

# Study on Increasing Permeability of Soft Coal Seams by Step-by-Step Hydraulic Fracturing Technology

Wei Qiao<sup>1,2\*</sup>, Qun Zhang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Research Institute Co., Ltd. of China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing

<sup>2</sup>State Key Laboratory of the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing

Email: \*403229474@qq.com

Received: Jul. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 23<sup>rd</sup>, 2019; published: Jul. 30<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Hydraulic fracturing has been widely used as a high-efficiency gas extraction and gas disaster prevention technology. The existing hydraulic fracturing technology mostly uses high-pressure pulse or low-pressure hydraulic to fracturing the coal around the borehole. This method can achieve good results in hard coal seam, but in soft coal seam, high-pressure water with large flow largely destroys the coal and rock mass around the borehole, which makes the soft coal seam destroyed or closed when the secondary cracks are not fully developed. Therefore, the application effect of hydraulic fracturing in soft coal seam is not significant, and even easy to cause the risk of coal extrusion or outburst. In the application of low-pressure hydraulic fracturing technology in soft coal seam, there are two main problems: one is that the influence scope is small, it is not easy to form differential pressure, and the fracture cannot be fully expanded; the other is that the fracturing construction time is long, the water consumption is large, and the drainage is difficult, which increases the cost and difficulty of gas control. On this issue, aimed at how to effectively extend the coal and rock mass in soft coal seam under the condition of fully developed cracks, a method of step-by-step jump fracturing hydraulic pressure and increasing coal seam permeability is put forward for the first time.

## Keywords

High Gas, Step by Step, Hydraulic Fracturing, Fracture Propagation, Coal Seam Permeability Enhancement

---

## 软煤层逐级跃升水力压裂增渗技术研究

乔伟<sup>1,2\*</sup>, 张群<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆

\*通讯作者。

<sup>2</sup>瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆  
Email: 403229474@qq.com

收稿日期: 2019年7月7日; 录用日期: 2019年7月23日; 发布日期: 2019年7月30日

## 摘要

水力压裂作为一种高效瓦斯抽采及瓦斯灾害防治技术得到了广泛的应用, 现有的水力压裂技术大多采用高压脉冲或者低压水力对钻孔周围煤体进行压裂。这种方式在硬煤层中能够取得较好的效果, 但在软煤层中, 大流量的高压水很大程度上破坏钻孔周围煤岩体, 致使软煤层在次生裂隙没有完全充分发育的情况下就遭到破坏、甚至闭合, 致使水力压裂效果不显著, 甚至造成煤体压出或突出危险。针对软煤层若采用低压水力压裂, 一方面影响范围小, 不容易形成压差, 裂隙无法充分扩展; 另一方面, 压裂施工时间较长, 用水量较大, 存在排水困难, 增加瓦斯治理成本和难度。因此, 针对软煤层, 如何有效使煤岩体在裂隙充分发育的情况下得到逐步延伸, 首次提出了一种煤层逐级跃升水力压裂增渗方法。

## 关键词

高瓦斯, 逐级, 水力压裂, 裂隙扩展, 煤层增渗

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现有的水力压裂技术大多采用高压脉冲或者低压水力对钻孔周围煤体进行压裂, 这种方式在高强度硬煤层中能够取得较好的效果[1] [2] [3] [4], 但在软煤层中, 大流量的高压水在进入裂隙, 很大程度上破坏钻孔周围煤岩体, 致使软煤层在次生裂隙没有完全充分发育的情况下就遭到高应力的破坏、甚至闭合, 无法进一步地充分扩展和延伸, 致使水力压裂效果不显著, 甚至造成煤体压出或突出危险。针对软煤层若采用低压水力压裂, 一方面影响范围小, 不容易形成压差, 无法实现动态平衡, 不易损伤煤体扩展裂隙, 另一方面, 压裂施工时间较长, 用水量较大, 存在排水困难, 增加瓦斯治理成本和难度。因此, 针对软煤层, 如何有效使煤岩体在裂隙充分发育的情况下得到逐步延伸, 成为了现有水力压裂方法现场应用的技术瓶颈[5] [6] [7] [8] [9]。

