

注浆改造顶-底板灰岩含水层技术 应用实践研究

Practical Research on Application of Roof-floor Limestone Aquifer Slurry Modification Technology

贺敬平, 周景凯, 刘培跃(山东能源临沂矿业集团有限责任公司邱集煤矿, 山东 德州 251105)

摘要:华北地区石炭-二叠系煤层山东黄河北煤田受顶-底板灰岩含水层水害威胁,下组煤开采风险极大。针对此类地质条件,经分析、总结、探索,提出了一种双层多分支顺层钻孔注浆改造顶-底板灰岩含水层方法,实现了对顶-底板灰岩含水层的治理。该方法创新采用了顶底板钻孔共用一开段,根据岩层赋存情况,确定了不同治理目标,并采取了针对性的治理方法。利用 COMSOL Multiphysics 对目标岩层治理参数进行了数值模拟,并结合国内类似条件治理经验,确定了合理的注浆参数和钻孔间距。该方法应用后,实现了下组煤的安全开采,为黄河北煤田受水威胁的 10 多亿吨煤炭资源的开发,以及受顶底板水威胁的类似矿井及非煤矿山,提供了可靠的技术方法和科学的指导,并具有巨大推广应用前景。

关键词:灰岩含水层; 承压水; 注浆; 双层多分支顺层钻孔

中图分类号: TD743

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)01-0067-10

Abstract: In the Carboniferous-Permian coal seam in North China, the Huanghebei coalfield in Shandong is threatened by the water hazard from the roof-floor limestone aquifer, and the mining risk of the lower coal group is extremely high. In respect of such geological conditions, and as a result of analysis, summarization and exploration, a method of double-layer multi-branch drilling grouting to transform roof-floor limestone aquifers is proposed in this article, which enables the management of roof-floor limestone aquifers. This method innovatively adopts an open section common to roof and floor drill-holes, and is used to set different management targets according to the occurrence of rock formations, in addition to specific management methods. COMSOL Multiphysics is used for numerical simulation of the control parameters of the target rock formations, and reasonable grouting parameters and drilling spacing are determined in conjunction with control experience under similar conditions in China. After the application of this method, the safe mining of the lower coal group has been realized, and it has provided a reliable technological method and scientific guidance for the development of the more than 1 billion tons of coal resources threatened by water hazard in Huanghebei coalfield, as well as other similar mines and non-coal mines threatened by roof and floor water hazard. Meanwhile, this method has great application prospects.

Key words: limestone aquifer; confined water; grouting; double-layer multi-branch drilling

1 前言

据统计,2001—2015年,我国共发生煤矿水害事故1162起,占煤矿事故的3.3%。近年,浅部煤炭资源逐渐枯竭,国内许多矿井转入深部或下组煤的开采。深部开采面临着水文地质更复杂^[1-7]。

华北地区石炭-二叠系煤层在世界晚古生代煤田中矿井水文地质条件最为复杂,均受岩溶水威胁,

防治水难度大^[8]。华北型煤田部分矿区赋存薄层灰岩含水层,奥灰与徐灰的间距小或存在变薄带、构造破碎带、导水裂隙带,致使二者之间水力联系密切,并且部分井田内孤立水流和优势流同时并存^[9-11]。多因素综合影响造成了华北型煤田水害防治和安全开采成为世界性的难题。

国内底板灰岩承压水治理方法主要有井下斜孔探查和治理,井下定向钻进技术超前探测和注浆,但此法不足在于井下空间受限,施工工程量大,安全系数相对低。地面水平钻治理底板薄层灰岩技术^[12-15],是目前工作面底板注浆改造中的新技术,该技术解决了受底板薄层灰岩水威胁的矿层开采,但对于受顶、底板双重灰岩含水层水害威胁的矿层,并未给出最佳方案。

[作者简介] 贺敬平(1974-),男,汉,山东陵县人,高级工程师,从事采矿及管理工作。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目:52178338;山东省重点基金项目:ZR2020KE006

[引用格式] 贺敬平,周景凯,刘培跃. 注浆改造顶-底板灰岩含水层技术应用实践研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(1):67-76.

华北型煤田山东黄河北煤田的11煤,顶板受四五灰水威胁,底板受徐灰、奥灰承压水威胁,且顶底板含水层水力联系密切,是典型的受顶、底板双重灰岩含水层水害威胁的煤层。由于顶板水与奥灰有水力联系,难以疏干,疏排水费用高、浪费地下水资源且经济上不合理,造成资源呆滞。鉴于此,在分析治理方法的基础上,提出了双层多分支顺层钻孔注浆方法,实现了对顶底板灰岩含水层的治理。

2 双层多分支顺层钻孔注浆方法

2.1 方法

该方法是一种双层多分支顺层钻孔对顶底板灰岩含水层进行注浆改造的技术,通过对目标含水层探查和治理,实现煤层的安全开采。该方法利用同一个钻孔,采用地面定向钻探技术^[16-17]对顶底板灰岩含水层进行探查,采用高压注浆方式将顶板改成弱含水或不含水岩层、底板改造成隔水层。该方法可分为钻探和注浆两个方面,也可分为顶板治理和底板治理部分,工艺流程如图1所示。

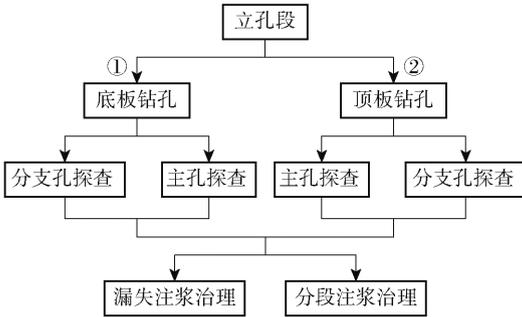


图1 施工工艺流程图

2.2 双层多分支顺层钻孔

双层多分支顺层钻孔设计,包括层位选择、钻孔结构、施工工艺等部分。

2.2.1 钻探设计

综合考虑治理层位、煤层展布规律、地质构造、钻探施工效能等因素,本着钻孔布置合理的原则,依据规范设计定向水平钻孔,平面示意图如图2所示。扇形钻孔呈“线网状”揭露岩层含水溶隙、裂隙等导水通道。钻孔顺被加固岩层钻进,沿钻孔轨迹分段揭露灰岩裂隙。

