



移动阅读

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0389

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.KJ19.0389

## 基于承压水单孔放水实验的底板水害精准注浆防治

李涛<sup>1,2</sup>,高颖<sup>1,2</sup>,艾德春<sup>1,2</sup>,杨军伟<sup>1,2</sup>,冯海<sup>3</sup>,薛卫锋<sup>3</sup>,赵国杰<sup>4</sup>

(1. 矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室,陕西西安 710065; 2. 六盘水师范学院 矿业与土木工程学院,贵州六盘水 553004; 3. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司,陕西西安 710065; 4. 澄合矿业有限公司,陕西渭南 714000)

**摘要:**我国华北型煤田普遍受底板承压水威胁,底板注浆改造是承压水害防治的有效途径。但注浆改造层位多为非均质的灰岩,其注浆地质条件复杂多变,使得注浆工程效率有限。为了提高底板注浆水害防治的效率,开展基于承压水单孔放水实验的底板精准注浆研究。以渭北煤田,特别是澄合矿区董家河煤矿为研究背景。在分析研究区底板水害防治特征的基础上,结合底板精准注浆内涵,针对性研发了单孔放水实验装置及配套使用技术。在开展单孔放水实验的基础上,结合突水优势面理论提出了底板分类注浆技术。研究表明:通过设置定流量控制阀,可以实现单孔放水实验,获取承压水的渗透系数 $K$ 和富水系数 $q$ 等参数。结合环向非完整井的设计,可以获取承压水水平方向上主要的径流方向。依据单孔放水实验获取的水文参数,结合突水优势面理论,注浆条件类型可以划分为5大类7小类,包括不富水型、 $Q-S$ 曲线直线I型、 $Q-S$ 曲线直线II型、 $Q-S$ 曲线抛物线I型、 $Q-S$ 曲线抛物线II型、 $Q-S$ 曲线幂函数型、 $Q-S$ 曲线对数型。依据钻孔注浆条件的重要性,给出了每种类型钻孔的注浆工艺。通过工程实践应用,采用分类注浆技术的注浆工程提高了注浆效率,有效控制了底板水害。研究成果为华北型煤田底板承压水害信息化防治提供了新的技术和设备。

**关键词:**底板;承压水;放水实验;注浆;煤炭精准开采

中图分类号:P333.5;TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)08-2494-08

## Floor precise grouting for prevention and control of water based on confined water single-hole drainage experiment

LI Tao<sup>1,2</sup>,GAO Ying<sup>1,2</sup>,AI Dechun<sup>1,2</sup>,YANG Junwei<sup>1,2</sup>,FENG Hai<sup>3</sup>,XUE Weifeng<sup>3</sup>,ZHAO Guojie<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Xi'an 710065, China; 2. School of Mining & Civil Engineering, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China; 3. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute, Xi'an 710065, China; 4. Chenghe Mining Co., Ltd., Weinan 714000, China)

**Abstract:** The North China type coalfields are generally threatened by the floor confined water, and the grouting transformation of floor is an effective way to prevent and control the confined water disaster. However, most of the grouting transformation layers are heterogeneous limestone, and the grouting conditions are difficult to ascertain, so the efficiency of grouting is limited. In order to improve the effect of prevention and control of floor water hazards, the floor precise grouting based on confined water single-hole drainage experiment had been studied. The Weibei Coalfield, especially

收稿日期:2019-03-30 修回日期:2019-05-29 责任编辑:郭晓伟

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172290);矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室陕西省自然资源厅开放基金资助项目(KF2017-12);贵州省教育厅青年科技人才成长资助项目(黔教合KY字[2018]376)

作者简介:李涛(1984—),男,江苏沛县人,副教授,硕士生导师,博士后。E-mail:qazwdx521@163.com

Dongjiahe Coal Mine in Chenghe Mining Area was taken as the research background. Based on the analysis of the characteristics of floor water hazard prevention and control in the study area, and combined with the connotation of floor precise grouting, a single-hole drainage experimental device and its supporting application technology had been developed. On the basis of single hole drainage experiment, combined with dominant surface water inrush theory, the floor classification grouting technology had been proposed. The results show that the single-hole discharge experiment can be realized by setting a constant flow control valve, and the permeability coefficient  $K$  and water enrichment coefficient  $q$  of confined water can be obtained. Combined with the design of circumferential incomplete wells, the main runoff direction in the horizontal direction of confined water can be obtained. According to the hydrological parameters obtained from the single-hole discharge experiment and based on the dominant surface theory of water inrush, grouting conditions can be divided into five categories and seven sub-categories, including non-water-rich type,  $Q$ - $S$  curve straight line type I,  $Q$ - $S$  curve straight line type II,  $Q$ - $S$  curve parabola type I,  $Q$ - $S$  curve parabola type II,  $Q$ - $S$  curve power function type, and  $Q$ - $S$  curve logarithmic type. According to the importance of different grouting conditions, each type of grouting technology was proposed. The application in engineering practice shows that the grouting project using classified grouting technology improves the efficiency and effectively controls the floor water hazard. The research results provide new technology and equipment for the prevention and control of confined water hazards in the floor of North China Coalfield.

