

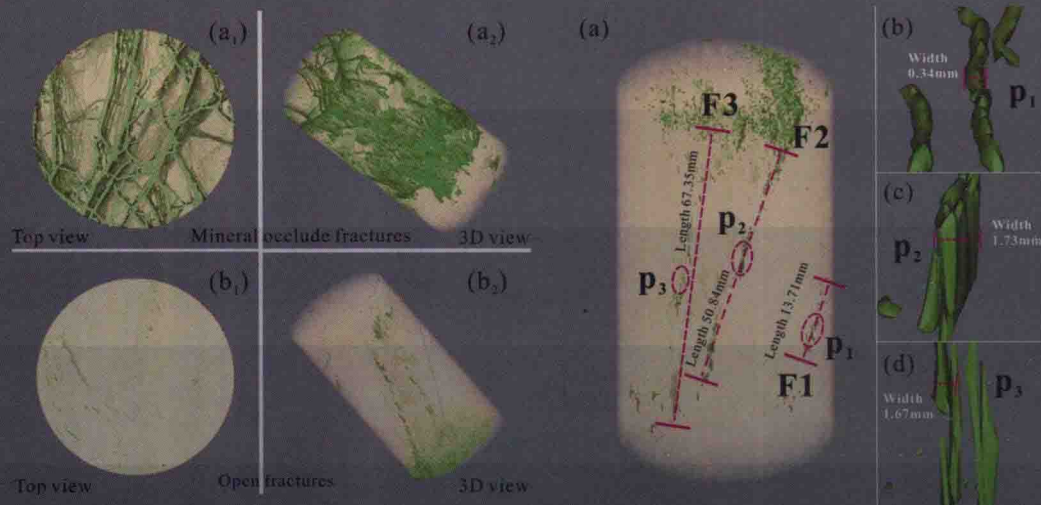
MEICENGQI SHENTOULV DE BIAOZHENG YU JIANMO

煤层气渗透率的表征与建模

Zhejun Pan(澳) Luke D. Connell(澳) 等著

王 勃 孙粉锦 穆福元

等 译著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

煤层气渗透率的表征与建模

Zhejun Pan(澳) Luke D. Connell(澳) 等 著

王勃 孙粉锦 穆福元 杨焦生 赵洋
王玫珠 Zhejun Pan(澳) 郑贵强 译著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

煤层气体吸附/解吸产生膨胀/收缩效应影响有效应力,从而影响煤储层渗透率。本书采用实验室测试、现场测试、理论分析、X-射线计算层析成像、声波发射和超声技术等多种手段,分析了三轴应力、气体组分、水分含量、孔隙结构等因素对渗透率的影响,得到割理压缩系数、杨氏模量、泊松比、两相流体、润湿相饱和度、孔隙率等与煤岩渗透率演化的相关关系,建立了煤岩渗透率模型,相关理论对提高煤层气采收率与 CO₂ 储存具有重大意义。

本书适合煤层气勘探开发及相关领域的科研人员、工程技术人员、教育工作者及学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气渗透率的表征与建模 / (澳) 潘哲君等著;
王勃等译著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2017. 4
ISBN 978 - 7 - 5646 - 3274 - 8
I. ①煤… II. ①潘… ②王… III. ①煤层—地下气
化煤气—渗透率—研究 IV. ①P618. 11
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 243858 号

书 名 煤层气渗透率的表征与建模
著 者 Zhejun Pan(澳) Luke D. Connell(澳) 等
译 者 王 勃 孙粉锦 穆福元 杨焦生 赵 洋
王玫珠 Zhejun Pan(澳) 郑贵强
责任编辑 潘俊成 孙建波
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 14 字数 367 千字
版次印次 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷
定 价 56.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

随着世界经济对能源需求的不断增长和低碳社会的逐渐到来,开发利用非常规油气资源将成为必然趋势。煤层气作为非常规天然气发展的重要领域之一,凸显出越来越重要的地位。我国埋深 2 000 m 以浅的煤层气地质资源约为 30 万亿 m^3 ,经济可采量约为 4 万亿 m^3 。经过 20 年的发展,初步实现了煤层气的规模开发,截至 2015 年年底煤层气产量达到 44 亿 m^3 ,同时在煤层气勘探开发理论方面成果卓著。但与世界上取得煤层气大规模开发的美国、澳大利亚等国相比,还存在一定的差距。因此,需要借鉴、引进、消化和吸收其先进的理论及技术方法。而基于此,本书以煤层气勘探评价、煤产能及采收率预测的核心参数之一——渗透率为主题,阐述应力敏感性、基质膨胀与收缩效应对渗透率的作用机理,对于渗透率改造和采收率提高的研究与生产实践,意义重大。

本书精选了澳大利亚联邦科学与工业研究组织的研究人员 Zhejun Pan 和 Luke D. Connell 及其合作者过去十年中在煤层气渗透率研究方面取得的重要研究成果,翻译整理成书。本书内容涵盖了煤层气渗透率的实验室表征技术方法、建模计算、气体吸附引起的膨胀实验测量以及机理模型的建立等方面。

本译著理论功底深厚,是从事煤层气勘探开发的研究人员及在校研究生非常好的参考书,对于深化煤层气渗透率的理论认识、指导煤层气储层评价研究及开展煤层气生产的开创性工作具有重要的启迪作用。



前 言

我国已在高煤阶煤层气勘探开发中取得重要突破,但中低煤阶煤层气在储层特征、孔径结构、储层物性、赋存状态等诸多方面有别于高煤阶煤层气。为了提升我国中、低煤阶煤层储层物性及其表征的研究理论和技术水平,笔者检索并筛选了近年来国外在煤层气渗透率方面的重要文献 9 篇,编译成《煤层气渗透率的表征与建模》一书,以借鉴和吸收国外关于储层渗透率表征与建模的先进技术方法,旨在为我国中、低煤阶储层物性精细评价研究提供借鉴,对于推动我国“十三五”中低煤阶煤层气勘探开发具有一定的现实指导意义。

