

油气藏中气态地层水的存在及其意义

郭望¹, 陈践发¹, 曹青², 赖长洁¹

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 油气藏中广泛存在烃—水及其他气体和矿物盐类的混溶体系, 其相变特征十分复杂, 但对油气勘探开发的作用至关重要。通过调研中外有关烃—水混溶体系的资料, 着重分析了气态地层水的存在条件及含水烃类体系的相变特征, 结果表明, 局部突发性的温度上升、压力减小及混溶体系含烃量增加, 均有利于烃—水混溶体系的气化。现今测得的束缚水膜厚度受控于束缚水饱和度的影响, 为动态变化量, 不适宜作为储层下限进行评估; 真正稳定的束缚水膜厚度应约为 1.6 nm, 在一定的温度和压力及溶解烃浓度下, 现今测得的储层物性下限一定可以降低。地层水的气化引起的盐析作用会降低油气藏的渗透率, 增大油水界面压力, 在开采过程中要注意气态地层水的变化。

关键词: 气态地层水 烃—水混溶体系 束缚水膜厚度 盐析 相变特征

中图分类号: TE37

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)01-0036-04

长久以来, 对于地下流体相态的研究多缺乏综合考虑与分析。例如尽管地层水广泛存在, 但石油地质学家在进行油气藏的PVT实验时, 都是在无水条件下进行的; 岩矿学家多考虑无机盐矿物离子溶解造成的水—盐体系相变化, 而忽视烃类及其他常温下水溶性差的物质溶解对于混溶体系造成的影响^[1-4]。在地下高温高压条件下, 同时存在无机矿物盐类及烃类流体在地层水中的溶解, 造成地下混合流体的相变特征极为复杂。近年来, 中外发现的深层高温高压凝析气藏及受束缚水影响明显的低渗透率气藏越来越多, 而现有的模拟软件及理论模型均简化了地下流体的相变特征, 忽略了地层水的影响, 导致油气藏流体相态、渗流和开发动态分析的结果往往与真实情况有所出入。随着石油工业勘探开发向深层及非常规方向发展, 未来发现的深层异常高温高压凝析气藏及非常规油气藏所占比重将越来越大^[5-6], 因此, 综合分析地下混溶流体的相态变化规律显得尤为重要。笔者通过调研中外有关烃—水混溶体系的资料, 着重分析了气态地层水存在的条件及含水烃类体系的相变特征。

1 气态地层水存在的条件

传统理论上对于地层水相态的研究多参考纯

水的压力—温度相图(图1), 液态水的临界点的温度和压力分别为 374.3 °C 和 22.0 MPa, 在该点以上, 液态的水不复存在。气态地层水可在 2 个区域存在。一是体系温度高于水的临界温度的部分, 取常规地表温度为 20 °C, 地温梯度为 30 °C/km, 要增加 354 °C, 对应增加的深度为 11 800 m, 显然这一深度以及对应的温度远远超出正常油气藏的形成范围。即使是对于沉积盆地深层油气带, 其油藏深度一般为 5~6 km, 气藏深度一般为 7~8 km^[7], 与临界温度对应的深度也相差较远。此外, 地层水体系要落在饱和蒸汽压曲线之下的区域同样较为困难, 按照地压梯度为 0.02~0.03 GPa/km 计算, 压力增加的速度远远大于温度增加的速度, 对于地下某一深度, 多数情况下出现低温高压的情况, 地层水多分布在液相区域。综合水的相图、典型地区的地温曲线、矿物脱水及一些矿物和岩石的含水量变化等方面研究, 王方正等^[1, 8]指出, 在正常地温条件下封闭的地壳中不存在气相的水, 且明确划定以 15.15~25.11 km 深度为界, 在该深度以上的岩石圈浅部水为液态, 而在该深度以下的岩石圈深部水为气态; 并断言, 在地温低于水的临界温度的中、上地壳中, 自由状态的水只能是液态。由此可见, 按照目前认为的油气生成的深度(仅针对油气有机成因论), 油气藏存在的深度对应的地层水为液态。

