

煤层气井排采过程中渗透率动态变化研究进展

吴财芳^{1,2} 张晓阳^{1,2}

(1. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 煤层气井排采过程中, 渗透率的动态变化决定着煤层气的运移和产出, 是控制煤层气井产能的核心因素。从排采过程中渗透率动态变化影响因素、渗透率动态变化规律等方面进行分析, 总结了国内外关于渗透率动态变化的普遍认识和最新进展, 并指出了研究过程中所存在的问题及今后的发展趋势。煤层气井排采过程中主要受到有效应力、煤基质收缩和克林肯伯格效应的影响, 导致渗透率总体呈现“先降低、后升高”的不对称“U”型变化。结合研究过程中存在的侧重点单一、作用阶段忽视、变化模型偏理论化等问题, 认为进一步结合实际排采数据, 细化各影响因素的不同作用阶段, 着重分析影响气、水产能的有效渗透率和相对渗透率变化规律, 完善储层尺度上的动态渗流过程, 为精细化定量排采控制提供可靠的理论支撑将是今后的研究重点。

关键词: 煤层气井; 排采过程; 渗透率变化; 渗流

中图分类号: P618.104

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)06-0007-07

Study progress of permeability dynamic variation in drainage process of coalbed methane well

Wu Caifang^{1,2} Zhang Xiaoyang^{1,2}

(1. MOE Key Lab of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Xuzhou 221008, China;

2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In the drainage process of the coalbed methane well, the dynamic variation of the permeability would determine the migration and output of the coalbed methane and would be the key factor to control the production capacity of the coalbed methane well. In the drainage process, an analysis was conducted on the dynamic variation factors affected to the permeability, the dynamic variation law of the permeability and other aspects. The paper summarized the general understanding and new progress on the dynamic variation of the permeability at home and abroad and pointed out the problems existed in the study process and the late development tendency. The effective stress, coal matrix shrinkage and Klinkenberg effect were mainly affected to the coalbed methane well in the drainage process and could cause the permeability to generally have an asymmetric U type variation with reduction first and then rising. In combination with the unitary emphasis, action stage neglected, bias theory to the model changed and other problems existed in the study process, the paper held that in a further combination with the actual drainage data, to fine the different action stage of each influence factor, to stress the analysis on the effective permeability rate and the relevant permeability variation law affected to the gas and water capacity and to improve the dynamic seepage process of the reservoir in dimension could provide the reliable theoretical support to the fine and quantitative drainage control and would be the late study emphasis.

Key words: coalbed methane well; drainage process; permeability variation; seepage

0 引 言

我国煤层气资源量巨大, 接近陆上天然气资源

量^[1-2]。煤层气的开发和利用对改善我国能源结构、环境保护和煤矿安全生产起到了至关重要的作用^[3]。截止到2014年底, 全国已完成钻进煤层气井

收稿日期: 2016-03-11; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.002

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044); 国家自然科学基金资助项目(41272178, 41572140)

作者简介: 吴财芳(1976—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师。E-mail: caifangwu@sina.com

引用格式: 吴财芳, 张晓阳. 煤层气井排采过程中渗透率动态变化研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 7-13.

Wu Caifang, Zhang Xiaoyang. Study progress of permeability dynamic variation in drainage process of coalbed methane well[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 7-13.

14 000 余口。但总体而言,我国现有煤层气生产井排采效果并不理想,单井日均产气量不足 500 m^3 ,大量煤层气排采井已经失效或接近失效,处于停产或半停产状态^[4-5]。在积极推进鄂尔多斯、滇东、黔西等新区块勘探开发的同时,更不能忽视现有煤层气井排采过程中所遇到的产能瓶颈问题。在排采过程中,煤储层渗透性异常敏感,受有效应力、煤基质收缩和克林肯伯格效应等因素的综合影响,使之变化规律异常复杂^[6-14]。而渗透性决定着煤层气的产出和运移,是控制煤层气井产能的关键。近年来,国内外学者通过物理试验模拟^[10,15-19]、数理模型推导^[20-28]、生产数据逆推^[15,29-31]等方法对煤层气井排采过程中渗透率动态变化过程进行了大量研究,在渗透率影响因素、变化规律等方面取得了显著成果。鉴于此,笔者在总结国内外研究资料的基础上,深入探讨各因素在排采过程中对渗透率动态变化的具体影响以及耦合效应,提出目前研究所存在的问题及未来的发展趋势,以期对煤层气精细化排采控制提供理论参考。

