

朱仙庄煤矿松软厚煤层注水防片帮技术研究

王 飞¹, 许文松^{1,2}

¹安徽理工大学安全科学与工程学院, 安徽 淮南

²安徽理工大学煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年2月20日; 录用日期: 2025年3月20日; 发布日期: 2025年5月9日

摘 要

针对松软厚煤层开采时, 因煤体松软易冒落导致工作面出现片帮漏顶现象, 以朱仙庄煤矿II833工作面为研究对象, 通过理论结合室内试验, 提出松软厚煤层注水防片帮技术, 并在现场实践验证其可行性。结果表明: 型煤的峰值强度随含水率的增大而减少, 煤体的强度降低, 将会影响煤壁前方支承压力区分布规律, 降低其峰值强度并前移, 有助于减轻工作面煤壁压力。朱仙庄矿II833工作面现场应用浅孔高压注水技术后, 将片帮深度从1.5 m降低至0.5 m以下, 有效降低了煤壁片帮对生产的影响, 提高了生产效率。

关键词

松软厚煤层, 片帮, 煤壁注水, 型煤

Study on Waterflood Prevention Sheet Wall Technology of Soft and Thick Coal Seam in Zhuxianzhuang Mine

Fei Wang¹, Wensong Xu^{1,2}

¹School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Feb. 20th, 2025; accepted: Mar. 20th, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

In response to the rib spalling and roof leakage problems caused by the soft and easily caving coal mass during the mining of thick coal seams, this study takes the II833 working face of Zhuxianzhuang Coal Mine as the research object, the water-flooding technology of sheet wall prevention in the soft and thick coal seam is put forward through theory and laboratory test, and its feasibility is verified by field practice. The results show that the peak strength of the briquette decreases with

the increase of water content, and the strength of the coal body decreases, which will affect the distribution law of the abutment pressure area in front of the coal wall, reduce the peak strength and move forward, and help to reduce the coal wall pressure. After the application of shallow hole high-pressure water injection technology in the II833 working face of Zhuxianzhuang Mine, the depth of the sheet wall is reduced from 1.5 m to less than 0.5 m, which effectively reduces the influence of the coal wall on production and improves production efficiency.

Keywords

Soft and Thick Coal Seam, Sheet Wall, Coal Wall Water Injection, Briquette

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

为满足经济发展和煤矿生产需求，我国大规模矿井逐年增多，对煤的需求日益增长，导致了由浅埋煤层向深部煤层开采、由中厚煤层向厚煤层开采的趋势[1][2]。然而在对松软厚煤层的开采过程中，因煤质松软极易冒落，经常出现工作面片帮、漏顶等问题，已成为制约煤矿生产安全与生产效率提升的重要因素[3]。

煤层注水是指在回采之前利用检修班时间将注水钻孔按一定的注水角度，将一定的压力水注入到煤体中，让水均匀地渗透到煤体的裂缝中，以提高煤体自身的含水量，本工艺在煤壁片帮及冒顶方面具有良好的应用前景[4]-[8]。本文将以朱仙庄矿II833 工作面为研究对象，采用室内试验、现场应用等研究方法，提出煤层注水防片帮技术措施，以提高煤壁稳定性，为工作面安全生产提供技术依据。

2. 工程概况

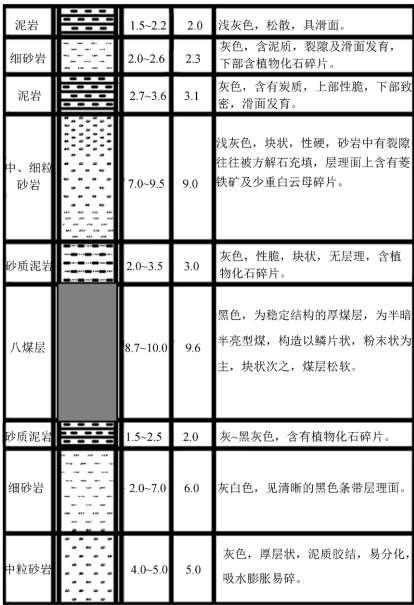
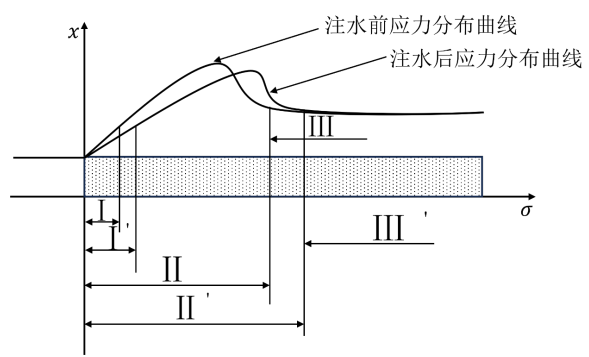


