

煤层气井水力压裂设计

张志全, 张 军 (江汉石油学院石油工程系, 湖北 荆州 434102)

许弟龙 (胜利油田有限公司清河采油厂, 山东 寿光 262714)

胡 东 (胜利油田有限公司孤岛采油厂, 山东 东营 257000)

张保国, 唐 艳 (中原油田分公司, 河南 濮阳 457001)

[摘要] 针对煤层气井储层特性和压裂的特殊性, 选择了拟三维模型进行水力压裂设计。针对一口具体井的资料进行了模拟计算, 计算结果合理。同时就地面注液排量、压裂液稠度系数和地应力差值对裂缝几何形态的影响进行了计算和分析, 并提出了相应的建议。

[关键词] 煤层气井; 水力压裂; 设计; 模型; 效果

[中图分类号] TE357.1; TE132.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-9752(2001)02-0032-02

煤层气是一种非常规天然气资源。煤层气储层与常规天然气储层相比具有很大的差异^[1]。煤层通常以多个煤层组形式存在, 各组之间相距的距离不等, 这一特征加上煤岩本身的一些特性, 使得煤层压裂与常规储层压裂之间存在一些差异^[1]。一般情况下, 对煤层进行压裂时, 压裂液的滤失现象相当严重。其副作用主要表现在: 限制裂缝延伸; 降低压裂效率; 极易伤害产层; 增大脱砂的可能性。

煤层中压裂裂缝的生成与扩张, 主要受煤岩的岩石特性和地层应力场分布等因素的影响, 它们同时也是煤层压裂设计中无法控制的因素。根据实际应用经验, 地层应力是控制裂缝扩张的主要因素, 通常以此为依据选用裂缝模型。笔者选择拟三维水力压裂模型(非煤层气)^[2~5]进行煤层气井水力压裂设计。

1 拟三维水力压裂模型

1) 基本假设 ①裂缝为垂直裂缝, 以井筒为轴心对称分布, 裂缝剖面近似为椭圆; ②生产层与遮挡层的地应力均匀分布, 且上下遮挡层的地应力相等; ③流体沿缝长方向一维流动; ④油层岩石为理想的线弹性断裂体, 裂缝在垂直平面内符合平面应变条件。

2) 模型的建立

连续性方程

$$Qt = V_i(t) + V_l(t).$$

式中, Q 为地面泵注排量, m^3/min ; t 为注液时间, min ; $V_i(t)$ 为注液 t 时的裂缝体积, m^3 ; $V_l(t)$ 为注液 t 时压裂液滤失体积, m^3 。缝中流体流动压降方程

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{32K}{3\pi} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{q^n(x)}{h^n(x)W_0^{2n+1}(x)}.$$

式中, $W_0(x)$ 为缝中 x 处的最大缝宽, m ; $h(x)$ 为缝中 x 处的高度, m ; K 为压裂液的稠度系数, $\text{kPa} \cdot \text{s}^n$; n 为压裂液的流态指数, 无因次; $q(x)$ 为缝中 x 处的液体流量, m^3/min ; P 为压裂液流动所具有的压力, kPa 。

裂缝宽度方程

$$W(x, \eta) = \frac{4(1-\nu)}{G} P(x) l(x) \left[\sqrt{1-\eta^2} - \frac{2}{\pi} \frac{\Delta S}{P(x)} \sqrt{1-\eta^2} \arccos f_1 - f_1 \ln \frac{\sqrt{1-\eta^2} + \sqrt{1-f_1^2}}{\sqrt{|f_1^2 - \eta^2|}} + \eta \ln \frac{f_1 \sqrt{1-\eta^2} + \eta \sqrt{1-f_1^2}}{\sqrt{|f_1^2 - \eta^2|}} \right].$$

式中, η 为缝中 x 处的无因次高度; $l(x)$ 为缝内 x 处的半缝高, m; G 为岩石的剪切弹性模量, kPa; ν 为岩石的泊松比, 无因次; ΔS 为生产层与遮挡层的地应力差, kPa; $P(x)$ 为缝中 x 处的净压力, kPa; f_1 为缝中 x 处的无因次厚度。

