

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

控制超压泥质岩裂隙开启的主要因素

张金功

(西北大学地质系, 西安)

梁志刚

(中原石油勘探局勘探开发研究院, 河南濮阳)

李丕龙

(胜利石油管理局勘探公司, 山东东营)



本文根据测井资料研究了华北盆地沧东-南皮凹陷及东濮凹陷前梨园洼陷早第三纪异常超压带内超压泥质岩裂隙的发育特征。结果表明, 开启超压泥质岩裂隙是在一定深度区间内集中发育。超压泥质岩裂隙开启的条件是泥质岩中流体热增压要超过泥质岩抗压强度, 控制上述条件的主要因素是泥质岩孔隙度、地温与埋深。超压泥岩裂隙段是最深、最有利的排烃段, 它与有机质成熟度的对应关系与地温梯度有关。

关键词 超压泥质岩裂隙 流体热增压 抗压强度 地温梯度

超压泥质岩裂隙指泥质岩在异常超孔隙流体压力作用下产生的裂隙, 因其规模小, 常被称为微裂隙。前人研究认为, 异常超压带内泥质岩中的油气初次运移主要是通过周期性开启与闭合裂隙(或微裂隙)实现的, 该机制是对应于油气大量生成阶段的最主要的排烃机制^[1-6]。

由于没有对埋藏状态下超压泥质岩裂隙开启与闭合的状况进行深入研究, (微)裂隙排烃理论在油气勘探中的应用受到了限制。例如, 若超压泥质岩裂隙是周期性开启与闭合的, 这是否意味着含油气盆地中排烃深度可以无限制地延续下去呢?

本文以测井资料为主要研究手段对华北盆地沧东-南皮凹陷及东濮凹陷前梨园洼陷早第三纪异常超压带内超压泥质岩裂隙的演化特征进行了研究, 分析了控制超压泥质岩裂隙开启的主要因素及其与有机质演化的关系。

1 超压泥质岩裂隙的发育特征

1.1 地质背景

华北盆地沧东-南皮凹陷是自早第三纪发育起来的断陷凹陷, 发育的地层有下第三系孔店组、沙河街组、东营组, 上第三系馆陶组、明化镇组以及第四系。早第三纪至第四纪地层缺失较少。下第三系岩性以湖相砂、泥岩为主, 砂、泥岩比率一般为 10—30%。孔店组二段、沙河街组三段及一段的暗色湖相泥质岩为本区主要生油岩。

东濮凹陷亦是自早第三纪发育起来的断陷凹陷, 前梨园洼陷是其北部的一个次级构造单元, 发育的地层有下第三系沙河街组、东营组, 上第三系馆陶组、明化镇组以及第四系。早第三纪至第四纪地层亦无大的缺失。下第三系岩性以湖相砂、泥岩为主, 含少量盐膏层, 砂、泥岩比率一般为 10—30%。其中沙河街组三段及一段的暗色湖相泥质岩为主要生油岩。

沧东—南皮凹陷与前梨园洼陷下第三系均以持续沉降为主要的演化趋势。最大的区别是地温场,沧东—南皮凹陷地温梯度一般为 $3.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,而前梨园洼陷地温梯度平均为 $2.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

1.2 研究程序及方法

研究程序是,先划分出泥质岩层,然后确定泥质岩异常超压带,在异常超压带内再识别泥质岩裂隙。

划分泥质岩层主要采用地质、钻井及测井资料相结合的方法。

泥质岩异常超压带主要是根据泥质岩声波时差(Δt)在半对数坐标中随深度(Z)的变化趋势确定的。在正常静水压力带 $\Delta t-Z$ 为直线关系,若偏上述直线关系,则为异常超压带^[7]。

前人曾用钻井岩芯及与岩芯有关的分析化验方法研究泥质岩裂隙^[5,7,8]。由于钻井取芯过程及取芯以后的机械加工会对岩芯产生影响,地表实验室的温压条件与地下温压条件存在较大差别,得出的认识往往不能反映泥质岩裂隙在埋藏条件下开启与闭合的状况。另外,钻井取芯的数量一般较少,往往也不能反映全井段泥质岩裂隙的发育状况。

