

深盆气高孔渗富气区块成因机理 物理模拟实验与解析

马新华^{1,2}, 王涛^{1,3}, 庞雄奇^{1,4}, 金之均^{1,4}, 罗群^{1,4}, 王强^{1,4}

(1. 石油大学 石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100864; 3. 中国石油天然气集团公司, 北京 100724; 4. 石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要: 实验表明, 深盆气及其富气区块的压力并非一成不变, 而是随着地质条件 (供气强度和供气量) 的变化呈周期性变化。深盆气富气区块与周边的致密砂体在深盆气的建设阶段各形成两套独立的正压 (高于静水压力) 压力系统, 这是由于两者之间存在孔渗性差异。在深盆气的消亡阶段, 两者压力均降低, 直到负压 (低于静水压力) 并逐渐归一, 其演变特征类似于正弦曲线。负压不是深盆气的基本特征, 而只是深盆气形成演化过程中消亡阶段的一个特点。深盆气富气区块形成演化要经历深盆气初期充注阶段、临界接触时刻、“甜点” 充气阶段、两气相连时刻、气藏扩展阶段和调整共溶阶段共 6 个阶段。控制深盆气富气区块成藏机理的动力是气体膨胀力、毛细管力和浮力, 它们在深盆气富气区块成藏过程的不同阶段具有不同的表现和控制作用。从而建立了实验条件下较完整的深盆气富气区块成藏序列及成因机理模式。

关键词: 物理模拟实验; 压力变化; 成藏机理; 高孔渗砂体富气区块; 深盆气

中图分类号: 地质 22.1

文献标识码: 特

1 深盆气藏高孔渗富气区块 (“甜点”) 的地质概念及研究现状

1.1 地质概念

自 1976 年 3 月在加拿大阿伯达 (特提斯) 盆地西部深盆构造区发现艾尔姆华士 (特提斯) 深盆气藏以来^[1], 又相继在美国的绿河 (特提斯) 盆地^[2]、红色沙漠 (特提斯) 盆地发现了深盆气聚集。我国自 1996 年引入深盆气理论之后^[3], 在鄂尔多斯盆地^[4]、吐哈盆地^[5] 等发现了深盆气藏。深盆气作为一种新的、潜力巨大的能源, 已引起了各国政治家和科学家的广泛关注^[1]。

但并非整个深盆气藏都具有勘探开发意义, 深盆气中具有勘探开发价值的区域仅仅是其中的富气区块, 即甜点区。勘探表明, 甜点区所占的比例和区域很小, 不到深盆气区的 10%。作为深盆气勘探的最终目标, 甜点区的形成和分布规律已成为地质家和勘探家关注的焦点。

所谓深盆气高孔渗富气区块, 是指深盆气藏内

的高孔渗性含气砂体, 它们在现有技术条件下开采可以获得工业价值气流。深盆气藏的勘探只有在寻找到了具有工业价值的高孔渗富气区带后才能取得实质成效^[1]。

深盆气富气区块的发育既有先天型也有后天型。所谓先天型, 是指天然气充注前就属于高孔渗区带, 如浊积砂体、河道砂体等, 它们充满深盆气后具有较高产能。后天型是指天然气充注后的致密砂层经构造变动等改造形成了裂缝, 或因成岩作用形成了次生孔隙, 致使它们具有了高孔渗特征和高产气能力。

1.2 研究现状

由于深盆气刚提出不久, 对其成因机理和分布的认识还不成熟, 大多处于推断和假说阶段, 对深盆气富气区块的形成条件、成因机理、作用过程和方式的认知更是不清楚, 从而导致对深盆气富气区块分布规律缺乏客观认识和掌握, 这势必增大深盆气勘探的风险。我国深盆气勘探前景十分广阔, 而形成又有自身独特的地质环境和成藏条件, 迫切需要适合我国深盆气成藏地质特点的正确理论的指导, 而正确的理论又离不开实验的支持, 探索深盆

