

文章编号: 1001-6112(2000)03-0225-07

断裂活动与油气藏保存关系研究

罗 群^{1,2}, 孙宏智³

(1. 大庆石油学院, 黑龙江 安达 151400; 2. 中油公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 大庆油田有限责任公司 勘探部, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 断裂对油气藏的破坏是一个普遍的现象。本文在分门别类解剖断层破坏油气藏典型实例的基础上, 探讨了断层破坏油气藏的机理, 确立了断层破坏油气藏的分类指标体系并将断层对油气藏的破坏分为 3 大类 9 小类 27 种类型, 建立了断层破坏油气藏的 4 种模式, 最后提出了定量评价断层破坏油气藏的地质概念模型和数学模型。

关键词: 模型; 类型; 保存; 油气藏; 断裂

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

油气藏的保存与破坏是油气成藏以后的演化过程中矛盾运动的两个对立统一的方面。由于地史过程中构造运动与变动频繁发生, 油气藏无疑要受到构造运动的影响, 其演化向两个方向发展, 一是向有利于油气藏保存并使油气更富集的方向发展, 一是向破坏油气藏的方向发展。下面着重讨论断裂对油气藏的破坏作用, 并用来说明断裂活动与油气藏保存条件的关系。

1 断裂破坏油气藏的情况

1.1 后生断裂对原生油气藏的破坏

油气藏形成以后, 由于后期构造运动在油气藏部位产生新的断裂, 切割油气藏, 打破了原生油气藏的物理-化学平衡, 油气将沿断裂面(带)这个相对低势区迅速逸散, 油气藏遭破坏。破坏的程度与断层切割圈闭形成的溢出点的高低、断层是否断至地表、断层重新封闭的时间等因素有关。显然, 溢出点越高, 断层重新封闭的时间越长, 断裂带越宽, 油气藏遭破坏的程度就越大。据断层是否断至地表, 可进一步分为下面两类。

1.1.1 断至地表的断裂对油气藏的破坏

这种类型的断裂对原生油气藏的破坏程度很大。由于地下深处的高压条件下的油气藏与地表常压环境相连通, 巨大的压力差将使油气沿纵向开启的断层通道迅速逸散到地表。

许多情况下油气沿断裂逸散到地表, 油气藏遭破坏的过程并非永远持续下去。随着逸散到地表的油气被氧化形成沥青塞而将断裂重新封闭, 下倾方向未逸出的油气得到保护, 从而形成沥青封闭型油气藏。柴达木盆地冷湖四、五号油田被主断裂所切割, 沿主断裂带分布着沥青、地蜡, 它们使这两个油田被保存下来。

1.1.2 断裂未断至地表的情况

当断裂作用使油层的一部分与上方储层连通时, 可使原有油气藏圈闭容积变小, 并使溢出点以下的油气沿断裂向上方储层中运移, 在新的圈闭内聚集成新的油气藏。其结果是, 使原先单一的油气藏分解成若干个油气藏, 以致油气藏的规模和价值都相应减小, 笔者称之为断裂对油气藏的分散效应。塔里木盆地库车坳陷轮南 2 号油藏就是由于后期断裂破坏而重新分布的油气藏。海拉尔盆地的乌西断

收稿日期: 1999-12-24; 修订日期: 2000-05-29.

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(95-101-01-05).

作者简介: 罗群(1963-), 男(汉族), 四川乐山人, 硕士、副教授, 主要从事油气藏形成机理与资源评价的教学和科研工作.

裂也是典型例子。

当油田中存在多油层,且最上部都存在良好的储集层和盖层时,断裂作用可以使多油层中的油气沿断裂向上方储集层中富集,形成巨大储量的油气藏,笔者称之为断裂对油气藏的集中效应。波斯湾盆地扎格罗斯山前带的许多巨大油气田都具这种特点。那里的油田大多存在于 3 个主要含油层即上侏罗统灰岩、白垩系灰岩和第三系主灰岩中。后期断裂的作用沟通了下面两个主要含油层与第三纪主灰岩储集层,使前两者地层中的油气藏遭破坏,油气沿断裂在第三纪主灰岩中集中,从而使第三纪主灰岩成为富集油气的主力油层,形成巨大的油气储量。

