

一种研究山前挤压构造区地应力的新方法

李 军^{1,2)} 张超谟²⁾ 王贵文³⁾ 肖承文⁴⁾ 李进福⁴⁾ P5 A

(1)成都理工大学能源学院,四川 成都,610059;2)江汉石油学院地球物理系,湖北 荆州,434102;
3)石油大学地球科学系,北京,102200;4)塔里木油田公司研究院,新疆 库尔勒,841000)

摘 要 通过对稳定沉降地区与山前挤压构造区的地球物理测井信息的深度域特征进行理论分析和对比,提出了一种基于测井信息计算最大主地应力的统计模型法。应用该方法对塔里木盆地库车地区地应力进行了实际计算,其结果与实验结果相符,同时利用椭圆井眼法确定最大主应力方向。最后,对山前挤压构造区的地应力分布与油气藏分布关系进行了探索。

关键词 地球物理测井 地应力 新方法 挤压构造 山前地区

A New Method for Studying Ground Stress in the Structural Compressive Area of a Foreland

LI Jun^{1,2)} ZHANG Chaomo²⁾ WANG Guiwen³⁾ XIAO Chengwen⁴⁾ LI Jinfu⁴⁾

(1)Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059;2)Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou, Hubei, 434102;
3)Petroleum University of China, Beijing, 102200;4)Tarim Petroleum Exploration & Development Company, Korla, Xinjiang, 841000)

Abstract Through a comparison between distribution characteristics of logging data in the structural stable field and those in the structural compressive field, the authors put forward a new method for determining maximum horizontal in-situ stress based on statistical analysis of resistivity and acoustic slowness-time. The method and the model were used to calculate in-situ stress in the Kuche oil field of Tarim basin. The calculated stress coincides with the result of the acoustic emission experiment. The azimuth of the maximum compressive horizontal principal stress was also obtained by using enlarged well bore breakouts in the area. The research shows an intimate relationship between the stress distribution and the distribution of petroleum pools in the area.

Key words geophysical logging ground stress new method compressive structure foreland area

中国西部山前地区为强烈挤压地应力集中区,地表和地下构造异常复杂。随着西部油气勘探活动不断深入,油气钻井工程和油气开发工程中迫切需要精细的地应力研究与预测。除采用地应力测量方法外,近年来,又采用了一种应用地球物理测井信息计算地应力的方法,该方法通过选择地应力模型,利用地球物理测井确定模型参数,对地应力进行连续计算与分析。其最大特点是快捷、成本低,但由于模型选择中科学依据不充分,因此误差较大(李志明,1997),在石油勘探和开发中往往只关注最大主地应力分布与方向,本文用全新的方法和思路,借助地球物理测井资料,确定山前挤压区最大主地应力大小和方向,取得较好的效果。

1 传统基于弹性力学的测井地应力研究

以弹性力学理论为基础,经过一定的假设条件和边界条件可以推演出用于计算地下原地应力的数学模型,用地球物理测井信息(包括声波全波列、密度等)确定模型参数,对地应力进行连续计算与分析。不同的研究者根据不同条件提出了众多的地应力模型,黄荣尊(1995)的黄氏模型在油田得到较广泛的应用。其模型如下:

$$\sigma_V = \int_0^H \rho(h) g dh$$
$$\sigma_H = \left(\frac{u_s}{1 - u_s} + str_1 \right) (\sigma_V - aP_P) + aP_P$$

本文由国家科技攻关项目专题“塔里木库车山前构造油气藏测井地应力分析”(99-111-01-01-02)的部分成果。

改回日期:2003-5-21;责任编辑:宫月萱。

第一作者:李军,男,1967年生,副教授,在读博士生,从事测井地质教学与科研;E-mail:jplijun@263.net。

$$\sigma_h = \left(\frac{u_s}{1 - u_s} + str_2 \right) (\sigma_V - aP_P) + aP_P$$

