

8-25-2019

## Technology and application of indirect fracturing in CBM vertical well of broken and soft coal seam with low permeability

ZHOU Jiajia

*Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

Z. (2019) "Technology and application of indirect fracturing in CBM vertical well of broken and soft coal seam with low permeability," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 3.

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.002

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/3>

This Special Issue Article is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

文章编号: 1001-1986(2019)04-0006-06

# 碎软低渗煤层煤层气直井间接压裂技术及应用实践

周加佳

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 为了解决碎软低渗煤层压裂改造过程中煤粉产出和压裂裂缝不易延伸的技术瓶颈, 采用地应力和数值模拟分析方法, 对煤层气井间接压裂适应性及裂缝展布规律进行分析研究, 并在湖南洪山殿矿区进行了间接压裂工程实践。结果表明: 间接压裂可有效提高碎软低渗煤层的压裂改造效果, 增加压裂裂缝长度, 当顶底板为脆性砂岩时, 更加有利于间接压裂; 洪山殿矿区 HC01 井取得了单井产气量 1 850 m<sup>3</sup>/d 的良好产气效果, 表明“大排量、大砂量、高前置液比、中砂比”的活性水间接压裂技术适用于碎软低渗煤层的增产改造; 同时, 可钻桥塞电缆射孔联作技术的应用可有效缩短煤层气井多煤层段压裂改造的施工周期, 提高压裂施工时效性。



**关键词:** 碎软低渗煤层; 煤层气; 间接压裂; 桥塞射孔联作技术; 洪山殿矿区; 湖南省  
**中图分类号:** TE357 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.002

## Technology and application of indirect fracturing in CBM vertical well of broken and soft coal seam with low permeability

ZHOU Jiajia

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of pulverized coal output and fracturing fracture not easy to extend during fracturing operation in the broken and soft coal seam with low permeability, the adaptability and fracturing fracture distribution of CBM during indirect fracturing are studied by means of in-situ stress and numerical simulation, and the engineering practice of indirect fracturing has been tested in Hongshandian mining area of Hunan Province. The results show that indirect fracturing can effectively improve the fracturing effect of the broken and soft coal seam with low permeability, and increase the fracture length. When the roof and floor are lithologically brittle sandstone, it is more conducive to indirect fracturing. Well HC01 has achieved a good gas production efficiency of 1 850 m<sup>3</sup>/d, indicating that the active water indirect fracturing technology of "large displacement, large sand volume, high pre-pad ratio and medium sand ratio" is suitable for fracturing of the broken and soft coal seam with low permeability. At the same time, the application of drilling bridge plug cable perforation technology can effectively shorten the construction period of multi-seam fracturing in CBM well and improve the efficiency of fracturing operation.

**Keywords:** broken and soft coal seam with low permeability; coalbed methane; indirect fracturing; bridge plug perforation combination technique; Hongshandian mining area; Hunan Province

我国陆上煤层埋深 2 000 m 以浅煤层气原地资源量为 32.86 万亿 m<sup>3</sup>, 煤层气资源量十分丰富<sup>[1-2]</sup>。但是, 碎软低渗煤层在我国分布却非常广泛, 约占我国煤炭资源总量的 60%, 碎软低渗煤层具有低强度、低弹性模量和高泊松比的力学特征, 煤体塑性大且易破碎, 其压裂裂缝很难延伸到煤层远端形成

长效缝, 整体不利于压裂改造。截至目前, 包括安徽、河南、山西以及湖南等地进行了大量的碎软低渗煤层煤层气开发工程实践, 抽采效果主要表现为单井产量低、稳产期短、衰减快、抽采效率低等特点<sup>[3-4]</sup>, 制约我国煤层气产业化快速发展且难以满足煤矿安全生产对快速降低煤层瓦斯含量的要求。针

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 国家科技重大专项任务(2016ZX05045-002-004)

**Foundation item:** National Science and Technology Major Project(2016ZX05045-002-004)

作者简介: 周加佳, 1984 年生, 男, 安徽巢湖人, 硕士, 助理研究员, 从事煤层气开发与压裂增产方面的研究工作。

E-mail: zhoujiajia@cctegxian.com

引用格式: 周加佳. 碎软低渗煤层煤层气直井间接压裂技术及应用实践[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 6-11.

