2012年 第36卷 第3期

文章编号:1673-5005(2012)03-0102-06

一种异常高压形成机制判别方法与应用

叶 志', 樊洪海', 蔡 军², 纪荣艺', 李朝玮', 刘 刚'

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 2. 中海石油湛江分公司,广东 湛江 524057)

摘要:系统总结异常高压形成机制,分析岩石沉积压实过程的力学关系,在此基础上对异常高压形成机制进行分类。 根据地层加载和卸载时的不同测井参数响应特征以及构造挤压环境下的典型构造地质特征,建立一种异常高压形 成机制判别方法。收集南海莺琼盆地一口高温高压井的测井数据,利用该方法对该井进行分析。结果表明:该方法 能够准确判别区分出欠压实、构造挤压和流体膨胀等异常高压形成机制,进而可以为优选地层压力计算模型提供依 据;该井 3.45 km以下地层存在流体膨胀机制造成的异常高压;利用判别结果选择的压力计算模型能够有效提高地 层压力的计算精度。

Investigation and application of a discrimination method for abnormal high formation pressure forming mechanism

YE Zhi¹, FAN Hong-hai¹, CAI Jun², JI Rong-yi¹, LI Chao-wei¹, LIU Gang¹

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
 2. CNOOC Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: The forming mechanisms of abnormally high formation pore pressure were systematically summarized and the mechanical relation in the sedimentary compaction process was analyzed. The mechanisms of abnormally high formation pore pressure were categorized. A method to discriminate the forming mechanisms of abnormally high pressure was proposed according to the different logging response of the formation's loading and unloading procedure and the geological characteristics of typical structure in tectonic compression environments. The logging data of one well with high temperature and high pressure in Yingqiong Basin at South China Sea were collected. The results show that the mechanisms of under-compaction, tectonic compression and fluid expansion can be determined by this method. A reasonable model to calculate the pore pressure of this well can be selected. There is abnormal high pressure over 3.45 km deep zone, which is caused by fluid expansion mechanism. The precision of pore pressure calculation is significantly improved by using the selected pressure calculation model.

Key words: abnormal high pressure; forming mechanisms; discrimination method; application

地层压力是一项重要的工程地质参数,它与钻 井工程和采油工程都密切相关。异常地层压力,特 别是异常高压是含油气盆地的一种普遍现象。对于 钻井工程来说,异常高压带来的潜在危害包括井眼 报废、井漏、井喷、井壁失稳、多余套管和钻井成本增 加等,因此必须对异常高压进行准确评价和分 析^[1-2]。异常高压的形成机制多种多样,很多学者针 对不同的压力形成机制提出不同的压力计算模 型^[3-6]。但是,目前还没有形成一种成熟的异常高压 形成机制判别方法,在进行地层压力计算时多是根 据经验或者反复试算来选择压力计算模型,显然这 样会影响地层压力的计算精度。因此,有必要分析

收稿日期:2011-10-25

基金项目:国家"973"重点基础研究发展计划项目(2010CB226704)

作者简介:叶志(1985-),男(汉族),湖北黄冈人,博士研究生,主要从事岩石力学与工程、钻井信息工程等研究。

总结异常高压的成因,并研究一种合理的异常高压 形成机制判别方法。

1 异常高压形成机制及分类

1.1 异常高压形成机制

异常高压可能是由多种互相叠加的因素所致, 其中包括地质、物理、地球化学和动力学的因素,但 对于一个特定压力体,其成因可能以某一种因素为 主,其他因素为辅。异常高压形成机制有很多种,目 前被大家普遍接受的有十几种^[7],如欠压实作用、 水热增压、生烃作用、蒙脱石脱水、浓差作用、水势面 不规则、硬石膏/石膏转化、流体浮力作用、深部高压 地层抬升、构造挤压、压力传递等。