式中, $\sigma_V, \sigma_H, \sigma_h$ 分别为垂向、水平最大地应力、水平最小地应力; ρ 为密度; H 为深度; a 为有效应力系数; P_P 为孔隙压力; u_s 为静泊松比; str_1, str_2 为构造校正量(必须分段考虑)。

可依据阵列声波测井得到的纵、横波速度确定模型力学参数:

$$U_d = \frac{0.5(v_p/v_s)^2 - 1}{(v_p/v_s)^2 - 1}$$

$$E_d = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \times 10^3$$

式中, U_d 为动态泊松比; E_d 为动态弹性模量; v_p 为纵波速度; v_s 为横波速度。

该方法最大特点是快捷、成本低,但由于模型选择中科学依据不充分,因此误差较大。

2 新方法的基本原理和思路

2.1 原理

泥岩压实实验研究表明,在正常压实情况下,泥岩孔隙度随负载压力(或埋深)呈指数递减规律(王燮培等,1990)即有

$$\varphi = \varphi_0 e^{-cz}$$

式中, φ 为任意深度处泥岩孔隙度; φ_0 为泥岩初始孔隙度(60%~80%); z 埋藏深度; c 为地区常数。

在单对数坐标纸上,正常压实条件下的泥岩孔隙度与深度之间关系为一直线(图1)。

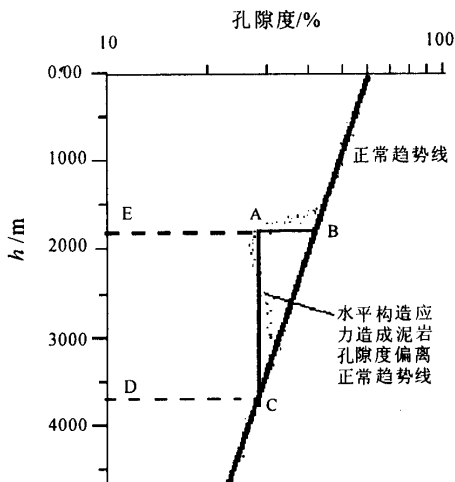


图1 利用泥岩正常压实趋势线确定附加构造挤压应力原理
Fig.1 The principle of determining structural compressive stress using shale burial curve

当泥岩额外地受到来自侧向构造挤压应力作用时(水平构造应力),孔隙进一步减小,促使泥岩孔隙度偏离正常趋势线(图1)。可以根据偏移量的大小来估算附加构造应力。图1中A点明显偏离正常趋势线,A点在正常趋势线上水平、垂向射影点分别为B、C两点。利用B、C两点纵坐标之差(即深度差D、E)可以估算附加构造应力大小(即深度差与岩石平均密度之积)。因此,可以利用正常趋势线方程和偏移量来求取附加构造应力。

2.2 思路

地层孔隙度可由测井参数(声波时差、岩石密度等)来确定。在流体性质相近情况下,泥岩电阻率的大小也能很好地反映孔隙度。因此在实际研究过程中,并不直接地选择孔隙度来建立模型,而是应用声波时差和电阻率等测井参数来建立模型。因为泥岩沉积相对稳定,流体性质相对单一和封闭,且易于压实,对地应力反映灵敏,因此,建模过程中要选取稳定沉积的泥岩,这也是模型正确与否的关键因素。山前构造应力研究基本思想是:①在远离山前挤压地区的构造稳定区(该区以沉降作用为主,没有水平挤压作用或者水平挤压作用弱),选取泥岩段,确定正常趋势应力模型;②应用模型对山前地应力进行估算,并与实验结果对比、修正模型。

具体步骤:①在稳定区依据测井资料选取稳定泥岩段,并读取电阻率、声波时差、密度和中子等参数;②对泥岩参数进行必要的校正处理;③建立泥岩正常应力模型;④计算山前地应力;⑤实验检验并修正模型。

