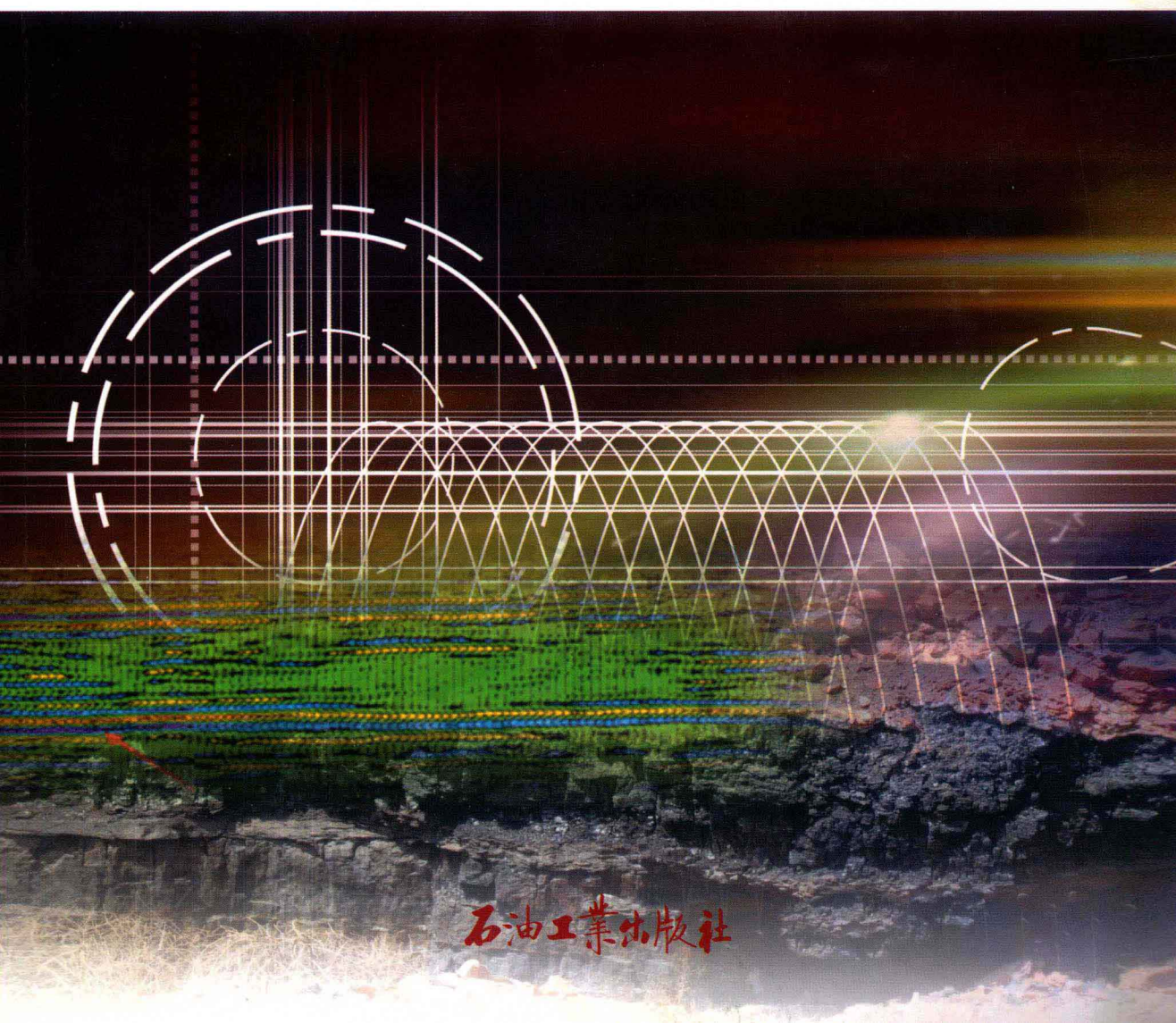


声震法 提高煤层气抽采率原理

易 俊 鲜学福 姜永东 著



石油工业出版社

声震法提高煤层气抽采率原理

易 俊 鲜学福 姜永东 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书运用煤层气地质学、岩石力学、渗流力学等理论,采用物理模拟与数值模拟相结合、静态模拟与动态模拟相结合的多方位对比研究方法,研究了煤的微观孔隙结构与煤层气的运移产出机理;建立了反映煤层气在煤层微孔中吸附扩散的简化双扩散数学模型和声场作用下煤层应力—温度—渗流压力三场动态耦合模型;提出了采用超声波技术促进煤层气的解吸、扩散和渗流时,既具有机械碎裂作用又具有升高煤质点温度的声震法新技术;阐述了在声场作用下促进煤层气解吸、流动的发生机理。

本书可供从事煤层气勘探开发和科学研究的科技工作者、管理者及高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

声震法提高煤层气抽采率原理/易俊,鲜学福,姜永东著.
北京:石油工业出版社,2010.12

ISBN 978-7-5021-8055-3

I. 声…

II. ①易…②鲜…③姜…

III. 煤层—地下气化煤气—资源开发—研究

IV. P618.110.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第190825号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010) 64523582 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:6.25

字数:154千字

定价:25.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

煤层气是含煤岩系中有机质在成煤过程中生成的以 CH_4 为主、混有一些有毒物质的非常规天然气。据估计，全球埋藏浅于 2000m 的煤层气资源量大约为 $240 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，是常规天然气探明储量的两倍多。世界上许多国家都重视对煤层气的开采利用。在美国，1986 年年产煤层气 $5 \times 10^8 \text{m}^3$ ，20 世纪 90 年代产量迅速增长，2004 年年产煤层气 $490 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2008 年为 $565 \times 10^8 \text{m}^3$ ，煤层气占气体总量（天然气）的 8% ~ 10%，成为美国重要的能源资源。澳大利亚、加拿大、俄罗斯等国都竞相开展对煤层气的开发。总之，煤层气开发已经成为世界各国发展新能源的趋势。

中国是世界上煤层气资源最丰富的国家之一，全国陆上煤田埋深浅于 2000m 的资源量为 $36.7 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，相当于 $450 \times 10^8 \text{t}$ 标准煤，与中国常规天然气资源总量相当，仅次于俄罗斯。我国从 20 世纪 90 年代开始进行煤层气开发技术和工程研究，经过近 30 年的努力，已经取得了一些技术突破，并取得了一定进展。2006 年，我国煤层气地面钻井 330 口，产量达到 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2008 年，我国煤层气地面开采总量达 $10 \times 10^8 \text{m}^3$ 。同时，我国陆续出台了多项支持煤层气产业发展的政策，大大提高了煤矿企业进行井下瓦斯抽放的积极性。到 2009 年，我国 1.5 万个煤矿产煤 $30 \times 10^8 \text{t}$ ，煤层气抽采 $61.7 \times 10^8 \text{m}^3$ ，利用 $17.7 \times 10^8 \text{m}^3$ ，利用率由前几年 19.7% 提高到 28.7%。同时，煤层气地面每年向大气释放煤层气约 $200 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

