

〔国家重点基础研究发展规划—973煤层气项目(2002CB211700)资助〕

〔国家自然科学基金重点项目(50134040)资助〕

多相介质煤层气储层 渗透率预测理论与方法

Theories and Techniques of Permeability Prediction
of Multiphase Medium Coalbed-Methane Reservoirs

傅雪海 秦 勇 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

[国家重点基础研究发展规划—973 煤层气项目(2002CB211700)资助]

[国家自然科学基金重点项目(50134040)资助]

多相介质煤层气储层 渗透率预测理论与方法

Theories and Techniques of Permeability Prediction
of Multiphase Medium Coalbed-Methane Reservoirs

傅雪海 秦 勇 著

中国矿业大学出版社

内容提要

作者运用系统论的观点,提出并论证了煤储层三相介质与三元结构系统的新概念,对煤储层内宏观裂隙、显微裂隙和孔隙进行了连续系统的分形研究,提出了适合于煤层气吸附/解吸、扩散与渗流的孔隙、裂隙结构分形分类和自然分类。采用现代测试方法与理论,厘定了多相介质煤岩体的吸附/解吸、扩散与渗流特征,发现平衡水条件下煤对甲烷吸附能力随煤级变化的拐点是在 $4.5\% R_{O,max}$ 左右,得出了我国煤储层气—水双相渗流区域狭窄、平衡点处相渗透率低的重要结论,明确指出降压、升温 and 置换是煤层气开发的主要方法。基于煤储层的地球物理特征,构建了煤储层含气量与煤储层渗透率的预测数学模型,弥补了煤田地勘过程中煤层气含量资料测试不多,煤心破碎之不足。基于现代岩石力学理论与方法,探讨了多相介质煤岩体的力学特征,构建起煤储层现代三维地应力与渗透率之间预测的数学模型,并首次对渗透率与主控因素之间关系进行了系统耦合分析,指出与中煤级煤相比,高煤级煤储层在煤层气开发过程中渗透能力较难以改善。

本书内容丰富,方法新颖,资料翔实,为煤储层物性研究提供了系统的理论和方法,可供石油、天然气、煤层气及瓦斯地质等相关专业的研究生、高年级本科生及科研院所的科技人员及实验测试人员参考、使用。

图书在编目(CIP)数据

多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法/傅雪海,秦勇著—徐州:中国矿业大学出版社,2003.11
ISBN 7-81070-805-8

Ⅰ.多… Ⅱ.①傅… ②秦… Ⅲ.多相介质—煤层—物性学 N. P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 100117 号

书 名 多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法

著 者 傅雪海 秦 勇

责任编辑 宋党育

责任校对 孙 景

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 286 千字

版次/印次 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

印 数 1~1 000 册

定 价 26.00 元

(图书出现印刷质量问题,本社负责调换)



序

我国 21 世纪面临优质能源严重短缺和生态环境急剧恶化的巨大压力,寻找洁净替代能源和防治环境污染势在必行。煤层气则是我国一种巨大的优质高效洁净能源,其开发对于增加新能源、改善我国能源结构,减轻矿井灾害、降低生产成本,遏制我国煤矿瓦斯排放量、缓解大气温室效应等均有极为重要的现实意义。

在我国煤储层中高煤级煤储层占有重要地位。由于我国地质条件复杂,煤储层含气饱和度、水饱和度、压力饱和度及渗透率相对较低,非均一性和地应力相对较高,与国外煤层气商业性开发成功的煤储层物性存在较大差异。因此,迫切需要针对我国煤储层自身特点开展系统、完整的物性实验,开发相关的数值模拟技术,以有效指导我国煤层气的勘探与开发。

《多相介质煤层气储层渗透率预测理论与方法》是我国系统研究煤储层物性特征的首部学术专著,作者运用系统论的观点,以地质科学、表面物理化学、渗流力学等学科交叉渗透的理论为指导,以 50 多对矿井的井下观测为基础,以先进的近似储层条件的物性实验为手段,采用实验模拟与数值模拟相结合的研究方法,在煤储层的孔隙、裂隙特性、吸附/解吸特性、多相介质力学特性、地球物理特性、渗透特性等诸多方面得出了新的认识,尤其是在煤储层原位渗透率预测及煤层气开发过程中渗透率动态变化规律等方面取得了创新性成果。

