

SHENGZHENFA QIANGHUA MEICENGQI
GAOXIAO CHOUCAI DE JILI

声震法强化煤层气 高效抽采的机理

姜永东 鲜晓东 宋 晓 郭臣业 周东平 著



科学出版社



声震法强化煤层气高效 抽采的机理

姜永东 鲜晓东 宋 晓 郭臣业 周东平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕煤层气高效抽采这一重要科学问题,采用实验研究、数值模拟、理论研究、现场试验研究等方法,对声波在煤气多孔介质中传播的波动方程与衰减规律、声场作用下煤层气的吸附/解吸特性及模型、多场耦合作用下煤层气的渗流方程、声震法提高煤层气抽采率的现场试验进行了研究,研究成果强化了煤层气的高效抽采,减少了煤中煤层气的含量,从而可以减少煤矿瓦斯事故。

本书可供采矿、煤矿安全及相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

声震法强化煤层气高效抽采的机理 / 姜永东等著. —北京: 科学出版社, 2014.8

ISBN 978-7-03-041758-9

I. ①声… II. ①姜… III. ①煤层-地下气化煤气-瓦斯抽放-研究 IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 196230 号

责任编辑: 李锐 杨 岭 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年8月第 一 版 开本: B5 (720*1000)

2014年8月第一次印刷 印张: 10.25

字数: 210千字

定价: 58.00元



前 言

我国煤层气储量丰富,由于煤矿地质条件复杂,煤储层渗透率极低,因此,煤层气的高效抽采成为矿业界的一大难题。目前针对高效开发煤层气,国内外提出了一些激励技术,其中物理场激励技术得到了专家学者的关注。

本书基于声震法提高煤层气抽采率的机理,采用实验研究、理论研究、数值模拟、现场试验相结合的方法,分析了声波在煤—气多孔介质中的传播规律及衰减特征,实验研究了声场作用下甲烷的吸附/解吸特性,以及多场耦合作用下甲烷的渗流特性,数值模拟与现场试验研究了声震法强化煤层气渗流,建立了声场作用下甲烷吸附/解吸模型和应力场、温度场、声场耦合作用下的煤层气渗流方程,分析了声震法强化煤层气解吸、扩散、渗流的机理。

本书共7章。第1章介绍了研究意义、国内外研究现状及主要内容,第2章介绍了可控声震法实验系统设计,第3章论述了声波在煤储层中的传播及衰减规律,第4章论述了不加声场和加声场作用下甲烷吸附解吸特性及模型,第5章论述了声震法促进煤层气解吸扩散的机理,第6章论述了声震法提高煤储层渗透率的机理,第7章介绍了声震法促进煤层气渗流的现场试验研究。

本书得到了国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB239204)、教育部创新团队发展计划(IRT13043)、教育部科学技术研究重点项目(109130)、中央高校基本科研业务费科研专项自然科学类重大项目(CDJZR12248801)、重庆市前沿与应用基础研究计划(cstc2013jcyjys001, cstc2014jcyjA1189)及煤矿灾害动力与控制国家重点实验室的资助,并得到科学出版社的大力支持,在此一并致谢!

限于作者水平有限,书中难免有欠妥之处,恳请读者不吝指正。

作 者

2014年7月于重庆

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状与评述	2
1.2.1 煤对煤层气的吸附/解吸研究现状	2
1.2.2 煤层气渗流的研究现状	8
1.3 本书主要内容	10
第2章 可控声震法实验系统设计	12
2.1 超声波收发装置设计	12
2.1.1 超声波收发器的性能指标	12
2.1.2 超声波收发装置工作原理	12
2.1.3 超声波收发装置结构框图	13
2.2 超声波收发装置软硬件设计	14
2.2.1 信号发生模块	14
2.2.2 信号接收模块设计	22
2.3 可控声震法实验系统设计	29
2.3.1 声场作用下甲烷吸附/解吸装置	29
2.3.2 声场作用下甲烷渗流装置	32
2.4 本章小结	35
第3章 声波在煤储层中的传播及衰减规律	36
3.1 声波在煤储层中的传播理论	36
3.1.1 声波在煤体中传播的波动方程和速度	36
3.1.2 声波在煤层气中传播的波动方程和速度	39
3.1.3 波动方程求解	40
3.2 声波在煤体中的衰减规律	47
3.2.1 声波的特征量	47

