



Reservoir Dynamic Geological Effect During
Coalbed Methane Development Process

煤层气开发过程 储层动态地质效应

汤达祯 刘大锰 唐书恒 李治平 邵先杰 等◎著



科学出版社

煤层气开发过程储层动态地质效应

**Reservoir Dynamic Geological Effect During
Coalbed Methane Development Process**

汤达楨 刘大锰 唐书恒 李治平 邵先杰 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是对国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“高丰度煤层气富集机制及提高开采效率基础研究”所属课题“煤层气开发储层动态地质效应(编号:2009CB219604)”研究成果的总结。书中重点介绍以下内容:通过对高丰度煤层气储层物性发育特征及其地质控制因素的分析,揭示高丰度煤层气储层地质特征与储层物性主控因素;研究煤层气开发过程中的煤岩弹性自调节作用,揭示煤储层物性在煤层气开发过程中的变化规律;研究煤层气生产过程中煤岩应变、煤储层渗透性变化和煤层气解吸渗流互动过程,探查煤储层诱导变化的产能地质效应,提出煤层气藏平衡开发及保持合理地层压力的依据与方法。研究成果推进了煤层气开发地质理论的发展,对指导煤层气排采过程控制、建立合理工作制度等有应用价值。

本书适合煤层气地质与工程研究人员和相关专业技术人员阅读,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气开发过程储层动态地质效应 = Reservoir Dynamic Geological Effect During Coalbed Methane Development Process / 汤达祯等著. —北京:科学出版社,2014. 3

ISBN 978-7-03-040213-4

I. ①煤… II. ①汤… III. ①煤层-地下气化煤气-资源开发-储集层-研究 IV. ①P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 046798 号

责任编辑:耿建业 刘翠娜 / 责任校对:赵桂芬

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:312 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



本书撰写人员名单

汤达桢	刘大锰	唐书恒	李治平	邵先杰
许 浩	姚艳斌	张松航	赖枫鹏	陶 树
张 彪	孟艳军	吕玉民	李 松	蔡益栋
李俊乾	田 霖	高丽军	刘振兴	梁建龙

序

历经了坚持不懈的理论探索和生产实践,我们迎来了中国煤层气产业化蓬勃发展的崭新局面。国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“高丰度煤层气富集机制及提高开采效率基础研究(编号:2009CB219600)”,以高丰度煤层气富集区为主攻方向,以寻找现实目标和加快我国煤层气产业发展为宗旨,依托沁水盆地、鄂尔多斯盆地等煤层气勘探开发示范区,针对高丰度煤层气富集区勘探和提高煤层气开采效率所面临的基础性问题,围绕“高丰度煤层气富集区形成机理及分布预测”、“煤层气开采过程中地质效应及机理”和“煤层气不同开发方式及压裂增产机理”三个科学问题开展攻关研究。中国地质大学(北京)、燕山大学积极组织力量,负责并圆满完成所属课题“煤层气开发储层动态地质效应(编号:2009CB219604)”的研究任务。

煤层气降压排采过程中,随着煤储层流体压力、有效应力的不断变化,孔裂隙系统开发动态效应集中体现于煤层渗透性变化,并在很大程度上影响产能效果。煤层气开发过程中,随着水、气排出,应力敏感性增强,导致裂缝闭合,渗透率下降;解吸产出造成煤基质收缩,裂隙空间扩大,渗透率增大。煤储层的开发动态效应贯穿于气井、气田的整个开发过程,从而影响着煤层气井的产气能力。因此,发展煤层气开发地质理论,为排采过程中采取合理的排采制度、有效保护煤储层提供理论依据,是实现煤层气高效平衡开发的基础保障。

