

注水井地层破裂压力预测方法及应用

王立军¹, 吕波¹, 吴锋², 邵振军³, 杨敏⁴

(1. 大庆石油学院 提高采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 2. 大庆油田有限责任公司 第七采油厂, 黑龙江 大庆 163517; 3. 大庆油田有限责任公司 第四采油厂, 黑龙江 大庆 163511; 4. 中国石油塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:运用既考虑地层因数,又考虑地层孔隙压力、岩石抗张强度及上覆岩压力计算地层破裂压力的计算模型,对葡北二断块套损区注水井的地层破裂压力进行了预测.结果表明,该方法计算注水井地层破裂压力与实际测得的地层破裂压力差异较小,并优于矿场普遍采用的只考虑上覆岩压力计算地层破裂压力的方法;同时在计算过程中,还提出了在缺少密度测井曲线情况下,经过反演得到计算上覆岩压的方法,应用实例证明该方法可行.

关键词:注水井;套损;地层破裂压力;密度测井;抗张强度

中图分类号:TE357.431 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1891(2006)04-0016-04

目前计算地层破裂压力的理论模型(公式)较多,如国外的伊顿公式、安德森公式^[1,2]等,国内的黄氏公式、冯氏公式^[3-5]等.这些理论模型存在2个局限性,一是模型中地层孔隙压力、地层抗拉强度、构造应力系数、地层泊松比等参数的求取过程复杂,往往不能求准;二是模型不能适应实际地层情况,需要修正补充方能使用.矿场计算地层破裂压力时把地层破裂压力视为只随地层深度变化的函数,但该模型主要适合于未受地质构造运动扰动过的沉积较新的连续沉积盆地,即适合水平均匀地应力状态,其水平地应力只来源于上覆岩层的重力作用.油田在注水开发过程中,特别是套损井多发区,地应力发生变化特别明显,把地层破裂压力只视为上覆岩压函数的模型不能准确预测注水井的破裂压力.因此,寻求既能反映上覆岩压力,又能反映地质构造因素的计算地层破裂压力的模型具有重要意义.

1 预测模型

地层破裂压力不仅与上覆岩压力有关,而且还与地层孔隙压力、地层构造因素、岩石的抗张强度有关.在建立模型过程中,为了计算和应用方便,笔者把描述与地质构造因素相关的参数统一用地层因数 η 来描述.预测地层破裂压力模型为

$$p_f = p_p + \eta(S - p_p) + S_t, \quad (1)$$

式中: p_f 为地层破裂压力; p_p 为地层孔隙压力; S 为上覆岩压力; S_t 为岩石抗张强度; η 为地层因数.

2 参数确定

2.1 抗张强度

在压裂过程中当地层被压裂后,突然停泵让裂缝闭合,此时破裂压力为瞬时停泵压力 p_s ,然后再开泵使裂缝重新张开,重新开启压力 p_r .地层破裂压力与重新开启压力之差可近似地认为是地层的抗张强度 S_t ,即

$$S_t = p_f - p_r. \quad (2)$$

收稿日期:2006-03-16;审稿人:李士斌;编辑:关开澄

作者简介:王立军(1964-)男,博士,副教授,主要从事油藏工程理论方面的研究.

2.2 上覆岩压力

密度测井曲线可以比较真实地反映地下岩石的体密度随其埋藏深度的变化规律,是求取上覆岩压力最为理想的资料;但有时难以获得完整的全井密度测井曲线.所以无法应用实测地层密度测井曲线计算上覆岩层压力.

笔者通过压裂施工曲线,运用实测地层破裂压力,反演、拟合得出地层密度曲线,进而计算上覆岩压力.根据式(1)可得

$$\left. \begin{aligned} p_{f1} &= p_{p1} + \eta_1(S_1 - p_{p1}) + S_{11}, \\ p_{f2} &= p_{p2} + \eta_2(S_2 - p_{p2}) + S_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(3)化简得

$$\frac{p_{f1} - p_{p1} - S_{11}}{p_{f2} - p_{p2} - S_{12}} = \frac{S_1 - p_{p1}}{S_2 - p_{p2}}. \quad (4)$$

因为地层密度 ρ 是地层深度 H 的函数,并且符合关系:

$$\rho = a \ln H + b, \quad (5)$$

式中: a, b 为常数.

