true triaxial stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2022，41(11)：2225-2239.

[9]　WANG G，LI J Z，LIU Z Y，et al. Relationship between wave speed variation and microstructure of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2020，126：200-203.

[10]　王和堂，杨景皓，谭江龙，等.难注水煤层液态 CO_2 加注多场耦合演化规律研究[J].煤炭科学技术，2024，3(3)：1-12.

WANG Hetang, YANG Jinghao, TAN Jianglong, et al. Research on multi-field coupling evolution law of liquid CO_2 filling in difficult water injection seams[J]. Coal Science and Technology:2024,3(3):1-12.

[11] 罗丹旎,苏国韶,何保煜.不同饱水度花岗岩的真三轴岩爆试验研究[J].岩土力学,2019,40(4):1331-1340.
LUO Danni, SU Guoshao, HE Baoyu. True triaxial test on rock burst of granites with different water saturations[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(4):1331-1340.

[12] 刘震,王文迪,许文彪,等.煤层注水渗透率模型及水力耦合影响因素数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(6):1250-1258.
LIU Zhen, WANG Wendi, XU Wenbiao, et al. Permeability model of coal seam water injection and numerical simulation study of hydraulic coupling influencing factors[J]. Journal of Mining Safety Engineering,2021,38(6):1250-1258.

[13] 徐茂,周刚,邱晗.三维预设原生裂隙下的煤层低压注水数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2017,36(6):73-80.
XU Mao, ZHOU Gang, QIU Han. Study of numerical simulation of coal seam low-pressure water injection based on three-dimensional precast pre-existing fractures [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2017,36(6):73-80.

[14] 谢强,田大浪,刘金辉,等.土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J].岩土力学,2019,40(3):879-892.
XIE Qiang, TIAN Dalang, LIU Jinhui, et al. Simulation of seepage flow on soil slope and special stress-correction technique [J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(3):879-892.

[15] 魏进兵,邓建辉,谭国焕,等.泄滩滑坡碎块石土饱和与非饱和水力学参数的现场试验研究[J].岩土力学,2007(2):327-330+335.
WEI Jinbing, DENG Jianhui, TANG Guohuan, et al. Field tests of saturated and unsaturated hydraulic parameters of gravelly soil in Xietan landslide [J]. Rock and Soil Mechanics,2007(2):327-330+335.

[16] PAN Z, COMMELL L D, MICHAEL C, et al. Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal[J]. Fuel, 2010,89(11):3207-3217.

[17] 茅献彪,陈占清,徐思朋,等.煤岩冲击倾向性与含水率关系的试验研究[J].岩土力学与工程学报,2011,20(1):49-52.
MAO Xianbiao, CHEN Zhanqing, XU Sipeng, et al. Experimental study on the burst between the burst tendency and water content in coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,20(1):49-52.

[18] 曲宏略,张新尚,张勇,等.基于倾向性指标的深埋隧道岩爆预测研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊2):949-955.
QU Honglue, ZHANG Xinshang, ZHANG Yong, et al. Prediction of rock burst in deep-buried tunnel based on tendency index[J]. Chinese Journal of Underground and Engineering,2021,17(Suppl.2):949-955.

[19] 李克钢,李明亮,秦庆词.基于改进综合赋权的岩爆倾向性评价方法研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊1):2751-2762.
LI Kegang, LI Mingliang, Qin Qingci. Research on evaluation method of rock burst tendency based on improved comprehensive weighting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(Suppl.1):2751-2762.

[20] 张传庆,卢景景,陈珺,等.岩爆倾向性指标及其相互关系探讨[J].岩土力学,2017,38(5):1397-1404.
ZHANG Chuanqing, LU Jingjing, CHEN Jun. Discussion on rock burst proneness indexes and their relation[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(5):1397-1404.