《煤层气开发过程储层动态地质效应》一书凝聚了课题研究的主要成果。通过研究高丰度煤层气储层基本特征与成因条件,揭示高丰度煤层气储层物性地质控制因素;研究煤储层储集性、渗透性、可采性耦合关系,揭示煤储层多相渗透率、气水饱和性及其在产能过程中的变化规律;分析煤层气开发过程中煤储层流固耦合渗流规律与产能影响,阐明煤储层渗透性变化和煤层气解吸的互动过程及产能地质效应。构建了以渗透性变化为核心的中、高煤阶煤储层动态分析理论和技术;形成了“开发过程中煤储层渗透率阶段变化规律”核心创新成果。在理论、实验和生产资料结合上,针对我国中、高煤阶煤层气井开发地质条件,形成了“基于煤层气井生产资料反算渗透率方法”、“运用生产资料计算煤层气井产能方法”和“平衡开发及保持合理地层压力依据与方法”,在沁水盆地、鄂尔多斯盆地煤层气勘探开发实践中得到了很好地应用,为煤层气开发方案的优化提供了理论基础。

中国煤层气产业的发展应尽快形成“技术支撑型”模式,急切期待煤层气储层工程理论和技术的发展和完善。目前我国煤层气井大多生产周期短,尚需从煤储

层多相渗透率转化、可动流体与渗透率关系、煤体流变产能效应方面揭示煤层气开发过程中煤储层渗流网络系统构成,强化理论与气井产能的结合,构建合理、量化的排采制度,更加有效地指导煤层气勘探开发。

我欣然为该书作序,同时热切期望作者不辱使命、不懈进取,与煤层气业内同仁共同奋斗,为煤层气勘探开发理论技术研发和中国煤层气产业发展作出更大贡献!

国家重点基础研究发展计划(973)项目
“高丰度煤层气富集机制及提高开采效率
基础研究”首席科学家



2014年2月于北京

前 言

本书是在国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“高丰度煤层气富集机制及提高开采效率基础研究”所属课题“煤层气开发储层动态地质效应(编号:2009CB219604)”的研究基础上编写而成。

书中针对煤层气开采过程中地质效应及机理这一科学问题,通过高丰度煤层气富集区的煤储层特性、渗流体系、压力平衡等关键问题的探讨,发展集煤层气储集性、渗透性和可采性为一体的煤层气储层评价预测理论;研究生产过程中煤储层参数变化与煤层气吸附/解吸的互动关系,探讨煤层气平衡开发中排采工艺的基础理论问题,揭示煤层气开发过程储层地质效应。本书主要总结以下研究进展。

(1) 高丰度煤层气储层基本特征与成因类型。通过高丰度煤层气储层的物质组成、岩石力学性质、孔渗性变化,表征储层内部结构及物性发育特征;建立高丰度煤层气储层的宏观、微观表征方法,揭示高丰度煤储层物性形成的地质控制因素,提炼煤储层工程参数,奠定煤储层动态评价基础。

(2) 煤储层储集性、渗透性与开发过程的耦合关系。通过物理模拟实验,研究煤层气开发过程中的煤岩弹性自调节作用,分析煤岩力学性质在开发过程中的显现特征,揭示煤储层“双孔隙结构系统”及渗透率的动态变化响应,揭示开发过程中中高煤阶煤储层渗透性变化规律。

(3) 开发过程中煤储层动态变化的产能响应。在探讨储层地质与开发条件下煤-水-气三相介质的耦合关系的基础上,分析煤层气开发过程中煤储层孔渗特征及力学特性的动态变化对煤层气产能的影响。结合排采资料,研究煤储层温压场、应力应变场、流体场等与解吸、扩散和渗透性变化的互动过程,探查煤储层物性变化特征及产能地质效应。

煤层气开采诱导煤体发生动态应变和渗透率动态变化,进而影响煤层气井和煤层气田的产气能力。煤储层特性的排采诱导变化贯穿于气井、气田的整个开发过程。发展煤层气开发地质理论,科学预测煤储层诱导变化,进而为排采过程中采取有效的稳产、增产措施提供技术依据,是实现煤层气开发重大技术创新的基础保障。本书通过煤储层特性精细描述、煤储层关键动态参数分析及煤储层产能动态分析,将“开发过程中煤储层渗透率阶段变化规律”研究确定为创新方向,研究发展渗透性变化为核心的煤储层动态分析理论和技术,为实现项目总体目标——建立高丰度煤层气富集区形成分布与高效开发理论体系提供煤储层工程理论和技术支撑。

