文章编号:1673-5005(2010)02-0071-03

# 碳酸盐岩地层破裂压力预测新模型及其应用

崔 杰[1,2], 李忠慧[3,4]

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院,山东 东营 257061; 2. 胜利油田 钻井工艺研究院,山东 东营 257017; 3. 长江大学 油气钻采工程湖北省重点实验室,湖北 荆州 434023; 4. 长江大学 石油工程学院,湖北 荆州 434023)

**摘要**:海相碳酸盐岩地层原生孔隙较少而裂缝较发育,利用测井资料计算其破裂压力难度较大。依据弹性力学原理和岩层破裂机制,综合考虑三向地应力及地层特征对地层破裂压力的影响,建立一种新的适合海相碳酸盐岩地层的破裂压力计算模型。川东北通南巴构造上5口井的应用结果表明,利用该模型计算得到的破裂压力值与实测值误差较小,能够满足工程计算要求。

**关键词**:碳酸盐岩; 破裂压力; 计算模型; 弹性力学

**中图分类号**:TE 344 **文献标志码**:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.014

# A new prediction model of fracture pressure of marine carbonate formation and its application

CUI Jie[1,2], LI Zhong-hui[3,4]

(1. *College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying* 257061, *China*;
2. *Drilling Technology Research Institute in Shenli Oilfield, Dongying* 257017, *China*;
3. *Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil & Gas, Yangtze University, Jingzhou* 434023, *China*;
4. *Department of Petroleum Engineering, Yangtze University, Jingzhou* 434023, *China*)

**Abstract**: The primary pore didn't develop and fracture developed in marine carbonate formation, so it is difficult to compute the fracture pressure by using log data. According to the elastic mechanics rule and rock stratum break mechanism, considering tri-crustal-stress and formation characteristic, a new prediction model of fracture pressure of marine carbonate formation was established. The application results of five wells in Tongnanba structure of northeast Sichuan indicate that the fracture pressure error obtained by this model is small enough to achieve the engineering calculation demand.

**Key words**: carbonate; fracture pressure; calculation model; elasticity mechanics

地层破裂压力模型研究由来已久,1957 年 Hubbert 和 Willis 对地层水压裂机制进行了研究,随后 Matthews 和 Kelly 在其基础上提出了地层破裂压力的预测模型[1],但考虑的因素太少,且上覆岩层压力假定为常数,这不符合生产实际;Eaton 模型[2]没有考虑井壁应力集中的影响和地质构造力的作用;Holbrook 模型中忽略了胶结较差岩层的抗拉强度;黄荣樽[3]、谭廷栋[4]、夏宏泉[5]、葛洪魁[6]等先后对岩石破裂压力进行了研究,并建立了不同的地层破裂压力模型;杨前雄[7]等考虑温度的影响对地层破裂压力进行了研究。笔者在前人研究的基础上,针对海相碳酸盐岩地层地质特点,根据弹性力学原理和岩层破裂机制,考虑三向地应力的影响,建立海相碳酸盐岩地层破裂压力预测模型,并进行应用分析。

## 1 碳酸盐岩地层破裂压力预测模型

对井筒进行受力分析,井眼周围岩石受最大和最小水平地应力 $\sigma_H$ 和 $\sigma_h$ 的作用,将井筒看作弹性力学中无限大平板中的圆孔模型来求解,计算可得到井眼周围的应力分布[8]。

**收稿日期**:2010-01-15

**基金项目**:国家"863"计划项目(2006AA06A109)

**作者简介**:崔杰(1973-),男(汉族),山东博兴人,高级工程师,博士研究生,从事地质工程模型研究和图形软件开发。

万方数据

从力学上分析,地层压裂是由于井内压力过大使岩石所受的周向应力超过岩石的抗拉强度而造成的。破裂发生在抗拉强度最小处,即 $\theta=0°$ 或 $\theta=180°$ 处[9],即

$$\sigma_\theta=3\sigma_h-\sigma_H-p_p-p_i. \tag{1}$$

式中,$\sigma_\theta$ 为在角度为 $\theta$ 处的切向有效应力,MPa;$p_p$ 为地层孔隙压力,MPa;$p_i$ 为井眼中的液柱压力,MPa。

