中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 1 期: 72 ~ 81
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

不同煤体结构的高阶煤储层物性特征及煤层气产出机理

张小东[1,2*], 杜志刚[1], 李朋朋[1]

1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 焦作 454000;
2. 中原经济区煤层气(页岩气)协同创新中心, 焦作 454000

* E-mail: z_wenfeng@163.com

收稿日期: 2016-05-27; 接受日期: 2016-11-01; 网络版发表日期: 2016-12-22
国家自然科学基金项目(批准号: 41372162)和河南省高校科技创新团队支持计划项目(批准号: 14IRTSTHN002)资助

摘要 煤储层物性是影响煤层气解吸、扩散、渗流的关键因素, 其好坏直接决定煤层气井的产气效果. 本文以高阶煤为例, 基于压汞、低温液氮吸附、等温吸附、煤粒甲烷放散初速度测试以及煤层气井现场自然解吸数据, 系统探讨了构造破坏作用下高阶煤的孔隙性、吸附性、扩散性、渗透性等物性的响应规律, 建立了不同煤体结构高阶煤储层几何模型、扩散模式图及气体产出综合模式图. 研究认为, 高阶煤经历构造作用后孔隙性得到改造, 不同孔径段孔隙数量均有所增加, 中、大孔增加最为明显, 孔隙连通性发生差异性变化, 这种孔隙性的变化是造成不同煤体结构煤的吸附/解吸性、扩散性等储层物性出现差异的根本所在. 原生结构和碎裂结构煤基质孔隙以微孔为主, 相对缺少大孔以及大孔连通性较差的孔隙特征, 制约着初期气体的解吸和扩散, 而较小孔径段孔隙连通性相对较好利于后期气体的解吸和扩散, 更由于气体解吸衰减速度慢, 易形成长期的产能; 碎粒结构和糜棱结构煤吸附、解吸能力增强, 自然条件下气体扩散能力强, 但储层条件下渗透率的强应力敏感性, 导致该类储层渗透性最差, 渗流能力弱制约了扩散和解吸的发生; 气体综合产出过程中, 不同煤体结构的煤储层随着储层压力的变化基质孔隙气体扩散模式发生动态演化, 过渡型扩散不断增强, Fick扩散不断弱化, 气体的扩散能力不断降低, 其中微孔和过渡孔是限制气体扩散的主要孔径因素; 提出的储层条件下气体产出的综合模式图可以显示制约不同煤体结构煤储层气体产出的关键因素所在, 有助于对储层进行针对性改造.

关键词 高阶煤, 煤体结构, 储层物性, 产气机理

1 引言

我国含煤盆地普遍分布, 具有丰富的煤层气资源, 其中, 蕴藏在$R_{o,max}$大于1.9%的高阶煤中的资源量占中国煤层气资源总量的21.2%, 广泛分布与我国华北和华南地区. 其中, 沁水盆地南部是国内煤层气投入工程量最多、研究程度最高, 世界上率先在高阶煤实现商业化规模开发的大型煤层气田. 截至2013年底, 煤层气探明储量接近全国的3/4, 气产量约占全国的85%(赵贤正等, 2015). 10余年的高阶煤煤层气勘探开发实践和

中文引用格式: 张小东, 杜志刚, 李朋朋. 2017. 不同煤体结构的高阶煤储层物性特征及煤层气产出机理. 中国科学: 地球科学, 47: 72–81, doi: 10.1360/N072016-00178
英文引用格式: Zhang X D, Du Z G, Li P P. 2017. Physical characteristics of high-rank coal reservoirs in different coal-body structures and the mechanism of coalbed methane production. Science China Earth Sciences, 60: 246–255, doi: 10.1007/s11430-016-5178-y

© 2016 《中国科学》杂志社

理论研究表明, 高阶煤储层的孔隙性、吸附/解吸性、渗透性等物性与中、低阶煤明显不同, 造成了采动过程中高阶煤储层气体的产出行为和产出机制有其特殊性(张群等, 2001; 张小东等, 2009a; Moore, 2012; 刘爱华等, 2013; Zhou等, 2016).

沁水盆地自石炭-二叠纪煤系沉积后, 历经印支、燕山、喜马拉雅三期全球性以及多次局部性的构造运动(宋岩等, 2005), 煤体发生不同程度的构造破坏作用, 使得盆地内部储层结构出现明显差异. 目前, 盆地内煤层气开发效果较好的区块以原生结构和碎裂结构储层为主, 而碎粒结构和糜棱结构开发效果往往不理想, 甚至同一煤体结构的相邻井位, 采用相同储层强化措施后产气效果差异较大, 具体表现为见气时间、见气压力、产气高峰、产气量以及气井寿命各不相同, 而造成这种现象的原因尚不清楚, 无法提出针对性措施. 此外, 随着先期生产井的产量下降, 甚至不产气, 而新井尚未投产或产气效果不佳, 面临着如何促使老井增产、新井合理建产等系列亟待解决的现实问题, 其解决需加强对高阶煤储层物性的深入研究, 以及地面开发过程中煤层气产出机理的深层次探索.

为此, 本文基于以往研究成果, 借助于高阶煤物性参数的测试及煤层气勘探开发实践, 以煤层气地面开发过程中气体产出的一般过程为主线, 深入地剖析了不同煤体结构高阶煤在储层物性方面的差异性, 以及这种差异对气体解吸-扩散-渗流过程的影响规律, 以揭示高阶煤储层气体的产出机理, 以期对我国煤层气勘探开发提供帮助.

2　采动条件下煤层气的产出过程

地层条件下, 气体分子处于吸附平衡状态, 采动影响下, 气体自基质孔隙表面发生解吸(图1a), 由吸附态转化为游离态, 进而在煤基质中扩散(图1b), 最后经由割理或较大的外生裂隙渗流至井筒(图1c).

