

构造应力场、地震泵和油气运移*

华保钦

(中国科学院兰州地质研究所, 兰州 730000)

提 要 本文从中国含油气盆地中断层发育区孔隙流体压力分布和构造应力场特征出发,以莫尔园及岩石破裂包络线理论深入探讨了不同条件下造成岩石破裂的机理,指出构造应力是油气运移的动力之一,地震泵在断裂发育区是油气沿断层作垂向运移的重要作用过程。

关键词 油气运移 构造应力场 地震泵

第一作者简介 华保钦 女 59 岁 研究员 石油地质

引 言

以往的石油天然气研究工作者们普遍认为,油气二次运移的作用力主要为浮力、水动力和毛细管阻力,决定二次运移方向和聚集场所的流体势(梯度)主要由这三种力所组成。同时,不少研究者基于压实盆地中异常压力的发育,导致岩石有效应力的减少,从而增加岩石的不稳定性,易于造成破裂并为油气初次运移造成通道等事实出发,强调了异常压力对水动力的贡献以及对油气运移的作用。包括 Hunt(1990)的流体压力油气封存箱模式在内的研究都主要是将异常地层压力作为一种影响油气运移的原动力,这个动力不仅在侧向运移中影响流体势的分布,且是垂向运移的主要运移动力。

但是,在大部分石油地质学家强调异常地层压力及与之有一定联系的水动力、浮力、毛细管力对油气二次运移的作用的同时,部分国内外地质学家在论文中也专门强调了构造作用力是油气运移的动力。Secor(1965)、Rochet(1981)、Sibson et al. (1975)、Hooper(1991)等对此均有深入的分析。

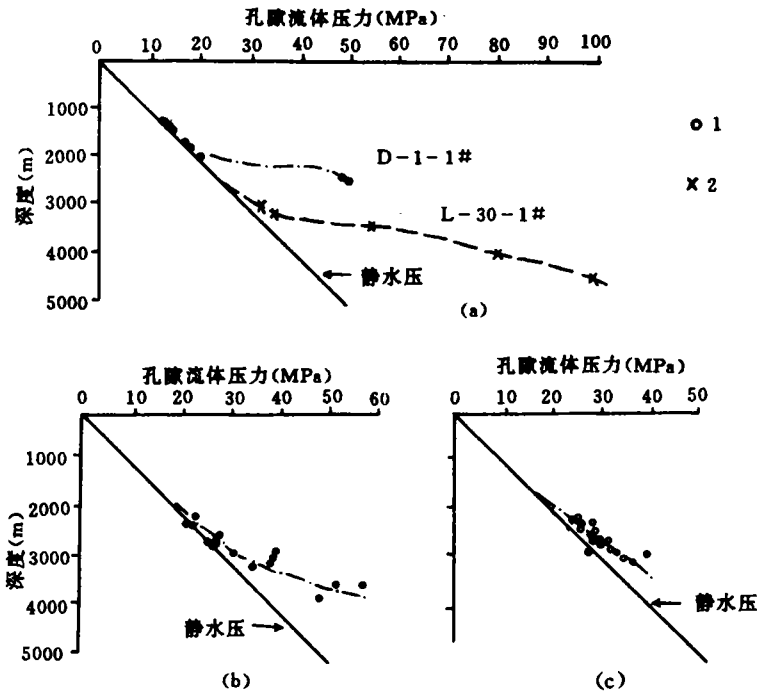
笔者在执行“85”102 项课题过程中,对比分析了不同类型含油气盆地地层压力分布情况后认为,除上述流体异常压力是影响油气二次运移的作用力外,构造应力应该是一个重要因素。

1 问题的提出

据前人研究认为,异常压力常发育于沉降速度大、泥质岩比例高的地区,尤以第三系沉积盆地为其。但我国含油气区资料表明,即使在上述盆地中,不一定发育异常高压。按异常压力发育程度,可分为异常高压发育、异常压力发育中等及基本上为正常压力等几类。如图 1 所示,南海莺歌海及琼东南盆地属异常高压发育区,渤海湾盆地东濮凹陷及柴达木盆地等属异常压