Figure 1. II833 composite bar chart
图 1. II833 综合柱状图

朱仙庄 II833 工作面主采 8 煤层, 宏观煤岩类型以半暗半亮煤为主, 构造以鳞片状、粉末为主, 块状次之, 煤层松软。II833 煤层柱状图如图 1 所示。II833 工作面为综放工作面, 煤层松软、破碎, 易冒落, 产生煤尘量大, 易形成冒落区段, 直接影响工作面支架的荷载及稳定性, 尤其是大倾角厚煤层综放开采, 使得支架前移等变得十分难以操作, 且会存在局部漏顶、片帮现象, 巷道围岩控制难。

3. 松软厚煤层煤壁注水防片帮机理

煤层注水防治片帮的关键在于: 水分渗入煤层后, 可弱化煤体的硬度、强度强化其塑性变形, 从而促使工作面前方应力降低区(煤体塑性区)加宽, 应力增高区(弹塑性变形区)向深处传递并扩展, 从而增加煤体受力区域; 在孔隙压力影响下, 煤壁处应力降低, 工作面前方集中应力向深部转移, 减少了煤壁处煤体的应力集中, 缓解了煤体积聚的内弹性能[9]。注水前后应力分布分析如图 2 所示。塑性区被压力水灌注后, 处于塑性区的煤体自身力学结构会改变, 其粘结性得到提升, 在超前支承压力作用下, 煤体在一定时期内会再次被压密, 进而减小煤体内的空隙, 加强煤颗粒之间的相互吸引, 使得被水侵透的煤体与顶板紧密粘结在一起, 最终形成具有一定强度和高度的粘结层[10] [11]。



I-注水前开挖扰动距煤壁最大距离; I'-注水后开挖扰动距煤壁最大距离; II-注水前煤壁前方应力分布; II'-注水后煤壁前方应力分布; III-注水前煤壁前方正常压力区; III'-注水后煤壁前方正常压力区。

Figure 2. Stress distribution before and after water injection
图 2. 注水前后应力分布

4. 煤层注水物理力学性质测试



Figure 3. Preparation process of briquette
图 3. 型煤制备过程

由于II833 工作面煤层松软, 普氏硬度 f 平均为 0.3, 难以取回完整煤块制成标准试件。型煤是利用一定的粒径的颗粒煤, 通过成型模具在一定成型压力下压制而成的符合标准的煤样, 型煤能大致模拟原煤

相关特性。为此,拟采用实验室已有实验装置,通过干燥、粉碎、筛选、配水搅拌及加压等一系列工序,将松软煤体制成完整型煤,型煤制备过程如图3所示,对不同含水率型煤进行单轴压缩试验。

在查阅大量文献的基础上,本试验计划制备含水率为3%、5%、7%、9%、11%、13%的成型型煤试件,在实际的制作过程中,当添加13%的水时,在压制过程中有部分水从模具中流出,无法完整成型,导致含水率有误差。故最终选择含水率为3%、5%、7%、9%、11%这5组成型型煤进行分析,制备好的成型型煤如图4所示。



Figure 4. Briquette with different moisture content
图 4. 不同含水率成型型煤

在压力机上,以0.1 mm/min的加载速度,对已制得的不同含水率的型煤进行单轴压缩试验,研究不同含水率条件下,型煤力学性质变化规律。图5展示了部分不同含水率下型煤单轴压缩试验的破坏形态。

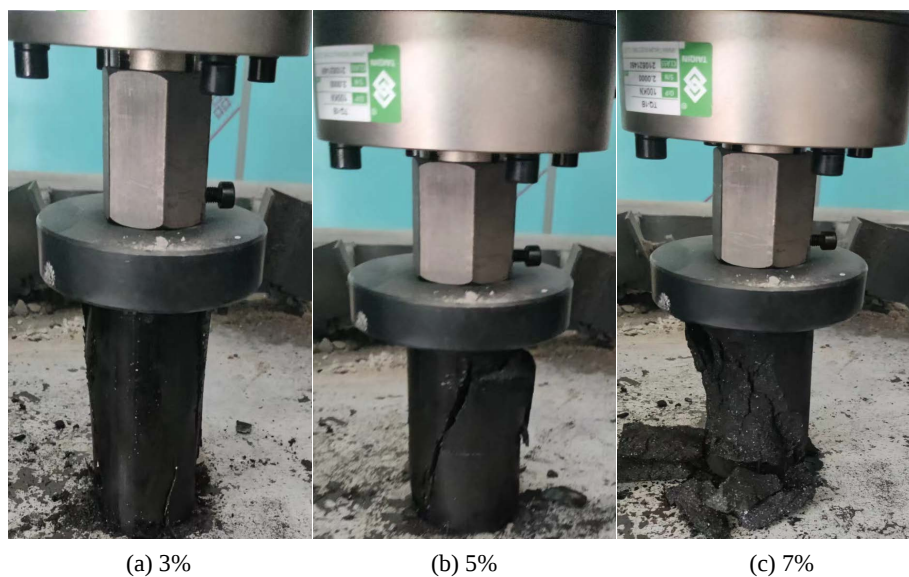


Figure 5. Damage morphology of briquette with different moisture content
图 5. 不同含水率型煤破坏形态