1.2 先存断裂封闭性变差而导致断层油气藏的破坏

1.2.1 由于构造运动造成断裂重新活动,油气藏被破坏

目前的勘探表明,陆相盆地中受断层遮挡而形成的油气藏是相当普遍的^[1]。显然,一旦作为遮挡条件的断层的封闭性变差,油气将沿断裂散逸。而作为构造薄弱带的断裂,总是后期构造运动应力集中和释放的地带。因此,先期封闭的断裂极易被后期构造运动重新激活,断层开启,从而破坏原来的油气藏。

1.2.2 由于地质条件和环境的改变致使断层封闭性变差,油气藏遭破坏

与前面的情况相比,这是一个逐渐、缓慢的过程。

任何事物的发展不可能是一成不变的,断层的封闭能力也是一样,随着地质条件的变化可能变好,也可能变差。造成断层封闭性变差的因素有:地下水沿断裂带的溶解、淋滤作用造成断裂逐渐变得开启;地应力的作用使断裂带产生裂缝,或由于地应力转向使断裂处于拉张环境(但并未造成断层的活动);由于温度、压力的变化造成断层带物质的孔、渗性变化,如压溶作用使断裂带物质溶解等;断层上、下盘地层由于压实、成岩、胶结等作用使物性改变而使断层横向封闭性变差,等等。

2 断裂破坏油气藏的机理及“保存”与“破坏”的关系

油气藏是一种流体矿床,对温度、压力等因素的变化十分敏感。油气藏是各种物理、化学等因素处

于一种动态平衡状态下的油气分布体系。这种平衡状态是比较脆弱的。由构造运动产生的断裂活动是地下巨大能量的快速释放,其作用和产生的效应对油气藏的破坏是致命的。断裂的产生或重新活动,突然打破了油气藏原有的压力平衡。这时,作为流体的油气便在压力差的驱使下迅速由高势区(原来的油气藏)从新的溢出点向低势区(断裂带内)运移,以达到新的压力平衡,由此导致油气藏的破坏。由于断裂封闭性变差而致使油气藏的破坏,本质上也是由于地质条件和环境的改变打破了油气藏原有的物理-化学平衡而在新的条件下重新达到新的平衡时,实现了油气的再分配。

油气藏的形成和破坏是矛盾运动的两个方面,是油气的供给和散失处于的一种平衡状态。当以前者为主时,油气藏处于建设阶段;当后者占主导地位时,油气藏处于破坏的状态。因此,断层的存在与否及断层封闭性的变化对这种平衡状态起重要的制约作用。

对于一个具体的断层圈闭,在某一阶段,断层的封闭性是相对稳定不变的。如果有油气供给时,起初由于油气的剩余压力小于断层的遮挡能力(排替压力),油气被遮挡聚集成藏;当油气聚集到一定程度时,油气的剩余流体压力达到或超过断层的遮挡能力,有一部分油气穿过断层而流失,这时油气藏处于一种相对稳定的平衡状态。无论油气的供给如何充分,断层遮挡油气的量是一定的。一旦由于断层封闭能力变差,油气的供给速度小于油气的散失速度时,对油气的破坏作用便开始了。如果断层封闭性继续变差,必然导致油气藏的完全破坏;如果断层封闭性又变好(尽管这时仍有油气流失),使油气供给量大于散失量,断层的破坏作用便停止了,而进入了有利于油气聚集的状态。因此,就断层对油气藏的破坏作用的理解,应该用辩证的、动态的、历史的观点去分析。

综上所述,油气的聚集和油气藏的破坏本质上是由油气供给速度与油气散失速度二者的关系所决定的。当油气供给速度大于油气散失速度时,油气逐渐聚集成藏;当油气供给速度小于油气散失速度时,油气藏遭破坏;当油气供给速度等于油气散失速度时,油气藏处于动态平衡状态。而断裂对油气藏的破坏本质上是由于断裂的产生或断裂的重新活动或断裂封闭性的降低而导致油气散失速度大于油气供给速度。断裂对油气藏保存与破坏作用见图 1。