1 渗透率动态变化影响因素

煤储层具有由孔隙、裂隙组成的双重孔隙结构,气体主要以吸附态存在于煤基质孔隙表面,而渗流作用主要发生在裂隙系统中^[12]。渗透率是影响煤层气井产量的关键参数,其影响因素十分复杂,除受自身裂隙发育特征控制外,地质构造、应力状态、煤

层埋深、煤的演化程度、煤岩煤质特征、煤体结构及电场等都不同程度地影响着煤层渗透率的演化^[32-33]。但煤层气井井位一旦确定,储层原位渗透率即已确定,影响煤层气产出的核心因素即为在排采过程中渗透率的动态变化,如何揭示渗透率动态变化规律是排采过程理论研究的核心。大量研究表明,煤层气在排采过程中主要受有效应力、煤基质收缩及克林肯伯格效应的影响^[6-14]。

1.1 有效应力对渗透率的影响

随着煤层气井排水采气的进行,生产井筒内的动液面会不断下降,孔隙流体压力逐渐降低,导致煤体骨架承受的有效应力增加,使得孔隙体积变小、裂缝趋于闭合,进而造成煤岩渗透率逐步下降^[6]。关于渗透率随有效应力的具体变化规律,国内外学者利用三轴伺服渗流装置,在模拟地层温度和压力的情况下进行了大量的试验研究,获取了众多基于试验数据的渗透率随有效应力变化的函数关系式,大致可分为指数型^[16,34-37]、乘幂型^[38]及多项式型^[16,39]3种类型(表1)。

目前国内外学者普遍认为煤储层渗透率与有效应力呈负指数关系,且对于高煤阶低渗透性煤储层,此关系更为明显。有效应力对渗透率的“负效应”随着煤层气井气、水的产出不可避免,认清有效应力对煤储层渗透率的影响规律,对控制煤储层的应力敏感性和科学地提高煤层气气井产能十分必要。

表1 有效应力-渗透率耦合函数关系统计

Table 1 Statistics of effective stress - permeability coupling functions

类型	研究学者	函数关系式	备注
指数型	Harpalani 等 ^[16]	$K = A \exp(-B\sigma)$	K 为渗透率, σ 为静水压, A 和 B 为常数
	Seidle 等 ^[16]	$K_D/K_{D0} = \exp(-3c_f\sigma_h)$	K_D 为给定压力下渗透率, K_{D0} 为初始渗透率, c_f 为孔隙压缩系数, σ_h 为静水压力变化量
	傅雪海等 ^[34]	$K_e = K_0 \exp(-aP_e)$	K_e 为应力渗透率, K_0 为无应力渗透率, a 为拟合常数, P_e 为围压
	彭守建等 ^[36]	$K = A \exp(-B\sigma_e)$	K 为渗透率, A 和 B 为常数, σ_e 为有效应力
	李志强等 ^[35]	$K = K_0 \exp(\alpha_1 t - \alpha_2 \sigma_e)$	K 为在给定温度和有效应力条件下的渗透率, K_0 为初始渗透率, t 为时间, α_1 和 α_2 为试验拟合系数, σ_e 为有效应力
乘幂型	孟召平等 ^[37]	$K_n/K_0 = b \exp(-a\sigma_e)$	K_n 为给定条件下的渗透率, K_0 为初始渗透率, σ_e 为有效应力, a 和 b 为试验拟合系数
	肖文联 ^[38]	$K = a(\sigma_e)^b$	K 为渗透率, σ_e 为有效应力, a 和 b 为试验拟合系数
多项式型	姜德义等 ^[39]	$K = A_0 + A_1 p + A_2 p^2 + A_3 p^3$	K 为渗透率, p 为有效应力, A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 为试验拟合系数
	Singh ^[16]	$K = Ap^2 - Bp + C$	K 为渗透率, p 为气体压力, A 、 B 和 C 为试验拟合系数

1.2 煤基质收缩对渗透率的影响

和传统油气藏不同,煤层气以吸附状态赋存于

煤层之中,当储层压力小于临界解吸压力时,煤层气就会从煤基质表面解吸,从而导致煤基质体积收缩,

增加煤层割理宽度,使得煤层渗透率增大。傅雪海等^[40]采用控制有效应力的方法,利用氮气和甲烷的渗透率平行试验,证实煤基质收缩效应引起的渗透率增量随流体压力的减少而呈对数形式增大,且增大程度与煤储层绝对渗透率关系密切。彭守建等^[41]同样利用平行试验在消除有效应力和克林肯伯格效应的基础上,拟合出基质收缩效应引起的渗透率增量与瓦斯压力呈指数关系,且与煤力学性质密切相关。汤达祯等^[15]利用光学法吸附膨胀测量装置测定了高、中、低 3 个煤阶煤样在不同孔隙压力下吸附甲烷后的膨胀量,且试验结果验证了 Day 等^[42]提出的修正 DR 模型描述煤岩吸附膨胀量和孔隙压力之间关系的适用性。倪小明等^[43]建立了压缩效应与解吸效应相互影响下煤基质收缩数理模型,结合实际排采数据,认为气体产生的解吸效应对基质收缩量影响较之应力压缩效应的影响大,尤其是气、水两相流阶段,更应注意产气对煤基质收缩量的影响及其连带效应。