测井方法识别泥质岩裂隙是比较有效的方法^[9]。虽然它是间接的,但它能较真实地反映埋藏状态的温压条件,而且还可以反映全井段泥质岩裂隙的发育状况。基于上述优点,本次研究超压泥质岩裂隙主要采用测井方法。所用的测井曲线有深侧向、浅侧向、微侧向及冲洗带电阻率测井曲线,中子孔隙度、声波时差及密度测井曲线,以及岩石强度及地层倾角测井曲线。

1.3 超压泥质岩裂隙发育特征

按照上述程序及方法对沧东—南皮凹陷及前梨园洼陷 50 多口井进行了研究,结果如下:

沧东—南皮凹陷下第三系泥质岩异常超压带发育在 1900—2200m 深度之下。其中约在 2500—3200m 深度范围内的泥质岩普遍发育裂隙,在 2500m 之上及 3200m 之下的泥质岩裂隙不发育(图 1)。

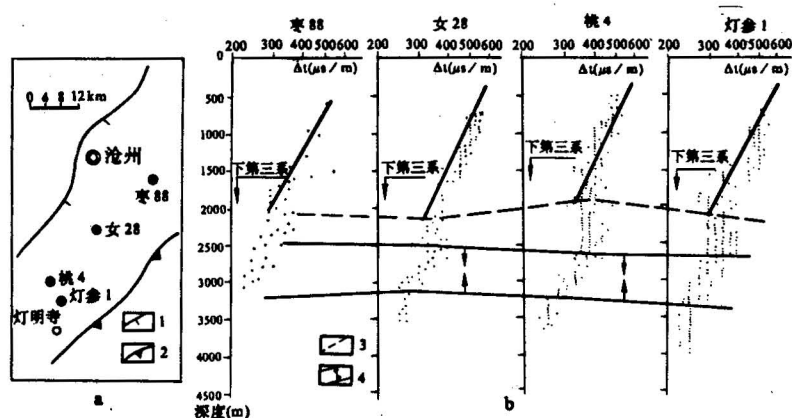


图 1 沧东-南皮凹陷超压泥质岩裂隙发育特征

Fig. 1 Development of overpressured pelite fractures in the Cang dong-Nanpi depression

a well location; b profile; 1. boundary fault; 2. denudation line; 3. upper margin of pelite overpressure zone; 4. zone of overpressured pelite fractures

前梨园洼陷早第三纪泥质岩异常超压带发育在 2500—2700m 深度之下,泥质岩裂隙大致开始出现于 3200m,裂隙消失的深度在不同井差别较大,一般在 3700—4100m 之间(图 2)。

