

Calculating Stress Method with Well-logging Data

Wei Zhao¹, Fazhan Zhao¹, Kan Liu¹, Xining Ren¹, Junjun Guo², Zhouai Zhang²

¹Shenhua Geological Exploration Co. Ltd, Shenhua Group, Beijing

²Shenhua Baorixile Shengli Energy Co. Ltd., Beijing

Email: zfz198@126.com

Received: Feb. 12th, 2020; accepted: Mar. 12th, 2020; published: Mar. 30th, 2020

Abstract

Because stress exists everywhere in the entire coal mine colliery areas, safety questions caused by stress de-balance will be faced from drilling hole to roadway mining. For preventing geological disasters such as rockburst and collapse, pre-determining stress value and stress direction is necessary and significant in work zones. There are many methods for measuring the stress field. While compared with them, the method with well-logging curves can work quickly and accurately. In this paper we first introduce how to calculate Young and shear modulus and the maximum and minimum stress with the P- and S-wave velocities, density and gamma curves from logging data, and then propose the mud window for safety well-drilling. Finally we determine the direction of stress with azimuthal caliper curve.

Keywords

Well-logging Curve, Stress, Young's Modulus, Safety Mud Window, Stress Direction

用测井曲线计算地应力的方法

赵伟¹, 赵发展¹, 刘侃¹, 任玺宁¹, 郭海桥², 张周爱²

¹神华地质勘查有限责任公司, 北京

²神华宝日希勒胜利能源有限公司, 北京

Email: zfz198@126.com

收稿日期: 2020年2月12日; 录用日期: 2020年3月12日; 发布日期: 2020年3月30日

摘要

由于煤矿开采地区存在着地应力, 在整个地质作业过程中, 从煤矿的钻孔到煤层巷道施工, 都存在着应力失稳安全问题。为了预防岩爆、坍塌等地质灾害的发生, 必须提前确定作业区地应力的大小和方向。目前, 在地质矿产开发中地应力的测量方法比较多, 但是用测井资料计算地应力有相对比较快速的特点, 而且误差比较小。本文以纵波、横波、密度、自然伽马等测井资料为依据, 计算地层的杨氏模量、剪切模量、最大主应力、最小主应力, 确定钻探安全泥浆窗口; 用带有方位的井径资料确定地应力方向, 为钻探施工和采煤作业提供有效的地应力预警资料, 以防止灾害的发生。

关键词

测井曲线, 地应力, 杨氏模量, 安全泥浆窗口, 应力方向

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 测井资料确定地应力的意义

在煤田钻孔工程中, 有时由于地应力比较大, 导致井壁坍塌, 经常出现卡钻, 影响后期的作业; 煤层巷道面由于应力集中, 出现岩爆, 会发生塌方, 导致重大的工程事故发生, 导致安全事故发生, 用测井的方法进行计算地应力, 快捷方便, 对于生产采取措施有巨大的指导意义。

2. 用地球物理测井确定地应力的方法

在油田勘探中, 为了确定煤层深度厚度, 要进行地球物理测井, 常规的测井资料包含声波时差, 密度等资料, 为了计算地应力, 还需横波时差, 利用纵波、横波时差、地层密度就可计算地层强度和最大最小主应力。根据测井资料计算的压力和泊松比称为动态压力和动态泊松比, 实验室的测试结果称为静态参数。

2.1. 弹性模量的计算方法

在各向同性地层中, 根据纵、横波传播方程给出的纵、横波速度与岩石动力学参数之间的理论关系, 用偶极横波测井资料得到纵波时差 Δt_c , 横波时差 Δt_s , 用密度测井得到体积密度 ρ_b , 就可计算各种岩石

力学参数:

$$\begin{aligned} G_{dyn} &= \frac{\rho_b}{(\Delta t_s)^2} \\ K_{dyn} &= \rho_b \left[\frac{1}{(\Delta t_c)^2} \right] - \frac{4}{3} G_{dyn} \\ E_{dyn} &= \frac{9G_{dyn} \times K_{dyn}}{G_{dyn} + 3K_{dyn}} \\ \nu_{dyn} &= \frac{3K_{dyn} - 2G_{dyn}}{6K_{dyn} + 2G_{dyn}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: G_{dyn} 为动态剪切模量; K_{dyn} 为动态体积模量; E_{dyn} 为动态杨氏模量; ν_{dyn} 为动态泊松比; ρ_b 为体积密度; Δt_s 和 Δt_c 分别为横波和纵波时差[1]。

