

文章编号: 1001-1986(2013)05-0029-04

煤层气井越流补给的判识方法

张双斌^{1,2}, 苏现波¹, 郭红玉¹

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 晋城职业技术学院矿业工程系, 山西 晋城 048026)

摘要: 排水降压是煤层气开发的技术依据, 及时判别煤层气井是否存在越流补给, 将关系到排采工作制度的制定和产气量预测。通过煤层气井不同排采阶段的实际产水量与理论值的比较, 并结合套压、井底流压、动液面和产气量的变化特征, 能够快速判识越流补给。若煤层气井实际产水量明显高于理论值, 且开始产气时动液面上升后不再下降, 产气量和套压保持在较低水平, 则认为该井存在越流补给。在此基础上, 根据动液面、套压和产气量特征划分越流补给井类型, 确定合理的后续排采制度。通过分析沁水盆地煤层气井的排采数据, 验证了越流补给井及类型的快速识别方法。

关键词: 煤层气; 排采; 压降漏斗; 越流补给

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2013.05.006

Identifying method of leakage recharge in CBM wells

ZHANG Shuangbin^{1,2}, SU Xianbo¹, GUO Hongyu¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Jincheng Vocational and Technical College, Jincheng 048026, China)

Abstract: Drainage and pressure lowering are technical basis for coalbed methane development, and prompt leakage recharge identification is related to the drainage working system and gas production forecast. Combined with the variation of bottom hole flowing pressure, casing pressure, producing fluid level and gas production of different drainage stages in CBM wells, the existence of leakage recharge is identified by comparison between theoretical and real water production. The paper points out that there is leakage recharge when the real water production is greater than the theoretical value, and the rose fluid level no longer declines after gas production, gas production and casing pressure are maintained at a low level. On this basis, according to the characteristics of dynamic fluid level, casing pressure and gas production, leakage recharge types are classified and the subsequent drainage working system is determined reasonably. The production curves of CBM wells show that this approach is effective in southern Qinshui basin.

Key words: CBM; drainage; pressure drawdown distribution; leakage recharge

煤层气主要以吸附态存在于煤储层中。根据等温吸附理论, 增温和降压是促使煤层气解吸的两条途径。由于单井范围内煤储层的温度和性质稳定, 只有降压解吸可选。储层压力是煤储层中裂隙水或煤层气的压力, 因此, 可以通过排水降低储层压力, 达到煤层气解吸的目的。目前, 已经形成了“排水降压→储层压力降低至临界解吸压力之下→基质块中的煤层气解吸→由浓度梯度驱动从基质孔隙扩散至储层裂隙网络→由压力差驱动从裂隙网络渗流至井筒产出”的煤层气井排采模式^[1-3]。但是, 当煤层与顶(或底)板中富含水区沟通, 出现越流补给, 压力传播路径发

生变化, 产水量也随之变化, 必然要求对排采制度做出相应调整。采用水质分析方法判断有无越流补给, 需要时间长, 会延误调整排采制度的时机^[4]。因此, 在排采中, 根据井口套压、井底流压、产水量和产气量的变化规律, 及时、准确识别有无越流补给及类型, 是确定产气后排采制度的关键, 具有重要意义。

1 无越流补给井的井底流压和产水量及产气量的变化规律

1.1 压降漏斗扩展模型及井底流压变化规律
在煤层气井排采过程中, 随着井底流压的下降,

收稿日期: 2012-09-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB219601); 博士基金项目(B2012-015)

作者简介: 张双斌(1977—), 男, 山西夏县人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为煤层气勘探与开发。

井筒周围煤储层中会形成一个以井筒为中心,不断径向扩展的压降漏斗(图 1)。当井底流压高于临界解吸压力时,煤层中只有单相水流,在井筒周围形成饱和水单相流区域^[5]。当井底流压降至临界解吸压力时,煤层气开始解吸,并扩散到裂隙网络,水中煤层气泡逐渐增多,但气泡仍相互孤立,没有连成流线^[6]。此时,饱和水单相流区域外移,在井筒周围形成非饱和水单相流区域。随着排水降压的进行,饱和水单相流、非饱和水单相流区域不断外移,解吸气体越来越多,水中的气泡逐渐连成线,在井筒周围形成一个气、水两相流区域^[7]。

