

沁水盆地郑庄—樊庄区块煤系储层 共生成藏微观输导体系

赵 慧¹, 杨海星², 赵承锦¹, 吴玉琛¹, 朱传真¹, 林玉祥¹

(1. 山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油煤层气有限责任公司 韩城分公司, 陕西 韩城 715409)

摘要: 基于沁水盆地郑庄—樊庄区块煤层气藏与顶板致密砂岩气藏之间存在共生性与不对称性迁移的现象, 提出了共生成藏微观输导体系的概念。以煤系储层微观输导体系为研究对象, 采用高压压汞实验、低温液氮吸附测试和核磁共振分析等方法, 对静态微观输导体系的特征和动态输导机制研究后发现, 研究区煤岩静态微观输导体系由过渡孔—微孔为主导的孔隙型输导要素与高密度、高角度的裂隙型输导要素构成; 构造抬升引起的降压是煤层气微观输导的动力。古近纪末期至现今, 由于构造抬升引起压力变化使得煤岩吸附气解吸, 每吨煤解析出 14.29 m³ 的甲烷。古近纪末期(距今约 30 Ma), 甲烷分子在煤岩孔径范围内发生 Fick 型扩散; 现今在孔径为 5~15 nm 的煤岩中发生过渡型扩散, 在孔径为 15~100 nm 的煤岩内发生 Fick 型扩散。

关键词: 共生成藏 微观输导体系 构造抬升 输导动力 气体扩散模式 动态输导机制

中图分类号: TE111.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)04-0046-07

Study on the micro-transportation system for symbiotic accumulation in coal seam in Zhengzhuang-Fanzhuang block of Qinshui Basin

Zhao Hui¹, Yang Haixing², Zhao Chengjin¹, Wu Yuchen¹, Zhu Chuanzhen¹, Lin Yuxiang¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao City, Shandong Province, 266590, China; 2. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Hancheng City, Shaanxi Province, 715409, China)

Abstract: Based on the coexistence and asymmetric migration of coal bed methane (CBM) and coal roof tight sandstone (CRTS) gas of the southern area of Zhengzhuang-Fanzhuang block in Qinshui Basin, the concept of micro-transportation system was proposed for the process of symbiotic gas accumulation. The micro-transportation system was studied by using methods of the high pressure mercury injection, low-temperature liquid nitrogen adsorption and nuclear magnetic resonance (NMR). After studying on the static characteristics and dynamic mechanism of micro-transportation system, it is found that the static micro-transportation system of the coal seam in the study area is mainly consist of transitional pores-micropores and high density and high angle fractures. The decreasing of pressure caused by tectonic uplift is the driving force for the coal seam gas micro-transportation. From the late Paleogene to now, changes in pressure caused by tectonic uplift result in the desorption of gas once adsorbed on coal and 14.29 m³ methane gas desorbed from one ton coal. Late in Paleogene (30 Ma), methane diffused according to Fick's law within the scope of the coal rock aperture. Today methane diffuses transitionally in coal rock with the aperture of 5-15 nm, and diffuses according to Fick's law in coal rock with the aperture of 15-100 nm.

Key words: symbiotic accumulation; micro-transportation system; tectonic uplift; driving force of transportation; model of

收稿日期: 2016-03-03。

作者简介: 赵慧(1990—), 女, 山东临沂人, 在读硕士研究生, 从事油气地质与评价方面的研究工作。联系电话: 18654629268, E-mail: zhui5299@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“沁水盆地煤层气与致密砂岩气共生成藏机理研究”(41172108), 国家科技重大专项“中深层煤系地层立体勘探有利目标优选”(2016ZX05041005)和“岩性地层油气藏区带、圈闭评价方法与关键技术”(2016ZX05001003)。

gas diffusion; dynamic transporting mechanism

在沁水盆地南部郑庄—樊庄区块煤层气勘探开发过程中,郑试31井和郑试49井钻探发现煤岩—顶板砂岩型气藏,其含气量分别为8.7和15.6 m³/t,砂岩气藏多为煤层气藏的伴生气藏。煤岩排出的天然气经过短距离运移,在与其紧密接触的致密砂岩中聚集成藏,垂向上两类气藏叠置共生,且近距离接触,呈现源储共生型油气聚集特征^[1]。结合沁水盆地南部烃源岩埋藏史与热演化史可知,煤岩二次生烃作用相对较早,主要发生于燕山中晚期^[2],如果后期没有古煤层气藏解吸出来的游离气作为补充,致密砂岩气藏早已散失殆尽。因此,盆地后期构造抬升引起的古煤层气藏脱烃作用对于游离气藏得以保存至今具有重要意义。在煤层气与砂岩气的共生转化过程中,煤岩微观输导体系起到了至关重要的作用,为游离气提供输导空间、输导通道和输导动力,促使游离气在砂岩中运聚成藏。为此,笔者以沁水盆地郑庄—樊庄区块山西组3号煤以及煤岩微观输导体系为研究对象,以甲烷分子运动学为理论依据,开创性提出共生成藏微观输导体系的概念,利用高压压汞实验、低温液氮吸附测试以及核磁共振分析等方法半定量刻画研究区煤岩静态微观输导体系,并研究构造运动(温压条件变化)对其微观输导能力的影响机理,以期丰富沁水盆地煤层气与砂岩气的共生成藏理论、实现煤层气与砂岩气合理共采提供参考和依据。

