

国家自然科学基金青年基金 (51104147)

中国矿业大学青年科研基金 (2011QNA17)

中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目

# 煤层中封存二氧化碳的 双重孔隙力学效应研究

吴宇著

10.2

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



年基金(51104147)

青年科研基金(2011QNA17)

中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目

# 煤层中封存二氧化碳的双重 孔隙力学效应研究

吴宇著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

在深部非采煤层中封存 CO<sub>2</sub> 是处置温室气体的重要途径之一。本书综合利用理论分析和数值模拟方法系统地对 CO<sub>2</sub> 煤层封存中的煤体变形、气体吸附、气体渗流和气体扩散等多场耦合作用进行了系统研究。首先研究了有效应力、气体吸附共同作用下煤层裂隙系统和孔隙系统的变形特征,建立了适合各自特点的渗透率动态变化公式。在此基础上建立了含吸附效应的双重孔隙介质多场耦合数学模型,得到了地应力、含水率、注气压力等对 CO<sub>2</sub> 注入效率的影响规律。最后研究了二元气体竞争吸附下煤层渗透率的动态变化规律,建立了可用于现场工程实践的煤层中注 CO<sub>2</sub> 驱替瓦斯的多场耦合计算模型。

本书可供从事采矿工程、油气工程、工程力学、岩石力学与工程等专业的科技工作者、研究生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤层中封存二氧化碳的双重孔隙力学效应研究 / 吴宇著. — 徐州:中国矿业大学出版社,2012.11  
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1683 - 0

I. ①煤… II. ①吴… III. ①煤层—孔隙储集层—二氧化碳—孔隙压力—研究 IV. ①P618.110.2  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 241904 号

书 名 煤层中封存二氧化碳的双重孔隙力学效应研究  
著 者 吴 宇  
责任编辑 杨 洋  
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 787×960 1/16 印张 9.25 字数 166 千字  
版次印次 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

我国目前的能源消费结构中,煤炭、石油和天然气所占的比例分别为69.4%、20.4%、3%,每年的碳排放量已居全球之首。而化石燃料作为我国现代化建设和工业生产的主要能源,在今后很长时间内不可能简单地被淘汰或取代。在保持经济平稳发展的前提下,如果没有重大技术突破,我国的碳排放总量还是会呈现上升的趋势,2050年之前都很难达到排放量峰值。2009年,中国向全世界公布了到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%的减排目标。这就意味着中国将逐渐向低碳经济转型,这个过程会付出巨大的社会成本。因此,迫切需要研究既能减少CO<sub>2</sub>排放量又不阻碍国民经济发展的新方法。

近年来,CO<sub>2</sub>地质封存成为国际科学社会的研究热点。CO<sub>2</sub>地质封存是指将重点排放源原来排放到大气中的废气经处理后得到的CO<sub>2</sub>,经压缩后注入深部具有封闭条件的地层中永久保存起来。由于煤具有特殊的孔隙结构和有机组成,CO<sub>2</sub>在其中主要呈吸附状态,性质稳定,吸附量大,因此在深部不可采煤层中封存CO<sub>2</sub>是减少温室气体排放的有效措施之一。此外由于煤对CO<sub>2</sub>的吸附能力是对CH<sub>4</sub>吸附能力的两倍,将CO<sub>2</sub>注入煤层中可以把原来处于吸附状态的CH<sub>4</sub>驱替出来,一方面可以提高的煤层气产出率,另一方面可以有效地封存CO<sub>2</sub>,减少直接排放到大气中,是一项一举两得的技术。但是在这一过程中包含了煤层变形、气体运移、气体吸附作用、温度变化等一系列力学问题尚待解决,严重制约了该项技术的发展和應用。

作者在国家自然科学基金项目和中国矿业大学的资助下,对CO<sub>2</sub>煤层封存及CO<sub>2</sub>-ECBM过程中的煤体变形、气体吸附、气体渗流、气

体扩散等多场耦合效应进行了基础理论性研究,建立定量描述这一过程的多场耦合数学模型,取得了多项有价值的成果。本书是在这些研究成果的基础上精心编写而成的。

本书共分8章。第1章介绍了CO<sub>2</sub>地质封存的基本原理和国内外该项技术的研究现状及发展形势,提出了本书的研究重点。第2、3章研究了CO<sub>2</sub>煤层封存过程中渗透率的变化规律,建立煤层中封存CO<sub>2</sub>的双重孔隙介质数学模型,并利用数值方法对模型进行了求解和验证。第4、5章利用所建立的双重孔隙介质模型对煤层中封存的CO<sub>2</sub>进行了数值模拟,重点分析了煤层中裂隙分布、含水率等因素对封存效果的影响。第6、7章将模型应用到CO<sub>2</sub>-ECBM中,研究了将CO<sub>2</sub>注入煤层中对煤层气的驱替效果。第8章是对全书研究成果的总结。

