

13

岩盐水力压裂的破裂判据

78-84

A THEORETIC BREAKDOWN CRITERION OF HYDROFRACTURING IN ROCK SALT

肖长富
Xiao Changfu

阳友奎
Yang Youkui

吴刚
Wu Gang

TD 313

邱贤德
Qiu Xiande

周时光
Zhou Shiguang

(资源及环境工程系)

摘 要 岩盐的基本力学特性和破坏特征的实验结果表明,岩盐是一种“杨氏模量/强度(E/S)”比值极低的特殊软岩,其破坏遵循变形破坏准则。根据最大拉应变强度理论建立了岩盐水力压裂时计入铅直应力效应的破裂判据,并建议一般应采用单轴压缩实验来确定临界拉应变值。该判据与实验结果极为一致,适应于各种应力状态下任何具有较小E/S比值的软岩。

关键词 岩盐力学;水力压裂;破裂判据;铅直应力效应

中国图书资料分类法分类号 TD313;TD315

ABSTRACT Experimental results of the basic mechanical properties and failure mode performed on rock salt demonstrate that rock salt is a typical and peculiar soft rock, whose "Young's modulus/strength(E/S)" ratio is extremely small, and whose failure follows the deformation failure criterion. With these results, this paper develops a theoretic breakdown criterion of hydraulic fracturing in rock salt, which is based on the greatest tension strain failure theory and includes the vertical stress effects. It has been suggested that the critical tension strain should be determined from uniaxial compression tests. This theoretic criterion exceedingly agrees with experimental results and is applicable for every soft rock with small E/S ratio under various stresses.

KEY WORDS rock salt mechanics; hydrofracturing; breakdown criterion; vertical stress effects

0 前 言

水力压裂的实质在于通过钻孔向被压目的层注入高压流体而使其产生人工裂缝。从本世纪40年代末开始水力压裂技术已广泛地用作低渗透性油气储集层的激化技术以提高油气

* 收文日期 1991-12-07

国家自然科学基金资助项目

产量和采收率。由于无须进行大规模的开挖即可将地表与深部地层联系起来,水力压裂技术成为开发利用地层深部资源和地应力环境调查的一种现代技术,在油气井酸化、地热开发、地层注浆加固、瓦斯抽放、岩盐矿床水溶开采、工业废料的地下处置和深部地应力测试等领域均得到了广泛应用。特别是随着现代工业的发展,放射性核废料的地下永久处置已成为世界各国共同关注的一项重要课题,而利用岩盐的水介质易溶性和极低的渗透性以及水力压裂技术所具有的优越性而发展起来的盐层水力压裂地下处置技术已受到越来越广泛的重视,与此相关的岩盐力学问题也已成为国际岩石力学界的一个新课题^[1-4]。

盐层水力压裂处置技术通常有两种方式,一是利用岩盐的易溶性和水力压裂技术形成地下溶腔来实现集中处置;其次是将要处理的废料混拌成流态后利用水力压裂技术直接压注入盐层的方法。然而,不管采用哪种方式,溶腔的设计与建造,地面注液系统的配置以及压裂作业过程的控制,都与盐层的应力场和水力压裂破裂压力有关,而深部地应力的水力压裂测量也离不开岩盐破裂机制的识别和破裂压力的预测,因此,破裂压力计算方法的正确与否是水力压裂设计与作业控制的关键。

岩层破裂压力 p_b 的传统预测方法是建立在均质各向同性介质中孔周应力分布的弹性平面应变解答和最大拉应力强度理论基础之上的,即^[1-6]

$$p_b = 3\sigma_h - \sigma_H + S_T - P_0 \quad (1)$$

式中 σ_h, σ_H —水平地应力, $\sigma_h \leq \sigma_H$; S_T —岩石的抗拉强度; P_0 —岩层内的孔隙压力。

然而,大量的现场试验^[1,2]和室内实验结果^[3-8]均已表明,依据式(1)的理论预测值与实测值之间存在着较大的数值和规律性差异,且对产生这种差异的内在机理目前尚无可靠的理论解释,而目前国内对岩盐这种特殊的岩石材料这方面的研究尚属空白。为此,本文首先对岩盐基本力学特性进行了初步的实验研究,获得了岩盐基本力学特性和破坏特征的实际资料,并在此基础上建立了适用于岩盐这类特殊软岩水力压裂的破裂判据,并对该判据的可靠性进行了实验验证。在目前国内十分缺乏岩盐力学方面研究的情况下,这项研究工作无疑对促进国内岩盐力学研究、确保盐层地应力测量中数据处理的可靠性、发展国际上已日益兴起的核废料盐层水力压裂处置技术以及用作其他目的的水力压裂技术都具有重要的理论意义和实践意义。

