

张遂安,曹立虎,杜彩霞.煤层气井产气机理及排采控压控粉研究[J].煤炭学报,2014,39(9):1927-1931. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.8025

Zhang Suian, Cao Lihu, Du Caixia. Study on CBM production mechanism and control theory of bottom-hole pressure and coal fines during CBM well production[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9):1927-1931. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.8025

煤层气井产气机理及排采控压控粉研究

张遂安^{1 2 3}, 曹立虎^{1 2 3}, 杜彩霞^{1 2 3}

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)气体能源开发与利用教育部工程研究中心,北京 102249;3. 中国石油大学(北京)煤层气研究中心,北京 102249)

摘 要:煤层气吸附/解吸特征、渗流机理和排采控制是煤层气井生产的重要因素。为此,进行了煤层气吸附解吸实验和渗流特征实验,结果表明:煤层气吸附/解吸是可逆的,存在“解吸滞后现象”;煤层气渗流呈现二级渗流特征,即煤的基质孔隙内流体的渗流呈非达西渗流和天然裂隙及大孔隙内流体的渗流呈达西渗流;煤层气排采过程中,随着排水降压,规模开发可导致“气水分异”,局部高点气产量高、水产量低,相对低点产水量高、产气量低。同时,煤层气井排采过快、洗井修井、停抽关井、液面低于煤层顶面等易造成污染,致使气水产量锐减,其伤害机理主要是煤粉堵塞伤害、应力敏感伤害和气锁/水锁伤害。基于伤害特点及伤害机理,结合多年的排采经验,确立了以定压排采、控制合理工作压差和控制煤粉适度产出等排采工作制度。

关键词:煤层气;产气机理;控压;控粉;排采

中图分类号:P618.11

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2014)09-1927-05

Study on CBM production mechanism and control theory of bottom-hole pressure and coal fines during CBM well production

ZHANG Sui-an^{1 2 3}, CAO Li-hu^{1 2 3}, DU Cai-xia^{1 2 3}

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Gas Energy Development Research Center of the Ministry of Education, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Coalbed Methane Research Centre, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The characteristics of adsorption/desorption of coal-bed methane, percolation mechanism and drainage control are important factors in the process of CBM production. The experiments on adsorption/desorption of CBM and characteristics of percolation were carried out in this study. The results show that the process of adsorption/desorption of CBM is reversible, while the “desorption hysteresis” occurs in the process. The seepage of CBM presents the characteristics of secondary percolation, which means that the seepage flow in coal matrix porosity is non-Darcy flow and the flow in natural fractures and large pore is Darcy flow. In addition, the study has found a phenomenon of “gas-water difference” in coal seams at a large scale development for the drainage decompression in the process of gas recovery. The gas yield is high with low water production at local high locations, while the water yield is high with low gas production at relatively low locations. At the same time, the damage process includes fast production, work over, stop pumping and shut-in and low fluid level below the top surface of coal seam can easily lead to pollutions which result in the sharp decrease of gas-water production. Its damage mechanism mainly includes pulverized coal jam damage, stress sensitivity damage, air lock damage and water lock damage. Based on the damage characteristics, damage mechanisms and

收稿日期:2014-07-20 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-003, 2011ZX05042-001, 2011ZX05063)

作者简介:张遂安(1957—),男,山东菏泽人,教授,博士生导师。Tel:010-89734802, E-mail:sazhang@263.net

many years' practical experience on CBM production a drainage working system has been developed including draining with constant pressure, controlling a reasonable working pressure difference and maintaining a sound pulverized coal production rate.

