

# Simulation study on the application of hydraulic fracturing technology along the goaf

Jiangan Wang<sup>1,2</sup> Bin Wang<sup>3,4,5</sup> Fuqiang Zhang<sup>1,2</sup> Long Guo<sup>5</sup> Yongqiang Liu<sup>3,4,5</sup> Mingxuan Li<sup>3,4,5</sup>

1. National Energy Group Wuhai Energy Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China
2. Guoneng Wuhai Energy Huangbaizi Mining Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016000, China
3. Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing, 100013, China
4. China Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100013, China
5. China Coal Technology (Xi'an) Mining Engineering Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

## Abstract

The 0213<sup>upper</sup>202 fully mechanized mining face of Huangbaizi Coal Mine adopts the technique of leaving roadway along the goaf for mining. In order to prevent the destructive effect of strong dynamic pressure on the roadway after mining, hydraulic fracturing technology is used to cut the overlying hard roof slab. To ensure the reliability of the hydraulic fracturing cutting technology developed, numerical simulation research was conducted. FLAC3D simulation results showed that the optimal cutting angle for the transportation trench cutting of the 0213<sup>upper</sup>202 working faces using the long borehole hydraulic fracturing cutting technology was 45°. Hydraulic fracturing measures were developed, and four fracturing boreholes were designed with a fracturing layer at a depth of 10m from the coal seam roof. The research results and methods have certain guiding significance for the application of hydraulic roof cutting technology in other mines.

## Keywords

leaving alleys along the air; Hydraulic fracturing; Numerical simulation; Top cutting angle; Fracturing measures

# 黄白茨煤矿沿空留巷水力压裂技术应用模拟研究

王建刚<sup>1,2</sup> 王滨<sup>3,4,5</sup> 张富强<sup>1,2</sup> 郭龙<sup>5</sup> 刘永强<sup>3,4,5</sup> 李明轩<sup>3,4,5</sup>

1. 国家能源集团乌海能源有限责任公司, 中国·内蒙古 乌海 016000
2. 国能乌海能源黄白茨矿业有限责任公司, 中国·内蒙古 乌海 016000
3. 天地科技股份有限公司, 中国·北京 100013
4. 中煤科工开采研究院有限公司, 中国·北京 100013
5. 中煤科工(西安)开采工程技术有限公司, 中国·陕西 西安 710000

## 摘要

黄白茨煤矿0213<sup>上</sup>202综采工作面采用沿空留巷技术进行开采,为防止采面回采后强动压效应对留巷产生的破坏效应,采用水力压裂技术对上覆坚硬顶板进行切顶。为保证制定的水力压裂切顶技术可靠,进行数值模拟研究,FLAC<sup>3D</sup>模拟结果表明:采用长钻孔水力压裂切顶技术对0213<sup>上</sup>202工作面运输顺槽切顶最佳切顶角为45°,制定水力压裂措施,设计压裂钻孔4个,压裂层位为煤层顶板10m位置。研究成果和研究方法对于其他矿井水力切顶技术应用具有一定指导意义。

## 关键词

沿空留巷; 水力压裂; 数值模拟; 切顶角度; 压裂措施

## 1 引言

近年来,随着工程技术不断发展,无煤柱沿空留巷开

采技术逐步成熟。沿空留巷通过对上一采面运输顺槽进行维护,作为下一采面回风顺槽,开采面和备采面之间不留煤柱,大大提高煤炭资源开采率。开采区域顶板坚硬,采面上部采空区垮落会形成强矿压效应,导致留巷围岩失稳。顶板水力压裂技术以水为介质,高压水对坚硬顶板进行切顶,可以有效控制矿压灾害。针对水力压裂切顶技术,我国专家学者进行了大量研究,王华针对干河煤矿工作面切顶技术展开研究,提出长钻孔水力压裂技术应用,取得良好效果;史刘飞采用短孔压裂技术对总采面上部坚硬顶板进行卸压,卸压效

