

④
15-20岩盐水力压裂的^{*}实验研究HYDRAULIC FRACTURING EXPERIMENTAL
STUDY IN ROCK SALT

TD315

肖长富 周时光 阳友奎 邱贤德 吴刚
Xiao Changfu Zhou Shiguang Yang Youkui Qiou Xiande Wu Gang
(重庆大学资源及环境工程系)

摘要 采用自制的ZH-1型等围压三轴水力压裂仪,对岩盐水力压裂中围压和轴压(水平地应力和铅直地应力)对破裂压力的影响规律进行了实验研究,得到了本文实验所用岩盐破裂压力与围压和轴压间呈线性关系的经验计算公式。

关键词 岩盐;水力压裂;破裂压力

中国图书资料分类法分类号 TD315

ABSTRACT This paper experimentally studies the influence of confined and axial pressures (horizontal and vertical in-situ stresses) on the breakdown pressure of hydraulic fracturing with rock salt by the common triaxial hydraulic fracturing device of ZH-1. The experimental formula of breakdown pressure linearly related to the confined and axial pressures for the rock salt used in present work are obtained.

KEY WORDS rock salt; hydraulic fracturing; breakdown pressure

0 前 言

盐(NaCl)是人类生活的必需品,也是重要的工业原料,在国际民生中占有重要地位。对固体岩盐矿床的开发,是盐矿产品的主要来源之一。根据岩盐矿床的水介质可溶性特征,人们对它广泛采用溶解法进行开采,其中岩盐矿床的钻孔水力压裂溶解采矿法(简称水力压裂法)是目前发展起来的最新方法之一^[1,2]。

岩盐矿床的水力压裂开采法是从石油天然气工业中的水力压裂激发技术发展而来的,其实质就是通过钻孔向盐层注入高压水压裂盐层,在盐层中产生张开裂缝,以增大水与盐层的接触面积,提高注水流量和加大卤水溶液的过流通道,达到提高开采强度的目的。特别是随着多井贯通溶解开采技术的发展,水力压裂技术在实现井间贯通方面已显示出了它更广泛的潜在优越性,这一技术的广泛应用,必将有助于贯通式注水—抽卤这一先进的高效采盐方法的发展。

* 收文日期 1991-07-27

国家自然科学基金资助项目

盐层破裂压力的确定与选取,是地面压力注水系统选型和压裂作业过程设计的关键。在传统的水力压裂技术设计中,破裂压力 p_{br} 的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解答和最大拉应力强度理论基础之上的,即^[2]

$$p_{br} = 3\sigma_h - \sigma_H + \sigma_T - p_0 \quad (1)$$

式中 σ_h, σ_H ——分别为最小和最大水平地应力; σ_T ——岩石的抗拉强度;

p_0 ——岩层内的孔隙流体压力。

然而,大量的现场试验和室内实验研究^[2~4]结果均已表明,根据式(1)的理论预测值与实验值之间存在较大差异,而对引起这种差异的内在机理目前尚无可靠的理论解释,本文也无意于此问题作深入研究,但这一现象给了我们一个很重要的启示,即在预测水力压裂中岩层破裂压力时,目前最可靠的方法是采用由实验研究所得的经验公式来进行。此外,对岩盐这种特殊岩石材料这方面的专门研究,目前国内尚属空白。基于上述原因,本文利用我们自制的等围压三轴水力压裂设备,对各种应力状态下岩盐水力压裂时的破裂压力进行了实验研究,获得了有关这方面的初步实际资料,这对推动国内岩盐力学的研究、发展岩盐矿床水溶开采技术乃至目前国际上已日益发展起来的有害性工业废料的盐层水力压裂处置等都具有很重要的理论意义和实际参考价值。

1 实验的准备工作

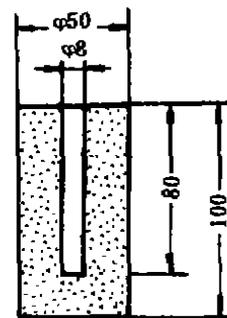
1.1 岩盐的取样加工

本文实验所用岩盐试样取自云南省大理州乔后盐矿,其基本特征和主要物理力学参数见表1。

表1 岩盐基本特征和主要物理力学参数

NaCl 含量	颜色	主要晶粒 尺寸	胶结充填 性质	单轴抗压 强度	劈裂拉伸 强度	直接拉伸 强度	变形模量
75%	黑灰色	≤1mm	钙泥质	36MPa	2.5MPa	3.3MPa	2.0×GPa

