

华北煤变质作用对煤含气量和渗透率的影响

杨起 汤达祯

(中国地质大学能源地质系,北京 100083)

摘要: 通过华北和美国煤层气地质条件的对比,基于华北煤变质特点,指出了区域岩浆热变质有利于提高煤层含气量和渗透率,并对其作用机理进行了初步探讨.在中国,经受燕山期岩浆侵入影响之前的煤级较低,因此在快速增温的高温作用下,煤层气再次发生即“叠加生烃”或“叠加成气”的潜力大,孔、裂隙系统发育更趋完善,区域岩浆热变质的生气时间晚而利于煤层气保存.叠加有区域岩浆热变质形成的煤级分带,包括高煤级煤和中煤级煤在内都将明显提高高煤的含气量和渗透率,因此,华北地区应重视在区域岩浆热变质煤中寻找煤层气勘探目标.

关键词: 煤层气;煤变质作用;含气量;渗透率;华北.

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)03-0273-05

作者简介: 杨起,男,教授,博士生导师,中国科学院院士,1919年生,1943年毕业于西南联合大学,1946年北京大学研究生毕业,长期从事煤地质学、煤变质理论和含煤岩系的沉积环境的教学和科研工作.

0 引言

我国煤层气资源丰富^[1].煤层气开发利用可以其高效、洁净的特点改善我国以煤为主的能源结构,先采煤层气后再采煤可以防止煤矿瓦斯爆炸事故并能降低采煤成本,还能降低煤矿排放甲烷造成的温室效应.

我国煤层气勘探起步较晚,由于在引进美国开发煤层气经验的初始阶段未能认真比较中国和美国煤层气地质条件的差异,收效不明显.如美国煤层气开发最成功的圣胡安盆地的渗透率较高,为 $5 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;美国富产煤层气的煤级主要为气煤、肥煤、焦煤和瘦煤,即中煤级煤.但我国打过一些钻井后发现最具煤层气开发潜力的华北晚古生代煤,其渗透率大都较低, $< 0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 者占到 72%,而富产煤层气的煤级不像美国那样,不是中煤级煤,反而在几个高煤级煤一无烟煤和贫煤地区获得了煤层气工业气流,我国在煤层气的勘探选区上前进了一大步.

1 煤层气地质条件对比

以华北石炭二叠纪煤为例,其成煤期距今约 $2.3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^2 \text{ Ma}$,首先,生成的煤层气经过如此长的时间,部分会逸散掉,何况晚古生代煤经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期的构造运动,特别是持续 $1.2 \times 10^2 \text{ Ma}$ 的燕山期,其构造变动具有多期性和多幕性,导致晚古生代煤系不止一次地被抬升并经受剥蚀.由于盖层剥蚀,封闭条件变化,煤层中的煤层气经过长时间的逸散,含气量大大降低,如淮南、大同等地晚古生代煤的含气量一般都较低,分别约 $6.8 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $6.0 \text{ m}^3/\text{t}$.

在沁水盆地,晚古生代煤的上覆岩系厚度约 3000 m,其原始厚度应不止于此.作为塑性较强的煤层,在经过如此长时间、这么厚盖层压力的作用,煤中孔隙的压缩程度较高,裂隙宽度也要变窄,甚至会闭合,从而导致煤的渗透率都较低.而只经受深成变质作用形成煤级低于肥煤的晚古生代煤层,显然含气量和渗透率都较低,不易成为具有开发潜力的煤层气气藏.

美国圣胡安盆地是我国煤层气勘探开发实验中主要借鉴的对象,其产气层位是晚白垩世煤,距今不

过几千万年,煤层的盖层厚度为 335~2 621 m,成煤后只经历过白垩纪与第三纪之间的拉腊米运动(Laramian orogeny),煤主要经受过深成变质作用^[2,3],成煤后时间远短于华北的晚古生代煤,虽曾有过较短时间的上隆,但煤层气逸散得少;盖层厚度不大,煤中孔裂隙压实的程度也较低,因此其含气量和渗透率都较高,分别为 $15 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $5 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

虽然在美国圣胡安、皮申斯和拉顿 3 个煤盆地之间有新生代的岩浆侵入,并使局部,如达科塔,煤的反射率达到 3.0%,而且也是煤层气高产区,但这在美国不是主要的,因此美国的经验为“中级煤是煤层气的高产煤级”。但我国的情况明显不同,中新生代的岩浆活动,特别是燕山期强烈的多期次的岩浆侵入导致了一些高煤级煤具有煤层气开发潜力。