2.2.2 钻孔结构

(1)开直孔段,0~300 m,孔径 $\phi 311$ mm,下入 $\phi 244.5$ mm \times 8.94 mm孔口管,至基岩层段,隔离第四系、新近系表土地层。

(2)开定向导斜段,进入设计岩层,300~550

m,孔径 $\phi 216$ mm,下入 $\phi 177.8$ mm \times 8.05 mm套管。

(3)开定向顺层段,顺层钻进200~800 m。各分支钻孔均在目的层位内定向钻进,孔径 $\phi 152$ mm。钻孔结构如图3所示。

2.2.3 施工工艺

1) 钻孔立孔段

钻孔造斜:当钻孔到达第四系地层中时施工造斜段,当造斜段进入基岩10~15 m后下一级套管,并固管。

2) 施工底板钻孔

(1)施工底板主孔:施工出造斜段后,通过无磁钻具施工底板主孔,施工至坚硬岩层下二级套管。

先施工底板主孔进入底板灰岩,进入底板灰岩含水层后,沿含水层顺层向前施工若干米,对钻孔内的漏失段采用高压注入注浆材料的方式进行改造,直至设计孔深,使底板形成隔水层。

(2)施工底板分支孔:在底板主孔孔道的设计位置,调整方位施工新的底板分支孔,对钻孔内的漏失段采用高压注入注浆材料的方式进行改造,直至设计孔深,将底板含水层中的水挤出。

3) 施工顶板钻孔

(1)施工顶板主孔:底板分支孔施工完成后,在造斜段通过无磁钻杆调节方位在设计位置进行顶板主孔的施工,施工进入顶板灰岩含水层后,沿顶板灰岩含水层顺层继续向前施工若干米,沿顶板灰岩含水层顺层向前施工过程中,对钻孔内的漏失段采用高压注入注浆材料的方式进行改造直至设计孔深,使顶板形成隔水层或弱含水层。

(2)施工顶板分支孔:顶板主孔施工完成后,在顶板主孔的孔道设计位置通过调节无磁钻杆的弯度调整方位侧出新的顶板分支孔。

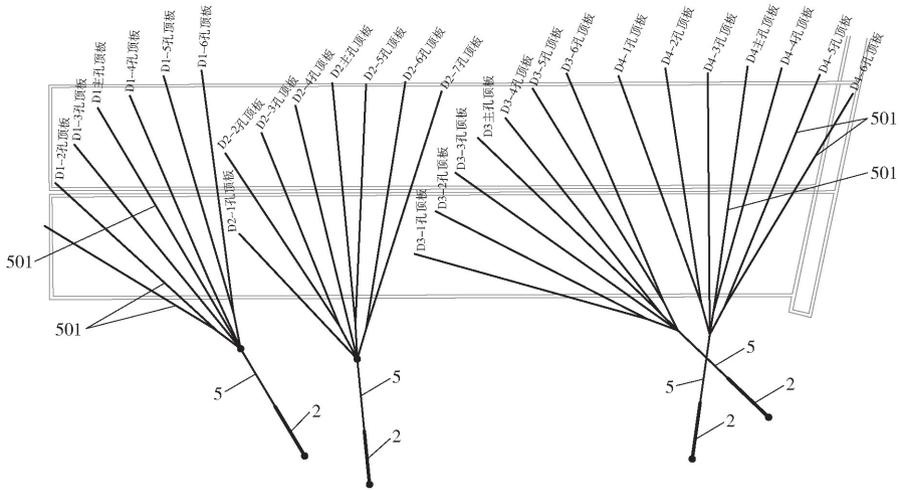
2.3 双层多分支顺层钻孔注浆

在浆液流动过程中,浆液压力会导致岩体产生变形,而岩体的变形又会影响到浆液扩散距离以及最终的注浆封堵效果。采用COMSOL Multiphysics进行数值模拟,研究煤层底板灰岩顺层注浆参数及浆液有效扩散半径。

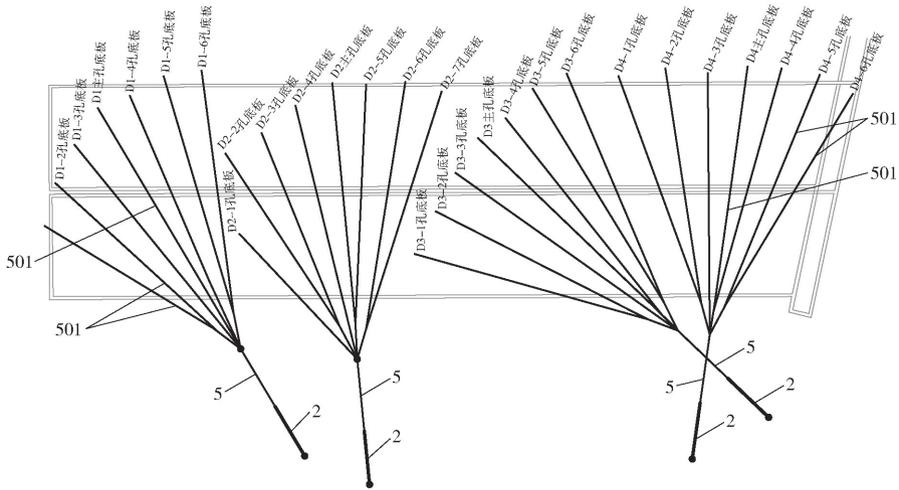
2.3.1 采用COMSOL Multiphysics进行注浆终压与浆液扩展范围的模拟

