

张树翠,孙可明,李凯.附加应力场和滤失作用下页岩水力压裂开裂机理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):17-24. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.003

Zhang S C, Sun K M, Li K. Shale Reservoir Fracture Mechanism Under Impacts of Additional Stress Field and Leak-off [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,35(4):17-24. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.003

附加应力场和滤失作用下 页岩水力压裂开裂机理

张树翠,孙可明*,李凯

(青岛理工大学 理学院,山东 青岛 266033)

摘要:为了研究含有天然微裂隙和层理的页岩储层在压裂液产生的滤失和附加应力场共同作用下的开裂机理,采用复变函数保角变换方法修正了传统附加应力场解析解,基于最大拉应力强度理论,通过解析分析比较储层基质、天然裂隙和层理的复杂应力状态及相应的强度,得出水力压裂主裂纹遇天然裂隙或层理后的开裂机理和扩展方向.基于莫尔强度理论分析讨论被裂纹穿过后储层次裂纹形成机理.结果表明:水力压裂主裂纹尖端拉应力集中,发生张性破坏;被主裂纹穿过的天然裂隙或层理在附加应力场和压裂液产生的滤失作用下发生剪切破坏,形成滑动次裂纹;附加应力场增大裂纹附近的最小地应力、降低裂纹附近的最大地应力,不利于储层次裂纹的形成;降低排量、增加压裂作用时间,提高裂纹附近储层孔隙压力,降低有效应力,可促进储层次裂纹的形成.

关键词:页岩储层;附加应力;滤失;有效应力;开裂机理

中图分类号:TE371 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)04-0017-08

Shale Reservoir Fracture Mechanism Under Impacts of Additional Stress Field and Leak-off

Zhang Shucui, Sun Keming, Li Kai

(School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: In order to study the fracturing mechanism of shale reservoir with many natural cracks and beddings under the combined impacts of leak-off and additional stress field, additional stress field analytical model was adjusted by complex function conformal transformation. Based on the maximum tensile stress strength theory, the major crack fracturing mechanism and propagation direction when hydraulic fracturing meeting natural cracks and beddings was obtained by a comparison of complex stress state in reservoir matrix, natural crack and beddings with corresponding strength. The formation mechanism of secondary cracks in reservoir with penetrating cracks is discussed based on the Mohr strength theory. The results show as follows. The stress concentration appeared at major crack tip of hydraulic fracture, which makes major crack propagate due to tensile failure. The secondary cracks emerged because of natural cracks and beddings sheared sliding failure under the combined impacts of leak-off and additional stress field. The additional stress field made the in-situ minimum stress increase and the

收稿日期:2018-05-02 修改日期:2020-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808306; 51574137);国家油气科技重大专项资助(2017ZX05037-001)

*通信作者, E-mail: sskmm11@163.com

maximum decrease, which restrained reservoir shear failure. Reducing injection velocity and increasing the fracturing time can increase pore pressure around the major crack and effective stress, which promoted reservoir secondary cracks formation.

Keywords: shale reservoirs; additional stress; leak-off; effective stress; fracture mechanism