ZHOU Jiajia. Technology and application of indirect fracturing in CBM vertical well of broken and soft coal seam with low permeability[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 6-11.

对碎软低渗煤层压裂中存在的问题,在国内外煤层气直井压裂中提出并应用了间接压裂技术<sup>[5-9]</sup>,选择对高弹性模量和低泊松比的煤层顶底板岩层进行射孔和压裂,可有效提高压裂裂缝的延伸长度和导流能力,实现对煤层的间接压裂改造,取得了良好效果。通过对间接压裂技术的适应性和裂缝展布规律分析,并结合间接压裂技术在湖南洪山殿矿区的工程实践,旨在探索一套适合碎软低渗煤层煤层气直井间接压裂高效抽采技术工艺,为湖南以及类似地区的煤层气开发探索新的方法和思路。

## 1 碎软低渗煤层压裂改造技术瓶颈

### a. 煤粉产出

碎软煤层受井筒应力集中和钻井中钻头挤压、钻井液冲刷作用的影响,会在近井地带形成煤屑、煤粉;在压裂裂缝延伸过程中,煤层受排量过大的压裂液冲刷及砂子的挤磨会形成煤粉,堵塞裂缝通道;且煤粉和压裂砂的镶嵌作用使砂子堆积在井筒周围不能形成长效缝,无法形成有效的渗流通道<sup>[10-12]</sup>。以上原因造成的煤粉产出会导致碎软煤层压裂裂缝较短,裂缝通道堵塞较严重,压裂效果差。同时,在排采过程中大量产出的煤粉堵塞煤层气运移通道,导致排采稳产期短,产气量衰减迅速。

### b. 压裂裂缝不易延伸

碎软煤层具有低弹性模量、高泊松比以及煤体塑性大的特征,直接对煤层进行射孔压裂,产生的煤粉易堵塞通道,裂缝很难延伸到煤层远端形成长效缝,导致压裂改造效果差,单井产量较低。

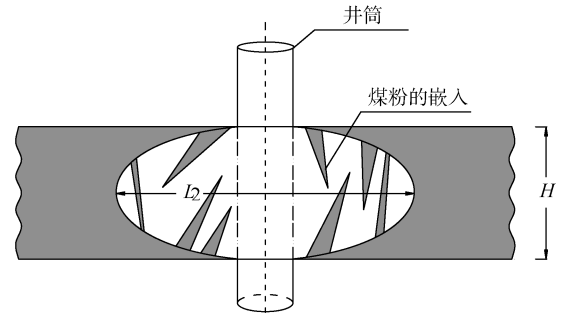
针对碎软低渗煤层压裂改造存在的技术瓶颈,提出了煤层气直井间接压裂技术。采取对高弹性模量和低泊松比的煤层顶底板岩层进行射孔和压裂,减少压裂过程中煤粉的产出,有利于裂缝长度延伸,增加泄流面积(图1)。通过压裂改造在煤层及其顶底板中形成“高速渗流通道”,提高压裂裂缝的导流能力,从而实现有效增产。

## 2 煤层间接压裂适应性及裂缝展布规律分析

### 2.1 间接压裂适应性

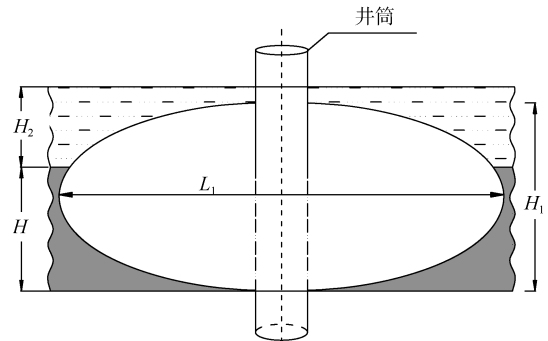
煤层间接压裂技术适应性取决于煤层顶底板岩性组合,煤层顶底板岩性大致可分为砂岩、粉砂岩、细砂岩及泥岩。由于地层的应力分布决定了水力压裂裂缝的产状和延伸方向,压裂裂缝在垂向上的延伸与层间最小水平主应力大小有关<sup>[13-14]</sup>。根据沉积岩地应力测试认为:地层中最小水平主应力值与岩层泊松比呈正相关关系,各岩性泊松比大小依次为