全书分为三部分,一是煤层渗透率的分析模型与实验数据综述,共 1 篇:

《煤储层渗透率的分析模型和实验数据综述》论文中综合评述了 25 年来针对煤层渗透率及模型开发所开展的研究成果,包括有效应力和煤层膨胀/收缩对煤层渗透率的影响、煤层渗透率特征和渗透率模型的建立方法等。

二是煤层渗透率、气体吸附膨胀的实验室表征技术方法,共 4 篇:

《煤层气抽采及注气提高采收率过程中煤储层渗透率变化的实验室表征》论文中提出了一种针对 Palmer-Mansoori 和 Shi-Durucan 渗透率模型的实验室表征方法,并将其应用于提高煤层气采收率(ECBM)和二氧化碳(CO_2)封存过程中的储层模拟。

《有效应力系数和吸附引起的应变对煤层渗透率演化的影响:实验观察》论文中针对煤样在不同的围压和孔隙压力下,采用非吸附性气体和吸附性气体进行了一系列实验。探讨了在应力边界控制条件下,注入吸附性气体时,气体的体吸附引起的应变对渗透率的影响机理。

《煤基质中湿度对气体扩散和流动的影响》论文中研究了湿度对 CH_4 和 CO_2 吸附率的影响。结果显示,基质中的湿度对气体吸附率有显著影响;湿度会导致煤膨胀/收缩以及力学特性的变化,从而影响储层条件下煤的渗透率。

《裂隙煤渗透率演化—三轴约束与 X—射线计算层析成像、声发射和超声波技术耦合》论文通过 X—射线计算层析成像技术(X—射线 CT)、声发射(AE)技术以及 P 波速度的耦合分析来探讨应力和损伤对渗透率变化的影响,研究煤样从应变发生到断裂过程的三维裂缝网络演化。

三是煤层渗透率机理模型及建模计算,共 4 篇:

《三轴应力应变条件下的煤岩渗透率分析模型》论文提出了两种基于一般线性多孔弹性介质的本构方程的渗透率模型,并对模型进行了实验验证。

《气体吸附引起煤膨胀的理论模型》论文利用能量平衡法推导了用于描述在吸附和应变平衡下吸附引起煤膨胀的理论模型,能够描述煤在不同气体和极高压条件下的膨胀行为。

《煤各向异性膨胀模型及其在煤层气生产和注气增产过程中对渗透率的影响》论文结合煤力学特性和结构的各向异性进一步发展了上文提出的模型,使之可应用于描述煤膨胀和

渗透率的各向异性。

《一种改进的针对煤储层相对渗透率模型》论文对常规的多孔介质两相流相对渗透率模型进行了改进,以描述煤储层的相对渗透率。同时,开展煤层水—气两相流的耦合数值模拟,将相对渗透率模型分别表示为浸润相饱和度的一元函数以及浸润相饱和度与渗透率比率的双元函数,进而分析了孔隙率变化引起的相对渗透率变化对浸润相饱和度和产气量的影响。

参加翻译工作的有王勃、穆福元、杨焦生、赵洋、王玫珠、郑贵强等,最后由穆福元、王勃、杨焦生对译文进行了审校。在此对给予本书翻译做出贡献的有关人员表示衷心的感谢!

由于译者水平所限,书中难免有不妥或不当之处,恳请读者斧正。

感谢以 Zhejun Pan、Luke D. Connell 等为代表的作者的大力支持,感谢 Elsevier 的鼎力相助。

译 者

2016 年 10 月

目 录

煤储层渗透率的分析模型和实验数据综述.....	1
煤层气抽采及注气提高采收率过程中煤储层渗透率变化的实验室表征	70
有效应力系数和吸附引起的应变对煤层渗透率演化的影响:实验观察.....	88
煤基质中的水分对气体扩散和流动的影响.....	104
裂隙煤渗透率演化—三轴约束与 X—射线计算层析成像、声发射和超声波技术耦合 ...	119
三轴应力应变条件下的煤岩渗透率分析模型.....	140
气体吸附引起煤膨胀的理论模型.....	160
煤各向异性膨胀模型及其在煤层气生产和注气增产过程中对渗透率的影响.....	172
一种改进的煤储层相对渗透率模型.....	192

煤储层渗透率的分析模型和实验数据综述

Zhejun Pan, Luke D. Connell

王勃 译 孙粉锦 校

摘要:与其他储层一样,渗透率是煤层中气体运移的关键控制因素。在气体生产期间,煤储层的绝对渗透率会显著变化,通常是先降低,然后随着储层压力和气体含量的降低而不断增加。在注 CO₂ 提高煤层气采收率期间渗透率会急剧降低。为了预测气体运移,煤层渗透率模型必须包含上述行为的机制。与其他裂缝性储层类似,煤储层的渗透率随着有效应力的增加以指数方式降低。但煤层的特性是:随气体解吸而收缩,随气体吸附而膨胀。在煤储层内部,膨胀/收缩效应导致地质力学响应,从而使有效应力变化,进而导致渗透率发生变化。建立煤层渗透率模型以涵盖有效应力和煤层膨胀/收缩影响的做法可以追溯至 25 年前。自此以后,研究人员建立了大量渗透率模型。最近几年,越来越多的机构对煤层渗透率行为和模型开展研究,这个方向受到广泛关注。本文综述了煤层渗透率的特点和建立渗透率模型的方法。由于用于测试模型的现场和实验数据非常重要,因此本文也予以详细概述。本文同时建议了未来一些潜在的研究方向。