1.2 沉积压实过程中的力学关系

异常高压的形成与岩石孔隙变形有直接关系, 几乎每种异常高压形成机制都将沉积物孔隙的变形 与地层压力的变化联系在一起。根据有效应力定 义,沉积物的压实变形仅受垂直有效应力控制,而沉 积物变形主要是指孔隙度的变化,因此沉积压实过 程中的力学关系(应力-应变关系)也就是有效应力 与孔隙度的关系。声波速度能够很好地反映岩石孔 隙度的变化,这种力学关系也可以用有效应力与声 波速度的关系加以描述。

研究地层沉积压实过程中的力学关系可以更好 地解释异常高压的形成机制,Tosaya等^[8]通过室内 试验分析认为地层沉积压实过程中的力学关系可以 分为加载曲线关系和卸载曲线关系两种^[9]。在地 层沉积压实过程中随着上覆岩层压力的增加,沉积 物逐渐被压实,垂直有效应力增加而孔隙度减小,沉 积物处于一种持续加载的力学过程,因此其力学关 系属于加载曲线关系。在沉积物压实过程中或者压 实之后,若因某种原因(如生烃作用等)孔隙压力升 高或上覆压力减小,造成垂直有效应力减小而孔隙 度增大,该过程称为卸载过程,此时有效应力与声波 速度的关系(力学关系)符合卸载曲线关系。

1.3 异常高压形成机制分类

对于异常高压形成机制的分类,很多学者都进 行了研究和讨论,Swarbrick 等^[9]将异常高压形成机 制分为3类,而 Bowers^[10]将异常高压形成机制分为 4类。本文中则根据沉积压实过程中的力学关系将 异常高压形成机制分为符合加载曲线、符合卸载曲 线、孔隙度近似不变3类,如表1所示。

(1)符合加载曲线类。地层平衡压实过程中沉 积物内的水被排出,垂直有效应力持续增加,因此平 衡压实过程是一个逐渐加载的力学过程,其应力-应变关系符合加载曲线关系。地层发生欠压实时, 垂直有效应力不会在原有值的基础上减小,而是与 平衡压实过程相比增加速率减小或维持原值不变, 因此欠压实过程也是一个逐渐加载或停止继续加载 维持原有载荷的力学过程,其应力-应变关系也符 合加载曲线关系。在构造挤压比较剧烈的区域,地 层在压实过程中同时还受到构造应力的挤压作用, 此时压实过程不仅受垂直方向的上覆岩层压力的控 制,同时还要受两个水平方向的构造应力的控制,可 以认为是一种三维压实状态。因此,构造挤压机制 也符合加载曲线关系,但是其加载曲线与仅受上覆 岩层压力控制的加载曲线形状会有所不同,加载速 率也更快。

表1 异常高压形成机制分类

Table 1 Classification of forming mechanisms

of abnormally high formation pressure

类别	形成机制
符合加载曲线类	欠压实、构造挤压
符合卸载曲线类	孔隙流体膨胀:水热增压、生烃作 用、烃类裂解、蒙脱石脱水、硬石膏/ 石膏转化、浓差作用
孔隙度近似不变类	压力传递、流体浮力作用、水头作用

(2)符合卸载曲线类。水热增压、生烃作用、黏 土矿物成岩作用等机制会造成孔隙内流体体积增 大,统称为流体膨胀机制。流体膨胀的结果是使孔 隙体积增大,造成垂直有效应力降低,进而形成异常 高压,因此流体膨胀的过程是使垂直有效应力降低 的卸载过程,其应力-应变关系应该符合卸载曲线。

(3) 孔隙度近似不变类。岩石加载过程中孔隙 度会变小, 而岩石卸载过程中孔隙度会增大, 因此还 存在孔隙度近似不变的第三类异常高压形成机制。 在很好的封闭环境中, 压力传递、深部高压地层抬升 以及流体浮力作用也能产生异常高压, 此类机制中 孔隙度变化甚微或者几乎不变。因而它们既不符合 加载曲线, 也不符合卸载曲线, 可以将其称之为孔隙 度近似不变类机制。

