

天然气机理类型及其分布

薛 会, 张金川, 刘丽芳, 卞昌蓉

(中国地质大学 能源学院, 北京 100083)

[摘要] 从天然气成因机理和成藏机理两个方面对天然气类型进行划分, 天然气成因机理分为有机成因气和无机成因气; 天然气成藏机理分为煤层气、页岩气、水溶气、根缘气(深盆气)、常规气以及气体水合物等。在天然气分类基础上, 认为天然气在运聚过程中存在天然气成因机理和成藏机理两种序列关系, 不同的天然气机理类型之间存在着过渡关系, 两种机理分类不是孤立的而是相互联系的, 具体运用到前陆盆地与裂谷盆地中, 提出了前陆盆地与裂谷盆地的气藏可能分布模式。

[关键词] 天然气; 成因机理; 成藏机理; 分布

[中图分类号] P618.130.1; TE122.1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)02-0053-05

Distribution and Mechanic Classification of Gas

XUE Hui, ZHANG Jin chuan, LIU Li fang, BIAN Chang rong

(School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Natural gas can be classified by gas formation mechanism and accumulation mechanism. According to gas formation mechanism, the types of gas can be divided into organic genetic ones and inorganic genetic ones. From gas accumulation mechanism, the types of gas can be divided into the coal bed gas, shale gas, source contacting gas or basin centered gas and tight sand gas, dissolved gas, normally trapped gas and hydrate etc. Based on the gas classification, it is thought that gas formation spectrum and accumulation spectrum exist in the process of gas migration and accumulation. There are transitional relations among different gas types. The two sorts of mechanisms are not independent but interrelated. Furthermore, the distribution modes of gas accumulation in foreland basins and rift basins are presented.

Key words: nature gas; formation mechanism; accumulation mechanism; distribution

1 天然气分类研究现状

天然气分类的研究与天然气地质研究开展几乎同步。目前主要形成的分类方法有2种:

(1)勘探应用的角度出发, 将天然气分为3大类和若干小类, 分类范围主要限于通常所见的常规气等类型。如司徒愈旺^[1]将中国天然气藏分为构造圈闭、岩性圈闭和地层圈闭3大类11亚类, 戴金星等将中国天然气藏划分为构造气藏、岩性气藏和古风化壳气藏等3大类10亚类^[2]。

(2)主要考虑天然气的地球化学特征和生成特点, 先将天然气划分为有机来源和无机来源两大类型, 然后从不同角度对天然气类型进行细划, 其中, 有机来源气又主要按照母质类型和成熟度划分为生物气、热解气等。如包茨(1988)从甲烷的成因机理角度出发, 认为天然气可以分为生物成因气(生物气)、热解成因气(热解气)以及深源无机成因气(深源气)等^[3]; 戴金星等(1992)根据天然气原始物质来源, 指出天然气可以划分为无机成因气、有机成因气及混合成因气3大类^[4]。

根据天然气成藏的其他地质条件, 如天然气成

[收稿日期] 2005 07 30

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40472073、40272062)

[作者简介] 薛 会(1980-), 男, 江苏淮安人, 博士研究生, 从事矿产普查与勘探研究。

分、储集类型及封闭形式等,还可以对天然气分类作进一步的补充。如根据天然气主要成分的含量变化,可将天然气藏分为烷烃气藏(进一步又分为甲烷气藏、重烃气藏等)、二氧化碳气藏、硫化氢气藏、氮气藏以及氦气藏等类型;根据储集条件,又可将天然气藏大致分为砂岩气藏、碳酸盐岩气藏和基岩储层气藏等类型。在非常规储集类型中,目前又分别发现了致密储层、煤岩储层、页岩储层、变质岩储层以及火山岩储层等类型;根据封闭形式,主要有盖层封闭、超压封闭、物性封闭、烃浓度封闭以及水动力封闭等。除此以外还有许多其他的天然气成因分类方法。结合目前天然气勘探和研究现状,过渡带气(低熟气)和再降解气也有必要作为新的类型而需要在天然气分类时进行考虑。