1 引言

煤层产生和储存煤层气(Clarkson 和 McGovern, 2005; Gash 等, 1992)。煤层甲烷(CBM)或瓦斯(CSG)主要通过吸附方式储存于煤基质中。生产煤层气应先降低储层压力,使气体解吸成游离态,然后游离气体通过基质扩散至裂缝系统,该裂缝系统称为“裂隙”(Pan 等, 2010b; Lu 和 Connell, 2007)。普遍假设气体在裂隙中的流动是达西流,并假设基质中的达西流可以忽略不计(Puri 等, 1991)。因此,渗透率主要受裂隙控制(Palmer, 2009; Reid 等, 1992; Sparks 等, 1995)。由于许多煤储层中都存在水和气,因此裂隙中存在两相流,有效气体渗透率是相对气体渗透率和绝对渗透率的函数(Clarkson 等, 2008a; Kissell 和 Edwards, 1975)。尽管相对渗透率和毛细管压力是决定煤层中气体流量的重要特性(Dabbous 等, 1976; Gash, 1991; Ham 和 Kantzas, 2008; Mazumder 等, 2003; Meaney 和 Paterson, 1996; Ohen 等, 1991; Paterson 等, 1992; Plug 等, 2008; Puri 等, 1991; Reznik 等, 1974),但是本文主要关注绝对渗透率,出于简化需要,本文将绝对渗透率称为渗透率。煤层渗透率的复杂性表现为在气体生产期间,受孔隙压力和气体解吸引起的基质收缩影响(Gray, 1987)。因此,一个模型能否精确模拟主要取决于是否能呈现这些特性。当注入 N₂ 和 CO₂ 等气体以提高储层气体的采收率时,渗透率变化对煤层气增产也有重要作用(Puri 和 Yee, 1990)。由于在相同的压力下煤层吸附的 CO₂ 多于甲烷,因此注入 CO₂ 不仅能够提高甲烷产量,而且也是减少温室气体的可行措施(Reznik 等, 1984)。

与其他天然裂缝储层一样,煤层渗透率也由许多裂缝特性决定,包括尺寸、间距、连通性、孔径和矿物填充程度以及方向布局(Laubach 等, 1998)。因为煤化过程中会产生裂隙,

所以渗透率也与煤岩类型和煤阶有关。例如 Clarkson 和 Bustin(1997)发现,对于其研究的煤样来说,渗透率从高到低的顺序为:亮煤、带状煤、纤维状煤、带状暗煤和暗煤。煤是有裂隙孔隙结构的软岩体,因此渗透率对有效应力较为敏感。有效应力增加时,渗透率以指数方式降低,这种关系经过大量的实验室(Seidle 等,1992;Somerton 等,1975)和现场数据验证(Enever 和 Hennig,1997;Sparks 等,1995)。但是,渗透率随有效应力降低的行为会被煤因气体解吸导致基质收缩的特性所抵消(Gray,1987)。在产气过程中,渗透率可能先降低,然后当基质收缩作用超过裂隙压缩作用时渗透率会回升。相比之下,注气提高煤层气生产期间因 CO_2 吸附而导致气体含量增加会造成煤膨胀和渗透率降低(van Bergen 等,2006)。常规天然气储层的渗透率模型不包括膨胀/收缩对渗透率的影响,因此不适用于煤储层。为了正确说明流体流动特性,煤层渗透率模型应考虑应力以及煤膨胀/收缩作用。

现有包含有效应力和膨胀/收缩影响的多种渗透率模型。虽然也有一些渗透率经验模型,但本文的重点在于总结那些基于理论的解析模型,其中一个关键是表现应力特性,需要对地质力学过程进行描述。为了使模型易于控制,最好使用简洁的函数形式,因此开发模型时引入了简化条件。最初 Gray(1987)引入了单轴应变和恒定垂直应力条件,大大简化了渗透率模型。Palmer-Mansoori(1998)以及 Shi-Durucan(2004a)提出的渗透率模型均使用了此简化方法并且被广泛应用。

近年来,有大量模型解释了更复杂条件下的煤层渗透率特性(Connell 等,2010a、2010b;Gu 和 Chalaturnyk,2010;Izadi 等,2011;Liu 和 Rutqvist,2010;Liu 等,2010;Ma 等,2011;Pan 和 Connell,2011;Wang 等,2009;Wu 等,2010)。另外一些模型中,对 CBM 和 ECBM 过程,采用了流动和地质力学耦合模型来研究地质力学过程对渗透率的影响(Connell,2009;Connell 和 Detournay,2009;Gu 和 Chalaturnyk,2006、2010;Wei 和 Zhang,2010;Zhao 等,2004;Zhu 等,2007)。

验证煤层渗透率模型的关键在于将其应用于相关问题并与已观察到的特性进行对照。许多渗透率模型都是针对解释储层条件下的渗透率特性,但现场数据是难以获得并且具有非常大的不确定性。虽然利用煤样更容易获得实验结果,但是所用的模型需要适用的测试条件。举例来说,单轴应变和恒定垂直应力条件下推导出的模型不适用于静水应力条件下的实验。因此,用于验证渗透率模型的数据应该从符合该模型条件的实验中得到。

Palmer(2009)综述了四种广泛使用的渗透率模型,Ma 等人(2011)在介绍自己的模型时也概述了已有的渗透率模型,Liu 等人(2011a)也提出了煤层气体流动多过程的概述。这一极其活跃的研究领域目前已发表了大量论文,需要一篇综述文章给读者提供参考。因此,本文针对煤层渗透率模型进行了全面综述,依次介绍了渗透率建模的理论依据,包括所用的假设和边界条件;概述了用于模型测试和验证的信息,并提出了煤层渗透率模型研究的潜在方向。

2 煤层渗透率模型的开发

双孔隙率模型是适用于煤的一般概念的模型,认为气体大部分储存于煤基质中,天然裂缝系统中为达西流。含裂缝介质的流动能力几乎完全取决于裂缝的数量、开度以及流动方向的连续性(Somerton 等,1975)。渗透率可以用于度量流动能力,它与孔隙尺寸(孔隙率)、连续性、连通性、壁粗糙度(Brown,1987)以及曲率(Tsang,1984)等一系列孔隙特性直接相

关。绝对渗透率是岩体的固有性质,但是由于煤层渗透率对应力极为敏感,因此提到绝对渗透率时必须说明应力条件。煤层中的气体有效渗透率更加复杂,它与绝对渗透率、裂隙中水/气饱和度、气体吸附引起的膨胀/收缩以及 Klinkenberg 效应有关(Klinkenberg, 1941)。