尽管我国在地面煤层气开采和煤矿井下瓦斯抽放两方面都取得了长足的发展，但由于我国煤田地质条件复杂，煤层的透气性低，造成煤层气的抽采率低，总抽采量少，至今还没有完全形成商业性开发和利用。

本书运用煤层气地质学、岩石力学、渗流力学等理论，采用物理模拟与数值模拟相结合、静态模拟与动态模拟相结合的多方位对比研究方法，研究了煤的微观孔隙结构与煤层气的运移产出机理；建立了反映煤层气在煤层微孔中吸附扩散的简化双扩散数学模型和声场作用下煤层应力—温度—渗流压力三场动态耦合模型；提出了采用超声波技术促进煤层气解吸、扩散和渗流时，既具有机械碎裂作用又具有升高煤质点温度的声震法新技术。阐述了在声场作用下促进煤层气解吸、流动的发生机理，为我国低渗透煤层气稳产、增产提供了理论基础，以推动我国煤层气早日产业化。

由于笔者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者予以批评指正。

著者

2010 年 7 月

目 录

1	绪论	1
1.1	煤层气吸附特性研究现状	1
1.2	煤体多孔介质中煤层气渗流特性研究	6
1.3	提高煤层气抽采率的研究现状	7
2	煤的微观孔隙结构与煤层气产出运移机理	11
2.1	煤的微观孔隙结构	11
2.2	煤气系统的吸附解吸特征	13
2.3	煤气系统的扩散特征	20
2.4	煤储层中煤层气渗流的基本特征	24
2.5	煤层气产出运移机理	28
3	声震法提高煤层抽采率的实验研究	30
3.1	煤微观孔隙结构的实验研究	30
3.2	声场作用下甲烷吸附解吸实验研究	36
3.3	声场促进煤层气渗流的实验研究	47
4	声场促进煤层气在煤层微孔中吸附扩散的机理	54
4.1	煤层气在煤层微孔中吸附—扩散的简化双孔隙扩散数学模型	54
4.2	声场作用下煤层气简化双孔隙扩散模型的应用	59
5	声场促进煤层气渗流的机理	64
5.1	声场促进煤层气渗流的应力—温度—渗流压力场的流固动态耦合模型	64
5.2	声场作用下煤层的动态耦合模型的应用	73
5.3	声场促进煤层气渗流的机理	78
	参考文献	83

1 绪 论

煤层气, 原称煤层瓦斯, 是含煤岩系中有机质在成煤过程中生成的以 CH_4 为主、混有一些有害毒物的多组分气体^[1]。我国煤层气埋深低于 2000m, 储量约为 $31.46 \times 10^{12} \text{m}^3$ ^[2]。其发热量可达到每立方米 8000kcal 以上, 与常规天然气大致相当, 它的开发利用既可弥补常规天然气的不足; 又可有效地降低强温室效应和煤矿瓦斯灾害。

煤层气主要以吸附态赋存在煤体中, 其产出是一个复杂的解吸—扩散—渗流的过程, 对这一过程的储层物理性质和地质环境给予的人为干扰和积极导向, 便构成了煤储层激励开采技术的主要内容, 其强化措施主要包括造穴、水力压裂、注气和物理场激励等^[3]。造穴技术适用于内生裂隙发育的中变质阶段煤; 水力压裂适用于相对坚硬的裂缝性煤储层; CO_2 注气开采, 效果明显, 但气源和经济性使其应用范围十分有限; 在外加交变电磁场、声场等物理激励促进煤层气解吸、流动机理方面还需要大量的室内实验研究。

声震法是一种强化提高煤层气抽采率的技术, 而且它还可能与常用的抽采技术相配合。早在 20 世纪 50、60 年代, 美苏就开始了超声波处理油层的研究工作。许多资料表明, 其处理油层有良好的效果。А. Э Петросян 等曾用扩散方程计算了半径为 25cm 块煤中甲烷在一个大气压条件下的解吸, 完全去气要经过 700 个月, 去气一半也要经过 42 个月, 但当把这种煤碎裂至小于 1mm 的质点时, 完全去气不到 1 分钟就可达到^[1]。在 20 世纪 90 年代后期鲜学福教授提出了用可控声震法来提高煤层气抽采率的思想, 在这期间研究了地应力场、温度场、静电场、交变电场、声场作用下不同煤质吸附甲烷的特性和渗透特性^[4~10]。但要提高煤层气的抽采率必须寻找出一条既具有机械碎裂作用又具有升高煤质点温度的新技术途径, 声震法则可基本满足这种要求。

1.1 煤层气吸附特性研究现状

煤是一种多孔介质, 是天然的吸附体, 与煤伴生的煤层气以吸附态、游离态、水溶态三种状态存在于煤体中, 但是 80% ~ 90% 的煤层气是以吸附形态存在于煤的过渡孔和微孔的内表面上, 形成一层煤层甲烷气薄膜^[11]。研究煤层气的吸附特征, 对了解煤层中煤层气的解吸、扩散、运移、聚集规律和阐述煤与瓦斯突出机理具有十分重要的意义, 所以在煤吸附煤层气的特性方面国内外进行了大量的研究, 其主要研究内容有以下几个方面。

1.1.1 煤孔隙研究

煤孔隙的研究内容包括孔隙大小、形态、结构、类型、孔隙度、孔容、比表面积及孔隙分形特征。研究的技术有借助普通显微镜、扫描电镜 (SEM)、压汞法和低温氮吸附法等^[12, 13]。ХОДОТВ.В^[14] 在 1961 年出版的《煤与瓦斯突出》一书中, 对煤的孔隙进行了较详细的论述, 按空间尺度将煤的孔隙分为微孔 ($< 10\text{nm}$)、小孔 ($10\text{nm} \sim 100\text{nm}$)、中孔 ($100\text{nm} \sim 1000\text{nm}$)、大孔 ($> 1000\text{nm}$)。ХОДОТВ.В 对煤的孔径结构划分是在工业吸附剂的基础上提出的, 主要是依据孔径与气体分子的相互作用特征, 他认为气体在大孔中主