收稿日期: 2012-11-26。

作者简介: 郭望, 男, 在读硕士研究生, 从事非常规天然气成藏及地下流体相态分析研究。联系电话: 18911030531, E-mail: guo-wang19860724@yahoo.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发项目”(2011ZX05023-001-011)。

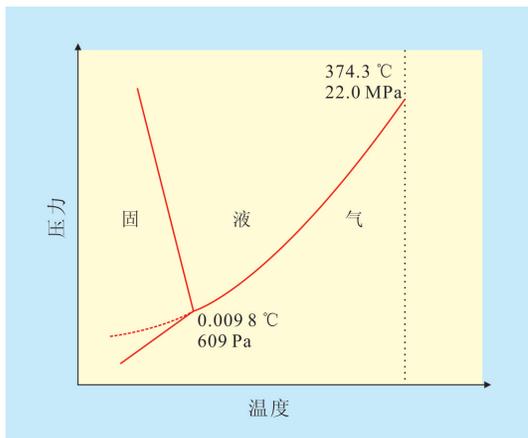


图1 纯水的压力—温度相图

但高温气藏开采过程中气态水的产出却对上述理论提出了质疑。在高温条件下,储层中的束缚水及油气藏边底水与烃类流体发生互溶,极易形成富含气态凝析水的凝析气藏。且在进行流体相态平衡理论分析时,富含地层水的凝析气藏的凝析气和溶解于其中的气态水往往被看作同一相^[9-11]。而且一旦钻井开始生产,井筒周围的压力降低将会引起气相中水含量的增加^[12]。

上述2种观点本质上是不对立的。单纯针对地层水而不考虑其与其他流体的互溶及构造活动导致温度和压力的动态调整,根据地层水压力—温度相图分析,地层水气化确实极为困难。而在实际的地质条件下,特别是对于含烃类流体丰富的油气藏,烃—水混溶及其所经历的温度和压力变化具有极大的不确定性,同时也为气态地层水的产生提供了可能,通常存在3种情况会导致液态地层水转化为气态。

其一,岩浆活动时能产生很高的热流,并持续一定的时间,必然会提高古地温梯度,导致局部地层温度超过相应压力条件下水气化所需的最低温度,甚至高于地层水的临界温度,从而形成了气态地层水。相关研究资料已经证实^[13-14],除放射性作用对大地热流贡献以外,岩浆活动是主要的热源之一,且油气的大规模生成往往与岩浆活动密切相关,例如三水盆地主要生油层古近系布心组,按现今地温梯度为 33.1 °C/km,地表年平均温度为 21.5 °C计算,其生油门限应为 2.2 km,但现今其生油门限仅为 1.2 km,大大浅于中国东部其他盆地古近系的生油门限。这显然与该地区古近纪—新近纪以来多期发生分布面积达 300 km²的火山岩和次火山岩活动有关。

其二,在地下温度和压力条件下,地层水会与

烃类流体发生一定程度的互溶,特别是在高温高压的凝析气藏中会有大量的水溶解在烃类流体中,如中原 Q69 和大港 BS 异常高温高压富含气态凝析水的凝析气藏中,地层水中凝析气的溶解能力较强,溶解气水比可达 10 m³/m³,甚至更大,溶解气水比随压力降低而减小;天然气中气态地层水含量达到 236 m³/10⁴ m³,并且高温下饱和气态地层水含量随压力的降低急剧增大。烃类碳数、混合体系的温度和压力及地层水矿化度的变化都会影响到烃类气体在水中的溶解,如烃类在地层水中的溶解度随碳数增加显著减小,甲烷在地层水中的溶解度很高,碳数大于 7 的烃类在地层水中几乎不溶解^[2],对于甲烷气体,压力的增加有利于甲烷气的溶解,而随着温度的增加,溶解度呈现先减小后增加的趋势,拐点值为 80 °C 左右。矿化度对溶解度的影响则相对微弱^[15-17]。因此,考虑烃、水混溶时,地层水对油气藏相态研究的影响可能仅限于低碳数的轻质油及高、过成熟度的天然气,而对于高碳数重油的影响可以忽略。

