

文章编号: 1001-6112(1999)03-0266-04

# 低渗透储集层中的泥岩裂缝储集体

曾联波, 肖淑蓉

(石油大学, 北京 102200)

**摘要:** 在低渗透储集层中, 由于泥岩夹层的成份不纯, 常含灰质、云质、钙质等脆性矿物, 极大地提高了泥岩的脆性程度, 它们在构造应力作用下容易形成裂缝, 使泥岩中构造裂缝较发育。泥岩层中不同组系与不同倾角的构造裂缝和非构造裂缝相互沟通, 常组成裂缝三维网络系统, 使泥岩夹层的渗透性大大增加, 泥岩中裂缝一般具有较好的含油性。因此, 低渗透储层中的泥岩一般不能起真正的隔层作用, 应划分为准储层或泥岩裂缝储集体, 其油藏类型为块状油藏。

**关键词:** 裂缝; 泥岩; 低渗透储集层

**中图分类号:** TE348

**文献标识码:** A

在低渗透油气田的勘探和开发中, 人们往往比较注重储层中裂缝的分布和发育情况以及它们对开发的影响, 而对储层之间泥岩夹层中裂缝的发育程度及其所起作用大小未能引起充分的重视, 通常按其岩性结构特征和实验室分析数据, 普遍地认为泥岩夹层为不渗透层, 而将它们划分为隔层, 从而按层状油藏进行油气田开发。实际上, 由于低渗透储层泥岩夹层中裂缝的普遍存在以及裂缝的渗流作用, 常使这些泥岩层变成渗透层而不能起真正的隔层作用, 它们属于假隔层, 甚至可成为泥岩裂缝储集体。这种现象在我国东部和西部不同构造环境下的低渗透油气储集层中普遍存在, 如火烧山油田、静北油田等均属于此类, 在这类油气田勘探和开发中应特别注意。

## 1 低渗透储层泥岩层中裂缝的类型及分布特征

根据其成因, 低渗透储层泥岩层中的裂缝可分为构造裂缝和非构造裂缝两种类型。

### 1.1 构造裂缝

在低渗透储层的泥岩夹层中, 由于其成份不纯, 常含灰质、云质、钙质等脆性矿物, 它们极大地提高

了泥岩的强度和脆性程度, 因此, 在受到构造应力作用时, 泥岩和储层岩石一样, 容易发生脆性破裂形成裂缝, 使泥岩中构造裂缝同样较发育。与储层岩石相比, 泥岩层的塑性相对较大, 岩石变形主要表现为剪切破裂, 因而使泥岩中的构造裂缝主要为高角度剪切裂缝和张剪性裂缝, 它们通常呈组出现, 与层面近垂直, 具有明显的方向性, 并有比较平整的裂缝面特征。泥岩中这种高角度的构造裂缝主要在岩层内发育, 部分可切穿泥岩层面延伸至储层的穿层裂缝。

在低渗透储层的泥岩中, 常常还发育有与岩层面大致平行的另一类构造成因的裂缝——低角度滑脱裂缝, 它们主要分布在泥岩层的顶部和底部, 尤其是在靠近储集层的部位发育。这类裂缝的倾角较小(图 1), 但倾向变化较大, 在裂缝面上常见有明显的擦痕和镜面特征。这类低角度滑脱裂缝主要是在伸展或挤压作用下, 由于顺层滑的剪切应力作用产生滑脱而形成。

### 1.2 非构造裂缝

泥岩中的非构造裂缝包括有干燥裂缝、脱水裂缝、热收缩裂缝、矿物相变裂缝以及与表生作用有关的卸载裂缝和风化裂缝等, 尤其以在沉积或成岩过程中, 由于压实和压溶等作用, 形成与层面大致平行的成岩裂缝(包括缝合线构造)为主。这类裂缝的分

