

Research on the correlation between pressure and fracture development in hydraulic fracturing technology

Guangning Liang^{1,2} Bin Wang^{3,4,5} Wencheng Li^{1,2} Long Guo⁵ Yuanwu Li^{1,2}

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

In the implementation process of hydraulic fracturing technology for hard coal seam roof, the duration of single fracturing is about 1 hour, and the water pressure curve of the fracturing section fluctuates significantly. The water pressure curve is divided into three stages: pressurization, fracturing, and continuous pressure. The development of rock fractures around the fracturing section varies in different stages. To determine the correlation between pressure and crack development during hydraulic fracturing, numerical simulation was used to analyze the crack development radius at different time periods. Based on the least squares method, the pressure data and crack development radius were fitted to determine the empirical formula for pressure and crack development radius during hydraulic fracturing of the roof of Huangbaizi Coal Mine. The research results have certain guiding significance for the selection of hydraulic fracturing parameters in this mine and adjacent mines.

Keywords

hydraulic fracturing; Pressure curve; Fracturing radius; Empirical formula;

水力压裂技术压力与裂隙发育相关性研究

梁广宁^{1,2} 王滨^{3,4,5*} 李文成^{1,2} 郭龙⁵ 李元武^{1,2}

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

煤层坚硬顶板水力压裂技术实施过程中, 单段压裂持续时间约1h, 压裂段水压曲线波动明显, 水压曲线分为加压、起裂、持续给压三个阶段, 不同阶段压裂段周边岩层裂隙发育情况不同。为确定水力压裂过程中压力与裂纹发育相关性, 采用数值模拟分析不同时间段裂隙发育半径, 基于最小二乘法对压力数据和裂隙发育半径进行拟合, 确定黄白茨煤矿顶板水力压裂过程中压力和裂隙发育半径经验公式, 研究成果对于本矿井及邻近矿井水力压裂参数选择具有一定指导意义。

关键词

水力压裂; 压力曲线; 压裂半径; 经验公式;

1 引言

【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】梁广宁(1980-), 男, 中国山东泰安人, 硕士, 工程师, 从事煤矿安全、生产研究。

【通讯作者】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。

水力压裂技术主要采用高压水作为介质, 对固体介质进行破碎的一种工艺。煤矿生产过程中, 伴有瓦斯、顶板、火灾等灾害, 煤层上覆岩层存在坚硬顶板引起采面无法正常垮落时会引发顶板事故, 坚硬顶板弱化技术有效性直接关系安全生产。水作为水力压裂技术实施的介质, 不仅仅可以有效控制坚硬顶板, 同时对矿井局部火灾具有预防作用, 因此该技术在矿井顶板灾害治理过程中具有更强适用性。水力压裂技术实施过程中, 关键参数为压裂半径的选择, 由于不同

水压对不同岩体的压裂效果存在差异性，因此进行相关研究是十分必要的。关于水力压裂技术机理及应用问题，我国专家学者进行了大量研究，李全贵，王明杰，余旭，等进行了脉动水力压裂扩展特征试验研究，提出脉冲高压水控制裂缝工艺，取得良好效果^[1]。贾猛提出新型水力压裂技术，提出高压水控压水力压裂技术，针对不同岩层、埋深及相关地质条件进行水力压裂措施优化，取得良好效果^[2]。刘宗柱提出水力压裂技术在综放工作面初次放顶中应用研究，主要采用短孔压裂技术实施，取得良好效果^[3]。其他专家学者针对水力压裂工艺进行了相关研究，分别取得一定成果。黄白茨煤矿 0213[±]02 综采工作面受上部邻近采面采空区和上覆坚硬顶板影响，导致采面巷道变形严重，现采用水力压裂技术进行综合治理，为确保压裂参数有效性，进行水压与裂隙发育相关性研究。

2 工程概况

黄白茨煤矿 0213[±]02 综采工作面位于 13[±]2 煤层，上部为 12 煤层，两层煤平均距离 14.38m。上部采面 1201 工作面已回采完毕，形成采空区，两个回采工作面空间关系如