烃—水混合体系在地层条件下的存在极为普遍,但对混合体系相变参数的影响研究则较为困难。Pedersen 等^[18]曾对烃类和其他物质,如水、乙醇和甘醇等的混合物的相态进行了精确的模拟研究,但其适用温度仅为 250 ~ 450 K,适用范围有限。实例分析中,混合体系最终的相态特征由温度和压力条件及组分的类别、质量浓度和所占比例决定,相图可能极为复杂,目前还没有形成地层条件下烃—水体系相平衡的系统研究,仅有部分学者模拟绘制了不同开采阶段因压力变化导致的天然气含水量所对应的混合体系相图。综合相包络线算法所得出的高温凝析气藏中不同含水率的烃—水体系的压力—温度相图(图 2a)及一般烃—水体系的压力—温度相图(图 2b)^[9],可以发现,随着含水率的增加,平衡水相初始三相分界线及平衡水的饱和蒸汽压曲线发生右移,高含水体系的烃—水互溶体系导致烃类体系相变曲线严重变形。但无论曲线如何变化,相比单一水的相图而言,高温高压环境下混合体系的地层水平衡蒸汽压曲线发生左移,且随着含水率降低,左移程度加强,整体而言,烃—水互溶有利于气态地层水的产出。该推断与樊建明等^[11]通过实验所得出的露点压力随着气中饱和水蒸汽含量的增加而降低的结论相符,且同样适用于地史演化过程中油气藏内部混合流体体系相态的变化。

其三,对于高温高压流体,类似气藏生产过程

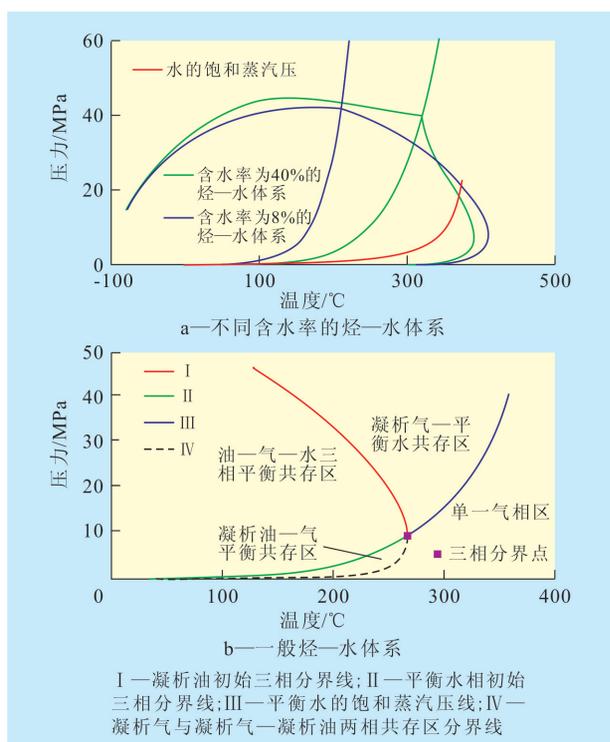


图2 烃—水体系压力—温度相图

中,近井带压力降低引起地层水蒸发,在地史演化过程中,由于断裂等构造运动,造成局部空间流体压力骤然降低,而温度基本保持不变或变化甚微的情况下,液态流体减压沸腾,发生类似闪蒸的过程,形成大量气体逸出,其中不可避免地涉及到水的气化,不仅包括自由水,对于气藏研究更为重要的束缚水也会发生相应的相态变化。在断裂带附近极易形成气态流体,又因断裂往往是良好的油气运移通道,研究断裂带上流体物理化学性质的变化就更为重要。

综上所述,油气藏中气态地层水是可以存在的,在进行相关研究时,应当结合相应的地质背景慎重处理。

2 气态地层水在油气勘探开发中的应用

2.1 稳定束缚水膜的厚度

一般认为,吸附在岩石颗粒表面的、不能自由流动的束缚水所组成的吸附水层,在储层埋藏至一定深度时,性质稳定,水膜的厚度基本保持不变,即束缚水膜厚度不变原理。

束缚水膜厚度稳定是许多油气藏研究的基础,特别是对于低渗透储层物性下限的确定,只有半径大于束缚水膜厚度的孔隙才有可能为油气的运储

提供空间。如姜福杰等^[19]根据束缚水膜厚度不变的特征,通过对致密砂岩气藏储层的孔隙空间演化和流体变化规律进行分析,确定了致密砂岩气藏成藏过程中的3个地质门限,即天然气充注门限、天然气饱和门限和天然气终止门限,并在鄂尔多斯地区进行了实践,取得了一定的效果。邹才能等^[20]在进行致密储层的物性下限研究时,通过将甲烷分子被稳定吸附的喉道临界值和束缚水膜的厚度加和,从理论上推导了含气致密储层的厚度下限,进一步求得含气致密储层的物性下限。

