

参 考 文 献

- [1] Haramy K. Floor heave analysis in a deep coal mine. Proc. of the 27th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Alabama: 1986: 520—525.
 [2] 康红普. 软岩巷道和峒室的底臃机理及卸压技术的研

- 究. 博士论文, 中国矿业大学, 1991.
 [3] 孙钧等. 地下工程中的有限单元法. 上海: 同济大学出版社, 1987.
 [4] 徐芝纶. 弹性力学, 北京: 高等教育出版社, 1982.
 (本文于 1992 年 1 月 12 日收到, 1992 年 5 月 19 日收到修改稿)

地下钻孔水压致裂的破裂准则¹⁾

周时光 阳友奎 张家达 卢国胜

(四川建材学院, 四川绵阳 621602)

提要 本文对水压致裂时钻孔周围的应变场进行了深入的分析, 采用最大拉应变强度理论建立了一个比传统的 Hubbert, M. K. 准则反映因素更全面的地下钻孔水压致裂破裂准则。

关键词 钻孔, 水压致裂, 最大拉应变, 破裂准则

1. 前言

地下岩层中的钻孔水压致裂方法可应用于石油、天然气开发, 盐类矿床的开采, 以及核废料的地下永久处置等许多方面^[1]。人们沿用较多的是传统的 Hubbert, M. K. 钻孔水压致裂破裂准则^[2]。Hubbert, M. K. 等人曾采用狭义平面应变假设(沿钻孔轴向的应变分量 $\epsilon_z = 0$)研究了钻孔水压致裂时破裂孔压与地应力场之间的关系, 认为当钻孔内水压引起钻孔孔壁岩石的环向拉应力达到岩石的单轴抗拉强度时, 孔壁岩石就将被压裂, 其破裂准则式为

$$P_{s1} = 3P_x - P_y - \sigma_t \quad (1)$$

式中, P_{s1} 为水压致裂起裂时的孔内水压; P_x 、 P_y 为地应力场中水平面内的最大、最小主应力; σ_t 为孔壁岩石的单轴抗拉强度 ($\sigma_t < 0$)。

从(1)式可以看出, 该准则没有反映出地应力场中沿钻孔轴向的铅直主应力 P_z 对水压致裂的影响, 通过文献[3, 4, 5]等的试验研究表明, 轴向应力 P_z 对破裂孔压存在着较大的影响, 例如岩石的单轴压缩会产生纵向劈裂破坏现象, 这表明由轴向应力引起的横向拉应变是导致岩石产生张性劈裂的根源, 对此, 本文将建

立地下钻孔水压致裂的广义平面应变 ($\epsilon_z = \text{常数}$) 受力模型并对其应变场进行分析, 从而建立水压致裂破裂准则。

2. 地下钻孔水压致裂的应变场分析及破裂准则的确定

如图 1 所示, 钻孔一般铅直向下, 设沿钻孔

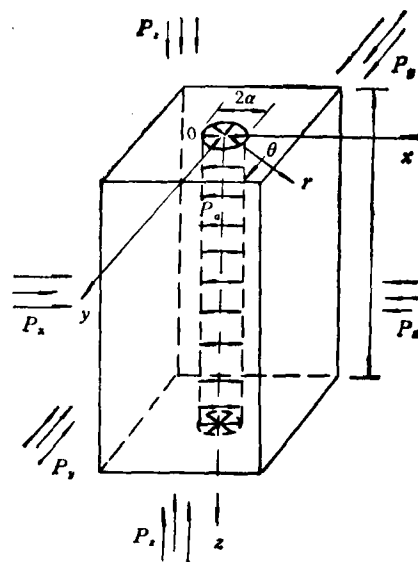


图 1 地下钻孔被压裂段的三维受力模型示意图

轴向的应力 P_z (一般为自重应力) 为地应力场中的一个主应力^[6], P_x 、 P_y 为水平面内的最大、最小主应力, 钻孔内的均匀水压为 P_s , 设沿钻孔轴向的变形均匀, 即 $\epsilon_z = \text{常数}$, 垂直于钻

