

doi: 10.11720/wtyht.2023.1007

艾能平, 宋鹏, 李伟, 等. 莺歌海盆地乐东区深层异常高压成因机制及预测研究[J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 190–198. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1007>

Ai N P, Song P, Li W, et al. Genetic mechanisms and prediction of the deep abnormal high pressure in the Ledong area, Yinggehai Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 190–198. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1007>

莺歌海盆地乐东区深层异常高压成因机制及预测研究

艾能平, 宋鹏, 李伟, 吴云鹏, 李虎

(中海石油(中国)有限公司 海南分公司, 海南 海口 570100)

摘 要: 乐东区深层地层压力结构复杂, 实测的地层压力数据表明: 不同深度、不同层位地层孔隙压力差异较大, 尤其是黄流组地层孔隙压力横向跨度大, 黄流组顶部地层孔隙压力有降低回头特征, 到底部地层压力系数又开始快速抬升至 2.3, 存在明显压力突变现象。单纯利用欠压实模式开展压力预测误差大, 极易引发工程事故。为了解决地层压力预测面临的问题, 须明确超压成因机制。利用垂直有效应力—测井响应交会图版可有效辨别超压形成机制, 乐东区深层超压成因机制主要为机械不均衡压实、化学压实作用、断裂垂向传递、生烃增压, 在明确超压成因机制前提下建立合理的压力预测方法, 提高预测精度, 以保证钻井工程的顺利实施。

关键词: 异常高压; 成因机制; 莺歌海盆地; 乐东区

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)01-0190-09

0 引言

莺歌海盆地为位于印支板块—欧亚板块交界处的新生代大型走滑伸展盆地^[1-3]。盆地以快速沉积、地温梯度高、高压面浅, 盆地中央发育多个流体底辟构造为特点^[4-6], 进入黄流组和梅山组地层普遍发育超压^[2,4]。早期莺歌海盆地被单纯地认为以欠压实作用为主导的超压成因机制, 利用欠压实成因机制, 准确地预测了东方 13 区黄流组地层压力, 并推动了该气田的有效开发。但随着勘探走向更深层和其他区带, 单纯利用欠压实模式的钻前预测与实测压力存在较大的误差^[7]。乐东区深层(埋深大于 3 500 m)黄流组及以下地层压力结构复杂, 黄流组局部存在压力反转, 且钻井揭示黄流组底部地层压力系数可达 2.3, 与上层套管鞋附近的地层破裂压力相近, 钻井安全窗口空间小, 井漏与井涌等事故时常发生, 从而使钻井作业提前终止, 不能揭开目的层系, 严重阻碍了超压领域的勘探开发进程。限于资料少及技术手段欠缺, 对异常高压成因机制认识

不清, 单一的预测方法导致预测地层压力与实钻揭示的压力存在较大的误差, 给钻井工程造成极大的安全风险, 为了解决压力预测问题, 保证钻井安全钻进, 推动超压领域勘探进程, 更加重视深层其他区带的超压成因机制^[7-8]。在明确超压成因机制的前提下, 对压力预测展开有针对性的预测, 不断提高压力预测的精度, 并为合理的井身结构设计和提高钻井安全提供技术支持, 为超高压领域勘探提供技术保障。

1 异常高压特征

由于乐东底辟区位于凹陷中心, 远离物源, 深层地层受埋深大、成岩作用强等影响, 储层条件普遍差, 且地层压力高, 故钻井较少, 除了泥浆数据外, 基本上无实测地层压力数据。深层井主要集中在凹陷中心到莺东斜坡的过渡带上, 本次研究的井区资料主要来自非底辟区, 综合利用电缆测压(MDT)、钻杆测试(DST)以及泥浆密度等实测资料对乐东区现今压力结构进行分析(图 1), 不同深度、不同层位地

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-11-28

基金项目: 中海油“十四五”重大科技项目“复杂边缘海盆地深层/超深层油气成藏条件与成藏机制研究—莺琼盆地”(KJGG2022-0404)

第一作者: 艾能平(1982-), 男, 工程师, 2009 年毕业于中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业, 硕士, 现在中海石油(中国)有限公司海南分公司从事综合石油地质研究工作。Email: ainp@cnooc.com.cn

层压力分布差异较大,整体上压力系数随着深度增大而增大。但局部层系压力系统复杂,黄流组地层压力横向跨度大。黄一段地层压力系数 1. 67 ~ 2. 02,地层压力 60. 6 ~ 73. 7 MPa;黄二段压力系数 1. 45 ~ 2. 27,地层压力 54. 7 ~ 93. 1 MPa;梅山组压力系数 2. 21 ~ 2. 28,地层压力 87. 6 ~ 92. 6 MPa;压力纵

向分布复杂:自莺歌海组开始发育超压,进入莺歌海组底部超压增大明显,但到黄流组砂岩段,黄流组压力系数差异很大,顶部压力有降低回头特征,到底部压力系数又开始快速抬升至 2. 3,存在明显压力突变现象(图 2)。突变的压力过渡带指示地层压力受到除欠压实超压机制以外其他机制的影响。