用测井资料计算的地应力为动态应力, 用岩心或煤心在实验室做出的应力, 为静态应力, 静态应力, 动态应力和静态应力呈现一种线性关系。

静态杨氏模量参数的计算:

$$E_{sta} = a + b * E_{dyn} \quad (2)$$

泊松比:

$$\nu_{sta} = c + d * \nu_{dyn} \quad (3)$$

E_{sta} 和 ν_{sta} 成为静态杨氏模量和静态泊松比, E_{dyn} 和 ν_{dyn} 为动态杨氏模量和动态泊松比, a 和 b , c 和 d 可由实验室岩石的应力 - 应变实验获得。在本区块, $a = -0.3512$, $b = 0.7199$, $c = 0.092$, $d = 0.38$ 。

2.2. 地应力的计算方法

2.2.1. 上覆地层压力计算

$$\sigma_v = g \int_0^h \rho_b(h) dh \quad (4)$$

上覆压力通过对地层密度进行积分计算得到。典型的地层密度通过电缆测井得到, 也可以利用岩心的密度。

σ_v 是上覆地层压力, 单位是 MPa, h 是某一深度处的垂深, 单位是米, ρ_b 是地层密度, 单位是 g/cm^3 , 是连续的测井曲线, g 是重力加速度。

2.2.2. 最小最大主应力的计算

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha p_p) + k_h \frac{E * H}{1+\nu} + \frac{\alpha_T * E * \Delta T}{1-\nu} + \alpha * p_p + \Delta \sigma_h \quad (5)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha p_p) + k_H \frac{E * H}{1+\nu} + \frac{\alpha_T * E * \Delta T}{1-\nu} + \alpha * p_p + \Delta \sigma_H \quad (6)$$

$$S_c = E [0.008V_{sh} + 0.0045(1 - V_{sh})] \quad (7)$$

$$C_o = V_p^4 \rho_o^2 (1 - 2\nu) * (1 + \nu) / ((1 - \nu) * (1 + 0.78V_{sh})) \quad (8)$$

$$S_t = S_c / 12 \quad (9)$$

式中: σ_v , σ_h , σ_H 分别为垂向应力, 最小水平主应力和最大水平主应力[2]; ν , E , α_T , α 分别为地层岩石

的泊松比、弹性模量、线膨胀系数和有效压力系数； H ， p_p ， ΔT 分别为地层深度、地层深度处的孔隙压力和地层温度的变化； k_h ， k_H 分别为最小和最大水平主应力方向的构造应力系数，在同一区块可视为常数； $\Delta\sigma_h$ ， $\Delta\sigma_H$ 分别为地层剥蚀的最小和最大水平应力附加量，在同一区块可认为是常数； S_c 是岩石的抗压强度； E 是杨氏模量； V_{sh} 是泥质含量； C_0 是初始剪切强度； V_p 是纵波速度； ρ_o 是地下某点开始计算应力时的密度； S_t 是抗张强度。

2.3. 孔隙压力计算方法

孔隙压力评价的目的是为了确定不同深度的地层孔隙中的流体所承受的压力。对于已钻过的井，可用重复地层测试仪或模块式地层动态测试仪(MDT)等测得孔隙流体压力，也可由试井得到孔隙流体压力。这种方法得到的数据直接、可靠，但通常数据点很少，不能得到连续的剖面。

在砂泥岩剖面中，可利用测井或地震资料，根据压实理论计算得到连续的孔隙压力剖面。根据压实理论，在正常的压力梯度下泥岩的声波时差随着深度的增加而减小。对于正常压实的地层，存在一个正常的压实趋势线。当声波时差偏离这个正常的趋势线后，通常就指示了压力的异常。Eaton 经验公式被广泛用于碎屑岩地层的孔隙压力预测。根据墨西哥湾的大量数据，Eaton 在 1975 年提出了如下的孔隙压力预测的经验公式：

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_n) \left(\frac{\Delta t_c}{\Delta t_n} \right) \quad (10)$$