全书共八章,第一章由汤达祯、许浩、陶树执笔;第二章、第三章由刘大锰、姚艳斌、蔡益栋、李俊乾执笔;第四章由许浩、张彪、陶树、吕玉民、李松、田霖执笔;第五章由唐书恒、张松航、刘振兴、梁建龙执笔;第六章、第七章由李治平、邵先杰、赖枫鹏、高丽军执笔;第八章由邵先杰、汤达祯、孟艳军执笔。汤达祯、许浩、陶树最后编纂成书。

在研究及成书过程中,973项目首席科学家、中国石油勘探开发研究院宋岩教授自始至终精心组织和指导了对科学问题的凝练、技术路线的设计和研究成果的总结。项目专家组特别是课题跟踪专家唐修义教授和成玉琪教授给予了全程指导。中国地质大学(北京)、燕山大学积极支持并提供了保障。中石油煤层气有限责任公司、中联煤层气有限责任公司、华北油田山西煤层气公司、中石化华东分公司、国家煤层气开发利用工程中心、中国石油勘探开发研究院廊坊分院、中国矿业大学、重庆大学等兄弟单位在技术、资料、实验测试及成果现场应用反馈等方面给予了大力支持。科学出版社能源与动力分社耿建业社长、刘翠娜编辑热情相助,本书始得付梓。

值此机会,作者谨对各有关单位,各位领导、专家和同仁给予的支持,表示衷心感谢!

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第二章 煤层气储层物性差异发育特征	8
第一节 高丰度煤层气储层物性基本特征	8
第二节 煤储层孔渗性差异发育特征	9
一、煤储层孔隙发育特征	9
二、煤储层微裂隙发育特征	10
三、煤储层初始渗透性	15
第三节 储层物性的煤岩学控制作用	16
一、煤岩制约的吸附能力变化	16
二、煤岩制约的孔隙发育程度	20
三、煤岩制约的微裂隙发育程度	22
第三章 煤储层物性综合表征方法	28
第一节 煤储层物性地震综合预测	28
一、属性分析与孔隙度预测	28
二、应用实例	29
第二节 渗透性测井信息反演	30
一、理论基础	31
二、计算模型	33
第三节 基于压汞测试结果的相对渗透率分析	37
一、压汞识别不同尺度孔裂隙	37
二、孔裂隙系统类型评价	40
三、利用分形模型计算气水相对渗透率	44
第四节 基于低场核磁共振分析的渗透率模型	47
一、理论基础	48
二、孔隙结构与有效孔隙度分析	48
三、核磁共振渗透率分析	52
第四章 煤储层开发动态关键参数分析	56
第一节 煤储层开发动态参数分析	56

一、地质特征参数	56
二、工程特征参数	67
第二节 煤储层开发因素灰色关联分析	71
一、产能因素相关性分析	72
二、灰色关联分析	75
三、产能关键因素	76
第五章 煤储层吸附渗流特性变化机理	78
第一节 有效应力效应	78
一、三轴伺服渗流实验	79
二、煤岩应力与应变关系	82
三、煤岩渗透性的应力效应	85
第二节 基质收缩/膨胀效应	90
一、光学法测定煤基质膨胀量实验	90
二、基质收缩的渗透率效应	95
第三节 应力与吸附膨胀综合效应	98
第四节 煤储层渗透率变化理论模型	107
一、煤储层裂缝应力敏感性模型	107
二、煤储层毛细管应力敏感模型	108
三、开发过程储层敏感性综合分析	109
第六章 煤储层渗透率阶段变化规律	113
第一节 煤层气井排采阶段划分	113
一、无因次产量分析法	113
二、相对渗透率比值分析法	118
第二节 煤储层渗透率阶段变化机理	123
一、解吸模型理论推导	124
二、解吸过程	128
三、解吸模型实践意义	130
第三节 煤储层渗透率阶段变化规律	134
一、渗透率阶段变化特征	134
二、渗透率阶段变化规律	139
第七章 基于生产数据计算渗透率变化	142
第一节 煤储层渗透率变化数学表达	142
第二节 煤储层渗透率变化反演推导	148
第三节 计算步骤及实现过程	149
第四节 应用实例	156

