

文章编号:1000-582X(2011)04-072-06

井下注气强化煤层气抽采效果的工程试验与数值模拟

李志强^{1,2}, 王兆丰¹

(1. 河南理工大学 河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室, 河南 焦作 454000;

2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:为提高特低渗透煤层的煤层气抽采效果,在重庆天府矿业公司 850 m 深井,采用注入组分为 78% 的 N₂ 的方法,进行了强化注抽煤层气的工业性试验。分别试验了单孔与多孔干扰情况下自然涌出、负压抽采、注气涌出、边注边抽和间歇注气试验。结果表明:在常规抽采达到极限后进行注气,甲烷抽采时间-浓度曲线呈现先上升后下降的单峰波形状态,间歇注抽的甲烷浓度高于边注边抽的甲烷浓度,但衰减较快,注气距离短,长时边注边抽的注抽效果好于间歇注抽效果。注气孔网间距 4 m,渗透率 1.112×10^{-4} mD 的煤层,连续注抽 5 d 后,抽采率由卸压后负压极限抽采的 52.4% 提高到 58.6%。建立了空气注采甲烷的渗流理论方程,计算了合理的注气孔网间距、注气时间、压力等技术参数,讨论了注气技术方法的适用条件和辅助技术,为推广这一技术提供了工程与理论参考。同时,提出了抽采后注气的变定解条件渗流方程解算的科学问题。

关键词:煤层气;瓦斯;注气;渗流;变定解条件

中图分类号:TD713;P618

文献标志码:A

Test and numerical simulation on effect of enhanced coalbed methane drawing by injecting gas under coal mine

LI Zhi-qiang^{1,2}, WANG Zhao-feng¹

(1. Key Laboratory of Henan Province for the Prevention of Methane and Fire Disaster, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, P. R. China;

2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to improve the extraction effect of ultra-low permeability coalbed methane, injecting and drawing industry test of enhanced coalbed methane recovery is carried out by injecting concentration 78% N₂ under 850 m depth coal mine of Tianfu Mining Co. Ltd., in Chongqing. The experiments of free methane emission, vacuum pumping, side injecting and side emission, side injecting and side drawing and intermittent injecting are tested under the condition of single hole and multi holes respectively. The testing results indicate that time-concentration curve of methane drawing is a single peak wave curve which increases and decreases during injecting N₂ after reaching the limits of ordinary extraction. The methane concentration of intermittent injecting gas is greater than that of side injecting and side drawing. However, the former declines rapidly and has a shorter migration distance than the latter. The injecting effect of long

收稿日期:2010-12-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724606);国家自然科学基金青年基金资助项目(51004041);国家创新研究群体基金资助项目(50621403);教育部科学技术研究重点项目(109130)

作者简介:李志强(1975-),男,博士,主要研究方向为煤层气开发及煤矿瓦斯防治理论与技术,
(E-mail)Maximos592@sohu.com。

time side injecting and side drawing is better than that of intermittent injecting. When hole space is 4 m, permeability 1.112×10^{-4} mD, the methane recovery ratio increases to 58.6% from conventional recovery ratio 52.4% after injecting 5 day. Meanwhile, the seepage flow equation of injecting air is provided and the parameters, such as rational hole mesh space, time and pressure of injecting gas, are simulated. At the same time, application condition and assistant technology about injecting gas are discussed, which provides engineering and theoretical reference to promote the injecting gas technology. Also, the problem of variable definite conditions seepage flow equation is put forward.

Key words: coalbed methane; gas; injecting gas; seepage flow; variable definite conditions