总之,该书资料翔实、内容丰富,定义论述科学合理,语言流畅,理论与实例紧密结合,图表精美,是一本全面系统论述煤储层物性的优秀学术著作,是从事石油、天然气、煤层气勘探开发科技人员的良师益友。该书的出版,对我国煤储层物性研究及煤层气勘探与开发具有重要的价值。



前 言

我国埋深 2 000 m 以浅、含气量 $4 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上煤层气资源总量约为 14.3 万亿 m^3 , 是新世纪我国重要的新型洁净能源和战略资源。煤层气资源的有效勘探与开发, 在改善我国目前不尽合理的能源结构、从根本上防治瓦斯事故以改善煤矿安全生产条件、降低因大量甲烷排放而导致的温室效应等方面具有重大意义。美国 2001 年煤层气产量已达 480 亿 m^3 , 是我国同期天然气总产量的 1.7 倍, 而我国迄今尚未实现煤层气地面规模性开发。

美国通过近 30 年的勘探开发实践, 建立了中煤级煤和低煤级煤煤层气成藏勘探与开发的系统理论, 但长期将高煤级煤层气藏为煤层气勘探开发的“禁区”。迄今为止, 世界上尚无成功开发高煤级煤储层中煤层气的先例。我国高煤级煤地区煤层气资源量巨大, 约占全国煤层气资源总量的三分之一, 具有极大的资源价值和开发潜力。我国近年来在沁水盆地的勘探与开发试验成果预示出我国高煤级煤地区具有良好的煤层气开发前景, 但初期产气量高, 后期产能很快衰竭之“瓶颈”现象, 对传统煤层气勘探开发理论构成了极大挑战, 向我国煤层气工业界和学术界提出了重大研究课题。

煤储层渗透率是决定煤层气资源开发成败的关键参数之一。先期研究表明, 煤储层渗透率显著地受控于天然裂隙的发育程度、现代三维地应力的方向和大小, 并在开采过程中不断发生变化。我国沁水盆地高煤级煤储层试井渗透率相对较高, 甚至部分达到美国圣胡安盆地一些单井的水平, 但气产量却相差甚远。国内外迄今对高煤级煤储层渗透率的受控规律与机理知之甚少, 在有效应力—煤基质收缩耦合作用对煤储层渗透率动态作用机制方面几乎没有开展专门的研究工作。首先, 我国在高煤级煤地区打出了高产煤层气井, 但对其机理在理论上还未形成深刻认识, 对地面开采的可持续特性也缺乏有效预测理论与方法。第二, 对煤储层渗透率动态变化规律和机制尚缺乏科学的实验依据, 难以构建煤储层精细数值模拟的模型与方法。第三, 关于不同构造环境对煤储层原始渗透率以及动态变化控制规律的差异性, 目前基本上仅停留在概念或总体认识阶段, 有效应力—煤基质收缩耦合效应对煤储层渗透率动态变化规律控制特征的研究成果目前尚未见及报道。

有鉴于此, 本文从煤储层三相介质组成和三元结构系统出发, 采用中、高煤级煤对比的研究方法, 以多相介质煤岩体力学性质、吸附/解吸性、地球物理特

性、渗透性等物理模拟为手段、以山西沁水盆地为依托,以地质科学、表面物理化学、渗流力学等学科交叉渗透的理论为指导,采用物理模拟与储层模拟相结合、静态模拟与动态模拟相结合等多方位的研究方法,针对上述问题较为系统地开展了分析与探讨。通过研究,力图在高煤级煤储层地质理论方面有所进展,并期望研究成果能对我国高煤级煤层气藏稳定、平衡开发有所贡献。