本书是作者近年来在地下多物理场耦合研究方面成果的总结,在写作过程中广泛参阅了前人的研究成果和国内外相关论著,在此谨致谢意。本书的写作和出版得到了中国矿业大学缪协兴教授的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢。本书中大部分研究成果是作者在澳大利亚西澳大学留学期间完成的,对西澳大学Jishan Liu教授在理论分析和数值计算方面给予的大量指导和帮助表示衷心感谢。感谢茅献彪教授、王连国教授、白海波教授、陈占清教授、浦海教授、马占国教授、赵玉成教授给予的指导和帮助。同时感谢中国矿业大学出版社编辑同志为本书出版所付出的辛勤工作。

此外,相关的研究和本书的出版,得到了国家自然科学基金青年基金(51104147)、中国矿业大学青年科研基金(2011QNA17)、中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目的资助,在此向有关基金会表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有疏误之处,恳请读者谅解与指正。

作 者

2012年10月

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.3 本书的研究内容及技术路线 .....	12
<b>2 煤层中封存 CO<sub>2</sub> 的双重孔隙介质模型</b> .....	15
2.1 双重孔隙介质物理模型及相关假设 .....	15
2.2 双重孔隙介质模型的控制方程 .....	16
2.3 双重孔隙介质的渗透率 .....	19
2.4 双重孔隙介质的多物理场耦合方程 .....	26
2.5 煤层湿度对双重孔隙介质模型的影响 .....	29
2.6 本章小结 .....	33
<b>3 双重孔隙介质模型的数值求解方法</b> .....	34
3.1 双重孔隙介质模型的可行性 .....	34
3.2 双重孔隙介质模型的求解 .....	39
3.3 数值结果与解析解的对比 .....	44
3.4 本章小结 .....	46
<b>4 煤层中裂隙分布对 CO<sub>2</sub> 注入效果的影响</b> .....	47
4.1 裂隙识别的数字图像处理技术 .....	47
4.2 裂隙识别的 X 射线扫描成像法 .....	50
4.3 煤层裂隙的数值生成法 .....	54
4.4 煤层裂隙分布对 CO <sub>2</sub> 注入效果的影响 .....	59
4.5 本章小结 .....	73

<b>5</b>	<b>双重孔隙介质模型在 CO<sub>2</sub> 煤层封存中的应用</b>	75
5.1	数值模型建立和模拟方案	75
5.2	裂隙发育程度对 CO <sub>2</sub> 注入效果的影响	77
5.3	水平地应力对 CO <sub>2</sub> 注入效果的影响	84
5.4	含水率对 CO <sub>2</sub> 注入效果的影响	88
5.5	本章小结	93
<b>6</b>	<b>双重孔隙介质模型在 CO<sub>2</sub>-ECBM 中的应用</b>	95
6.1	CO <sub>2</sub> -ECBM 简介	95
6.2	多元气体对煤层渗透率的影响	100
6.3	双重孔隙介质 CO <sub>2</sub> -ECBM 模型的控制方程	103
6.4	CO <sub>2</sub> -ECBM 模型的验证	108
6.5	本章小结	110
<b>7</b>	<b>双重孔隙介质 CO<sub>2</sub>-ECBM 模型的工程实例</b>	112
7.1	工程背景及数值模型的建立	112
7.2	煤层的变形特征	116
7.3	煤层中气体压力和组分的变化	119
7.4	煤层气产量及 CO <sub>2</sub> 注入率	120
7.5	本章小结	124
<b>8</b>	<b>主要结论</b>	125
	<b>参考文献</b>	128



# 1 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

自工业革命以来的一百多年内,迅速发展的科学技术和工业生产给人类的生活带来了巨大的变化,人类能够更加自由地利用和支配自然。但是在生活水平日益提高的同时,人类在生产和生活中大量使用化石能源已经导致大气中CO<sub>2</sub>气体浓度急剧升高。据统计,大气中的二氧化碳含量已经从工业化前的 $280 \times 10^{-6}$ 增加到2007年的 $380 \times 10^{-6}$ <sup>[1]</sup>。我国2007年CO<sub>2</sub>排放量为 $5.06 \times 10^9$  t,仅次于美国,居世界第二位<sup>[2]</sup>。而据联合国能源署最新数据显示,目前我国的CO<sub>2</sub>排放量已经超过美国成为世界第一,在全球气候保护问题上面临着巨大压力。在我国目前的能源消费结构中,煤炭、石油和天然气所占的消费比例分别为69.4%、20.4%、3%<sup>[2]</sup>,以煤炭为主的能源结构意味着碳排放量将会居高不下。而化石燃料是我国现代化建设和工业生产的主要能源,并且在今后很长时间内不可能简单地淘汰或取代,因此,中国的碳排放总量还是会呈现上升的趋势。在保持经济平稳发展的前提下,如果没有重大技术突破,没有外部足够的资金支持,2050年之前中国都很难达到排放量峰值<sup>[3]</sup>。表1-1为中国化石燃料排放的二氧化碳情况及预测<sup>[4]</sup>。

表 1-1 中国化石燃料排放二氧化碳情况及预测

化石燃料	二氧化碳排放量/( $\times 10^6$ t/a)			
	1985年	1990年	2020年	2025年
煤	528.77	541	1 152~1 347	1 670~1 944
石油	75.62	101	188~220	321~374
天然气	6.82	8.09	62~73	91~105
煤气	8.68	—	40~73	67~78
合成油	0	—	3~3.4	6~8