1 共生成藏微观输导体系概念的提出

输导体系是指油气从烃源岩到圈闭过程中所经历的所有路径及其相关围岩,包括骨架砂体、断层、不整合面及其组合^[3-6],由于常规油气初次生排烃强度较大,宏观输导体系研究侧重于油气二次运移输导体系的刻画。煤岩微观输导体系是指吸附气解吸之后运移到砂体过程中所经历的孔隙—裂隙网络系统。由于煤岩具有很强的吸附性能,因而可以自生自储大量的甲烷气,一旦温度和压力发生变化,引起煤层吸附气解吸,向煤层游离气—砂岩游离气动态转化,必然涉及到游离气发生扩散和渗流所途经的源内微观输导体系,煤层游离气通过源内微观输导体系运移至顶板砂岩中成藏,这就形成了煤层气与砂岩气的共生成藏。此处所指的微观输导体系与常规烃源岩排烃时的微观输导体系存

在3点不同:①排烃动力不同。盆地后期构造抬升过程中,煤岩二次生烃作用已经终止,气源主要为下伏的古煤层气藏,因此,在排烃动力上不存在异常高压,主要为构造抬升导致的源储压差和气体膨胀力。②源汇体系不同。砂岩透镜体直接捕获砂体周围烃源岩所生成的烃类,而煤岩顶板砂岩主要捕获下伏古煤层气藏解吸的吸附气;从供烃方向来看,前者形成球形汇聚渗流^[7-8],周围烃源岩形成的烃类向中心处砂岩运移聚集成藏;后者以致密砂岩底部烃源岩面式充注为主,主要发生垂向运移。③迁移机制不同。常规砂岩气运聚成藏之后不会发生向烃源岩的迁移。将煤层气藏和顶板砂岩气藏视为同处于一个体系中,在该体系内吸附气、游离气和水溶气三者共生成藏,且吸附气与游离气之间的转换受控于温压场。在一定的温压条件下,煤岩吸附能力是一定的,即煤岩颗粒表面吸附气与孔隙间游离气处于吸附—解吸动态平衡,而煤岩孔隙和裂隙间的游离气与顶板砂岩游离气之间可相互转化,处于动态平衡。当地质历史时期温压条件发生改变时,吸附气与游离气之间发生不对称迁移,即吸附气解吸过程中形成的部分游离气会脱离煤岩—顶板砂岩体系,形成不可逆的迁移^[9]。

2 静态微观输导体系特征

煤岩是一种具有双重孔隙系统的孔隙—裂隙型储层,基质孔隙型输导空间和裂隙型输导空间共同构成了其静态微观输导体系,控制了煤岩与砂岩接触面的输导能力。对沁水盆地郑庄—樊庄区块山西组3号煤采样后进行高压压汞实验、低温液氮吸附测试以及核磁共振分析,研究其微观孔隙和裂隙形态、孔径分布特征、裂隙的密度、充填及连通情况,对煤岩静态微观输导体系进行定性—半定量评价。

2.1 基质孔隙型输导空间

利用高压压汞实验和低温液氮吸附测试分析研究区山西组3号煤的孔隙结构,以进一步研究其孔隙比和比表面积比。以霍多特提出的十进制分类系统为基础,结合刘焕杰针对10 nm孔隙提出的分类方案^[10],将煤岩孔隙划分为大孔(孔径大于1 000 nm)、中孔(孔径为100~1 000 nm)、过渡孔(孔径为10~100 nm)、微孔(孔径为5~10 nm)、次微孔(孔径为2~5 nm)和极微孔(孔径小于2 nm)6类。

测试结果表明:研究区山西组3号煤总孔容为 $262.22 \times 10^{-4} \sim 598.84 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{g}$,平均为 $433.47 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{g}$,以西南侧沁水矿区最高,往北东方向逐步减小。以大孔和过渡孔为主,分别占56.99%和36.02%,其次为中孔,微孔系列孔容比均较小(图1)。研究区山西组3号煤的比表面积为 $2.85 \sim 14.91 \text{ m}^2/\text{g}$,平均为 $6.40 \text{ m}^2/\text{g}$,主要为过渡孔和极微孔,分别占62.38%和24.68%(图1)。分析沁南地区比表面积可知,由南向北以极微孔为主逐渐变为以过渡孔为主,同时全孔比表面积逐渐减小。