气富气区块分布规律必须弄清其形成机理^[6-8]。

目前普遍认为,致密砂层背景条件下的高孔渗性砂体的成藏可能分为 3 个阶段^[1]:

第一阶段是致密砂层充气阶段。此阶段以天然气整体向上或向外排驱孔隙水为特征。天然气排驱孔隙水的原动力来自气体的体积膨胀。

第二阶段是致密砂层内的深盆气向高孔渗砂体内供运天然气并形成常规岩性气藏的阶段。此阶段以高孔渗性砂体内天然气富集出现正压异常和汽水并存为特征。天然气进入到高孔渗性砂体内的动力来自天然气体积膨胀力和毛细管力。

第三阶段是致密砂层与高孔渗性砂体天然气压力归一化的阶段。此阶段以高孔渗性砂体的常规气转变成致密砂层深盆气一部分、气层内部由正异常压力转为负异常压力为特征。

以上解释只是一种理论推断,缺乏实验依据。为此,迫切需要从物理模拟实验入手,进一步验证、完善深盆气富气区块成藏机理。

从机理上讲,深盆气成藏要求储层致密。统计分析结果和物理模拟实验结果均表明,储层的孔隙度和渗透率或其孔喉半径必须小于某一临界值后才能形成深盆气藏。另一方面,勘探实践表明,深盆气藏内的储气量仅有约 10% 左右能够构成现今技术条件下的有效资源,而这一部分气量大都储集在深盆气藏含气范围内孔渗性好的储集层内,被称为“甜

点”。甜点内储层的孔隙度和渗透率有时远远超过了深盆气成藏要求的临界门限,即 $\Phi > 12\%$, $k > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。为此人们不禁要问:低孔渗的深盆气藏与高孔渗的“甜点”其成因机理有何不同?其次,低孔渗的深盆气藏与高孔渗的富气区块在成藏过程中的压力是怎样变化的,是否存在压力机制的转化?弄清这些有关高孔渗富气区块成藏机理的问题,对于判别深盆气藏勘探中高孔渗富气区块的存在和分布,对预测有利勘探区具有重要的理论意义。而物理模拟实验是探讨深盆气富气区块成藏机理的重要手段。