1) 数值计算模型

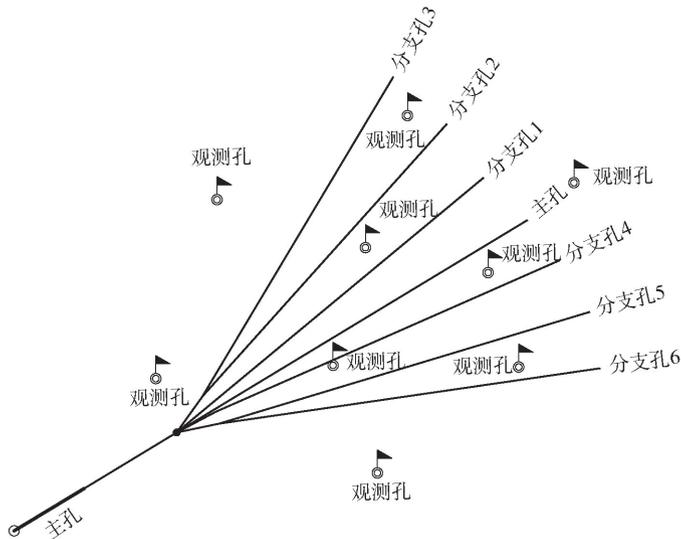
根据地质、水文地质条件,建立数值概化模型,模拟不同注浆压力下浆液扩散范围,设计垂向剖面上的数值计算模型,具体如图4所示。



(a) 顶板钻孔平面示意图



(b) 底板钻孔平面示意图



(c) 钻孔平面示意放大图

图2 定向水平钻孔平面布置示意

根据地质、水文地质条件,建立数值概化模型, 模拟不同注浆压力下浆液扩散范围,模型尺寸 300

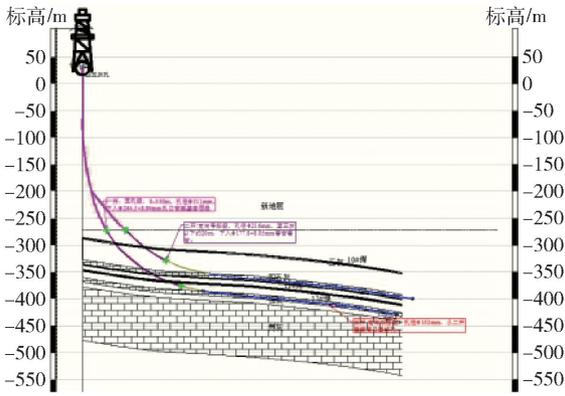


图3 钻孔设计剖面示意图

m × 150 m, 注浆孔 $\phi 152$ mm。参考区域地应力实测结果和模拟埋深, 模型上边界 10 MPa 荷载, 左边界 9 MPa 荷载, 模型上下为隔水边界, 注浆孔定义为恒水压边界并考虑岩体自重。根据目标含水层水文地质特征, 模拟 4 MPa、8 MPa、10 MPa 和 12 MPa 下裂隙浆液的扩散过程, 结果如图 5 所示, 相关参数见表 1。

2) 计算结果及分析

对于二维数值模型, 不同注浆压力下, 浆液的扩散规律, 黑线为浆液 2 mm/s 流速等值线图, 取 2 mm/s 流速等值线与注浆孔的距离为浆液扩散半径。

表1 相关材料参数

属性	数值	单位
浆液密度	1 400	kg/m ³
浆液黏度	0.008	Pa·s
岩体孔隙率	0.4	
岩体密度	2 000	kg/m ³
岩体渗透率	3×10^{-11}	m ²