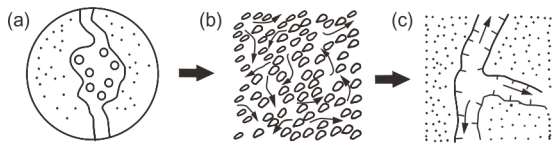

图 1　采动影响下煤层气的产出过程示意图
(a) 解吸; (b) 扩散; (c) 渗流. 改自Gamson等(1996)

2.1　解吸

煤层气地面开发过程中, 压降是促使气体解吸的前提条件. 一般而言, 在吸附能力、含气饱和度相近的条件下, 压降越大解吸的气量越多, 单位压降下的气体解吸量:

$$\mathrm{d}V=\frac{V_{\mathrm{L}}P_{\mathrm{L}}}{(P_{\mathrm{L}}+P_0)}\mathrm{d}P, \tag{1}$$

式中, P_0为原始储层压力(MPa), $\mathrm{d}V$为压降$\mathrm{d}P$条件下解吸的气量(m^3), $\mathrm{d}P$为压降(MPa), P_{L}为兰氏压力(MPa), V_{L}为兰氏体积或极限吸附量($\mathrm{m}^3\ \mathrm{t}^{-1}$).

2.2　扩散

对于煤基多孔介质, 不同尺度的孔隙内气体扩散模式不同(林瑞泰, 1995; 何学秋等, 2001; 张小东等, 2011), 可依据孔径(d)和气体分子平均自由程(λ)的相对大小来甄别: Knudsen型扩散($d\leqslant 0.1\lambda$)、过渡型扩散($0.1\lambda<d<10\lambda$) 和Fick型扩散($d\geqslant 10\lambda$), 另外在煤基质内部一些特殊扩散位置, 还存在着表面扩散、溶解相扩散和固溶体扩散(Shi等, 2003).

对于Knudsen型扩散, 其扩散系数为(刘禹等, 2014)

$$D_{\mathrm{k}}=\frac{d}{3}\sqrt{\frac{8\mathrm{R}T}{\pi M_{\mathrm{A}}}}, \tag{2}$$

式中, D_{k}为Knudsen型扩散系数($\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-1}$), T为绝对温度(K), M_{A}为甲烷分子的摩尔质量($\mathrm{g\ mol}^{-1}$), R为普适气体常数, 值为$8.314\ \mathrm{J\ mol}^{-1}\ \mathrm{K}^{-1}$.

对于Fick型扩散, 其扩散系数为

$$D_{\mathrm{f}}=\frac{\lambda}{3}v=\frac{\mathrm{K}_{\mathrm{B}}T}{3\sqrt{2}\,\pi(d_0)^2p}\sqrt{\frac{8\mathrm{R}T}{\pi M_{\mathrm{A}}}}, \tag{3}$$

式中, D_{f}为Fick型扩散系数($\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-1}$), v为扩散时气体分子的方均根速度($\mathrm{m\ s}^{-1}$), p为气体压力(MPa), $\lambda=\frac{\mathrm{K}_{\mathrm{B}}T}{\sqrt{2}\,\pi(d_0)^2p}$, 为气体分子平均自由程(nm), d_0为甲烷分子直径(nm), K_{B}为波尔兹曼常数, 值为$1.38\times10^{-23}\ \mathrm{J\ K}^{-1}$, 其他参数物理意义同前.

对于过渡型扩散, 其扩散系数为

$$D_{\mathrm{g}}=\left(\frac{1}{D_{\mathrm{f}}}+\frac{1}{D_{\mathrm{k}}}\right), \tag{4}$$

式中, D_{g}为过渡型扩散系数($\mathrm{m}^2\ \mathrm{s}^{-1}$), 其他参数物理意

义同前.

2.3 渗流

单一气体分子扩散结束后, 脱离基质块体进入大孔或裂隙网络, 形成渗流的起点. 鉴于煤储层经过压裂改造后通常形成一定方位的主裂隙通道, 可将渗流过程视为流向井筒的单向流, 利用非线性渗流理论及多孔介质渗流雷诺数(孔祥言, 2010), 对煤层气渗流阶段的气体运动状态进行划分:

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}L}=-\frac{\mu}{k}u+\alpha\rho u^2, \tag{5}$$

式中, α为非达西渗流系数, 无量纲, $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}L}$为储层内流体压力梯度(MPa m^{-1}), k为储层渗透率(mD), μ为气体动力粘度系数(Pa s), u为气体渗流速度(cm s^{-1}), ρ为气体密度(g cm^{-3}).

$$Re=\frac{\rho u w_i}{\mu}, \tag{6}$$

式中, Re为雷诺数, 无量纲, w_i为裂隙宽度(mm), 其他参数物理意义同上.

Re<5时, 裂隙内气体发生层流, 气体流速较小, 式(5)中二次项可不计, 气体运动满足:

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}L}=-\frac{\mu}{k}u. \tag{7}$$

Re>100时, 裂隙内气体发生紊流, 气体流速较大, 式(5)中一次项可不计, 气体运动满足:

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}L}=\alpha\rho u^2. \tag{8}$$

5<Re<100时, A、B≠0, 气体的运动状态介于层流和紊流之间的非线性流, 可用式(5)表示.

3 不同煤体结构高阶煤的储层物性差异

3.1 孔隙性

依照GB/T 30050-2013关于煤体结构的划分, 在沁水煤田霍尔辛赫矿、寺河矿回采工作面揭露的断裂构造带附近依次采集了原生结构煤、碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤8件实验样品, 其煤种分别为贫煤和无烟煤, 样品宏观特征见表1.

在中国矿业大学煤层气成藏教育部重点实验室采用压汞法、低温氮吸附法对采集的煤样进行了测试, 其中压汞法测试孔径范围7.2~10000nm, 低温液氮法为0.8~100nm. 按照霍多特的十进制孔径划分方案(Ходот, 1966), 将煤中孔隙划分为微孔(<10nm)、过渡孔(10~100nm)、中孔(100~1000nm)、大孔(>1000nm).