本书撰写工作的分工如下:前言、第一章,秦勇、傅雪海;第二章、第三章、第四章、第五章、第六章、第七章、第八章,傅雪海;第九章,秦勇。全书由傅雪海统一定稿。

在研究过程中,韩德馨院士、戴金星院士、周世宁院士为研究工作提出了建设性意见,戴金星院士欣然为本书作序;研究工作还得到了刘焕杰教授、王桂梁教授、唐修义教授、姜波教授、曾勇教授、范炳恒教授、缪协兴教授、李文平教授、薛秀谦教授、桑树勋教授、杨永国教授、韦重韬副教授、朱炎铭副教授、郭英海副教授和聂伯胜博士、张勇博士、李朝峰博士后的指导;煤样采集得到了晋城矿务局、晋城县煤管局、高平县煤管局、长治市煤管局、潞安矿务局、襄垣县煤管局、沁源县煤管局、古县煤管局、霍州矿务局、阳泉矿务局、寿阳县煤管局、焦作矿务局、淮南矿务局、淮北矿务局、皖北矿务局、乌鲁木齐矿务局、阜康市煤管局、米泉县煤管局、哈密矿务局等单位和李贵中硕士、徐磊硕士、张华硕士的大力支持;岩石力学实验得到了中国矿业大学岩控中心张少华高级工程师,石油勘探开发研究院廊坊分院张保平博士、田国荣高级工程师的帮助和指导;气、水相对渗透率实验得到了廊坊分院万玉金博士、武平工程师和天然气所张建博博士、王红岩博士、刘洪林博士的帮助和指导;等温吸附实验、压汞实验、煤岩鉴定和煤质化验得到了中国矿业大学张井高级工程师和江苏省煤田地质勘探研究所李春林高级工程师的帮助和指导。地应力数值模拟得到了中国矿业大学(北京校区)能源工程系曹代勇教授、孟召平教授、邵龙义教授、唐跃刚教授,计算中心张瑞新教授、曾刚高级工程师,分形研究所陈忠辉教授、周宏伟副教授的大力支持和帮助。

多相介质煤储层渗透率预测是一个新颖的命题,但本次工作笔者总是试图从一个不与前人完全雷同的角度去认识它,力求朝这种思路去处理所获得的资料、实验结果和信息,并引出自己的判断和结论。科学研究立足于创新,何况地质学又是一门探索性极强的学科,本人虽有志于此,但也深知举步维艰,在以下的章节中,您将可以看到这些追求的足迹……

作 者

2003年10月

SUMMARY

Some innovative achievements were acquired in the physical properties of coal reservoirs, based on coal the section observation under 28 mines, the micro-petrological and pore identification from 57 coal samples, the multiphase medium sorption experiments from 35 samples, the multiphase medium mechanical, adsorption-expanding and permeability experiment of the single-phase and gas-water double-phase medium of 6 set samples, and the analyses of 214 bore logs.

1. The new concepts, i. e. , the three-phase medium and ternary structure system of coal reservoirs, were put forward and demonstrated utilizing phylogenetic idea.

Coal reservoir is a three-dimension geological system consisted of three-phase matters, i. e. , gas, liquid and coal matrix. Under the stratum in situ, the relationships among the coal matrix, adsorbed methane, free methane and water are relatively steady with dynamic equilibrium state, and total methane contents accord with the thermodynamical conditions or the gas-state equation. When the effects of the fluid pressure or other outside forces are changed, the corresponding changes would occur in the three-phase medium system, namely, the multiphase medium coal rock can be look upon a separate and self-adjustable system.

Coal reservoir is a ternary structure system including the macrofractures, microfractures and pores. The pores are the primary stored room of coalbed methane (CBM), the macrofractures provide the channels for the CBM flow, and the microfractures make up of the bridge connecting the former to the latter.

The macrofractures, microfractures and pores in coal reservoirs were systematically researched in virtue of the fractal theory and method for the first time, and the fractal classification and natural ones of the coal pores and fracture structures adapting to CBM-sorption, diffusion and seepage flow were further suggested.

2. The characteristics of the absorption, diffusion and seepage flow in the multiphase medium coal rocks were re-examined by means of the modern testing methods and theories.

It was found that the evolution of the methane-adsorbing capacities of coals with coal ranks takes a reverse about at the maximum vitrinite reflectance $4.5\%R_{o,max}$ under the equilibrium moisture. The Langmuir volume of coals increases with increasing coal rank when $R_{o,max}$ is less than 4.5% , and it is inverse when $R_{o,max}$ is more than 4.5% . But as for the low-rank coals, the influence of the coal rank on the Langmuir volume is relatively weak, and that of the coal macerals is rather strong.

The permeability experiments showed that the absolute helium permeability of coals is more than the Klinkenberg methane one, whereas the latter is again more than the water permeability. The water-bounded saturation of coal reservoirs in China is higher, and the seepage flow range of the double-phase gas-water medium is very narrow. The relative

permeability at the equilibrium spot and the gas permeability under water-bounded are lower.

The key factors affecting the absorptive capacities of the coals to methane were found out. The capacities strengthen with raising the gas pressure (the partial pressure of multiple components), pore volume, special surface area and adsorbing heat, and weaken with increasing the temperature, mineral matters, water and oil. Thereby, the reservoir pressure drop, temperature elevation and gas replacement were suggested as the primary methods for developing coalbed methane.

