

考虑裂缝特性指标的煤层气“垂直井”起裂压力计算方法

王志荣, 贺 平, 郭志伟, 王永春

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为探究碎裂煤储层中裂缝特性指标对垂直井起裂压力的影响规律, 解决垂直井起裂压力的理论计算问题, 首先基于断裂力学和弹性力学原理, 考虑原生裂缝特性和压裂液渗透特性, 建立了垂直井起裂压力模型。其次定量分析原生裂缝特性对起裂压力的影响, 提出了“裂缝特性指标 T ”的概念, 并推导出 T 的数学表达式。最后对起裂压力做了原生裂缝特性参数敏感度分析, 得出影响起裂压力的最敏感性因素为裂缝宽度 b , 且当 b 在 $100 \sim 700 \mu\text{m}$ 区间内时地层的裂缝特性指标对起裂压力有实际意义, 解决了压裂目标层的选择问题。研究表明, 垂直井起裂压力的影响因素不仅与储层岩石力学性质、应力场、压裂液性质、井孔尺寸有关, 还与原生裂缝的宽度、长度、密度以及裂缝面的粗糙度有关, 尤其是裂缝宽度的小范围波动都会引起垂直井起裂压力较大的变化。根据焦作矿区恩村 5 口试验井田实际地质勘查资料和压裂施工资料, 对垂直井起裂压力进行了计算和验证, 发现实际起裂压力与大部分计算结果较为吻合, 且与井筒埋深的变化趋势一致, 表明该理论模型对于垂直井起裂压力的实际控制具有一定的指导意义。

关 键 词: 碎裂煤; 裂缝特性指标; 起裂压力; 控制系数; 敏感度分析

中图分类号: TD 823

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018) 增 1—0369—09

Calculation of initiation pressure of vertical well for coalbed methane considering crack characteristic index

WANG Zhi-rong, HE Ping, GUO Zhi-wei, WANG Yong-chun

(School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: In order to explore the influence of fracture characteristics index on crack initiation pressure in vertical well and solve the problem of theoretical calculation about vertical well initiation pressure. First of all, the vertical well initiation pressure model is established based on the principles of fracture mechanics and elastic mechanics, considering the characteristics of primary fractures and fracturing fluids. Secondly, the influence of primary crack characteristics on initiation pressure is analyzed quantitatively; meanwhile, proposing the concept of "crack characteristic index control coefficient T " and deriving the mathematical expression of T . At last, sensitivity analysis of the primary crack characteristic parameters is made for the initiation pressure. It is concluded that the most sensitive factor affecting the initiation pressure is the crack width b . When b is in the range of $100 \sim 700 \mu\text{m}$, the fracture characteristics of the formation have the practical significance for the initiation pressure, which solves the problem of the choice of fracturing target layer. The results show that: The influence factors of vertical well initiation pressure are related not only to the mechanical properties of the source rock, the stress field, the fracturing fluid properties and the well size, but also the width, length, density and roughness of the crack. Especially the small fluctuations in the width of the crack will cause vertical wells crack pressure changes. According to the actual geological prospecting data and fracturing construction data of the 5 test wells in Jiaozuo mining area, the vertical well initiation pressure is calculated and verified. It is found that the actual initiation pressure is in good agreement with the calculated results. It is shown that the theoretical model has some guiding significance for the actual control of the vertical well initiation pressure.

Keywords: fractured coal; fracture characteristic index; initiation pressure; control coefficient; sensitivity analysis

收稿日期: 2017-08-26

项目基金: 国家自然科学基金项目 (No.41272339)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41272339).

第一作者简介: 王志荣, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 从事地质工程与地质灾害防治方面的研究。E-mail:wangzhirong513@sina.com

1 引言

水力压裂作为一种有效的储层渗透性改造技术被广泛应用于非常规天然气的开发,该技术关键是确定合适的起裂压力。起裂压力过高会增大经济和技术风险^[1],且容易产生穿透顶底板的水力裂缝^[2],不仅破坏围岩的封闭性和导致地下水突出,还污染地下水环境。影响起裂压力的因素主要与地层岩石性质、地层埋深、储层应力、压裂液渗透力、地层原生裂缝特性等相关,近些年来许多学者针对裂缝性地层展开了研究,普遍认为地层原生裂缝特性,会对裂缝的起裂、裂缝的扩展和延伸产生复杂的影响,尤其是裂缝的几何特性是决定地面起裂压力的关键因素。Daneshy 等^[3]提出,随着地层原生裂缝尺寸的增大,对水力裂缝扩展的影响逐渐增大。周健等^[4]研究了裂缝性地层中原生裂缝的张剪破坏机制,认为水平主应力差、逼近角的高低是天然裂缝是否发生剪切破坏的控制性因素。Beugelesdijk 等^[5]通过物理模拟,探讨了天然裂缝对水力裂缝几何形态的影响。李丹琼等^[6]建立了顶板压裂物理模型并开展真三轴模拟试验研究,结果表明天然裂缝在 100~500 μm 区间内时天然裂缝对水力裂缝的扩展具有复杂的影响。张矿生等^[7]通过室内三轴试验和施工现场测试,研究了裂缝性地层水平井起裂机制,认为天然裂缝的倾角对裂缝的剪切起裂压力影响较大,对裂缝的张性起裂压力影响较小。任岚等^[8]、赵金洲等^[9]基于 PKN 模型,建立了裂缝性地层中水力压裂缝非平面延伸的数学模型,推导出考虑水平地应力方位角与原生裂缝走向和倾角的起裂压力试算模型。程远方等^[10]建立了水力裂缝与天然裂缝干扰判据以及新裂缝起裂角计算模型,研究了天然裂缝产状对水力裂缝扩展的干扰。罗天雨^[11]以独特的视角模拟了多裂缝闭合应力和滤失变化对裂缝宽度和长度的影响。这些重要成果使人们越来越重视低渗储层原生裂缝对压裂效果的控制与影响。

