

文章编号:1001-6112(2000)03-0201-05

地应力对排烃的影响方式及作用模型

童亨茂

(石油大学 地球科学系,北京 昌平 102200)

摘要:本文在对不同排烃阶段排烃机理分析的基础上,结合盆地构造力学,研究分析了地应力对排烃的影响方式,建立了地应力作用下的微裂缝排烃的理论模型,指出地应力对排烃的作用主要表现为两个方面:形成排烃的通道(微裂缝)和作为油气初次运移的动力(改变烃源岩的孔隙流体压力)。研究表明,地应力分量中对排烃起决定作用的是最大差应力;在应力作用下,排烃方向为微裂缝的延伸方向,即平行于最大主压应力方向;不同类型盆地中地应力对排烃的影响方式和影响程度是不一致的,其中挤压盆地影响较大,伸展盆地影响相对最小;盆地构造活动期最有利于排烃。

关键词:排烃;微裂缝;压实排烃;地应力;构造应力

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

油气的初次运移指的是油气自生油层向储集层中的运移,是一极其复杂的过程。根据已有的研究,油气初次运移主要存在 3 种机理,即压实机理,异常压力作用下的微裂缝机理和扩散机理。引起油气初次运移的动力主要有压实作用、水热增压作用、粘土矿物脱水作用、毛细管力作用及烃类气体的形成等,但地应力对油气初次运移的影响一直被忽略。地应力与油气初次运移的关系, Jean du Rouchet 做了开创性的工作,指出了应力对油气运移存在重要影响,认为微裂缝是重要的排烃通道,分析了岩石破裂形成微裂缝的条件,建立了在地应力条件下,石油如何从微裂缝进入孔隙储层的数学模型^[1]。郝石生等对微裂缝排烃模型作了进一步的论述^[2]。地应力与油气初次运移分析研究取得了一些进展,但至少还存在以下几方面的问题:(1)地应力主要在微裂缝排烃机理中产生影响,但微裂缝排烃在油气初次运移中的相对重要性还没有明确的认识;(2)地应力对排烃的影响方式和影响程度;(3)微裂缝排烃模型中力学分析上采用一维模型,即把盆地简化为只受重力作用的弹性体,而根据大量的地应力测量发现,不同盆地不同演化阶段的地应力状态可以有很大的变化,忽略构造作用与实际情况偏差较大。本文在构造力学和流体力学相结合的基础上,进一步探讨了地应力与排烃的关系,建立了在地应力作用下的微

裂缝排烃模型,并分析了不同类型盆地中,地应力对油气初次运移的影响程度。

1 不同排烃阶段地应力对排烃的影响方式和影响程度

地应力主要由重力应力和构造应力两部分叠加而成^[3,4],地应力对排烃的影响也主要由这两种应力产生。其中重力应力作用产生的排烃就是压实排烃,这方面已有较系统的研究成果。本文研究地应力对排烃的影响主要针对其中的构造应力。

根据烃源岩在地下所处的环境及其排烃特点,可将油气运移划分为两个主要阶段:压实排烃阶段和微裂缝排烃阶段^[2]。

第一阶段是当烃源岩埋深较浅、孔隙度和渗透率较高的浅埋藏阶段。这一阶段中,烃源岩中的孔隙流体,可以在压实作用的影响下顺利地排出而不受阻碍。这一阶段称为压实排烃阶段。

第二阶段是当烃源岩埋藏较深、孔隙度和渗透率很小的深埋藏阶段。这一阶段的特点是烃源岩已经成岩,岩石的可压缩性很小,压实作用对流体的排出不起主要作用。在这一阶段流体的排出受阻,随着上覆压力的增大、温度的增高、粘土矿物的脱水、烃类的生成(尤其是甲烷气的生成)等多种因素的影

收稿日期:2000-02-16;修订日期:2000-04-27.

基金项目:中油公司“九五”科技攻关项目(960007).