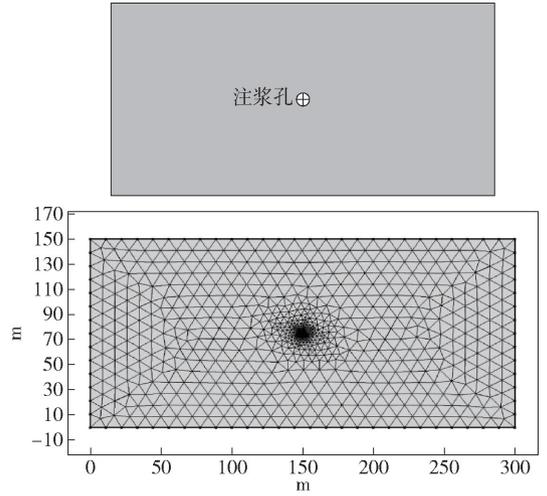


图4 注浆模型及网格划分示意图

模拟结果表明, 当注浆压力为 4 MPa 时, 主要充填含水层的天然裂隙, 注浆段局部向灰岩顶板扩散,

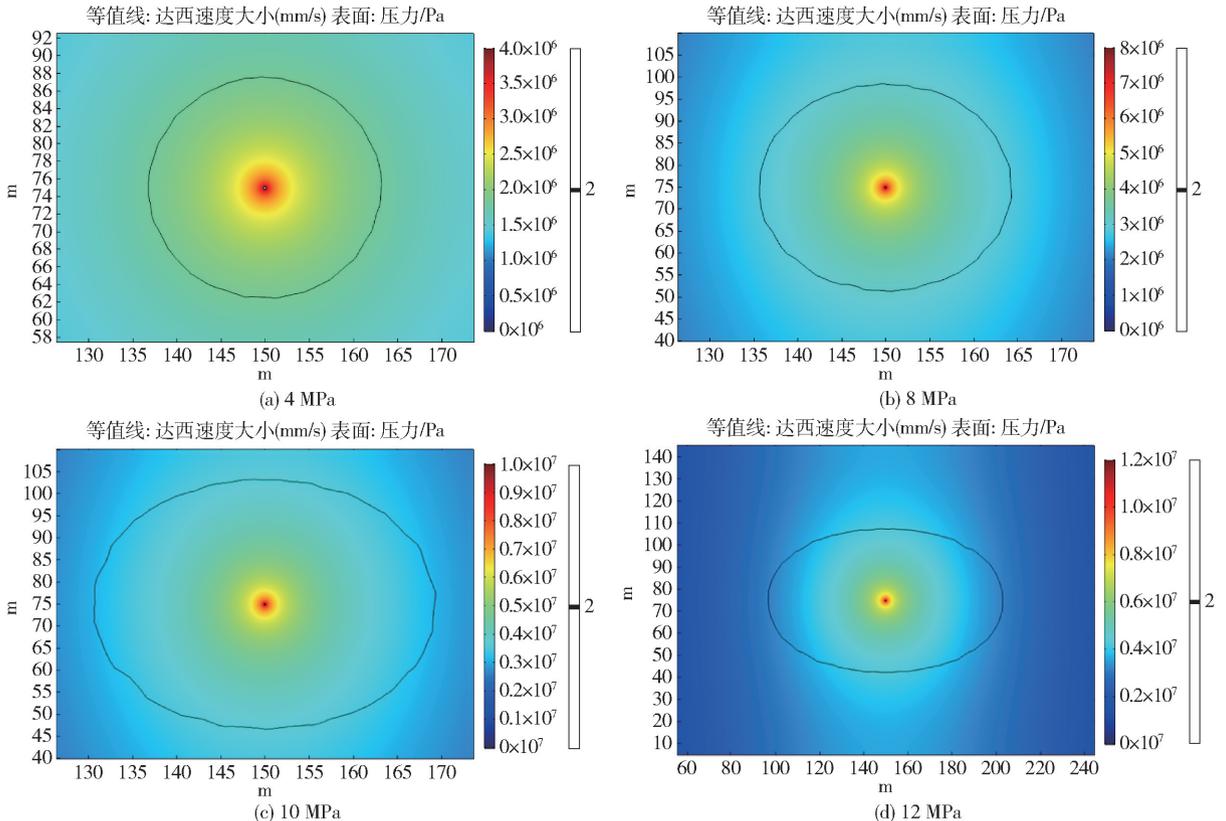


图5 不同注浆压力下浆液扩散范围

浆液扩散半径约 13 m。

当注浆压力升至 8 MPa 时,浆液扩散范围逐渐增大,软弱结构面开始扩张,浆液扩散半径约 35 m。

当注浆压力升至 10 MPa 时,含水层被进一步加固,浆液扩散半径约 40 m。

当注浆压力升至 12 MPa 时,原生已被封堵,含水层被较好地加固,浆液扩散半径约 60 m。

研究表明,注浆压力为静水压力的 2.0 ~ 2.5 倍时,原生裂隙及压裂形成的裂缝被浆液填充密实,扩散半径为 40 ~ 60 m。随注浆压力的增加,裂隙充填得密实程度增加,但浆液扩散半径增长幅度较小。因此,最终注浆压力设为静水压力的 2.0 ~ 2.5 倍。分支孔间距应小于 2 倍扩散半径,综合考虑钻孔高效利用和经济合理性,孔间距设计为 60 ~ 80 m。

2.3.2 注浆终压注浆量标准

当试验段位于地下水位以下,透水率在 10Lu 以下,渗透系数为

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{1}{r}$$

式中:K——地层渗透系数,m/d;

Q——压水流量,m³/d;

H——试验压力,以水头表示,m;

L——试验段长度,m;

r——钻孔半径,m。

3 工程案例

3.1 矿井水文地质特征

邱集煤矿位于德州市齐河县,是黄河北煤田第一对试验型矿井。矿井采用立井开拓,中央并列式通风,可采煤层为 7、10、11、13 煤层。下组煤(11、13 煤层)总储量近 2 亿 t,占矿井资源量的 87%。

井田内的含水层自上而下主要是太原组一灰、二灰、三灰、四五灰、徐灰和奥陶系灰岩。其中一灰、二灰、三灰已基本疏干,对 11、13 煤层的开采没有影响。四五灰为 11 煤直接充水含水层,徐灰为间接充水含水层,奥灰是四五灰、徐灰的直接充水含水层。经多次放水试验查明四五灰、徐灰与徐奥灰之间存在广区域、多点式的垂向补给通道,水力联系密切,因此 11、13 煤层同时受顶板四五灰、底板徐灰和奥灰含水层的威胁,水文地质条件为复杂型,具体柱状如图 6 所示。

3.2 11、13 煤开采水害危险性分析

(1)四五灰含水层。四五灰为 11 煤层的直接

层厚/m	柱状	岩性	岩性描述
7.91		泥岩	黑灰色,较细腻,夹有线形细砂岩薄层,含少量的植物化石,有的叶片已炭化
5.13		四灰	褐红色,致密块状,含较多的珊瑚化石,裂隙发育被方解石细脉填充
5.14		泥岩	黑灰色,顶部夹有线形细砂岩薄层
2.01		五灰	黑灰色,致密,裂隙被方解石细脉填充
1.80-2.18 1.99		11煤	黑色,粉末状,属半暗型煤
6.86		泥岩	黑灰色,较细腻,含的植物叶片化石,有的叶片已炭化
3.09-4.12 3.61		13煤	黑色,夹0.5 m夹矸,属半暗型煤
24.9		泥岩	黑灰色,较细腻,断口平整,裂隙较发育被钙质薄膜填充,含较多的黄铁矿晶体,局部岩芯稍破碎
6.53-13.69 10.0		徐灰	灰褐色,致密块状,质纯,裂隙发育被方解石细脉填充,具较多的缝合线构造
4.40-18.00 8.19		黏土岩	浅灰色,团块状,底部0.2 m为砾石
>700		奥灰	褐色,致密块状,性脆,上部夹薄层灰绿色黏土岩,裂隙发育被方解石细脉填充,有的裂隙被粘土质的黄铁矿填充,岩芯较完整

图 6 矿井主要煤层柱状图

顶板,岩溶裂隙发育,钻孔最大涌水量为 300 m³/h;四五灰间夹薄层泥岩,厚度约 1.42 m,故可视四五灰为一个含水层。根据瞬变电磁探查结果(图 7),可知顶板富水性呈现局部聚集,区域连通的特点。四五灰含水层对 11、13 煤层的开采威胁较大,采前必须对四五灰含水层进行治理。

