

庆深气田火山岩地层三个压力预测技术研究

李增乐, 周庆刚

(大庆石油管理局钻探集团钻井工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413)

摘要: 地层孔隙压力、破裂压力和坍塌压力是合理确定井身结构、钻井液密度和固井完井方案的基本依据, 是钻井工程设计的一项重要内容。分析了火山岩地层的压力预测技术, 首次将国外先进的岩石力学理论应用于庆深气田火山岩地层, 建立了 3 个压力预测模型, 针对模型和庆深气田火山岩地层特性提出了新的修正方法; 编制了庆深气田火山岩地层 3 个压力预测软件, 该模型软件精度满足现场施工要求, 为大庆地区钻井工程设计提供了参考。

关键词: 火山岩; 孔隙压力; 坍塌压力; 破裂压力; 预测模型; 大庆地区

中图分类号: TE2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2008)11-0027-04

Study on Prediction Technique of Formation Pressure in Volcanic Rocks in Qingshen Gas Field/LI Zeng-le, ZHOU Qing-gang (Drilling Engineering and Technology Research Institute of Daqing Drilling and Exploration Engineering Company, Daqing Heilongjiang 163413, China)

Abstract: Pore pressure, breakdown pressure and collapsing pressure are the bases of determining the casing programme, drilling fluid density and cementing and completion plan, and are important in the design of drilling engineering. Analysis was made on prediction technique of formation pressure in volcanic rocks, and for the first time, the advanced rock mechanics theory abroad was put into volcanic rocks in Qingshen gas field. 3 pressure prediction models were made, new correction methods were put forward according to these models and the characteristics of volcanic rocks in Qingshen gas field; 3 pieces of pressure prediction software were worded out, and the precision met the construction requests, it provides the reference for the design of drilling engineering in Daqing area.

Key words: volcanic rock; pore pressure; collapsing pressure; breakdown pressure; prediction model; Daqing area

随着钻井工艺的发展和钻井技术的进步, 特别是以气体钻井技术为主的欠平衡钻井技术的大规模应用, 准确的预测地层孔隙压力和地层坍塌压力是整个工程顺利实施的关键, 地层孔隙压力剖面、地层坍塌压力剖面和地层破裂压力剖面是科学钻井的基础和关键。目前, 对于庆深气田火山岩地层压力预测方面研究还是空白, 本文将国内外先进的岩石力学理论首次应用于庆深气田火山岩地层, 建立了庆深气田火山岩地层 3 个压力预测的理论模型及计算方法, 为更加合理的确定井身结构、钻井液密度、固井完井方案等提供了理论依据, 对缩短钻井周期、减少复杂事故的发生、节约钻井成本和保证钻井成功实施具有重要意义。

1 孔隙压力计算模型的建立

孔隙压力的准确计算对于合理、经济地选用钻井液体体系和设计套管程序, 以及防止井喷、井漏、井塌等复杂钻井情况的发生具有重要意义。等效深度法可以比较准确地预测砂泥岩剖面的地层孔隙压

力, 但预测非砂泥岩剖面中的地层孔隙压力时需要利用纯泥岩段的测井数据来制作正常压实趋势线。大庆深层的火山岩剖面中缺少大段的纯泥岩层, 难以建立正常压实趋势方程。

为此, 本文提出一种新的预测方法, 就是利用有效应力定理, 计算岩石有效应力和地层孔隙压力。结果表明, 该法对于大庆深部地层孔隙压力预测具有较强的实用性, 计算精度较高。

1.1 孔隙压力预测原理

由 Terzaghi 有效应力定理可知, 若已知某地层的上覆岩层压力和有效应力, 则可以求出地层孔隙压力。上覆岩层压力可以通过已钻井的密度测井资料等求得, 因此只要设法求出有效应力即可以确定孔隙压力。

$$\sigma = P_0 - P_p \quad (1)$$

式中: σ ——岩石的有效应力, MPa; P_0 ——上覆岩层压力, MPa; P_p ——地层孔隙压力, MPa。

岩石的有效应力 σ 与岩石力学参数密切相关, 而岩石力学参数又可以由声波测井资料求取, 这样

收稿日期: 2008-04-07; 改回日期: 2008-08-22

作者简介: 李增乐(1982-), 男(汉族), 山东青州人, 大庆石油管理局钻探集团钻井工程技术研究院工程师, 化学工程与工艺专业, 从事钻井工程设计及钻井技术研究工作, 黑龙江省大庆市, lizengle@cnpc.com.cn。