**Key words:** floor; confined aquifer; drainage experiment; grouting; precise coal mining

我国华北型煤田正逐渐向地质条件复杂的深部区域延伸,隔水层承受的水压多超过临界值,需要开展底板注浆改造工程<sup>[1-4]</sup>。

底板注浆改造工程有大量的研究成果涌现。在注浆材料方面,有黏土为主的注浆材料,有水泥为主的注浆材料,局部还有高分子化学浆液为主的注浆材料<sup>[5-7]</sup>。还有学者研究废弃物注浆材料<sup>[8]</sup>。在注浆工艺方面,也有大量的科研成果。有学者研究了井上制浆、管路运输、井下连续注浆的工艺<sup>[9]</sup>。有学者研究了定向钻区域注浆代替传统的钻孔注浆,其中孙晓宇开展了地面 L 型钻孔注浆改造成套技术和装备的研究<sup>[10]</sup>,沈冰在陈四楼煤矿应用了国内研制的井下定向钻机,开展底板注浆改造工程取得了成功<sup>[11]</sup>。在注浆参数方面,通过大量的实践工程和理论研究,得到了适宜的注浆参数<sup>[12-13]</sup>。其中,王钦东结合水文地质条件分区,研究了底板注浆最优设计模式,并取得了成功<sup>[14]</sup>。

虽然,底板注浆防水技术已有大量成功的经验,

但底板水害注浆探测方面还以地球物理勘探和水位监测为主<sup>[14-15]</sup>。在注浆前的地质保障尚未有系统的研究成果。特别是袁亮院士提出了“精准开采”的概念和内涵<sup>[16-18]</sup>,明确指出需要加强煤炭开采过程中相关地质保障技术的研究。该类地质保障技术的研发一方面可以提高注浆的效率,有效减少煤矿水害的发生。另一方面,可以有效控制受承压水威胁的煤炭开采成本。

笔者基于承压水体精准探测装备及配套技术的研发,结合突水优势面理论研究底板精准注浆技术,并通过实践检验该技术的合理性。

## 1 研究区采矿受底板水威胁概况

### 1.1 研究区煤炭开采底板水害概况

研究区为渭北煤田澄合矿区董家河煤矿,该矿主要开采 5 号煤层,煤层开采时受下伏奥陶系灰岩(以下简称“奥灰”)承压水威胁严重,5 号煤至奥灰之间地层特征见表 1。

表 1 研究区 5 号煤层下伏地层  
Table 1 Underlying strata of No. 5 coal seam in study area

序号	地层	厚度/m	岩性	富水性/(L·(s·m) <sup>-1</sup> )	备注
1	5 号煤	3.60	煤	—	主采煤层
2	太原组	10.08	粉砂岩、泥砂岩	隔水层	底板破坏区
3	太原组	5.48	灰岩、石英砂岩	0.000 7~1.65	注浆改造层位
4	太原组	7.52	铝质泥岩、煤	隔水层	有效隔水层
5	峰峰组二段	150.00	石灰岩为主	0.2~36	顶段无明显充填带

其中,5号煤至奥灰顶段间距为20~30 m,其间有太原组灰岩含水层(以下简称“太灰”),该含水层富水性多变。太灰和5号煤之间距离仅10 m左右,是采煤底板破坏区域。太灰至奥灰有一层平均7.52 m的铝质泥岩发育,该地层隔水性良好。

奥灰的顶段为峰峰组二段,该段岩性以石灰岩为主,富水性强。奥灰含水层作用在5煤下伏隔水层上的水压为1~2 MPa,依据突水系数理论,奥灰是5号煤层的主要充水层位。历史上该矿发生过大量奥灰突涌水现象即为佐证。因此开采5号煤层需要开展底板注浆改造工程,来防治底板奥灰水害。但由于峰峰组二段没有明显的奥灰顶段充填带发育,因此无法采用定向钻对奥灰顶段注浆改造,已有工程实践证明。另外,在局部地区,太灰地层由石灰岩演变为坚硬的石英砂岩,定向钻探在这种地质环境中实施存在一定的难度。因此,底板注浆工程只能以常规钻孔注浆为主。