**【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》资助(项目编号:WHNY-KX-23-24)。

**【作者简介】** 王建刚(1985-),男,蒙古族,中国内蒙古乌兰察布人,本科,助理工程师,从事采矿工程研究。

果良好。聂嘉汾,张海东针对不同切顶角度下围岩动力进行理论研究,确定最优切顶角度,为水力压裂技术工程应用具有一定理论意义。其他专家学者分别针对水力压裂切顶技术进行了深入研究,分别取得丰硕成果。黄白茨煤矿 0213<sup>±</sup>202 工作面运输顺槽作为留巷,顶板坚硬,为防治采面回采完毕后垮落强动压现象对破坏留巷,拟采用水力压裂技术进行顶板切顶,为确定切顶角度,采用软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行围岩稳定性模拟研究<sup>[1]</sup>。

## 2 工程概况

0213<sup>±</sup>202 综采工作面距地表垂深约 170~185m; 0213 上 202 综采工作面北为井田西北边界煤柱; 东部为已经准备的 0213 上 206 综采工作面, 南部为 1312 轨道上山、1311 皮带上山开拓巷道, 西部为 F22 正断层及保护煤柱<sup>[2]</sup>。

0213<sup>±</sup>202 综采工作面位于 13 上 2 煤层, 与上部 12 煤层距离为 6.82~20.30m, 平均距离为 14.38m。0213 上 202 综采工作面两巷编录厚度为 1.2-1.86m, 大部分 1.40m, 为中厚层煤, 煤层较稳定。

煤层结构较简单, 夹矸一般为 1 层或不夹矸, 夹矸岩性多为炭质泥岩、粘土岩和泥岩。顶板岩性多为砂质泥岩及泥岩, 少数钻孔可见粉砂岩和细砂岩, 厚度为 0.4~9.3m。底板岩性以泥岩为主, 有少量的炭质泥岩及粘土岩, 厚度为 0.19~5.54m。

黄白茨煤矿 0213<sup>±</sup>202 综采工作面采用走向长壁、综合智能化、一次采全高、全部垮落采煤法, 采用全部垮落法控制顶板, 采空区顶板随支架前移自行垮落充填。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<sup>±</sup>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, 制约工作面安全生产, 为有效保障工作面初采厚硬顶板分层有序及时垮落, 消除工作面厚硬顶板大面积悬顶隐患, 及大面积突发垮落引发的顶板灾害, 有效控制厚硬顶板沿空留巷强烈动压导致的留巷变形破坏。

## 3 数值模拟研究

拟采用水力压裂技术对坚硬顶板进行切顶处理, 为提高保证切顶措施有效性, 采用数值模拟研究确定切顶角度。

### 3.1 力学模型

坚硬顶板视为两端固支“梁”结构, 分析模型见图 2。顶板切顶弱化后, 如图 3, 可将其视为“楔形”岩层体, 将“楔形”岩层体单独取出简化为物理模型。在弱化面位置岩体中以弱化面线为对角线取微元体, 软弱面处微元体正应力  $\sigma$  和切应力  $\tau$  为:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{1}{2}(\sigma_h + \sigma_v) - \frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\cos 2\theta \\ \tau = -\frac{1}{2}(\sigma_h - \sigma_v)\sin 2\theta \end{cases}$$

式中:  $\sigma_h$ —微元体受到的水平应力, m;  $\sigma_v$ —微元体受到的垂直应力, m;  $\theta$ —软弱面倾角, ( $^\circ$ )。