* 本文系“八五”国家重点科技攻关项目 85-102-15-03-03 研究成果之一。

力中等发育区,而与东濮凹陷一样同属第三纪裂谷盆地的渤海湾盆地的辽河拗陷则基本上属静水压力区。



1. 实测压力值 2. 泥浆比重换算压力值
a 莺歌海盆地 b 东濮凹陷 c 辽河裂谷东部凹陷黄金带油田

图1 异常地层压力不同发育程度对比图

Fig. 1 Comparison of abnormal formation pressures with different development degree

详细分析辽河拗陷的情况表明,该区伸张应力条件下的正断层十分发育,油气田沿断层呈串珠状分布。地质和地球化学证据证实,过成熟或成熟油气可分布在未成熟的浅处,可以说断层通到那里,油气即分布到那里。该区异常压力虽有分布,但压力系数不大。除张性盆地中出现此类情况外,压(扭)性盆地中也有类似情况,如吐哈盆地,侏罗系地层中含油气丰富,该盆地中除部分地区受渗入水高水头影响出现异常高压外,其它大部分地区侏罗系地层压力为接近静水压的正常压力;燕山运动以来历次构造运动压(扭)性构造作用力较明显,造成成排成带的褶皱背斜并伴生逆断层,油气源对比也说明了油气经一定距离的垂向运移。上述这些异常地层压力不发育而广泛分布有断层的地区,断层为主要的油气运移通道,其油气运移动力如何解释?笔者的结论是,除浮力作用外,构造应力是形成油气运移通道—断层和微裂隙的主要动力,且构造应力在断层区不论有无异常地层压力前提下还是重要的运移动力,它的运移作用与地震泵作用紧密相关。

2 构造应力是造成垂向运移通道的主要动力

中国油气勘探实践说明,在不少石油地质学家正将石油、天然气运移动力的注意力集中于异常压力的同时,应该重视研究油气运移的应力场。构造应力不仅是造成油气垂向运移通道—断层和裂隙的动力,且构造应力导致的断层活动过程也产生了油气运移的动力。

构造应力造成岩石中断裂和裂隙产生,这一事实早就为地质学家所一致认可。与此同时,不少地质学家又强调了异常压力对于产生岩石破裂的作用。如何全面地认识造成岩石破裂,以至形成油气运移通道的机理,对于解释多种盆地应力场类型和石油地质背景下的油气运移问题是十分必要的。

用莫尔圆和破裂包络理论可以清楚地说明岩石破裂机理。它首先由 Griffith 所提出,后来由 Secor(1965)在其基础上,修正他的破裂包络线公式,提出破裂包络公式应为

$$\tau = \frac{4}{\sqrt{3}}k + \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma$$

其中, k 为岩石抗张强度, τ 和 σ 为平面上的剪切应力和正应力

图 2 表示了压性应力条件和抗张应力条件下岩石产生破裂情况。其横坐标代表正应力轴,纵坐标代表剪切应力轴。莫尔圆直径为最大主应力 S_1 和最小主应力 S_3 之差(即差异应力)。破裂包络线与纵坐标的交点即为岩石抗剪强度,与 X 轴的交点则为张力强度。X 轴的正的一侧表示压性应力区,负值区表示张性应力区。破裂包络线与凹面所包含的区域为稳定区,当应力组成的莫尔圆处于该区时不会产生破裂,但当莫尔圆移动而一旦与包络线相切,则会发生剪切破裂,而当差异应力小且 S_3 为张性应力的条件下所组成莫尔圆在坐标左侧张力破裂点与破裂包络线相切时则产生张力破裂。

