

# 深部油气藏

Н. А. Еременко Т. А. Ботнева  
(全俄石油地质勘探科学研究所 俄罗斯 莫斯科)

**摘 要** 探讨了 $>100^{\circ}\text{C}$ 和 $>22\text{MPa}$ 温压条件下深部流体的物化状态,和深部孔隙环境中水和油的关系。认为深部烃藏最大限度地可存在于温度达 $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ 、压力达 $100\text{MPa}$ 温压条件下。

**关键词** 地壳深部 流体系统 温压条件 烃藏 “临界”气藏 “临界”油藏

В. Ф. 安得烈耶夫等人从理论上阐述了在深部地层 $>100^{\circ}\text{C}$ 的高温和 $>22\text{MPa}$ 的高压条件下存在液态烃的可能性。俄罗斯及其他有关国家在超过 $5\,000\text{m}$ 的深部钻井中均获得了液态烃流。

为了发现深部油藏并有效地进行开发,必须十分清楚地认识深部油藏的构造和烃类的演化。

## 1 $>100^{\circ}\text{C}$ 和 $>22\text{MPa}$ 温压条件下深部流体的物化状态

$>100^{\circ}\text{C}$ 和 $>22\text{MPa}$ 温压条件下烃藏的流体系统由气态烃、汽化烃、石油、水蒸汽和水组成。在这种条件下,流体系统处于一种特殊的温压环境:压力高于水的临界压力( $21.85\text{MPa}$ );温度低于水的临界温度( $374^{\circ}\text{C}$ )。显然,其中大部分是石油。石油的临界温度是从 $250^{\circ}\text{C}$ (轻油)到 $400^{\circ}\text{C}$ (重油)或更高。但是,关于石油临界温度问题的文献资料很有限,故而确定上述各成分混合物的温度临界点是今后的一个研究课题。

目前可以确定,这种混合物的温度低于水的临界温度,但随着深部温度的升高,其温度会趋向于水的临界温度值。随着温度的升高,天然气的物理性质——密度和粘度会发生变化——升高,而石油的这些性质则发生降低的变化。采用快速方法使越来越多的油溶于气,可使油、气二者物性接近。归根结底,这种现象的出现是液、气(蒸汽)相面消失和液、气态表面张力接近于零的结果。气—油界面被形成的过渡带取而代之,该带可分布在整个烃藏。

分析不同含油气省内石油随深度增加、温度升高的变化过程和对这些变化过程的数学模拟以及实验室的热演化实验结果,笔者作出了这样的结论:在深成作用带,即在深部和刚性温压限制带,烃类流体的转化存在着有规律的方向性。А. Ф. 多布里扬(1961)指出,从稳定性弱的、大的、复杂的、混合的分子化合物向较简单的、稳定的分子化合物的转化是烃类随深度增加、温度升高所进行的深成演化的一个主要法则。多布里扬还写到:在 $120^{\circ}\text{C}$ 温度条件下,具有自由能偏正的高分子烷烃在热力学上是不稳定的,故其具有向低分子烃转化的倾向;芳环的稳定性较强,随着深成作用的加强,芳环只能从石蜡环烷烃中析出。这样,根据多

收稿日期:1999-10-13

布里扬的观点,随着温度和深度的增大,烃类流体的变化与各类烃组构的简单化过程有关。这一简单化过程可造成更多低分子烷烃和简单芳环的积聚,并造成较牢固的聚亚甲基环数的减少和石油整体密度的减小。

А.Л. А. 彼得洛夫根据自己对不同含油气省石油热演化的实验研究反证了多布里扬关于石油和凝析油气深成演化的理论观点。彼得洛夫将油在 150~400℃ 温度区间进行热解,发现了很强的成气作用,与原油相比,在高含正烷烃和低含环烷烃(二者比为 1.5~2.0)的产物中,汽油分馏物增加到 10%~15%。在分析石油热解结果后彼得洛夫认为,正烷烃的分解是主要的分解过程,其中首先是长石蜡链的断开以及环烷烃和芳烃从正烷烃链的末端分离。彼得洛夫还查明,环上的 C—C 键比正烷烃链上的此键牢固。正烷烃链的断裂造成正烷烃  $C_{25} \sim C_{31}$  数量大大减少,而  $C_{15} \sim C_{24}$  数量增加。

