# 利津洼陷古近系烃源岩异常高压 计算方法与分布特征

李朝玮,樊洪海,叶志,陈绪跃,王鄂川 (中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室,北京102249)

摘要:东营凹陷利津洼陷古近系沙四段上亚段、沙三段下亚段和沙三段中亚段烃源岩中广泛发育异常高压。对其 异常高压的成因进行分析,利用综合解释法建立了研究区80口已钻井的地层孔隙压力系数剖面;明确了沙四段上 亚段、沙三段下亚段和沙三段中亚段的地层孔隙压力系数等值线分布,分析了利津洼陷烃源岩地层异常高压的分 布特征。研究结果表明,综合解释法在计算由欠压实和生烃膨胀等多种成因共同作用形成的利津洼陷古近系烃源 岩异常高压时的精度较高;研究区古近系烃源岩异常高压分布与洼陷形态一致,呈东北—西南向展布,在洼陷深陷 区以高压和超高压为主,至洼陷边缘构造高部位逐渐呈辐射状降低至正常压力;洼陷中心的异常高压是烃源岩向 洼陷边缘排烃的主要动力。

**关键词:**地层孔隙压力 烃源岩 异常高压 综合解释法 利津洼陷 中图分类号:TE112.115 **文献标识码:**A

地层孔隙压力是指地层孔隙或裂缝中流体 (油、气、水)所具有的压力,是研究油气运聚成藏的 基础数据,也是钻井工程设计和施工的必要参数。 利津洼陷位于东营凹陷西北部,其西北为滨县凸 起,北为陈家庄凸起,东南为东营凹陷中央背斜带, 气勘探生产区域。洼陷内古近系沙四段上亚段  $(E_{s_4}^{\perp})$ 、沙三段下亚段 $(E_{s_3}^{\top})$ 和沙三段中亚段 $(E_{s_3}^{+})$ 以大套暗色泥页岩为主,是利津洼陷的主力烃源 岩:而烃源岩中广泛发育异常高压,给钻井施工带 来了诸多挑战。前人对东营凹陷的异常高压进行 了研究[1-6],但研究内容多侧重于整个东营凹陷的油 气运聚成藏规律、异常高压的形成机制以及烃源岩 生烃、排烃过程。笔者以利津洼陷沙四段上亚段、 沙三段下亚段和沙三段中亚段烃源岩为研究对象, 对烃源岩地层孔隙压力的计算方法进行了探讨,进 而分析研究区古近系烃源岩的地层孔隙压力分布 特征。

## 1 异常高压形成机制

中国学者通常根据地层孔隙压力系数将地层 孔隙压力分为超低压(地层孔隙压力系数小于

#### 文章编号:1009-9603(2013)05-0038-05

0.75)、低压(地层孔隙压力系数为0.75~0.90)、常压 (地层孔隙压力系数为0.90~1.10)、高压(地层孔隙 压力系数为1.10~1.50)、超高压(地层孔隙压力系 数大于1.50)<sup>[7]</sup>。综合前人对东营凹陷异常高压成 因的研究成果<sup>[1-5]</sup>,结合地质、测井和实钻资料,对利 津挂陷古近系烃源岩中异常高压的成因进行分析, 主要包括欠压实作用、生烃膨胀、粘土矿物脱水、水 热增压和封隔层等因素。

欠压实作用 研究区沙四段上亚段一沙三段 中亚段以暗色泥页岩为主的烃源岩最大厚度达 1000多米,在压实过程中随着埋深的增加,其孔隙 度和渗透率逐渐降低,岩层的封闭性增强,致使孔 隙中流体无法正常排出,造成欠压实并产生异常高 压。刘计国等统计表明,利津洼陷沙三段的沉积速 率为0.2~0.43 mm/a,高于产生欠压实作用的沉积 速率上限值(0.1 mm/a),发生了明显的欠压实作用; 而沙四段上亚段的沉积速率为0.032~0.1 mm/a,发 生欠压实作用的范围相对较小<sup>[8]</sup>。

生烃膨胀 沉积物中的有机质在一定条件下 (一般为地层温度超过93.33℃,以生油为主的母质 的镜质组反射率大于0.6%<sup>[9]</sup>)可转化为烃类。利津 洼陷的生油门限约为2200m(对应的地层温度约为 93℃),在埋深为2200~3000m进入烃类成熟阶段 后,地层温度升至93~122 ℃,进入热催化生油阶段,干酪根降解后生成大量的烃类;在埋深为3000~3800m进入烃类较高成熟阶段后,干酪根进一步裂解生成分子质量更小的烃类,大幅升高的总烃含量使孔隙流体体积急剧增加;此外,分解的烃类物质与孔隙中原有的流体混合后形成两相或三相流体,进而降低了水的有效渗透率;且分解出的大分子沥青质对孔喉造成一定程度的封堵,增强了地层对孔隙流体的封隔能力,致使地层孔隙压力明显增大。