2.1 与渗透率有关的孔隙率或应力

图 1 为煤自然裂隙系统的平面概念图。裂隙(割理)分为两种:面割理和端割理,它们通常相互垂直并垂直于煤层平面(Close, 1993; Nelson, 2000; Pattison 等, 1996)。

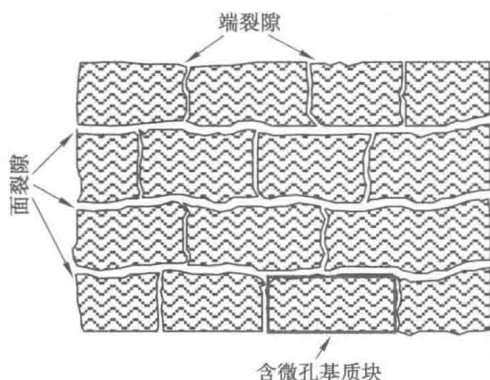


图 1 煤层结构的平面图(据 Harpalani, 1999)

火柴棒概念模型被广泛用于煤层裂隙系统以及推导渗透率模型。图 2 为火柴棒模型的广义形式以及 Reiss(1980)使用的两个裂隙系统的模型。在此概念模型中,裂隙系统的流动可以用立方定律描述,它是平行板之间流动的直接延伸(Bai 和 Elsworth, 2000)。对于一组平行裂隙,如果它们与笛卡儿主轴对准,有均匀的开度 b_i 和间距 a_i ,立方定律可以写为:

$$q_i = -\frac{b_i^3}{12\mu a_i} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (1)$$

其中, μ 是黏度系数; p 是压力; x_j 是笛卡儿坐标轴, $j=1, 2, 3$ 。

方程(1)适用于流动方向为 j 方向。

考虑到表面粗糙度、曲率等,裂隙孔径 b_i 是有效开度,通常小于表面开度或力学机械开度(Bai 和 Elsworth, 2000; Gu 和 Chalaturnyk, 2010)。

根据方程(1),渗透率为:

$$k_i = \frac{b_i^3}{12a_i} \quad (2)$$

或

$$\frac{k_i}{k_{i0}} = \left(\frac{b_i}{b_{i0}}\right)^3 \quad (3)$$

其中,下标 0 代表参考状态,假设开度小于间距。

对于图 2(a)所示的各向异性情况,孔隙率方程可以写为:

$$\varphi = \frac{b_1}{a_1} + \frac{b_2}{a_2} + \frac{b_3}{a_3} \quad (4)$$

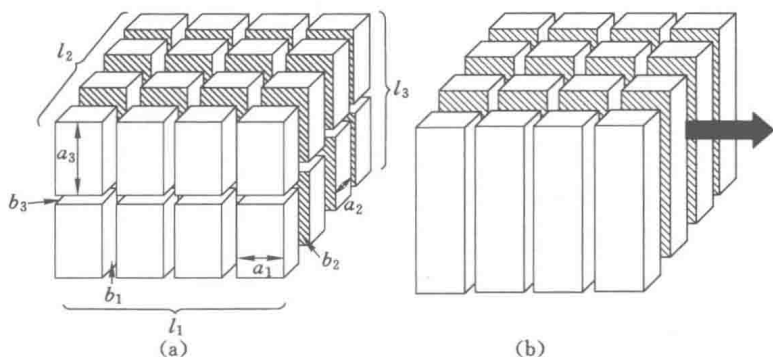


图2 理想的煤层裂隙系统几何结构(据 van Golf-Racht,1982)

(a) 各向异性(3个裂隙组);(b) 各向同性(2个裂隙组)

在各向同性条件下,将 $\varphi = \frac{3b}{a}$ 代入方程(2),从而获得:

$$k = \frac{1}{96}a^2\varphi^3 \quad (5)$$

对于火柴棒模型中2组裂隙的情况, $\varphi = \frac{2b}{a}$ 和渗透率关系为(Reiss,1980):

$$k = \frac{1}{48}a^2\varphi^3 \quad (6)$$

因为裂隙特性具有极大的变化性,所以煤层裂隙结构肯定比图2所示的简单概念模型复杂得多,在实际使用中取适当的平均值。

2.1.1 孔隙度与渗透率的关系

根据方程(5)或方程(6),很容易得出参考状态下的渗透率变化:

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3 \quad (7)$$

其中,下标0指参考状态。若因膨胀/收缩和压缩而变化的基质尺寸改变相比于孔隙率变化可以忽略不计,则:

$$a \approx a_0 \quad (8)$$

因此,方程(7)可以简化为:

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3 \quad (9)$$

方程(9)被广泛用于孔隙率造成的渗透率变化(Cui 和 Bustin,2005;Palmer 和 Mansoori,1996,1998)。

关于孔隙率模型的一个重要问题是这些模型如何考虑裂隙系统的各向异性。绝对渗透率存在各向异性,但由于上述推导孔隙率的方程无方向性,因此无法表现渗透率变化的方向性。

2.1.2 应力与渗透率的关系

方程(9)中的裂隙孔隙率必须通过流动实验获得,它代表有效孔隙率。另一种方法是使用应力与渗透率之间的关系,其表达式中不涉及孔隙率。Cui 和 Bustin(2005)推导出了应力与渗透率关系通用表达式,对孔隙率 $\varphi = V_p/V_b$ 求偏导得到:

$$\frac{d\varphi}{\varphi} = d\epsilon_b - d\epsilon_p \quad (10)$$

其中, V_p 是裂隙体积; V_b 是总体积; $d\epsilon_p = -dV_p/V_p$ 是孔隙应变的微分; $d\epsilon_b = -dV_b/V_b$ 是总应变的微分。

结合方程(10)给出下列关系式:

$$\frac{\varphi}{\varphi_0} = \exp\left[-\left(\int_{\epsilon_{p0}}^{\epsilon_p} d\bar{\epsilon}_p - \int_{\epsilon_{b0}}^{\epsilon_b} d\bar{\epsilon}_b\right)\right] \quad (11)$$