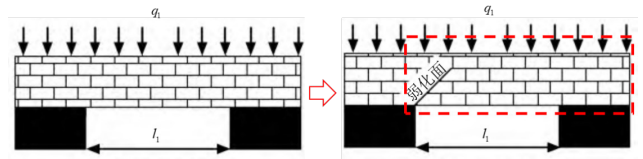


图 2 固支“梁”结构分析模型

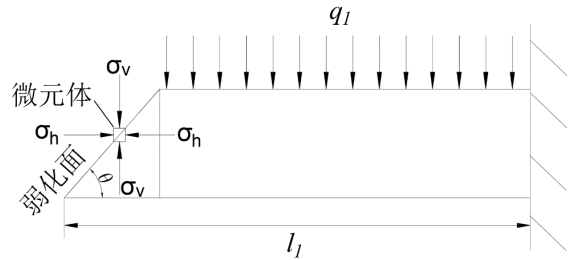


图 3 “楔形”岩层体物理模型

### 3.2 数值模拟

采用数值模拟方法进行研究确定 0213<sup>±</sup>202 工作面运输顺槽合理钻孔倾角, 采用数值模拟方法进行研究。基于现场工程地质条件, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立长 423m, 宽 100m, 高 100m 计算模型, 本模型共计 321903 个实体单元, 56820 个结构单元。同时标定水力压裂所产生的软弱面, 对模型顶部施加原岩自重应力, 底部进行全约束, 其余四面只施加水平方向约束。各岩煤层采用摩尔库伦理论分析。对模型顶部施加 10MPa 的应力, 模拟上覆岩层自重, 通过改变不同钻孔倾角, 弱化切顶区域, 获得巷道与采空区所受的最大主应力与最大位移分布情况<sup>[3]</sup>。

图 4 对比了在不同钻孔倾角下的工作面顶板及煤柱应力情况预计位移情况。可知, 当钻孔倾角为 35 $^\circ$  时, 巷道非工作帮应力集中明显, 最高达 32~34MPa, 大范围的应力集中使巷道非工作帮产生大变形, 巷道位移量最高达 1200~1500mm。当钻孔倾角逐渐增大至 55 $^\circ$  时, 该应力集中现象逐渐减弱至 10~12.5MPa, 巷道最大位移量降低至 500~600mm, 切顶效果较好。当钻孔倾角为 35 $^\circ$  时, 上覆岩层中部优先接触底板, 工作面两端仍存在空区, 切顶效果较差。当钻孔倾角增大至 45 $^\circ$  时, 上覆岩层位移量逐渐向巷道侧转移, 且顶板与底板接触较好, 未存在空区。直至倾角增加到 55 $^\circ$  后, 巷道侧空区重新显现, 这是由于弱面的存在, 导致上覆岩层沿着弱面滑移<sup>[4]</sup>。

综上所述。随着钻孔倾角的增大, 巷道非工作帮应力集中显现情况逐渐减少。同时考虑工程施工难度及成本, 最终确定 0213<sup>±</sup>202 运输顺槽水力分段压裂钻孔倾角 45 $^\circ$ 。

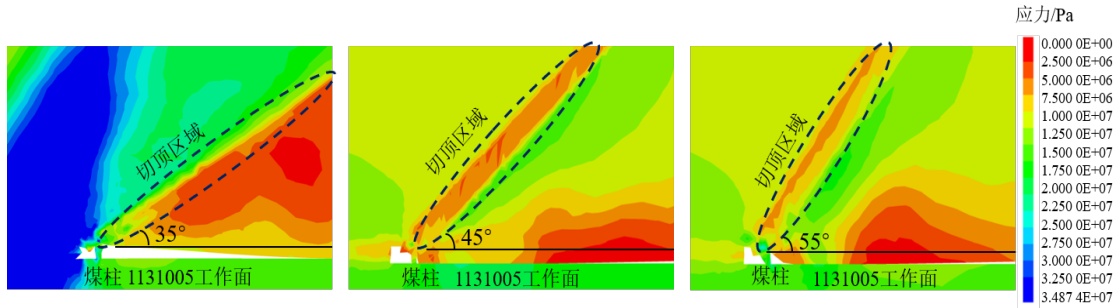


图4 不同倾角压裂钻孔顶板应力

### 4 水力压裂技术措施

根据图1可知,煤层顶板上方0~17m、8.98~14.02m、2.07~12.33范围内较厚页岩顶板不易垮落。因此确定压裂层位10m。同时根据长孔压裂裂缝扩展规律,压裂至30min时,水力裂缝扩展半径为30m,为避免破坏运顺顶板,钻孔与顺槽水平距离为30m。

