

# 大采深矿井地面区域治理奥灰水害关键技术研究

赵庆彪<sup>1</sup> 赵兵文<sup>1,2</sup> 付永刚<sup>1</sup> 南生辉<sup>3</sup> 赵章<sup>1</sup>

(1. 冀中能源集团有限责任公司, 河北 邢台 054000; 2. 冀中能源峰峰集团有限公司, 河北 邯郸 056000;  
3. 中国煤炭科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为安全开采邯邢矿区深部煤炭资源, 提出了“区域超前治理”奥灰岩溶水害理念, 开展了华北型煤田大采深高承压水安全开采成套技术研究课题; 从理论上研究得出“分带分时段突破”底板突水机理; 采用阻水系数法评价试采区底板隔水层承压能力; 成功地研究出地面多分支近水平定向钻探关键技术; 从岩石力学和水动力学阐述了裂隙含水层中水平孔注浆浆液扩散机理, 并给出了孔距计算公式; 对于钻遇岩溶或断裂构造状况, 研究出了铺底浆液控制技术。地面区域超前治理奥灰水害成套技术在九龙矿成功应用, 取得了显著技术经济与环境效果。

**关键词:** 大采深矿井; 高承压水; 奥灰岩溶裂隙含水层; 区域超前治理水害; 多分支近水平孔定向钻探; 水平孔浆液扩散机理

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)08-0014-07

## Research on key technology to control Ordovician limestone water disaster on surface region of deep mining depth mine

Zhao Qingbiao<sup>1</sup> Zhao Bingwen<sup>1,2</sup> Fu Yonggang<sup>1</sup> Nan Shenghui<sup>3</sup> Zhao Zhang<sup>1</sup>

(1. Jizhong Energy Group Corporation Limited, Xingtai 054000, China; 2. Jizhong Energy Fengfeng Group Co., Ltd. Handan 056000, China;  
3. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to safely mine the coal resources in the deep depth of Hanxing Mining Area, an idea on the “regional advance control” of Ordovician limestone water disaster was provided and a research program was conducted on the completed technology of safety mining in the seam with the deep depth and high pressurized water in North China coalfield. From the theoretical study, the floor water inrush mechanism with “zoning and timing section breaking” was obtained. A water resistance coefficient method was applied to evaluate the pressure bearing capacity of the water isolated layer in the floor of the trial mining block. The key technology of the multi branch subhorizontal directional drilling exploration on the surface ground was successfully researched. From rock mechanics and water dynamics, the paper stated the grout diffusion mechanism of the horizontal borehole grouting in the crack aquifer and provided the calculation formula of the borehole space. When the drilling operation was in the Karst or broken tectonic conditions, a control technology with a bottom grout was researched. The advance completed technology to control the Ordovician limestone water disaster in the surface region was successfully applied in Jiulong Mine, which showed obvious technical and economic effect as well as the environment effect.

**Key words:** deep mining depth mine; high pressurized water; crack aquifer of Ordovician limestone Karst; regional advance control of water disaster; directional drilling of multi-branch subhorizontal borehole; grout diffusion mechanism of horizontal borehole

## 0 引 言

我国东部煤矿区由于煤炭资源开发早且强度

高, 中等埋深以浅煤炭资源基本枯竭, 采深以每年 10~25 m 的速度延深, 现大部分矿井转入深部开采, 且截至 2013 年底, 全国有 47 个矿井开采深度超

收稿日期: 2016-04-19; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.08.003

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272276, 51174289)

作者简介: 赵庆彪(1957—), 男, 辽宁海城人, 教授级高级工程师, 博士。Tel: 0319-2068322, E-mail: qingbiaozh@163.com

引用格式: 赵庆彪, 赵兵文, 付永刚, 等. 大采深矿井地面区域治理奥灰水害关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 14-20.

Zhao Qingbiao, Zhao Bingwen, Fu Yonggang et al. Research on key technology to control Ordovician limestone water disaster on surface region of deep mining depth mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 14-20.

过 1 000 m<sup>[1]</sup>。我国埋深 2 000 m 以浅的煤炭资源总量 5.57 万亿 t<sup>[2]</sup> 其中 51.34% 位于 1 000~2 000 m 其深部丰富的煤炭资源是工业优质原料和燃料。