煤层低渗透性是当前制约我国煤层气抽采的瓶颈问题。为提高煤体渗透性,我国工业界相继采取了开采保护层、水力压裂、高压水射流割缝、注气驱替、多分支水平井等技术措施来提高煤层气产量,对应于不同煤层条件,各种技术措施均取得了一定的排采效果。然而每一种技术方法均有其技术优势和局限性,如保护层卸压增渗开采煤层气技术适应于多煤层群煤层气抽采,并需要有合理的层间距离,层间距不合理或者无保护层可采时,该项技术受到制约;水力压裂适合开采中等硬度煤层的煤层气,但对于Ⅲ~Ⅴ的构造煤,由于煤体松软、破碎严重,水力压裂无法造缝,且煤粉容易堵塞钻井,煤层气开采效果并不理想;高压水射流割缝在煤炭系统的石门揭煤、穿层条带抽采、本煤层水平长钻孔的瓦斯抽采过程中取得了较好的增渗效果,但下向孔却存在排渣困难,孔内积水等不利于煤层气抽采的弊端;多分支水平井钻井技术同样在Ⅲ~Ⅴ的构造煤中也遇到了垮孔等技术困难。

在直接提高煤体渗透性有限的情况下,研究者们提出了注气置换/驱替增产煤层气的技术理论。注气理论目前的研究主要集中在 CO_2/N_2 多组分吸附和数值模拟方面,崔永君、张群^[1]通过煤的多组分吸附实验发现, $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ 体系中, CH_4 的气相浓度总是低于其吸附相中的浓度,而在 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ 体系中, CH_4 在气相中的浓度总是高于其吸附相中的浓度,且强吸附质比例越大,吸附曲线越靠近强吸附质的吸附曲线,这表明注入 CO_2 开采煤层气主要是置换/竞争吸附原理,而注入 N_2 主要是驱替降压原理。唐书桓通过多组分吸附实验发现,煤层气中一定比例的 N_2 、 CO_2 会明显提高低压下煤层气的解吸速度,吴世跃^[2]较为系统的研究了 CO_2 的吸附膨胀应力问题,认为吸附膨胀应力应符合虎克定律,此外吴世跃^[3-6]在多组分吸附实验基础上提出了考虑多组分吸附-扩散-渗流方程,并提出了自然降压开采和注气开采煤层气的回收率计算公式,认为自然降压开采时的最大理论回收率为44%,注 CO_2 和

N_2 开采时的最大理论回收率分别为76%和54%,并建议煤层气初始压力为2~3 MPa时应先降压开采,待压力低于此值时,再采用注气开采。孙可明^[7-10]较为系统的开展了注气开采多组分扩散渗流模拟,提出了基质系统多组分气体扩散方程和裂隙系统多组分气水渗流方程,模拟了注气井与多生产井的 CH_4 与 CO_2 的浓度分布。

注气增产 CH_4 理论取得了阶段性的进展^[11],为提高煤层气采收率和 CO_2 地下存储提供了理论指导,但限于室内实验测试的难度和现场注采周期的试验时间太长,关于符合实际情况的注气实验和工程试验报道不多,仅中联煤层气公司报道了在沁水盆地南部注 CO_2 采收煤层气的先导性试验^[12],注液态 CO_2 后煤层气采收率提高了1.8~14倍,突破时间为2.6~5.1 d,注 N_2 提高煤层气采收率的试验及其采收效果的报道并不多见。

为了考察注气采收煤层气的效果,进一步完善注气技术理论,本文在井下进行了注气试验,以期弥补室内实验和纯数值计算的不足。提出了变定解条件渗流方程的计算问题,以期抛砖引玉。

1 煤矿井下注气可行性分析

1.1 试验地点煤层及煤层气基本参数测定

注气试验选择在重庆天府矿业公司三矿底板巷道穿层条带孔进行。试验地点埋深852~900 m,实测原位煤层煤层气压力为2.3 MPa,煤层气含量为16.48 m^3/t ,渗透率为0.000 041 75 mD。实验室内测定煤层的吸附常数 a 为31.723 m^3/t , b 为0.715 0 MPa^{-1} ,煤层真密度(TRD)为1.46 t/m^3 ,视密度ARD为1.41 t/m^3 ,煤层孔隙率为0.034 2。

1.2 煤层孔隙性测定

为了了解注气过程中注入气体的入渗性能,判断注气的可行性,对煤的孔隙性进行了测定。采用ASAP2020低温液氮吸附仪和压汞仪测定煤的孔径分布、连通性、比表面积、压汞渗透率等值。测定结果如下:低温液氮比表面积为0.503 6 m^2/g ,平均孔