由表2和3可以看出, 随煤体破坏程度的增加, 煤的比表面积和孔容呈现增大的趋势. 其中, 微孔是煤比表面积的主要贡献; 原生结构煤中微孔、过渡孔是孔容的主要贡献, 大孔的贡献相对较弱, 原因在于原生结构煤中大孔数量较少(Tunio和Ismail, 2014; 蔺亚兵等, 2016); 过渡孔、中孔、大孔的孔容量不同程度增加, 尤以中孔、大孔最为明显, 增量高达一个数量级, 而微孔的孔容量整体上呈现为增加的趋势, 但并不显著.

压汞法孔容增量曲线显示(图2), 随着孔径的增大, 孔容增量曲线呈现震荡性的下降, 暗示着相应孔径段孔隙数量的减少. 对于原生结构煤, 中孔阶段的孔容增量曲线近乎为0, 大孔阶段, 孔容增量曲线震荡性较强, 表明其内部孔径的阶跃性分布特征. 随着煤体破坏程度的增加, 孔容增量曲线的震荡性减弱, 孔径分布的连续性增强, 孔隙分布均一化增强. 此外, 本次压汞法获得的煤样进退汞曲线(图3), 对于孔径大于100nm

表 1 不同煤体结构煤样的宏观特征[a)]

样品编号	宏观煤岩类型	煤体结构类型	样品描述
HE-I、SH-I	亮煤	原生结构	条带结构明显, 原生构造清晰可见; 有擦痕, 块状结构, 坚硬
HE-II、SH-II	亮煤	碎裂结构	条带结构可见, 层状构造保存完整; 煤体被多向裂隙切割, 无明显位移, 呈块状, 较硬
HE-III、SH-III	暗煤	碎粒结构	条带结构基本被破坏, 不同方向的小裂隙发育,碎粒结构、块状结构; 手拭具一定硬度, 能捏成碎块
HE-IV、SH-IV	暗煤	糜棱结构	条带结构完全消失, 具糜棱构造; 颗粒定向排列, 手拭强度极差, 易捏成粉末

a) HE表示霍尔辛赫矿贫煤; SH表示寺河矿无烟煤; I表示原生结构; II表示碎裂结构; III表示碎粒结构; IV表示糜棱结构

表 2　压汞法对不同煤体结构煤的微米级孔隙参数测试结果[a)]

煤样	煤体结构	孔容($cm^3\ g^{-1}$)					比表面积($m^2\ g^{-1}$)				
		V_1	V_2	V_3	V_4	V_t	S_1	S_2	S_3	S_4	S_t
HE-I	原生结构	0.0008	0.0012	0.0052	0.0040	0.0112	0.001	0.018	1.242	1.719	2.980
HE-II	碎裂结构	0.0014	0.0016	0.0097	0.0041	0.0135	0.002	0.020	1.229	1.774	3.025
HE-III	碎粒结构	0.0090	0.0244	0.0152	0.0031	0.0517	0.016	0.333	1.553	2.615	4.517
HE-IV	糜棱结构	0.0098	0.0518	0.0193	0.0062	0.0871	0.019	0.699	2.539	2.975	6.232
SH-I	原生结构	0.0008	0.0013	0.0088	0.0057	0.0166	0.001	0.028	1.660	2.496	4.185
SH-II	碎裂结构	0.0013	0.0022	0.0098	0.0059	0.0192	0.002	0.039	1.821	2.593	4.455
SH-III	碎粒结构	0.0060	0.0074	0.0100	0.0064	0.0298	0.015	0.083	1.862	2.750	4.710
SH-IV	糜棱结构	0.0102	0.0110	0.0125	0.0060	0.0397	0.017	0.140	2.136	2.567	4.860

a) V_1、V_2、V_3、V_4、V_t分别表示孔径在1000~10000nm、100~1000nm、10~100nm、7.2~10nm的大孔、中孔、过渡孔、微孔的孔容及总孔容; S_1、S_2、S_3、S_4和S_t为与孔容相对应的孔径段的比表面积和总比表面积

表 3　低温液氮吸附法对不同煤体结构煤的纳米级孔隙参数测试结果[a)]

煤样	煤体结构	孔容($cm^3\ g^{-1}$)			比表面积($m^2\ g^{-1}$)			平均孔径(nm)
		V_3	V_4	V_t	S_3	S_4	S_t	d
HE-I	原生结构	0.000535	0.000147	0.000682	0.056	0.077	0.133	20.21
HE-II	碎裂结构	0.000704	0.000354	0.001058	0.072	0.266	0.338	14.42
HE-III	碎粒结构	0.001025	0.000516	0.001541	0.103	0.261	0.364	9.11
HE-IV	糜棱结构	0.002803	0.001198	0.004001	0.247	0.746	0.993	7.73
SH-I	原生结构	0.000664	0.000072	0.000736	0.050	0.023	0.073	18.81
SH-II	碎裂结构	0.000843	0.000843	0.001686	0.082	0.089	0.171	16.98
SH-III	碎粒结构	0.003240	0.000925	0.004165	0.289	0.289	0.578	8.76
SH-IV	糜棱结构	0.003032	0.001836	0.004868	0.291	0.524	0.815	8.32

a) V_3、V_4和V_t分别表示孔径在10~100nm、0.8~10nm的过渡孔、微孔的孔容及总孔容; S_3、S_4和S_t为与孔容相对应的孔径段的比表面积; 孔容和平均孔径值采用BJH模型; 比表面积值采用BET模型

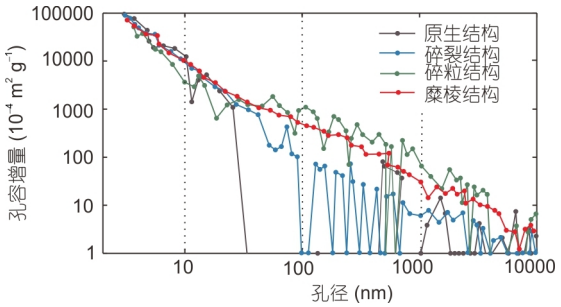

图 2　孔容增量曲线(压汞法)

左右的中、大孔, 随着煤体破坏程度的增加, “滞后环”趋于显著, 表明该孔径范围内开放孔含量增多, 连通性增强; 而小于100nm的微孔和过渡孔, “滞后环”变弱, 封闭孔含量增加, 孔隙连通性有变差的趋势. 这种规律性的变化与针对焦作煤田不同煤体结构的无烟煤测试结果一致(张小东等, 2013).