受到实际复杂条件的影响,对于束缚水膜稳定层的具体厚度无统一论和精确的测量。目前对于水膜厚度的计算多依据土壤学中计算土壤颗粒表面水膜厚度的理论公式^[20-21]。要测定岩心中任一时刻的水膜厚度,可通过测定任一时刻岩心中的含水饱和度得到。近些年来,许多学者通过气驱、水锁和核磁共振等实验方法对不同地区低渗透气藏的束缚水饱和度进行了测定^[20-22],通过计算束缚水饱和度得到的束缚水膜厚度并不是个稳定的值,同一地区、同一层段最大差值可达15 nm,相当于束缚水膜厚度最大值的1/2,简单地通过平均所得出的储层物性下限会错失部分有效储层。此外,实际生产中,束缚水饱和度的测量多在室温、亲油条件下进行,这是不全面的。相关实验结果已经表明,亲水岩心的束缚水饱和度随温度上升而下降,亲油岩心的束缚水饱和度随温度升高而增大^[23]。更进一步说明了依据束缚水饱和度计算束缚水膜厚度的不确定性。依据束缚水膜厚度不变原理,存在极为稳定、极难脱附掉的束缚水层,不稳定的部分在一定的条件下可以脱附掉,在确定储层的物性下限时,最终稳定存在的束缚水膜厚度才是有效的。

由于目前得到的束缚水膜厚度多数是在实验室地层水以液态形式相对稳定存在前提下测得的,所以实际地层条件下,束缚水膜可能普遍会以气化继续减薄的形式而到达最终稳定状态。根据已知经验可知,温度升高、压力降低有利于束缚水气化。但这并不意味着地层沉降、温度和压力上升会阻碍束缚水气化,如图3中的A和B点所示,B点温度和压力均大于A点相应的值;在1个大气压和温度为15.5℃的条件下,B点的饱和水蒸气含量(即束缚水的气化量)同样大于A点的相应的值。所以,不管是埋深成藏还是抬升成藏,束缚水均有可能气化,必须结合具体的温度和压力才能做出准确的判断。

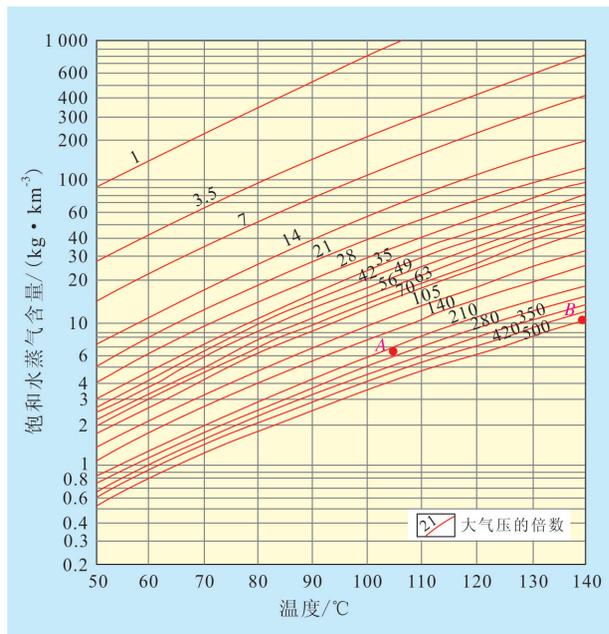


图3 天然气饱和水蒸气含量与温度和压力的关系

对于最终极为稳定的束缚水膜厚度, Hunt^[24]认为仅有2个或3个水层,这其实已经是结构水部分。尽管束缚水膜厚度已为分子水平,但仍需考虑对应水的相态。原因为:单个水分子直径约为0.4 nm,气态形式中水最多的是单体,在岩石颗粒表面以单层的形式排列,稳定束缚水膜的厚度为1.0 nm左右,而液态形式下,水分子大都在四面体构造中排列,以单个水分子直径为0.4 nm计算,四面体形式的水膜厚度则为0.53 nm,稳定束缚水膜的理论厚度约为1.6 nm,比前者多出1/3,在进行微观研究时有必要予以重视。

