

多煤层储层能量垂向分布特征及控制机理

杨兆彪¹⁾, 秦勇¹⁾, 陈世悦²⁾, 刘长江²⁾

1) 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州, 221008;

2) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266555

内容提要:研究多煤层储层能量垂向分布特征及其决定的含气系统性质具有重要的科学意义。基于油气田地质学及煤层气开采实践将煤储层空气渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (原地渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 作为划分具有统一压力的含气系统和无统一压力的含气系统的界限值, 不同性质含气系统的储层能量具有不同的表现形式。以黔西织纳钻孔实测煤岩物性为分析资料, 结果显示: 该区代表岩性孔渗性极差, 发育于三级层序边界的煤层空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 同时吸附性较强, 形成无统一压力的含气系统, 而其他煤层则单独形成具有统一压力的含气系统。多煤层垂向发育多套具有统一压力的含气系统时, 则应优先开采侧压面较高储层能量较大的煤组段。多煤层储层能量垂向分异的决定因素是煤岩系的渗透性, 其中含煤岩系酸性环境下的特殊成岩作用是岩层物性变差的主要因素。发育于最大海泛面附近的煤层镜质组分多, 孔渗性较好, 易于形成具有统一压力的含气系统。现代构造应力场大小是影响煤层渗透性的大小的因素。六盘水多煤层为典型的无统一压力的含气系统, 而织纳部分区域含煤层组或单煤层为具有统一压力的含气系统。

关键词: 多煤层; 储层能量; 含气系统; 成因

多煤层地区煤层气成藏具有特殊的表现形式。其中多煤层储层能量垂向分布是本文所关注的重点。储层能量的垂向分布, 主要是指影响后期煤层气排采渗流能力的主要参数吸附性、渗透率和压力的垂向分布, 储层吸附性、渗透率和储层压力是储层能量的主要外在表征。储层能量的垂向分布以含气系统为单元, 储层能量的垂向分布特征决定了含气系统的发育特征。后期多煤层气排采不同于单煤层排采的最主要区别则是在一个含气系统内的几层煤层的合层排采。研究多煤层垂向储层能量的分布特征及其所决定的垂向含气系统划分对于多煤层煤层气成藏作用及开采开发具有重要的科学意义。

1 基本依据

煤层及其相邻盖层孔渗性是决定流体运动形式的基础。一般当孔隙直径大于 $500 \mu\text{m}$, 或裂隙宽度大于 $250 \mu\text{m}$ 时, 在自然条件下, 流体在其中可以自由流动, 服从静水力学的一般规律。而当孔隙直径小于 $0.2 \mu\text{m}$, 或裂隙宽度小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 流体与周

围介质分子之间存在巨大引力, 在通常温度和压力条件下, 流体在其中不能流动(蒋有录等, 2006), 孔隙平均直径 $0.2 \mu\text{m}$ 一般对应空气渗透率为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。即随储层孔径的减小, 流体渗流由线性达西流转向为非达西流。致密砂岩气储层空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 渗流以非达西流为主, 一般无统一的压力系统(邹才能等, 2009, 2011)。

对于煤储层系统, 本文以煤储层空气渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为划分达西流和非达西流的参考。在达西流系统中流体在其中可以自由流动, 服从静水力学的一般规律, 储层压力可以自由传递。而在非达西流系统中流体不能自由流动, 存在启动压力。这种划分与杨陆武(2007)根据生产实践将煤储层渗透性以 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 划分出的压力气和应力气相一致。压力气系统中压力可以自由传递, 而应力气不能实现较好的压降传递。因此本文参考致密砂岩气划分原理及煤层气生产实践以空气渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或原地渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为划分是否具有统一压力含气系统的标志。

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40730422), 国家重大科技专项(编号 2011ZX05034)和国家青年科学基金项目(编号 41202115)联合资助成果。