## 2. 逐级跃升水力压裂增透机理

首次提出一种逐级跃升水力压裂增透方法, 目的在于克服现有水力压裂技术的不足。其增透机理如下: 1) 首先根据现场煤岩体实测区域地质构造分布、煤体节理及孔裂隙发育情况将煤体强度由近及远进行分级; 2) 强度一区为钻孔周围较小范围, 采用较低一级的水压力压裂, 并保持一定的小压差 $\Delta P$ , 防止直接高压水作用压死煤体、造成裂隙闭合; 3) 随着压裂范围逐渐扩大, 由于压裂水在裂隙中流动过程中的沿程阻力作用, 裂隙尖端水压势能 $\Delta P$ 也逐渐损失, 进入强度二区, 提升压裂水压力, 为新的压裂区提供能量; 同时, 已压裂区除了裂隙尖端, 其他位置的煤体受前期水压作用接近三向受力状态, 不容易被升高的水压压死而造成裂隙闭合; 4) 煤体受到逐级升高的水压作用, 煤体的含水率不断增大, 强度进一

步降低, 裂隙网络进一步发育; 5) 逐级升高的水压提供新的能量势能, 使得先期形成的裂隙网络进一步扩大, 已压裂区煤体渗透性进一步增强; 6) 依次循环逐级跃升不断地扩大钻孔周围的塑性区逐级增大水力压裂增渗范围。

该方法既避免了高压水力直接压裂对软煤体破坏损伤, 造成裂隙闭合; 又避免了低压水力压裂的动力不足, 压裂范围较小的缺陷, 极大的提高了水力压裂在软煤层的增渗效果。

### 3. 逐级跃升水力压裂裂缝扩展模型

#### 3.1. 逐级跃升水力压裂裂缝扩展模型建立

本次模型建立仅考虑单级提升水力压裂能量势的时间段内裂缝扩展模型。

逐级跃升水力压裂裂缝扩展模型基本假设, 如下图 1。

1) 假设裂缝的横断面为长  $l$ , 宽  $h$  的长矩形; 俯视图为长轴  $l$ , 短轴为  $w$  的长椭圆形模型(如图 1 所示); 水力压裂依靠高压水提供能量, 对煤岩体产生拉应力破坏, 当水压力大于煤岩体疲劳强度后造成煤岩体失稳破裂及其原生裂隙扩展和延伸, 假设  $x$  方向为最大主应力方向,  $y$  方向为最小主应力方向, 则煤岩体原始裂隙会受到高压水作用沿  $y$  方向变高, 沿  $x$  方向延伸,  $z$  方向变宽。

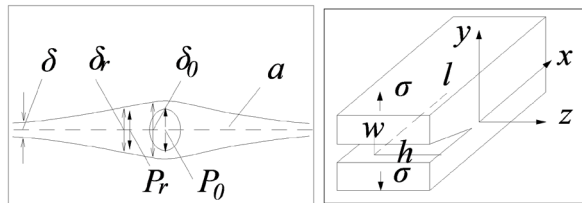


Figure 1. The schematic diagram of fracture section model

图 1. 裂缝断面模型示意图

2) 煤岩体为各向均质体; 压裂液为不可压缩的单相牛顿流体; 压裂液在裂隙中为层流; 忽略煤岩体内瓦斯气体的影响;  $h$  为裂缝高度;  $w$  为裂缝半宽度;  $l$  为压裂液扩散距离( $l$  随时间变化而延伸  $l = l(t)$ )。

3) 不考虑压裂过程中压裂液滤失量。

4) 忽略通道内的重力的影响, 压裂液流动过程中受煤岩体的反向剪切力作用, 摩擦阻力系数  $\lambda = 64/Re$  ( $Re$  为雷诺系数, 取值 0.6125)。