3.2.2 声波的衰减与衰减系数	48
3.3 本章小结	52
第4章 不加声场和加声场作用下甲烷吸附解吸特性及模型	53
4.1 实验煤样工业分析	53
4.2 煤体的微观孔隙结构	55
4.2.1 煤微观孔隙结构研究方法	55
4.2.2 煤孔隙结构的分类	56
4.2.3 煤孔隙的成因类型	56
4.2.4 煤体微观孔隙结构的实验研究	57
4.3 不加声场和加声场作用下甲烷吸附特性及模型	67
4.3.1 吸附模型	67
4.3.2 不加声场作用下甲烷吸附特性	69
4.3.3 声场作用下甲烷吸附特性	70
4.3.4 声场作用下煤吸附甲烷模型	75
4.3.5 声场影响煤吸附甲烷的机理	77
4.4 不加声场和加声场作用下甲烷解吸特性及模型	78
4.4.1 解吸模型	78
4.4.2 不加声场作用下甲烷解吸特性	79
4.4.3 声场作用下甲烷解吸特性	82
4.4.4 声场作用下甲烷解吸模型	91
4.5 本章小结	92
第5章 声震法促进煤层气解吸扩散的机理	94
5.1 煤层气扩散	94
5.1.1 Fick 型扩散	95
5.1.2 Knudsen 型扩散	102
5.1.3 过渡型扩散	102
5.2 双扩散模型	103
5.3 本章小结	107
第6章 声震法提高煤储层渗透率的机理	108
6.1 煤层气的渗透特性与渗流方程	108
6.1.1 煤层气的渗透特性	108
6.1.2 煤层气渗流方程的研究	112
6.2 声场促进煤层气渗流的实验研究	113

6.2.1	试件加工	113
6.2.2	煤样变形特性的实验研究	113
6.2.3	温度对煤体变形特性的影响	115
6.2.4	气体渗透率计算公式	116
6.2.5	不加声场作用下甲烷气渗流特性的实验研究	116
6.3	地应力、地温、声场中煤层气渗流方程	124
6.3.1	煤层气运动方程	125
6.3.2	煤层气流动的连续性方程	125
6.3.3	煤层气状态方程	125
6.3.4	煤层气含量方程	126
6.3.5	煤层气渗流方程	127
6.4	煤层气渗流特性的数值模拟	127
6.4.1	单场与多场作用下煤层气渗流数值模拟	127
6.4.2	声场作用下煤层气渗流特性的数值模拟	132
6.5	声场促进甲烷气解吸扩散渗流的机理	136
6.5.1	机械振动作用	136
6.5.2	热效应作用	136
6.5.3	煤与甲烷分子间的作用关系	138
6.6	本章小结	139
第7章	声震法促进煤层气渗流的现场试验研究	140
7.1	提高煤层气抽采率的激励技术	140
7.2	声震法促进煤层气渗流的现场试验	144
7.2.1	实验现场情况	144
7.2.2	现场实验方法与数据分析	146
7.3	本章小结	149
参考文献		150

第 1 章 绪 论

1.1 研究意义

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, 并混有一些有害毒物的多组分气体。 CH_4 含量大于 95% 的煤层气, 其发热量可超过 $33.6\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。我国煤层气在埋深 2000m 以浅, 储量约为 30 多万亿 m^3 ^[1], 与我国陆上常规天然气资源量相当, 它是一笔可支配的较洁净的能矿资源和化工原料, 其次煤层气是煤矿重大灾害事故的有害源。据统计, 煤层气灾害事故约占煤矿重大灾害事故的 70%。同时, 其主要组分 CH_4 是一种比 CO_2 高 20 多倍的强温室效应气体。所以, 从资源的利用、安全生产和保护环境角度来看, 开发煤层气势在必行。

