

文章编号: 1001-1986(2009)02-0001-05

# 煤层瓦斯渗流特性研究进展

陶云奇, 许江, 李树春, 彭守建

(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:** 针对非线性瓦斯流动理论和煤层瓦斯流固耦合理论存在的问题, 以及越来越多高温矿井引发的瓦斯灾害治理难题, 在综述煤层瓦斯渗流研究进展的基础上, 对国内外学者在非线性瓦斯流动理论、地温场效应的瓦斯流动理论以及煤层-瓦斯流固耦合理论 3 方面的研究成果给予了重点评述, 展望了地球物理场作用下煤层瓦斯渗流特性研究领域的发展趋势。研究显示, 在非线性瓦斯渗流、深部开采引起的高温和低渗透问题以及煤层瓦斯的流固耦合问题等方面, 还需做更深层次的探索。

**关键词:** 瓦斯渗流; 非线性; 地球物理场; 流固耦合

**中图分类号:** TD712.51; P618.11 **文献标识码:** A

## Advances in study on seepage flow property of coalbed methane

TAO Yunqi, XU Jiang, LI Shuchun, PENG Shoujian

(Key Lab. for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In the view of problems in non-linear methane seepage flow theory and coalbed methane liquid & solid coupling theory, and difficulties of methane control in the more and more high temperature mines, based on summarizing the study evolution of coalbed methane seepage flow at home and abroad, non-linear methane seepage flow theory, earth temperature field effect and methane seepage flow theory, and coalbed methane liquid & solid coupling theory were reviewed especially, and the development trend of research on coalbed methane seepage flow under the effect of geophysical field was indicated. The results showed that deeper study is required in the problem of non-linear methane seepage flow, the problem of high temperature and low permeability methane seepage flow with deep mining and coalbed methane liquid and solid coupling for solving effectively the problem of coal bed methane seepage flow in production.

**Key words:** coalbed methane seepage flow; non-linear; geophysical field; liquid and solid coupling

众所周知, 煤是孔隙-裂隙双重介质, 与煤伴生共存的瓦斯以吸收、吸附和游离状态赋存于煤层中。影响煤层瓦斯运移和富集的主控因素主要为所在区域的煤岩性质、煤系地层的地球物理场及地质构造。采矿活动虽不会改变所在区域的煤岩性质和地质构造格局, 但必然会引起局部地球物理场发生变化, 从而导致煤层中本已平衡的瓦斯再次发生迁移和重新分布。目前, 研究瓦斯在煤层中运移的理论主要有以斐克定律(Fick's Law)为基础的扩散理论和以达西定律(Darcy's Law)为基础的渗流理论。

煤层瓦斯渗流力学是专门研究瓦斯在煤层中运动规律的一门新兴的边缘学科。自该学科提出至今, 已发展起来的理论成果有线性瓦斯流动理论、线性

瓦斯扩散理论、瓦斯扩散-渗透理论、非线性瓦斯流动理论、地球物理场效应的瓦斯流动理论、多煤层系统瓦斯越流理论和煤层瓦斯流固耦合理论<sup>[1]</sup>。目前, 普遍公认的 3 个主要发展趋势或研究热点为: a. 非线性、非达西渗流问题; b. 深部开采引起的井下高温和低渗透问题; c. 煤层瓦斯的流固耦合问题。基于此, 本文将以非线性瓦斯流动理论、地球物理场效应的瓦斯流动理论以及煤层瓦斯流固耦合理论这 3 方面为重点, 对国内外学者的研究成果给予评述。

### 1 非线性瓦斯流动理论

线性瓦斯流动理论虽说较为成熟, 但其有一定的适用范围, 即雷诺数在 1~10 之间的线性层流区,

收稿日期: 2008-05-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534080); 重庆市科技攻关计划重大项目(CSCT, 2006AA7002)

作者简介: 陶云奇(1979—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事安全技术及工程和渗流力学方面的研究。