3. Coalbed gas content and permeability of coal reservoir were predicted based on the characteristics of geophys of coal reservoir

The regress formulae between log responses and coalbed gas content were established utilizing progression regression analysis method, and F-checking and precision-checking shows that digital log is good simulative log.

With cluster analysis method, coalbody structure was classified into primary constructional coal-ruptured coal, mortar coal and mylonitic coal utilizing log curve, and combining the observation under mine and description of coal core.

The mathematical models for predicting coalbed gas content and permeability of coal reservoir were established, and they make good the shortage of the testing of coalbed gas content and the imperfection of breakingup of coal core in the course of coalfield exploration.

4. The mechanical characteristics of multiphase medium coal rocks were discussed based on the modern theory and methods of the rock mechanics.

Mechanical parallel experiments of multiphase medium coal rocks showed that elasticity modulus and compression strength of coal samples with saturated water and gas are less than that of the ones with saturated water, and the latter are as well as less than that of the ones under air dry, nevertheless the poissons ratio is just opposite. Effect stress coefficient (Boit coefficient) reflecting the distortion effect of pore fluid to solid can not explain completely physical chemistry effect of gas and water medium on coal matrix, whereas there existing "corrosion-damage" of intensity and energy among them. On the contrary, the intension of coal reservoirs may strengthen, poissons ratio may decrease, plane stress ponderance of gravity will fall and permeability will improve with the discharge of water and the release of methane in the process of releasing coalbed methane

Parallel permeability experiments of methane and helium showed that permeability increment induced by coal matrix shrinkage effect increases on logarithm form with the reducing fluid pressure. Expand experiments of coals adsorbing CO₂ showed that simulative relationship between coal volume strains and fluid pressure accords with the form of Langmuir equation, and the coal matrix shrinkage strains reduce with the increasing coal rank.

Coal reservoir permeability lies on the development of nature fractures, whereas modern crutial stress controls opening and closing of them. The modern ground stress in middle to south of Qinshui basin in Shanxian Province were simulated utilizing FLAC-3D software, integrating stress-permeability experiments and the data of testing permeability of CBM testing

wells in the researched region, a coupling mathematical model of permeability to three dimension stress was erected, and original permeability were completely predicted in the said region at the light of the mode.

It is pointed out that the main permeability-controlled factors were the development fractures and pores, effect stress and the capacities of coal matrix shrinkage. Negative effect of effective stress on permeability is more than position one of coal matrix shrinkage on permeability in high-rank coals and theirs permeability reduce with the fall of reservoir pressure, whereas middle-rank coals are opposite.

The development of fractures and the capacity of coal matrix shrinkage in high-rank coals are less than middle-rank coals, nevertheless confining water saturation of the former is bigger and its gas-permeability only accounts for 15.6% of the Klinkenberg one under confining water. As a whole, they are difficult to be improved in comparison with middle-rank ones in the process of releasing coalbed methane.

目 录

序	戴金星
前言	1
第一章 绪论	1
第一节 研究意义	1
第二节 国内外研究现状及评述	1
一、煤储层裂隙、孔隙结构系统	1
二、多相介质煤岩体吸附与解吸特征	2
三、测井响应研究煤层气含量与煤体结构	3
四、多相介质煤岩体力学实验	3
五、多相介质煤岩体渗透性实验	4
第三节 问题的提出	5
第四节 研究方案	6
一、研究思路	6
二、研究内容	6
三、研究历程	7
第二章 煤储层三相介质系统	9
第一节 煤储层中的固相介质	9
一、煤岩学描述	9
二、煤化学描述	10
第二节 煤储层中的液相介质	14
第三节 煤储层中的气相介质	15
第四节 流体的状态方程	17
第三章 煤储层三元孔隙结构系统	19
第一节 裂隙、孔隙系统描述	19
一、宏观裂隙	19
二、显微裂隙	25
三、孔隙	25
四、影响煤储层裂隙发育的地质因素	30
第二节 裂隙、孔隙系统分形研究	31

