



煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用

郑士田, 马荷雯, 姬亚东

引用本文:

郑士田, 马荷雯, 姬亚东. 煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 167–173.
ZHENG Shitian, MA Hewen, JI Yadong. Optimization of regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(5): 167–173.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术

Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huabei coalfields
煤田地质与勘探. 2018, 46(4): 142–146, 153 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.04.023>

华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则

Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield

煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 1–10 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.001>

地面定向钻探技术在煤层底板高承压含水层改造中的应用

Application of surface directional drilling technology in reforming the confined aquifer with high pressure in coal seam floor
煤田地质与勘探. 2019, 47(z1): 32–36 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.S1.006>

基于定向水平钻陷落柱综合探查与阻水塞立体建造技术

Comprehensive exploration of collaps column and three-dimensional construction technology of water plug based on directional horizontal drilling

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 168–175 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.021>

煤层底板水害防治智能决策支持系统框架构建

Framework on intelligent decision support system for coal seam floor water hazard prevention and control
煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 161–169 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.017>



移动阅读

郑士田, 马荷雯, 姬亚东. 煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 167-173. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.018
ZHENG Shitian, MA Hewen, JI Yadong. Optimization of regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 167-173. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.018

煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用

郑士田^{1,2}, 马荷雯^{1,2}, 姬亚东^{1,2}

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘要:为了进一步提高煤层底板水害区域超前治理技术的治理效果, 应优化注浆工艺, 扩大技术的应用范围。总结淮北矿区区域底板超前治理工程实践表明, 低压扩散和中压加固阶段压力控制对注浆总量起主要控制作用, 进而直接影响灰岩含水层改造效果, 推导的不同岩溶裂隙发育程度地层的注浆量预计公式, 可以有效指导注浆工程设计。此外, 提出了工作面区域内、外双(钻)孔组的水平布设方法, 优化注浆工艺的同时, 提高了钻孔利用率。针对注浆工程中注浆压力控制及浆液选取等关键技术问题, 建立了研究区裂隙发育程度的多源信息判识方法和“微压充填—低压扩散—中压加固—高压劈裂”的“阶段型”注浆压力控制模型, 细分了不同注浆阶段的注浆浆液类型, 推导了注浆压力的分级阈值和设计公式, 实现了注浆压力的分区段高效、精准控制, 对煤矿底板水害超前区域治理技术的应用与推广具有重要意义。

关 键 词:底板水害; 薄层灰岩; 区域超前治理; 定向水平钻进; 注浆工艺



语音讲解

中图分类号: TD745; TD265.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2021)05-0167-07

Optimization of regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology and its application

ZHENG Shitian^{1,2}, MA Hewen^{1,2}, JI Yadong^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to optimize the grouting process, improve the effect of the technology, and promote its application, this paper presents an investigation on the application of the regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology in Huabei mining area. The investigation shows that the pressure control in low pressure diffusion and medium pressure strengthening stages plays a major role in controlling the total grouting volume, which directly affects the limestone aquifer reformation. The prediction formula for grouting volume for strata with different karst fractures can provide guidance to the grouting engineering design. In addition, the horizontal layout method of double drill hole group inside and outside the working face is put forward to optimize the grouting technology and improve the utilization rate of drilling holes. To address the key technical issues of grouting pressure control and grout selection, the multi-source information identification method of fracture development and the stage-grouting pressure control model are established, in which the slurry types for different grouting stages are divided, and the classification threshold and design formula of grouting pressure are proposed, making the grouting pressure control efficiently and accurately. It is of great significance for the application and promotion of the regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology.

Keywords: the floor water hazard; thin limestone; regional advanced prevention and control; horizontal directional drilling; grouting process

我国典型的石炭-二叠纪煤田带压开采过程中,一直受煤层底板水害困扰,是我国煤矿安全生产的重大难题。深部煤层开采过程中,底板下方隔水层相对薄弱,距离开采煤层较近区域存在多层灰岩含水层,且富水性极不均匀,煤层底板突水系数极大,时刻威胁着煤矿安全生产^[1-3]。近十多年来,采用顺层定向钻进技术的区域治理理念已被证明是解决此类灾害的有效途径,并已在我国煤层底板水害治理中推广使用^[4-6]。基于华北型煤田大采深高承压下组煤底板突水防治实例,提出了“随探随注、探治结合”“区域主动超前治理”“探、注、验一体化”等技术理念,治理区域也扩展到奥陶纪灰岩(简称奥灰)顶部^[7-10],总结出超前区域水害防治技术体系与准则^[11-13]。