将式(5)对 H 积分得上覆岩压力为

$$S = \int_0^H \rho dH = \int_0^H (a \cdot \ln H + b) dH = a \cdot H \cdot \ln H - a \cdot H + b \cdot H, \quad (6)$$

式(6)中 S 的单位为 kg/m^2 , 转化为 MPa 可得

$$S = 0.0098(a \cdot H \cdot \ln H - a \cdot H + b \cdot H). \quad (7)$$

设2组破裂层位的中部深度分别为 H_1, H_2 , 则上覆岩压力分别为

$$S_1 = 0.0098(a \cdot H_1 \cdot \ln H_1 - a \cdot H_1 + b \cdot H_1), \quad (8)$$

$$S_2 = 0.0098(a \cdot H_2 \cdot \ln H_2 - a \cdot H_2 + b \cdot H_2), \quad (9)$$

$$\frac{p_{f1} - p_{p1} - S_{11}}{p_{f2} - p_{p2} - S_{12}} = \frac{0.0098(a \cdot H_1 \cdot \ln H_1 - a \cdot H_1 + b \cdot H_1) - p_{p1}}{0.0098(a \cdot H_2 \cdot \ln H_2 - a \cdot H_2 + b \cdot H_2) - p_{p2}}, \quad (10)$$

整理得

$$a + \frac{B}{A}b = \frac{C}{A}, \quad (11)$$

式中: $A=0.0098 \cdot (p_{f1} - p_{p1} - S_{11}) \cdot (H_2 \cdot \ln H_2 - H_2) - 0.0098(p_{f2} - p_{p2} - S_{12}) \cdot (H_1 \cdot \ln H_1 - H_1)$;
 $B=0.0098 \cdot H_2 \cdot (p_{f1} - p_{p1} - S_{11}) - 0.0098 \cdot H_1 \cdot (p_{f2} - p_{p2} - S_{12})$;
 $C=p_{p2}(p_{f1} - p_{p1} - S_{11}) + p_{p1}(p_{f2} - p_{p2} - S_{12})$.

应用最小二乘法可拟合出 a, b . 根据式(7)可计算不同深度地层密度.

2.3 地层因数

确定一个地区的地层因数,可以通过压裂施工曲线,运用实测破裂压力,根据式(1)反算得出.

2.4 地层孔隙压力

模型中应用的地层孔隙压力,对于水井来说,是水井静压,可通过实测水井静压获得.

3 实例计算

3.1 预测模型的 p_f

压裂施工曲线中记录的破裂压力,实际上是地面泵压,如要获得地层破裂压力 p_f ,就需要通过地面记录的泵压求出油层实际破裂压力.地层破裂压力与地面泵压的关系为

$$p_f = p_b + p_j - p_m - p_u, \quad (12)$$

式中: p_b 为油层破裂时地面泵压; p_j 为压裂管柱静液柱压力; p_m 为压裂液通过油管的沿程摩阻; p_u 为压

裂液在射孔孔眼处的摩阻, 其中 p_j, p_m, p_U 可从采油工艺手册中查得.

3.2 上覆岩压力及地层孔隙压力

运用葡北二断块套损区实测破裂压力 $p_{实}$ 数据(表1), 据式(11), 拟合出 a, b , 得到该区块的上覆岩层压力为

$$S = 0.0098(0.1727 \cdot H \cdot \ln H - 0.1727 \cdot H + 1.0813 \cdot H). \quad (13)$$

通过实测水井静压获得该块地层孔隙压力 p_p , 其结果见表2.

表1 葡北二断块套损区实测破裂压力数据

井号	层位	H/m	$p_{实}/MPa$
1	PI2	968.5	19.84
2	PI5	984.5	19.88
3	PI7	995.6	21.07
4	PI1	1066.5	22.01
5	PI4	1021.3	21.67
6	PI9	1046.6	22.03
7	PI6	1049.2	21.11
8	PI9	1002.7	20.31
9	PI10	1107.8	23.58
10	PI2	1064.3	22.84
11	PI4	1073.2	22.36
12	PI4	971.2	21.22

表2 葡北二断块套损区上覆岩压力及地层孔隙压力

井号	层位	H/m	S/MPa	p_p/MPa
1	PI2	968.5	19.89	6.47
2	PI5	984.5	20.25	6.52
3	PI7	995.6	20.50	9.17
4	PI1	1066.5	22.08	8.44
5	PI4	1021.3	21.07	6.91
6	PI9	1046.6	21.64	6.92
7	PI6	1049.2	21.69	5.43
8	PI9	1002.7	20.65	5.41
9	PI10	1107.8	23.01	8.95
10	PI2	1064.3	22.03	8.95
11	PI4	1073.2	22.23	8.97
12	PI4	971.2	19.95	10.18

3.3 抗张强度和地层因数

为了验证模型的正确性, 选取4口井4个层位的岩心进行巴西劈裂抗拉实验, 通过此实验确定该层位岩石抗张强度 $S_{实}$, 并与通过压裂施工曲线读取的抗张强度 $S_{读}$ 进行对比验证. 实验结果与压裂施工曲线读取的抗张强度对比见表3.