2 华北煤变质特点

中、新生代的岩浆活动使中国煤的变质具有明显的特色,可概括为“多阶段变质演化与多热源叠加变质作用”^[4]。

华北煤,尤其是晚古生代煤形成后大多经历了 3 个演化阶段。第一演化阶段普遍进行深成变质作用,由于煤的深成变质程度取决于所经受地温的高低及其持续时间的长短,华北石炭二叠纪煤系厚度较薄,而其上覆三叠系除少数地区外一般也不厚,因此大部分华北晚古生代煤以低煤级烟煤为主。第二演化阶段以多热源叠加变质作用为主,使已形成的低煤级煤在正常地温之上又经受叠加的异常热,如岩浆侵入热及其派生的热液、热气,岩体中放射性元素的蜕变热,沿深大断裂上导的高温 and 莫霍面抬升形成的地热场异常等,其中以成煤期后的岩浆活动,特别是燕山期岩浆侵入引起的区域岩浆热变质使部分低煤级煤提高到中、高煤级,对增加煤层的含气量和提高煤的渗透率的作用最为明显。煤变质的第三阶段是以奠定了中国煤变质格局为特征,第三纪构造变动使已形成的煤变质分带发生位移,如长治—紫荆关断裂沿 NNE 向的右旋活动使在第二演化阶段的纬向高变质煤带发生位移,相对于长治—紫荆关断裂带西侧沁水盆地北部的高变质煤带,断裂以东的太行山东麓和鲁中高变质煤带向南移动了约 100 km,到北纬 $37^\circ \sim 38^\circ$; 原与长治—紫荆关断裂西侧沁水盆地南部北纬 $35^\circ \sim 36^\circ$ 的煤高变质带相对应

的河南荥巩、焦作、永夏,安徽淮北,江苏丰沛和山东陶枣南移到北纬 $34^\circ \sim 35^\circ$ 。

由于存在各种促使煤变质的热源,因而煤变质作用也有几种类型。煤在普遍进行深成变质的基础上,又可能经受一种或一种以上的其他类型的变质作用,构成了煤的多热源叠加变质作用,如叠加一次甚至一次以上的区域岩浆热变质,又如叠加热液、热水变质作用,以及同时叠加区域岩浆热变质和热液变质作用等,其中叠加区域岩浆热变质作用最常见,也最有利于煤层气的富集高渗。

3 华北煤的含气量与渗透率

煤层气评价选区的诸多参数中,以煤层的含气量和渗透率最为关键^[5~7]。因为含气量关系到有无富集的煤层气可供开发,而渗透率决定着富集的煤层气能否以可采气流出。华北晚古生代煤通过深成变质作用生成的煤层气由于长时间的煤层压实、气体逸散和盆地基底抬升、盖层剥蚀而导致含气量较低;只进行深成变质的煤其孔隙的孔径小:微孔的孔径小于 10 nm,过渡孔(小孔)10~100 nm,中孔 100~1 000 nm,大孔大于 1 000 nm。我国煤层的微孔孔容平均为总孔容的 40.97%,过渡孔平均为 26.61%,中孔和大孔分别平均为 12.84% 和 19.85%^[1]。孔隙的平均中值半径多集中在 4.0~8.0 nm 之间^[8],微孔所占比例最高。因此,我国煤中孔隙的吸附力较强而渗透性较差。

据统计,我国煤的渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 者占 35%, $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 者占 37%,而大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 者只有 28%^[1]。同样由于长时间的压实,华北晚古生代煤中作为煤层气主要运移通道的内生裂隙其宽度变窄,甚至闭合,因此降低了煤的渗透率,这也是我国煤层气勘探受到“高资源量、低产能”局面困扰的原因之一。

另一方面,我国经过十几年的勘探,已在数个煤田获得试井日产煤层气几千 m^3 ,甚至更高,其中柳林、阳泉、寿阳正位于北纬 $37^\circ \sim 38^\circ$ 纬向带上;沁水盆地南部的晋城、屯留居于北纬 $35^\circ \sim 36^\circ$ 纬向带上;淮北位于北纬 $34^\circ \sim 35^\circ$ 构造带上;黑龙江鹤岗和辽宁铁法位于 NNE 向的伊兰—伊通断裂带附近;抚顺则是临近密山—敦化断裂带;而铁法和抚顺同时又是处于北纬 $41^\circ \sim 42^\circ 30'$ 构造带上。这些煤田的地理位置都是在中、新生代,特别是燕山期岩浆断续侵