二氧化碳是主要的温室气体之一。它在大气中增多的结果是形成一种无形的玻璃罩,使太阳辐射到地球上的热量无法向外层空间发散,增加大气及地球表面温度,形成温室效应。根据 IPCC(世界气象组织和联合国环境规划署联合组建的政府间气候变化专门委员会)公布的第四次评估报告,1906 年至 2005 年的 100 年间,全球地表平均温度上升了  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。近 50 年来的线性趋势则进一步攀升到每 10 年增加  $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。近百年来中国平均地表气温增加明显,升温幅度为  $0.5\sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>。根据政府间气候变化专门小组 1995 年的报告预测,到 2100 年,如果当前的温室气体继续排放,全球平均温度将升高  $1.0\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,全球海平面将上涨  $15\sim 95\text{ cm}$ 。虽然这些变化可能是细微的,但是其消极影响将是深远的。森林和其他生态系统由于不能适应气温和降水模式的变化,可能会遭到破坏。而发展中国家可能蒙受比发达国家更大的损失,因为它们对适应变化准备更为不足。许多处在干旱和半干旱地区的发展中国家会发现更难获得安全饮用水(如今超过 10 亿人口缺少安全饮用水)。热带疾病将扩散到更远的北方,而洪水成为温带和潮湿地区更大的问题。在中高纬度地区更容易进行粮食生产的同时,热带和亚热带地区的粮食产出则可能会下降。南北极地冰山将大幅度融化,导致海平面大大上升,大量的居民将会被上涨的海平面剥夺了居住地,仅孟加拉国就有上亿人口受到影响,一些岛屿和沿海城市将淹于水中,其中包括几个著名的国际大城市:纽约、上海、东京和悉尼<sup>[6]</sup>。

1992 年 5 月,联合国环境与发展大会在巴西里约热内卢召开,这次会议由政府间气候变化专门委员会(IPCC)发起,通过了旨在控制  $\text{CO}_2$  排放量、保护全球气候环境的《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)。149 个国家和地区的代表于 1997 年 12 月在日本东京召开了《联合国气候变化框架公约》缔约方第三次会议,通过了《京都议定书》,达成了发达国家二氧化碳等温室气体的减排“指标”。2002 年 8 月,我国政府也正式核准了《京都议定书》。

中国作为发展中国家虽然没有在条约中承担义务,但是随着中国经济的高速发展和人口增长,目前已超过美国成为世界第一大温室气体排放国。2009 年,中国向全世界公布了到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降  $40\%\sim 45\%$  的减排目标。这就意味着中国将逐渐向低碳经济转型,这个过程中会付出巨大的社会成本。中国人民大学能源与气候经济学项目团队的研究结果<sup>[3]</sup>表明:在继续实施现有的节能减排政策和措施,而不再额外增加现有政策措施的力度或不再出台新的政策;先进节能减排技术的应用也没有取得突破性的进展的情况下,碳强度在 2020 年应比 2005 年减少  $30\%$  左右。在此基础上,如果 2020 年碳排放强度相比 2005 年分别下降  $40\%\sim 45\%$ ,则相对基准情景,利用项目组开发的动态可计算一般均衡模型(CGE)模拟得到的 2020 年的 GDP

损失分别是 3 384 亿元和 5 862 亿元(2005 年不变价,分别占当年 GDP 的 0.64%和 1.11%)。除了考虑减排目标直接带来的 GDP 损失,还需要考虑社会成本以及减排过程中各种资源投入的机会成本。可以看出,中国公布的 40%~45%强度目标,并不是轻而易举就能实现的。因此,中国迫切需要研究既能减少 CO<sub>2</sub>排放量又不阻碍国民经济发展的新方法。