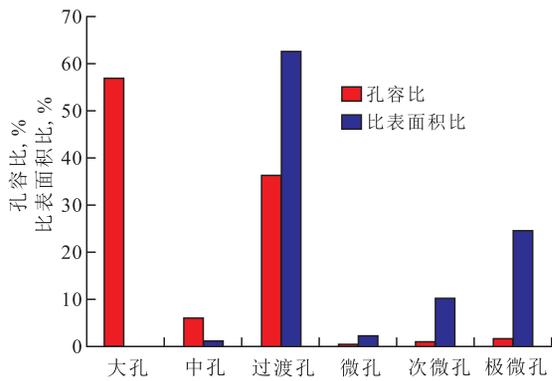


图1 沁南地区山西组3号煤孔隙结构

Fig.1 Pore structure of No.3 coal of the Shanxi Formation in the southern Qinshui Basin

研究区山西组3号煤核磁共振横向弛豫时间为 $0.5 \sim 2.5, 20 \sim 50$ 和大于 100 ms 时所对应的谱峰分别代表微小孔(孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$)、中一大孔(孔径大于 $0.1 \mu\text{m}$)和裂隙,谱峰越高,说明该峰所代表的孔隙或裂隙越发育^[11]。根据郑庄—樊庄区块山西组3号煤核磁共振 T_2 谱分布特征(图2)可知:大部分样品横向弛豫时间为 $0.5 \sim 2.5 \text{ ms}$ 所对应的谱峰最高,这说明煤岩中以孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙最为发育,其次极少数样品中大孔也较为发育;横向弛豫

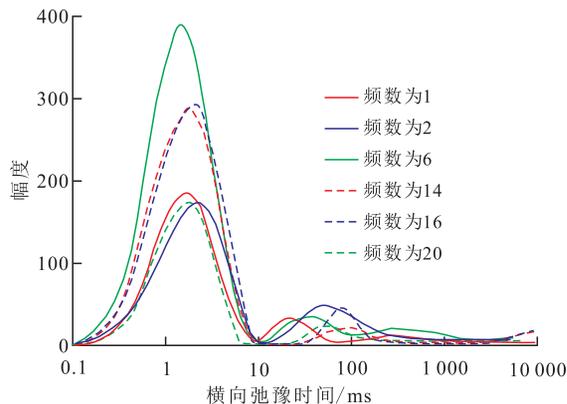


图2 沁水盆地郑庄—樊庄区块山西组3号煤核磁共振 T_2 谱分布

Fig.2 NMR- T_2 spectrum distribution of No.3 coal from the Shanxi Formation in Zhengzhuang-Fanzhuang block of Qinshui Basin

时间为 $0.5 \sim 2.5$ 和 $20 \sim 50 \text{ ms}$ 所对应的谱峰之间不连续,说明微小孔和中一大孔之间的连通性较差;而横向弛豫时间为 $20 \sim 50$ 和大于 100 ms 所对应的两峰之间连续性相对较好,说明中一大孔与裂隙间的连通性较好。

2.2 裂隙型输导空间

煤岩裂隙按照成因不同,可分为内生裂隙(主要为割理)和外生裂隙。郑庄—樊庄区块山西组3号煤成分以镜质组为主,非常有利于割理以及裂隙(图3a,3b)的发育,在煤岩露头中发现高角度—垂直的外生裂隙(图3c,3d),在晋城地区还发现了外生节理和气胀节理。以郑庄—樊庄区块及邻区为例,山西组3号煤割理发育密度为 $344 \sim 760 \text{ 条}/\text{m}$,为高密度割理发育区,割理宽度约为 $1 \mu\text{m}$,无充填。由线割理和面割理构成的立体内生割理系统串通了大孔—过渡孔—微孔的基质裂隙型(割理是内生裂隙)输导空间,极大地改善了煤岩的输导能力。

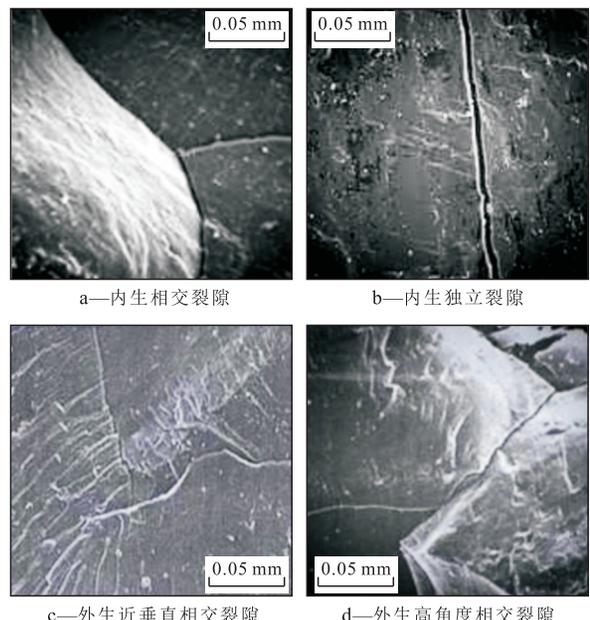


图3 沁水盆地郑庄—樊庄区块3号煤裂隙发育特征

Fig.3 Developmental characteristics of No.3 coal fractures in Zhengzhuang-Fanzhuang block of Qinshui Basin

