

煤层气地质学基本问题的探讨

孙万禄 应文敏 王树华 樊明珠

(华北石油地质局, 河南郑州 450006)

煤层气是一种由煤生成, 以 CH_4 为主的非常规气。它与常规气藏不同, 主要以吸附状态储集在煤岩过程中形成的三维储集网络内, 其储集量远大于储存在孔隙、裂隙中的游离气和溶解气量。正是这一特点决定了煤层气的运移、扩散微弱, 易于大面积成藏。在地质历史演化过程中, 后期构造相对稳定、水动力系统完好、煤层处于封闭状态是形成良好煤层气藏的必要条件。成煤期具有全球意义, 我国与全球有极为相似的分期特征, 出现在阿尔卑斯和华力西两个构造期。我国 5 个构造区分属以陆块为代表的稳定区和以陆缘为代表的活动区, 其中塔里木-华北区和华南区为稳定区, 几个成煤期都利于煤层气盆地的成生与保存。

关键词 煤层气 成生演化 运移聚集 成藏条件 盆地

第一作者简介 孙万禄 男 58 岁 教授级高级工程师 石油地质

煤层气是一种洁净能源, 勘查开发利用煤层气有助于改善能源结构和生态环境。煤层气作为一种新能源开发利用, 具有极大的经济价值和社会效益。

煤层气主要是以甲烷为主的吸附气, 其成因机理与固体煤炭成因同出一源却是两种形态的矿产, 与常规天然气或石油往往共生于同一沉积盆地, 但成藏条件却不相同, 因而煤层气的勘探开发技术有其独特之处。

美国煤层气的年产量占天然气总产量的 50%, 相当于我国天然气年总产量^[1]。我国自 80 年代开始研究至今已经开始煤层气的勘探开发, 不久将成为我国一个新兴的能源产业。

1 煤层气的成生及演化

煤炭源于陆生高等植物, 煤的原始有机物质主要是碳水化合物、木质素, 成煤作用由泥炭化和煤化作用两个阶段完成。由植物—泥炭—褐煤—烟煤—无烟煤, 是经过未成岩—成岩—变质作用, 泥炭化—煤化的全过程。

泥炭化阶段(成岩期前), 有机质在低温($< 50^\circ\text{C}$)和近地表氧化环境中, 由于细菌的作用, 生成少量甲烷及二氧化碳, 呈水溶状态或游离状态而散失。

褐煤阶段已经进入成岩阶段, 属煤化作用的未变质阶段。此期是干酪根的未成熟期, 地温在 50°C 左右, 镜质体反射率 $R_o \approx 0.5\%$, 有机质热降解作用已经开始并且逐步加深, 生物化学作用逐步减弱, 主要生成甲烷及其它挥发物。

烟煤阶段的长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤属煤化作用的低—中变质阶段, R_o 为 $0.5\% \sim$

2.0%。此期是干酪根的成熟期,已经进入生油门限,沉积物埋深达到1 000~4 500 m,地温达50~150℃,有机质经过热降解,有重烃、轻烃、甲烷及其它挥发物产出。

煤化作用的后期是高变质阶段,一般将贫煤与无烟煤划在这一阶段, $R_o > 2.0\%$,此期是干酪根过成熟期,地温 $> 150^\circ\text{C}$,埋深 $> 4\,500\text{ m}$,热降解产物主要是甲烷。

2 煤层气的运移与储集

煤岩是煤层气的气源岩,又是储集岩^[2]。因为煤岩基质是由微细颗粒连结在一起的,颗粒间有无数成岩作用中形成的细微孔隙。同时,煤岩在成岩过程中形成层理时,也形成垂直于层面的面割理和端割理,可将煤岩基质分割成大小不等的三维网格状裂隙,相互连通构成一体。由于沉积或构造变动的影响,煤岩层又可形成更为复杂的各向相异的节理,有些形成穿层的大的裂隙通道,使煤岩自身形成一定的孔隙空间和渗滤通道,作为煤层气藏(田)的储集岩层。当然,由于煤岩类型的差别,同一含煤盆地不同的构造部位,或不同层位的储集岩性能各不相同。