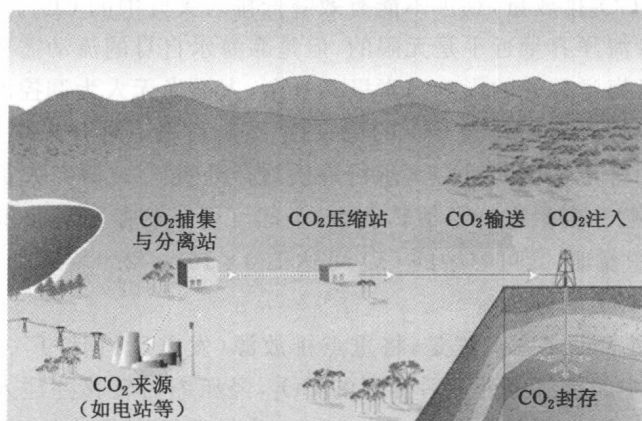


图 1-1 CO<sub>2</sub> 地质处置的基本流程示意图<sup>[13]</sup>

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 二氧化碳的处置方法

随着二氧化碳排放量的持续增加,引起的温室效应等气候变化对人类的环境保护提出了巨大挑战,为了控制二氧化碳排放,人们开始积极寻找减少二氧化碳排放的有效措施。目前,控制 CO<sub>2</sub> 排放的方法主要有以下几种<sup>[7]</sup>:① 通过提高能源利用效率来减少 CO<sub>2</sub> 排放,但这一措施的推广受到技术发展水平和经济发展等诸多因素的限制,在未来相当长的时期内,单纯依靠提高能源效率来减少 CO<sub>2</sub> 的排放量的方法,其效果将非常有限。② 大力开发低碳或无碳能源。目前,人类利用的主要低碳能源包括水能、风能、太阳能、氢气、地热及核能等,且这些低碳能源已经在人类能源结构中占了很大比重,发展低碳经济也将是未来社会发展的一个趋势,但是必须看到这些能源的都具有各自的局限性,在未来几十年内都无法大量替代煤和石油等化石燃料。③ 积极推行二氧化碳综合利用和处理技术<sup>[8]</sup>,即通过物理、化学及生物处理等技术回收和分离二氧化碳,将其资

源化,变废为宝。由于  $\text{CO}_2$  是超临界流体,具有化学性质稳定、无毒性、无腐蚀性、不易燃和不爆炸、超临界状态容易实现等特点,已经广泛应用于化工、机械、农业、食品、商业、运输、石油开采、国防、消防等部门。目前, $\text{CO}_2$  的超临界萃取、超临界制冷、超临界溶剂等方面的应用已受到越来越多的关注<sup>[9]</sup>,但是人们可综合利用  $\text{CO}_2$  的量非常有限,相比全球巨大的  $\text{CO}_2$  排放量来说,这种方法只能在一定程度上减少  $\text{CO}_2$  排放量,远远不能有效降低排入大气中的  $\text{CO}_2$ 。④ 利用海洋处置  $\text{CO}_2$ ,尽管海洋容量近乎是无限的,但是靠海水自身的流动需要数千年才能达到平衡,况且海洋处置的影响因素极其复杂,人类尚无人工调控海水  $\text{CO}_2$  平衡的能力,也难以控制海洋处置  $\text{CO}_2$  的稳定性。⑤ 利用不可开采煤层、深部含水层、废弃油气田等地下空间对  $\text{CO}_2$  进行地质封存处置<sup>[10]</sup>。研究人员对世界范围内  $\text{CO}_2$  的地下贮存容量进行了估算认为,全球可用于贮存  $\text{CO}_2$  面积约  $7.0 \times 10^7 \text{ km}^2$  的陆地沉积盆地,其可容纳的  $\text{CO}_2$  可达  $1.0 \times 10^{14} \sim 2.0 \times 10^{14} \text{ t}$ ,可存放人类几千年以上的  $\text{CO}_2$  的排放量<sup>[11]</sup>。

$\text{CO}_2$  地质处置的基本流程是:将重点排放源(发电厂、钢铁厂、炼油厂等)原来排放到大气中的废气经处理后得到的  $\text{CO}_2$ ,经压缩后转移并注入深部具有适当封闭条件的地层中永久保存起来。 $\text{CO}_2$  地质封存特别是油气田,煤层地质封存兼具保护环境和促进油气、煤层气产量的双重功能,近年来, $\text{CO}_2$  的地质封存已经成为一个研究热点。

选择合适的封存场所是  $\text{CO}_2$  地质封存的重要一步,目前  $\text{CO}_2$  地下储存场所主要包括<sup>[18]</sup>:① 沉积盆地内的深部含水层;② 已废弃或无商业开采价值的油气田;③ 开采中的油气田;④ 难以或不可开采的深部煤层。地质处置大量  $\text{CO}_2$  是一项可行的技术方法,所需的技术步骤已有了实际应用。如果矿物燃料燃烧产生的  $\text{CO}_2$  都实现地质处置,将使排放到大气中的  $\text{CO}_2$  减少 20%<sup>[19]</sup>,并且地质处置后的  $\text{CO}_2$  长期内对人类和环境的影响甚微<sup>[18]</sup>。不同储存的场地, $\text{CO}_2$  储存机制有所不同。我国煤炭资源丰富,不可采煤层数量众多,具有较大的  $\text{CO}_2$  煤层封存潜力,具有较好的关于煤炭、 $\text{CH}_4$ (煤层气)的研究和开采基础及经验,深部不可开采煤层处置  $\text{CO}_2$  将是我国在此项研究上的重点发展方向,因此本书将国内外  $\text{CO}_2$  深部煤层封存项目方面的研究情况予以重点介绍。

目前, $\text{CO}_2$  地质封存技术在世界各国还处于可行性和示范性研究阶段,在我国尚属起步阶段。但是,由于  $\text{CO}_2$  地质封存特别是油气田,煤层地质封存兼具保护环境和促进煤层气、石油产量的双重功能,近年来此项目的研究迅速发展,如美国、加拿大、日本、欧盟等纷纷展开研究,并先后进行了不同规模的现场试验,我国现在也有了一些小规模现场试验。图 1-2 为世界范围内  $\text{CO}_2$  地下存储示范项目分布图<sup>[13]</sup>,表 1-2 为部分  $\text{CO}_2$  驱替  $\text{CH}_4$  现场试验项目的情况。美国是

