

文章编号:0253-9993(2007)01-0052-04

穿层钻孔起裂注水压力与起裂位置理论

张国华, 魏光平, 侯凤才

(黑龙江科技学院 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 在分析煤层结构和应力场特点的基础上, 确定出了穿层钻孔起裂注水压力计算方法, 并指出该压力不仅取决于侧向应力系数的大小, 而且还取决于组成钻孔围岩的性质, 总体表现出在径向上受最弱煤分层的控制, 在轴向上则受最弱层理面的控制. 在起裂位置上, 轴向受控于最弱层理面, 在径向上则受控于煤的最小抗拉强度和垂直侧向应力系数.

关键词: 穿层钻孔; 注水压力; 起裂位置; 水力压裂

中图分类号: TD713.33 文献标识码: A

Theory of start-split affusion stress and start-split location about through coal delaminations' bore of hydraulic fracture

ZHANG Guo-hua, WEI Guang-ping, HOU Feng-cai

(School of Safety Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: On the basis of analysis characteristic of coal bed's structure and stress field, deduced the calculation-method on start-split affusion stress of through coal delaminations' bore, and pointed out the stress not only lies on the side stress coefficient, but also lies on the wall rock's character of bore, as a whole, it is controlled by furthest weak coal delamination along radial and weak interface between delaminations along bore's axes. Start-split location is controlled by weak interface between delaminations along bore's axes, and controlled by min. tensile strength and the vertical side stress coefficient along radial.

Key words: through coal delaminations' bore; affusion stress; start-split location; hydraulic fracture

低渗透率煤层一直是限制本煤层瓦斯抽放技术推广应用的关键因素之一, 为了提高该类煤层的渗透率, 目前主要有深孔松动爆破、水力割缝、高压注水压裂3种方法. 由于深孔松动爆破在应用过程中容易诱发煤与瓦斯突出, 故其应用范围逐步减少, 而水力割缝虽能提高煤层渗透率, 但当将瓦斯作为一种洁净资源进行开采时, 又易破坏地质储气结构, 导致瓦斯流散^[1]. 从水力压裂在其它(如石油开采等)领域的成功应用^[2,3], 可以得出以下3个结论:

(1) 水力压裂可以提高地质体的渗透率, 从而提高其内部流体资源的开采量;

(2) 压裂裂隙弱面的扩展延伸和在抽采负压作用下压裂裂隙的闭合, 完全可以通过支撑剂和封堵剂的设计来实现人为控制;

(3) 所有控制措施的采取与实施均是建立在裂隙弱面发展过程的基础之上, 属于一种过程控制^[4].

因此, 利用水力压裂提高煤层的渗透率完全可以实现.

收稿日期: 2006-04-17 责任编辑: 耿红敏

基金项目: 黑龙江省教育厅基金资助项目(10551275)

作者简介: 张国华(1971-), 男, 黑龙江讷河人, 硕士, 副教授. Tel: 0451-88036483, E-mail: zgh710828131@163.com

由于在本煤层中采用水力压裂时，其注水压力取决于钻孔的起裂压力，而初期控制剂的选取又取决于其起裂位置及裂隙扩展延伸方向，故对二者进行深入分析将对进一步研究水力压裂控制设计具有重要意义。

1 煤层的结构特征

在煤层沉积形成过程中，由于各种地质因素的影响，在泥炭堆积的整个过程中往往存在不同补偿方式的反复交替，便形成了不同的煤层形态和煤层结构。煤层整体表现出两个特点：

- (1) 煤层是由多个煤分层组成的，且相邻分层之间在组成矿物成分及物理力学性质上均具有差异性；
- (2) 在成煤过程中受自然界各种应力作用，煤分层内部富含微原生裂隙和构造裂隙。

基于以上原因，煤层在物理力学性质上表现出相对于煤层层面而言，具有正交异性、横观同性的特点。因此，它属于由多分层组成的、具有正交异性横观同性特点的、富含原生裂隙的地质体，其分层界面为层理面。