水力压裂法是油气井增产增注的重要技术之一,也是目前页岩气等非常规天然气的主要开采方法.水力压裂法利用高压泵组以远超过储层自身吸收能力的排量向目标层注入较高黏度的压裂液,压裂液在井底憋起高压,当压力超过井底岩体的破裂强度时,岩体发生损伤,裂缝开启,压裂液继续注入使裂缝扩展,储层中产生的裂缝可沟通更大的储层体积,促进储层中吸附气体的解吸及运移,水力压裂中的裂纹扩展规律对增产效果的提高起关键作用.页岩气是一种重要的非常规油气资源^[1-2],页岩储层的层理和天然微裂隙较多.近年来,Li等^[3-4]通过微震裂缝监测技术得出页岩储层压裂缝网的复杂性,其形成机理与常规储层不同,不仅仅是张性破坏;张广清等^[5-7]通过预制裂纹混凝土试件室内水力压裂实验,研究了水力裂缝与天然裂缝的相互作用以及相交模式,并提出了页岩储层中变排量压裂^[8]可使水力裂缝沟通更多天然裂缝;李根生等^[9]基于弹性力学理论建立了水力裂缝穿过天然裂缝的判断准则;Sneddon等^[10]研究了裂缝弹性体在裂缝内均布压力作用下,裂纹邻近区域的应力分布;Warpinski等^[11-14]将其应用于水力压裂中,称其为压裂改变应力、附加应力或应力阴影,解析分析只考虑裂纹内部流体压力产生的附加应力场,未考虑初始应力场在裂缝影响下的重新分布;朱万成等^[15]的研究发现地应力差对附加应力场有影响,却未能得出包含初始地应力项的附加应力场解析解;Nagel等^[16]通过微震和测斜仪等裂缝监测方法对裂缝周围附加应力场进行研究,表明附加应力场的影响范围大约为缝宽的1.5倍,在层理或天然裂缝发育储层中,附加应力场的影响不可忽略,此外,压裂液滤失到地层中,改变了地层的有效应力;李爱芬等^[17]研究了压裂液滤失对裂缝的影响并建立了滤失模型.综上所述,页岩气储层地质构造复杂,天然裂缝与水力裂缝相互交织,上述学者未得到附加应力场、滤失和压裂裂纹与天然裂缝相互作用等多因素共同影响下水力压裂裂纹的损伤破坏机理,鉴于此,文中从单一因素的独立影响入手,并考虑各因素的影响条件及作用效果的叠加,得出了页岩储层水力压裂在附加应力场、滤失以及天然裂缝等共同作用下的损伤开裂机理.

为研究页岩储层的损伤开裂机理,现做如下假设:(1)我国页岩储层埋深较大,构造应力占优,因此,假设页岩储层中的垂向地应力 σ_v 、最小水平地应力 σ_h 和最大水平地应力 σ_H 满足 $\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$;(2)页岩储层中的层理和天然裂隙使储层整体表现为横观各向同性,弹性模量的改变较小,因此,假设其横观各向同性只体现在强度方面;(3)压裂液为液体,假设为不可压缩流体.

1 压裂裂纹周围及裂尖应力状态

页岩储层水力压裂不同于常规储层,压裂裂纹的复杂性主要由水力压裂裂纹周围的应力复杂性和页岩储层材料非均质及各向异性引起.首先,对压裂过程中裂纹周围及裂尖的应力状态进行分析,除原地应力外,还需考虑压裂产生的附加应力场、裂尖的应力集中以及压裂液滤失产生的孔隙压力.

1.1 附加应力场

为了研究包含裂纹的储层在内部流体压力及初始地应力场共同作用下,裂纹附近应力场的改变,将裂纹简化为椭圆形,其长轴长 $2a$,以椭圆中心建立复坐标系 $z = x + iy$,将裂缝外的无限大区域通过复势函数保角变换,变换到坐标系 $\zeta = \xi + i\eta = \rho e^{i\varphi}$ 上的单位圆内,如图1所示,则有

$$z = x + iy = \omega(\zeta) = \frac{a}{2}(1/\zeta + \zeta). \quad (1)$$

式中: $\omega(\zeta)$ 为变换函数.

根据应力分量的复变函数表示有

$$\sigma_y + \sigma_x = 4\text{Re}\varphi'(z);$$

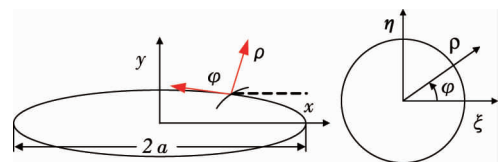


图1 复势函数保角变换

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = 2[\bar{z}\varphi''(z) + \psi'(z)]. \quad (2)$$

边界条件:

$$\varphi'(z) + z\overline{\varphi'(z)} + \overline{\psi'(z)} = i\int(\bar{f}_x + i\bar{f}_y) ds. \quad (3)$$

式中: σ_y 为 y 方向储层应力; σ_x 为 x 方向储层应力; τ_{xy} 为储层剪应力; $\varphi(z)$ 和 $\psi(z)$ 为复位势函数; $\bar{f}_x + i\bar{f}_y$ 为边界面力矢量的复数表示.