根据 Zimmerman 等人(1986)和 Jaeger 等人(2007)的结论得出:

$$d\epsilon_b = C_{bs}(d\sigma - dp) + C_m dp, d\epsilon_p = C_{ps}(d\sigma - dp) + C_m dp \quad (12)$$

其中, $C_{bs} = -(\partial V_b/\partial \sigma)_p/V_b$; $C_{ps} = -(\partial V_p/\partial \sigma)_p/V_p$; σ 是平均应力; C_m 是基质压缩系数。

将方程(12)代入方程(11), 然后再代入方程(9), 得出:

$$k = k_0 \exp\left\{-3\left[\int_{(\sigma_0, p_0)}^{(\sigma, p)} (C_{ps} - C_{bs})(d\bar{\sigma} - d\bar{p})\right]\right\} \quad (13)$$

由于 $C_{bs} \ll C_{ps}$ 并且假设恒定的压缩系数, 因此得出 Cui 和 Bustin(2005)的方程:

$$k = k_0 \exp\{-3C_{ps}[\sigma - \sigma_0 - (p - p_0)]\} \quad (14)$$

Seidle 等人(1992)推导出了用于分析静水压力下实验室渗透率测定的模型, 它与方程(14)的关系式类似。在 Shi-Durucan(2004a)模型中, 使用了 Seidle 等人(1992)的模型, 该模型假设渗透率是水平有效应力的函数, 与火柴棒模型的垂直面裂隙和端裂隙的假设一致, 作用于裂隙上的应力改变裂隙开度, 且垂直应力不变。但只有当有效应力中的 Biot 系数等于 1 时, 方程(14)才等于 Shi-Durucan(2004a)模型所用的方程。

用水平应力代替平均应力并引入裂隙压缩系数 c_f , 方程(14)变成:

$$k = k_0 \exp\{-3c_f[\sigma_h - \sigma_{h0} - (p - p_0)]\} \quad (15)$$

其中, $c_f = C_{pp} = (\partial V_p/\partial p)_\sigma/V_p$ 。当 Biot 系数等于 1 时, $C_{ps} = -C_{pp}$ 。

Liu 和 Rutqvist(2010)基于裂隙即使在无限高应力下依然保持一些开度的假设, 得出了应力与渗透率的关系:

$$b = b_r + b_f e^{-c_f \sigma} \quad (16)$$

其中, b_r 是残余裂隙开度; b_f 是裂隙开度的应力敏感部分。根据方程(16)和方程(3), 渗透率变化可以被描述为:

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\eta + e^{-c_f \sigma}}{\eta + e^{-c_f \sigma_0}}\right)^3 \quad (17)$$

其中, $\eta = b_r/b_f$ 。当残余裂隙开度为零或忽略不计时, 方程(17)简化为方程(15)。

将方程(15)与变化孔压或围压下的渗透率实验结果进行拟合, 可以估计裂隙压缩系数。Seidle 等人(1992)将公式(15)以及在变孔压、常围压下注水所测定的渗透率进行了拟合, 其他一些研究人员也使用了类似的方法(Harpalani 和 McPherson, 1986)进行了研究。但是, 由于有效应力系数或 Biot 系数通常小于 1(Chen 等, 2011; Zhao 等, 2003), 因此均假设其为 1 的话会高估有效应力变化而低估裂隙压缩系数。Pan 等人(2010a)测量了常孔压、变围压下的气体渗透率, 保持孔隙压力恒定, 渗透率测量不受气体吸附引起的膨胀作用并且消除了 Biot 系数的潜在影响, 因此有效应力仅受到围压变化的影响。

Palmer-Mansoori(1996, 1998)的模型中, 将固体压缩系数和膨胀作用忽略不计, 裂隙压缩系数的定义如下:

$$c_f = \frac{1}{\varphi M} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)E\varphi} \quad (18)$$

其中, M 是约束的轴向模量; ν 是泊松比; E 是杨氏模量。

因此, 裂隙压缩系数是裂隙孔隙率的函数, 假设其他地质力学特性恒定, 裂隙压缩系数随着孔隙率的增加而增加。如果考虑固体压缩系数和基质收缩时, 裂隙压缩系数会变得更加复杂。另外, 实验室应力—渗透率测量获得的裂隙压缩系数随气体类型和应力而变化 (Durucan 和 Edwards, 1986; Pan 等, 2010a; Robertson 和 Christiansen, 2007), 但是恒定裂隙压缩系数便于应用, 经常被假设为常数 (Seidle 等, 1992; Shi-Durucan, 2004a)。基于裂隙压缩系数的应力被应用于描述现场测量的渗透率 (Shi-Durucan, 2009, 2010)。但是, 裂隙压缩系数与气体类型和应力的关系尚不清楚。

2.2 煤基质膨胀/收缩作用

煤层在气体吸附时膨胀, 解吸时收缩, 这种吸附引起的煤基质体积变化是煤储层的特有现象。实验室结果表明, 煤的体积可以膨胀几个百分点 (Chikatamarla 等, 2004; Cui 等, 2007; Day 等, 2008; Durucan 等, 2009; Harpalani 和 Chen, 1995, 1997; Harpalani 和 Schraufnagel, 1990; Karacan, 2003, 2007; Levine, 1996; Moffat 和 Weale, 1955; Reucroft 和 Patel, 1983, 1986; Robertson 和 Christiansen, 2005; St. George 和 Barakat, 2001; van Bergen 等, 2009; Wang 等, 2010; Zarebska 和 Ceglarska-Stefanska, 2008)。在储层内部, 因为初始裂隙孔隙率通常小于 1%, 所以这对裂隙孔隙率具有重大影响, 进而对渗透率产生重大影响 (Palmer 和 Reeves, 2007)。

2.2.1 膨胀在渗透率与应力关系中的作用

在第 2.1.2 节, 渗透率的指数模型是从孔隙率定义中导出的, 参见方程 (10)。Cui 和 Bustin (2005) 推导了包含煤膨胀效应的方程。根据 Connell 等人 (2010a), 方程 (10) 中的微分可以被分成一个力学分量 (上标 M) 和一个膨胀分量 (上标 S), 书写如下:

$$d\epsilon_b = d\epsilon_b^M + d\epsilon_b^S, d\epsilon_p = d\epsilon_p^M + d\epsilon_p^S \quad (19)$$