根据数值模拟研究结果可知,0213<sup>±2</sup>02运输顺槽水力分段压裂钻孔倾角最优值为45°。制定0213<sup>±2</sup>02运输顺槽顶板水力压裂措施如图5所示。利用0213<sup>±2</sup>02运巷内现

有硐室,初步设置1个钻场,定向长钻孔4个,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5所示。其中,Z1、Z3位于02工作面侧,与柔膜挡墙水平距离为30m,垂高位于煤层顶板以上10m。Z2、Z4位于Z1、Z3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。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1.5m<sup>3</sup>/min。

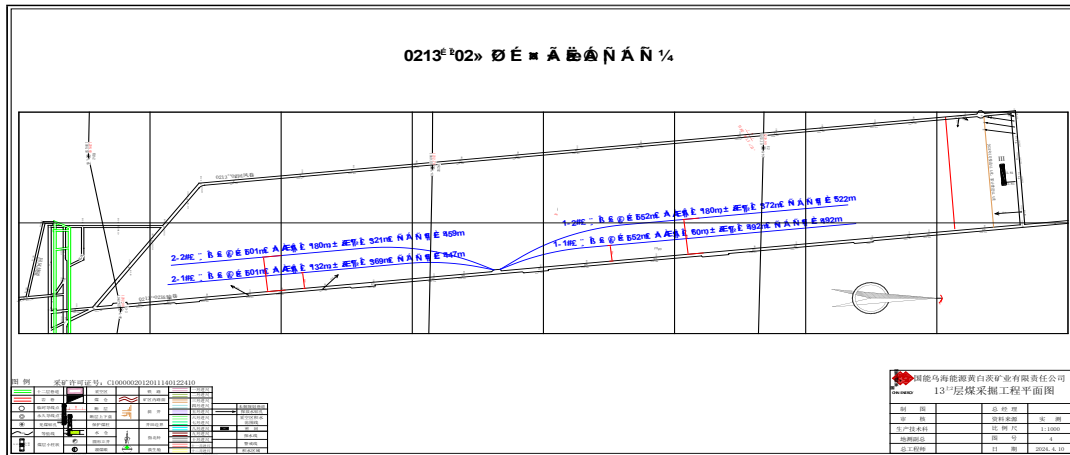


图5 运巷厚硬顶板切顶护巷水力压裂示意图

### 5 结语

黄白茨煤矿0213<sup>±2</sup>02运输顺槽顶板坚硬,存在采面回采后留巷围岩失稳危险。为保证0213<sup>±2</sup>02工作面回采过程中留巷围岩稳定,采用水力压裂切顶技术进行顶板弱化,采用数值模拟确定水力压裂切顶切角,制定水力压裂措施,得到以下结论:①对0213<sup>±2</sup>02工作面区域地质条件进行分析,确定坚硬顶板垮落产生强矿压,容易导致0213<sup>±2</sup>02工作面巷道超前应力集中、巷道变形较大,制约工作面安全生产;②采用水力压裂措施对0213<sup>±2</sup>02工作面顶板切顶切角进行数值模拟分析,确定最优切顶角度为45°;③依据数值模

拟成果制定0213<sup>±2</sup>02运输顺槽水力分段压裂措施,施工钻孔4个,钻场位于0213<sup>±2</sup>02运巷现有中部硐室。

### 参考文献

- [1] 王华.干河煤矿D工作面水力压裂切顶技术应用[J].江西煤炭科技,2025,(01):82-85.
- [2] 史刘飞.综采工作面水力压裂切顶卸压技术的应用研究[J].石化技术,2024,31(12):300-301.
- [3] 聂嘉汾,张海东.不同切顶角度下临空巷道围岩力学响应特征及控制效果[J].山西煤炭,2024,44(04):120-127.
- [4] 刘俊旭.棋盘井煤矿110901工作面末采期切顶卸压技术研究[J].能源技术与管理,2024,49(05):54-57.