在煤层底板水害区域超前治理技术中,注浆压力控制和注浆量预计是保证煤层底板薄层灰岩注浆工程效果的重要指标。目前,国内外开展的煤层底板薄层灰岩区域超前治理工程与技术研究^[14-16]中,对于指导底板薄层灰岩注浆工程的相关技术指标缺少定量化研究。为此,笔者以淮北矿区近水平定向钻进区域注浆改造煤层底板薄层灰岩含水层工程实践为例,提出注浆压力的全时段“分阶控制”模式,推导注浆最大终压设计公式和注浆量预计公式,并在原有技术的基础上,对钻孔布设方法进行改进,优化传统经验公式,将对煤层底板水害区域超前治理技术更大范围的推广和应用具有重要意义。

1 研究区概况

1.1 区域地质概况

朱庄煤矿位于安徽省淮北市以东约 9 km,矿区地处淮北平原中部,地势平坦,地表为 50.45~96.30 m 厚第四系冲积层覆盖,形成一个北部偏高、南中部偏低的山间盆地平原。区域内地层以宽缓褶曲构造为主,断裂构造不甚发育。朱庄煤矿采用竖井和风井的开拓方式,现有-150 m 和-250 m 两个生产水平,以长壁走向式主采 4、5、6 煤层。其中Ⅲ63 采区主采 6 煤,属二叠系下统山西组,煤厚 2.3~3.0 m,均厚 2.8 m,煤层倾角 6°~15°,平均 10°。

6 煤底板为山西组砂岩裂隙含水层,埋深 303.71~807.61 m,平均 504.40 m,厚度 2.29~50.22 m,平均 22.60 m,岩性以浅灰-深灰色夹少量灰绿色中、细砂岩、岩浆岩为主,夹灰色粉砂岩及泥岩。该含水层地下水处于封闭-半封闭环境,以静储量为主,岩层内部裂隙发育程度不均,富水性受裂隙发育程度控制, $q=0.007\sim0.023\text{ L/(s·m)}$, $K=0.038\sim0.045\text{ m/d}$ 。

1.2 Ⅲ 632 工作面概况

淮北矿区朱庄煤矿Ⅲ 632 工作面为Ⅲ 63 采区左

翼首采工作面,工作面走向长 840 m,倾斜宽 172 m。工作面主采 6 煤,主要充水水源为煤层底板下伏太原组灰岩含水岩组(第一层灰岩至第四层灰岩,分别简称一灰、四灰含水层等),距工作面底板 55~100 m,富水性较差,水压约 4 MPa,属高承压含水层,平均突水系数大于 0.9 MPa/m,远高于安全开采突水系数 0.06 MPa/m。其中,一灰和二灰(第二层灰岩)含水层较薄为 1.5~3.5 m,距 6 煤 55~65 m,与下伏灰岩含水层的水力联系较弱,易于疏干,如图 1 所示。三灰(第三层灰岩)和四灰含水层属强富水含水层,涌水量最大超过 400 m³/h,疏干成本巨大^[17]。此外,底板三灰、四灰含水层与其下部奥灰含水层存在直接水力联系,接受奥灰含水层大量补给。

