

国家专项大型油气田及煤层气开发课题
山西省基金项目、国家863项目
国家973课题、国家自然科学基金项目

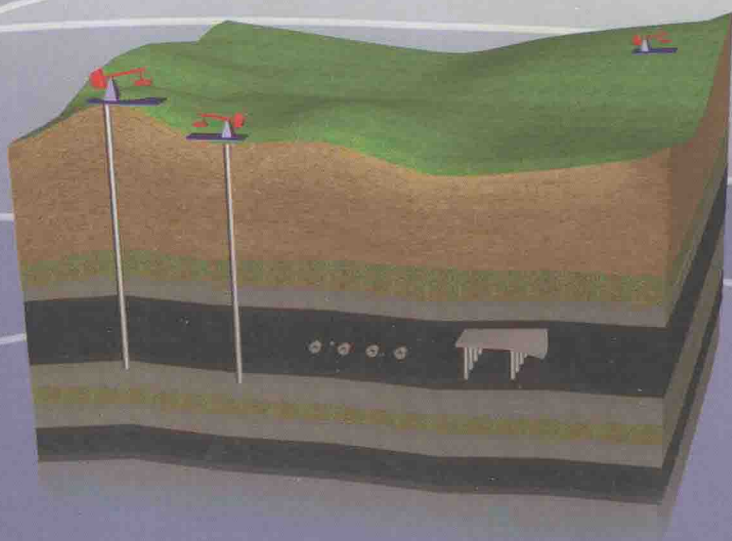
资助

煤储层

评价原理技术方法及应用

王生维 段连秀 张明 陈立超 周春梅 著

MEICHUCENG PINGJIA YUANLI
JISHU FANGFA JI YINGYONG



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

国家专项大型油气田及煤层气开发课题
山西省基金项目、国家863项目 资助
国家973课题、国家自然科学基金项目

煤储层评价原理 技术方法及应用

王生维 段连秀 张 明 陈立超 周春梅 著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

煤储层评价原理技术方法及应用/王生维,段连秀,张明,陈立超,周春梅著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2012.12

ISBN 978-7-5625-2978-1

I. ①煤…

II. ①王…②段…③张…④陈…⑤周…

III. ①煤田-综合评价-研究②煤层-地下气化煤气-资源开发-研究

IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 309595 号

煤储层评价原理技术方法及应用

王生维 段连秀 张明 陈立超 周春梅 著

责任编辑:段连秀

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:320 千字 印张:12.75

版次:2012 年 12 月第 1 版

印次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2978-1

定价:158.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

为适应我国煤层气产业快速发展之急需,以满足广大煤层气开发工作者的研究需要,笔者在总结沁水盆地和鄂尔多斯盆地等煤区的煤层气勘探开发研究成果的基础上,试图总结适合我国煤层气地质条件的煤储层评价原理与技术方法而出版本书。

本研究先后得到了国家专项大型油气田及煤层气开发“基于静态信息/排采历史耦合的煤储层分析与探测技术”课题(2011ZX05034-002)和“煤层气井生产过程中煤基质及气水相渗动态变化规律研究”课题(2008ZX05034-002);山西省基金项目“沁水盆地煤储层水力压裂裂缝延展控制因素研究”(2012012007);国家 863 项目“晋城煤层气探测与增产技术研究”(2006AA06Z232);国家 973 课题“煤储层物性控制机理及有利储层预测方法”(2002CB211702)和“地质动力、构造样式对深部煤层气赋存的控制作用”(2006CB202204);国家自然科学基金项目“晋城煤区煤储层大裂隙系统研究”(40672099)的资助。同时也得到了煤炭企业和煤层气勘探开发企业众多项目的资助。

杨健和刘伟在小微构造解剖方面做了大量开创性的研究工作,并参与了本专著有关章节的撰写。刘和平和晁巍巍在煤储层大裂隙系统整理方面做了大量研究工作,并参与了本专著有关章节的撰写。

先后参加本研究工作的研究生还有孙钦平、唐江林、张典坤、杨青雄、韩兵、刘旺博、孟欣、王宁、赵俊芳、陈文文、李瑞、胡奇、何俊铎、张业畅、张晨等。先后参加本研究工作的本科生共有 52 名。

感谢山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司所属技术研究院、通风处、寺河矿、成庄矿、赵庄矿、长平矿、寺河 2 号井、胡底矿;山西兰花煤炭实业集团有限责任公司