2 深盆气富气区块成因机理模拟实验

本次模拟实验的目的,是探索深盆气高孔渗富气区块形成的地质条件、作用方式、形成过程和主控因素,为深盆气富气区块的勘探提供实验论据和理论指导。

2.1 地质模型

根据目前对深盆气及其富气区块成藏地质条件、成藏环境及作用方式的认识,我们建立了深盆气富气区块成藏机理物理模拟实验地质模型(图 1)。

2.2 实验装置

本次实验装置是自行设计,采用平流泵向气体计量仪注水排气,将气体从底部向上推挤进入已饱

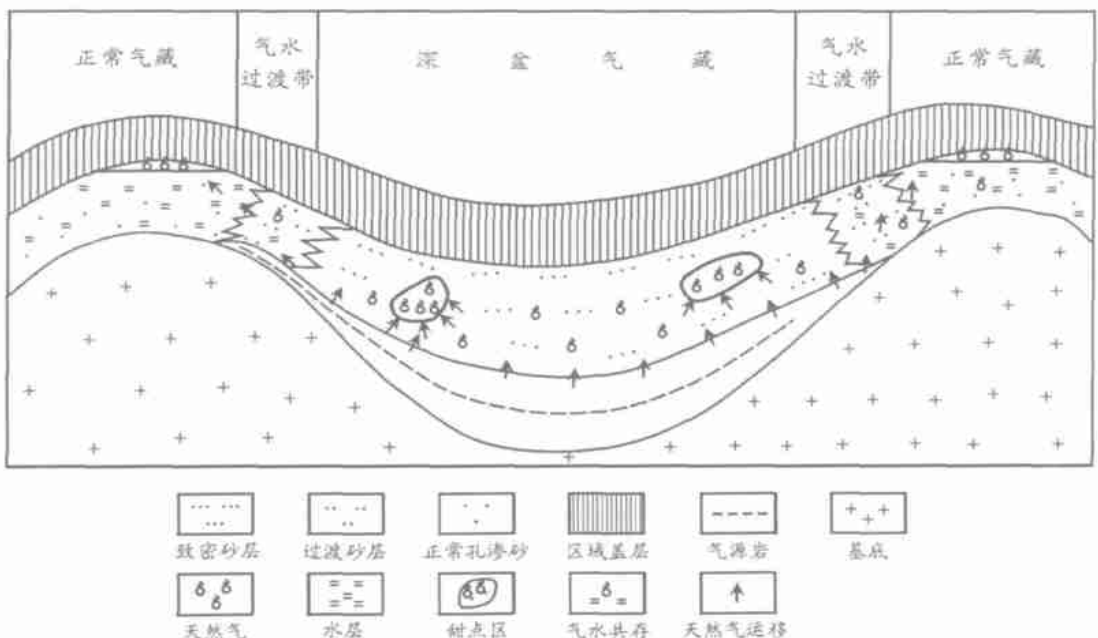


图 1 深盆气富气区块(“甜点”)成藏机理物理模拟实验地质模型

和水的深盆地模拟实验容器之中。实验容器的材料是透明塑钢,以模拟地下深处烃源岩向致密砂层排气驱水的过程。容器大小 40 茱茱 \times 30 茱茱 \times 8 茱茱,在其面上打 5 个孔,接 5 个玻璃管,内径为 1.0 茱茱,伸入容器 2.5 茱茱,保证所测压力为容器中不同粒径的砂中的压力,这些玻璃管分别连接相应的测压管。根据测压管中液面的变化来测定其连接的容器区域压力的变化。实验装置见图 2。

2.3 实验材料

实验采用统一的 3 种粒径的砂:特砂体用 0.05~0.1 茱茱的砂,稠砂体用 0.6~0.7 茱茱的砂,植砂体用 0.7~0.8 茱茱的砂。它们的孔隙度为 28%~32%。特砂体的渗透率 $\mu_{特} = 41.625 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,稠砂体的渗透率 $\mu_{稠} = 3126.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,植砂体的渗透率 $\mu_{植} = 4162.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。它们分别代表致密砂体、高渗透砂体(富气区块甜点区)和上覆地层。

2.4 实验过程

首先通过平流泵向深盆地模拟容器注水,使其中的砂体被水饱和;再缓慢地从底部向深盆地模拟容器中注气,通过砂体颜色变化观察气在深盆地模拟容器中的运移轨迹,并同时通过测压管中水柱的

变化测定不同部位砂体压力及其变化情况(其中 2 号测压管测定富气区块的压力),通过气体计量瓶记录注入深盆地模拟容器的气体体积。当高渗透砂体充满气后,停止注气,观察和记录各测压管中水柱的变化及高渗透砂体颜色的变化。

2.5 实验现象记录

由于实验本身的复杂性和实验条件的原因,先后进行了数次实验,下面是第某次实验记录。

实验日期:6 月 13 日。只测定 1,2,3,4 号测压管压力,其中 2 号测压管测定富气区块压力。

- 17:00 开始注气。注气速度:2 茱茱/茱茱
- 17:07 4 个管的压力上升,2 号管稍高于其他 3 根管。
- 18:05 稠砂体明显变白(图 3),表明气进入稠砂体并在顶部聚集,形成正常常规气藏。植中水位上升,出水管有水排出,表明气整体向上排水。1,3,4 号管水柱增高且相同,表明特砂体为统一的压力系统,2 号管增高较快,为另一压力系统。
- 18:10 稠中气体增加,逐渐充满。
- 18:46 稠完全被气饱和(图 4),颜色全部变白,

