

文章编号: 1001-4888(2019)06-1010-09

多层煤层气藏合采特征及物理模拟实验方法研究^{*}

石迎爽¹, 梁冰¹, 薛璐², 孙维吉¹, 李桥桥¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 中建一局集团建设发展有限公司, 北京 100102)

摘要: 多层合采是多层煤层气藏的有效开采方式之一, 目前关于多层煤层气藏合采的实验研究较少。本文通过分析煤层气产气机理、多层煤层气藏储层特征和合采产气特征, 提出了一种多层煤层气藏合采实验模拟方法。合采储层通过储层模拟系统实现, 可模拟各储层的孔隙度、渗透率、储层压力、地应力等特性。由于层间距的存在, 合采过程中各储层的实际井底压力是不相同的, 在实验过程中各储层的井底压力通过井底压力模拟系统实现。为分析合采效果, 提出了储层压降干扰率和产气量干扰率计算公式。开展了不同层间距条件下的多层煤层气藏合采模拟实验, 结果显示模拟层间距的改变会通过改变各储层初次同时产气时的储层压力和生产压差来影响层间干扰程度; 合采 2h, 生产压差较小的模拟储层(2#模拟储层)受到的干扰程度大于生产压差较大的模拟储层(1#模拟除储层), 且 2#模拟层的生产压差越小其受到的干扰程度越大。本文研究成果可为多层煤层气藏合采层位优选研究和影响因素研究提供参考。

关键词: 多层合采; 层间距; 井底压力; 物理模拟

中图分类号: TD712.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-135

0 引言

煤层气藏在形成过程中受沉积作用的影响, 普遍具有垂向上多层叠置的特点^[1,2], 例如阜新、沁水、韩城、贵州织纳等地的煤层气藏。对于多层煤层气藏, 单井多层合采既可以提高单井产量, 又可以缩短单井成本回收周期, 是首选的开采方式。目前针对煤层气单井多层合采的实验研究还比较少, 已有的多层气藏合采实验研究主要针对致密砂岩气藏^[3,4]。此外, 已有的多层合采物理实验研究或是不提供回压, 或是各模拟储层共用一个回压, 忽略了合采层之间存在的层间距, 以及由其引起的各储层处液面压力的差异, 不适用于多层煤层气藏合采物理实验研究。为此, 本文从多层煤层气藏储层特征出发, 结合多层煤层气藏合采产气机理和产气特征, 提出了一种可模拟各储层处液面压力的多层煤层气藏合采物理模拟实验方法。

1 多层煤层气藏储层及合采产气特征

1.1 煤层气产出过程及机理

煤层气在原始储层中主要以吸附态、游离态和少量的溶解态形式存在, 其中吸附态煤层气占 80%~90%^[5]。如图 1 所示, 吸附态煤层气需经过解吸、扩散、渗流运移至井筒才可产出。煤层气解吸、渗流的驱动力是压力差, 扩散的驱动力是浓度差^[6], 因此降压是煤层气开采的基础。煤储层的孔隙、裂隙系

^{*} 收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-10-07

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0801404); 国家自然科学基金面上项目(51874166); 辽宁省教育厅服务地方类项目 A 类(LJ2017FAL018)

通讯作者: 孙维吉(1980—), 男, 副教授, 主要研究领域: 低渗透气藏流动理论及工程应用。Email: sunweiji-1231@163.com

统中除气体外,还有大量的承压水,因此排出储层中的承压水,降低储层压力是煤层气产出的前提。

在煤层气开采过程中,排水降压、渗流、扩散、解吸四个环节环环相扣、紧密相连^[5-13]。首先,通过排水降低井底压力,使储层与井底之间形成压力差,在压力差的驱动下,储层裂隙系统中的气体经渗流运移至井筒,裂隙系统压力下降,与煤基质之间形成压力差和浓度差。在压力差和浓度差的驱动下,煤基质孔隙中的气体经扩散运移至裂隙系统中,一方面裂隙系统中的气体量增加,促进了裂隙系统中的气体渗流至井筒产出;另一方面煤基质孔隙气体压力和浓度下降,煤基质孔隙与煤基质表面形成压力差。在压力差的驱动下,吸附在煤基质表面的气体解吸,煤基质孔隙中的气体量增加,加大了基质孔隙与裂隙系统的压力差和浓度差,促使基质孔隙中的气体不断地扩散至裂隙系统中。与此同时,压降漏斗进一步扩大加深,为了保证开采的继续进行,需进一步降低井底压力。