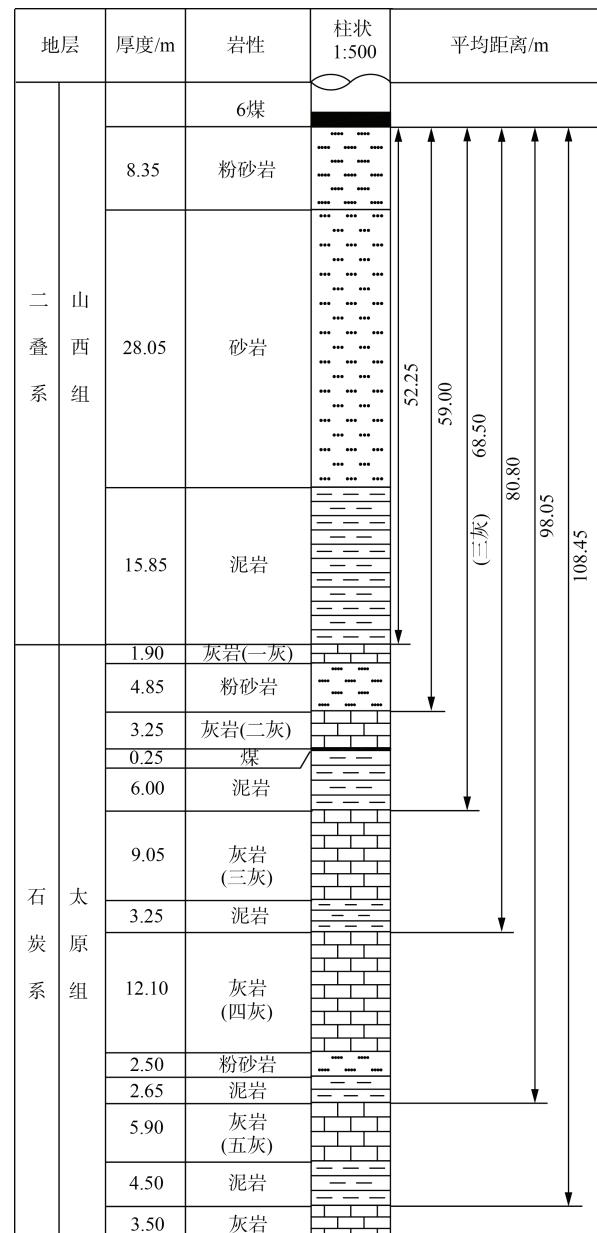


图 1 Ⅲ 632 工作面煤层底板地层结构

Fig.1 Stratigraphic structure of coal floor if working face III 632

2 底板水害区域超前治理关键技术

2.1 技术原理

煤层底板水害区域超前治理技术是以采区或相对独立的水文地质单元为对象^[18], 采用地面定向钻孔对开采煤层底板下伏含水层进行区域超前探查, 并通过钻孔将浆液灌注到目标地层层位, 使工作面底板下伏地层中形成一层有效隔水层, 以满足带压开采煤层底板水害区域综合治理的目的。由于开采煤层底板直接受其下伏含水层威胁, 在采掘之前, 采用水平定向钻进下伏含水层的方式, 最大限度沟通导水裂隙, 在顺层段注浆以形成区域隔水层(带), 如图 2 所示。

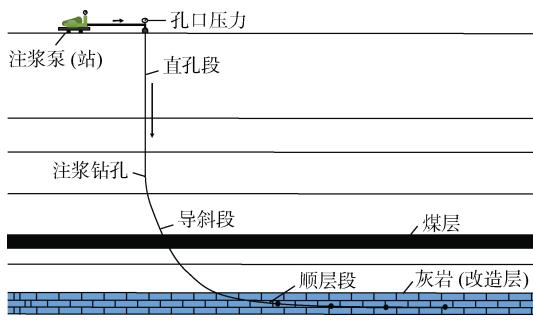


图 2 煤层底板薄层灰岩注浆工程设计

Fig.2 Design of grout injection into thin limestone in coal floor

2.2 治理方案设计

为实现对朱庄煤矿左翼Ⅲ632首采工作面底板薄层灰岩含水层大范围改造, 形成底板“再造”隔水层(带), 彻底隔断与下伏奥灰含水层的水力联系, 采用地面定向顺层精准钻进技术^[6], 对太原组上段三灰(L3)目标含水层进行注浆改造。为最大限度获得裂隙充填率, 并对工作面底板水害治理区域全覆盖, Ⅲ632工作面内、外共设计2个地面钻孔, 采用分级多支水平钻孔沿地层倾向顺层进尺, 分别对工作面不同区域的下伏地层进行注浆, 实现“再造”隔水层对工作面的全覆盖, 如图3所示。其中, D1组钻孔共设计1个主注浆钻孔(D1)和3个水平分支钻孔(D1-1、D1-2、D1-3), 共同对Ⅲ632工作面内部区域下伏含水层进行注浆; D2组钻孔共设计1个主注浆钻孔(D2)和5个水平分支钻孔(D2-1—D2-5), 共同对Ⅲ632工作面外部区域下伏含水层进行注浆, Ⅲ632工作面下伏“再造”隔水层选用水泥和粉煤灰的混合浆液进行灌注。