对于裂缝性地层的研究大多集中在水力裂缝的延伸和扩展规律上,考虑裂缝性地层中原生裂缝的长度、宽度和密度的垂直井的起裂压力计算理论还不完善,而且考虑原生裂缝的影响因素时大多仅仅考虑了原生裂缝的走向、倾向、逼近角,并没有考虑原生裂缝的宽度、长度、密度等影响因素。本文在量化分析豫北焦作矿区碎裂煤原生裂缝几何参数(宽度,长度,密度)的基础上,基于断裂力学原理推导出起裂压力计算公式,得到实际工程的验证,对裂缝性储层的起裂压力的实际控制有一定

的指导意义。

2 井筒源岩应力分析

试验区焦作煤田为我国著名的“三软”大水矿区,含煤地层为石炭系上统太原组、二叠系下统山西组和下石盒子组、二叠系上统上石盒子组。山西组二₁煤普遍发育,埋深 155~800 m,为矿区主要可采煤层,层位稳定,块状~碎裂结构,节理和裂隙发育,岩层整体性较差,属 II 类构造软煤^[12]。

2.1 地质模型建立

为了正确建立起裂压力的计算模型,首先分析井筒压裂目标层的初始地应力状况。垂直井筒到达目标层往往需要穿透多个地层(见图 1),对地层原始应力分布造成扰动,而井筒的应力集中效应又会加剧这种扰动(由弹性力学理论可知,在 5 倍于井筒半径之外其应力集中效应可忽略不计),对井底的起裂压力会产生较大的影响。水力压裂是通过射孔使高压水作用于目标层岩体,裂缝的起裂条件及其扩展延伸与目标地层的应力状态有关。图 1 中, R_w 为井筒半径; R_c 为应力集中效应影响区域的半径; σ_H 、 σ_h 分别为作用于目标层的最大、最小水平主应力; P_s 为目标层均布的射孔压力。

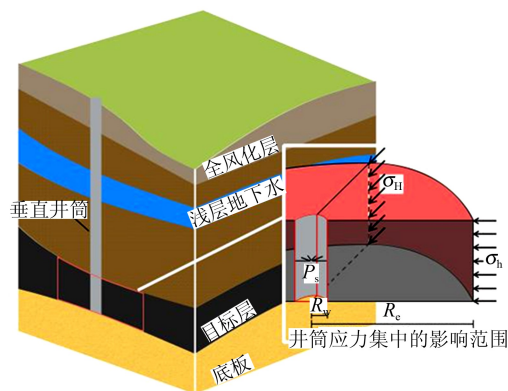


图 1 垂直井三维地质模型

Fig.1 Three-dimensional geological model of vertical well

2.2 井筒初始应力分析

储层应力场是影响水力压裂的起裂和裂缝扩展的主要因素之一,一般认为储层应力场由两部分构成,一个是构造运动形成的构造应力场,不同地区构造应力差异较大,其测定方法不一,且难度较高。另一个是万有引力产生的自重应力场,由上覆岩层的性质决定。埋藏较深的地层中的孔隙压力往往产生超压^[13],与水平地应力相互叠加耦合,由地下水处于动态变化的特点,使得深层超孔隙水压力处于动态变化之中。豫北焦作矿区地层稳定,地质历史上没有发生过较大的挤压构造运动,仅发育具

有伸展变性特征的断裂构造，构造应力可以忽略不计。根据张金才^[14]对储层应力和储层压力关系的研究，研究区储层应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_v &= \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \\ p_c &= \sigma_v - \frac{(\sigma_v - p_u)}{cH} \ln \left(\frac{\psi_0}{\psi} \right) \\ \sigma_H &= \frac{\mu}{1-\mu} (\sigma_v - p_c) + p_c + \beta \sigma_v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： σ_v 为垂直地应力； p_u 为正常孔隙压力； H 为地层埋深； c 为地层压缩系数， ψ_0 为地表松散层孔隙度，一般 $\psi_0 = 0.65$ ； ψ 为岩层孔隙度（根据井田勘探报告）； p_c 为超孔隙压力； μ 为泊松比； β 为主应力系数，其他符号意义同前。

由储层应力的函数关系，储层中一点的应力场可表示为（见图 2）：在压裂目标层原生裂缝较为发育的地区，还应考虑初始裂缝及其所产生的水流渗透作用对起裂压力的影响。由于渗透岩层和非渗透岩层的起裂准则不同^[15]，且水力裂缝的产生总是垂直于最小主应力方向^[16]，计算起裂压力时（垂直井筒的受力可简化为弹性力学的平面应变问题），可以选用如图 3 所示应力作用模式，即在射孔对准原生裂缝的条件下对垂直井的起裂压力进行研究。