河北邯邢矿区属典型的华北型煤田大水老矿区近 20 年来大部矿井转入深部开采现有 4 座矿井采深达 1 000 m 以深煤层底板承受奥灰水压达到 10.6 MPa 以上因此煤层底板突水危险性日益增加。20 多年来邯邢矿区发生煤层底板奥灰较大突水 8 次<sup>[3]</sup> 尤其 2009 年 1 月 8 日九龙矿 4 号煤 15423N 工作面发生滞后突水最大突水量达 120 m<sup>3</sup>/min 而造成淹井突水源为奥灰水突水通道是 4 号煤底板隐伏小型导水陷落柱。因此中等采深以浅的矿井防治水经验已不能完全满足深部煤层安全开采需要亟需创新矿井防治水思路及技术才能有效防止底板突水。目前在煤层底板突水机理超前探测、防治水安全评价和矿井防治水技术等方面的研究成果很多<sup>[4-9]</sup> 大幅推进了矿井防治水技术进步但在煤矿深部开采防治水理论与技术方面却鲜见可借鉴的突破性成果。鉴于此冀中能源集团通过对 8 起突水实例深入分析提出了“区域超前治理”<sup>[10-12]</sup> 理念实行由井下局部治理向地面区域治理底板奥灰水害;超前探测向掘前治理转变;目标是“不掘突水头不采突水面”。经过 4 年多的研究及应用试采获得了成功在时空上达到了大范围区域超前治理水害目的取得了显著的经济及环境效果形成了华北型煤田深部安全开采成套技术及理论为邯邢矿区深部近 10.0 亿 t 优质煤炭资源乃至我国中、东部地区深部丰富的煤炭资源安全开采探索出一条新的技术途径。

## 1 矿井开采条件与试采工作面概述

邯邢矿区九龙矿核定产能 210 万 t/a 最大采深 1 360 m;是一座受煤与瓦斯突出和大采深、高承压水“双重”安全威胁的典型矿井。主采 2 号煤是煤与瓦斯突出煤层其下伏 4 号煤是非突保护层但 4 号煤层开采受井田基底奥灰强含水层威胁严重因此决定研究应用地面区域超前治理奥灰水害技术。

九龙矿经 24 年多的开采揭露了 12 条大断层,小断层 261 条;井田内发育有陷落柱。矿井区域内奥灰含水层水位+115 m。矿井主要生产地区在北翼-850 m 水平北三、五采区,该区域煤层平均厚 5.5 m 煤种为焦煤,可采储量占全矿井储量的 50% 以上。所以区域治理试采区选择在北翼-850 m 水

平北五采区。

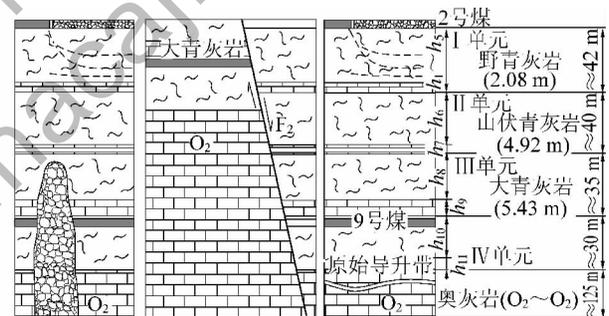
15445N 试采工作面斜长 101~150 m 走向长 480 m 煤厚平均 1.45 m 煤层倾角 12°~15° 可采储量 13.9 万 t;回采工作面标高-710~-850 m 埋深 840~990 m。4 号煤直接顶野青灰岩厚 1.7~3.0 m 属弱含水层距奥灰顶界 105 m;承奥灰水压 8.0~9.65 MPa,突水系数  $T_s$  为 0.07~0.98 MPa/m。

## 2 底板突水机理及区域超前治理水害技术路线

煤层底板突水三要素是突水水源、突水通道和突水强度。所以应围绕隔水层和突水通道形成条件展开研究。

### 2.1 底板阻水“分带”机制分析

通过邯邢矿区发生的 8 起底板突水典型实例分析,以上组煤主采 2 号煤底板至奥灰顶面间的野青、山伏青、大青等 3 个薄层灰岩含水层为底界,划分 4 个隔水地质单元。在此基础上,考虑到各类采动破坏、损伤及原始导升带等按阻水能力构建了煤层底板的 11 个阻水“分带”<sup>[13]</sup> 如图 1 所示。



(a) 受陷落柱影响 (b) 受断层影响 (c) 受采动影响

图 1 “分带”模型及突水组合构造类型

Fig. 1 “Zoning” model and water intrusion structure type

图 1 中:  $h_1$  为底板破坏带厚度,消耗水头小,基本是沿程阻力消耗;  $h_2$  为新增损伤带厚度,有一定阻水能力;  $h_3$  为原位张裂带距新增损伤带间阻水带厚度,原位张裂带高度与基本顶来压强度密切相关,厚度小且变化大,有一定阻水能力,可视为薄层导水界面;  $h_4$  为原位张裂带与野青灰岩间阻水带厚度;  $h_5$  为野青灰岩含水层厚度,弱富水且很不均一;  $h_6$  为野青灰岩与山伏青灰岩间主要阻水带厚度;  $h_7$  为山伏青灰岩含水层厚度,弱富水且不均一;  $h_8$  为山伏青与大青灰岩间主要阻水带厚度;  $h_9$  为大青灰岩含水层厚度,弱至中等富水,不均一;  $h_{10}$  为大青灰岩与原始导升带间主要阻水带厚度;  $h_{11}$  为原始导升带高度,有