利用测井资料就可以间接地求得有效应力。

1.2 模型中参数确定

利用密度测井资料求得相应井段的上覆岩层压力 P_0 , 然后根据测井或其它试油资料来求得某一井段的地层孔隙流体压力 P_p , 这两者之差就是有效应力 σ_0 。由此结合测井数据, 就可以绘制出有效应力与纵横波速度比、泊松比 μ 的关系图版, 从而回归出有效应力与纵横波速度、泊松比的关系式。

1.3 模型的建立

根据徐家围子地区 20 余口井的测井资料处理计算所得到的纵横波速度比、泊松比等参数值以及地层压力测试资料, 在研究中按照不同井深和层位分别绘制出了其相应的函数关系图, 分别进行回归, 建立了有效应力与纵横波速度比、泊松比关系经验图版(图 1、图 2)。

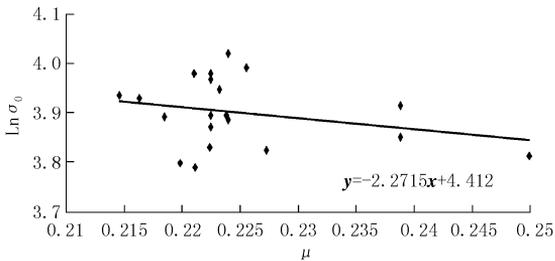


图 1 登娄库组 - 营城组 $\text{Ln}\sigma_0$ 与 μ 的关系图

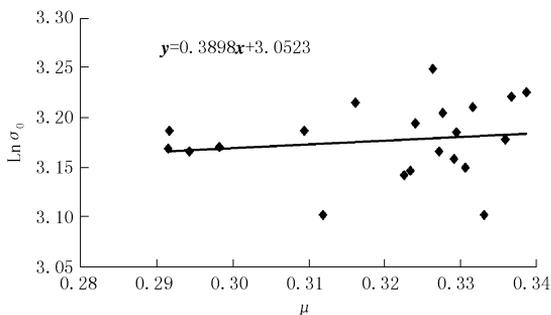


图 2 姚家组 $\text{Ln}\sigma_0$ 与 μ 的关系图

从而得到了 2 个不同的 σ_0 与 μ 的关系式:

$$\text{姚家组: } \sigma_0 = 21.157 \times e^{3.0523\mu} \quad (2)$$

$$\text{登娄库组: } \sigma_0 = 82.443 \times e^{-2.2715\mu} \quad (3)$$

$$\text{关系式的形式均为: } \sigma_0 = a \times e^{b\mu} \quad (4)$$

1.4 孔隙压力预测结果及误差分析

根据上述理论, 对徐家围子地区 9 口深井的孔隙压力进行了预测, 并且与实测值进行了比较, 结果见表 1。

从表 1 中可以看出, 计算值与实测值的误差均在 10% 以内, 吻合效果较好。

表 1 徐家围子 9 口井的孔隙压力实测值与计算值对比情况表

井号	层位	油层中部深度 /m	地层压力 /MPa	计算值 /MPa	误差 /%
徐深 1	yc	3581.40	39.71	35.92	-9.54
徐深 4	yc	3830.80	38.31	41.69	8.83
	yc	3900.50	40.62	43.58	7.29
徐深 5	yc	3620.80	38.05	37.11	-2.48
	yc	3583.90	37.86	35.99	-4.94
徐深 6	yc	3492.75	38.48	37.81	-1.75
	yc	3772.88	39.15	39.32	0.42
徐深 601	yc	3466.25	37.29	33.89	-9.11
	yc	3595.61	35.30	35.33	0.08
徐深 7	K1yc	3877.00	39.48	43.02	8.96
徐深 8	K1yc	3729.00	39.20	41.89	6.86
	K1yc	3661.50	38.80	37.24	-4.02
徐深 9	K1yc	3774.25	41.33	40.55	-1.88
	K1yc	3670.25	40.90	40.48	-1.02
徐深 901	K1yc	3901.75	41.72	43.72	4.80