一、煤岩体的块度分形	32
二、煤储层裂隙分形	33
三、孔隙分形研究	36
第三节 孔径结构自然分形分类与自然分类	40
一、吸附孔隙的自然分类	40
二、渗流孔隙的自然分类	42
三、煤层气气体分子在不同孔径段的流动特征	44
四、煤孔径结构分类	44
第四节 本章小结	44
第四章 多相介质煤岩体三轴力学特性	46
第一节 实验原理与方案	46
一、表征体积单元	46
二、实验方法	46
三、实验原理与数据处理	49
第二节 三轴力学特性显现特征	52
一、静态弹性模量与静态泊松比	52
二、体积压缩系数和体积模量	56
三、动态弹性模量和泊松比	62
四、Boit 系数	64
五、煤基质收缩参数	64
第三节 气、水介质对煤岩体的“蚀损效应”	67
一、强度“蚀损”	69
二、能量“蚀损”	70
第四节 本章小结	71
第五章 多相介质煤岩体的吸附/解吸与渗流特征	72
第一节 基础理论	72
一、吸附与解吸	72
二、扩散	75
三、渗流	76
第二节 实验方案	77
一、平衡水等温吸附实验	77
二、相对渗透率实验	78
第三节 多相介质煤岩体的吸附/解吸特征	83
一、气相多元组分吸附特征	83
二、多相介质的吸附特征	85
三、干燥与平衡水煤样最大吸附量之间的关系	90
四、解吸特征	92

第四节 多相介质煤岩体相渗透率特征	95
一、单相渗透率	95
二、相对渗透率	96
第五节 问题讨论	99
一、吸附/解吸动力学特征	99
二、煤基质收缩效应与渗透率	101
三、粘性指进	104
四、煤层气的渗流特征	105
第六节 本章小结	106
第六章 煤储层物性的测井响应	108
第一节 测井响应解释煤层气含量	108
一、测井评价煤层物性的理论依据	108
二、测井响应拟合煤层气含量	109
第二节 测井响应评价煤体结构	114
一、煤体结构分类	114
二、煤体结构研究方法	115
第三节 煤储层渗透率预测	124
一、煤体结构类型的厚度和比例计算	124
二、渗透率预测	124
三、渗透率分布	125
第四节 本章小结	128
第七章 煤储层应力渗透率模拟	129
第一节 理论基础	129
一、地应力的构成	129
二、裂隙应力分析	130
第二节 应力渗透率物理模拟与数学模型	132
第三节 实例数值模拟	133
一、地质模型	133
二、现代地应力数值模拟	135
三、应力渗透率数值模拟	141
第四节 本章小结	145
第八章 煤储层渗透率与主控因素的耦合分析	146
第一节 影响渗透率的主控因素	146
一、有效应力原理	146
二、水平有效应力计算	147
第二节 裂隙宽度物理模型与数学模型	148

一、有效应力—裂隙宽度模型	148
二、煤基质宽度—裂隙宽度耦合模型	150
第三节 渗透率与主控因素耦合关系的数值模拟	151
一、与孔隙、裂隙结构的关系	151
二、与有效应力和煤基质收缩效应的耦合分析	156
第四节 本章小结	159
 第九章 结论	 160
 附录:主要符号说明及单位	 164
 参考文献	 166

第一章 绪 论

煤层气与常规天然气不同,多相介质煤储层具有非常特殊的物理特征,其物性包括孔隙、裂隙性,吸附/解吸性,力学性质,地球物理特性及渗透性等多个方面,所反映出来的煤层气储集和产出机理比常规天然气复杂得多。

第一节 研究意义

以煤层作为储层的天然气称为煤层气(或煤层甲烷),也是矿井瓦斯的主要来源。开发煤层气具有三重意义:①充分利用煤层气这一高效洁净的优质能源;②改善煤矿安全条件;③保护人类生态环境。开发煤层气,有助于促进我国能源结构的调整,有利于我国能源战略的可持续发展^[1],因此日益受到我国各级政府和有关工业部门的高度重视。

我国煤层气资源量约为 $14 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (甲烷含量大于 $4 \text{ m}^3/\text{t}$,埋深 $-2\ 000 \text{ m}$ 以浅)^[2]。至今已在全国三十多个矿区施工了约 240 余口煤层气井,大部分为参数试验井,部分进行了试气排采,虽不乏高产气井,但渗透率普遍偏低,尤其是气产量很快衰减,严重制约了我国煤层气勘探开发的步伐,是目前急待解决的重大课题。然而,国外理论和实践表明,煤储层在排水降压过程中,随着水和甲烷的解吸、扩散和排出,煤基质收缩,煤储层渗透率将不断得到改善^[3],又为我国煤层气地面开发带来了新的曙光。煤储层渗透率研究是进行煤层气渗流分析的主要参数,在煤层气资源已查明的前提条件下,煤储层渗透率又是制约我国煤层气资源地面开发成败的关键因素之一。所以开发煤层气,研究其赋存的地质条件以及生成、储集、逸散机理等一系列成藏条件固然必要,但研究煤储层物性,尤其是煤储层渗透率预测、动态变化规律和煤储层气、水两相介质的渗流机理更显得迫切和重要。