收稿日期: 1997-03-26

作者简介: 曾联波(1967-), 男(汉族), 湖南沅江人, 讲师, 主要从事低渗透储层裂缝、构造应力场与构造地质学的教学和研究

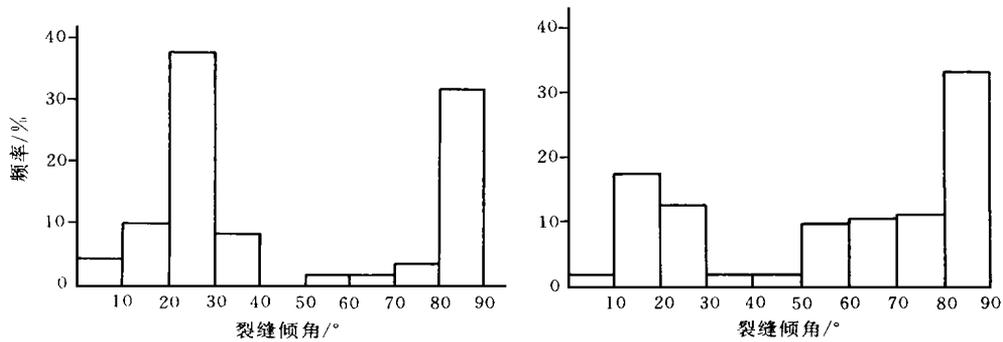


图1 低渗透储集层泥岩层中裂缝倾角分布频率图

(左图为大安油田,右图为火烧山油田)

Fig. 1 Histogram of fracture dips for mudstone beds in tight reservoirs

布随机性很大,不受构造影响,其规模很小,纵向上切穿深度局限。成岩裂缝一般分布在岩性界面上,分布不规则,顺层面具有弯曲、断续、分枝、尖灭等现象,常有较好的延伸性和连通性,以微观裂缝居多。

在泥岩中有时还可见顺着层面分布且被沥青质充填的水平裂缝,裂缝中沥青脉的宽度一般为0.5~2mm,最大可达1~2cm。裂缝的形态不规则,在水平方向延伸较短。经测定,裂缝中沥青的镜质体反射率可达到0.7%,其成因可能与油气运移过程中的异常高压有关。

## 2 低渗透储层泥岩层中裂缝的发育程度

泥岩层中裂缝的发育情况是其成为假隔层和泥岩裂缝储集体的一个重要因素,它主要与泥岩中含脆性矿物组分的高低和所处构造部位及构造强度有关。大量统计表明,随着泥岩中脆性矿物成分含量的增加,岩石的强度和脆性程度提高,则泥岩层中裂缝的密度增大<sup>[1]</sup>。从整体上看,虽然泥岩层中宏观裂缝的密度比储层略低,但由于泥岩中呈树状不规则分布的成岩裂缝发育,因此,低渗透储层泥岩夹层中的裂缝一般都比较发育。例如,吉林大安油田岩心上宏观裂缝,用分形几何方法计算可得,储集层中裂缝的分数维D值为1.1~1.3,而泥岩层中裂缝的分数维D值为0.9~1.2;储集层中微观裂缝用薄片面积法测得其面密度为0.74cm/cm<sup>2</sup>,而泥岩层中微观裂缝的面密度为0.93cm/cm<sup>2</sup>(表1),两者相差较小,泥岩层中同样具有较发育的裂缝分布。

在相同条件下,随着岩石应变的增强,岩石的破

裂程度增大,则岩石中裂缝密度增加,因而常常在构造高部及断层附近等部位,由于应力较大,则泥岩中的裂缝更发育。在泥岩中裂缝密集发育段,它们常常成为泥岩破碎带,使泥岩的取心收获率极低,泥岩中裂缝难以识别,这种现象在低渗透储层中时常可见。

表1 大安油田泥岩层与砂岩储层中裂缝发育程度对比

Table 1 Comparison of fracture-developing degree between mudstone and sandstone reservoirs in Da'an oil field

| 岩性层位 | 岩心上宏观裂缝的分数维D值 | 成岩裂缝面密度/cm/cm <sup>2</sup> | 微观构造裂缝面密度/cm/cm <sup>2</sup> |
|------|---------------|----------------------------|------------------------------|
| 泥岩层  | 0.9~1.2       | 0.33                       | 0.41                         |
| 储集层  | 1.1~1.3       | 0.11                       | 0.82                         |