4.1. 不同含水率型煤单轴压缩试验应力 - 应变曲线

图6给出了不同含水率型煤单轴压缩试验过程中全应力 - 应变曲线图,从图中可以看出:在低含水

率条件下(3%, 5%), 全应力 - 应变曲线表现出较高的弹性模量和峰值强度, 塑性变形量较小。随着含水率增加至 7%、9%, 型煤的应力 - 应变曲线在弹性阶段的斜率降低, 即型煤的弹性模量降低, 型煤在达到峰值之前的屈服期增加, 峰值强度降低, 峰值点逐渐后移, 峰值应变随含水率增加而增加, 水分的存在减小了煤颗粒间的摩擦力和粘结强度, 型煤强度降低, 但塑性变形能力增强, 破坏形式更具延展性, 当含水率进一步增加, 增加至 11% 时, 曲线整体下移, 峰值应力显著降低, 弹性模量达到最低, 水分过多会破坏煤颗粒间的粘结结构, 导致型煤松散, 强度下降。不同含水率的型煤在达到峰值强度后的变形特征基本相同, 均未呈现明显的脆性破坏, 仍具有一定的残余变形, 高含水率的型煤可以在单向荷载作用下承受压力, 达到持续耐压, 整体性膨胀, 且峰后位移量较大, 呈现出一定的延性。研究表明, 水分含量的增加会引起型煤轴向应变的增加, 宏观表现为增大工作面煤壁的塑性变形量。

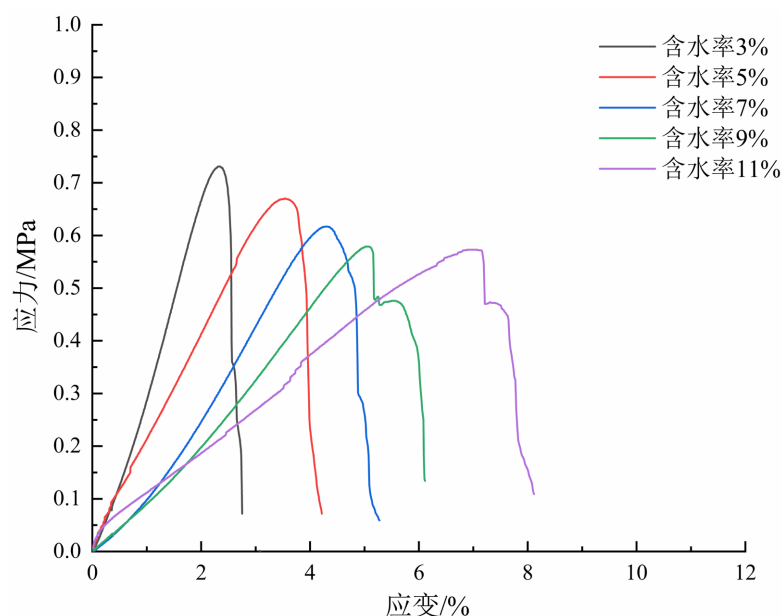


Figure 6. Total stress-strain curves of briquette with different moisture content
图 6. 不同含水率型煤全应力 - 应变曲线图

4.2. 不同含水率煤样峰值强度变化规律

将不同含水率条件下的峰值强度与含水率进行非线性拟合, 得到以下函数:

$$\sigma_c = x^{-0.1993} + 0.9128 \quad (R^2 = 0.9834) \quad (1)$$

式中: σ_c ——型煤峰值强度, MPa;

x ——型煤含水率, %。

由公式(1)和图 7 可以看出, 随着含水率的增加, 型煤峰值强度缓慢下降, 所以型煤峰值强度与含水率呈负相关。当含水率达到 9% 时, 其峰值强度就会趋于平稳。具体而言, 含水率从 3% 增加到 11% 时, 型煤峰值强度由 0.731 MPa 降至 0.573 MPa 左右, 下降了 21.61%, 总体上来说, 型煤强度相对较低, 这与现场实际煤层强度较为一致。研究表明, 随含水率的增大, 型煤的单轴抗压强度不断减小, 主要因为松软煤体具有大量孔隙、裂隙, 水分子会逐渐充满煤体内部微孔隙, 改变了煤颗粒之间的连接方式和煤体自身的力学结构与性质, 说明水对煤体的抗压强度起到一定的弱化作用[12]。型煤的峰值强度随含水率的增大而减少, 煤体的抗压强度减小, 可减缓煤壁前方支承压力区分布, 减小其峰值强度并前移, 有助