复位势函数 $\varphi(\zeta) = \varphi(z)$, $\psi(\zeta) = \psi(z)$, 通过变换, 有

$$\begin{aligned} \varphi'(z) &= \varphi'(\zeta)/\omega'(\zeta) = \Phi(\zeta); \\ \psi'(z) &= \psi'(\zeta)/\omega'(\zeta) = \Psi(\zeta). \end{aligned} \quad (4)$$

根据曲线坐标系下应力分量与复位势函数的关系以及边界条件, 有

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi + \sigma_\rho &= 4\text{Re}\Phi(\zeta); \\ \sigma_\varphi - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\varphi} &= \frac{2\zeta^2}{\rho^2 \bar{\omega}'(\bar{\zeta})} [\bar{\omega}(\bar{\zeta})\Phi'(\zeta) + \omega'(\zeta)\Psi(\zeta)]; \\ i\int(\bar{f}_x + i\bar{f}_y) ds &= \Phi(\xi) + \omega(\xi)/[\bar{\omega}'(\bar{\xi})\Phi'(\xi) + \bar{\Psi}(\bar{\xi})]. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: σ_φ 为环向应力; σ_ρ 为径向应力; $\tau_{\rho\varphi}$ 为剪应力; $\bar{f}_x + i\bar{f}_y$ 为边界面力矢量的复数表示.

应力有限大的条件下, 复变函数 $\Phi(\zeta)$, $\Psi(\zeta)$ 可写为^[18]

$$\begin{aligned} \Phi(\zeta) &= \frac{1+\nu}{8\pi}(\bar{F}_x + i\bar{F}_y)\ln\zeta + B\omega(\zeta) + \varphi_0(\zeta); \\ \Psi(\zeta) &= -\frac{3-\nu}{8\pi}(\bar{F}_x - i\bar{F}_y)\ln\zeta + (B' + iC')\omega(\zeta) + \psi_0(\zeta); \\ \varphi_0(\zeta) &= \sum_{n=1}^{\infty} b_n\zeta^n; \\ \psi_0(\zeta) &= \sum_{n=1}^{\infty} c_n\zeta^n. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ν 为材料泊松比; \bar{F}_x, \bar{F}_y 为边界处集中力矢沿 x 轴方向的投影和 y 轴方向的集中力; B, B', C' 为系数, 由边界条件确定; $\varphi_0(\zeta)$, $\psi_0(\zeta)$ 为单位圆外的解析函数; b_n, c_n 为幂级数展开系数.

如图 2 所示建立储层初始地应力场, 根据边界条件, 可得

$$\begin{aligned} B &= (\sigma_v + \sigma_H)/4; \\ B' &= -(\sigma_H - \sigma_v)/2; \\ C' &= 0; \\ (\bar{f}_x + i\bar{f}_y) ds &= -iP_w dz; \\ \bar{F}_x = \bar{F}_y &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

式中: P_w 为裂缝内流体压力, Pa.

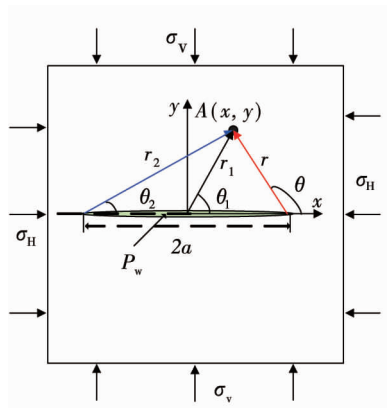


图 2 压裂裂纹附近某点应力场

将式(7)代入式(6)和式(4)中,结合式(1),可得

$$\begin{aligned} \varphi'(z) &= \frac{\sigma_v - P_w}{2} \left[\frac{z}{\sqrt{z^2 - a^2}} \right] + \frac{\sigma_H}{4} - \frac{\sigma_v}{4} + \frac{P_w}{2}; \\ \psi'(z) &= -\frac{(\sigma_H + \sigma_v)}{2} - \frac{P_w}{2} \frac{a^2 z}{(z^2 - a^2)^{3/2}}. \end{aligned} \tag{8}$$

r, r_1 和 r_2 分别为点 A 到裂纹右端、中间以及左端的距离, θ, θ_1 和 θ_2 依次是 r, r_1 以及 r_2 和裂纹相应的夹角,则有

$$z = r_1 e^{i\theta_1}, z - a = r e^{i\theta}, z + a = r_2 e^{i\theta_2}. \tag{9}$$