入的纬向或 NE—NNE 向构造带上,这些煤田的煤因区域岩浆热变质作用的叠加形成了包括高煤级煤在内的煤级分带,成为煤层气勘探的有利选区。

4 燕山期岩浆活动特点

既然这些产气量较高的煤田与燕山期岩浆分布关系如此密切,有必要了解燕山期岩浆侵入的特点。

燕山期岩浆活动强烈,并且具有多期性和方向性的特点。多期性可以邯邢煤田为例,煤田范围内武安磁山和涉县符山基性岩体的同位素年龄为 $1.40 \times 10^2 \sim 1.80 \times 10^2$ Ma,武安矿山村和涉县固镇中性岩的同位素年龄要新些,为 $1.20 \times 10^2 \sim 1.40 \times 10^2$ Ma,而武安洪山与河南安阳李珍的中性岩的时代更新,为 $0.69 \times 10^2 \sim 1.20 \times 10^2$ Ma。邯邢煤田康二成矿的太原组野青煤受燕山晚期岩浆直接侵入只形成了粉状碎裂煤,而非天然焦,原因是在正长岩岩浆直接侵入煤层之前,闪长岩岩浆已于燕山早期侵入太原组下伏数百米的中奥陶系内,闪长岩岩浆的预先烘烤使此处的野青煤已变质为失去粘结性的高煤级煤,因此煤层在后期的正长岩岩浆的侵入时已失去了形成天然焦的物质条件。

由于燕山期岩浆多沿一定方向断续侵入,使其相关的煤级分带也有一定的规律可循。燕山期岩浆侵入及其导致煤的区域岩浆热变质主要沿纬向和 NE—NNE 向构造带继续分布。就目前所知,我国共有 6 个纬向构造带和 11 个 NE—NNE 向构造带断续分布有燕山期侵入岩体,因而在这些纬向和 NE—NNE 向构造带上的多处煤田、煤产地的煤因经受了区域岩浆热变质而形成了高中低煤级分带。华北最北面的北纬 $41^\circ \sim 42^\circ 30'$ 纬向带,西起新疆拜城,经内蒙、河北、辽宁到吉林浑江等煤田;往南的北纬 $39^\circ \sim 40^\circ$ 纬向带,西起新疆乌恰,经甘肃、宁夏、山西、河北到北京斋堂、房山等煤田;再往南的北纬 $37^\circ \sim 38^\circ$ 纬向带,西起新疆英吉沙,经青海、甘肃、宁夏、山西阳泉等煤田,再往东由于长治—紫荆关断裂的右旋活动,将原分布在北纬 $37^\circ \sim 38^\circ$ 之间的武安、峰峰以及淄博、潍坊等煤田向南移动了约 100 km,大致相当于一个纬度的距离,移动到北纬 $36^\circ \sim 37^\circ$;北纬 $35^\circ \sim 36^\circ$ 纬向带从甘肃窑街,经陕西韩城、山西新绛、阳城、晋城等煤田,进入河南后同样由于长治—紫荆关断裂的右旋活动,将原来分布在北纬 $35^\circ \sim 36^\circ$ 的河南荥巩、永夏、安徽、江苏、山东枣庄、临沂

等煤田向南推移到了北纬 $34^\circ \sim 35^\circ$ 。

5 叠加变质提高煤层含气量和渗透率的机理

只经受深成变质作用的华北晚古生代煤含气量和渗透率大多较低,但中生代岩浆侵入导致区域岩浆热变质的叠加则起到了增加煤层含气量和改善煤层渗透性的作用。岩浆温度高,如处于北纬 $37^\circ \sim 38^\circ$ 的纬向构造带的阳泉和寿阳一带的古地温梯度曾达到 $9.3 \sim 9.8$ $^\circ\text{C}/100$ m;位于北纬 $35^\circ \sim 36^\circ$ 的晋城、屯留一带的古地温梯度曾达到 $7.3 \sim 8.3$ $^\circ\text{C}/100$ m;根据石英包体测温表明,晋城一带煤层经受过的平均温度为 $234 \sim 267$ $^\circ\text{C}$,最高的达 600 $^\circ\text{C}$ 左右。由于经受燕山期岩浆侵入影响的背景煤级低,因此在快速增温的高温作用下,煤层必然再次产气,即“叠加生烃”或“叠加成气”,亦即深成变质阶段的已成气又叠加了区域岩浆热变质作用的煤层气。“叠加生烃”不仅气量大且成烃速度快,叠加成烃的同时形成大量的“热解气孔”,其孔径远大于深成变质作用下的气孔孔径。