开展多相介质煤岩体物性实验及煤储层渗透率数值模拟,有利于确定我国煤层气的开发前景,有利于煤层气地面开发高渗富集区优选,有利于制订有效的煤层气开发战略和完井方案,有利于煤层气产能预测和经济评价,并能为储层改造和提高采收率提供理论依据,还将有助于煤与瓦斯突出机理的分析与探讨,有助于多相介质力学的创立和发展。因此,开展此项研究,既有理论意义又具有实用价值。

第二节 国内外研究现状及评述

煤储层是由气、液、煤基质块和宏观裂隙、显微裂隙、孔隙组成的三相介质与三元结构系统,是由相互关联、相互制约和相互作用的一些部分组成的具有某种功能的组合^[4]。多相介质煤储层物性研究涉及到煤的孔隙、裂隙性,吸附/解吸性,地球物理特征,力学性质及渗透性等多个方面。

一、煤储层裂隙、孔隙结构系统

煤储层中的裂隙在国外煤层气工业中常被称为割理,由于受研究目的、方法、地区等因

素的限制和影响,不同的研究者对割理成因和内涵的认识还不完全一致,对其定义主要有以下四种:①割理基本上是煤储层中的收缩裂隙,走向受形成期古构造应力场控制^[5];②割理是煤化作用过程中形成的,煤储层中最发育的裂隙^[6];③割理相当于其他沉积岩中的节理^[7];④割理是煤层中基本上没有发生位移的张性裂隙^[8]。

许多学者对割理成因的解释主要依据自己的观察结果,概括起来,有以下三种认识:①强调内应力作用,认为割理是煤化作用过程中,由于垂向压实作用和脱水作用引起煤基质收缩而形成^[9];②强调外应力作用,认为割理的形成与古构造应力有关^[10];③割理是由煤化作用和古构造应力综合作用的结果^[7,11]。

煤孔隙研究的焦点集中在煤孔径结构划分上,不同研究者基于孔径与气体分子间的作用特征、或孔隙在煤中的赋存状态或仪器的工作范围对煤的孔径结构划分作过富有成效的研究工作^[12~16]。目前,具有代表性的煤孔径结构划分系统如表 1-1 所示。其中,在国内煤炭工业界应用最为广泛的是 Ходот(1961)的十进制分类系统,Dubinín(1966)系统和 Gan(1972)系统则较普遍地见诸国外煤物理和煤化学文献。但适合于煤层气吸附与解吸、扩散与渗流的孔隙结构自然分类系统尚未建立。

表 1-1 煤孔径结构划分方案比较 单位:直径/nm

Ходот ^[12] (1961)	Dubinín ^[13] (1966)	IUPAC ^[13] (1966)	Gan ^[14] (1972)	抚顺煤研所* (1985)	吴俊 ^[15] (1991)	杨思敬 ^[16] (1991)
微孔,<10	微孔,<2	微孔,<2	微孔,<1.2	微孔,<8	微孔,<5	微孔,<10
过渡孔,10~100	过渡孔,2~20	过渡孔,2~50	过渡孔,1.2~30	过渡孔,8~100	过渡孔,5~50	过渡孔,10~50
中孔,100~1000					中孔,50~500	中孔,50~750
大孔,>1000	大孔,>20	大孔,>1000	粗孔,>1000	大孔,>100	大孔,500~7500	大孔,>1000

* 抚顺煤炭科学研究所煤层烃类气体组分与煤岩煤化关系的研究,1985

煤储层是一种非连续、非均质、各向异性体。由于其孔、裂隙结构分布的复杂性和随机性,以往对孔、裂隙多进行成因分类和大小分级,对其定量描述往往只注重一个方面,一个局部,未从整体上去把握。谢和平(1993)、赵阳升(1994)、何学秋(1995)、赵爱红等(1998)或研究煤中孔隙、或研究煤中宏观裂隙的局部分形特征^[17~20],对煤储层从宏观裂隙、显微裂隙到孔隙的连续系统的分形研究尚未见诸报道,对不同标度区间的分形维数与不同尺度的孔隙、裂隙发育状态及与煤化作用程度的关系缺乏深入探讨,分形维数也没有在煤层气吸附和渗流研究中得到具体应用。