2 异常高压形成机制判别方法

目前,几乎所有的地层压力评价方法都是根据 声波、电阻率、密度、孔隙度等与岩石孔隙变形相关 的岩石物性参数来间接估算地层压力。孔隙度近似 不变类机制一般不会导致太高的异常高压,并且很 难通过岩石物理参数的测量值对其进行准确评价, 所以目前对于此类机制的研究较少,也不是研究的 重点。现今研究较多的是由加载曲线类或者卸载曲 线类机制引起的异常高压,本文中也着重研究这两 类异常高压形成机制的判别方法,也就是要建立一 种能够区分欠压实、构造挤压和流体膨胀3种机制 的判别方法。该判别方法主要包括两个步骤:首先, 根据地层加载和卸载时测井参数对孔隙变形的响应 特征不同,判别加载类机制和卸载类机制,从而可以 将流体膨胀机制区分出来;然后,利用构造挤压剧烈 环境下的典型构造地质特征,即可将欠压实机制和 构造挤压机制区别开来。

2.1 判别方法的理论基础

与孔隙变形相关的岩石物性参数主要有声波速 度、电阻率、密度以及孔隙度等,目前已经发展了多 种分别利用这4种岩石物性参数进行压力计算的方 法。很多学者^[11-12]在实际应用中发现,在某些存在 异常高压的地层,利用密度和孔隙度不能检测出异 常高压的存在,而利用声波速度和电阻率则能够反 映出异常高压。Hermanrud 等^[13]经过研究和统计发

现,这种反常情况通常都出现在岩石发生卸载的地 层,也就是由孔隙流体膨胀机制造成异常高压的地 层。随后, Bowers 等^{〔14〕}经过进一步研究认为这种反 常情况是由于加载和卸载时测井参数对孔隙变形的 响应特征不同造成的。声波速度和电阻率属于传导 特性,而密度和孔隙度属于体积特性。体积特性参 数只与岩石孔隙的体积相关,而声波速度等传导特 性参数受孔隙尺寸、形状以及孔隙间连通状况等多 种因素的综合影响。岩石发生卸载时孔隙体积增 大,有效应力减小,声波和电阻率等传导特性对这种 变化比较敏感,因而会发生明显的反转变化,而密度 和孔隙度等体积特性的变化不明显。如图1所示: 岩石加载时有效应力增大,声波速度和密度的变化 趋势几乎一致;岩石卸载时有效应力减小,此时声波 速度有明显的减小趋势,而密度变化则不是很大。 因此,可以根据地层卸载时传导特性参数与体积特 性参数的不同响应特征来判断异常高压形成机制的 类型。







相比于孔隙度和电阻率,声波速度和密度测井 数据更易获取,并且数据精度更高。因此,可以根据 加载和卸载时声波速度、密度以及有效应力之间的 相互关系,建立一种基于声波速度-密度交会图判 别异常高压形成机制的方法。如图2所示,利用声 波速度-密度交会图可以准确判断某地层处于加载 还是卸载状态,进而可以确定异常高压是由加载曲 线类机制引起的还是由卸载曲线类机制引起的,也 就能区分出流体膨胀机制。

加载类机制包括欠压实和构造挤压,卸载类机 制主要是指流体膨胀,因而根据交会图法可以区别 出流体膨胀机制,但还需要进一步判断区分欠压实 机制和构造挤压机制。从表面上看构造挤压机制与 欠压实机制类似,都是由于沉积压实过快导致地层 不完全排水而形成异常高压,但是二者的成压机制