径 13.093 nm, 总孔容 $1.2358 \text{ cm}^3/\text{g}$, 压汞孔隙率为 0.010 82, 压汞渗透率为 8.85 mD。孔径分布测试表明, 煤层中孔容积占 4.94%, 小孔容积占 89.38%, 微孔容积占 5.68%, 孔隙连通性测定如图 1 所示。

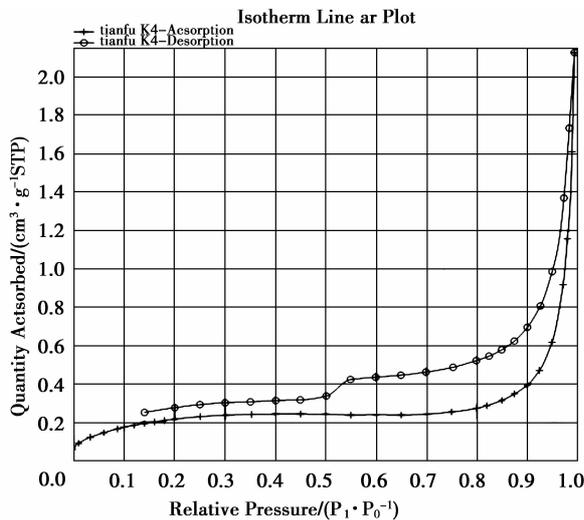


图 1 煤层低温液氮吸附与脱附回线

从图 1 可以看出, 吸附线与脱附线并不重合, 而是形成吸附回环。吸脱附回线与孔隙形状的关系为, 两端开口的管状孔、平行板状孔会形成吸附回线, 孔隙的连通性较好, 利于气体流动, 而一端封闭的管状孔、尖劈孔为封闭孔, 这种孔隙的不会形成吸

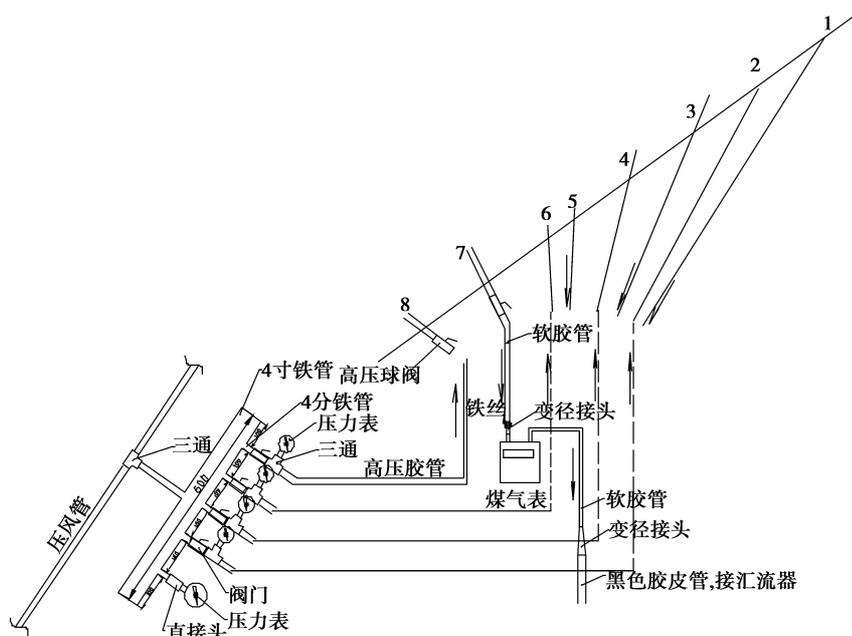
附回线, 孔隙的连通性较差, 另外墨水瓶孔也形成吸附回线, 但存在脱附线突降点, 孔隙的连通性也较差。根据这一关系, 对照图 1 可以判断, 试验地点煤层的孔隙整体连通性较好, 虽存在少量的墨水瓶孔, 但不影响整体连通性。再对照压汞渗透率可以发现, 卸压后煤体的压汞渗透率可达 8.85 mD, 是原位煤层渗透性的 2.12×10^5 倍。

