

# 煤层气干扰试井测试技术研究

郝临山 邱 锋

(瑞华通正非常规油气技术检测(北京)有限公司 北京 102200)

**摘要:**为了研究煤层气井井间干扰现象及干扰规律,获得优势渗流通道,在不影响煤层气井产气量的前提下,选取4个井组进行煤层气“一源一汇”干扰试井测试。通过对激动井注水、观察井开井生产的模式,在井间形成压力降,应用压降叠加理论,定量研究分析了煤层气排采降压过程中出现的井间干扰现象。结果表明:在选取的4个干扰试井井组中,西南方位部署的2口生产井压力上升明显,显示为连通,井间连通优势方位与试井区域最大地应力方向基本吻合,从实际注水情况看,显示压裂裂缝方向与储层连通方向是一致的,说明西南方向为该煤层气储层的优势渗流通道,井间合理间距为300 m。证实煤层气井间干扰作用可为判断井间连通性及评价井网部署提供有效依据。

**关键词:**煤层气;注入/压降试井;干扰试井;优势通道

中图分类号:TE133; TD712.6 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2016)05-0018-05

## Study on test technology of coalbed methane interference test well

Hao Linshan, Qiu Feng

(SGS Unconventional Hydrocarbon Technology Detection (Beijing) Company Limited, Beijing 102200, China)

**Abstract:** In order to study the interference phenomenon and interference law between the coalbed methane wells and to obtain the dominant seepage channel, on the premise of no influence to the gas production of the coalbed methane well, there were 4 well groups selected for the test of the coalbed methane "one source and one collection" interference test well. With the water injection in the perturbed well, the production mode of the observation well, the pressure drop formed between the wells and the application of the pressure drop superposition theory, the interference phenomenon between the wells occurred in the coalbed methane drainage and pressure drop process was quantitatively studied and analyzed. The results showed that in the selected 4 interference test well groups, the pressure in two production wells located in the south-west were increased obviously and were connected. The connection dominant azimuth between the wells and the max geostress direction in the test well region were fitted basically. From a view of the actual water injection condition, the fractured crack direction and reservoir connection direction were the same. The south-west direction would be the dominant seepage channel of the coal reservoir. The rational space between the wells was 300 m. The interference role between the coalbed methane wells could be effective basis to judge the connection between the wells and to evaluate the layout of the well network.

**Key words:** coalbed methane; injection/pressure drop logging; interference test well; dominant channel

## 0 引言

目前煤层气试井多采用的是注入/压降试井,但受煤层气储层非均质性比较严重、煤层松软易破裂等因素影响,注入/压降试井测试时间较短、测试范围有限,所获得的储层参数只能代表井筒附近地层

的储层特征。而干扰试井属于多井试井,它可以获得一个区域的储层信息,其中包括:获取井间连通情况;获取断层封闭情况;获取被测储层的优势渗流通道;判断储层裂缝的走向。常规油气干扰试井在测试过程中的干扰信号是通过改变激动井工作制度使其产生干扰信号,通过对观测井干扰时的监测压力

收稿日期:2016-03-18;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2016.05.004

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05063)

作者简介:郝临山(1956—),男,山西大同人,教授,现任瑞华通正非常规油气技术检测(北京)有限公司总经理。通讯作者:邱锋,硕士。

Tel:18701675085 E-mail:Feng.qiu@sgs.com

引用格式:郝临山,邱锋.煤层气干扰试井测试技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):18-22.

Hao Linshan, Qiu Feng. Study on test technology of coalbed methane interference test well [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 18-22.

和观测井的背景压力进行对比解释来确定地层的连通情况,并求出井间地层的流动系数、导压系数和储能系数等地层参数<sup>[2-8]</sup>。鉴于煤层气储层自身的特点<sup>[9]</sup>,煤层气井井间干扰试井测试时不需通过对激动井进行关井产生干扰信号,2种测试方式截然不同,主要有以下几个原因:考虑到煤层气储层渗透率低的因素,采取激动井注水,观察井开井时生产的模式,在探测范围内形成一定的压差,进而缩短压力传导时间,可以大幅节约测试成本;煤层气排采需要不断地排水,关井将导致排水终止,进而煤粉停止运移而沉积下来,对煤层气储层造成严重的伤害,结果必然会降低该井的气产量甚至会变成一口废井;如果煤层气井关井,一方面该井不能产气,另一方面停止了排水、减缓了煤层气的解吸<sup>[10]</sup>,进而不能形成区域降压,从而影响了邻近煤层气井的产量。笔者主要针对煤层气试井方法及干扰试井进行探讨。