由上述基本假设可得压裂液造缝俯视图形态椭圆方程:

$$\frac{x^2}{l^2} + \frac{y^2}{w^2} = 1 \quad (1)$$

根据前学者阳友奎[10]研究水力压裂初始造缝的缝宽可由煤岩体断裂韧度与弹性模量表示:

$$w_0 = \frac{4}{E} K \sqrt{\frac{l}{\pi}} \quad (2)$$

式中,  $K$  为煤岩体断裂韧度;  $E$  为煤岩体弹性模量。

本次为解算水力压裂过程中裂缝扩展长度, 因此不考虑压裂过程中压裂液滤失量, 压裂液体积即造缝的裂缝体积, 可积分导出以下关系式:

$$Q = qt \approx 2h \int_0^l w(l) dx \quad (3)$$

式中,  $Q$  为压裂液流量,  $t$  为压裂时间。

由此可得造缝速度  $u$  的时间公式:

$$u = \frac{dl}{dt} = \frac{qE}{3wK\sqrt{\pi l}} \quad (4)$$

### 3.2. 逐级跃升水力压裂裂缝扩展数值模拟

基于上述分析, 采用 PFC 数值模拟软件进行逐级跃升水力压裂数值模拟, 煤层裂隙扩展增渗过程如图 2, 图 3 所示。

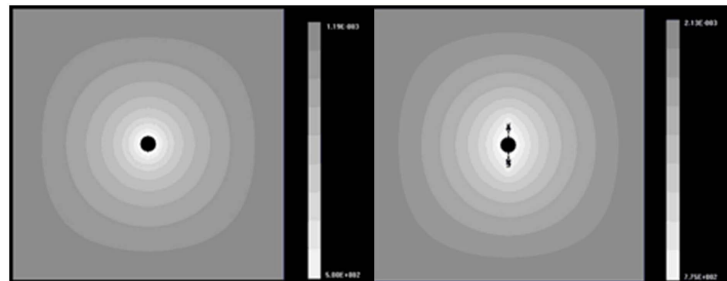


Figure 2. The fracture propagation in initial hydraulic fracturing  
图 2. 初始水力压裂裂缝扩展

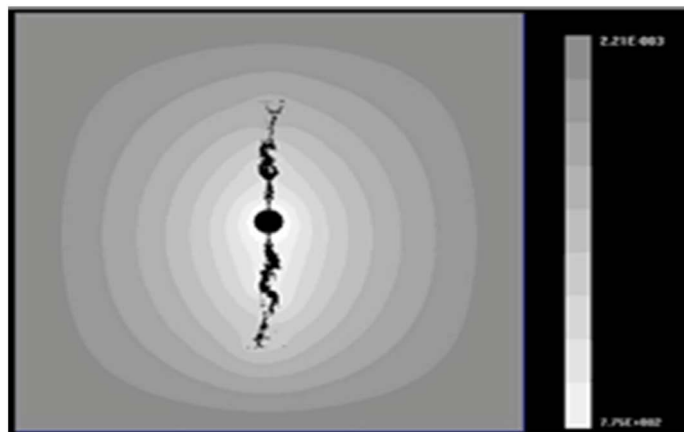


Figure 3. The fracture propagation in step-by-step jump hydraulic fracturing  
图 3. 逐级跃升水力压裂裂缝扩展

由于煤层天然割理裂隙发育, 通过数值模拟分析研究表明煤层具有较强的应力敏感性[11], 在逐级跃升压裂过程中, 煤层裂隙随着能量势的逐级提升而逐步扩展, 而且始终沿着最大主应力方向扩展延伸, 增渗效果非常明显。

### 4. 裂缝扩展模型分析解算

忽略通道内的重力的影响, 压裂液流动过程中受煤岩体的反向剪切力作用, 摩擦阻力系数  $\lambda = 64/Re$  ( $Re$  为雷诺系数, 取值 0.6125), 流体微元段上两端压力分别为  $p$ 、 $p + dp$ , 段上压差为  $dp$ , 则压裂液运动方程可表示[12] [13] [14] [15] [16]:

$$\tau = z\lambda \frac{dp}{dx} = \tau_s + \mu\gamma \quad (5)$$

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{\mu} \left( z\lambda \frac{dp}{dx} - \tau_s \right) \quad (6)$$

式中,  $\mu$  为塑性黏度,  $\tau$  流体的剪切屈服强度;  $\gamma$  为剪切速率,  $\gamma = du/dy$ , 则沿  $z$  方向对裂缝断面进行积分, 将公式(5)、(6)代入公式(4)可计算造缝平均速度, 即压裂液平均流速。

压裂过程中, 始终裂缝尖端断面平均流速和裂缝延伸速度相等, 则可得逐级跃升压力过程中每级跃升的水力压力函数:  $f(p) \approx (E、K、\mu、\tau、\gamma)$ 。