根据以往淮北矿区煤层底板注浆现场试验数据, 注浆总压力一般为受注含水层最大静水压力的2~3倍。为此, 得出注浆最大允许压力设计公式:

$$p_o = p_p - H \times G_f - f_p, \text{且 } p_o > kp_w \quad (1)$$

式中: p_o 为总注浆压力, MPa; p_p 为注浆泵压力, MPa; H 为受注地层埋深, m; G_f 为地层随深度变化压力梯度; f_p 为浆液在注浆管中流动阻力; p_w 为受注地层静水压力, MPa; k 为静水压力系数, $k \in (2,3)$ 。特别地, 当注浆目的层中存在断层、陷落柱等构造时, k 值宜取小值。

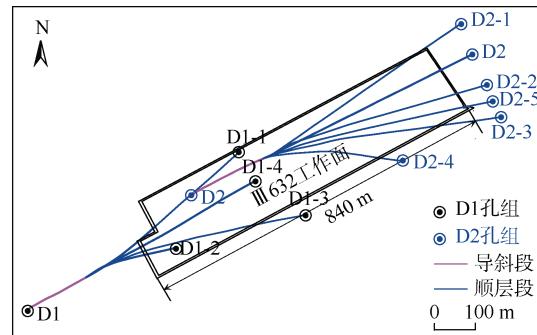


图 3 朱庄煤矿Ⅲ632工作面钻孔位置

Fig.3 Layout of borehole location in working face III 632 in Zhuzhuang Coal Mine

3 区域治理效果分析

3.1 注浆压力动态控制

注浆压力是影响浆液扩散、充填率的主要影响参数, 不同注浆压力对应不同的注浆阶段, 直接反映出注浆(目的)地层中裂隙发育情况和裂隙充填率。随着采深的增大, 水压升高, 高注浆压力可能导致煤层底板隔水层破坏或破坏程度增加。朱庄煤矿左翼Ⅲ632首采工作面底板薄层灰岩注浆钻孔终孔孔压设计10~12 MPa, 在注浆孔口对D1孔组注浆压力进行实时监测。在整体注浆过程中, 注浆孔口“起压”后, 注浆钻孔压力呈现“阶梯式”递增趋势, 先后经历“微压充填—低压扩散—中压加固—高压劈裂”4个阶段, 如图4所示。

1) 微压充填阶段

注浆孔口压力为0, 注浆目的层发育较大原始裂隙, 地层可注性极强, 浆液主要对含水层的天然裂隙进行充填加固。

2) 低压扩散阶段

注浆孔口压力阈值为0~4 MPa, 注浆目的层原始裂隙发育良好或裂隙已经部分充填, 地层可注性较好。随着压力的不断提升, 原始地层裂隙再次扩展, 浆液的扩散距离逐渐增大, 对灰岩含水层进行注浆加固或改造。

3) 中压加固阶段

注浆孔口压力阈值为4~8 MPa, 注浆目的层原始发育裂隙基本充填, 地层可注性一般, 并且随着注浆

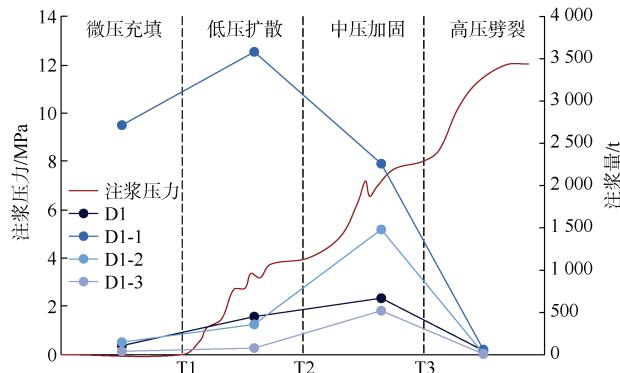


图 4 阶段型注浆压力下注浆量控制曲线

Fig.4 Duration curve of grouting volume control on grouting pressure stages

孔口压力的持续上升,灰岩含水层进一步被加固,改造形成隔水层(带)。

4) 高压劈裂阶段

注浆孔口压力大于 8 MPa, 注浆目的层裂隙完全充填, 灰岩含水层内注浆孔口发生劈裂, 并形成新的充填裂缝。随着压力上升, 充填变得密实, 原始裂隙和劈裂作用形成的新裂隙已经达到较充分的充填。