为了证明在叠加变质的高温煤是否会生成热解气孔,在实验条件下将不同煤级煤样在高压釜密封管中,拟合地层压力,按 50 $^\circ\text{C}$ 的间隔增温加热,在 $250 \sim 300$ $^\circ\text{C}$ 之间开始软化,逸出气体的同时产生“热解气孔”。不同煤级煤产生大小不同的气孔,长焰煤的孔径以 $10 \sim 20$ μm 为主,气煤和肥气煤的孔径以 $10 \sim 80$ μm 为主,肥煤的气孔常合并联通,孔径加大,可达 200 μm 以上(图版 I, 1~4)。气孔率总的有随温度增高而增大的趋势,如 300 $^\circ\text{C}$ 时热解气孔率为 $2\% \sim 18\%$,而 500 $^\circ\text{C}$ 时可达 40% 。采自荥巩煤田的无烟煤和永夏煤田的天然焦样品也都证实了煤层经受区域岩浆热变质自然产生叠加煤层气及热解气孔的事实(图版 I, 5~7)。热解气孔的孔径远大于常规气孔,超过几个数量级,明显增加了煤层气含量,况且“叠加生烃”发生在燕山期,距今时间较短,煤层气散失的机会也较少。

裂隙是煤层气在煤中渗流、运移的通道,使气和水的达西流在降压期间能向井孔方向运移。华北晚古生代煤层经过长时间的压实,因此渗透率较低,但若叠加上述区域岩浆热变质作用和由于岩浆侵入伴随的上拱作用,使煤层中已有的裂隙加大宽度并会增

多新的裂隙;而由于叠加生烃的产气量大、速度较快,气体的压力对裂隙起到了撑开扩宽加长的作用,使部分内生裂隙扩展到镜煤和光亮煤之外,成为外生裂隙,从而提高了煤的渗透率,所以说中生代,尤其是燕山期持续 1 亿多年之久的多期多幕岩浆侵入,改善、提高了华北部分晚古生代煤的煤层气含量和渗透率,使之成为富集高渗可能性很大。表 1 就部分叠加变质煤与深成变质煤含气量和渗透率的比较,有力地说明这种叠加变质影响的重要。

表 1 一些煤田(矿区)煤变质程度、含气量与渗透率

Table 1 Variations of coal rank, methane content and permeability in some coalfield (mining)

煤田 (矿区)	煤变质程度 (以煤类表示)	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}$	岩浆 侵入
沁水	瘦-无烟煤	15~30	0.5~1.6	有
寿阳-阳泉	贫-无烟煤	13	>3.0	有
抚顺	长焰-气煤	6.4~18.5	1~4	有
大城	气-焦煤	11.3	0.50~1.79	有
淮北	气-无烟煤	7.5	1.3	有
阜新王营	中-高变质煤、 天然焦	12		有
阜新	长焰煤	4.9	<0.01	无
唐山	气-气肥煤	3~9	0.1~0.5	无
吴堡	气-焦煤	11.5	0.1	无
淮南	气煤	6.8	0.2	无

6 结语

(1)研究煤层气富集性与可采性,必须结合地质特点。在吸取国外先进经验的同时,还要摆脱国外经验的束缚。华北煤的多阶段变质演化与多热源叠加变质作用不仅使部分煤演化为中高煤级,也对煤层气的富集高渗十分有利。结合煤变质特点进行研究,是从成因上揭示我国煤层气开发地质条件的重要方面。