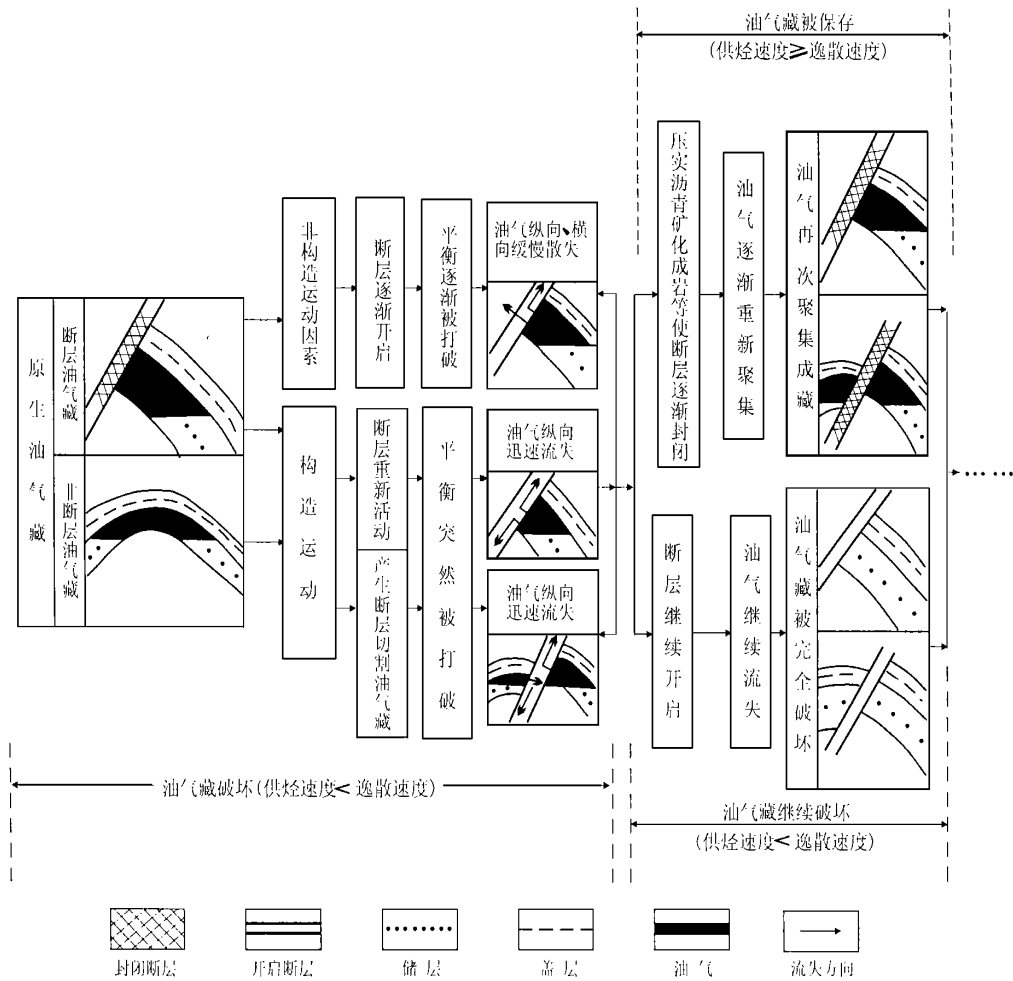


图 1 断层对油气藏保存和破坏动态模型

Fig. 1 The dynamic model showing the preserving and destroying of oil and gas accumulation caused by faults

3 断层对油气藏破坏类型的确定

断层对油气藏破坏的分类首先应考虑油气散失的方向,其次是油气散失的速度,最后考虑油气藏被破坏的结果(程度)。

3.1 油气散失的方向为一级分类指标

与断层有关的油气藏的破坏是由于断层的封闭性变差而导致的(新产生的断裂对油气藏的破坏可视为断层由于构造运动重新突然活动的情况等同看待)。断层的封闭性包括断层的横向封闭性和断层的纵向封闭性两个方面。因此,我们将由于断层的纵向封闭性变差而造成油气沿断层面(带)纵向散失破坏的情况称为纵向逸散型;将由于断层的横向封