第八章 煤储层动态变化及产能控制作用	194
第一节 煤层气井产量变化规律	194
一、煤层气井产能模式	194
二、煤层气井产量递减类型	200
三、产能递减控制因素	204
第二节 煤层气开发工程干预的影响	206
第三节 平衡开发及合理地层压力保持水平	213
一、开发过程压力作用机制	213
二、地层压力对解吸和渗流的影响	219
三、生产过程解吸-渗流连续流动方程	220
四、实例分析	222
参考文献	227

第一章 绪 论

在排水降压开发煤层气的过程中,煤储层空间结构、流体系统、应力场随流体介质的采出呈现出连续变化,导致煤储层不同尺度孔裂隙结构中煤层气的压力、浓度、解吸、扩散、渗流的协同变化。煤层气开采过程中,煤层气的解吸、渗流特征是选择煤层气开发工艺和控制煤层气井产能的关键因素。目前对不同煤级储层中有有效应力、煤基质收缩对渗透率的综合作用及其在井网中的叠加效应尚不明确,大面积排水降压、解吸效果不十分理想,亟须从煤储层空间结构、流体系统的相互作用过程来研究煤层气解吸、渗流动态变化规律,建立流体在煤储层这一变形介质中的扩散、渗流耦合模型,揭示煤层气排采过程中的储层地质效应,为煤层气平衡开发提供理论基础。

本书以沁水盆地、鄂尔多斯盆地煤层气开发示范区为依托,以中、高煤阶煤储层为主要研究对象,开展煤层气开发地质和煤层气开发工程信息的综合分析,系统进行煤储层含气性、渗透性、储层压力动态变化与煤层气井产能关系研究。深入分析排采过程中煤储层流体和固体骨架的动态变化规律及耦合效应。

本书通过煤储层特性精细描述、煤储层关键动态参数分析及煤储层产能动态预测,进一步完善以渗透性变化为核心的煤储层动态分析理论和技术。在煤储层特征及其控制因素研究的同时,提取关键地质要素对煤层气产能的控制效应,并研究煤储层物性精细表征与预测的基础理论和实用技术,形成地质、地震、测井及室内实验的有效方法,建立广适性煤层气有利储层的地质表征及综合预测理论和方法;通过分析不同排采阶段煤储层含气性、渗透性和储层压力变化对煤层气产能的耦合影响,开展渗透率变化规律理论及方法研究,有效厘定储层地质与开发条件下煤-水-气三相介质的耦合关系;加强流固耦合渗流规律与产能影响分析,区分不同开发地质条件,分类剖析总结储层动态变化及其产能地质效应,探讨煤层气高效开发途径,得出制订稳产、增产方案的指导性结论。

第一,以沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘煤层气开发示范区为主要研究区,探讨煤储层渗透性差异发育特征及其主控因素,揭示地应力场、埋深、储层压力、孔裂隙特征、煤岩组成、煤层力学性质等煤储层渗透率主控因素及其作用,总结高丰度煤层气储层的基本特征,从煤储层精细化、无损化和定量化表征角度,首次提出应用低场核磁共振技术对煤的孔裂隙类型、有效孔隙度、渗透率和孔径结构分布等进行精细定量表征的新方法。

(1) 基于沁水盆地南部煤层气井资料统计分析,厘定高丰度煤层气区高煤阶

煤储层发育的基本特征: ①煤厚大于 5m; ②含气量大于 $14\text{m}^3/\text{t}$, 含气饱和度大于 65%; ③储层压力梯度大于 $0.7\text{MPa}/100\text{m}$, 临储压力比大于 0.66; ④渗透率在 $0.1\sim 1\text{mD}$ ^①, 以大于 0.5mD 为主; ⑤煤储层裂缝发育, 内生微裂隙线密度大于 1 条/cm, 地质环境有利于煤层裂隙张开; ⑥宏观煤岩组成中镜煤和条带状亮煤比例达到 50% 以上, 显微煤岩类型中“微镜煤+微惰镜煤”的比例达到 50% 以上, 煤的显微组分中均质镜质体比例较高。