根据式(2),得出图2中裂纹附近 A 点的附加应力场为

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_x &= (P_w - \sigma_v)(D - E - 1); \\ \Delta\sigma_y &= (P_w - \sigma_v)(1 - D - E); \\ \Delta\tau_{xy} &= (P_w - \sigma_v)F. \end{aligned} \tag{10}$$

式中: $D = (r_1 / \sqrt{rr_2}) \cos[\theta_1 - (\theta + \theta_2) / 2]$; $E = [a^2 r_1 / \sqrt{(rr_2)^3}] \sin\theta_1 \sin[3(\theta + \theta_2) / 2]$; $F = -[a^2 r_1 / \sqrt{(rr_2)^3}] \sin\theta_1 \cos[3(\theta + \theta_2) / 2]$.

令 $K_1 = D - E - 1, K_2 = 1 - D - E, K_3 = |F|$, 则 $K_i (i = 1, 2, 3)$ 的幅值变化分别与 $\Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y, \Delta\tau_{xy}$ 的幅值变化保持一致. 其中, $K_i > 0 (i = 1, 2)$ 表示附加应力场为压应力, $K_i < 0 (i = 1, 2)$ 表示附加应力场为拉应力. 裂纹附近 K_1, K_2, K_3 的等值线分布见图3.

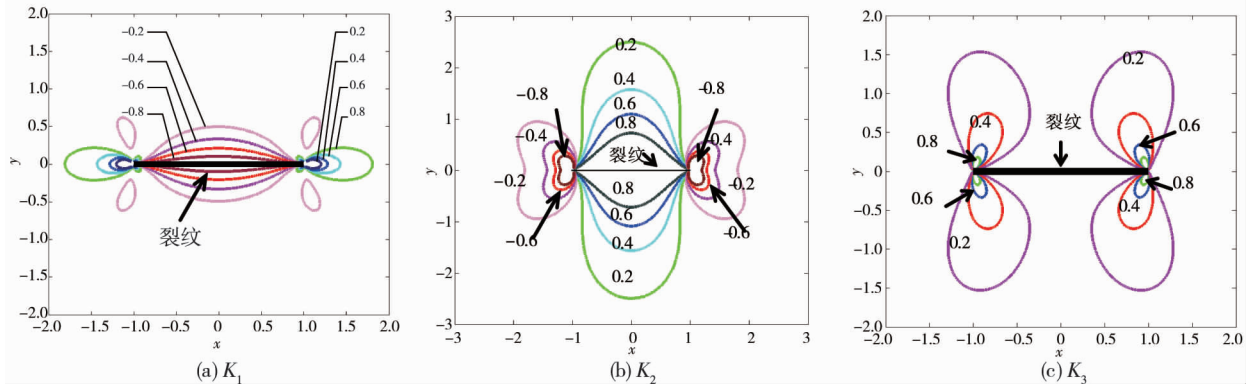


图3 附加应力场等值线分布

从图3可以看出:裂纹尖端出现裂纹方向的压应力和裂纹垂向拉应力;裂纹两侧产生裂纹走向的拉应力和裂纹垂向的压应力;裂纹尖端的侧向剪应力变化较明显;附加应力场随着裂纹距离的增加而降低. 裂纹垂向,附加应力场使最大地应力降低,最小地应力升高,不利于储层发生剪切破坏,若减小排量可降低裂缝内的流体压力,减弱附加应力场. 由于初始地应力和裂纹内流体压力在裂纹周围的作用效果相反,故考虑初始地应力场后的修正附加应力场减小. 取 $\sigma_v = 10 \text{ MPa}, P_w = 15 \text{ MPa}$, 裂纹宽度 $2a = 2 \text{ m}$, 提取图2中沿 y 轴的附加应力场与 Sneddon 解对比,结果见图4. 从图4可以得出:裂纹面垂向附加应力场在裂纹垂向表现为压应力,切向表现为拉应力;压应力影响范围约为裂纹宽度的2倍,拉应力的影响范围约为裂纹宽度的1倍;考虑初始地应力修正后附加应力场减弱.