由于我国煤矿地质条件复杂, 煤储层渗透率极低, 在煤层气抽采中抽采率低, 全国平均抽采率在 23% 左右, 国际上许多国家的平均抽采率都在 40% 以上, 个别的达到 70%, 甚至更高。我国存在的问题: 一是抽采量少, 20 世纪 90 年代中期, 全国抽采量不过 6 亿多 m^3 , 2011 年抽采量 115 亿 m^3 , 2013 年抽采量约 160 亿 m^3 , 预计到 2015 年达到 300 亿 m^3 。二是综合利用差, 抽出的煤层气近一半排空, 2013 年煤层气综合利用占抽采总量的 49.4%, 而排空占 50.6%, 至今我国煤层气的开发还没有真正走向商业运营阶段。美国则把煤层气作为能源来开采利用, 1953 年美国圣胡安盆地第一口煤层气开发区建成投产, 1978 年美国能源部开始实施甲烷回收计划, 1980 年美国黑勇士盆地煤层气开发建成投产, 1996 年美国煤层气产量极高的圣胡安盆地的 110 口煤层气井, 日产量达 660 万 m^3 , 2000 年美国煤层气产量占天然气总量的 15%, 2012 年美国煤层气产量达 500 亿 m^3 , 不仅产量大而且质量好, 并已与常规天然气联网^[2]。为使我国的煤层气走向商业化, 在煤层气开发和利用方面还需要做大量的基础研究工作。

对低渗透煤层提高煤层气抽采率, 国内外采用了造穴、水力压裂、预裂爆破、水力割缝、水平井技术、注气、物理场激励等^[3~5]方法。其中, 造穴适应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煤层; 预裂爆

破提高煤层渗透性的范围较小,影响范围为钻孔直径的 5~15 倍;水力割缝在低渗透煤层中应用效果好;水平井技术使煤体裂隙、裂缝连通,增加了单位面积内煤层气的渗透容积,但由于煤层赋存条件与地面条件的复杂性,选井位置困难;注气开采效果明显,但气源和经济性使应用范围十分有限;物理场激励国内外研究较少,研究不够深入,对提高煤层气抽采率的微观机理认识不清。鉴于超声波处理油层具有很好的效果,20 世纪 90 年代后期,重庆大学鲜学福院士提出了用可控声震法技术提高煤层气抽采率的新思想,认为要提高煤层气的抽采率必须寻找到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,而超声波基本能满足这种要求。他带领的团队研究了应力场、温度场、静电场、交变电场、声场作用下煤层气的吸附、解吸、渗流特性,建立了煤层气吸附/解吸模型,多场耦合作用下煤层气渗流理论^[6~12]。本书为了揭示声震法提高煤层气抽采率的机理,在声震法促进煤层气解吸、扩散、渗流方面做了较深入的研究,该研究成果可为声震法强化煤层气高效抽采提供理论基础。

1.2 国内外研究现状与评述

1.2.1 煤对煤层气的吸附/解吸研究现状

煤是一种多孔介质,是天然的吸附剂,与煤伴生的煤层气以吸附态、游离态、水溶态三种状态赋存于煤体中,但 80%~90% 的煤层气是以吸附态赋存于煤的过渡孔和微孔中。研究煤层气的吸附特征,对了解煤层气的解吸、扩散、运移、聚集规律和阐述煤与煤层气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。其主要研究内容为以下 7 个方面:①煤的结构模型;②煤层气的吸附机理;③煤吸附气体的理论模型;④影响煤吸附性能的因素;⑤煤对多元组分气体的吸附理论;⑥地球物理场中甲烷的吸附/解吸特性;⑦声场作用甲烷的吸附/解吸特性。

1) 煤的结构模型

煤的结构包括两个方面^[13]:一是煤的化学结构即煤的分子结构,二是煤的物理结构即分子间的堆垛结构。煤的大分子结构模型有:Krevelen 模型(1954)、Given 模型(1960)、Wiser 模型(1975)、Shinn 模型(1984),这些模型基本上代表人们在各个时期对分子结构的认识。煤分子间构造模型有:Hirsch 模型(1954)、Riley 模型(1957)、交联模型(1954)、两相模型或主-客(host-guest)模型(1986)、缔合模型(1992),其中 Hirsch 模型和两相模型最具有代表性。煤结构的综合模型考虑了煤的分子结构和空间结构,其模型有:Oberlin 模型