存在本质上的不同。欠压实机制主要受垂向应力 (上覆岩层压力)控制,相当于一维压实,而构造挤 压则受三个方向的应力(一个垂向应力和两个水平 侧向应力)共同控制,相当于三维压实。通常情况 下,欠压实机制一般发生在构造比较平缓的地区,不 会形成太高的异常高压;而构造挤压机制则发生在 构造挤压剧烈的地区,可以引起超高压。构造挤压 作用剧烈的地层与普通地层相比会有一些鲜明的构 造地质特征,因此可以结合这些构造地质特征来区 分欠压实机制和构造挤压机制。水平地应力值、褶 皱翼尖角、褶皱紧闭度和褶皱挤缩率等4个构造地 质特征参数可以反映构造挤压作用的大小,进而可 以说明地层受构造应力挤压的强度。通过一定的手 段测量出这4个参数值后,即可区分欠压实机制和 构造挤压机制。如果某地层的水平地应力很大、褶 皱翼尖角很小,而褶皱紧闭度以及褶皱挤缩率很大, 说明此地层受到的构造挤压作用很强,此时可以定 性地判定该地层的异常高压是由构造挤压机制引起 的。

2.2 判别方法的实现步骤

(1)测井数据收集与处理。收集目标井的声波 速度、密度和自然伽马等测井数据,对这些测井数据 进行校正处理。主要包括范围检查、环境影响因素 校正、测井曲线分层取值、深度对齐与平滑、剔除异 常点等处理流程,目的是去伪存真,获取真实准确并 且等深度间隔的测井数据。

(2)泥岩测井参数提取。对自然伽马数据进行 分层,求取分层泥质含量,按照计算的分层泥质含量 提取泥岩的声波速度和密度数据。对获取的泥岩声 波速度和密度数据进行插值处理,得到深度对齐且 等间隔的泥岩测井数据。

(3)地层卸载的初步判断。在相同深度坐标下 绘制出各数据的曲线图,根据曲线变化趋势判断声 波和密度是否出现反转现象,初步确定可能出现卸 载的地层段。

(4) 交会图绘制。提取反转点附近最可靠的泥 岩声波速度和密度数据,利用矩形滤波对数据进行 过滤。

(5)加载机制和卸载机制的判别。根据交会图 判断地层处于加载状态还是卸载状态,进而结合地 质条件可以判别异常高压是由加载机制还是卸载机 制(流体膨胀)引起的,在判断地层卸载时需要注意 剔除由于岩性变化引起的测井数据反转现象。

(6)欠压实机制和构造挤压机制的判别。如果 通过交会图判断出异常高压地层处于加载状态,则 需要进一步判别区分欠压实和构造挤压机制。借助 凯塞尔声发射试验或水力压裂试验等地应力解释方 法可以获取地层的水平地应力值,根据野外勘察测 量或者室内对褶皱形态的解释,可以确定褶皱的翼 尖角、紧闭度以及挤缩率等参数。综合分析这些构 造挤压剧烈区域具有的典型构造地质特征,即可以 确定地层是否存在强烈的构造挤压作用,然后可以 判别出地层的高压是否由构造挤压机制引起。

3 现场应用

该判别方法已在南海莺琼盆地、准噶尔盆地以 及塔里木盆地库车坳陷等高压油气区进行了多口井 的现场应用,结果表明该判别方法具有较高的判别 精度,能够较为准确地判别区分欠压实、流体膨胀和 构造挤压3种异常高压形成机制。以南海莺琼盆地 的LG-2井为例,阐述此判别方法的实现步骤和应用 效果。

莺琼盆地是典型的高温高压盆地,盆地内普遍 发育异常高压,地层压力系数高达2.35。异常高压 给本地区的钻井和地质工程带来了极大的挑战,该 盆地的地层压力评价方法一直是国内学者研究的热 点和难点。莺琼盆地异常高压的形成主要有两个原 因:一是地层沉积速率快,最大沉积速率达到700 m/Ma,欠压实作用明显;二是地层温度高,4 km 以 下地层温度一般都在160 ℃以上,流体膨胀机制也 是地层深部产生超高压的主要原因之一^[15-16]。欠 压实和流体膨胀两种机制是该盆地超高压形成的主 要原因,针对两种不同的成压机制分别有不同的压 力计算模型,研究人员发现如果不加以判别区分,选 择了不合适的模型则会导致压力计算结果不准确。

