

裂缝性油藏测井资料定量解释

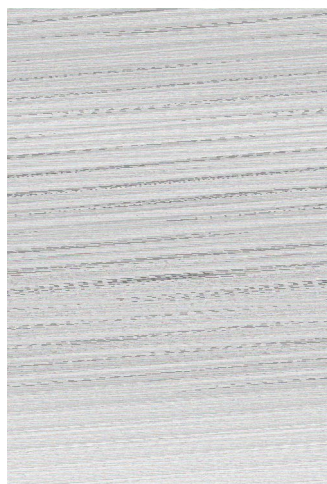
谭廷栋

(石油工业部石油勘探开发科学研究院)

本文论述了利用测井资料确定碳酸盐储层孔隙度、含水饱和度和渗透率的方法。对裂缝与岩块分别解释,有助于正确评价裂缝性油藏,提高勘探效果。

一、确定孔隙度

碳酸盐岩裂缝性油藏存在两种孔隙系统,一种是由裂缝和溶洞构成的裂缝孔隙系统,另一种是由粒间孔隙构成的岩块孔隙系统。岩块孔隙分布均匀,裂缝孔隙分布不均匀。在大多数情况下,裂缝孔隙度小于岩块孔隙度。图1A代表实际储集层,有裂缝、溶洞和岩块;图1B代表模型储集层,溶洞与裂缝合并在一起,岩块由垂直裂缝和水平裂缝网络



溶洞

岩块

A

B

岩块

模型

图1 裂缝性油藏储集层模型^[1]

A—实际储集层, B—模型储集层

1. 确定裂缝孔隙度

裂缝孔隙度 ϕ_f 定义为裂缝孔隙容积 V_f 与裂缝岩石总体积 V 之比:

$$\phi_f = V_f / V \quad (1)$$

图1模型是一个立方体模型,设每个立方体的边长为 a ,裂缝宽度为 b ,则

$$\phi_f = \frac{(a+b)^3 - a^3}{(a+b)^3} \approx \frac{3b}{a} \quad (2)$$

式(2)表明,裂缝孔隙度与裂缝宽度成正比,而与岩块边长成反比。

T. D. van Golf-Racht 给出的裂缝孔隙度经验估计值^[1]列于表1。

表1 裂缝孔隙度经验估计值^[1]

类	型	变化范围(%)
网状大裂缝孔隙度		0.01—0.5
孤立的微裂缝孔隙度		0.001—0.01

裂缝孔隙度,示于图2右边第3道(细实线)。

应用式(3)算出该油田白云岩裂缝性油藏裂缝孔隙度(包括溶洞孔隙度在内)平均为1%,与油田开发数学模拟获得的裂缝孔隙度基本一致。裂缝孔隙度虽然很小,但它储藏可采石油的能力很高。在裂缝性油藏中,1%的裂缝孔隙所储藏的石油可采量,相当于5—8%的岩块孔隙储藏的石油可采量。

2. 确定岩块孔隙度

岩块孔隙度 ϕ_b 定义为岩块孔隙体积 V_b 与裂缝岩石总体积 V 之比:

$$\phi_b = V_b / V \quad (4)$$

基块孔隙度 ϕ_m 定义为岩块孔隙体积 V_b 与岩块体积 V_r 之比:

$$\phi_m = V_b / V_r \quad (5)$$

岩块孔隙度小于基块孔隙度,它们之间的关系是:

$$\phi_b = \phi_m (1 - \phi_f) \quad (6)$$

通常,利用测井资料确定岩块孔隙度,利用岩心确定基块孔隙度。用式(6)亦可将基块孔隙度转换成岩块孔隙度。

除低角度裂缝外,高角度裂缝和溶洞对声波(纵波)测井没有响应。因此,可以用它近似地确定岩块孔隙度:

$$\phi_b = \frac{\Delta t_c - \sum_{i=1}^N V_{mai} \Delta t_{mai}}{\Delta t_f - \sum_{i=1}^N V_{mai} \Delta t_{mai}} \quad (7)$$