综合以上分析, 试验地点煤层存在较大的原岩应力, 导致了极低的渗透性, 而煤层结构本身的渗透性较好, 适合注气。就试验地点而言, 若要增加煤层气抽采量, 首先仍要卸压以提高其渗透性, 注气可作为一种辅助性措施进一步提高煤层气抽采能力。试验地点煤层气初始压力为 2.3 MPa, 根据吴世跃教授的建议, 宜先采用降压开采, 待残余压力稳定后, 再采用注气开采。根据井下实际情况和吴世跃教授所著文献的建议, 笔者在井下采取了穿层钻孔高压水射流割缝卸压增渗措施, 先期降压抽采煤层气, 待降压抽采达到极限后, 进行了注气抽采煤层气技术措施。

2 煤矿井下注气方法

2.1 注气试验管路系统

注气系统由注气总管、注气支管、压力测试表、抽气支管、流量测试表、浓度测试表组成, 注气所采用的管路系统如图 2 所示, 图中钻孔间距为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。



1. 压力表量程 1.6-2 MPa; 2.1-6 号注气孔和抽气孔连接方式; 与 7、8 号孔连接方式相同; 3. 软胶管与铁管和煤气表连接处用铁丝缠紧; 4. 注气胶管和排气管加工成活动管路, 便于拆卸安装

图 2 注气驱排煤层气试验系统示意图

2.2 注气试验方法

考虑到注气安全和注气成本,注入CO₂可能导致煤层的突出危险性增大,而注入纯N₂成本较高,本次试验所用驱替气体为成本低廉的压缩空气(含78%N₂),进气支管所测注气压力为0.7~1 MPa。注气开始后,压缩空气从进气管进入注气支管,再通过进气管路注入煤层,一定时间后从抽气管路流出。注气开始前,分别测定出气管的煤层气浓度和流量,注气开始后,前4 h内,每隔20~30 min测定一次煤层气浓度和流量,之后每天测定一次参数,连续跟测1~5 d。

3 井下穿层钻孔注气效果

因本层孔注气煤壁前方存在卸压带、集中应力带和原始应力带,注气试验无法判断哪一带的注气效果,因而本次注气采用穿层孔注气,并认为注气过程中煤层内渗透率和应力均匀分布。为了对比各种注气效果,分别试验了煤层气自然排放、单孔只注不抽、单孔既注又抽、多孔干扰只注不抽、多孔干扰既注又抽和多孔间歇注气等多种注气方法,试验结果如表1-7所示。

3.1 各种注抽条件下的甲烷浓度变化

各种注气和抽采条件下的甲烷浓度变化如表1-7所示,表中浓度均为体积分数,表中数据测定时间为2009年,因数据量大,仅列出典型数据。

表1 降压抽采极限后,钻孔自然涌出CH₄浓度/%

钻场号	钻孔号	12.8 放空自然涌出				12.9 12.16	
		11:10	12:10	12:50	13:30	11:10	14:40
三	2	0	0.4	0	0	0	0
	8	0	0.1	0.3	0	0	0
四	1	0	0	0	0	0.2	1.8
	4	0	0.1	0	0	1.2	5

表2 单孔只注不抽条件下CH₄浓度/%

钻场号	钻孔号	11.27 注前				注中		11.30
		10:15	11:10	11:50	12:25	12:45	9:40	
一	1 注气							
	2	33	30	66	44	40	25	
二	1	20	25	35	40	60	27	

表3 多孔干扰只注不抽条件下CH₄浓度/%

钻场号	钻孔	注前 11.30					注中		12.1
		10:40	11:10	11:45	12:25	13:45	9:25		
一	1	7	14	51	57	57	21		
	2	5	10	18	26	35	7		
	4	0	10	20	52	51	4		
	5	6	45	28	82	75	16		
	6	0	3	2	10	15	1		
二 2468	5	0	50	17	47	40	2		
注气	7	0	13	17	25	10	5		