表3 实测抗张强度与施工曲线获得抗张强度对比

井号	层位	$S_{实}/MPa$	$S_{读}/MPa$	相对误差/%
1	PI11	3.13	2.95	5.75
2	PI5	2.75	2.85	3.64
3	PI7	3.05	3.20	4.92
4	PI3	2.78	2.70	2.88

据表3可知, 4个层位岩心读取的抗张强度与实测抗张强度平均相对误差为4.23%, 误差能够满足工程计算要求, 说明应用压裂施工曲线法所得地层抗张强度是合理可行的.

应用此方法获得该断块各层位岩石抗张强度, 并应用式(1)和实测破裂压力数据反算地层因数, 其结果见表4.

3.4 矿场经验法的 p_f

目前现场普遍采用矿场经验方法, 其计算公式为

$$p_f = 0.0098 \times 0.23 \times H. \quad (14)$$

用文中地层破裂压力预测模型和式(14)的预测结果与 $p_{实}$ 对比, 其结果见表5. 由表5可知, 矿场经验方法预测的平均绝对误差为1.71 MPa, 该预测模型预测的平均绝对误差为0.35 MPa, 因此其预测精度较矿场经验方法的预测精度有较大提高.

表4 葡北二断块套损区抗张强度及地层因数

层位	S_i/MPa	η
PI1	2.71	0.7624
PI2	2.69	0.8217
PI3	2.78	0.7872
PI4	2.96	0.8114
PI5	2.75	0.8158
PI6	2.85	0.7630
PI7	3.05	0.8019
PI8	2.93	0.7655
PI9	3.07	0.7937
PI10	3.01	0.8088
PI11	3.13	0.7896

表5 预测模型与矿场经验方法预测结果对比 MPa

井号	层位	$p_{实}$	矿场经验方法		预测模型	
			$p_{实}$	绝对误差	p_f	绝对误差
1	PI2	19.84	21.83	1.99	20.19	0.35
2	PI5	19.88	22.19	2.31	20.47	0.59
3	PI7	21.07	22.44	1.37	20.77	-0.30
4	PI1	22.01	24.04	2.03	21.55	-0.46
5	PI4	21.67	23.02	1.35	21.36	-0.31
6	PI9	22.03	23.59	1.56	21.67	-0.36
7	PI6	21.11	23.65	2.54	20.69	-0.42
8	PI9	20.31	22.60	2.29	20.58	0.27
9	PI10	23.58	24.97	1.39	23.33	-0.25
10	PI2	22.84	23.99	1.15	22.39	-0.45
11	PI4	22.36	24.19	1.83	22.69	0.33
12	PI4	21.22	21.89	0.67	21.07	-0.15
平均绝对值				1.71		0.35

(下转第21页)

(上接第 18 页)

4 结论

(1)基于多因素计算注水井破裂压力的方法优于矿场只考虑上覆岩压力计算地层破裂压力的方法,计算结果表明,该方法具有很高的预测精度。

(2)提出了运用反演拟合上覆岩压力的计算方法,弥补了缺乏全井密度测井曲线而无法获得地层密度曲线的缺陷。该方法获得的上覆岩压力接近真实压力。

参考文献:

- [1] 董建华,刘鹏,王薇. 地应力剖面在水力压裂施工中的应用[J]. 大庆石油学院学报,2005,29(2):40-42.
- [2] 陈天愚. 套损问题影响因素分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2004,25(1):104-107.
- [3] 梁卫东,姜玉璞,王丽敏,等. 砂岩油田合理注水压力的确定[J]. 大庆石油学院学报,2004,28(4):42-44.
- [4] 杨雷,王洪亮. 破裂压力预测的应用研究[J]. 新疆石油学院学报,2002,14(4):67-70.
- [5] 陈涛平,胡靖邦. 石油工程[M]. 北京:石油工业出版社,2004.