砂岩<细砂岩<粉砂岩<煤层<泥岩<sup>[15-16]</sup>。



注:泄流面积 $A_2 < H \times L_2$ ,其中 $H$ 为煤层厚度, $L_2$ 为裂缝长度

(a) 碎软煤层压裂



注:泄流面积 $A_1 < H_1 \times L_1$ ,其中 $H$ 为煤层厚度; $H_1$ 为裂缝高度;  
 $H_2$ 为顶板厚度; $L_1$ 为裂缝长度

(b) 煤层顶板压裂

图1 碎软低渗煤层压裂裂缝对比示意图

Fig.1 Fracturing fracture contrast of broken and soft coal seam with low permeability

综上所述,煤层顶底板岩性为砂岩、细砂岩和粉砂岩的脆性岩层,其泊松比低、弹性模量高,岩层最小主应力小于煤层的最小主应力,适合压裂裂缝延伸,此类岩性顶底板比较适于进行间接压裂施工,其压裂裂缝的延伸效果好,能够形成好的煤层气解吸和渗流通道。而脆性矿物含量少的厚层泥岩比煤层的可塑性更强,最小主应力大于煤层,此类泥岩是很好的遮挡层,不适合实施间接压裂,只有当顶底板泥岩脆性指数高于40时,间接压裂相比于直接压裂的优势才得以体现<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 间接压裂裂缝展布规律

水力压裂裂缝形态受地应力大小、岩石力学特性和压裂工艺技术的综合影响,其中地应力和岩石力学特性是控制裂缝形态的本质地质因素<sup>[19-20]</sup>。湖南洪山殿矿区HC01井6煤厚度2.74 m,其顶板为5.87 m泥岩,底板为4.2 m细砂岩,适合进行间接压裂施工。通过地应力测井和顶底板岩石力学测试得到6煤及其底板岩石力学参数(表1)。由表1可知:

煤层及其底板的垂向应力均大于水平应力,表明压裂过程中将形成垂直裂缝,有利于压裂裂缝从底

板向上延伸到 6 煤中；6 煤底板相对煤层的泊松比低、弹性模量高，底板最小主应力小于煤层的最小主应力，有利于压裂裂缝沿脆性较大的底板细砂岩横向延伸形成长缝，有效提高裂缝导流能力。因此，采取间接压裂施工工艺对 6 煤及其底板进行压裂改造，形成的裂缝有利于纵向向上煤层延伸，同时也能形成较长的压裂裂缝，达到较好的增产效果。

为了进一步研究煤储层间接压裂施工工艺技术

对裂缝展布规律的影响，对湖南洪山殿矿区 HC01 井 6 煤进行压裂裂缝模拟分析，模拟排量为  $8 \text{ m}^3/\text{min}$ ，压裂施工规模相同的条件下，分别设计不同压裂方式下 4 种不同射孔位置(表 1)的压裂模拟方案，运用 FracproPT 压裂模拟软件对 6 煤 4 种不同射孔压裂方案进行裂缝模拟分析，得到不同的压裂裂缝数据(表 2)和展布图(图 2)(以 6 煤和 6 煤+2 m 底板为例)。