煤岩外生裂隙发育情况与不同地质历史时期的构造活动密切相关。沁水盆地古生界煤系地层沉积之后,经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期3期不同方向应力场的构造作用,为裂隙发育提供了良好动力。研究区山西组3号煤主要发育2组外生裂隙,第1组裂隙走向为 $15^\circ \sim 66^\circ$,主要为 $30^\circ \sim 45^\circ$;第2组走向为 $276^\circ \sim 355^\circ$,多数为 $285^\circ \sim 330^\circ$,2组裂隙产状均较陡,倾角绝大部分大于 67° 。其中第1组较为发育,为主要外生裂隙;第2组为次要外生裂隙。研究区山西组3号煤的割理和外生裂隙发育,

合计密度达555~904条/m,二者均为煤层气解吸之后的垂向运移提供了良好的运移通道。

综上所述,以过渡孔—微孔为主导的孔隙型输导要素与高密度、高角度的裂隙型输导要素共同构建了沁水盆地郑庄—樊庄区块山西组3号煤的静态微观输导体系。孔隙好比孤立或连通的站点,内生割理系统连通性好、无充填,串联了绝大部分站点呈网状分布,类似“普通公路”,而外生裂隙就是游离气向源外运移的“高速公路”,其输导能力远大于孔隙和割理。孔隙空间主要起扩散作用,将气体从微孔输送到裂隙;而裂隙主要起渗流作用,控制着气体的流量^[12]。孔隙和裂隙各司其责,将煤岩解吸出来的游离气通过立体微观输导体系垂向运移至煤岩顶板砂岩中成藏,形成了煤层气与顶板砂岩气共生的现象。

3 动态输导机制

3.1 构造抬升是微观输导的动力

盆地在构造抬升过程中,往往伴随着大范围的降温与降压,直接导致煤岩吸附气的解吸和水溶气的脱溶,在一定程度上均可促进天然气成藏。卞从胜等对四川盆地须家河组气藏研究后认为:后期构造抬升是导致煤系烃源岩吸附气解吸和砂岩水溶气脱溶的关键因素,在很大程度上促进了须家河组致密气的大面积成藏^[13-14]。鉴于沁水盆地郑庄—樊庄区块煤层气藏和顶板砂岩气藏具有共生性,将煤岩和顶板砂岩视为一个相对封闭的体系。选取不同地质历史时期的2个时间节点,通过这2个时间节点煤岩的吸附量与溶解量的对比,验证构造抬升能否引起煤层气向游离气的转化,微观输导体系是否在规模输导中起到关键作用。为了便于探讨构造抬升对煤层气和顶板砂岩气共生成藏的影响,假设条件如下:①煤岩与顶板砂岩之间多呈过渡接触,即二者之间存在厚度不等的泥岩,将3号煤和上覆的第1套砂岩视为统一的系统;②由于煤岩与砂岩之间存在夹层,且两者在物性上存在差异,导致两者之间存在一定的压差^[15-16]。在选取地质历史时期某一时间节点进行分析时,近似认为二者的温压环境与地层流体性质相同。

根据研究区埋藏史及热演化史(图4),选取2个时间节点进行分析。节点1:古近纪末期(距今约30 Ma),3号煤埋深约为1 500 m,地层压力为15 MPa,地层温度为60℃^[17-18]。该状态下,煤层吸附气含量达到最大,但含气饱和度最低,为欠饱和煤层气藏;

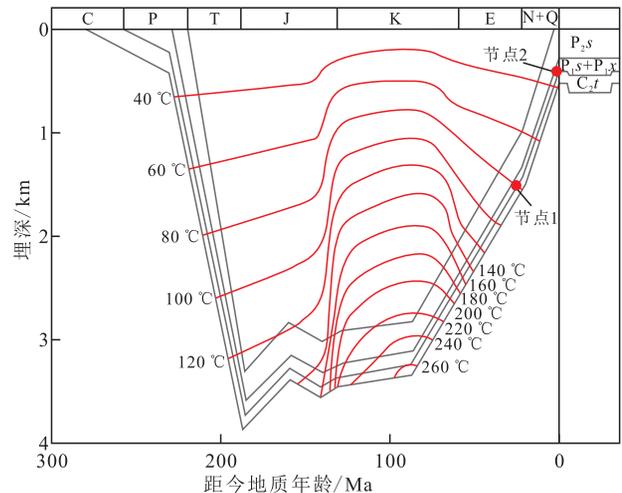


图4 沁水盆地郑庄—樊庄区块埋藏史及热演化史 (据文献[15]修改)