超过该范围区域, Darcy's Law 将不再适用。多数学者认为, Darcy's Law 偏离的原因主要有流量过大、分子效应、离子效应和流体本身的非牛顿态势。随着煤层瓦斯流动理论研究的不断深入, 其发展趋势越来越偏向地球物理场作用下的非线性、非达西渗流问题, 其中最典型的理论模型为幂定律(Power Law)模型。

1984 年, 日本学者通口澄志对高鸟、夕张等矿的块状煤样进行了瓦斯渗透实验。实验通过变化压差测定煤样瓦斯渗透率, 指出 Darcy's Law 不太符合瓦斯流动规律, 并在大量试验研究的基础上提出了 Power Law 理论。该理论的实质是瓦斯流动速度和瓦斯压力梯度的  $m$  次幂成正比, 其适用范围主要为雷诺数在 10~100 之间的非线性层流区。Power Law 理论的提出引起学者们的广泛关注。1987 年, 国内学者孙培德<sup>[2]</sup>根据 Power Law 的推广形式, 在均质煤层和非均质煤层条件下, 首次建立起可压缩性瓦斯在煤层内流动的数学模型——非线性瓦斯流动模型, 并以焦作矿务局中马村矿的实测瓦斯参数为依据, 对均质瓦斯渗流场的压力分布作了 3 类不同模型的数值模拟。经与实测值比较表明, 该文提出的非线性瓦斯流动模型比文献[3]提出的以瓦斯体积守恒为基础建立的线性瓦斯流动模型更符合实际<sup>[2,4]</sup>。进而初步提出 Power Law 更符合煤层瓦斯流动基本规律的观点。随后, 孙培德<sup>[5-6]</sup>又在焦作中马村矿 23051 采面准备煤巷的实测煤层物性参数和瓦斯动力参数基础上, 对 5 种不同模型进行了数值模拟, 认为文献[2]提出的非线性瓦斯流动模型所模拟的瓦斯压力分布值与实测的瓦斯压力最吻合, 从而证明文献[2]所提出的非线性瓦斯流动模型比国内外其他 4 种模型更逼近实际, 更具实用性。

然而, 随着研究的深入, 加之学术观点的分歧或当时实验条件的限制, 对非线性瓦斯流动理论也产生了争议。时隔 2 a, 文献[7]尖锐地指出文献[2]所建立的瓦斯运动方程存在无量纲化导致的错误、幂定律表达式的错误和假设无因次系数  $A$  是二秩对称张量的错误。这是因为文献[2]对 Power Law 的无量纲化, 实质上是要解决无因次系数  $A$  值量纲不一致的问题, 但由于无量纲化过程的主观性, 不但没有减少变量个数, 反而因缺乏客观物理基础导致整个方程组内单位制的混乱。同时, 文献[2]中所述的 Power Law 数学表达式为:

$$q = -A \left( \frac{dP}{dx} \right)^m, \quad (1)$$

式中  $q$  为瓦斯在  $x$  点的比流量;  $m$  为渗透指数。

然而, 在一维情形下考察式(1)则会发现: 若  $\frac{dP}{dx} > 0$

时, 则式(1)能正确地表达幂定律的物理实质; 但若  $\frac{dP}{dx} < 0$  时, 式(1)则出现错误。因为在  $\frac{dP}{dx} < 0$ , 当  $m$  为正整数且是偶数时,  $q < 0$ , 其物理含义是瓦斯流向和压力梯度同方向, 瓦斯从低压流向高压, 违背热力学第二定律, 显然错误; 当  $m$  为整数且是奇数时, 该式无物理意义。同时, 在三维情况下, 文献[2]把  $m$  看作是与瓦斯状态有关的参数, 那么在把煤层瓦斯视为理想气体的条件下, 空间任一点的瓦斯状态均可由瓦斯压力和温度决定, 即当恒温时, 只要瓦斯压力相同,  $m$  值就相同, 而和煤的性质无关, 这和通口澄志的实验结果相矛盾。根据通口澄志的实验结果,  $m$  值只决定于煤层本身的性质, 所以在 Power Law 表达式里, 当介质非均质和各向异性时,  $m$  取不同的值,  $A$  的 9 个分量应具有不同的量纲, 不可能是二秩对称张量。所以文献[7]认为, 文献[2]在 Power Law 基础上推出的非线性瓦斯流动模型是错误的, 依据该模型的数值结果得出“Power Law 比 Darcy's Law 更符合实际”的观点并不成立。