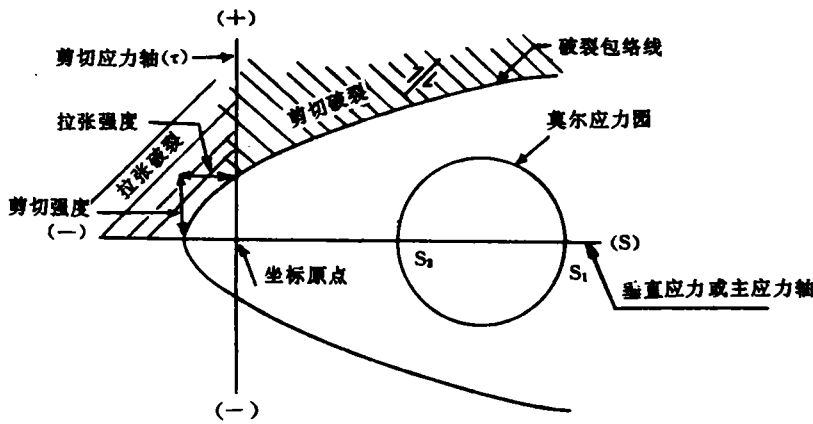


图 2 用莫尔圆和破裂包络线表示的应力场

Fig. 2 The stress field represented by "Mohr's circle" and "Failure envelope"

如果不考虑岩石中充满具有一定压力的孔隙流体,则图 2 中主应力用总应力表示,即用 S_1 、 S_3 分别表示最大和最小主应力。但若考虑到孔隙中充满流体,且地层条件下孔隙流体常具较

大的流体压力,则应使用有效应力 σ_1 和 σ_3 分别代表图 2 中 S_1 和 S_3 ,而总应力和有效应力之间关系可表示为

$$\sigma = S - P$$

其中 P 为流体压力。当流体压力具异常高压时,则有效应力 σ 减小,也即莫尔园向左移动。

岩石发生破裂的应力场条件可归纳为如下几种情况:

(1)最大主应力 σ_1 与最小主应力 σ_3 之差增大,即莫尔园直径增大,从而造成莫尔园与破裂包络线相切,导致岩石产生以剪切破裂为主的裂隙。一般当构造挤压应力加大或集结,即 σ_1 加大(图 3a 第 I 种情况),或应力释放,即 σ_3 减小(图 3a 第 II 种情况)时产生剪切为主的破裂,即属此种情况。

(2)在异常压力发育时,造成一定深度下孔隙流体压力与上覆负荷之比增大,有效应力减小,莫尔园向坐标左方逼近,易于与破裂包络线相切。一旦相切,则导致岩石产生剪切破裂(图 3b)。

(3)最大主应力与最小主应力差不大,并且最小主应力为张力情况下,即 $\sigma_3 = -k$ 时,就会在破裂包络线左端抛物线与横坐标相交处与莫尔园相切,从而产生垂直于张应力的张性破裂(图 3c)。

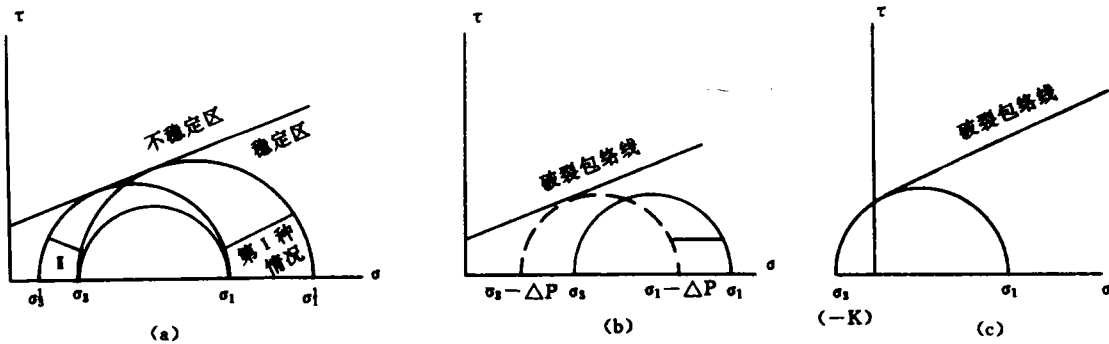


图 3 岩石产生破裂的三种应力场条件

Fig. 3 Three situations of stress field leading to rock fracturing

由上可见,异常压力导致的破裂机理只是造成岩石破裂的应力条件之一。

在张性盆地中,当发生断裂活动时最小主应力为负值,即 $\sigma_3 < 0$,而最大主应力在一定深度(如大于 500 米)下通常为垂直地面,导致岩石产生张性破裂所需的拉张应力远比产生剪切破裂所需挤压应力小得多,这种情况下易产生张性破裂。中国东部裂谷盆地内与深大断裂伴生的张性断裂及裂隙极为发育,即是由此破裂机理所引起。通油气源层的垂向断裂常成为油气进行垂向运移的良好通道。