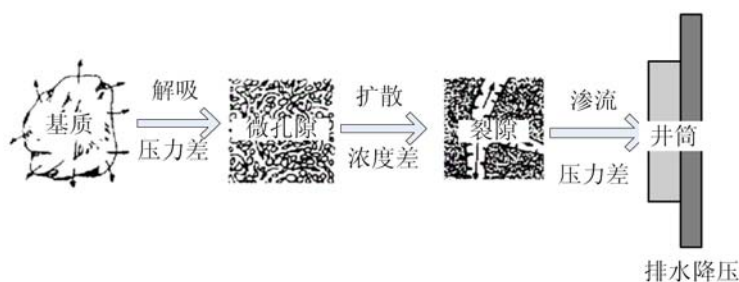


图1 煤层气的产出过程^[2]

Fig. 1 Production process of Coalbed Methane(CBM)^[2]

1.2 多层煤层气藏特征

受地层沉积作用的影响,煤层气藏垂向上通常发育有多个含气储层,秦勇等^[14]根据含气性及储层压力随埋深的变化特征以及封闭层的渗透性,将多层煤层气藏分为多层叠置独立含煤层气系统和多层统一含煤层气系统。

多层叠置独立含煤层气系统是指垂向上发育有多套相对独立的流体压力系统的含气单元(图2)。多层叠置独立含煤层气系统的形成,本质上是由于地层格架中阻水阻气低渗透岩层的发育,垂向上阻断了煤层群间的流体交换。该类气藏通常垂向上发育有多个厚度较厚且具有一定间距的含煤段;顶底板岩性多以渗透性低的中厚细砂岩、泥质岩、凌铁岩为主,具有很好的封盖作用;水文地质条件相对简单,不同岩层之间缺乏水力联系,断层附近的节理裂隙多被充填物充填,富水性和透水性较弱;在临界深度范围之内,煤层含气量及储层压力随煤层埋深常常出现“波动式”变化的现象,突变主要出现在不同含气单元之间,且突变一般较大^[14-18]。

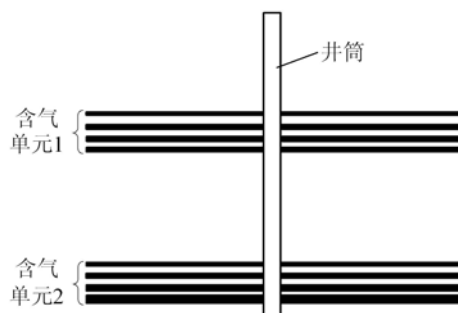


图2 多层叠置独立含煤层气系统

Fig. 2 Unattached multiple superposed CBM system

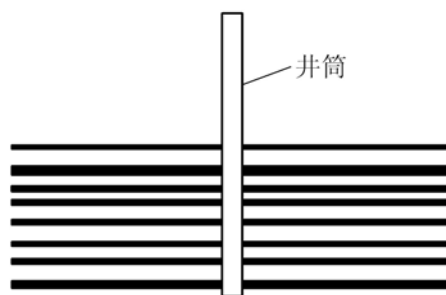


图3 多层统一含煤层气系统

Fig. 3 Unified multi-layer CBM system

多层统一含煤层气系统是指垂向上大范围的煤层处于一套流体压力系统的多层煤层气藏(图3)。该类煤层气藏通常煤层层数多而薄,气藏垂向上跨度大,砂岩、灰岩等渗透性好的岩层较为发育,煤层与岩层之间水力联系较强,含气系统整体封闭性较弱,系统内封闭层的渗透性较好^[14-16]。煤层含气量居

中,垂向上含气量变化简单,基本符合煤层气吸附原理^[14],各储层的压力梯度基本一致^[17]。

1.3 煤层气多层合采产气特征

无论是单井单层开采还是多层合采,煤层气的产气机理和产出过程是相同的,都是通过排水降压降低储层压力,使吸附态煤层气解吸,并经扩散、渗流运移至井筒产出。不同的是,多层煤层气藏合采效果除受各储层自身物性影响外,还受合采层间的储层物性差异的影响,包括储层压力梯度、临界解吸压力、埋深、渗透率、供液能力等的差异^[19-24]。

储层压力梯度、渗透率、供液能力等直接影响储层流体的产出速率,如果合采层间的储层压力梯度、渗透率、供液能力的差异较大,合采时压力梯度大的储层或渗透率高的储层或供液能力强的储层,会由于排采速度过快而产生速敏效应,损害储层,影响排采效果。

临界解吸压力直接影响气井的产气时间,当合采层间的临界解吸压差较大时,若动液面高度下降较慢,则临界解吸压力较低的储层就会迟迟不产气。为使临界解吸压力较低的储层较早产气,就需加快动液面下降速度,这样临界解吸压力高的储层生产压差就会过大,排采速度过快,产生速敏效应,影响排采效果。