综上,研究区5号煤受底板奥灰水威胁严重,而奥灰顶段无良好的改造条件,因此需要对太灰进行常规钻孔注浆改造。而太灰地层复杂多变,注浆主要存在两个问题。一方面,存在过量注浆的情况,浆液以跑浆、串浆等形式流失。另一方面,主要的导水通道没有得到充分的加固,治理效果有限。因此,开展“精准注浆”相关研究如下。

## 1.2 精准注浆概述

底板注浆是为了加固煤层底板隔水层,防止底板水害的发生。相对传统注浆,“精准注浆”有以下新的内涵:

(1)“精准注浆”是查明注浆条件的基础上,把浆液相对精准的注入需要加固的关键区域,即针对突水优势面精准加固。

(2)“精准注浆”是把适宜的浆液采用精准的注浆工艺注入需要加固的关键区域,即不同注浆条件采用不同工艺精准注浆。

综上,为达到“精准注浆”目标,需要研发相应的注浆条件探测技术和配套注浆方法,相关研究内容见第2节和第3节。

## 2 承压含水层注浆条件精准探测

注入的浆液在岩层中运移主要与岩层的水理参数密切相关,包括渗透性、富水性、连通性等参数。目前对注浆条件探测是采用电法圈定富水区进行初步探测。由于物探方法的多解性,必须通过钻探进行进一步验证。在井下以承压含水层为目的层的钻探工程,常规只能获取最大涌水量、静水压力等水理参数。

虽然通过群孔放水实验进行大区域水文地质条件的探测,但是群孔放水实验费时、费钱、专业化程度高、获取的是区域水文参数,可以指导区域水害防治,而对采煤工作面的注浆工程指导效果有限。为此,亟需研发简单易实施的承压含水层注浆条件钻孔探测装备及技术。

### 2.1 注浆量与传统水文参数关系分析

传统注浆钻孔只进行简易的水文观测,因此仅能获取注浆层位单孔最大涌水量 $Q_{\max}$ 和最大静水压力 $P$ 。对这两个参数与钻孔最终注浆量 $Q'$ 各进行了74组数据的回归分析,结果如图1所示。

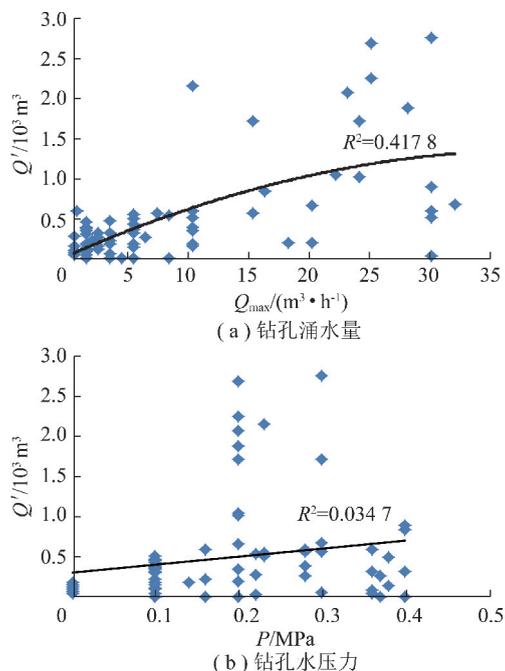


图1 钻孔涌水量、水压力与注浆量关系

Fig. 1 Relationship between water inflow, water pressure and grouting quantity in boreholes

由图1可以看出:

(1)钻孔最大涌水量 $Q_{\max}$ 与最终注浆量 $Q'$ 没有明显的相关性(采用线性、非线性等多种回归统计分析方法,其中 $R^2$ 最大为0.4178,但F检验均不通过),说明影响注浆的不只是这一个因素。

(2)最大静水压力 $P$ 与最终注浆量 $Q'$ 也没有明显的相关性(采用线性、非线性等多种回归统计分析方法,其中 $R^2$ 最大为0.0347,但F检验均不通过),说明传统获取的参数不足以评价钻孔的注浆条件。