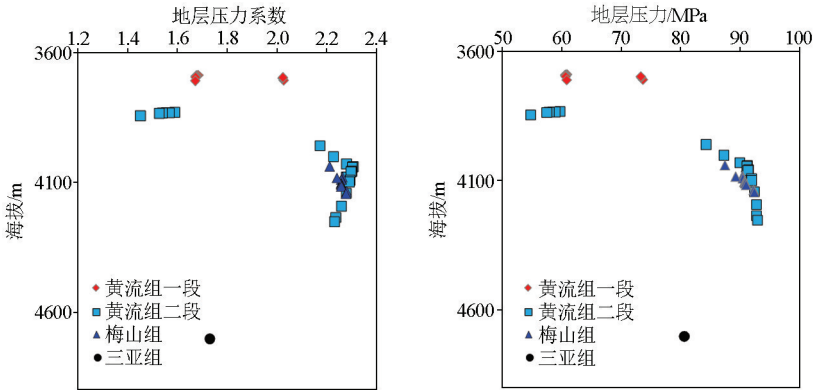


图 1 乐东区地层实测压力特征

Fig. 1 Characteristics of measured formation pressure in Ledong area

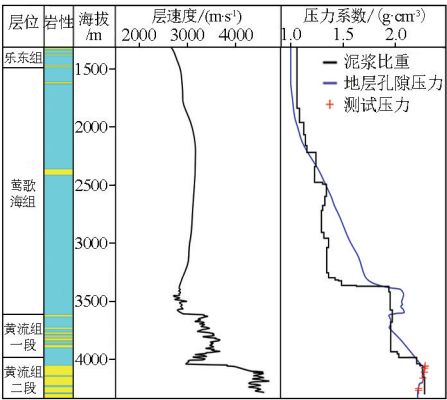


图 2 乐东区 A 井完井压力

Fig. 2 Completion pressure chart of Well A in Ledong area

2 异常高压成因

不同成因的超压在测井响应上存在明显的不同,可依据测井资料大体识别不同的超压机制:①若超压段随埋深增大,声波时差增大,电阻率减小,密度显著减小,则超压属不平衡压实成因;②若超压段随埋深增大,声波时差增大,电阻率增大,密度不变或略有减小,则超压可能为膨胀成因;③若超压段随埋深增大,声波时差增大,密度增大,则超压可能为蒙脱石—伊利石转化作用成因;④若超压段声波时差正常减小,电阻率和密度也正常增大,则超压可能为构造挤压成因^[9]。以上只是根据测井曲线组合特征对超压成因的初步判识,但是近年来新的超压成因的提出,例如化学压实和卸载作用,使得利用综

合泥岩压实曲线区分超压成因机制仍显不足。而根据泥岩传导属性与体积属性对加载和卸载过程的不同响应特征可以有效判断超压的形成机制。基于此而建立的垂直有效应力—测井响应交会图版被广泛应用于超压成因机制的判识^[9-12]。由垂直有效应力—测井响应构建的加载—卸载曲线能够有效区分砂岩中超压成因。如果超压点位于加载曲线上,指示砂岩超压主要来自于不平衡压实(包括机械压实和化学压实)。如果超压点偏离加载曲线而落在卸载曲线上,可以认为是卸载超压机制,卸载超压机制包括流体膨胀(生烃作用、水热膨胀等)或断裂超压传导^[13]。此外,发生化学压实作用往往会导致密度增大,与生烃作用或压力传导有关的超压往往表现为密度基本不变或轻微减小^[13-14]。垂直有效应力—测井声波密度和声波—密度响应交会图版可有效识别超压成因机制。本文利用已钻井实测资料编制测井响应交会图版,拾取已钻井实测测压点上下纯泥岩声波、密度测井数据,并编制声波、密度交会响应图(图 3c~d)。根据有效应力基本原理,地层受承受的垂直有效应力等于相同深度静岩压力与流体压力的差值:

$$\sigma_v = S_v - P_h \quad , \quad (1)$$

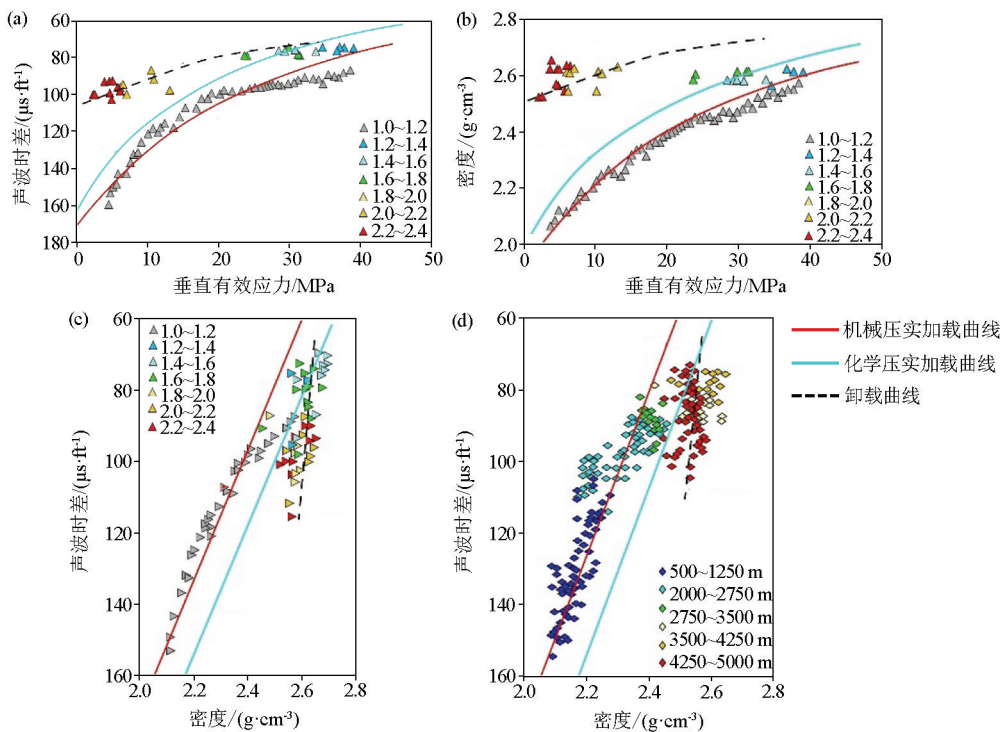
式中, σ_v 为垂直有效应力, MPa; S_v 为静岩压力, MPa; P_h 为同深度下的流体压力, MPa。

$$S_v = \int_0^h \rho_z g dz \quad , \quad (2)$$

式中, ρ_z 为 Z 点深度的地层密度, g/cm³; g 取值 9.8

N/kg ; Z 为地层埋藏深度, m ; 静岩压力 S_p 可通过实测密度曲线累计积分求取, 泥岩流体压力 P_h 可近似采用附近实测砂岩孔隙压力值。通过计算得到相应深度处的垂直有效应力, 从而编制声波、密度与垂直有效应力交会图(图 3a 与图 3b)。为了进一步确定泥岩超压的来源, 通过将声波时差—深度关系转化为声波时差—垂直有效应力关系, 以获得对应机械压实阶段、化学压实阶段的加载曲线, 进而可以用于