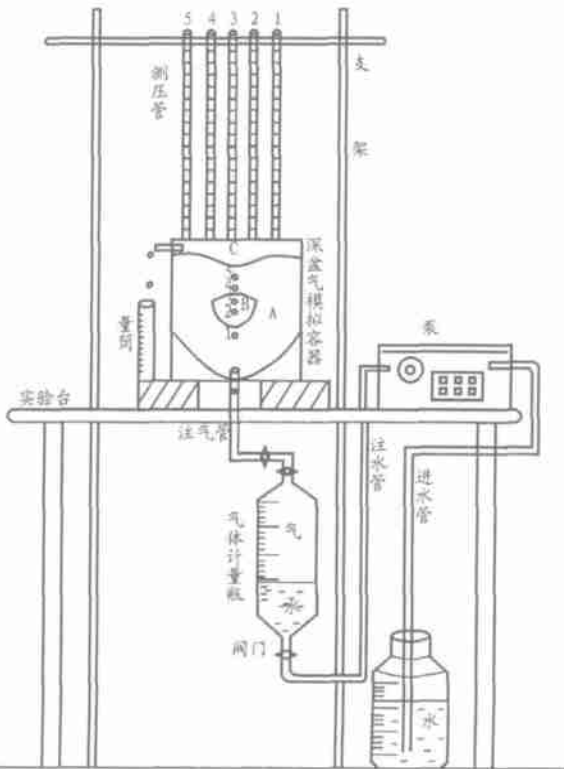


图 2 深盆地富气区块物理模拟实验装置
特:致密砂体;稠:富气区块(“甜点”);植:高渗透区

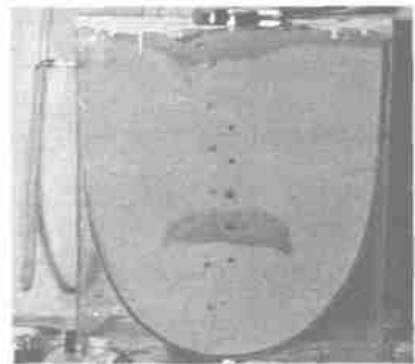


图 3 气体开始进入稠砂体(“甜点”) 特:致密砂体;稠:富气区块(“甜点”);植:高渗透区

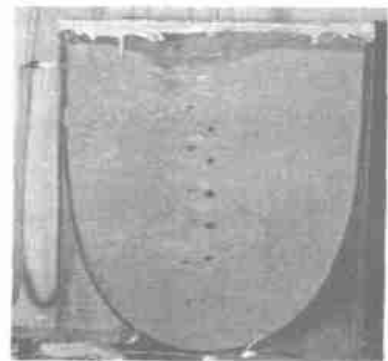


图 4 稠砂体完全被气饱和和

特:致密砂体;稠:富气区块(“甜点”);植:高渗透区

特:致密砂体;稠:富气区块(“甜点”);植:高渗透区

透亮,此时稠与替中气体连为一体,成为替致密砂岩深盆气中一个甜点区。

- 18:50 停止注气。
- 18:57 压力开始降低。
- 19:01 压力进一步降低,稠中气体明显减少(颜色变浅)。推断由于稠的测压管未封好,气体一旦失去供给,很难在稠中保存较长时间。重新密封稠中的测压管,加强稠中测压管封闭性。
- 19:45 二次注气,注气速度 2 獬獬獬獬。
- 19:50 稠中气体未完全跑掉,注气 5 獬獬后稠中气体明显增多。
- 20:00 稠中充满气。
- 20:10 停气后,稠中充满气(再次形成致密砂体深盆气中的富气区块),白色透亮,替中充满水,水位较高,表现出下气上水的深盆气特征。
- 21:06 1,2,3,4 四管的压力开始降低。
- 21:20 压力降低,甜点区稠饱含气。