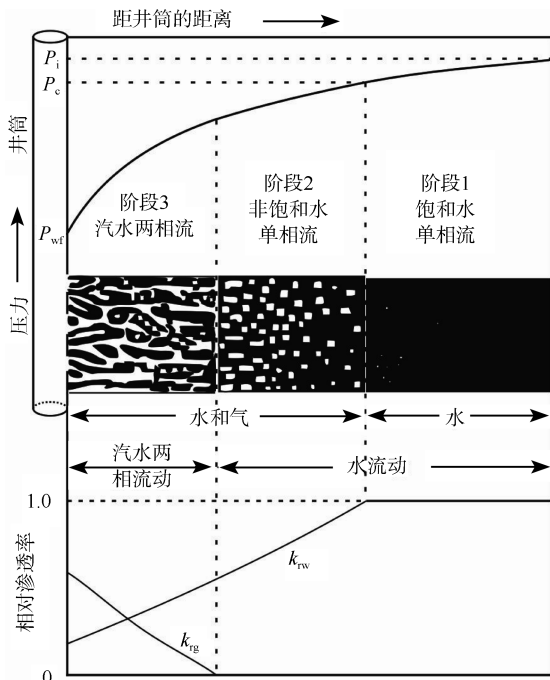


图 1 排采压降漏斗模型

Fig. 1 Pressure drawdown distribution of drainage

当煤层气井产气后,井底流压的大小可以通过井底压力计测量,也可通过井口套压 P_t (MPa)、井口至液面气柱压力 ΔP_g (MPa)、液面至井底液柱压力 ΔP_w (MPa)之和进行计算^[8],即:

$$P_{wf} = P_t + \Delta P_g + \Delta P_w \quad (1)$$

由于 100 m 空气柱和煤层气柱产生的压力分别为 0.001 29 MPa 和 0.000 78 MPa,对井底流压的贡献很小,进行计算时可以忽略不计,则式(1)可简化为:

$$P_{wf} = P_t + \Delta P_w \quad (2)$$

1.2 产水量与产气量的变化规律

在饱和水单相流阶段,无煤层气解吸,只有单相水的流动,产水量 Q_w (m³/d)可表示为:

$$Q_w = \frac{2\pi k h (P_i - P_{wf})}{\mu \ln \left(\frac{R_e}{R_w} \right)} \quad (3)$$

式中 k 为煤层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为煤层厚度, m; P_i 为储层压力, MPa; μ 为粘度, mPa·s; R_e 为排水影响半径, m; R_w 为井筒半径, m。

进入非饱和水单相流阶段和气-水两相流阶段后,由于煤层气解吸后会阻碍水的流动,使水的相对渗透率下降,产水量随之下降^[9],产水量 Q_w 可表示为:

$$Q_w = \frac{2\pi k k_{rw} h (P_e - P_{wf})}{\mu \ln \left(\frac{R_e}{R_w} \right)} \quad (4)$$

式中 k_{rw} 为水的相对渗透率。

在进入气-水两相流阶段后,随着压降漏斗的不断扩展和气体的连续解吸产出,井口套压不断增大;由于处于关井状态,产气量为零,此时煤储层中水的相对渗透率仍较大,井筒周围储层仍然以水相流为主。在套压大于 0.4 MPa 时,通常采用套管针形阀或较小油嘴控制开始产气,随着产气量逐渐增加,煤储层中气相流动加快,水的相对渗透率下降,产水量也随之下降。在保持动液面平稳下降的前提下,井口套压、井底流压、产水量和产气量变化曲线如图 2 所示。