Key words: coal-bed methane; CBM production mechanism; bottom-hole pressure; coal fines; production

在原始煤层气储层(以下简称“煤储层”)条件下,煤层气以吸附态赋存于煤储层之中^[1-2]。基于煤层气吸附理论,美国煤层气产业界创立了经典的煤层气开采理论——“排水—降压—解吸—扩散—渗流—解吸—产出”理论^[3],有力地推动了美国煤层气产业的形成与发展。基于此,我国煤层气业界探索并形成了一套独特的煤层气井排水采气工艺技术(我国煤层气产业界将其简称为“排采”)。

由于美国、加拿大、澳大利亚的煤层气储层渗透率远高于我国煤层的渗透率,且其煤层结构较我国的煤层结构更有利煤层气开发,因此我国煤层气井排采遇到了美国、加拿大、澳大利亚未遇到的问题,如煤粉伤害和应力敏感伤害等问题。针对上述问题,国内虽开展了一系列研究,但都未系统的进行阐述^[4-9]。为此,系统研究了煤层气的产气机理和排采过程中的伤害机理,结合笔者 20 余年煤层气开发领域的研究和实践,提出以定压排采、控制合理工作压差和控制煤粉适度产出等排采工作制度。

1 煤层气产出机理

由于煤层气独特的吸附态赋存特征,决定了煤层气产出的先决条件是由吸附态转变为游离态(此过程称为“解吸”)。基于煤层气产出机理,开展了煤层气解吸机理和排水降压机理研究。

1.1 排水降压与区域压力降

煤层气井排采的本质是通过排水,降低井底流压,进而降低储层内流体压力,从而使吸附态的煤层气因降压而被解吸,由吸附态变为游离态,为煤层气产出提供条件。储层流体压降的基本特征是压降后的流体压力的等压曲线呈现为漏斗状(被称为“压降漏斗”)。随着持续排水降压,压降漏斗会不断向外扩展^[10-11]。

研究表明,煤层气井附近储层内的压降漏斗形态和扩展速率,不仅取决于该井的排水速率,同时还取决于煤层本身的孔隙度、渗透率等储层特征。在排采过程中,在一定的井底流压条件下,煤层气储层的渗透率越高,其压降漏斗的形态就越平缓,渗透率越低,其形态越陡。压降漏斗形态和扩展速率,决定着煤层气的解吸总量和孔隙内的气、水饱和度,从而决定了该排采井的煤层气产出速率和产出总量。

在开发过程中,并非井底流压或近井筒流体压力低于临界解吸压力就会大规模解吸和产气。实际上,只有当煤储层中流体压力低于临界解吸压力的区域才会发生煤层气解吸。根据沁水盆地南部的煤层气勘探和开发实践发现,从井底流压低于临界解吸压力到大规模产气,一般需要井底流压低于临界解吸压力 0.8 MPa 才会出现大规模产气,可把这个开始大规模产气的临界井底流压点定义为“临界产气井底流压”。

井间干扰,会导致常规天然气井的单井产量大幅度锐减,表明井网设计不合理。而井间干扰对煤层气生产则是一项最有效的实现稳定高产的技术措施。

从产出机理看,只有当煤储层内的流体压力降至临界解吸压力之下,吸附态煤层气才可能被解吸,由吸附态转化为游离态。但由于煤储层的渗透率比较低,所以单井的临界解吸压力等值线压降漏斗的扩展区域会受到渗透率的局限。也就是说,仅仅靠单井排水降压是很难实现大面积的煤储层内流体压力降到临界解吸压力之下。

根据井间干扰原理,可以通过调整开发井网的井间距,使相邻井的压降漏斗产生井间干扰,从而扩大煤层气解吸区域,实现煤层气规模开发井网的高产稳产。

1.2 煤层气降压解吸机理

为深入研究煤层气的吸附/解吸机理,进一步指导煤层气开发,依托国家重点研究发展规划(973)项目“煤层气开采基础理论研究”和国家自然科学基金项目“煤层气解吸动力学特征及解吸行为研究”,利用自主研发的 AST-2000 型大样量煤层气吸附解吸仿真实验装置,深入开展了煤层气解吸机理实验研究。

不同煤样对 CH_4 、 CO_2 、 N_2 等单组分气体的吸附/解吸实验结果表明,不同煤样、不同气体的等温解吸曲线和等温吸附曲线有所相同。即:在同压力点,被吸附的气体分子并不能被全部解吸,总会有部分气体分子仍然被吸附,因此解吸过程具有显著的压力滞后现象,如图 1 所示,笔者将其称为“解吸滞后效应”^[12-13]。