表4 单孔既注又抽条件下CH₄浓度/%

钻场号	钻孔	注前 12.3					注中		12.4
		10:15	10:45	11:40	13:00	13:30	9:25		
五	3	3	4	1	0	1.5	1.5		
	4 注气	5	5	5	2	4	5	2.5	
四	4	1.2	11	8	12	8	6		

表5 多孔干扰既注又抽条件下CH₄浓度/%

钻场号	钻孔	注前 12.24				12.25 注中		12.26
		15:45	14:10	15:10	16:10	14:30		
三 1357	2	0	2.2	3.2	2.5	0		
	4	0	0.3	0.2	1.5	0		
	6	2	2.6	5.3	5.8	0		
	8	1	1	1.8	3.5	0		
四	1	1	6.2	8	3.5	0		
	2	1	2.3	2.2	1.7	0		
	3	1.1	1.9	1.8	3	0		
	4	1.2	1.1	2	1.4	0		
	5	3	2.2	2.7	2.1	0		
	6	1.8	2.5	1.3	1.3	0		
	7	1.2	4.2	2	2	0		
	8	3.5	5.8	6.5	6	0		

表6 多孔间歇注气条件下CH₄浓度/%

2009.12.9,12:00 开始抽采					
钻孔	9:30	12:00	12:25	12:50	13:40
1	3	0.1	0	0.2	0
2	注后抽采	2.5	35	35	33
3	1	0.2	4.5	3	3
4	注后抽采	18	17	15	12
5	0.8	0.5	2.6	2.5	2
6	注后抽采	30	31	30	24
7	1	1.5	2.5	2.1	2

表7 各种注气条件下平均驱替 CH₄ 量

注气方式	单孔只注不抽	多孔只注不抽	单孔既注又抽	多孔既注又抽	自然涌出	间歇注气
CH ₄ 量 /m ³	0.047	0.77	0.062	1.117	0.0013	
CH ₄ 流量 / (m ³ · d ⁻¹)	0.047	0.77	0.062	0.555	0.0013	
CH ₄ 浓度 /%	13.22	16.46	2.65	2.88	3.60	23.54

3.2 注气驱替煤层气效果分析

从表1中可以看出,负压抽采达到极限后,钻孔中自然涌出甲烷浓度均极低,自然排空1d后,甲烷浓度几乎无变化,连续放空8d后,部分钻孔甲烷浓度才略有上升,但增幅不大。

表2-3显示,只注不抽条件下,邻近出气孔甲烷浓度在前4h内均大幅上升,对比表1的自然涌出甲烷浓度变化,可以判断注气过程中的甲烷浓度大幅上升是注气引起的,亦即注气起到了驱排煤层甲烷的效果。注气过程中出现了甲烷浓度先上升,后下降的趋势,分析认为,注气后,煤层中的甲烷在注气压力的驱动下,从邻近出气孔中排出,注气初期首先是煤层气中的甲烷被驱出,随着注气时间的延长,所注空气也从邻近孔中排出,将甲烷稀释,因而浓度降低,煤层中的甲烷逐渐被压缩空气驱出替代,直至甲烷浓度衰减至很低,注气结束。

表4-5显示,既注又抽条件下,邻近孔亦出现甲烷浓度先上升后下降的趋势,但浓度量值较只注不抽条件下的浓度要小,这主要是因为煤层渗透性较低,驱气流量较小,驱出的甲烷很快被负压带走的缘故。

表6间歇注气的试验表明,注气结束后立即换负压抽采,甲烷浓度短时间内急速增大,原因是注入的压缩气体原路返回,在排气过程中携带大量甲烷排出,可以看出短期间歇吞吐注气的效果好于既注又抽的效果,但间歇注气距离短,携带甲烷量有限,甲烷浓度衰减较快,需要反复多次间歇注气才能取得较好的效果,长时注抽情况下,既注又抽的效果好于间歇注气效果。

表7显示,多孔只注不抽比单孔只注不抽的驱气量大1个数量级,驱排平均甲烷浓度前者比后者稍大;多孔既注又抽比单孔既注又抽的驱气量也大一个数量级,驱排平均瓦斯浓度前者比后者稍大,这种变化规律与只注不抽情况下的规律类似;单孔既注又抽比单孔只注不抽的注气量稍大,二者在同一数量级,但前者比后者的甲烷浓度小得多,这主要是抽采条件下,甲烷被负压迅速带走的缘故;多孔既注