## 1 煤层气注入/压降试井

煤层气注入/压降试井方法的应用已经由来已久,在求取煤层气储层参数方面占有特有的优势,在煤层气勘探开发过程中得到了广泛应用。主要用于评价流体产出能力及液性,评价储层原始地层压力及温度;获取煤层的有效渗透率、原始地层压力、表皮系数及调查半径等参数。但由于煤层埋深浅、井壁松软等因素的影响,给测试过程及分析范围带来不同程度的限制:<sup>①</sup>受井壁松软的制约,注入/压降测试时,长时间注水会使裸眼井壁坍塌,封隔器及管柱极易被埋;<sup>②</sup>注水及关井时间较短,测试范围受限,同时储层非均质性较强,无法获取更多的储层参数以及远井区域信息;<sup>③</sup>封隔器上下压差小,难以坐封。坐封后作用于胶筒面积的上下压差小,且作用面积有限,产生向下的力小<sup>[11]</sup>;<sup>④</sup>井壁岩性主要以泥岩、泥质砂岩为主,砂岩段很少,给封隔器坐封带来一定风险。

## 2 煤层气干扰试井

### 2.1 煤层气井间干扰的原理

煤层气井的工作制度不发生改变时,整个煤层气区块将处于某一稳定状态,煤层气储层能量的消耗和供应处于一个暂时的平衡。当区域内任何一口煤层气井的工作制度发生变化后,能量平衡都会被破坏,引起整个渗流场发生变化,致使煤层气储层内各点的压力重新分布,其分布符合压降叠加原

理<sup>[12-16]</sup>。以2口煤层气井为例,说明煤层气井间干扰的本质和受到邻井干扰后储层压力重新分布的情况。

用数学方法来解释压降叠加原理,为了使问题得到简化,故作以下2个方面的假设:<sup>①</sup>煤层气储层是水平均质等厚的,煤层气井附近的渗流近似为平面径向流,地层边缘有充足的液源供给;<sup>②</sup>渗流条件要求单相流体服从达西定律,稳定渗流,且流体和多孔介质均不可压缩。

当区域中只有1口煤层气井A进行生产时,则建立数学模型,其中控制方程,内、外边界条件方程分别如式(1)、式(2)、式(3)所示,即

$$\frac{d^2 p_A}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp_A}{dr} = 0 \quad (1)$$

$$p_A|_{r=r_w} = p_w \quad (2)$$

$$p_A|_{r=r_e} = p_e \quad (3)$$

解式(1)二阶线性微分方程得

$$p_A = p_e - \frac{p_e - p_w}{\ln r_e / r_w} \ln r_e / r_A \quad (4)$$

亦可写成

$$\Delta p_A = p_e - p_A = \frac{p_e - p_w}{\ln r_e / r_w} \ln r_e / r_A \quad (5)$$

当地层中只有1口煤层气井B进行生产时,同理可得

$$\Delta p_B = p_e - p_B = \frac{p_e - p_w}{\ln r_e / r_w} \ln r_e / r_B \quad (6)$$

则得出如下方程:

$$\frac{d^2 \Delta p_A}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Delta p_A}{dr} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d^2 \Delta p_B}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Delta p_B}{dr} = 0 \quad (8)$$

其中,式(7)和式(1)具有相同的解。

从数学角度出发,将式(7)和式(8)的微分方程进行叠加可得

$$\frac{d^2 (\Delta p_A + \Delta p_B)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d(\Delta p_A + \Delta p_B)}{dr} = 0 \quad (9)$$

则式(7)和式(8)的定解的和必定是式(9)的解,则其解为

$$\Delta p = \Delta p_A + \Delta p_B = \frac{p_e - p_w}{\ln r_e / r_w} \ln \frac{r_e^2}{r_A r_B} \quad (10)$$

式中:r为地层半径,m;r<sub>w</sub>为煤层气井半径,m;r<sub>e</sub>为外边界到井中心的距离,m;r<sub>A</sub>、r<sub>B</sub>分别为A井、