粘土矿物脱水 研究区沙河街组埋深为 2800~3400m地层中的蒙脱石迅速伊利石化,80% 以上的蒙脱石层消失<sup>[10]</sup>。蒙脱石向伊利石转化过 程中的脱水作用会产生层间水和结晶水,致使孔隙 流体体积增加,进而造成地层孔隙压力增大;但蒙 脱石向伊利石转化过程中增加的孔隙流体体积累 积不超过5%,因此,脱水作用对形成异常高压的贡 献很小。此外,在粘土矿物脱水过程中,钙、铁和镁 等离子从泥页岩中释放出来并沉淀形成绿泥石、方 解石等胶结物质,提高了孔喉空间对流体的封闭能 力,对异常高压的形成具有促进作用。

水热增压 利津洼陷具有高地热背景,地温梯 度一般为3.4~4.4 ℃/hm,平均地温梯度为3.6~ 3.7 ℃/hm,热流值高达60~100 mW/km<sup>2</sup>,属于热盆 性质<sup>[10]</sup>。因此,整体上水热增压对利津洼陷异常高 压的形成起到了一定的促进作用。

封隔层 异常压力系统是具有一定体积的地 质体,根据其成因可分为封闭型、滞排型、顶封滞排 型和入侵型4种类型<sup>[11]</sup>,良好的封闭环境或滞排条 件是维持高压系统的先决条件。研究区沙四段下 亚段一孔店组发育巨厚的盐岩和膏岩层,形成异常 高压带的底封闭层;在沙三段上亚段沉积时期,东 营三角洲向西伸入利津洼陷中心,与该套砂体相接 的下部泥岩由于排流畅通、压实程度高,形成异常 高压带的顶封闭层<sup>[12]</sup>。生烃作用分解出的长链大 分子对孔喉的堵塞以及粘土矿物脱水后的胶结作 用也在烃源岩内部对流体增压起到了促进作用。

综上所述,利津洼陷的异常高压是由地质、物 理和化学等多种因素共同作用所形成,但这些因素 在不同区域、不同深度对形成异常高压的贡献程度 存在差异:在具有封存高压孔隙流体的封闭环境的 前提下,生烃膨胀是形成沙四段上亚段异常高压的 主要原因,欠压实作用是形成沙三段中亚段异常高 压的主要原因,而沙三段下亚段则同时具备欠压实 及生烃膨胀的双向增压效应<sup>[13]</sup>;粘土矿物脱水和水 热增压也对沙河街组烃源岩异常高压的形成起到 一定的促进作用。

# 2 烃源岩地层孔隙压力分析方法

烃源岩地层增压机制的复杂性,致使目前针对 烃源岩地层孔隙压力进行预测的方法较少。诸多 学者<sup>[1,12-15]</sup>利用声波时差数据并采用等效深度法、四 参数经验模型等方法对东营凹陷和利津洼陷的地 层孔隙压力进行了计算。这些常规地层孔隙压力 计算方法对泥页岩欠压实机制下异常高压具有较 好的适应性,但未充分考虑欠压实机制以外的异常 高压成因对地层孔隙压力的影响,导致其对由多种 增压机制共同作用的烃源岩异常高压的计算精度 较低。为此,针对利津洼陷古近系这种由欠压实和 生烃膨胀等多种增压机制共同作用形成的烃源岩 异常高压,利用多种测井数据并采用综合解释法<sup>[16]</sup> 分区域建立模型,对研究区的地层孔隙压力进行了 详细分析。

### 2.1 综合解释法的计算原理

综合解释法以声波速度模型和Terzaghi有效应 力定理<sup>[16]</sup>为理论基础。其中,声波速度模型综合反 映了岩石中声波传播速度随孔隙度和泥质含量的 增加而减小、随垂直有效应力增加而增加的基本规 律,即

$$V_{\rm p} = A_0 + A_1 \phi + A_2 \sqrt{V_{\rm sh}} + A_3 \left( \sigma_{\rm v} - e^{-D\sigma_{\rm v}} \right)$$
(1)