于减轻工作面煤壁压力。

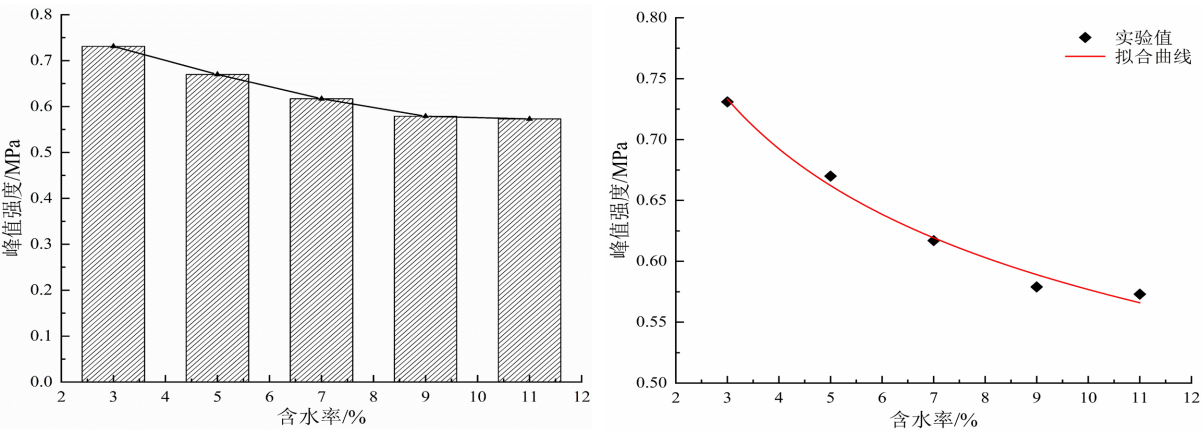


Figure 7. Relationship between moisture content and peak intensity and fitting curve
图 7. 含水率与峰值强度关系及拟合曲线

4.3. 不同含水率煤样峰值应变变化规律

由上述分析可知, 含水率的增大导致型煤的物理力学性质发生变化, 从而导致其峰值强度下降, 并提高其塑性。在此基础上, 提出用峰值应变这一塑性指标来表征含水率对煤的塑性特征的影响, 当煤受单向载荷作用下, 其峰值应变应该是达到最大强度时对应的应变值。图 8 是各类型煤在不同含水率条件下峰值应变与含水率的关系曲线图。将各类型煤峰值应变的数据进行拟合, 得出以下函数:

$$\varepsilon_c = 0.9176x^{0.8305} \quad (R^2 = 0.9451) \quad (2)$$

式中: ε_c ——峰值应变;
 x ——型煤含水率, %。

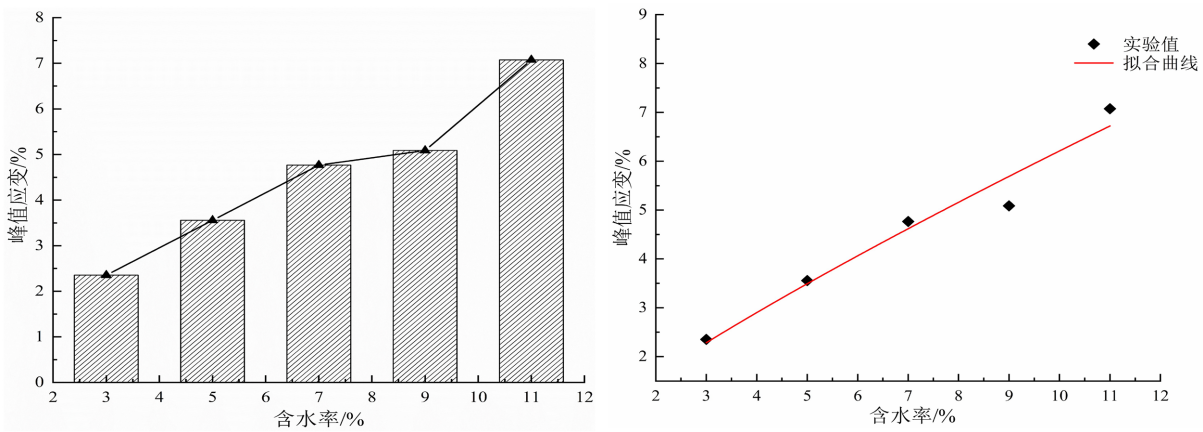


Figure 8. Relationship between moisture content and peak strain
图 8. 含水率与峰值应变关系

结合式(2)和图 8 可知, 型煤峰值应变与含水率之间呈现正相关关系, 即峰值应变随含水率的增大而增大, 含水率由 3% 增加至 11%, 型煤峰值应变由 2.35% 增加至 7.07% 左右, 提高了 200.64%, 说明合理的成型水分, 对于提高型煤的塑性变形量有着显著成效。