2 钻孔围岩任意点处的应力状态

由于受各煤分层厚度变化的影响，同时在打钻时又难于始终保证钻孔与煤分层层面平行，故水力压裂钻孔实际上绝大多数属于穿层钻孔。如图1(a)所示，根据H. Kastner求解过程，注水压裂前钻孔围岩内任意一点处的应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1 + \lambda_c}{2} q_0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1 - \lambda_c}{2} q_0 \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta = \frac{1 + \lambda_c}{2} q_0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1 - \lambda_c}{2} q_0 \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} = \frac{1 - \lambda_c}{2} q_0 \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta, \end{cases} \quad (1)$$

式中， σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ 分别为钻孔围岩内任意点的径向应力、切向应力、剪应力； λ_c 为原岩应力场中与钻孔轴线水平垂直方向上的侧向应力系数； q_0 为铅垂自重应力，且 $q_0 = \gamma H$ （ γ 为上覆岩层的平均容重， H 为地层深度）； a 为钻孔的半径； r 为点到钻孔中心的距离； θ 为点的方向角。

若不考虑原岩应力的影响，仅在内水压力作用下，根据弹性力学的相关知识可得到围岩内任意一点处的应力（图1(b)）分别为

$$\sigma_r = \frac{a^2 p}{r^2}, \quad \sigma_\theta = -\frac{a^2 p}{r^2}, \quad \tau_{r\theta} = \tau_{\theta r} = 0,$$

式中， p 为钻孔内的注水压力。

根据钻孔与注水两个过程的先后性，可得到钻孔在原岩应力和内水压力双重作用下，围岩内任意一点处的应力表达式，即

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1 + \lambda_c}{2} q_0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1 - \lambda_c}{2} q_0 \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{a^2 p}{r^2}, \\ \sigma_\theta = \frac{1 + \lambda_c}{2} q_0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1 - \lambda_c}{2} q_0 \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{a^2 p}{r^2}, \\ \tau_{r\theta} = \frac{1 - \lambda_c}{2} q_0 \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta. \end{cases} \quad (2)$$

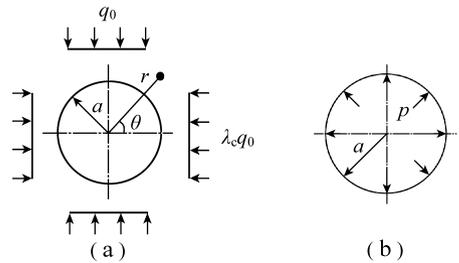


图1 原岩应力下和内水压力下钻孔围岩任意点应力

Fig. 1 Stress of different location of bore in wall rock under original stress and inner waterstress

(a) 原岩应力; (b) 内水压力

3 穿层钻孔起裂注水压力与起裂位置的确定

钻孔在内水压力和原岩应力的共同作用下发生起裂,是由于在二者共同作用下其围岩内某位置处所产生的拉应力超过该处抗拉强度的结果.由于穿层钻孔沿钻孔轴线方向上是多个煤分层的组合,各段的围岩性质不同,且各煤分层之间存在层理弱面.因此,应从钻孔径向和轴向两个方向上分别进行具体分析.

这里假设沿钻孔轴向上各段围岩均为均质、连续、各向同性体,但各段围岩之间性质不同.

3.1 穿层钻孔径向分析

若穿层钻孔在内水压力作用下沿着钻孔某一截面周边上发生起裂,此时可忽略轴向水平应力的影响,只考虑铅垂应力 q_0 和水平径向应力 $\lambda_c q_0$,因此可作为平面应变问题处理,如图 2 所示.