由于煤层气的吸附解吸是可逆的,通过对吸附膨胀量的研究即可得到解吸过程中的基质收缩量,大部分研究学者普遍认为吸附膨胀量与孔隙压力呈 Langmuir 方程的关系^[40,44-45]。结合火柴棍模型推导孔隙度变化量,进而利用孔隙度变化量与渗透率变化量的三次方关系,推导出煤基质收缩所引起的渗透率正效应变化量^[23-24,46]。由于煤基质收缩对渗透率的正效应是在煤层气解吸之后发生的,在排采过程中对于实际解吸点的确定尤为重要。

1.3 克林肯伯格效应对渗透率的影响

理论上讲,煤储层绝对渗透率与测试流体性质无关,即气测绝对渗透率与液测绝对渗透率应是相同的。但在实际分析测试中,一般气测渗透率均大

于液测渗透率,而且这种差异随着煤储层绝对渗透率的降低而增大,其主要原因是由于气体存在克林肯伯格效应(滑脱效应)^[47-49]。克林肯伯格效应是指气体在介质孔道渗流的过程中出现在靠近孔道壁表面的气体分子流速不为零,孔道壁面的气体分子与孔道中心的分子流速几乎没有差别的现象。研究表明,低压条件下克林肯伯格效应普遍存在,低渗储层尤其是特低渗储层克林肯伯格效应较强,气体、温度、束缚水饱和度等因素均对克林肯伯格效应有一定的影响^[50-51]。当储层渗透率较大、孔隙压力较高时,克林肯伯格效应可以忽略不计^[41,52]。也就是说,在煤层气井排采过程中,气体克林肯伯格效应对渗透率的正效应影响主要体现在煤层气井排采的中后期,对储层渗透率的改善具有一定的促进作用,但具体能对渗透率产生多大影响,需要结合储层物性特征具体分析^[17]。

2 渗透率动态变化规律

煤层气井排采过程中渗透率呈现出的动态变化是多种影响因素叠加下的综合表征,其具体变化规律尤为复杂。一方面,随着排水降压的进行,煤储层表现出较强的应力敏感性,导致渗透率减小;另一方面,煤层气的解吸产出导致煤基质收缩,导致渗透率增大。同时,由于煤储层渗透率相对较低,克林肯伯格效应的存在能够改善煤储层渗透率。国内外学者利用物理模拟试验和数理模型推导,结合实际排采数据对煤层气井排采过程中的渗透率动态变化规律进行了大量的研究,建立了一系列预测模型,主要包括基于应变变化模拟渗透率、基于应力变化模拟渗透率和基于实际生产数据模拟渗透率 3 类(表 2)。

表 2 渗透率动态变化模型类别统计

Table 2 Statistics of dynamic permeability change models

类型	代表性模型或研究学者	构建理论
应变变化模拟	Gray 模型、S&H 模型、Levine 模型、P&M 模型、ARI 模型 ^[53] 、张先敏等 ^[46] 、周军平等 ^[23] 、郭徽等 ^[11] 、王彩凤 ^[10] 、马飞英等 ^[54] 、张崇崇等 ^[26] 、朱启朋等 ^[27]	将有效应力的影响转化为对煤基质的体积应变,结合煤基质的体积应变,利用体积应变与孔隙度、孔隙度与渗透率之间的关系,建立渗透率动态变化模型
应力变化模拟	S&D 模型 ^[55] 、C&B 模型 ^[56] 、Robertson 等 ^[53] 、马东 ^[25] 、戚宇等 ^[28]	将煤基质收缩造成的体积应变转换为应力变化,利用应力变化与渗透率的关系建立渗透率动态变化模型
生产数据逆推	孟艳军等 ^[29] 、赖枫鹏等 ^[30] 、汤达祯等 ^[15] 、蔡振华等 ^[31]	结合物质平衡方程、连续流动方程和产能方程,利用实际排采数据反求渗透率,建立渗透率动态变化模型