5. 煤壁注水渗流模型数值模拟分析

5.1. 几何模型与网格划分

针对现场煤壁注水的实际情况, 基于注水湿润几何对称的特点, 选取一个钻孔为研究对象, 在考虑最大的湿润半径的前提下, 构建具有理想长宽高 30 m × 20 m × 20 m 的三维计算模型。创建的计算物理模型如图 9 所示。利用 Comsol 软件提供的网格生成器, 自动划分三角形网格单元, 其中最小单元大小为 0.004 m, 最大单元大小为 0.26 m, 最大单元增长率 1.05, 曲率因子 0.2, 狭窄区域分辨率 1。依据朱仙庄煤矿 II833 工作面的煤岩体力学参数, 初始模拟参数如表 1 所示。

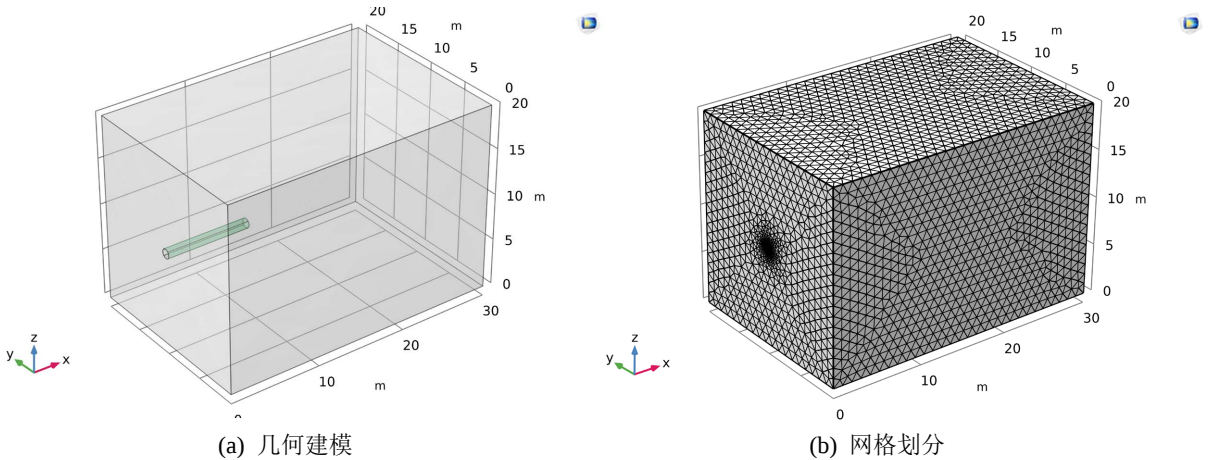


Figure 9. Physical model of water seepage in coal wall
图 9. 煤壁注水渗流物理模型

Table 1. Simulated initial parameter settings
表 1. 模拟初始参数设定

参数类别	参数值	参数单位
煤层孔隙率	0.1	
煤层渗透率	1e-12	m ²
流体粘度	1.01e-3	pa·s
流体密度	1000	kg/m ²
煤体密度	1630	kg/m ²
泊松比	0.35	
煤层杨氏模量	8.5e9	pa

5.2. 孔隙水压分布模拟分析

利用 Comsol 软件对不同注水压力(5 Mpa, 7 Mpa, 9 Mpa, 11 MPa)下煤壁内孔隙水压的分布规律进行模拟, 为便于观测数据和压力云图的分布规律, 对三维模型选择剖面图进行分析研究, 不同注水压力下煤壁内孔隙水压分布规律如图 10 所示。并在孔隙水压压力云图上加入等值线更加方便观测孔隙水压变化情况。

在注水过程中, 煤层内水的渗流运动是受压力差决定的。当施工时施加一定的注水压力后, 离钻孔较近的位置孔隙水压较大, 压力差促使压力水持续向煤层内渗透, 水在煤层的这种渗流运动导致煤层内的孔隙分布都呈现出椭圆形状, 并且都以钻孔为中心向外逐渐递减, 并最终降低为 0。其中, 钻孔的孔壁