在煤层底板水害区域超前治理技术实施过程中, 注浆压力是控制浆液扩散距离和地层裂隙充填率的主要影响因素。一般地, 在一定范围内, 高的注浆压力, 浆液扩散距离也相应增大, 进而有助于提高裂隙充填率; 但当注浆压力超过一定范围时, 巨大的注浆压力可能导致地层中产生新的裂隙, 甚至与原生裂隙导通, 形成新的导水通道, 增加底板水害发生的风险。如图 4 所示, 在微压充填和低压扩散阶段, 注浆量占孔组总注浆量的 76.62%, 注浆压力与注浆量和裂隙充填率呈正相关关系; 高压劈裂阶段, 注浆量仅占孔组总注浆量的 0.59%, 高压劈裂作用下的新生裂隙未与原生裂隙导通, 没有新的导水通道产生, 注浆效果良好。

3.2 钻遇构造判识

在顺层段水平定向钻进过程中(图 2), 钻时冲洗液录井和压水试验^[16,19-20]结果可以对钻遇构造的导水性能进行判识, 进而为超前区域治理工程注浆层位(顺层段)构造发育情况进行探查。由于钻井过程中使用不同类型冲洗液, 根据我国现阶段淮北地区区域超前治理工程现场情况统计, 选取冲洗液漏失量 30 m³/h 和压水试验吕荣值 10 Lu 作为构造导水性判识标准, 对注浆治理区域(顺层段)构造发育情况进行初判。

当定向钻进过程中漏失量大于 30 m³/h 且吕荣值大于 10 Lu 时, 说明地层中发育大型岩溶裂隙或

断层, 即存在导水通道, 地层可注性较强; 当漏失量小于等于 30 m³/h 且吕荣值小于等于 10 Lu 时, 说明地层中可能存在小型岩溶裂隙、断层或无明显构造, 即地层可注性较差或注浆量有限; 当漏失量大于 30 m³/h 且吕荣值大于 10 Lu 或漏失量小于等于 30 m³/h 且吕荣值大于 10 Lu, 说明地层发育小型岩溶裂隙或断层, 即存在具有一定导水性的导水通道, 具有一定可注性, 注浆前期注浆量一般较小, 后期单位注浆量可能增加。

朱庄煤矿Ⅲ632 工作面 D1 孔组和 D2 孔组定向钻进过程中, D1-1 孔钻井液漏失量为 60 m³/h, 其余分支孔钻井液漏失量均小于等于 30 m³/h; D2 主孔井液漏失量为 60 m³/h, 其余分支孔钻井液漏失量均小于等于 15 m³/h, D1 和 D2 孔组压水试验吕荣值均小于等于 10 Lu, 由此初步得出, 地层中存在小型岩溶裂隙或断层, 无明显较大导水构造。

3.3 注浆工程参数分析

根据注浆钻孔“阶梯式”压力控制模型, 分别对不同注浆阶段下的注浆材料进行调整, 选用不同比重类型浆液进行现场试验, 见表 1。利用粉煤灰的活性和凝胶作用, 选用 1.03~1.27 摊注比的粉煤灰-水泥混合浆液, 可以提高浆液的后期强度^[21-22]。

在微压充填和低压扩散阶段, 灰岩含水层可注性强, 选用粉煤灰-水泥混合稀浆, 保证浆液在地层裂隙中较好的流动性。随着地层裂隙大部分被充填, 地层可注性一般, 中压加固阶段选用粉煤灰-水泥混合稠浆。高压劈裂阶段, 地层裂隙基本被完全充填, 选用 1.6 比重的水泥稠浆, 进一步对高压新产生的裂隙进行充填, 并对前期注浆区域进行加固。

表 1 不同注浆阶段浆液类型

Table 1 Grout types in different grouting pressure stages

注浆阶段	浆液类型	浆液比重	可注性
微压充填	粉煤灰-水泥混浆	1.3~1.5	极强
低压扩散	粉煤灰-水泥混浆	1.3~1.5	较强
中压加固	粉煤灰-水泥混浆	1.5~1.6	一般
高压劈裂	水泥纯浆	1.6	差