公司所属煤层气勘探开发公司、玉溪矿、大宁矿；山西沁和能源集团有限责任公司所属端氏矿；山西潞安矿业(集团)有限责任公司所属通风处、余吾矿、高河矿、五阳矿；山西焦煤西山煤电(集团)有限责任公司所属通风处、屯兰矿、马兰矿；山西阳泉煤业(集团)有限责任公司所属通风处、寺家山矿；中国中煤能源集团有限责任公司所属王家岭矿；山西焦煤霍州煤电(集团)有限责任公司所属安泽矿；神华集团有限责任公司所属神东分公司、通风处、布尔台矿、寸草塔矿；神华集团有限责任公司乌海能源分公司所属通风处、平沟矿；内蒙古伊泰煤炭股份有限公司所属通风部、酸刺沟矿等煤炭企业对本研究的鼎力支持。

山西蓝焰煤层气集团有限责任公司、中石油华北油田分公司煤层气勘探开发指挥部、钻采部、采研院、山西煤层气勘探开发分公司等煤层气开发企业给笔者的研究工作以无私的帮助。笔者在此一并表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限，如存在错误和不妥之处，敬请批评指正。

作 者

2012 年 11 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 煤储层评价在煤层(瓦斯)气开发中的重要性	(1)
第二节 中国高煤阶煤储层的特点及研究重点	(2)
第三节 本书的主要研究内容	(3)
第二章 煤储层的孔隙特征与分类	(6)
第一节 煤储层孔隙系统分类	(6)
第二节 煤储层孔隙测定方法	(8)
第三节 煤储层孔裂隙系统分类	(9)
第三章 煤储层大裂隙系统发育特征	(11)
第一节 煤储层大裂隙系统的概念及研究意义	(11)
第二节 沁水盆地南部煤储层实例解剖	(22)
第三节 沁水盆地西北缘煤储层实例解剖	(25)
第四节 鄂尔多斯盆地东北缘煤储层实例解剖	(36)
第四章 小微构造与煤储层大裂隙系统发育特征之间的关系	(49)
第一节 煤储层小微构造概念的产生及研究意义	(49)
第二节 小微褶曲构造背景下的煤储层大裂隙系统发育特征	(50)
第三节 小微正断层构造背景下的煤储层大裂隙系统发育特征	(57)
第四节 陷落柱构造附近的煤储层大裂隙系统发育特征	(63)
第五章 煤储层描述技术与评价参数	(65)
第一节 煤储层描述技术与煤储层评价的参数选择	(65)
第二节 沁水盆地南部 3 [#] 煤储层评价	(71)
第三节 晋城煤区 3 [#] 煤储层的分类评价总结	(94)
第六章 煤储层评价在煤层气开发中的应用	(95)
第一节 煤储层评价在沁水盆地煤层气开发中的应用	(95)
第二节 煤储层评价在西山煤区煤层气开发中的应用	(103)

第七章 煤储层评价在瓦斯防治中的应用	(110)
第一节 煤储层评价在预测煤层瓦斯突出危险区方面的应用.....	(110)
第二节 煤储层评价在煤层瓦斯抽放中的应用.....	(111)
第三节 煤储层评价在地面水平井成井地质条件评价中的应用.....	(113)
第四节 煤储层评价在水平井科学部署方面的应用.....	(116)
第五节 煤储层评价在矿井上下联合抽采方面的应用.....	(118)
第八章 煤储层及气藏探测技术简介	(126)
第一节 煤储层大裂隙的现场观测技术.....	(126)
第二节 煤储层裂缝连通探测示踪技术.....	(130)
第三节 地震映像技术检测压裂裂隙范围的技术与实例.....	(132)
第四节 煤储层大裂隙系统的测井识别技术.....	(135)
第五节 煤储层大裂隙系统的压裂曲线识别技术.....	(141)
第六节 构造、裂缝行迹地面观测填图技术	(146)
第七节 增加煤层瓦斯钻孔孔壁稳定性若干技术.....	(151)
第八节 煤层瓦斯压力快速探测技术.....	(154)
第九节 超低频电磁探测煤层含气性技术简介.....	(165)
第十节 小微构造与伴生大裂隙系统描述技术.....	(167)
第九章 构造应力场分析在煤储层分类预测中的应用	(173)
第一节 构造应力场与煤储层小微构造形态之间的关系.....	(173)
第二节 构造应力场分析在煤储层分类预测中的应用.....	(183)
参考文献	(195)