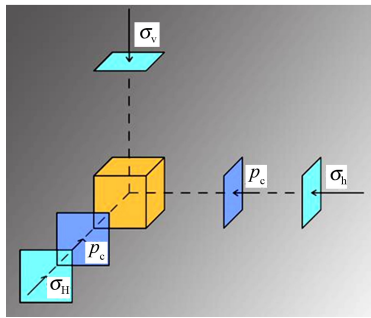


图 2 裂缝性地层中一点应力场

Fig.2 Stress field of a little protolith in fractured strata

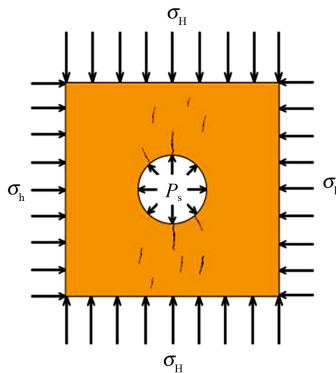


图 3 垂直井起裂压力计算模型

Fig.3 Calculation model of vertical well fracturing pressure

宋丽娟^[17]基于分形理论研究天然节理的几何特征，发现大岗山坝区各组裂隙的倾向和倾角多以正态分布为主，且已有研究表明大多数情况下天然裂缝倾向和倾角的分布也是服从正态分布，说明天然裂缝的分布有一个显著的特征，即沿某个方向分布的原生裂纹在所有的原生裂纹中占主导地位，由于井筒的射孔是在各个方向都会设置的，所以在宏观层面上假设射孔对准主导方向的原生裂缝具有一定的合理性，这里忽略少部分其他方向的原生裂缝，不考虑原生裂缝间的相互干扰。

2.3 井筒二次应力分析

针对裂缝发育的岩体，压裂液的渗透作用的计算是求解起裂压力的关键因素之一，由水力学理论可知渗透力是以体积力的形式作用于结构体，以渗透力代替体积力，能够解释有渗流的情况下与Lama解答的不同之处。岩石中的渗流大都以层流运动为主，且渗透力的方向与渗流方向相同，正好也适应了平面应变问题的基本假设。

2.3.1 水力压裂的渗透力分布

对于裂隙岩体系统，基于岩石力学理论，其渗透性特征参数的定量指标^[18]为

$$K = k \frac{\rho g}{\eta}; \quad k = b^3 \lambda S^{-1} \quad (2)$$

式中： K 为岩石系统的等效渗透系数； k 为等效渗透率； ρ 为压裂液密度； g 为重力加速度； η 为压裂液黏滞系数； b 为平均裂隙宽度； λ 与整体裂隙粗糙度有关； S 为裂隙的平均间距。

在层流运动中不存在实际坡度，用伯诺里能量法推导其等效水力坡降为

$$\left. \begin{aligned} d \left(\frac{P_i}{\gamma} + \frac{\alpha v_i^2}{2g} \right) / dr &= \bar{J}(r) \\ K \bar{J}(r) &= v_i(r) \\ \frac{\Delta P}{4\gamma R_w} r + C_i &= P_i(r) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $\bar{J}(r)$ 为等效水力坡降； P_i 为渗透路径上的分布压力； v_i 为分布流速； P_i 、 v_i 为与 r 有关的函数； α 为渗流的动能修正系数，工程计算中取1.0~1.2； ΔP 为水力压裂影响区域内外压力差； C_i 为任意常数。

解非齐次线性常微分方程：

$$\bar{J}(r) = \frac{rg}{\alpha K^2} \left(1 - \frac{\Delta P}{2\gamma R_w} \right) \quad (4)$$

由渗透力的定义，可得径向与环向的渗透力为

$$F_r = \gamma \bar{J}(r); F_\theta = 0 \quad (5)$$

式中: F_r 、 F_θ 分别为径向和环向体积力。

2.3.2 水力压裂的应力状态

计算模型 (见图 5) 在考虑渗透力为体积力时极坐标的平衡微分方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + F_r &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

引入 Airy 应力函数 Φ 表示极坐标的应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + V \\ \sigma_\theta &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + V \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial \theta} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在考虑体积力的情况下引入体积力位置函数 V , 使应力分量满足平衡微分方程, 将式 (7) 代入式 (6) 可得

$$F_r = -\frac{\partial V}{\partial r}; F_\theta = -\frac{\partial V}{r \partial \theta} \quad (8)$$

联立式 (4) ~ (6) 和式 (8), 可解得

$$V = \frac{g}{\alpha K^2} \left(\frac{\Delta P}{2\gamma R_w} - 1 \right) r^2 = Hr^2 \quad (9)$$

应用弹性力学平面问题的逆解法, 在此认为 Airy 应力函数 Φ 只与 r 有关, Φ 应满足变形协调方程:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi(r) \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \Phi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式 (9)、(10) 代入式 (8), 可得

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= A \ln r + Br^2 \ln r + Cr^2 + D \\ \sigma_r &= \frac{A}{r^2} + B(1 + 2 \ln r) + 2C + Hr^2 \\ \sigma_\theta &= -\frac{A}{r^2} + B(3 + 2 \ln r) + 2C + Hr^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由物理方程可得水力压裂时井筒附近的应变状态为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1+\mu}{E} \left[A/r^2 + B(1 + 2 \ln r) - F \right] \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1+\mu}{E} \left[-A/r^2 + B(3 + 2 \ln r) - F \right] \\ F &= 4\mu B(1 + \ln r) - 2(1-2\mu)C - (1-2\mu)Hr^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由几何方程可得位移和应变的关系:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = \varepsilon_r; \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = \varepsilon_\theta \quad (13)$$