收稿日期: 2011-11-06; 改回日期: 2012-02-19; 责任编辑: 周健。

作者简介: 杨兆彪, 男, 1980 年生。博士, 讲师, 研究方向为煤层气地质。Email: zhaobiaoyang@163.com。

当相邻煤岩层空气渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,其上覆下伏为良好盖层(空气渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)时,此煤岩层组合为一套含气系统,存在统一的压力系统,在此压力系统内,煤层含气量符合吸附定理,随储层压力升高,含气量增大,一般下部煤层含气量高于上部煤层含气量,后期排采可以实现自由的压降传递,压力系统一般表现为正常压力或高压。而当煤岩层空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,尤

其是小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,在此系统内无统一的压力系统,煤层含气量一般违背吸附定理,含气量波动幅度大,排采很难实现压降的自由传递,表现为局部高压或低压。多煤层储层能量垂向表现则为多套压力系统垂向分布,各自压力系统具有独立的压力,压力系统之间则由低渗煤岩层分割,在这些低渗煤岩层内无统一的压力系统。其具体特征见表 1。

表 1 多煤层含气系统类型及储层能量特征

含气系统类型	煤层储层能量特征			开采方式	典型实例
	渗透性	储层压力	吸附性/含气性		
统一压力的含气系统组合	空气渗透率 $\geq 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 原地渗透率 $\geq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	正常压力或超压; 开采过程中压力可实现自由传导。渗流为达西流	吸附性正常, 在同一套压力系统内煤层含气性符合吸附定理。下部煤层含气量高于上部煤层	合层排采	织纳部分区域 如比德向斜
无统一压力的含气系统组合	空气渗透率 $< 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 原地渗透率 $< 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	低压或超压; 开采过程中压降传导困难。渗流为非达西流	吸附性较高。相邻煤层或同一煤层含气性一般违背吸附性定理。含气性平面或垂向变化复杂	单层改造排采 或井下抽放	六盘水

2 实例讨论

贵州织纳比德-三塘盆地晚二叠世龙潭组地层煤层群发育,前期作者讨论了水公河向斜煤层群“多层叠置独立含气系统”的基本成因(秦勇等,2008)。本文就此问题以本文观点做进一步的讨论,以深化内在规律。选取三塘向斜 1001 孔煤岩层做了渗透性测试及相关煤层吸附性的测试(表 2,表 3)。1001 孔柱状图见图 1。

根据以空气渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为划分具有统一压力系统下限的依据,1001 孔,7 号煤、17 号煤、30 号煤空气渗透率均小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,同时采集的该区代表岩性泥岩、粉砂岩、细砂岩,空气渗透率均小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大部分小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于超致密岩。因此该区除了 7 号煤、17 号煤及 30 号煤外,其余各煤层各自形成统一的压力系统,上覆下伏底板岩性的致密性阻断了相邻煤层之间成为统一压力系统的可能性,但在后期的开采过程中“虚拟储层”改造,则可使相邻煤层沟通从而成为一个统一的压力系统。7 号煤、17 号煤及 30 号煤与相邻岩层形成无统一压力系统的含气系统。与之相对应的这 3 层煤吸附性较强(表 3),兰氏体积及兰氏压力明显高于相邻煤层。原因在于不论是渗透性还是吸附性都由其孔隙结构

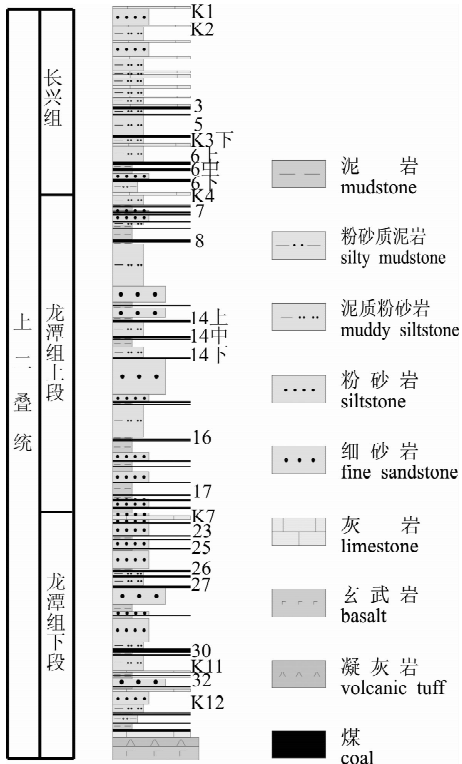


图 1 贵州织纳比德-三塘盆地三塘向斜 1001 孔柱状图
Fig. 1 Columnar section of borehole No. 1001 from Santang syncline in Bide-Santang basin of Zhina in Guizhou Province