随着科学研究的深入, 在以上两种理论中出现了极大的学术分歧, 学者们各持己见。以 Power Law 为基础的非线性瓦斯流动理论, 是否真的比基于 Darcy's Law 的线性瓦斯流动理论更适用于瓦斯在煤层中的流动情况, 目前还难以断定。但不可否认的是, 目前煤层瓦斯渗流研究(领域)的发展趋势的确是在地球物理场作用下的非线性、非达西渗流方面的研究。

## 2 地球物理场效应下的瓦斯渗流特性

本文中的地球物理场指地应力场、地电场和地温场。地壳中岩层和煤层都处在地球物理场作用下, 彼此之间互为影响, 当地壳中的构造或物质发生变化时, 势必引起局部地球物理场的异常, 进而影响煤层瓦斯的运移状态。随着煤矿开采深度的加大, 由深部地球物理场引发的井下煤层高温、低渗透等问题越来越引起采矿界学者们的关注, 其中尤以高温矿井的煤层瓦斯运移规律为重。

### 2.1 地应力场和地电场效应

关于国内外学者对地应力作用下煤层瓦斯运移方面的研究报道较多<sup>[8-16]</sup>, 成果也相对成熟, 且观点基本趋于一致, 即煤层渗透性敏感地依赖于地应力, 在高应力区渗透率低, 低应力区渗透率高。如文献[12]通过对阳泉、平顶山等 10 多个矿区煤层气井的试井实测渗透率与原地最小主应力进行了相关研究, 发现在应力松弛区, 渗透率高, 随深度增加, 变化幅度不大; 正常应力区, 渗透率中等, 随深度增加而减少; 在高应力区, 渗透率较低, 且随深度

的增加渗透率急剧减小。出现这种现象的原因是：在应力松弛区，煤层中起渗透作用的宏观裂隙尚未被完全压实闭合，而此区的应力梯度也较小，随深度的增加，应力变化幅度也较小，故渗透率变化幅度不大；而在高应力区(为应力集中带)，无论是构造应力还是地应力均较集中，裂隙闭合程度和应力梯度值均较大，与应力松弛区相比，增加同样的深度，施加在煤体上的外力就较大，所以渗透率急剧减小。这表明在不同应力状态下渗透率与深度的变化趋势不同，这也为由深部开采引起的高地应力和高温状态下瓦斯渗透的研究奠定了基础。

地电场时刻存在于含瓦斯煤体的空间，它亦是含瓦斯煤体渗流特性的重要影响因素之一。国外在此领域的研究成果较少，国内以重庆大学鲜学福院士为首的课题组在此方面研究较多<sup>[17-23]</sup>，其研究重点主要在地电场作用下煤对瓦斯的吸附和煤层渗透率方面。尽管取得的一些成果对煤与瓦斯突出机理和低渗透煤层的瓦斯抽放理论研究起到了有益推动作用，但美中不足的是所有的研究成果均局限在理论研究层面，没有在生产现场进行推广应用，亦未见现场实测数据对其验证，因此其实用性有待进一步探讨。

## 2.2 地温场效应

地温测试表明，在恒温带以下，地温随煤层埋深增加大致呈线性关系增加。井下采矿活动的延深致使大量高温矿井出现，如平煤八矿在5-9月份井下局部作业地点环境温度高达40~45℃。高温现象不仅严重威胁作业人员的健康，而且对井下煤层中的瓦斯运移也影响很大。国内外在这方面的报道相对较少，主要集中在瓦斯渗透率和瓦斯吸附与温度关系方面，而且多是室内实验研究。