(1989)、球(Sphere)模型(1990)。

煤的孔隙结构是煤的物理结构的主要部分,煤的吸脱附很大程度上取决于煤的孔隙结构。煤的孔隙结构一般用孔隙体积、比表面积、孔径分布、孔隙模型来表征。研究的技术有借助普通显微镜、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、压汞法和低温氮吸附法等手段^[14~16]。Ходот В. В.^[17]对煤的孔隙进行了分类,按空间尺度将煤的孔隙分为:微孔($<10\text{nm}$)、小孔($10\sim100\text{nm}$)、中孔($100\sim1000\text{nm}$)、大孔($>1000\text{nm}$)。Dubinin 等人^[18]1966年将孔隙划分为:微孔($<10\mu\text{m}$)、过渡孔($10\sim20\mu\text{m}$)、大孔($>20\mu\text{m}$)。Gan 等人^[19]将其划分为:微孔($<1.2\mu\text{m}$)、过渡孔($1.2\sim30\mu\text{m}$)、粗孔($>30\mu\text{m}$)。之所以有以上三种煤的孔隙不同划分,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 等人^[20]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^[21]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年张慧等^[22]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年张素新等^[23]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,有些借用了砂岩储层和灰岩储层的名称。

2) 煤层气的吸附机理

煤层气主要以吸附态、游离态、溶解态的方式赋存在煤层中,其中吸附态占的比例为 $80\%\sim90\%$ ^[24]。张力等^[25]将煤体吸附煤层气的全过程概括为:渗流—扩散、吸附—脱附的综合过程。其中,主要包括:渗流、外扩散、内扩散、吸附、脱附、内孔中煤层气气体分子的反扩散和煤基质外表面反扩散七个过程。煤层气的吸附机理有两种观点^[26]:一是物理吸附,二是化学吸附。物理吸附解释为吸附剂与吸附质之间的作用力是范德华力,即分子间力;化学吸附解释为吸附剂与吸附质的原子间形成化学吸附键。但大多数学者认为是物理吸附。

红外光谱是从分子水平研究固体表面吸附的最有效方法之一,当有化学吸附存在时,因化学吸附键的定位性,可从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^[27]。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 $Re=0.335\text{nm}$, $De=2.65\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, $\beta=20\text{nm}^{-1}$, 研究认为煤基块表面分子与煤层气分子间的作用力为范德华力,属于物理吸附。煤基块吸附的煤层气可分为吸收煤层气和吸着煤层气,吸收煤层气进入煤体内部,而吸着煤层气吸附在煤体表面。在 $-100\sim30^\circ\text{C}$ 温度范围区,现场红外光谱实验未

观察到甲烷在煤中形成化学吸附^[28]。国外有关研究测得煤对煤层气的吸附热比汽化热低 2~3 倍,从而认为煤层气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^[29,30],说明煤对气体的吸附是无选择性的。总的来说,煤对煤层气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的观点得到了大多数研究者的认同。

3) 煤吸附气体的理论模型

目前,研究者针对不同的吸附系统和基于不同的假设,提出了许多等温吸附理论模型。如 Henry 模型、Langmuir 单分子层定位吸附模型、BET 多分子层吸附模型、Freundlich 经验模型、基于 Gibbs 法的各种等温吸附模型以及基于吸附势理论的各类等温吸附模型。而 S. Brunauer 等将等温吸附曲线归纳为五种类型^[31],如图 1.1 所示。其中,类型 I 表示为单分子层物理吸附;类型 II 表示在低压时形成单分子层吸附,但随压力增高,产生多分子层吸附甚至凝聚现象,使得吸附量急剧增加;类型 III 表示从起始就是多分子层吸附,在压力达到某值后,发生凝聚,吸附量也趋于无限大;类型 IV 表示低压时为单分子吸附,压力增加产生毛细凝聚,最后达到饱和;类型 V 表示在低压时为多分子吸附,压力增加产生毛细凝聚,最后达到饱和^[32]。