由于克林肯伯格效应仅在储层压力较低的情况

下作用明显,且只是间接增大了储层的气体渗透率,

并未对储层物理性质造成任何改变,作用效果在实际生产中相对有限且作用阶段难以定量确定。因此,国内外学者在研究渗透率动态变化的过程中大都主要考虑有效应力和基质收缩效应,忽略了克林肯伯格效应对气体渗透率的影响。研究表明,煤层气井排采制度合理的情况下,压降漏斗得到有效传递,煤储层经历有效应力作用阶段、有效应力和煤基质收缩效应耦合作用阶段和有效应力、煤基质收缩、克林肯伯格效应综合作用阶段。煤层气井排采过程中渗透率呈现“先降低、后升高”的不对称“U”型变化(图1),但最终煤储层渗透率的反弹程度受到储层物性特征、煤体结构和排采制度等因素的共同影响。储层初始渗透率越低,开发初期应力敏感性越强,渗透率降低幅度相对越大,最终煤储层渗透率不能恢复至原始水平^[19];原生结构煤弹性模量大、硬度高,排采初期煤体应变较小,渗透率变化不大,后期基质收缩正效应可以起到充分作用,提高产气量。构造煤煤体破碎,渗透率恢复较原生结构煤缓慢,渗透率伤害较大^[7];排采初期排采制度制定不当,排采速率过快,有效应力会迅速增加,产生严重的压敏效应和速敏效应,进而对煤储层造成不可逆的伤害,导致渗透率无法反弹,气井产能严重下降。

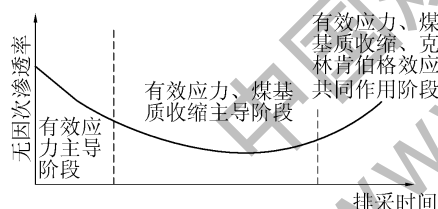


图1 不对称“U”型渗透率动态变化示意

Fig.1 Dynamic permeability change with an asymmetric “U” type

3 存在问题及研究趋势

煤层气井的排采是一个连续的排水降压过程,排采过程中储层流态会由单相流阶段变化为气水两相流动阶段,不同阶段煤储层的应力分布、流体系统都具有其特殊性。目前,国内外学者的研究大都集中于对煤储层绝对渗透率的分析,侧重点单一,并没有结合煤层气井排采过程中的不同流态和产出特征进行分阶段精细研究,缺乏气水两相流阶段对气、水有效渗透率和相对渗透率动态变化规律的研究^[13]。另外,现有渗透率动态变化模型大都忽视了煤基质

收缩和克林肯伯格效应的实际作用阶段,往往用一个模型描述整个动态变化过程,模型过于简化和概括,缺乏对不同排采阶段渗透率特征的细致描述。同时,现有模型大都偏理论推导,无法结合实际排采数据量化地确定实际渗透率的变化程度,对排采制度的制定无法提供量化的理论指导。

渗透性是影响煤层气产出的核心因素,是指导煤层气井精细化定量排采的理论基础,继续对排采过程中渗透率动态变化规律进行细化研究不可少。针对目前渗透率动态变化研究过程中所存在的问题,笔者认为研究重点将主要集中在以下3个方面。

1) 针对不同煤储层特征,细化各因素对排采过程中渗透率变化的具体作用阶段,分阶段、分影响因素,量化、精细化地研究动态变化规律。

2) 基于物理模拟试验和数值模拟方法,利用实际排采数据,着重分析排采过程中气、水有效渗透率和相对渗透率的动态变化规律,使预测模型与实际生产相结合。

3) 结合煤层气井排采过程中煤储层的压降扩展规律,分析储层尺度上的有效应力变化和基质体积变化,将渗透率动态变化的研究由点扩展到面,完善气、水在储层中的动态渗流过程,指导排采制度的制定。

4 结 语

近年来,国内外对煤层气井排采过程中渗透率的动态变化进行了大量研究,并取得了显著成果。在排采过程中,有效应力“负效应”、煤基质收缩“正效应”以及克林肯伯格效应对气相渗透率的改善作用已经取得共识,认为渗透率呈不对称“U”型变化。但我国煤储层具有低渗、高非均质性的特点,煤层气井生产状况复杂,进一步结合实际生产数据,细化各影响因素对不同煤储层的具体作用阶段,分析气、水有效渗透率和相对渗透率的动态变化规律,完善储层尺度上的动态渗流过程,可为精细化定量排采制度的制定、提高气井产能提供可靠的理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 李建忠,郑民,张国生,等.中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J].石油学报,2012,33(S1):89-98.
Li Jianzhong, Zheng Min, Zhang Guosheng, et al. Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 89-98.
- [2] 刘成林,朱杰,车长波,等.新一轮全国煤层气资源评价方法