根据实验热解资料,烷烃链的断裂在 300℃ 以前是一个很慢的过程,在 350~360℃ 区间,其断裂速度骤然加快,比 300℃ 以前快 50~60 倍。与自然条件相比,实验室的温度作用是“瞬间的”,但实验的高温度弥补了热解过程中在时间延续上的不足。按照这些假设可以查明深部石油随温度升高进行演化的总趋势是:轻的汽油分馏物聚集及其构成的甲烷化;较轻的烷烃(主要是  $C_{12} \sim C_{21}$ )因长链的断裂及从环烷烃和芳烃上的分离而出现过剩。甲基和芳环不可破坏原则是石油热演化的普遍性法则之一。

分析石油性质和构成与埋深、温度和压力的对比关系,可使我们在利用回归方程进行数值对比的同时,查明烃类流体的性质、构成和相态随温度和深度增加的变化趋势。从对前高加索中生界和新生界含油气层的等时中子伽马测井资料来看,3 000 m 以浅主要为油藏,3 000~4 000 m 大部分为油藏和凝析气藏,5 000 m 深度多数为凝析气藏、气藏和少数油藏。最后一种油藏中油的密度有由 0.813 g/cm<sup>3</sup> 向 0.800 g/cm<sup>3</sup> 减少的趋势,而甲基环烷烃分馏物的数量则有由 85% 增加到 90% 的趋势。通过总结滨里海盆地、普里皮亚特坳陷、高加索山前坳陷和南里海地区的石油随埋深增加而变化的实际资料表明,对各含油气省来说,在大于 4 000~5 000 m 深度,石油密度减小的一般趋势是 0.850~0.800 g/cm<sup>3</sup>,而含轻质馏分增加趋势是从 30% 到 75%~80%。

通过详细研究两个大的含油气省——提马诺—伯朝拉和滨里海含油气省石油和凝析油气性质和组成变化的实际资料,发现了相同的石油密度减小的趋势。特别是在滨里海含油气省,这种趋势十分明显。在该省,埋深从 1 000 m 增加到 6 000 m,石油密度从 0.850~0.900 g/cm<sup>3</sup> 下降到 0.800 g/cm<sup>3</sup>。当埋深超过 4 500~5 000 m、温度高于 100℃、层压大于 60 MPa 时,油的密度急剧减小。在提马诺—伯朝拉含油气省,当埋深超过 4 000~5 000 m、温度达 120℃、压力达 70 MPa 时也出现了油密度急剧减小现象。

与石油相反,凝析油气的密度随埋深、温度和压力的增大而增大。在提马诺—伯朝拉含油气省,凝析油气的密度从埋深 2 000~3 000 m 的 0.700 g/cm<sup>3</sup> 增加到埋深为 5 000~6 000 m、温度高于 100℃、压力大于 60 MPa 时的 0.800 g/cm<sup>3</sup>。

在滨里海含油气省也观察到了凝析油气密度变化的相同趋势,即从 0.780 g/cm<sup>3</sup> 增大至 0.822 g/cm<sup>3</sup>。在 5 000~6 000 m 深度和温度高于 100℃、压力大于 60 MPa 时,石油密度(减小)和凝析油气密度(增大)的变化最突出。

假若如上所述,石油密度的减小与热解引起烃键断裂和复杂结构被破坏并重新形成轻的汽油馏分等过程有关,那么凝析油气密度的增大则是其他作用造成的。随着温度的升高和

压力的增大,越来越多的高分子石油成分变成了气态溶液。已经查明,随着埋深的增大,凝析油气中石蜡烷烃分馏物的分子环化作用增强。实验数据和实际资料表明,在深部( $>5\ 000\text{ m}$ )存在着含有特殊烃类流体的烃藏。根据自身的性质,这种流体处于典型石油和典型凝析油气两者的中间状态,其中还含有大量的溶解气。气的来源是:①深部岩石有机质在高温(深成作用中期3级和4级)条件下产生的气态烃;在深成作用中期3级阶段,液/气态烃(油/气)比为0.5;在深成作用中期4级阶段,液/气比为0.2;②热催化作用下的石油可分解出许多气态烃。

依据井内样品的成分和状态,常常很难确定烃藏的物理状态,其可能是含油环的凝析气藏,也可能是含有大量气的油藏,也可能是“过渡相”的油藏,即汽化烃和气体混合物的单相态烃藏。对于开采来说,上述相态是有本质区别的。为了确定烃藏的具体相态,要求进行补助调查。