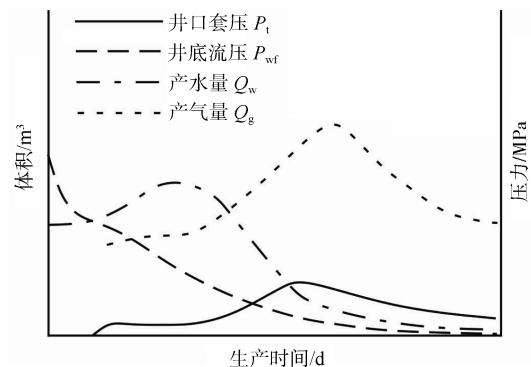


图 2 无越流补给井的井口套压、井底流压、产水量和产气量变化规律示意图

Fig. 2 The curve of casing pressure, bottom hole flowing pressure, water and gas production in CBM wells without leakage recharge

2 越流补给井的判识方法及意义

2.1 越流补给井的压降漏斗模型及井底流压变化规律

在排采过程,出现越流补给的煤层气井相较于高供液能力井具有典型的特征,具体表现在:

a. 当煤层顶底板围岩的渗透率高于煤层时,压力降主要在岩层中传递。当井底流压低于临界解吸压力时,井筒附近小范围内煤层气解吸,套压较低,产气后,供气能力不足。其井口套压、井底流压、产水量和产气量变化如图 3。

b. 当煤层顶底板围岩与煤层渗透率相当时,压

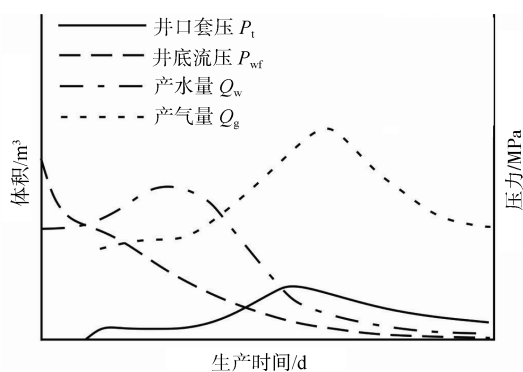


图3 越流补给井的井口套压、井底流压、产水量和产气量变化规律示意图

Fig. 3 The curve of casing pressure, bottom hole flowing pressure, water and gas production in CBM wells with leakage recharge

力降在煤层中同时传递^[10]。此时,煤层中的压降扩展慢,套压增加较缓,供气能力一般。

c. 当煤层渗透率高于煤层顶底板围岩时,压降主要在煤层中传递,对套压和供气能力影响较小。

2.2 越流补给井的判识方法

根据越流补给井的特征,综合排采过程中煤层气井的产水量、井底流压、套压和产气量变化情况,可快速判识煤层气井的越流补给。

a. 产水量明显高于理论值。煤层气井的实际产水量明显高于式(3)和式(4)计算的相应阶段的产水量理论值。

b. 开始产气时,保持产水量不变,动液面升高后难以下降。煤层气井开始产气时,套压减小,在井底流压不变的情况下,由式(2)可知动液面必然上升,且在套压下降 0.1 MPa 时,动液面约上升 10 m。此时,由于水的饱和度降低,其相对渗透率下降,由式(4)可知,在保持冲程、冲次不变的情况下,井底流压的下降速率必然增大,即动液面下降幅度变大。因此,开始产气时,若动液面短暂上升后,随着排水的连续进行,产气量不断增加,动液面快速下降,则不存在越流补给,须减小排水;若动液面上升后

不再下降,且套压和产气量始终保持在较低的水平,则说明存在第 1 种越流补给,须加大排水;若动液面缓慢下降,套压和产气量逐渐上升,则属第 2 类型越流补给,可适当加大排水;第 3 种越流补给量较小,套压和产气量特征与无越流补给井类似,要适当减小排水。