作者简介:童亨茂(1967-),男(汉族),浙江嵊县人,硕士、讲师,主要从事储层裂缝、构造应力场与油气运移等方面的研究工作。

响,必然导致孔隙压力的升高,形成异常高孔隙流体压力^[5]。这一阶段,烃源岩中的烃类,主要是在异常高压力的作用下,通过微裂缝排出。

在浅埋藏的压实排烃阶段,烃源岩结构比较松软,是软弱的非能干层,构造应力值很小,这一阶段构造应力对排烃的影响很小,可以不加考虑;在深埋藏的微裂缝排烃阶段,烃源岩已经成岩,结构比较紧密,受正常构造应力的作用。构造应力对排烃的影响主要出现在这一阶段(图 1)。由于构造应力只有在微裂缝排烃阶段才对排烃产生影响,要了解构造应力对排烃的影响程度,必须对微裂缝排烃的相对重要性有正确的认识。

根据已有的认识,油气的初次运移,压实作用是起决定作用的因素^[6,7]。但根据我们的研究,这一结论存在偏差。不同类型的盆地排烃机制应有较大的差异。

只有在烃源岩成熟点深度之下,才有可能出现压实排烃,在成熟点深度之上压实排出的液体只能是水。不同类型盆地、不同时代的成熟点深度存在很大的差异(表 1)。地温梯度较高的地区,有机质不用埋藏太深就可以转化为烃类。如我国渤海湾盆地冀中、黄骅两拗陷的下第三系沙河街组(距今 25~30Ma)成熟点深度为 1 500m。在这样的裂谷作用阶段的热盆地,压实排烃应在油气初次运移中占主导地位(图 2)。而在地温梯度较低的冷盆地,成熟点深度较大。烃源岩开始生烃时,烃源岩的压实作用已基本完成。这样靠进一步的压实作用产生的排烃数量就十分有限。这时,排烃的机理转化为在

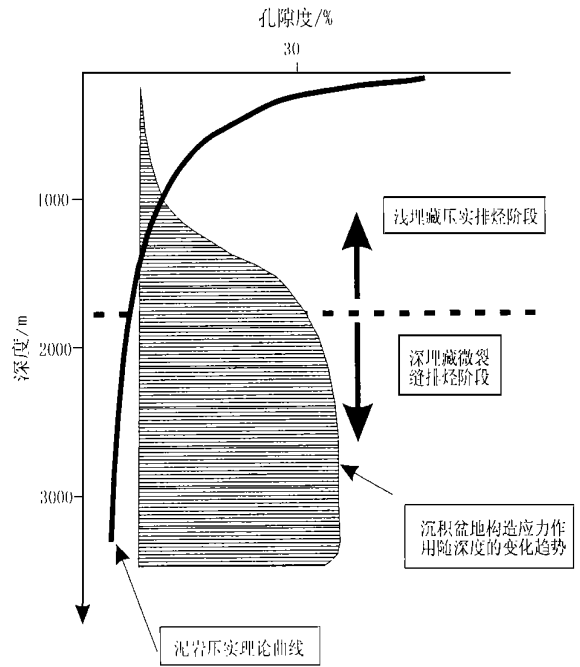


图 1 盆地中构造应力、烃源岩孔隙度变化和排烃机理随深度变化的理想模型

Fig.1 Conceptual model of variety of tectonic stress, porosity of source rock and mechanism of hydrocarbon expulsion with depth in basins

地应力条件下的生成的烃类通过微裂缝排出,即进入第二阶段的排烃(图 2)。

因此,对于地温梯度较高,成熟点深度较小的盆地,压实排烃占主导地位;地温梯度较低,成熟点深度较大的盆地,微裂缝排烃可能起主要作用(图 2)。

表 1 世界若干含油气盆地生油岩成熟点的温度与深度(据 J. Connan, 1974^[8])

Table 1 The temperature and depth of maturation point of source rock in some basins in the world

盆 地	岩石类型	成熟点 温度/	成熟点 深度/ m
加利福尼亚文图拉盆地	页岩?	127	2 740
法国巴黎盆地	页岩	60	1 400
喀麦隆杜阿拉盆地	粉砂质粘土岩	65	1 200
法国西南部阿奎坦盆地	泥质石灰岩	90	3 300
法国东南不卡马尔果盆地	碳酸盐岩	106	3 250
新西兰塔拉纳基盆地(海上)	粉砂质页岩	80	2 900
巴西亚马逊盆地	页岩	62	1 570