(2) 总结了高丰度煤层气储层的微裂隙发育特征。以内生微裂隙为主时, 裂隙密度大于 $80\text{条}/9\text{cm}^2$, 且多呈树枝状、正交状或网状、连通性好、矿物填充少; 而以外生微裂隙为主时, 裂隙密度小于 $300\text{条}/9\text{cm}^2$, 且多呈网状、连通性好、矿物填充少。构造煤微裂隙密度虽然高, 但这类裂隙缝窄, 方向性差, 常被后生矿物充填, 因此渗透率低。当裂隙密度高于 $300\text{条}/9\text{cm}^2$ 时, 并非裂隙密度越高渗透率越好, 有时甚至呈现相反的变化趋势。

(3) 提出利用低场核磁共振谱定量识别煤的吸附孔、渗流孔和裂隙的新方法: ①在煤的核磁共振弛豫时间 T_2 谱中, T_2 为 $0.5\sim 2.5\text{ms}$ 、 $20\sim 50\text{ms}$ 和大于 100ms 的三个峰值段, 分别对应于煤的吸附孔、渗流孔和裂隙, T_2 谱峰越大, 孔裂隙越发育; ②煤的 T_2 谱一般具有多峰分布的特点, 反映了煤的孔隙结构更复杂, 孔隙类型更多; ③不同煤级煤的 T_2 谱显著不同, 高煤阶煤以吸附孔波峰凸显为典型特征。提出了煤的可动流体孔隙度计算的新方法: ①煤的孔隙度可根据 NMR 测试的横向弛豫时间截止值 T_2C 而划分出束缚水孔隙度和可动流体孔隙度; ②煤的 T_2C 较砂岩低, 一般都为 $2\sim 30\text{ms}$, 煤级越高 T_2C 值越低; ③当煤样的 T_2C 较低 (一般小于 10ms), 同时 T_2 谱中又不存在或存在很小的可动流体峰时, 此类煤一般以吸附孔发育为主, 渗透率很低。而当煤样的 T_2C 较高, 同时 T_2 谱中存在明显的可动流体峰, 渗透率一般较高。建立了基于可动流体孔隙度的渗透率计算模型: 发现煤的渗透率主要取决于可动流体孔隙度, 二者呈相关性极高的幂指数关系, 并据此建立了煤样的核磁共振渗透率的可动流体孔隙度计算模型, 该模型较常规油气储集岩中提出的 Coates 模型和 SDR 模型, 计算方法更简便, 结果更准确, 对煤的实用性更强。构建了核磁共振 T_2 谱划分孔径结构分布的新方法: 发现核磁共振 T_2 谱的弛豫时间分布与常规压汞方法测得的孔径分布具有良好的对应关系, 据此提出了采用核磁共振 T_2 谱构建孔径分布曲线的“离心- T_2C 法”, 该方法与常规方法相比, 不但简便易行, 精度较高, 而且对煤的免伤害物性测试实用性较强。

(4) 通过对沁南高煤阶煤层气田早期排采灰色关联分析及评价, 发现气井早期往往存在一个产气高峰, 该峰值大小和持续时间受控于水力压裂造缝规模和含气量。水力压裂缝的规模越大, 产气高峰持续的时间越长, 目的煤层的含气量越

① $1\text{D}=0.986923\times 10^{-12}\text{m}^2$

大,产气高峰的峰值也越大。煤储层的原始渗透率和含气量是影响气井整体产能的关键因素。原始渗透率越大,含气量越高,产气高峰过后的气井产能下降速度越缓慢,气井的稳定产能效果越好。煤储层原始渗透率较低是阻碍气井形成高产的不利因素。

第二,通过气体吸附实验和煤岩三轴应力实验,结合渗透率变化理论模型分析,得出煤岩吸附膨胀和有效应力对煤岩渗透性影响的实质是煤的孔裂隙受力作用变化,综合考虑基质、煤体、流体相互作用及煤层气排采过程中的渗透率正负效应,揭示了基质收缩和有效应力作用机制,厘定了有效应力和吸附膨胀效应双重作用对煤岩渗透性的综合影响。