式中: $V_{p}$ 为纵波速度,km/s; $A_{0}$ , $A_{1}$ , $A_{2}$ , $A_{3}$ 和 D 为模型系数; $\phi$ 为孔隙度; $V_{sh}$ 为泥质含量; $\sigma_{v}$ 为 垂直有效应力,MPa。

Terzaghi有效应力定理描述了饱和多孔介质中 地层孔隙压力、上覆岩层压力及垂直有效应力三者 的关系,即

$$p_{\rm p} = p_{\rm o} - \sigma_{\rm v} \tag{2}$$

式中: $p_p$ 为地层孔隙压力,MPa; $p_o$ 为上覆岩 层压力,MPa。

利用综合解释法进行计算时,首先由密度测井 数据对体密度积分,获取上覆岩层压力<sup>[17]</sup>;然后,利 用声波时差和孔隙度等测井资料确定声波速度和 孔隙度,利用自然伽马或自然电位测井资料确定泥 质含量,代入式(1)后得到垂直有效应力;最后,根 据式(2)求取地层孔隙压力。

#### 2.2 典型井地层孔隙压力系数剖面建立

建立利津洼陷典型井地层孔隙压力系数剖面

的步骤为:①选取典型井,优选新井、探井、直井、深 井及井径较规则的井,且在整个利津洼陷分散取 井、在异常高压带多取井,按此标准优选出80口已 钻井;②搜集和处理数据,计算地层孔隙压力所需 的数据包括岩性、钻井液密度、地质分层、分段钻头 和实测地层压力等基础资料及声波时差、自然伽 马、井径和密度等测井资料,数据处理包括单位换 算、数据校正、多次测井数据的合并、测井曲线过滤 和平滑以及泥岩声波时差提取等;③利用井径校正 和泥浆密度校正后的密度测井数据积分并回归,分 别得到研究区滨南、纯梁、利津、史南和胜坨5个井 区的上覆岩层压力系数计算模型(表1);④分别在5 个井区各选1口典型井,利用校正并过滤平滑后的 测井数据和实测地层孔隙压力计算出 $\sigma_v$ ,  $V_n$ ,  $\phi$ 和 V<sub>sh</sub>,由式(1)利用多元非线性回归求取 A<sub>0</sub>,A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>,A<sub>3</sub>和D,然后根据相邻井进行模型修正,即分 别得到适合上述5个井区的声波速度计算模型(表 1);⑤根据分井区获取的上覆岩层压力系数和声波 速度的计算模型,得出80口典型井的单井地层孔隙 压力系数剖面,从研究区5口典型井的沙河街组地 层孔隙压力系数剖面(图1)可以看出,5口井在沙四 段上亚段、沙三段下亚段和沙三段中亚段的地层孔 隙压力系数多大于1.2,显示出明显的异常高压。

对不同井区7口井的地层孔隙压力系数的计算 值与实测值进行对比表明(表2),由综合解释法计 算的烃源岩地层孔隙压力系数与实测地层孔隙压 力系数的吻合程度超过90%,达到了对烃源岩地层 孔隙压力分析的要求。

表1 利津洼陷上覆岩层压力系数和声波速度计算模型							
井区	上覆岩层压力系数	声 波 速 度					
滨南	$G_0 = 2.692 - 0.007\ 005\ 4H - 0.607 \mathrm{e}^{-0.2H}$	$V_{\rm p} = 4.235 - 1.126\phi - 0.408\sqrt{V_{\rm sh}} + 2.736\left(\sigma_{\rm v} - {\rm e}^{-3.01\sigma_{\rm v}}\right)$					
纯梁	$G_0 = 3.007 - 0.0159436H - 0.932e^{-0.1H}$	$V_{\rm p} = 2.589 - 0.899\phi - 0.130\sqrt{V_{\rm sh}} + 1.791\left(\sigma_{\rm v} - {\rm e}^{-5.25\sigma_{\rm v}}\right)$					
利津	$G_0 = 1.899 + 0.114\ 264\ 3H - 0.097 e^{-3.69H}$	$V_{\rm p} = 3.739 - 3.627\phi - 0.290\sqrt{V_{\rm sh}} + 3.313\left(\sigma_{\rm v} - {\rm e}^{-7.68\sigma_{\rm v}}\right)$					
史南	$G_0 = 1.994 + 0.0637430H - 0.091e^{-2.59H}$	$V_{\rm p} = 3.720 - 1.405\phi - 0.000 \ 1\sqrt{V_{\rm sh}} + 1.309 \left(\sigma_{\rm v} - e^{-3.01\sigma_{\rm v}}\right)$					
胜坨	$G_0 = 2.075 + 0.061\ 051\ 2H - 1.175 e^{-7.91H}$	$V_{\rm p} = 4.962 - 3.996\phi - 0.312\sqrt{V_{\rm sh}} + 3.163\left(\sigma_{\rm v} - {\rm e}^{-3.01\sigma_{\rm v}}\right)$					
注: G_为上覆岩层压力系数; H为深度, m。							