式中： P_p 是孔隙压力； σ_v 是上覆岩层压力； P_n 是正常静水压力，通常情况下为 1.03 g/cm^3 ； Δt_c 是测量声波时差； Δt_n 是正常压实情况下的声波时差，由趋势线确定[3]。

2.4. 地层最大主应力最小主应力以及破裂压力计算

钻井过程中，为了防止井壁坍塌，要采用合适的泥浆，泥浆密度过大，会压穿地层，造成井漏，泥浆密度过小，易造成坍塌，所以要选择合适的安全泥浆窗口。

当液压增加到临界破裂压力时，井壁出现张裂缝，(Hamison)海姆森给出了自然破裂压力 P_f 的计算公式：

$$P_f = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + S_t \quad (11)$$

P_f 是破裂压力， σ_h ， σ_H 分别最小水平主应力和最大水平主应力， P_p 是孔隙压力， S_t 是抗张强度。

当井中的压力比较小时，径向应力由压性逐渐向张性过渡，由此两应力构成的莫尔圆与岩层切边破裂包络线相切时，岩层发生剪切破裂，所以在最小水平主应力方向最易发生坍塌，这时井中泥浆柱压力为剪切破裂压力极限值 p_c ，由库仑破裂准则可得：

$$p_c = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - 2C_0K + p_p(K^2 - 1)}{K^2 + 1} \quad (12)$$

式中： K 内摩擦是系数， $K = \text{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Phi}{2}\right)$ ； Φ 是内摩擦角， $\Phi = \frac{\pi}{12} \left[2 \left(1 - \frac{\nu}{1-\nu} \right) + 1 \right]$ 。