超压成因分析。可辨识出大于 3 500 m 地层, 压力系数大于 2.0 位于卸载曲线上, 卸载超压机制包括流体膨胀(生烃作用等)或断裂传导超压, 2 000 ~ 3 500 m 地层, 压力系数在 1.6 ~ 1.8 位于化学压实曲线上, 浅层主要在机械压实曲线上。表明乐东区深层主要存在机械压实、化学压实、垂向断裂传递、生烃增压等机制。不同区带、不同层段的超压差异实际上是几种超压成因机制相互叠合作用所造成。



a—垂直有效应力与测井声波交会; b—垂直有效应力与测井密度交会; c—测井密度与声波交会(随压力系数变化); d—测井密度与声波交会(随深度变化)

a—intersection of vertical effective stress and logging acoustic wave; b—intersection of vertical effective stress and logging density; c—intersection of logging density and acoustic wave(change with pressure coefficient); d—intersection of logging density and acoustic wave(change with depth)

图 3 乐东区实测压力点垂直有效应力、测井声波、密度响应交会

Fig. 3 Intersection of vertical effective stress, logging sound wave and density response at measured pressure points in Ledong area

2.1 机械压实(欠压实)

快速沉积的含油气盆地中年轻地层超压形成的最基本地质作用是泥岩机械压实不均衡^[15-16], 不均衡压实形成的封闭条件也构成了其他许多机制增压的前提^[17-18]。上覆负荷沉积速率、泥质含量与地层渗透能力间的平衡关系决定了地层压力的大小^[16,19], 当泥岩地层由于上覆负荷快速增加而来不及排出孔隙水时, 就会导致超压的形成。莺歌海盆地新近系沉积速率快, 黄流组、莺歌海组二段、莺歌海组一段、乐东组沉积速率分别可达 200、500、1 500、500 m/Ma, 根据岩屑录井和测井资料确定黄流组泥质含量介于 60%~80% 之间, 上覆巨厚莺歌海组泥质含量超过 85%, 莺歌海盆地中央凹陷带整

体为富泥地层, 快速富泥沉积—埋藏地质条件是形成泥岩机械压实不均衡的根本原因。李超等利用盆模技术对机械压实作用增压机制进行了模拟, 纵向上随着机械压实不均衡程度增大, 其形成的超压增大, 模拟压力略小于或等于实测压力, 反应还有其他超压来源贡献^[20]。

2.2 化学压实

前人研究往往认为泥岩主要发生机械压实作用, 但随着埋深增大, 地层温度升高, 化学成岩作用对于泥岩孔隙度、孔隙结构的变化以及泥岩地层中异常压力形成等的控制作用越来越明显, 泥岩中的化学成岩作用通常被称为化学压实作用^[21-23]。泥质沉积物中的黏土矿物在埋藏过程中, 随着上覆负

荷以及温度的增加,泥质沉积物发生物理、化学成岩作用,导致孔隙流体排出,促进颗粒骨架重新排列,矿物发生溶解和沉淀,泥质沉积物的固结程度不断增加,泥岩中黏土矿物的转换是发生化学作用的重要机制。泥岩的压实作用可划分为 3 个阶段:机械压实阶段、过渡阶段以及化学压实阶段。机械压实作用主要发生在 2~3 km 以浅的埋深,孔隙度演化主要受有效应力控制;过渡阶段由于泥岩中黏土矿物开始转化,开始发生化学压实作用,此时机械压实作用仍在继续;化学压实作用随埋深增加逐渐增强,在深埋成岩阶段起主导作用。泥岩中发生的化学压实作用过程都可表述为化学动力学过程,时间、温度和矿物成分往往被用来标识化学压实作用的程度。化学压实作用取决于矿物组成和埋藏历史^[23]。泥岩化学压实作用对超压的影响应该是多种成岩效应综合作用的结果,主要表现在增强黏土颗粒定向性、降低泥岩的渗透率以及骨架弱化引起应力转移等 3 个方面,泥岩压实过程中黏土颗粒定向性和微晶石英胶结程度对超压作用影响大,随泥岩化学压实作用,钾长石或云母的溶解促使泥岩骨架弱化,能够使有效应力从岩石骨架转移到孔隙流体,另外自生石英胶结和黏土矿物定向排列极大地降低了泥岩的渗透性,也能促使其他成因产生超压,这种超压增加的程度很难量化,但是可以模拟,模拟结果表明胶结程度越高、黏土颗粒定向性越强,对地层超压的贡献越大^[20,24]。乐东区泥岩黏土矿物主要由蒙脱石、伊蒙混层、伊利石、高岭石及绿泥石组成,泥岩黏土矿物分析结果证实,随埋深增大,泥岩中发生了明显的黏土矿物转化及化学压实作用。其中,蒙脱石仅在浅层出现,中浅层(350~2 000 m)黏土矿物主要为伊/蒙混层、伊利石、高岭石;中深层(2 000~3 500 m)以伊利石和高岭石为主;深层(>3 500 m)则以伊利石为主要矿物,蒙脱石完全消失。伊/蒙混层分析的混层比显示,中浅层混层比变化大。乐东区深层伊蒙混层比从 60%减小为 15%左右,伊蒙混层比从 70%减小到 10%以下,混层中蒙脱石相对含量从 20%减小到 0%左右,伊利石含量从 20%增大到 80%左右。随泥岩化学压实作用,钾长石或云母的溶解促使泥岩骨架弱化,能够使有效应力从岩石骨架转移到孔隙流体,另外自生石英胶结和黏土矿物定向排列极大地降低了泥岩的渗透性,这些因素均为超压起到贡献作用。

