

Study on hydraulic fracturing effect of directional long borehole drilling in hard roof

Bin Wang^{1,2,3} Long Guo³ Fuqiang Zhang⁴ Yongqiang Liu^{1,2,3} Yankun Wang⁴ Mingxuan Li^{1,2,3}

1. Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing, 100013, China

2. China Coal Mining Engineering Research Institute Co., Ltd., Beijing, 101300, China

3. China Coal Mining Engineering (Xi'an) Mining Technology Co., Ltd., Xi'an, 710075, China

4. Guoneng Wuhai Energy Huangbaicisi Mining Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016040, China

Abstract

In the process of production of Huangbaizi Coal Mine, the working face is affected by the activity of adjacent mined-out area and hard rock strata on the overlying roof, resulting in strong mine pressure, leading to excessive stress concentration and large roadway deformation in the return roadway and belt roadway of 0213 Upper 202 comprehensive mining face. The research results and methods have certain guiding significance for other mine hydraulic fracturing process.

Keywords

hard roof; hydraulic fracturing; fracturing process; fracturing parameters; effect investigation

坚硬顶板定向长钻孔水力压裂效果考察研究

王滨^{1,2,3} 郭龙³ 张富强⁴ 刘永强^{1,2,3} 王彦坤⁴ 李明轩^{1,2,3}

1. 天地科技股份有限公司, 中国·北京 100013

2. 中煤科工开采研究院有限公司, 中国·北京 101300

3. 中煤科工(西安)开采工程技术有限公司, 中国·陕西 西安 710075

4. 国能乌海能源黄白茨矿业有限责任公司, 中国·内蒙古 乌海 016040

摘 要

黄白茨煤矿生产过程中在工作面受临近采空区和上覆顶板坚硬岩层活动影响, 形成强矿压, 导致0213^上202综采工作面回风巷和胶带巷超前应力集中、巷道变形较大。为治理上覆坚硬顶板无法正常垮落引发的次生灾害, 拟采用定向长钻孔水力压裂技术进行顶板弱化, 分析了水力压裂层位选择、压裂参数选择, 制定水力压裂措施, 采用压裂曲线、内窥监测、宏观考察等多种措施进行压裂效果考察。研究成果和研究方法对于其他矿井水力压裂工艺具有一定指导意义。

关键词

坚硬顶板; 水力压裂; 压裂工艺; 压裂参数; 效果考察

1 引言

矿井坚硬复合顶板开采过程中, 伴生顶板灾害问题比较多。矿井坚硬顶板引发采面无法正常垮落、巷道围岩变形严重等问题, 严重制约矿井安全生产。顶板岩层厚度大、应力高、难垮落时工作面开采共性问题, 容易引发冲击地压、巷道变形等问题, 因此必须采用一定措置对坚硬顶板进行弱

化处理。针对坚硬顶板治理问题, 我国专家学者进行了大量研究, 刘甲采用长钻孔水力压裂技术进行对高瓦斯矿井上覆坚硬顶板进行压裂, 提高瓦斯抽采效率, 取得良好效果^[1]; 吴东园针对综采工作面坚硬顶板端头悬空位置进行水力压裂, 有效控制端头巷道围岩变形严重问题, 取得良好效果^[2]; 杜志伟提出应用定向长钻孔水力压裂技术治理煤层坚硬顶板引发的顶板问题, 进行现场应用研究, 取得良好效果^[3]。其他专家学者分别针对水力压裂技术在煤矿生产中应用问题展开研究, 分别取得丰硕成果。黄白茨煤矿下部开采过程中存在坚硬顶板引发的巷道变形严重问题, 为控制顶板灾害事故发生, 现采用区域定向长钻孔水力压裂工艺对坚硬顶板进行压裂。

【基金项目】国家能源集团乌海能源有限责任公司科技项目《近距离煤层群沿空留巷条件厚硬顶板多维卸压关键技术研究与应用》资助(项目编号: WHNY-KX-23-24)。

【作者简介】王滨(1987-), 男, 中国山东东平人, 硕士, 高级工程师, 从事煤层顶板岩层压裂的工程及科学研究。

2 工程概况

黄白茨煤矿 0213^{±2}02 综采工作面 13^{±2} 煤层, 煤层平均厚度 1.40m, 顶板岩性为砂质页岩, 底板以泥岩为主, 工作面采用走向长壁综合机械化开采, 一次采全高。综合分析该工作面开采煤层直接顶板厚度大、坚硬强度高, 为厚硬难垮类型顶板。为控制坚硬顶板产生的矿压对留巷的破坏, 需采取措施控制应力向留巷传递, 拟采用水力压裂技术控制上覆岩层水平运移。