3 模型确定

以塔里木盆地库车山前挤压构造区地应力研究为例,说明模型建立过程。

库车地区位于塔里木盆地北部与天山南麓交接处。构造属性为前陆挤压型盆地,发育多层次的推覆构造,为强烈挤压应力作用区。库车地区往南150~200 km,基本进入稳定沉降区(轮南地区南缘),侧向挤压作用较弱。

模型的建立首先是从分析稳定沉降区测井信息深度域特征开始的。

3.1 稳定沉降区声波时差、电阻率随深度变化特征

统计稳定区多口井的测井资料(泥岩层数据),确定了声波时差和电阻率深度域的特征。稳定区声波时差、电阻率随深度关系符合正常条件下压实趋势规律,在单对数坐标纸上为一条直线(图2)。但

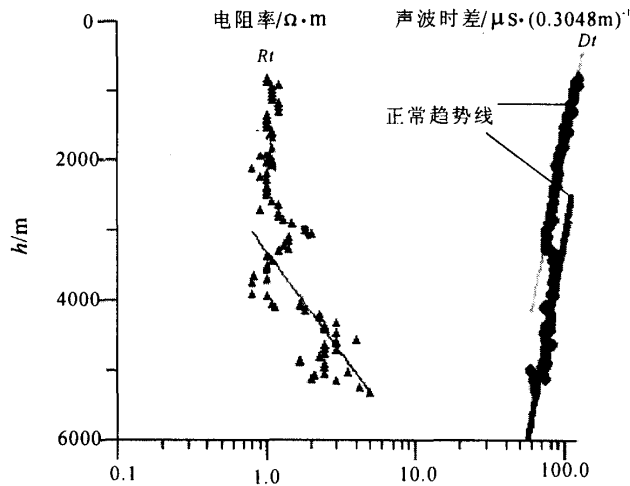


图 2 稳定沉降区声波时差、电阻率随深度关系

Fig. 2 The depth-dependent changes of acoustic slowness-time and resistivity in the structural stable field

该区有其特殊性:①以古近纪底为界,趋势线出现断点,表现出不同分段特征;②声波时差上、下两段都有很强的随深度变化规律,而电阻率只有下段才显示规律性(图 2)。岩石在较疏松情况下,电阻率影响因素多,与深度关系不明确,因此,在建立模型时要注意这一点。

3.2 地应力与声波时差和电阻率的关系

正常趋势线的建立并不是最终目的,还要通过正常趋势线建立地应力与测井参数的关系,以便用于山前地区地应力计算。

稳定沉降地区地应力主要由其重力作用衍生出来的,构造侧向挤压作用较弱,因此,垂直方向为最大主应力方向。公式如下:

$$6v = \int_0^h \rho g dh$$

式中, $6v$ 为垂向地应力(也是最大地应力); ρ 为密度; g 为重力加速度; h 为深度。

统计稳定地区最大主应力与各深度点声波时差和电阻率关系,得到地应力模型。

$$\sigma_{\max} = -86.8556 \times \log(\Delta t) + 437.279 (\Delta t < 260 \mu s/m)$$

$$\sigma_{\max} = -172.874 \times \log(\Delta t) + 837.938 (\Delta t \geq 260 \mu s/m)$$

$$\sigma_{\max} = 26.3337 \times \log(Rt) + 71.7665 (Rt < 5 \Omega \cdot m)$$

$$\sigma_{\max} = 13.4411 \times \log(Rt) + 82.6613 (Rt > 5 \Omega \cdot m)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为最大主地应力(MPa); Δt 为声波