综上,传统注浆钻孔获取的参数无法断定该点与4类(底板灰岩强径流带、导水断层、采动断层、底板裂隙发育带)突水结构优势面的关系,特别是钻孔揭露点的渗透性、富水性、连通性无法获取。为达到1.2节中“精准注浆”第1个内涵要求,需要查明注浆

钻孔所揭露区域的渗透性、富水性以及在空间连续性。为此,研发了单孔放水实验仪器及配套求参方法如下。

## 2.2 单孔放水实验获取水文参数

在群孔放水仪的基础上,对放水装置进行了改造,改造后如图 3 所示,图中  $\theta_0$  为扇形钻孔套管的内夹角的 1/2。图 2 中放水管通过钻孔连接到承压含水层,并在钻孔口上方设置了安全阀门、压力监测表、流量监测表和流量控制阀。其中,流量控制阀可以通过设定以固定流量  $Q$  把承压水由含水层中放出。通过流量控制阀的设置,可以观测水压变化计算出固定放水量下水位的降深  $S$ ,相关水文参数的求取近似等效为定流量的完整井稳定流抽水实验求取水文参数的过程。

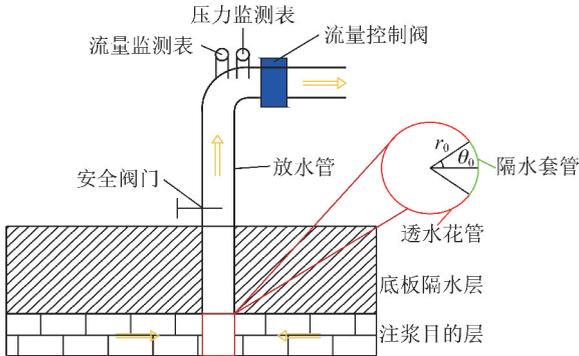


图 2 单一钻孔放水试验仪器示意

Fig. 2 Schematic diagram of single borehole outflow test instrument

依据流量和水压力的观测结果可以依据抽水实验的方法求取含水层的渗透系数  $K$  和富水系数  $q$ 。其中,渗透系数  $K$  为

$$K = \frac{Q_1}{2\pi SM} \ln \frac{R}{r_0} \quad (1)$$

式中,  $Q_1$  为一次放水实验稳定的放水流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $S$  为放水实验稳定的水位降深,  $\text{m}$ , 按照式 (2) 计算获得;  $M$  为含水层厚度,  $\text{m}$ ;  $R$  为影响半径,  $\text{m}$ ;  $r_0$  为放水孔的内径,  $\text{m}$ 。

$$S = \frac{P_0 - (P_1 + \Delta P)}{\rho g} \quad (2)$$

式中,  $P_0$  为钻孔中原始水压力,  $\text{MPa}$ ;  $P_1$  为钻孔一次放水实验稳定时的水压力,  $\text{MPa}$ ;  $\Delta P$  为钻孔放水时的水头损失对应的压力,  $\text{MPa}$ , 按照式 (3) 计算;  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度。

$$\Delta P = \frac{\zeta \left( \frac{Q_1}{A} \right)^2 \rho}{2} \quad (3)$$

式中,  $A$  为放水实验的管路横截面积;  $\zeta$  为管嘴出流水

头损失系数,一般取 0.5。

富水系数  $q$  则通过多次单孔放水实验获取的  $Q-S$  曲线按照《煤矿防治水细则》计算获得<sup>[19]</sup>。这里需要额外设计的是最大的一次降深  $S$  对应的影响半径  $R$  应该大于注入浆液的扩散半径。

## 2.3 单孔放水实验获取主要径流方向

由于本次注浆含水层有非均质性,而一个区域的主要水力传导方向也是一个重要的参数,该方向直接决定了底板最需要注浆的区段。因此,设计环向非完整井进行单孔放水实验来完成这一个参数的测试。环向非完整井的设计如下:

在完整井的基础上,进行钻孔套管和花管的设计,来实现环向非完整井单孔放水功能。图 2 局部放大的平面图中空红色部分为花管,可以有地下水流动,绿色部分为可旋转移动的套管,套管为隔水部分,不允许地下水自由通过。该套管为扇形,其夹角为  $2\theta_0$ 。图 2 中的套管每次旋转  $\theta_0$  角度,每次旋转按照式 (4) 求取相应的非完整井渗透系数  $K'$ , 钻孔套管旋转一整圈得到最小的  $K'$  值,此时过套管中线所在的方位角为水力传导性最大的方向。用完整井的渗透系数  $K$  来表征该钻孔单孔放水实验区域的渗透性,结合水力传导性最大的方向,以矢量图的形式画在采煤工作面上,用于指导工作面底板精准注浆。

$$\frac{2\pi MK'S}{Q_1} = 2 \sqrt{\frac{T}{\pi}} \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(n\theta_0) \cos(n\theta)}{n(\pi - \theta_0)} \right] \quad (4)$$