B井半径 ,m; 地层边缘上有充分的供给来源 ,在边缘上的供给压力为  $P_e$ , MPa;  $P_w$  为煤层气井的井底压力 ,MPa;  $P_A$ 、 $P_B$  分别为 A 井、B 井生产时的地层压力 ,MPa。

根据式(5)、式(9)以及式(10)作出压降示意图 ,如图 1 和图 2 所示。其中虚线为地层中只有 1 口煤层气井生产 ,实线是地层中有 2 口煤层气井同时生产 , $Q_1$  为注水井注入产量 , $m^3/d$ ;  $Q_2$  为生产井产量 , $m^3/d$ ;  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  为地层中任意一点。

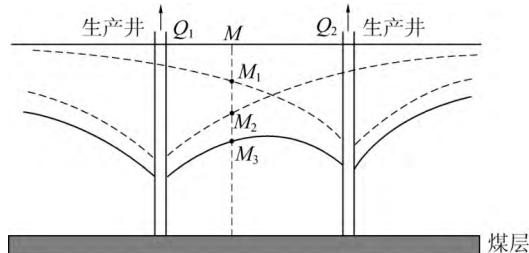


图 1 生产井干扰的压降曲线

Fig. 1 Interference pressure drop curves of production well

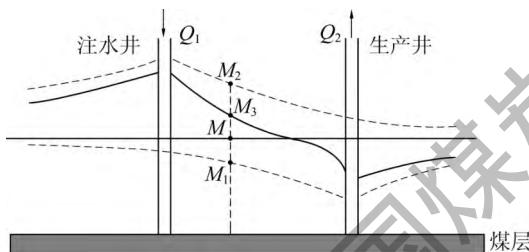


图 2 一注一采井的压降曲线

Fig. 2 Interference pressure drop curve of production and injection well

从图 1 和图 2 中可以看出: 多井同时工作时 ,地层中任意一点的压降等于各井单独工作时在该点所造成的压降的代数和 ,这就是煤层气井井间干扰的本质。由于煤层气储层低渗透的属性 ,在做煤层气井干扰测试时 ,为了缩短干扰信号的传播时间 ,采用的方法是向激动井中注水 ,即“一源一汇”干扰试井方法 ,在这种情况下 ,压力降叠加规律和图 2 相同。

## 2.2 煤层气干扰试井设备

煤层气干扰试井设备采用万普龙智能排采综合管理系统 ,可以对井下压力温度变化实时监控 ,同时可根据方案随时调整注水流量 ,主要包括地面装置和井下装置 2 个部分。其中地面装置主要由 2 个部分组成 ,包括: 智能注水装置及永久式压力测量系统控制器; 井下装置包括: 井下关井装置主要包括机械旋转式封隔器、电缆、电子压力计等 ,如图 3 所示。

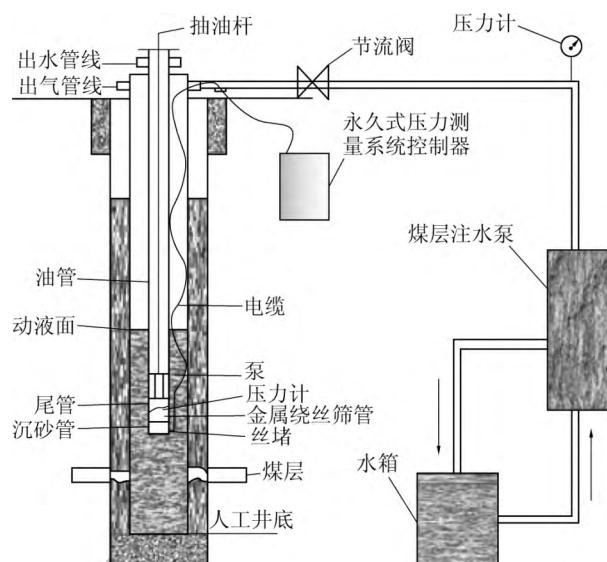


图 3 设备示意

Fig. 3 Equipment schematic diagram

## 3 实例分析

### 3.1 测试井组选取依据

以均质油藏中的 2 口井进行干扰测试为例 ,观察井开始出现响应压力  $\Delta p_w$  与传播时间  $t$  的关系 ,可以表示为<sup>[17]</sup>

$$\Delta p_w(t) = p_R - p_w(t) = \frac{qB\mu}{1086kh} Ei\left(\frac{-l^2}{14.4\eta t}\right) \quad (11)$$