和储集层中裂缝一样,泥岩中裂缝的组系与方位主要受古构造应力场的3个主应力产状控制,因此储集层及其泥岩夹层中的裂缝组系通常一致。根据岩心、测井及裂缝的数值模拟研究表明,在东部伸展构造区低渗透储层的泥岩层中,主要发育3组裂缝,它们受拉张应力场的控制;而在西部挤压构造区,由于受挤压应力场的作用,主要发育有4组裂缝,泥岩中不同方位、不同倾角以及不同成因类型的裂缝在平面上和纵向上相互连通,并通过层面、水平裂缝和穿层裂缝与储层及其裂缝系统相沟通,它们共同组成了裂缝的整体三维网络系统,从而控制了泥岩中横向和垂向上的有效渗流系统。

## 3 低渗透储层泥岩中裂缝的渗透性

泥岩的渗透性是决定泥岩夹层是否起隔层作用的主要指标,也是决定其是否成为泥岩裂缝储集体的主要因素。但由于受实验条件的限制,泥岩中有裂

缝时的总有效渗透率一般很难求得, 实验测定数据通常仅代表无裂缝时泥岩基质的渗透率, 其数值很小, 故泥岩总有效渗透率可以近似地用裂缝有效渗透率来表示。

根据泥岩中不同级别裂缝的分布特征, 泥岩中裂缝的渗透率可用薄片面积法和蒙特卡罗逼近法进行计算和统计<sup>[2]</sup>, 其公式为:

$$K_f = C \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n l_i e_i^3$$

式中:  $i$  代表样品中每条裂缝的符号,  $l_i$  代表第  $i$  条裂缝的长度,  $e_i$  代表第  $i$  条裂缝的开度,  $n$  为样品中裂缝的总数,  $A_s$  为样品的面积,  $C$  为比例系数, 对随机分布的裂缝,  $C$  值可取为  $1.71 \times 10^6$ 。

上式表明, 裂缝的渗透率和裂缝开度的三次方成正比, 裂缝的地下开度对裂缝的渗透性起决定性作用, 因此, 恢复至地下围压状态下泥岩裂缝的原始开度对评价裂缝的渗透性能显得尤为重要。通常高温高压物理模拟等方法对东部和西部不同低渗透油田中裂缝地下开度的研究表明, 泥岩中裂缝的地下开度比砂岩或碳酸盐岩中裂缝开度普遍要小, 在目前低渗透储层的埋藏深度范围内, 泥岩中裂缝的原始地下开度一般为  $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 。根据各油田泥岩层中裂缝的开度及密度分布, 用上述方法计算泥岩中裂缝(包括宏观和微观裂缝)的渗透率通常比实验室分析数据大  $1 \sim 2$  个数量级以上, 并远远大于储层的基质渗透率(表 2)。例如, 火烧山油田低渗透砂岩储层的泥岩夹层中, 由于普遍含白云质和钙质等组分, 在构造作用下发育多组裂缝, 岩心上宏观裂缝的平均线密度达  $2.92$  条/米, 微观裂缝的平均面密度达  $0.62 \text{ cm}^2/\text{cm}^2$ , 泥岩中各类裂缝的孔隙度为  $0.18\%$ , 而裂缝渗透率在  $100 \times 10^3 \mu\text{m}^2$  以上。

造成泥岩不能起真正隔层作用的另一关键因素是其与上下储集层的连通情况及泥岩层的纵向渗透

性。造成泥岩层与上下储集层相连通的因素有 3 个: 一是穿层裂缝的发育, 二是顺层面分布的成岩裂缝和层间滑脱裂缝, 三是泥岩的层面。尤其是穿层裂缝和与层面近平行的成岩裂缝及滑脱裂缝的发育, 对提高泥岩夹层的纵向渗透性能起了决定性的作用。从显微观察可看出, 泥岩界面也可以成为油气的顺层通道, 油气可沿着界面通道运移到上下储层中的裂缝(尤其是垂直裂缝)发育部位, 并与上下储层相沟通, 这也是泥岩夹层分隔作用明显减弱而成为泥岩裂缝储集体的一个重要原因。