Fig.4 Burial history and thermal evolution history of Zhengzhuang-Fanzhuang block in Qinshui Basin (modified from reference[15])

而对于顶板砂岩,烃源岩二次生烃注入的天然气大部分已经散失,孔隙中以含水为主。节点2:现今状态。煤岩现今埋深为500~600 m,储层压力梯度平均为0.67 MPa/hm,地层压力为2.77~4.20 MPa,平均为3.48 MPa;地温梯度约为1.5℃/hm,煤岩温度为22.72~26.48℃,平均为25℃;含气量一般大于20 m³/t,且含气饱和度大于90%,为高饱和气藏。

研究区山西组3号煤的地层水矿化度平均为2 496 mg/L,主要为NaHCO₃型。假设地层水矿化度在各地质历史时期始终保持不变,结合樊庄固县子区块部分井3号煤等温吸附数据(表1),利用吸附势求取吸附量的方法,求得节点1和节点2的煤岩吸附量分别为35.63和21.34 cm³/g,利用甲烷溶解度回归公式^[19-20],求得节点1和节点2的地层水溶解度分别为2.33和1.18 m³/m³。说明从节点1向节点2的构

表1 樊庄固县子区块3号煤等温吸附数据
Table1 Isothermal adsorption data of No.3 coals in Fanzhuang Block

井号	水分, %	灰分, %	挥发分, %	平衡水分, %	兰氏体积/(cm ³ ·g ⁻¹)	兰氏压力/MPa
华固17-2	13.95	7.76	9.89	32.97	32.97	1.84
	12.28	6.45	11.39	35.42	35.42	2.03
	18.45	6.86	13.36	36.58	36.58	2.79
华固17-3	7.84	6.68	13.99	40.7	40.7	2.8
	10.63	5.77	14.36	38.93	38.93	2.91
	8.96	7.68	15.09	37.34	37.34	2.52
华固17-4	9.61	5.91	11.61	41.89	41.89	2.96
	15.96	6.47	12.69	34.11	34.11	2.75
	13.81	6.11	12.36	35.2	35.2	2.74

造抬升过程中,每吨煤会解吸出 14.29 m³的甲烷,同时每立方米的地层水会释放出 1.15 m³的甲烷;由此可见,这些解吸或脱溶的天然气是抬升期煤层气区块成藏的重要气源,游离气沿着微孔隙及裂隙构成的微观输导体系发生大规模不对称性迁移,在与煤岩近距离接触的致密砂岩中聚集成藏。

古煤层气藏区块解吸气向顶板砂岩储层的运移机理在很大程度上类似于现今煤层气藏开发过程中煤层气的运移,地层压力下降到临界解吸压力之下,引起煤层气解吸,当煤岩孔隙型输导空间内外气体浓度差足够大时,气体扩散至裂隙型输导空间内,依靠裂隙空间的渗流作用将煤层游离气运移到砂岩储层成藏,故将煤系储层动态微观输导过程分为解吸、扩散和渗流3个过程。在构造抬升过程中,煤层气的解吸速度远大于渗流速度,而气体分子渗流速度大于气体扩散速度,因此微观输导能力很大程度上取决于游离气在孔隙中的扩散速度。

3.2 气体扩散模式

依据相态和游离气在煤岩中的扩散位置,将扩散划分为气相扩散、吸附相扩散、溶解相扩散和固溶体扩散4种类型^[21],其中气相扩散最为重要。根据努森数(Kn),将气相扩散类型划分为Fick型扩散(Kn 大于10)、Knudsen型扩散(Kn 小于0.1)和过渡型扩散(Kn 为0.1~10)^[22]。Fick型扩散阻力主要来自气体分子之间的碰撞,气体与孔隙壁面之间的碰撞几率较小;Knudsen型扩散阻力主要来自于孔隙壁面;过渡型扩散两者兼有,是介于Fick型与Knudsen型之间的类型。

在实际地层条件下,在考虑气体压缩性的情况下,甲烷分子的平均自由程是孔径、温度、压力和气体压缩因子的函数,努森数为孔径与甲烷分子平均自由程的比值,因此,在不考虑甲烷分子直径变化的情况下,在一定的地质历史时期,随着温压条件的改变,甲烷分子平均自由程呈动态变化,努森数随之发生变化,从而扩散方式也会发生改变。分析图5可知:①当选取地质历史时期某一时间节点进行分析,即甲烷分子平均自由程一定时,不同孔径的孔隙中具有不同的扩散模式。②在孔径一定的情况下,随着甲烷分子平均自由程的增大,扩散模式由Fick型扩散向过渡型扩散、Knudsen型扩散依次发生改变。③在不同地质历史时期某一时间节点,温压条件不同,甲烷分子平均自由程发生变化,必然导致界定各种扩散模式的孔径发生改变。