随着时间的推移,高渗透砂体稠(甜点区)的压力和周边致密砂体替(非甜点区)的压力一同降低,且两者差别越来越小,甜点区保留大部分气,替中充满水,说明水在替,稠顶部,替,稠和替构成气水倒置的深盆气体系。直到替和稠的压力降为负压(低于静水压力)且两个压力系统逐渐归一为一个压力系统(图 5)。当底部又开始注气时,又出现新一轮循环。

由图 5 可知,注气阶段两套压力系统不断增压,高渗透砂体(稠砂体)压力较致密砂体(替砂体)高。停止注气后 2 套压力系统的压力都明显回落,并逐渐归一,1 600 獬獬后均降为负压,2 395 獬獬后形成一个相对稳定的负压压力系统,表现出深盆气负压特征。

3 深盆气高孔渗富气区块(“甜点”)成藏机理解释

3.1 成藏机理

通过总结各次实验的结果,深盆气高孔渗富气

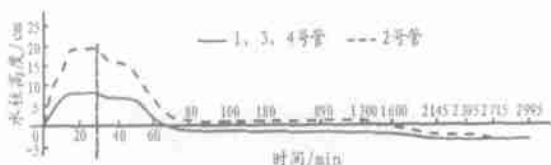


图 5 第某次实验二次注气压力变化曲线

区块的成藏过程及其机理是:在下部气源大量供给的背景下,高渗透砂体因高孔隙度和高渗透率首先“吸引”致密砂体中充注的深盆气进入其中,在浮力和气体膨胀力作用下向上运移,在高渗透砂体的顶部因上部致密砂层的封盖而聚集,形成常规天然气藏。随着高渗透砂体顶部天然气的不断聚集和气藏体积的不断增大,产生向下的气体膨胀力,向下排挤高渗透砂体中的孔隙水,以满足不断聚集的天然气对空间的需要。高渗透砂体中产生的向下气体膨胀力导致了高渗透砂体内部压力不断增高,其增高的速度比其周边的致密砂体气体压力增高速度快,从而形成两套压力系统。随着高渗透砂体中气体的不断聚集,向下的膨胀力也不断增大,直到将高渗透砂体中的孔隙水完全排出其外,使高渗透砂体完全被气充满,形成高孔渗富气区块(即“甜点”)。这时,富气区块的压力仍比周边的致密砂体高,仍为两套压力系统,且都高于静水压力。随着气源的不断供给,在气体膨胀力作用下,进入致密砂体中的深盆气不断向上排水和推进,直到将富气区块完全包围,使富气区块成为致密砂体深盆气的一部分。当气源供给停止后,深盆气进入稳定—消亡阶段,深盆气(包括富气区块)的压力将逐渐下降,直到降至负压,并且,高渗透砂体与致密砂体的深盆气将逐渐混溶,其压力也将逐渐统一,直到下一次供气周期的到来。富气区块一旦形成以后,将长期保存富气的状态,如果长期没有气源补给,富气区块中的气体将不断扩散、散失。因此,负压不是深盆气的基本特征,而只是深盆气演化过程中消亡阶段的一个特点。目前具有负压特征的深盆气只可能正处于深盆气的消亡阶段。

3.2 成藏过程和成藏模式

实验表明,深盆气藏高孔渗富气区块形成过程具有明显的阶段性和规律性,不同阶段其成藏动力、压力特征均表现出不同的特点。结合深盆气藏理论,归纳和总结出深盆气高孔渗富气区块(“甜点”)成藏过程共分为 6 个阶段。

第一阶段:初期充注阶段。此阶段以烃源岩排出的天然气整体向上排驱孔隙水为特征。天然气排驱孔隙水的原动力来自气体的体积膨胀。结果在致密砂层底部初步形成深盆气藏。由于不断供气导致的气体膨胀力的作用,高渗透砂体与致密砂体的压力不断增加,并逐渐高于静水压力,两者处于同一压力系统。