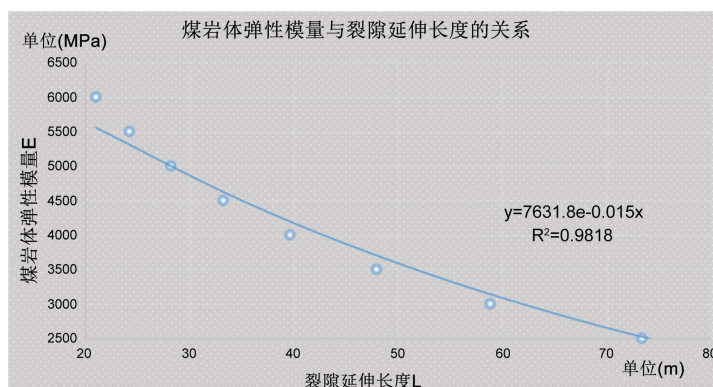
当高压水力压裂泵提供压力在裂缝尖端产生的拉应力等于裂缝尖端垂直地应力时, 则压裂液停止流动, 即裂缝扩展至最大值  $L_{max}$ :

$$L_{max} = \left( \left( 64E^2 q^2 \mu^2 - 12\pi^{\frac{1}{2}} w^5 k \lambda^2 \tau (w^2 - 4z_0^2) \left( \pi^{\frac{1}{2}} \Delta p k \lambda^3 (8z_0^3 - w^3) + 8Eq\mu l_0^{\frac{1}{2}} \right) - 3\pi^{\frac{1}{2}} l_0 w^4 \lambda^2 \tau (w^2 - 4z_0^2) \right)^{\frac{1}{2}} + 8Eq\mu \right)^2 / \left( 36\pi k^2 \lambda^4 \tau^2 (w^2 - 4z_0^2)^2 \right)$$

通过 Matlab 软件编程解算逐级跃升过程中每级水力压裂提供的压力  $P$  与裂缝扩展长度  $L_{max}$ , 解算参数如表 1 所示, 如图 4、图 5、图 6 所示。

**Table 1.** The calculating parameter table of crack propagation model  
**表 1.** 裂缝扩展模型解算参数表

模拟参数	各项值			
$Q$ 压裂液流量: $m^3/s$	200			
$E$ 煤岩体弹性模量: MPa	3500			
$u$ 流体塑性黏度: MPa.s	0.69			
$k$ 煤岩体断裂韧度: $MPa.m^{0.5}$	13.8			
$\tau$ 流体的剪切屈服强度: MPa	0.96			
$a$ 钻孔半径: m	0.047			
$z$ 宽度: m	0.2	0.18	0.16	0.14
$p$ 压力差: MPa	20	15	10	5



**Figure 4.** The elastic modulus of coal and rock mass  
**图 4.** 煤岩体弹性模量/MPa

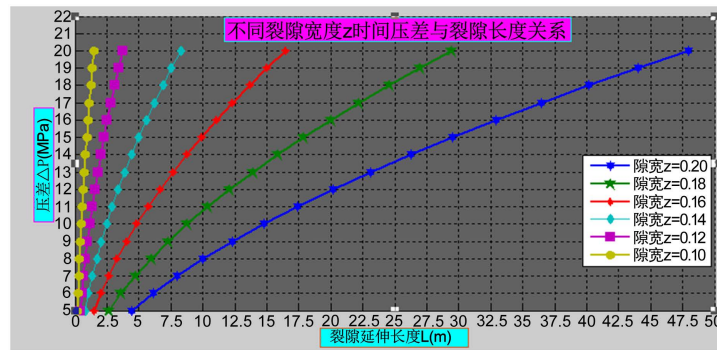


Figure 5. The fracture propagation and extension relationship under different fracture width conditions  
图 5. 不同裂隙宽度条件下与裂隙扩展延伸关系