(2)确认华北高煤级煤(高煤阶煤)有利于煤层气的富集高渗,是十几年来煤层气选区工作极为重要的成果之一。但叠加的区域岩浆热变质所形成的煤级分带不只包括高煤级煤,而且还有中煤级煤;华北煤变质演化,有利于提高与改善煤的含气量和渗透率,这种影响不仅针对高煤级煤的无烟煤和贫煤,也施加在中煤级煤的瘦煤、焦煤、肥煤和气煤之上。因此可首先着眼于区域岩浆热变质煤的煤层气地质条件综合分析,寻找确定煤层气勘探区,扩大有利煤层气的多煤级目标选择,不必限制在美国提出的“优

势煤级”范围内。

(3)燕山期岩浆沿多个纬向构造带和 NE—NNE 向构造带断续侵入,在 1 450 多个区块发育有丰富煤资源的我国,就目前所知,有相当数量的煤田或煤产地受燕山期岩浆侵入影响而发生区域岩浆热变质。若这些煤田、煤产地的煤层厚度足够而稳定,地层压力、水文地质等其他条件配置适当,则我国不仅有利煤层气富集高渗的煤级多,而且有可能发现更多的煤田、煤产地赋存以高煤级煤和中煤级煤为载体的煤层气富集高渗区。

参考文献:

- [1] 中国煤田地质总局. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998. 60~123.
- [2] James E F. Geology and coal-bed methane resources of the Northern San Juan Basin, Colorado and New Mexico [M]. Denver, Colorado: Rocky Mountain Association of Geologist, 1988. 51~291.
- [3] Rightmire C T, Eddy G E, Kirr J N. 美国煤层甲烷资源 [M]. 马学昌, 王休中, 尹善春, 等译. 北京: 地质出版社, 1991. 1~364.
- [4] 杨起, 吴冲龙, 汤达祯, 等. 中国煤变质作用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996. 182~197.
- [5] Konechny P, Kozyusnikova A. Measurement of gas permeability of coal and clastic sedimentary rocks under triaxial stress conditions [A]. In: Gayer R, Harris I, eds. Coalbed methane and coal geology [C]. Oxford: the Alden Press, 1996. 227~229.
- [6] Harris I, Gayer R. Coalbed methane and coal geology [M]. London: London Geological Society, 1996. 103~338.
- [7] McKee K, Bumb A C, Way S C. 应用渗透率与深度关系评价煤层天然气的潜力[A]. 见: 华北石油地质局编. 煤层气译文集[C]. 张胜利译. 郑州: 河南科学技术出版社, 1986. 366~384.
- [8] 李明潮, 梁生正, 赵克镜. 煤层气及其勘探开发[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 23~94.

图 版 说 明

图 版 I

热压处理煤和区域岩浆热变质的气孔构造

- 1 长焰煤, 加热 300 ℃, 油浸反光, 320×;
- 2 肥煤, 加热 300 ℃, 油浸反光, 320×;

- | | |
|---------------------------|----------------------|
| 3 长焰煤,加热 450 ℃,油浸反光,320×; | 6 蒙巩煤田无烟煤,油浸反光,204×; |
| 4 气煤,加热 400 ℃,油浸反光,320×; | 7 永夏煤田天然焦,油浸反光,360×. |
| 5 蒙巩煤田无烟煤,油浸反光,190×; | |

EFFECT OF COAL METAMORPHISM ON METHANE CONTENT AND PERMEABILITY OF COAL IN NORTH CHINA

Yang Qi Tang Dazhen

(*Department of Energy Resources Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The contrast in geological conditions for the coalbed methane between North China and United States indicates that the telemagmatic thermal metamorphism is favorable for the increase of the coalbed methane volume and permeability characteristic of coal metamorphism in North China. Additionally, the mechanism of the telemagmatic thermal metamorphism is discussed in this paper. The majority of coals in North China were ranked in the low level before the intrusion of Yanshanian magma. Therefore, at the high temperature caused by the rapid increase of the temperature, the coalbed methane occurred the second time. That is to say the coalbed was of great potential to the “superimposed hydrocarbon generation” or “superimposed coalbed-methane generation”. The porosity and fissure system turned more developed. Moreover, the late generation of the coalbed methane derived from the telemagmatic thermal metamorphism favored the reservation of the coalbed methane. The coal-rank zonings superimposed by the telemagmatic thermal metamorphism, including high-rank and middle-rank coals, increase distinctively the methane content and the permeability. Therefore, special attention should be paid to the location of the coalbed-methane prospecting target in the telemagmatic thermal metamorphic coals.

Key words: coalbed methane; coal metamorphism; methane content; permeability; North China.