将式(1)代入岩石的拉伸破裂强度准则,可得岩石产生拉伸破坏时井内液柱压力即地层破裂压力为

$$p_f=3\sigma_h-\sigma_H-p_p+S_t. \tag{2}$$

式中,$p_f$ 为地层破裂压力,MPa;$S_t$ 为岩石抗拉强度,MPa。

由于地层间是连续的,各地层在水平方向的应变应对应相等,即

$$\begin{cases}\varepsilon_{1A}=\varepsilon_{1B}=\varepsilon_{1C}=\cdots=\varepsilon_{1Z}=\varepsilon_1,\\ \varepsilon_{2A}=\varepsilon_{2B}=\varepsilon_{2C}=\cdots=\varepsilon_{2Z}=\varepsilon_2.\end{cases} \tag{3}$$

式中,$\varepsilon_{1A},\varepsilon_{1B},\cdots,\varepsilon_{1Z},\varepsilon_1$ 为各地层在水平 $x$ 方向应变值;$\varepsilon_{2A},\varepsilon_{2B},\cdots,\varepsilon_{2Z},\varepsilon_2$ 为各地层在水平 $y$ 方向应变值。

根据虎克定律有

$$\begin{cases}\varepsilon_1=\dfrac{1}{E}[\sigma'_1-(\sigma'_2+\sigma'_3)\mu],\\ \varepsilon_2=\dfrac{1}{E}[\sigma'_2-(\sigma'_1+\sigma'_3)\mu].\end{cases} \tag{4}$$

其中

$$E=\frac{\rho v_s^2(3v_p^2-4v_s^2)}{(v_p^2-v_s^2)},$$

$$\mu=\frac{v_p^2-2v_s^2}{2(v_p^2-v_s^2)}.$$

式中,$E$ 为弹性模量,MPa;$\mu$ 为泊松比;$\rho$ 为地层密度,g/cm$^3$;$v_p$ 为纵波速度,m/s;$v_s$ 为横波速度,m/s。

由式(4)解方程得水平方向有效主地应力为

$$\begin{cases}\sigma'_1=\dfrac{1}{2}\left[\dfrac{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)E+2\mu\sigma'_3}{1-\mu}+\dfrac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)E}{1+\mu}\right],\\ \sigma'_2=\dfrac{1}{2}\left[\dfrac{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)E+2\mu\sigma'_3}{1-\mu}-\dfrac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)E}{1+\mu}\right].\end{cases} \tag{5}$$

由 $\sigma'_{ij}=\sigma_{ij}-\alpha\delta_{ij}p_p$ 得水平方向主应力为

$$\begin{cases}\sigma_1=\dfrac{1}{2}\left[\dfrac{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)E+2\mu\sigma'_3}{1-\mu}+\dfrac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)E}{1+\mu}\right]+\alpha p_p,\\ \sigma_2=\dfrac{1}{2}\left[\dfrac{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)E+2\mu\sigma'_3}{1-\mu}-\dfrac{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)E}{1+\mu}\right]+\alpha p_p.\end{cases} \tag{6}$$

式中,$\sigma'_{ij}$ 为地层岩石骨架有效应力分量;$\sigma_{ij}$ 为井周岩石所受的应力偏量;$\delta_{ij}$ 为应变分量;$\alpha$ 为岩石的有效应力系数。