决定,两者具有内在的联系。结果为无统一压力系统

的含煤层与具有统一压力系统的含煤层相比,即难以解吸,又难以形成较好的压降实现压力传导,实现流体的自由流动。在后期开采过程中,可借助井下瓦斯抽放或井上井下协同开采的模式来进行。

表 2 贵州织纳比德-三塘盆地三塘向斜 1001 孔代表岩性孔渗性表

Table 2 Porosity and permeability of representative rock from borehole No. 1001 in Bide-Santang basin of Zhina in Guizhou Province							
岩样编号	测试方向	岩性	埋深(m)	氮气孔隙度(%)	空气渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	单相水渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	备注
岩 3	//	灰岩(K3 下)	132.35	0.3	0.0055	<0.001	*
岩 4	//	菱铁岩	136.71	0.3	0.0069		*
岩 5	//	砂质泥岩	149.41	5.3	0.0350	0.0119	样品有裂隙
岩 9	//	泥岩	214.00	0.1	0.0060	<0.001	*
岩 12	//	灰岩(K7)	293.01	0.1	0.004	/	*
岩 13	//	粉砂岩	299.01	2.3	0.0140	0.0017	
岩 14	//	泥岩	315.01	1.8	0.2220	0.0023	
岩 15	//	泥质粉砂岩	322.43	3.6	0.2230	0.0066	
岩 16	//	细砂岩	345.5	1.3	0.0110	<0.001	*
岩 18	//	菱铁质泥岩(K12)	367.71	0.2	0.0057	/	*

注:“*”表示泵注流量 0.01 mL/min,岩芯两端压差达到 16 MPa 以上,出口不见水。K3 下、K7、K12 为全区具有对比性的标志层。

表 3 贵州织纳比德-三塘盆地三塘向斜 1001 孔多煤层空气渗透率及吸附性参数表

Table 3 Permeability and adsorptive parameter of multi-coalbeds from borehole No. 1001 in Bide-Santang basin of Zhina in Guizhou Province								
煤层	3	5	7	14 中	17	23	26	30
空气渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	9.47	1.95	0.069	3.65	0.11	3.88	1.48	0.069
兰氏体积(m^3/t)	32.59	34.86	35.19	31.48	36.26	36.71	38.00	33.49
兰氏压力(MPa)	2.08	2.18	2.38	2.12	2.98	2.1	2.26	2.3

对于垂向各煤层或煤层组存在多套统一压力的含气系统的特征,其各含气系统的储层能量必然有差别,在开采开发中如果不考虑这种情况,统一穿层开采,其中一些含气系统必然受到抑制,即各含气系统由于能量系统的差异,有先后解吸的次序。以珠藏向斜部分钻孔为例,以视储层压力(水头高度)来进行讨论。在油气田地质中,对于地层中存在的上下两套压力系统,当钻孔打穿时,一般流体由侧压面高的压力系统流向侧压面低的压力系统。

多煤层垂向存在多套压力系统,也是如此。见图 2,这 4 个钻孔同时分别测了 2~6 煤、7~16 煤、17~30 煤、30 煤下 4 套煤组的水位标高,各煤组在合层测时具有统一的水位标高。测试结果显示 4 套煤组的水位标高有差异,表明 4 套煤组具有不同的能量系统,则在开发中,若采取全部合层开采的模式,水位标高高的煤组流体要先流向水位标高低煤组,即水位标高高的煤组先解吸渗流,而水位标高低煤组后解吸渗流,合层开采时,由于能量系统的差异,水位标高高的煤组对水位标高低煤组解吸