式中,  $T$  为含水层导水系数;  $\theta$  为距离中线的角度。

综上,2.2 节和 2.3 节获取的注浆条件探测成果与突水优势面理论的对应关系见表 2。由表 2 可以看出,基于单孔放水实验可以基本查明突水优势面的赋存,进而可以达到 1.2 节中“精准注浆”的内涵 (1) 的要求。这里需要说明的是:

(1) 参考文献 [20] 指出,判定突水优势面的关键是要查明富水区和小形隐伏构造。而传统物探对小构造和富水区的定量控制十分困难。

(2) 在高密度注浆钻探中 (放水实验影响半径大于钻孔间距的一半),开展简易的单孔放水实验可更准确圈定富水区 and 隐伏构造区。

(3) 关于富水区,富水区划分最直接的方法就是依据实验获取的  $q$  值划分。通过大量实践工程统计认为富水性大于  $2.5 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$  时突水临界状态存在突变 (更容易发生突水)<sup>[5]</sup>。因此,单孔放水实验定量获取的  $q$  值对突水优势面的评价意义重大。

(4) 关于小型隐伏构造,通过空间上高密度的注浆钻孔中完整井单孔放水实验获取的  $Q-S$  曲线和环

表 2 突水优势面与单孔放水实验成果关系

Table 2 Relation between dominant surface of water inrush and experimental results of single hole drainage

突水优势面类型	突水优势面判定要素	对应需要开展的实验类型
1 类(强径流带)	$K, q$ 较大, 且有空间连续性, $Q-S$ 曲线多为直线或抛物线型	单孔(完整井+非完整井)放水实验
2 类(导水断层)	$K, q$ 较大, 且有空间连续性, $Q-S$ 曲线多为直线或抛物线型	单孔(完整井+非完整井)放水实验
3 类(采动断层)	$K, q$ 较小, $Q-S$ 曲线多为幂函数型, 采动后 $K, q$ 变大	单孔完整井放水实验
4 类(底板裂隙)	$K, q$ 较小, 空间连续性差, $Q-S$ 曲线多为指数曲线型	单孔完整井放水实验

向非完整井放水实验获取的不同方向水力传递差异, 可以更准确圈定隐伏构造区, 即单孔放水实验对突水优势面的判定意义重大。

### 3 基于突水优势面理论的底板注浆方法

对我国煤层底板突水事件进行统计分析发现了“逢突必断”的规律, 说明煤层底板突水事故和底板结构面的发育关系密切<sup>[20]</sup>。为防治底板突水, 需要对这些结构面重点处理, 最为常见的手段就是注浆。但是, 目前注浆工艺多是所有钻孔采用同一种注浆材料、注浆方法、结束标准, 对钻孔没有分类, 对主要的突水通道未能重点加固, 对非主要通道过量注浆, 产生底臃, 甚至跑浆、串浆现象。即传统注浆钻孔注浆工艺与注浆条件不相匹配。为达到 1.2 节中“精准注浆”第 2 个内涵要求, 将探测到的注浆条件与注浆工艺的配伍性研究如下。

#### 3.1 基于突水优势面的注浆钻孔分类

与突水优势面有关联性的钻孔一般具备 3 个条件, 首先是有一定的富水性, 其次有一定的连通性, 最后在空间上有一定的连续性。

如图 3 所示, 对注浆钻孔分类的步骤如下:

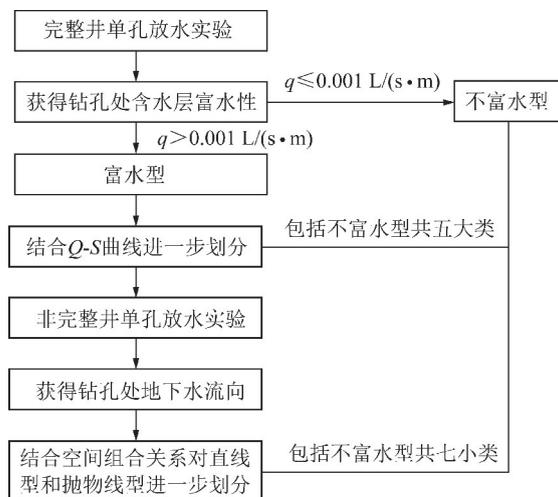


图 3 注浆钻孔地质条件分类步骤

Fig. 3 Classification steps of geological conditions for grouting boreholes

(1) 依据单孔放水实验获得的富水系数  $q$  把钻孔分为富水型 ( $q > 0.001 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ) 和不富水型 ( $q \leq 0.001 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ )。