联立式 (12)、(13), 并积分可得

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{1+\mu}{E} \left[-\frac{A}{r} - Br + 2(1-2\mu)Br \ln r + \right. \\ &\quad \left. 2(1-2\mu)Cr + \frac{1}{3}(1-2\mu)Hr^3 \right] + f(\theta) \\ \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} &= \frac{1+\mu}{E} \left[4(1-\mu)Br + \frac{2}{3}(1-2\mu)Hr^3 \right] - f(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

根据轴对称平面应变问题的位移单值性可得

$$B = \frac{2\mu-1}{6(1-\mu)} Hr^2; f(\theta) = 0 \quad (15)$$

在考虑渗透力时垂直井筒内边界面上的均布水压力和外边界面上的围压均与目标层压裂体内部的渗透压力相互平衡, 故受力边界条件为

$$\left. \begin{aligned} r &= R_w, (\sigma_r = 0) \\ r &= R_e, (\sigma_r = 0) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

将式 (15)、(16) 代入式 (11) 第二式可得

$$\left. \begin{aligned} A &= 25R_w^4 H \left[\frac{2\mu-1}{6(1-\mu)} (\ln R_w^2 + 4.353) + 1 \right] \\ 2C &= -26R_w^2 H \left[\frac{2\mu-1}{6(1-\mu)} (\ln R_w^2 + 4.224) + 1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

至此得到了考虑初始裂缝和渗透力条件下的应力分布解析解:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1-2\mu}{6(1-\mu)} \left[\frac{HR_w^2}{r^2} (26r^2 - 25R_w^2) \cdot \right. \\ &\quad \left. \left(\ln R_w^2 + 4.3 + \frac{6(1-\mu)}{2\mu-1} \right) - \left(\frac{5-4\mu}{2\mu-1} + \ln r^2 \right) Hr^2 \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{1-2\mu}{6(1-\mu)} \left[\frac{HR_w^2}{r^2} (26r^2 + 25R_w^2) \cdot \right. \\ &\quad \left. \left(\ln R_w^2 + 4.3 + \frac{6(1-\mu)}{2\mu-1} \right) - \left(\frac{3}{2\mu-1} + \ln r^2 \right) Hr^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3 焦作矿区目标层的起裂压力

水力压裂过程中目标层井眼射孔附近受到的破裂应力最大, 裂缝从射孔处向目标层深部发展, 射孔附近岩体的最小起裂压裂就是目标层起裂的临界压力。根据工程经验判断, 初始裂缝一旦产生, 目标层岩体系统的力学性质将会改变, 剩余裂缝将迅速产生, 完成对目标层的渗透率改造。但是, 压力

过大，会使目标层裂缝与相邻地层串联，导致抽采工作失败。合适的压力将会对目标层产生较好的渗透率改造效果，提高单位体积的产气效率和产气量，因此临界压力的判断将对工程施工的压力控制和施工效果均产生较大的影响。

3.1 岩石起裂的判断准则

裂缝较为发育的岩体，由于岩体内部存在天然缺陷，其强度问题已经不符合材料力学范畴，现代断裂力学的强度观点能够较好地解决本文的问题，在此引入断裂力学的判断准则。根据井筒周围应力状态的解答，发现水力压裂的力学机制必然是受拉应力而发生破裂，但在裂纹起裂时不仅有受垂直裂纹面的拉应力 σ_θ 作用，而且还受到平行于裂纹面的切应力 σ_r 作用，在断裂力学中其裂缝的特点综合表现为张开撕开复合型。

根据单裂缝的受力情况（见图 4），裂缝属于 I&III 复合型裂缝，下面给出复合型裂纹起裂判断准则，其的工程近似经验公式^[19]为

$$\left. \begin{aligned} K_I^2 + \frac{K_{III}^2}{1-\mu} &= K_{IC}^2 \\ K_I &= \sigma_\theta \sqrt{\pi a} ; K_{III} = \sigma_r \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中： K_I 为 I 型裂缝的应力强度因子； K_{III} 为 III 型裂缝的应力强度因子； K_{IC} 为目标层岩体的断裂韧性常数； a 为裂纹的半长。

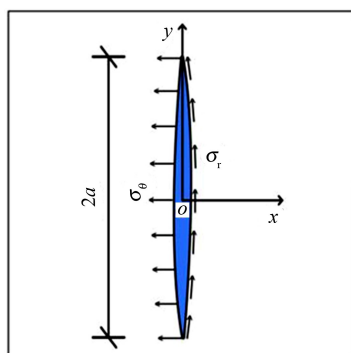


图 4 单裂缝受力分析模型图

Fig.4 Single fracture stress analysis model

3.2 目标层的临界起裂压力

当目标层射孔附近的应力状态满足式（20），细部裂纹开始扩展，岩石开始破裂。

$$\frac{\sigma_r^2}{1-\mu} + \sigma_\theta^2 = \frac{K_{IC}^2}{a\pi} \quad (20)$$

由工程经验可知，水力压裂产生的裂缝从射孔端部起裂，在计算临界起裂压力时应取 $r = R_w$ ，即

射孔端部的起裂压力就是临界起裂压力，取 $\mu = 0.31$ ^[20]，将式（18）代入式（20）可得

$$4.6^2 R_w^4 (6.569 - \ln R_w^2)^2 = \frac{K_{IC}^2}{a\pi H^2} \quad (21)$$

将式（9）代入式（21），可得

$$4.6 \times \frac{g R_w^4}{\alpha K^2} \left(\frac{\Delta P}{2\gamma R_w} - 1 \right) (6.569 - \ln R_w^2) = \frac{K_{IC}}{\sqrt{a\pi}} \quad (22)$$