综上所述,笔者重点从天然气的成因机理和成藏机理两个方面对天然气进行分类。

2 天然气成因机理类型与分布

2.1 有机成因机理和类型

2.1.1 生物化学成因

有机质在未成熟阶段($R_o < 0.5\%$)由厌氧细菌经过生物化学降解作用生成气态产物。生物气化学成分以高含甲烷及低碳同位素为特征,一般甲烷含量 $\geq 97\%$, $\delta^3\text{C}_1 < -55 \times 10^{-3}$ 。生物化学气的生成一般发生在接近地表的较浅环境中,它通常发育在离地表 300~700 m 深度范围内,向上可延伸至地表,形成通常所见的沼气。其实,沼气是生物化学作用气的特殊情况,它直接发生在地表环境中。

2.1.2 生物化学-热解作用混合成因

生物化学气作用带向下可与热解气作用带相连,形成过渡带气(也称低熟-未熟气)。实际上,过渡带气是干酪根低温早熟的产物,即源岩中某些有机质在埋藏升温达到干酪根生烃高峰阶段以前(相应的镜质组反射率 R_o 值大体在 $0.3\% \sim 0.7\%$ 范围内),经由不同生烃机制的生物化学反应或低温化学反应生成的气体,因此,它具有生成机理上的混合成因特点。目前所发现的过渡带气藏大多与陆源沉积作用有关,可能与其中的生烃母质有一定关系,但更重要的还取决于特定的地质条件和作用背景,过渡带气通常发育在条件适宜的陆相沉积湖盆中。

2.1.3 热-裂解成因

热解气主要发生在原始沉积的有机质在其成

熟阶段($R_o = 0.5\% \sim 2.0\%$),经热催化作用降解而形成的天然气。根据有机质母质类型又可分为来源于 I 型和 II₁ 型干酪根(泥质岩类等)的油型热解气和主要来源于 II₂ 型、II 型干酪根(煤岩、煤系地层)的煤型热解气。

裂解气主要发生在有机质演化程度较高的阶段中,此时,已生成的液态烃、部分重烃气以及残余干酪根经高温裂解作用而进一步形成天然气,因此,天然气生成的母质在本质上已不再完全属于原始的沉积有机质范畴。从这一意义上来说,裂解气已属于改造类型。裂解气的成因来源与热解气具有承袭性,同样可分为腐泥型和腐殖型两种。裂解气的化学组分以甲烷为主,重烃气含量极少,小于 2%,甲烷碳同位素值偏重,腐泥型裂解气($-37 \sim -30$) $\times 10^{-3}$,腐殖型裂解气($-35 \sim -20$) $\times 10^{-3}$ 。

2.1.4 复杂成因与改造成因

主要由于构造作用变动,有机母质的生气作用可能出现复杂的变化过程,二次生气便是其中的重要表现。二次生烃作用发生在构造抬升运动之后,烃源岩所受的温度和压力降低,导致正常的生烃作用(一次生烃作用)停止,当所受温度和压力再次升高并达到与终止时相同的温度和压力时,生气过程重新开始。中国许多大型油气田分布地区的古老烃源岩都具有二次生烃历程。

在生气母质生气作用的停止过程中,已经生成的油气还可能通过非热裂解方式维持生气作用过程,属于天然气的改造成因。这些作用可能包括了生物再降解机理、水洗机理、混合机理等,从而导致了更复杂机理天然气的生成。