3 水力压裂技术原理

3.1 水力压裂原理

水力压裂技术主要以水为介质, 通过在岩层钻孔局部注入高压水, 岩体在流体自由应力作用下产生裂纹, 随着压力的持续, 裂隙不断发育, 达到对目标岩体破碎的作用。研究表明: 水力压裂过程中产生多向自由应力可有效压裂坚硬顶板产生的高应力区。采面回采过程中, 顶板来压后质地较软的岩层容易垮落, 坚硬顶板无法正常破碎, 因此产生应力集中区; 无法正常垮落的坚硬顶板垮落周期具有不确定性, 因此形成不可控危险源。水力压裂工艺的高压水对坚硬顶板形成的高应力区进行压裂、破碎, 从而达到高应力区卸压的作用, 保证采空区顶板在合理周期范围内正常垮落, 最终保护周围巷道。

3.2 压裂工艺

水力压裂技术治理顶板问题技术工艺主要包括: 关键层位选择、水力压裂参数钻测、压裂区水力压裂的实施。关键层位一般分布在硬度较大的砂岩层。

3.2.1 关键层位选择

关键层即上覆岩层中高应力集中岩层, 因此该层具有骨架结构作用, 通过理论技术确定关键层, 并对关键层进行压裂、卸压, 压裂效果最佳。因此正确判断关键层对于水力压裂实施有效性至关重要。

计算关键层上载荷

由组合梁原理, 可导出作用在第 1 层硬岩层上的载荷为^[9-10]:

$$q_1(x)|_m = E_1 h_1^3 \sum_{i=1}^m h_i \gamma_i / \sum_{i=1}^m E_i h_i^3 \quad (1)$$

依据岩层力学特性, 主要为裂隙带。由于岩层为沉积岩, 计算从第 n 层对第 m 层的竖向载荷, 如果上一层载荷小于下一层, 满足强度要求, 计算公式如下:

$$q_{m|n+1} < q_{m|n} \quad (2)$$

由此推断, n 层为关键层, 即坚硬岩层。

3.2.2 水力压裂参数计算

确定水力压裂参数主要考虑应力装填、岩体力学参数、地应力等, 根据基础环境参数确定水力压裂压力参数 P_k, 计算公式如下:

$$P_k = 3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_t - P_0 \quad (3)$$

式中:

σ_h —最小主应力, MPa;

σ_H —最大主应力, MPa;

σ_t —抗拉强度, MPa;

P_0 —孔隙压力, MPa;

$$P_w = P_k + P_H + P_r \quad (4)$$

式中:

P_H —压裂管路液柱压力, $P_H = \rho g H$, MPa; 计算取 0.29;

ρ —压裂液密度, kg/m³; 取 1000;

g —重力加速度, N/kg; 取 9.8;

H —压裂管路高程差, 钻孔终孔标高减去开口标高, m;

取 20;

P_r —压裂液沿程摩阻, $P_r = L \lambda_1$; 取 0.67 ~ 5.7;

L —管路长度, m; 取 50 ~ 150;

λ_1 —摩阻系数, MPa/m; 取 0.0067。

代入公式: $P_w = 16.39 \sim 21.42$ MPa。

依据压裂目标煤层岩层预估的压裂影响范围孔隙体积, 考虑压力水漏失, 按式 (5) 估算压裂水量。

$$V_{\text{水}} = 0.01 V_{\text{体}} \lambda_2 \lambda_3 \quad (6)$$

式中:

$V_{\text{水}}$ —压裂水量, m³;

$V_{\text{体}}$ —压裂影响范围煤岩体积, m³;

λ_2 —顶底板岩层吸水系数, λ_2 取值 1;

λ_3 —煤层质密, 煤层坚硬时吸水系数, λ_3 取值 0.1;