2.3 越流补给井的判识意义

在排采过程中,及时判识存在的越流补给,具有如下重要意义。

a. 便于确定合理的后续排采制度。煤层气井产气后,无越流补给井煤层中水的饱和度快速降低,水的相对渗透率急剧减小,应及时调整冲程和冲次,减小产水量,保持动液面缓慢下降;而越流补给井却须加大产水量,才能使动液面下降。

b. 预估产气量,进行排采的经济性评价。根据煤层气井的井口套压、井底流压、产水量和产气量变化特征,及时识别可能出现的越流补给及其类型,有助于准确预估煤层气井的产气量,便于从经济性角度决定是否继续排采。

3 实例分析

沁水盆地南部是迄今为止我国煤层气开发最活跃、最成功的区块,排采时间较长,对其数据分析的结果具有代表意义^[11]。

3.1 煤层气井参数

沁水盆地南部煤层气 A221 和 A114 井分别于 2009 年 3 月和 5 月开始排采,储层参数见表 1,其排采曲线分别如图 4 和图 5。

表 1 A221 和 A114 井储层参数
Table 1 The reservoir parameters of wells A221 and A114

井号	渗透率 $k/(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	煤层厚度 h/m	水的粘度 $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	储层压力 P_c/MPa	井筒半径 R_w/mm
A221	13.29	8.65	0.85	3.53	62.13
A114	10.13	9.99	0.82	3.39	62.13

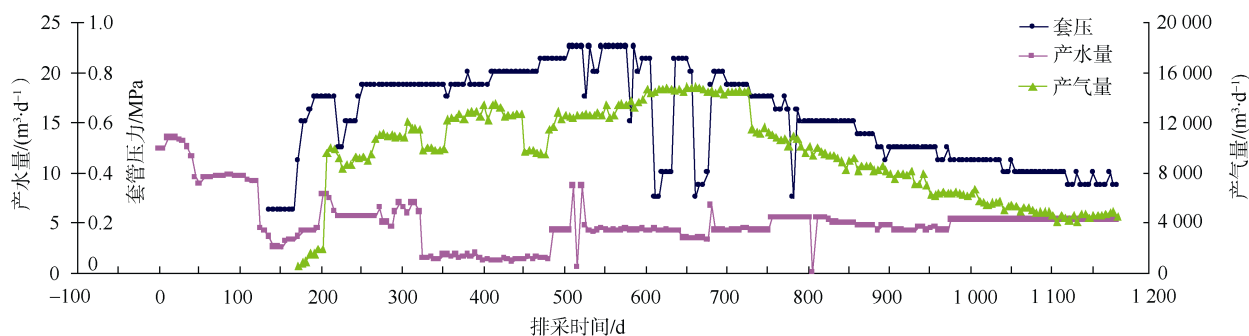


图4 A221 煤层气井排采曲线

Fig. 4 The drainage curve in coalbed methane well A221

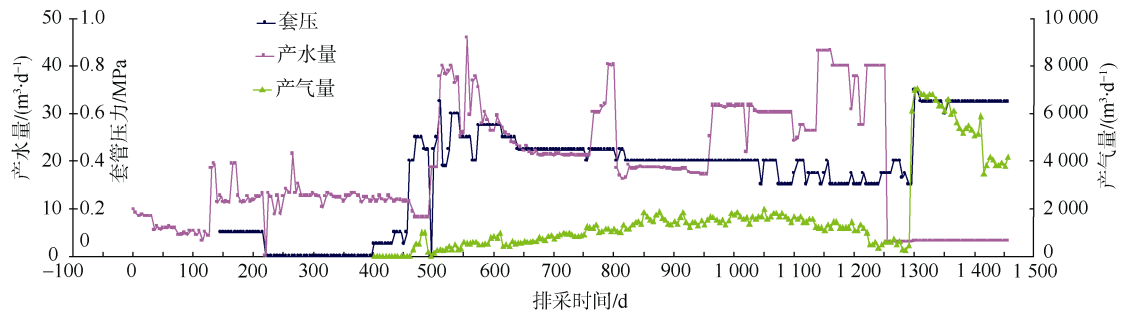


图 5 A114 煤层气井排采曲线

Fig. 5 The drainage curve in coalbed methane well A114

3.2 越流补给判识

应用式(4)和式(5)分别计算 A221 井见气前后的理论产水量,并分别与该井的实际产水量进行对比,结果见表 2。

从表 2 可以看出,见气前,A221 和 A114 井的实际产水量均低于理论产水量,受排采工作制度的控制,无法区分有无越流补给。见气后,A221 井的实际产水量低于理论产水量,并且由图 3 可知,开始产气后,产水量持续降低,其套压长时间高于 0.5 MPa,产气量保持较快增长,最高时达到 15 583 m³/d,A221