煤层气排采时的生产压差实际是储层压力与储层处的液面压力之差,当合采层间的埋深差距较大,即合采层间距较大时,则合采各储层的液面压力差较大,导致各储层的实际生产压差差距较大。易造成生产压差较小的储层排采速率过慢,压降漏斗得不到有效扩展,而生产压差较大的储层排采速率过快,产生速敏效应,造成储层伤害。

2 多层煤层气藏合采物理模拟实验方法

2.1 多层煤层气藏合采物理模拟实验方法

(1) 多层煤层气藏合采井底压力特征

如图 4 和公式(1)所示,煤层气生产井的井底压力由三部分组成:井口的套压 P_e 、纯气柱压力 P_g 及混气液柱压力 P_{mi} ^[25]。对于多层煤层气藏合采井,由于储层之间存在一定的间距,因此各储层对应的混

气液柱压力也不相同,即 $P_{mi} \neq P_{m(i+1)}$,进而各储层对应的井底压力也不相同,即 $P_{wfi} \neq P_{wfi+1}$ 。

$$P_{wfi} = P_{mi} + P_g + P_e \quad (n = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

假设第 $i-1$ 储层与第 i 储层之间的层间距为 $\Delta h_{(i-1,i)}$,混合液柱的密度为 ρ ,则第 i 储层的井底压力还可表示为:

$$P_{wfi} = P_{wfi-1} + \rho g \Delta h_{(i-1,i)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (2)$$

式中, P_{wfi} 为第 i 储层的井底压力, MPa; P_{mi} 为第 i 储层对应的混气液柱压力, MPa; P_g 为纯气柱压力, MPa; P_e 为井口套压, MPa。

(2) 多层煤层气藏合采储层压力特征

对于多层合采气藏,假设第 i 储层的储层压力为 P_i ,生产压差为 ΔP_i ,第 $i+1$ 储层的储层压力为 $P_{(i+1)}$,生产压差为 $\Delta P_{(i+1)}$,则有

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - P_{wfi} \\ \Delta P_{(i+1)} = P_{(i+1)} - P_{wfi+1} \end{cases} \quad (3)$$

联立(2)式、(3)式可得第 i 储层生产压差与第 $i+1$ 储层生产压差之间的关系表达式(4)。

$$\Delta P_{(i+1)} = P_{(i+1)} - (P_i + \rho g \Delta h_{(i,i+1)} - \Delta P_i) \quad (4)$$

由式(4)可知,在多层煤层气藏合采过程中,只有当 $P_1 < P_{(i+1)} - \rho g \Delta h_{(i,i+1)} + \Delta P_i$ 时,第 $(i+1)$ 储层才可能开始产气。

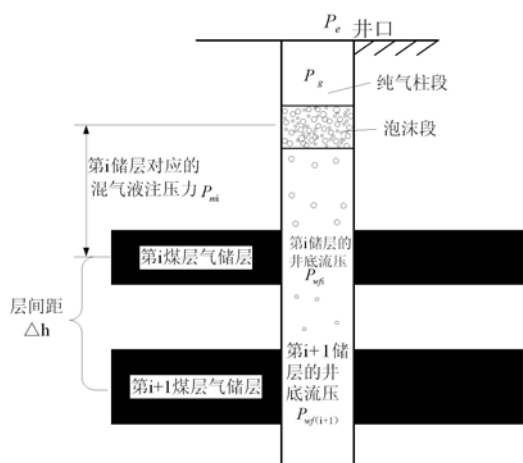
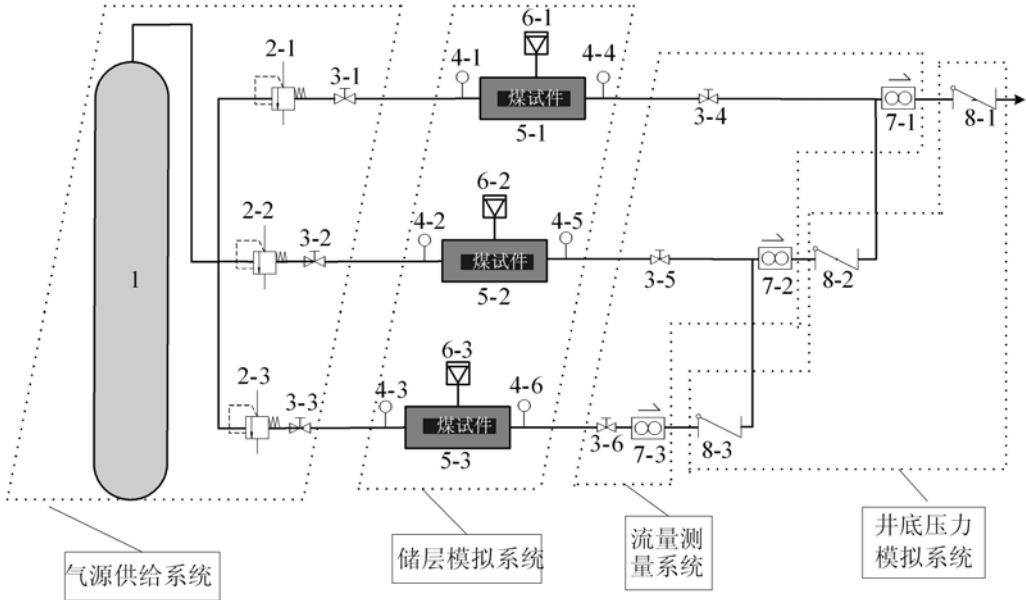