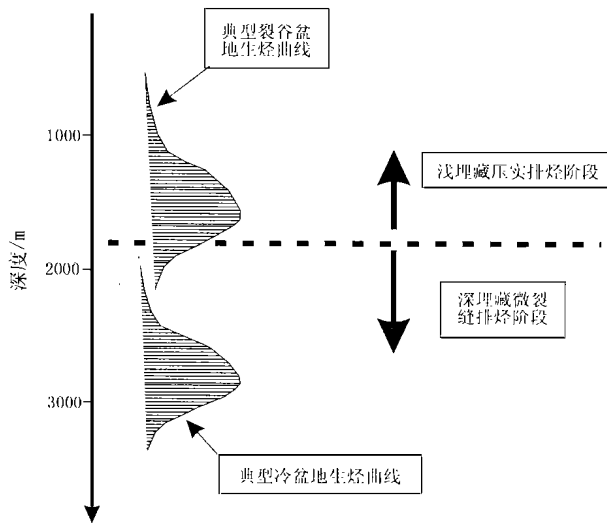


图 2 不同类型盆地中油气生成深度及排烃机理的差异

Fig. 2 The difference of oil generation depth and hydrocarbon expulsion mechanism among different kinds of basins

$$P = \frac{\mu}{1 - \mu} gh, \tag{2}$$

其中 P 为流体压力, R 为岩石的抗张强度, μ 为岩石的泊松比, ρ 为岩石的密度, g 为加速度, h 为深度。

上述微裂缝的形成条件中忽略了构造应力的作用。但实际上,不同地区和不同类型盆地的地应力测试结果表明,不同盆地在同一深度水平方向的地应力值有很大的差异,这是由于构造应力作用的结果,因此不考虑构造应力的作用微裂缝形成模型不符合盆地的实际情况。另外,微裂缝的形成和扩展必须考虑裂缝的尖端效应。

2.1.1 尖端效应的影响

岩石中一般是充满微裂纹的(格里菲斯裂纹)。根据弹性力学的研究成果^[9],由于裂纹尖端效应的影响,微裂缝的形成和扩展比理想均匀介质就要容易得多。

2.1.2 构造应力的影响

在考虑构造应力的情况下,式(1)就要作改动。右端的第一项改为最小主压应力(σ_3):

$$P = \sigma_3 + R. \tag{3}$$

最小主压应力的方向决定于盆地的性质和构造活动情况(图 3)。在不同性质、不同大小的构造应力的作用下,最小主应力的方向可以发生数量级的变化^[3]。构造应力对岩石是否破裂和形成裂缝起着决定性的作用。张性构造应力有利于张裂缝的形成,差异构造应力则有利于剪裂缝的形成。

在伸展构造力作用的情况下,盆地属于 I 类地应力状态,生成的微裂缝将是垂直伸展方向的直裂缝;属于 II 类地应力状态的盆地,受到较大的挤压构造应力的作用,产生的微裂缝主要将是水平缝或是低角度的剪裂缝;属于 III 类地应力状态的盆地,处于走滑构造应力状态,生成的微裂缝将是垂直于最小主压应力方向的直裂缝或是直的剪裂缝(图 3)。

2 地应力作用下微裂缝排烃模型

地应力对烃源岩排烃的影响主要表现为两个方面:产生排烃的通道(微裂缝)和作为排烃的动力。

2.1 微裂缝的生成与地应力的关系

通过微裂缝排烃,首先必须有微裂缝形成。岩石发生破裂形成微裂缝的条件,很多作者都作了论述^[1,2]。他们假定沉积盆地的最大主应力 σ_1 总是直立的,其数值等于地静压力,并假定地下岩石受弹性方式承受上覆重力载荷的条件下,岩石初次破裂形成微裂缝的条件为:

$$P = \frac{\mu}{1 - \mu} gh + R. \tag{1}$$

已闭合的微裂缝再次张开需要的临界压力为:

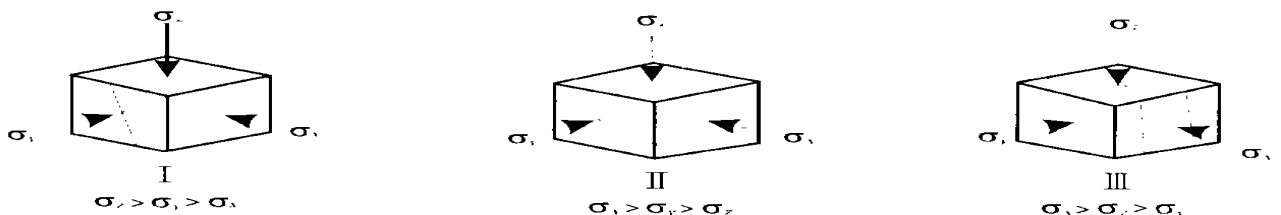


图 3 3 个类型的地应力状态

Fig. 3 Three kinds of crustal states in basins

2.2 孔隙流体压力与地应力的关系

在微裂缝的排烃阶段,排烃的主要动力是孔隙系统内的异常高孔隙流体压力。根据已有的研究成果^[1,2],这种异常高孔隙流体压力的形成,是多种因素综合作用的结果:这些因素主要包括压实作用;粘土矿物的成岩转变;油气的生成和孔隙流体的热膨胀。它们各自以不同的方式影响着烃源岩孔隙流体压力的演变。地应力改变孔隙流体压力的方式和压实作用类似,即主要通过使烃源岩发生孔隙体积变化来影响孔隙流体压力。但它们之间存在着区别,主要表现在:一方面压实作用的规律性比较强,它与深度存在着对应的函数关系,而地应力与深度没有确定的函数关系;另一方面上覆负载的改变(增加和减小)一般速度较慢,而地应力的改变则相对较快,这样导致的变形方式也不一致。

根据我们对完全封闭性孔隙储层孔隙流体压力和地应力关系的研究成果^[10],完全封闭型的孔隙型储层,在应力作用下,其流体压力的增量和主应力增量的平均值近于相等。这样,根据地应力与构造应力的关系^[4]和式(3),由于构造应力的作用,孔隙流体压力的改变量为(应力值压为正,拉为负):

$$P = (\sigma_a + \sigma_b) / 3 \tag{4}$$

其中 σ_a , σ_b 分别为最大和最小构造应力, P 为孔隙流体压力的增量。

这样,在构造应力的作用下,烃源岩孔隙流体压力将发生改变,改变量决定于构造应力的性质和大小。在挤压构造应力作用下,孔隙流体压力将增大,而在伸展构造应力作用下,孔隙流体压力将减小。

2.3 受地应力作用微裂缝排烃模型

根据前面的分析,应力对油气初次运移的影响是通过促使微裂缝的生成和改变孔隙流体压力来实现的。

与微裂缝的形成关系最为密切的是最小主应力的大小和方向。而与孔隙流体压力相关的是平均主应力增量。那么怎样的地应力组合最有利于排烃呢?

最小主压应力减小和(或)最大主压应力增大,有利于岩石的破裂形成微裂缝(图4);而平均主应力增大,有利于形成较高的孔隙流体压力。差应力的增大可同时满足上述几方面的要求,随着差应力的增大,平均主应力和最小主应力的比值也随着增大,就越有利于排烃。因此地应力分量中对排烃起