又抽与多孔只注又抽的比较与单孔情况类似。

3.3 讨论

总体来看,本次注气试验取得了一定的效果,原位煤层抽采率为23%,高压水射流割缝后(不注气)的抽采率为52.4%,割缝及注气抽采率为58.6%,注气抽采率提高了6.2%。因重庆地区煤层渗透性极低,煤层原位渗透率仅为0.000 041 75 mD,即使在采取高压水射流割缝卸压增渗主力措施后,煤层渗透率也仅为0.003 75 mD,这导致注气能力有限,一定时间内的注气的距离较短,注穿邻近孔的所需时间较大。因而,提高煤层气采收率的主要技术关键仍是卸除高地应力,也只有卸压增渗后,随后的注气技术才能取得应有的效果。受井下注气设备能力和注气安全的限制,煤矿井下注气压力不宜太高,略高于负压抽采极限后的残余煤层气压力是可行的注气方法,且注气后应立即抽出所注气体,并确保残余气体压力低于采掘所规定的安全压力0.74 MPa。

4 煤层注气数值计算

为了指导注气工程施工,需要进一步的数值计算以确定注气所需合理参数。

孔隙介质中的气体流动理论可用列宾逊方程表示^[13],即

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2u\phi} \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

为便于计算,式(1)可变换成式(2),

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \frac{kp}{u\phi} \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

平面径向流方程可改写成下式(3),

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \frac{kp}{u\phi} \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) \quad (3)$$

边界条件

$$p(r, 0) = 0, p(0, t) = 1, \frac{\partial p^2}{\partial r} \Big|_r = 0 \quad (4)$$

以上式子中, p —气体压力,MPa;

t —时间,s;

u —气体动力黏性系数, 17.9×10^{-6} ,

Pa · s;

k —渗透率, 0.00375×10^{-15} ,m²;

ϕ —孔隙率,0.0342;

x, y, z —笛卡尔坐标流动距离,m;

r —平面径向流动半径,m。

考虑到注入的压缩空气与煤层的吸附性较小,注气提高采收率原理主要为驱替甲烷和降低甲烷分压,为简单计,本次计算暂不考虑多组分吸附,并认为注气压力略高于降压抽采残余煤层气压力注气有效,根据式(1)~(4)计算的注气压力与时间距离关

系如下图。

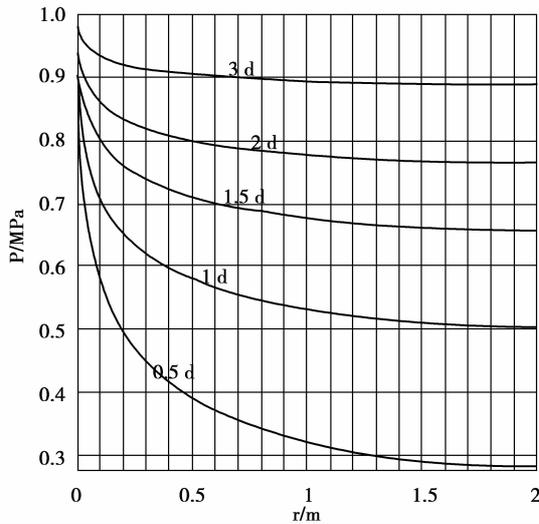


图2 注气压力与时间距离关系

从图2中可见,采用1 MPa的压力,注气3 d后,距钻孔中心2 m处的注气压力可达到0.9 MPa,略高于残余煤层气压力(0.8 MPa),可认为注气3 d为合适的注气时间。

5 关于注气方程定解条件的讨论

上文中注气流动方程的初始条件假定了煤层中抽采后的煤层气压力为恒定值,是不得以而为之的方法。事实上,前期抽采后,煤层中煤层气压力为时间和空间的函数,形态上属于随空间变化的抛物线曲线,随时间变化的负指数曲线,如图3所示。