2.2 无机成因机理和类型

无机成因气泛指在任何可能环境中由无机物质及其相互作用所形成的天然气。无机成因气绝大部分表现为小分子量特点,成分复杂,可能以甲烷、二氧化碳、氮气或氦气等成分为主。

从成因机理来看,无机成因气包含无机岩分解气、变质岩气、岩浆岩气及幔源气等类型。无机盐分解气由沉积岩(如碳酸盐岩)中无机盐类的化学分解作用所产生;变质岩气是在变质岩中发生高温化学变质作用所形成;岩浆岩气由岩浆岩中的高温化学作用所形成;而幔源气(又称深源气),则可能包括了岩浆岩气、变质岩气等类型,它们可能产生于地壳或地幔中并通过不同方式上升到沉积地层中。因此,无机气通常来源于地壳深部或地幔,与地球内部发

生的物理化学反应以及地球动力地质作用具有密切关系,它们通常沿深大断裂或转换断层上升至沉积圈,条件适宜时形成工业性天然气聚集。

目前所发现的无机成因气藏主要有二氧化碳气藏、烷烃气藏、硫化氢气藏、氮气藏以及氦气藏5种类型,在前3类气藏中,无机成因气含量占有绝对优势,当气藏中二氧化碳含量大于60%时,形成的气藏属于二氧化碳气藏,然而在很多情况下气藏中的二氧化碳达90%以上。但是在氦气藏和硫化氢气藏中,氦气和硫化氢气体含量仅占气藏组分的极小部分,目前研究利用比较广泛的主要是二氧化碳气藏。

无机成因的二氧化碳是各种无机物质或元素在各种物理化学反应中形成的,它的形成主要与岩浆火山活动、碳酸盐岩的高温变质分解、地幔活动有关。二氧化碳气藏主要分布在有岩浆活动的断裂附近。在中国的渤海湾、莺歌海、苏北以及海拉尔等盆地已经发现二氧化碳气藏^[5]。

3 天然气成藏机理类型与分布

3.1 常规天然气

主要受浮力作用控制的所有天然气聚集都可归属于常规天然气的范畴。

常规天然气与非常规天然气在成藏机理特征上差别明显。从成藏条件来看,需要有与输导体系相关的构造高部位,源岩与储层有一定的距离,构造顶部要有盖层;从成藏方式来看,浮力是天然气运移的主要动力,盖层毛细管压力是阻力,天然气通过置换水的方式不断向上运移,气水界面从顶部开始向下整体推进;从成藏特征来看,气藏最大成藏高度取决于盖层毛细管压力,圈闭富气,气水界面明显,位于气藏下方,气藏分布与源岩之间有一定的距离,成藏有利区主要在区域性低势能部位。

3.2 煤层气

煤层气贮存于煤层及煤系地层中,以自生自储方式为主,是目前已得到重视并形成规模性开发生产的非常规天然气藏类型之一。

煤层气主要通过吸附作用将天然气聚集起来,为典型的吸附成藏机理,煤的储气能力与煤的变质程度、温度和压力有关。因此,天然气存在方式、成藏特征与常规圈闭气藏有较大差别。由于煤层气主要以吸附作用为主,游离气和溶解气比例很小,因

此,可以不需要通常的圈闭存在。煤层气聚集与常规圈闭气的低势区聚集不同,其不受由高气势面构成的三维封闭的低气势而形成的圈闭的控制,只要有较好的盖层条件,能够维持相当的地层压力,无论在储层的构造高部位还是低部位,都可以形成气藏。

3.3 根缘气

根缘气(也称深盆气)是一种有气水倒置关系、存在于构造低部位致密岩性中的有根状天然气聚集。形成根缘气需要构造位置、充足气源以及致密储层等条件。

根缘气通常发生在烃源岩开始大量生气后,在储层构造下倾部位,由于天然气生成及不断注入,形成相对于天然气运移阻力更高的地层压力,受此压力推动,进入致密储层中的天然气沿构造上倾方向依次向地层压力相对较低的高部位推进。气体进入致密储层后,毛细管排驱压力成了天然气进一步运移的主要障碍。储层的致密性导致天然气很难以常规意义的置换形式向上运移,从而形成气水倒置。由于储层的致密性以及天然气的大量生成,导致天然气把水整体向上排驱,形成了与常规圈闭完全不同的成藏方式,即典型意义上的活塞式成藏机理^[6]。