式中:  $\Delta p_w(t)$  为观测井在  $t$  时刻的井底压力差 ,MPa;  $p_R$  为地层压力 ,MPa;  $p_w(t)$  为观测井在  $t$  时刻的井底压力;  $q$  为激动井的产量 , $m^3/d$ ;  $B$  为流体的体积系数;  $k$  为储层渗透率 , $\mu m^2$ ;  $h$  为地层的有效厚度 ,m;  $\mu$  为地层流体黏度 , $mPa \cdot s$ ;  $l$  激动井与观察井之间的距离 ,m;  $t$  为传播时间 ,h;  $\eta$  为导压系数 , $cm^2/s$ 。

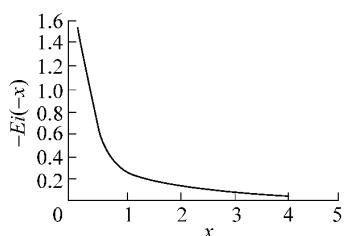
根据标准的幂积分函数  $-Ei(-x)$  的具体表达式为

$$-Ei(-x) = \int_x^\infty \frac{1}{x} e^{-x} dx \quad (12)$$

由此可以绘出  $-Ei(-x)$  与  $x$  的关系曲线 ,如图 4 所示。

由图 4 可以看出  $-Ei(-x)$  随着  $x$  的增大而减小 ,而  $x = -\frac{\phi\mu C_t l^2}{14.4kt}$  ,其中:  $\phi$  为孔隙度 ,%;  $C_t$  为流体压缩系数 , $MPa^{-1}$ 。

结合式(11)可以得出结论。当激动井注入量

图 4  $-Ei(-x)$  与  $x$  关系曲线Fig. 4 Relation curve between  $-Ei(-x)$  and  $x$ 

一定时,井间距将决定注入时间,井距越短所需要的传播时间就越短。因此,在选择测试井时应尽可能选择井距较小的煤层气井<sup>[18]</sup>。根据这个原则,再结合现场实际情况,在测试时选择了 ZX-1 井、GC-2 井、GC-3 井、GC-4 井和 GC-5 井,干扰试井井组的基本情况见表 1。

表 1 干扰试井井组的基本概况

Table 1 General situation of interference test wells group

井号	顶板埋深/m	底板埋深/m	煤层厚度/m	井深/m	井间距/m	方位
ZX-1	321.55	328.03	6.48	466.18	—	中心井
GC-2	281.38	287.75	6.37	421.00	292.0	SW
GC-3	280.56	286.89	6.33	431.40	284.0	NE
GC-4	336.55	343.01	6.46	491.60	303.0	SW
GC-5	286.08	292.51	6.43	424.05	352.0	NW

### 3.2 干扰试井测试结果及分析

永久式压力系统 10 s/点,每天记录 8 640 个点。根据压力值点绘出整个测试过程的测试井组的干扰曲线,如图 5 所示。

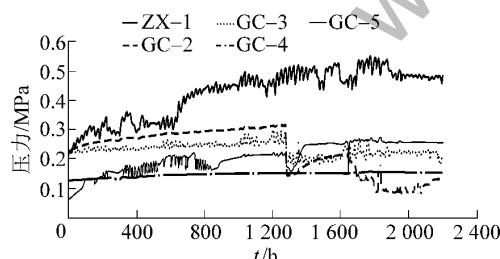


图 5 实测压力曲线

Fig. 5 Pressure test curve

1) 干扰试井测试期间,注入井、观察井井底压力变化分析见表 2。

2) 表中 4 个干扰试井井组中 ZX-1 井与 GC-2 井、ZX-1 井与 GC-4 井显示为连通,其余井组不连通。干扰试井结果表明,井间连通优势方位与试井区域最大地应力方向 SW 方向基本吻合。