通过基本数学变换可得临界压力 P_s 的表达式：

$$P_s = \frac{2\gamma\alpha K^2 K_{IC}}{4.6g R_w^3 \sqrt{a\pi} (6.569 - \ln R_w^2)} + 2\gamma R_w + \sigma_H \quad (23)$$

令式（23）中

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{\alpha K^2 K_{IC}}{g \sqrt{a\pi}} \\ R_\mu &= 4.6 R_w^3 (6.569 - \ln R_w^2) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中： T 为只与原生裂缝特征（宽度、长度和密度）有关的参数，称之为裂缝特性指标； R_μ 为仅与井孔尺寸和目标层泊松比有关的量，在一个研究区域内认为 R_μ 为常量。将系数 T 、 R_μ 代入式（23）可得

$$P_s = 2\gamma \frac{T}{R_\mu} + 2\gamma R_w + \sigma_H \quad (25)$$

由式（25）可以发现，新临界起裂压力公式与传统起裂压力算法有着根本的差别，在影响因素方面更加全面合理，不仅考虑到了地应力、压裂液渗透力、岩体的力学性质，而且还考虑到了压裂液的性质、井孔的尺寸、原生裂缝的宽度，长度，密度以及裂缝面的粗糙度；在起裂判断准则上否定了传统意义上以抗拉强度为依据的判别方法，引入了现代断裂力学判别方法，使得判断依据更加可靠。

3.3 裂缝特性指标敏感度分析

地层的原生裂缝特性指标的定量化分析思路，使临界起裂压力的判定更加准确，为研究垂直井底起裂压力提供了一个全新的精细化的方法。起裂压力对裂缝特性参数的敏感程度决定了某个参数是否为关键的影响参数，对于实际工程临界起裂压力的计算至关重要。敏感度高的参数需要更加精细的勘察手段，因此需要的成本也高；敏感度低的参数可以用类似工程的参数替代，而对起裂压力不会产生较大的影响，可以节约成本和时间。根据敏感度分析法得到下列分析结果，见表 1 和图 5。

根据敏感度分析图（见图 3），可以直观地得出垂直井临界起裂压力的最敏感原生裂缝特性指标

表 1 敏感度分析结果计算

Table 1 Sensitivity analysis results calculation

基准值	i	不确定性因素变动幅度				
342	$b/\%$	-100	-80	-60	-40	-20
100	T_b	0	0.006 4	0.41	4.67	26.2
1.44	$a/\%$	-100	-80	-60	-40	-20
100	T_a		2 501.3	625.3	277.9	152.6
2.72	$s/\%$	-100	-80	-60	-40	-20
100	T_s		500	250	166.7	125.0
0	$b/\%$	20	40	60	80	100
100	T_b	298.8	753.3	1 678.6	3 403.1	6 403.2
0	$a/\%$	20	40	60	80	100
100	T_a	69.5	51.1	39.1	30.9	25.1
0	$s/\%$	20	40	60	80	100
100	T_s	83.3	71.4	62.5	55.6	50.0

为裂缝宽度 b 。由数据计算可得, 当 $b < 100 \mu\text{m}$ 时, 目标地层原生裂缝对起裂压力的贡献值不足 0.1 MPa, 这种影响可忽略不计, 即可认为地层原生裂缝不存在; 当 $b > 700 \mu\text{m}$ 时, 目标地层原生裂缝对起裂压力的贡献值超过 50 MPa, 表明该地层原生裂缝过宽, 在不需要压裂施工的情况下地层已相当破碎。

表 2 焦作矿区恩村试验井实测施工参数

Table 2 Actual construction parameters of Jiaozue coal mine

井号	射孔段 /m	厚度 /m	井孔半径 R_w /m	压裂液重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	压裂液黏滞系数 $H / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	井底水头 /MPa	实际破裂压力 /MPa
JLS 试-016	517.11~523.14	6.03	0.25	9.8	8.0×10^{-4}	5.13	12.9
EC 试-007	752.45~758.87	6.42	0.25	9.8	8.0×10^{-4}	7.44	13.5
EC 试-011	758.80~765.85	7.05	0.25	9.8	8.0×10^{-4}	7.51	15.8
EC 试-015	771.50~775.82	4.32	0.25	9.8	8.0×10^{-4}	7.60	13.1
EC 试-008	796.18~802.48	6.30	0.25	9.8	8.0×10^{-4}	7.86	16.3

4.2 储层原生裂缝特性

焦作煤田恩村—五里源含煤区 EC 试-1 井的地质勘查和煤岩测试结果表明, 压裂层为华北型煤田主采二₁煤层, 煤岩成分以亮煤为主, 其次为暗煤, 镜煤主要是线理状和细条带状结构, 少量丝炭。煤芯主要呈柱状, 质地较硬, 主要为原生结构煤, 下部有少量碎裂煤和碎粒煤。二₁煤层宏观煤芯煤样主裂隙(见图 6)较发育, 走向大体一致, 长度为 1~5 cm, 密度为 0~17 条/10 厘米, 高度为 0.5~5 cm; 次裂隙一般不发育。测试样品(EC 试 1-2-7)发现一组与层理呈约 30°相交的构造裂隙, 部分裂隙被方解石充填, 连通性差。

试验区储层微观裂隙也较发育(见图 7), 显微镜下二₁煤层主割理密度为 1.2~8.2 条/厘米, 长 0.01~5 cm, 高 0.01~3.5 cm, 裂口宽度为 5~400