图1 利津洼陷5口典型井沙四段上亚段一沙三段中亚段地层孔隙压力系数剖面

表2 地层孔隙压力系数计算值与实测值对比							
井号	沤庄/m	巨位	泥浆密度/	地层孔隙	压力系数	相对误	
	1本)又7111	)Z  L	$(g \cdot cm^{-3})$	实测值	计算值	差,%	
滨423	3 087.1	$\mathbb{E}s_3^{F}$	1.36	1.403	1.386	1.21	
利90	3 247.6	${\rm E}s_4{}^{\pm}$	1.47	1.296	1.327	-2.39	
梁225	2 240.0	$Es_3^{+}$	1.20	1.047	1.129	-7.83	
史108	3 351.5	$Es_3^{+}$	1.34	1.483	1.427	3.78	
营101	3 346.3	${\rm E}{s_4}^{\pm}$	1.53	1.519	1.587	-4.48	
河 156	3 232.3	$\mathbf{Es_3}^{F}$	1.56	1.382	1.415	-2.39	
坨712	3 233.0	$\mathbf{Es_3}^{F}$	1.84	1.671	1.693	-1.32	

#### 2.3 地层孔隙压力系数平面等值线图绘制

绘制利津洼陷地层孔隙压力系数等值线图的 步骤为:①根据岩性和地质分层数据,在计算得到 的80口典型井的地层孔隙压力系数中分别提取沙 四段上亚段、沙三段下亚段和沙三段中亚段泥页岩 层的地层孔隙压力系数,并去除计算结果中明显不 合理的数据点;②对各层段的地层孔隙压力系数数 据取加权平均值,作为各井在对应层段的地层孔隙 压力系数结果,并用相应层段的钻井液密度和实测 地层孔隙压力值进行复核;③整理各井的分层平均 地层孔隙压力系数及井位坐标数据;④使用Surfer 绘图软件中的克里金插值法进行数据插值,并用等 值线绘制模块绘图;⑤添加构造底图、井位名称等 图件信息,最终得到研究区沙四段上亚段、沙三段 下亚段和沙三段中亚段烃源岩的地层孔隙压力系 数平面等值线分布(图2)。



图2 利津洼陷烃源岩地层孔隙压力系数平面等值线分布

# 3 烃源岩地层孔隙压力分布特征

利津洼陷沙四段上亚段烃源岩在乔庄油田西 南部、滨南油田东北部、利津油田东北部和胜坨油 田等部分区域发育异常高压(图2a),局部地层孔隙 压力系数超过1.4;大部分洼陷深陷区的地层孔隙压 力系数为1.15~1.25,为弱异常高压,其异常高压分 布为东北一西南走向;洼陷边缘斜坡带和构造高部 位的地层孔隙压力系数基本保持为0.90~1.15。沙 三段下亚段烃源岩广泛发育异常高压,异常高压带 在洼陷中心呈东北一西南向分布(图2b);胜坨油 田、现河庄油田北部、史南油田及乔庄油田沙三段 下亚段烃源岩为高压或超高压中心;自洼陷中心至 洼陷边缘,地层孔隙压力系数逐渐降低;在洼陷西 北边缘的滨县凸起、利津一滨南断裂带、胜北断裂 带和东南边缘的中央断裂背斜带附近,地层孔隙压 力系数回归正常。沙三段中亚段烃源岩地层孔隙 压力系数分布特征与沙三段下亚段的相似(图2c); 洼陷中心深陷区的地层孔隙压力系数超过1.5;从洼 陷中心至洼陷边缘斜坡带和构造高部位,地层孔隙 压力系数呈辐射状逐渐降低;在洼陷西北和东南边 界的大部分地区,地层孔隙压力系数回归正常,其 值约为1.15。整体上,洼陷深陷区的异常高压成为 烃源岩排烃的主要动力,驱使洼陷中心烃源岩生成 的油气向洼陷边缘构造高部位运移,利津洼陷的油 藏具有围绕洼陷中心呈环带状分布的特点。