只有当岩石的孔隙度和渗透率足够大时才可以近似取 $\alpha=1$,利用声波法确定 $\alpha$ 为

$$\alpha=1-\frac{\rho(3v_p-4v_s)}{\rho_m(3v_{mp}^2-4v_{ms}^2)}.$$

式中,$\rho_m$ 为岩石骨架密度,g/cm$^3$;$v_{mp}$ 和 $v_{ms}$ 分别为岩石骨架的纵、横波速度,m/s。

由此可求得水平方向地应力方程为

$$\begin{cases}\sigma_1=\sigma'_1+p_p=\dfrac{\mu}{1-\mu}\sigma'_3+\alpha\sigma'_3+p_p=E\varepsilon_1,\\ \sigma_2=\dfrac{\mu}{1-\mu}\sigma'_3+\alpha\sigma'_3+p_p=E\varepsilon_2.\end{cases} \tag{7}$$

将 $\sigma'_3=\sigma_3-p_p=\sigma_v-p_p$ 代入式(7)可得水平应变方程为

$$\begin{cases}\varepsilon_1=\dfrac{1}{E}\left[\dfrac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v-p_p)+\omega_1(\sigma_v-p_p)+p_p\right],\\ \varepsilon_2=\dfrac{1}{E}\left[\dfrac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v-p_p)+\omega_2(\sigma_v-p_p)+p_p\right].\end{cases}$$

式中,$\sigma_v$ 为地层垂向应力,MPa;$\omega_1,\omega_2$ 为构造应力系数,可由现场破裂压力试验数据反算求得。

把式(4)代入到式(6)中,推导得到地层破裂压力预测模型为

$$p_f=\frac{E(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{1-\mu}-\frac{2E(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{1+\mu}+\frac{2\mu}{1-\mu}(\sigma_v-\alpha p_p)+\alpha p_p+S_t.$$

海相地层因隐性裂隙和裂缝的存在,使岩石的破裂压力预测困难。研究表明,裂缝方位和有无填充物对岩石力学特征影响明显,因此对于不同地层的岩石抗拉强度值引入强度校正因子 $K$ 来修正[3],修正后的模型为

$$p_f=\frac{E(\varepsilon_1+\varepsilon_2)}{1-\mu}-\frac{2E(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{1+\mu}+\frac{2\mu}{1-\mu}(\sigma_v-\alpha p_p)+\alpha p_p+KS_t.$$

$$K=\Phi(D,\beta,A,T).$$

式中,$D$ 为裂缝宽度;$\beta$ 为裂缝角度;$A$ 为裂缝方向;$T$ 为裂缝填充度。$K=1$ 表示岩石是非裂缝储层,否则 $K$ 是裂缝宽度、角度、方向的函数。$K$ 的取值为 0~1,一般由试验数据反算和回归求得。

## 2 应用分析

通南巴构造带是四川盆地的第二大构造,是盆地西部印支-燕山构造带东端的一个大型 NE 向背斜。地表有局部高点,地下构造总体为一大型 NE

万方数据

向隆起。在纵向上可分两个形变层。上、下形变层总体为 NE 向隆起。其形成受形变环境、位置和区域应力场控制,构造带的形成具明显的多期性。为了验证模型的合理性,结合该构造带地质特征,利用上述地层破裂压力模型及相关测井资料,对川东北地区通南巴构造碳酸盐岩地层的 5 口井地层破裂压力进行预测,并与常用黄氏模型[3]进行了对比分析,计算结果见表 1,利用建立的模型计算得到的 HB1 井全井地层破裂压力钻井液当量密度剖面见图 1。

**表 1　破裂压力钻井液当量密度预测值与实测值对比**

**Table 1　Comparison of predicted and measured value of fracture pressure equivalent drilling fluid density**

| 井号 | 井深 $H$/km | 破裂压力 $p_f$/(g · cm$^{-3}$) | | | 相对误差 $e_r$/% | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 实测值(承压试验获得) | 黄氏模型预测值 | 本文模型预测值 | 黄氏模型 | 本文模型 |
| HB1 | 4.3688 | 2.10 | 2.34 | 2.29 | 11.4 | 9.0 |
| YB1 | 6.6063 | 2.10 | 2.41 | 2.25 | 14.7 | 7.1 |
| LJ3 | 3.0740 | 2.01 | 1.76 | 1.94 | 12.4 | 3.6 |
| Mb2 | 4.4393 | 2.05 | 1.67 | 2.02 | 18.5 | 1.5 |
| YB2 | 6.1800 | 2.05 | 2.32 | 2.15 | 13.2 | 0.5 |