随着盆地的不断沉降,烃藏内油、气、水的比例也不断变化:气和水中的含油量增加,即过渡相的乳状液——气油溶液增加;乳状液在(过渡相)烃藏上下均有分布。

乳状液的形成可能引起流体以高速向井底流动。B. Г. 瓦西里耶夫(1966)把这种烃藏称为过渡态烃藏。

在更高的温压条件下(温度 $280\sim 350^{\circ}\text{C}$ )液态烃和水变成了不断互溶的溶液。在形成统一烃藏的同时,上部的气—油(或蒸汽—油)过渡相带与下部的水—油相带随之混为一体。不断的相互溶解是流体在超临界状或接近该状态下存在的特征。在接近这一状态即接近这种深度带,可以观察到原先相互不溶解的流体此时则出现强烈的溶解性和被溶解性。在温度达到 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 时,油和水在化学构成已经出现上述特征,当温度达到 $180^{\circ}\text{C}$ 时,这种特征则变得相当明显。经过汽化的含气不饱和的油藏也逐渐接近上述类型烃藏。显然,这类烃藏应当称为临界态烃藏。在这类烃藏里,流体系统变成了单一流体系统,表面张力消失,密度和构成出现变化,相渗透性急剧变化(没有相,只有不同构成和不同大小的分子)。该流体系统的界面可通过绝对体积、热动力环境、运移方向(该系统存在运移方向和能量)来测定。

## 2 储层

对于这一多层次问题本文只研究其中的一个问题,即孔隙环境中水和油的关系问题。因为沉积岩基本上是亲水的,故其可作为研究的对象。首先应当弄清油和水同时存在于储层的可能形式。为此我们提出了下列七种方案(图1)。

需要指出,水膜无一例外地在任何情况下都会出现。水完全充填孔隙(图1A)和油完全充填孔隙的前提是:水和油在所有孔隙空间按达西定理作自由运动。在亲水岩中水不断努力将油从较小的孔隙挤向较大的孔隙(在疏水岩中情形则相反)。这样,在烃藏含油部分的那些储层内,会存在既充填有油又充填有水的孔隙。在生产井从一开始就有水出现。水量变化不大依据两个条件:一是水与油充填孔隙的比例,二是相渗透率条件。当油渗入岩石时还会出现平衡状态(图1B)。油要开始运动就要克服分离表面膜的阻力(拉普拉斯力)。表面张力越大、孔隙半径越小,要求的拉普拉斯力就越大。在钻井中可以清楚地观察到“初始梯度”或“涌出梯度”。由于表面的自然静电现象,在电场变化作用下油产量也有变化。油、水界面上的表面张力随着温度的升高而减弱,并在临界温度域内趋于零。然而,当温度超过 $100^{\circ}\text{C}$ 和压力大于 $92\text{ MPa}$ 时表面张力已有明显的减弱。此时油和水的粘度均下降。

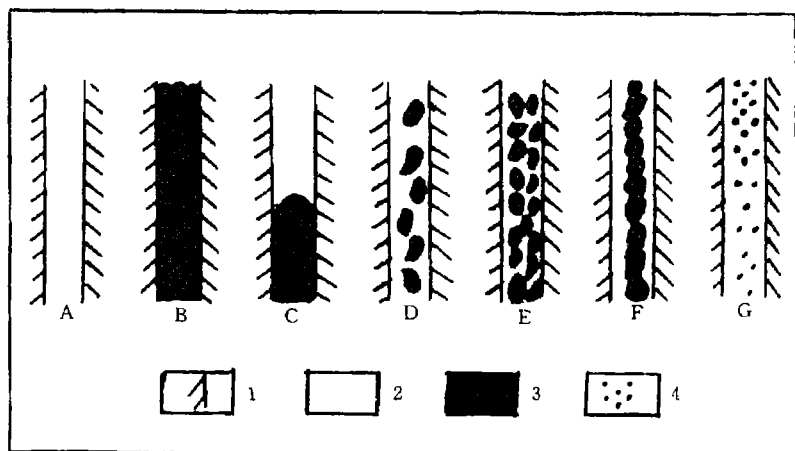


图1 油和水在孔隙中存在的条件

A~G, 油和水在孔隙中存在形式的可能方案; 1: 带有水膜的孔隙壁;