在此条件下,钻孔围岩内任一点的切向应力仍可表示为式(2)

第 2 式的形式,而孔壁上的切向应力为

$$\sigma_{\theta} \Big|_{r=a} = (1 + \lambda_c) q_0 + 2(1 - \lambda_c) q_0 \cos 2\theta - p,$$

若钻孔发生起裂, $\sigma_{\theta} \Big|_{r=a}$ 必须为拉应力,且满足

$$\sigma_{\theta} \Big|_{r=a} > |R_t|,$$

式中, R_t 为分层煤的抗拉强度.

若不考虑正负号,只考虑数值大小,由以上两式可知,起裂注水压力应满足

$$p > (1 + \lambda_c) q_0 + 2(1 - \lambda_c) q_0 \cos 2\theta + R_t. \quad (3)$$

由于沿钻孔轴向上其围岩是由多个煤分层组成的,各煤分层的抗拉强度不同,所以取分层煤中抗拉强度最小的作为式(3)中的计算值,此时式(3)应为

$$p > (1 + \lambda_c) q_0 + 2(1 - \lambda_c) q_0 \cos 2\theta + \min \{R_{ti}\} \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

式中, R_{ti} 为第 i 分层煤的抗拉强度; m 为钻孔所穿过的煤分层数目.

因此,在只考虑径向分析条件下,起裂注水压力可表示为

$$p_{H1} = (1 + \lambda_c) q_0 + 2(1 - \lambda_c) q_0 \cos 2\theta + \min \{R_{ti}\} \quad (i = 1, 2, \dots, m).$$

3.2 穿层钻孔轴向分析

若穿层钻孔在内水压力作用下沿着钻孔轴向方向上某一层理面发生起裂,此时可忽略径向水平应力的影响,只考虑铅垂应力 q_0 和水平轴向应力 $\lambda_p q_0$ (λ_p 为与钻孔轴线平行方向上的水平侧向应力系数),如图 3 所示.

此时,层理面上的法向压应力为

$$p_f = q_0 \cos \alpha + \lambda_p q_0 \sin \alpha,$$

式中, α 为层理面与钻孔轴线之间的夹角.

若钻孔沿层面发生起裂,则注水压力必须克服层理面上的法向压应力 p_f 和层理面处的黏结力 C .因此,此时的起裂条件为

$$p > q_0 \cos \alpha + \lambda_p q_0 \sin \alpha + C. \quad (5)$$

由于沿钻孔轴向上有多个层理面,式(5)中的层理面黏结力应取最小的一个,即 $C = \min \{C_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$),此时可得起裂注水压力为

$$p_{H2} = q_0 \cos \alpha + \lambda_p q_0 \sin \alpha + \min \{C_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, m).$$