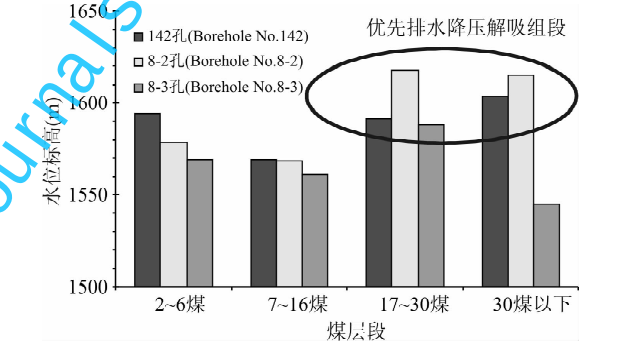


图 2 贵州织纳比德-三塘盆地珠藏向斜部分钻孔含煤层段水位标高分布图
Fig. 2 Water level elevation distribution figure of bearing-coal seam section from some boreholes in Zhuzang syncline of Bide-Santang basin of Zhina in Guizhou Province

具有抑制作用。因此建议分段开采,避免相互压力系统之间由于能量系统差别很大,在合层开采中,能量系统低的煤组由于受到抑制而不能正常解吸。

3 成因机制

多煤层储层能量垂向分布的上述特征,其决定因素是煤岩组的渗透性,渗透性的大小决定了流体系统的分布和运移特征,从而决定了储层能量的垂向分异,形成具有统一压力系统的含气系统和无统一压力系统的含气系统。煤系岩层渗透性主要受成岩压实、胶结和溶解作用控制,煤系岩层成岩作用具有其特殊性。煤层孔渗性受到层序旋回的控制,同时也受到构造应力场的宏观控制。

3.1 煤系地层成岩特征

尽管煤系岩层粒度大小是影响岩层孔渗性的主要因素,但煤系地层环境特殊的成岩作用需引起重视。煤系地层成岩早期具有酸性水介质条件,导致缺少碳酸盐胶结物,机械压实作用强;晚期成岩过程中煤系地层产生大量有机酸,有利于石英的次生加大和高岭石的普遍发育,进而使储层物性变差(郑浚茂等,1997)。这是煤系地层区别于其他地层的最大特征。多煤层地区尤为如此,酸性环境频繁,持久而稳定。织纳中寨勘查区 1001 孔部分岩样扫描电镜图,泥岩及泥质粉砂岩中观察到了孔隙中充填有新鲜的晶面完整的石英(图 3a、b),属于晚成岩 B、C 阶段(陈丽华等,1994)。细砂岩孔隙被页理状或六边形片状高岭石充填。煤系地层的成岩压实作用,酸性环境下石英的次生加大和高岭石的普遍发育是导致织纳含煤岩层孔渗性极差的重要原因。

3.2 沉积层序控制成因

多煤层地区含煤高频旋回发育。织纳地区晚二叠世含煤地层识别出 3 个三级层面,划分出 5 个三级层序(杨兆彪,2011)。层序脉动式旋回不仅在宏观上控制了煤系砂体的发育面积,直接决定了煤储层的封闭性,而且在微观上控制了煤储层的显微组分,而对煤储层孔裂隙影响最大的则是煤储层的主要显微组分——镜质组分。镜质组性脆,裂隙发育,微孔隙发育,是甲烷的主要储气空间和运移通道,镜质组分多的煤层是煤层气的优良储层。

发育于最大海泛面附近的泥炭沼泽可容空间增加到最大,关键在于其可容空间变化速率达到稳定且较小(图 4),泥炭产率与可容空间达到平衡,或可容空间稍大,不仅适合泥炭的堆积,主要适于煤层在还原环境下彻底凝胶化,形成富镜质组分的煤层,后期煤化作用富镜质组分的煤层内生节理发育,煤岩类型多为光亮型和半亮型。这是其孔渗性较好的主