表 1 湖南洪山殿矿区 HC01 井 6 煤及其底板岩石力学参数

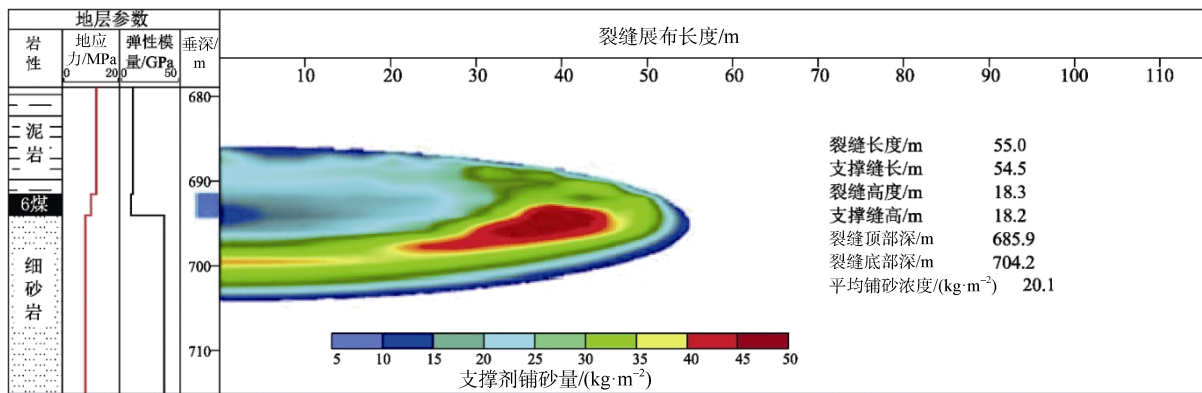
Table 1 Rock mechanics parameters of No.6 coal seam and its floor in well HC01

地层	厚度/m	垂直应力/MPa	最小水平主应力/MPa	弹性模量/ $10^4$ MPa	泊松比
6号煤	2.74	16.75	10.29	0.83	0.38
底板细砂岩	4.20	16.78	9.78	3.73	0.26

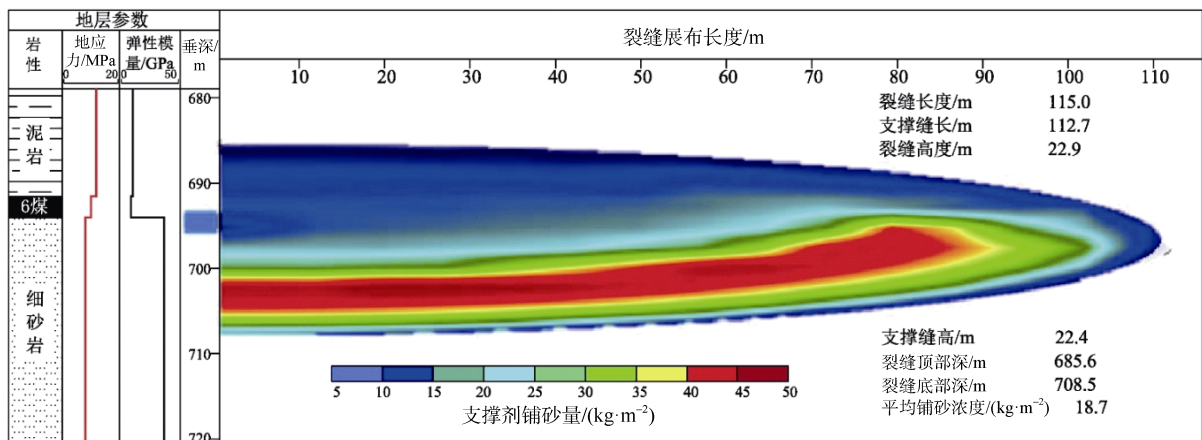
表 2 不同射孔位置压裂裂缝参数数据表

Table 2 Fracturing parameters of different perforation position

压裂方式	射孔位置	裂缝长度/m	支撑缝长/m	裂缝高度/m	支撑缝高/m	裂缝顶部深/m	裂缝底部深/m
直接压裂	6煤	55.0	54.5	18.3	18.2	685.9	704.2
	6煤底部+1 m 底板	73.0	72.5	23.7	23.5	685.2	708.7
间接压裂	6煤底部+2 m 底板	115.0	112.7	22.9	22.4	685.6	708.5
	6煤底部+3 m 底板	121.8	118.5	24.2	23.5	685.0	709.2