2.3 断裂垂向传递

沿垂向输导体系由深部强超压系统垂向传导

导致的异常压力被称为他源超压^[24]。断层开启往往形成良好的流体渗流通道,使得不同压力系统发生水力连通,当开启断层所连通的地层内超压幅度不同时,这些地层间的流体压力会发生迅速调整,从强超压系统向弱超压系统发生压力传导,使得弱超压系统内压力显著增高,直到剩余压力达到平衡为止。莺歌海盆地底辟区浅层高压就来自于深部高压通过断裂垂向传递导致的^[25-26],莺歌海盆地乐东区黄流组地层压力表现出突变型压力过渡结构,并且在垂直有效应力—测井响应交会图版中表现出明显的卸载特征。黄流组地层埋深浅,生烃潜力有限,基本不具备生烃增压的可能性。那么渗透性地层中压力突变及卸载作用最大可能是断层活动引起的超压传递所致。前人对乐东 10 区天然气同位素特征及天然气运移模式的研究,发现研究区晚期断层活动导致超压传递的地质证据^[20]。断层传递增压与机械压实不均衡和生气增压在压力表现上存在差异,断层传递增压导致不同深度地层压力沿着近似平行于静水压力梯度增大。而机械压实不均衡和生气增压有关的地层压力梯度一般大于静岩压力梯度^[25]。

2.4 生烃增压

地层中烃类物质的生成一直被认为是异常压力形成的最重要原因之一。烃类生成对于孔隙压力演化的影响表现在:①固体干酪根转化为液态烃或气态烃,增加了孔隙流体的体积;②由于烃类物质与孔隙水互不相溶,因此减小了地层的渗透率。生烃增压的大小取决于有机质类型、丰度和成熟度等^[27]。干酪根生气以及原油裂解成气作用被认为是可以使含油气盆地形成大规模超压的主要成因机制。一般干酪根热降解生成的液态烃量相对较小,在岩石有机质含量大于 5% 条件下,生烃增压才比较明显。由于有机质裂解的深度较大,故其增压机制发生得比较晚^[27]。乐东区黄流组泥岩有机质 $TOC < 0.6\%$,镜质体反射率 $R_o < 1\%$,生烃能力较差;梅山组烃源岩有机质 TOC 平均为 0.65% ,镜质体反射率 R_o 介于 $0.8\% \sim 1.3\%$;三亚组烃源岩有机质 TOC 平均为 0.85% ,镜质体反射率 R_o 介于 $0.9\% \sim 1.3\%$,梅山组、三亚组具有较好的生烃潜力。采用实测的烃源岩参数,利用 petromod 盆模软件模拟,结果表明埋深大于 5 000 m(图 4),生烃增压机制才开始产生影响,越向深部,生烃增压的贡献越大。

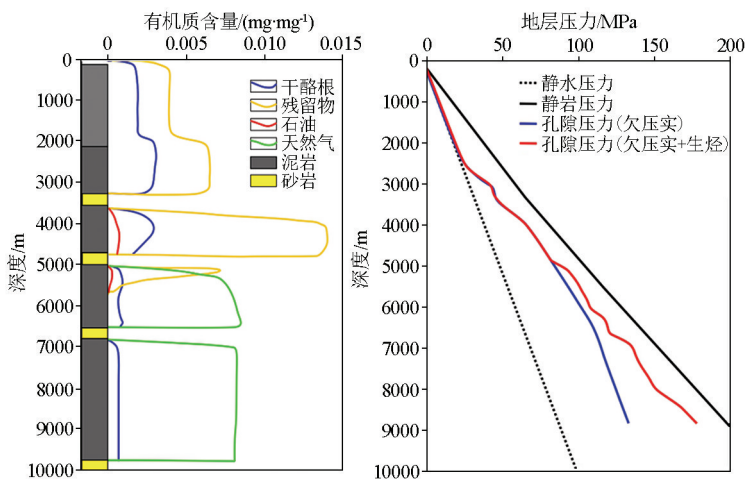


图 4 乐东区 LD30-1-1A 井有机质热演化动力学及生烃增压数值模拟

Fig. 4 Thermal evolution kinetics of organic matter and numerical simulation of hydrocarbon generation and pressurization in well LD30-1-1A, Ledong area

3 预测方法与实践

明确超压成因是压力估算及预测的基础,不同超压形成机制所导致的岩石物理变化能够表现在测井响应上,据此可以估算超压的大小,尽管多种测井响应都能够指示超压的发育,但是目前最常用的压力估算都是基于速度资料展开的^[28]。乐东区目前的勘探层系埋藏深度小于 5 000 m,前述生烃增压模拟结果表明 5 000 m 以浅地层生烃增压作用不明显。地层主要的超压机制为机械压实、化学压实、断裂垂向传递等,针对乐东区不同成因机制导致的异常地层压力尝试利用不同的预测方法对地层压力进行综合预测。