3.3 不同孔径煤岩动态微观输导机制

综上所述,甲烷分子在纳米级孔隙中以何种扩

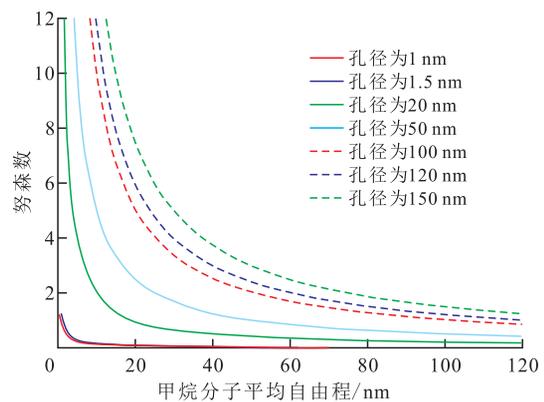


图5 沁水盆地郑庄—樊庄区块不同孔径下努森数与甲烷分子平均自由程的关系

Fig.5 Relationship between Kn and λ for different pore sizes of coals from Zhengzhuang-Fanzhuang block in Qinshui Basin

散方式运移不仅与孔径有关,还与温压条件有关。结合研究区埋藏史,参考Brown建立的甲烷压缩因子图版^[23],计算得到理想状态时节点1和节点2甲烷分子的平均自由程分别为0.4和1.54 nm;在由节点1向节点2的演化过程中,由于温度变化对甲烷分子自由程的影响明显弱于压力变化,修正后,甲烷分子平均自由程分别为0.36和1.47 nm。

在由节点1到节点2的构造抬升过程中,甲烷分子平均自由程为0.36~1.47 nm。取最大值1.5 nm进行分析,在考虑甲烷分子直径和煤岩表面吸附作用的基础上,以不同扩散模式下煤岩的孔径分布为依据,同时结合前人关于孔隙结构与煤层气扩散、渗流的研究^[24-26],得到了不同孔径下的扩散模式(图6):①无效孔隙(孔径小于0.4 nm),甲烷分子直径约

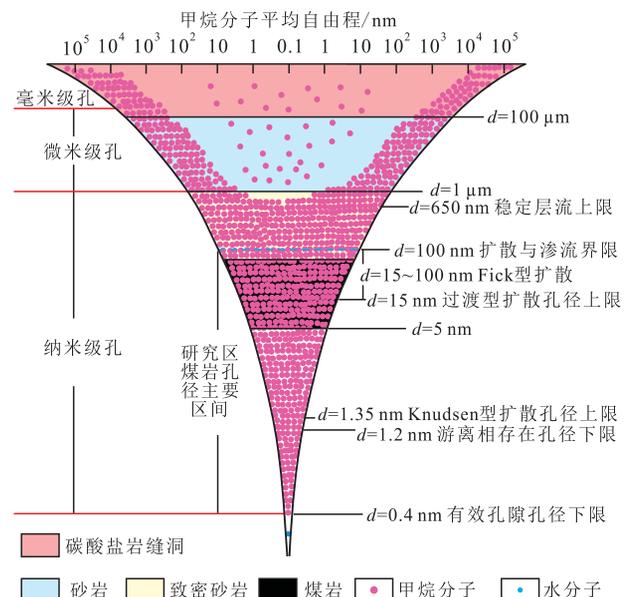


图6 不同孔径煤岩的动态微观输导机制

Fig.6 Dynamic transporting mechanism for different seam pore sizes of coals

为0.41 nm,只有当孔径(d)大于甲烷分子直径时,甲烷分子才有可能进入孔隙,无效孔隙对游离气运移基本不起作用。②极微孔(孔径为0.4~1.2 nm),由于煤岩有机质表面强烈的吸附作用,会在有机质或干酪根表面形成稳定的单分子吸附层,因此,甲烷分子主要以吸附相存在,发生吸附相扩散和固溶体扩散。③次微孔(孔径为1.2~1.35 nm),孔隙可以并列容纳3个甲烷分子,位于中间的甲烷分子以自由状态存在,发生Knudsen型扩散。④微孔(孔径为1.35~15 nm),随着孔径的进一步扩大,甲烷分子发生过渡型扩散。⑤过渡孔(孔径为15~100 nm),以发生Fick型扩散为主,上限为扩散孔隙和渗透孔隙的分界点,即100 nm。⑥中孔(孔径为100~650 nm)与大孔(孔径大于650 nm),当孔径大于100 nm时,以渗流为主,其中650 nm为稳定层流与剧烈层流的分界点。