一定阻水能力。

需要说明的是  $h_1$  基本无阻水能力;  $h_6$ 、 $h_8$ 、 $h_{10}$  是主要阻水带。如果没有原始导升带, 则  $h_{11}$  为 0,  $h_{10}$  厚度即 IV 隔水地质单元。

“分带”机制基于以下 2 点: ①薄层灰岩是裂隙含水层, 新贯穿裂隙一般止于此界面, 可作为各隔水地质单元底边界; ②采动造成破坏、损伤和原始导升带等阻水能力被削弱甚至基本丧失阻水能力而构成相对隔水边界。

煤层开采直接造成底板破坏带; 采动影响对底板破坏带下邻的新增损伤带要产生向下递进效应, 当传递到原位张裂带时, 会增加原位张裂带张度; 当传递到原始导升带时, 与高承压水共同作用, 可能对原始导升裂隙产生张裂“递进”作用。上述由采动引起的底板破坏带、新增损伤带及原位张裂带在 I 单元内(采 2 号煤); 原始导升带位于 IV 单元底部。

## 2.2 突水机理与类型

煤层底板突水的主要地质影响因素为地质构造、隔水层厚度及承受水压、底板岩性组合和应力等。在上述构建分带地质模型基础上, 大采深矿井底板突水机理可描述为“原始导升带形成-非 Darcy 渗流-稳定渗流-管涌形成”<sup>[13]</sup> 四时段底板突破, 在采空区卸载条件下, 底板产生裂隙并向下扩张延伸; 隔水层底部原始裂隙受采动影响而可能发生扩张并向上“递进”, 在有地质构造及高承压水条件下, 当扩张裂隙相互导通, 最终使采掘空间与底板含水层连通而导致突水。

分析 8 起突水实例发现, 突水类型基本是组合构造型, 可分为 2 类: 一是大采深高承压水采上组煤厚隔水层条件下, 其底板突水基本以组合型隐伏构造突水为主, 如导水陷落柱或导水大型断层为主的组合型构造; 二是在较大采深高突水系数下组煤开采条件下, 以较薄隔水层的(隐、显性)微、小型断裂构造及裂隙带组合底板突水为主。根据现场实测及利用相似材料模拟试验, 采深 500 m 以浅, 底板采动破坏深度小于 20 m; 采深大于 800 m 时, 底板破坏深度为 30~45 m。如九龙矿 15423N 综采工作面滞后突水就是由于 4 号煤底板存在着隐伏导水陷落柱, 使 4 号煤底板隔水层厚度由 105 m 减少为 41.5 m, 在采动破坏和高承压水作用下, 奥灰水突破陷落柱顶部“岩帽”发生滞后突水, 陷落柱参数见表 1。

表 1 陷落柱发育特征参数

Table 1 Characteristics parameters of the development of collapse column

| 陷落柱发育<br>最高层位   | -770 m 标高陷落柱参数 |        |                    | 距 4 号煤底<br>板距离/m |
|-----------------|----------------|--------|--------------------|------------------|
|                 | 长轴长度/m         | 短轴长度/m | 截面积/m <sup>2</sup> |                  |
| 石炭系太原<br>组山伏青底板 | 14             | 7.2    | 100                | 41.5             |

## 2.3 隔水层有效承压能力初步评价

根据该区域 9 个钻孔资料分析, 底板岩层主要岩性有铝土泥岩、泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩、灰岩以及破碎带等。根据现有资料对底板岩层的组合分析可知: 砂质岩比例为 51.26%~67.02%, 泥质岩为 8.47%~26.74%, 灰岩为 6.05%~15.85%。可见岩性组合以砂质岩为主, 泥质岩和灰岩比例较小。其中砂质岩和灰岩较硬, 厚度占总厚度的 65.11%~83.42%, 泥质岩较软, 厚度占总厚度的 8.47%~26.74%。底板由  $n$  类不同岩性及不同厚度的岩层构成, 其每种岩性相应有不同阻水系数; 底板总阻水能力  $P_z$  可按式计算:

$$P_z = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n H_i z_i \quad (1)$$

其中:  $P_i$  为底板第  $i$  类岩层可承受水压, MPa;  $H_i$  为底板第  $i$  类岩层厚度, m;  $z_i$  为底板第  $i$  类岩层阻水系数, MPa/m, 参见表 2 选取阻水系数, 破碎段阻水系数一般取 0.1 MPa/m, 构造影响区段阻水系数一般取完整段的 1/3。