1.2 压裂裂纹尖端应力集中

式(10)中当 r 或 $r_2 \rightarrow 0$ 时, σ_x 和 $\sigma_y \rightarrow \infty$ 表示裂纹尖端出现应力集中. 以裂纹尖端为原点, r 为极径, θ 为极角建立局部极坐标系,则 $r_1 \approx a + r \cos\theta, r_2 \approx 2a + r \cos\theta, \theta_1 \approx r \sin\theta / a, \theta_2 \approx r \sin\theta / (2a)$, 化简可得裂纹尖端环向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = -(P_w - \sigma_v) \sqrt{a/2r} \cos^3 \frac{\theta}{2}. \tag{11}$$

由式(11)可知:裂纹尖端环向为拉应力,岩体耐压不耐拉,故岩体裂纹尖端主要破坏模式为张性破坏.

令 $K_4 = \sqrt{a/2r} \cos^3(\theta/2)$, 图 5 为 K_4 等值线分布和沿裂纹走向环向应力变化曲线.从图 5 可以看出:裂纹的存在使尖端附近环向应力由压应力转变为拉应力,但拉应力的影响范围非常小,随着距离的增大,拉应力急剧下降恢复至压应力;当到裂缝尖端的距离相同时,裂纹走向即 $\theta = 0^\circ$ 方向拉应力最大.同上文取 $\sigma_v = 10 \text{ MPa}$, $P_w = 15 \text{ MPa}$, 裂纹宽度 $2a = 2 \text{ m}$, 裂纹方向环向应力随距离的变化曲线见图 5b.

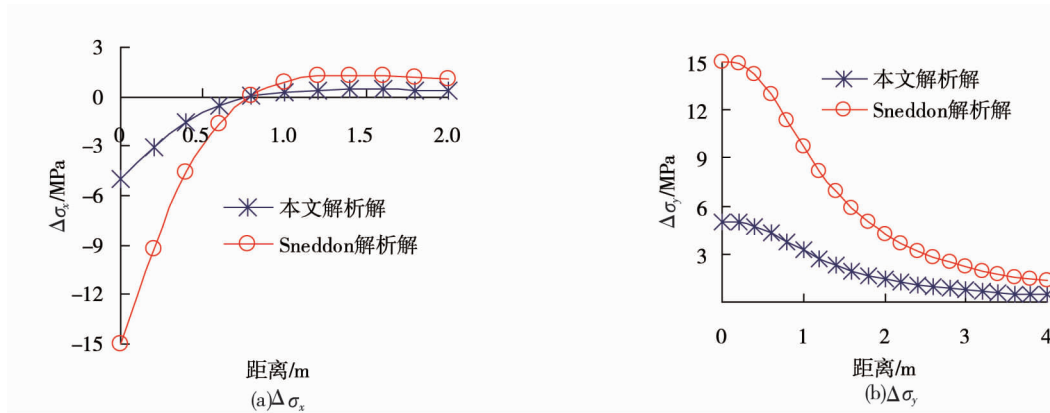


图 4 裂纹垂向附加应力解析对比曲线

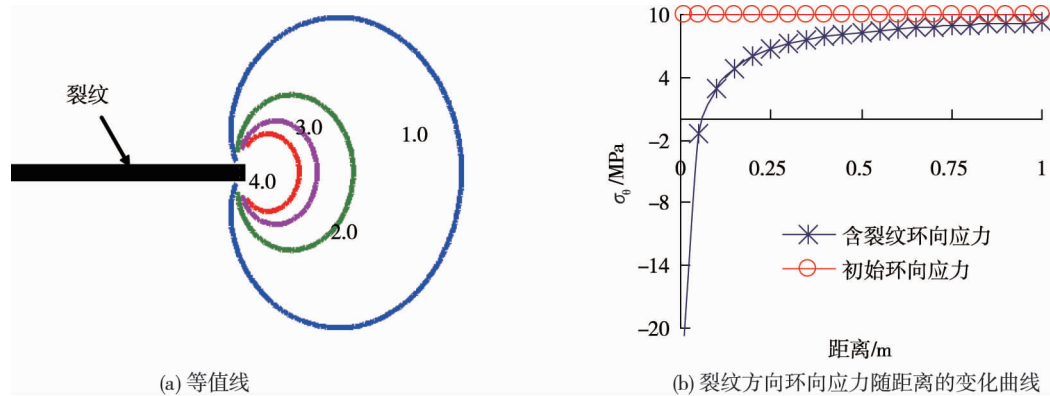


图 5 裂纹尖端环向应力

1.3 滤失引起的压裂裂纹附近储层孔隙压力改变

有效应力原理:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha P_p \delta_{ij} \tag{12}$$