- 与结果[J]. 天然气工业 2009 29(11): 130-132.
- Liu Chenglin, Zhu Jie, Che Changbo, *et al.* Methodologies and results of the latest assessment of coalbed methane resources in China [J]. Natural Gas Industry 2009 29(11): 130-132.
- [3] 刘洪林, 王洪岩, 张建博. 中国煤层气资源潜力及其勘探方向[J]. 石油勘探与开发 2001 28(1): 9-11.
- Liu Honglin, Wang Hongyan, Zhang Jianbo. Coalbed methane resource and its exploration direction in China [J]. Petroleum Exploration and Development 2001 28(1): 9-11.
- [4] 李国庆, 孟召平, 王保玉. 高煤阶煤层气扩散-渗流机理及初期排采强度数值模拟[J]. 煤炭学报 2014 39(9): 1919-1926.
- Li Guoqing, Meng Zhaoping, Wang Baoyu. Diffusion and seepage mechanisms of high rank coalbed methane reservoir and its numerical simulation at early drainage rate [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(9): 1919-1926.
- [5] 侯岗岗, 李玉魁. 我国煤层气井重复压裂综合技术探讨[C]//2014年中国地球科学联合学术年会——专题57:盆地动力学与非常规能源论文集. 北京: 中国地球物理学会 2014: 2455-2458.
- [6] 杜新锋. 煤层气排采过程中渗透率变化规律及动液面控制研究[J]. 煤炭工程 2015 47(7): 93-96.
- Du Xinfeng. Research on variation law of coal reservoir permeability and dynamic water level control in coalbed methane drainage [J]. Coal Engineering 2015 47(7): 93-96.
- [7] 杜新锋. 不同煤体结构煤储层煤层气排采中渗透率变化规律研究[J]. 煤矿安全 2015 46(6): 8-11.
- Du Xinfeng. Study on permeability change law of coalbed methane in coal reservoir with different coal structure in drainage process [J]. Safety in Coal Mines 2015 46(6): 8-11.
- [8] 邵先杰, 董新秀, 汤达祯, 等. 煤层气开发过程中渗透率动态变化规律及对产能的影响[J]. 煤炭学报 2014 39(S1): 146-151.
- Shao Xianjie, Dong Xinxu, Tang Dazhen, *et al.* Permeability dynamic change law and its effect on productivity during coalbed methane development [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(S1): 146-151.
- [9] 陶树. 沁南煤储层渗透率动态变化效应及气井产能响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京) 2011: 74-76.
- [10] 王彩凤. 煤层气开发过程中渗透率变化规律及对产量的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学 2013: 48-50.
- [11] 郭徽, 房新亮, 王雪颖, 等. 煤层气井排采时储层渗透率变化特征研究[J]. 煤炭科学技术 2013 41(1): 82-83 88.
- Guo Hui, Fang Xinliang, Wang Xueying, *et al.* Study on permeability rate variation features of mine coalbed methane reservoir during gas drainage process of coalbed methane well [J]. Coal Science and Technology 2013 41(1): 82-83 88.
- [12] 刘峻杉. 煤储层渗透率影响因素探讨[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版 2014 31(2): 100-104.
- Liu Junshan. The influencing factors of coal reservoir permeability [J]. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition 2014 31(2): 100-104.
- [13] Chen Yaxi, Liu Dameng, Yao Yanbin, *et al.* Dynamic permeability change during coalbed methane production and its controlling factors [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering 2015, 25: 335-346.
- [14] Tao Shu, Wang Yanbin, Tang Dazhen, *et al.* Dynamic variation effects of coal permeability during the coalbed methane development process in the Qinshui Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology 2012 93(4): 16-22.
- [15] 汤达祯, 刘大锰, 唐书恒, 等. 煤层气开发过程储层动态地质效应[M]. 北京: 科学出版社 2014.
- [16] 马强. 煤层气储层渗透率变化规律理论与试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京) 2011: 60-75.
- [17] 汪吉林, 秦勇, 傅雪海. 多因素叠加作用下煤储层渗透率的动态变化规律[J]. 煤炭学报 37(8): 1348-1353.
- Wang Jilin, Qin Yong, Fu Xuehai. Dynamic changes laws of the coal reservoirs permeability under the superimposition of multi-influential factors [J]. Journal of China Coal Society 37(8): 1348-1353.
- [18] 李俊乾, 刘大锰, 姚艳斌, 等. 气体滑脱及有效应力对煤层气相渗透率的控制作用[J]. 天然气地球科学 2013 24(5): 1074-1078.
- Li Junqian, Liu Dameng, Yao Yanbin, *et al.* Controls of gas slippage and effective stress on the gas permeability of coal [J]. Natural Gas Geoscience 2013 24(5): 1074-1078.
- [19] 陈振宏, 陈艳鹏, 杨焦生, 等. 高煤阶煤层气储层动态渗透率特征及其对煤层气产量的影响[J]. 石油学报 2010 31(6): 966-969 974.
- Chen Zhenhong, Chen Yanpeng, Yang Jiaosheng, *et al.* Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane and its effect on the coalbed methane output [J]. Acta Petrolei Sinica 2010 31(6): 966-969 974.
- [20] Xu Hao, Tang Dazhen, Tang Shuheng, *et al.* A dynamic prediction model for gas-water effective permeability based on coalbed methane production data [J]. International Journal of Coal Geology 2014 121: 44-52.
- [21] Shi Jiquan, Pan Zhejun, Sevet Durucan. Analytical models for coal permeability changes during coalbed methane recovery: model comparison and performance evaluation [J]. International Journal of Coal Geology 2014 136: 17-24.
- [22] Liu Shimin, Satya Harpalani. Permeability prediction of coalbed methane reservoirs during primary depletion [J]. International Journal of Coal Geology 2013 113: 1-10.
- [23] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 考虑有效应力和煤基质收缩效应的渗透率模型[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版 2009 31(1): 4-8.
- Zhou Junping, Xian Xuefu, Jiang Yongdong, *et al.* A permeability model considering the effective stress and coal matrix shrinking effect [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition 2009 31(1): 4-8.
- [24] 艾池, 栗爽, 李净然, 等. 煤层储层渗透率动态变化模型