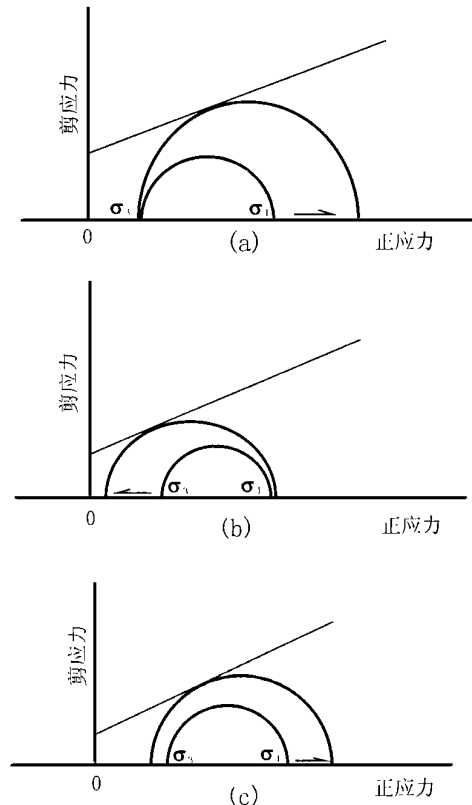


图4 随着最小主压应力 σ_3 的减小和最大主压应力 σ_1 的增大,都可能促使岩石的破裂

- a. 伸展构造应力作用,使 σ_3 减小;
- b. 挤压构造应力作用,使 σ_1 增大;
- c. 走滑构造应力作用,使 σ_1 增大和(或)使 σ_3 减小

Fig. 4 With the decrease of minimum main stress (σ_3), or increase of maximum main stress (σ_1), it is possible to cause fracture in rock

决定作用的是最大差应力。

增加差应力有两方面的途径,增加最大主应力,和/或减小最小主应力。除了弱挤压以外,无论是伸展构造力作用还是挤压构造力的作用,都能加大最大差应力。因此一般情况下,构造作用对排烃起着积极的促进作用。实际盆地分析结果也证实了这一点,即油气的初次运移往往与构造运动是密切相伴的。

这样,在烃源岩开始生烃之后,在差异应力的作用下,一方面促使形成排烃的通道——微裂缝,另一方面改变烃源岩的孔隙流体压力(式4)。当应力组合和烃源岩孔隙流体压力符合式(2)时,微裂缝开启,含烃流体从微裂缝排出,孔隙流体压力随着减小,微裂缝迅速闭合,完成一个周期。随着生烃的继

续以及其他因素的影响,会持续出现上述过程。烃类的排出方向为微裂缝的延伸方向,即平行于最大主压应力方向。

3 不同类型盆地应力对排烃的影响

不同类型盆地中,由于构造应力存在很大的差异,对排烃的影响也存在很大的差别。

伸展盆地属类地应力状态。随着伸展构造应力的增加,最小主应力不断减小,平均应力也随着减小,差应力不断增加,能促进烃源岩的排烃。因此在伸展盆地中,构造应力对烃源岩排烃的作用主要是通过减小最小主应力,促使烃源岩微裂缝的形成来实现的。在伸展盆地中,由于构造应力的绝对值量值较小,构造应力对烃源岩中孔隙流体影响很小,往往可以忽略。伸展盆地往往是地温梯度较高的热盆地,压实排烃往往占主导地位,因此地应力对排烃的影响应较小。

挤压盆地在构造活动期属类地应力状态。在挤压盆地中,构造应力对烃源岩排烃的影响主要是通过增加平均主应力,进而提高烃源岩的孔隙流体压力来实现的。与伸展构造应力不同,挤压构造应力值一般很大,挤压构造应力的存在可以大大提高平均地应力水平。挤压性盆地往往是地温梯度较小的冷盆地,微裂缝排烃往往占主导地位,因此地应力对排烃的影响较大。

类地应力状态的盆地处于走滑应力状态,中间主应力为竖直方向的重力应力。随着走滑构造作用的增强,在张扭(拉分)的情况下,最小主应力不断减小;在压扭的情况下最大主应力不断增加;在直扭的情况下,最小主应力不断减小,最大主应力不断增加。张扭的情况与伸展盆地类似;压扭的情况与挤压构造作用的情况类似;直扭在减小最小主应力的同时,又同时增加平均应力,因此走滑构造应力作用

能较有效地促使排烃。

4 结论

应力对排烃的影响主要表现在微裂缝排烃阶段,成熟点深度较大的冷盆地,微裂缝排烃可能起主要作用。应力对油气初次运移的影响是通过促使微裂缝的生成和改变烃源岩孔隙流体压力来实现的。其中应力分量中对排烃起主要作用的是最大差应力。排烃方向为微裂缝的延伸方向,即平行于最大主压应力方向。不同类型盆地中应力对排烃的影响方式和影响程度是不一致的,其中挤压盆地影响较大,伸展盆地影响较小。

参考文献:

- [1] Jean du Rouchet. Stress field, a key to oil migration[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(1): 174 - 85.
- [2] 郝石生,柳广弟,黄志龙,等. 油气初次运移的模拟模型[J]. 石油学报, 1994, 15(2).
- [3] 王平. 含油气盆地构造力学原理[M]. 北京:石油工业出版社, 1993. 34 - 50.
- [4] 童亨茂. 伸展盆地复杂断层组合成因新模式[A]. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集[C]. 北京:地震出版社, 1998. 107 - 111.
- [5] P E Gretenet. 孔隙压力的基本原理通常所引起的后果及其构造地质含意[M]. 北京:石油工业出版社, 1982. 17 - 30.
- [6] 张厚福,张万选. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1989. 152 - 161.
- [7] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京:石油工业出版社, 1994. 90 - 79.
- [8] Connan. Time-temperature relation in oil genesis[J]. AAPG Bulltin, 1974, 58(12).
- [9] 王仁,丁中一,殷有泉. 固体力学基础[M]. 北京:地质出版社, 1979. 181 - 190.
- [10] 童亨茂. 应力对流体压力、油气运移作用的几种模式[J]. 石油大学学报, 1999, 23(2).

THE WAY AND MODEL OF STRESS EFFECT ON HYDROCARBON EXPULSION

TONG Heng-mao

(Department of Earth Science, University of Petroleum, Changping, Beijing 102200, China)

(to be continued on page 209)

THE TRANSFER ZONE WITHIN INTRA-CONTINENT SUBDUCTION OROGENIC BELT IN THE TIANSHAN, NORTHWEST CHINA

CAI Li-guo

(*Wuxi Research Institute of Experimental Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China*)

Abstract : The Tianshan Mountains is a composite orogenic belt. The intra-continent subduction occurred under the influence of distant compressure of subduction and collision taking place between the Indian plate and the Eurasia plate in the Mesozoic-Cenozoic. The Tarim block and the Junggar block subducted in the opposite direction beneath the Tianshan Mountains. The mountains was lifted rapidly and thrust-folded from central to north and south. Intra-continent subduction foreland basins were developed, under effect of the tectonic load, in the North and South of the Tianshan Mountains. There were differences along the trend of the intra-continent subduction orogenic belt, in terms of the thickness of crust, the elevation of mountains, the intensity of earthquake etc, between eastern and western Tianshan Mountains. It was clear that the West of Tianshan Mountains was more active than the East. The Bogeda Mountains showed the intensive activity in the formation of intra-continent orogenic belt. Lift and thrust-fold belt, formed in the stage, controlled the deposition in the foreland basins developed in the two sides of the Mountains. There was comparison between the West of the Tianshan Mountains and Bogeda Mountains. All of them showed that there was a transfer zone, which transferred the shortening from the West of the Tianshan Mountains to the Bogeda Mountains, in the development of intra-continent orogenic belt. The difference of the crust shortening of western and eastern Tianshan Mountains was transferred to the Bogeda Mountains. The transfer zone balanced the differences between eastern and western Tianshan Mountains, and named as Urumqi-Kuerle transfer zone.

Key words : intra-continent orogenic transfer zone; intra-continent orogenic belt; western and eastern Tianshan Mountains; the Bogeda Mountains

(continued from page 205)

Abstract : Based on analysis of hydrocarbon expulsion mechanism in different stages, the way of stress effect on hydrocarbon expulsion is discussed, and theoretical model of hydrocarbon expulsion with stress effect is developed. By these models, the stress effect on hydrocarbon expulsion is defined on two aspects: pathway formation of hydrocarbon expulsion (microfracture) and as a power of primary oil migration (causing the change of fluid pressure of source rock). The result shows that the stress component which has main effect on hydrocarbon expulsion is maximum differential stress, and the direction of hydrocarbon expulsion is parallel to microfracture, which is parallel to maximum main stress. It is also shown that, in different kind of basins, the way and result of stress effect on hydrocarbon expulsion is different, in which compressive basin has relative bigger effect, and extensional basin has smaller one, and it is the most propitious to hydrocarbon expulsion in active tectonic stage.

Key words : hydrocarbon expulsion; microfracture; hydrocarbon expulsion with compaction; crustal stress; tectonic stress