(2) 依据富水钻孔的  $Q-S$  曲线, 将富水钻孔进一步分为直线型、抛物线型、幂函数曲线型和对数曲线型。《煤矿防治水细则专家解读》<sup>[21]</sup> 中阐释了每一种  $Q-S$  曲线类型所表征的水文地质背景, 认为幂函数曲线型补给性差, 对数曲线型富水性弱, 另外两种则相对富水性和连通性好。

(3) 直线型和抛物线型由于富水性和连通性好, 需要对空间连续性进一步判断。采用 2.2 节研发的非完整井放水实验, 获取采煤工作面下伏的强径流带(渗透性强且渗流方向近似的区域)。依据直线型和抛物线型钻孔与强径流带等突水结构面的空间关系, 进一步分为直线 I 型和 II 型, 抛物线 I 型和 II 型。其中, 直线 I 型和抛物线 I 型与强径流带等突水结构面关系密切, 直线 II 型和抛物线 II 型与强径流带等突水结构面有潜在的联系。

综上, 共分为五大类七小类注浆类型, 即不富水型、 $Q-S$  曲线直线 I 型、 $Q-S$  曲线直线 II 型、 $Q-S$  曲线抛物线 I 型、 $Q-S$  曲线抛物线 II 型、 $Q-S$  曲线幂函数型、 $Q-S$  曲线对数型。

#### 3.2 不同分类注浆钻孔的注浆工艺

不同注浆地质条件的钻孔采取图 4 的注浆工艺选择, 具体如下:

(1) 针对不富水钻孔 ( $q \leq 0.001 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ) 直接进行封孔工作, 不进行高压注浆工作。这主要是防止高压注浆产生底臃, 乃至跑浆现象(为达到注浆结束标准而强行注浆)。

(2) 针对富水钻孔 ( $q > 0.001 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ), 可参照  $Q-S$  曲线类型、其他相关参数和强径流带测定成果, 分类注浆如下:

直线型。其中, 直线类型又依据其与突水优势结构面的关系, 可以进一步分为直线 I 型和直线 II 型。其中直线 I 型为优势结构面附近连通性好的钻孔, 这种钻孔为关键注浆钻孔。直线 II 型为远离优势结构面但连通性好的钻孔, 这种钻孔为重点注浆钻

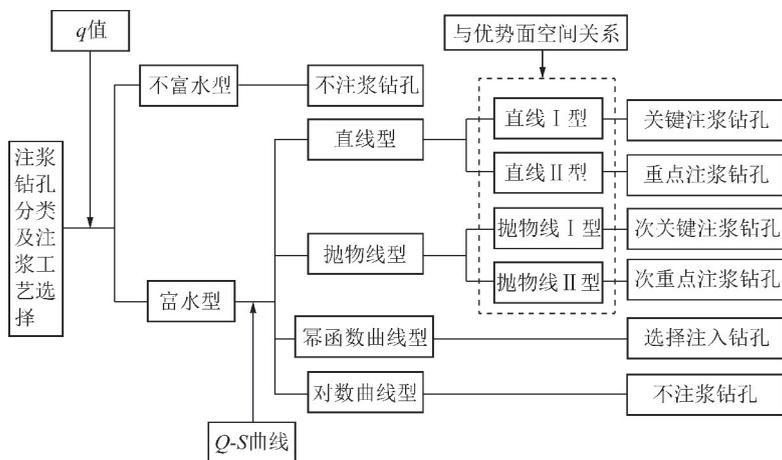


图 4 注浆钻孔对应的注浆工艺

Fig. 4 Grouting technology of grouting borehole

孔。因为当出现有的优势结构面封闭后,剩余直线型钻孔将是潜在导水通道之一,即有演变为新的优势结构面的可能。针对这两亚类的注浆工艺选择如下。

**直线 I 型:**采用注浆材料选定为工业海带、黄豆、木屑、水泥、黏土、水玻璃、粉煤灰及水泥速凝早强剂,其中海带、木屑为浆液的骨料,水泥和黏土为主要注浆材料。注浆工艺为首先下注浆的骨料(海带、黄豆、木屑、水泥结块等),待注浆骨料充水吸水膨胀后,然后下水泥、黏土、水玻璃、粉煤灰、三乙醇胺和水的混合浆液,待注浆压力满足停止压力后停止注浆并封孔。由于钻孔投入了凝结速度较快的水玻璃及速凝水泥,会导致扩散半径明显降低,这对于该优势结构面的改造不利,应在优势结构面附近补充一定钻孔进行注浆。