根据定向钻进过程中揭露原始地层岩溶裂隙发育情况的初步判识结果, 进一步结合Ⅲ632 工作面钻孔单位注浆干灰量, 选取单位注浆干灰量 15 t/m 为指标, 将Ⅲ632 工作面底板三灰顺层段划分为高岩溶裂隙发育区域和低岩溶裂隙发育区域。其中, 高岩溶裂隙发育区域单位注浆量大于 15 t/m, 低岩溶裂隙发育区域单位注浆量小于等于 15 t/m。不同注浆钻孔顺层段长度对应的单位注浆量拟合曲线如

图5所示,不同裂隙发育程度下,单位注浆量与注浆干灰总量的线性相关系数为0.963 4(高岩溶裂隙发育)和0.980 6(低岩溶裂隙发育)。其中,单位注浆量为注浆量与顺层段(三开)钻进距离比值。

在无明显构造异常区情况下,根据地层原生裂隙发育不同程度,单位注浆量与注浆干灰总量呈线性关系。地层裂隙发育程度越高,单位注浆量越大,相应地注浆干灰总量越大。低岩溶裂隙发育下,单位注浆量与钻孔注浆干灰总量关系为:

$$y=464.39x-66.231 \quad (2)$$

高岩溶裂隙发育下,单位注浆量与钻孔注浆干灰总量关系为:

$$y=554.74x-4244.1 \quad (3)$$

式中: x 为单位注浆量; y 为钻孔注浆干灰总量。

如图5所示,D1和D2孔组最小和最大单位注浆量分别为1.42 t/m 和 53.68 t/m,浆液对不同程度裂隙发育的地层进行了有效填充,灰岩含水层得到有效改造。在无明显构造异常区情况下,根据式(2)和式(3)可以对淮北矿区不同原生裂隙发育程度的煤层底板灰岩含水层注浆量进行预计。

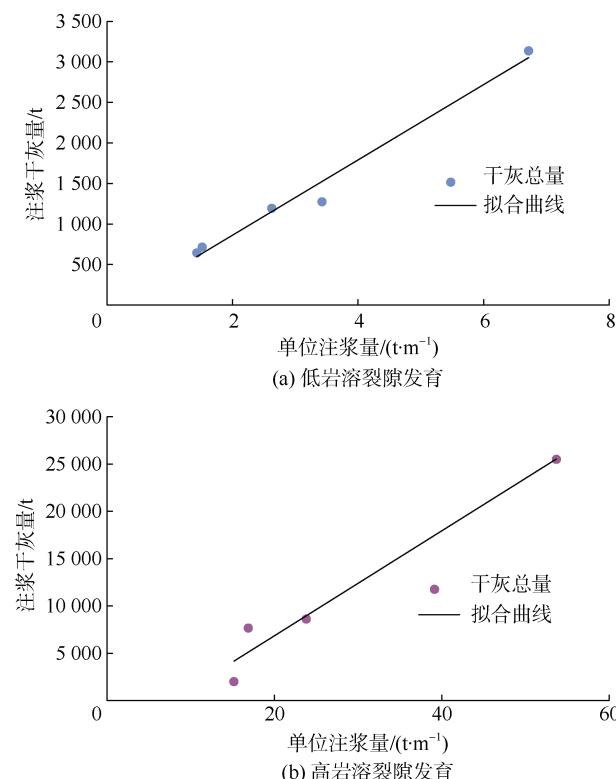


图5 裂隙发育不同程度下注浆量变化关系曲线

Fig.5 Variation of grouting volume at different levels of fracture development

3.4 单元钻孔注浆工程分析

根据D1和D2孔组不同分支孔注浆(量)情况,相同钻孔组内有且仅有1个钻孔注浆量最大,占到

该孔组总注浆量的50%左右。注浆进行到中压加固和高压劈裂阶段时,灰岩含水层中原生裂隙基本填充完毕。根据高压劈裂阶段钻进过程中返回的岩屑类型,原生灰岩地层裂隙中浆液的扩散半径为60~120 m。根据弱透水岩体内注浆扩散距离为50~55 m、中等透水岩体内为90~150 m、强透水岩体内为350 m判断^[17],朱庄煤矿左翼6煤下伏灰岩含水层为弱-中等透水岩体。