- [J]. 特种油气藏 2013 20(1): 71-73.
- Ai Chi ,Li Shuang ,Li Jingran ,*et al.* Models of dynamic permeability variation of coal seam[J]. Special Oil and Gas Reservoirs , 2013 20(1): 71-73.
- [25] 马 东. 煤层渗透率变化规律和气润湿反转方法提高煤层气产量研究[D]. 荆州: 长江大学 2013: 46-49.
- [26] 张崇崇, 王延斌, 倪小明, 等. 煤层气直井排采过程中渗透率变化规律研究[J]. 中国矿业大学学报 2015 44(3): 520-525.
- Zhang Chongchong ,Wang Yanbin ,Ni Xiaoming ,*et al.* Research on permeability variation law of coal reservoir in drainage process of CBM vertical wells[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2015 44(3): 520-525.
- [27] 朱启朋, 桑树勋, 刘世奇, 等. 煤储层渗透率动态变化模型与模拟研究[J]. 西安科技大学学报 2015 35(1): 9-14.
- Zhu Qipeng ,Sang Shuxun ,Liu Shiqi ,*et al.* Dynamic variation model of reservoir permeability during the development of coalbed methane[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology 2015 35(1): 9-14.
- [28] 戚 宇, 韦重韬, 邹明俊. 煤储层渗透率变化新模型及控制因素研究[J]. 煤炭工程 2015 47(2): 99-101.
- Qi Yu ,Wei Chongtao ,Zou Mingjun. A new model for variation of coal seam permeability and study on influence factors[J]. Coal Engineering 2015 47(2): 99-101.
- [29] 孟艳军, 汤达祯, 李治平, 等. 高煤阶煤层气井不同排采阶段渗透率动态变化特征与控制机理[J]. 油气地质与采收率, 2015 22(2): 66-71.
- Meng Yanjun ,Tang Dazhen ,Li Zhiping ,*et al.* Dynamic variation characteristics and mechanism of permeability in high-rank CBM wells at different drainage and production stages[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency 2015 22(2): 66-71.
- [30] 赖枫鹏, 李治平, 张跃磊, 等. 利用排采数据计算煤层渗透率的方法[J]. 重庆大学学报 2014 37(3): 101-107.
- Lai Fengpeng ,Li Zhiping ,Zhang Yuelei ,*et al.* A calculation method for coalbed permeability by using drainage data[J]. Journal of Chongqing University 2014 37(3): 101-107.
- [31] 蔡振华, 廖新维, 杜志强, 等. 煤层气排采时渗透率动态特征研究[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版 2014 33(2): 149-153.
- Cai Zhenhua ,Liao Xinwei ,Du Zhiqiang ,*et al.* Research method for dynamic permeability of coalbed methane reservoir[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science ,2014 33(2): 149-153.
- [32] 叶建平, 史保生, 张春才. 中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J]. 煤炭学报 1999 24(2): 118-122.
- Ye Jianping ,Shi Baosheng ,Zhang Chuncai. Coal reservoir permeability and its controlled factors in China[J]. Journal of China Coal Society 1999 24(2): 118-122.
- [33] 杨 起, 汤达祯. 华北煤变质作用对煤含气量和渗透率的影响[J]. 地球科学 2005 25(3): 273-277.
- Yang Qi ,Tang Dazhen. Effect of coal metamorphism on methane content and permeability of coal in north China[J]. Earth Science 2005 25(3): 273-277.
- [34] 彭守建, 许 江, 陶云奇, 等. 煤样渗透率对有效应力敏感性实验分析[J]. 重庆大学学报 2009 32(3): 303-307.
- Peng Shoujian ,Xu Jiang ,Tao Yunqi ,*et al.* Coefficient of sensitivity between permeability and effective pressure of coal samples[J]. Journal of Chongqing University 2009 32(3): 303-307.
- [35] 李志强, 鲜学福, 隆晴明, 等. 不同温度应力条件下煤体渗透率试验研究[J]. 中国矿业大学学报 2009 38(4): 523-527.
- Li Zhiqiang ,Xian Xuefu ,Long Qingming ,*et al.* Experiment study of coal permeability under different temperature and stress[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2009 38(4): 523-527.
- [36] 傅雪海, 秦 勇, 姜 波, 等. 山西沁水盆地中-南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟[J]. 地质科学 2003 38(2): 221-229.
- Fu Xuehai ,Qin Yong ,Jiang Bo ,*et al.* Physical and numerical simulations of permeability of coal reservoirs in central and southern part of the Qinshui Basin ,Shanxi[J]. Chinese Journal of Geology 2003 38(2): 221-229.
- [37] 孟召平, 侯泉林. 煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析[J]. 煤炭学报 2012 37(3): 430-437.
- Meng Zhaoping ,Hou Quanlin. Experimental research on stress sensitivity of coal reservoir and its influencing factors[J]. Journal of China Coal Society 2012 37(3): 430-437.
- [38] 许 江, 曹 偲, 李波波, 等. 煤岩渗透率对孔隙压力变化响应规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2013 32(2): 225-230.
- Xu Jiang ,Cao Jie ,Li Bobo ,*et al.* Experimental research on response law of permeability of coal to pore pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,2013 32(2): 225-230.
- [39] 姜德义, 张广洋, 胡耀华, 等. 有效应力对煤层气渗透率影响的研究[J]. 重庆大学学报: 自然科学版 1997 20(5): 22-25.
- Jiang Deyi ,Zhang Guangyang ,Hu Yaohua ,*et al.* Study on affection to permeability of gas of coal layers by effective stress[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition ,1997 ,20(5): 22-25.
- [40] 傅雪海, 李大华, 秦 勇, 等. 煤基质收缩对渗透率影响的试验研究[J]. 中国矿业大学学报 2002 31(2): 129-131, 137.
- Fu Xuehai ,Li Dahua ,Qin Yong ,*et al.* Experimental research of influence of coal matrix shrinkage on permeability[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2002 31(2): 129-131, 137.
- [41] 彭守建, 许 江, 尹光志, 等. 基质收缩效应对含瓦斯煤渗流影响的实验分析[J]. 重庆大学学报 2012 35(5): 109-114.
- Peng Shoujian ,Xu Jiang ,Yin Guangzhi ,*et al.* Experimental analysis of matrix shrinkage's influence on mechanical permeability of gas-filled coal[J]. Journal of Chongqing University 2012 35