二、多相介质煤岩体吸附与解吸特征

以甲烷作为吸附剂,不同研究者对煤的吸附特征开展了以下几个方面的工作:①干燥煤样和平衡水煤样的等温吸附平行实验,并建立了二者最大吸附量之间的经验转换公式^[21~23];②不同煤级煤的吸附性能评价^[24];③对影响煤吸附性能因素的考察^[25~26];④煤的吸附与解吸同煤层气开发以及同煤与瓦斯突出关系的探讨^[27]。此外,还开展了电场、交变电场和温度等对煤吸附与解吸甲烷能力的影响以及化学吸附甲烷的可能性研究^[28~31]。

吸附机理研究中,朗缪尔理论忽略了气体分子之间的相互作用势,对煤大分子缺陷内的多层吸附和毛细凝聚无法作出合理的解释,BET 多分子层吸附理论,微孔充填理论则可弥

补朗氏理论之不足。

前人研究的煤级大多 $R_{o,max}$ 介于 $0.54\% \sim 4.25\%$ 之间,对 $R_{o,max} > 4.25\%$ 和 $R_{o,max} < 0.5\%$ 的煤样很少开展过实验,因而对煤的吸附性能随煤级变化规律的认识不够全面。且大多数研究者对煤岩组分、矿物质、孔隙性、比表面积、温度、压力和吸附介质等对煤最大吸附量的影响是基于低压、干燥条件得出的,又因研究的煤级不全,得出的结论难免会存在一定的片面性。

三、测井响应研究煤层气含量与煤体结构

随着测井技术的发展,测井响应不但能提供岩层层位、岩性、煤岩煤质参数、含水层参数、孔隙度、力学参数及沉积环境分析等多种成果,近年来,在煤层气含量拟合、煤体结构评价及煤储层渗透率预测方面也取得了长足发展。

S W 兰伯特和 M A 特立维茨(1978)利用密度测井曲线将煤体结构划分为脆煤和硬煤^[32],何建坤(1987)利用伽玛伽玛测井曲线划分焦作矿区二、煤层中的构造煤^[33],焦作矿业学院瓦斯地质研究所(1993)根据煤体结构的宏观和微观特征、力学性质、瓦斯特征、超声波传播特征和瓦斯突出参数等进行了煤体结构的定量划分^[34],张玉贵(1995)利用视电阻率、自然伽玛、伽玛伽玛描述过原生结构煤和构造煤^[35]。M J 缪伦(1989)利用高精度能谱密度测井,在圣胡安盆地东南部对水果地组煤层建立了煤样实测解吸甲烷含量与煤体积密度之间的线性相关经验公式^[36],并用此经验公式来推算未知钻孔煤层甲烷含量,傅雪海(1997, 1999, 2003),安徽煤田地质总局*(1998)也建立了局部地区煤储层的电阻率(视电阻率)、密度(伽玛伽玛)、自然电位、自然伽玛和声波时差等地球物理测井响应与煤层气含量的回归公式^[37~39],傅雪海还据地球物理测井响应将煤体结构分为原生结构煤—碎裂煤、碎斑煤、糜棱煤或碎粉煤三类,并进一步利用划分的煤体结构来进行煤储层渗透率的预测。

近 10 年来,在煤层气勘探开发过程中,国内外学者利用地球物理测井响应在煤储层裂缝探测、煤层吸附等温线预测等方面,也取得了一批有价值的研究成果^[40~41]。

四、多相介质煤岩体力学实验

前苏联 B B 霍多特(1961),J M 怀特(1980),刘宝琛等(1983)对不含气、水介质的自然煤岩体进行过单轴或三轴压力实验,结果表明:煤的变形呈非线性应力—应变关系,煤是一种应力—应变不完全可逆的微裂隙介质,不可恢复的残余变形是裂隙受压闭合的结果^[12,42~43]。

朱之芳(1985)、吴海青(1989)进行了自然煤样和饱和水煤样单轴抗压强度、杨氏模量及泊松比的对比实验,得出煤样含水后强度降低,变形增大^[44~45]。王佑安等(1964),李中成(1982),姚宇平(1987)对含瓦斯煤岩体的力学实验表明煤样饱和瓦斯介质后,其强度降低 60% 以上^[46~48]。

游木润(1984)进行了成型煤样吸附膨胀实验,结果表明:随着充气压力的提高,变形值逐渐增大;平行层理方向的变形大于垂直层理方向的变形^[49]。

以上实验主要是针对煤与瓦斯突出而设计的,其依据的是莫尔(Mohr)剪切破裂理论和格里菲斯(Griffith)脆性断裂理论,强调的是峰值强度后的变形,而地面煤层气开发仍在弹性变形范畴内,达不到破裂极限。上述实验大多在较低围限压力($< 4 \text{ MPa}$)和较低流体压力