**直线 II 型:**采用的注浆材料与直线 I 型相似,但可降低水泥、水玻璃及速凝早强剂所占的质量比例。注浆工艺也相似,但由于直线 II 型在平面上比较离散,可补充极少量钻孔甚至不补充注浆钻孔进行注浆改造。

**抛物线型。**抛物线型又依据其与突水优势结构面的关系,可以进一步分为抛物线 I 型和抛物线 II 型。其中抛物线 I 型为优势结构面附近连通性好的钻孔,这种钻孔为次关键注浆钻孔。抛物线 II 型为远离结构面但连通性好的钻孔,这种钻孔为次重点注浆钻孔。因为当出现有的优势结构面封闭后,剩余抛物线钻孔将是潜在导水通道之一,即有演变为新的优势结构面的可能。其注浆工艺可以参考直线型开展。

**幂函数曲线型。**对于幂函数曲线型注浆钻孔应选择性注入。若相邻钻孔有直线型和抛物线型注浆钻孔的,则为注入钻孔,否则不注入浆液直接封孔。注入钻孔的注浆材料选择黏土为主料,添加固硫灰、

膨润土,注浆工艺为将黏土、固硫灰、膨润土与水的混合浆液注入,达到注浆停止压力后停止注浆并封孔。

**对数曲线型。**对于对数曲线型注浆钻孔应以疏放含水层中有限的水体为主,然后对钻孔进行封孔处理。

## 4 工程实践

### 4.1 工程概况

董家河煤矿 22517 工作面主要开采 5 号煤,煤层底板距离奥灰顶板 20 ~ 30 m。奥灰水压实测为 0.8 ~ 1.5 MPa,部分地区突水系数大于临界突水系数,需要进行底板注浆工程防治奥灰水害。

依据采矿地质条件相似的采煤工作面现场实测和统计分析成果,可以预测 22517 采煤工作面的底板破坏深度约为 12 m。由于奥灰顶段富水性强到极强,因此注浆改造的层位只有  $K_2$  含水层。为安全回采煤炭资源,以  $K_2$  为注浆目的层,采用单孔放水仪查明注浆钻孔的地质条件,结合物探成果,为“精准注浆”提供了地质保障。

### 4.2 工程应用

基于单孔放水实验的底板注浆工程的应用如下:

(1) 为指导底板注浆工程,采用电法对  $K_2$  含水层的富水区域进行了探测,有多个异常区域(图 5)。

(2) 在物探结果的基础上布置了 17 个钻场,每个钻场至少 3 个钻孔。

(3) 对所有钻孔进行了单孔放水实验,获取了每个钻孔揭露的含水层区域的渗透系数  $K$ 、富水系数  $q$  和主要渗流方向,结果如图 5 所示。

(4) 由图 5 分析出一个区域性的突水优势面(针对突水优势面补充了 7 个钻孔注浆),其余的电法异常区为局部富水区。

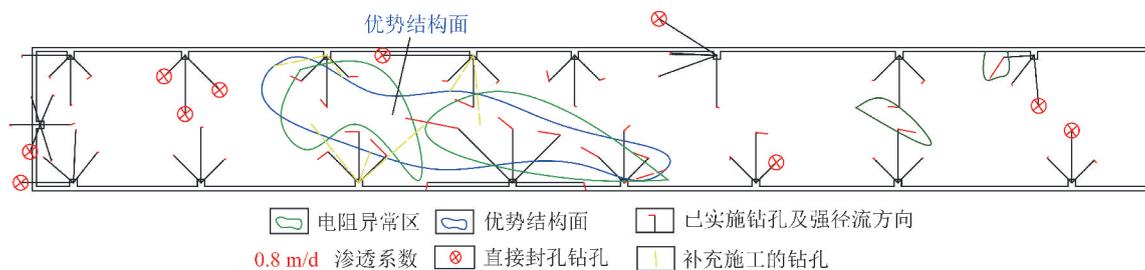


图 5 钻孔分类注浆工程布置

Fig. 5 Classified grouting engineering layout of boreholes

(5)包括 7 个补充钻孔在内,共计实施 64 个钻孔。其中不富水型钻孔 5 个,直线 I 型 10 个,直线 II 型 7 个,抛物线 I 型 15 个,抛物线 II 型 15 个,幂函数型 9 个,对数型 3 个。