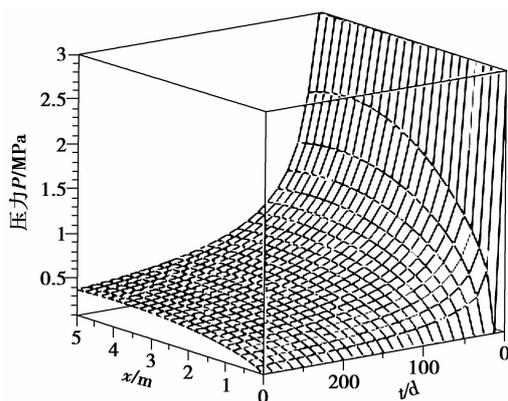


图3 常规抽采后煤层气压力与距离时间关系示意图

注气时,应该将抽采后的压力条件作为定解条件加载到注气方程中进行解算,但这属于变定解条件的偏微分方程,在数学计算上较为困难。这种情况广泛存在,如抽采后的注气、注热、注水,在此提出变定解条件渗流方程这一科学问题,抛砖引玉,期待更多研究者参与解决之。

6 结论

1) 进行了煤层注气可行性分析,认为孔隙连通性好,预先卸压提高煤体渗透性是煤层注气的先决条件。在原位煤层极低渗、煤层气压力较大时,宜先采取增渗措施降压开采,达到降压极限后再进行注气抽采煤层气。

2) 进行了煤矿井下单孔(与多孔干扰)只注不抽、单孔(与多孔干扰)既注又抽和多孔间歇注气等注气试验,试验表明,注气过程中,邻近孔甲烷浓度均呈现先上升后下降的趋势,既注又抽的甲烷流量大于只注不抽的甲烷流量,但前者的甲烷浓度小于后者的甲烷浓度。

3) 短时多孔间歇注气的排甲烷浓度大于既注又抽的浓度,而长时既注又抽的排甲烷效果大于短时间间歇注气效果。

4) 依据列宾逊方程进行了注气数值计算,计算表明,注气压力1 MPa,注气3 d时,4×4孔间距的注气半径2 m处的注气压力略高于降压抽采的最高残余甲烷压力,认为此时可将甲烷驱出。考虑到井下采掘安全,注气压力1 MPa,注气3 d为宜。

5) 提出了抽采后注气的变定解条件渗流方程解算问题,这一问题广泛存在于抽采后注气、注热、注水等工程领域中,如何将第一次流动方程解算后的压力条件作为新的定解条件加载到第二次流动方程中再次解算,是一个新的科学问题。

参考文献:

- [1] 崔永君. 煤对 CH_4 、 N_2 、 CO_2 及多组分气体吸附的研究[D]. 西安:煤炭科学研究总院西安分院,2003.
- [2] 吴世跃,赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,24(10):1674-1678.
WU SHI-YUE, ZHAO WEN. Analysis of effective stress in adsorption methane-coal system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 24(10):1674-1678.
- [3] 吴世跃,郭勇义. 注气开采煤层气增产机制的研究[J]. 煤炭学报,2001,26(2):199-203.
WU SHI-YUE, GUO YONG-YI. Study of the mechanism of increasing production of exploitation coalbed methane by gas injection[J]. 2001,26(2):199-203.
- [4] 吴世跃,赵文. 自然降压开采和注气开采煤层气的效果评价[J]. 中国矿业,2004,13(10):76-79.
WU SHI-YUE, ZHAO WEN. Evaluation of effects on the exploitation of coalbed methane by the natural decompression and injection gas [J]. China Mining Magazine, 2004,13(10):76-79.