井在排采中无越流补给;而 A114 井在见气后,实际产水量是理论产水量 2.1 倍,并且由图 4 可知,开始产气后,产水量一直保持较高水平,且套压小于 0.1 MPa,动液面距井底 127 m 不再下降,属于压降在煤与围岩中同时传递的越流补给井。此后,A114 井提高产水量到 20~43.3 m³/d,经过近 1.5 a 的强化排水,套压上升至 0.4 MPa,动液面逐渐下降,产气量开始缓慢上升到 1 000 m³/d 以上,短时达到 7 200 m³/d,便降至 4 000 m³/d 左右。此时,煤层与顶底板含水层已共同降压。

表 2 A221 和 A114 井理论产水量与实际产水量对比

Table 2 The comparison between theoretical and real water production of wells A221 and A114

井号	见气前			见气后		
	影响半径 R_e/m	理论产水量 $Q_w/(m^3 \cdot d^{-1})$	实际产水量 $Q_e/(m^3 \cdot d^{-1})$	影响半径 R_e/m	理论产水量 $Q_w/(m^3 \cdot d^{-1})$	实际产水量 $Q_e/(m^3 \cdot d^{-1})$
A221	60	13.7	10.1	120	6.2	5.2
A114	50	12.9	7.3	100	5.8	12.2

4 结 论

a. 在排采过程中,煤层气越流补给井压降传递主要有 3 种类型,分别为压降主要在围岩中传递、压降在围岩和煤层中同时传递及压降主要在煤层中传递,其中第 1 种类型对煤层气产气量影响最大。

b. 当煤层气井不同排采阶段的实际产水量明显高于理论值,且产气开始时,保持产水量不变,若动液面升高后难以下降,此时可以快速判定该井存在越流补给。

c. 结合套压、井底流压、产水量和产气量变化规律,可以确定越流补给井的类型,并及时合理地调整后续排采制度。

参考文献

[1] THARAROOP P, KARPYN Z T, ERTEKIN T. Development of a multi-mechanistic, dual-porosity, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012(8): 121–131.
[2] 李金海,苏现波,林晓英,等. 煤层气井排采速率与产能的关系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 376–380.

[3] 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, 2009: 158170.
[4] KINNON E C P, GOLDING S D, BOREHAM C J, et al. Stable isotope and water quality analysis of coal bed methane production waters and gases from the Bowen Basin, Australia[J]. International Journal of Coal Geology, 2010(82): 219–231.
[5] 刘新福,慕耀光,胡爱梅,等. 单相水流动煤层气井流入动态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 960–966.
[6] 马东民,李卫波,蔺亚兵. 降压解吸关系式在中高阶煤层气排采中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(6): 697–701.
[7] 刘新福,慕耀光,刘春花,等. 气水两相流煤层气井井底流压预测方法[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 998–1003.
[8] 司庆红,朱炎铭,曹新款. 煤层气井排采初期井底压降的计算方法[J]. 中国煤层气, 2011, 8(1): 37–39.
[9] 倪小明,苏现波,魏庆喜,等. 煤储层渗透率与煤层气垂直井排采曲线关系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1194–1198.
[10] 陈天宇,梁冰,孙维吉,等. 复杂地质条件煤层气藏群井排采压力分布规律研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 603–608.
[11] 陈霞,刘洪林,王红岩,等. 沁水盆地含水煤层气藏的气体渗流特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 500–503.