时差,单位为 $\mu s/m$; Rt 为电阻率,单位为 $\Omega \cdot m$ 。

3.3 电阻率和声波时差对地应力的敏感性及其模型选择

研究发现,电阻率和声波时差对地应力的敏感性有不同特征。

当岩石承受的总地应力较弱时,岩石保持较高孔隙,电阻率对地应力响应不灵敏(图 3),但声波时差能有效地反映地应力,因而采用声波时差建立地应力模型。

在岩石受到强地应力作用下,岩石致密,声波时差对地应力反映不灵敏,而电阻率能灵敏地反映地应力的存在(图 3),此时,应当采用电阻率建立地应力模型。

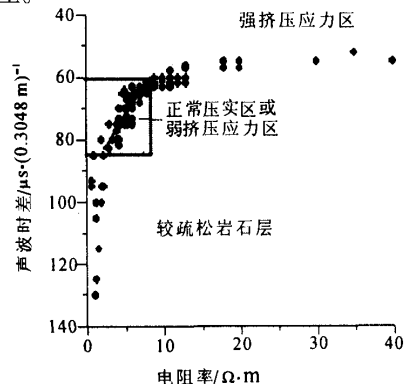


图 3 不同应力条件下,声波时差和电阻率交会特征

Fig. 3 The cross plot of acoustic slowness-time and resistivity under deferent stress

在中等地应力作用区,既可用声波时差建立模型,也可用电阻率建立模型。

4 计算结果与实验分析

4.1 声发射实验确定地应力的基本原理

实验表明:在单调增加应力作用下,当应力达到过去已施加过的最大应力时,声发射活动明显增加,这种效应就是著名的凯塞尔效应。因此,岩石的声发射活动能够“记忆”岩石所受过的最大应力(Yoshikawa,1990)。

利用凯塞尔效应测定地应力过程是将取自深部地层的岩心样品在室内加载,用声发射仪接收岩石受载过程中所发射的声波信号,再对信号进行分析,确定凯塞尔效应点,从而确定地应力(孙宝珊等,1996)。

4.2 计算结果与实验分析

利用应力模型可以连续地对山前挤压带的地应力进行计算,确定应力在井筒方向上的分布规律(图4)。将计算结果与声发射实验确定的地应力进行对比,相互检验。

稳定区计算地应力与实验结果的方法非常接近

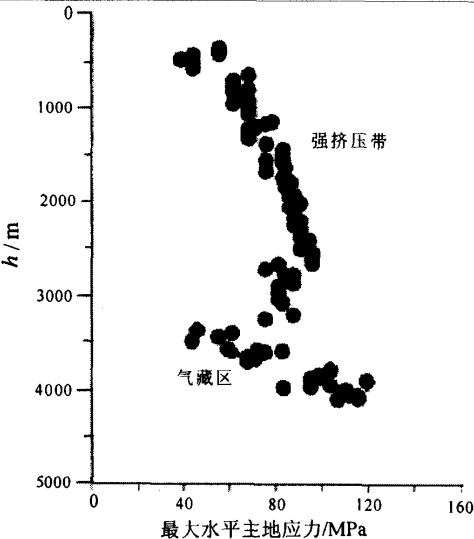


图4 克拉2井最大地应力随深度变化图

Fig. 4 The Kela2 well's maximum horizontal principal stress profile derived from logging data

(表1),山前地区计算地应力与实验结果,误差水平较稳定区误差大,但仍具有较好的一致性(表2),表明模型是可靠的。

表1 构造稳定区测井地应力计算结果与实验分析结果对比
Table 1 Correlation of the calculated maximum stress from logging data with measured results from acoustic emission in structural stable field