LG-2 井位于莺琼盆地西北部的临高构造带,是 一口典型的高温高压井。收集该井的声波、电阻率、 密度、自然伽马等测井资料,进行数据分析可以粗略 地发现在 3.4 km 左右地层声波和电阻率有明显的 反转减小趋势,而密度几乎不变,如图3所示。进而 对 3.4 km 附近地层的声波速度和密度数据进行详 细分析,按照前面论述的操作步骤对该井的声波速 度和密度数据进行处理,绘制出该井3.4 km 附近地 层的声波速度-密度交会图,如图4所示。从图4中 可以判别卸载点约为 3.45 km, 3.45 km 上部地层处 于加载状态, 3.45 km 下部地层进入卸载状态。结 合地质信息排除岩性因素的影响之后,可以确定在 3.45 km 以下地层发生了卸载,也就说 3.45 km 以 下地层的异常高压是由流体膨胀机制引起的。针对 LG-2 井 3.45 km 上下地层处于不同的压实状态分 别选用了不同的压力计算模型,3.45 km 上部地层 选用适合于加载曲线机制的 Bowers 加载模型-61,即

$$\begin{cases} v = 5\ 000 + A\sigma^{B}, \\ p_{p} = p_{o} - \sigma. \end{cases}$$
(1)

式中,*v* 为声波速度,0.3048 m/s; *o* 为垂直有效应 力,6.895 kPa; *A*、*B* 为模型系数; *p*。为上覆岩层压 力; *p*、为地层压力。







3. 45 km 下部地层选用适合于卸载曲线机制的 Bowers 卸载模型^[6],即

$$\begin{cases} v = 5\,000 + A \left[\sigma_{\max} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^{1/U} \right]^B, \\ p_n = p_n - \sigma. \end{cases}$$
(2)

式中, *σ*_{max} 为卸载开始点的垂直有效应力, 6.895 kPa; *U* 为弹塑性系数, 0~1。

根据上面选取模型,结合该盆地区域地质情况 以及已钻井信息,确定适合于该盆地的 Bowers 加载 模型参数和卸载模型参数为

$$\begin{cases} v = 5\ 000 + 14.\ 46\sigma^{0.73}, \\ p_{a} = p_{a} - \sigma. \end{cases}$$
(3)

0 77

$$\begin{cases} v = 5\ 000 + 14.\ 46 \left[6\ 138.\ 42 \left(\frac{\sigma}{6\ 138.\ 42} \right)^{1/2.31} \right]^{0.73}, \\ p_{p} = p_{o} - \sigma. \end{cases}$$
(4)

利用确定的模型结合 LG-2 井的声波测井数据 即可计算该井的地层压力剖面(图5)。从图5中可 以看出,3.45 km 下部地层压力(用当量密度表示) 突然升高,地层压力梯度当量密度最高达到2.0 g/ cm³ 左右,符合流体膨胀机制的成压特征。通过与 实测压力(黑色圆点)以及常规方法计算结果的对 比可以看出,区分机制后的压力计算结果更加准确。



4 结束语

分析总结了现有的异常高压形成机制,并按照 岩石沉积压实过程中的力学关系将其分为符合加载 曲线、符合卸载曲线以及孔隙度近似不变3类。根 据地层加载和卸载时的不同测井参数响应特征以及 构造挤压环境下的典型构造地质特征,研究建立了 一种异常高压形成机制的判别方法,阐述了该判别 方法的实现步骤。利用此判别方法在南海莺琼盆地 和新疆准噶尔盆地等典型高压区进行了应用,应用 结果表明该判别方法判别精度较高,利用判别结果 可以优选地层压力计算模型,提高地层压力的计算 精度。

参考文献:

- [1] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 石油大 学出版社, 2000.
- [2] 刘景东, 蒋有录, 高平. 东濮凹陷濮卫地区地层压力 演化及其与油气运聚的关系[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010,34(5):25-31.
 LIU Jing-dong, JIANG You-lu, GAO Ping. Evolution of formation pressure and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Puwei area, Dongpu depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(5):25-31.
- [3] EATON B A. The equation for geopressure prediction

from well logs [R]. SPE 5544, 1975.