煤化作用是沉积有机质腐殖型干酪根的热降解过程。热降解作用分离出来的 CH_4 等挥发物一部分游离在煤岩的微孔隙及裂隙之中,一部分溶解在孔隙或裂隙的水中,还有一部分通过分子渗滤或微粒渗透,运移到煤层的顶、底板岩层或穿透顶、底板扩散到其它岩层之中。在烃类初次运移过程中,当渗滤通道有利,其它岩层又有良好的储集空间的圈闭条件时, CH_4 或其它挥发物质就会聚集储存下来,形成气藏(田),这就是一般意义的煤成气藏(田)。它的气源岩是腐殖型的煤岩层,但它的储集条件具有常规天然气藏(田)的基本特征。

一般来说,在煤岩层的孔隙或裂隙中储存下来的 CH_4 或其它烃类,是煤层气藏(田)产出的重要组成部分。当开采煤层或钻开煤层的时候,排放出的 CH_4 等气体有相当部分是水中溶解气或呈气态的游离气。在煤层气理论与技术尚未推广之时,煤层气常被认为如同常规天然气一样,采收的主要是这种游离气或溶解气。实际上,煤层气藏(田)产出的 CH_4 绝大部分是煤岩层中的吸附气,它的储集量远远大于储存在孔隙、裂隙中的游离气和溶解气^[2]。煤的微细颗粒对 CH_4 具有极强的吸附能力,据统计,煤的比表面积为 $100\sim 400\text{ m}^2/\text{g}$,随着煤层深埋,压力的增加,其吸附能力也随之加大。呈吸附状态的 CH_4 ,与常规的气(油)藏(田)的储集状态不同,主要以吸附状态储集在煤岩的孔隙、裂隙空间的微细颗粒表面,不完全受孔隙、裂隙空间大小的限制。

煤岩层中的吸附气、溶解气与游离气共存于一个封闭的孔隙、裂隙系统空间之中,不是静态不变的。在地层温度、压力及水动力条件变化时, CH_4 及其它烃类挥发物的赋存状态也相互转换,由吸附状态转化为溶解状态、游离状态,或由游离状态、溶解状态,改变为吸附状态。

煤层在构造变动、沉积沉降过程中形成的 CH_4 及烃类等挥发物,是一种热动力地球化学作用的结果。当地层沉降,地温、地压增加时,产生的 CH_4 及其它烃类物质随之增加;当地层回返上升时,地温下降、地压减小,已经由于热动力产生的 CH_4 等挥发物,并不因此而出现逆反过程,但呈吸附状态的 CH_4 则由吸附状态解吸成游离状态,吸附气量减少,游离气或溶解气增加。游离状态或溶解状态的 CH_4 浓度增加,地层暴露氧化或存在排渗通道时, CH_4 即可通过通道运移。当地质构造条件再次变动,地层再度沉降时,煤层中处于游离状态和溶解状态的 CH_4 浓度下降,吸附气量增加,但气源补充来源不足,吸附气常常出现不饱和状态。当然,并不排除在地层回返时,当储盖条件优越,造成一种相对的封闭条件,也会出现游离状态或溶解状

态 CH_4 的良好储聚, 形成与常规天然气藏类似的气储条件。

3 煤层气藏(田)的封盖与保存

煤层一般都有较明显的顶板和底板, 底板多是沼泽相的泥岩和粉砂岩, 顶板岩性多样, 湖泊相沉积多为泥岩、粉砂岩, 也有粗碎屑岩出现, 浅海相沉积多为石灰岩、泥岩, 也有泻湖相、滨海-海湾相的膏岩类。同一含煤盆地在一定的地质历史时期往往出现多旋回煤系地层, 由于沉积盆地沉降中心的变迁, 煤系地层在含煤盆地中空间展布上出现交错叠置, 致使同一含煤盆地不同部位纵向上、横向上形成的煤系地层岩系组合各异。煤层的底板常是粘土岩类, 可以成为煤层气的封堵层, 而煤层的顶板并不一定都是封堵层。在一个含煤盆地中的某一成煤时期, 煤系地层往往是一套成煤组合岩系, 也往往有多层粘土岩系, 因而具有较好的封盖泥质岩层组合。同时, 在构造条件较稳定, 沉积环境较好的含煤沉积盆地, 往往具有形成泥页岩区域性盖层的条件。

泥质岩类(泥页岩)对油气的封盖条件是通过人们的实践被证实的, 已有资料证实^[3], 页岩最小孔隙直径中值约为 $10 \times 10^{-10} \sim 30 \times 10^{-10} \text{ m}$, 这些微小孔隙空间约占页岩孔隙体积的 $70\% \sim 90\%$ 。煤层中的 CH_4 虽然有相当多的量是溶解或游离状态, 但处于吸附状态的量要更多。正是由于 CH_4 在煤层中的吸附特点, 在泥质岩类封盖条件下, CH_4 的运移、扩散极其微弱、缓慢, 使吸附的 CH_4 不被解吸, 成为煤层气较大面积成藏(田)的基本条件之一。