图 4 气井井底压力剖析图

Fig. 4 Analysis diagram of gas well bottom pressure

(3)实验原理

参照煤层气吸附解吸实验装置和多层气藏开采实验装置,并结合多层煤层气藏特征和多层合采产气特征,设计了可同时模拟各合采储层和各储层井底压力的多层煤层气藏合采模拟实验方法,实验原理及实验系统如图5和图6所示,实验系统由气源供给系统、储层模拟系统、流量测量系统和井底压力模拟系统组成。



1—高压气瓶;2-1~2-3—减压阀;3-1~3-6—球形阀;4-1~4-6—压力传感器;5-1~5-3—岩芯夹持器;
6-1~6-3—围压系统;7-1~7-3—质量流量控制器;8-1~8-3—背压阀

图5 实验原理图

Fig. 5 Experimental principle graph



图6 实验系统

Fig. 6 The experimental system

① 储层模拟:储层模拟包括模拟储层的孔隙结构、渗透率、储层压力、地应力等,在多层煤层气藏合采实验中储层孔隙结构的模拟通过煤岩试件的选取来实现,在实验过程中试件可以为原煤试件,为了减小孔隙结构对实验结果的影响也可采用型煤试件,试件放在岩心夹持器 5-1~5-3 中;实验中同时产气时各模拟层的储层压力需满足公式(4),并通过给煤岩试件通入与各模拟储层压力相同的气压来实现,气压由气源供给系统提供;地应力通过围压系统模拟,给各岩心夹持器施加的围压等于其模拟的储层地应力值;储层渗透率则由煤岩试件孔隙结构、储层压力和地应力共同决定。若只研究储层压力、孔隙结构或地应力中的一个因素对多层煤层气藏合采效果的影响,只需改变被研究的因素且同时保持其他因

素不变开展实验即可。

② 井底压力模拟:多层合采气井各储层的井底压力之间的关系如公式(2)所示,在实验室模拟过程中由井底压力模拟系统实现。当各合采层之间的井底压力差值不可忽略时,即合采层间距不可忽略时,各岩心夹持出气端回压值需满足公式(2);当各合采层之间的井底压力差值可忽略时,即合采层间距可忽略时,将背压阀 8-2、8-3 的背压调至零,背压阀 8-1 的背压调至设定压力即可。

③ 注意事项:在进行合采模拟时需保证截止阀 3-4、3-5、3-6 同时打开。

2.2 多层煤层气藏合采物理模拟实例

(1) 实验方案

为了研究层间距与多层煤层气藏合采效果之间的关系,以某煤层气田 1[#]、2[#]煤层气含气系统为研究对象,开展不同层间距条件下的双层煤层气藏合采模拟实验,该地层的地质参数见表 1。实验中各模拟参数如表 2 所示,本实验为定性研究实验,为了实验操作简便,实验中 1[#]模拟层的初始储层压力为 6.70MPa,围压为 8.00MPa;2[#]模拟层的初始储层压力为 6.80MPa,围压为 9.00MPa;实验模拟层间距分别为 50m、80m 和 100m。在实际开采过程中为了避免 1[#]模拟层过早地暴露,应优先降低 1[#]模拟层的压力,因此本次实验以 1[#]模拟层的生产压差为模拟生产压差,2[#]模拟层的生产压差随 1[#]模拟层生产压差而定,且 1[#]、2[#]模拟层的储层压力和生产压差需满足公式(2)~(4),各模拟层的模拟生产压差如表 2 所示。模拟开采时间为 2h。

表 1 模拟气田地质参数

Tab. 1 Geological parameters of the simulated gas field

含气系统	埋深/m	层间距/m	储层压力/MPa	含气量/(m ³ /t)	地应力/MPa
1 [#]	740	80	6.74	8.72	8.07
2 [#]	820		6.747	9.41	8.94