考虑到现今测得的束缚水膜厚度为一动态变化量,严格受控于束缚水的饱和度,不适宜作为储层下限进行储层物性评估,真正的下限值应结合具体的流体性质及温度和压力条件来分析,当地层条件或人工改造足以使得水气化时,现今测得的储层物性下限完全可以降低。目前研究的难点在于对束缚水膜变化的微观观察及计算。

2.2 盐析作用的影响

地层水蒸发是油气藏渗透率降低的主要原因之一,特别是存在高矿化度地层水的高温高压气藏^[12]。这在油气田开发领域的研究已较为深入。原始地层条件下,地层水与天然气处于一种平衡状态,在气井开始生产后,近井带压力降低引起水蒸发,当地层水的蒸发量超过矿物盐的临界饱和度时,会发生盐析,导致水蒸发区域的气相渗透率降低^[5,12]。此外,对于表面活性剂的性能及驱油效果研究显示,盐析作用会导致大部分表面活性剂进入

油相,破坏油水界面的吸附平衡,导致界面张力上升^[25]。因此在油气开采过程中需要及时监控储层的温度和压力条件。目前对于造成储层损害的盐析的研究难点在于对地层水蒸发规律及影响的定量研究。

3 结束语

地下高温高压条件下广泛存在烃—水混溶及突发性地质事件导致的温度和压力条件突变,所造成的流体相态变化极为复杂,在进行实验室模拟及油气开采时,一定要结合具体的地质条件慎重对待。气态地层水在一定条件下可以存在,局部突发性的温度上升、压力减小及混溶体系含烃量增加,均有利于烃—水混溶体系的气化。现今测得的束缚水膜厚度受束缚水饱和度影响,为一动态变化量,不适宜作为储层下限进行评估;理论上稳定的值可达到1.6 nm左右,在一定的温度和压力条件及溶解烃浓度下,现今测得的储层物性下限一定可以降低。地层水的气化引起的盐析作用会降低油气田的渗透率,增大油水界面压力,在进行油气田开采过程中要注意气态水的变化。目前有关研究的难点都与地层水,包括可动水及束缚水的气化规律和影响因素的量化密切相关,这将成为以后研究的重点。

参考文献:

- [1] 王方正,胡宝群.岩石圈深部的水及其意义讨论[J].地质科技情报,2000,19(4):25-30.
- [2] 石德佩.富含气态凝析水的凝析油气体系相态研究及其应用[D].南充:西南石油学院,2005.
- [3] 张守鹏,张林晔,王伟庆,等.含油气盆地地层水演化过程中含烃酸性流体的浸入效应——以东营凹陷胜坨油田为例[J].油气地质与采收率,2011,18(4):10-12,20.
- [4] 银燕.东营凹陷地层水水化学纵向分带性与成岩耗水系统划分[J].油气地质与采收率,2011,18(3):32-35.
- [5] 汤勇,杜志敏,孙雷,等.考虑地层水蒸发的异常高温油气藏相态和渗流研究现状[J].钻采工艺,2007,30(5):82-85.
- [6] 杨红梅,李旭兵.水盐体系相平衡与相图研究现状[J].海湖盐与化工,2002,31(5):14-19.
- [7] Neruchev S G,何炜.沉积盆地深层和超深层地带油气生成的定量模型[J].地质科技情报,1989,8(4):29-30.
- [8] 胡宝群,吕古贤,王方正,等.水的相变在热液成矿作用中的意义[C].中国核科学技术进展报告——中国核学会2009年学术年会论文集:第一卷·第1册,2009:68-77.
- [9] 石德佩,孙雷,李东平,等.关于烃—水体系相平衡研究的现状及新进展[J].西南石油学院学报,2005,27(3):49-53.

(下转第43页)