3.4 页岩气

页岩气是以多种相态存在、主体上富集于泥页岩(部分粉砂岩)地层中的天然气聚集。页岩气藏中的天然气不仅包括了存在于裂缝中的游离相天然气,也包括了存在于岩石颗粒表面上的吸附气。

据不同成藏条件,页岩气成藏可表现为典型吸附机理、活塞成藏机理或置换成藏机理。由于天然气生成来自化学能的转化,可形成高于地层压力的排气压力,从而导致岩石薄弱面小规模破裂。当泥页岩中缺乏大规模断裂作用将已排出的天然气及时运移出去时,天然气就近在裂缝中保存。这个过程包含两种页岩气成藏机理,先生成的天然气首先被吸附在泥页岩颗粒表面,表现为吸附成藏机理。随着生成量增加,天然气的聚集作用又可表现为典型的活塞成藏机理。如果天然气生成量继续增加,则天然气成藏表现为裂缝系统中的置换成藏机理。

3.5 水溶气

水溶气以溶解状态存在于地层水中,当地层水中的含气量丰度达到一定程度后,形成具有工业勘探开发价值的天然气藏。

天然气在其生成、运移和聚集的过程中,始终与地层水保持密切联系,天然气在地层水中发生溶解

作用而形成溶解气。天然气在地层水中溶解存在两种机理,一种是天然气分子与水分子作用形成水合分子;另一种则是天然气分子充填在水分子的间隙中^[7]。这两种机理的溶解度大小都受到温度和压力的影响。压力增大,天然气在地层水中的总溶解度增大,反之则减小。温度对天然气在地层水中的影响比较复杂,当温度小于 80℃时,天然气溶解度随温度升高而减小,当温度大于 80℃时,溶解度随温度升高而逐渐增大。水溶气的成藏除了受温度和压力的影响外,还受地质条件和构造运动等因素的影响。

3.6 气体水合物

天然气水合物是由气体和水组成的冰状固态化合物。从结构化学上说,气体水合物就是甲烷与水的笼形结构物。据统计,1 m³ 饱和的气体水合物(在其中 100%的客体位置均被占据)含有 164 m³ 甲烷(在标准温度、压力下)和大约 0.8 m³ 的水。

静水压力、沉积物表面温度、地温梯度和气体浓度是海洋中形成气体水合物条件。大陆极地地区深度小于 150 m,温度低于 0℃,大洋沉积地区深度小于 300 m,温度在 0℃左右^[8],甲烷水合物在这个深度、温度范围能保持稳定状态。据适合气体水合物存在的温度和压力条件,气体水合物可出现在符合条件的陆区地质环境中,主要是高纬度的冻土带、大陆斜坡和大洋盆地。目前对气体水合物形成机理争论较多,其中气体水合物成因方案可分为两种可能模式:先存天然气因温度或孔隙压力的有利变化而转变为天然气水合物;微生物成因气或热成因气从下部运移至气体水合物稳定带而形成气体水合物。

4 天然气分布模式

4.1 天然气机理序列

4.1.1 天然气成因机理序列

从成因机理来看,天然气可以划分为地表沼气、浅地表生物气、过渡带气(也称低熟-未熟气)、热解气、裂解气以及二次生烃气等。可以看出,这些天然气类型具有从地表到地下深处连续分布的规律和特点,反映了烃源岩生气环境和作用过程的逐渐过渡性。天然气生成环境在很大程度上影响着天然气的类型及特征。