3.1 非垂向断裂传压的预测

本文中把除垂向断裂传压成因以外的统称为非垂向断裂传压机制,应用中发现平衡深度法不仅可以准确预测机械压实不均衡形成的超压,而且对于烃源岩层段同时发生机械压实不均衡和生烃作用也是适用的。但传统的等效深度法压力预测主要是考虑机械压实作用,而机械压实阶段获得的泥岩正常压实曲线不能外推到中深层已经步入化学压实作用段的泥岩。忽略化学压实对泥岩正常压实曲线的影响,必然导致中深层地层压力预测存在较大误差^[23]。不同压实阶段的泥岩具有不同的孔隙度演化趋势,因而泥岩的正常压实曲线不应该被认为是单一的趋势,而是涵盖不同压实阶段泥岩的分段压实曲线或综合压实曲线。研究过程中提出了建立耦合机械压实阶段、过渡阶段和化学压实阶段正常压实曲线的计算方法,在此基础上开展压力预测解决

了目前单一的正常压实曲线无法适用于深部超压成因分析及压力预测的难题。对于黏土矿物快速转化深度以上,以机械压实阶段正常压实曲线为依据开展压力预测,对于黏土矿物快速转化对应的过渡阶段则以过渡阶段正常压实曲线为参考,而黏土矿物转化基本完成的化学压实阶段以偏离化学压实阶段正常压实曲线的程度来预测地层压力。在此基础上,将不同阶段预测压力叠合就可以获得准确的地层压力分布。

具体地层压力预测计算方法如下:首先建立不同压实阶段泥岩正常压实趋势线方程,处于黏土矿物转化深度以上的泥岩其压实过程为机械压实阶段,机械压实阶段正常压实曲线可以表示为声波时差 DT 与深度 z 的指数函数:

$$DT = DT_0 \times e^{-C^m \cdot z}, \quad (3)$$

式中, DT 为泥岩声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; DT_0 为泥岩地表声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; C^m 为机械压实系数; z 为对应的深度, m ;通过对黏土矿物转化深度以上的已钻井泥岩声波时差与深度数据进行以 e 为底的指数函数拟合,即可获得机械压实阶段 $DT_0 = 182.847\ 4\ \mu\text{s}/\text{ft}$, $C^m = 0.000\ 335\ 7$,进而获得机械压实阶段正常压实曲线:

$$DT = 182.847\ 4 \times e^{0.000\ 335\ 7z}. \quad (4)$$

泥岩黏土矿物快速转化深度 z_c 以下为泥岩的化学压实阶段。化学压实阶段泥岩正常压实曲线用修正的声波时差—深度关系表述:

$$DT = DT^c \times e^{-C^c \cdot (z - z_c)}, \quad (5)$$

式中, DT^c 为化学压实阶段起点 z_c 处的声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$; C^c 为化学压实阶段压实系数。

由于化学压实阶段泥岩往往发育超压致使声波

时差—深度关系偏离正常压实曲线,因而无法通过直接对声波时差—深度进行拟合获得 DT^e 。根据不同矿物组分的机械压实实验,不同矿物组分在未压实状态下原始孔隙度近似相等,因而化学压实与机械压实泥岩应该具有相同的地表声波时差,即: $DT_0^e = DT_0$,因此可以将式(5)改写为:

$$DT = DT_0^e \times e^{-C^e \cdot z} \tag{6}$$

化学压实阶段正常趋势线中压实系数 C^e 无法直接获取。研究过程中提出实测压力数据约束下的压实参数反演算法:

首先赋予 C^e 一个合理的初值(例如 C^e 初值为 C^m),基于平衡深度法根据正常压实曲线估算不同深度地层压力。利用实测压力作为约束,如果估算压力小于实测压力,则表明压实系数不合理。通过反复调整化学压实阶段正常趋势线中压实参数 C^e ,当估算压力与实测压力误差最小时,即可确定化学压实阶段正常压实趋势线所对应的压实系数。利用实测压力约束反演的方法确定了乐东区泥岩化学压实阶段压实系数 C^e 为 0.000 558 5,因此泥岩化学压实阶段的正常压实曲线为:

$$DT = 182.847\ 4 \cdot e^{-0.000\ 055\ 85 \cdot z} \tag{7}$$

第二步:利用等效深度法计算压力,地层压力的方程可表示为:

$$P_h = S_v - (S_{v,e} - P_{w,e}) \tag{8}$$

式中, P_h 为孔隙压力,MPa; S_v 为静岩压力,MPa; $S_{v,e}$ 为 v 点等效深度点 e 处的静岩压力,MPa; $P_{w,e}$ 为 v 点等效深度点 e 处的静水压力,MPa。等效深度点可以从建立的化学压实速度趋势线上拾取各速度所对应的等效点。前文已述静岩压力 S_v 和对应等效深度点处的静岩压力 $S_{v,e}$ 可通过实测密度曲线累计积分求取,从而计算出孔隙压力值。

根据上述分析分别利用已经建立的机械压实和化学压实正常压实曲线对乐东区钻井进行了地层压力预测。以 LD30-1-1A 井为例,3 000 m 以浅泥岩的矿物组分基本没有发生明显的变化,表明泥岩处于机械压实阶段。3 000~3 500 m 深度区间内泥岩中伊蒙混层比快速减小,表明发生了黏土矿物快速转化作用,对应于泥岩压实的过渡阶段。而深度超过 3 500 m 以后,泥岩中矿物学组分基本不再发生明显的变化,表明此时泥岩已经进入化学压实阶段。依据不同阶段对应的深度建立耦合不同压实阶段的综合泥岩正常压实曲线,利用平衡深度法可以实现地层压力综合预测。2 500 m 以上泥岩压实曲线与机械压实阶段正常压实曲线具有较好的吻合性,预测压力与泥浆压力均表明此时地层压力为常压(图 5)。压实曲线从 2 500 m 开始逐渐偏离机械压实正常压实曲线,泥浆压力也表明 2 500~3 000 m 发育为低幅度超压。预测压力与泥浆压力基本吻合,意味着 LD30-1-1A 井从机械压实阶段就开始发育超压(图 5),该阶段超压主要来源于泥岩机械压实不均衡作用。利用机械压实正常压实曲线预测的地层压力在 3 500 m 以深明显小于泥浆压力。泥浆压力显示 3 000~3 500 m 深度区间内地层压力快速增大,基于过渡阶段正常压实曲线预测的压力与泥浆压力相吻合。底部利用化学压实作用预测的压力与泥浆压力也是吻合的,证实该预测方法的合理性。此方法可以实际应用于整个莺歌海盆地,只是由于莺歌海盆地特殊的地温场特征,导致不同地区泥岩中黏土矿物转化深度差异较大。因而难以建立一个普遍适用于整个盆地的化学压实曲线方程。但可以分区带建立不同区带化学压实阶段正常压实曲线方程,如果能够结合泥岩矿物分析或者声波时差—密度交