闭性变差而导致油气穿越断层面进入对盘地层中散失的情况称为横向调整型;如果断层的纵、横向封闭性同时变差而造成两者情况皆有时,则称之为双向破坏型。

3.2 油气藏被破坏的速度为二级分类指标

油气藏被破坏的速度分为: 由于后期构造运动而造成断层封闭性突然变差,油气藏遭突然快速的破坏,这种情况称为突发型; 由于非构造运动的原因造成断层封闭性逐渐变差,油气缓慢流失,这种情况称为慢流型; 在一个破坏周期内由于断层封闭性时好时坏而造成油气间歇性流失,这种情况称为间歇型。

3.3 油气藏被破坏的程度为三级分类指标

油气藏完全被破坏,且油气沿断层完全散失到

地表,这种情况称为完全散失型;断裂断至地表,但由于封闭性变好,油气藏中的油气只是部分沿断层散失到地表,部分被保存下来,这种情况称为部分散失型;断裂未断至地表,油气藏中的部分油气沿断裂运移到新的圈闭中重新聚集成藏,油气总的数量没有改变(即没有油气散失到地表),这种情况称为重新分配型。

这三级分类指标构成一个分类指标体系。将它们按顺序组合在一起,得到断层破坏油气藏的类型(表 1),共 3 大类 9 小类 27 种基本类型。由一级指标组成纵向逸散型、横向流失型和双向破坏型 3 大类,由一级指标与二级指标组合为纵向逸散突变型

等 9 小类,由一、二、三级指标组合成纵向突发完全散失型等 27 种基本类型。显然,研究程度越高,分类越详细。

4 断层破坏油气藏的地质模式

4.1 构造运动导致的断层破坏油气藏模式

后期构造运动造成断裂的活动和开启并断至地表,断裂带成为一个高渗低压的通道,油气藏中的油气在高压差下突破油气藏的遮挡带(面)而迅速涌入断裂带内进行纵向运移即纵向渗漏散失于地表,油气藏遭破坏。

表 1 断层破坏油气藏分类指标与基本类型

Table 1 Basic types and classifying indexes for faults destroying oil and gas accumulation

一级指标	二级指标	三级指标	断层破坏油气藏的基本类型
纵向逸散	突发	完全散失	纵向突发完全散失型
		部分散失	纵向突发部分散失型
		重新分配	纵向突发重新分配型
	间歇	完全散失	纵向间歇完全散失型
		部分散失	纵向间歇部分散失型
		重新分配	纵向间歇重新分配型
	慢流	完全散失	纵向慢流完全散失型
		部分散失	纵向慢流部分散失型
		重新分配	纵向慢流重新分配型
横向流失	突发	完全散失	横向突发完全散失型
		部分散失	横向突发部分散失型
		重新分配	横向突发重新分配型
	间歇	完全散失	横向间歇完全散失型
		部分散失	横向间歇部分散失型
		重新分配	横向间歇重新分配型
	慢流	完全散失	横向慢流完全散失型
		部分散失	横向慢流部分散失型
		重新分配	横向慢流重新分配型
双向破坏	突发	完全散失	双向突发完全散失型
		部分散失	双向突发部分散失型
		重新分配	双向突发重新分配型
	间歇	完全散失	双向间歇完全散失型
		部分散失	双向间歇部分散失型
		重新分配	双向间歇重新分配型
	慢流	完全散失	双向慢流完全散失型
		部分散失	双向慢流部分散失型
		重新分配	双向慢流重新分配型

这种模式包括两种情况。一是原来的油气藏本身就是受断层遮挡的油气藏,构造运动重新激活已经休眠、封闭的断层;另一种情况是原来的油气藏是非断层遮挡油气藏,而构造运动产生新的断层切割油气藏造成对油气藏沿断裂的流失破坏。

随着油气沿断裂带向上流动并散失于地表,油气将逐渐被氧化而成为沥青,将断裂带重新封堵;或由于其它原因造成断层重新封闭。当断裂带内压力增大到大于油气藏剩余压力时,破坏作用终止,剩余油气藏得到保存,直到下一次构造运动的再次破坏。这种情况相当于纵向突发破坏类型。