3.2　吸附/解吸性

煤对甲烷的吸附主要为物理吸附, 吸附性大小不仅受压力、温度等外在因素的影响, 也与煤级、显微组分、含水性、孔隙性等内在因素有关. 其中, 煤级、显微组分是通过对孔隙的改变间接地影响吸附性(Clarkson等, 1999a, 1999b; Bae和Bhatia, 2006; 张小东等, 2009b; Feng等, 2014).

不同煤体结构的高阶煤等温吸附实验表明, 随着煤体破坏程度的增加, 煤的吸附性有增大趋势, 且在低压段各类煤样的吸附线基本重合, 而高压段吸附性

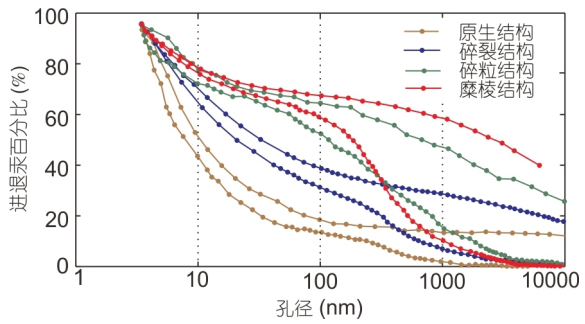

图 3　进退汞曲线(压汞法)

显著不同(图4) (张小东等, 2009a; 郇璇等, 2015; 孟召平等, 2015). 原因在于, 煤体破坏程度的增加, 不同孔径段的孔隙含量均有增多的趋势, 吸附能力增强, 其中, 大、中孔增加最为明显, 微孔增加相对较少. 而煤吸附过程中, 微孔吸附势能大, 低压下微孔优先发生吸附, 而后随着微孔吸附量达到饱和, 高压下中、大孔发生吸附作用, 造成了上述吸附性的差异(Jaroniec等, 1996; 简阔等, 2014; Alshaaera等, 2014; Birungi和Chirwa, 2015).

沁水盆地煤层气含气量现场实测过程中, 煤岩芯对气体进行自然解吸时均表现出相似的规律, 由安泽区块的原生结构煤和糜棱结构煤解吸性差异(图5), 发现糜棱煤的自然解吸时间显著短于原生结构煤. 不同阶段, 两类煤的解吸速率的对比关系不同: 自然解吸初期, 糜棱煤解吸速率大于原生结构煤, 气体衰减速度快, 自然解吸1000min左右, 后期原生结构煤的解吸速率大于糜棱煤. 两类煤的解吸速度与解吸时间差异, 一定程度上可以解释在煤层气开发实践中, 构造破坏较严重的地段, 煤层气井往往容易达到产气高峰, 但

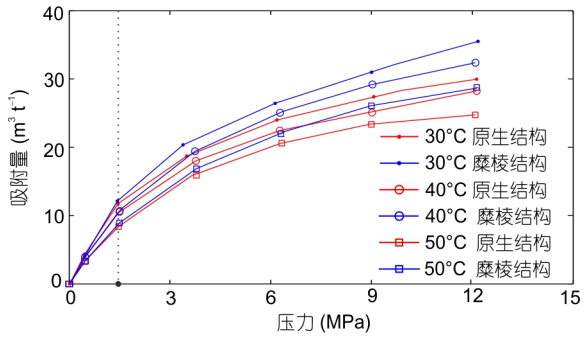

图 4　原生结构与糜棱结构煤吸附性差异

数据源自张小东等(2009a)

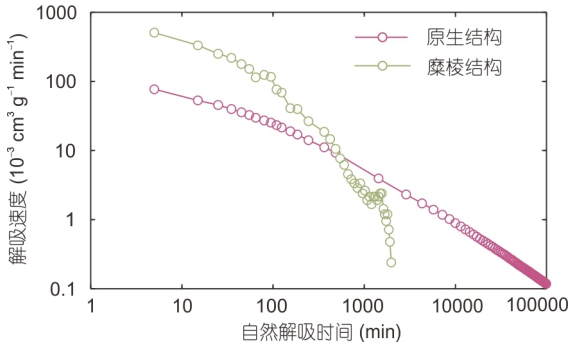

图 5　原生结构与糜棱结构煤解吸性差异

稳产时间较短的现象.

3.3　扩散性

煤中气体的扩散能力受多因素影响, 其中孔隙结构起着决定性的作用(Medveď和Černý, 2011; Tao等, 2016), 前人有关煤粒瓦斯放散机理的研究, 揭示了煤基质孔隙内气体的产出遵循扩散定律(Busch等, 2004; 刘彦伟, 2011; Staib等, 2013). 根据式(2)~(4)计算了甲烷气体在多孔介质中的扩散系数(表4). 结果表明, 对于三种扩散模式, Fick型扩散系数(D_f) 明显高于Knudsen型扩散系数(D_k) 和过渡型扩散系数(D_g), 而Knudsen型扩散系数(D_k) 略大于过渡型扩散系数(D_g).