4.1.2 天然气成藏机理序列

天然气藏类型多种多样,不同的分析方法产生不同的分类结果。从赋存相态观察,天然气藏主要

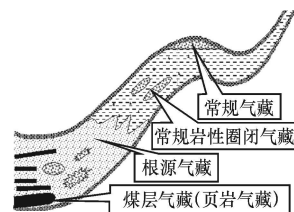
包括了吸附相、游离相和溶解相等类型。在成藏机理上,分别对应于煤层气、页岩气、根缘气、常规圈闭气、水溶气及水合物等气藏类型。油气藏的形成和分布是一个连续的、复杂的序列过程,油气生成的多源性和不同聚集条件下成藏聚集的多变性,构成了油气在平、剖面上发育和分布的序列性^[9]。

上述不同类型的天然气藏在盆地中的有机组合,形成盆地中油气藏组合的多种变化序列。通常只有在理想盆地中,才能发育完整的天然气成因、成藏序列所包括的各种天然气藏类型,当然这些天然气藏类型完全可以在盆地中单独发育,或者以两种或两种以上的类型存在。

4.2 天然气成因与成藏机理间的关系

成因机理分类与成藏机理分类是天然气两种不同的分类方式,两者之间不是孤立的而是相互联系的,从浅地表至地下深处天然气成因机理与成藏机理都是相互对应的。

生物气通常在常规圈闭中聚集形成常规气藏,还可以形成水溶气藏,如日本、中国东南沿海等。另外,生物气也可能发育在较深的部位,如中国的柴达木盆地。低熟气主要在常规圈闭中聚集形成常规气藏、热解气和裂解气是目前世界上天然气藏成因的主要类型,它们通常运移到相邻常规圈闭形成常规气藏,如果烃源岩上覆近邻致密储层,还可以形成根缘气藏,如果烃源岩是煤层或泥页岩,且孔隙和裂隙发育良好,则首先形成煤层气藏或页岩气藏,如加拿大的阿尔伯达盆地、美国的威利斯顿盆地、中国的吐哈盆地以及四川盆地等。此外,已形成的气藏常有可能受到地震和构造运动的影响,导致气藏破坏,气体散逸,这些散逸的气体在适宜的条件下又可以形成甲烷水合物气藏(图 1)。



据张金川, 2002

图 1 天然气成因与成藏机理间的关系

Fig. 1 Relationship of Gas Formation Mechanism and Accumulation Mechanism

前陆盆地和裂谷盆地是油气聚集成藏的重要场所,研究其油气分布规律具有重要意义。

4.2.1 前陆盆地地质特征及其天然气分布

典型的前陆盆地都有一个从伸展陆缘到聚敛、碰撞的演化过程,因而主要发育在被动陆缘之上。据统计^[10],前陆盆地陆内的油气资源在总资源量中

占有举足轻重的地位,估计为 30%~45%。前陆盆地是由相邻构造带冲断负荷引起的挠曲下沉引起的,从造山带向克拉通方向前陆盆地依次由 4 部分组成:褶皱冲断带、深拗陷、前陆斜坡和前缘隆起。前陆盆地发育多期的逆冲作用,造成前陆盆地存在多个沉积旋回,形成多套生储盖组合^[1]。

中国前陆盆地大部分以湖相为主,从湖盆中心至陆地方向,沉积物粒度由细到粗,宏观上由泥岩依次递变为粉沙、细沙、沙及砾石等。图 2 中,从平面上来看,据天然气成藏机理序列关系,前陆盆地从深凹陷至湖盆边缘可能依次发育有煤层气藏、页岩气藏、根缘气藏、水溶气藏以及常规气藏等。从剖面上来看,据天然气成因机理序列关系,在宏观上,前陆盆地由浅到深可能依次发育生物气藏、低熟气藏和热-裂解气藏等。由于在前陆盆地中很少发育贯穿全盆地的深大断裂,往往可以发育大规模根缘气藏,世界上主要根缘气藏大部分都发育在前陆盆地中。