研究结果表明,煤岩孔径绝大部分为5~100 nm,不同孔径的孔隙类型扩散模式不同。而研究区孔径以过渡孔和微孔为主,以Fick型扩散和过渡型扩散为主。不同地质历史时期的扩散模式不同,节点1,甲烷分子平均自由程为0.36 nm,努森数为13.9~277.8,发生Fick型扩散;节点2,甲烷分子平均自由程为1.47 nm,努森数为3.4~68.0,当煤岩孔径为5~15 nm时发生过渡型扩散,当煤岩孔径为15~100 nm时发生Fick型扩散。

4 结论

煤岩微观输导体系是指将吸附气解吸之后运移到砂体所经历的由孔隙—裂隙构成的立体网络系统。在排烃动力、源汇体系和迁移机制三方面有别于宏观输导体系。以过渡孔和微孔为主导的纳米级孔隙型输导要素与高密度、高角度的裂隙型输导要素共同构建了沁水盆地郑庄—樊庄区块煤岩静态微观输导体系。

构造抬升是微观输导的动力。研究区煤层在从古近纪末期埋深1 500 m抬升剥蚀至1 000 m过程中,吸附气、水溶气转化为游离气,其中以吸附气向游离气转化为主。以气体扩散模式为依据,研究了沁南地区不同孔径煤岩的输导机制为:节点1,以Fick型扩散为主;节点2,煤岩孔径为5~15 nm时发生过渡型扩散,为15~100 nm时发生Fick型扩散。

参考文献:

[1] 邹才能,杨智,陶士振,等.纳米油气与源储共生型油气聚集

[J].石油勘探与开发,2012,39(1):13-26.

Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.

[2] 李伟,张枝焕,朱雷,等.山西沁水盆地石炭—二叠系煤层生排烃史分析[J].沉积学报,2005,23(2):337-345.

Li Wei, Zhang Zhizhuan, Zhu Lei, et al. The history analysis of hydrocarbon expulsion from the coal beds in the Carboniferous-Permian in Qinshui basin, Shanxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 337-345.

[3] 郭凯,曾溅辉,金凤鸣,等.冀中拗陷文安斜坡第三系油气有效输导体系研究[J].石油实验地质,2015,37(2):179-186.

Guo Kai, Zeng Jianhui, Jin Fengming, et al. Effective petroleum migration system in the Tertiary of Wen'an Slope, Jizhong Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 179-186.

[4] 贾京坤,尹伟,邱楠生,等.红河油田延长组长8段油气输导体系及运聚模式[J].油气地质与采收率,2016,23(2):9-15.

Jia Jingkun, Yin Wei, Qiu Nansheng, et al. Petroleum carrier systems and migration and accumulation patterns in Chang8 member of Yanchang Formation in Honghe oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 9-15.

[5] 林玉祥,孙宁富,郭凤霞,等.油气输导机制及输导体系定量评价研究[J].石油实验地质,2015,37(2):237-245.

Lin Yuxiang, Sun Ningfu, Guo Fengxia, et al. Mechanism and quantitative evaluation method of the petroleum migration system[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 237-245.

[6] 王圣柱,林会喜,张奎华,等.准噶尔盆地北缘哈山构造带油气输导系统研究[J].特种油气藏,2015,22(6):30-34.

Wang Shengzhu, Lin Huixi, Zhang Kuihua, et al. Study on hydrocarbon transport system in Kazan Tectonic Zone at North Margin of Junggar Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 30-34.

[7] 赵黎明,刘建军,刘晓贵,等.沁水盆地煤系地层游离气的运移途径分析[J].长江大学学报:自然科学版,2015,12(23):17-21.

Zhao Liming, Liu Jianjun, Liu Xiaogui, et al. Analysis of migration ways of free gas in the coal strata of Qinshui Basin[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2015, 12(23): 17-21.

[8] 赵文智,邹才能,谷志东,等.砂岩透镜体油气成藏机理初探[J].石油勘探与开发,2007,34(3):273-284.

Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Gu Zhidong, et al. Preliminary discussion on accumulation mechanism of sand lens reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 273-284.

[9] 梁宏斌,林玉祥,钱铮,等.沁水盆地南部煤系地层吸附气与游离气共生藏研究[J].中国石油勘探,2011,(2):72-79.

Liang Hongbin, Lin Yuxiang, Qian Zheng, et al. Study on coexistence of absorbed gas and free gas in coal strata south of Qinshui Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, (2): 72-79.

[10] 刘焕杰.山西南部煤层气地质[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998:12-80.