表 2 岩层阻水系数

Table 2 Water resistance coefficients of rock stratum MPa/m

| 岩性   | 中粒砂岩  | 细粒砂岩  | 粉砂岩   | 泥岩    | 铝土岩   | 灰岩    |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 阻水系数 | 0.331 | 0.285 | 0.194 | 0.293 | 0.114 | 0.399 |

岩性组成及阻隔水能力计算结果见表 3。由表 3 可知, 该底板岩性组合类型在较完整条件下, 底板可承受水压大于底板实际承压; 但在地质构造等区域, 底板阻水能力消减至 3.21~8.31 MPa/m, 该区域阻水能力约有 50% 小于底板实际承压 4.77~8.42 MPa, 所以需要区域超前治理底板薄弱带以提高底板阻水能力。

## 2.4 区域超前治理防治水技术路线

### 2.4.1 奥灰顶部含水层改造层位选择

奥灰含水层为煤系基底强含水层, 厚度 500~700 m, 奥灰富水性从垂向分为三组八段, 顶部峰峰组八段厚度为 15~50 m, 富水很不均一; 七段平均厚度 89.6 m, 为强含水层, 以岩溶-细小溶蚀裂隙为主, 小溶孔次之。奥灰水位标高 +90.05—+115.0

m。该含水层分布广且厚度大, 动静水储量巨大, 为 矿井防治水主要对象。

表 3 岩性组成及阻隔水能力计算结果

Table 3 Calculation results of litho logic composition and waterproof capacity

| 孔号   | 岩性组成及厚度/m |      |      |       |       | 理论承受水压/MPa |       |       | 实际承压/MPa |      |
|------|-----------|------|------|-------|-------|------------|-------|-------|----------|------|
|      | 粉砂岩       | 细砂岩  | 中砂岩  | 泥岩    | 铝土    | 灰岩         | 破碎带   | 完整段   |          | 裂隙区  |
| 观 2  | 45.76     | 2.02 | 8.00 | 6.41  | 5.40  | 10.76      | 12.45 | 20.13 | 6.64     | 5.59 |
| 主 2  | 50.90     | 4.10 | 0.00 | 9.10  | 11.20 | 21.30      | 10.70 | 24.55 | 8.10     | 5.65 |
| 主 3  | 29.90     | 2.20 | 0.00 | 3.30  | 0.90  | 3.00       | 10.30 | 9.72  | 3.21     | 5.03 |
| 主 1  | 35.62     | 4.00 | 0.00 | 4.65  | 12.20 | 12.10      | 2.50  | 15.88 | 5.24     | 5.12 |
| 观 3  | 27.50     | 3.34 | 0.00 | 5.73  | 4.80  | 5.90       | 9.16  | 11.78 | 3.89     | 4.77 |
| 观 8  | 56.79     | 0.00 | 0.00 | 8.59  | 5.46  | 13.89      | 0.00  | 19.70 | 6.50     | 6.55 |
| 观 10 | 45.03     | 2.00 | 3.60 | 16.10 | 7.90  | 15.12      | 0.00  | 22.15 | 7.31     | 8.42 |
| 观 11 | 44.81     | 6.30 | 0.00 | 6.00  | 11.60 | 12.49      | 2.90  | 18.84 | 6.22     | 5.17 |
| 观 12 | 45.37     | 4.20 | 6.75 | 8.55  | 6.95  | 12.91      | 0.00  | 20.68 | 6.82     | 7.30 |

奥灰顶部八段受岩性结构和沉积后期构造改造作用, 其顶部风化剥蚀的裂隙产生再充填、压实、胶结等复杂地质过程, 由此形成奥灰顶部古“风化”<sup>[14]</sup> 充填带, 具有较高强度和低渗透性特点, 隔水性相对较好, 可注性差, 是可以利用改造较弱含水层。所以, 注浆改造目标层选择奥灰八段。另外, 在一定探查密度条件下, 越靠近含水层进行探查, 发现溶蚀溶洞和断裂构造概率越大, 从而为在根本上防治水害打好基础。

### 2.4.2 区域治理防治水技术路线

井下常规钻进是一种类似“纳鞋底”的点接触钻进方式, 缺点是钻探作业人员安全性差、效率低和探查不精等。在大采深高承压水开采条件下, 鉴于 15423N 保护层工作面底板发育隐伏小型陷落柱而发生奥灰突水情况, 确定采取探治一体化区域超前治理技术, 在地面应用多分支水平井定向钻探技术, 实施区域注浆改造奥灰顶部含水层, 增加隔水层厚度及阻隔水能力, 超前消除奥灰含水层对开采的严重威胁, 防治水技术路线如图 2 所示。