4.2 非构造运动导致的断层破坏油气藏模式

由于地质环境和地质条件的变化,使断层油气藏遮挡断裂的封闭性(包括纵、横向封闭性)变差,断裂带渗透性变好。当油气藏中的油气的剩余压力大于断裂带排替压力时,油气将沿断裂带纵向流失;当油气的剩余压力大于断裂带排替压力,断裂带排替压力又大于对置盘排替压力时,油气将穿过断裂带

并进入对置盘地层中而发生流失,此即油气的横向调整(流失)。当断层再次重新封闭后,未流失的油气被保存下来。

断裂破坏油气藏的地质模式见图 2。

5 断层对油气藏破坏的地质概念模型与数学模型

5.1 构造运动导致断层对油气藏的破坏

无论是先存断裂还是新产生的断裂,构造运动使得构造应力在这些断裂部位集中并突然释放,断裂在短时间内形成开放的通道^[2]。这些后期构造运动导致的断裂活动往往断至地表。地表和地下压力的巨大差距使地下的油气沿断裂带迅速流失,散失于地表。由于断裂带是一个开放的空间,油气在其中的流动应满足紊流规律(油气质点流动速度大,质点彼此相互混杂、碰撞,运动轨迹线不规则,运动

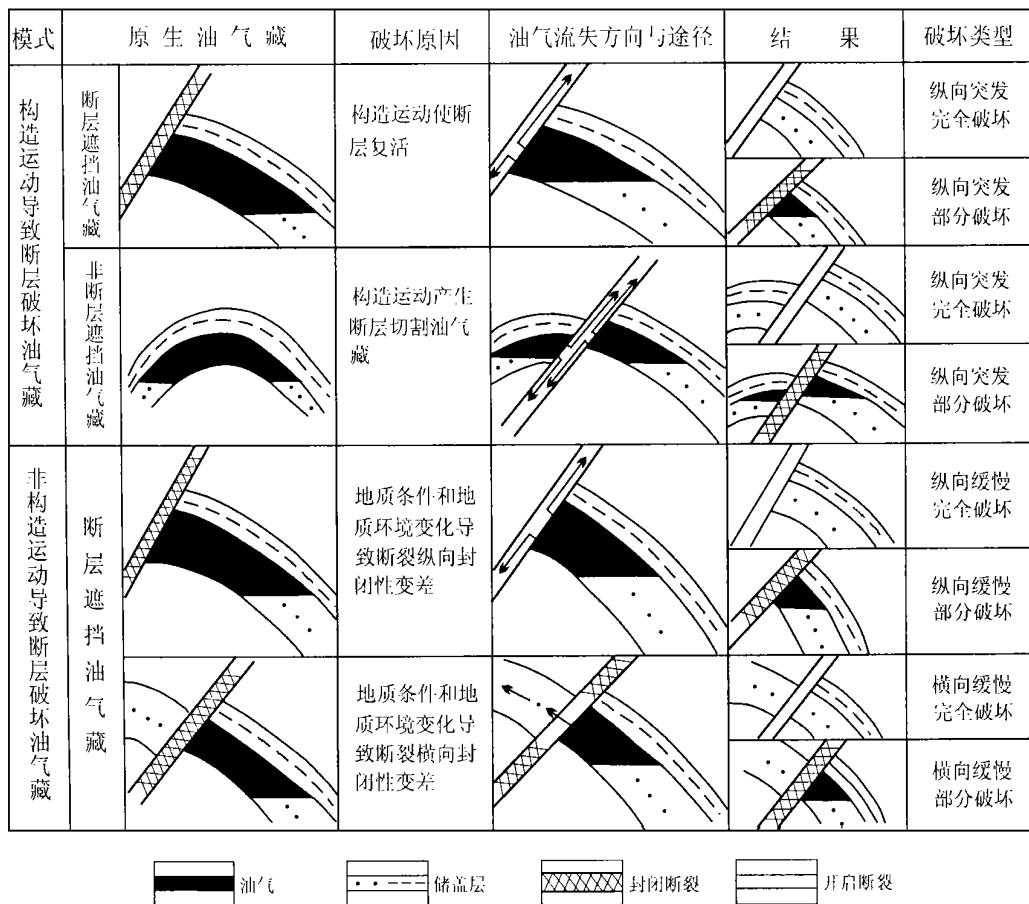


图 2 断层破坏油气藏基本模式探讨

Fig. 2 Basic models of fault destroying oil and gas accumulation

时水头损失大^[31]。

紊流运动的水力梯度与流速的平方成正比：

$$I = K_1 V^2. \tag{1}$$

式中： I ——水力坡度(梯度)， $I = \frac{H}{L}$ ；

H ——水头差(m)；

L ——距离(m)；

K ——渗透系数， $K_1 = \frac{1}{K}$ ；

V ——流速(流体渗透速度，m/Ma)， $V = \frac{Q}{F}$ ；

Q ——流量($10^6\text{t}/\text{m}^2$)；

F ——流体运动方向横断面面积(m^2)。

因此

$$\begin{aligned} \frac{H}{L} &= K_1 \frac{Q^2}{F^2}, \\ Q &= \frac{H}{L K_1} \cdot F = \frac{K}{L} \frac{H}{F^2} \cdot F. \end{aligned} \tag{2}$$

式中 Q 为单位时间(Ma)流过面积 $F(\text{m}^2)$ 的流体数量。