处孔隙水压值最大, 与注水压力相近。

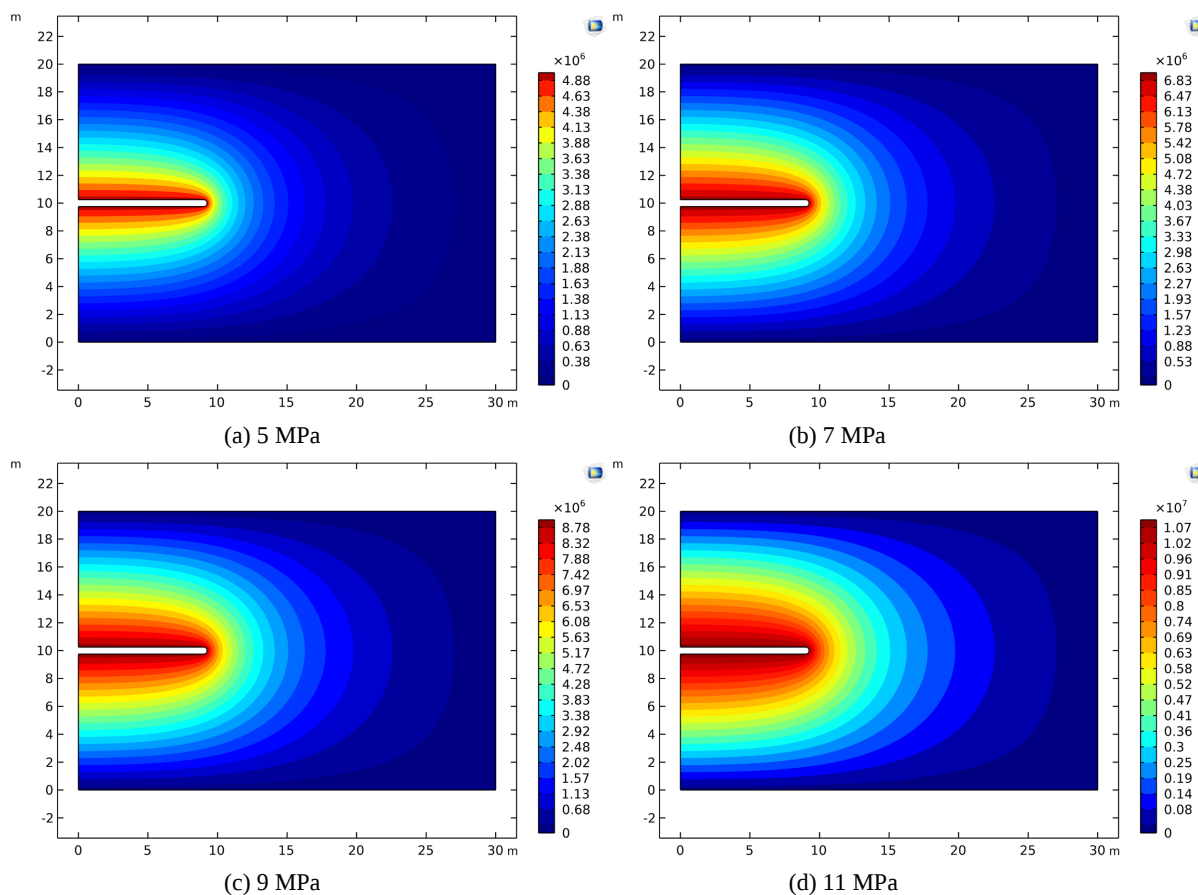


Figure 10. Distribution of pore water pressure under different injection pressures

图 10. 不同注水压力时孔隙水压分布

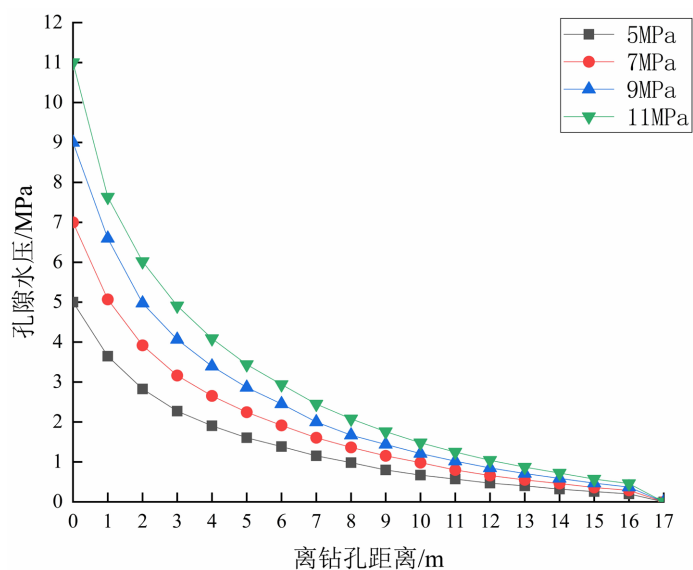


Figure 11. Water pressure distribution curves of coal body under different injection pressures

图 11. 不同注水压力下煤体水压分布曲线图

利用 Comsol 的后处理功能, 将钻孔垂直一侧直线对应的压力值提取出来, 绘制出不同注水压力下煤层孔隙水压分布变化曲线图, 如图 11 所示。

由图可知: 孔隙水压的递减速率与注水压力有着密切关系, 随着注水压力的增大, 孔隙水压的递减速率也在不断增大。注水压力为 5 MPa 时, 孔隙水压随离钻孔距离的增大缓慢下降, 并最终下降为 0, 递减速率变化较为平缓, 但当注水压力增大为 11 MPa 时, 孔隙水压的递减速率开始突增, 递减速率变化变得陡峭。当离钻孔距离超过 13 米时, 孔隙水压值趋于一致, 并最终都降为 0。这说明, 在超过一定的距离后, 孔隙水压受到注水压力的影响减弱。