4 煤层气藏(田)成藏的基本条件

煤层气藏(田)的成藏概念与常规油气藏(田)是有区别的。由于煤层气以甲烷(CH_4)为主要成分, 同时又以吸附状态为主储存在煤岩层之中, 因而煤层气藏(田)就不需要如常规油气藏(田)经过油气水运移分异而使油和气聚集在相对低势区的过程和储集圈闭。经过勘探实践证实的煤层气藏(田), 在不存在储集层中高等势面封闭的低势区的条件下, 完好地较大面积地储集聚集在反背斜构造的复式向斜的含煤层气盆地之中。当然由于地质构造演化的差别, 煤层气藏形成的可能性和成藏条件的优劣是有差别的。这正是研究煤层气藏(田)聚集规律的所有在。

煤层气藏(田)的成藏(田)基本条件是, 要有含气量丰度高、储渗条件好的煤层。在地质历史构造演变过程中, 居中煤阶的气煤-焦煤(中变质光亮煤-半光亮煤)的演化(变质)程度较为适中, 形成的孔隙、裂隙较为适度, 储集在煤层中的吸附 CH_4 与溶解、游离状态的 CH_4 平衡较为适当; 处于低演化阶段的褐煤, 成岩程度低, 孔隙、裂隙空间较为发育, 但由于热降解演化(煤化)程度低, 降解气量不足; 处于高演化(煤化)阶段的贫煤-无烟煤虽然热降解气量很高, 但在较高地温、地压作用下, 渗滤条件变差, 游离状态气量加大, 气体难以在较长地质历史过程中在煤层中保存, 往往被运移或逸散。

煤层气成藏的另一个条件是要有良好的聚集保存条件。一个原始含煤沉积盆地一般都经历了多次构造变动。现今的含煤盆地(复式向斜), 不一定是原型沉积盆地, 有的含煤盆地经过地质构造演变可以成为复式背、向斜, 被分割成数个含煤构造, 形成现今的含煤构造盆地。一个含煤盆地通过地质构造变动达到新的平衡后, 含水地层可能与地表水相通, 形成一个与地表水相通的水动力系统, 从而将溶在水中或游离状态的 CH_4 烃类挥发物质运移、扩散到其它岩层之中或散失在大气之中。只有当水动力系统完好, 使含煤地层处于封闭状态下, 方能使吸附

状态及溶解、游离状态的 CH_4 完好地保存在煤层之中,形成较好的煤层气藏(田)。当然,煤层顶、底板的封闭亦是必须具备的条件之一。只有煤层顶、底板层封盖条件好,又有封闭的水动力条件,才能形成好的煤层气藏(田)。

一个具有良好生油条件的盆地,若没有良好的圈闭条件,分散状态的烃类是不会聚集成油气藏(田)的;而一个具有较高丰度含气量的含煤盆地,在没有遭受后期构造强烈破坏,分散在煤层中的吸附 CH_4 及溶解、游离状态的 CH_4 , 仍然能较好地保存在煤层之中,并在含煤盆地的有利部位,形成煤层气藏(田)。

5 控制含煤-煤层气盆地的主要因素

煤、煤层气和石油、天然气(常规)都是盆地的产物,其生成、运移、聚集、破坏,均受制于盆地的成生与演化。煤层气与煤是共生矿藏,成因机理类同,赋存状态不同。煤层气盆地必须是含煤盆地,但含煤盆地不一定是煤层气盆地,更不一定能够成为具有工业价值的煤层气藏(田),只有具备煤层气藏条件的含煤盆地才称煤层气盆地。气候带分布、植物演化、海陆变迁、地壳运动都是含煤-煤层气盆地成生、演化的重要条件,在诸多因素的影响下,造成含煤-煤层气盆地的多样性和不均一性。在全球范围内时间、空间展布的规律性,是探讨含煤-煤层气盆地控制因素的重要内容。