在 Cui 和 Bustin (2005) 研究中, 假设煤块膨胀应变和孔隙膨胀应变相等 (即 $d\epsilon_b^S = d\epsilon_p^S$), 因此将方程 (19) 代入方程 (10) 时, 这两个应变互相抵消。Connell 等人 (2010a) 假设两个应变通过常量 γ 呈线性相关, 得出以下方程:

$$k = k_0 \exp \{ -3 [C_p (\sigma - \sigma_0 - (p - p_0)) + (1 - \gamma) \bar{\epsilon}_s] \} \quad (20)$$

其中, ϵ_s 是基质块膨胀应变。

2.2.2 渗透率模型膨胀/收缩的地质力学响应

考虑吸附引起膨胀/收缩与岩石的热膨胀类似 (Palmer 和 Mansoori, 1996, 1998)。采用此类比, 可以修改标准的地质力学公式, 使其包含膨胀/收缩应变效应。然后将得到的地质力学关系和之前章节中所述的渗透率模型一起用于提出应变和压力综合效应的渗透率模型 (Cui 和 Bustin, 2005; Shi 和 Durucan, 2004a)。Shi-Durucan (2004a) 从各向同性线性孔弹性理论的本构关系中导出了渗透率模型, 假设吸附引起的膨胀相当于热膨胀。采用 Cui-Bustin (2005) 的形式, 可以写为:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{E}{1+\nu} (\bar{\epsilon}_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \bar{\epsilon}_h \delta_{ij}) + \alpha p \delta_{ij} + K \bar{\epsilon}_s \delta_{ij} \quad (21)$$

其中, 变量上方的横线表示增量; δ_{ij} 是克罗内克符号; α 是 Biot 系数; K 是体积模量; E 是杨

氏模量; ν 是泊松比; ϵ_s 是基质吸附应变, $\bar{\epsilon}_s = \bar{\epsilon}_{sx} + \bar{\epsilon}_{sy} + \bar{\epsilon}_{sz}$ 。

采用 Cui-Bustin(2005)的方法, Connell(2009)将方程(21)重写为以下形式:

$$\bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = \frac{\nu}{1-\nu}\bar{\sigma}_{zz} + \frac{E}{1-\nu}\bar{\epsilon}_{xx} + \frac{E}{1-\nu}\bar{\epsilon}_{sx} + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\alpha p \quad (22)$$

假设膨胀应变是各向同性的, 这个方程说明了各种效应对应力的作用。

上文所示的渗透率模型基于各向同性假设。最近, 出现了一些考虑各向异性的研究。各向异性对应的较普遍的应力—应变关系如下所示(Jaeger 等, 2007; Pan 和 Connell, 2011):

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{\bar{\sigma}_{ij}^e}{E_i} \delta_{ij} - \sum_{j=x,y,z} \left[\nu_{ji} \frac{\bar{\sigma}_{jj}^e}{E_j} \right] + \bar{\epsilon}_{ij}^s \delta_{ij} + \alpha_T T \delta_{ij} \quad (i = x, y, z) \quad (23)$$

其中, $\bar{\sigma}_{ij}^e$ 是有效应力; $\bar{\epsilon}_{ij}^s$ 是吸附引起的膨胀应变; α_T 是热膨胀系数; T 是温度。

方程(23)可以简化成 Shi-Durucan(2004a)对各向同性煤储层的应力—应变关系。在方程(23)中, 方向性膨胀应变被视作同热膨胀有相同的效果。

还有一些人用其他方法来建立渗透率模型中的膨胀应变。例如, 在 Liu 等人(2010)提出的模型中, 气体吸附引起的方向渗透率通过一个弹性模量降低率 R_m 与方向性应变相关联。这是煤块的弹性模量与煤基质模量的比率($0 < R_m < 1$), 它代表裂缝系统和基质之间的总应变分配。Liu 等人(2011b)认为, 渗透率首先受内部裂缝边界条件控制, 然后受外部边界条件控制, 具体取决于基质膨胀过程。

2.2.3 建立膨胀/收缩应变模型

气体吸附的表面上或测得的膨胀应变包含两个效应: 气体吸附所致的膨胀以及围压与孔隙压力差值所致的压缩效应。为了估算, 采用方程(21)所导出的模型的膨胀应变, 测得的应变应减去这些压缩效应。许多提供了膨胀应变测量值的文献中没有考虑到孔隙或围压的效应, 而是简单提供了测得的应变值。

Gray(1987)在他的渗透率模型中采用了膨胀/收缩应变与压力之间的线性关系。Levine(1996)发现线性关系会高估来自膨胀/收缩的影响, 尤其是在高压下以及采用朗缪尔形式方程来表示测得的膨胀行为时, 有:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_1 p / p_{sl}}{1 + p / p_{sl}} \quad (24)$$

其中, ϵ_1 是拟合朗缪尔形式方程的最大膨胀应变; p_{sl} 是等温膨胀的朗缪尔压力常数(在下文要提供的某些模型中, 被 $B = 1/p_{sl}$ 取代)。表示膨胀应变的朗缪尔形式方程已得到了广泛使用(Palmer 和 Mansoori, 1998; Shi 和 Durucan, 2004a), 为了描述混合气体吸附引起的膨胀, Mavor 和 Gunter(2006)提出了一个扩展的朗缪尔形式方程。

另一种方法是将测得的应变与气体量相关联。Sawyer 等人(1990)采用了膨胀应变与总吸附量之间的线性关系。Harpalani 和 Chen(1995)发现体应变与吸附的气体体积成比例。Seidle 和 Huitt(1995)也采用了一个与气体量的线性关系来表示基质收缩行为, 可以表示为:

$$\epsilon = \alpha V_a \quad (25)$$

其中, ϵ 是膨胀应变; α 是膨胀或者吸附比率; V_a 是总吸附量。许多研究人员(Connell, 2009; Connell 和 Detournay, 2009; Cui 和 Bustin, 2005; Shi-Durucan, 2005)将膨胀应变和总吸附量之间的这种线性关系应用于他们的渗透率模型中。