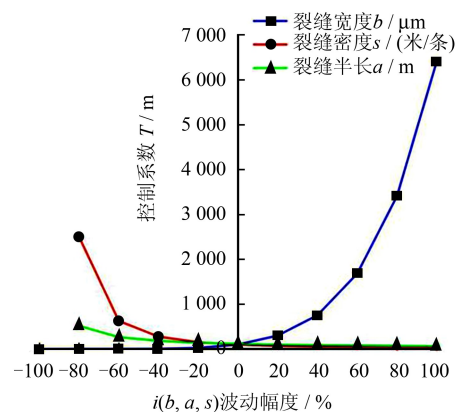


图 5 敏感度分析图

Fig.5 Sensitivity analysis chart

4 实际算例

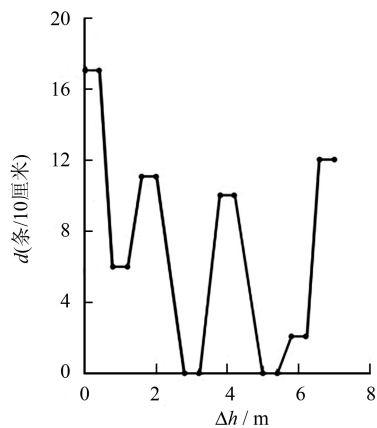
4.1 矿区地质背景

焦作矿区储层原始渗透率极小, 根据恩村井田 EC 试-1 试验井的注入/压降法测试结果, 测得二₁煤层的原始渗透率为 $0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 抗拉强度为 3.3 MPa, 弹性模量平均为 2 500 MPa, 泊松比平均为 0.31。本文选取区内五口抽采试验井的实测资料作为验证样本, 见表 2。

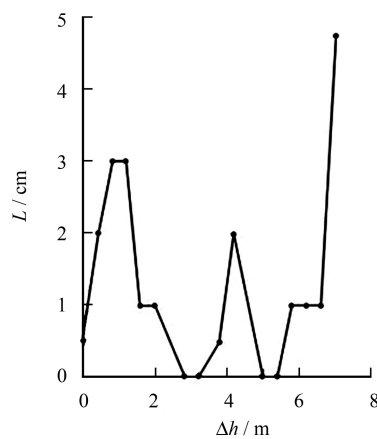
μm 。次裂隙不发育, 密度为 0.6~3.2 条/厘米, 长 0.01~0.8 cm, 高 0.01~2.0 cm, 裂口宽度为 4~300 μm 。裂隙的连通性上部中等, 下部差。根据上述测试资料可确定以下参数, 见表 3。

根据裂缝特性指标(见图 6、7), 对裂缝控制参数进行量化计算, 其中参数 λ 的取值按照岩石力学的相关规定, 当裂缝面光滑无填充物时, $\lambda=1/12$ ^[18], 计算结果见表 3。

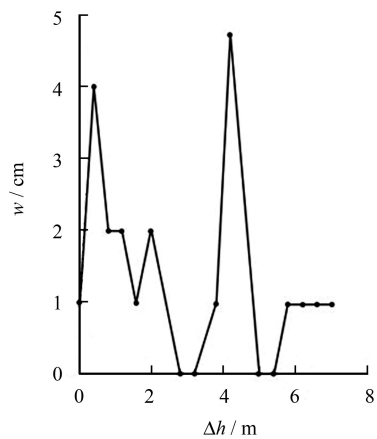
一般情况下地层中存在大量的原生裂缝, 学术界多般认为水力压裂缝在扩展时会产生缝间相互干扰, 而关于原生裂缝起裂时的缝间干扰很少涉及^[21-22]。至于原生裂缝在水压致裂阶段是否会发生相互干扰, 目前还没有定论, 是另外一个值得探讨的新问题。本文侧重于在原生裂缝的初始变形阶段, 引入量化裂缝特性指标来描述对起裂压力的影



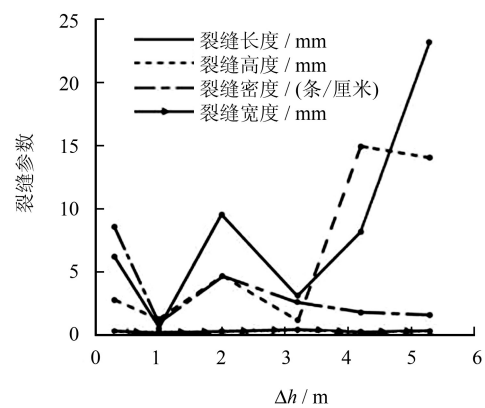
(a) 裂纹密度分布曲线



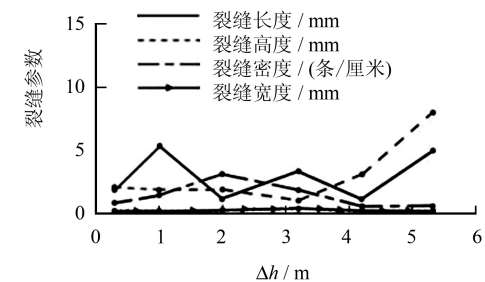
(b) 裂纹长度变化曲线



(c) 裂纹高度变化曲线

图 6 二₁煤层煤芯宏观裂纹特征示意图Fig.6 Coal core macroscopic crack characteristics sketch of 二₁ coal seam coal