- hydrodynamics: with special applications to particulate media[M]. Vol 1. The Hague: Nijhoff, 1986.
- [15] COSTA A. Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption [J]. Geophysical research letters, 2006, 33: L02318.
- [16] EIDSATH A, CARBONELL R G, WHITAKER S, et al. Dispersion in pulsed systems-III, comparison between theory and experiments in packed beds[J]. Chemical Engineering Science, 1983, 38 (11): 1803-1816.
- [17] SAHRAOUI M, KAVIANY M. Slip and no-slip boundary condition at interface of porous plain media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(4): 927-943.
- [18] KATZ A J, THOMPSON A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation [J]. Physical Review Letters, 1985, 54(12): 1325.
- [19] MAJUMDAR A. Role of fractal geometry in the study of thermal phenomena [J]. Annual Reviews of Heat Transfer, 1992, IV: 51-110.
- [20] 张新铭, 彭鹏, 王金灿. 基于分形理论的石墨泡沫新材料导热系数[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(9): 109-111. ZHANG XIN-MING, PENG PENG, WANG JIN-CAN. Effective thermal conductivity of a new material of graphite foam based on fractal theory[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27 (9): 109-111.
- [21] ADLER P M, THOVERT J F. Real porous media: Local geometry and macroscopic properties[J]. Applied Mechanics Reviews, 1998, 51(9): 537-585.
- [22] YU B M, LI J H. Some fractal characters of porous media[J]. Fractals, 2001, 9(3): 365-372.
- [23] YU B M, CHENG P. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(14): 2983-2993.
- [24] CHEN Z Q, CHENG P, ZHAO T S. An experimental study of two phase flow and boiling heat transfer in bi-dispersed porous channels [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2000, 27 (3): 293-302.
- [25] SULLIVAN R R. Specific surface measurement on compact bundles of parallel fibers [J]. Journal of Applied Physics, 1942, 13(11): 725-730.

(编辑 张小强)

(上接第77页)

- [5] 吴世跃, 张美红, 郭勇义. 单井间歇注气开采煤层气生产过程分析[J]. 太原理工大学学报, 2008, 38(2): 148-150. WU SHI-YUE, ZHANG MEI-HONG, GUO YONG-YI. Production procession analysis of coalbed methane by intermittent gas injection into single-well [J]. Chinese Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2008, 38(2): 148-150.
- [6] 张力, 郭勇义, 吴世跃, 等. 煤层气渗流方程数值分析[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(10): 40-42. ZHANG LI, GUO YONG-YI, WU SHI-YUE, et, al. Numerical value analysis of coal bed methane influent equation[J]. 2001, 29(10): 40-42.
- [7] 孙可明. 低渗透煤层气开采与注气增产流固耦合理论及其应用[D]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2003. 12.
- [8] 孙可明. 煤层气注气开采多组分流体扩散模型数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(3): 305-308. SUN KE-MING. Model and numerical simulation about multispecies fluid diffusion and seepage in exploitation methane by gas injection [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(3): 305-308.
- [9] 孙可明, 梁冰, 潘一山. 流固耦合作用下注气开采煤层气增产规律研究[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(7): 802-813. SUN KE-MING, LIANG BIN, PAN YI-SAN. Study of exploitation coalbed methane by gas injection in fluid-solid coupling flow [J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(7): 802-813.
- [10] 张宛君, 邵英楼. 煤层气注井开采数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2009, 28(9): 289-291. ZHANG WAN-JUN, TAI YING-LOU. Numerical simulation of coal-bed methane note well exploitation [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2009, 28 (9): 289-291.
- [11] 高远文, 姚艳斌, 郭广山. 注气提高煤层气采收率研究进展[J]. 资源与矿业, 2007, 9(6): 105-108. GAO YUAN-WEN, YAO YAN-BIN, GUO GUANG SHAN. Study advances on coalbed methane recovery viagas injection[J]. Resources industries, 2007, 9(6): 105-108.
- [12] 叶建平, 冯三利, 范志强, 等. 沁水盆地南部注二氧化碳提高煤层气微型先导性试验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 77-80. YE JIAN-PING, FENG SAN-LI, FAN ZHI-QIANG, et, al. Micro-pilot test for enhanced coalbed methane recovery by injecting carbon dioxide in south part of Qinshui basin [J]. Acta Petroei Sinica, 2007, 28(4): 77-80.
- [13] K. C. 巴斯宁耶夫, A. M. 费拉索夫, B. M. 马克西莫夫. 地下流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.

(编辑 张小强)