为了研究不同煤体结构煤样扩散性的差异性, 仍依据GB/T 30050-2013关于煤体结构的划分, 在潞安矿区王庄矿回采工作面揭露的断裂构造带附近依次采集了碎裂煤、碎粒煤、糜棱煤三类煤样, 其煤种为贫煤, 宏观煤岩类型为光亮煤. 对采集的煤样进行甲烷气体放散性测试, 结果见图6. 可以看出, 对于三类不同破坏程度的煤样, 随着粒径的增大, 气体的放散能力均呈现减弱的趋势. 不同粒径段, 气体的放散能力与煤体结构呈现差异性: 当粒度较小时, 随着煤体破坏程度的增加, 气体放散初速度较大, 气体扩散速度较快; 但在大粒径段, 呈现相反的对比关系. 该实验结果宏观上体现为粒径对不同煤体结构煤中气体扩散性的影响, 实质是通过孔、裂隙性的影响权重的变化而综合作用的结果. 粒度较大时, 影响气体分子扩散速度的主要因素是裂隙系统, 碎裂煤的裂隙通道较为完整, 有利于气体的运移. 随着破坏程度的增加, 特别是到了糜棱煤阶段, 强烈的地质构造作用破坏了煤体的裂隙系统, 裂隙的定向性完全遭到破坏, 甲烷运移

表 4　甲烷气体在多孔介质中扩散系数理论计算结果[a)]

T(K)	P(MPa)	扩散系数(10^{-7} m^2 s^{-1})		
		D_k	D_g	D_f
303	10.0	0.00367	0.00356	0.115
	8.0	0.00459	0.00445	0.144
	6.0	0.00611	0.00592	0.192
	4.0	0.00917	0.00889	0.288
	2.0	0.01834	0.01777	0.576
	1.0	0.03668	0.03555	1.152
	0.5	0.07337	0.07111	2.304
	0.3	0.11820	0.11467	3.840

a) D_k计算时取相应压力下发生Knudsen扩散与过渡扩散的临界孔径, 即d=0.1λ

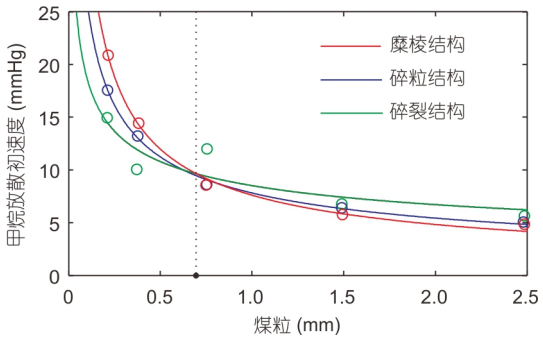

图 6　不同粒度下煤样的甲烷气体放散初速度变化

阻力变大, 不利于气体的扩散; 当粒度较小时, 孔隙性对气体分子扩散的影响成为主因, 而裂隙对甲烷放散的影响减弱. 构造的破坏作用, 使得不同孔径段的孔隙数量增多, 气体运移通道增多有利于扩散行为, 因此放散速度较大.

3.4　渗透性

煤岩具有低弹性模量、高泊松比的力学性质(朱庆忠等, 2015), 造成储层渗透率具有极强的应力敏感性. 考虑到储层内割理或裂隙垂直于层面水平方向展布, 储层渗透率对水平应力更为敏感, 储层渗透率(k)与水平应力及煤岩体力学性质之间满足如下关系(Mazumder等, 2012):

$$k = k_0 \exp\left(-3C_f\left((\sigma_h - \sigma_{h0}) - (P - P_0)\right)\right), \tag{9}$$

$$\sigma_h - \sigma_{h0} = \frac{1-2\varphi}{1-\varphi}(P - P_0), \tag{10}$$

式中, k_0为储层原始渗透率(mD), $C_f = \frac{\varepsilon}{E}$为裂隙压缩系数(MPa^{-1}), E为煤岩的弹性模量(10^3MPa), ε为无量纲比例系数, φ为泊松比, 无量纲, σ_{h0}为初始水平应力(MPa), σ_h为排采过程中水平应力(MPa), P为排采过程中储层压力(MPa), 其他参数物理意义同前.

根据沁南地区煤层气井声波测井所得的煤岩体力学性质参数, 统计了不同煤体结构高阶煤的弹性模量和泊松比力学参数指标(表5), 随煤体结构破坏程度的增强, 煤岩体的弹性模量和泊松比减小, 其力学性质的变化反应在储层物性上, 表现为煤体的裂隙压缩系数增大, 储层渗透率的应力敏感性强. 因此, 在煤层气排采过程中随着储层压力的降低, 相同应力变化条件下, 构造煤的渗透率变化更为明显, 有效应力对储层渗透性的伤害越明显, 这也正是构造煤储层渗流能力弱的原因之一(Ju等, 2012).

4　不同煤体结构高阶煤储层几何模型及气体产出模式

4.1　储层几何模型

煤储层是由基质孔隙、显微裂隙、宏观裂隙组成的三元结构模型(Gamson等, 1996; 傅雪海等, 2001). 以往对于煤储层几何模型的研究, 大多集中在对储层裂隙系统的构建(王生维等, 2005; 苏现波等, 2009; Lai和Pao, 2013), 普遍缺少基质孔隙和显微裂隙, 模型构建不完整. 基于此, 本文依据煤储层三元结构观点, 结合实验测试结果, 构建了不同煤体结构高阶煤的储层

表 5　不同煤体结构煤的弹性模量和泊松比统计结果

煤体结构	样品数	φ	E (10^3MPa)
原生结构	25	0.23–0.26 平均0.24	5.9–8.5 平均6.9
碎裂结构	16	0.22–0.24 平均0.23	4.0–6.1 平均5.2
碎粒及糜棱结构	40	0.21–0.24 平均0.23	2.9–4.1 平均3.5

几何模型.

对于高阶煤而言, 基质孔隙的孔径分布特征决定了高阶煤储层的特殊性, 原生结构煤储层(图7a), 基质孔隙以微孔最为发育为其主要特征, 过渡孔、中孔缺少最为明显, 宏观裂隙主要为赋存于镜煤和亮煤条带中的割理, 其中面割理连续性较好, 存在于割理与基质间的显微裂隙, 沟通了基质块与宏观裂隙的联系. 碎裂结构煤储层(图7b) 相对于原生结构高阶煤储层, 基质孔隙的孔径结构变化不明显, 仍以微孔为主, 中孔少许增加, 该类储层最显著的特征表现为储层中发育了具有一定走向和较好连通性的外生裂隙.