3.3 注水压力与起裂位置的确定

综合前面的分析,穿层钻孔在内水压力作用下发生破裂,其注水压力为

$$p_H = \min \{p_{H1}, p_{H2}\}. \quad (6)$$

因此,当 $p_H = p_{H2}$ 时,注水压裂钻孔将沿着某层理面法线方向起裂,起裂位于最弱层理面位置处.当

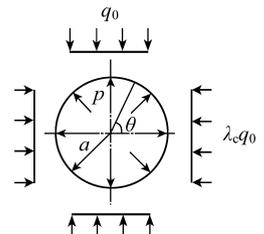


图 2 钻孔径向受力分析

Fig. 2 Stress analysis along bore's radial

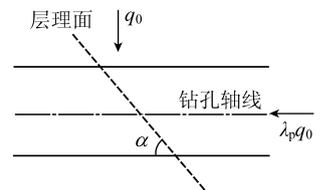


图 3 钻孔轴向受力分析

Fig. 3 Stress analysis along bore's axes

$p_H = p_{H1}$ 时，由式 (4) 可知，钻孔起裂位置不仅与最小煤分层抗拉强度有关，而且还取决于径向水平侧向应力系数。

当钻孔起裂位置发生在水平即 $\theta = 0$ (180°) 方向上时，由式 (4) 得

$$(3 - \lambda_c)q_0 + \min\{R_{\bar{u}}\} - p < 0,$$

$$\lambda_c > 3 + \frac{\min\{R_{\bar{u}}\} - p}{q_0}.$$

当钻孔起裂位置发生在铅垂即 $\theta = 90^\circ$ (270°) 方向上时，由式 (4) 得

$$(3\lambda_c - 1)q_0 + \min\{R_{\bar{u}}\} - p < 0,$$

$$\lambda_c < \frac{1}{3}\left(\frac{p - \min\{R_{\bar{u}}\}}{q_0} + 1\right).$$

由此可见，当 $\lambda_c > 3 + \frac{\min\{R_{\bar{u}}\} - p}{q_0}$ 时，在内水压力作用下钻孔的起裂位置位于最弱煤分层的水平方向上，沿铅垂方向起裂；当 $\lambda_c < \frac{1}{3}\left(\frac{p - \min\{R_{\bar{u}}\}}{q_0} + 1\right)$ 时，则起裂位置位于最弱煤分层的铅垂方向上，沿水平方向起裂。

这里需要说明一种特殊情况，即钻孔在某段位置处恰好处于两个分层层面的分界位置处，如图 4 所示。根据 3.1 中的分析过程：

当 $\theta = 0$ (180°) 时， $p_{H1-1} = (1 + \lambda_c)q_0 + 2(1 - \lambda_c)q_0 \cos 2\theta + C = (3 - \lambda_c)q_0 + C$ ；

当 $\theta = 90^\circ$ 时， $p_{H1-2} = (1 + \lambda_c)q_0 + 2(1 - \lambda_c)q_0 \cos 2\theta + R_{sh} = (3\lambda_c - 1)q_0 + R_{sh}$ ；

当 $\theta = 270^\circ$ 时， $p_{H1-3} = (1 + \lambda_c)q_0 + 2(1 - \lambda_c)q_0 \cos 2\theta + R_x = (3\lambda_c - 1)q_0 + R_x$ ；

式中， R_{sh} 、 R_x 分别为上、下煤分层的抗拉强度。

此时， $p_{H1} = \min\{p_{H1-1}, p_{H1-2}, p_{H1-3}\}$ ，钻孔的起裂注水压力将仍然按式 (6) 来确定，起裂位置则仍可按以上分析过程进行分析确定。

4 结 语

受煤层自身多分层结构的影响，穿层钻孔是水力压裂中最常见的一种钻孔，在原岩应力和内水压力双重作用下，其起裂注水压力不仅取决于钻孔轴向与径向水平应力的 大小，而且还取决于组成钻孔围岩的性质，总体表现出在径向上受最弱煤分层的控制，在轴向上则受最弱层理面的控制。而在起裂位置上，轴向受控于最弱层理面，在径向上则受控于 $\min\{R_{\bar{u}}\}$ 和 λ_c 。该分析对利用水力压裂提高煤层渗透率过程中钻孔注水压力的确定，以及进一步选择初期支撑剂和做好控制设计均具有重要的指导意义。

参考文献：

[1] 张国华. 本煤层水力压裂致裂机理及裂隙发展过程研究 [D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2004.
 [2] 卢拥军. 90 年代国外压裂液技术发展的新动向 [J]. 石油与天然气化工，1998，27 (2)：30~33.
 [3] 胥元刚. 水力压裂的几个新进展 [J]. 西安石油学院学报，1998，13 (4)：27~30.
 [4] 张国华，梁 冰，孙广义. 煤分层压裂钻孔始裂位置及发展过程分析 [J]. 煤炭学报，2005，30 (增)：34~37.

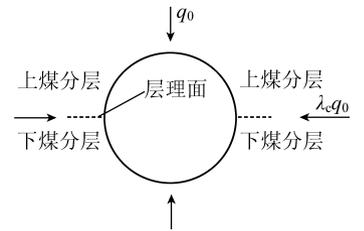


图 4 分层界面钻孔段受力分析
 Fig. 4 Stress analysis of delamination interface of bore's segment