多年的煤层气产出机理实验研究和开发实践发现,煤层气的吸附是偶于地质时期煤的热演化生烃、排烃过程之中的一个漫长(以百万年计的地质时间)的吸附过程(称之为“自发过程”),而煤层气开发所

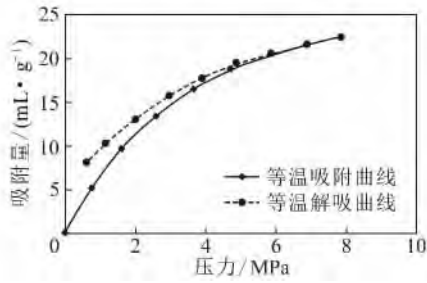


图 1 煤层气解吸滞后效应示意

Fig. 1 CBM desorption delayed effect

涉及的煤层气的解吸问题是一个物理解吸问题,是一个人为的“排水—降压—解吸”过程(“被动过程”)^[14]。

基于煤层气的吸附/解吸机理实验研究发现,虽然用 Langmuir 方程拟合等温解吸实验数据的效果尚可,但用 Weibull 模型拟合的效果更好^[15],其 Weibull 方程为

$$V = abp / (1 + bp) + c \quad (1)$$

式中, V 为解吸到压力 p 下的残余的吸附量, mL/g ; a 为煤样最大吸附容量, mL/g ; b 为吸附速度/解吸速度与吸附热/解吸热的综合函数, MPa^{-1} ; c 为匮乏压力下的残余吸附量, mL/g 。

多年的煤层气解吸机理实验以及煤层气开发实践还发现,由于煤吸附煤层气是基于两者之间的分子间范德华力,甲烷分子的吸附状态是一种动态平衡状态,其解吸是一个瞬间的过程,所以开发过程中不会因所谓的煤层气的解吸速度影响到煤层气的产量。

1.3 煤层气渗流机理

通过煤样渗流机理实验,首次发现煤层具有显著的二级渗流特征,即基质孔隙的非达西渗流和天然裂隙的达西渗流。

为探索煤储层基质孔隙内流体的渗流机理,顺煤样分层钻取了样柱(称之为“顺层样柱”),并对顺层样柱进行了渗流实验。实验结果表明,流体在基质孔隙中的流动呈典型的非达西渗流,如图 2 所示。此成果的实验条件为:实验围压为 5 MPa,实验流体渗出口压力为 0.10 MPa。

1.4 规模开发过程中的饱和度变化

在规模开发过程中,随着持续的排水—降压,煤储层孔隙中的流体不断产出,煤储层内的流体压力也在持续降低,从而导致一些吸附态煤层气被解吸和产出。随着煤层气的解吸和产出,煤储层孔隙中的气饱和度、水饱和度不断发生着变化。

以临界解吸压力等压线为界,在高于临界解吸压力的区域,煤层气未被解吸,为单相流状态;低于临界解吸压力的区域,煤层气被不同程度地解吸,呈现出

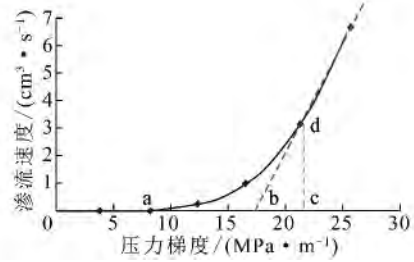


图 2 煤样渗流速度与压力梯度的关系

Fig. 2 Relationship between low rate and pressure gradient

a—流体开始流动的启动压力梯度; b—拟启动压力梯度;
c—临界压力梯度; d—临界渗流速度

水和气两相流状态,两相流的流动状态取决于相对渗透率。如图 3 所示。

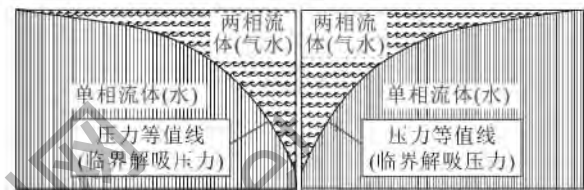


图 3 煤层气产出过程流体状态示意^[16]