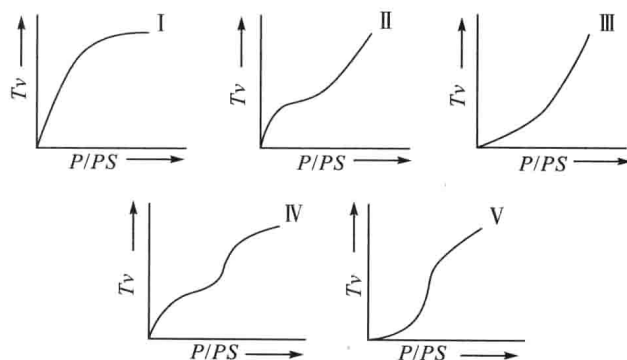


图 1.1 Brunauer 的五种等温吸附曲线

4) 影响煤吸附性能的因素

目前较多学者对煤吸附能力进行了研究,通过研究结果表明,影响煤吸附能力的因素主要有:煤的变质程度、物质组成、煤阶、水分、温度、气体压力等。

(1) 煤的变质程度。国内外的研究表明,煤的吸附特性与煤的变质程度之间不存在单值联系,但有一个总的趋势,即在相同的气体压力下,煤的甲烷吸附

量随着煤的变质程度的提高而增大。随着煤变质程度增高和挥发分减少,煤的微孔容积增大。在同一挥发分含量值时,吸附煤层气量有很大差别。文献 [33] 对煤阶 $R_{\max}=0.46\%\sim 0.71\%$ 的干燥基煤样实验研究表明:煤变质对煤吸附能力起着控制作用。

(2)物质组成。煤的物质组成包括有机显微组分和矿物质,对煤的吸附能力起主控作用。其中,煤中矿物质含量越高,其吸附能力越低。

煤由镜质组、壳质组和惰质组组成。镜质组是植物木质纤维素在还原条件下经凝胶化作用形成的胶状物质;壳质组是由植物皮质部、孢子、花粉、分泌物形成,这些物质在泥炭化作用阶段化学稳定性强,几乎没有发生质的变化而保存在煤中;惰质组是丝炭化作用的产物,在氧化条件下,植物遗体由于失去被氧化的原子团而脱氢、脱水,炭含量相对增加,经历了较大程度的芳烃化和缩合作用。各种组分所经历的变化不同,导致化学组成、分子结构和孔隙的差别。凝胶化作用和丝炭化作用不同,致使植物组织保存的程度不同。在煤变质过程中,各组分产生的烃类物质、挥发性物质量的不同造成孔隙发育程度不同。因而,显微组分的吸附能力存在差异。钟玲文^[34]研究表明,煤的吸附能力是惰质组 II (指胞腔结构无充填物的丝质体) > 镜质组 > 惰质组 I (粗粒体和有胞腔结构但被充填的丝质体),原因是在煤变质程度较低的煤中惰质组中有大量的纹孔,而镜质组中孔隙和内表面积纹孔较少,造成惰质组 II 比镜质组吸附能力强。在无烟煤 3 号变质阶段,煤的吸附能力是镜质组 > 惰质组,原因是在高变质阶段,镜质组中有更多的挥发物质产出,引起微孔增多。但总体表明,物质组成对煤吸附能力具有较大影响。

(3)煤阶。研究表明,在同等温度条件下,煤阶越高吸附能力越强。 $R_{\max}$ 越大,证明煤的总孔隙率越高,特别是小的孔隙数量越多。这样煤的孔隙比表面积也相应增加,导致煤的吸附容积增大,对甲烷的吸附能力增强。

(4)水分。水是煤炭的组成部分。研究表明:随着煤的变质程度不同,水分变化很大。其中,泥炭中水分最大,可达 $40\%\sim 50\%$,褐煤次之,在 $10\%\sim 40\%$ ^[35],烟煤含量较低,无烟煤又有增加的趋势,这是由于煤中水分除与煤的变质程度有关外,还与煤的结构有关。煤中水的形态可以分为游离水和化合水,游离水是煤内部毛细管吸附或表面附着的水;化合水是和煤中矿物成分呈化合形态存在的水,也叫结晶水。文献 [36, 37] 研究表明,水分对煤的吸附性能有较大的影响,煤的吸附量随含水量的增加而减小。