注浆钻孔的平均跟层率(即钻进在目的层薄层灰岩的距离/总的顺层段钻进距离)和钻孔单位注浆量直接反映浆液在目的层注浆量的有效作用和地层原生裂隙的发育程度,即地层可注性。 $\text{III}632$ 工作面实测平均单位注浆量为16.42 t/m, D1和D2孔组平均跟层率分别为95.93%和96.72%,三灰跟层率平均为96.48%, $\text{III}632$ 工作面钻孔整体质量较高。

4 技术关键及推广

朱庄煤矿左翼 $\text{III}632$ 首采工作面按照工作面区域内外双孔组钻孔的布设方法,采用地面顺层定向钻进技术对煤层底板薄层灰岩进行高压注浆,在工作面底板下伏灰岩含水层中形成了“再造”隔水层,防止煤层底板突水的同时,阻隔矿井水对地下奥灰水的污染。

$\text{III}632$ 工作面实测涌水量小于10 m³/h,预计回采时煤层底板灰岩涌水量将减少90%,实现了工作面底板薄层灰岩含水层大范围改造和导水通道的封堵,实现了超前区域治理和水源-通道一体化治理,为今后淮北矿区深部高承压强富水煤层开采提供有益参考。

5 结论

a. 提出的工作面区域内、外双(钻)孔组的水平定向钻孔布设方法,实现对工作面底板薄层灰岩全覆盖式改造(治理),提高钻孔利用率,可以对工作面下伏灰岩含水层进行全面改造,形成区域性再造隔水层,降低了施工难度和钻孔工程量,并优化施工工艺。

b. 建立了注浆工程“微压充填—低压扩散—中压加固—高压劈裂”的“阶段型”注浆压力控制模型和注浆压力的分阶段阈值,提出了不同注浆阶段的注浆浆液类型和浆液比重。结果表明,微压充填和低压扩散阶段对注浆总量起主要控制作用,高压劈裂作用产生的新生裂隙有限,注浆主要对灰岩含水层进行加固。

c. 提出了不同淮北矿区煤层底板区域注浆最

大允许压力设计公式，综合分析注浆目的地层构造发育的不同特征，推导的不同岩溶裂隙发育程度地层的薄层灰岩注浆量预计公式，可为煤层底板注浆现场试验设计提供有益指导。

d. 提出以漏失量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 和压水试验呂荣值 10 Lu 作为构造导水性判识准则阈值，分类总结了不同指标值对应的目的段岩层导水性和可注性特征，综合实际冲洗液漏失量和压水试验指标，对注浆治理区域(顺层段)构造发育情况进行初判，可为区域底板注浆工程注浆量进行预计和指导。

e. 在无明显导水构造发育情况下，提出了岩溶裂隙发育程度的多源信息判识方法。综合冲洗液录井、压水试验和单位注浆干灰量的判识准则及其相应指标，可以对地层原生裂隙发育情况进行系统性综合判识，有效控制和指导顺层段注浆工程。

参考文献(References)