1 岩盐的基本力学特性

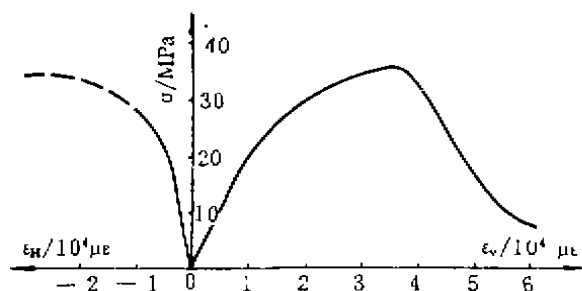
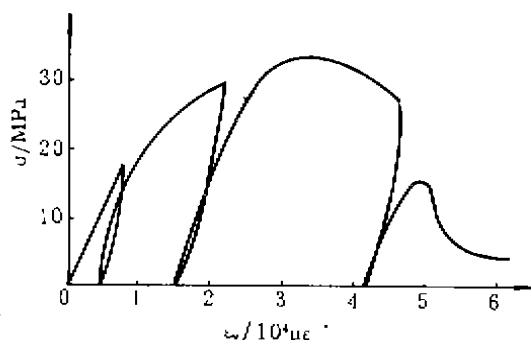
为建立与岩盐这种特殊材料的力学特性相适应的破裂判据,首先必须了解其基本力学特性和破坏特征。为此,本文对取自云南省乔后盐矿的岩盐进行了单轴压缩、等围压三轴压缩、直接拉伸和圆盘劈裂拉伸四类实验。下面仅介绍有关的部分结果。

(1)表1中列出了岩盐的基本力学特性参数,且为便于比较说明岩盐所具有的特殊力学特性,表1中还列出了几类常见岩石和常与岩盐伴生的硬石膏和灰岩的对比值。可以看出,岩盐的强度值与一般岩石同量级甚至有时比有的岩石还高,但其杨氏模量比一般岩石低一个数量级以上,杨氏模量与强度比值(E/S)较一般岩石小1—2个数量级,这表明岩盐不仅是一种典型的软岩,而且是一种相对于其较小的强度来讲具有更小变形模量的特殊软岩。

(2)图1为实验所得岩盐典型的单轴压缩全应力—应变曲线,图中可见,岩盐具有很大的横向变形能力,在轴向应力接近于80% S_c 时,其泊松比 μ 值就接近0.5。

表 1 岩盐基本力学特性参数及其与几类岩石的对比

岩石名称	岩盐	砂岩	页岩	灰岩	硬石膏
单轴抗压强度 S_c (MPa)	36	20—200	10—100	50—200	30—140
抗拉强度 S_T (MPa)	直拉: 3.2 劈裂: 2.8	4—25	2—10	5—20	3—10
杨氏模量 E ($\times 10^3$ MPa)	2.0	10—100	20—80	50—100	30—80
E / S_c	55.5	≥ 500	≥ 800	≥ 500	≥ 570
E / S_T	667—714	≥ 2500	≥ 1000	≥ 5000	≥ 8000

图 1 典型的岩盐单轴压缩
全应力—应变曲线图 2 典型的岩盐循环加载
全应力—应变曲线

(3) 岩盐是一种弹塑性岩石, 在较低应力水平下即表现出一定的塑性, 随着应力水平的提高, 其应变恢复能力减弱 (图 2), 其塑性特性表现为加载过程的强化, 在短期单轴压缩试验中无塑性流动现象, 三轴应力状态时的塑性流动也不明显。

(4) 岩盐的单轴压缩破坏主要表现为与水平面成 75° — 90° 夹角的纵向劈裂破坏, 当轴向应力达到极限抗压强度 S_c 的 80% 左右时, 即可用肉眼观察到试件上有纵向张性裂缝产生, 这表明, 由轴向载荷引起的横向拉伸变形是导致试件破坏的主要机制。