(6)依据不同钻孔的类型,进行了注浆工程,注浆总量约 4 万  $\text{m}^3$ ,防治水成本下降 17.9%。在注浆工程后采煤工作面顺利回采,未发生突水事故。

## 5 结 论

(1)研发的单孔放水实验装置和求参方法为底板精准注浆提供了地质保障。

(2)依据单孔完整井和非完整井放水成果,结合优势面理论,将注浆钻孔条件划分为五大类七小类,并提出了相应的注浆工艺。通过实践检验分类注浆能够在保障安全的前提下,费用降低 17.9%。

## 参考文献 (References):

[1] 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 Dangu. 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.

[2] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 561-565.  
WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 561-565.

[3] 赵铁锤. 华北地区奥灰水综合防治技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.

[4] PANG Yihui, WANG Guofa, DING Ziwei. Mechanical model of water inrush from coal seam floor based on triaxial seepage experiments[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(4): 428-433.

[5] 乔伟. 矿井深部裂隙岩溶富水规律及底板突水危险性评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.  
QIAO Wei. Study on the water abundance regularity of deep fracture-karst aquifer and the critical evaluation of water inrush from coal floor in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.

[6] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711-1717.  
FAN Limin, MA Xionged, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.

[7] 彭苏萍, 张博, 王佟, 等. 煤炭资源与水资源[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[8] 陈振国, 徐润, 高岗荣. 钻井废弃泥浆用作注浆材料的研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 49-53.  
CHEN Zhenguo, XU Run, GAO Gangrong. Research on waste drilling mud being used in grouting[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 49-53.

[9] 王苏健, 陈通, 李涛, 等. 承压水体上保水采煤注浆材料及技术[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 134-139.  
WANG Sujian, CHEN Tong, LI Tao, et al. Grouting material and technique in water protection mining above confined water[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 134-139.

[10] 孙晓宇. 地面 L 型钻孔煤层底板注浆加固技术与装备研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(3): 53-56.  
SUN Xiaoyu. Grouting reinforcement technology and equipment for ground L-type drilling coal seam floor[J]. Coal Engineering, 2018, 50(3): 53-56.

[11] 沈冰. 基于定向钻进的高承压底板水害防治研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(11): 174-176.  
SHEN Bing. Research on water inrush prevention of high pressure floor mine based on directional drilling[J]. Coal Technology, 2018, 37(11): 174-176.

[12] LEE J S, BANG C S, MOK Y J, et al. Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(7): 1027-1037.

[13] 李志鹏, 张连震, 张庆松, 等. 砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3488-3497.  
LI Zhipeng, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Simulation test for permeation grouting reinforcement effect of sand layer[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3488-3497.

[14] 王钦东. 底板改造预注浆工程的最优设计模式[J]. 煤炭技术, 2014, 33(11): 328-331.  
WANG Qindong. Floor renovation pregrouting engineering optimal design model[J]. Coal Technology, 2014, 33(11): 328-331.

[15] 吴基文, 翟晓荣, 张海潮, 等. 注浆加固与含水层改造底板采动效应孔巷电阻率 CT 探测研究[J]. 地球物理学进展, 2015,

- 30(2):920-927.
- WU Jiwen, ZHAI Xiaorong, ZHANG Haichao, et al. The electronic resistivity CT detection and research of holes and roadways on the mining effect of floors after grouting reinforcement and reconstruction of aquifers [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 920-927.
- [16] 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.
- YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [17] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
- YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7.
- [18] 袁亮. 面向煤炭精准开采的物联网架构及关键技术[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10): 1-7.
- YUAN Liang. Framework and key technologies of internet of things for precision coal mining [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 1-7.
- [19] 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.
- [20] 高延法, 章延平, 张慧敏, 等. 底板突水危险性评价专家系统及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 253-258.
- GAO Yanfa, ZHANG Yanping, ZHANG Huimin, et al. Research on expert system for risk assessment of water inrush from coal floor and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 253-258.
- [21] 杜运夯, 孙小林, 陈小国. 煤矿防治水细则专家解读[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018.