(5)温度。煤吸附能力严格受温度和压力的影响,压力增高,吸附量增加,温度增高,吸附量减小。一些学者的研究成果^[38, 39]表明:等压条件下,煤吸附的甲烷量随着温度增加近似于线性减少;在相同温度变化程度下,不同压力、不同煤样吸附量的减小程度不相同。温度对固气脱附起活化作用,温度越高,

煤对甲烷的吸附能力越小^[40]。甲烷在煤物质表面包括孔隙表面的吸附是一个放热过程。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。

(6)气体压力。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,围岩中的高地应力决定了煤层的高孔隙压力。文献[26]实验研究表明:在给定的温度下,吸附煤层气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,煤体吸附煤层气量增大,并且当气体压力增大到一定值时,吸附煤层气量将趋于定值。

5)煤对多元组分气体的吸附理论

煤层气实际上是以 CH_4 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较多,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 ^[41,42]。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,但因煤阶差异,也有 CO_2 优先解吸的现象。Pariti 等^[43]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^[44]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^[45]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。多组分吸附的一个重要研究内容是建立多组分吸附模型,其模型有:扩展的 Langmuir 方程、IAS 理论、BET 多组分气体吸附模型、空位溶液模型和格子模型等,应用较多的是扩展的 Langmuir 方程、IAS 理论。扩展的 Langmuir 方程保留了 Langmuir 方程理论中的各种假设条件,而且认为每个吸附中心对各组分的机会是均等的,各组分在吸附中心展开竞争。IAS 理论的核心假设为混合气的吸附相类似于理想溶液,并可用类似于 Raoult 定律的公式来表示气相分压、吸附相

浓度和铺展压之间的关系。

6) 地球物理场中煤层气的吸附/解吸特性

地球物理场是指地应力场、地温场和地电磁场。地球物理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。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几率降低,从而使煤与甲烷间的吸附能力减弱,并且可使煤层气分子 London 色散势提高,从而使煤层气分子的动态特性增强,扩散渗透性提高。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。为此刘保县^[8]对此进行了深入的研究,认为交变电场作用下,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。

7) 声场作用煤吸附/解吸甲烷的特性

20 世纪五六十年代,美国和苏联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。为了提高煤层气的采收率,鲜学福院士在 20 世纪 90 年代后期提出用声震法来提高煤层气抽采率的思想。主要依据是:天然煤中微孔占有一半以上的孔容,过渡孔占 30%~40% 的孔容,而与煤伴生的煤层气中 90% 又是以吸附和吸收态存在于煤层中,分布在这种孔隙的块煤里,而其中的孔隙并非总是连通的。目前关于这方面的研究国内外很少报道。文献 [46] 研究了超声波空化效应对煤储层渗透率的影响,分析了超声波诱发的热效应,会引起煤—煤层气系统温度升高,煤分子和煤层气分子的热运动加剧,动能增大,促进煤层气分子脱附,提高煤层气解吸率。文献 [9] 研究了 40kHz、30W 超声波作用下甲烷的解吸特性,得出了声场作用下煤中甲烷的解吸量增加 20% 左右,声震法促进煤层气的解吸机理源于声波的机械振动和热效应作用。文献 [9] 对超声热效应促进煤层中煤层气解吸扩散过程进行数值分析,得出了超声热效应可以提高煤体的温度,增大微孔隙扩散系数,提高大孔隙游离气的动态百分数,降低微孔隙中吸附气的动态百分数。

1.2.2 煤层气渗流的研究现状

目前国内外对于煤层气的渗流特性研究主要采用数值模拟、实验与理论研究。其中主要的煤层气渗流方程主要有：线性渗流模型、非线性渗流模型、地球物理场效应的渗流模型和多煤层系统越流模型。