(a) 主生裂隙分布示意图



(b) 次生裂隙分布示意图

图 7 二₁煤层微观裂纹特征示意图Fig.7 Microcracks characteristics Sketch of 二₁ coal seam

响，从而揭示影响起裂压力的深层次原因。

4.3 起裂压力验证

由表 3 可知，试验区储层裂缝宽度 b 在 (230~400 μm) 区间，表明二₁煤层需要压裂改造。储层最大水平主应力可由储层应力场参数计算得到，根据式 (1)、表 2 的施工参数对储层应力场相关参数进行计算，其中主应力系数 $\beta = 0.035^{[23]}$ ，计算结果见表 4。

将表 2~4 的计算参数和实测参数直接代入到起裂压力公式 (25) 中可得相应井孔的起裂压力计算结果，见表 5。

利用 Matlab 数值分析软件，将焦作矿区相应井孔的起裂压力计算值与实际值进行对比如图 8 所示。两者吻合程度较高，很好地验证了该模型的正确性。由此可见，在“三软”大水矿区通过建立裂缝特性指标 T ，超前并精准把握地面井起裂压力，完

表 3 量化裂缝控制参数计算表

Table 3 Actual geological data of Jiaozue coal mine

井号	裂纹半长 a / m	平均裂隙宽 b / m	裂隙平均间距 S / m	裂隙面的粗糙度 λ	岩石系统渗透系数 $K / (\text{m/s})$	断裂韧性常数 $K_{IC} / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
JLS 试-016	0.010	4.0×10^{-4}	5.26×10^{-3}	1/12	1.24×10^{-2}	0.118
EC 试-007	0.018	2.3×10^{-4}	1.22×10^{-3}	1/12	1.02×10^{-2}	0.212
EC 试-011	0.004	3.8×10^{-4}	3.85×10^{-3}	1/12	1.46×10^{-2}	0.047
EC 试-015	0.015	4.0×10^{-4}	5.88×10^{-3}	1/12	1.11×10^{-2}	0.175
EC 试-008	0.025	3.0×10^{-4}	2.17×10^{-3}	1/12	1.27×10^{-2}	0.295

表 4 焦作矿区储层应力场参数计算表

Table 4 Calculation of stress field parameters of original rock in Jiaozuo mining area

H/m	P_u/MPa	σ_v/MPa	C/MPa^{-1}	$\psi(f)$	$\psi_0(f)$	$I_n(\psi_0/\psi)$	P_c/MPa	σ_H/MPa
523.14	5.13	13.76	0.002 652	0.01	0.65	4.174	4.575	9.18
758.87	7.44	19.96	0.002 652	0.04	0.65	2.788	1.296	11.11
765.85	7.51	20.14	0.002 652	0.04	0.65	2.788	1.485	11.29
775.82	7.60	20.40	0.002 652	0.04	0.65	2.788	1.736	11.56
802.48	7.86	21.11	0.002 652	0.04	0.65	2.788	2.432	12.27

表 5 临界起裂压力计算

Table 5 Calculation results of critical initiation pressure

井号	T/m	R_μ	σ_H/MPa	P_s/MPa
JLS 试-016	125.57	0.67	9.18	12.84
EC 试-007	82.68	0.67	11.11	13.52
EC 试-011	172.13	0.67	11.29	16.32
EC 试-015	99.33	0.67	11.56	14.49
EC 试-008	131.52	0.67	12.27	16.11

全可以指导“高产高效”的煤层气抽采实践。而计算模型的敏感度分析,对于防治压裂层涌水突水事故以及保护矿区地下水环境,均具有重要的现实意义。

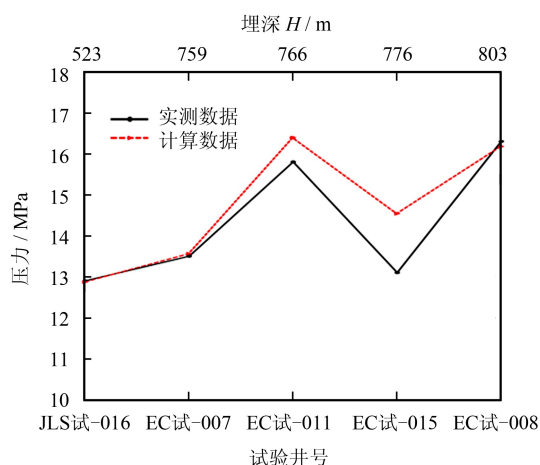


图 8 起裂压力计算值与实际值对比曲线

Fig.8 Comparison curves of critical crack pressure and actual burst pressure

5 结 论

(1) 考虑压裂液在裂缝性地层产生的渗透力,基于断裂力学复合裂纹起裂准则,推导出含定量裂缝控制参数的垂直井临界起裂压力公式,经实例计算得到了焦作矿区实际起裂压力的验证。研究表明临界起裂压力受地层岩性、原岩应力场、裂缝地层的渗透特性和原生裂缝特性指标共同控制。

(2) 临界起裂压力的敏感性因素为原生裂缝宽度 b ,且当 b 在 $(100 \sim 700 \mu m)$ 区间内时地层的

裂缝特性指标对临界起裂压力有实际意义。当 $b < 100 \mu m$ 时,地层可看做均质与各向同性岩体处理,不考虑原生裂缝的影响。当 $b > 700 \mu m$ 时,表明地层较为破碎,不需进行压裂处理。

(3) 基于临界起裂压力公式,分析了裂缝特性指标 T 对起裂压力的影响程度,使施工之前能够更容易、更直接地控制起裂压力的大小。计算模型的敏感度分析,对于精准把握起裂压力以及有效保护矿区地下水资源,均具有十分重要的现实意义。