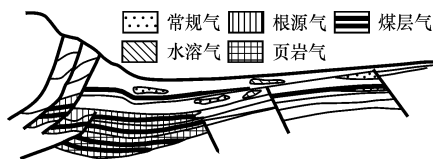


图 2 前陆盆地油气形成分布模式

Fig. 2 Distribution Model of Oil and Gas in Foreland Basin

4.2.2 裂谷盆地地质特征及油气分布

裂谷盆地主要是受构造拉伸影响,发育有地堑、半地堑(断陷)和地垒等 3 种基本结构模型。断陷是组成裂谷盆地的结构单元,并且断陷边界断层的形态和运动学特征又直接控制着沉积作用、热力演化过程及油气生成过程。断陷发育对于裂谷盆地的油气成藏分布有重要影响,既能够形成油气封堵,又能够导致油气藏泄漏。

断陷发育导致裂谷盆地从沉降中心向盆地两侧岩性变化复杂。图 3 中裂谷盆地在天然气成因机理序列与成藏机理序列上与前陆盆地相似,但较前陆盆地更为复杂。由于裂谷盆地中断裂发育相对丰富,常有深大断裂发育且贯穿全盆地,深部气

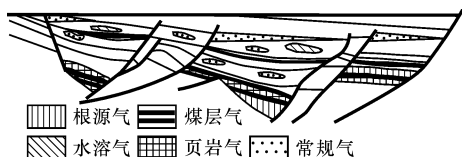


图 3 裂谷盆地油气形成分布模式

Fig. 3 Distribution Model of Oil and Gas in Rift Basin

体沿深大断裂向上运移,往往还有可能发育一些无机成因气藏,同时断裂发育,尤其有深大断裂发育,导致在裂谷盆地中很难形成大规模的致密储层。因此,根缘气藏在裂谷盆地中发育范围通常有限。

5 结语

存在天然气成因机理序列与成藏机理序列,可以从成因机理序列与成藏机理序列两个角度来划分天然气类型。

(1)从有机成因机理来看,天然气可分为生物化学成因气、生物化学-热解作用的混合成因气、热-裂解成因气以及复杂成因与改造成因气等类型;从无机成因机理来看,无机成因气主要包含有无机盐分解气、变质岩气、岩浆岩气以及地幔气等类型。

(2)按成藏机理来划分,天然气藏主要有煤层气藏、页岩气藏、水溶气藏、根缘气藏、常规气藏及气体水合物等类型,每种类型都有各自的成藏机理特征。

(3)天然气成因机理分类与成藏机理分类不是孤立而是相互联系的,在此基础上分析前陆盆地与裂谷盆地的天然气藏分布规律,提出前陆盆地与裂谷盆地天然气的可能成藏模式。

[参 考 文 献]

- [1] 司徒愈旺. 试论我国油气藏的圈闭类型及分布特点[J]. 天然气工业, 1981(3): 5-17.
- [2] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 二[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [3] 包 茨. 天然气地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [4] 戴金星, 裴锡古, 戚厚发. 中国天然气地质学: 一[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [5] 戴金星, 戴春森, 宋 岩 等. 中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征[J]. 中国海上油气(地质), 1994 8(4): 12-17.
- [6] 金之钧, 张金川. 深盆气成藏机理[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 208.
- [7] 付晓泰, 王振平, 卢双舫. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程[J]. 中国科学: B 辑, 1996, 26(2): 124-130.
- [8] 石 深, 白 冶. 气体水合物的基本特征、形成条件及成因初探[J]. 矿物岩石, 1999, 19(3): 100-104.
- [9] 张金川, 金之钧, 袁明生, 等. 油气成藏与分布的递变序列[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 81-88.
- [10] Bally A W, Snelson S. Realms of Subsidence Facts and Principles of World Petroleum Occurrence[J]. Mem Can Soc Petrol Geol, 1980, 6: 9-75.
- [11] 张福厚, 方朝亮, 高先志, 等. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.