(a) 射孔6煤煤层



(b) 射孔6煤底部+2m底板

图 2 不同射孔位置压裂裂缝展布对比示意图

Fig.2 Fracturing fracture distribution contrast diagram of different perforation position

根据4种不同射孔位置的压裂裂缝模拟结果可以看出, 直接对6号煤层进行射孔压裂改造, 裂缝长度较短, 压裂裂缝很难延伸到煤层远端形成长效缝; 采用间接压裂方式对6煤底部和底板进行射孔压裂改造, 压裂形成的裂缝延伸效果好, 能够相对延伸到煤层远端, 更加有利于提高压裂缝的导流能力; 从表(2)可以看出, 射孔6煤底部+3 m底板的裂缝长度比射孔6煤底部+2 m底板的裂缝长度增幅不大。因此, 采用间接压裂方式, 选择射孔6煤底部+2 m底板的射孔方式, 有利于压裂裂缝沿底板细砂岩横向延伸形成长缝并沟通煤层, 以达到增产改造的最佳效果。

### 3 工程实践及其抽采效果

#### 3.1 地质概况

为了推动湖南省煤层气勘探开发的进程, 结合“十三五”国家科技重大专项《碎软低渗煤层地面煤层气抽采技术与装备》的研究, 在湖南娄底市洪山殿矿区部署1口煤层气试验直井HC01井, 旨在深入了解研究区主要可采煤层的煤储层特征和煤层气勘探开发潜力。

HC01井含煤地层主要位于二叠系龙潭组(P<sub>2</sub>l), 该井完井深度750 m, 自上而下共钻遇6层煤层, 其中, 压裂改造目标煤层为2、3、4和6煤。对6号煤进行注入/压降试井, 测试6煤的渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 结合钻井取心观测, 2、3、4和6煤煤体结构整体呈现为糜棱结构煤, 手捻成粒状、粉状。煤层顶板多为泥岩, 底板以砂质泥岩、细砂岩和粉砂岩为主。通过气含量测试分析, 煤层整体气含量

较高, 其中, 4煤气含量最高为 $16.29 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

#### 3.2 压裂工艺技术分析

##### 3.2.1 煤层气间接压裂技术

湖南洪山殿矿区HC01井压裂改造目标煤层为2煤、3煤、4煤和6煤, 整体表现为碎软低渗的特点。根据煤层顶底板岩性特征可知, 3煤顶底板均为泥岩, 不适合进行间接压裂施工, 选择直接对3煤进行射孔压裂; 对2煤、4煤和6煤及其底板细砂岩进行间接压裂施工。压裂施工均采用活性水压裂液, 并采用复合支撑剂技术, 加入20~40目(425~850  $\mu\text{m}$ )和16~20目(850~1 000  $\mu\text{m}$ )石英砂。前置液比例大于45%, 施工排量7~8  $\text{m}^3/\text{min}$ , 加砂规模9~15  $\text{m}^3/\text{m}$ , 平均砂比10%~12%(表4)。对比施工压力分析可知, 3煤平均施工压力16.69 MPa为该地区对3煤直接压裂的正常施工压力, 而对2号、4号和6号煤进行间接压裂的施工压力均大于3煤的施工压力, 且远大于各煤层的正常施工压力。由此可见, 对2、4和6煤进行间接压裂有利于压裂裂缝沿底板细砂岩横向延伸形成长缝并沟通煤层, 达到良好的增产改造效果。

同时, 压裂施工过程中对HC01井3煤和6煤进行了微地震裂缝监测, 监测结果显示, 采用间接压裂施工的6煤层平均裂缝半长为100.9 m, 大于直接压裂的3煤层平均裂缝半长70.6 m。因此, 针对碎软低渗煤层所采用的“大排量、大砂量、高前置液比、中砂比”的活性水间接压裂工艺技术能够有效解决压裂施工过程中碎软低渗煤层易伤害、压裂液滤失量大、压裂缝短、支撑剂镶嵌严重的难题, 增加压裂裂缝的延伸长度和导流能力, 实现高效压裂改造的目的。