参 考 文 献

- [1] 张广清,殷有泉,陈勉,等. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 40—44.
ZHANG Guang-qing, YIN You-quan, CHEN Mian, et al. Study on influence of perforation on formation fracturing pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 40—44.
- [2] 王志荣,贺平,郭志伟,等. 水力压裂条件下“三软”煤层压裂渗透模型及应用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 349—355.
WANG Zhi-rong, HE Ping, GUO Zhi-wei, et al. The research on permeable model of hydraulic fracture and its application in the “three soft” coal seam[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(3): 349—355.
- [3] DANESHY A A. Hydraulic Fracture propagation in the presence of planes of weakness[R]. [S. l.]: [s.n.]. 1974.
- [4] 周健,陈勉,金衍,等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2637—2641.
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2637—2641.
- [5] BEUGELSDIJK L J L, PATER C J D, SATO K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium[C]//Spe Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. [S. l.]: [s. n.]. 2000.
- [6] 李丹琼,张遂安,张士诚. 煤层气水平井穿层压裂裂缝扩展机理[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 84—88.
LI Dan-qiong, ZHANG Sui-an, ZHANG Shi-cheng.

- Expansion mechanism of through strata fractured cracks in coalbed methane horizontal well[J]. **Coal Science and Technology**, 2016, 44(5): 84—88.
- [7] 张矿生, 樊凤玲, 王波, 等. 裂缝性储层水平井裂缝起裂和延伸规律研究[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(10): 105—109.
ZHANG Kuang-sheng, FAN Feng-ling, WANG Bo, et al. Fracturing initiation and propagation of horizontal wells in the fractured reservoir[J]. **Journal of Oil and Gas Technology**, 2014, 36(10): 105—109.
- [8] 任岚, 赵金洲, 胡永全, 等. 裂缝性地层水力裂缝非平面延伸特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 167—172.
REN Lan, ZHAO Jin-zhou, HU Yong-quan, et al. Non-planar propagation characteristics of hydraulic fracture in naturally fractured formations[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2014, 45(1): 167—172.
- [9] 赵金洲, 任岚, 胡永全, 等. 裂缝性地层水力裂缝张性起裂压力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2855—2862.
ZHAO Jin-zhou, REN Lan, HU Yong-quan, et al. Hydraulic fracture tensile initiation pressure analysis for fractured formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.1): 2855—2862.
- [10] 程远方, 常鑫, 孙元伟, 等. 基于断裂力学的页岩储层缝网延伸形态研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 603—611.
CHENG Yuan-fang, CHANG Xin, SUN Yuan-wei, et al. Research on fracture network propagation pattern of shale reservoir based on fracture mechanics[J]. **Natural Gas Geoscience**, 2014, 25(4): 603—611.
- [11] 罗天雨. 水力压裂多裂缝基础理论研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
LUO Tian-yu. The study on the mechanism of multiple fractures in hydraulic fracturing[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.
- [12] 王志荣, 郭志伟, 徐培远, 等. 九里山煤矿垂直井起裂压力对煤层气产能的影响[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 124—128.
WANG Zhi-rong, GUO Zhi wei, XU Pei-yuan, et al. Influence of fracturing pressure of vertical well to CBM capacity in Jiulishan coal mine[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2017, 44(4): 124—128.
- [13] 秦绪英, 陈有明, 陆黄生. 井中应力场的计算及其应用研究[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 271—275.
QIN Xu-ying, CHEN You-ming, LU Huang-sheng. Calculation of broehole stress with full-wave acoustic logging data and its application[J]. **Geophysical Prospecting for Petroleum**, 2003, 42(2): 271—275.
- [14] 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 Jin-cai, YI Shang-xian. 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.
- [15] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. In-situ stresses in low-permeability, nonmarine rocks[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1987, 41(4): 405—414.
- [16] 冯彦军, 康红普. 水力压裂起裂与扩展分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 3169—3179.
FENG Yan-jun, TANG Hong-pu. Hydraulic fracturing initiation and propagation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.1): 3169—3179.
- [17] 宋丽娟. 基于分形理论的节理几何特征描述与几何参数模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
SONG Li-juan. Description of joint geometry character and study on the model of joint geometric parameters based on fractal theory[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [18] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 108—111.
CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2013: 108—111.
- [19] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 19—22.
CHENG Jin, ZHAO Shu-shan. Fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006: 19—22.
- [20] 李宏欣. 焦作九里山井田煤层气赋存特征分析[J]. 中州煤炭, 2012, 34(9): 4—6, 33.
LI Hong-xin. Analysis on CBM occurrence characteristics of Jiulishan coalfield in Jiaozuo[J]. **Zhongzhou Coal**, 2012, 34(9): 4—6, 33.
- [21] 张劲, 张士诚. 水平多缝间的相互干扰研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2351—2354.
ZHANG Jin, ZHANG Shi-cheng. Study on interference among horizontal multi-fractures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(14): 2351—2354.
- [22] 于永军, 朱万成, 李连崇, 等. 水力压裂裂缝相互干扰应力阴影效应理论分析[J]. 岩石力学与工程报, 2017, 36(12): 2926—2939.
YU Yong-jun, ZHU Wan-cheng, LI Lian-chong, et al. Analysis on stress shadow of mutual interference of fractures in hydraulic fracturing engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(12): 2926—2939.
- [23] MENG Z, ZHANG J, WANG R. In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2011, 48(1): 122—131.