Fig. 3 Diagram of fluid state during CBM production^[16]

1.5 规模开发过程中气水分异现象

通过对研究区生产数据分析发现,在煤层气规模开发条件下,相对高部位井产气量高、产水量低,甚至只产气不产水,低部位井的产水量高、产气量低,甚至只产水不产气。此现象被称之为“气水分异现象”。

在煤层气规模开发条件下形成气水分异现象的主要原因主要有以下 3 方面:

- (1) 压降—解吸作用,随着区域压降,煤层气从吸附态变为游离态;
- (2) 重力—浮力,水受重力的作用,从高部位向低部位流动,从而使得低部位井水产量较高;煤层气受浮力作用,从低部位向高部位流动,从而使得高部位井气产量较高;
- (3) 气顶现象,气水分异导致在相对高部位形成煤层气规模开发过程中的“气顶”,从而使得高部位井气产量高,甚至只产气不产水。

2 排采过程的煤储层伤害机理

20 世纪 90 年代初期,我国曾有一批煤层气生产试验井因排采过程中速度控制不当导致产量锐减。如沁水盆地南部的 TL-006 井、河北大城 DC-001 井等。研究发现,导致这些煤层气开发试验井产量锐减的主要原因有排采过快、修井作业和关井停产。

2.1 排采过快

(1) 情形 1,应力敏感性伤害。多年的开发实践

发现,煤层气井排采过快,尤其是动液面较接近煤层时,会出现气、水产量锐减。为进一步探索应力敏感伤害的机理,通过采集不同地区、不同变质程度、不同岩石力学性质、不同渗透率煤样进行应力敏感实验,大量的煤样应力敏感实验结果显示,煤储层渗透率对有效应力非常敏感。即:随着有效围压增加,煤样的渗透率被快速降低;而在有效围压逐步递减过程中,虽然渗透率有所增加,但却无法恢复到原来的渗透率,出现较大差距。此现象就是有效应力对煤样渗透率造成的伤害。所以排采过快导致井底流压与煤储层中流体压力之间的压差过大时,近井筒地带的煤储层渗透率就会受到应力敏感性伤害,从而致使煤层气井的水产量和气产量锐减。

(2)情形2,气锁或水锁伤害。排采过快,极易造成大量煤粉产出,煤粉极易对泵体形成卡泵,卡泵造成停排,停排使得流动的气水两相流骤然停止,从而会出现气水分异现象。由于煤储层的孔喉半径较小,毛细管现象显著,所以气水分异会导致煤储层的气锁或水锁伤害,从而导致水产量和气产量锐减。

(3)情形3,煤粉堵塞伤害。排采过快,易导致大量煤粉产出,煤粉堵塞泵体而造成卡泵,卡泵造成停抽,停抽会导致流动中的煤粉沉积而堵塞人工裂缝及天然裂缝,导致水产量和气产量锐减。

2.2 修井作业

(1)情形1,敏感性伤害。修井作业会因外来液体进入煤储层,对煤储层造成水敏、酸敏等敏感性伤害,从而导致水产量和气产量锐减。

(2)情形2,煤粉堵塞伤害。修井作业,循环液体会把人工裂缝中及井筒内的煤粉推入到天然裂缝和人工裂缝之中,从而形成煤粉堵塞伤害,导致水产量和气产量锐减。

(3)情形3,气锁或水锁伤害。在修井作业过程中,会因外来液体进入煤储层,造成对煤储层的气锁或水锁现象,从而导致水产量和气产量锐减。

2.3 关井停产

(1)直井。关井停产导致煤粉滞留在支撑裂缝,煤粉滞留堵塞裂缝,导致支撑裂缝导流能力降低甚至丧失,从而造成水产量和气产量锐减;关井停产,使渗流中的气液两相流体形成气锁或水锁,导致水产量和气产量锐减。