2 坍塌压力计算模型的建立

地层坍塌压力也可以用钻井液当量密度来表示, 它主要与地层的地应力、岩石的力学参数等有关。建立地层坍塌压力计算模型的关键是要选优强度屈服准则。关于岩石在压缩情况下的屈服, 研究者们提出了许多准则。有 Mohr - Coulomb 和扩展的 Griffith 破裂判别准则, 线性屈服准则, Mohr - Coulomb 准则等。根据庆深火山岩的地质情况, 把张性破裂与剪切滑移结合在一起进行了研究, Mohr - Coulomb 准则最为合适。

2.1 坍塌压力预测理论及模型的确定

根据井眼围岩应力分布规律以及剪切破坏准则, 考虑到地层岩石是非线性弹性体的实际情况, 可以建立如式(5)所示的地层坍塌压力 (P_b) 的计算模型。

$$P_b = \frac{\eta(3\sigma_H - \sigma_h) - 2cK + \alpha P_b(K^2 - 1)}{(K^2 + \eta)H} \times 100 \quad (5)$$

式中: P_b ——地层坍塌压力当量密度, g/cm^3 ; $\text{ctg}[45^\circ - (\varphi/2)]$; σ_H 、 σ_h ——分别为水平最大和最小主地应力; α ——有效应力贡献系数; c ——岩石的粘聚力; η ——应力非线性修正系数。

2.2 模型中参数确定

计算地层坍塌压力时需要知道岩石的泊松比 (μ)、有效应力贡献系数 (α)、粘聚力 (c) 和内摩擦角 (φ) 等参数, 这些参数在实验室所需的原地层岩石很难完整地取得。测井资料具有高分辨率、连续性、方便性、可靠性、经济性等优点, 因此通过测井信息来获取这些岩石力学参数。

利用测井资料计算地层应力时, 首先通过对岩

石力学参数的动静态同步测试及岩石抗压和抗拉强度测试建立地区的动静态弹性参数经验关系式,然后根据优选模型,用密度和全波列测井资料由式(6)计算水平最大、最小主应力。

$$\begin{cases} \sigma_H = [\mu/(1-\mu) + A](\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p \\ \sigma_h = [\mu/(1-\mu) + B](\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ ——岩石泊松比; A 、 B ——地层构造应力系数,可通过水力压裂法确定。

岩石粘聚力 c 、内摩擦角 φ 、应力非线性修正系数 η 分别由各自的经验公式求得。

2.3 坍塌压力计算结果及误差分析

利用上述的模型,根据徐深 301 井的测井数据计算得到的徐深 301 井坍塌压力见图 3。

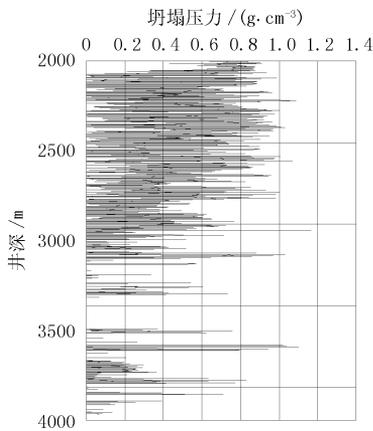


图 3 徐深 301 井坍塌压力剖面图

从图 3 可以看出,2000 ~ 2100 m 地层坍塌压力 $0.7 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ [$(0.7 \sim 0.8) \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$], 2500 ~ 3100 m 坍塌压力为 $0.2 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ [$(0.2 \sim 0.6) \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$], 3700 ~ 4200 m 为 $0 \sim 0.2 \text{ g/cm}^3$ [$(0 \sim 0.2) \times 10^{-2} \text{ N/cm}^3$]。该井实钻采用的钻井液密度:2000 ~ 2980 m 为 $1.20 \sim 1.28 \text{ g/cm}^3$, 2980 ~ 4370 m 为 $1.08 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$, 均大于该计算值,钻井过程中没有发生井塌现象(其井眼曲线见图 4)。其邻井徐深 302 井空气钻井结果也表明,3000 ~ 3500 m 井段井眼稳定性良好,计算结果也显示徐深 301 井 3100 ~ 3700 m 井段坍塌压力几乎为零,经验稳定性良好,与实际相符合。