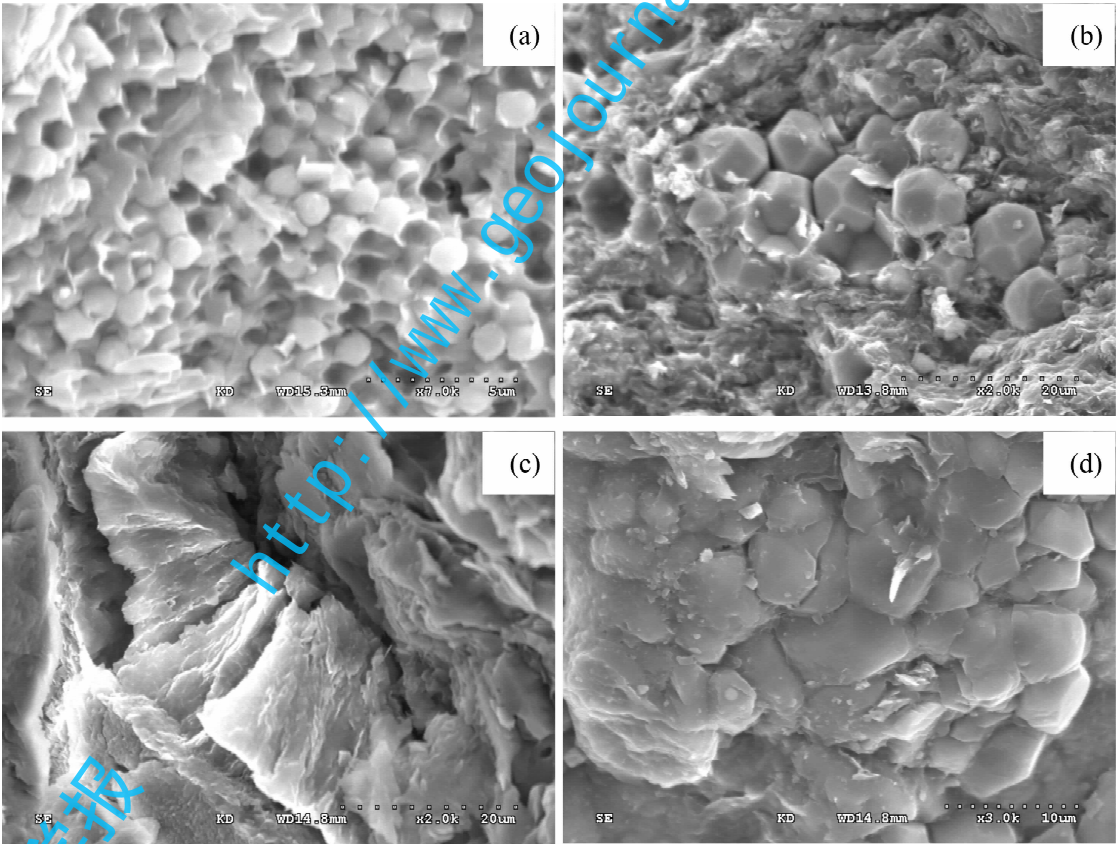


图 3 织纳中寨 1001 孔岩样扫描电镜照片

Fig. 3 SEM image of rock samples from Zhongzhai borehole No. 1001 in Zhina

(a)—泥质粉砂岩,孔隙中的生长石英,埋深 125.21 m;(b)—泥岩孔隙中生长石英,埋深 348.53 m;
(c)—细砂岩,孔隙被高岭石充填,埋深 345.5 m;(d)—细砂岩,高岭石,埋深 345.5 m

(a)—Muddy siltstone, growth quartz in pores, burial depth 125.21 m; (b)—growth quartz in mudstone pores, burial depth 348.53 m;
(c)—fine sandstone, pore filled with metakaolinite, burial depth 345.5 m; (d)—fine sandstone, metakaolinite, burial depth 345.5 m

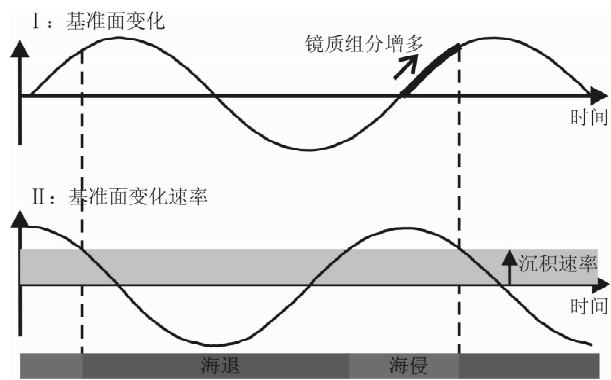


图 4 基准面变化及基准面变化速率与煤岩组分关系
Fig. 4 Relationship between datum plane variation, datum plane speed and coal maceral