根据地层破裂压力和坍塌压力，可以求产保持井壁稳定的合理泥浆密度范围，最大泥浆密度 ρ_{\max} 为岩石的自然破裂压力梯度：

$$\rho_{\max} = \frac{100p_f}{DEP} \quad (13)$$

最小泥浆密度 ρ_{\min} 为岩石的坍塌压力梯度：

$$\rho_{\min} = \frac{100P_c}{DEP} \tag{14}$$

保持井壁稳定的合理泥浆密度 ρ_m 为: $\rho_{\min} < \rho_m < \rho_{\max}$ 。

式中: P_p 地层孔隙压力; S_t 是抗张强度; P_c 是坍塌压力; C_o 初始剪切强度; DEP 是深度。

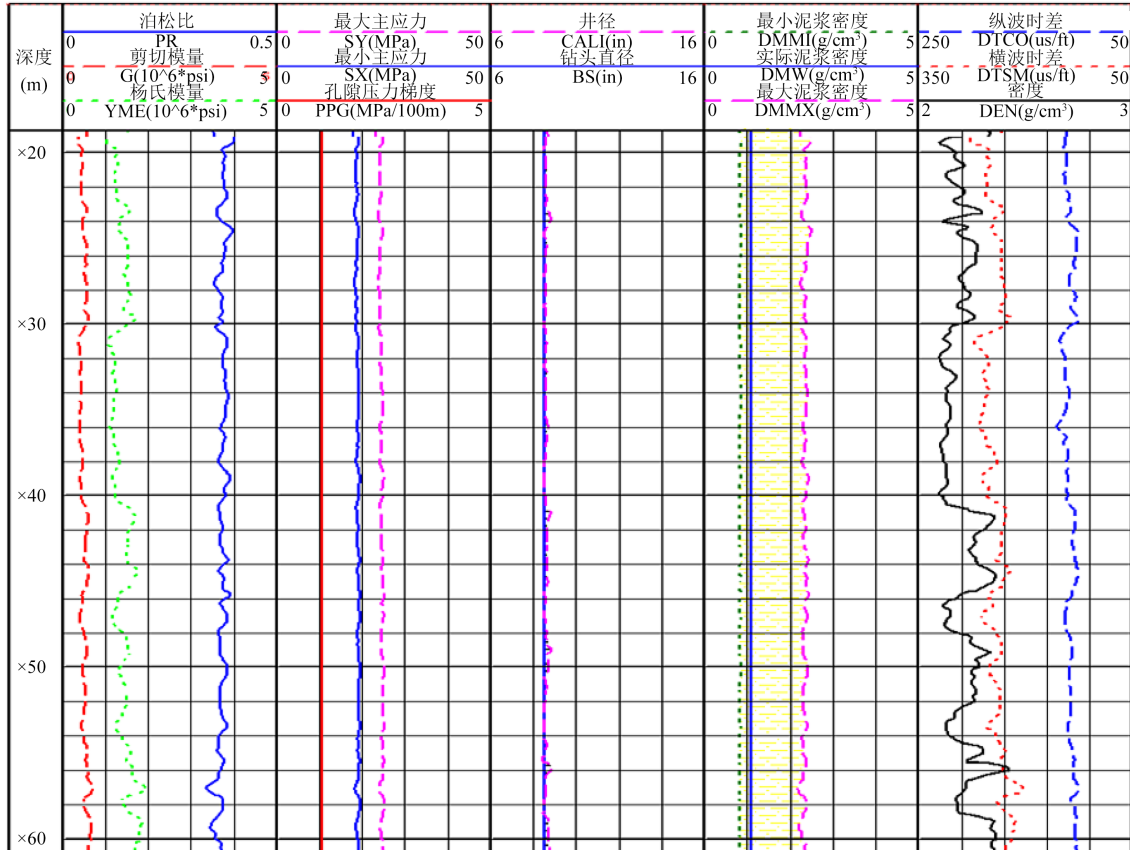


Figure 1. Acoustic wave data processing result graph
图 1. 声波资料处理成果图

在图 1 是根据偶记横波测井处理的成果图, 第一道是深度道, 第二道是泊松比(ν), 剪切模量(G , 单位 psi), 杨氏模量(YME , 单位 psi); 第三道是最大主应力(SY , 单位 MPa)和最小主应力(SX , 单位 MPa), 孔隙压力梯度(MPa/100m); 第四道是钻头尺寸(BS , 单位 in)和井径曲线($CALI$, 单位 in); 第五道是安全泥浆窗口(g/cm^3); 第六道是纵波时差($DTCO$, 单位 $\mu s/ft$), 横波时差($DTSM$, 单位 $\mu s/ft$)和地层密度(DEN , 单位 g/cm^3) [4] [5] [6]。

从第五道看出, 选取最低泥浆密度为 $1.2 g/cm^3$, 可以满足井壁稳定, 又不压穿地层。

3. 地应力方向的确定

一个地区地应力的方向大致是不变的, 局部有一定的变化, 地应力方向的确定有多种方法, 在钻孔中, 由于应力的作用, 在某一地层, 钻孔井眼为椭圆形, 椭圆的长轴为最小主应力方向, 根据椭圆短轴与正北方向的夹角就可确定最大主应力的方向, 利用带方位的双井径测井技术进行方位与井径的测量经过统计就可获得最大主应力的方向。图 2 所示的图中, $C1 > C2$, $C1$ 与 $C2$ 的差为正, 而 1 号极板指示正东方向, 所以该区最大主应力方向为南北方向[7]。