最早进行煤层中封存 CO<sub>2</sub> 工程实践的国家。1995 年,全球第一个 CO<sub>2</sub> 强化煤层 CH<sub>4</sub> 回收(CO<sub>2</sub>-ECBM)的试验工程在美国西南部 SanJuan 盆地建立<sup>[14]</sup>。加拿大的 Alberta 研究院对位于该地区的沉积盆地煤层进行了钻探测试和分析,认为该盆地煤层中储存 CO<sub>2</sub> 的能力达到了  $1.0 \times 10^{10} \text{ t}$ <sup>[15]</sup>。荷兰在 ZuidLim-burg 进行了 ECBM 技术及 CO<sub>2</sub> 的地质处置的现场试验工作。Hamelinck 等人根据该工程实践对 Achterhoek 等四个煤层气产区的二氧化碳地质处置能力进行了评价,表明其煤层每年可以处置  $5.4 \times 10^7 \text{ t}$  到  $9.0 \times 10^9 \text{ t CO}_2$ <sup>[16]</sup>。日本科学家<sup>[17]</sup>基于 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 吸附动力学模型评价了日本国内煤层处置 CO<sub>2</sub> 的潜力,发现北海道岛的煤层具有很大的处置能力,大约占其煤层可处置 CO<sub>2</sub> 量的 50%。在我国,注 CO<sub>2</sub> 强化煤层 CH<sub>4</sub> 回收项目也已进行了多次现场试验,如中加合作执行了“中国煤层气技术开发/二氧化碳埋藏”项目。此外,我国在平顶山煤矿实施了 CO<sub>2</sub>-ECBM 项目,获得了良好效果,并正在山西潞安煤矿进行煤层气小规模注气驱替现场试验<sup>[12]</sup>。

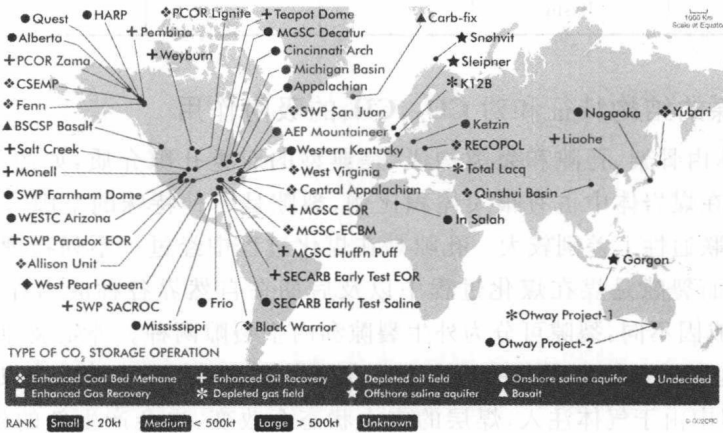


图 1-2 世界范围内 CO<sub>2</sub> 地下存储示范项目分布图<sup>[13]</sup>

表 1-2 CO<sub>2</sub> 驱替 CH<sub>4</sub> 现场试验项目<sup>[13]</sup>

项目名称	地点	所属国家	开始/停止 注气时间	CO <sub>2</sub> 封 存量/kt	煤层深度 /m
Allison Unit	New Mexico	美国	1995/2001	277	950
MGSC-ECBM	Illinois	美国	2007/2008	0.7	273
PCOR Lignite	North Dakota	美国	2008	—	500

续表 1-2

项目名称	地点	所属国家	开始/停止 注气时间	CO <sub>2</sub> 封 存量/kt	煤层深度 /m
SECARB Central Appalachian	West Virginia	美国	2009	0.9	490~670
SECARB Black Warrior Basin	Alabama	美国	2009	0.9	470
SWP San Juan	New Mexico	美国	2008	35	910
Fenn/Big Valley	Alberta	加拿大	1998	0.2	
CSEMP	Alberta	加拿大	2008	10	
PECOPOL	Kaniow	波兰	2004/2005	0.76	1 090
Qinshui Basin	QinshuiBasin	中/加	2004/2004	0.192	478
Yubari Project	Ishikari Coal Basin	日本	2004	0.884	890

### 1.2.2 煤的结构特征和对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 的吸附作用

煤岩体由骨架、孔隙和裂隙构成,是典型的双重孔隙介质,如图 1-3 所示。其中,孔隙在煤岩体中占有很大体积比例,裂隙是一种特殊的空隙。两者在成因、规模和联通性上差别较大。孔隙是在煤化过程中经过一系列物理化学变化而形成的,而裂隙是煤在煤化过程中以及后期在自然界各种应力作用下形成的<sup>[20]</sup>。按成因不同,裂隙可分为外生裂隙和内生裂隙两种。外生裂隙是由地质作用或人为开采活动所引起地应力改变使煤体破裂而产生的。在煤层中封存 CO<sub>2</sub> 的过程中由于气体注入,煤层的应力状态会改变,也会产生新的外生裂隙。而内生裂隙是在成煤过程中,煤中凝胶化物质受到温度和压力等因素的影响,体积均匀收缩产生内张力而形成的一种张裂隙。内生裂隙一般与煤层的层理面垂直于或者近似垂直,所以也称为割理。割理的间距和方位较为均匀,通常包括走向相互垂直的两组,一组称为端割理,端割理连续性较差并在面割理处终止,另一组称为面割理,其发育较好、延伸较远、连续性较好。割理将煤岩切割成小块体,称为煤基质块。