要以层流和紊流方式渗流,在微孔中以毛细管凝结、物理吸附及扩散方式存在。Dublinin^[15]等人1966年将孔隙划分为:微孔($< 2\text{nm}$)、过渡孔($2\text{nm} \sim 20\text{nm}$)、大孔($> 20\text{nm}$)。Walker^[16]等人划分为微孔($< 1.2\text{nm}$)、过渡孔($1.2\text{nm} \sim 30\text{nm}$)、粗孔($> 30\text{nm}$)。之所以有以上三种煤的孔隙划分,主要沿于煤的孔隙结构具有随机性、研究者研究目的不同和研究手段与研究区域的差异,所以造成分类不同。根据煤孔隙的成因,1972年Gan^[17]等人将煤孔隙划分为分子间孔、煤植体孔、热成因孔和裂缝孔。1987年郝琦^[18]则把煤的孔隙划分为植物组织孔、气孔、粒间孔、晶间孔、铸模孔、溶蚀孔等。1998年张慧^[19]借助扫描电镜进行大量观测后,将煤孔隙划分为原生孔、外生孔、变质孔、矿物孔。2000年张素新^[20]又把煤的孔隙划分为植物细胞残留孔隙、基质孔隙和次生孔隙三类。以上这些划分是将煤的孔隙和裂隙一起考虑的,有些借用砂岩储层和灰岩储层的名称。在煤孔隙研究的分形特征方面,研究者通过对材料的研究得出:材料的孔隙和粒子从原子尺度到晶粒尺寸范围内均表现出分形特征。1995—2001年徐龙君、张代钧、鲜学福^[21~24]等详细评价了煤分形特征的研究方法和煤的分形特征。分形特征的研究方法有小角散射法、水银孔度计法、气体吸附法,它们各有优势,但联合使用可以更完整地分析微孔特征。煤分形研究得出:分维数一般在 $2 < D \leq 3$ 范围,它随煤阶(褐煤到无烟煤)增加而减小。1996年王明寿^[25]等通过对淮南、淮北两个研究区不同煤矿不同煤级煤样进行的压汞孔隙测量结果的分析得出:用分形维数可以表示煤的孔隙结构特征,而且煤孔隙体积分形维数随着煤的变质程度的增大而减小,渗透性随煤级的增加而减弱。1998年赵爱红^[26]等通过对抚顺煤田不同煤岩类型、两淮及内蒙古不同变质类型煤样品的分析研究得出:发现最小半径在 $65\text{nm} \sim 87\text{nm}$ 的大孔和中孔具有分形特点,可以用分形维数定量表示煤的孔隙特征、煤岩组分的复杂程度和煤结构破坏程度。1999年孙波^[27]等通过对北票、韩城、鸡西等矿区的煤样进行分析得出:可以按分形特征把孔隙结构划分为三种类型,认为分维数 D_2 可以用来作为煤与瓦斯突出的预测指标。付学海通过对全国多个矿区煤孔隙体积分形研究得出:煤孔径结构在 75nm 左右发生突变,煤孔径大于 75nm 的为渗流孔隙,小于 75nm 的为吸附孔隙。以上是利用法国数学家Mandelbort^[28]创建的分形几何来研究煤孔隙的分形特征。

1.1.2 煤层气的吸附机理

煤储层,即煤层,是煤层气的储集层,具有两方面的能力:第一,在压力作用下有吸附煤层气的能力;第二,由于孔隙—天然裂隙系统的存在而具有允许气体流动的能力^[14]。它与其它多孔介质固体吸附剂类似,煤基孔隙具有较大的比表面积,内表面积可达到 $100 \sim 400\text{m}^2/\text{g}$ ^[29]。当气体分子碰到煤表面时,由于煤基质的孔隙和孔隙表面分子与内部分子受力上的差异,存在剩余表面力场,形成表面势能,使得气体分子在煤孔隙壁面上的浓度增大,也就形成了吸附现象。固体对气体的吸附按其作用力的性质不同,可以分为物理吸附和化学吸附两种类型。前者的吸附剂与吸附质之间的作用力是范德华力,即分子间力。而后者是通过吸附剂与吸附质的原子间形成化学吸附键而形成的。

红外光谱是从分子水平研究固体表面吸附的最有效的方法之一,当有化学吸附存在时,因其化学吸附键的定位性,可从其光谱上观察到新的特征吸收带,而物理吸附只能使原吸附分子的特征吸收带有某些位移或在强度上有所改变,但不会产生新的特征谱带^[30]。通过低温红外光谱实验发现,甲烷与煤核表面的相互作用是各向异性的,当甲烷在煤核表面呈正三角锥重叠式吸附时能量最低,相互作用势能也最大,吸附态的Morse参数为

$R_e=0.335\text{nm}$, $D_e=2.65\text{kJ/mol}$, $\beta=20\text{nm}^{-1}$ 。研究认为煤基块表面分子与甲烷分子间的作用力为范德华力,属于物理吸附,煤基块吸附的甲烷可分为吸收瓦斯和吸着瓦斯,吸收瓦斯进入煤体内部,而吸着瓦斯吸附在煤体表面。在 $-100\sim 30^\circ\text{C}$ 温度范围区,现场红外光谱实验未观察到 CH_4 在煤中形成化学吸附^[31]。国外有关研究测得煤对甲烷的汽化热是吸附热的 $2\sim 3$ 倍,从而认为煤层甲烷应以物理吸附方式存在,煤对氮气、二氧化碳等的吸附也与甲烷一样,属于物理吸附^[32, 33],说明煤对气体的吸附是无选择性的。总的来说,煤对甲烷气体的吸附具有吸附热低,吸附、解吸速率快,吸附和解吸可逆以及无选择性等特点,属于物理吸附或以物理吸附为主,该观点得到大多数研究者的认同。

1.1.3 煤吸附气体的理论模型

根据不同的吸附系统和基于不同的假设现已提出了许多等温吸附理论模型,如 Henry 公式、Langmuir 公式、Freundlich 公式、BET 方程、D-A 方程等^[34~36],但用于甲烷与煤物质相互作用的模型有:Langmuir 公式,是 1915 年 Langmuir 研究低压气体在金属上吸附时,根据实验数据和动力学观点得出的。该理论的基本假设与实际不符,因此其理论基础长期受到置疑。但是 Langmuir 公式能较好地描述甲烷在煤物质中的吸附规律,所以现在仍较普遍使用;Freundlich 公式,是研究多孔物质吸附气体时得出的一个经验规律,适用于液体和气体;BET 方程,是 1938 年 Brunauer、Emment、Teller 三人在单分子层吸附理论的基础上提出的多分子层吸附理论,该模型在煤储层吸附研究中常用来测定煤基质的比表面积;D-A (Dubinin Astaknov) 方程微孔充填理论是 20 世纪 40 年代 Dubinin 及其合作者提出的,D-A 方程在微孔充填理论中使用的较多。此外,在煤吸附研究中,许多学者还结合不同的研究目的对吸附模型进行了探讨。1992 年刘常洪等^[37]对 Langmuir 吸附模型进行了实验研究,得出不同的煤岩类型中,镜煤的等温吸附实验结果最为符合 Langmuir 等温吸附曲线;不同煤级煤中,高煤级煤较中、低煤级煤的 Langmuir 方程的拟合程度高。1998 年陈昌国^[38]等通过微孔填充理论对比研究了无烟煤与活性炭的吸附特性,并与 Langmuir 和 Freundlich 等温方程进行比较,得出微孔填充理论更为符合实际的观点。