沧东-南皮凹陷及前梨园洼陷超压泥质岩裂隙发育的共同特征是具有开启裂隙的泥质岩在垂向上集中分布在一定的深度区间,该区间在横向上可以对比,不受局部构造应力场的控制。

上述特征说明,持续沉降的地质背景下超压泥质岩裂隙的发育具有明显的阶段性,即主要经历了一次开启到闭合的过程,而非周期性开闭的。

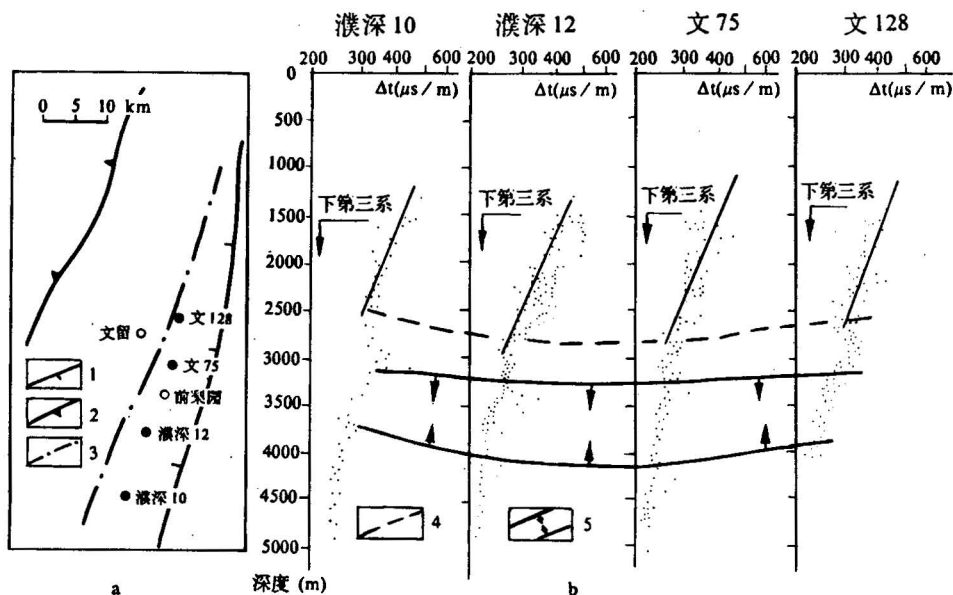


图 2 东濮凹陷前梨园洼陷超压泥质岩裂隙发育特征

Fig. 2 Development of overpressured pelite fractures in the Qianliyuan hollow Dongpu depression.

a 井位图; b 剖面图; 1. 边界断裂; 2. 剥蚀线; 3. 洼陷分界; 4. 泥质岩异常超压起始线; 5. 超压泥质岩裂隙发育带

a Well location; b profile; 1. boundary fault; 2. denudation line; 3. hollow boundary;

4. upper margin of pelite overpressure zone; 5. zone of overpressured pelite fractures

2 控制超压泥质岩裂隙开启的主要因素

许多学者对超压泥质岩裂隙开启的条件及控制因素进行过研究,但认识很不一致。

Snarsky(1962)研究表明,只要在岩石或孔隙内部的流体压力比周围介质的静水压力大 1.4—2.4 倍,就可以超过岩石的机械强度并使岩石产生破裂^[1]。

Tissot 和 Pelet(1971)报导,在一块页岩中,当实验中的静岩压力为 $440 \times 10^5 \text{Pa}$ 时,页岩的内部气体压力却保持在 $540 \times 10^5 \text{Pa}$,在这个实验中,页岩产生了显微裂隙^[1]。

Secor(1965)认为,若岩石中孔隙流体压力 P_p 超过最小压应力 S_3 与岩石抗张强度 K 之和,就可以产生裂隙^[10]。用公式表示为:

$$P_p > S_3 + K \quad (1)$$

$$S_3 = \frac{v}{1-v} S_1 \quad (2)$$

其中: v 泊松比;

S_1 最大压应力,在沉积盆地中应是地压负荷或地静压力。

王新洲等(1994)的观点与 Secor(1965)的不同。他认为,超压泥质岩裂隙产生的条件是泥质岩孔隙流体压力 P_p 应大于静岩压力 S_1 与泥质岩抗压强度 C 之和^[5],即

$$P_p > S_1 + C \quad (3)$$

孔隙流体压力由两个分力组成,一个是静岩压力的反作用力,与静岩压力抗衡。另一个由水热增压(与气体增压)产生。由于泥质岩矿物基质膨胀值只有水的 1/15 左右,大约相当于 6% 的孔隙度,因此只有当泥质岩孔隙度超过 6% 时,由水热增压产生的孔隙流体压力才具备超过岩石抗压强度的条件。总之,超压泥质岩裂隙开启的条件是流体热增压要超过泥质岩抗压强度。

上述观点主要是建立在超压泥质岩裂隙周期性开启与闭合的基础上,能否解释超压泥质岩裂隙一次性开闭的过程呢? 下面就来讨论这个问题。

沧东-南皮凹陷 3200m 深度之下的泥质岩裂隙是不发育的,但这个范围泥质岩孔隙流体压力却远远超过最小压应力与岩石抗张强度之和。据陈发景等(1989)的研究^[7],该区 3300m 深度的泥质岩, $P_p = 53.93\text{MPa}$, $S_1 = 74.73\text{MPa}$, $K = 2.94\text{MPa}$ 。若取泊松比 $v = 0.36$, 据(2)式计算得 $S_3 = 42.03\text{MPa}$, 则 $S_3 + K = 42.003 + 2.94 = 44.97(\text{MPa})$ 。因此 $P_p(53.93\text{MPa})$ 远大于 $S_3 + K$ 。