构造运动导致断层对油气藏的破坏的地质概念模型见图 3a。

设断裂开启时刻为 t_1 (距今 Ma)，重新封闭时刻为 t_2 (距今 Ma)，那么断层开启时间 $t = t_2 - t_1$ (Ma)。

根据紊流定律，单位时间通过断裂带流失的油气数量 Q_0 为：

$$Q_0 = \sqrt{\frac{K H}{L}} \cdot F,$$

那么在断层开启时期 t 内通过断层流失的油气数量 $Q_{\text{总}}$ (百万 t) 则为：

$$Q_{\text{总}} = Q_0 \cdot t = \sqrt{\frac{K H}{L}} \cdot F \cdot (t_2 - t_1). \tag{3}$$

5.2 非构造运动导致断层对油气藏的破坏

由于非构造运动的原因造成断层纵、横向封闭性的逐渐变差，可归结为断裂带渗透性变好所致。

断层封闭性的变差是一个缓慢的过程。断裂带为一个低渗透层，因此，油气在断裂带中的流动合乎达西定律。将由于非构造运动导致油气藏流失破坏的情况总结为如图 3b 所示的地质概念模型。模型由三部分组成：一是原生油气藏；二是断裂带，因为无论油气是发生横向运移或是沿断裂带发生纵向运移或是沿断裂带发生纵向运移后再流到其它的地层中，油气要流失都必须首先要突破断裂带；第三部分是油气流失空间，即油气穿透断裂带后流失的空间，譬如各地层或地表。该概念模型可描述为由于断裂带遮挡能力降低，油气藏的油气在压力差(油气藏与断裂带之间的压力差)作用下突破断裂带而进入流失空间，油气藏遭破坏。随着油气的流失，油气藏的压力减小，直到与流失空间的压力平衡，油气没有能力穿越断裂带时，破坏作用停止。

假定油气藏遭破坏前油气藏压力为 P_1 (MPa)，断裂带排替压力为 P_2 (MPa) ($P_2 > P_1$)，流失空间压力为 P_3 (MPa)，油气在断裂带中的流动距离为 L (m)，油气藏埋深为 H_1 (m)，流失空间底界埋深为 H_2 (m)。

油气要发生渗流漏失，首先必须满足 $P_2 < P_1$ 。

若 $P_3 > P_2$ 且 $P_2 < P_1$ ，则发生纵向渗漏流失(散失)。

若 $P_3 < P_2$ 且 $P_2 < P_1$ ，则有两种情况：发生横向渗漏流失(断层未断至地表)；发生纵向渗漏流失(断层断至地表)。

5.2.1 当油气发生横向流失时($P_3 < P_2 < P_1$)