2 岩盐水力压裂破裂判据的建立

岩盐水力压裂破裂压力实验结果的分析比较^[9]表明, 传统的理论预测值与实验值之间存在太大的数值差异和规律性的极不一致, 且存在明显的轴向应力效应。这给了我们这样一个重要启示, 即传统的理论公式 (1) 所依赖的最大拉应力强度理论和不计铅直应力效应对岩盐来讲可能存在本质上的不适用性。与一般岩石相比, 岩盐相对于其强度来讲具有明显更低的变形模量和更大的泊松比, 使其横向变形量较大, 拉伸变形成为导致岩盐破坏的主要机制。因此, 岩盐水力压裂也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起着重要作用。下面通过孔壁应

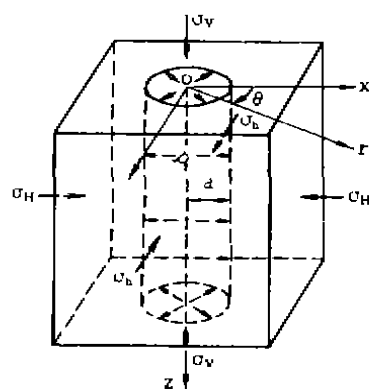


图 3 水力压裂物理模型

力压裂破裂判据的建立。下面通过孔壁应

力和应变的广义平面应变求解和最大拉应变强度理论导出适于岩盐水力压裂的破裂判据。

水力压裂物理模型和圆柱坐标系如图3所示。按现场应用中的一般情形,取孔轴为铅直方向即与铅直主应力 σ_v 的作用方向平行, σ_h 和 σ_H 为水平主应力 ($\sigma_h \leq \sigma_H$), 孔内压裂液压力为 p 。为简化问题的求解,除弹性问题的基本假设外,作如下补充假设:

(1) 不考虑压裂液对岩盐的溶解扩孔作用,这与现场通常采用饱和盐水作压裂液以维持注液孔的完好性相一致;

(2) 由于不论是室内的压裂实验还是现场的压裂作业,从注液开始到孔壁破裂的时间都很短,因此不考虑时间效应;

(3) 由于岩盐具有的渗透性极低(渗透性与岩盐的吸水性不能混淆),因此不计压裂液渗透引起的孔隙压力效应。则该水力压裂模型可简化为三维应力场中的广义平面应变问题^[9],利用弹塑性力学的基本方程和模型边界条件以及线性叠加原理,即得孔壁环向应力和应变为

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

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

式中符号意义同前,以压应力为正,拉应力为负。

由式(2)和(3)可见, $\theta = 0$ 或 π rad 时 $\sigma_{\theta\theta}$ 和 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 最小,在 $(\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v)$ 一定的情况下,随着孔内压力 p 的增加, $\sigma_{\theta\theta}$ 和 $\varepsilon_{\theta\theta}$ 将变为负值即变为拉应力和拉应变。根据最大拉应力强度理论和(2)式即可得到传统的破裂判据式(1),而由式(3)和最大拉应变强度理论即得本文所要建立的岩盐水力压裂破裂判据为

$$\varepsilon_{\theta\theta}|_{\theta=0,\pi} = \frac{1}{E} [(\sigma_H + \sigma_h) - 2(1 - \mu^2)(\sigma_H - \sigma_h) - (1 + \mu)p - \mu\sigma_v] = \varepsilon_{\max} \quad (4)$$

式中 p_b 为破裂压力, ε_{\max} 为破坏时的临界拉应变。

由于岩盐的特殊力学特性,其复杂应力状态下的拉应变主要由压应力的横向变形效应所引起,因此本文在确定岩盐的 ε_{\max} 值时与一般最大拉应变强度理论明显不同的是,不是由抗拉强度确定为 S_T/E ,而是建议由单轴压缩试验按下式确定

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

则由(4,5)两式得适用于岩盐的水力压裂破裂判据为

$$p_b = A\sigma_h + B\sigma_H + C\sigma_v + DS_C$$

$$A = \frac{3 - 2\mu^2}{1 + \mu}, \quad B = \frac{2\mu^2 - 1}{1 + \mu}, \quad C = -\frac{\mu}{1 + \mu}, \quad D = \frac{\mu}{1 + \mu} \quad (6)$$