要内在原因。海侵体系域初期阶段可容空间变化率较大,具有突发性,可以在局部形成厚煤层或煤线,但其凝胶化不够彻底,相对不易于形成富镜质组分的煤层,但整体海侵体系域镜质组分较多。而高位体系域后期形成的煤层,不仅不易保存,同时易于氧化,尽管可能惰质组分多,但镜质组组分少,不利于煤化作用过程中裂隙的形成。7 号煤、17 号煤、30 号煤均在层序界面附近或接近层序界面,这是其孔渗性差,渗透率低的原因。即发育于层序界面附近的煤层孔渗性可能较差,可能形成没有统一压力系统的含气系统,为相对意义上的低渗阻气层,而发育于最大海泛面附近的煤层镜质组分多,孔渗性较好,易于形成优质储层,形成具有统一压力系统的煤层或煤组。

3.3 地应力与渗透率关系

除了沉积层序决定煤层储层物性,从而决定了多煤层垂向储层能量的分异之外。构造背景及构造应力是决定煤储层区域渗透率的主要因素。尽管同一区域同为多煤层发育地区,但由于构造应力有差异,因而在垂向储层能量具有不同的表现形式。见图 5,试井渗透率随最小主应力梯度的增加而减小,趋势明显,最小主应力是控制渗透率大小的重要因素。六盘水盘关向斜亮山区块、金竹坪区块、青山向斜马依区块渗透率大都远远小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与之相对应的最小主应力梯度大,平均为 2.39 MPa/100m,远远大于沁水盆地 1.77 MPa/100m (孟石平等,2009);而织纳比德向斜渗透率较高,均大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,相应最小水平主应力梯度较小,平均为 1.83 MPa/100m,接近沁水盆地的平均值。因此六盘水区域多煤层大都为无统一压力系统的含气系统,也即属于杨陆武(2007)划分的应力气,

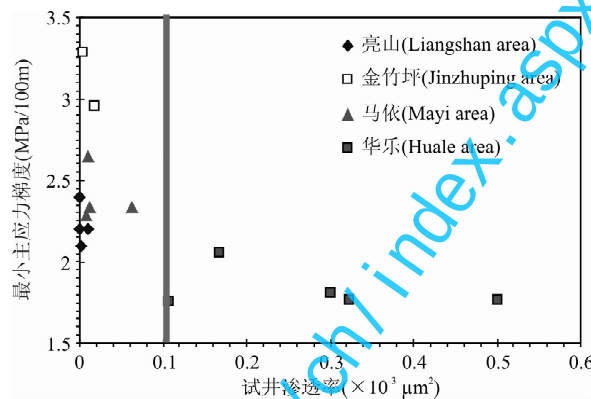


图 5 黔西部分区块试井渗透率与最小主应力梯度关系
Fig. 5 Relationship between test permeability and minimal main stress grads of some area in wester Guizhou province

相邻煤层难以实现合层排采。而织纳部分区域含煤层组或单煤层具有统一压力的含气系统,储层能量高,可实现合层排采。

4 结论

多煤层煤层气垂向储层能量分布特征决定于含煤岩系的渗透性,借鉴油气地质学及煤层气开发经验将煤储层空气渗透率 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或原地渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为划分是否具有统一压力含气系统的界限值,煤储层原地渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为具有统一压力的含气系统,而小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为无统一压力的含气系统,多煤层在垂向表现为不同性质的含气系统的垂向配置,相应其储层能量表现出不同的特征。