由于岩盐的遇水易溶特性,在用套钻从所取块样上套取岩芯时,采用了饱和盐水外注水的方式进行,然后将所得的 $\varnothing 50\text{mm}$ 的圆柱体岩芯干式切割成所需长度并将端面磨平,在钻床上用 $\varnothing 8\text{mm}$ 的直钻钻出中心注液加压铅直孔,最后所得的岩盐水力压裂厚壁圆筒试件如图1所示。试件全部取其自然干湿状态,且为了防止实验过程中围压油的渗入可能造成的影响,在试件外表面涂上一层厚约0.5mm的硅橡胶形成防渗保护层。



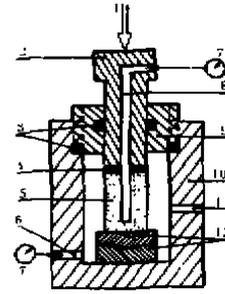
1.2 实验装置及其工作原理

利用煤炭科学研究总院北京开采所研制的 MKC-82型三轴压力室的缸体外套作为本实验水力压裂仪的围压套筒,自行设计和加工的带中心孔道的轴向压头、传力密封组件和液压连接密封组件,再配以两台 DYB-1A 型电动高压油泵和一台 YE-200A 型压力试验机,构成如图2所示的 ZH-1型等围压三轴水力压裂

图1 盐岩水力压裂试件示意图

装置。

该系统的工作原理参见图2。试件所受的轴向压力由 YE-200A 型压力试验机提供，围压由一台 DYB-1A 型电动高压油泵通过围压进油孔注入压力油来提供，由另一台 DYB-1A 型电动高压油泵通过轴向压头上的中心注液孔道将压力油注入试件的中心孔来提供中心孔压，轴压、围压和中心孔压可以实现各自独立的控制和操作。筒盖与轴向压头之间以及筒盖与套筒之间均采用 O 型橡胶密封圈密封，轴向压头与试件之间采用经高压处理的环形橡胶垫片粘贴于轴向压头的端面来实现。此外，套筒上还设有测量导线孔，试件下端设有球面支座。所有实验中的压裂液均采用 40 号机油。



1—YE-200型材料试验机提供轴向载荷
2—轴向压头 3—O型密封圈
4—环形密封垫片 5—盐岩试件
6—围压进油孔 7—DYB-1A型高压电动油泵
8—中心注液孔 9—筒盖
10—三轴压力室套筒 11—测量导线孔
12—上下球形支座

图 2 ZH-1型等围压三轴水力压裂仪结构示意图

2 实验研究与结果分析

根据水力压裂破裂压力预测的理论公式(1)

可知，水平应力 p_h 和 p_H 是影响岩盐破裂压力的两个主要可变因素，因此本文首先对轴压 p_a 恒定时围压变化对破裂压力的影响进行了实验研究，且考虑到岩盐所具有的很低的变形模量和显著的塑性变形、流变等特性，可以预见岩盐矿床内的水平地应力具有极好的各向同性即等围压特性，因此实验中仅考虑了等围压情形。此外，考虑到轴向压力 p_a 对破裂压力可能产生的影响，且以往的室内水力压裂实验都忽略了这种可能的影响等因素，本文还特别对破裂压力的轴向应力效应进行了研究。最后进行的第三类实验是针对前述两类应力效应即破裂压力的围压与轴压效应同时存在时而进行的。

2.1 轴压 p_a 恒定时的实验研究

本实验设定的恒定轴向压力为(模拟铅直地应力) $p_a = 23.5\text{MPa}$ 。实验中采用统一的加载方式进行，即轴压 p_a 、围压(模拟水平地应力) p_H 和孔压 p_c 均采用 1.5 倍小比例增加的方式加载，每一个梯段的加载采用先施加一定轴压，再同步增加围压和孔压的顺序，以防止试件端部漏油和试件提前的非水力压裂破坏。在达到预定的轴压和围压值之后，再逐渐施加孔压直至将试件压裂。