1.1.4 影响煤吸附性能的因素

煤层气主要依赖于煤固体基质的吸附性而赋存在煤储层中,吸附性的高低不仅取决于煤的物理化学结构、煤岩成分与显微组分、煤级、灰分与水分含量等自身因素,而且温度、压力对煤层气的吸附性有较大的影响。

1.1.4.1 煤孔隙结构的影响

煤的孔隙结构是煤的物理结构的主要部分,与其它多孔吸附质一样,煤的吸附特性很大程度上取决于其孔隙结构。苏联学者艾鲁尼利用电子显微技术和 X 射线衍射结构分析,测出了甲烷在煤层中的分布,指出 $80\%\sim 90\%$ 的甲烷分子是以填隙、置换、渗入等方式固溶于煤中形成固溶体^[39]。重庆大学矿山工程物理研究所采用现场红外光谱测定时,在 $-100\sim 30^\circ\text{C}$ 范围内未能观测到以上固溶体的存在^[40]。微孔是发生气体吸附的主要场所,微孔的发育程度决定了煤的吸附能力^[41]。

1.1.4.2 煤岩成分与显微组分

煤由镜质组、惰质组、壳质组等三类显微组分构成^[42]。不同的研究者,由于研究条件、实验样品的差别,往往得出不同的结论。Ettinger 研究发现,富惰质组煤的甲烷吸附量

在中煤级阶段高于富镜质组煤，在高煤级煤阶段两者相当^[43]。巴卡耶娜在干燥煤样吸附实验的基础上曾提出：在煤的低中变质阶段，镜质组煤的吸附量比丝质体低且随变质程度的增高而呈现一种凹形曲线，在长焰煤—焦煤阶段，惰质组吸附量高于镜质组，在瘦煤—无烟煤阶段正好相反^[44]。然而，根据我国东北、华北、华南和西南中生代和晚古生代主要煤田或含煤区的数十个含平衡水煤样吸附研究的结果，发现 Langmuir 体积参数 (V_L) 随镜质组含量增加而增大，随惰质组含量增加而减小^[45]，两者在长焰煤到贫煤之间得出的结论截然相反，分析其原因，可能是水分的作用或样品之间的差异造成的。也有研究认为，随着煤中镜质组和惰质组含量的不同， V_L 呈现间断性变化：当 $V_L < 12\text{m}^3/\text{t}$ 时，随镜质组含量的增加而减少，随惰质组含量增加而增大；当 $12\text{m}^3/\text{t} < V_L < 30\text{m}^3/\text{t}$ 时随镜质组含量的增加而略有增大，随惰质组含量增加而稍有减小；当 $V_L > 30\text{m}^3/\text{t}$ 时，随镜质组含量的增加而呈现减小趋势，随惰质组含量增加而呈现增大趋势，但这种现象具有离散性。煤岩类型也影响煤的吸附能力，在同一煤层中，亮煤的吸附能力明显高于暗煤^[46]。总而言之，显微组分对煤吸附性的关系受煤化程度、水分含量等因素影响，不同的煤化阶段，显微组分影响吸附的关系也不同，从煤演化阶段显微组分的物理化学结构的变化来分析可能会发现其实质。

1.1.4.3 煤级

煤级通常被认为是影响煤的吸附能力的主要原因之一。在平衡水条件下，煤的吸附能力随煤级的升高而增加，但是，在干燥基煤样吸附量散点图上，随煤级变化的 Langmuir 吸附体积呈 U 形态势^[47]。平衡水和干燥基煤样的 Langmuir 吸附体积随煤级变化不同趋势产生的原因在于，低煤级煤对于水分有很高的亲和性，水分对甲烷吸附能力的影响改变了 Langmuir 吸附体积随煤级变化的总趋势^[48]。煤的孔隙结构分析证明，褐煤以大孔为主，随着煤级的升高，中孔和微孔增加，大孔减少，无烟煤则以微孔为主；镜质组微孔居多，而惰质组以中孔和大孔占主导地位^[17, 49~51]，在煤级相近或相等的情况下，暗煤的总孔容比亮煤大，而亮煤具有更大的比表面积。这种对比趋势证明，亮煤的微孔比暗煤多，微孔总量随镜质组含量的增加而增加，表明煤级和煤岩成分对煤的孔隙结构和吸附能力产生一定影响^[46]。

1.1.4.4 灰分与水分

煤中灰分产率和灰成分与成煤环境的原始泥炭沼泽类型密切相关^[52, 53]；煤中灰分除了来自成煤植物本身的固有无机物外，另一个主要来源是注入原始泥炭沼泽的水流携带的可溶和不可溶无机物。甲烷的吸附能力与煤中的灰分产率呈明显的负相关^[53~56]。造成上述负相关关系的机理，可能是由于矿物质的增加，导致煤颗粒内表面单分子层容积的降低^[17, 57]。关于水分导致气体吸附能力降低的机制，目前尚不甚明。Joubert 等^[58, 59]发现，煤中的水分与氧含量之间存在良好的对应关系，认为煤表面吸附的水分子与氧化物之间可能存在强烈的相互作用，从而导致了煤表面吸附能力降低。Kroos B M 等^[60]认为，由于水的吸附作用和煤的膨胀作用降低了基质孔隙的尺寸，饱和水煤比干燥基煤的孔隙体积少得多，因此，水分降低了煤的吸附能力是很自然的事。Laxminarayana C 等^[61]认为水分是煤表面吸附位置的竞争者，并可堵塞气体进出的微孔系统。

1.1.5 煤对多元组分气体的吸附特性

煤层中的瓦斯实际上是以甲烷为主的混合气体。近几年来，国内外对煤吸附多元混合

气体的研究增多,普遍认为多元气体吸附时,气体之间存在着吸附位的竞争,煤层气体主要组分的吸附能力由大到小依次为 CO_2 、 CH_4 、 N_2 ^[62]。二元气体的吸附等温线总是介于吸附能力强的气体和吸附能力弱的气体之间,组成的百分比不同,所得的等温线也不同。受气体组成百分比、气体成分影响,多元气体的等温线分布更为复杂。多元气体的解吸研究发现,大多情况下 CH_4 优先解吸,但因煤级差异,也有 CO_2 优先解吸的现象。Pariti 等^[63] 研究发现,在煤中呈物理吸附的混合气体吸附和解吸是可逆的,两者都符合相同的压力和吸附量曲线。然而 Greaves 等^[64] 在含平衡水煤样吸附实验中发现,吸附和解吸过程中压力和吸附量的关系存在显著差异,即吸附与解吸之间并不完全是可逆的。Chaback 等^[63] 提出,尽管混合气体在解吸过程中,吸附能力强的组分比例增强,但是其过程仍是一个可逆的过程。总的来说,多元气体的吸附是通过吸附位的竞争来进行的,吸附竞争力的强弱与吸附质分子的极性有明显的关系,吸附和解吸是可逆的,但由于煤样中水分的作用,可能出现不可逆现象。