以贵州织纳煤田实测钻孔为例探讨了多煤层储层能量垂向分布特征,发现该区煤岩系渗透率均较低,含煤岩系典型岩性空气渗透率远远小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,大部分都小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型致密岩,发育于三级层序界面附近的 7 号煤,17 号煤,30 号煤空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,同时吸附性较强,形成无统一压力的含气系统,而其他煤层则单独形成具有统一压力的含气系统。多煤层垂向发育多套具有统一压力的含气系统时,若储层能量差异较大,则应优先开采侧压面较高的煤组段,避免合层开采导致储层能量弱的煤层煤层气难以排水降压解吸。

多煤层储层能量垂向分异的决定因素是煤岩系的渗透性,其中含煤岩系酸性环境下的特殊成岩作用是岩层物性变差的主要因素。多煤层岩系尤其如此,这也是织纳煤田实测岩性空气渗透率极低的重

要原因。发育于层序界面附近的煤层孔渗性可能较差,而发育于最大海泛面附近的煤层镜质组分多,孔渗性较好,易于形成优质储层,形成具有统一压力的煤层或煤组。现代构造应力场大小是影响煤层渗透性的大小的因素。六盘水最小主应力梯度远远大于织纳的最小主应力梯度,相应其渗透率很低,六盘水多煤层为典型的无统一压力的含气系统。而织纳部分区域含煤层组或单煤层为具有统一压力的含气系统。

参 考 文 献

陈丽华,姜在兴.1994.储层实验测试技术.东营:石油大学出版社.
蒋有录,查明.2006.石油天然气地质与勘探.北京:石油工业出版社,98.

孟召平,田永东,李国富.2009.沁水盆地南部煤储层渗透性与地应力之间关系和控制机理.自然科学进展,19(10):1142~1148.
秦勇,熊孟辉,易同生,等.2008.论多层叠置独立含煤层气系统——以贵州织金-纳雍煤田水公河向斜为例.地质论评,54(1):65~69.
杨陆武.2007.中国煤层气资源类型与递进开发战略.中国煤层气,4(3):3~7.
杨兆彪.2011.多煤层叠置条件下的煤层气成藏作用.徐州:中国矿业大学博士学位论文,27~40.
郑浚茂,应凤祥.1997.煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式.石油学报,18(4):19~24.
邹才能,陶士振,张响响,等.2009.中国低孔渗大气区地质特征、控制因素和成藏机制.中国科学(D辑):地球科学,39(11):1607~1624.
邹才能,等.2011.非常规油气地质.北京:地质出版社,67.

Controlling Mechanism and Vertical Distribution Characteristics of Reservoir Energy of Multi-Coalbeds

YANG Zhaobiao¹⁾, QIN Yong¹⁾, CHEN Shiyue²⁾, LIU Changjiang²⁾

1) Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process (CUMT), Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221008;

2) School of Geoscience, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266555

Abstract

Study of vertical distribution characteristics of reservoir energy and gas-bearing system is of important scientific importance. Based on petroleum geology and coalbed methane exploration, air permeability $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (or in-situ permeability $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) of coal bed reservoir was used as the threshold value of dividing unified pressure gas-bearing system (UPGS) and discrete pressure gas-bearing system (NUPGS). Reservoir energy of gas-bearing systems with different features has different manifestation. This study took borehole Zhina in western Guizhou drilling as an example to analyze physical properties of coal-bearing rocks. Out results show that representative rocks are poor in porosity permeability, with air permeability in the third-level coalbed less than $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ and relatively strong adsorption, thus forming the NUPGS. But other coal beds form the UPGS individually. When several UPGSs was developed vertically within multi-coalbeds, the coal beds which have high reservoir energy and high lateral pressure surface should be preferentially mined. Determinant of vertical distraction of multi-coalbeds reservoir energy is permeability of coal measure, but the main factor which worsens physical property of rocks is special diagenesis in acidic environment of coal measure. The coalbeds developed in the MFS have high vitrinite and better porosity-permeability, which are prone to forming the UPGS. The scale of modern tectonic stress field is an important factor affecting the permeability of coal reservoir. The Liupanshui multi-coalbeds are a typical NUPGS, while multi-coalbeds or individual coalbed in the part Zhina area are UPGS.

Key words: multi-coalbeds; reservoir energy; gas-bearing system; mechanism