共对一组 8 个试件进行了实验测试，其测试结果见表 2 所示。试件破裂形态见图 3 所示。

表 2 轴压恒为 $p_a = 23.5\text{MPa}$ 时不同围压下岩盐的破裂压力实测值和试件破坏特征

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8
围压 p_H (MPa)	0	0	4.5	6.8	10	10	15	22.5
破裂压力 p_{cF} (MPa)	6	7	13	20	24.5	25	29.5	32
试件破坏特征	75°左右纵向 拉剪破裂		90°纵向对径张拉破裂					

为便于结果的整理与分析比较,将表2中的测试结果绘于图4,同时也引用了后文表3中 $p_z = 23.5 \text{ MPa}$ 时的两个破裂压力测试值。图4中的散点图表明,岩盐水力压裂时的破裂压力随围压的增大而增大,并显示出较好的线性变化趋势。利用最小二乘法对图中十个测点进行直线拟合,得到反映破裂压力和围压之间关系的直线回归方程为

$$p_{or1} = 1.2434p_H + 9.2085 \quad (2)$$



图3 试件破裂形态

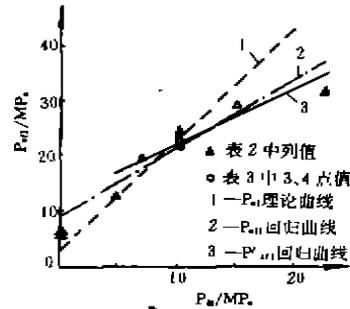


图4 $p_z = 23.5 \text{ MPa}$ 时破裂压力与围压的关系

式中各符号的意义和单位与表2同。该方程的线性回归相关系数 $r = 0.945$, 可见其具有较好的线性回归性。

考虑到现场地应力的水平应力不可能为零这一实际情况,为使实验经验公式更能可靠地应用于现场实际,舍弃 $p_H = 0$ 的两个测点值再次进行回归得

$$p_{or1} = 0.96p_H + 13.03 \quad (3)$$

此时的线性回归相关系数为 $r = 0.912$, 仍具较好的线性回归性。

图4中给出了由回归方程(1)和(2)所得的 $p_{or} - p_H$ 曲线。

对试件破裂形态的观察表明,岩盐水力压裂时仍主要表现为对径纵向张拉破裂。但1号和2号试件的破裂面与水平面的夹角不是 90° 而是 75° 左右,这表明,在围压为零的情况下,岩盐水力压裂时破裂带有剪切破坏特征,反映为拉剪破裂,这种破裂特征可能在浅部盐层水力压裂时出现。此外,由于实验中水平应力的各向同性特性,各试件的对径张拉破裂在周向上无固定方位,其径向起裂方位将由岩盐结构特征所决定,它必将沿着孔壁最薄弱处所决定的方向开裂。

对实验过程中压力变化的观察表明,试件压裂瞬间,孔压突然下降,而围压突然上升,但两者间仍然存在一定差值,与此同时,轴压也突然下降。这说明,在轴压恒定的情况下,岩盐水力压裂的对径张拉破裂在等围压应力状态下表现为脆性断裂特征。

若取岩盐的抗拉强度 $\sigma_T = 3.0 \text{ MPa}$, 且不计孔隙压力效应(事实上这在本文的实验研究中的影响是很小的),则由式(1)得等围压时本实验用岩盐的理论破裂压力值应为 $p_{or} = 2p_H + 3.0$, 同时也将该理论曲线绘于图4中,可以看出,这与实验所得的结果差别很大,引起这种差别的内在原因目前尚无可靠的解释,但本文作者认为其中一个明显可见的原因是在理论解答中忽略了轴向应力效应所致,本文下面将对此作进一步的实验研究。而对诸如岩盐的塑性效应、试件尺寸效应和式(1)所依据的破坏准则本身等所可能产生的影响不作讨论。

2.2 围压 p_H 恒定时的实验研究

该组实验共对一组七个试件进行了测试,恒定围压的设定值为 $p_H = 10\text{MPa}$ 其加载方式与轴压恒定时的实验相同,表3列出了所得实验结果。

表3 围压恒为 $p_H = 10\text{MPa}$ 时不同轴压下岩盐的破裂压力实测值和试件破坏特征

试件编号	1	2	3	4	5	6	7
轴压 p_z (MPa)	16.2	16.2	23.5	23.5	41.3	52.3	78.5
破裂压力 p_{or2} (MPa)	27	29	22.5	23	19	17	7.5
试件破坏特征	90°纵向对径张拉破裂						75°纵向 拉剪破裂