前梨园洼陷约 4100m 深度之下的泥质岩裂隙是不发育的,但计算结果也表明该深度范围内 P_p 是大于 $S_3 + K$ 的。

以上分析说明,Secor(1965)的观点不能有效解释超压泥质岩裂隙的开闭过程。

何炳骏(1982)对沧东-南皮凹陷泥质岩孔隙度进行了研究^[11]。结果表明,该区在 3200m 之下,泥质岩孔隙度一般小于 6%,在 3200—2500m,泥质岩孔隙度一般为 6—15%,即在开启泥质岩裂隙带泥质岩孔隙度一般都大于 6%,且在 6—15% 之间。

前梨园洼陷超压泥质岩裂隙与泥质岩孔隙度也有明显的对应关系,尽管该区超压泥质岩裂隙发育深度与沧东-南皮凹陷差别很大。在开启泥质岩裂隙带泥质岩孔隙度一般为 6—11%,而在超压泥质岩裂隙带之下,泥质岩孔隙度一般小于 6%。

沧东—南皮凹陷平均地温梯度为 $3.2^\circ\text{C}/100\text{m}$,超压泥质岩裂隙产生的深度约为 2500m,对应的地温值约为 95°C ,而前梨园洼陷平均地温梯度为 $2.8^\circ\text{C}/100\text{m}$,明显小于前者,超压泥质岩裂隙产生的深度却相应增至 3200m,对应的地温升高为 105°C 。

以上事实说明,泥质岩孔隙度是控制超压泥质岩裂隙开启的关键因素。只有当泥质岩孔隙度大于 6% 时,才具备产生流体热增压的可能。

当然,流体热增压要超过岩石抗压强度需要达到一定的地温。由于岩石抗压强度随围压增大而增大^[12],即随埋深增大而增大,因而埋深越大,克服抗压强度所需的热增压就越大,所对应的地温值也就越高。这种关系可以用地温梯度来衡量。地温梯度越高,达到一定地温对应的深度就越浅,流体热增压就越容易超过岩石抗压强度,超压泥质岩裂隙发育的深度也就越浅。反之,流体热增压就越难超过岩石抗压强度,超压泥质岩裂隙发育的深度就相应越深。

上述分析说明王新洲等(1994)的观点基本符合超压泥质岩裂隙的发育特征。

泥质岩中孔隙流体包括两部分,即水和烃类。烃类的成分及相态与有机质演化程度有关。在沧东-南皮凹陷,超压泥质岩裂隙段与有机质演化的低成熟阶段对应,镜质体反射率在 0.5—0.6%之间,烃类以低成熟原油为主^[13]。而在前梨园洼陷,超压泥质岩裂隙段与有机质演化的高成熟阶段对应,镜质体反射率约 1.0—1.3%,烃类有原油也有大量天然气^[14]。从超压泥质岩裂隙段与有机质成熟阶段对应的差异性上来看,虽然烃类的生成能导致泥质岩中孔隙流体压力的升高,但不是影响超压泥质岩裂隙发育的关键因素。

综上所述,异常超压带内超压泥质岩裂隙开启的基本条件是流体热增压要超过泥质岩抗压强度。控制上述条件的关键因素是泥质岩孔隙度、地温与埋深。

3 讨论

从异常超压带内超压泥质岩裂隙的发育特征看,通过泥质岩裂隙的排烃方式不是周期性或间歇性的,而是持续性的,且具有明显的阶段性。

超压泥质岩裂隙排烃的深度及其与有机质成熟度的关系与地温梯度有关。地温梯度越高,超压泥质岩裂隙排烃段的深度就越浅,对应的有机质成熟度就越低;反之,对应的深度就越深,对应的有机质成熟度就越高。