井名	深度 /m	电阻率 /Ω·m	声波时差 /μs·m ⁻¹	测井计算最大 主应力值 /MPa	实验分析最大 主应力 /MPa	最大主应力 相对误差 /%	测井最大有效 主应力值 /MPa	实验最大有效 主应力值 MPa
- G1 [#]	3860	1.4	266	85.95	86.00	-0.058	46.96	47.0
	4020	2.0	266	85.95	88.00	-2.33	45.34	47.0
	4045	1.3	256	90.36	88.00	2.68	49.50	48.0
	4100	2.0	236	99.71	89.0	12.03	58.3	48.0
	4150	2.5	233	101.34	90.00	12.6	59.43	48.0
	4175	2.6	246	74.94	90.00	5.48	52.77	48.0
	4275	2.7	246	94.94	92.0	3.2	51.76	48.0
	4300	3.3	233	101.34	92.0	10.15	57.91	49.0
	4405	3.5	213	111.65	94.0	18.72	67.17	49.0
	4500	3.5	240	98.09	95.0	4.1	52.65	49.0
	4550	3.5	236	99.71	96.0	3.85	53.75	50.0
	4630	3.5	230	102.9	97.0	6.08	56.24	50
	4750	3.6	249	93.4	98.0	4.69	45.41	50
	4850	3.3	253	91.09	100.0	.91	42.88	51
	4960	3.2	230	102.9	101.0	1.88	52.90	51
	4980	3.0	246	94.9	98.0	3.16	44.64	51

表 2 库车山前 KL2[#]地区测井地应力与实测地应力对比表
Table 2 Correlation of the calculated maximum horizontal stress from logging data with measured results from acoustic emission in Kuche foreland basin

井名	深度 /m	电阻率 /Ω·m	声波时差 /μs·m ⁻¹	测井有效最大 主应力值 /MPa	实验有效最大 主应力值 /MPa	有效最大主 应力相对误差 /%	测井最大 主应力值 /MPa	实验最大 主应力值 /MPa	最大主应力 相对误差 /%
KL201 [#]	3626.8	3.2	263	50.77	55.67	-8.8	87.4	92.3	-5.3
	3629.1	3.2	263	50.75	53.04	-4.32	86.8	89.7	3.2
	3855.7	6	246	64.06	65	-1.45	103.0	94.6	8.6
	3933.9	6	230	71.92	65	9.54	111.56	104.8	6.5
	3988.1	6	220	67.83	65	4.35	108.1	105.27	2.6
	3992.5	6	220	67.79	65	4.3	108.1	105.32	2.6
KL202 [#]	4358.5	10	207	71.29	69.6	2.42	115.3	112.3	2.68

5 地应力分布与油藏分布关系

地球物理测井信息为确定最大主应力方向提供了一种十分快捷而有效的方法：椭圆井眼法。在现今地应力作用下，塑性层钻井井眼呈椭圆形，且最大主应力方向垂直椭圆井眼长轴方向。利用地球物理测井资料（包括地层倾角测井、井壁成像测井）可以确定椭圆井眼长轴方向，从而确定最大主应力方向。应用此方法确定该区最大挤压应力方向呈近 SN 向，与该区构造样式吻合。

确定地应力分布状况不仅对钻井工程、油藏工程意义重大，而且也能在某种程度上指示油气藏分布规律。研究发现，山前挤压区油气藏分布总是位

于挤压应力背景下相对较低的应力区，图 4 中 3 650~3 900 m 井段为挤压应力背景中的低应力区，也是巨厚天然气层（西气东输主力气层）。较低的地应力作用有利于储层保持较高原生孔隙，为形成良好储集空间打下基础。这一点对于西部山前强挤压条件下能否形成高产油气田是十分必要的。

在挤压背景下形成较低的应力带是受一定构造样式制约的。图 5 中区域断坪下部（下盘）为宽缓的三角构造区，挤压应力较低，形成了高孔高渗带，断坪上部（上盘）为复杂的叠瓦构造带，为强烈挤压应力段，油气储层物性差。总之，在山前强挤压背景下，局部地带在某种屏蔽条件下，可以形成较低的应力段，为形成高孔、高渗储层提供基本条件。