式中: σ'_{ij} 为有效应力张量; σ_{ij} 为总应力张量; α 为比奥系数,非裂隙区岩石 $0 < \alpha < 1$, 裂隙区 $\alpha = 1$; P_p 为孔隙压力; δ_{ij} 为 Kroneker 符号,满足:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \tag{13}$$

根据 Harrington 等^[19]的滤失经验公式有

$$V_1 = 2\sqrt{2}SN/\sqrt{t} \tag{14}$$

式中: V_1 为水力压裂裂纹内流体滤失速度, m^3/s ; S 为裂纹面面积, m^2 ; N 为储层滤失系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$; t 为滤失时间, s .

同时压裂液的滤失满足达西定律,则有

$$V_1 = -\frac{KS(P_p - P_w)}{\mu L} \tag{15}$$

式中: K 为储层渗透率, m^2 ; P_p 为储层中裂纹附近某点的孔隙压力, Pa ; μ 为流体粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; L 为该点到裂缝的距离, m .

联立式(14)和式(15)可得

$$P_p = P_w - \frac{2\sqrt{2}N\mu L}{K\sqrt{t}} \quad (16)$$

由式(16)可知:当储层性质一定时,压裂裂纹附近的孔隙压力与裂缝内的流体压力呈线性递增规律,与到裂纹的距离呈线性递减规律,与滤失作用时间的平方根呈负反比关系.

2 页岩储层水力压裂损伤开裂机理

由式(11)可得裂纹尖端应力集中产生较大拉应力,当水力压裂裂纹与天然裂缝或层理不相交时,裂纹沿垂直最小地应力方向扩展.

2.1 含天然裂缝或层理页岩储层主裂纹损伤开裂机理分析

天然裂缝或层理与水力压裂裂纹的相遇如图 6 所示.设闭合的天然裂缝或层理与水力压裂裂纹的相交角为 γ ,如图 6a 所示.储层岩石基体抗拉强度为 S_t ,天然裂缝或层理抗拉强度 S'_t .根据最大拉应力破坏准则 $\sigma_\theta = -S_t$,可得水力压裂裂纹垂直最小地应力方向扩展所需的流体压力^[20]为

$$P_w^o = \sigma_v + \sqrt{\frac{2r}{a}} S_t \quad (17)$$

裂纹在斜交的天然裂缝或层理处起裂所需流体压力为

$$P_w^b = \sigma_v + \sqrt{\frac{2r}{a}} S'_t / \cos^3(\gamma/2) \quad (18)$$

裂纹沿天然裂缝或层理张性扩展所需流体压力为

$$P_w^c = \sigma_v + (\sigma_H - \sigma_v) \cos^2 \gamma + \sqrt{\frac{2r}{a}} S'_t \quad (19)$$

对以上流体压力进行分析可知:水力压裂裂纹遇斜交的天然裂缝或层理时,转向天然裂缝或层理扩展的条件为 P_w^b 与 P_w^c 均小于 P_w^o ;穿过天然裂缝或层理继续垂直最小地应力方向扩展的条件为 P_w^b 与 P_w^c 均大于 P_w^o ;若满足 $P_w^b < P_w^o < P_w^c$,则压裂裂纹会是天然裂缝或层理产生微裂纹,但压裂主裂纹不会转向.

天然裂缝处($S'_t = 0$ 时),比较式(18)和与式(17)可知, P_w^b 恒小于 P_w^o ,即压裂裂纹与天然裂缝或层理弱面斜交后,在天然裂缝处一定起裂;比较式(19)与式(17)可知,当 $(\sigma_H - \sigma_v) \cos^2 \gamma < \sqrt{\frac{2r}{a}} S_t$ 时,压裂裂纹转向天然裂缝扩展,反之,穿过天然裂缝.

层理弱面处($S'_t \neq 0$ 时),比较式(18)与式(17)可知,当层理抗拉强度与储层基质强度及相交角满足 $\cos^3(\gamma/2) > S'_t/S_t$ 时,水力压裂裂纹在层理处起裂;比较式(19)与式(17)可知,当 $(\sigma_H - \sigma_v) \cos^2 \gamma < \sqrt{\frac{2r}{a}} (S_t - S'_t)$ 时,压裂裂纹转向层理弱面扩展,反之,穿过层理弱面.