(2)水平井。关井停产导致大量煤粉滞留在水平井近生产井筒,堵塞井筒,从而造成水产量和气产量锐减。

综上所述,煤层气井排采对煤层气储层及其人工裂缝可能造成的伤害有三大类,即:①煤粉堵塞伤

害;②应力敏感伤害;③气锁水锁伤害。

3 煤层气井控压控粉排采技术

基于上述煤层气井排采过程中的伤害特点及伤害机理,结合多年的煤层气井排采实践经验,确立了严格控制合理的工作压差(特指井底流压与储层压力之间的压差)和精确控制煤粉适度的产出速度等关键的控制要素。

3.1 井底流压、套压与产量的关系

从煤层气井排采技术的角度,制约煤层气井产气量和产水量的主要参数包括井口回压、套压、动液面、井底流压等,而这些参数本身又存在着相互作用、彼此影响的内在联系,如图4所示。

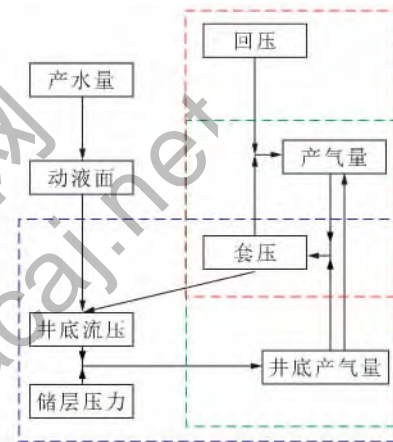


图4 煤层气井筒各参数间耦合关系

Fig. 4 Coupling relationship of parameters of coal-bed methane well

3.2 排采技术要求及排采工作制度

为降低排采过程中的伤害,煤层气井的排采设备选择应以保障长期、稳定和连续排采为前提条件。排采设备必须性能可靠,持久耐用,节能低耗,易于维修保养。同时,要有从低排量到高排量较大范围内的排液能力与控制排液能力,还要有较强的和较灵敏的井口及产气系统的压力控制能力。

根据多年煤层气井排采取得的经验和教训,煤层气井排采可采用的工作制度只有定压排采,无法实现定产排采。即:煤层气井排采应在有效控制煤粉产出速率和合理的工作压差的条件下,按照拟定的井底流压进行生产。

3.3 合理工作压差的控制

基于上述煤层气储层易受到应力敏感伤害,确立了控制合理工作压差的排采控制理论。

如图4所示,在煤层气井排采过程中,控制工作压差的方式是控制井底流压,控制井底流压的重要途径是控制动液面的高度和油套环空的气体压力(套

压)。控制动液面的有效的手段是通过调整工作制度控制产水速率,从而控制动液面的高度;通过有效地调整油嘴大小,调整套压。

3.4 适度的煤粉产出速度的控制

多年的排采实践发现,无论是通过水力压裂的直井还是水平井,都会产出一定数量的煤粉。煤粉的产出极易导致卡泵,停排后煤粉又会对人工裂缝、水平井段、储层造成伤害。但若不让煤粉产出,同样也会对人工裂缝、水平井段、储层造成伤害。为避免煤粉造成的系列伤害,可以采取有效的“疏导”方式使其产出。从排采技术的角度考虑,控制煤粉以适度的速度产出的重要手段是合理控制产水量。

4 结 论

(1)煤层气开发所能涉及的煤层气吸附/解吸主要是物理吸附和物理解吸,物理吸附的作用力是甲烷分子与煤分子的分子间力(范德华力)。鉴于这种作用力较小,所以煤层气的物理吸附过程和物理解吸过程是可逆的,但存在“解吸滞后现象”(因解吸需克服范德华力)。由于物理吸附是一种动态平衡过程,因此煤层气解吸是一个瞬间过程,所以不存在煤层气解吸速率影响煤层气产量。

(2)煤层气渗流为典型的二级渗流,即:煤基质孔隙内的流体流动多为非达西渗流,煤的天然裂隙及较大孔隙内的渗流为达西渗流,且存在启动压力、滑脱效应等超低渗储层所有的相关现象。

(3)在排采过程中,通过定压排采,控制合理的工作压差(特指井底流压与储层压力之间的压差),精确控制煤粉适度的产出速度可有效预防煤粉堵塞、应力敏感和气锁/水锁伤害,保证煤层气井安全、有效排采。

参考文献:

- [1] McLennan J D, Schafer P S, Pratt T J. A guide to determining coalbed gas content [M]. Chicago: US Gas Research Institute, 1995.
- [2] 张新民, 张遂安. 中国的煤层甲烷 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991: 29 - 76.
- [3] Saulsbury J L, Schafer P S, Schraufnagel R A. A guide to coalbed methane reservoir engineering [M]. Chicago: US Gas Research Institute, 1996.
- [4] 曹立虎, 张遂安, 石惠宁, 等. 沁水盆地煤层气水平井筒煤粉迁移及控制 [J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(4): 93 - 95.
Cao Lihu, Zhang Suian, Shi Huining, et al. Coal dust migration and treatment for coalbed methane horizontal wells in Qinshui Basin [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(4): 93 - 95.
- [5] 刘岩, 张遂安, 曹立虎, 等. 煤粉在支撑裂缝中的运移与沉积规律 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1333 - 1337.
Liu Yan, Zhang Suian, Cao Lihu, et al. Rules of coal powder migration and deposition in the proppant fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1333 - 1337.
- [6] 曹立虎, 张遂安, 张亚丽, 等. 煤层气水平井煤粉产出及运移特征 [J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 31 - 35.
Cao Lihu, Zhang Suian, Zhang Yali, et al. Investigation of coal powder generation and migration characteristics in coalbed methane horizontal well [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(3): 31 - 35.
- [7] 刘升贵, 张新亮, 袁文峰, 等. 煤层气井煤粉产出规律及排采管控实践 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 412 - 416.
Liu Shenggui, Zhang Xinliang, Yuan Wenfeng, et al. Regularity of coal powder production and concentration control method during CBM well drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 412 - 416.
- [8] 崔思华, 管保山, 张遂安, 等. 煤岩储层伤害机理及评价方法 [J]. 中国煤层气, 2012, 9(3): 38 - 41.
Cui Sihua, Guan Baoshan, Zhang Suian, et al. Mechanism of coal & rocks reservoirs and evaluation methods [J]. China Coalbed Methane, 2012, 9(3): 38 - 41.
- [9] 郭春华, 周文, 孙晗森, 等. 考虑应力敏感性的煤层气井排采特征 [J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 27 - 30.
Guo Chunhua, Zhou Wen, Sun Hansen, et al. The relationship between stress sensitivity and production of coal bed methane wells [J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 27 - 30.
- [10] 赵金, 张遂安. 煤层气井底流压生产动态研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(2): 21 - 28.
Zhao Jin, Zhang Suian. Production dynamics of CBM bottom hole pressure [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(2): 21 - 28.
- [11] 赵金, 张遂安. 煤层气排采储层压降传播规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 65 - 68.
Zhao Jin, Zhang Suian. Study on pressure drop transmission law of coal bed methane drainage reservoir stratum [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 65 - 68.
- [12] 张遂安, 叶建平, 唐书恒, 等. 煤对甲烷气体吸附-解吸机理的可逆性实验研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 44 - 46.
Zhang Suian, Ye Jianping, Tang Shuheng, et al. Theoretical analysis of CBM adsorption/desorption mechanism and its reversibility experimental study [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 44 - 46.
- [13] 张遂安. 关于煤层气开采过程中煤层气解吸作用类型的探索 [J]. 中国煤层气, 2004, 1(1): 26 - 28.
Zhang Suian. Views on types of desorption effect in the process of CBM production [J]. China Coalbed Methane, 2004, 1(1): 26 - 28.
- [14] Zhang Suian, Huo Yongzhong, Ye Jianping, et al. Displacement desorption test of coalbed methane and its mechanism exploring [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(S2): 158 - 162.
- [15] 马东民, 张遂安, 蒯亚兵. 煤的等温吸附-解吸实验及其精确拟合 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 477 - 480.
Ma Dongmin, Zhang Suian, Liu Yabing. Isothermal adsorption and desorption experiment of coal and experimental results accuracy fitting [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 477 - 480.
- [16] Hollub V A, Schafer P S. A guide to coalbed methane operations [M]. Chicago: US Gas Research Institute, 1992.