所有这些方法均有简单的函数形式,并且可以直接应用于渗透率模型中,然而它们是经验方法,仅能应用于特定压力范围内。Moffat 和 Weale(1955)的测量结果显示,膨胀应变随着气体压力增加而增加,达到最大值时开始下降,在高压下吸附趋于平稳。此外,在考察 Levine(1996)的实验数据时,Pekot 和 Reeves(2002、2003)发现,测得的膨胀应变随着气体种类的不同而不同,即使吸附量相同,将此现象称为差异膨胀。因此,膨胀与吸附量成比例的这种说法很有问题。当描述混合气体吸附引起的煤膨胀时,这些经验模型可能导致很大误差(Mitra 和 Harpalani,2007)。

因此,带有简单数学形式的理论膨胀模型在渗透率建模中至关重要。现有一些描述吸附引起膨胀的理论模型,如 Pan 和 Connell(2007)提出了一个基于吸附热力学和弹性理论的模型,采用了 Scherer(1986)提出的结构模型。通过假设吸附所致的表面能变化等于煤固体的弹性能变化,来描述气体吸附引起的膨胀。Pan 和 Connell 膨胀模型能够基于一组煤特性参数和不同气体的吸附等温线来描述不同气体引起的煤膨胀。采用相同一组煤特性参数和混合气体吸附等温式,此模型可以很容易地描述混合气体吸附引起的煤膨胀。经证明 Pan-Connell 模型可以精确描述混合气体中煤膨胀的实验测量值(Clarkson 等,2010),并且此模型具有简单的解析形式,很容易应用于渗透率模拟中。此模型和 Palmer-Mansoori(1998)渗透率模型一起被用于精确描述圣胡安盆地 CBM 井的生产数据,此井生产出高浓度的二氧化碳和甲烷(Clarkson 等,2010)。但是,Pan 和 Connell 模型仅适用于煤储层条件以及气体吸附在煤表面情况,温度升高时煤特性可能发生改变(Larsen,2004)。因此,若气体和煤相互作用超出物理吸附,则膨胀机制将变得更复杂。采用朗缪尔吸附模型来描述吸附量时,Pan 和 Connell 煤膨胀模型可以表示为:

$$\epsilon = RTL \ln(1 + BP) \frac{\rho_s}{E_s} f(x, \nu_s) - \frac{P}{E_s} (1 - 2\nu_s) \quad (26)$$

其中, ϵ 是膨胀应变; ρ_s 是煤固体密度; E_s 是煤固体的杨氏模量; x 是煤结构参数; ν_s 是煤固体的泊松比; f 是描述煤结构的函数。

$$f(x, \nu_s) = \frac{[2(1 - \nu_s) - (1 + \nu_s)cx][3 - 5\nu_s - 4(1 - 2\nu_s)cx]}{(3 - 5\nu_s)(2 - 3cx)} \quad (27)$$

其中, c 是常量, $c=1.2$; x 通过以下方程与微孔的孔隙率相关联:

$$\varphi = 1 - 3\pi x^2 (1 - cx) \quad (28)$$

其中, φ 是微孔的孔隙率。

Vandamme 等人(2010)研究出一个框架,用于描述多孔介质中流体吸附在孔隙表面导致的宏观应变。框架利用热力学方法在分子尺度直接得到的结果来计算宏观应变,作者将渗流力学扩展到表面能和表面应力。它们的焦点在于吸附如何改变表面应力,以及如何通过分子模拟来估算吸附行为。开发的膨胀模型可以表示为:

$$\Delta\epsilon = -\frac{p}{K_s} + \alpha_e \Gamma_F^{\max} \int_{\mu_F=-\infty}^{\mu_F(p)} \frac{1}{1 + f_F e^{-\mu_F/RT}} d\mu_F \quad (29)$$

其中, p 是压力; K_s 是固体体积模量; α_e 是材料常参数; $\Gamma_F^{\max}$ 和 f_F 是确定吸附等温线形状的两个参数; μ_F 是孔隙流体的化学势能(Vandamme 等,2010)。

Yang 等人(2010)采用 QSDFT 理论研究储层条件下煤吸附甲烷,主要焦点在于吸附作用引起的变形,可能导致膨胀或收缩,具体取决于压力、温度和孔隙尺寸。根据孔隙宽度有

两个不同的变形行为:第一类是在整个压力范围内的单调膨胀,此行为的特点是孔最小尺寸小于 0.5 nm,无法容纳超过一层的甲烷;第二类先膨胀后在低压下收缩,这些孔可以容纳整数(2~6)的吸附层(Yang 等,2010)。Yang 等人(2010)建立了不同孔隙尺寸下甲烷含量与施加的压力及煤层深度之间的关系。他们发现,煤变形取决于煤层深度,并且在不同深度处,膨胀或收缩具体取决于孔隙尺寸分布。他们的模型可以表示为:

$$\epsilon = \frac{\varphi}{k} \bar{f}_s \quad (30)$$

其中, φ 是孔隙率; k 是弹性模量,它与体积模量 K 通过方程 $K = k/\varphi$ 相关联; f_s 是溶解压力,其定义如下:

$$f_s = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial \Omega}{\partial H} \right)_{T, \mu, A} - p_\infty \quad (31)$$

其中, A 是表面积; Ω 是自由能; H 是孔隙宽度; T 是温度; μ 是化学势能; p_∞ 是流体压力。

$$\Omega[\{\rho_i(r)\}] = F_{\text{int}}[\{\rho_i(r)\}] + \sum_i \int d\mathbf{r} \rho_i(r) [\psi_i(r) - \mu_i] \quad (32)$$