表 2 压力变化情况

Table 2 Situation of pressure variation

井类型	井号	初期压力/MPa	末期压力/MPa	变化量/MPa	结果
注入井	ZX-1	0.213	0.478	0.265	注水效果明显
	GC-2	0.063	0.257	0.194	形成干扰
	GC-3	0.223	0.203	-0.020	未形成干扰
	GC-4	0.127	0.156	0.029	形成干扰
	GC-5	0.228	0.133	-0.095	未形成干扰

3) ZX-1 井压裂方向为西南方向,结合实际注水情况可以看出,在实际生产开发中,压裂裂缝方向与储层连通方向一致,说明西南方向为该煤层气储层的优势渗流通道。

4) ZX-1 井与 GC-2 井间距 292 m,与 GC-4 井间距为 303 m,干扰试井结果表明,当井网与区域构造裂隙方向一致,井间距 300 m 部署是合理的。

5) 根据煤层气储层低孔低渗的特性,在本次煤层气干扰试井时,采用向中心井进行注入。在这种情况下,“一源一汇”的测试方式,压力降叠加规律与两口生产井干扰规律相同,同时在不影响正常生产的情况下,大幅缩短了干扰信号的传播时间。

### 参考文献(References):

- [1] 张世福.煤层气注入/压降测试技术应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程) 2001(3): 42-45.  
Zhang Shifu. Coalbed methane injection and pressure drawdown well testing technical application [J]. Mining Engineering ,2001 (3): 42-45.
- [2] 邓团,汪敏,彭景云等.干扰试井技术在苏码头构造的研究[J].油气井测试 2009,18(5): 17-22.  
Deng Tuan,Wang Min,et al.Peng Jingyun,et al.Interference well testing technical study in Sumatou structure [J].Oil and Gas Testing 2009 ,18(5): 17-22.
- [3] 赵玉东.徐深 1 井区非均质气藏干扰试井设计及分析[D].大庆:东北石油大学 2011.
- [4] 李慧,任立成.一种干扰试井设计的简便方法[J].油气井测试 2002,11(3): 22-24.  
Li Hui,Ren Licheng.Interference well testing design simple method [J].Oil and Gas Testing 2002 ,11(3): 22-24.
- [5] 李成荣,李玖梅,李华君等.干扰试井技术在文 79 北块的应用[J].油气井测试 2004,13(1): 40-41.  
Li Chengrong,Li Jiumei,Li Huajun,et al.Interference well testing technical application on Wen 79 North Block [J],Oil and Gas Testing 2004 ,13(1): 40-41.
- [6] 李传亮,彭朝阳,朱苏阳.煤层气其实是解析气[J].岩性油气藏 2013,25(2): 112-115.

- Li Chuanliang ,Peng Chaoyang ,Zhu Suyang. Coalbed methane is adsorption gas undergrand [J].*Lithologic Reservoirs* ,2013 ,25( 2) : 112-115.
- [7] 倪小明,苏现波,张小东.煤层气开发地质学[M].北京:化学工业出版社,2010:124-128.
- [8] 李传亮,彭朝阳.煤层气的开采机理研究[J].岩性油气藏,2011 ,23( 4) :9-11.
- Li Chuanliang ,Peng Chaoyang. Research on the flow mechanism of coal bed methane [J].*Lithologic Reservoirs* ,2011 ,23( 4) : 9-11.
- [9] 苏现波.煤层气地质学[M].北京:煤炭工业出版,2009: 16-55.
- [10] 冯文光.煤层气藏工程[M].北京:科学出版社,2009: 20-21.
- [11] 梁于文.煤层气井 DST 测试技术[J].油气田地面工程,2003 ,22( 8) :56.
- Liang Yuwen. Coalbed methane DST testing technical [J].*Oil-gasfield Surface Engineering* ,2003 ,22( 8) :56.
- [12] 张建国.油气层渗流力学[M].2 版.东营:中国石油大学出版社,2009: 77-78.
- [13] 陈志胜.煤层气井微破裂试验测试技术及应用[J].中国矿业大学学报,2003 ,32( 1) :54-56.
- Chen Zhisheng. Coalbed methane micro-fracture testing technical and application [J].*China University of Mining Technology* ,2003 ,32( 1) :54-56.