挤压性或压扭性的前陆盆地内,于快速沉降的沉积层段以及接近盆地边缘的地史晚近时期的推覆带附近,除某些地区异常地层压力发育可作为造成剪切破裂的起因外,有的地区如吐哈盆地异常压力并不普遍,而这些地区挤压性、压扭性应力十分强烈,从而与褶皱作用同时造成发育的共轭剪切破裂,其断裂成因显然主要与上述第一种机理有关,同时产生平行或垂直长轴方向的断层或节理。这些断裂和裂隙成为油气垂向运移的主要通道。准噶尔盆地克乌断裂

带、四川盆地川西北龙门山前陆带以及塔里木盆地库东拗陷、吐哈盆地台北拗陷油气运移均主要受控于这种成因的断裂构造分布。异常压力看来对这些地区的断裂和节理的产生是处于从属性的和次要的作用。有的地区如四川龙门山前异常压力则主要可能由构造侧压力引起,而在大陆边缘海盆如莺歌海盆地等,则异常压力对于产生岩石破裂应该起着明显的作用。总的讲断裂构造的产生为构造力、异常地层压力,另外还有重力(如同生断层)诸因素的联合作用。

3 断层运移中的地震泵作用

关于地震泵对于油气运移的作用目前研究得尚不充分,迄今对它尚没有形成成熟的一致看法。地震泵这一提法首先由 Sibson(1975)所提出。他在研究了热液金属矿与古代断层破碎带的关系后指出,这类矿化作用与通热液矿源的较深古断层活动相关联。矿脉横切面的镜下观察说明其矿化作用是多期的,呈幕状发生的。这种含金属矿热液的输运过程为地震所诱发,地震断层的作用就像一个泵一样,由较深部位抽出热液,并由断面驱入上方有较低正应力的易进得去的张开裂隙中,并将它称之为“地震泵”。他并指出了地震泵有助于烃类在大地构造活动区的运移。

Hooper(1991)在“流体沿生长断层运移”一文中将地震泵这一原理引入了油气运移。虽然在一些细节上认识与 Sibson 有所不同,但还是认为流体沿生长断层的流动具有周期性、突发生的特征,通成熟油气源岩的活动(生长)断层能作为油气运移的导体。笔者根据中国实际资料认为,中国不少含油气盆地中确实存在着广泛的沿断层的油气垂向运移,而油气沿断层或裂隙的垂向运移应该在断层活动即地震活动时尤为显著。油气垂向运移机理与地震泵作用过程有关。

3.1 地震和断裂活动

地震活动总是与断层活动相伴而生,中国的绝大多数地震与区域性大断裂有成因的联系,大多强地震带受近代活动性大断裂的控制,表现在(中国科学院地质研究所,1974):

- (1)地震错动面的产状大部分和地表大断裂相一致。
- (2)绝大多数极震区和等震线的延长方向和当地大断裂走向一致。
- (3)强地震带上震中的迁移活动往往与该主要断裂带或主要构造带相一致。

(4)破坏性地震大多发生在褶皱带的山区与盆地边缘山前拗陷之间的差异运动极其强烈的大断裂带上,或者在山间断陷盆地中。

(5)活动断裂带交叉的地方往往成为强震区。在中国东部,北北东向构造是主要的发震构造,有一定规模。新构造活动强烈的北北东向大断裂是东部强震区的主要构造线方向。在一些与相当规模的北西向或近东西向活动断裂交叉的地方,容易发生强震。

3.2 地震活动对地下水和油气产量动态变化影响

地震活动伴随热泉水涌出这种现象早就为中外学者所注意。中国资料说明,地震活动前后不仅常伴有地下水异常,且伴随有油气产量和压力异常。近年来,地震研究工作者记录了一系列大震前夕地下水发生了与正常动态相违背的变化情况,如1976年7月28日唐山7.8级大地震,震中区临震前井下水位上升,并冒出地面的报导屡见不鲜。除震中区以外,临震前地下水位或成分变化还在天津、宝坻、北京、辽南等地区观察到(国家地震局科研处,1981)。