裂缝高度方程

$$\frac{dh}{dx} = \frac{-\frac{32K}{3\pi} \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n q^n(x)}{h^{n-1}(x)W_0^{2n+1}(x) \left[\frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi h(x)}} - \frac{2\Delta S f_1}{\pi \sqrt{1-f_1^2}} \right]}$$

式中, K_{IC} 为断裂韧性的极限值, kPa · m^{0.5}。

2 计算实例及分析

利用编制的程序对一口煤层气井在压裂过程中裂缝延伸的动态几何尺寸进行了模拟计算。其结果为：井筒最大缝宽 0.0459 m；裂缝一翼缝长 155.95 m；井筒最大缝高 14.97 m。同时，研究了裂缝几何形态的影响因素。

1) 地面注液排量对裂缝几何形态的影响 随注液排量的增加，裂缝的长度、宽度和高度均随之增加，但裂缝的长度和高度增加较快（表 1）。

2) 稠度系数对裂缝几何形态的影响 在其他条件不变的情况下，随稠度系数的增加，裂缝的高度逐渐增加（表 2）。

3) 地应力差值对裂缝几何形态的影响 随着地应力差的增加，裂缝的长度和高度随之减少，而裂缝的宽度却随之增加（表 3）。

表 1 地面注液排量对裂缝几何形态的影响

注液排量 /m ³ · min ⁻¹	裂缝长度 /m	裂缝宽度 /m	裂缝半高度 /m
4.0	225.3906	0.0118	5.5251
4.5	242.1875	0.0119	5.8616
5.0	257.8125	0.0120	6.2190
5.5	272.4609	0.0120	6.5581
6.0	286.2891	0.0120	6.8810
6.5	299.3945	0.0121	7.1895
7.0	311.9141	0.0121	7.4857
7.5	323.8672	0.0121	7.7705
8.0	335.3320	0.0122	8.0454
8.5	346.3672	0.0122	8.3112

表 2 稠度系数对裂缝几何形态的影响

稠度系数 /×10 ⁻⁷ Pa · S ⁿ	裂缝长度 /m	裂缝宽度 /m	裂缝半高度 /m
7.00	311.9141	0.0121	7.4381
7.25	311.9141	0.0121	7.4440
7.50	311.9141	0.0121	7.4497
7.75	311.9141	0.0121	7.4557
8.00	311.9141	0.0121	7.4617
8.25	311.9141	0.0121	7.4677
8.50	311.9141	0.0121	7.4737
8.75	311.9141	0.0121	7.4797
9.00	311.9141	0.0121	7.4857
9.25	311.9141	0.0121	7.4917

表 3 地应力对裂缝几何形态的影响

地应力差 /kPa	裂缝长度 /m	裂缝宽度 /m	裂缝半高度 /m
2019.09	318.8867	0.0110	8.0553
2046.29	317.4609	0.0112	7.9378
2073.69	316.0547	0.0114	7.8226
2101.30	314.6680	0.0117	7.7095
2129.13	313.2812	0.0119	7.5985
2157.17	311.9141	0.0121	7.4895
2185.42	310.5664	0.0123	7.3826
2213.90	309.2383	0.0126	7.2777
2242.59	307.9297	0.0128	7.1749
2271.51	306.6211	0.0131	7.0838

大多数煤层气藏投产前，水力压裂是一项必须进行的增产措施。在进行煤层气井的水力压裂设计时，要先进行地层评价，优选设计模型及参数，以获得较好的经济效益。

[参考文献]

[1] 赵庆波, 刘兵, 姚超. 世界煤层气工业发展现状 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
 [2] Jeffrey R G, Wold M B, Choi S K, et al. Stimulation for methane gas recovery from coal [J]. SPE Production & Facilities, 1998, 13 (3): 200~207.
 [3] 万人傅, 罗英俊. 采油技术手册 (修订本) (第九分册) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
 [4] 王晓泉, 陈作, 姚飞. 水力压裂技术现状及发展展望 [J]. 钻采工艺, 1998, 21 (2): 28~32.
 [5] 江汉石油学院“石油工程专业改革与建设”项目组. 石油工程设计 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.