由于煤体的破坏和孔径结构的改造, 碎粒结构煤储层(图7c) 和糜棱结构煤储层(图7d) 基质孔隙、宏观裂隙发生明显变化. 其中, 中、大孔明显增多, 孔隙的连通性增强, 而煤体原生条带结构的碎粒化、糜棱化, 使储层内割理系统遭受严重切割破坏, 形成了储层中颗粒间的迂曲通道, 尤其是粉化程度较高的糜棱结构煤储层, 宏观裂隙渗流通道更加曲折, 迂曲度增大.

4.2　采动条件下的气体扩散模式

为了更好地反映采动影响下煤层甲烷分子在多孔介质中扩散模式的演化特征, 假设储层温度不变(T=303K), 储层压力从10.00MPa降到0.55MPa, 图8为压降过程中甲烷分子扩散模式的动态演化过程. 在较高储层压力下, 受气体分子平均自由程影响, 微孔内发生Fick扩散, 而随着压力的降低, 分子平均自由程变大, 过渡扩散历经的孔径范围不断扩大, 而Fick扩散历经的孔径范围不断缩小. 此外, 甲烷分子由于受基质孔隙表面吸附势能的影响(降文萍等, 2006), 在小于1nm左右的孔隙中气体分子扩散模式始终以表面扩散或Knudsen扩散为主, 不随压力发生变化, 具有一定的特殊性.

原生结构高阶煤以微孔为主(表2和3), 气体扩散模式以过渡扩散为主, 扩散速度较慢, 是制约扩散能力的主要孔径因素. 随煤体结构的破坏, 由于中孔(100~1000nm)、大孔(>1000nm)的增多, Fick扩散所占比重不断增多, 气体的扩散能力增强, 这也为自然状态下煤粒瓦斯放散实验所证实. 在小粒径条件下受孔隙性对扩散的影响, 煤体破坏越严重, 气体放散速度越快(图6). 结合目前沁水盆地煤层气开发的实际资料, 原始储层压力集中在4~8MPa, 废弃压力在0.7MPa左右. 在煤层气降压开采过程中, 随着储层压力的降

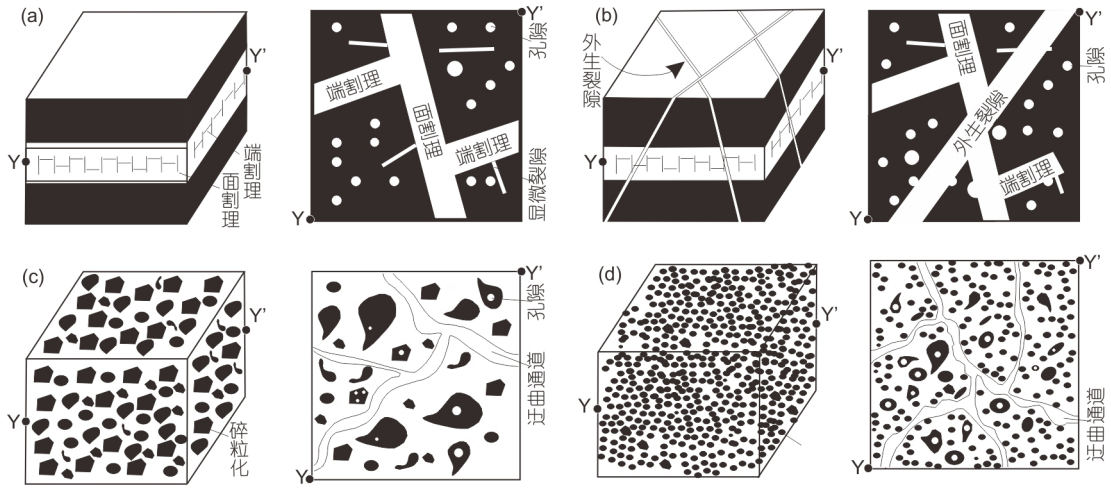

图 7　不同煤体结构高阶煤储层几何模型

(a) 原生结构煤储层; (b) 碎裂结构煤储层; (c) 碎粒结构煤储层; (d) 糜棱结构煤储层

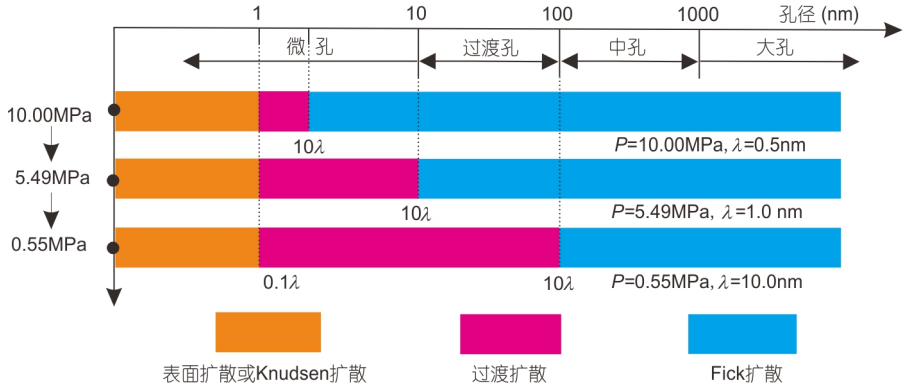

图 8　多孔介质中甲烷分子扩散行为演化模式

低, 扩散模式的动态变化主要表现为过渡扩散与Fick扩散在微孔和过渡孔间的相互演化, 过渡扩散历经的孔径范围不断外扩, Fick扩散历经的孔径范围不断缩小, 扩散能力不断减弱. 这也正是造成排水降压产气过程中气井产气能力降低的原因之一, 其中微孔和过渡孔是制约气体扩散能力的主要孔径因素.