表3 湖南洪山殿矿区HC01井目标煤层基本参数表

Table 3 Basic parameters of the target coal seams in well HC01

煤层	煤层深度/m	煤层厚度/m	气含量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	顶板岩性	底板岩性
2煤	567.78~570.76	2.98	14.66	炭质泥岩	细砂岩
3煤	587.27~592.32	5.05	11.09	泥岩	泥岩
4煤	622.85~624.27	1.42	16.29	泥岩	细砂岩
6煤	691.74~694.48	2.74	15.68	泥岩	细砂岩

表4 湖南洪山殿矿区HC01井煤层压裂施工参数统计表

Table 4 Statistics of fracturing operation parameters of coal seams in well HC01

煤层	压裂方式	施工压力/MPa	排量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	砂量/ $\text{m}^3$	平均砂比/%
2煤	间接压裂	16.83~19.15/17.33	7~8	32.59	12.53
3煤	直接压裂	16.01~17.61/16.69	7~8	46.91	10.95
4煤	间接压裂	18.60~36.83/24.83	7~8	24.57	10.15
6煤	间接压裂	20.39~25.17/22.21	7~8	37.92	10.66

注: 表中16.83~19.15/17.33表示最小~最大值/平均值, 其他同。

##### 3.2.2 煤层气并可钻桥塞电缆射孔联作技术

由于HC01井需要进行多层段压裂施工, 采用

常规的填砂分压方式, 存在填砂难度大、封隔效果差及压裂施工作业工期长等问题。在贵州官寨多煤

层地区，2014-10-25 至 2014-12-06 采用填砂分压方式对 GZ01 井的 4 煤、6+9 煤及 11+12+13 煤层进行多层段压裂施工，由于碎软煤层放喷时间长造成 GZ01 井整个压裂施工周期共耗时 43 d<sup>[21]</sup>。因此，为了实现多层段压裂改造，保证分层压裂的针对性、准确性和时效性，本次 HC01 井压裂采用煤层气直井可钻桥塞电缆射孔联作技术(图 3)，于 2017-12-04 至 2017-12-07 对 2 煤、3 煤、4 煤和 6 煤进行多层段压裂施工，压裂施工周期 4 d，可在带压情况下进行作业施工，4 段压裂目标煤层可实现连续压裂，压后同时放喷，一趟钻塞，相比填砂分压可大幅缩短压裂作业周期，提高压裂施工的时效性。

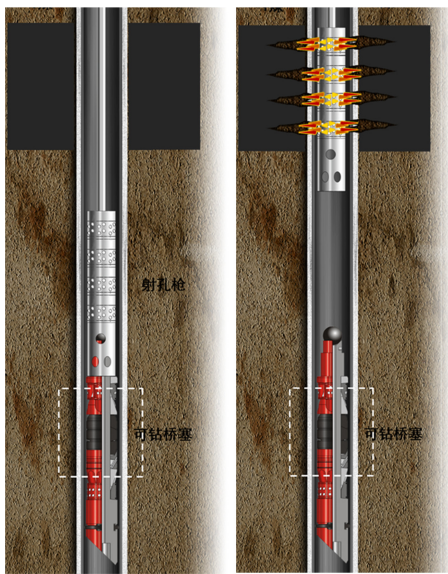


图 3 可钻桥塞电缆射孔联作技术示意图

Fig.3 Diagram of drillable bridge plug cable perforation co-operated technology

可钻桥塞电缆射孔联作技术在洪山殿矿区 HC01 井多层压裂施工的成功应用表明，该技术工艺在煤层气直井多煤层段压裂改造施工中有较好的适用性，可有效缩短煤层气井多煤层段压裂改造的施工周期，提高压裂施工时效性。

### 3.3 抽采效果评价

湖南省前期煤层气勘探开发程度较低且单井产量低。国土资源部中南石油地质局于 1991—1995 年在洪山殿矿区实施了两口煤层气试验井湘煤 1 井和湘煤 2 井，其瞬时最高产气量为 158~600 m<sup>3</sup>/d，且稳产时间较短<sup>[22]</sup>。与之进行对比，本次 HC01 井选用 GLB120-CBM-18 型螺杆泵进行排采作业，整个排采过程采用定压稳排方式，严格把握“平稳、安全、阶段性调整”的原则，进行分阶段精细化排采管理，最大限度地使煤层充分解吸，达到高产稳产的效果。自 2018-02-05 开始排采，初期上产速度快，单井最