文献[24]在围压不变的情况下，利用三轴渗流实验装置分别在20、30、40、50℃测定了瓦斯气体渗流量，经所测数据分析得出，煤层瓦斯渗流率 $K$ 与煤体温度 $t$ 成幂函数关系：

$$K=K_0(1+t)^n, \quad (2)$$

式中 $n$ 为试验常数； $K_0$ 为理论上煤体温度 $t$ 为零时的 $K$ 值。但是，文献[25]经实验研究发现，随着温度的升高，煤样瓦斯的渗透率减低，渗透率的对数与温度成线性关系：

$$\ln K=A+Bt, \quad (3)$$

式中 $K$ 为煤层瓦斯渗透率； $t$ 为温度； $A$ 、 $B$ 为常数。

尽管以上两篇文章在瓦斯渗透率与温度之间的函数关系表面上不同，但所得的规律现象却是相同的。因为若将式(3)取泰勒级数展开并忽略高阶项的

话，则可得到关系式 $K=K_0'(1+nt)$ ，这与式(2)的展开式 $K=K_0'(1+nt)$ 相同。由此可见，式(2)、式(3)在低阶项都可用来描述煤层瓦斯渗透率与温度的关系，说明两项研究所得的结果吻合。该现象的发生，是因为随着温度升高，煤体骨架发生膨胀变形，煤层瓦斯流动通道缩小；另一方面，随着温度升高，煤层瓦斯的粘度降低，致使煤层瓦斯渗透率降低。

在研究煤层瓦斯渗透率与地温之间的关系时，虽然能够取得基本一致的观点，但在探讨Langmuir方程吸附常数 $a$ 、 $b$ 随温度变化的关系时，却出现严重分歧的观点。例如，文献[26]通过不同温度下的吸附实验研究发现， $a$ 值随温度 $T$ 升高而降低， $b$ 值随温度 $T$ 升高而呈波动性变化(图1)，拟合其数学表达式为：

$$\begin{cases} a=c_0+c_1T+c_2T^2 \\ b=d_0+c_1dT+d_2T^2+d_3T^3 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 为实验系数。但是，前苏联学者B.B.Ходот的实验资料显示， $a$ 值基本上不随温度而变化， $b$ 值则随温度的增高而减小<sup>[27]</sup>。另外，国内学者陈昌国<sup>[28]</sup>、张庆玲<sup>[29]</sup>和钟玲文等<sup>[30]</sup>的研究结论也与文献[27]相同。单从试验实测数据分析，文献[26]在温度 $T<40$ ℃时，吸附常数 $b$ 值与文献[27-30]有同样的规律——随温度的升高 $b$ 值减小，但在45℃时 $b$ 值却突然增大，这有悖于文献[26]的结论—— $b$ 值随温度升高而呈波浪形曲线关系，这有待进一步深入研究和论证。

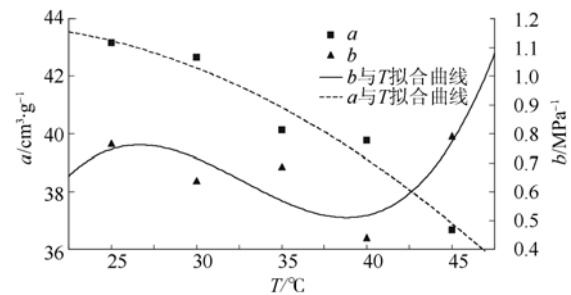


图1 吸附常数 $a$ 、 $b$ 与温度 $T$ 的关系

Fig. 1 The dependence of adsorption constant( $a$  and  $b$ ) on temperature ( $T$ )