5.3. 湿润半径影响分析

煤体中的孔隙水压由高到低有规律地逐渐递减, 孔隙水压降低到一定程度后煤层的润湿效果将不再显著。根据孔隙水压与煤体水分增量之间的关系, 通常认为在煤层注水过程中, 当水分增量达到约 1%时, 标志着湿润范围的界限[13]。如果将 1.5 MPa 视为临界压力, 那么高于这一压力的区域为注水湿润区, 而低于该压力的区域则被视为未受注水影响区[14]。在此条件下, 计算出了不同注水压力条件下的湿润半径, 结果见表 2。

Table 2. Wetting radius of different injection pressures
表 2. 不同注水压力湿润半径

注水孔长/m	注水压力/MPa	湿润半径/m
9	5	5.7
	7	7.8
	9	8.9
	11	9.91

由表 2 中数据可得: 润湿半径随注水压力的增大而增大, 因此为了改善注水效果, 增加注入水的湿润范围, 可以采用增大注水压力的方法。

6. 煤层注水防片帮工程现场应用

6.1. 注水参数

为保证注水效果, 设计钻孔间距为 6 m, 钻孔深度为 9 m, 且为了防止压力水渗进顶板裂隙, 钻孔倾角向上 1°~5° (钻孔水平投影与煤壁水平方向夹角)。注水参数数据如表 3 所示。

Table 3. Water injection parameters
表 3. 注水参数

注水孔深度/m	注水孔倾角/°	注水孔间距/m	注水压力/MPa	单孔注水流量/m ³	单孔注水时间/h
9	1~5	6	9-11	5.34	5.93

6.2. 工作面注水工艺

考虑现场大采高工作面生产任务重、工作量大, 而对于注水钻孔布置方式来讲, 对工作面超前煤体进行注水效果最好的当属在工作面煤壁布置钻孔注水, 但通过以往的现场经验看出, 直接在工作面煤壁

进行注水工序相对较为繁琐, 且注水设备较多, 对工作面生产造成相当大的影响, 因此, 建议在工作面两顺槽内向工作面实体煤侧布置钻孔注水, 已达到对工作面超前煤体及顶板岩层进行注水加固的效果。在工作面两巷施工钻孔, 布置在工作面前方煤体中, 其方向与工作面推进方向垂直, 如图 12 所示。

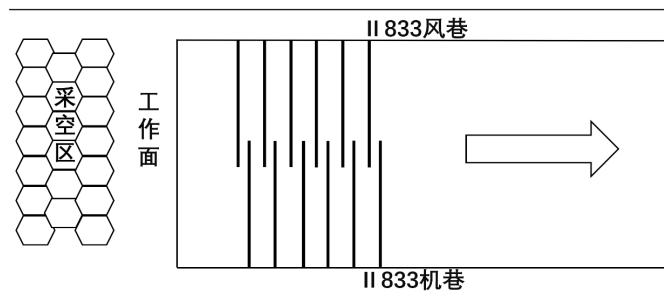


Figure 12. Layout plan of water injection borehole
图 12. 注水钻孔布置平面示意图

使用 ZQSJ-80/2.8 型气动手持式钻机, 配合直径为 $\phi 42$ mm、长度为 1 m 的接杠螺旋通水钻杆进行钻孔作业。钻孔的布置需综合考虑煤层孔隙率、透水性、工作面采高(3.5 m)以及注水扩散半径等因素。为避免注入的压力水从煤层顶板流出或渗入顶板裂隙, 钻孔应以近水平角度布置在煤壁的中上部。根据实测数据, II833 工作面的钻孔距离底板高度为 2 m, 倾角向上 $1\sim 5^\circ$, 钻孔间距为 6 m, 钻孔深度为 9 m。钻孔布置在两支架护帮板之间, 为防止工作面两端煤壁发生片帮现象, 工作面两端各预留 6 m 不设置注水钻孔。II833 工作面钻孔布置的三视图如图 13 所示。