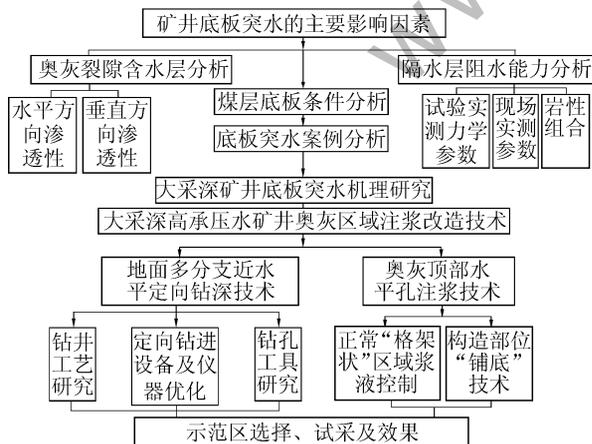


图 2 区域超前治理奥灰水害技术路线

Fig. 2 Technique flow chart of the regional pre-governance of Ordovician limestone water disaster

## 3 地面区域超前治理奥灰水害关键技术

### 3.1 多分支近水平定向钻探关键技术

研究应用地面多分支近水平定向钻探技术, 为区域超前治理奥灰水害和大规模高效注浆改造奥灰顶部含水层提供关键技术及必要条件。

#### 3.1.1 近水平定向钻探技术

地面多分支近水平定向钻进技术是利用特殊的井底动力工具和随钻测量技术, 钻成井斜大于 86° 并保持该角度沿目标层的定向钻井技术, 包括随钻测量、井眼轨迹控制和井壁稳定技术等。一般先在地面施工垂直井, 然后造斜进入奥灰含水层一定深度变成近水平井, 利用水平钻孔可分支特点, 钻孔轨迹可设计“羽、带”状, 灵活地对煤层底板和奥灰含水层异常区进行多方位控制和充分揭露, 目的主要为: ①探查溶蚀溶洞、断层等异常含水水体; ②实施区域注浆治理以消除奥灰水患。坚持“遇漏必注”原则, 即遇浆液流失量大于 5.0 m<sup>3</sup>/h 时, 要求停钻注浆治理; 先做压水试验, 根据吸水量大小确定注浆量和浓度, 从“根部”对导水通道进行治理, 从而达到“治本”目的。

#### 3.1.2 钻进工艺及轨迹控制

水平孔施工要克服奥灰硬岩(普氏系数  $f > 7.0$ ) 钻进难题, 钻机型号选用美国产 T200XD 型车载钻机、国产水源 2000 钻机或 ZJ30/1700B 钻机等; 钻孔定向采用 PWMD 型泥浆脉冲无线随钻设备; 钻具组合为  $\phi 152$  mm PDC+120 mm 螺杆+ $\phi 120$  mm MWD 或 LWD 无磁钻杆+ $\phi 89$  mm 钻杆; 泵压 7~12 MPa。

所有分支孔以主孔在工作面的终点作为分支点, 分别按设计采用  $\phi 152.4$  mm PDC 钻头施工至奥灰含水层, 进入奥陶系灰岩 30~60 m 逐步改为水平井施

工。分支孔的造斜段垂深控制进入奥灰深不大于60 m。随钻测量仪和伽马探测仪采集自然伽马、电磁波电阻率、钻压、转矩和泥浆压差等参数,实时反馈给定向软件以及时调整定向,严格控制水平井身轨迹;并结合伽马地球物理测井及岩粉鉴定等,保证钻孔轨迹在设计改造目标层位内并达到钻遇率要求。

### 3.2 裂隙含水层水平孔注浆浆液扩散及孔距设计

#### 3.2.1 水平孔注浆浆液扩散机理

奥灰顶部区域注浆一般是升压渗透注浆,浆液扩散主要发生在该时段,在浆液充满裂隙后,随注浆压力升高,浆液驱替地下水分为浆、水两区<sup>[15-17]</sup>,向外径向辐射扩散,即升压渗透注浆,如图3所示。

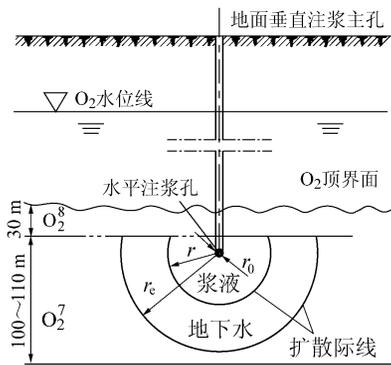


图3 水平注浆孔浆液扩散示意

Fig. 3 Schematic diagram of slurry diffusion for horizontal grouting holes

以此建立升压注浆浆液扩散渗流模型<sup>[13,18-19]</sup>,推导出浆液扩散半径  $r$  与水平孔底注浆压力 ( $P_0 - P_e$ ) 之间关系式:

$$r = \exp\left\{ \frac{\pi g \delta^3 (P_0 - P_e)}{6q_g [1 + 8.8(\omega/\delta)^{1.5}](v_g - v_w)} + \frac{v_g \ln r_0 - v_w \ln r_e}{v_g - v_w} \right\} \quad (2)$$