其中, F_{int} 是固有亥姆霍兹自由能; ρ_i 和 μ_i 分别是局部数量密度和分量 i 的化学势能; ψ_i 是局部外势能(Yang 等,2010)。

对于某些煤层而言,膨胀/收缩有强烈的各向异性,相比平行于煤层的方向,在垂直于煤层的方向上有更大膨胀量(Day 等,2008 年;Levine,1996;Majewska 和 Zietek,2007)。基于 Pan 和 Connell(2007)研究的煤膨胀模型,Pan 和 Connell(2011)研究了一个各向异性煤膨胀模型,假设膨胀各向异性是煤力学特性和基质结构的各向异性所致,模型通过一组描述煤特性、基质结构和不同气体吸附等温线的参数能够精确描述实验数据。此模型也被用于描述文献中的各向异性膨胀实验结果,模型可以很好地吻合测量结果。各向异性煤膨胀模型被应用于一个各向异性渗透率模型,以描述煤层气开采及提高煤层气采收率的渗透率行为。若考虑各向异性膨胀得到的渗透率与假设各向同性显著不同,则具有强烈各向异性膨胀的渗透率模型需要考虑到各向异性行为(Pan 和 Connell,2011)。

2.3 渗透率模型开发的储层条件

正如前面章节讨论的那样,可以从裂隙孔隙率或应力变化来推导渗透率模型,这两种方法均将应变视作一个中间变量。难点在于描述储层条件下的地质力学行为,并确保渗透率模型的简明方式。简化地质力学最广泛应用的假设是单轴应变($\bar{\epsilon}_{xx} = \bar{\epsilon}_{yy} = 0$)和恒定上覆岩层应力($\bar{\sigma}_{zz} = 0$)(Gray,1987)。通过这两个假设,可以将各向同性和等温条件的方程(22)简化如下:

$$\bar{\sigma}_{xx}^e = \bar{\sigma}_{yy}^e = -\frac{\nu}{1-\nu} \bar{p} + \frac{E}{1-\nu} \bar{\epsilon}_{xx}^s \quad (33)$$

其中,Biot 系数 $\alpha=1$ 。

Cui 和 Bustin(2005)以及 Connell(2009)提出了一个基于方程(33)形式的应力表达式,其中包含 Biot 系数:

$$\bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha \bar{p} + \frac{E}{1-\nu} \bar{\epsilon}_{xx}^s \quad (34)$$

也有基于其他假设的渗透率模型,例如定体积假设。通常基于孔隙率应用各种假设得到渗透率模型。

2.4 渗透率模型

已有的一些渗透率模型考虑了地质力学效应和吸附引起的煤膨胀。本节对各向同性渗透率模型进行了简要综述,下一节对各向异性渗透率模型进行简要综述。本文没有讨论渗透率经验模型,诸如 Harpalani 和 Zhao(1989)模型。

2.4.1 Gray

Gray(1987)提出了首个煤层渗透率模型,采用应力方法来考虑地质力学效应和吸附引起的膨胀/收缩行为:

$$\sigma_h^e - \sigma_{h0}^e = -\frac{\nu}{1-\nu}(p - p_0) + \frac{E}{(1-\nu)} \frac{\Delta \epsilon_s}{\Delta p_s} \Delta p_s \quad (35)$$

其中, σ_h^e 是有效水平应力; Δp_s 是等效吸附压力变化量; $\frac{\Delta \epsilon_s}{\Delta p_s}$ 是等效吸附压力的单位变化导致的应变。方程(35)采用了与方程(15)类似的方程来表示应力变化和渗透率的关系。

2.4.2 Sawyer 等人

Sawyer 等人(1987、1990)提出了一个基于孔隙率变化的 ARI 模型(Palmer, 2009):

$$\varphi = \varphi_0 [1 + c_p(p - p_0)] - c_m(1 - \varphi_0) \frac{\Delta p_0}{\Delta C_0} (C - C_0) \quad (36)$$

其中, c_p 是孔隙压缩系数; c_m 是基质压缩系数; f_0 是初始孔隙体积; p_0 是初始储层压力; C 是储层气体含量; C_0 是原始储层气体含量。

Pekot 和 Reeves(2002、2003)将此模型进行扩展,考虑了相同压力下不同气体引起的膨胀不相同,有:

$$\varphi = \varphi_0 [1 + c_p(p - p_0)] - c_m(1 - \varphi_0) \frac{\Delta p_0}{\Delta C_0} [(C - C_0) + c_k(C_t - C)] \quad (37)$$

其中, c_k 是偏膨胀系数; C_t 是储层总气体含量。利用方程(9)来表示孔隙率和渗透率的关系。

2.4.3 Seidle 和 Huitt

Seidle 和 Huitt(1995)提出了一个基于孔隙率变化的模型,但是仅考虑了煤膨胀/收缩的影响:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_0 \left(1 + \frac{2}{\varphi_0}\right) \epsilon_1 \left[\frac{Bp_0}{1 + Bp_0} - \frac{Bp}{1 + Bp} \right] \quad (38)$$

采用方程(9)来表示孔隙率和渗透率的关系。

2.4.4 Harpalani 和 Chen

Harpalani 和 Chen(1995)利用火柴棒几何结构,开发了一个渗透率模型。假设膨胀发生在定体积内,有:

$$\frac{k_{\text{new}}}{k_{\text{old}}} = \frac{\left(1 + \frac{2l_m^* \Delta p}{\varphi_0}\right)^3}{1 - l_m^* \Delta p} \quad (39)$$

其中, k_{new} 是压力 p 下的渗透率; k_{old} 是初始渗透率; l_m^* 是水平方向上煤基质块的尺寸改变; f_0 是初始孔隙率。Ma 等人(2011)将 $l_m^* \Delta p$ 和膨胀/收缩应变、孔隙压力变化关联如下:

$$l_m^* \Delta p = -1 + \sqrt{1 + \left(\epsilon_1 \frac{Bp_0}{1 + Bp_0} - \epsilon_1 \frac{Bp}{1 + Bp}\right) + \frac{1-\nu}{E}(p - p_0)} \quad (40)$$

然后,将方程(40)代入方程(39)中,以计算孔隙压力变化和膨胀/收缩应变相关的渗