(上接第 17 页)

- Sun Hansen ,Feng sanli ,Wang Guoqiang ,et al. Regional geological and reservoir characteristics of the Panhe CBM gas field in the southern Qinshui Basin and their influences on CBM gas production capacity [J].*Natural Gas Industry* ,2011 ,31( 5) :21-23.
- [49] 张家根,武玉东,周佳等.沁南区块煤层气井压裂液体系研究[J].中国石油和化工标准与质量,2013( 21) :140-141.
- Zhang Jiagen ,wu yudong ,zhou jia ,et al. Coalbed methane well fracturing fluid system of Qinnan Block research [J].*Journal of China Petroleum and Chemical Industry Standard and Quality* ,2013( 21) :140-141.
- [50] 罗莉涛,刘卫东,姜伟等.煤粉悬浮剂性能评价及现场实施方案设计与应用[J].钻井液与完井液,2015 ,32( 3) :30-34 ,105.
- Luo Litao ,Liu Weidong ,Jiang Wei ,et al. Evaluation ,operation program design and application of coal powder suspending agent [J].*Drilling Fluid & Completion Fluid* ,2015 ,32( 3) :30-34 ,105.
- [51] 郭红玉,夏大平,苏现波等.二氧化氯作为煤储层压裂液破胶剂的可行性试验研究[J].煤炭学报,2014 ,39( 5) :908-912.

- [14] 李顺初,周荣辉,黄炳光.临井干扰压力理论分析及其应用[J].石油勘探与开发,1994 ,21( 1) :84-88.
- Li Shunchu Zhou Ronghui ,Huang Bingguang. An analysis of the theory of pressure interference in an adjacent well and its application [J].*Petroleum Exploration and Development* ,1994 ,21 ( 1) : 84-88.
- [15] 胜利油田地质处开发试验室.井间干扰试验在胜利油田的应用[J].石油勘探与开发,1975 ,2( 5) :21-43.
- Laboratory of Geological Development of Shengli Oilfield .Application of well interference test in Shengli Oilfield [J].*Petroleum Exploration and Development* ,1975 ,2( 5) :21-43.
- [16] 张 聪,李梦溪,王立龙,等.樊庄矿区煤层气井干扰认识与应用[J].中国煤层气,2013 ,10( 6) :24-27.
- Zhang Cong ,Li Mengxi ,Wang Lilong ,et al.The study and application of CBM wells interference in Fanzhuang [J].*China Coal Bed Methane* ,2013 ,10( 6) :24-27.
- [17] 《试井手册》编写组.试井手册[M].北京:石油工业出版社,1992: 156-160.
- [18] 康圆圆,邵先杰,石磊,等.煤层气开发目标区精选体系与方法研究[J].岩性油气藏,2011 ,23( 1) :62-66.
- Kang Yuanyuan ,Shao Xianjie ,Shi Lei ,et al.Study on system and method of ranking coal bed methane development perspectives [J].*Lithologic Reservoirs* ,2011 ,23( 1) :62-66.
- Guo Hongyu ,Xia Daping ,Su Xianbo ,et al.Experimental study on the feasibility of chlorine dioxide as fracturing fluid gel-breaker for coal reservoirs [J].*Journal of China Coal Society* ,2014 ,39 ( 5) :908-912.
- [52] 李 兰,杨 旭,杨德敏.油气田压裂返排液治理技术研究现状[J].环境工程,2011 ,29( 4) :54-56 ,70.
- Li Lan ,Yang Xu ,Yang Demin.Progress in treatment of fracturing fluid recover from oil /gas field [J].*Environmental Engineering* ,2011 ,29( 4) :54-56 ,70.
- [53] 刘文士,廖仕孟,向启贵,等.美国页岩气压裂返排液处理技术现状及启示[J].天然气工业,2013 ,33( 12) :158-162.
- Liu Wenshi ,Liao Shimeng ,Xiang Qigui ,et al.Status quo fracturing flowback fluids treatment technologies of US shale gas well and its enlightenment for China [J].*Natural Gas Industry* ,2013 ,33( 12) :158-162.
- [54] 苏晓倩,郭超.煤层气采出水悬浮物处理方法研究[J].中州煤炭,2014( 3) :115-116.
- Su Xiaoqian ,Guo Chao.Study on treatment method of suspended material in produced water of coalbed methane [J].*Zhongzhou Coal* ,2014( 3) :115-116.