式中:  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\delta$  为粗糙裂隙平均张开度,  $m$ ;  $P_e$  为奥灰水压,  $MPa$ ;  $P_0$  为孔底注浆总压力;  $q_g$  为浆液流量,  $m^3/s$ , 是相对定值;  $v_g$ 、 $v_w$  为浆液和水运动黏性系数,  $m^2/s$ ;  $r_0$  为水平注浆孔半径,  $m$ ;  $r_e$  为含水层水力影响半径,  $m$ ;  $\omega$  为裂隙表面绝对粗糙度。

应用该式计算时,视水力影响半径  $r_e$  为常数,即在  $r_e$  处浆液驱动含水层静水的流速  $\varepsilon$  近似为 0 ( $\leq 1.0 \times 10^{-5} m/d$ ),由此可求得  $r_e$ :

$$r_e \propto \frac{r_0}{\varepsilon} \quad (3)$$

#### 3.2.2 水平注浆孔距初设

1) 水平钻孔位置选择。峰峰组七段是富水含水层,岩溶裂隙发育,裂隙率在 0.05%~0.50%,渗透系数  $1.16 \times 10^{-4} \sim 5.80 \times 10^{-3} m/d$ ,可注性较好,奥灰八段底界面可作为浆液扩散相对边界,所以水平注浆孔位设计距奥灰八段底界 5.0~15.0 m。

2) 水平孔间距设计。若注浆压力小,达不到改造含水层目的;注浆压力过大,可能会将奥灰七段全部注满,既损害了七段含水层,又增加了改造费用。根据-850 m 水平北五采区地质及水文地质条件,水平孔距计算参数如下:

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| 浆液比例(水灰比)                      | 1.35                 |
| $\omega/\delta$                | 0.033~0.500          |
| $v_g/(m^2 \cdot s^{-1})$       | 7~20                 |
| $v_w/(m^2 \cdot s^{-1})$       | 0.75~5.00            |
| 注浆孔直径/m                        | 0.152                |
| 水平孔深/m                         | 950~1 060            |
| 单位注浆量 $q_g/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 0.017                |
| $\varepsilon$                  | $1.0 \times 10^{-5}$ |

$\delta$  在 0.001~0.007 m,这里取 0.005 m;  $\omega/\delta$  取 0.035;  $v_g$ 、 $v_w$  分别取 7.5、0.8  $m^2/s$ ; 注浆总压力  $P_0$  为 (1.5~2.5)  $P_e$ ,这里取 2.5  $P_e$ ; 注浆泵压  $P_b$  取 10.0 MPa;  $H_d$  为水平孔深, 1 130 m。

利用公式(2)计算得  $r = 33.07 m$ ; 考虑牛顿型浆液黏滞系数对扩散距离有影响,所以浆液扩散距离设计不大于 30 m,即水平注浆孔间距确定小于 60 m,一般根据现场试注情况要加以调整。

## 4 奥灰含水层注浆铺底控制技术与区域治理效果检验

### 4.1 注浆材料及工艺要求

注浆材料选用水泥浆或水泥+粉煤灰混合浆液。地面建注浆站,采用散装水泥、水力射流、两级搅拌注浆工艺。采取“遇漏必注”原则,注浆水灰比 1.2 : 1~3 : 1; 如遇大裂隙时,使用水泥+粉煤灰混合浆液; 钻遇溶洞或断裂构造时采取注石子、沙子等骨料; 注浆孔口压力为 6.0~12.0 MPa。根据钻井液消耗及钻进距离 (<200 m) 考虑停钻注浆: 一是钻井液漏失量大于 5  $m^3/h$  时,停钻注浆; 二是钻井液无明显漏失,钻进距离为 100~200 m,停钻压水,观测压水量大于 0.3  $m^3/min$ ,开始注浆。

### 4.2 注浆铺底控制技术

在奥灰钻遇“格架”状溶隙、溶洞或断裂构造进

行注浆时,当注浆压力达到一定值后,浆液通过溶洞或溶隙将向无需改造的奥灰下部扩散,既破坏了含水层,又造成大量浆液浪费。所以,在巨厚含水层中对构造发育地段注浆需进行“铺底”设计。

一般通过研究注浆目标层渗透性、裂隙发育程度、浆液黏滞系数和注浆压力等相关因素,以确定注浆压力、结束压力、注浆加压时间以及水平孔距及注浆材料等参数。奥灰岩层厚,裂隙发育差异大,需对不同规模地质构造采用不同注浆材料,如钻遇溶蚀溶洞或断层时,为控制注浆量向下扩散,须铺底预设下边界。在钻进过程中,通过对冲洗液漏失量大小和掉钻等现象进行观察分析,估计所钻遇构造的规模,根据构造规模采用不同材料进行铺底,如灌注骨料、粉煤灰等,见表4。通过采取上述措施,取得了良好经济及环保效果。