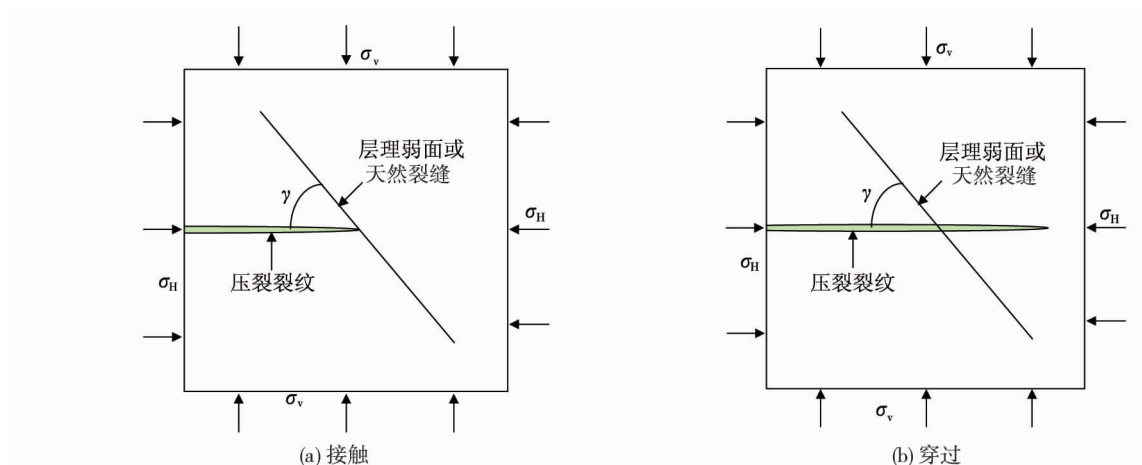


图 6 天然裂缝或层理与水力压裂裂纹的相遇

2.2 含天然裂缝或层理页岩储层裂纹形成机理分析

水力压裂裂纹穿过天然裂缝或层理后,如图6b,原地应力中 $\sigma_1 = \sigma_H = \sigma_x, \sigma_3 = \sigma_v = \sigma_y$. 水力压裂裂纹对天然裂缝或层理的影响见图7.附加应力场使水力压裂裂纹两侧的最大地应力减小,最小地应力增大,即应力圆缩小,与Sneddon解相比,修正初始地应力项后,附加应力场减弱,可通过减小排量的方式降低水力压裂裂缝内的流体压力,进一步减弱附加应力场效果;压裂液的滤失使裂纹两侧储层孔隙压力增大,应力圆向左移动;层理和天然裂缝处的渗透率较大,孔隙压力增加较大,加之强度准则中天然裂缝或层理的粘聚力 c_b 和内摩擦角 φ_b 较小.如图7所示,天然裂缝或层理剪切破坏时最小地应力仍为压应力,张性破坏时最小地应力需转为拉应力,因此,随着压裂液的滤失,与水力压裂裂纹相交后的天然裂缝或层理更易产生剪切损伤,形成裂纹.

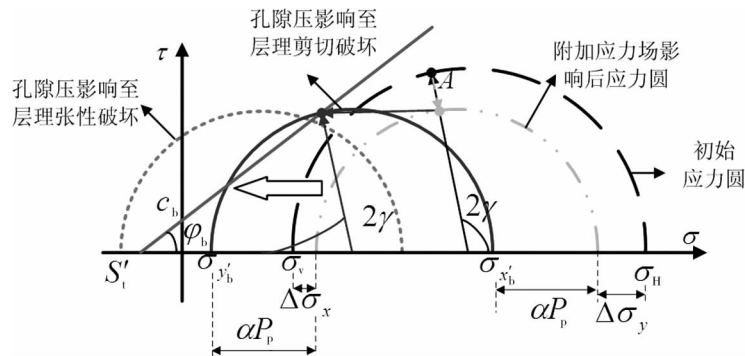


图7 天然裂缝或层理破坏机理

综上所述,页岩储层主裂纹沿垂直最小地应力扩展时,裂纹尖端拉应力集中使储层受拉损伤,裂纹扩展.压裂主裂纹遇层理时易使层理受拉产生微裂纹,若储层地应力差较小,层理受拉破坏,裂纹转向层理扩展;若地应力差较大,层理产生微裂纹后不发生扩展,压裂主裂纹仍沿垂直最小地应力扩展.被压裂裂纹穿过的天然裂缝或层理受压裂液的滤失影响,有效应力减小,易发生剪切破坏,形成滑动次生裂纹.