(1) 通过气体吸附实验,发现霍州、长治和晋城中-高煤阶煤的基质膨胀规律:随着 CH_4 充注压力增大,煤样的线性膨胀量增大;垂直层面方向最大线性膨胀量大于平行层面方向,相差 $8.4\% \sim 8.7\%$;随煤阶增高,最大体积膨胀量增大;采用修正的 DR 模型可以对实验数据进行拟合。对于储层压力为 6.4MPa 、废弃压力为 1.4MPa 的晋城地区煤储层,降压解吸引起煤基质的体积收缩率为 1.5% ,孔隙度增大为原来的 1.5 倍,煤储层的渗透率则增大为原来的 3.375 倍。理论推导出煤岩基质收缩对孔隙度、渗透率的计算公式,根据理论公式,计算对比了高、中、低阶煤不同压力下基质收缩对孔隙度、渗透率的影响,结果表明,在压力一定的情况下,煤阶越高,基质收缩对煤岩孔隙度、渗透率的增加越大,理论计算结果与实验结果一致。

(2) 以三轴应力实验为基础,计算得到孔隙度和渗透率随有效应力变化的数学模型,为煤岩的应力敏感分析提供了理论依据。实验数据分析表明,煤岩的孔隙度、渗透率随应力的变化较大,有效应力对渗透率损害比对孔隙度损害更明显。提出了应用煤岩三轴应力实验资料计算煤岩孔隙度、渗透率的方法,建立了相应的数学计算模型,并对霍州、长治和晋城的煤岩三轴应力测试资料进行了分析,计算得到了三个地区煤岩孔隙度、渗透率随应力的变化关系。

(3) 通过三轴应力条件下煤岩的吸附-渗透性实验,考察了有效应力和吸附膨胀效应对煤渗透性的综合影响。结果表明:①煤岩渗透性和有效应力呈指数函数关系,随有效应力增加煤岩渗透率指数下降;②围限压力条件下,煤岩吸附甲烷后岩石力学性质增强;③实验时间内,晋城无烟煤吸附甲烷的径向应变随时间总体上呈线性增长,各孔隙压力下的最大径向应变与孔隙压力关系可以采用兰氏(Langmuir)方程描述;④煤渗透性和煤吸附变形关系符合指数函数关系,随煤岩吸附膨胀,渗透性呈指数下降。煤岩吸附膨胀和有效应力对煤岩渗透性影响的实质是煤的孔裂隙受力作用变化,即煤岩内部的孔裂隙受到力的作用逐渐减小或闭合。

(4) 在实验基础上,分别建立了煤储层裂缝应力敏感性模型和煤储层毛细管

应力敏感性模型,刻画了煤岩的弹性模量、裂缝产状、地应力分布等对渗透率应力敏感程度的影响。随着煤储层孔隙流体压力的降低,无因次渗透率 K/K_0 也随之降低。随着煤岩弹性模量的降低,敏感性程度越强,煤阶越高,弹性模量越大,对应力的敏感程度降低。排采早期应力敏感占主导地位,当地层压力降低到解吸压力后,渗透率开始反弹,并随地层压降幅度增大逐渐增强。

(5) 沁水煤层气田 3# 煤渗透率变化显示:①煤层压力下降到临界解吸压力 3.8MPa 前,煤层孔隙度、渗透率呈下降趋势,储层物性不断变差;②临界解吸压力由 3.8MPa 降至 2.5MPa 前,储层物性开始反弹,孔隙度、渗透率逐渐上升,但未恢复到储层原始状态;③压力继续下降,储层物性得到进一步改善,孔隙度、渗透率好于初始状态,当储层压力大到最大解吸压力时,孔隙度、渗透率达到最大值,其中孔隙度达到初始孔隙度的 1.357 倍,渗透率可以达到初始渗透率的 2.5 倍;④储层压力继续下降到最大解吸压力以后,煤的渗透率变化不大,并可能因应力作用再次出现降低趋势。

第三,依据煤层气解吸渗流理论,结合开发实践,将煤层气井生产过程划分为排水阶段、不稳定产气阶段、稳定产气阶段及衰减阶段等四个阶段,分析了煤层气排采诱导煤体动态应变和渗透率阶段变化特征,定量表征了不同储层压力条件下煤层气解吸量的差异及其对煤层气产出的贡献,揭示了煤储层渗透率阶段变化规律。