高产气量达到 1 850 m<sup>3</sup>/d，实现了该地区煤层气井单井产气量的巨大突破。截至 2018-10-15，稳定产气量为 1 138 m<sup>3</sup>/d，累计产气量 19.09 万 m<sup>3</sup>，且仍保持高产稳产的产气潜力(图 4)。

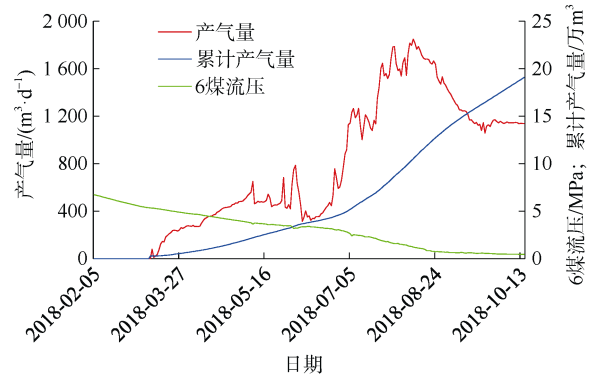


图 4 湖南洪山殿矿区 HC01 井生产数据曲线图

Fig.4 Production curve of well HC01 in Hongshandian mining area of Hunan

煤层气直井间接压裂技术在湖南洪山殿矿区 HC01 井进行工程实践并取得了良好的产气效果，其成功应用对湖南及类似地区碎软低渗煤层储层煤层气开发具有一定的借鉴和实践指导意义。

## 4 结论

- a. 碎软低渗煤层具有低强度、低弹性模量和高泊松比的力学性质，煤粉产出和压裂裂缝不易延伸是制约煤层气压裂改造效果的主要技术瓶颈。
- b. 间接压裂可有效提高碎软低渗煤层的压裂改造效果，增压裂裂缝长度。当煤层顶底板为脆性砂岩岩层时，更有利于进行间接压裂改造，其压裂裂缝的延伸效果较好。
- c. 可钻桥塞电缆射孔联作技术工艺可有效缩短煤层气井多煤层段压裂改造的施工周期，提高压裂施工的时效性。
- d. 湖南洪山殿矿区地面煤层气开发取得了单井产气量达到 1 850 m<sup>3</sup>/d 的良好产气效果，工程实践表明“大排量、大砂量、高前置液比、中砂比”的活性水间接压裂工艺技术适用于碎软低渗煤层的增产改造，对湖南以及类似地区的煤层气开发具有一定的指导意义。

## 参考文献

[1] 张新民,赵靖舟,张培河,等. 中国煤层气技术可采资源潜力[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(4): 23–26.  
ZHANG Xinmin, ZHAO Jingzhou, ZHANG Peihe, et al. China coalbed gas technically recoverable resource potential[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(4): 23–26.