第一章 绪 论

第一节 煤储层评价在煤层(瓦斯)气开发中的重要性

始于 20 世纪 80 年代的中国煤层气勘探,经历了 20 多年的不断探索,21 世纪初进入煤层气产业初始发展阶段,目前已进入快速发展阶段。按照国家能源局 2011 年颁布的煤层气产业“十二五”规划,到 2015 年末中国地面煤层气的产量将达到 $160 \times 10^8 \text{ m}^3$,矿井煤层瓦斯抽放量将达到 $140 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。依据最新的煤层气开发利用战略研究成果,预期在 2020 年左右中国的煤层气总产量将达到年产 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水平,其中地面煤层气产量将达到年产 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$,矿井煤层瓦斯抽放量将达到 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。之后,中国的煤层气产业将进入稳定的缓慢增长阶段。

中国煤层气资源丰富,富含煤层气的沉积盆地众多,低、中、高煤阶均蕴藏有丰富的煤层气资源。依据目前煤层气产能建设重点煤区的开发趋势看,近期是以高煤阶煤层气为主。

煤层气产出的基本原理是通过排水而采气,整个煤层气所有工程技术均围绕实现“排水采气”这个目标服务。大量的煤层气开发工程实践证明,研究煤储层中的裂缝通道对于提高煤层气产能具有重要意义。

就煤层气产出通道而言,我国煤层气主要富集区块的煤储层特征是:低煤阶煤储层的孔隙异常发育,煤储层内部的通道一般比较畅通,反映出煤储层的渗透率比较高,煤层气开发区内渗透性的变化比较小;随着煤阶增高,煤储层的孔隙度呈降低一再升高趋势,非均质性增加,裂缝性特征显现,特别是高煤阶无烟煤的裂缝性特征更加突出和典型。

中国现有的煤层气产能主要集中在沁水盆地南部无烟煤区,现有的煤层气开发井已经超过 6 800 口,而且在今后一段时期内,煤层气产能建设的重点仍然集中在山西沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘高煤阶区块,预计到 2015 年煤层气开发井将超过 15 000 口。

然而,由于尚未确立得到普遍认可有效的裂缝性高煤阶储层的研究方法与评价技术体系,给沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘高煤阶区块煤层气开发及产能建设带来了一定的困扰,甚至是潜在的风险。其主要体现在以下两方面:

(1) 由于对高煤阶煤储层裂缝系统研究的重要性认识不足,仍然依赖现有非常有限而不完整的煤层气勘探成果来部署煤层气的开发方案。

(2) 缺乏对煤层气产出主要通道的地质规律的深入认识,更谈不上建立企业技术规范来满足大规模开发不同类型煤层气藏的急需。

煤层气开发必须对煤层气藏有比较深入的认识,换句话说,必须对煤储层以及内部的流体特征有比较深入的认识,包括含气性、渗透性、工程属性特点、类似煤区的开发经验与教训等。

以往的开发经验已证明对煤储层含气性及其变化的认识在开发实践中比较容易掌握;但是对于认识煤储层非均质性导致的渗透性以及工程属性特点变化的特征却很难,需要多方面的知识及资料积累,研究的时间也比较长。

高煤阶煤储层属于典型的裂缝型储层,与碳酸盐岩不同的是,其内部特征非常复杂,但具有区块范围能辨识的特点。晋城煤区的煤层气开发实践证实,煤储层的裂缝系统、渗透性以及工程属性特征具有能够准确认识和把握的特点。遗憾的是这一关键新技术的广泛应用尚未引起主要决策层的高度重视,还尚未构成部署煤层气开发方案的必备研究内容。

作者在沁水盆地煤层气开发多年研究实践的基础上,对裂缝性高煤阶煤储层的研究方法及评价技术体系进行了初步总结,并将在更大的范围推广,以促进煤层气产业的健康快速发展。

第二节 中国高煤阶煤储层的特点及研究重点

在 20 年的高煤阶煤层气勘探开发实践中,作者逐步体会到了中国高煤阶煤储层的裂缝系统、渗透性及工程属性特征对煤层气勘探开发的重要性。

高煤阶煤储层的裂缝系统、渗透性及工程属性特征是:经历了多阶段的变质作用;区域岩浆热变质影响最深;后期构造简单;原始煤层气含量比较高;特别是埋藏浅煤区,由于保存条件不同,造成目前的含气量差异显著。由于煤特殊的机械岩石力学性质,导致高煤阶煤储层具有裂缝型储层的特点,认识这种裂缝型储层特点对于高煤阶煤层气藏的开发具有十分重要的意义,具体表现在以下几个方面:

(1)煤储层内部普遍存在一种大裂隙系统。这种特有的大裂隙系统具有天然的规律性,表现为主要由构造节理、气胀节理和内生裂隙组成的肉眼可见裂隙系统,并且各种级别的裂隙在特定构造环境下,明显地受到较高一级小微构造的控制。

(2)煤储层大裂隙系统对煤层气井渗透性具有控制作用。已有的 6 800 多口煤层气开发井的生产数据表明:高煤阶煤储层的渗透性变化很大,相似渗透率相邻井数量不超过 5 口,其原因是由高煤阶煤储层的大裂隙系统的发育导致的。高煤阶煤储层的大裂隙系统是煤储层与古地应力相互作用的产物,此外,煤储层渗透性还与现今地应力的作用关系密切。

(3)煤体结构不仅影响含气性与渗透性,也深刻影响着工程属性和工程措施的效果。与开发常规天然气不同的是,煤储层大裂隙系统对直(水平)井开发的钻井、完井、压裂、排采等工程措施的效果也具有明显制约作用。例如,煤体的破碎程度直接决定水平井的井眼稳定性,同样也决定煤层气直井的压裂施工效果。

(4)由于煤储层大裂隙系统不仅对煤储层岩石物理性质以及开发工程产生重要影响,同样它也间接控制煤层的含气量,从而对煤层气井产能产生重要的影响。大量的产能数据统计表明,高煤阶煤储层的煤层气生产井具有小井组(5~10 口)内部不均一性强的特点,类似产能的相邻煤层气井数量不超过 5 口,但是区块内(几十到几百口煤层气井)的产能大致处于几个相近的量级;不同区块之间比较,每个区块内部又具有相对一致性。但是区块之间差别是很大的。

值得指出的是,煤储层中广泛存在的小微构造在已有的煤田勘探(包括提交建井高级储量的精细勘探)报告中大部分尚未查清,而大裂隙系统则更属于未知的范畴。在高煤阶煤储层的

煤层气勘探开发的实践中,随着煤层气开发井密度增加以及煤储层非均质性在各方面的突出表现,逐步体会到了传统描述煤储层的方法技术不能满足煤层气生产的基本需求。因此,不少煤层气开发公司开始增加二维地震勘探来揭露煤层中的小微构造。相对于煤层气开发的现实需要,煤层气产业对大裂隙系统的研究成果的重视程度还远远不够,其中缺乏科学有效的研究方法技术体系是最主要的原因之一。

经过多年来煤层气勘探开发的探索,特别是晋城煤层气开发与煤层瓦斯抽放一体化的大量工程实践经验积累,煤层气压裂井的长期追踪观测、煤层气开发井的追踪开挖解剖,超过 20km^2 的工作面连续回采观测解剖,以及不同煤区 30 多个矿井的大裂隙系统的观测解剖,对这种天然裂缝系统取得了一定的研究结果。在作者倡导大规模开展煤储层大裂隙系统研究与应用的同时,产业单位,特别是油气公司提出了煤矿距离煤层气井较远,能否有效指导未知区以及由于埋藏深度不同造成的差异如何解决等疑问。通过反复研究和生产实践证实,作者认为,开展大裂隙系统解剖研究是解决当前煤层气开发诸多困惑的切实可行的技术途径。特别是研究高煤阶煤储层内裂缝系统的技术方法日渐成熟,客观上具备了将高煤阶煤储层评价研究成果以及技术方法结集成书的基本条件。

依据沁水盆地南部无烟煤储层解剖实例的经验及为煤层气开发公司提供高煤阶煤储层评价研究的成果,作者体会到:在煤层气开发过程中,除了提供煤储层的天然大裂缝系统的基本地质特征研究以外,还要提供煤储层有关工程属性方面的认识。这里的工程属性特指一些具体生产井的工程属性,如钻井、压裂和排采过程中与煤储层之间的作用等。只有这种深入揭示煤储层地质与工程属性的储层评价,才能有效指导工程技术的合理运用,合理解决煤储层地质与工程措施之间的适配性问题,达到预期目标。因此,本书将煤储层有关的工程属性作为研究讨论的重点内容。