3 结论

1) 附加应力场对裂纹两侧应力状态的影响表现为最大地应力减小和最小地应力增大,不利于储层剪切破坏;修正后的附加应力场与不考虑地应力场的模型相比,附加应力值减小,并可以通过降低排量的方式减弱附加应力场的作用效果.

2) 压裂裂纹附近的孔隙压力与裂缝内的流体压力呈线性递增规律,与到裂纹的距离呈线性递减规律,与滤失作用时间的平方根呈负反比关系.

3) 水力压裂主裂纹尖端出现拉应力集中,因而主裂纹尖端的破坏模式为张性破坏.

4) 水力压裂裂纹穿过的天然裂缝或层理以及压裂裂纹附近的层理或天然裂缝在压裂液的滤失影响下发生剪切破坏,形成滑动次生裂纹.

参考文献:

- [1] 王世谦.页岩气资源开采现状、问题与前景[J].天然气工业,2017,37(6):115-130.
- [2] 刘曰武,高大鹏,李奇,等.页岩气开采中的若干力学前沿问题[J].力学进展,2019,49(1):1-236.
- [3] Li N, Huang B, Zhang X, et al. Characteristics of microseismic waveforms induced by hydraulic fracturing in coal seam for coal rock dynamic disasters prevention[J]. Safety Science, 2019, 115:188-198.
- [4] Liu S, Valkó P P, Mcketta S, et al. Microseismic Closure Window Better Characterizes Hydraulic Fracture Geometry[C]// SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 2016: 423-445.
- [5] 张广清,周大伟,窦金明,等.天然裂缝群与地应力差作用下水力裂缝扩展试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),

2019,43(5):157-162.

- [6] 侯振坤,程汉列,海金龙,等.页岩水力压裂裂缝起裂和扩展断裂力学模型[J].长江科学院院报,2020,37(5):99-107.
- [7] 曾义金,周俊,王海涛,等.深层页岩真三轴变排量水力压裂物理模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1758-1766.
- [8] 侯冰,陈勉,程万,等.页岩气储层变排量压裂的造缝机制[J].岩土工程学报,2014,36(11):2149-2152.
- [9] 张然,李根生,赵志红,等.压裂中水力裂缝穿过天然裂缝判断准则[J].岩土工程学报,2014,36(3):585-588.
- [10] Green A E, Sneddon I N. The Distribution of Stress in the Neighborhood of a Crack in an Elastic Solid [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1946, 187(1009):229-260.
- [11] Warpinski N R, Branagan P T. Altered-Stress Fracturing [J]. Journal of Petroleum Technology, 1989, 41(9): 990-997 .
- [12] 张广明,刘勇,刘建东,等.页岩储层体积压裂的地应力变化研究[J].力学学报,2015,47(6):965-972.
- [13] Zhou D S, Zheng P, Peng J, et al. Induced Stress and Interaction of Fractures During Hydraulic Fracturing in Shale Formation[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2015, 137(6):062902.
- [14] Rios A M, Gutiérrez G, Nagel N B, et al. Stress Shadow Evaluations for Chicontepec – evaluating New Completion Options [C]//The 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, USA, 2013.
- [15] 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].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2926-2939.
- [16] Nagel N B, Marisela S N. Stress Shadowing and Microseismic Events: a Numerical Evaluation [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado, USA, 2011.
- [17] 李爱芬,张环环,郭海萱,等.压裂液滤失深度及滤失速度计算新模型[J].西安石油大学学报(自然科学版),2015,30(1):67-71.
- [18] 徐芝纶.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [19] Harrington L J, Whitsitt N F, Hannah R R. Prediction of the Location and Movement of Fluid Interfaces in a Fracture [C]//Annual Southwestern Petroleum Association Meeting. Lubbock, TX, USA, 1973.
- [20] 孙可明,张树翠.含层理页岩气藏水力压裂裂纹扩展规律解析分析[J].力学学报,2016,48(5):1229-1237.