3 破裂压力计算模型的建立

地层破裂压力 (P_f) 是确定合理井身结构和安全钻井等的重要依据。大庆深部地层主要以火山岩为主,由于火山岩呈现明显的非均质性与各向异性,同时不同的构造部位受构造应力作用的强度难以确定,造成最小水平主应力和岩体抗张强度的度量较

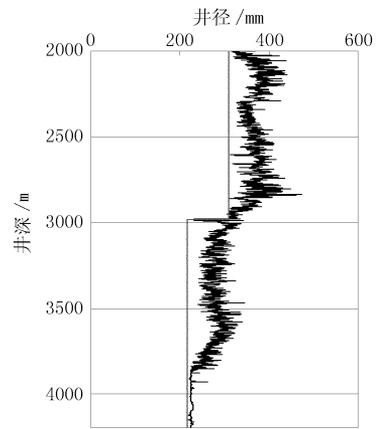


图 4 徐深 301 井井径曲线图

难。

3.1 破裂压力预测理论及模型的确定

地层破裂压力的预测模型已有较多报道,这些模型都有其特定的适用条件,主要适用于砂泥岩地层。对于火山岩地层,其独有的孔隙空间结构与砂岩均质孔隙有较大的区别,它的低孔、各向异性、非均质性等因素给预测地层破裂压力带来了复杂性。必须从火山岩地层的实际情况出发,建立适合于火山岩的地层破裂压力预测模型。

模型中既要考虑地应力以及地层孔隙压力对骨架应力的影响,又要考虑岩石的抗张强度对破裂压力的贡献。我们从三向地应力模型出发,经过一系列的推导之后建立了适合于火山岩地层特点的破裂压力预测模型:

$$P_f = \alpha P_p + u_b [\mu/(1-\mu)] (P_0 - \alpha P_0) + S_t \quad (7)$$

其中 αP_p 反映了地层孔隙压力对破裂压力的影响, $u_b [\mu/(1-\mu)] (P_0 - \alpha P_0)$ 反映了由上覆地层压力和地层孔隙压力综合作用的垂直骨架应力对破裂压力的贡献, S_t 反映了岩石抗张强度对破裂压力的影响。

3.2 破裂压力计算结果及误差分析

依据徐深 301 井的测井数据,利用上述方法计算得到的破裂压力值与实测点之间的对比情况见表 2。

表 2 破裂压力系数计算值与实测值对比

井段/m	破裂压力系数		误差/%
	计算值	实测值	
3680 ~ 3670	1.58 ~ 1.60	1.58	1.3
3760 ~ 3780	1.61 ~ 1.65	1.61	2.5
3870 ~ 3880	1.78 ~ 1.80	1.86	4.9
3980 ~ 4000	1.76 ~ 1.80	1.72	4.65

由表 2 可以看出,计算值与实测值的变化趋势

相同,其误差在 1.3% ~ 4.9% 范围内,符合项目指标要求。

4 压力预测软件

该软件系统主要利用文本所建立的模型,依据声波、伽玛、密度等测井数据计算地层的 3 个压力剖面。该软件主要包括数据管理、处理计算、图形输出 3 大模块,具有操作简单、智能高效的特点,使用过程中仅需要导入测井数据,软件就可以自动完成全部运算。该软件可以提高地层 3 个压力的预测、检测精度,合理设计井身结构、钻井液密度,对于安全高效钻井和油气藏保护有重要的意义。