4.3　储层条件下的气体产出综合模式

从产出过程来讲, 储层条件下气体解吸后的产出发生于基质孔隙内气体扩散和宏观裂隙内气体渗流基础之上, 即煤层气产出的扩散阶段和渗流阶段(图9). 气体发生解吸后, 扩散起点形成, 气体以不同的扩散模式自基质孔隙向宏观裂运移, 随着甲烷分子脱离基质块体, 进入宏观裂隙网络, 扩散过程结束, 渗流起点形成, 甲烷气体进入裂隙网络, 根据雷诺数对渗流的划分, 储层改造后不同尺度的裂隙系统可能发生不同流态的渗流过程, 渗流能力取决于储层的渗透性以及通道的迂曲度(图7).

不同煤体结构煤储层基质孔隙和宏观裂隙的双重差异性, 决定了制约储层条件下气体产出能力以及不同产出阶段的主控因素有所差异. 宏观裂隙网络是储层进行降压、减小孔隙压力, 打破吸附/解吸平衡, 促使气体解吸的关键, 碎粒煤和糜棱煤储层由于煤体结构强烈破坏, 渗流通道迂曲错乱(图7c和d), 其中糜棱煤储层渗流能力最差, 储层中不能形成有效的压力传导, 只有近井地带小范围的泄气面积内出现短期渗流. 但由于其解吸能力强、扩散速度快, 在排采初期易形成短时间的产气高峰, 而解吸速度衰减较快, 造成了气井产气高峰过后产量下降明显. 原生结构、碎裂结构煤储层发育良好的裂隙通道(图7a和b), 尤其是碎裂结构储层. 由于优势裂隙通道的存在, 渗流能力最强, 形成了储层压降向深部的有效传播, 促使更大范围内气体的解吸. 采动初期由于气体解吸速度较慢、同时过渡扩散所占比重较大, 限制了气体的扩散能力, 造

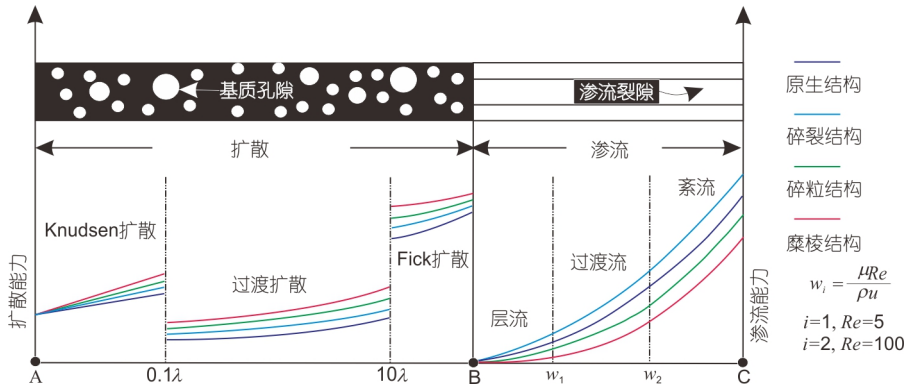

图 9　储层条件下气体产出的综合模式图

A点表示气体解吸完成后, 形成了扩散的起点; B点为扩散向渗流发生转换的临界点; A点至B点表示煤层气产出的扩散阶段; B点至C点表示煤层气产出的渗流阶段

成气井见气时间较长, 初期产气能力较低. 但由于气井解吸衰减速度慢, 可持续解吸时间长, 更易形成稳定的长期产能.

5 结论

(1) 构造的破坏作用, 使得高阶煤中的过渡孔、中大孔含量增加, 孔径分布均匀化增强. 此外, 煤体破坏也使得不同孔径范围内的孔隙连通性发生差异性变化, 这种孔隙性的差异正是造成煤层气体吸附/解吸性、扩散性差异的主因.

(2) 原生结构煤以微孔占绝对优势. 即使存在初期气体解吸速度慢、扩散能力低等不利因素, 但由于气体持续解吸时间长, 解吸速度衰减慢, 更易形成煤层气井的长期产气现象. 随着煤体破坏程度的增加, 煤体吸附能力增强, 自然条件下气体的解吸速度更快、扩散能力更强. 但由于煤中原始的裂隙通道破坏越严重、储层渗透率的应力敏感性增强, 造成了储层条件下流体的渗流能力较弱, 制约了气体解吸和扩散的发生.

(3) 采动影响过程中, 随着储层压力的下降, 高阶煤中过渡型扩散增强, 而Fick扩散弱化, 这种变化规律并不因煤体结构不同而改变, 造成了压降过程基质孔隙中气体扩散能力不断减弱, 其中微孔和过渡孔是限制气体扩散能力的主要孔径因素.

(4) 基于孔隙组成的差异性, 建立了不同煤体结构煤储层的空间几何模型. 结合相关实验数据, 构建了不同煤体结构高阶煤的扩散、渗流综合模式图, 该模式图可以反应制约不同煤体结构高阶煤气体产出的关键因素所在, 有助于储层改造.

致谢 文中的现场煤层气解吸数据由中国石油天然气股份有限公司华北油田公司提供, 在此深表谢意.