1.1.6 地球物理场中煤吸附特性研究

地球物理场是指地应力场、地温场和地电磁场。地球物理场中的地应力场、地温场和地电磁场对地质体中物质的作用是彼此互为影响、互为渗透的一种复杂的物理现象。除地球内部构造异常引起的地球物理场异常外,地球物理场的变化是有规律的。总的规律是在地壳中地应力随着离开地表面向下的深度增加而增大,地温在恒温带以下也是随着深度的增加而增高的,地电磁场在地球上是有区域性的。

1.1.6.1 温度场对煤吸附瓦斯特性的影响

实验研究表明,随着温度的升高,煤对甲烷气体的吸附量将降低。甲烷在煤物质表面包括孔隙表面上的吸附是一个放热过程,解吸是一个吸热过程。自由气体分子的碰撞或温度升高都能够为脱附提供能量。气体分子的热运动越剧烈,其动能越高,吸附气体分子获得能量后发生脱附的可能性越大,也表现为吸附性越弱。气体温度增高,以动能增加的形式表现出来,气体温度越高,气体分子的动能越大,吸附分子获得高于吸附势阱能量的机会越多,其在孔隙表面上停留的时间越短,气体吸附量就越少。

1.1.6.2 地应力场对煤吸附瓦斯特性的影响

地应力场是由自重应力场、构造应力场所组成。国内外的研究资料表明,煤层气压力场与地应力场之间有着密切的联系。由于地应力的压缩作用,使孔隙中的煤层气具有压力,反过来煤层气压力又对孔隙壁产生张应力的作用,力图使孔隙破坏。因此,煤层气压力是和地应力相对应的,地应力场对煤层气压力场起控制作用。围岩中高的地应力决定了煤层的高孔隙压力。实验研究表明:在给定的温度下,吸附甲烷量与气体压力的关系呈双曲线变化,遵从 Langmuir 方程,随着气体压力的升高,煤体吸附甲烷量增大,并且当气体压力增大到一定值时,吸附甲烷量将趋于定值。

1.1.6.3 地电磁场对煤吸附甲烷特性的影响

何学秋^[66] 研究了外加交变电磁场条件下煤吸附/解吸甲烷特性的变化规律及作用机理,研究表明,外加交变电磁场对煤吸附甲烷性能的影响程度与煤对甲烷气体吸附性的强弱成正比,弱吸附性气体对外加电磁场不敏感。突出危险煤在外加电磁场作用下其甲烷放散速度和解吸速度高于非突出煤;放散过程中,施加电磁场的甲烷放散量大于未施加电磁场条件下的放散量。这主要是因为外加交变电磁场的作用使煤表面势能提高,使甲烷分子

被吸附的概率降低,从而使煤与甲烷间的吸附能力减弱,并且可使瓦斯分子 London 色散势提高,从而使瓦斯分子的动态特性增强,扩散渗透性提高。Tapacov 研究了在静电场作用下煤的吸附甲烷特性,当通过煤的电流为 $0 \sim 300\mu\text{A}$ 时,煤对甲烷的吸附量开始是逐渐增加的,当电流为 $150\mu\text{A}$ 时增加到最大值,随后吸附量又随电流的增加而减小。但 Tapacov 没有描述实验条件,也未对结果进行理论分析。艾鲁尼、塔拉索夫等研究认为静电场的作用提高了瓦斯吸附量。徐龙君^[7]研究表明,四川省芙蓉矿务局白皎矿煤样在静电场作用下,吸附量是减小的。刘保县^[9]研究认为在交变电场作用下,各煤样吸附甲烷的量仍很好地遵从 Langmuir 方程;交变电场的作用减弱了煤的吸附能力和解吸能力,并且减缓了含甲烷煤的解吸过程,但对煤的饱和吸附量和最大解吸量影响不大。

1.1.7 声场下煤吸附特性研究

20 世纪 50、60 年代,美苏就开始了超声波处理油层的研究工作。许多资料表明,其处理油层有良好的效果。但声场对煤吸附解吸甲烷的特性研究较少,鲜学福在 20 世纪 90 年代后期就曾提出了用可控声震法来提高煤层气抽采率的思想。主要依据为:天然煤中微孔占有一半以上的孔容,过渡孔约占 $30\% \sim 40\%$ 的孔容,而与煤伴生的煤层气 90% 又是以吸附和吸收态存在于煤层中,而其中的孔隙并非总是连通的。刘保县^[9]研究了声场作用下煤对甲烷的吸附解吸特性,实验得出:声场的作用使煤的吸附量明显减少,吸附能力降低,且煤的甲烷吸附量随声强增大而减小。要提高煤层气的抽采率必须寻找到一种既具有机械碎裂作用又具有升高煤质点温度的新技术途径,声震法可基本满足这种要求。不过对其发生机理和应用技术工艺还有待进一步深入研究。

1.2 煤体多孔介质中煤层气渗流特性研究

赋存在煤层中的煤层气既是资源,又是威胁煤矿安全生产的严重灾害之一。因此研究煤层气渗流规律及其特征参数测试方法对开发利用甲烷,减少煤矿瓦斯事故具有重大意义。孙培德等^[69, 70]详细地阐述了渗流力学理论研究现状及展望,具有代表性的模型有:(1)以达西定律(Darcy's Law)为基础的层流模型;(2)以菲克定律(Fick's Law)为基础的扩散模型;(3)瓦斯的扩散—渗流模型;(4)以幂定律(Power Law)为基础的非线性渗流模型;(5)地球物场效应的渗流模型;(6)多煤层系统越流模型。

1856 年法国工程师 Darcy 提出了线性渗流定律,从此渗流力学的应用扩展到许多领域。20 世纪 40 年代末,苏联学者应用达西定律描述煤层内煤层气的运动,开创性地研究了考虑煤层气吸附性质的渗流问题,成为开创煤层气渗流力学的先驱之一。我国学者周世宁,自 60 年代中期开始,也为建立和应用达西定律的煤层气流动理论做了一些开拓性工作。郭永义^[71]、谭学术^[72]等对达西定律进行了修正、完善和发展。文献[76 ~ 80]还利用有限差分法、有限单元法和边界元法对煤层气渗流规律进行了数值模拟。周世宁、魏晓林、郭勇义等^[81 ~ 83]又以达西定律为基础对煤层的透气系数的测定进行了研究。