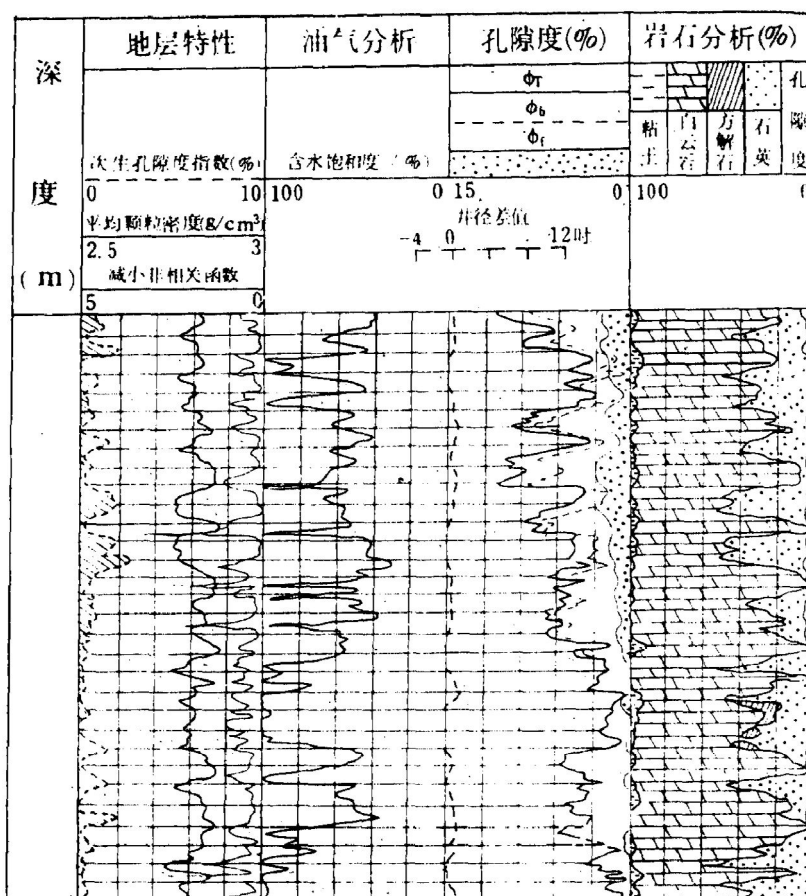


图2 测井定量解释成果图

式中 Δt_e ——纵波时差 ($\mu\text{s}/\text{m}$),

Δt_f ——流体时差,

Δt_{ma} ——骨架时差,

V_{ma} ——矿物含量 (%),

N ——矿物种数。

裂缝性储层很少是由一种矿物组成的。为了求准岩块孔隙度,应对多矿物骨架时差进行校正。根据中子与岩性-密度测井确定的岩石矿物成分,示于图2右边第4道。应用式(7)计算的岩块孔隙度,示于图2右边第3道(虚线)。任丘油田白云岩裂缝性油藏,测井确定的岩块孔隙度为2—3%,而岩心分析确定的基块孔隙度为2.15%。

3. 确定总孔隙度

裂缝性储层的总孔隙度 ϕ_t 等于裂缝孔隙度与岩块孔隙度之和:

$$\phi_t = \phi_f + \phi_b \quad (8)$$

根据式(3)、(7)、(8)算出的任丘油田白云岩储层总孔隙度为3—4%。图2右边第3道(粗实线)表示总孔隙度。

此外,中子与密度测井也能确定岩石总孔隙度。人们习惯于把中子与密度测井交会孔隙度同声波测井孔隙度之差,称为次生孔隙度指数,用来定性指示裂缝渗透带:

$$SPI = \phi_{ND} - \phi_s \quad (9)$$

式中 SPI——次生孔隙度指数,

ϕ_{ND} ——中子与密度测井交会孔隙度,

ϕ_s ——声波测井孔隙度。

应用式(9)计算的次生孔隙度指数,示于图2左边第1道(点线)。在低孔隙裂缝性油藏中,使用中子与密度测井确定的岩石总孔隙度,达不到精度要求,一般只用于定性解释。孔隙度是估计裂缝性油藏石油储量的重要参数。由于裂缝孔隙采收率高于岩块孔隙采收率,应该分别估计裂缝孔隙与岩块孔隙的石油储量。

二、确定含水饱和度

在裂缝性油藏中,同样存在两种含水系统,即裂缝孔隙含水系统与岩块孔隙含水系统。裂缝孔隙含水饱和度远远低于基块孔隙含水饱和度。

1. 确定裂缝孔隙含水饱和度

裂缝孔隙含水饱和度 S_{wf} 指的是裂缝孔隙含水体积 V_{wf} 与裂缝孔隙体积 V_f 之比:

$$S_{wf} = V_{wf} / V_f \quad (10)$$

根据图1模型,可建立计算裂缝壁束缚水饱和度的公式如下:

$$S_{wf} = \frac{(a+b_w)^3 - a^3}{(a+b)^3 - a^3} \approx \frac{3b_w}{2b} \quad (11)$$

式(11)表明,裂缝孔隙含水饱和度与裂缝壁束缚水厚度 b_w 成正比,而与裂缝宽度 b 成反比。法国石油研究院测定过碳酸盐岩裂缝壁束缚水膜的厚度, $b_w = 0.32 \mu\text{m}$ ^[2]。因此,只要裂缝宽度大于 $10 \mu\text{m}$,裂缝孔隙含水饱和度就小于5%,可以忽略不计。由于裂缝含水饱和度极低,裂缝原始含油饱和度特别高。

到目前为止,还不能根据测井资料直接确定裂缝孔隙含水饱和度。

2. 确定岩块孔隙含水饱和度

岩块孔隙含水饱和度 S_{wb} 指的是岩块孔隙含水体积 V_{wb} 与岩块孔隙体积 V_b 之比:

$$S_{wb} = V_{wb} / V_b \quad (12)$$

岩心分析表明,岩块孔隙含水饱和度变化范围很大。当岩块孔隙度小于5%时,含水饱和度大于50%;当岩块孔隙度为5—8%时,含水饱和度为25—50%;当岩块孔隙度大于8%时,含水饱和度为25%^[1]。