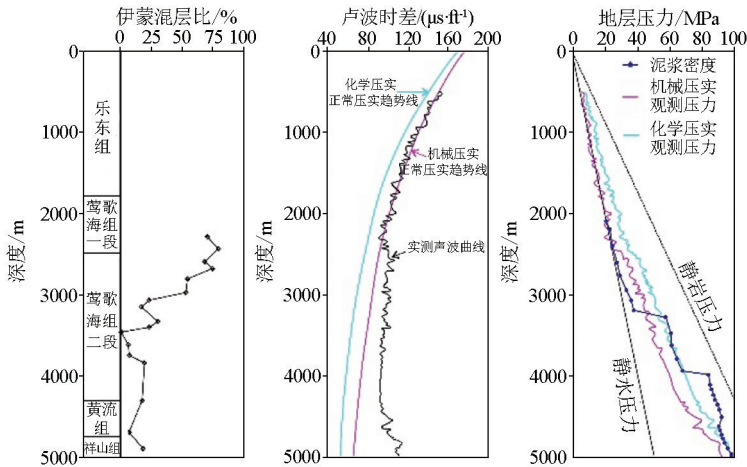


图 5 LD30-1-1A 井地层压力预测

Fig. 5 Formation pressure prediction map of well LD30-1-1A

会图版分析确定不同压实阶段深度的话,便不难计算获得泥岩压实曲线方程,从而获得理想的预测压力结果。

3.2 断层垂向传导超压的预测

在不考虑断层传递作用时,利用等效深度法预测的地层压力会小于实测地层压力。对于断层传递导致的超压,可以利用 Bowers 法进行预测。由于乐东区断裂主要发育于梅山组地层以下^[3],由深部高压通过断裂传导至黄流组底部渗透性砂岩而导致异常高压,由于乐东区泥岩发生了化学压实作用,因而卸载作用的起点也应该已经化学压实加载曲线而确定,基于 Bowers 的加载—卸载曲线方法对乐东区进行了地层压力预测。

在实验和理论分析基础上,泥岩的声波速度与垂直有效应力关系构建的加载曲线方程可以表示为^[29]

$$V = V_0 + A\sigma_v^B, \quad (9)$$

式中, V 为泥岩声波速度, m/s; V_0 为沉积物表面的声波速度,一般取值为 1 500 m/s; σ_v 为垂直有效应力, MPa; A 和 B 为相关系数,可由图 3 数据垂直有效应力—声波速度数据回归确定 A 、 B 值。

基于上式,由加载机制引起的异常压力,可通过以下公式计算地层压力:

$$P_{\text{加载}} = S_v - \sigma_v = S_v - \left(\frac{V - V_0}{A} \right)^{\frac{1}{B}}, \quad (10)$$

式中, $P_{\text{加载}}$ 为加载过程中地层压力, MPa; S_v 为静岩压力, MPa, 根据测井密度积分求得。

有效应力与声波速度关系在地层抬升或卸载过程中并不遵循加载曲线,卸载曲线可以用下述方程来描述^[29]

$$V = V_0 + A \left[\sigma_{\text{max}} \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_{\text{max}}} \right)^{\frac{1}{U}} \right]^B, \quad (11)$$

式中, σ_{max} 为泥岩经历的最大有效应力值, MPa; U 为泥岩弹塑性系数; σ_{max} 通常取速度回降区(经历卸载的地层段)开始点的速度 V_{max} 在加载曲线上对应的垂直有效应力值(加载过程达到的最大有效应力)。泥岩弹塑性系数 U 取值不同其表示的含义不同,当 U 为 1 时表示完全弹性变形,即卸载曲线与原始加载曲线重合。 U 为无穷大时,表示完全不可逆变形。对于受卸载超压影响的地层压力,可通过以下公式进行预测:

$$P_{\text{卸载}} = S_v - \sigma_v = S_v - \left(\frac{V - V_0}{A} \right)^{\frac{U}{B}} (\sigma_{\text{max}})^{1-U}, \quad (12)$$

式中, $P_{\text{卸载}}$ 为卸载过程孔隙压力, MPa; S_v 为静岩压

力, MPa; σ_{max} 为泥岩经历的最大有效应力值, MPa; 可由图 3 数据垂直有效应力—声波速度数据回归确定 $A = 39.8855$; $B = 1.5494$ 。 σ_{max} 为加载曲线与卸载曲线的交汇点,从图 3 可以确定 $\sigma_{\text{max}} = 33$ MPa; U 取地区经验值为 4.37。进而卸载过程中地层压力计算方程为:

$$P_{\text{卸载}} = S_v - \left(\frac{V - 1500}{39.8855} \right)^{\frac{4.37}{1.5494}} (33)^{1-4.37}. \quad (13)$$