表4 浆液控制铺底材料

Table 4 Foundation material for slurry control

| 项目   | 不同漏失量下的铺底材料            |                         |                      | 掉钻    |
|------|------------------------|-------------------------|----------------------|-------|
|      | <0.5 m <sup>3</sup> /h | 0.5~1 m <sup>3</sup> /h | >1 m <sup>3</sup> /h |       |
| 铺底材料 | 1:1 注浆                 | 注浆或早强水泥浆                | 粉煤灰                  | 碎石、细沙 |

#### 4.3 区域治理效果检验

为验证地面区域治理效果,在15445N工作面采前施工了5个大青层位验证孔。5个钻孔均揭露山伏青灰岩,除1个孔水量为10.2 m<sup>3</sup>/h,其余孔水量均小于6 m<sup>3</sup>/h,说明山伏青灰岩含水层总体富水性弱,含水层水位最高为-560 m;当钻孔揭露大青灰岩时,5个孔出水量在12~39 m<sup>3</sup>/h,水压7.5 MPa;说明了大青灰岩含水层局部富水性强,含水层水位最高为+25 m左右。钻孔验证范围内,后经地面分支水平孔补探补注后,孔内水量和水压随之下下降,说明通过地面注浆改造后,该区域煤层底板的奥灰含水层向上补给上覆含水层的通道被有效封堵。工作面底板注浆验证钻孔在穿过山伏青和大青灰岩含水层水位相差较大,说明两含水层之间无水力联系或水力联系微弱。经地面区域治理及井下补强注浆,该区域奥灰顶部含水层改造为弱含水层乃至相对隔水层。

#### 5 应用效果

在15445N工作面及外围100 m的范围内,共施工2个注浆主孔和11个分支水平孔,钻探进尺7 997 m,施工中共探查到明显漏失点28个,注水泥

77 436 t。各孔均满足注浆结束压力标准,即压水单位吸水率小,为0.01 L/(min·m<sup>2</sup>),安全采出4号煤13.4万t,实现了15445N保护层工作面安全开采目标,获得2号煤治理达标煤量121.2万t。九龙矿自2012年开展北翼-850 m水平进行地面区域治理防治水以来,截止到2015年6月底,共施工6个主孔,总进尺31 756 m,其中水平孔进尺25 854 m;累计注水泥204 720 t,粉煤灰20 101 t,沙子505 m<sup>3</sup>;治理面积81万m<sup>2</sup>,解放深部2号煤1 246万t。

#### 6 结 论

1) 通过实施地面区域超前治理奥灰水害技术,基本查明了区域内隐伏导(含)水构造,将奥灰顶部含水层注浆改造为相对隔水层,增加了煤层底板隔水层厚度及完整性,为杜绝煤层底板奥灰突水探索出一条新技术途径。

2) 地面区域治理实现了“先治后掘”及探治与掘分离,实现了“不掘突水头,不采突水面”安全带压开采目标;解决了井下高承压水钻孔施工安全和采掘衔接紧张问题。

3) 通过对钻进过程中冲洗液漏失、掉钻及注浆量等数据分析,研究出了一套注浆铺底控制注浆技术。

4) 在钻探及注浆施工中,提前查明了4个隐伏陷落柱,消除浆液漏失点127个,超前治理了底板突水隐患,达到了“治本”目的。

5) 地面区域治理能充分发挥钻进效率高、精准、施工安全性高等优势,可解决大采深矿井井下钻探效率低、易塌孔埋钻等问题。

#### 参考文献(References):

- [1] 中国煤炭工业协会.中国煤炭工业发展研究报告(2013)[R].北京:中国煤炭工业协会,2013.
- [2] 马蓓蓓,鲁春霞,张雷.中国煤炭资源开发的潜力评价与开发战略[J].资源科学,2009,31(2):224-229.  
Ma Beibei, Lu Chunxia, Zhang Lei. Assessment of exploitation potential and strategy of coal resource in China [J]. Resource Science, 2009, 31(2): 224-229.
- [3] 赵兵文,关永强.大采深矿井高承压奥灰岩溶水综合治理技术[J].煤炭科学技术,2013,41(9):75-78.  
Zhao Bingwen, Guan Yongqiang. Comprehensive treatment technology of high pressure-bearing Ordovician limestone Karst water in large mining depth mine [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 75-78.
- [4] Martinez J D, Johnson K S, Neal J T. Sinkholes in evaporate rocks