随着煤气田的开发和煤矿采深的增加，深部煤层的瓦斯压力和地温均明显升高，温度对煤吸附瓦斯的影响已不容忽视。因此，相关研究对准确预测煤层气含量将起到关键性作用。

## 3 煤层瓦斯流固耦合理论

在煤层开采过程中，煤体骨架所受应力发生的变化，导致煤体骨架的体积和孔隙变化，从而使煤

层孔隙内瓦斯压力亦发生变化,而瓦斯压力的变化又引起煤体吸附瓦斯发生变化,并使煤体骨架所受的有效应力发生了变化,由此导致岩石特性变化;另一方面,这些变化又反过来影响瓦斯在煤层中的流动和压力的分布。周世宁院士<sup>[3,31]</sup>指出,在含瓦斯煤层的开采过程中,煤层变形和瓦斯(在煤层中的)流动都是在固流耦合作用下发生的。因此,要使煤层瓦斯流动理论的研究更符合实际,必须研究煤层瓦斯的流固耦合作用,即考虑煤层瓦斯系统内应力场与渗流场之间的相互耦合作用。国内学者在此领域做的研究与探索相对较多。如文献[32]根据固体变形和煤层瓦斯渗流的相关理论,建立了煤层瓦斯固气耦合数学模型,并结合实际分析了巷道瓦斯涌出规律,提出了模型的数值解法。梁冰等<sup>[33]</sup>在考虑瓦斯吸附变化对煤体本构关系影响的基础上,建立了煤层瓦斯吸附变化对煤体变形耦合作用的数学模型,对采动影响情况下瓦斯在采空区的流动规律进行了数值模拟分析,为采空区煤层瓦斯抽放提供了科学依据。汪有刚<sup>[34]</sup>将渗流力学与弹塑性力学相结合,考虑煤层瓦斯和煤体骨架之间的相互作用,建立了煤层瓦斯运移的数学模型,并根据有限元法原理推出了耦合模型求解方法。

尽管以上研究成果为煤层瓦斯流动理论的深入研究奠定了坚实的基础,但不足的是这些成果只考虑了应力场与渗流场的耦合作用,均未考虑地球物理场中温度场的影响。然而,随着井下煤层开采深度的增加,热效应已成为影响井下煤层中瓦斯流动至关重要的因素。因此,为使煤层瓦斯流动规律的研究更切合现场实际,应将地球物理场中的温度场、渗流场和应力场这三场同时耦合考虑,俗称热-流-固耦合。

目前,国内对煤层瓦斯热-流-固耦合方面的研究成果报道相对较少,主要集中于辽宁工程技术大学<sup>[26,35-40]</sup>。煤层瓦斯流固耦合问题的一个显著特点是煤体与瓦斯互相包含、互相缠绕,因此研究中,须将瓦斯流体相与煤体视为相互重叠的连续介质,在不同相的连续介质之间可以发生相互作用。这个特点须使流固耦合问题的控制方程针对具体的物理现象来建立,而流固耦合作用也是通过控制方程反映出来的,即在描述“三场”中任一场的控制方程中,要有体现另外两场的项。

在其他工程领域中,国内学者关于三场耦合的研究也不少见。如在石油热采方面,文献[41]建立了两类油藏热-流-固三场耦合模型,并编制程序给出了第1类非完全耦合模型的数值解。在第1类非完全耦合模型中,渗流方程与变形方程完全耦合,但温度场的热应变方程没有与前两者完全耦合,其表达式中没有体现岩体变形和流体渗流的耦合项。

第2类完全耦合模型,从理论上更深入地研究了热-流-固耦合过程。该模型耦合温度场和渗流场方程中,均含有体现岩石固相骨架变形的项,这些项必须联立岩石耦合变形场方程才能求解;岩石耦合变形场方程中,含有体现孔隙流体压力的项和体现温度场变化的项,这些项必须联立耦合温度场方程和流体耦合渗流场方程才能求解。与第1类模型相比,虽然第2类模型改进了很多,但仍然存在很大弊端:例如,流体耦合渗流方程中没有体现温度场变化的项。耦合温度场方程中没有体现渗流场变化的项。没有实现双向完全耦合,且因该模型数值求解困难,没有给出其数值解。

