

岩盐水力压裂的变形破裂准则*

阳友奎 肖长富 邱贤德 吴刚 马建春

(重庆大学资源及环境工程学院, 重庆 630044)

关键词 岩盐、水力压裂、变形破裂准则

1 前言

自本世纪40年代末水力压裂技术开始用作油气井激化以提高油气产量和采收率以来,由于它毋需进行大规模的地下开挖,仅通过向地层深部钻孔注入高压流体诱发孔壁岩石的破裂,现已成为深部地应力测量中广泛采用的方法,而随着岩盐层溶腔储存技术和岩盐矿床水溶开采的发展,对岩盐层这种特殊岩石介质地应力环境的了解也越来越受到各国岩土工程界的重视。

水力压裂地应力测量中与地应力状态有关的一个重要特征量是破裂压力 P_b , 其传统的解释方法是建立在众所周知的 Kirsch 解答和最大拉应力强度理论基础之上的^[1],即

$$P_b = 3\sigma_h - \sigma_H + S_T - p_0, \quad (1)$$

式中 σ_h 和 σ_H 分别为最小和最大水平地应力(文中按岩土工程界的一般规定,以压应力为正), S_T 为岩石的抗拉强度, p_0 为岩层内的孔隙压力。然而,现场试验和我们的初步室内实验结果^[2]均已表明,岩盐的破裂压力与 Kirsch 弹性解释并不吻合,且破裂压力存在明显的铅直应力效应。而至今仍未对此作出合理而简单适用的解释。为此,本文根据岩盐物理力学特性和破坏模式的基本实验资料,结合最大拉应变强度理论导出了一个适用于岩盐的水力压裂变形破裂准则,并进行了初步的实验验证。

2 破裂准则的建立

本文实验所用岩盐取自云南省乔后盐矿,其基本力学特性实验结果表明:(1)单轴抗压强度 $S_c = 36\text{MPa}$, 抗拉强度 $S_T = 3.0\text{MPa}$, 杨氏模量 $E = 2.0\text{GPa}$, 其“杨氏模量/强度 (E/S)”比值比一般岩石低1—2个数量级以上,即岩盐是一种相对于其较小的强度来讲具有更小变形模量的软岩;(2)岩盐具有很大的横向变形能力,在轴向应力接近80% S_c 左右时,其泊松比 μ 值就接近0.5;(3)岩盐单轴压缩时主要表现为纵向劈裂张拉破坏。上述特征表明了拉伸变形成为导致岩盐破坏的主要机制。因此,岩盐在水力压裂时应遵循变形破坏准则,且铅直应力在产生孔壁环向拉应变中必然起着重要作用。

所用水力压裂物理模型和坐标系如图1所示。按现场应用中的一般情形,取孔轴与铅直主应力 σ_v 的作用方向平行,孔内流体压力为 P 。则该水力压裂模型可简化为三维应力场中

1992-05-11 收稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

的广义平面应变问题,孔壁处的环向应力和应变为^[3]

$$\sigma_{\theta\theta} = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta + P, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} [(\sigma_H + \sigma_h) - 2(1 - \mu^2)(\sigma_H - \sigma_h) \cdot \cos 2\theta - (1 + \mu)P - \mu\sigma_V], \quad (3)$$

由式(2)和(3)可见, $\theta = 0$ 或 π 时 $\sigma_{\theta\theta}$ 和 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 最小, 在应力场 $(\sigma_H, \sigma_h, \sigma_V)$ 一定的情况下, 随着孔内压力 P 的增大, $\sigma_{\theta\theta}$ 和 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 将变为负值即拉应力和拉应变。根据最大拉应力强度理论和式(2)即可得到传统的破裂准则式(1), 而由式(3)和最大拉应变强度理论得

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta\theta}|_{\theta=0, \pi} &= \frac{1}{E} [(\sigma_H + \sigma_h) - 2(1 - \mu^2) \\ &\quad \cdot (\sigma_H - \sigma_h) - (1 + \mu)P_b - \mu\sigma_V] \\ &= \varepsilon_{\max}, \end{aligned} \quad (4)$$

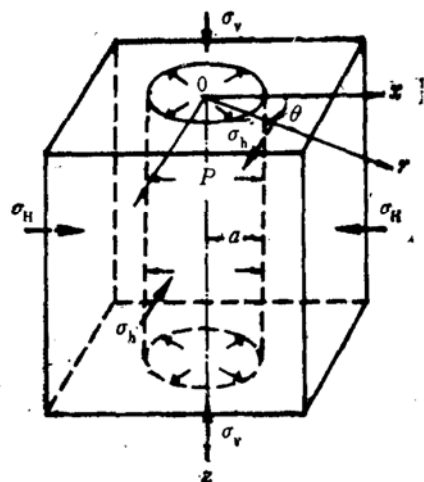


图1 水力压裂物理模型示意图

式中 $\varepsilon_{\max}$ 为临界拉应变值。与一般最大拉应变强度理论不同的是, $\varepsilon_{\max}$ 不是由抗拉强度来确定, 而是考虑到复杂应力状态下岩盐中的拉应变主要由压应力的横向变形效应所引起, 由单轴压缩试验确定为

$$\varepsilon_{\max} = -\frac{\mu}{E} S_c, \quad (5)$$

则由式(4)和(5), 岩盐水力压裂的变形破裂准则具体化为

$$\begin{aligned} P_b &= A\sigma_h + B\sigma_H + C\sigma_V + DS_c, \\ A &= \frac{3-2\mu^2}{1+\mu}, B = \frac{2\mu^2-1}{1+\mu}, C = -\frac{\mu}{1+\mu}, D = \frac{\mu}{1+\mu}. \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)与式(1)的明显区别在于: (1)水平地应力影响系数 A 和 B 不再为常数, 而取决于具体岩盐的泊松比; (2)非零系数 C 反映了破裂压力的铅直应力效应。