- [1] 彭苏萍. 深部煤炭资源赋存规律与开发地质评价研究现状及今后发展趋势[J]. 煤, 2008, 17(2): 1–11.
PENG Suping. Present study and development trend of the deepen coal resource distribution and mining geologic evaluation[J]. Coal, 2008, 17(2): 1–11.
- [2] 张党育. 深部开采矿井水害区域治理关键技术研究及发展[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 8–12.
ZHANG Dangyu. Research and development on key technology of mine water disaster regional control in deep mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 8–12.
- [3] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39–46.
LAN Hang, CHEN Dongke, MAO Debing. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 39–46.
- [4] 张党育, 蒋勤明, 高春芳, 等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 31–36.
ZHANG Dangyu, JIANG Qinming, GAO Chunfang, et al. Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water damage control in the floor of North China Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 31–36.
- [5] 赵庆彪. 高承压水上煤层安全开采指导原则及技术对策[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 82–86.
ZHAO Qingbiao. Technical countermeasures and guidance principles of seam safety mining above high pressurized water aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 82–86.
- [6] 李晓龙, 张红强, 郝世俊, 等. 煤层底板奥灰水害防治定向钻孔施工关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 64–70.
LI Xiaolong, ZHANG Hongqiang, HAO Shijun, et al. Key techniques for directional drilling & construction for control of coal floor Ordovician limestone karst water disaster[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5): 64–70.
- [7] 王道坤, 崔亚利, 易德礼. 地面定向钻探技术在煤层底板高承压含水层改造中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(增刊1): 32–36.
WANG Daokun, CUI Yali, YI Deli. Application of surface directional drilling technology in reforming the confined aquifer with high pressure in coal seam floor[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(Sup.1): 32–36.
- [8] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1112–1117.
ZHAO Qingbiao. Ordovician limestone karst water disaster regional advanced governance technology study and application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1112–1117.
- [9] 蒋向明, 任虎俊, 陈亚洲. 区域超前探查治理技术在邯邢矿区深部采煤底板水害防治中的应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(3): 66–71.
JIANG Xiangming, REN Junhu, CHEN Yazhou. Application of advance exploration and control technology in deep mining of Hanxing Mining Area[J]. Coal Engineering, 2020, 52(3): 66–71.
- [10] 尹尚先, 王屹, 尹慧超, 等. 深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1855–1864.
YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, et al. Mechanism and full-time-space prevention and control technology of water inrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1855–1864.
- [11] 赵庆彪. 带压开采防治水技术保障体系建设[J]. 中国煤炭, 2010, 36(1): 98–100.
ZHAO Qingbiao. Construction of technical guarantee system for water prevention and control in coal mining under safe water pressure of aquifer[J]. China Coal, 2010, 36(1): 98–100.
- [12] 董书宁, 郭小铭, 刘其声, 等. 华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 1–10.
DONG Shuning, GUO Xiaoming, LIU Qisheng, et al. Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 1–10.
- [13] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142–146.
ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huabei coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 142–146.
- [14] 安许良. 大水垂比地面定向水平孔煤层底板注浆防治水技术[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(11): 126–132.
AN Xuliang. Water prevention and control technology for coal seam floor grouting with high horizontal-vertical ratio ground oriented horizontal hole[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11): 126–132.
- [15] 郑士田. 地面定向钻进技术在煤矿陷落柱突水防治中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 229–233.
ZHENG Shitian. Application of ground directional borehole

- technology to control prevention karst collapsed column water inrush in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 229–233.
- [16] 南生辉. 邯邢矿区奥陶系灰岩上部注浆改造技术[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(3): 37–40.
NAN Shenghui. Technical feasibility of grouting reform for upper part of Ordovician limestone in Xingtai and Handan coal mining areas[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(3): 37–40.
- [17] 郑士田. 地面顺层孔探注成套技术在底板高压岩溶水害治理中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(8): 53–57.
ZHENG Shitian. Application of complete set of surface bedding borehole exploration and grouting technology on floor high pressure karst water hazard governance[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(8): 53–57.
- [18] 赵庆彪, 高春芳, 王铁记. 区域超前治理防治水技术[J]. 煤矿开采, 2015, 20(2): 90–94.
ZHAO Qingbiao, GAO Chunfang, WANG Tieji. Technology of regional advanced water prevention and control[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(2): 90–94.
- [19] 国家能源局. 水电工程钻孔压水试验规程: NB/T 35113—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- National Energy Administration. Regulations for borehole pressure water test of hydropower engineering : NB/T 35113—2018[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2018.
- [20] 李涛, 高颖, 艾德春, 等. 基于承压水单孔放水实验的底板水害精准注浆防治[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2494–2501.
LI Tao, GAO Ying, AI Dechun, et al. Floor precise grouting of prevention and control of water based on confined water single-hole drainage experiment[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2494–2501.
- [21] 张永成. 注浆技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012: 92–96.
ZHANG Yongcheng. Cementation technology[M]. Beijing : China Coal Industry Publishing House, 2012: 92–96.
- [22] 丁庆军, 管学茂, 胡曙光. 混合材对超细灌浆水泥流变性能的影响[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(2): 23–26.
DING Qingjun, GUAN Xuemao, HU Shuguang. Effect of admixtures on rheological properties of microfine grouting cement[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(2): 23–26.

(责任编辑 周建军)