(1) 引进解吸效率概念,定义为单位压降煤层气的解吸量。以兰氏方程曲率表征解吸效率变化的快慢,依次反映缓慢增大、快速增大、快速减小、缓慢减小四个阶段,对应解吸效率为基本不变、缓慢增大、快速增大与急速增大四个阶段。在煤层气解吸曲线上存在 3 个阶段性转折点,分别将这些点定义为启动压力、转折压力与敏感压力。启动压力、转折压力与敏感压力对应的解吸效率分别约为 $0.55(\text{m}^3/\text{t})/\text{MPa}$ 、 $1.0(\text{m}^3/\text{t})/\text{MPa}$ 与 $2.50(\text{m}^3/\text{t})/\text{MPa}$,以此为分界点,将等温吸附/解吸特征划分低效解吸、缓慢解吸、快速解吸与敏感解吸 4 个阶段。

(2) 相渗曲线特征真实反映了煤层气井从单相水流到单相气流整个排采过程,而有效渗透率曲线又直观显示了排采过程中水相和气相的有效渗透率的变化特征。根据有效渗透率曲线特征,可以简便地将渗透率变化阶段划分为排水阶段(单相水流)、不稳定产气阶段(气水两相流)、稳定产气阶段(气相为主的气水两相流)和衰减阶段(单相气流)四个阶段。随着排采的进行,有效应力效应和基质收缩效应的综合作用导致煤储层绝对渗透率不断改变,同时煤层中气水饱和度分布不断改变,最终导致煤储层气水有效渗透率的动态变化。

(3) 定义了无因次产气率 $\eta_{\text{gd}} \in [0, 1]$,并据此对煤层气生产过程进行了阶段分割。①排水阶段:从排采开始到产气开始,此时间范围内只有水产出,区间范围为 $[0, \eta_1]$, η_1 对应的是此时的无因次产气率,对于不同生产井情况,排水阶段持续

时间不同,因此, η_1 对于每口生产井均不同; ②不稳定产气阶段: 该阶段气体开始产出,产气量也逐渐上升,而产水量开始呈下降趋势,对应的无因次产气率逐渐升高,对应的区间范围 $[\eta_1, \eta_2)$, 一般情况下无因次产气率 $\eta_2 > 0.5$; ③稳定产气阶段: 此阶段产气稳定在一个较高水平,而对应的日产水量也维持在一个较低水平,此后水产量可能会偶尔出现较大波动,但基本浮动在一个较低的水平,基本区间为 $[\eta_2, \eta_3]$; ④产气递减阶段: 该阶段中产气量开始呈递减趋势,而产水量依然很低,区间是 $[\eta_1, 1]$ 。

(4) 煤层气开发的“排水阶段—不稳定产气阶段—稳定产气阶段—衰减阶段”整个过程中煤储层气-水饱和度和气-水相对(有效)渗透率的变化反映出煤储层渗透率对产能的影响。煤储层开发过程中,有效应力效应和基质收缩效应的阶段性作用强度变化从根本上控制了煤储层渗透率变化阶段特征;煤储层的解吸特征控制了各阶段煤储层基质收缩效应的强度;煤储层渗流的相态构成为渗透率阶段划分提供了依据,也表征了与产能直接相关的气相有效渗透率的变化;煤储层产能动态过程反映了各阶段的产能特征,同时通过产能动态数据可以反算渗透率变化值,进而进行产能预测。

(5) 排采过程渗透率阶段变化规律。①排水阶段: 由于煤层甲烷未发生解吸,受应力作用的影响,储层渗透率在该阶段呈持续下降的趋势,储层物性受到破坏; ②不稳定产气阶段: 由于煤层甲烷开始解吸并产出,受应力作用及基质收缩效应双重因素的影响,相对于排水阶段,渗透率下降幅度逐渐减小或保持不变; ③稳定产气阶段: 此阶段主要考虑产水量相对于产气量非常少或基本不产水,该阶段由于应力作用效果的减弱,基质收缩效应增强,因此,此阶段煤层渗透率出现恢复的现象,若基质收缩效应足够大,随着气体的产出,储层渗透率会得到改善,优于初始渗透率; ④衰减阶段: 由于煤层气解吸、产出基本结束,基质收缩效应减弱或消失,由于煤层的少量水排出,使得煤层压力继续下降,有效应力作用重新产生主导影响,渗透率变化停滞或再次呈现下降趋势。渗透率变化的时序和强度与压实作用和基质收缩效应的强弱有关。压实作用越强,第一阶段持续时间越长,第二、三阶段发生时间越晚,若压实作用非常强,第三阶段有可能不发生,渗透率持续降低,基质收缩越强,第一阶段持续时间越短,第二、三阶段发生时间越早。