(6)式表明,岩盐水力压裂的破裂压力是关于应力场 $(\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v)$ 和强度 S_C 的线性函数,它不仅反映了铅直应力的影响,而且还反映了横向变形能力参数 μ 的影响。式中仅取决于 μ 的系数 A、B、C、D 反映了相应变量对破裂压力的影响程度,由于 $\mu \leq 0.5$, 则有 $A > 0$, $D > 0$ 和 $B < 0$, $C < 0$, 这说明最小水平主应力和强度 S_C 的增大将引起破裂压力的增大,而较大水平主应力 σ_H 和铅直主应力 σ_v 的增大将起着使破裂压力减小的作用,反之亦然。随着 μ 值的增大, $|A|$ 和 $|B|$ 将减小, $|C|$ 和 $|D|$ 将增大,即水平主应力的影响将减弱,而铅直主应力和强度的影响将增强。特别地,随着 μ 减至很小而有 $\mu S_C/E \leq S_T/E$ 时,破裂判据式(4)中的 ε_{\max} 应由拉伸实验确定为 S_T/E ,若此时再不计 μ 值的影响即 $\mu = 0$, 则得到(1)式,这说明传统的破裂判据式

(1)仅为本文给出判据(4)式 $\mu=0$ 时的一个特例,它仅适用于 μ 值很小的岩石。

3 判据式(6)的实验验证

文献[3]中所进行的等围压应力状态下岩盐水力压裂实验研究得出了破裂压力的经验公式为

$$p_b = 1.30\sigma_H - 0.30\sigma_v + 16.0 \quad (7)$$

若用传统的理论公式(1)进行破裂压力预测,则等围压状态下有

$$p_b = 2\sigma_H + 3.0 \quad (8)$$

显然,该式预测出的破裂压力值不但与实验值之间存在明显的差异,与(7)式所反映的规律性也极不一致,这说明传统的理论判据所依赖的最大拉应力强度理论和不计铅直应力效应对岩盐来讲存在本质上的不适用性。

根据前文岩盐基本力学特性实验结果,取 $S_r = 36\text{MPa}$, $\mu = 0.5$ 和 $E = 2.0 \times 10^5 \text{MPa}$,代入(6)式即得本文和文献[3]中实验所用岩盐在等围压应力状态下的水力压裂破裂判据为

$$p_b = 1.33\sigma_H - 0.33\sigma_v + 12 \quad (9)$$

(9)式与(7)式变量系数的比较表明,两式中反映水平应力和铅直应力对破裂压力影响程度的变量即 σ_H 和 σ_v 的系数极为相近,其相对误差分别为2.26%和9.1%,这说明该判据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。两式中的常数项相差仍较大,但与用传统理论公式(1)时的常数项为 $S_r = 3.0\text{MPa}$ 相比,该判据的常数项与实验公式(7)中的常数项已相当接近。对于产生这一常量误差的原因,由于它并不影响 p_b 依赖于 σ_H 和 σ_v 的规律性,很可能主要是由实验系统误差所引起,事实上文献[3]中测得的破裂压力是由电动油泵上的压力表直接测读的,并不是压裂孔内的真实流体压力,因此,由电动泵的输出口到压裂孔间的管道内必然存在的压力损失可能是引起该常量误差仍较大的主要原因。

图4和图5分别给出了铅直应力恒定和水平应力恒定两种情况下破裂压力实验结果^[3]与式(1)和式(9)预测结果间的比较,图中更直观地反映出了前述分析比较结果。

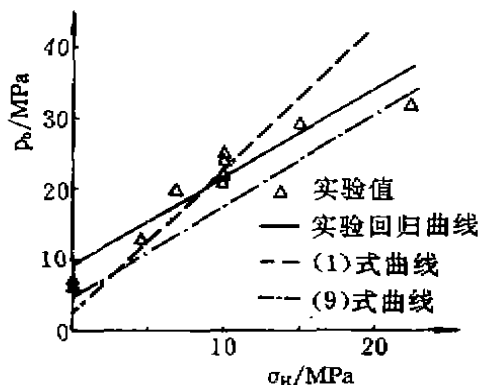


图4 $\sigma_v = 23.5\text{MPa}$ 时的 $p_b - \sigma_H$ 关系

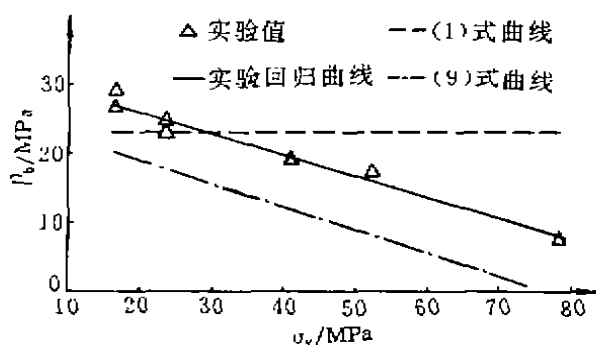


图5 $\sigma_H = 10\text{MPa}$ 时的 $p_b - \sigma_v$ 关系

为进一步验证本文所建立的破裂判据,下面引用文献[8]的一组真三轴水力压裂实验

结果来进行分析比较。实验材料为500号水泥与河砂及水按标定配比搅拌配制而成,养护28天,试件抗拉强度 $S_T = 1.926\text{MPa}$,泊松比 $\mu = 0.1875$,弹性模量 $E = 19.83 \times 10^3\text{MPa}$ 。由于 $|\mu S_C/E| > |S_T/E|$,故按抗压强度 $S_C = 50\text{MPa}$ 确定临界拉应变值 ϵ_{\max} [式(5)],将各参数值代入(6)式即得其破裂判据为