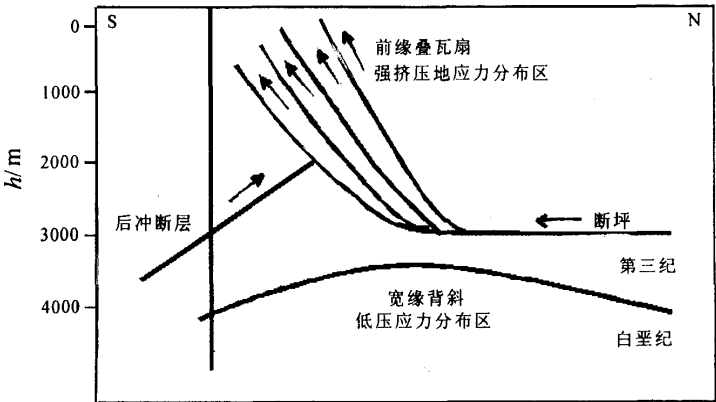


图 5 地应力分布与构造样式(示意图)
Fig.5 The relationship between stress distribution and structural style

6 结论

本文介绍的新方法只适用于强烈挤压的构造变形区,而且统计模型是基于泥岩地球物理特性的,模型适应性受到限制。

通过新方法估算的地应力值,确定传统模型参数(如构造系数等),这样可以充分发挥两种方法各自的优势,从不同侧面连续确定井筒剖面地应力的变化状况。也可将井筒地应力剖面与地震参数(如层速度)结合,以确定地应力平面分布。

将此方法确定的地应力与原地地应力测量结果(如水压法测量结果)进行对比,经过较多的对比研究,将进一步完善理论模型基础,提高该方法的可信度。

致谢 感谢中国石油天然气总公司勘探局欧阳健对本项研究的指导和关心。

参 考 文 献

黄荣尊. 1995. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究. 钻井液与完井液, 12(3): 56~61.

李志明, 张金珠. 1997. 地应力与油气勘探开发. 北京: 石油工业出版社, 146~156.

王燮培, 费琪, 张家骅. 1990. 石油勘探构造分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 120~125.

孙宝珊, 丁原辰. 1996. 声发射法测量古今应力在油田的应用. 地质力学学报, 2(2): 11~17.

References

Huang Rongzun. 1995. The research on coupling of mechanics and chemistry for borehole stability in shale drilling. Drilling & Completion Liquid, 12(3): 56~61 (in Chinese with English abstract).

Li Zhimin, Zhang Jinzhu. 1997. In-situ stress and petroleum exploration & development. Beijing: Petroleum Press, 146~156 (in Chinese with English abstract).

Wang Xiebei, Fei Qi, Zhang Jiahua. 1990. Structural analysis in petroleum exploration. Wuhan: The Press of China University of Geosciences, 120~125 (in Chinese).

Sun Baoshan, Din Yuanchen. 1996. In-situ stress evaluation from acoustic emission activity and its application to oil field. Journal of Geological Mechanics, 2(2): 11~17 (in Chinese with English abstract).

Yoshikawa S Mogik. 1990. Experimental studies on the Kaiser effect of stress history on acoustic emission activity—a possibility for estimation of rock stress. Journal of Acoustic Emission, 8(4): 113~123.

《地球学报》特设鼓励资助的通知

《地球学报》是中国地质科学院主办的地球科学综合学术期刊,是全国中文核心期刊、美国《CA》收录期刊、中国科学引文来源期刊、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊。在2002年《中国科技期刊引证报告——地球科学类》中排名第14名。现已成为全国地学界具有重要影响的期刊之一。

自2001年改版以来,蒙广大作、读者的厚爱,投稿量不断增加,出版质量和出版水平不断提高。《地球学报》对广大作、读者的大力支持表示诚挚的感谢!

为尽快地推出我国地学界一流的研究水平,使具有创新性、先进性的论文更快地面世,《地球学报》特设鼓励资助:

1. 对具有重大发现、重要研究成果、新方法的论文免收版面费。
 2. 对具有重大发现、重要研究成果的论文免收彩色图版(2个)的版面费2000元(限每期2版)。
- 欢迎广大从事地质科学研究、地质调查研究的科研人员和地质院校的广大师生踊跃投稿。

《地球学报》编辑部

2003. 7. 26