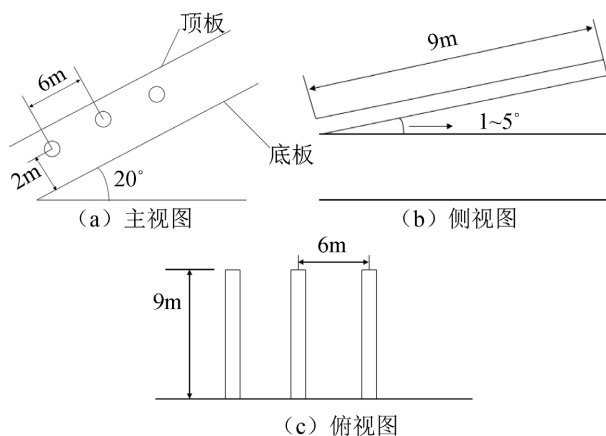


Figure 13. Three views of drilling layout
图 13. 钻孔布置三视图

6.3. 注水效果分析

实施浅孔高压注水后, 在现场进行大量观测, 每天对工作面片帮次数情况进行统计汇总, 对比分析浅孔高压注水前后煤壁片帮情况, 结果如表 4 所示。

现场工程实践表明, 采用浅孔高压注水技术可改善松软煤体的粘结性和塑性, 从而更好地与顶板煤层粘结, 降低了顶板的受力, 使顶板承受的压力减小, 加强了煤壁的整体稳定。使用该方法, 可有效减轻了松软煤体片帮和冒顶的发生, 降低了煤壁片帮的深度和长度, 大大提高了生产效率, 为开采工作面的安全管理提供了良好的条件。

Table 4. Statistical table of sheet wall before and after injection
表 4. 注水前后片帮情况统计表

分类项目	实施注水措施前(工人叙述)	实施注水措施后(现场实测)
片帮深度	最深时达 2.7 m，一般在 1.0~2.0 m 之间	片帮深度平均在 0.5 m 以下
片帮长度	占工作面长度的 70~80%	占工作面长度的 20~30%
片帮支护情况	每班都需花近一半的时间进行人工木料支护和清理片落的煤	仅早班检修时对个别片帮较严重的地段进行木料支护(平均 2~3 处)，而在生产班片帮少、程度轻，支护的次数很少
对正常生产的影响程度	在生产班次，影响正常生产的时间约 50%	在生产班次，影响正常生产的时间在 20%以下

7. 结论

- 1) 高含水率的型煤可以在单向荷载作用下承受压力，达到持续耐压，整体性膨胀，且峰后位移量较大，呈现出一定的延性，水分含量的增加会引起型煤轴向应变的增加，宏观表现为增大工作面煤壁的塑性变形量。
- 2) 型煤的峰值强度随含水率的增大而减少，煤体的抗压强度减小，可减缓煤壁前方支承压力区分布，减小其峰值强度并前移，有助于减轻工作面煤壁压力。型煤峰值应变与含水率之间呈现正相关关系，合理的成型水分，对于提高型煤的塑性变形量有着显著成效。
- 3) Comsol 模拟煤层注水孔隙水压变化规律，注水过程中，煤层内水的渗流运动是受压力差决定的，压力差促使压力水持续向煤层内渗透。润湿半径随注水压力的增大而增大，因此为了改善注水效果，增加注入水的湿润范围，可以采用增大注水压力的方法。
- 4) 通过对朱仙庄煤矿II833 工作面现场应用浅孔高压注水技术后，将片帮平均深度从 1.5 m 降低至 0.5 m 以下，有效降低了煤壁片帮对生产的影响，提高了生产效率。

基金项目

煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金资助(EC2023020)；安徽省高校自然科学重点科研项目(2024AH050351)。

参考文献

[1] 郑欢. 中国煤炭产量峰值与煤炭资源可持续利用问题研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南财经大学, 2014.

[2] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.

[3] 王文才, 王瑞智, 刘海, 等. 煤矿片帮冒顶事故树分析[J]. 煤矿安全, 2010, 41(7): 133-135.

[4] 石计群. 三软煤层仰采工作面片帮治理技术[J]. 煤炭技术, 2015, 34(1): 17-20.

[5] 安超军, 王平均, 李升. 义络公司煤层注水技术[J]. 煤炭技术, 2007, 26(1): 129-130.

[6] 王云东. 特厚极软煤层放顶煤工作面防片帮、漏顶技术的研究[J]. 煤炭技术, 2007, 26(5): 80-82.

[7] 张健, 徐明, 刘涛, 等. 分段封孔注水提高煤层注水效果的应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(2): 79-83.

[8] 王佳奇, 李松. 大采高煤壁片帮条件及注水增稳机理研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(12): 60-63.

[9] 张勇. 芦岭煤矿松散破碎煤层注水增稳技术研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(4): 152-154.

[10] 李斌. 松散厚煤层工作面煤壁注水防片帮机理及工程应用[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.

[11] 魏坤. “三软”厚煤层煤壁注水防片帮技术研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

[12] Hashiba, K. and Fukui, K. (2014) Effect of Water on the Deformation and Failure of Rock in Uniaxial Tension. *Rock*

Mechanics and Rock Engineering, **48**, 1751-1761. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0674-x>

- [13] 孙强. 压力水源下煤岩体内渗流过程分析[J]. 煤矿安全, 2006, 37(2): 58-59.
- [14] 王开德, 宁洪进, 万纯新, 等. 煤层注水压力及渗透率分布规律数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(5): 181-184.