2: 水; 3: 油; 4: 油、水、气在接近临界状态的混合物

下一情形(图 1D)是水(油、气)中烃泡的形成。在重力作用下, 烃泡可以在孔隙中浮游, 浮游的障碍是孔隙通道收缩后变得很狭窄。为了通过孔隙的狭窄部分, 烃滴必须改变自己的形状, 这就要消耗补充能量。这类烃滴的积聚就可引起水油乳液或气体乳液的形成(图 1D)。乳液移动缓慢, 会被电场作用破坏。沿通道以链状伸长的烃滴可以形成烃流(图 1F), 其大小不一。B. B. 萨夫琴科和 A. Л. 科兹洛夫曾论证了这种形态的有用烃流。在层温和层压升高情况下, 层间流体总是力图达到临界状态。这种状态的特点是无休止的流体互溶(正像蒸汽互溶一样), 并缺乏界面、表面张力和重力分离等。

对于油—气—水系统临界点的研究很薄弱。在高于水的临界压力(22 MPa)和温度高于 100℃ 条件下才能在一定程度上查明这一临界点, 特别在温度高于 150~240℃ 时能清楚地查到。这一温度并不少见, 其可看作是近临界现象存在的温度。也可以把气中出现凝析物视为临界点的出现。难道此时还要谈什么液态烃在气中的真正溶解么? 一些文献关于液态石油溶于气的看法缺乏物理学根据。更正确的说法应是汽化烃与气的混合。这样, 随着温度的升高凝析物变重并在构成上变复杂。在压力超过水的临界压力的烃藏里, 汽化烃和水蒸汽形成时会出现温度的骤变。这种烃藏应改名为“近临界烃藏”, 或干脆叫“临界烃藏”。按其本质, 这种低粘度、无界面和几乎缺乏重力分离的物质将具备最有利的运移条件。

上述情况在图 1G 中用密集的点表示(图 1G)。在变成过渡相之后, 不存在明显的水—油和气的接触点。在两种情况下可以观察到烃藏里的“过渡”带。其一: 在相对低的温度下, 在较小(按直径算)的孔隙里保存有水, 这些水后来与油(气)一起来到井内。其二: “临界”烃藏——蒸汽、水、油和气的同处于一个孔隙中。由于缺乏表面张力膜和重力分离很弱(图 1G 上点很密集), 故没有相的区别, 也没有相渗透率。

关于深部储层问题应注意两个方面: 一是存在的可能性, 二是能源势。

深部存在储层问题已被查明的流体的大量涌流所证实。应当看到, 导致深部储层变差乃至消失的因素是一些负面因素, 如脱碱作用、构造性和收缩性裂隙的形成以及欠压实等。在

这里谈一谈欠压实,这是其他文献涉及很少的一个问题。为了压实那些由相互挤压较弱的流体(水和油)所充填的储层,就要将流体从孔隙中挤出。流体的被挤出和储层的被压实是一个同时进行的并相互关联的过程。假若流体很难挤出或者根本就没有被挤出,那么,储层就很难压实。储层会出现异常高层压,后者出现的时间取决于岩层被压实的速度和其中压力的松弛。当然,随着压力的升高,在储层形成过程中,如果不是从空间体积的增大(仅增大2%~4%)、而是从流体运移通道形成的角度来看,所产生的裂隙度值也随之升高。

依据前面对深部流体粘度的变化、表面张力作用的骤减和重力特性的接近以及相界面的缺乏等现象的论述,可以断言,在渗透性方面深部储层类似于近地表地层,其具有很好的产能。还有,在变化了的温压条件下某些层(如粘土质粉砂岩层,有时还有粘土层)在作为盖层的同时,还是一种很好的深部储层。应当注意,所有的对烃藏的勘查和开采方法都是以重力原理为基础的,而随着压力和温度的增加重力值则急剧减小。

在沉积层包括储层堆积过程中,总是能观察到埋藏有机质矿粒的组成和大小的不均匀性,也能观察到埋藏水化学成分的不均一性,而且,由压实所引起的地球化学作用还会加强这种不均一性。

可以看出,早在沉积过程中,介质的非均质性就开始形成,然后依靠非均匀的压实、有效应力非均匀场和温度的非均匀作用等因素而增强。假如是一个均匀的热场作用于介质,那么由于介质各点热传导和热容的不均匀性,也会出现各种不同的温度。H. A. 叶列缅科和Г. B. 契里加尔(1996)就上述因素对地球化学作用的方向性和速度的影响曾作过详述。

这样,在含油气层岩石化作用过程中,组成岩石的矿物和有机质部分的有规律变化依靠古深度、厚度和升高了的温度的作用时间间隔等因素。这种变化的主要特点是不均匀性,不均匀性可造成深层各部位能量潜势及其总能量强度的差异。总能量强度是深部的主要驱动因素。