表 2 实验模拟参数

Tab. 2 Experimental simulation parameters

模拟层间距 $\Delta h/\text{m}$	模拟储层初始压力 P/MPa		围压/MPa		模拟生产压差 $\Delta P/\text{MPa}$		模拟开采 时间/h
	P_1	P_2	1 [#]	2 [#]	ΔP_1	ΔP_2	
50					$6.70 \xrightarrow{0.80} 5.90$	$6.80 \xrightarrow{0.40} 6.40$	
80	6.70	6.80	8.00	9.00	$6.70 \xrightarrow{0.80} 5.90$	$6.80 \xrightarrow{0.10} 6.50$	2.00
100					$5.90 \xrightarrow{0.80} 5.10$	$6.80 \xrightarrow{0.10} 6.10$	

因为本次实验为层间距单一因素变量实验,因此实验中其他因素不变,只改变同时产气时的模拟储层压力和模拟井底压力。为了对比双层合采各模拟层压降和产气量与单层单采时的差距,分析层间距与合采效果之间的关系,开展了与双层合采各模拟层相同实验参数的 1[#]、2[#]模拟层单层单采模拟实验。

本实验为两套含气系统合采物理模拟实验,实验过程中球形阀 3-3 和 3-6 保持关闭,背压阀 8-3 调至最高。岩心夹持器 5-1 中的试件模拟 1[#]含气储层,岩心夹持器 5-2 中的试件模拟 2[#]含气储层。岩心夹持器 5-2 产出的气体量由质量流量控制器 7-2 直接测得,岩心夹持器 5-1 产出的气体量由质量流量控制器 7-1 测得的流量减去质量流量控制器 7-2 测得的流量得到。开展单层单采实验时,只需将不进行实验的岩心夹持器的进气端和出气端截止阀关闭即可。

(2) 实验结果及分析

为了更好地对比合采时各模拟层压降和产气量与单层单采时的差距,定义压降干扰率和产气量干扰率,如公式(5)、(6)。干扰值为正值,则单层单采值较大;干扰值为负值,则合采值较大;干扰率值的绝对值越大,则干扰程度越大,反之,则干扰程度越小。

$$\text{压降干扰率} = \frac{(\text{单采压降} - \text{合采压降})}{\text{单采压降}} \times 100\% \quad (5)$$

产气量干扰率 = $\frac{(\text{单采产气量} - \text{合采产气量})}{\text{单采产气量}} \times 100\%$ (6)

模拟开采 2h, 双层合采和单层单采模拟实验中各模拟层的压降、产气量数据见表 3, 压降干扰率及产气量干扰率见表 4。由表 3 和表 4 可知, 双层合采各模拟层的压降和产气量均小于单层单采时的, 由此可知双层合采过程中层间产生了干扰。由表 4 可知, ①当改变模拟层间距时, 1[#]、2[#] 模拟层合采同时产气时的储层压力差 $P'_1 - P'_2$ 和生产压差的差 $\Delta P_1 - \Delta P_2$ 也随之改变, 合采 2h, 1[#] 模拟层的压降干扰率和产气量干扰率明显小于 2[#] 模拟层的, 且不同模拟层间距时 1[#] 模拟层的压降干扰率和产气量干扰率相差不大, 而 2[#] 模拟层相差较大; ②对于 1[#] 模拟层, 当 1[#]、2[#] 模拟层的储层压差 $P'_1 - P'_2$ 相同时, 1[#] 模拟层的压降干扰率和产气量干扰率随 1[#]、2[#] 模拟层生产压差的差 $\Delta P_1 - \Delta P_2$ 的增大而减小; ③对于 2[#] 模拟层, 当 1[#]、2[#] 模拟层储层压差 $P'_1 - P'_2$ 不变时, 2[#] 模拟层的压降干扰率和产气量干扰率随 1[#]、2[#] 模拟层生产压差的差 $\Delta P_1 - \Delta P_2$ 的增大而增大; ④当模拟层间距为 100m 时, 虽然 1[#]、2[#] 模拟层生产压差的差 $\Delta P_1 - \Delta P_2$ 较小, 但储层压差 $P'_1 - P'_2$ 较大, 使得合采过程中储层间仍产生一定的干扰, 且 2[#] 模拟层受到的干扰程度大于 1[#] 模拟层受到的干扰程度; ⑤不同模拟层间距下, 合采 2h, 1[#]、2[#] 模拟层总产气量均受到了较大的干扰, 但干扰率相差不大。

表 3 单层单采、合采累积压降、累积解吸量数据

Tab. 3 Pressure drop and desorption data of single-layer and multi-layer combined mining under different interval conditions