3 实验验证

为验证前文所建立的岩盐水力压裂变形破裂准则, 在自行设计的等围压 $(\sigma_H = \sigma_h)$ 三轴水力压裂系统上对岩盐进行了室内水力压裂实验, 结果见表1。

表1 岩盐室内三轴水力压裂实验结果(单位: MPa)

σ_H	0		4.5			6.8	10					15			22.5
σ_V	13.1	23.5	15.7	23.5	25.1	23.5	16.2	23.5	41.3	52.3	78.5	23.5	35.6	47.9	23.5
P_b	13.5	6.5	17.5	13	13.5	20	28	23.8	19	17	7.5	29.5	28	23	32

对表1中全部实验结果和两种特定情形时的实验结果进行线性回归得

$$P_b = 1.30\sigma_H - 0.30\sigma_V + 16.0, \quad (7)$$

$$P_b|_{\sigma_H=10\text{MPa}} = -0.305\sigma_V + 31.0, \quad (8)$$

$$P_b|_{\sigma_V=23.5\text{MPa}} = 1.25\sigma_H + 9.2, \quad (9)$$

从上面三式的比较可见, (7)式对(8), (9)两式有很好的代表性, 说明统一采用(7)式作为实验

所用岩盐的经验破裂准则具有较高的精度。

根据前文的结果,取 $\mu = 0.5$ 和 $S_c = 36\text{MPa}$ 代入(6)式即得

$$P_b = 1.33\sigma_H - 0.33\sigma_V + 12. \quad (10)$$

可以发现,(7),(10)两式中反映水平应力 σ_H 和铅直应力 σ_V 对破裂压力影响程度的系数极为相近,其相对误差分别为 2.26% 和 9.1%,说明该理论准则较真实地反映了水平应力和铅直应力对破裂压力的影响规律。两式中的常数项仍相差较大,这主要是由实验系统误差所引起,即压力测读点与注液孔间管道内流体压力损失所引起。

为与传统破裂压力公式(1)进行比较,下面来看(8),(9)两式所反映的两种特殊情形。当 $\sigma_H = 10\text{MPa}$ 时,由(10)式得出的 $P_b(\sigma_V)$ 理论曲线与实验曲线近于平行(图 2),其间只存在一近于常量的实验系统误差;而此时(1)式给出常量破裂压力 $P_b = 23.0\text{MPa}$,在图 2 中表现为一水平线。当 $\sigma_V = 23.5\text{MPa}$ 时,(10)式给出的 $P_b(\sigma_H)$ 曲线亦与实验曲线近于平行(图 3),其间亦只存在一近于常量的实验系统误差。

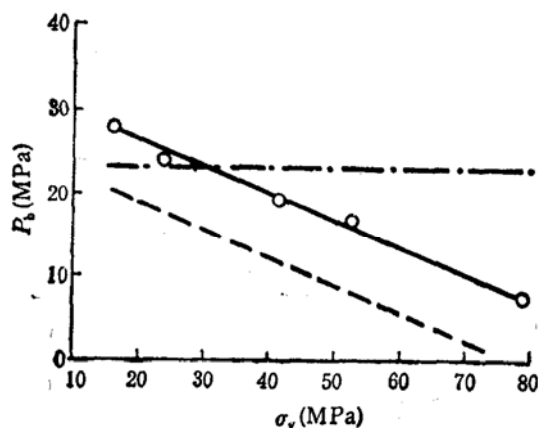


图 2 $\sigma_H = 10\text{MPa}$ 时的 P_b - σ_V 关系
○实验值,--(10)式,--(8)式,---(1)式

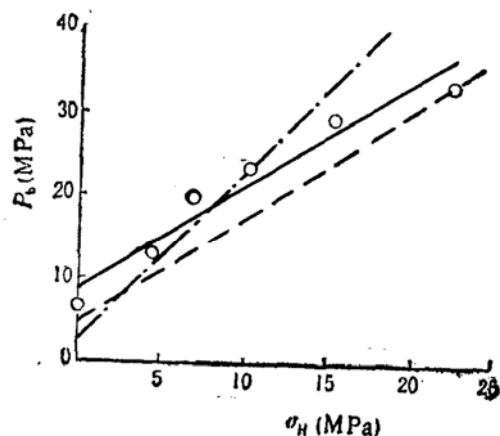


图 3 $\sigma_V = 23.5\text{MPa}$ 时的 P_b - σ_H 关系
○实验值,--(9)式,--(10)式,---(1)式

上述分析比较表明,本文所建立的岩盐水力压裂变形破裂准则较好地解释了岩盐水力压裂时的破裂压力,对岩盐层地应力的水力压裂测量具有重要的理论和实践意义。

4 结 论

1. 岩盐是一种 E/S 比值极低的特殊软岩。
2. 岩盐具有很大的横向变形能力,即使是在单轴压缩状态下,其破坏亦遵循变形破坏准则而反映为对径张拉破坏。
3. 岩盐的水力压裂破裂压力与各主应力呈线性关系,并表现出明显的铅直应力效应。
4. 基于最大拉应变强度理论建立的岩盐水力压裂变形破裂准则包含了三个主应力和泊松比的影响,且其临界拉应变值一般应由单轴压缩实验确定,该准则较好地解释了岩盐水力压裂时的破裂压力。

参 考 文 献

- [1] Bush, D., Barton, N., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1989, 26: 629—635.
- [2] 肖长富、周时光、阳友奎等,重庆大学学报,1992,15(1): 15—20.
- [3] 郑雨天,岩石力学的弹塑性理论,煤炭工业出版社,1988,156—167.