图 1 所示。

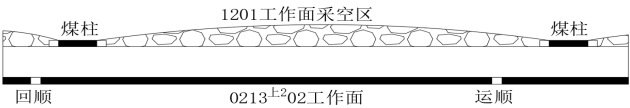


图 1 0213[±]02 工作面近距离煤层剖面图

目前 0213[±]02 综采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，采面回风巷和胶带巷超前应力集中、巷道变形较大，严重制约工作面安全生产。为控制巷道变形，采用水力压裂技术对坚硬顶板进行弱化处理，控制巷道围岩应力集中现象。煤层柱状图如图 2 所示，根据关键层理论计算，关键层为上部砂质页岩层。压裂设备为 BYW80/450 型压裂泵组，最大压裂达到 60MPa，具备一键启停功能。

3 水力压裂裂纹发育模拟研究

3.1 模拟参数

现场取岩石样本，取样 3 个，进行力学参数测试，测得顶板管关键层岩层力学参数如表 1 所示。

柱状	累深 (m)	层厚 (m)	采长 (m)	采取率 (%)	倾角 (度)	岩石名称	岩性描述
	136.83	5.12	4.90	96		12煤	黑色半亮型树脂光泽呈块状结构复杂内夹除一层砂质页岩煤尚有五层页岩0.25 (0.02) 0.60 (0.02) 0.25 (0.03) 0.92 (0.13) 1.15 (0.50) 0.40 (0.05) 0.80
	139.09	0.26	0.25	96		砂质页岩	深灰色，致密含植物叶化石及黄铁矿薄膜。夹板层薄煤线。
	156.62	17.53				砂质页岩	暗灰色，厚层状由泥质及粉砂组成含黄铁矿薄膜及镜煤植物干 下部具有交错层理在孔深149.59米处钻杆见软介无芯可能为13上3煤层见软原0.17米
	157.98	1.36	1.25	92		13上2煤	
	158.03	0.05	0.05	100		无芯	
	158.37	0.34	0.34	100		13上2煤	黑色，半亮型光泽稍暗呈块状内夹0.05米页岩一层。
	161.26	2.89	2.87	99		页岩	
	161.37	0.11	0.05	45		煤	
	162.41	1.00	0.82	82		页岩	黑色，致密含黄铁矿薄膜及砂页岩包裹体，椭圆形1-2cm分布不规则下部夹薄煤线一层含0.11炭。
	163.12	0.71	0.66	93		13上1煤	黑色，半亮型树脂光泽呈块状。
	166.61	3.49	3.38	97		细粒砂岩	暗灰色，由石英长石云母组成含炭屑及黄铁矿均呈点状分布。

图 2 煤层柱状图

表 1 力学参数表

岩性	密度 kg/m	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	粘聚力 /MPa	内摩擦角
砂质页岩	2801.62	23.72	71.5	1.91	3.02	26.62

3.2 数值模拟

采用耦合模拟软件 COMSOL Multiphysics 进行模拟研究。COMSOL Multiphysics 是一款多场耦合模拟软件,软件基于有限元理论,满足固体力学、流体力学、热力学以及多场耦合模拟要求。水力压裂技术主要采用水作为介质进行压裂,涉及流-固耦合理论,选用软件内流-固耦合模型进行数值模拟。假设流体产生的应力自由边界,压裂的岩体为均匀介质,压裂水为均匀介质,初设压裂 26MPa,钻孔直径 $\phi 120\text{mm}$ 。模型为瞬态模型,模拟周期 60min,步长 10min。建立的几何模型如图 3 所示