地质历史上的成煤期是具有全球意义的,在不同的陆块或构造单元上虽有区别,但却有很强的共性。世界性的重要成煤期是泥盆纪以后的石炭纪、二叠纪、侏罗纪、白垩纪和第三纪。主要出现在阿尔卑斯和华力西两个构造期,形成晚白垩世—早第三纪、晚侏罗世—早白垩世、早、中侏罗世、早二叠世—晚二叠世和中、晚石炭世五个成煤期。其中,早石炭世和三叠纪虽然也是成煤时期,但因古气候、古地理及地质构造条件的变化,导致时间短暂,衰退较早。

我国成煤期与世界其它地区大体相似,主要成煤期是晚石炭世、二叠纪、早、中侏罗世、晚侏罗—早白垩世和第三纪。成煤规模以早、中侏罗世居首位,分布广度以石炭纪、二叠纪为最。早石炭世和晚二叠世是两个次要成煤期,早、中三叠世、早白垩世晚期至晚白垩世基本不成煤或成煤极少,全球有极为相近的分期特征。

组成中国大陆的基本构造单元,主要为以陆块为代表的稳定区和以陆缘为代表的活动带。稳定区有:华北陆块、塔里木陆块、扬子陆块;活动带有:天山—兴安活动带、昆仑—秦岭活动带、川滇青藏活动带、南华活动带、台湾活动带。

依据构造的稳定性-活动性、构造格架、地层区划、岩浆分区、古板块格架及与矿产关系,将中国大地构造基本格局划分为5个地区(图1)^[4]:

(1) 天山—兴安地区:区内有几个微型陆块,大部属晚元古代以及不同构造期的陆缘活动带。

(2) 塔里木—华北地区:全区为具前震旦系至前长城系基底的稳定古陆块。

(3) 昆仑—秦岭地区:区内除柴达木微型陆块外,为前寒武纪不同基底上发育的古生代至早中生代不同构造期的陆缘活动带。

(4) 青藏地区:除藏滇、羌中南-唐古拉-保山、羌北-昌都-恩亨几个微型陆块外,全区为早晚前寒武纪至第三纪不同构造期的陆缘活动带和结合带。

(5) 华南地区:区内有扬子陆块和琼南微陆块及南华活动带和台湾岛弧。

我国含煤-煤层气盆地的分带特征,表现在含煤-煤层气盆地主要分布在构造的稳定带,构

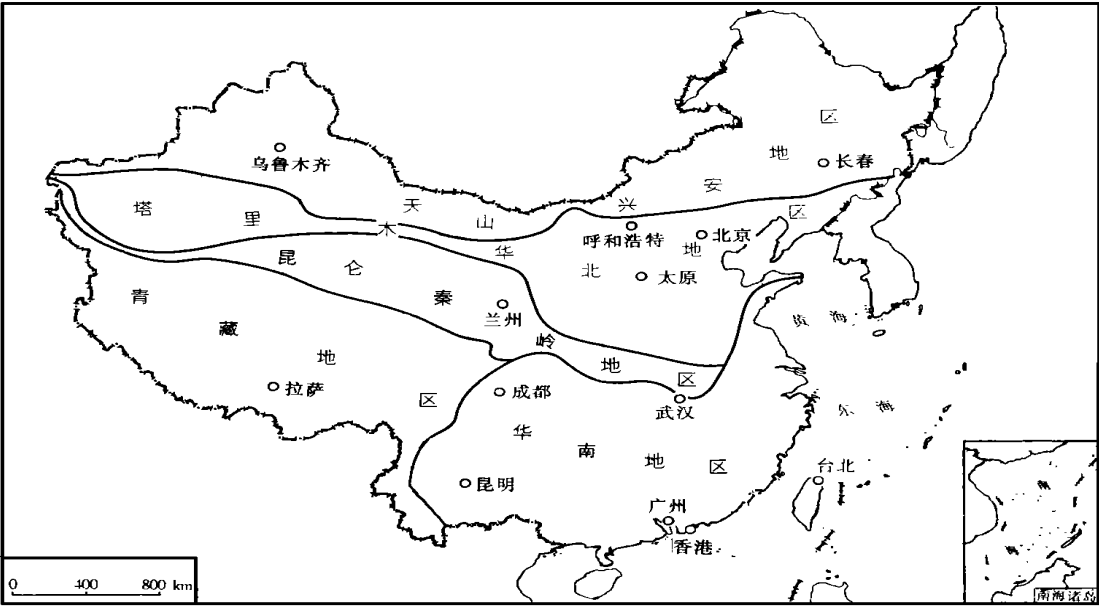


图1 中国大地构造基本格局划分(据[4]修改)