Liu Huanjie. Geology of coalbed methane in southern Shanxi, Chi-

- na [M].Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998: 12-80.
- [11] 姚艳斌, 刘大锰, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2010, 40(11): 1 598-1 607.
Yao Yanbin, Liu Dameng, Cai Yidong, et al. Advanced characterization of pores and fractures in coals by nuclear magnetic resonance and X-ray computed tomography. [J] Science China: Series D Earth Science, 2010, 40(11): 1 598-1 607.
- [12] 李小彦, 解光新. 孔隙结构在煤层气运移过程中的作用——以沁水盆地为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(4): 341-344.
Li Xiaoyan, Xie Guangxin. Effect of pore structure on CBM transport-taking Qinshui basin as the example [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(4): 341-344.
- [13] 卞从胜, 王红军, 汪泽成, 等. 四川盆地川中地区须家河组天然气大面积成藏的主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 548-557.
Bian Congsheng, Wang Hongjun, Wang Zecheng, et al. Controlling factors for massive accumulation of natural gas in the Xujiahe Formation in central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 548-557.
- [14] 李伟, 秦胜飞, 胡国艺, 等. 水溶气脱溶成藏——四川盆地须家河组天然气大面积成藏的重要机理之一[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 662-670.
Li Wei, Qin Shengfei, Hu Guoyi, et al. Accumulation of water-soluble gas by degasification: One of important mechanisms of large gas accumulations in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 662-670.
- [15] Su Xianbo, Lin Xiaoying, Zhao Mengjun, et al. The upper Paleozoic coalbed methane system in the Qinshui basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(1): 81-100.
- [16] 马中良, 郑伦举, 秦建中, 等. 盆地沉降、抬升过程中源储压差的生排烃效应[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 402-408.
Ma Zhongliang, Zheng Lunju, Qin Jianzhong, et al. Hydrocarbon generation and expulsion caused by pressure difference between source rock and reservoir during basin subsiding and uplifting [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 402-408.
- [17] 赵孟军, 宋岩, 苏现波, 等. 沁水盆地煤层气藏演化的关键时期分析[J]. 科学通报, 2005, 50(增刊 I): 110-116.
Zhao Mengjun, Song Yan, Su Xianbo, et al. Analysis of the key period of CBM reservoir evolution in Qinshui Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(Supplement I): 110-116.
- [18] 王红岩. 山西沁水盆地高煤阶煤层气成藏特征及构造控制作用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005.
Wang Hongyan. The reservoir characteristics and tectonic influence of high rank coalbed methane in Qinshui basin, Shanxi Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.
- [19] 崔永君, 李育辉, 张群, 等. 煤吸附甲烷的特征曲线及其在煤层气储集研究中的作用[J]. 科学通报, 2005, 50(增刊 I): 76-82.
Cui Yongjun, Li Yuhui, Zhang Qun, et al. Characteristic curve of coal adsorbed methane and its role in the study of CBM reservoir [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(Supplement I): 76-82.
- [20] 郝石生, 张振英. 天然气在地层水中的溶解度变化特征及地质意义[J]. 石油学报, 1993, 14(2): 11-22.
Hao Shisheng, Zhang Zhenying. The characteristic of the solubility of natural gas in formation waters and its geological significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2): 11-22.
- [21] 刘银山, 王聚团, 刘飞, 等. 考虑煤层气扩散作用的物质平衡模型[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 68-73.
Liu Yinshan, Wang Jutuan, Liu Fei, et al. A material balance model considering the effect of coal bed methane diffusion [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 68-73.
- [22] 何学秋, 聂百胜. 孔隙气体在煤层中扩散的机理[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(1): 1-4.
He Xueqiu, Nie Baisheng. Diffusion mechanism of porous gases in coal seams [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(1): 1-4.
- [23] 王允诚. 油层物理学 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 80-81.
Wang Yuncheng. Reservoir physics [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2006: 80-81.
- [24] 闫宝珍, 王延斌, 倪小明. 地层条件下基于纳米级孔隙的煤层气扩散特征[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 657-660.
Yan Baozhen, Wang Yanbin, Ni Xiaoming. Coalbed methane diffusion characters based on nano-scaled pores under formation conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 657-660.
- [25] 桑树勋, 朱炎铭, 张时音, 等. 煤吸附气体的固气作用机理 (I)—煤孔隙结构与固气作用[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 13-15.
Sang Shuxun, Zhu Yanming, Zhang Shiyin, et al. Solid-gas interaction mechanism of coal-adsorbed gas (I)—coal pore structure and solid-gas interaction [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 13-15.
- [26] 傅雪海, 秦勇, 张万红, 等. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. 科学通报, 2005, 50(增刊 I): 51-55.
Fu Xuehai, Qin Yong, Zhang Wanhong, et al. Research on coal pore fractal classification and natural classification based on coalbed methane migration [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(Supplement I): 51-55.

编辑 常迎梅