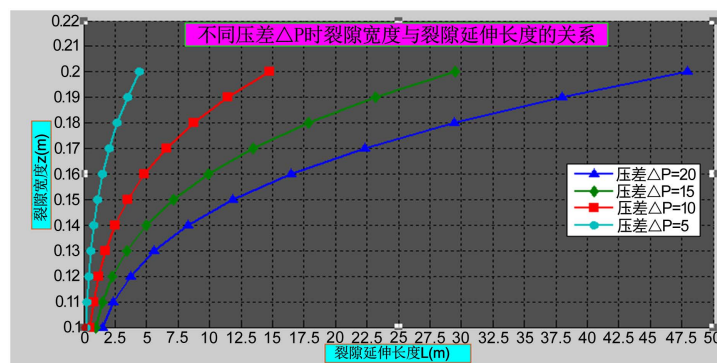


Figure 6. The fracture propagation and extension relationship under different pressure difference conditions  
图 6. 不同压差条件下裂隙扩展延伸关系

## 5. 结语

1) 提出了一种逐级跃升水力压裂增渗方法, 该方法既避免了高压水力直接压裂对软煤体破坏损伤, 造成裂隙闭合; 又避免了低压水力压裂的动力不足, 压裂范围较小的缺陷, 极大地提高了水力压裂增渗效果和应用范围。

2) 得出了逐级跃升水力压裂过程中每级跃升的压力与裂缝扩展长度模型。煤层具有较强的应力敏感性, 在逐级跃升压裂过程中, 煤层裂隙随着能量势的逐级提升而扩展, 且始终沿着最大主应力方向扩展延伸, 增渗效果非常明显。

3) 裂缝扩展过程中煤岩体弹性模量、逐级跃升的压差, 对裂缝扩展长度影响较大, 且初始裂隙宽度和裂隙高度对逐级跃升水力压裂裂隙扩展增渗效果有一定的影响。针对逐级跃升压力过程中每级压裂时间及流量控制有待下一步应用研究。

## 基金项目

国家重点研发计划(课题编号: 2016YFC0801404); 重庆市“科技创新领军人才支持计划”(CSTCKJCXLJRC14)。

## 参考文献

- [1] 章敏, 王星华, 汪优, 等. Herschel-Bulkley 浆液在裂隙中的扩散规律研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 815-820.
- [2] 李宗福, 孙大发, 陈久福, 等. 水力压裂-水力割缝联合增透技术应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 72-76.

- [3] 卢义玉, 葛兆龙, 李晓红, 等. 脉冲射流割缝技术在石门揭煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(1): 55-58+69.
- [4] 孙东玲, 胡千庭, 苗法田. 煤与瓦斯突出过程中煤-瓦斯两相流的运动状态[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 452-458.
- [5] Creedy, D. and Tilley, H. (2003) Coalbed Methane Extraction and Utilization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **217**, 19-25. <https://doi.org/10.1243/095765003321148655>
- [6] Perkins, T.K. and Kern, L.R. (1961) Width of Hydraulic Fracture. *Journal of Petroleum Technology*, **13**, 937-949. <https://doi.org/10.2118/89-PA>
- [7] 李亭, 杨琦, 陈万钢, 等. 煤层气压裂综合滤失系数的影响因素评价[J]. 煤炭科学与技术, 2013, 41(3): 81-83.
- [8] 张小东, 张鹏, 刘浩, 等. 高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 574-579.
- [9] 王春光, 张东旭. 深部煤矿开采瓦斯综合治理技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 11-14.
- [10] 阳友奎, 肖长富. 水力压裂裂缝形态与缝内压力分布[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1995, 18(3): 20-26.
- [11] 许露露, 崔金榜, 黄赛鹏, 等. 煤层气储层水力压裂裂缝扩展模型分析及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2068-2074.
- [12] 欧阳进武, 张贵金, 刘杰. 劈裂灌浆扩散机理研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1328-1335.
- [13] 林柏泉, 孟凡伟, 张海宾. 基于区域瓦斯治理的钻割抽一体化技术及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 75-79.
- [14] Osorio, J.G., Chen, H.-Y. and Teufel, L.W. (1997) Numerical Simulation of Coupled Fluid-Flow/Geomechanical Behavior of Tight Gas Reservoirs with Stress Sensitive Permeability. *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 30 August-3 September 1997, 1-15.
- [15] 徐刚, 彭苏萍, 邓绪彪. 煤层气井水力压裂压力曲线分析模型及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 174-178.
- [16] 沈春明, 林柏泉, 吴海进. 高压水射流割缝及其对煤体透气性的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2058-2063.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7301, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [me@hanspub.org](mailto:me@hanspub.org)