#### 4 结论及建议

根据作者近几年对东部和西部多个低渗透油气储层研究, 可以认为:

(1) 在低渗透储层泥岩中, 由于裂缝网络系统的存在, 使泥岩层的渗透性能明显增大, 泥岩层通常不能起真正的隔层作用, 应划分为假隔层。

(2) 根据岩心、显微薄片及荧光分析表明, 泥岩中的裂缝通常具有较好的含油性, 表明它们在地下既能起储集作用又能起渗流通道作用, 因此, 泥岩层可划分为准储层或泥岩裂缝储集体, 其油藏类型应属于块状油藏, 它们具有统一的水动力系统和水油界面。故在油藏的储量计算中应包括这部分在内, 当泥岩中裂缝较发育时, 可获得可观的产能, 如火烧山油田泥岩夹层中 28 口井的 31 个非油层井段出油, 获得了  $15.2 \text{ t/d}$  的产能就是良好的例证。

(3) 在低渗透油气田的开发中, 泥岩夹层中裂缝的研究十分必要, 对开发井网的布置和注水效果的分析具有重要指导意义。当泥岩中裂缝较发育时, 容易造成泥岩层吸水严重, 而使油层的吸水指数下降, 甚至造成层间水淹水窜, 此时应严格控制注水压力低于裂缝延伸压力, 对降低泥岩吸水量, 防止水淹水窜有重要作用。

表 2 一些低渗透储层泥岩中裂缝的参数

Table 2 Parameters of fractures for mudstone in some tight reservoirs

| 油田名称  | 宏观裂缝线密度<br>/条/米 | 微观裂缝面密度<br>/ $\text{cm}^2/\text{cm}^2$ | 宏观裂缝渗透率<br>/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 微观裂缝渗透率<br>/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 储层基质渗透率<br>/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ |
|-------|-----------------|--|---|---|---|
| 火烧山油田 | 2.92            | 0.62                                   | 121.7                                       | 31.25                                       | 1.9   |
| 雷加油田  | > 10            | 0.77                                   | 188.5                                       | 39.2  | 2.32  |
| 大安油田  | 1.96            | 1.02                                   | 81.7  | 18.6  | 2.1   |
| 静北油田  | > 10            | 2.1                                    | 407.7                                       | 102.5                                       | 10~15                                       |

(4) 泥岩层界面一般为应力分布的异常部位, 尤其当泥岩中顺层滑脱裂缝发育, 注水破坏其应力平衡时, 甚至可引起泥岩层的滑脱, 产生套管变形或断裂等现象。因此, 在油气田开发时, 应较好地控制注水部位、注水压力和注水量。

#### 参考文献:

- [1] R A 纳尔逊著, 柳广第, 等译. 天然裂缝性储集层地质分析 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
- [2] J hH Howard, Richard C Nolen-Hoeksema 何成效译, 论石油地质学中天然裂缝系统的定量分析 [J]. 天然气勘探与开发, 1991, (2).

## FRACTURES IN THE MUDSTONE OF TIGHT RESERVOIRS

ZENGLian-bo, XIAO Su-rong

*(Department of Geosciences, Petroleum University, Beijing 102200, China)*

**Abstract:** In tight reservoirs, lime, mica, calcareous and other brittle mineral often exist because the composition of mudstone interbeds is impure. This greatly heightens the brittle degree of mudstone, and makes it liable to form fractures under tectonic stress. So tectonic fractures are relatively developed in mudstone. Different series and different dips of tectonic fractures in mudstone interbeds are interconnected with non-tectonic fractures often to form the 3-D network system of fractures. This makes the permeability of mudstone interbeds greatly increased and the fractures in mudstone commonly have better oil-bearing features. Thus, the mudstone in tight reservoirs generally cannot perform a true sealing function and can be classified as quasireservoirs or fractures reservoirs of mudstone. Their accumulation patterns are massive.

**Key words:** fractures; reservoirs; mudstone; tight fields of gas and oil