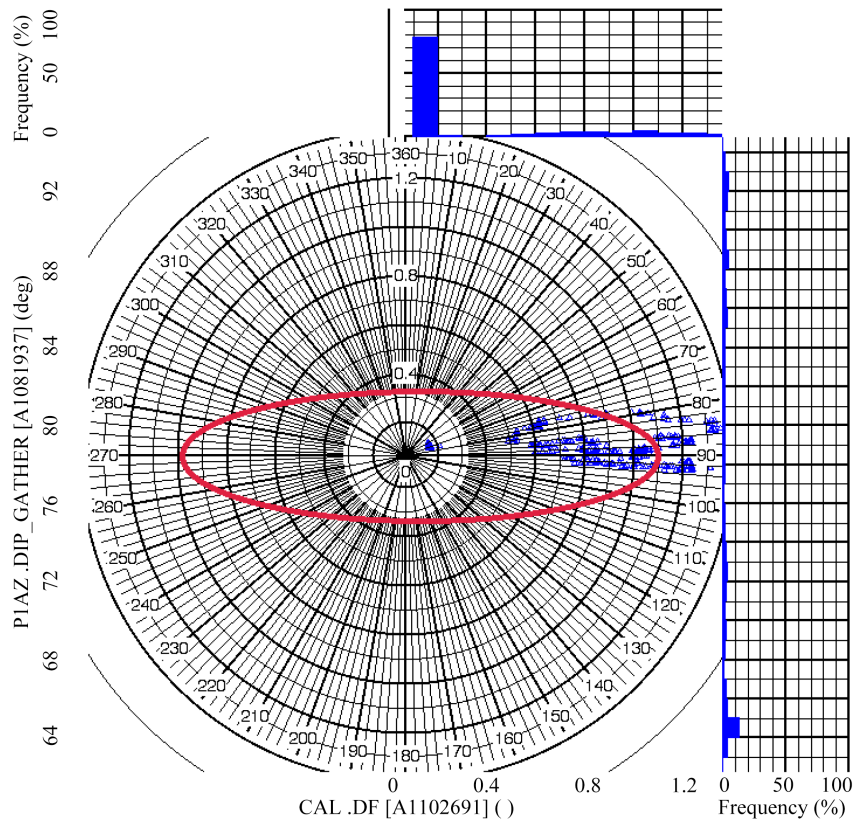


Figure 2. Ellipse-shaped hole indicating maximum main stress direction
图 2. 椭圆井眼指示最大主应力方向示意图

4. 地应力在压裂作业和水平井钻井中应用

在煤层气的压裂是体积压裂，压裂形成的裂缝是张性断裂，形成裂缝时收到的力是来自两侧的。裂缝沿着最大主应力方向延伸，因为地层内部裂缝的扩展，主要受地层内应力控制，油田和煤田开发研究与实践认为，在水平井或大斜度井中，水力压裂裂缝延伸方向总是平行于地层最大水平主应力方向。

5. 地球物理测井方法与常规地应力测量的优缺点对比

目前测量地应力的方法有套芯应力解除法，水压致裂法，应变恢复法，钻孔崩落法，声发射法等多种应力测量方法，但是，每种方法各有优缺点。存在的问题是测量和探测深度不足，在技术层面，仪器的设备和性能很难满足高温高压，防水的能力，测量数据的重复性和可靠性需要的得到提高。有些测量受环境影响比较大。

岩体中的地应力是一个具有三维空间的复杂应力场，它的大小和分布规律受到各种因素的影响和不确定因素，水力初始应力随深度的变化不存在线性增大的变化关系，在大量的地应力影响因素中，地质构造历史，岩性和切割地貌是主要因素。

而地球物理测井方法，曲线的重复性好，测量速度快，通过实验确定研究区的参数，地应力计算结果与实验数值接近，对油田储层的方位射孔有很好的指导作用。

6. 结论

- 1) 在钻孔中根据应力大小确定合适的泥浆密度，为安全钻井提供快速、安全的钻进奠定了基础。

2) 页岩气煤层气压裂产生裂缝, 裂缝总是沿着平行于最大主应力的方向延伸, 并且延伸一定的距离, 对页岩气和煤层气的体积压裂有重要的指导意义。

3) 根据最大泥浆安全窗口计算破裂压力, 并预测裂缝的在纵向上的延伸高度, 便于控制顶板、地板高度。

4) 在应力比较集中的部位对抗压套管的选型有重要的指导意义。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFC0501102-04)。

参考文献

- [1] 戴钟良, 柴成秋, 李伟平. 岩石力学参数与测井资料相关性研究及其在大情字井油田的应用[J]. 吉林石油科技, 2001(上): 51-56.
- [2] 张筠, 林绍文. 利用测井进行弹性特征以及应力场分析[J]. 测井技术, 2001, 25(6): 467-472.
- [3] 刘厚彬, 孟英峰, 王先起, 等. 利用测井资料预测地层孔隙压力方法研究综述[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(6): 91-93.
- [4] 路保平, 张传进. 岩石力学在油气开发中的应用前景分析[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(1): 7-9.
- [5] 刘加杰, 康毅力, 王业众. 扩展钻井液密度窗口理论与技术进展[J]. 钻井液与完井液, 2007, 24(4): 69-75.
- [6] 朱玉林, 申辉林. 利用测井资料确定安全钻井液密度窗口[J]. 国外测井技术, 2006, 21(5): 17-19.
- [7] 刘之的, 夏宏泉, 汤小燕, 等. 成像测井资料在地应力计算中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(4): 9-12.