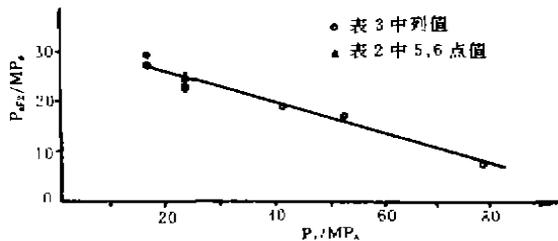


图5 $p_H = 10\text{MPa}$ 时破裂压力与轴向压力的关系

将表3中的测试结果和前文表2中 $p_H = 10\text{MPa}$ 时的两个测值一起绘于图5中。图中散点图表明,破裂压力随着轴向压力的增大而减小,两者具有很好的线性相关特性。利用最小二乘法对图中九个测值进行线性回归,得到围压恒定时本文实验所用岩盐的水力压裂破裂压力与轴压间的线性经验回归方程为

$$p_{or2} = -0.305p_z + 31.731 \quad (4)$$

式中各符号意义和单位与表3同。该回归方程的相关系数 $r = 0.980$,可见实验值的线性回归性极好。

试件的破坏特征与前一组实验相同,即主要表现为对径纵向张拉脆性破坏。而对7号试件所表现出来的剪切特征,明显地是由于水平应力和铅直应力相差太大所致。

2.3 围压和轴压同时变化时岩盐的破裂压力

为获得同时考虑围压和轴压变化时岩盐水力压裂破裂压力的经验计算公式,除前两组实验外,还对围压/轴压的其他组合比时的破裂压力进行了一组实验,其结果见表4。

现将表2、表3和表4中的所有实测数据进行二元线性回归,得到本文所用岩盐水力压裂破裂压力的一般经验公式为

$$p_{or} = 1.30p_H - 0.27p_z + 15.98 \quad (5)$$

式中各符号意义和单位同表4。取检验水平 $\alpha = 0.05$,经 F 检验,线性回归特性显著,经 T 检验,单个回归系数 1.30 和 (-0.27) 的回归性显著。

表4 围压和轴压同时变化时岩盐破裂压力的实测值和试件破坏特征

试件编号	1	2	3	4	5
围压 p_H (MPa)	0	4.5	4.5	15	15
轴压 p_z (MPa)	13.1	25.1	15.7	35.6	47.9
破裂压力 p_{or} (MPa)	13.5	13.5	17.5	28	23
试件破裂特征	75°左右纵向 拉剪脆性破裂		90°纵向对径张拉脆性破裂		

3 结 论

1) 对于岩盐这种特殊的岩石材料,其水力压裂破裂压力值的实验值与传统弹性理论值间有较大差别,除与水平应力(围压)有关外,同时还明显地受铅直应力(轴压)的影响。

2) 当轴压一定时,岩盐水力压裂破裂压力与围压间呈线性同步递增关系,而在围压一定时,破裂压力随轴压的增大而线性地减小。

3) 本文针对乔后岩盐进行的实验研究所得的水力压裂破裂压力的一般经验公式为 $p_{cr} = 1.30p_H - 0.27p_z + 15.98$,它反映出破裂压力与水平应力和铅直应力呈线性关系。

4) 岩盐在三维应力状态下水力压裂的破裂特征主要表现为对径纵向张拉脆性破坏,只有在水平应力很低或(和)水平应力与铅直应力相差很大时才会有剪切破坏特征出现

5) 在等围压条件下进行的水力压裂,试件的对径破裂面在径向上的方位由岩盐的结构特征决定,它必将沿孔壁岩盐结构最薄弱处所决定的破裂面方位开裂。

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,(2),1~4
- 2 林元雄. 盐类水溶采矿技术. 成都:四川人民出版社,1990,10
- 3 Hubbert M K, willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing. Trans Am Inst Min Engrs, 1957, 210, 153~168
- 4 吴景龙等. 室内水压致裂法的初步实验研究. 水利学报,1982,8(7),52~57