## 4 结束语

利津洼陷古近系沙河街组烃源岩广泛发育异 常高压,其中沙四段上亚段主要为生烃膨胀形成异 常高压,沙三段下亚段受欠压实作用和生烃膨胀双 重增压机制控制,沙三段中亚段主要为欠压实作用 形成异常高压;粘土矿物脱水和水热增压也对沙河 街组烃源岩异常高压的形成起到了促进作用。综 合解释法可有效计算由欠压实作用及生烃膨胀等 多种机制形成的烃源岩异常高压,解决了常规地层 孔隙压力计算方法只适用于砂、泥岩沉积地层在欠 压实机制下的异常高压计算的局限性。研究区沙 四段上亚段烃源岩的异常高压分布范围较小,沙三 段下亚段和沙三段中亚段烃源岩异常高压分布范 围较大;洼陷中心深陷区的异常高压是烃源岩排烃 的主要动力,也是研究区油藏围绕洼陷中心呈环带 状分布的主要原因。应继续深入研究欠压实、流体 膨胀及构造挤压等多种成因机制共同作用形成异 常高压的判别程序及多种超压机制作用下的声波 速度——垂直有效应力计算模型。

## 参考文献:

- [1] 郑和荣,黄永玲,冯有良.东营凹陷下第三系地层异常高压体系 及其石油地质意义[J].石油勘探与开发,2000,27(4):67-70.
- [2] 高建岗,高树新,王凤华,等.东营凹陷胜坨地区沙四段地层压 力特征及对储层的影响[J].油气地质与采收率,2008,15(1): 35-38.
- [3] 谈彩屏,江兴歌,陈拥锋,等.石油运移成藏有利区预测方法研 究——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J].石油实验地质,2008, 30(6):629-635.

- [4] 张善文,张林晔,张守春,等.东营凹陷古近系异常高压的形成
  与岩性油藏的含油性研究[J].科学通报,2009,54(11):
  1570-1578.
- [5] 刘士林,郑和荣,林舸,等.渤海湾盆地东营凹陷异常压力分布 和演化特征及与油气成藏关系[J].石油实验地质,2010,32 (3):233-237.
- [6] 郭利果,田辉,肖贤明,等.基于干酪根热模拟与族组分比例配 分模型的烃源岩生油量计算方法[J].油气地质与采收率, 2012,17(2):21-24.
- [7] 赵国欣·烃源岩层中异常高压研究——以渤海湾盆地东营凹陷 古近系为例[J].石油实验地质,2008,30(4):340-344.
- [8] 刘计国,武晓春,于兴河,等,东营凹陷异常高压体系与油气关系[C]//李丕龙,庞雄奇.隐蔽油气藏形成机理与勘探实践——第三届隐蔽油气藏国际学术研讨会论文集.北京:石油工业出版社,2004:183-192.
- [9] 范凌霄,樊洪海,杨皆平.东营凹陷下第三系烃源岩异常高压形成机理探讨[C]//李丕龙,庞雄奇.隐蔽油气藏形成机理与勘探实践——第三届隐蔽油气藏国际学术研讨会论文集.北京:石油工业出版社,2004:119-122.
- [10] 张守春.东营凹陷异常压力形成机制及其与成烃成藏关系[D]. 东营:中国石油大学(华东),2010.
- [11] 刘伟新,承秋泉,范明.盖层、压力封盖和异常压力系统研究[J].石油实验地质,2011,33(1):74-80.
- [12] 陈利.利津洼陷异常高压带及其内部成藏规律研究[J].新疆石 油天然气,2005,1(2):16-18.
- [13] 陈中红,查明.东营凹陷烃源岩超压体系特征及勘探意义[J]. 大庆石油地质与开发,2004,23(3):11-13.
- [14] 何新贞.东营凹陷压力系统特征分析[J].油气地质与采收率, 2002,9(4):21-23.
- [15] 邱桂强,凌云,樊洪海.东营凹陷古近系烃源岩超压特征及分布 规律[J].石油勘探与开发,2003,30(3):71-75.
- [16] 樊洪海.适于检测砂泥岩地层孔隙压力的综合解释方法[J].石 油勘探与开发,2002,29(1):90-92.
- [17] 樊洪海,张传进.上覆岩层压力梯度合理计算及拟合方法[J]. 石油钻探技术,2002,30(6):6-8.

编辑 邹潋滟