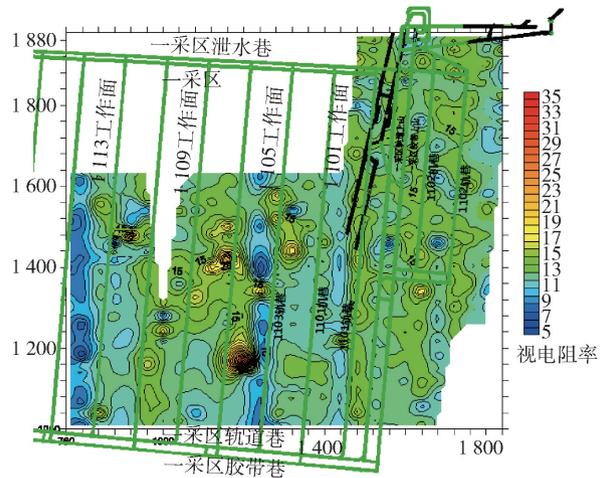


图 7 四五灰富水状态分布

(2)徐灰含水层。上距 11 煤层 30.62 ~ 39.14 m,平均 35.40 m,与奥灰相距 5.67 ~ 17.99 m,平均 11.74 m,是开采 11、13 煤层的间接充水含水层,岩溶

裂隙发育,钻孔最大涌水量 200 m³/h。-447 m 水平首采区徐灰突水系数为 0.11~0.15,对 11、13 煤层开采有较大影响。由图 8 可知,徐灰富水性强,部分富水区与顶板四五灰重合,可能水力联系密切。

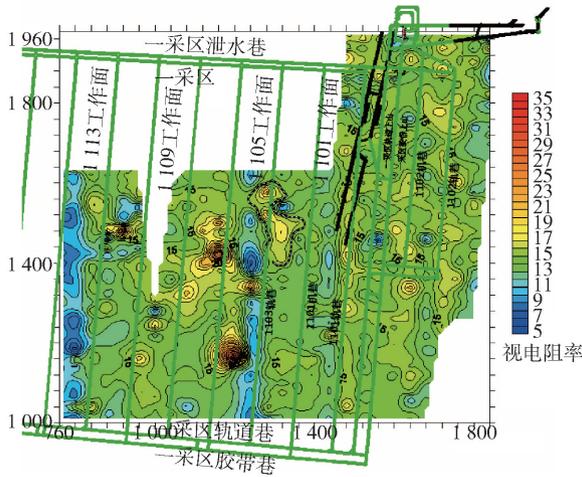


图 8 徐灰富水状态分布

(3)奥灰含水层。具有多段多层的岩溶含水层,且各段各层的富水性并不一致^[18], -447 m 水平奥灰突水系数为 0.06~0.12,部分区域对煤层开采影响较大。探查结果可知(图 9),奥灰含水层水量比较丰富。

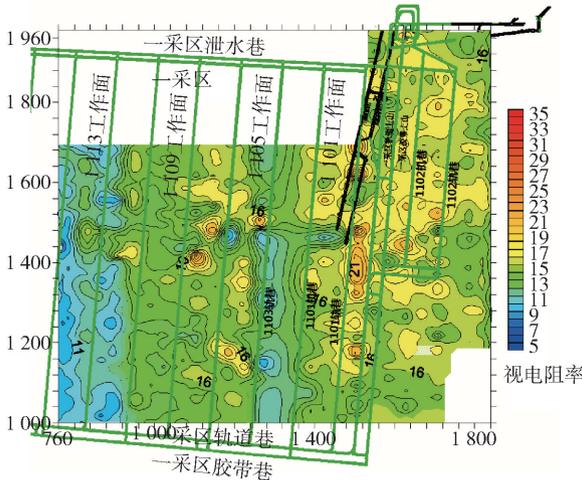


图 9 奥灰富水状态分布(顶板下 10 m)

表 2 主要含水层水文地质参数

岩层	平均厚度/ m	单位涌水量/ L·s ⁻¹ ·m ⁻¹	富水性	充水层 情况
四五灰	9.81	0.194~0.89	中等-强	直接
徐灰	10	0.012~1.18	中等-强	间接
奥灰	>700	0.006~4.14	弱至强	间接

见表 2,可知 11、13 煤层是一种典型的同时受顶板四五灰、底板徐灰和奥灰含水层威胁的下组煤。

3.3 顶-底板灰岩含水层方法

1) 钻探工程

结合矿井水文地质特征和岩层赋存条件,注浆改造的目标层位为顶板四五灰、底板徐灰。顶板四五灰改造成弱含水或不含水岩层,底板徐灰改造成隔水层。

钻孔单元由一个主孔和 2~6 个呈“扇形”交错排列的近水平顺层分支孔组成。每个钻孔需要在孔深约 340~550 m 处进入底板徐灰或者顶板四五灰地层,顺目标层位在灰岩内近水平钻进 200~800 m。顶底板钻孔设计平面如图 10 所示。

钻探施工采用定向水平钻孔技术,主要技术包括无线随钻定向钻进技术、柔性钻杆水平孔钻进技术、特殊泥浆冲洗液循环技术等^[19],设备构成如图 11 所示。

2) 注浆过程

注浆采用分段下行式注浆法。目标地层是徐灰和四五灰岩层,钻探中若有涌水情况,需进行注浆;水平段以漏失量、分段注浆为标准,并根据注浆情况采用连续与间歇相结合。

注浆压力直接影响到浆液的扩散距离与有效的充填范围。综合实践经验和理论计算两项成果,确定治理目的层主要参数^[20-21],治理参数见表 3。

表 3 目的含水层治理参数

岩层	孔间距/ m	终压/ MPa	注浆量/ L·min ⁻¹	静水压力/ MPa
四五灰	0~70	>9	90	3.2~4.5
徐灰	0~60	>10	90	3.5~4.9