随着煤层气渗流规律研究的深入,国内外许多学者都赞同煤层气渗透—扩散的理论。1986 年以来,国内一些学者作了研究工作^[84, 85],杨力生^[86]以瓦斯地质的新观点来认识煤层内煤层气运移的机理,明确指出:煤层内煤层气流动实质上是可压缩性流体在各向异性且非均质的孔隙—裂隙双重介质中的扩散—渗透的混合非稳定流动。此观点的提出,对指

导现代煤层气流动理论的研究具有一定的影响。

国内外许多学者对达西定律是否完全适用于均质多孔介质中的气体渗流问题早已作出了大量的考察和研究^[87, 88]。著名的流体力学家 E.M.Allen^[89] 指出,将达西定律用于描述从均匀固体物(煤样)中涌出气体的试验,结果导致了与实际观测不相符合的结论。1984 年日本北海道大学教授通口澄志^[90] 指出,从通过变化压差测定煤样煤层气渗透率看,达西定律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更能符合瓦斯流动的基本规律——幂定律。1991 年,罗新荣^[91] 经过实验研究,提出考虑克氏(Klinkenberg)效应的修正形式的达西定律——非线性煤层气渗流规律。

随着对煤层气渗流机理研究的深入,许多学者认识到了地应力场、地温场及地电场等对煤层瓦斯流动场的作用和影响。Somerton W.H.^[92] 从达西定律出发,研究了煤渗透系数与地应力的关系,认为在加载时煤层渗透系数随地应力的增加而减小,并且与应力史有关。梁冰^[93] 提出将煤层气流动看作可变形固体骨架中可压缩流体的流动,得到了采动影响下煤岩层煤层气流动的耦合数学模型。赵阳升^[94~96] 在前人工作的基础上,提出的煤体—煤层气耦合理论,体现了煤层气气体与煤岩固体之间相互作用下的煤层气流动过程,并结合数值模拟实例,得出耦合模型与非耦合模型差别较大,且更符合实际情况的结论。林柏全、许江等^[97~101] 对含气煤体的变形规律、煤样透气率与等围压或孔隙压之间的变化关系,含气煤的力学性质以及含气煤的流变特性等进行了研究。杜荣贵^[4] 在我国首次深入地研究了地电场(直流电)对煤层气渗流的作用和影响;余楚新^[102] 结合实际情况,应用计算机成功地模拟了回采工作面前方煤层中支撑压力作用下煤层透气系数的动态变化规律,进而应用有限元法实现了回采面前方煤层中煤层气渗流的数值模拟。

但是,对煤的渗流特性在声场作用下的煤层气渗流特性的研究还未见报道。

1.3 提高煤层气抽采率的研究现状

提高煤层抽采率的激励技术有造穴、水力压裂、注气、松动爆破、物理场激励等^[103]。

1.3.1 造穴

造穴既是储层激励技术,也是一种完井技术。1977 年 Amoco 公司用该技术完成了 Cahn1 井后,使人们认识到其潜在的优势。之后,许多公司相继在圣湖安盆地北部抽采煤层气采用这一技术,并演化为更为完善的造穴方法。Logan 将该方法描述为:

(1) 使钻孔与储层连通性加强;

(2) 在储层内形成多方向自我支撑的诱导裂隙;

(3) 使井筒诱导裂隙切割自然裂隙系统,为完井注入阶段压力的传递提供通道;较高的储层压力能使在卸压阶段形成储层到井筒的较大压差,使井筒附近煤体所受压力超过其破裂极限而发生破裂,较厚的煤层不仅能形成较大的洞穴,而且有利于形成较长的诱导裂隙;造穴的对象必须选择裂隙发育完好,同时必须以内生裂隙为主,外生裂隙次之的煤储层。

国内外学者曾从储层选择、储层强化机制、数值模拟等方面进行了深入的研究。造穴的过程通过注入—卸压—循环程序完成,造穴利用空气压缩机将空气或水的化合物以一定流速注入钻井孔裸眼段,持续 1 ~ 6h,然后终止突然卸压;使注入的流体、储层中的流体

和煤粒涌向钻孔，构成一个注入卸压旋回。重复这一程序，直到钻孔被煤粒充满为止，通过钻孔流体循环清除这些固体。概括起来，该方法具有五个方面的优点：

- (1) 能产生大量的张性裂缝，缩短解吸气的扩散路径，减少了扩散阻力，提高解吸速度；张性裂缝对解吸速度的影响比大裂缝更为有利，且能延长解吸气的自喷期；
- (2) 能极大地减小煤的颗粒，从而极大地提高解吸速度；
- (3) 能产生裂缝和大量张性破裂，提高排水速度，增加解吸速度，从而提高解吸气的渗流速度；
- (4) 能清除井壁的污染堵塞；
- (5) 能防止煤粉的深度污染。

1.3.2 水力压裂

水力压裂是提高低渗透油气井产量的重要措施，在国内外已经得到广泛的应用。近 20 多年，国内外许多公司力图将石油工业的水力压裂技术应用于煤层气藏的强化开采中，以提高煤层气井的产量和延长煤层气井产量的衰减时间。但是煤层与常规油气储层相比，煤层杨氏模量低、泊松比高，且具有特殊的双孔隙结构，割理发育，以及各向异性和不均质性突出等特点，形成了煤层压裂时的特殊性，主要表现为：

- (1) 压裂施工中煤岩破碎产生大量的煤粉及大小不一的煤碎屑，极易积聚起来阻塞压裂裂隙前缘，导致压裂处理压力过高；
- (2) 煤岩吸附压裂液后会引起煤岩基质的膨胀及堵塞割理，从而降低割理孔隙度和渗透率及限制煤层吸附；
- (3) 煤层压裂液的滤失可以限制裂缝的延伸，降低压裂液的效率，极易伤害煤储层，增大脱砂的可能性。

因此，煤层压裂时，应绕开井筒附近被污染的地层，更有效地连通井筒与煤层的天然裂缝系统，加快排水脱气，提高煤层的解吸速度，增大卸压范围，避免应力集中，降低煤粉量。根据资料统计，采取适当的压裂方式，可以不同程度地提高煤层气产量，大部分取得了 $200 \sim 600 \text{m}^3/\text{d}$ 的排放量，初始最高可以达到 $2650 \text{m}^3/\text{d}$ 。同时，也显示压裂后煤层气有明显的衰减趋势，透气性差的煤层一般只能维持 $1 \sim 5\text{a}$ ，透气性好的可以维持 10a ；进一步分析发现，压裂增产效果与煤层透气性成正比，透气性越好，增产效果也越明显，维持时间越长；煤层脆性强、中等硬度、节理发育的条带状亮煤型压裂效果好，而致密、节理不发育、连通性差的暗煤以及糜棱状煤压裂效果差。