- BOWERS G L. Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction [J]. SPE Drilling & Completions, 1995 (2):89-95.
- [5] 樊洪海.利用声速检测欠压实泥岩异常高压的简易方法与应用[J].石油钻探技术,2001,29(5);9-11.
 FAN Hong-hai. A simple pore pressure estimation method for disequilibrium compaction shale formation using sonic data [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001,29(5); 9-11.
- [6] 樊洪海.利用层速度预测砂泥岩地层孔隙压力单点算 法模型[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增刊); 2037-2040.

FAN Hong-hai. Single point algorithm for pore pressure prediction of sand-shale formation using seismic interval velocity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(sup):2037-2040.

- [7] 樊洪海. 地层孔隙压力预测检测新方法研究[D]. 北京:石油大学石油工程学院,2001.
 FAN Hong-hai. Investigation of new methods for pore pressure prediction and determination [D]. Beijing: School of Petroleum Engineering in University of Petroleum, China, 2001.
- [8] TOSAYA C A. Acoustical poperties of clay bearing rocks[D]. American: Stanford University, 1982.
- [9] SWARBRICK R E, OSBORNE M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview [R]. AAPG Memoir, 1998, 70:13-34.

- [10] BOWERS G L. Detecting high pressure [J]. The Leading Edge, 2002,21(2):174-177.
- [11] CARSTENS H, DYPVIK H. Abnormal formation pressure and shale porosity [J]. AAPG Bulletin, 1981,65 (2):344-350.
- [12] GRAULS D, CASSIGNOL C. Identification of a zone of fluid pressure-induced fractures from log and seismic data-a case history [J]. First Break, 1993, 11(2):59-68.
- [13] HERMANRUD C, WENSAAS L, TEIGE G M G, et al. Shale porosities from well logs on Haltenbanken (offshore mid-Norway) show no influence of overpressure; abnormal pressure in hydrocarbon environment [R]. AAPG Memoir, 1998,70;65-85.
- [14] BOWERS G L, JOHN Katsube T. The role of shale pore pressure on the sensitivity of wire-line logs to overpressure: pressure regimes in sedimentary basins and their prediction [R]. AAPG Memoir, 1998,76:43-60.
- [15] 马启富,陈斯忠,张启明,等.超压盆地与油气分布
 [M].北京;地质出版社,2000.
- [16] 易平,黄保家,黄义文,等. 莺-琼盆地高温超压对有 机质热演化的影响[J].石油勘探与开发,2004,31 (1):32-35.

YI Ping, HUANG Bao-jia, HUANG Yi-wen, et al. Influence of high temperature and overpressure on the thermal evolution of organic matter in the Yingqiong Basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31 (1):32-35.

(编辑 李志芬)

(上接第97页)

[13] 吕官云,孙峰. 捷联式自动垂直钻井系统井斜方位 动态测量算法研究与应用[J]. 测井技术,2011,35 (1):93-97.

> LÜ Guan-yun, SUN Feng. Dynamical measurement algorithm and application of inclination and azimuth in strap-down automatic vertical drilling system [J]. Well Logging Technology, 2011,35(1);93-97.

[14] DIPERSIO Richard D, COBERN Meriden E. Method for measurement of azimuth of a borehole while drilling: US 4813274[P/OL]. http://www.google.com. hk/patents? id = OKduAAAAEBAJ&printsec = frontcover&dq = 4813274&hl = en&sa = X&ei = L21MT7P2KcetiAfW5_ 1Y&ved=0CDUQ6AEwAA.

 [15] PROAKIS John G, MANOLAKIS Dimitris G. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

(编辑 李志芬)