模拟层 间距/m	单层单采压降/MPa		合采压降/MPa		单层单采产气量/cm ³			合采产气量/cm ³		
	1 [#]	2 [#]	1 [#]	2 [#]	1 [#]	2 [#]	1 [#] +2 [#]	1 [#]	2 [#]	1 [#] +2 [#]
50	0.75	0.37	0.73	0.35	150.70	69.50	220.10	136.00	60.30	194.60
80	0.75	0.11	0.74	0.08	160.80	20.40	181.10	146.40	16.80	162.90
100	0.77	0.73	0.76	0.69	148.50	156.30	304.70	140.40	140.80	274.10

表 4 压降干扰率、累积解吸量数据

Tab. 4 Pressure drop interference rate and cumulative desorption data

模拟层 间距/m	同时产气时储层压力 P'/MPa			模拟生产压差 $\Delta P/\text{MPa}$			压降干扰率/%		产气量干扰率/%		
	P'_1	P'_2	$P'_1 - P'_2$	ΔP_1	ΔP_2	$\Delta P_1 - \Delta P_2$	1 [#]	2 [#]	1 [#]	2 [#]	1 [#] +2 [#]
50	6.70	6.80	-0.10	0.80	0.40	0.40	2.67	5.41	9.74	15.67	11.61
80	6.70	6.80	-0.10	0.80	0.10	0.70	2.26	25.48	8.96	19.02	10.09
100	5.90	6.80	-0.90	0.80	0.70	0.10	1.30	5.48	5.42	14.46	10.05

由煤层气井的产气机理可知, 井底压力发生变化会引起生产压差的变化, 从而影响储层的产气能力; 由煤层气井的井底压力影响因素^[26]可知, 气井的产气量会直接影响井筒中纯气段和混气液柱段压力, 从而影响井底压力, 进而又影响储层的产气能力。双层合采较单层单采而言, 产气储层的增加会直接影响气井的产气量。对于 2[#] 模拟层, 由于其生产压差较 1[#] 模拟层小, 因此当井筒中纯气段和混气液柱段压力发生变化时, 2[#] 模拟层生产压差的变化较 1[#] 模拟层生产压差的变化更加敏感, 且生产压差越小敏感性越强。因此, 层间距间接通过储层压力差 $P'_1 - P'_2$ 和生产压差的差 $\Delta P_1 - \Delta P_2$ 影响层间干扰程度; 合采 2h, 1[#] 模拟层受到的干扰程度小于 2[#] 模拟层受到的干扰程度, 且 1[#]、2[#] 模拟层生产压差的差越大, 2[#] 模拟层受到的干扰程度越大, 但对 1[#]、2[#] 模拟层总产气量的干扰程度影响不大。

3 结论

(1) 对于多层煤层气藏合采, 合采层间的压力梯度、临界解吸压力、埋深、渗透率、供液能力等物性参数往往存在一定的差异, 从而影响合采效果。对于多层煤层气藏合采井, 由于各储层之间存在一定的间距, 各储层处的混气液柱压力也不相同, 使得各储层对应的井底压力也不相同。

(2) 根据多层煤层气藏产气特征和井底压力特征, 本文提出了一种多层煤层气藏合采物理模拟实验方法, 该方法既可模拟合采层间距可忽略时的多层煤层气藏合采, 也可模拟合采层间距不可忽略时的

多层煤层气藏合采。

(3) 当仅改变模拟合采层间的间距时,各储层同时产气时的储层压力和生产压差也随之改变,从而影响各储层受到的干扰程度。当以 1[#] 模拟层的生产压差为模拟生产压差时,不同模拟层间距条件下合采 2h, 2[#] 模拟层受到的干扰程度大于 1[#] 模拟层受到的干扰程度,且随 1[#]、2[#] 模拟层生产压差的差 $\Delta P_1 - \Delta P_2$ 的增大而增大,而 1[#]、2[#] 模拟层的总产气量受到的干扰程度变化不大。

参考文献:

- [1] 沈玉林, 秦勇, 郭英海, 等. “多层叠置独立含煤层气系统”形成的沉积控制因素[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2012, 37(3):573—579 (SHEN Yulin, QIN Yong, GUO Yinghai, et al. Sedimentary controlling factor of unattached multiple superimposed coalbed-methane system formation [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(3):573—579 (in Chinese))
- [2] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 中国煤系“三气”成藏特征及共采可能性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1):167—173 (LIANG Bing, SHI Yingshuang, SUN Weiji, et al. Reservoir forming characteristics of “the three gases” in coal measure and the possibility of commingling in China[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1):167—173 (in Chinese))
- [3] 谭玉涵, 郭京哲, 郑锋, 等. 气井多层合采渗流特征及接替生产物理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6):1009—1015 (TAN Yuhan, GUO Jingzhe, ZHENG Feng, et al. Physical simulation on seepage features of commingled production and right time of production conversion for gas wells[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6):1009—1015 (in Chinese))
- [4] 朱华银, 胡勇, 李江涛, 等. 柴达木盆地涩北多层气藏合采物理模拟[J]. 石油学报, 2013, 34(S1):136—142 (ZHU Huayin, HU Yong, LI Jiangtao, et al. Physical simulation of comingled production for multilayer gas reservoir in Sebei gas field, Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1):136—142 (in Chinese))
- [5] 周世宁, 林伯泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1999 (ZHOU Shining, LIN Boquan. Coal seam gas occurrence and flow theory[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999 (in Chinese))
- [6] 李相方, 石军太, 杜希瑶, 等. 煤层气藏开发降压解吸气运移机理[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2):203—213 (LI Xiangfang, SHI Juntao, DU Xiyao, et al. Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):203—213 (in Chinese))
- [7] 赵欣. 煤层气产能主控因素及开发动态特征研究[D]. 中国矿业大学, 2017 (ZHAO Xin. The study of main influence factors on productivity of coalbed methane welland the development performance[D]. China University of Mining and Technology, 2017 (in Chinese))
- [8] 郑贵强. 不同煤阶煤的吸附、扩散及渗流特征实验和模拟研究[D]. 中国地质大学(北京), 2012 (ZHENG Guiqiang. Experimental and simulation study on the sorption, diffusion and seepage characters in different-ranked coals[D]. China University of Geosciences(Beijing), 2012 (in Chinese))
- [9] 吕伏, 徐曾和, 梁冰, 等. 考虑煤岩变形和煤对瓦斯吸附特性的煤体渗透规律试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3):469—476 (LV Fu, XU Zenghe, LIANG Bing, et al. Experimental study on the seepage law of coal considering deformation of the coal rock and the adsorption characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):469—476 (in Chinese))
- [10] 梁冰, 石迎爽, 孙维吉, 等. 考虑压力作用的煤吸附/解吸 CH_4 变形试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(2):215—222 (LIANG Bing, SHI Yingshuang, SUN Weiji, et al. Experimental study of coal deformation produced by CH_4 adsorption/desorption taking into account pressure influence[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(2):215—222 (in Chinese))
- [11] Ayers W B. Coalbed systems, resources, and production and a review of contrasting cases from the san juan and power river basins[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1853—1890.
- [12] Lü Y M, Tang D Z, Xu H, et al. Production characteristics and the key factors in high-rank coalbed methane fields: A case study on the Fanzhuang Block, Southern Qinshui Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 96(97):93—108.
- [13] 商永涛. 煤层气渗流机理及产能评价研究[D]. 中国石油大学, 2008 (SHANG Yongtao. Study on percolation