1) 煤层气渗流理论研究

1856年法国工程师达西(Darcy)提出线性渗流定律以来,渗流力学一直在向前发展,并不断地与其他学科交叉而形成许多新兴的边缘学科。煤层气渗流力学是专门研究煤层气在煤体多孔介质内运动规律的科学。20世纪80年代以来,该科学发展迅速,其主要表现是:煤层气渗流力学的应用范围更广;煤层气渗流力学的理论以较快的速度不断深化;煤层气渗流力学的研究手段不断实现现代化。

线性煤层气渗流理论认为,煤层内煤层气运动基本符合线性渗透定律——达西定律(Darcy's law)。线性煤层气流动理论的研究已有40多年的历史,在探求煤层内煤层气运移机理方面已先后发展了线性渗流理论^[47~56]及其应用、线性扩散理论^[57]、渗透-扩散理论^[58~60]等,在一定的简化假设下,已形成了较严密的理论体系,也得到了较为成熟的发展,但煤层气渗流是一个非常复杂的过程,它不仅与煤体结构有关,而且受到众多因素的影响。上述线性煤层气流动理论和方法的适用性和实用性常受到挑战,主要体现在下列五个方面:①对煤层这个孔隙-裂隙双重介质的几何参量很难进行严格的定量描述。②煤层内煤层气运移只是近似地用线性规律来描述,至今仍在探索煤层气运移的基本规律。③煤层这个固体骨架不能假定为刚性的。④在实际煤层内煤层气运移过程中,存在着许多尚未深入研究的物理化学效应。⑤由于缺乏测试各向异性透气系数的有效方法,导致对各向异性煤层内煤层气运移的深入研究以及数值模拟遇到了极大的困难。

国内外许多学者对线性渗流定律——Darcy's law 是否完全适用于均质多孔介质中的气体渗流问题,作出了大量的考察和研究。许多学者经过研究归纳出达西定律偏离的原因为:流量过大;分子效应;离子效应;流体本身的非牛顿态势。著名的流体力学专家 E. M. Allen 指出^[60],将达西定律用于描述从均匀固体物(煤样)中涌出煤层气的试验,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指出^[61],从通过变化压差测定煤样中煤层气渗透率看,达西定律不太符合煤层气流动规律。并在大量试验研究的基础上提出了更能符合煤层气流动的基本规律——幂定律(power law)。

1987年,文献[59]根据 power law 的推广形式,在均质煤层和非均质煤层条件下,首次建立了可压缩性煤层气在煤层内流动的数学模型——非线性煤

层气流动模型。1991年,文献[62]经过实验研究,提出了考虑克氏(Klinkenberg)效应的修正形式的达西定律——非线性煤层气渗流规律,并建立了相应的煤层气流动数学模型,指出了达西定律的适用范围。非线性煤层气流动理论的发表,引起了国内外同行的兴趣和关注。孙培德^[55,58]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煤层气动力参数基础上,对5种不同模型进行了数值模拟,认为文献[72]提出的非线性煤层气流动模型所模拟的煤层气压力分布值与实测的煤层气压力最吻合,从而证明文献[59]所提出的非线性煤层气流动模型比国内外其他4种模型更逼近实际,更具实用性。

文献[63]对煤层气越流场的定义提出以下问题:如煤层群开采中采场煤层气涌出问题,保护层开采的有效保护范围的确定问题,井下邻近层(采空区)煤层气抽采工程的合理布孔设计及抽采率预估问题,地面钻孔抽采多气层煤层气工程的合理设计及抽采率预估问题,以及地下多气层之间煤层气运移规律的预测和评估等问题,都可归结为煤层气越流问题。经国内外生产实践表明,开采保护层是预防煤与煤层气突出最为有效的区域性治理措施。目前,在我国有保护层开采条件的突出矿井,基本上都优先采用保护层开采法以预防突出。在对保护层开采的作用机理认识及其实践中,文献[64~67]作出了贡献。关于煤层气抽采钻孔的合理设计问题则处于摸索阶段。我国有关地下多气层之间煤层气运移规律以及地面钻孔抽采多气层煤层气工程的效果预估及合理设计等问题的研究甚少,也未得到应有的重视。而欧美国家则重视对煤层气资源开采和煤层气抽采工程的煤层气流动问题的数值模拟技术研究以及商业软件包的开发,这是当今本学科的重要研究课题。