与上述现象有关,地震临震前及以后,部分钻井油气产量也发生变化(吴起林等,1983),最

突出的例子莫过于 W-11 井(图 4)。该井距唐山地震震中约 160km,处于黄骅凹陷边缘的仓东断裂带附近。该井终孔深度为 2600.25m,1975 年 7 月试油因低产而关井。于 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震前曾出现三次喷油,后又于 1976 年 11 月 15 日宁河 6.9 级地震前喷油两次,1977 年 5 月 12 日宁河 6.5 级地震前喷油三次。与此同时,该井附近 Ca9-13 井井口压力突变与喷油时间有较好的对应关系,W-11 井喷油在前,Ca9-13 井压力上升在后。

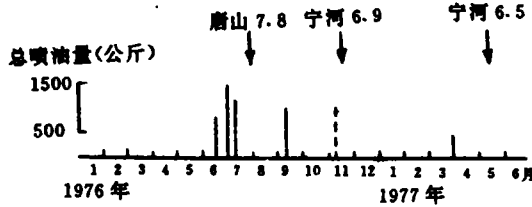


图 4 W-11 井喷油与唐山地震及强余震关系示意图(据国家地震局科技处,1983)

Fig. 4 Sketch map showing relationship between spurted oil of Well W-11 and Tangshan Earthquake and its strong after-shock

表 1 地震前后油井异常统计表(据吴起林等,1983)

Table 1 The statistics of unusual situation of oil wells before and after earthquake

井号	对应地震	距震中(公里)	油层中部深度(m)	异常时间		异常情况及幅度			断裂情况	备注
				起至时间(年月日)	天数	产液量(吨/日)	产水量(方/日)	产气量(万方/日)		
兴 5 井	海城 7.3	80	1850.3	74.10.9 至 75.2.4	118	上升 38 (2↑40)	上升 16.8 (0.2↑17)	下降 0.8 (3.6↓2.8)	通过北东向断层与近东西向断层交汇处	自喷能力加强
热 10-6	海城 7.3	80	1923.0	74.12.1 至 74.12.29	28	上升 76 (4↑80)	上升 3 (2↑5)	变化不大	通过东西向断层	抽油变自喷 井底大量出砂和泥浆
兴 201 井	唐山 7.8	380	1586.1	76.4 至 76.7	约 90				通过北东向断层与近东西向断层交汇处	自喷能力加强
于 11 井	官屯 6.0	20	2530	78.5.12 至 78.5.18	3	上升 53 (24↑77)	上升 10 (3↑13)	上升 4.7 (0.3↑5)	通过北东向断层与近东西向断层交汇处	抽油变自喷
大 1 井	官屯 6.0	20	1785.1	78.4.9 至 78.5.18	39	上升 30 (40↑70)	上升 16 (14↑30)	上升 1.89 (0.3↑2.2)	北西向断层附近	抽油变自喷
板 804*	唐山 7.8	120	2767.0	76.3 至 76.7.28	149				北东向断层附近	震后静压继续上升
渤海 2 井*	宁河 6.9	50	3070	76.11.15 至 76.11.26	11	下降后上升 83(15 ↓7↑90)	下降后上升 12 (7↓2↑14)			震前突降 震后突升
坨 3-5-13*	唐山 7.8	250	1981	76.7.22 至 76.7.26	5	上升 35.5 (76↑112.5)	下降 2.5 (25↓22.5)		位于北东向断层端部	临震前油量突增

* 资料引自石油勘探开发科学研究院分院天然气所·华北地区天然气形成富集规律及资源评价·1990。

除上述 W-11 井外,辽河油田及华北油田…等地还有部分钻井于海城 1975 年 1 月、唐山 1976 年 7 月、官屯 1978 年 5 月、宁河 1976 年 11 月地震前后出现产油气量变化。表现为大部分井呈上升,即自喷能力加强或抽油变自喷,少数井呈下降(表 1)。压力也发生变化。