Barenblatt 最早提出双重孔隙介质的物理模型<sup>[21]</sup>。模型煤岩体分成含有孔隙空间的煤岩块和分割煤岩块的裂隙空间组合而成。煤岩块称为基质块,其孔隙度较大,但渗透率较小,是地下流体主要的储集空间;而裂隙的孔隙度很小,但渗透率较大,是流体渗流的主要通道。比较经典的双重孔隙介质模型有 War-

ren-Root 模型、Kazemi 模型和 Deswann 模型。Warren-Root 模型<sup>[22]</sup>在煤层气开发中较为常用,如图 1-4 所示。

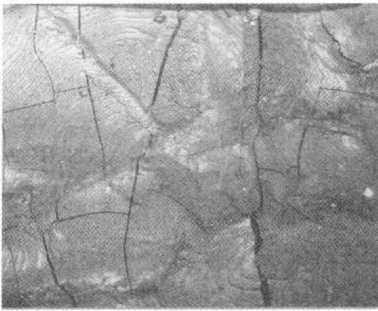


图 1-3 煤中的裂隙和节理

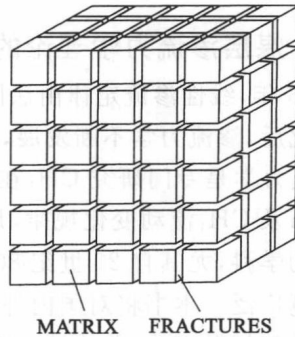


图 1-4 Warren-Root 模型

气体在煤层孔隙中的吸附/解吸是其储集的核心机制,主要在煤基质块中的微小孔隙中。煤层中现有储存的煤层气是在煤化作用、构造活动、埋藏演化史中经过多次吸附—解吸、扩散、渗透、运移后,在目前围岩限制条件下动态平衡的产物。煤层气的开发,实质上就是煤层气的解吸动力学过程,就整个煤层气的地面开发过程而言,可以概括为解吸、扩散、渗透三个连续过程。实际上,CO<sub>2</sub>在煤层中的地质处置过程可以简化为煤层气开采的逆过程,其核心是 CO<sub>2</sub> 吸附动力学的过程。

早在 1956 年, Walker 和 Geller 就做了一些无烟煤对 CO<sub>2</sub> 吸附的简单试验<sup>[23]</sup>, 70 年代,人们又进行了各种气体不同条件下的吸附试验。到 80 年代, Reznik 实施了用 CO<sub>2</sub> 置换 CH<sub>4</sub> 的试验,这是含气煤层封存 CO<sub>2</sub> 模拟实验的先驱<sup>[24,25]</sup>。之后的多项煤层封存试验研究均围绕揭示 CO<sub>2</sub> 封存过程中的煤的各种响应特性。而与这些实验研究成果相关的数值模拟研究开始展开,其中 Amoco 首先成功地展示了封存的现场过程<sup>[26]</sup>。

有关 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 在煤表面的吸附,国内学者已做了许多研究。如唐书恒<sup>[27]</sup>等通过煤吸附单一气体实验发现,CO<sub>2</sub> 在煤表面的吸附能力总比 CH<sub>4</sub> 强。降文萍等<sup>[28]</sup>从量子化学的角度计算了 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 在煤表面的吸附势阱,发现 CO<sub>2</sub> 在煤表面的吸附势阱远大于 CH<sub>4</sub> 的吸附势阱。这些研究都充分论证了在煤表面 CO<sub>2</sub> 具有很强的驱 CH<sub>4</sub> 能力,为 CO<sub>2</sub>-ECBE 的实施提供了理论基础。此外,国内许多学者以等温实验为基础<sup>[27,29]</sup>,探讨了煤对不同比例的 CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub> 以及 CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> 等多组分气体的吸附特征,发现在 CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> 吸附—解吸过程中,游离相的 CH<sub>4</sub> 浓度在不断增加,而游离相 CO<sub>2</sub> 浓度则在不断



下降。上述研究充分证明,在多组分气体吸附的过程中,CO<sub>2</sub>在煤表面的吸附具有竞争优势。该成果的发现为CO<sub>2</sub>的煤层贮存与其强化CH<sub>4</sub>产出提供了理论依据。