对比分析表 1 可知,应用本文模型预测的地层破裂压力钻井液当量密度的误差比黄氏模型产生的误差小得多,最大为 9.0%。对于碳酸盐岩地层,本文模型中考虑了地层裂缝对地层破裂的影响,计算误差满足工程要求,说明该方法是适合于碳酸盐岩地层的,对于现场施工具有一定的指导意义。

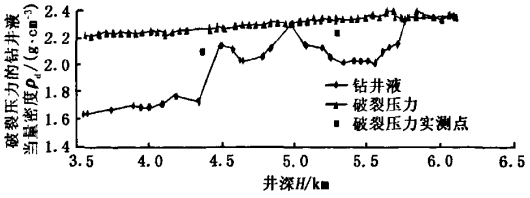


**图 1　HB1 井地层破裂压力测井解释图**

**Fig. 1　Formation fracture pressure log interpretation chart of well HB1**

从图 1 可以看出:在上部地层中,现场施工中使用的钻井液密度小于本文方法计算得到的破裂压力值,实测点进行的地层承压试验未压漏,说明地层的实际破裂压力应高于承压试验的压力,与计算结果相吻合;下部地层(5.7 km 以下)使用的钻井液密度接近或部分超过了新模型预测的地层破裂压力,该井在钻井过程中,5.7 km 以下发生了 6 起井漏事故,分析认为是使用的钻井液密度超过了地层的破裂压力引起的,说明该方法预测的地层破裂压力与工程现场情况相吻合,能满足工程要求。

## 3　结　论

(1)根据弹性力学原理和岩层破裂机制,考虑三向地应力及裂缝的影响,建立海相碳酸盐岩地层破裂压力预测新模型,最大相对误差为 9.0%,计算精度较高。

(2)提高模型预测精度的关键是准确确定模型中各相关参数,其中裂缝的走向及缝长是关键参数。

**参考文献:**

[1]　陈庭根,管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营:石油大学出版社,2000.

[2]　孙明光. 钻井、完井工程基础知识手册[M]. 北京:石油工业出版社, 2002.

[3]　黄荣樽. 地层破裂压力模式的探讨[J]. 华东石油学院学报,1985,5(1):34-38.
HUANG Rong-zun. A model for predicting formation fracture pressure[J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1985,5(1):34-38.

[4]　谭廷栋. 从测井信息中提取地层破裂压力[J]. 地球物理测井,1990,14(6):371-377.
TAN Ting-dong. Determination of formation fracture pressure from well logging data[J]. Well Logging Technology, 1990,14(6):371-377.

[5]　夏宏泉,张元泽,陈平,等. 碳酸盐岩地层破裂压力的测井预测研究[J]. 天然气工业,2004,24(8):32-35.
XIA Hong-quan, ZHANG Yuan-ze, CHEN Ping, et al. Log prediction of carbonate formation breakdown pressure [J]. Natural Gas Industry, 2004,24(8):32-35.

[6]　葛洪魁,林英松,马善洲,等. 修正 Holbrook 地层破裂压力预测模型[J]. 石油钻探技术,2001,29(3):20-22.
GE Hong-kui, LIN Ying-song, MA Shan-zhou, et al. Modification of Holbrook's fracture pressure prediction model[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001,29(3): 20-22.

[7]　杨前雄,熊伟. 考虑温度时碳酸盐岩地层破裂压力的确定[J]. 石油钻探技术,2007,35(3):12-14.
YANG Qian-xiong, XIONG Wei. Determination of carbonate formation fracture pressure considering formation temperature[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3):12-14.

[8]　徐芝伦. 弹性力学[M]. 北京:人民教育出版社, 1979.

[9]　邓金根,张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.

(编辑　李志芬)

万方数据