* 叶诗忠,章云根,曾庆华等.两淮煤田煤层气储层特征、甲烷富集机制及开发前景评价. 科研报告 1998

($<2\text{ MPa}$)条件下,以 N_2 或 CO_2 作为介质,且大多为构造煤,煤样为成型煤样或热压型煤,对原煤块样进行的实验较少,煤体变形量较少,用百分表或千分表读数误差也较大,且未考虑水分和温度的影响,实验具有一定的局限性。尤其是对气、水饱和条件下,即多相介质条件下煤的力学性质的研究尚处于空白。

五、多相介质煤岩体渗透性实验

日本学者大冢一雄(1982),氏平增之等(1985)对成型煤样的瓦斯渗透性进行了实验研究,测定了成型煤样的孔隙率及渗透率,并利用毛细管模型研究了成型煤样渗透率随载荷和煤粒大小而变化的关系。此外,还对孔隙压缩系数对渗透率的影响进行了研究^[50~51]。R M Bustin(1993)在研究澳大利亚悉尼盆地北部二叠纪高挥发分—低挥发分烟煤时,得出其渗透率取决于有效应力、显微组分组成和显微结构的认识,内生裂隙发育的亮煤渗透率最高,暗煤最低,且对应力变化最敏感^[52]。C R Clarkson 和 R M Bustin(1997)运用压力衰减渗透仪研究加拿大科迪勒拉白垩系高挥发分和中挥发分烟煤时,得出其渗透率随煤岩类型递减的顺序为:光亮煤、条带状亮煤、丝炭、条带状暗煤、暗淡煤^[53]。J R Enever 和 A Henning(1993)揭示了原位煤层渗透率与最小有效应力呈负指数递增关系^[54]。

罗新荣(1992)在轴向加载与卸载过程中,进行了煤样渗透率随围压和流体压力变化实验,得出反复加载和卸载,其渗透率不能全部恢复,即渗透率出现滞后现象^[55]。

段康廉(1993),赵阳升(1994)在研究煤层注水效果时,采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的大块原煤样,在三轴应力下,研究应力与孔隙水压对煤体渗透率的影响,得出煤体渗透系数随体积应力的增加而减少,随孔隙水压的增加而增大的指数规律拟合结果^[56,18]。秦勇等(1999)根据地震震源机制解和小震综合断面解,通过有限元模拟得到山西沁水盆地中—南部现代构造应力场,其与下二叠统山西组主煤储层试井渗透率耦合结果表明:煤储层渗透率随主应力差增加而呈指数形式增大^[57]。

综上所述,早期研究者大都定性或定量地分析了煤层渗透率与煤级、煤体结构、煤岩类型、裂隙及有效应力等各个单因素之间的静态关系,得出的结论肯定是不全面的。国内研究者大多是基于煤与瓦斯突出或注水防尘,研究单相饱和和瓦斯或单相水的渗透率,对气、水多相介质在应力作用下的相渗透率实验尚未见诸报道。

20 世纪 90 年代以来,国外一些学者如 Gash 等(1991)、Puri 等(1993)、Harpalani 等(1993)分别研究了煤储层割理孔隙率、绝对渗透率及相渗透率等参数特征,相互关系及围压、储层压力、割理频率、煤基质收缩率等因素对它们的影响,取得了大量数据和定量、半定量成果,并且形成了一系列实验室分析测试技术^[58~61]。因他们视高煤级煤储层为煤层气开发的“禁区”,对高煤级煤岩体的相渗特征也未进行过实验或研究。

煤层气地面开发过程中,随着水体的排出和气体的解吸,煤基质发生收缩,多相介质煤储层内应力、流体压力、煤体孔、裂隙结构及渗透性等均发生相应的一系列变化。因此,地应力、储层压力、多相介质煤岩体物性三者之间是相互联系、相互影响的,单一的学科知识已不能认识必须由各有关学科来共同反映的规律和复杂的综合现象。必须考虑煤岩体的应力—应变问题,气、水介质在地应力作用下的渗流问题,气、水介质与煤基质间相互作用问题,必然涉及到岩石力学、渗流力学、表面物理化学及煤地质学等多学科理论的交叉和融合,需要通过一系列的微分方程进行联合求解,才有可能反映煤储层渗透率与各种因素的耦和机理,才有可能在工程上得到具体应用。