设断裂带与油气藏接触面积为 $S(\text{m}^2)$ ，断裂带厚度为 L (m)，断裂横向开启时刻为 t_1 (距今 Ma)，断裂横向封闭时刻为 t_2 (距今 Ma)。

根据达西定律，断裂在横向开启时期内油气流失量 $Q_1(10^6\text{t})$ 为：

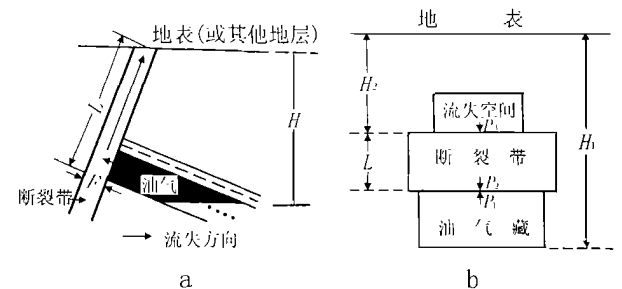


图 3 地质概念模型图

Fig. 3 Diagram of geologic concept models

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= K \cdot S \frac{H}{L} \cdot t \\
 &= K \cdot S \frac{(H_1 - H_2)}{L} (t_2 - t_1). \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中: K ——渗透系数;

H_1 、 H_2 ——油气藏的压力 P_1 和流失空间压力 P_3 所转化来的埋深(m)。

5.2.2 当油气发生纵向流失时

$P_1 > P_2$ 且 $P_2 < P_3$ 时,油气在断裂带内流动一段距离后再发生横向运移进入另一地层。

$P_1 > P_2 > P_3$ 时,油气沿断裂带运移到地表散失。

依据达西定律,在断裂纵向开启时期内的油气流失量 Q_2 (10^6 t) 为:

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= K \cdot F \cdot \frac{H}{L} \cdot t \\
 &= K \cdot F \cdot \frac{(H_1 - H_2)}{L} (t_2 - t_1). \quad (5)
 \end{aligned}$$

6 实例

辽河盆地冷家堡油田冷 115 块 $E_s^{3(1)}$ 段是一个

被断层破坏殆尽的空圈闭。冷 115 块四周破断层围限,东营组沉积时期已聚集了 3×10^7 t 地质储量的石油,东营组末期大规模的构造运动不仅使已有的断层重新活动,而且又产生了数条切割原生油藏的断裂。断层封闭史研究表明,这些新、老断裂在馆陶、明化镇组时期开启。由公式(3)的计算表明,在这个时期内原生油藏被完全破坏,这段时期内理论计算流失的石油达 9.3×10^7 t。而冷 115 块北侧的冷 37 块,尽管也遭到东营末期构造运动的强烈破坏,但断裂愈合快,开启时间短。由公式(3)的计算表明,石油流失量仅 1.7×10^7 t。冷 37 块在东营组沉积时期已聚集石油地质储量达 4.5×10^7 t 以上,加上它又近临陈家生烃洼陷,后期油气补给较充分。因此冷 37 块 $E_s^{3(1)}$ 段油气资源丰富,但为特稠油,反映油藏曾破坏、氧化强烈;且越靠近断裂,石油的粘度、密度越高。断裂封闭靠稠油封堵。

参考文献:

- [1] 单家增. 构造模拟实验在石油地质学中的应用[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
- [2] 陶一川. 石油地质流体力学分析基础[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993.
- [3] 吕延防. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社,1996.

RELATIONSHIP BETWEEN FAULTING AND THE PRESERVATION OF OIL AND GAS ACCUMULATION

LUO Qun^{1,2}, SUN Hong-zhi³

(1. Daqing Petroleum College, Anda, Heilongjiang 151400, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China;

3. Exploration Branch, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163000, China)

Abstract: Faulting destroying oil and gas accumulation is a widespread phenomenon. Based on the analysis of typical cases about faults destroying oil and gas accumulation in this paper, its mechanism is studied, and its classifying index system is determined. It can be divided into three categories, nine subcategories and twenty-seven types. Then, four models of faults destroying oil and gas accumulation are established, and the geologic concept models and mathematical models for its quantitative evaluation are suggested.

Key words: models; types; preservation; oil and gas accumulation; faults