$$p_b = 2.467\sigma_A - 0.783\sigma_H - 0.158\sigma_v + 7.9 \quad (10)$$

表2给出了由(1)式和(10)式所得的 p_b 计算值和实验结果以及它们间的差值。

表2 三轴水力压裂时的破裂压力 p_b ^[8]

MPa

σ_v	σ_H	σ_A	实验值	(1)式预测值	(1)式预测值 与实验值之差	(10)式预测值	(10)式预测值与 实验值之差
0	0	0	9.3	1.926	7.374	7.9	1.4
30	20	10	13.2	11.926	1.474	12.17	1.03
40	26.6	13.3	15.05	15.226	-0.176	13.60	1.45
50	32.2	16.7	16.9	19.826	-2.926	16.0	0.9

表2中的数据比较表明,由传统的理论公式(1)预测的理论值与实测值之间相差较大,且其误差值极无规律性,在 $[-2.926, 7.374]$ 间波动,说明式(1)不能真实地反映应力状态对破裂压力的影响,在低应力状态下预测值偏低,而在高应力状态时偏高。而由本文建立的破裂判据预测的结果不但与实验结果间的误差很小,且其差值波动性也很小 $[0.9, 1.45]$,这说明该破裂判据预测值比实测值均低一近似的常量,造成这种相对稳定误差的原因可能是由实验的系统误差所致。

上述分析比较表明,本文所建立的水力压裂破裂判据,对相对于其强度值来讲具有明显更低的变形模量的软岩(或似岩石材料)具有广泛的适用性,且适用于各种应力状态。

4 结 论

- 1) 岩盐是一种相对于其较低的强度值来讲具有更低变形模量的特殊软岩,即其 E/S 比值比一般岩石小得多。
- 2) 岩盐具有很大的横向变形能力,即使在单轴压缩状态下,其破坏也遵循变形破坏准则而表现对径张拉破坏,即应以最大拉应变强度理论作为各种应力状态下岩盐的破裂判据。
- 3) 根据广义平面应变问题的应变解答和最大拉应变强度理论建立的岩盐水力压裂破裂判据中,包含了三个主应力和泊松比的影响,且其临界拉应变值 ϵ_{\max} 一般应由单轴压缩实验确定。
- 4) 本文建立的水力压裂破裂判据与实验结果极为一致,它不仅适用于本文实验所用岩盐在等围压三轴应力状态下的水力压裂,而且还适用于具有较低 E/S 比值的软岩在各种应力状态下的水力压裂。

参 考 文 献

- 1 Wauersik W R, Stone C M. A characteritaition of pressure records in inelastic rock demonstrated by hydraulic fracturing measurements in salt. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, 1989, 26(6): 613~627
- 2 Bush D D, Barton N. Application of small-scale hydraulic fracturing for stress measurements in bedded salt. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, 1989, 26(6): 629~635
- 3 肖长富等. 岩盐水力压裂的实验研究. *重庆大学学报*. 1992, 15(1): 15~20
- 4 林元雄. 盐类水溶采矿技术. 成都: 四川人民出版社, 1990, 164—173, 227~234
- 5 吴景浓, 吴锦拔. 内孔加压三轴条件下岩石的破裂实验研究. *地震地质*, 1986, 8(2): 69~76
- 6 刘建中, 李自强. 对水压致裂应力测量理论的实验分析. *岩石力学与工程学报*. 1986, 5(3): 267~276
- 7 陶振宇等. 水压致裂试验中岩石的破坏特性及判据. *岩石力学与工程学报*, 1986, 5(1): 41~50
- 8 王允诚等. 三轴应力破裂压力试验仪及其应用. *石油钻采工艺*, 1980, 3: 76~80
- 9 郑雨天. 岩石力学的弹塑性理论. 北京: 煤炭工业出版社, 1988, 156~167