5 应用实例分析

以徐深 3 井为例,根据上述研究成果,预测得到的 3 个压力剖面见图 5,破裂压力实测数据见表 3。

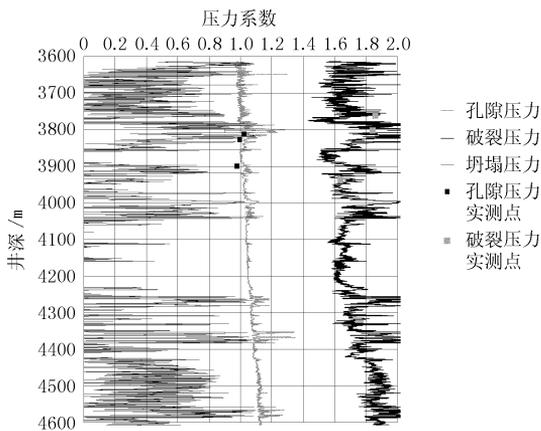


图 5 徐深 3 井 3 个压力剖面图

由图 5 和表 3 可以看出:3757 ~ 3766 m 井段,破裂压力系数在 1.68 ~ 1.87,实测值为 1.86,最大

表 3 徐深 3 井破裂实测数据

井段/m	破裂压力/MPa	破裂压力系数
3757 ~ 3766	68.67	1.86
3800 ~ 3806	68.67	1.84
3935 ~ 3944	63.29	1.64

误差 9.6%;3800 ~ 3806 m 井段破裂压力系数在 1.8 ~ 1.9 左右,实测值为 1.84,最大误差 3.3%;3935 ~ 3944 m 井段破裂压力系数在 1.64 ~ 1.73 左右,最大误差 5.5%。从图 5 看出,实测点均落在计算曲线上,吻合程度较好。

6 结论

(1) 本文提出了适合大庆油田深部地层压力预测的新方法,建立了预测模型,并且对预测模型中的经验参数进行了回归,解决了深部火山岩地层 3 个压力预测难的技术难题。

(2) 建立了获取声波、密度、伽玛、井径等测井资料,试油、试气、压裂等实测资料的方法和手段,为 3 个压力预测提供了数据支持。

(3) 编制了徐深气田 3 个压力预测软件,为徐深气田深井钻井工程设计的更加合理性提供了技术保障。

参考文献:

- [1] 楼一珊,等. 地层坍塌压力预测技术在钟市地区的应用[J]. 石油钻探技术,1999,17(3):12-13.
- [2] 刘之的,等. 利用测井资料计算碳酸盐岩三个地层压力[J]. 钻采工艺,2005,28(1):18-21.
- [3] 胡治华,等. 松辽盆地兴城火山岩相中测井资料的特征及应用[J]. 石油地质,2007,(4).
- [4] 王璞珺,等. 盆地火山岩:岩性·岩相·储层·气藏·勘探[M]. 北京:科学出版社,2008.32-34.

我国矿产资源勘查重点实现战略西移

中国地质调查局网站消息 随着中央财政逐步加大对西部基础地质调查投入,我国矿产资源勘查立足国内,勘查重点业已实现战略西移。

中国地质调查局资源评价部主任陈仁义 11 月 12 日说,目前我国矿产资源勘查重点已经实现战略西移。中央财政逐步加大对西部基础地质调查的投入,2007 年中央财政投入西部地区矿产基础调查 9.1 亿元,占全国 38.4%;社会资金投入 35.8 亿元,占全国 36.7%。

陈仁义在 2008 中国国际矿业大会“地质调查与找矿新成果”专题会上说,目前全球经济发展不确定性与日俱增,我国拉动内需的经济发展战略要求矿产勘查不断加大投入、持续发展,以保证基础设施建设和经济社会长远发展的需要。

为在重要成矿区带实行统一部署,尽快提高基础地质工作程度,引导企业资金有序开展商业性矿产勘查,2008 年年初以来中国地质调查局已与黑龙江、云南、福建、新疆、湖南、青海、西藏等省区人民政府签署合作协议,统筹部署中央与地方公益性地质工作。目前中央、地方、企业和地勘单位多方联合,公益性地质调查与商业性矿产勘查合理分工的多渠道投入机制已经初步建立。

据中国地质调查局总工程师主任严光生介绍,2009 年我国地质调查工作部署将坚持以国家需求为目标,立足解决重大资源、环境、科学问题,统一部署、综合部署,集中各方面力量,统筹各方面资金,引领大投入,形成大拉动,通过工作部署推动全国矿产勘查新机制逐步破题。