深部盖层和沉积层的发育特征反映在层状储集体及其圈闭的特性上。若按层状储集体的概念理解储层和“盖层”(从上部、侧部和下部即底层将储层隔离)的相互关系就应指出二者相互变化的条件。由于成岩作用和后成岩作用,一些储层会完全失去渗透性。

同时,在近地表条件下,由于水、流体的失去,某些非储集性岩石例如粘土岩会变得坚硬并失去弹性,然后成为“临界流体”的储集层。如此,随着深度的增加,在层状储集体里,储层的性能会变好、盖层的性能会变差。

层状储集体构造的改造不能不反映在其能量特性上。在这样的储集体里,层能的分布与自流盆地的水静力学和水动力学有关。可是,带有这种能量分布特性的层状储集体只有沉积层最上部才有。在深埋部,由于岩石压实和各种二次地球化学作用的结果,层状储集体会发生分异。在这里,笔者不想涉及物质组成的变化问题,只谈一下层状储集体储层基本性质的变化问题,即孔隙度和渗透率的变化问题。如果层状储集体的储层原来多多少少是均一的(当然指孔隙度和渗透率),那么现在到各储层相互间几乎完全独立之前,各储层才出现非均一性。其外部标志是:流体动力学状态由自流型变为电子离子型;异常压力出现。在开始阶段,以流体的侧向运移为主。此时,与整个层状储集体能量相比,烃藏势能还显得很小时。而随着储集体的分异,侧向运移的困难越来越大,大量的水力断裂的出现导致流体从储集体流向更有利的地带。还可观察到弹性势能(异常高层压)的增大,能量的分布开始具有离散性。烃藏与层状储集体势能之间的差异开始变小,在个别地带(区块)其势能将趋于同一。

在这种储集体的每一个区块里,都可以形成自己的圈闭,并出现带有含油边界或“过渡”的烃藏。不仅可以用断层,而且可以用储层内部的二次变化带来界定所形成的圈闭(这里指的是由褶皱断层所产生的圈闭组合)。通常在这种情况下可标出由断层屏蔽的烃藏,同时用烃藏的存在证明断层的存在(而不是用断层的存在证明烃藏的存在)。关于断层的屏蔽性能有一些不可信的看法,其主要观点是假设表面滑移的屏蔽作用。如果是这样的话,与层厚度有关的断层断距的增加就成了必需条件。现以材料力学现象来说明。材料力学指出,材料断裂有一个从弹性经塑性(褶皱)到断裂的变形过渡。厚度的减小、结构的改变、最终过渡到断裂是材料塑性变形的特点。褶皱断裂(塑性变形)伴随有岩层厚度(挠曲)的减小和物质的流动。厚度的减小必然伴随有孔隙度和渗透率的减小,也就是说会出现运移屏障(圈闭)。而应将通常被构造角砾岩充填的断裂带看作是角砾岩孔隙度和渗透率的当前岩层。这样,扮演屏蔽角色的常常不是断层表面,而是与之相邻的渗透率变差的岩带。在这种情况下,对屏蔽来说断层断距就没有任何意义

### 3 结论

(1)“临界”气藏和油藏最大限度地可存在于压力达 100MPa(可能还更高)、温度达 350~400℃ 的深部。

(2)在深部,依靠欠压实、各种表层现象影响的减弱和流体粘度的降低,某些储层的渗透性会增强。

(3)深部裂隙—孔隙型细粒岩储层比浅层的同型储层更具产能。

(4)在深部高温高压条件下,可以出现“区块型层状储集体”,在其内部异常高层压的分布是不均匀的。

(5)在深部高温高压条件下,圈闭可能会发生变化,但是,就像其他问题一样,关于圈闭有待做进一步的工作。

### 参 考 文 献

- 1 Арье А Г. Физические основы движения подземных вод. М:Недра,1984.
- 2 Парпарова Г М,Неручев С Г,Жуков АВ и др. Катагенез и нефтегазоносность. М:Недра 1981.
- 3 Петров Ал А. Углеводороды нефти. М:Наука 1994.
- 4 Савченко В П. Формирование, разведка и разработка месторождений нефти и газа. М:Недра 1977.
- 5 Antonellini M, Agdin A. Effect of faulting on fluid in porous sandstones; petrophysical properties. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1994, 78(3):147~175.

史斗 译自 Геолотия Нефти и Гдза,1998,(6):6~11.