第四,根据渗流力学理论及煤层气藏物质平衡方程,构建了基于单井生产数据反求煤储层渗透率的方法,推导建立了考虑煤岩应力和煤岩基质收缩情况下煤岩渗透率随压力变化的关系式,开发了采用生产数据反求煤岩渗透率的计算软件,求取沁水、韩城的煤层气井储层渗透率变化数据,并对方法的实用性和可靠性进行了检验。

(1) 采用煤层气井井底压力和气水产量数据,反求煤储层渗透率: ①对于生产工作制度相对稳定的井、采用先求气井产能方程系数,再通过产能方程系数,计

算得到渗透率；②对于产量变化频繁的井，将生产过程看成一系列定产量生产的叠加，应用渗流力学理论推导出渗透率随产量变化的关系，从而计算得到相应的渗透率。

(2) 建立适合于煤层气藏的物质平衡方程，最终得到储层压力的变系数一元三次方程。该三次方程的系数为煤层属性、流体属性及煤层气水生产动态数据等参数的函数，反映储层平均压力变化与生产动态数据的关系，可通过盛金公式进行方程求解，得到储层压力的解析解，并实现利用生产数据反求储层参数。

(3) 通过实例应用，表明渗透率与煤层气井累积产水量之间存在较为密切的变系数三次多项式关系，这可应用于煤层气地面开发条件下的累积产水量对煤层气储层渗透率预测，指导煤层气排采工作制度的制定与调整。

第五，分析总结了煤层气井产能变化模式、递减方式及其控制因素，揭示了压力梯度驱动下的储层物性响应及流体运动规律，提出了平衡开发及保持合理地层压力的依据与方法，建立了考虑煤储层敏感性的连续流动气井产能方程，为科学预测排采过程煤储层诱导变化和采取有效稳产、增产措施提供了科学依据。

(1) 不同的煤层气井所处的构造位置、煤层厚度、孔隙度、渗透率、水文地质等条件不同，产气的模式亦不同。模式Ⅰ多为中、低产气井，稳产时间短，当产气量达到峰值后，很快开始递减，几乎没有稳产阶段，与煤储层渗透率低、供气面积小等因素有关，在递减阶段多表现为指数递减；模式Ⅱ多为中、高产气井，稳产时间长，这类井控制的煤储层一般有较高的渗透率，压降漏斗扩展范围大，供气面积大，递减曲线较平缓，多为调和递减，递减阶段基质收缩、渗透率反弹具有阶段性和多周期性，产气量也随之出现多周期性回升；模式Ⅲ多为中、高产井，煤储层裂缝比较发育，裂缝中游离气饱和度比较高，射孔后，随地层水一起排出，出现一个峰值，当游离气排出后，产气量开始下降。排水降压后，吸附气解吸，逐渐进入稳产期，多表现为调和递减，也常出现基质收缩，渗透率多周期性反弹，产气量出现多周期性回升；模式Ⅳ多属于低产井，煤层厚度一般较薄，孔隙度、渗透率低，不仅产气量低，而且产量波动大，受排采制度和水文地质条件的影响，产气量波动强，几乎不出现峰值产量，长期处于低产状态。

(2) 同一地区出现不同递减类型是因为递减受煤储层边界类型、煤层气吸附特性、煤层渗透率、解吸过程中渗透率的反弹、井间干扰、层间干扰和排采制度等因素影响。晋城、韩城矿区 100% 的低产井和 45% 的中产井的产量符合指数或复合递减类型，100% 的高产井和 55% 的中产井符合调和递减类型。高产井井区煤储层渗透率往往比低产井大。

(3) 通过建立渗透率与有效应力及孔隙流体压力模型，定量反映了渗透率随着孔隙流体压力降低（即有效应力增加）而降低的关系，揭示了煤层气排采过程渗透率降低的幅度差异对产量的影响。利用实验数据构建了考虑煤储层应力敏感性