2) 煤层气渗流的实验研究

目前煤层气渗流特性的实验研究较多,主要集中于煤体变形、应力场、温度场、地球物理场等方面对煤层气渗流特性的研究。

煤层气主要在煤体的裂隙中渗流,因此煤体变形特征对渗透率的影响很大,煤体的受力变形同岩石变形相似,分为四个阶段:①初始压密阶段,煤体原生裂隙和孔隙被压密,渗透率降低;②弹性阶段,煤体体积继续减小,渗透率降低;③应变硬化阶段,当煤体的应力大于屈服应力,煤体体积开始增大,煤体中将产生新的裂纹,且这些裂纹扩展形成贯通,煤体渗透率开始增加;④破裂阶段,煤体内部形成宏观裂隙,渗透率骤增,其值超过初始阶段的渗透率。文献[68]进行含煤层气煤三轴压缩的实验,系统地研究了含煤层气煤在变形过程中渗透率的变化规律,根据大量的实验数据,拟合得到含煤层气煤的渗透率随围压和孔隙压力变化的经验方程。文献[69]进行了型煤和原煤研究,得出了由于型煤与原煤的结构特性不同,致使两种煤样受力以后具有不同的损伤机制,渗流速度-轴向应变曲线差异较大,尤其在破坏阶段。文献[70,71]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。

应力场方面,早期大量的研究表明^[72~76],煤储层的渗透率与有效应力之间存在幂函数关系,随着有效应力的升高,渗透率通常呈指数形式降低。李伍成^[77]通过研究不同有效应力、不同温度和不同煤层气压力水平下的煤样渗透特性试验,得出了温度和煤层气压力一定时,随着有效应力的增大,渗透率逐渐减小,且减小趋势逐渐减缓。文献[78]测量了三维应力作用下煤层气在煤岩体孔隙裂隙中的渗透率,得到了渗透系数随有效体积应力和孔隙煤层气压力的变化规律;文献[79]对含煤层气煤在变形过程中渗透率的变化规律进行了研究。文献[80~82]对应力场下煤层气渗流特性进行研究得出,随着围压增大,煤层气渗透率降低。围压对试件渗透率的影响比轴向压力大。文献[83]等研究了孔隙气压对煤层气气体渗透性的影响,得出了煤的渗透率随孔隙气压增大而减小,这种特性是由孔隙气压变化引起滑脱效应和孔隙结构本身变化所致。

重庆大学鲜学福院士及其博士等开创性地进行了地球物理场效应的煤层气流动理论的系列研究:文献[84]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;文献[85]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;文献[86,87]研究了地温场作用下的煤层气渗流基本规律,并指出,温度升高有利于煤层气渗流;文献[88]研究了温度影响下煤层气解吸渗流规律,结果表明,相同围压、轴压和孔隙压力下,煤体渗透率随温度的增加而降低;文献[89]对外加应力场下温度对煤层气渗流特性的影响研究表明,温度对煤层气渗流的影响需要考虑外加应力大小。该研究得出,在高外应力情况下,温度对煤体渗透率的影响,在低平均有效应力时,渗透率随温度的增加而增加,在高平均有效应力时,渗透率随温度的增加而减小;文献[9]等在此基础上进行了声场作用研究,得出了声场作用有利于提高煤层渗透率。

1.3 本书主要内容

根据以上国内外研究现状的评述,论文拟采用实验研究、理论研究、数值模拟、现场试验相结合,在总结前人研究成果的基础上,围绕声震法提高煤层气抽采率的机理这一重要科学问题展开研究工作,其主要研究内容如下。

1) 超声波在煤气多孔介质中传播的波动方程与衰减规律

利用声发射仪和自主研发的可控超声波发生器实验测定超声波在煤气多孔介质中传播的纵波与横波速度,以及在煤气介质中传播的衰减系数。在实验研