参考文献

傅雪海, 秦勇, 薛秀谦, 李贵中, 王文峰. 2001. 煤储层孔、裂隙系统分形研究. 中国矿业大学学报, 30: 11–14

郇璇, 张小兵, 韦欢文. 2015. 基于不同类型煤吸附甲烷的吸附势重要参数探讨. 煤炭学报, 40: 1859–1864

何学秋, 聂百胜. 2001. 孔隙气体在煤层中扩散的机理. 中国矿业大学学报, 30: 3–6

简阔, 张玉贵, 赫少攀, 高然超. 2014. 构造煤甲烷吸附表面能研究. 煤田地质与勘探, 42: 31–34

降文萍, 崔永君, 张群, 李育辉. 2006. 煤表面与CH_4, CO_2相互作用的量子化学研究. 煤炭学报, 31: 237–240

孔祥言. 2010. 高等渗流力学(第二版). 合肥: 中国科学技术大学出版社. 44–47

刘爱华, 傅雪海, 梁文庆, 路露, 罗培培. 2013. 不同煤阶煤孔隙分布特征及其对煤层气开发的影响. 煤炭科学技术, 41: 104–108

林瑞泰. 1995. 多孔介质传热传质引论. 北京: 科学出版社. 152–156

刘禹, 王常斌, 宋付权, 龙运前. 2014. 页岩气渗流中扩散影响机理分析. 渗流力学进展, 4: 10–18

蔺亚兵, 贾雪梅, 马东民. 2016. 基于液氮吸附法对煤的孔隙特征研究与应用. 煤炭科学技术, 44: 135–140

刘彦伟. 2011. 煤粒瓦斯放散规律、机理与动力学模型研究. 博士学位论文. 焦作: 河南理工大学. 114–130

孟召平, 刘珊珊, 王保玉, 田永东, 武杰. 2015. 不同煤体结构煤的吸附性能及其孔隙结构特征. 煤炭学报, 40: 1865–1870

宋岩, 赵孟军, 柳少波, 王红岩, 陈振宏. 2005. 构造演化对煤层气富集程度的影响. 科学通报, 50(增刊): 1–5

苏现波, 林晓英. 2009. 煤层气地质学. 北京: 煤炭工业出版社. 16–37

王生维, 候光久, 张明, 孙钦平. 2005. 晋城成庄矿煤层大裂隙系统研究. 科学通报, 50(增刊): 38–44

张群, 冯三利, 杨锡禄. 2001. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略. 煤炭学报, 26: 230–235

赵贤正, 杨延辉, 陈龙伟, 杨艳磊, 申建, 晁巍巍, 邵国良. 2015. 高阶煤储层固-流耦合控产机理与产量模式. 石油学报, 36: 1029–1034

张小东, 刘浩, 刘炎昊, 苏现波. 2009a. 煤体结构差异的吸附响应及其控制机理. 地球科学——中国地质大学学报, 34: 848–854

张小东, 刘炎昊, 张子戌, 王利丽, 刘浩. 2009b. 焦作煤田煤储层物性特征及控气因素. 天然气地球科学, 20: 446–453

张小东, 刘炎昊, 桑树勋, 刘浩. 2011. 高煤级煤储层条件下的气体扩散机制. 中国矿业大学学报, 40: 43–48

张小东, 苗书雷, 王勃, 柴松峰. 2013. 煤体结构差异的孔隙响应及其控制机理. 河南理工大学学报(自然科学版), 32: 125–130

朱庆忠, 左银卿, 杨延辉. 2015. 如何破解我国煤层气开发的技术难题——以沁水盆地南部煤层气藏为例. 天然气工业, 35: 106–109

Alshaaera M, Zaharakic D, Komnitsasc K. 2014. Microstructural characteristics and adsorption potential of a zeolitic. Desalin Water Treat, 56: 338–345

Bae J S, Bhatia S K. 2006. High-pressure adsorption of methane and carbon dioxide on coal. Energ Fuels, 20: 2599–2607

Birungi Z S, Chirwa E M N. 2015. Adsorption and desorption potential of cadmium using green algae: Equilibrium and kinetic studies. Adv Material Res, 1130: 693–696

Busch A, Gensterblum Y, Krooss B M, Littke R. 2004. Methane and carbon dioxide adsorption-diffusion experiments on coal: Upscaling and modeling. Int J Coal Geol, 60: 151–168

Clarkson C R, Bustin R M. 1999a. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: A laboratory and modeling study. 1. Adsorption rate modeling. Fuel, 78: 1333–1344

Clarkson C R, Bustin R M. 1999b. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: A laboratory and modeling study. 2. Adsorption rate modeling. Fuel, 78: 1345–1362

Feng Y Y, Jiang C, Liu D, Chu W. 2014. Microstructure and its influence on CH_4 adsorption behavior of deep coal. Chin Phys B, 23: 1–7

Gamson P, Beamish B, Johnson D. 1996. Coal microstructure and secondary mineralization: Their effect on methane recovery. In: Gayer R, Harris I, eds. Coalbed Methane and Coal Geology. London: Geol Soc Spec Publ. 165–179

Jaroniec M, Gadkaree K P, Choma J. 1996. Relation between adsorption potential distribution and pore volume distribution for microporous carbons. Colloids Surfaces A: Physicochemical Eng Aspects, 118: 203–210

Ju Y W, Yan Z F, Li X S, Hou Q L, Zhang W J, Fang L Z, Yu L Y, Wei M M. 2012. Structural characteristics and physical properties of tectonically deformed coals. J Geol Res, 2012: 101–111

Lai K S, Pao W K S. 2013. Assessment of different matrix-fracture shape factor in double porosity medium. J Appl Sci, 13: 308–314

Mazumder S, Scottm M, Jiang J. 2012. Permeability increase in Bowen basin coal as a result of matrix shrinkage during primary depletion. Int J Coal Geol, 96: 109–119

Medveď I, Černý R. 2011. Surface diffusion in porous media: A critical review. Microporous Mesoporous Mater, 142: 405–422

Moore T A. 2012. Coalbed methane: A review. Int J Coal Geol, 101: 36–81

Shi J Q, Durucan S. 2003. A bidisperse pore diffusion model for methane displacement desorption in coal by CO_2 injection. Fuel, 82: 1219–1229

Staib G, Sakurovs R, Gray E M A. 2013. A pressure and concentration dependence of CO_2 diffusion in two Australian bituminous coals. Int J Coal Geol, 116: 106–116

Tao Y, Liu D, Xu J, Peng S, Nie W. 2016. Investigation of the Klinkenberg effect on gas flow in coal matrices: A numerical study. J Nat Gas Sci Eng, 30: 237–247

Tunio S Q, Ismail M S. 2014. Effect of coal rank and porosity on the optimization of ECBM recovery. Asian J Appl Sci, 7: 158–168

Ходот В В. 1966. Coal and Gas Burst. Translated by Song S Z, Wang Y A. Beijing: China Industry Publishing House. 27–30

Zhou S D, Liu D M, Cai Y D, Yao Y B. 2016. Gas sorption and flow capabilities of lignite, subbituminous and high-volatile bituminous coals in the Southern Junggar Basin, NW China. J Nat Gas Sci Eng, 34: 6–21