这些井大多钻遇断层,且断层方向有一定的规律性,大多为东西向断层和北东向断层,或钻井处于两条断层的交汇处。还有的井位于北东向断层端部。

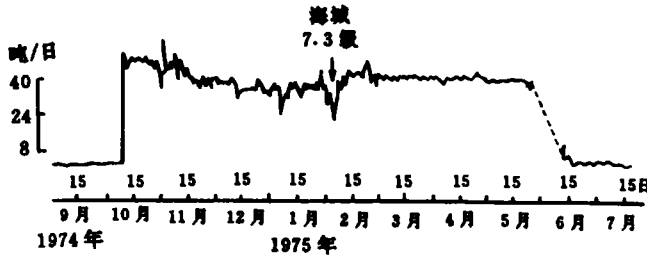


图 5 兴 5 井产液量变化与地震关系(据吴起林等,1983)

Fig. 5 The relationship between liquid production of Well Xing - 5 and earthquake

地震前后地下水动态的异常有关的变化,时间可以长达九年;震前或震时呈现突然水位上升或下降;震后水位又逐渐恢复至正常。由表 1 及图 5 可见,油气产量异常也可长达数月,同时地层压力也会出现上升或下降的变化(图 6)。

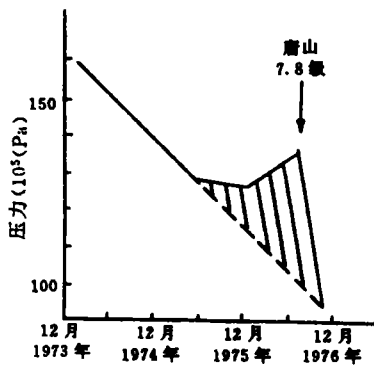


图 6 兴 201 井地层压力变化曲线(据吴起林等,1983)

Fig. 6 The changing curve of formation pressure in Well Xing - 201

上述地下水位和钻井中产油气水量和地层压力变化反映了地震孕育过程经历了如下几个阶段:

- (1) 区域应力应变积累阶段;
- (2) 区域应力应变活动加剧阶段;
- (3) 震源微破裂、主破裂应力释放阶段;

(4)震后应力调整阶段。

3.3 油气运移的地震泵作用机理初探

正如 Sibson 等(1975)、Hooper(1991)所提出,在断层中这种由地震泵诱导的运移作用不是一次完成的,而是间歇性地呈周期性进行的。这不仅可由地震泵诱发的金属热液矿成矿作用资料所证明,且可由地震活动的周期性予以证实。如 1895 年到 1992 年,新疆发生 $M_s 7.0$ 级地震 16 次,平均复发周期为 6 年。本世纪以来到 1992 年青海及邻区共发生了 $M_s > 6.0$ 级地震 55 次,平均不到两年即发生一次。大的地区中地震活动是如此,对于一个断层或断层带来说,其活动也是呈周期性出现的。

地震泵油气垂向运移机理可以这样设想,在拉张应力或者挤压性应力条件下,塑性岩石会发生一定形变,当应力积累到超过岩石的破裂强度时,即发生裂隙或断层。对于原已存在并已闭合了的裂隙,则只需很小的流体压力足以使它重新张开。由于断层的活动,断层附近应力得到释放,岩石孔隙增大,更促使断层破碎带中流体压力下降,导致围岩中流体向断层运移,油气源岩内及早先储集在断层下方多孔岩层中的油气即向断层带快速运移。

由于一般地讲,孔隙流体压力在深处易于出现超压,加以断层中流压易于在上方首先得到释放,断层上方和下方之间通常存在着一定水势差,水即能向断层上方运移,而对于烃类来讲,浮力作用也驱使进入断层带中油气在烃势梯度的作用下,向上方快速运移。