超压泥质岩裂隙排烃与有机质成熟度对应的差异性控制着一个地区油藏的相态。地温梯度越高,油藏的比例就越大,反之,气藏的比例就越大。沧东-南皮凹陷发现的主要是油藏,而前梨园洼陷不仅有油藏而且还有大量气藏说明了这一点。

由于超压泥质岩裂隙闭合时,泥质岩孔隙度一般低于 6%,基本接近于不可压缩状态,因而泥质岩中流体排出的潜力大大降低。从这种意义上讲,超压泥质岩裂隙排烃段应是一个地区最深且最有利的排烃阶段。

论文编写过程中张金亮博士给予了极大帮助与支持,中原油田勘探开发研究院提供了前梨园洼陷泥质岩孔隙度的分析数据,秦武英、张祎、杨雷做了大量工作,特此致谢!

参 考 文 献

- 1 蒂索 B P. 威尔特 D H 著,石油形成和分布. 徐永元等译,北京:石油工业出版社,1989. 216—222 页.
- 2 Hedberg H D. Methane generation and petroleum migration. AAPG studies in Geology. 1980. 10: 179—206.
- 3 李明诚. 石油与天然气运移. 北京:石油工业出版社. 1987. 37—38 页.
- 4 傅家谟,刘德汉主编. 天然气运移、储集及封盖条件. 北京:科学出版社,1992. 38—39 页.
- 5 王新洲等. 流体间歇压裂运移—石油初次运移的重要方式之一. 石油勘探与开发,1994(2):20—26.
- 6 郝石生等. 油气初次运移的模拟模型. 石油学报,1994(2):21—31.
- 7 陈发景,田世澄主编. 压实与油气运移. 武汉:中国地质大学出版社,1989. 7—11 页,80—86 页.
- 8 Capuano R M. Evidence of fluid flow in microfractures in geopressured shales, AAPG., 1993, 77: 1303—1314.
- 9 谭廷栋. 裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法. 北京:石油工业出版社,1987. 164—197 页.
- 10 Jean du Rouchet, Stress fields; a key to oil migration, AAPG., 1981, 65: 74—85.
- 11 何炳骏. 华北地区地层压实作用与油、气初次运移. 石油学报,1981(4 增刊):93—99.
- 12 张恺等. 石油构造地质学. 北京:石油工业出版社,1989. 34—36 页.
- 13 大港油田石油地质志编辑委员会. 中国石油地质志(卷四). 大港油田,北京:石油工业出版社,1991. 143 页.
- 14 中原油田勘探局编. 东濮凹陷油气生成地球化学研究. 北京:石油工业出版社,1991. 1—48 页.

MAIN FACTORS CONTROLLING THE OPENING OF OVERPRESSURED PELITE FRACTURES

Zhang Jingong

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an Shaanxi)

Liang Zhigang

(Institute of Petroleum Exploration and Development, Zhongyuan Petroleum Exploration Administration, Puyang, Henan)

Li Peilong

(Shengli Petroleum Exploration CO., Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong)

Abstract

The evolution of overpressured pelite fractures in the Eocene overpressured zone in the Cangdong-Nanpi and Dongpu depressions, Huabei basin is studied with log data, which shows that pelites with open fractures occur only in a certain depth interval and below this depth few open fractures develop. The condition for the opening of overpressured pelite fractures is that thermocompression of pore fluids in pelites must exceed compression strength of pelites, which are controlled by porosities, subsurface temperature and burial depths of pelites. Primary migration of hydrocarbons through overpressured pelite fractures may be the deepest and most effective primary migration in a basin, and its depths and correspondence to organic maturation are connected with geothermal gradient.

Key words: overpressured pelite fracture, thermocompression of pore fluids, compression strength, geothermal gradient

作者简介

张金功,生于1963年3月。1984年毕业于石油大学勘探系,1987年在西北大学地质系获硕士学位,现为西北大学讲师,主要从事石油地质科研与教学。通讯处:西安市西北大学地质系,邮政编码:710069。