- (5): 109 – 114.
- [42] Day S, Fry R, Sakurovs R *et al.* Swelling of coals by supercritical gases and its relationship to sorption[J]. *Energy & Fuels* 2010, 24(4): 2777 – 2783.
- [43] 倪小明, 张崇崇, 王延斌, 等. 气水两相流阶段煤基质收缩量预测方法[J]. *煤炭学报* 2014, 39(S1): 174 – 178.
Ni Xiaoming, Zhang Chongchong, Wang Yanbin *et al.* Prediction of coal matrix shrinkage in gas – water two – phase flow stage[J]. *Journal of China Coal Society* 2014, 39(S1): 174 – 178.
- [44] Day S, Fry R, Sakurovs R. Swelling of australian coals in supercritical CO₂ [J]. *International Journal of Coal Geology* 2008, 74(1): 41 – 52.
- [45] Pini R, Ottiger S, Burlini L *et al.* CO₂ storage through ECBM recovery: An experimental and modeling study[J]. *Energy Procedia* 2009, 1(1): 1719 – 1726.
- [46] 张先敏, 同登科. 考虑基质收缩影响的煤层气流动模型及应用[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学* 2008, 38(5): 790 – 796.
Zhang Xianmin, Tong Dengke. Coalbed methane transfusion model and its application with matrix shrinkage[J]. *Science in China (Series E): Technological Sciences* 2008, 38(5): 790 – 796.
- [47] Alireza Ashrafi Moghadam, Rick Chalaturnyk. Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media[J]. *International Journal of Coal Geology* 2014, 123: 2 – 9.
- [48] 肖晓春, 潘一山. 低渗煤储层气体滑脱效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报* 2008, 27(S2): 3509 – 3515.
Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Experimental study on gas slippage effects in hypotonic coal reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2008, 27(S2): 3509 – 3515.
- [49] 覃建华, 肖晓春, 潘一山, 等. 滑脱效应影响的低渗储层煤层气运移解析分析[J]. *煤炭学报* 2010, 35(4): 619 – 622.
Qin Jianhua, Xiao Xiaochun, Pan Yishan *et al.* Analytical solution of coalbed methane migration with slippage effects in hypotonic reservoir[J]. *Journal of China Coal Society* 2010, 35(4): 619 – 622.
- [50] 章星, 杨胜来, 章玲, 等. 低渗透气藏克氏渗透率影响因素室内试验研究[J]. *油气地质与采收率* 2012, 19(3): 81 – 83.
Zhang Xing, Yang Shenglai, Zhang Ling *et al.* Experimental study on factors of Klinkenberg permeability in low permeable gas reservoir[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency* 2012, 19(3): 81 – 83.
- [51] 肖晓春, 潘一山, 于丽艳. 水饱和度作用下低渗透气藏滑脱效应试验研究[J]. *水资源与水工程学报* 2010, 21(5): 15 – 19.
Xiao Xiaochun, Pan Yishan, Yu Liyan. Experiment of slippage effect under water saturation in hypotonic coalbed[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering* 2010, 21(5): 15 – 19.
- [52] 罗瑞兰, 程林松, 朱华银, 等. 研究低渗气藏气体滑脱效应需注意的问题[J]. *天然气工业* 2007, 27(4): 92 – 94.
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Zhu Huayin *et al.* Problems on the study of slippage effect in low – permeability gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry* 2007, 27(4): 92 – 94.
- [53] 邹明俊. 三孔两渗煤层气产出建模及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学 2014: 5 – 8.
- [54] 马飞英, 王永清, 王林, 等. 考虑水分含量的煤岩渗透率动态变化特征[J]. *天然气地球科学* 2014, 25(9): 1477 – 1482.
Ma Feiying, Wang Yongqing, Wang Lin *et al.* The permeability dynamic variation features of coals with the consideration of moisture content[J]. *Natural Gas Geoscience* 2014, 25(9): 1477 – 1482.
- [55] Shi J Q, Durucan S A. Model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 2005, 8(4): 291 – 299.
- [56] Cui X, Bustin R M. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 2005, 89(9): 1181 – 1202.