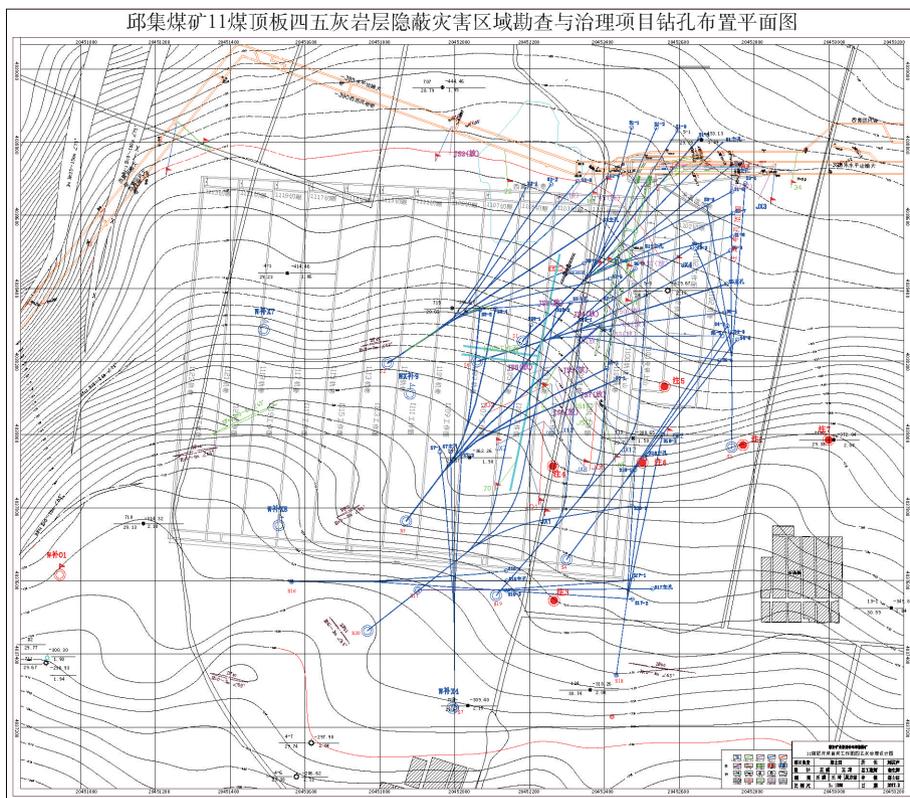
3.4 治理效果

截至 2019 年,11 煤层首采区首个治理区域治理区域内共施工了 19 个主孔和 95 个分支孔,累计进尺 6.41 万 m,累计注浆量 35.3 万 t,钻孔施工如图 12 所示。

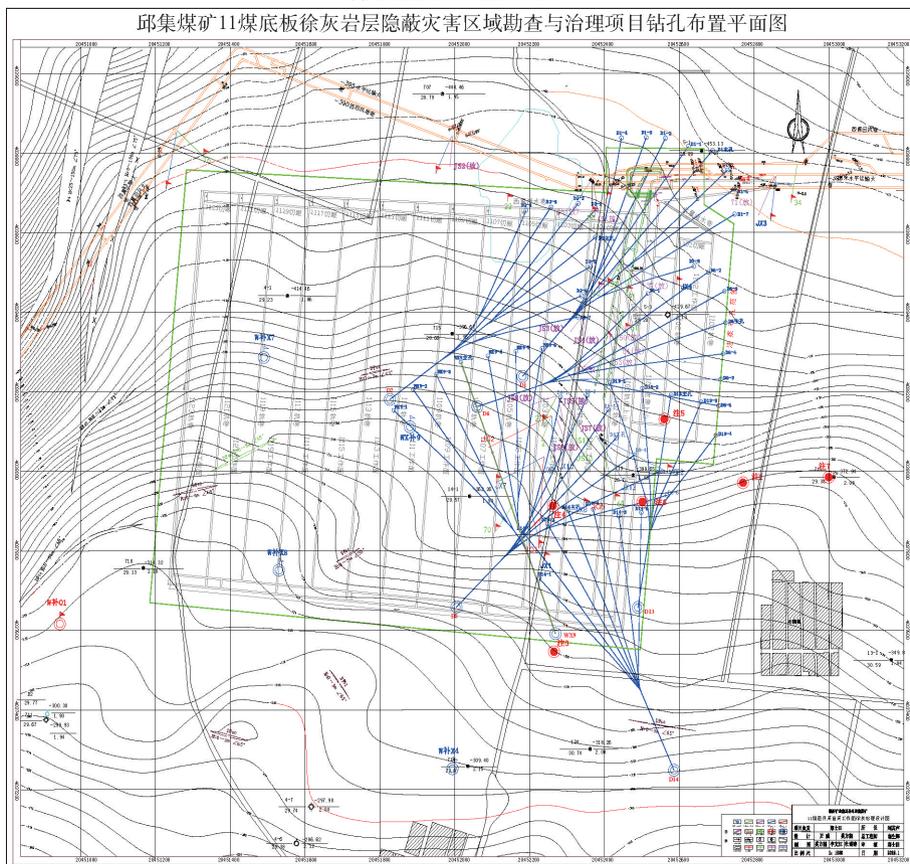
音频电透视和瞬变电磁探查发现,顶底板灰岩含水层的富水异常区基本消失;治理后顶板四五灰渗透系数降为 0.010 4 m/d,底板徐灰平均渗透系数为 0.010 38 m/d。