赵阳升等针对煤层水力压裂，进行了大量的室内三维应力下的控制压裂实验和数值模拟，认为尽管水力压裂增加了裂缝的数量，但是煤岩中产生的裂缝数量仍然很少。由于水力压裂并添加支撑剂，在煤层压裂裂缝周围形成一高应力区，它的存在较大幅度地降低了裂缝周围煤体的渗透性。尽管通过裂缝形成了一条较好的渗流通道，但在裂缝周围反而形成一个屏障区，进一步分析认为，水力压裂技术仅仅适用于相对坚硬的裂缝性储层煤层气开采，对煤层较软，孔隙裂缝复杂的煤储层，水力压裂作用十分有限。

1.3.3 注气

将 N_2 、 CO_2 、烟道气等注入低渗透油气层，提高油气井产量，已经在石油工业中得到广泛的研究和应用。近 10 多年来，部分煤矿工程师试图将该方法应用于煤层气藏，以期待

提高煤层气藏采收率和煤层气井产量。

1993 年, Amoco 公司在 San Juan 盆地西北部煤层气储层成功地进行了第一次注 N_2 试验, 试验井网包括 4 口外注入井和 1 口中央生产井。一年的试验是成功的, 中央生产井的日产量增加了 5 倍, 达到 $2.8 \times 10^4 m^3/d^{[14]}$ 。

注气开采煤层气就是向储层注入 N_2 、 CO_2 、烟道气等气体, 其实质是向煤层注入能量, 改变压力传导特性和增大或保持扩散速率不变, 从而达到提高单井产量和气藏采收率的目的。按照注气方式的不同, 分为先注气后采气的间断性注气模式和边注边采的连续注气模式。我国学者吴世妖等依据扩散渗流理论和多组分吸附平衡理论, 通过室内试验认为: (1) 间断性注气在吸附平衡后煤层部分采气区的原始压力增加, 开采时压力梯度增加, 渗流速度增加, 衰减时间延长; 连续性注气保持了维持煤层气流动的压力梯度不变, 相对提高了渗流速度。(2) 注气造成的渗流速度增加又引起裂隙系统中煤层气分压下降速度加快, 由此引起更多的吸附煤层气参与解吸, 解吸扩散速率的增大, 反过来又促使渗流速度加快。(3) 煤层与混合气体达到吸附平衡后, 每一组分的吸附量都小于其在相同分压下单独吸附时的吸附量; 注气后, 竞争吸附置换, 必然使一部分吸附的煤层气解吸扩散, 从而引起扩散速率、渗流速度和采收率提高。

2000 年, BP 公司在美国 DOE (Department of Energy) 的资助下, 在 San Juan 盆地西北部开始了长达 3 年的现场试验工作, 试验由 CO_2 或其它强吸附气驱替煤层气, 提高煤层气的采收率。实验室试验和计算机模拟表明, 相对均质煤层可采出 90% 的地层原始储量, 而常规降压开采只能采出 30% ~ 80%。

1.3.4 松动爆破

针对高煤层气低透气性煤层透气性系数低的特点, 可以在工作面前方的煤体中打深 50m 以上的炮眼, 装药爆破, 使炮眼周围的煤体在炸药产生的爆压作用下, 产生破裂和松动, 从炮眼沿径向由内向外形成三环分布: 破碎圈、松动圈和裂隙圈。这种方法的特点是在爆破孔的周围增加了辅助自由面 (控制孔), 爆破后不仅在相邻孔边线方向产生贯通裂隙, 而且能在其它方向产生裂隙。预裂爆破的作用机理可概括为: 炸药在钻孔内爆炸后产生的应力波和大量高温高压爆生气体在爆破近区形成压缩粉碎区, 使煤体固体骨架发生变形破坏, 形成爆炸空腔; 在爆破中区, 应力波过后, 爆生气体产生准静态应力场, 并楔入空腔壁上已经张开的裂隙中, 使裂隙进一步扩展, 进而在钻孔周围形成径向“之”字形的交叉裂隙网; 在爆破远区, 由于控制孔的作用, 形成反射拉伸波与径向裂隙尖端处的应力场相互叠加, 促使径向裂隙和环向裂隙进一步扩展, 大大地增加了裂隙区的范围。最后, 使煤体内形成以爆破孔为中心的影响范围为 5 ~ 15 倍钻孔直径的连通裂隙网。

1.3.5 物理场激励

从 20 世纪 80 年代开始, 国内许多研究机构便开始利用声、电、磁、水力脉冲等物理场作用于油层来增加原油产量的研究工作, 由此, 形成了超声波法、液电脉冲法、水力振动、人工地震、高能气体压裂等物理采油方法。研究表明, 外加物理场对油层可以实现解除或减轻多孔岩石的堵塞现象的解堵、改善液体饱和多孔介质的渗透率, 实现促渗作用。这些技术在石油开采中得到了广泛的运用, 并取得了可观的经济效益。

国内外许多学者围绕外加物理场对煤层煤层气吸附、解吸, 煤层煤层气渗流特性等方

面开展了大量的室内研究工作，20 世纪 70 年代苏联学者研究了地电场煤层对煤层气吸附特性的影响，研究表明：当通过煤的电流在 $0 \sim 300 \mu\text{A}$ 时，煤对煤层气的吸附量开始是逐步增加，当电流达到 $150 \mu\text{A}$ 时，吸附量达到最大值，随后吸附又随电流增加而减小。何学秋^[66]研究了交变电磁场对煤吸附特性的影响，认为：外加电磁场改变了煤表面势能，从而使吸附量减小，并发现电磁场作用下煤层气放散初速度和解吸速度高于非突出煤；艾鲁尼^[39]、塔拉索夫^[68]、杜云贵^[4]等研究了静电场作用能促进煤层气解吸；刘保县^[9, 10]研究了交变电场和声场作用下煤样的吸附、解吸和渗透特性，得到吸附等温线很好地遵从 Langmuir 方程，但是，在交变电场作用下，随着电压的升高，煤样的饱和吸附量变化不大，而吸附能力却逐渐减弱；在声场作用下，煤的煤层气吸附量随声强增大而减小。