(上接第6页)

- [21] 杨广文, 艾兴, 姜进军, 等. 大流量惰气与惰泡灭火工艺[J]. *煤矿安全* 2011, 42(7): 52 – 53.
Yang Guangwen, Ai Xing, Jiang Jinjun. Mine fire extinguishing technology for large flow of inert gas and inert foam[J]. *Safety in Coal Mines* 2011, 42(7): 52 – 53.
- [22] 徐精彩, 文虎, 张辛亥, 等. 综放面采空区遗煤自燃危险区域判定方法的研究[J]. *中国科学技术大学学报* 2002, 32(6): 672 – 677.
Xu Jingcai, Wen Hu, Zhang Xinhai *et al.* Study on the method for determining dangerous zones of coal self – ignition in gobs in a fully mechanized top – coal caving face [J]. *Journal of University of Science and Technology of China* 2002, 32(6): 672 – 677.
- [23] 宋文忠. 无机固化粉煤灰应用技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2004, 32(9): 64 – 67.
Song Wenzhong. Study on applied technology of inorganic solidified fly ash[J]. *Coal Science and Technology* 2004, 32(9): 64 – 67.
- [24] 段西凯. 基于正逆双向模拟的采空区隐蔽火源探测技术[J]. *煤矿安全* 2014, 45(10): 51 – 54.
Duan Xikai. Fire detection technology of gob hidden source based on forward and inverse two – way simulation [J]. *Safety in Coal Mines* 2014, 45(10): 51 – 54.
- [25] 许延辉, 金永飞, 李海涛, 等. 浅埋深煤层近距离采空区隐蔽火源探测及控制技术[J]. *煤矿安全* 2014, 45(9): 144 – 147.
Xu Yanhui, Jin Yongfei, Li Haitao *et al.* Hidden fire detection and control technology in shallow distance seam group gob [J]. *Safety in Coal Mines* 2014, 45(9): 144 – 147.