以 LD-B 井为例,浅部以正常压力为主,因而计算过程中采用加载条件下的压力预测方程,预测结果也显示为正常压力。而 4 000 m 左右实测压力点具有明显的卸载作用的特征,利用加载曲线预测的地层压力远远小于实测压力,因而采用卸载条件下的压力预测方法,预测结果与实测压力基本吻合(图 6)。值得注意的,尽管泥岩预测压力和砂岩预测压力都是连续变化的,但是对于泥岩而言,其反映整个地层内压力分布趋势。而砂岩地层预测压力只反映地层中上下由于断层作用导致水力学连通的砂体内压力值,而并非代表整个地层内压力值的分布趋势。任意钻遇层段内压力值应该在泥岩预测压力与砂岩预测压力之间,针对具体砂岩内压力值大小,应该在细致地质解剖的前提下确认砂体发育和分布情况,如果砂体不具备与深部连通的条件,则其压力与泥岩压力基本接近,而如果砂体因为多种因素导致与深部压力系统连通的话,其压力值应该以砂岩预测压力为参考。

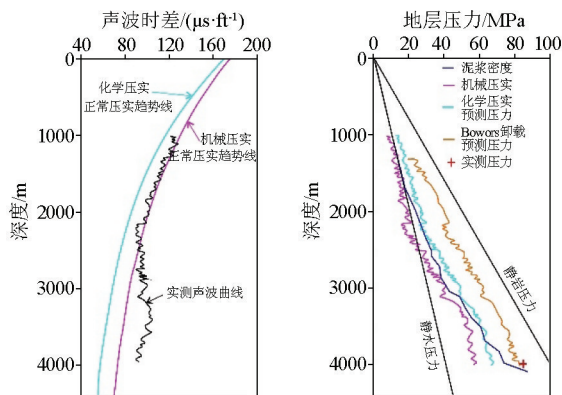


图 6 LD-B 井地层压力预测

Fig. 6 Formation pressure prediction map of well LD-B

4 结论

1) 乐东区深层超压成因机制主要为机械压实、化学压实作用、断裂垂向传递、生烃增压。机械压实和化学压实增压地层中声波速度与垂向有效应力的变化应遵循正常压实作用的指数变化关系,而生烃

增压、超压传递增压地层明显偏离正常压实趋势线;不均衡压实、化学压实增压地层中声波速度与密度的变化遵循正常压实趋势线,而超压传递增压地层将偏离正常压实趋势线。3 500 m 以上地层超压主要为机械压实(欠压实),3 500~5 000 m 地层化学压实和断裂垂向传递增压显现,大于 5 000 m 生烃增压作用贡献明显。

2)合理建立耦合机械压实阶段、过渡阶段和化学压实阶段正常压实曲线,等效深度法可以很好预测非垂向断裂传压超压成因机制的地层压力。此方法可以应用于整个莺歌海盆地,只是由于莺歌海盆地特殊的地温场特征,导致不同地区甚至不同井中泥岩中黏土矿物转化深度差异较大。因而难以建立一个普遍适用于整个盆地的压实曲线方程。但可以分区带建立不同区带化学压实阶段的正常压实曲线方程,如果能够结合泥岩矿物分析或者声波时差—密度交会图版分析确定不同压实阶段深度的话,便不难计算获得泥岩压实曲线方程,从而获得理想的预测压力结果。而 Bowers 法可以预测断层垂向传递成因机制下的地层压力。该方法均可适用于卸载成因超压类型的沉积盆地中。

参考文献 (References):

[1] 郭令智,钟志红,王良书,等. 莺歌海盆地周边区域构造演化[J]. 高校地质学报,2001,7(1):1-12.
Guo L Z,Zhong Z H,Wang L S,et al. Regional tectonic evolution around Yinggehai basin of south China sea[J]. Geological Journal of China Universities,2001,7(1):1-12

[2] 张启明. 莺—琼盆地的演化与构造—热体制[J]. 天然气工业,1999,19(1):12-17.
Zhang Q M. Evolution of Ying-qiong basin and its tectonic thermal system[J]. Natural Gas Industry,1999,19(1):12-17.

[3] 范彩伟. 莺歌海大型走滑盆地构造变形特征及其地质意义[J]. 石油勘探与开发,2018,45(2):190-199.
Fan C W. Tectonic deformation features and petroleum geological significance in Yinggehai Large Strike-Slip Basin,south China sea [J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(2):190-199.

[4] 解习农,刘晓峰. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系[J]. 矿物岩石地球化学通报,2000,19(2):103-108.
Xie X N,Liu X F. Related to black shale seriesfluid dynamic system and relationship with accumulation of hydrocarbon in overpressured basin [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry,2000,19(2):103-108

[5] 万志峰,夏斌,林舸,等. 超压盆地油气地质条件与成藏模式——以莺歌海盆地为例[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(6):91-97.
Wan Z F,Xia B,Ling G,et al. Hydrocarbon accumulation model for overpressure basin:An example from the Yinggehai basin[J].

Marine Geology & Quaternary Geology,2010,30(6):91-97.

[6] 张启明,刘福宁,杨计海. 莺歌海盆地超压体系与油气聚集[J]. 中国海上油气:地质,1996,10(2):65-75.
Zhang Q M,Liu F N,Yang J H. Overpressure system and hydrocarbon accumulation in the Yinggehai basin[J]. China Offshore Oil and Gas;Geology,1996,10(2):65-75.

[7] 刘爱群,范彩伟,吴云鹏,等. 南海高温高压领域基于传递模式的它源压力预测方法研究[J]. 中国海上油气,2021,33(1):50-55.
Liu A Q,Fan C W,Wu Y P,et al. Study on prediction method of allochthonous pressure based on transfer mode in high temperature and high pressure field of south China sea[J]. China Offshore Oil and Gas,2021,33(1):50-55.

[8] 胡益涛,刘挺,陈现军,等. 随钻地层压力综合评价技术在莺歌海盆地超压井中的应用[J]. 长江大学学报:自然科学版,2019,16(10):29-33.
Hu Y T,Liu T,Chen X J,et al. Application of comprehensive evaluation technology of formation pressure while drilling in ultra-high pressure wells in Yinggehai basin[J]. Journal of Yangtze University:Natural Science Edition,2019,16(10):29-33.