断层带中的油气如何向储层中运移呢?对于 $S_3 > 0$ 的挤压性应力区,Rochet 已详细论述了其应力场条件,即在断层上方邻近断层的砂岩,其最小主应力 S_3 和孔隙内油压 P_o 关系为

$$S_3 > P_o$$

时,断裂或裂缝中油气即能向断层两侧的砂岩中运移。关键是张性盆地。正如 Rochet 在文中分析的,拉张力条件下不可能向储层运移,只有当最小主应力 S_3 为正值并且大于储层中油气的毛细管阻力 P_o 时,即

$$S_3 > P_o$$

时,断层中油气才能注入储层。

现代应力场的测定资料似乎也说明了在所谓张性应力场地区, S_3 为负值可能是瞬态的,负值主要发生在断层及地震活动时,而在地震静止时, S_3 为正值。前人在前苏联各地区、挪威矿山、芬兰斯堪的纳维亚部分地区以及中国华北地区所得地应力测定值中,压应力占绝对优势,出现拉张应力者极少且分布限于局部地区,于 70 个测量数据中最小主应力为负值者仅占两个^[5]。属中国东部张性应力区的华北地区最小主应力均为小的正值,最小值为 0.2MPa,最大值为 10.4MPa,平均值为 2.35MPa,远比上述其它地区测得的最小水平应力 S_3 (一般达 5MPa 至几十 MPa) 为小。

因此可推测,当断层和地震活动平静时,张性盆地最小主应力一般为正值,只要它大于储层中油气的毛管阻力时,即能进入断层上方的储层。

地应力积累和释放以及构造活动的周期性,导致油气垂向运移中地震作用呈幕状出现,运移相态呈油气水混相涌流。而在地震活动平静时期,只要断层带中有一定的渗透率、连续油气柱高度所形成的浮力以及由于断层上下方超压不同所造成的势差在一定条件下也可以克服断层中毛细管阻力向上缓慢运移,直到断层再次活动,再一次在地震泵作用下油气快速运移,这样周而复始,形成幕状的或脉冲状地震泵作用为主的垂向运移过程。

收稿日期:1994年10月15日

参 考 文 献

- [1]中国科学院地质研究所,中国地震地质概论,1974,北京:科学出版社,159—178页。
- [2]国家地震局科研处,唐山地震考察与研究,北京:地震出版社,1981,106—129页。
- [3]吴起林,刘安捷,海城、唐山两大地震前后油井生产动态的变化,地震学报,1983,5(4):461—465。
- [4]P. E 格雷泰纳著,孔隙压力的基本原理通常引起的后果及其构造地质含意,陈荷立等译,1982,北京:石油工业出版社。
- [5]李铁汉,潘别桐编,岩体力学,北京:地质出版社,1980,119—123。
- [6]Hooper E C D. Fluid migration along growth faults in compacting Sediments. Jour. Petrol. Geol. ,1991,4(2):161—180.
- [7]Hunt J M. Generation and Migration of Petroleum from abnormal pressured fluid compartment. AAPG Bull,74(1), 1990,1—12
- [8]Rochet J H. Stress fields, a key to oil migration. AAPG,1981,65(1):74—85.
- [9]Secor D T. Role of fluid pressure in jointing, Amer. Jour. Science,1965,263,633—646.
- [10]Sibson, R H et al. Seismic pumping — a hydrothermal fluid transport mechanism, Jour. Geol. Sci. 1975,131(6): 653—660

Stress Field, Seismic Pumping and Oil - Gas Migration

Hua Baoqin

(Lanzhou Institute of Geology ,Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In some oil - bearing basins of China , the abnormal pressures do not develop, for example the oil - bearing formation of Tertiary in Liaohe Basin and the Jurassic coal measure in Tuha Basin, which are characterized by the near - hydrostatic pressure. Faults and fractures are the main paths of oil and gas migration, and tectonic stress is the principle dynamics of producing faults and fractures. The writer applies graphs of Mohr's stress circle and failure envelope to discuss this mechanism.

According to the abnormal records of ground water table and oil - gas production before, at end after the time of strong earthquake in Eastern China during the latest 30 years, the author indicates that the oil - gas migration along the faults is closely related to the seismic pumping mechanism. The active fault leads to the stress relaxation in faults, especially in its upper part, and then the fluid flow from the surrounding rocks towards fault. Based on the fluid potential difference between upper and lower part in fault and buoyance, the oil - gas - water may move periodically and gush out in a mixed phase.