- [J].American Scientist,1998,86:39-52.
- [5] 尹尚先,武强.陷落柱突水模式及理论判据[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):4-6.  
Yin Shangxian,Wu Qiang.Water inrush patterns and theoretic criteria of Karstic collapse columns[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(6):4-6.
- [6] 虎维岳.深部煤炭开采地质安全保障技术现状与研究方向[J].煤炭科学技术,2013,41(8):1-5.  
Hu Weiyue.Study orientation and present status of geological guarantee technologies to deep mine coal mining[J].Coal Science and Technology,2013,41(8):1-5.
- [7] 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.
- [8] 杨新安,程军,杨喜增,等.峰峰矿区矿井突水分类及发生机理研究[J].地质灾害与环境保护,1999(2):25-30,37.  
Yang Xin'an,Cheng Jun,Yang Xizeng,et al.Study on the water invasion classification and mechanism in Fengfeng mine area[J].Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,1999(2):25-30,37.
- [9] 卢超波.深部裂隙岩体注浆迁移扩散及加固机理研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006.
- [10] 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):83-86.  
Zhao Qingbiao.Technical countermeasures and guidance principles of seam safety mining above high pressurized water aquifer[J].Coal Science and Technology,2013,41(9):83-86.
- [11] 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.Ordoevian limestone karst water disaster regional advanced governance technology study and application[J].Journal of China Coal Society,2014,39(6):1112-1117.
- [12] 冀中能源峰峰集团,中煤科工集团西安研究院.大采深矿井煤层底板奥灰突水机理及其区域注浆改造技术研究报告[R].邢台:冀中能源峰峰集团,2014.
- [13] 赵庆彪,赵昕楠,武强,等.华北型煤田深部开采底板“分时段分带突破”突水机理研究[J].煤炭学报,2015,40(7):1601-1607.  
Zhao Qingbiao,Zhao Xinnan,Wu Qiang,et al.Water burst mechanism of “divided period and section burst” at deep coal seam floor in North China type coalfield mining area[J].Journal of China Coal Society,2015,40(7):1601-1607.
- [14] 董书宁,刘其声.华北型煤田中奥陶系灰岩顶部相对隔水段研究[J].煤炭学报,2009,34(3):289-292.  
Dong Shuning,Liu Qisheng.Study on relative aquiclude existed in mid-Ordovician limestone top in North China coal field[J].Journal of China Coal Society,2009,34(3):289-292.
- [15] 兖州煤业股份有限公司,中国矿业大学(北京).兖州矿区奥灰高承压水上下组煤开采技术研究与应用[R].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [16] 武强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.  
Wu Qiang.Progress,problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J].Journal of China Coal Society,2014,39(5):795-805.
- [17] 许延春,李建波.注浆加固工作面底板突水“孔隙-裂隙升降型”力学模型[J].中国矿业大学学报,2014,43(1):49-55.  
Xu Yanchun,Li Jianbo.“Pore-fractured lifting type” mechanical model for floor water inrush of the grouting enforcement working face[J].Journal of China University of Mining & Technology,2014,43(1):49-55.
- [18] 《岩土注浆理论与工程实例》写作组.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.
- [19] 孙广忠,孙毅.岩石力学原理[M].北京:科学出版社,2011.
- [16] 袁超,周灿灿,张锋,等.随钻方位伽马测井探测器直径优化设计[J].石油机械,2014,42(3):1-4.  
Yuan Chao,Zhou Cancan,Zhang Feng,et al.Optimization of diameter of detector for azimuthal gamma logging while drilling[J].China Petroleum Machinery,2014,42(3):1-4.
- [17] 任晓荣,黄剑雄.自然伽马测井刻度的论述[J].石油仪器,1999,13(4):25-27.  
Ren Xiaorong,Huang Jianxiong.Discussion on calibration of natural gamma ray logging[J].Petroleum Instruments,1999,13(4):25-27.
- [18] 谢灵芝.内蒙古准格尔煤田玉川井田煤质特征及利用方向评价[J].露天采矿技术,2013(8):15-18.  
Xie Lingzhi.Evaluation of coal quality characteristics and utilization direction of Yuchuan Mine Field in Zhungeer Coalfield Inner Mongolia Region[J].Opencast Mining Technology,2013(8):15-18.

## (上接第167页)

制方法[J].电子元器件应用,2008,10(1):24-25.

Li Wenjuan,Hai Xia.High speed on-line detection and control method Based on PMT[J].Electronic Component & Device Applications,2008,10(1):24-25.

- [13] 王挺峰.光子计数用光电倍增管的外围工作电路[J].光机电研究论坛,2009(2):39-44.

Wang Tingfeng.Working circuit of PMT in photon counting systems[J].OME Research Forum,2009(2):39-44.

- [14] 任晓荣,赵福宇.自然伽马测井仪可靠性分析与优化设计[J].仪表技术与传感器,2005(6):8-9.

Ren Xiaorong,Zhao Fuyu.Reliability analysis and optimize design for natural gamma-ray logging tool[J].Instrument Technique and Sensor,2005(6):8-9.

- [15] 黄隆基.放射性测井原理[M].北京:石油工业出版社,1985.