2 煤的微观孔隙结构与煤层气产出运移机理

煤层是煤层气的源岩，煤在演化和变质过程中产生大量的气体，一部分气体保留在煤层中，煤层中的孔隙和裂隙为煤层气的赋存提供了空间，同时也为其运移提供了通道，因此煤层又是煤层气的储集层。可见，煤层气是一种自储自生的非常规天然气。煤层的孔隙特征、吸附能力、渗流能力等与常规天然气相比有其自身的特殊性，因此要建立适合煤层储层特点和煤层甲烷运移特性的储层模拟理论和方法，首先要弄清煤的微观孔隙结构和煤层气运移产出机理。本章着重介绍煤的物理化学结构、煤岩成分与显微组分、煤级、灰分与水分含量、应力场、温度场、静电场、交变电场下煤对甲烷气的吸附/解吸/渗流特性。

2.1 煤的微观孔隙结构

煤是一种含有有机质、矿物组分、甲烷和复杂网络孔隙的非均质物质。一般认为，煤的有机质是由陆地植物经演化而聚集起来的有机物质。植物的构成物（叶、茎）在其上覆岩石产生的压力和温度作用下，通过数百万年复杂的生物、化学和地球化学过程转化为煤，这种有机堆集岩石是由称之为煤素质和矿物填充物的化石植物构成，煤素质是煤的细微组织，可以分为 Vitrinite, Liptinite 和 inertinite 三种^[104]。Vitrinite 来源于木质植物而且是最普通的煤素质，Liptinite 来源于脂质和蜡质植物，而 Inertinite 可能来源于像森林火灾之类的史前高温分解过程的烧焦部分。植物转化为褐煤、生煤和无烟煤的过程称之为煤化作用。在煤化过程中，大量的挥发性气体如 CH_4 、 CO_2 和水蒸气被释放出来，虽然 CO_2 比其它挥发性气体有更强的吸附性能，但是，由于它在煤化过程中更容易溶解在产生的水中而被消耗掉。所以，甲烷在煤层中是占优势的气体，通常大于 95%。

煤的煤化程度或者煤的成熟过程可以用煤阶表示，美国标准测试方法（ASTM）将 Vitrinite 反射系数（ $R\%$ ）、固定碳含量（ $C\%$ ）、挥发气体百分数（ $VM\%$ ）、热值作为主要指标对煤阶进行分类，见表 2-1。在煤化过程中，煤的物理和化学特性将发生变化，煤阶从褐煤变化到无烟煤，碳含量上升、氧含量降低、氢含量降低。另外，随着煤阶上升，芳香烃和分子簇增加，Vitrinite 反射系数增加，气体含量降低。

表 2-1 ASTM 煤阶分类标准

种 类	热值 (HV), Btu/lb	固定碳 (FC), %	挥发性物质 (VM), %
Metanthracite	> 14000	> 98	< 2
无烟煤	> 14000	92 ~ 98	2 ~ 8
Semianthracite	> 14000	86 ~ 92	8 ~ 14
Low Volatile Bituminous	> 14000	78 ~ 86	14 ~ 22
Medium volatile Bituminous	> 14000	69 ~ 78	22 ~ 31
高挥发胶质煤	> 14000	< 69	> 31

2.1.1 煤的分子结构

煤是一种由有机物质和非有机成分构成的复杂混合物，由于煤的非均质性，煤没有一个统一的分子结构。煤化学家共同认为煤物质是一种大分子结构，这种结构是由周边连接有多原子基团的缩聚芳香稠环、氢化芳香稠环（统称为芳香核或基本结构单元）通过各种桥键（ $-\text{CH}_2-$ ， CH_2-CH_2- ， $-\text{O}-$ ， $-\text{CH}_2-\text{O}-$ ， $-\text{S}-$ ， $-\text{S}-\text{S}-$ ， $-\text{CH}_2-\text{S}-$ ）连接而成。相当长的时间以来，研究者利用如分光镜、X 光衍射，红外光谱、电子顺磁共振、测量电介质损失等方法，引入“平均分子结构（average molecular structure）”概念，对煤大分子进行描述。20 世纪 60 年代，Given^[105] 基于彼此连接、大量排列芳香系统，提出了石墨薄片结构，旨在说明煤物质的三维空间结构和煤分子结构的重要性；1984 年，Shinn 的模型^[106] 认为，煤分子是一种由醚基交链而成的芳香稠环和氢化芳香稠环系统；1986 年，Marzec 的双相模型^[107] 认为，在分子共价部分，三维交链大分子网络中捕捉少量低分子组分，在非分子共价部分，被束缚的挥发物和可转化的溶解物依靠一定的力（氢键、van der Waals 力、 $\pi-\pi$ 键、静电力）限制在大分子结构之中，或者捕聚在大分子稠环之中。Jones^[108] 的模型则进一步显示了随机导向的芳香稠环的典型三维空间特征。

2.1.2 煤的物理结构

煤是一种多孔的，似玻璃状的固体岩石^[109]，这种似玻璃状的岩石的玻璃转化温度为 580 ~ 623K。当温度高于它的玻璃转化温度时，这种似玻璃状的大分子网络结构将转化为一种似橡胶状的物质，这些特征在有机溶解、吸附气等实验中可观察到。因此，煤既是一种多孔岩石，又是一种拟聚合体。作为多孔岩石的煤体处于似玻璃状态，所以，很多煤的特性类似于那些玻璃聚合体。例如，玻璃聚合体的结构表现出坚硬和易脆的特性，大分子链的移动性受到严重的限制，而且，由于大分子结构密集，在大分子间的孔隙空间非常小。且处于玻璃状态的煤基吸附气扩散能力低。然而，处于橡胶状态的煤，由于链的绕动、转换和振动，大分子链具有高的移动性和占据了大部分自由空间，这些变化使得吸附气在煤中扩散比玻璃状态的煤具有更高的扩散能力。

2.1.3 煤的孔隙尺寸

煤是由高度交连、混合排列的大分子链构成，由于这种大分子链在三维空间的排列而形成延伸孔隙。在第一章中分别介绍了不同学者对煤孔隙分类及相应的参数值，同时 IUPAC^[110] 提出了煤孔隙的分类标准，Gan 和 Nandi 等^[17] 提出煤的孔隙体积的分布依靠煤阶来划分。不同的测量技术和测量方法可以得到不同的煤孔隙尺寸。表 2-2 是 Argonne Premium 煤用不同测量方法得到的孔隙尺寸。因此，煤的孔隙系统的尺寸具有从埃到微米、严重非均质孔隙结构性质。

表 2-2 选择的 Argonne Premium 煤的孔隙尺寸^[111 ~ 113]

煤名称	平均孔隙尺寸, nm	测试方法
Wyodak	6.7 ± 0.2	Xe-NMR
Illionis No.6	5.8 ± 0.4	Xe-NMR
Pittsburgh	19.1	CO ₂ 吸附
Beulah-Zap	16.8	CO ₂ 吸附
Beulah-Zap	22.0	H-NMR