[9] 赵靖舟,李军,徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. 石油学报,2017,38(9):973-998.
Zhao J Z,Li J,Xu Z Y. Advances in the origin of overpressures in sedimentary basins[J]. Acta Petrolei Sinica,2017,38(9):973-998.

[10] Bowers G L. Pore pressure estimation from velocity data:Accounting for overpressure mechanisms besides under compaction[C]//IADC/SPE27488, IADC/SPE Drilling Conference, 1994: 515-530

[11] Ramdhanam, Goulty N R. Overpressure-generating mechanisms in the peciko field,lower kutai basin,indonesia[J]. Petroleum Geoscience,2010,16(4):367-376.

[12] Goulty N R,Sargent C,Andras P,et al. Compaction of diagenetically altered mudstones Part 1: Mechanical and chemical contributions[J]. Marine and Petroleum Geology,2016,77:703-713.

[13] Tingay M R P,Morley C K,Laird A,et al. Evidence for overpressure generation by kerogen to gas maturation in the Northern malay basin[J]. AAPG Bulletin,2013,97(4):639-672.

[14] Van Ruth P,Hillis R,Tingate P. The origin of overpressure in the carnavon basin,western australia: Implications for pore pressure prediction[J]. Petroleum Geoscience,2004,10(3):247-257.

[15] Fertl W H. Abnormal formation pressure: Implication to exploration,drilling,and production of oil and gas resources[M]. Amsterdam;Elsevier,1976:382.

[16] Magara K. Compaction and fluid migration,practical petroleum geology[M]. Amsterdam;Elsevier,1978:319.

[17] Luo X R,Vasseur G. Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental conditions[J]. AAPG Bulletin,1992,76(10):1550-1559.

[18] Osborne M J,Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation [J]. AAPG Bulletin,1997,81(6):1023-1041.

[19] Audet D M. Mathematical modeling of gravitational compaction and

clay dehydration in thick sediment layers[J]. Geophysical Journal International, 1995, 122: 283–98.

[20] 李超, 罗晓容, 范彩伟, 等. 莺歌海盆地乐东斜坡区乐东 A 构造储层超压形成机制及其对天然气成藏的启示[J]. 地质科学, 2021, 56(4): 1034–1051.

Li C, Luo X R, Fan C W, et al. Generation mechanism of overpressure and its implication for natural gas accumulation in Miocene reservoir in Ledong A structure, Ledong slope, Yinggehai Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 56(4): 1034–1051.

[21] Lahann R W, Swarbrick R E. Overpressure generation by load transfer following shale framework weakening due to smectite diagenesis[J]. Geofluids, 2011, 11(4): 362–375.

[22] Goult N R, Ramdhan A M, Jones S J. Chemical compaction of mudrocks in the presence of overpressure[J]. Petroleum Geoscience, 2012, 18(4): 471–479.

[23] 李超, 罗晓容, 张立宽. 泥岩化学压实作用的超压响应与孔隙压力预测[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(5): 851–968.

Li C, Luo X R, Zhang L K. Overpressure responses for chemical compaction of mudstones and the pore pressure prediction [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(5): 851–968.

[24] 罗晓容. 数值盆地模拟方法在地质研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 6–10.

Luo X R. The application of numerical basin modeling in geological studies [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 6–10.

[25] 罗晓容. 断裂成因他源高压及其地质特征[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 641–648.

Luo X R. Allogenic overpressuring associated with faulting and geological consequences[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 641–648.

[26] 刘晓峰, 解习农. 储层超压流体系统的成因机制述评[J]. 地质科技情报, 2003, 22(3): 55–60.

Liu X F, Xie X N. Review on formation mechanism of the reservoir overpressure fluid system [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(3): 55–60.

[27] Luo X R, Vasseur G. Geopressuring mechanism of organic matter cracking: Numerical modeling [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(6): 856–874.

[28] 谢玉洪. 莺歌海高温超压盆地压力预测模式及成藏新认识 [J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 21–25.

Xie Y H. Models of pressure prediction and new understandings of hydrocarbon accumulation in the Yinggehai Basin with high temperature and super-high pressure [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 21–25.

[29] Bowers G L. Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction [J]. SPE Drilling and Completion, 1995, 10(2): 89–95.

Genetic mechanisms and prediction of the
deep abnormal high pressure in the Ledong area, Yinggehai Basin

AI Neng-Ping, SONG Peng, LI Wei, WU Yun-Peng, LI Hu
(Hainan Branch of CNOOC, Haikou 570100, China)

Abstract: The deep strata in the Ledong area of the Yinggehai Basin have a complex pressure structure. As indicated by the surveyed pressure data, strata at different depths and horizons have greatly different pore pressure. Especially in the Huangliu Formation, the pore pressure shows a large transverse span. Moreover, it tends to reduce at the top but rises rapidly at the bottom, with a pressure coefficient of up to 2.3, indicating the presence of significant pressure mutation. Pressure prediction using only the undercompaction model yields large errors and thus is prone to induce engineering accidents. To effectively predict the formation pressure, it is necessary to determine the genetic mechanisms of overpressure. This study effectively identified the genetic mechanisms of the overpressure using the cross plots of vertical effective stress vs logging response. The identification results show that the genetic mechanisms of the deep overpressure in the Ledong area mainly include mechanical unbalanced compaction, chemical compaction, vertical pressure transmission along faults, and hydrocarbon-generating pressurization. A proper pressure prediction method was established based on the defined genetic mechanisms, thus improving the prediction precision and ensuring the smooth construction of drilling engineering.

Key words: abnormal high pressure; genetic mechanism; Yinggehai Basin; Ledong area

(本文编辑: 叶佩)