### 1.2.3 煤层渗流力学理论的研究现状<sup>[30]</sup>

1856年,线性渗流定律由法国工程师达西(Darcy)提出,标志着渗流力学的诞生。此后,渗流力学不断发展,并与其他学科交叉形成许多新兴的边缘学科。CH<sub>4</sub>渗流力学是专门研究CH<sub>4</sub>在煤层内运动规律的科学,主要研究煤层内CH<sub>4</sub>压力分布及CH<sub>4</sub>流动变化规律,是一门至今仍深受采矿界和力学界关注并不断发展中的学科,尤其自20世纪80年代以来迅速发展,其理论不断深化,应用范围越来越广泛。本书将对国内外学者在以下三个方面:CH<sub>4</sub>线性流动理论、CH<sub>4</sub>线性渗透与扩散理论、非线性CH<sub>4</sub>流动理论研究进展进行介绍。

#### (1) CH<sub>4</sub>线性流动理论

线性瓦斯渗流理论认为,煤层内瓦斯运动基本符合达西定律(Darcy's law)。20世纪40年代末,随着采矿(煤)业的大力发展,瓦斯渗流力学成为当时研究的热点之一。苏联学者首先应用达西定律来描述煤层内瓦斯的流动,开创性地研究了考虑瓦斯吸附性质的瓦斯渗流问题<sup>[31,32]</sup>。20世纪60年代,我国的学者周世宁、孙辑正<sup>[33]</sup>借鉴了苏联学者的研究成果,假设煤层瓦斯的流动符合达西定律,把多孔介质的煤层看成一种大尺度上均匀分布的虚拟连续介质,在我国首次提出了线性瓦斯流动理论。到了20世纪80年代,瓦斯流动理论的研究已经十分活跃,修正和完善瓦斯流动的数学模型是主要的研究内容,重点是修正瓦斯流动方程。郭勇义<sup>[34]</sup>在一维情况下,采用Langmuir方程来描述瓦斯的等温吸附量,结合相似理论提出了修正的瓦斯流动方程式。谭学术<sup>[35]</sup>应用瓦斯真实气体状态方程提出了修正的煤层真实瓦斯渗流方程。此后,文献<sup>[37~41]</sup>在总结前人研究成果的基础上,进一步修正和完善了均匀、各向同性煤层的瓦斯流动数学模型,并发展了非均质煤层的瓦斯流动数学模型,在此基础上应用计算机进行了数值模拟的对比分析。余楚新、鲜学福<sup>[36]</sup>认为煤层中只是可解吸的部分瓦斯参与了渗流,并假设煤体瓦斯吸附与解吸过程完全可逆,建立起瓦斯渗流的控制方程。近年来,人们为了探索煤与瓦斯突出的机理,用达西渗流运动方程来描述突出过程中的瓦斯流动。研究表明,煤的破碎启动与瓦斯渗流的耦合是煤与瓦斯突出的内在因素<sup>[42-44]</sup>。

#### (2) CH<sub>4</sub>线性渗透与扩散理论

瓦斯渗透与扩散理论认为煤层内瓦斯运动包含了渗透和扩散两种流动形式。随着这一领域研究的不断深入,煤层瓦斯渗透—扩散的理论被越来越多国内外许多学者所认同。1986年以来,国内学者在煤层内瓦斯运移的机理方面取



得了很大突破,对现代瓦斯流动理论的研究做出了很大贡献,提出煤层瓦斯流动实质上是可压缩性流体在各向异性且非均质的孔隙—裂隙双重介质中的渗透—扩散的混合非稳定流动<sup>[45]</sup>。1987年,A. Saghfi 和 R. J. William 等<sup>[47]</sup>认为煤层中瓦斯包含游离态和吸附状态,游离的瓦斯将通过煤岩体内相互沟通的裂隙网络向低压力处流动,与此同时,块煤内部的瓦斯解吸,向裂隙扩散,并在此基础上耦合了描述瓦斯渗流的 Darcy 定律和描述煤块瓦斯扩散 Fick 定律,形成瓦斯渗透—扩散的流动耦合方程,结合边值条件,提出了瓦斯渗透—扩散的动力模型。

### (3) CH<sub>4</sub> 非线性流动理论

线性瓦斯流动理论经过 40 多年的发展历史,先后发展了线性渗流理论<sup>[31-41]</sup>、线性扩散理论<sup>[44]</sup>、渗透—扩散理论<sup>[45,47,48]</sup>等来描述煤层内瓦斯运移规律,并且在一定的简化假设下已形成了较严密的理论体系,对人们理解煤岩、体内瓦斯流动规律和指导煤矿安全生产方面起到了很大作用。但是,煤层内瓦斯运移是一个非常复杂的过程,这不仅与煤结构有关,而且受到其他众多因素的影响,人们发现线性瓦斯流动理论在许多情况下不能描述煤层瓦斯的流动规律跟实际情况差别很大。随着这一领域研究的不断深入,人们逐渐认识到瓦斯流动实际上非线性,因此瓦斯流动的非线性理论被提出来并受到人们的重视。