- mechanism and deliverability evaluation of coalbed methane[D]. China University of Petroleum, 2008 (in Chinese))
- [14] 秦勇, 熊孟辉, 易同生, 等. 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[J]. 地质论评, 2008(1): 65—70 (QIN Yong, XIONG Menghui, YI Tongsheng, et al. On unattached multiple superposed coalbed—methane system; in a case of the Shuigonghe syncline, Zhijin-Nayong Coalfield, Guizhou[J]. Geological Review, 2008(1):65—70 (in Chinese))
- [15] 曹佳, 韦重韬, 鲍园, 等. 多层叠置含煤层气系统成藏模拟技术及实例研究[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(3):17—19, 24(CAO Jia, WEI Chongtao, BAO Yuan, et al. Simulation technique of multiple layers superposed coalbed methane reservoir formation history and case study[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(3):17—19, 24 (in Chinese))
- [16] 杨兆彪, 秦勇, 高弟. 黔西比德—三塘盆地煤层群发育特征及其控气特殊性[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4):593—597 (YANG Zhaobiao, QIN Yong, GAO Di. Development character and particulartiy of controlling coalbed methane under coal seam groups from Bide-Santang Basin, western Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4):593—597 (in Chinese))
- [17] 赵丽娟, 秦勇, 林玉成. 煤层含气量与埋深关系异常及其地质控制因素[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7):1165—1169 (ZHAO Lijuan, QIN Yong, LIN Yucheng. Abnormal relation and its geological controls of coalbed methane content to buried depth of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7):1165—1169 (in Chinese))
- [18] 张广政, 徐文慧. 都格井田多层叠置独立含煤层气系统发育特征[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(7):28—32, 74 (ZHANG Guangzheng, XU Wenhui. Development features of multilayer superimposed independent CBM-bearing system in Duge minefield[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(7):28—32, 74 (in Chinese))
- [19] 张政, 秦勇, 傅雪海. 沁南煤层气合层排采有利开发地质条件[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(6):1019—1024 (ZHANG Zhen, QIN Yong, FU Xuehai. The favorable developing geological conditions for CBM multi-layer drainage in southern Qinshui basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(6):1019—1024 (in Chinese))
- [20] 秦勇, 张政, 白建平, 等. 沁水盆地南部煤层气井产出水源解析及合层排采可行性判识[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9):1892—1898 (QIN Yong, ZHANG Zheng, BAI Jianping, et al. Source apportionment of produced-water and feasibility discrimination of commingling CBM production from wells in Southern Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9):1892—1898 (in Chinese))
- [21] 巢海燕, 王延斌, 葛腾泽, 等. 地层供液能力差异对煤层气合层排采的影响——以大宁—吉县地区古驿背斜西翼为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3):606—613 (CHAO Haiyan, WANG Yanbin, GE Tengze, et al. Difference in liquid supply capacity of coal seams and its influence on multi-layer drainage of coalbed methane; Taking the west limb of Guyi anticline in Daning-Jixian region as an example[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3):606—613 (in Chinese))
- [22] 彭龙仕, 乔兰, 龚敏, 等. 煤层气井多层合采产能影响因素[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10):2060—2067 (PENG Longshi, QIAO Lan, GONG Min, et al. Factors affecting the production performance of coalbed methane wells with multiple-zone[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10):2060—2067 (in Chinese))
- [23] 杜希瑶, 李相方, 徐兵祥, 等. 韩城地区煤层气多层合采开发效果评价[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(2):28—34 (DU Xiyao, LI Xiangfang, XU Bingxiang, et al. Multi-layer production evaluation of coalbed methane wells in Hancheng area[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(2):28—34 (in Chinese))
- [24] 熊涛, 孙国忠, 池斌, 等. 鄂尔多斯盆地东缘桑峨区煤层气分压合采可行性分析[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(12):52—54 (XIONG Tao, SUN Guozhong, CHI Bin, et al. Feasibility study of separate layer fracturing and multi-layer drainage for CBM in Sange Area, eastern margin of ordos basin[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(12):52—54 (in Chinese))
- [25] 杨焦生, 王一兵, 王宪花. 煤层气井井底压力分析及计算[J]. 天然气工业, 2010, 30(2):66—68, 141—142 (YANG Jiaosheng, WANG Yibing, WANG Xianhua. Analysis and computation of flowing bottom-hole pressure in coalbed methane wells[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2):66—68, 141—142 (in Chinese))
- [26] 杨焦生. 煤层气井井底压力计算及影响因素分析[C]//中国煤炭学会煤层气专业委员会、中国石油学会石油地质专业委员会. 2008年煤层气学术研讨会论文集, 2008:8 (YANG Jiaosheng. Computation of bottom hole flowing

pressure(WBHP) and analysis of influencing factors in coalbed methane well[C]//Professional Committee of Coalbed Methane of China Coal Society, Petroleum Geology Committee of China Petroleum Institute. Proceedings of the symposium on coal bed methane in 2008, 2008;8 (in Chinese))

Study on the characteristics of multi-layer CBM reservoir mining and the experimental method of its physical simulation

SHI Ying-shuang¹, LIANG Bing¹, XUE Lu², SUN Wei-ji¹, LI Qiao-qiao¹

(1. Institute of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. China Construction First Group Construction & Development Co. . Ltd, Beijing 100102, China)

Abstract: Multi-layer combined mining is one of the effective mining methods of multi-layer coal-bed methane (CBM) gas reservoir. At present, there are few experimental studies on the simultaneous exploitation of multi-layer CBM. In this work, based on the analysis of CBM gas production mechanism, reservoir characteristics and gas production characteristics of multi-layer CBM reservoir, an experimental simulation method of simultaneous exploitation of multi-layer CBM reservoir is presented. The reservoirs are simulated by the reservoir simulation system, which can simulate the characteristics of porosity, permeability, reservoir pressure and ground stress of each reservoir. Because of the existing of layer spacing, the actual bottom hole pressure of each reservoir obtained by the bottom hole pressure simulation system is different. In order to analyze the combined production effect, the formulas for calculating the disturbance rates of reservoir pressure drop and gas production are presented. The simulation experiments of simultaneous exploitation of multi-layer CBM reservoir under different layer spacings are carried out showing that changing the simulated layer spacing will affect the degree of interlayer interference by changing the reservoir pressure and production pressure difference when all reservoirs simultaneously produce gas. After two hours of double-layer mining, the interference degree of # 2 simulation layer is greater than that of # 1 simulation layer, and the smaller the pressure difference of # 2 simulation layer is, the greater the interference degree is. The present work provides theoretical guidance for investigating the optimization and influencing factors of simultaneous exploitation of multi-layer CBM.

Keywords: multi-layer combined mining; layer spacing; bottom hole pressure; physical simulation