岩层水力压裂过程中,裂隙初始状态向水平方向发育深度较大,在竖直方向发育比较小,由于岩层为沉积岩,不同岩层之间存在分层,因此水平方向裂隙发育更快,随着水力压裂工序持续进行,压裂孔周边裂隙不断发育。分析可知,压裂 10min 时,钻孔周边孔隙率最大值为 20%,初始压裂较大,裂隙发育至 20m 位置开始逐步闭合,不再向外扩展;压裂 20min 时,钻孔周边孔隙率最大值为 25%,裂隙发育至 35m 位置开始逐步闭合;压裂 30min 时,钻孔周边孔隙率最大值为 25%,裂隙发育至 36m 位置开始逐步闭合;压裂 40min 时,钻孔周边孔隙率最大值为 25%,裂隙发育至 40m 位置开始逐步闭合;压裂 50min 时,钻孔周边孔隙率最大值为 25%,裂隙发育至 40m 位置开始逐步闭合;压裂 60min 时,钻孔周边孔隙率最大值为 25%,裂隙发育至 40m 位置开始逐步闭合。综合分析,水力压裂工序保压 26MPa 时,钻孔水平方向压裂半径预测为 40m,40m 范围之外裂隙不再变化,随着保压时间持续,60min 之内钻孔周边裂隙不断发育区间主要为 10-40m 之间。

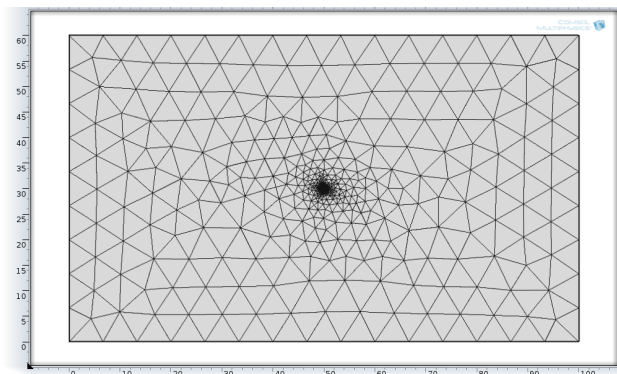


图 3 几何模型

4 压裂曲线与裂纹发育相关性分析

为进一步分析压裂曲线与裂纹发育相关性,对现场 1h

内水力压裂实施时的压裂曲线进行统计分析。黄白茨煤矿 0213[±]202 综采工作面上部施工 1# 钻孔深度 558m,压裂间距 21m。压裂的前 6 段压裂曲线、流量统计结果。

拟合公式如下:

$$10\text{min}: y = -50 + 3x$$

$$20\text{min}: y = -61 + 4.3x$$

$$30\text{min}: y = -80 + 5.5x$$

$$40\text{min}: y = -102 + 7x$$

$$50\text{min}: y = -65 + 4x$$

$$60\text{min}: y = -165 + 10.35x$$

式中: x ——水压, MPa

y ——孔隙率, %

综合分析,孔隙率随着水压增大而增大,随着时间推移,斜率呈增大趋势。水压越大,裂隙发育越明显。

5 结语

为治理黄白茨煤矿 0213[±]202 综采工作面坚硬顶板引发的次生灾害,采用水力压裂工艺对该工作面坚硬顶板进行压裂,采用数值模拟研究确定上覆岩层坚硬顶板压裂半径,实施水力压裂工艺,对压裂时水压和压裂半径进行拟合分析,确定压裂经验公式,得到以下结论:

(1) 采用数值模拟研究可知,0213[±]202 综采工作面上覆坚硬顶板水平方向压裂半径较大,预测 60min 压裂半径为 40m;

(2) 对 0213 上 202 综采工作面上覆坚硬顶板施工的 6 段压裂参数进行统计,综合分析可知,压裂时压力呈波动性,波动过程中伴生裂隙发育;

(3) 通过对不同时间段水压和裂隙发育参数进行拟合分析可知,随着压裂增大,裂隙扩散越快,对应的经验公式斜率不断增大。

综合分析,通过数值模拟研究确定了 0213[±]202 综采工作面上覆岩层不同时间段压裂半径,通过对比现场压裂曲线,得到压力-裂隙经验公式,研究成果和研究方法对于其他矿井水力压裂工艺实施具有一定指导意义。

参考文献

- [1] 李全贵,王明杰,余旭,等.流量控制式脉动水力压裂裂缝扩展特征试验研究[J].煤炭科学技术,2025,53(02):178-189.
- [2] 贾猛.郭庄井下新型水力压裂技术的应用分析[J].山东煤炭科技,2023,41(08):188-190.
- [3] 刘宗柱.水力压裂在综放工作面初采初放期间的应用[J].煤,2024,33(05):62-64.