在煤层瓦斯流动领域中,文献[26]研究了非等温情况下的煤层瓦斯流动规律,建立了三场耦合模型,编制计算机程序,进行了数值模拟求解。该模型的渗流场方程中,体现有煤岩应力场和温度场变化的项;煤岩应力场方程中,体现有流体渗流场瓦斯压力项;煤层温度场方程中,体现有渗流场瓦斯解吸的微分热能项。但该模型在应力场方程中,未体现温度场的耦合项,温度场方程中未体现应力场的耦合项,也未实现各场双向完全耦合,且应力场方程中的瓦斯解吸的微分热能项存在问题。

综上所述,到目前为止,仍然没有建立真正意义上的煤层瓦斯三场耦合数学模型,各国学者的成果大都是在前人研究基础上不断改进而来的。所以,含瓦斯煤体三场耦合研究还有待深入开展,以期在不久的将来,在一定条件下,建立更为完善的含瓦斯煤体三场耦合数学模型,使其实现各场之间的双向完全耦合(即要求温度场方程中要体现渗流场和应力场变化的耦合项;渗流场方程中要体现应力场和温度场变化的耦合项;应力场方程中要体现温度场和渗流场变化的耦合项)(图2)。

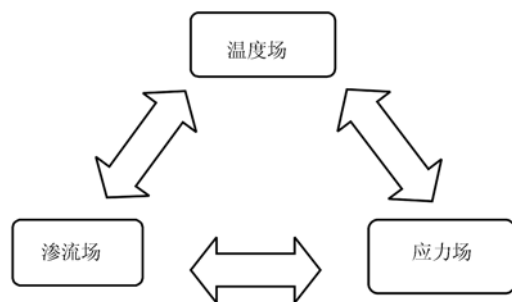


图2 三场完全耦合模型

Fig. 2 Complete coupling model among temperature-seepage-stress

#### 4 结 语

毋庸置疑,瓦斯在煤层中的流动自始至终都受地球物理场的影响,煤体变形和瓦斯流动都是在固

流耦合作用下的煤体变形和瓦斯流动。

随着煤矿井下采矿活动的逐步延深,地球物理场对瓦斯在煤层中的运移影响必将越来越大,虽然目前已取得一些显著成果,但仍需进行更深层次的探索。作者认为,在今后相当长一段时间内,以下3方面将会成为地球物理场作用下,煤层瓦斯渗流领域的发展趋势或研究热点:

- a. 非线性、非达西渗流问题;
- b. 深部开采引起的井下高温和低渗透问题;
- c. 煤层瓦斯的流固耦合问题。

## 参考文献

- [1] 孙培德, 鲜学福. 煤层瓦斯渗流力学的研究进展[J]. 焦作工学院学报, 2001, 20(3): 161-167.
- [2] 孙培德. 煤层瓦斯流场流动规律的研究[J]. 煤炭学报, 1987, 12(4): 74-82.
- [3] 周世宁, 孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1965, 2(1): 24-36.
- [4] SUN Peide. Study of the dynamic models for coal gas dynamics(part 1)[J]. Min.Sci.Technol. 1991, 12(1): 17-25.
- [5] 孙培德. 瓦斯动力学模型的研究[J]. 煤田地质与勘探, 1993, 21(1): 32-40.
- [6] SUN Peide. Coal gas dynamics and its applications [J]. Scientia Geologica Sinica., 1994, 3(1): 66-72.
- [7] 刘明举. 幂定律基础上的煤层瓦斯流动模型[J]. 焦作矿业学院学报, 1994(1): 36-42.
- [8] SOMERTON W H. Effect of stress on permeability of coal [J]. Int. J. Rock Mech. Mech. Min. Sci. & Geomech.Abstr., 1975, 12(2): 151-158.
- [9] LEVINE J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coalbed reservoirs[J]. Geological Society Publication, 1996, 199: 197-212.
- [10] ENEVER J R E, HENNING A. The relationship between permeability and effective stress for australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modelling[C]//Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium. Alabama: The University of Alabama Tuscaloosa, 1997: 13-22.
- [11] 林柏泉, 周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1987, 16(1): 21-28.
- [12] 唐书恒. 煤储层渗透性影响因素探讨[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(1): 28-31.
- [13] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.
- [14] ZHAO Yangsheng, KANG Tianhe, HU Yaoqing. The permeability classification of coal seam in China[J]. Int.J.Rock Mech. Min. Sci., 1995, 32(4): 365-369.
- [15] 孙培德, 凌志仪. 三轴应力作用下煤渗透率变化规律实验[J]. 重庆大学学报, 2000, 23: 28-31.
- [16] 孙培德. 变形过程中煤样渗透率变化规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20: 1801-1804.
- [17] 杜云贵. 地球物理场中煤层瓦斯吸附、渗流特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1993.
- [18] 徐龙君, 鲜学福, 刘成伦, 等. 恒电场作用下煤吸附甲烷特征的研究[J]. 煤炭转化, 1999, 22(4): 68-70.
- [19] 刘保县, 熊德国, 鲜学福. 电场对煤瓦斯吸附渗流特性的影响[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(2): 83-85.
- [20] 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 地电场对煤中瓦斯渗流特性的影响[J]. 重庆大学学报, 2000, 23: 22-24.
- [21] 王宏图, 李晓红, 鲜学福, 等. 地电场作用下煤中甲烷气体渗流性质的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 303-306.
- [22] 刘保县, 鲜学福, 王宏图, 等. 交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验. 重庆大学学报, 2000, 23: 41-43.
- [23] 刘保县, 鲜学福, 徐龙君, 等. 交变电场作用下煤吸附甲烷特性的研究[J]. 煤炭转化, 2000, 23(3): 36-39.
- [24] 程瑞端. 煤层瓦斯涌出规律及其深部开采预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1996.
- [25] 张广洋, 胡耀华, 姜德义. 煤的瓦斯渗透性影响因素的探讨[J]. 重庆大学学报, 1995, 18(3): 27-30.
- [26] 刘建军. 非等温情况下煤层瓦斯流动规律的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 1998.
- [27] В.В.Ходот. Внезапные выбросы угля и газа, Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу [M], Москва, 1961.
- [28] 陈昌国. 煤的物理化学结构和吸附(解吸)甲烷机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1995.
- [29] 张庆玲, 崔永军, 曹利戈. 煤的等温吸附试验中各因素影响分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(2): 16-18.
- [30] 钟玲文, 郑玉柱, 员争荣, 等. 煤在温度和压力综合影响下的吸附性能及气含量预测[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 581-585.
- [31] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 15-24.
- [32] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 229-239.
- [33] 梁冰, 章梦涛, 王泳嘉. 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 135-142.
- [34] 汪有刚, 刘建军, 杨景贺, 等. 煤层瓦斯流固耦合渗流的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 286-289.
- [35] 刘建军, 梁冰, 章梦涛. 非等温条件下煤层瓦斯运移规律的研究[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(4): 302-308.
- [36] 梁冰, 刘建军, 王锦山. 非等温情况下煤和瓦斯固流耦合作用的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1999, 18(5): 483-486.
- [37] 梁冰, 刘建军, 范厚彬, 等. 非等温条件下煤层中瓦斯流动数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 1-5.
- [38] 刘建军. 煤层气热-流-固耦合渗流的数学模型[J]. 武汉工业学院学报, 2002(2): 91-94.
- [39] 李宏艳. 非等温气固耦合模型及有限元分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2000.
- [40] 肖晓春. 考虑深部影响的煤层气渗流数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2005.
- [41] 王自明. 油藏热流固耦合模型研究及应用初探[D]. 成都: 西南石油学院, 2002.