- [2] 李景明,史保生,巢海燕,等. 中国煤层气资源特点及开发对策[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 9-13.  
LI Jingming, SHI Baosheng, CHAO Haiyan, et al. Characteristics of coalbed methane resource and the development strategies[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4): 9-13.
- [3] 宋岩,张新民,柳少波. 中国煤层气基础研究和勘探开发技术新进展[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 1-7.  
SONG Yan, ZHANG Xinmin, LIU Shaobo. Progress in the basic studies and exploration and development techniques of coalbed methane in China[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 1-7.
- [4] 朱庆忠,杨延辉,左银卿,等. 中国煤层气开发存在的问题及破解思路[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 96-100.  
ZHU Qingzhong, YANG Yanhui, ZUO Yinqing, et al. CBM development in China: Challenges and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 96-100.
- [5] AMOLD III W T. Indirect hydraulic fracturing method for an unconsolidated subterranean zone and a method for restricting the production of finely divided particulates from the fractured unconsolidated zone: US, US 6644407 B2[P]. 2003.
- [6] OLSEN T N. Improvement processes for coalbed natural gas completion and stimulation[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Science Petroleum Engineering, 2003: 120-130.
- [7] CRAMER D. The unique aspects of fracturing western U S coalbeds[J]. Journal of Platform Technology, 1992, 42(10): 351-361.
- [8] 边利恒,熊先钺,王伟彬. 低渗透软煤储层压裂改造研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(2): 185-186.  
BIAN Liheng, XIONG Xianyue, WANG Weibin. Research on stimulation of low permeability soft coal formation[J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 185-186.
- [9] 吴辅兵. 间接压裂技术在阜新煤层气开发中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2009(12): 114-115.  
WU Fubing. The application of the indirect fracturing technology in Fuxin coalbed methane development[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(12): 114-115.
- [10] 曹立虎,张遂安,张亚丽,等. 煤层气水平井煤粉产出及运移特征[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 31-35.  
CAO Lihu, ZHANG Sui'an, ZHANG Yali, et al. Investigation of coal powder generation and migration characteristics in coalbed methane horizontal well[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(3): 31-35.
- [11] 魏迎春,曹代勇,袁远,等. 韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1424-1429.  
WEI Yingchun, CAO Daiyong, YUAN Yuan, et al. Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng block[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1424-1429.
- [12] 陈文文,王生维,秦义,等. 煤层气井煤粉的运移与控制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊2): 416-421.  
CHEN Wenwen, WANG Shengwei, QIN Yi, et al. Migration and control of coal powder in CBM well[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 416-421.
- [13] HOWER T. Performance of the Powder River coal seams, Wyodak and Big George[C]//IPAMS Energy Conference. Denver: 2003: 1019-1025.
- [14] 唐书恒,朱宝存,颜志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65-69.  
TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.
- [15] 张金才,尹尚先. 页岩油气与煤层气开发的岩石力学与压裂关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1691-1699.  
ZHANG Jincai, YIN Shangxian. Some technologies of rock mechanics applications and hydraulic fracturing in shale oil, shale gas and coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1691-1699.
- [16] MCLENNAN J D. Spalling and the development of a hydraulic fracturing strategy for coal[J]. Quarterly Review of Methane from Coal Seams Technology for Coal, 1991, 8(2): 25-27.
- [17] 杨宇,林璠,曹煜,等. 煤层气直井间接压裂施工的先导地质分析[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 46-50.  
YANG Yu, LIN Fan, CAO Yu, et al. Pilot geological analysis of indirect fracturing in vertical CBM well[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(3): 46-50.
- [18] 熊先钺,边利恒,王伟,等. 韩城区块煤储层间接压裂地质主控因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 189-195.  
XIONG Xianyue, BIAN Liheng, WANG Wei, et al. Research on main geological controlling factors of coal reservoir indirect fracturing in Hancheng block[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 189-195.
- [19] 朱宝存,唐书恒,张佳赞. 煤岩与顶底板岩石力学性质及对煤储层压裂的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 756-760.  
ZHU Baocun, TANG Shuheng, ZHANG Jiazan. Mechanics characteristics of coal and its roof and floor rock and the effects of hydraulic fracturing on coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 756-760.
- [20] 单学军,张士诚,李安启,等. 煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 130-132.  
SHAN Xuejun, ZHANG Shicheng, LI Anqi, et al. Analyzing the fracture extend law of hydraulic fracturing in coalbed gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 130-132.
- [21] 胡正田,万志杰,张东亮. 贵州官寨井田煤层气直井压裂工艺分析[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(4): 46-50.  
HU Zhengtian, WAN Zhijie, ZHANG Dongliang, et al. Analysis of CBM well fracturing in Guanzhai mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(4): 46-50.
- [22] 李启桂,唐飞龙,田国祥. 湘中、湘东南煤层(成)气评价勘查阶段总结报告[R]. 北京: 国土资源部中南石油地质局, 1996.