对于线性的 Darcy 定律用于描述均质多孔介质中气体渗流出现偏离的问题国内外许多学者已做了大量研究<sup>[52,53]</sup>。人们经过研究归纳出造成达西定律偏离的原因:① 流速过快;② 分子效应;③ 离子效应;④ 流体本身的非牛顿态势。著名的流体力学家 E. M. Allen<sup>[49]</sup>指出均匀煤样中瓦斯涌出的试验中观测到实验结果与应用用达西定律描述结果不相符合。1984年,日本学者通口澄志<sup>[45]</sup>通过试验证明达西定律不太符合煤岩体内瓦斯流动规律,并在大量试验研究的基础上提出了更能符合瓦斯流动的幂定律(Power Law)。并对比现场实测结果数据,分别应用非线性幂定律瓦斯流动模型和线性的 Darcy 定律描述煤层内瓦斯流动,结果表明了前者更准确,更符合实际。此后,我国学者孙培德<sup>[45]</sup>在均质煤层和非均质煤层条件下,根据幂定律的推广形式,首次建立起可压缩性瓦斯在煤层内流动的非线性瓦斯流动模型,非线性瓦斯流动理论<sup>[45]</sup>的发表,引起了国内外同行的兴趣和关注<sup>[51]</sup>。1991年,罗新荣<sup>[50]</sup>经过实验研究,提出考虑 Klinkenberg 效应的修正形式的达西定律—非线性瓦斯渗流规律,并建立了相应的瓦斯流动数学模型,指出了达西定律的适用范围。

从上面的叙述可以看出,忽略煤层的变形只单纯考虑气体在煤层中的渗透与扩散所得到的结果均不太理想。因为煤的变形对气体在其中的渗透特性有相当大的影响。在建立了合适的渗透率变化模型后,Darcy 定律也就变成了非线性的形式了,这就是文献<sup>[47]</sup>在采用变透气系数的前提下,使数值模拟结果与实

际情况相吻合的原因。

#### 1.2.4 煤层流固耦合模型的研究现状

煤储层是含有孔隙和裂隙的多孔介质,其中固相、液相和气相并存。对于岩石(煤)中流体流动问题,经典渗流力学已进行了广泛的研究,但它没有考虑流体流动和岩石(煤)变形之间的作用,而在实际情况中,例如本书所研究的深部不可采煤层中封存 $\text{CO}_2$ 的问题,由于孔隙流体压力的变化,一方面要引起煤储层骨架应力变化,由此导致煤体渗透特性变化。另一方面,这些变化又反过来影响孔隙流体的流动和压力变化。因此,在许多情况下必须考虑流体,包括液体(水等)、气体(煤层气、天然气等)在多孔介质中的流动规律及其对岩石(煤)本身变形或强度的影响即应考虑岩体(煤)应力场与渗流场之间的耦合作用。

在煤层内瓦斯流动的流固耦合研究中,1994年,矿井下煤层 $\text{CH}_4$ 流动的固结数学模型由我国学者赵阳升等提出,并用数值方法对均质岩体的固气耦合数学模型进行了求解<sup>[54,55]</sup>,从而基本奠定了这一研究的基础。1995年,章梦涛和梁冰<sup>[56]</sup>利用塑性力学的内变量理论进一步发展了 $\text{CH}_4$ 突出的固气耦合数学模型。刘建军等<sup>[57]</sup>研究了煤层气的运移产出和煤体变形的流固耦合问题,建立起比较完善的煤层气储层流固耦合模型。孙可明等<sup>[58]</sup>在考虑气溶于水的情况下,建立了煤层气开采过程中的气、水两相流阶段的渗流场和煤岩体变形场以及物性参数间耦合作用的多相流体流固耦合渗流模型,通过将岩土质点的位移分量引入到渗流场、渗流场中的孔隙流体压力引入到变形场、有效应力和孔隙流体压力引入到渗流物性参数中,实现了流固耦合间的相互作用。梁冰、孙可明<sup>[59]</sup>等对低渗透煤层气藏的流固耦合特性进行了研究,将煤层抽象为双孔隙度单渗透率的双重孔隙介质模型,给出了煤储层中煤层气的储集、运移和产出机理,并建立了反映解吸、扩散、渗流过程的低渗透双重介质气、水两相流流固耦合模型和注气增产煤层气多组分流体流固耦合模型。李祥春<sup>[60]</sup>等在考虑煤吸附 $\text{CH}_4$ 产生膨胀应力的前提下,根据煤体受力平衡条件建立考虑吸附膨胀应力的煤体有效应力表达式,并根据流—固耦合渗流理论的基本思想,建立煤层 $\text{CH}_4$ 流—固耦合数学物理模型。王惠芸<sup>[61]</sup>等考虑气体滑脱效应条件下,建立了煤层气在低渗透储层中渗流的数学模型,采用Laplace变换和留数计算方法进行解析求解,得出了气体非线性渗流的压力分布规律,并将其与达西渗流条件计算的结果进行对比分析。李小春、白冰<sup>[62]</sup>等研究了二氧化碳煤层封存流动流固耦合问题,给出了 $\text{CO}_2$ -ECBM过程固气耦合分析的完整数学模型,并考虑了煤岩体的吸附膨胀效应,提出了考虑吸附膨胀效应的煤岩孔隙率、渗透率的动态演化方程。冯启言、周末<sup>[7]</sup>将煤体看做单孔介质建立了包含气体竞争吸附、竞争扩散、气体渗