造活动带即或有早期的原型含煤沉积盆地, 现今保存也不会完好, 只有在后期构造变动相对稳定的条件, 才能使含煤—煤层气盆地较好地保存下来。我国5个构造区中, 塔里木—华北地区和华南地区, 由于华北、塔里木、扬子古陆块的存在, 致使这两个地区是相对稳定的地区, 几个成煤期都利于含煤—煤层气盆地的成生与保存。

华北与华南两个地区, 在华力西成煤期含煤—煤层气盆地均较发育, 这是两区的共同点。但华北地区时代为晚石炭世至二叠纪, 而华南地区直至晚二叠世—晚三叠世才是含煤—煤层气盆地的发育时期。

侏罗纪—早白垩世成煤期的分带性更为明显。早—中侏罗世南方大中型含煤—煤层气盆地很少发育, 至中侏罗世时期聚煤结束; 但在昆仑—秦岭活动带以北的大片北方地区, 如塔里木盆地、华北陆块及东北北部地区都广布着含煤—煤层气盆地。晚侏罗世—早白垩世成煤期, 含煤—煤层气盆地主要发育在天山—兴安活动带的东部和东北地区。

喜山成煤期, 含煤—煤层气盆地的分带格局一反历次构造期的特点, 主要呈拗陷、断陷盆地分布在环太平洋沿海一带, 这可能是因为喜山期环太平洋构造运动强烈的缘故。

含煤—煤层气盆地的分期、分带特点, 是来自地球动力自身。在地质历史过程中, 从古板块至现代板块的成生、演化, 既造就了成煤期与非成煤期、构造稳定区与非稳定区的差异, 同时也造就了不同成煤期, 只要构造条件相对稳定, 就利于含煤—煤层气盆地的成生与保存。

煤层气地质学如同石油地质学、天然气地质学、煤田地质学一样, 是一门完整的理论体系。随着我国煤层气产业的兴起以及国外煤层气勘查开发商业利用发展, 煤层气地质学这门新的学科也会应运而生, 日臻志成。

参 考 文 献

1 杨锡禄. 煤层气勘探开发进展. 煤田地质与勘探. 1996, 24(1): 29~ 32
2 黄景城主编. 煤层气译文集. 河南郑州: 河南科学技术出版社, 1990. 1~ 51
3 李明诚. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社, 1987. 16~ 18
4 程裕淇. 中国区域地质概论. 北京: 中国地质出版社, 1994. 16~ 17

AN APPROACH TO ESSENTIAL ISSUES OF COALBED GAS GEOLOGY

Sun Wanlu Yin Wenmin Wang Shuhua Fan Mingzhu

(*North China Bureau of Petroleum Geology, Zhengzhou, Henan*)

Abstract

Coalbed gas is a kind of unconventional and coal-formed gas that is mainly composed of methane. The gas is preserved in 3-D reservoir networks in the coalbeds. Its reserve is much greater than that of free gas and dissolved gas preserved in pores and fractures. It is this property that decides the gas migrating and dispersing weakly and preserving easily in large areas. In geological evolution, the existence of stable post structures, complete hydrodynamic system and well sealed coalbeds are necessary for the formation of coalbed gas reservoirs. China's five tectonic regions are situated respectively in stable regions (represented by continent blocks) and active regions (represented by continental margins). Among them, Tarim, North China and South China regions are stable ones, the coal-forming stages of the regions were favourable for the formation and preservation of coalbed basin.

(上接第 176 页)

MINIATURE DIFFERENTIAL ACCUMULATION IN CARBONATE FRACTURE SYSTEM IN SOUTHEAST SICHUAN

Jiang Ziang Xiong Ying Dong Rongxiang He Xuemeng Liu Xuning

(*South Sichuan Co., Sichuan Petroleum Administration, Luzhou, Sichuan*)

Abstract

Miniature differential accumulation exists in carbonate fracture system in Southeast Sichuan. The formation, distribution and transformation of the accumulation were controlled by horizontal torsion stress field; its existence is related to considerable tectonic stress field remained. The miniature differential accumulation is composed of migration drive system, accumulation drive system and passage system. The driving force is caused by the closure strain contractancy of regional major tensile fracture; water and gas accumulations result from the tensile strain dilatancy of the local tensile fracture. The geological model of this kind of accumulation in South Sichuan includes height transformation and fault displacement types, which could describe the distribution regularity of oil and water, and provide theoretical basis for discovering hidden fracture reservoirs.