第二阶段:临界接触时刻。高渗透砂体的毛细管力的作用使得气体主体向高渗透砂体方向运移并进入其内聚集。这个阶段时间较短,为致密砂体深盆气

由致密环境向高渗透砂体环境运聚的临界状态。

第三阶段:“甜点”充气阶段。本阶段是致密砂层内的深盆气向高渗透砂体内供运天然气,并在其顶部形成常规气藏的阶段。随着气体的不断进入和在顶部的不断聚集,压力迅速增加,形成独立于致密砂体的高压系统,并不断向下排挤孔隙水以扩大高渗透砂体中的气体规模。此阶段以高孔渗性砂体内气水并存为特征。天然气进入到高孔渗性砂体内的动力来自天然气体积膨胀力、毛细管力和浮力。

第四阶段:两气相连时刻。本阶段是高孔渗性砂体天然气与致密砂层深盆气相遇的阶段。在天然气体积膨胀力的作用下,高渗透砂体内气体不断向下、向外排水,气体体积不断增大,最终充满整个高渗透砂体,并与下部致密砂体中的深盆气接触。此阶段仍保持两个不同的高压系统状态。

第五阶段:气藏扩展阶段。本阶段是致密砂体深盆气完全包围高渗透砂体的阶段。随着底部气源的不断供给,在气体膨胀力的作用下不断向上驱水推进,最终将高渗透砂体包围在其中。此阶段高孔渗性砂体的常规气转变成致密砂层深盆气一部分,但两者仍处于不同的压力系统,且压力都在继续增大之中,高渗透砂体的压力仍高于致密砂体。

第六阶段:调整共溶阶段。本阶段也是压力归一化阶段。停止注气后,气体膨胀力消失,高渗透砂体的气藏体系与致密砂体的气藏体系在新的环境下逐渐趋向新的平衡,两者也逐步合并为一个体系,压力不断下降并逐步归一。由于气体密度小于水的密度,因此,只要有充分的时间,整个深盆气(包括富气区块)的压力将会降至同等深度的静水压力之下(负压)。深盆气富气区块(“甜点”)成藏机理模式见表 1。

表 1 深盆气富气区块成藏机理及形成发育模式

编号	阶段	压力特征	模式图	特征描述
I	初期 充注阶段	A、B 压力同步增加,处于统一压力系统		气从底部注入,整体向上推进排水,在下部形成气水共存的深盆气藏,气体注入导致 A、B 压力同步增加,形成高压状态
II	临界 接触时刻	A、B 压力不断增加,但 B 压力增加速度比 A 快,逐渐形成两套压力系统		当气向上推进到与 A、B 接触面时,由于 B 为相对高孔渗,气主体向 B 聚集进入 B 中,部分气在 B 两侧向上排水,推进, A、B 压力继续上升,且 B 上升较 A 快
III	甜点 充气阶段	A、B 形成两套压力系统, B 压力迅速增加, A 压力均匀稳定上升		汇入 B 中的气首先在 B 的顶部聚集,形成正常气藏。随着 B 顶气的不断聚集, B 的压力迅速增大并将其中的水往外排挤,正常气藏空间不断扩大
IV	两气 相连时刻	A、B 仍是两套压力系统,均为高压,但 B 的压力比 A 高得多,且 A、B 都在增压		B 充满气,并与 A 中的气相连, B 中的气成为整个深盆气的一部分
V	气藏 扩展阶段	A、B 仍是两套压力系统,均为高压,但 B 的压力比 A 高得多,且 A、B 都在增压		形成完整的深盆气,其中 B 为甜点区,但仍为两个压力系统
VI	调整 共溶阶段	A、B 为同一压力系统且比静水压力低,为负压状态		停止供气一段时间后, A、B 两套气压系统有足够的时间混合调整为统一压力系统