1) 国家自然科学基金资助项目。

孔轴向的每个截面变形都相同, 于是地下钻孔水压致裂就成为一个典型的三维应力场中的弹性力学广义平面应变问题, 其边界条件表示如下:

$$\textcircled{1} z = h \text{ 或 } 0, r \rightarrow \infty, 0 \leq \theta \leq 2\pi:$$

$$\sigma_z = P_z$$

$$\tau_{rz} = \tau_{r\theta} = 0$$

$$\textcircled{2} 0 \leq z \leq h, r = a, 0 \leq \theta \leq 2\pi:$$

$$\sigma_r = P_z$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$$

$$\textcircled{3} 0 \leq z \leq h, r \rightarrow \infty, 0 \leq \theta \leq 2\pi:$$

$$\sigma_r = P_x \cos^2 \theta + P_y \sin^2 \theta$$

$$\sigma_\theta = P_x \sin^2 \theta + P_y \cos^2 \theta$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$$

参考吉尔希解答和圆孔受均匀内压的平面问题解答及单轴压缩解答, 采用叠加原理, 可求出水压致裂钻孔周围岩石中的应力场^[1], 进而可以得到钻孔周围岩石中的应变场表达式:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} \left\{ \frac{1}{2} (P_x + P_y) \left[(1 - \mu) - (1 + \mu) \frac{a^2}{r^2} \right] + \frac{1}{2} (P_x - P_y) \cdot \left[(1 + \mu + 4\mu^2) - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3(1 + \mu) \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta + P_z (1 + \mu) \frac{a^2}{r^2} - \mu P_z \right\} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} \left\{ \frac{1}{2} (P_x + P_y) \left[(1 - \mu) + (1 + \mu) \frac{a^2}{r^2} \right] - \frac{1}{2} (P_x - P_y) \cdot \left[(1 + \mu - 4\mu^2) - 4\mu \frac{a^2}{r^2} + 3(1 + \mu) \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\theta - P_z (1 + \mu) \frac{a^2}{r^2} - \mu P_z \right\} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [P_z - \mu(P_x + P_y)] \\ \nu_{r\theta} &= -\frac{1 + \mu}{E} (P_x - P_y) \cdot \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \\ \nu_{\theta z} &= \nu_{rz} = 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

式中, $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \nu_{r\theta}, \nu_{\theta z}, \nu_{rz}$ 分别为钻孔周围岩石中的 6 个应变分量; E, μ 为岩石的弹模、泊松比; r, θ, z 为圆柱坐标分量; a 为钻孔半径; 其余符号意义同前。

由(2)式, 令 $r = a$, 得钻孔壁上的应变值:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{r,a} &= \frac{1}{E} \left[-\mu(P_x + P_y) + 2\mu(1 + \mu) \cdot (P_x - P_y) \cos 2\theta + (1 + \mu)P_z - \mu P_z \right] \\ \varepsilon_{\theta,a} &= \frac{1}{E} \left[(P_x + P_y) - 2(1 - \mu^2) \cdot (P_x - P_y) \cos 2\theta - (1 + \mu)P_z - \mu P_z \right] \\ \varepsilon_{z,a} &= \frac{1}{E} [P_z - \mu(P_x + P_y)] \\ \nu_{r\theta,a} &= \nu_{\theta z,a} = \nu_{rz,a} = 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

由(3)式可知, 在进行水压致裂时, 随着钻孔内水压 P_z 的逐渐增大, 孔壁岩石的环向应变 $\varepsilon_{\theta,a}$ 将逐渐减小, 当 P_z 增大到一定程度时, $\varepsilon_{\theta,a}$ 将变为负值的拉应变, 并且当 $\theta = 0$ 或 π 时, 负值的拉应变 $\varepsilon_{\theta,a}$ 取得极小值。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\theta,a,\min} &= \frac{1}{E} \left[(P_x + P_y) - 2(1 - \mu^2) \times (P_x - P_y) - (1 + \mu)P_z - \mu P_z \right] \end{aligned} \right\} (4)$$

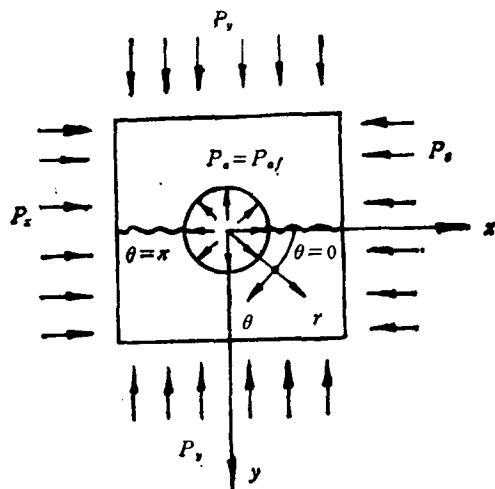


图 2 xy 面上水压致裂对径纵向张裂破坏示意图

本文认为, 当钻孔内水压 P_z 的增大所引起的孔

壁岩石环向应变的极小值即拉应变绝对值的极大值达到岩石的单轴极限拉伸应变时,孔壁岩石将产生对径的纵向张裂破坏,如图2所示。令(4)式等于岩石的单轴极限拉伸应变 ε_t ,得水压致裂破裂准则:

$$P_{ef} = \frac{1}{1+\mu}(P_x + P_y) - 2(1-\mu)(P_x - P_y) - \frac{\mu}{1+\mu}P_x - \frac{1}{1+\mu}E\varepsilon_t$$

即

$$P_{ef} = A(P_x + P_y) + B(P_x - P_y) + CP_x + DE\varepsilon_t \quad (5)$$

式中, P_{ef} 为水压致裂破裂孔压;

$$A = \frac{1}{1+\mu} > 0; \quad B = -2(1-\mu) < 0;$$

$$C = -\frac{\mu}{1+\mu} < 0; \quad D = -\frac{1}{1-\mu} < 0;$$

$E\varepsilon_t < 0$ 为表征岩石抗拉的强度指标;其余符号意义同前。

3. 小结

分析所建立的水压致裂准则(5)式可知:

(1) 破裂孔压 P_{ef} 与地应力场中水平面内最大、最小主应力之和($P_x + P_y$)成正比,比

例系数为 $A = \frac{1}{1+\mu} > 0$;

(2) 破裂孔压 P_{ef} 与地应力场中水平面内最大、最小主应力之差($P_x - P_y$)成反比,比例系数为 $B = -2(1-\mu) < 0$;

(3) 破裂孔压 P_{ef} 与地应力场中沿钻孔轴向的铅直主应力 P_x 成反比,比例系数为

$$C = -\frac{\mu}{1+\mu} < 0;$$

(4) 破裂孔压 P_{ef} 与孔壁岩石的抗拉强度指标的绝对值 $|E\varepsilon_t|$ 成正比,其比例系数的绝对

值为 $|D| = \frac{1}{1-\mu}$;

(5) 孔壁岩石的泊松比 μ 对系数 A, B, C, D 起着控制作用,它对破裂孔压 P_{ef} 的影响是综合的。如果令 $\mu = 0$,则(5)式成为

$$P_{ef} = 3P_y - P_x - E\varepsilon_t,$$

这就是前述的 Hubbert, M. K. 准则 $P_{ef} = 3P_y - P_x - \sigma_t$ (因 $E\varepsilon_t = \sigma_t$),但是,实际中 $\mu = 0$ 的岩石材料是不存在的,这说明本文所建立的准则反映出了岩石的变形特性对压裂的影响,比 Hubbert, M. K. 准则更接近实际情况;

(6) 钻孔水压致裂开裂点的方位角为 $\theta = 0$ 和 π ,如图2所示,即表明破裂面与水平面内最小主应力的方向垂直。

工程现场中的水压致裂所涉及到的岩石介质是十分复杂的地质材料,还存在着水的渗流作用等影响^[6],因此由准则式(5)式所计算的数值可能与实际之间存在着一定的误差,这还有待于通过现场试验进一步研究、验证和修正。然而,本文所建立的地下钻孔水压致裂破裂准则在形式上规范,反映的因素较全面,它所表达的物理意义对地下钻孔水压致裂机理的认识和工程的实际应用有着重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 张家达,周时光. 水力压裂在地下工程中应用的初步探讨. 四川冶金,1990,12(2)
- [2] Hubbert M K & Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing. Trans. Am. Inst. Min. Engrs, 1957(210): 153-168
- [3] 吴景浓等. 室内水压致裂法的初步实验研究. 水利学报,1982(7)
- [4] 吴景浓等. 内孔加压三轴条件下岩石的破裂试验研究. 地震地质,1986,8(2)
- [5] 周时光. 岩盐力学特性及其水力压裂机理的研究: [硕士论文]. 重庆: 重庆大学 1991年5月.
- [6] 苏恺之编著. 地应力测量方法. 北京: 地震出版社, 1985年3月.
- [7] 郑雨天编著. 岩石力学的弹塑性理论. 北京: 煤炭工业出版社,1988年8月.

(本文于1992年1月29日收到,1992年8月7日收到修改稿)