3.2.3 施工工艺

主要设备见图 1 所示, 水力压裂设备主要包括控制中心、大流量压裂泵组、压裂串、封孔器即综合参数监测系统。定向水平孔按照钻孔设计参数, 采用定向钻机钻孔。

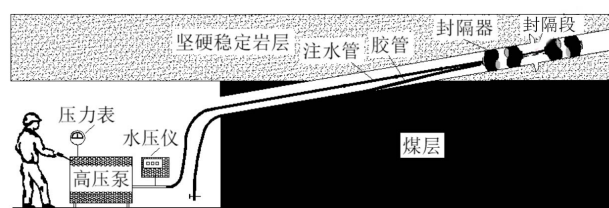


图 1 定向水平孔原位水力压裂示意图

4 水力压裂应用及效果考察

4.1 水力压裂施工

利用 0213^{±2}02 运巷内现有硐室, 初步设置 1 个综合钻场, 共 4 个定向长钻孔, 依次扰乱工作面来压步距进一步控制来压强度。运巷厚硬顶板切顶护巷钻孔布置如图 3.3 所示。其中, 1#、4# 位于 02 工作面侧, 与柔膜挡墙水平距离为 30m 与 25m, 垂高位于煤层顶板以上 10m。2#、3# 位于 1#、4# 钻孔内侧, 与 02 运巷水平距离为 60m, 垂高位于煤

层顶板以上 10m。打钻时需要考虑实际揭露的顶煤厚度。

各钻孔参数如下采用水平后退式分段压裂方式，分段压裂距离 30m 左右，分段压裂时间不小于 30min。压裂泵施工排量 1.5m³/min。各钻孔参数如表 3.1。

表 1 钻孔参数

钻孔编号	设计长度 /m	拐弯长度	水平位置	终孔高度（煤上）/m	压裂间距 /m
1#	558	138	距柔膜墙 30m	10	21
2#	531	132	距柔膜墙 60m	10	21
3#	447	138	距柔膜墙 25m	10	21
4#	495	132	距柔膜墙 60m	10	21

4.2 效果考察

4.2.1 内窥监测

本次使用的内窥设备为光纤内窥仪，具有煤安标志，该设备满足煤矿井下使用要求。设备自带光源，使用灵活，窥视的结果解像度更高，清晰度高。观测结果包括钻孔全景和前视两种场景。压裂钻孔内部水力压裂区域出现局部裂隙，产生裂隙主要为沿着钻孔轴向裂隙，部分法向裂隙向四周蔓延。

4.2.2 压力曲线

对压裂期间压裂段水压和流量统计分析，统计结果。

整体压力稳压维持在 19 ~ 35MPa，每段压裂曲线都会有一个起压过程，当压力达到岩石起裂点后便会骤变，压力的变化也证明岩石内部产生了新的裂缝，随后稳定在一个波动较小的状态，即稳压状态，稳压阶段压力为波动状态，由于此时岩体内裂隙呈蠕变状态发育，且不断向外扩展，因此曲线呈锯齿状。压裂过程中出现水压波动较大点为较大裂隙突变点，为某个点存在不均匀介质产生的大型裂隙发育所致。压裂曲线保压状态波状曲线说明高压水形成的应力一直在做功。

4.2.3 宏观观测

对压裂保护区和未压裂保护区顶板情况进行对比观测。压裂保护区巷道变形较小，未出现明显垮落、破碎现象。未压裂区域留巷变形严重，巷道破碎范围比较大。

5 结语

黄白茨煤矿 0213 ±202 综采工作面采用沿空留巷工艺开采，为防治采面回采完毕上部坚硬顶板对留巷围岩稳定性影响，采用定向长钻孔水力压裂工艺进行治理，对定向长钻孔水力压裂工艺实践应用进行深入研究，得到以下结论：

（1）0213 ±202 综采工作面采用沿空留巷开采，不采取措施回采完毕后留巷变形严重，主要为上覆坚硬顶板影响；

（2）采用水力压裂技术治理 0213 ±202 综采工作面留巷变形问题，提出关键层理论确定压裂层位，针对压裂层岩性确定水力压裂参数，详述了压裂工艺；

（3）通过内窥、压裂曲线、宏观对比观测对压裂效果进行监测，内窥监测确定了压裂区孔壁裂隙，压裂曲线监测对压裂过程进行动态观测，巷道宏观观测可直观监测压裂成果。

黄白茨煤矿 0213 ±202 综采工作面定向长钻孔水力压裂技术应用研究成果对于其他矿井顶板问题的治理具有一定指导意义。

参考文献

[1] 刘甲.坚硬顶板定向长钻孔水力压裂卸压瓦斯抽采研究[J].西部探矿工程,2025,37(01):126-127+131.
[2] 吴东园.综采工作面坚硬顶板端头悬顶水力压裂控制研究[J].能源技术与管理,2024,49(05):61-63.
[3] 杜志伟.煤层坚硬顶板定向长孔水力压裂技术的应用研究[J].石化技术,2024,31(09):331-332.