注浆后四五灰含水裂隙和水泥的结石体,裂隙最大宽度达 5 cm,最大注浆体厚度 >20 cm;地面钻探验证钻孔徐灰结石体,具体如图 13 所示。

通过上述分析,结合主要含水层水文地质参数,



(a) 顶板徐灰钻孔设计图



(b) 底板徐灰钻孔设计图

图 10 顶底板钻孔设计平面图

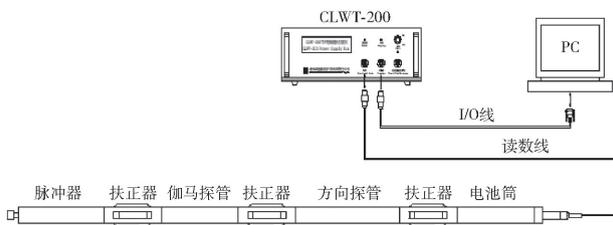
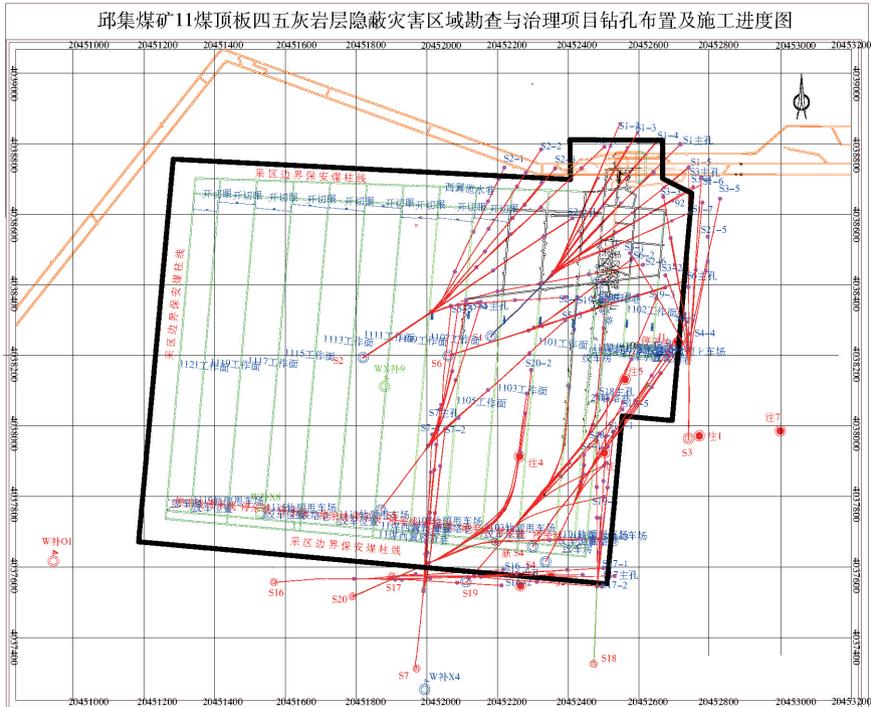
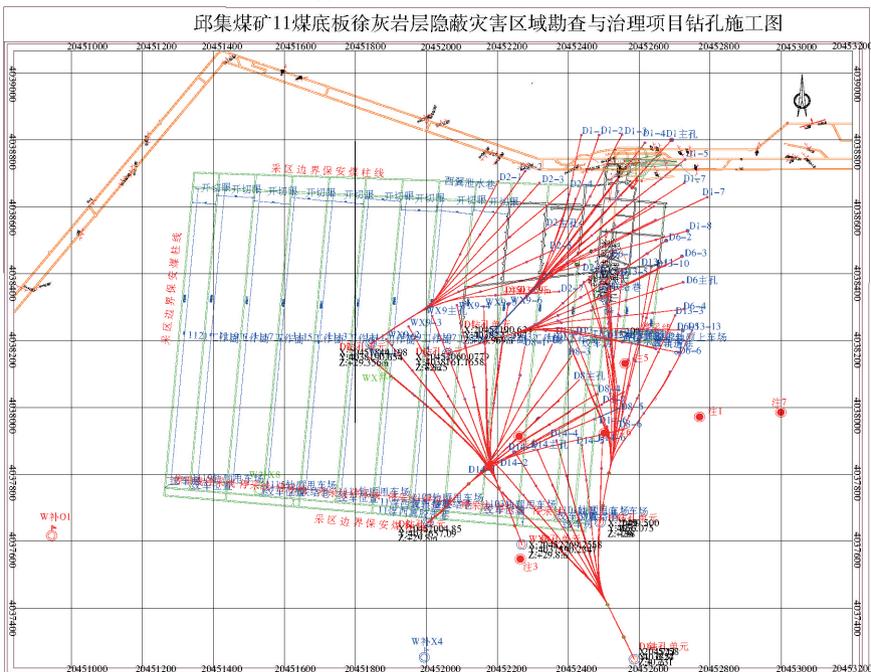


图 11 定向钻探无线仪器设备构成

2018年,试采工作面顶底板水害治理效果及防治水安全性评价通过评审,后试采工作面进行安全开采。当前,首采工作面已经推采450m,累计产出11煤近50万t,经济收入近3亿元,经济效益明显,破解受顶底板双重灰岩威胁的下组煤开采世界性难题,为我国黄河北煤田类似矿井水害的治理提供了科学的指导。



(a) 顶板徐灰钻孔施工图



(b) 底板徐灰钻孔施工图

图 12 顶底板钻孔施工图

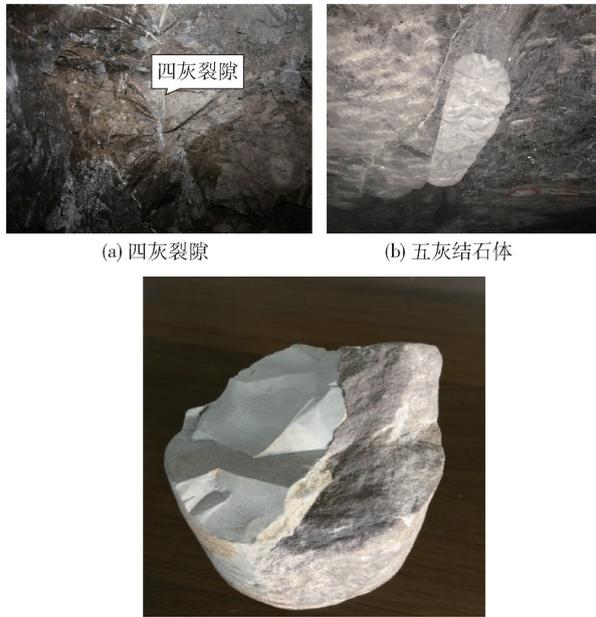


图13 地面验证立孔徐灰岩芯水泥结石体

4 结论

本文以山东黄河北煤田邱集煤矿受顶-底板灰岩含水层水害威胁的煤层为工程背景,利用双层多分支顺层钻孔注浆改造顶-底板灰岩含水层方法为基础,确定施工方案和关键参数,现场应用效果良好,主要结论如下:

(1)针对黄河北煤田受顶-底板灰岩含水层水害威胁下组煤水文地质条件,经过分析总结、探索,提出了一种双层多分支顺层钻孔注浆改造顶-底板灰岩含水层方法,实现了顶-底板灰岩含水层的治理,破解受顶底板双重灰岩威胁的下组煤开采世界性难题。

(2)方法将底板改造成隔水层,顶板改造成弱含水或不含水层,封堵了底板水源补给通道并形成一定厚度的有效隔水层,从而防止采中、采后突水,保护地下水系统和水循环,实现受顶底板双重灰岩水害威胁的矿层的安全保水开采。

(3)该方法创新采用了共用一个孔位和一造斜段施工双层多分支顺层钻孔对顶、底板双层灰岩层进行改造,降低工程成本,减少地面的占地面积和搬家的次数。

(4)结合治理岩层的特征,采用 COMSOL Multiphysics 进行数值模拟,研究目标灰岩扩散半径达 40~60 m,注浆终压设为含水层静水压力的 2.0~2.5 倍,分支孔间距 60~80 m。

(5)该方法被应用到受顶-底板灰岩含水层水

害威胁的邱集煤矿下组煤治理,取得了良好效果。为黄河北煤田受水威胁的 10 多亿 t 煤炭资源的开发,以及受顶底板水威胁的类似矿井及非煤矿山,具有巨大的经济效益和推广应用前景。

[参考文献]

- [1] 马凯,尹立明,陈军涛,等.深部开采底板隔水关键层受局部高承压水作用破坏理论分析[J].岩土力学,2018,39(9):1-10.
- [2] 郭惟嘉,张士川,孙文斌,等.深部开采底板突水灾变模式及试验应用[J].煤炭学报,2018,43(1):219-227.
- [3] 尹立明,郭惟嘉,路畅.深井底板突水模式及其突变特征分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3):459-463.
- [4] 白继文,李术才,刘人太,等.深部岩体断层滞后突水多场信息监测预警研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2327-2335.
- [5] ZHANG Shichuan, GUO Weijia, LI Yangyang, et al. Experimental simulation of fault water inrush channel evolution in a coal mine floor[J]. Mine Water and the Environment, 2017, 36(3):1-9.
- [6] ZHANG Shichuan, LI Yangyang, XU Cuicui. Application of black box model for height prediction of the fractured zone in coal mining[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(6):997-1010.
- [7] 白海波,缪协兴.晚古生代煤田水文地质特征与防治水理论与技术[J].中国矿业大学学报,2016,45(1):1-10.
- [8] 王晋丽,陈喜,张志才,等.基于离散裂隙网络模型的裂隙水渗流计算[J].中国岩溶,2016,35(4):363-371.
- [9] 陈星明,曹树凯.石炭-二叠系煤层底板高承压岩溶水防治技术[J].煤炭科学技术,2018,46(3):182-187.
- [10] 袁道先,朱德浩,翁金桃.中国岩溶学[M].北京:地质出版社,1994.
- [11] 李泉新,石智军,许超,等.2311 m 顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术[J].煤炭科学技术,2016,46(4):27-32.
- [12] 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.
- [13] 张济怀,何继刚,代琪.薄层灰岩地面水平分支孔超前探查治理地质构造技术[J].煤炭与化工,2016,39(12):39-43.
- [14] Yao Ningping, Zhang Jie, Jin Xing, et al. Status and Development of Directional Drilling Technology in Coal Mine[J]. Procedia Engineering, 2014, 73:289-298.

- [15] 李金岭,钱瑞平,田小军,等. 定向井技术在复杂断块油藏调整挖潜中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2012,33(15):204.
- [16] 汪健生. 山东旦镇井田岩溶水勘探方法探讨[J]. 中国煤炭地质,1990,2(3):46-49.
- [17] 吴志敏,王永龙. III 631 工作面出水原因分析及综合防治[J]. 山东煤炭科技,2014(9):153-154,157.
- [18] 赵庆彪,毕超,虎维岳,等. 裂隙含水层水平孔注浆“三时段”浆液扩散机理研究及应用[J]. 煤炭学报,2016,41(5):1212-1218.
- [19] 张森,邹金锋,陈嘉祺,等. 非对称荷载作用下土体劈裂注浆压力分析[J]. 岩土力学,2013,34(8):2255-2262.
- [20] 王强,冯志强,王理想,等. 裂隙岩体注浆扩散范围及注浆量数值模拟[J]. 煤炭学报,2016,41(10):2588-2595.
- [21] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京:煤炭工业出版社,2018.

(上接第44页)

- [6] 冷振东,范勇,卢文波,等. 孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输与破岩效果分析[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(12):2451-2462.
- [7] 冷振东,卢文波,范勇,等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响[J]. 爆炸与冲击,2017,37(4):661-670.
- [8] 吴丹,王志修,于世波. 甲玛多金属矿露井联采条件下露天边坡稳定性评价[J]. 有色金属(矿山部分),2020,72(4):7-12.
- [9] 李长洪,肖永刚,王宇,等. 高海拔寒区岩质边坡变形破坏机制研究现状及趋势[J]. 工程科学学报,2019,41(11):1374-1386.
- [10] 司剑峰,钟冬望,黄小武. 钻孔爆破孔间最佳延时时间模型试验研究[J]. 金属矿山,2015,(6):19-22.
- [11] 高启栋,卢文波,冷振东,等. 岩石爆破中孔内起爆位置对爆炸能量传输的调控作用研究[J]. 岩石工程学报,2020,42(11):2050-2059.
- [12] 颜松. 谢一矿综采工作面采空区遗煤低温氧化特性与自燃防治技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2015.
- [13] 肖永刚. 高寒边坡岩体采动响应与多场耦合时效致灾过程研究[D]. 北京:北京科技大学,2021.
- [14] 韩超超. 崩落法开采挂帮矿露天矿边坡岩移离散元数值模拟研究[D]. 成都:西南科技大学,2019.
- [15] 高常华,崔恒. 综放工作面采空区液、气两相防灭火技术研究与应用[J]. 内蒙古煤炭经济,2016(16):107+123.