除了可用岩心确定岩块孔隙含水饱和度外,还可用测井资料计算岩块孔隙含水饱和度^[5]:

$$S_{wb} = \left(\frac{AR_w}{\phi_b^m R_{fb}} \right)^{\frac{1}{n_b}} \quad (13)$$

式中 R_{fb} ——岩块真电阻率,

R_w ——地层水电阻率,

m_b ——岩块孔隙度指数,

n_b ——岩块饱和度指数,

A ——阿尔奇经验常数。

裂缝性油藏岩块真电阻率由下式确定^[5]：

$$R_{tb} = \left(\frac{1}{R_d} - \frac{\phi_f^{m_f}}{R_m} \right)^{-1} \quad (14)$$

岩块真电阻率与邻层（非裂缝层）真电阻率不同，不能用邻层真电阻率代替岩块真电阻率。

3. 岩石总孔隙含水饱和度

裂缝性油藏岩石总孔隙含水饱和度 S_{wt} 等于裂缝孔隙含水饱和度与岩块孔隙含水饱和度的算术加权平均值。以 v_f 表示裂缝孔隙度分布指数（裂缝孔隙度与岩石总孔隙度之比），则

$$S_{wt} = v_f S_{wf} + (1 - v_f) S_{wb} \quad (15)$$

任丘油田白云岩裂缝性油藏裂缝孔隙度分布指数为25—33%。由式(11)、(13)和(15)算出的该油田白云岩裂缝性油藏岩石总孔隙含水饱和度为22—24%。

此外，也可以用双侧向测井经过侵入校正的地层电阻率 R_{ic} ，计算岩石总孔隙含水饱和度：

$$S_{wt} = \left(\frac{AR_w}{\phi_i^m R_{ic}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

应用式(16)计算的岩石总孔隙含水饱和度，示于图2左边第2道。式中 m 为总孔隙度指数， n 为总孔隙饱和度指数。

必须指出，当泥浆侵入裂缝深度超过深侧向测井探测深度时，应用式(16)算出的裂缝性油藏岩石总孔隙含水饱和度偏高。如图2所示，用式(16)算出的岩石总孔隙含水饱和度为40—90%，显然不合理。

三、确定渗透率

裂缝性油藏存在两种渗透系统，即裂缝渗透系统与岩块渗透系统。通常，裂缝渗透率高于岩块渗透率几百倍，甚至几千倍。

1. 确定裂缝渗透率

在裂缝性油藏中，裂缝渗透率有两种：固有裂缝渗透率与岩石裂缝渗透率。固有裂缝渗透率 K_{if} (mD) 只与张开裂缝宽度 b (μm) 有关^[3]：

$$K_{if} = 0.8333 b^2 \quad (17)$$

例如，已知张开裂缝宽度为100 μm ，则固有裂缝渗透率为8333 mD。可见固有裂缝渗透率特别高。

使用双侧向测井可确定张开裂缝宽度^[4]：

$$b = 2500 R_m \left(\frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_d} \right) \quad (18)$$

应用式(18)计算任丘油田白云岩裂缝性油藏张开裂缝宽度，获得了比较满意的结果。

果。

岩石裂缝渗透率 K_f 等于裂缝孔隙度与固有裂缝渗透率的乘积:

$$K_f = \phi_f K_{ff} \quad (19)$$

在油藏工程中, 通常用岩石裂缝渗透率计算石油产量。

2. 确定岩块渗透率

裂缝性油藏岩块渗透率指的是无裂缝时岩石的渗透率。岩块渗透率 K_b 与岩块孔隙度 ϕ_b 的经验关系式如下^[1]:

$$K_b = e^{7.47\phi_b + 0.506} \quad (20)$$

例如, 如果由式(7)确定的 ϕ_b 为 0.02, 则岩块渗透率为 1.93 mD。

3. 确定岩石总渗透率

裂缝性油藏岩石总渗透率 K_t 等于岩石裂缝渗透率与岩块渗透率之和:

$$K_t = K_f + K_b \quad (21)$$

总渗透率的大小, 与流体在裂缝性储层中的流动方向有关。

参 考 文 献

- [1] van Golf-Racht, T.D., 1982, *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York.
- [2] Reiss, L.H., 1980, *The Reservoir Engineering Aspect of Fractured Formation*. Gulf Publishing Company, Book Division, Houston Texas.
- [3] Aquilera, R., 1980, *Naturally Fractured Reservoir*. Petroleum Publishing Company. New York.
- [4] Alardo, D.J. et al., 1985, *Well Evaluation Conference China 1985*. Tien Wah Press, Singapore.
- [5] 谭廷栋, 1983, 地球物理学报, 第26卷, 第6期。

QUANTITATIVE LOG INTERPRETATION OF FRACTURE RESERVOIR

Tan Tingdong

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and
Development, Ministry of Petroleum Industry)

Abstract

This paper discusses the method for determining the porosity, water-saturation and permeability of the carbonate reservoir by log data. A cube model is used, so that the rock-blocks and fractures can be distinguished and get interpretation respectively.