已有的开发研究实践证实,煤储层工程属性(钻、压、采)必须而且有条件进行研究。这一点是常规油气所不具备而特别有利的客观条件。研究煤储层特点与工程技术措施之间的适配性,是有效指导高煤阶煤层气开发的关键技术路线。对生产井诸多存在的问题很有必要进行评价,这无疑对于新区的煤层气开发方案的科学制定具有重要的指导意义。

我国待开发的高煤阶煤层气区块还比较多,而且在近期仍然占有很大比重。因此,在我国煤层气产能建设的“十二五”关键时期,作者将过去多年积累的经验与体会结集成书,提出高煤阶煤储层评价研究的基本思路与方法,试图为促进我国煤层气的成功开发贡献微薄之力。

第三节 本书的主要研究内容

煤储层评价包括动态与静态两个主要方面。这些年作者一直在实践中尝试寻找一些煤储层动态评价的有效方法和途径,但效果不够理想。其原因可能是:①煤储层的动态变化太微小,很难被发现或系统记录。②由于高煤阶煤层气藏的特殊性,例如含气饱和度和低,多数气藏为特低压残留气藏,加上气体的吸附特性,所以产生的流体原始体积与骨架之比很微小。③难以用常规油气的数字模拟等技术得到比较认可的结果。

有趣的是,在长期观测研究实践中,作者发现了高煤阶煤储层内部对煤储层静态评价有着决定性影响的一系列特征,其中最重要的是,煤储层内部的小微构造,以及与之密切伴生的大

裂隙系统。它们不仅对煤储层的渗透率有着决定性的影响,而且对煤层气关键成藏期的封闭保存也起着至关重要的作用;同时也是控制煤层气井成井的关键地质要素,对煤储层的压裂以至于排采均有不可小视的影响。

基于煤层气藏与常规油气藏存在的巨大差别,特别是煤储层中小微构造及与之伴生的大裂隙系统对煤层气开发的重要作用,本书将研究的重点放在煤储层的静态评价方面。与常规天然气开发不同,加强煤储层静态评价是解决煤层气开发关键技术难题的优先发展方向。

煤储层评价的前提条件是,对若干评价参数进行定量或者半定量的采集,包括外生节理的高度、密度、空间形态、裂缝宽度、充填物特征;气胀节理与内生裂隙的高度、密度、裂缝宽度、充填物特征、裂隙空隙度;煤系围岩露头节理层外生节理之间关系对比、及外生节理的分期配套、古应力场分析;高精度二维地震解释小微构造、小微构造与伴生大裂隙系统发育特征之间的关系解析;煤层气井测井、压裂曲线与煤层软分层、大裂隙系统之间的关系;外生节理的高度与围岩关系、裂缝充填物特征;气胀节理与内生裂隙的裂缝充填物特征;软分层厚度与内部特征、一定规模的密集裂隙破碎带、原始煤粉富集特征;等等。在此基础上对煤层气产出通道的煤储层大裂隙系统发育特征以及渗透性,煤层气藏的含气性以及煤储层的工程属性进行评价,从而为地面煤层气开发与煤矿区煤层气规模开发(包括地面井煤层气开发、矿井煤层水力压裂、矿井煤层瓦斯抽放及两者的有机衔接)提供理论依据。

由于煤储层岩石学特征的复杂性,为了让读者能更准确地理解本书所阐述的内容,例如煤储层岩石类型、孔隙系统,特别是涉及煤储层裂隙系统等内容的确切含义,本书首先将有关概念术语进行阐述。同时尽可能使用图件及实物照片来限定其物理意义。除了对部分已有概念术语在本书的诠释外,作者还把在实践中比较适用的一些概念术语引入,并对新增加的概念术语做了自己的诠释。或许这些概念术语不一定合适,敬请读者批评指正。

煤储层孔隙是煤储层评价的最重要方面。煤储层是由孔隙、裂隙组成的双重结构系统,煤中的基质孔隙是吸附态和游离态煤层气的主要储集场所。为了本书的理论体系完善,作者将煤储层孔隙系统单独列出一章进行阐述,强调的重点是对于煤层气产出有重要影响的与井筒能够发生联系的那一部分有效孔隙。

煤储层的裂隙系统是本书研究的重点,特别是与煤层气成藏、产出通道以及开发工程属性密切相关的煤储层大裂隙系统发育特征。在研究煤储层渗透性的过程中,发现规模达到断开煤层的断层以及微小的孔隙并不是煤层气产出的主要通道,而外生节理、气胀节理、内生裂隙、微裂隙所组成的裂隙系统正是煤层气产出的主要通道,因此将其定义为煤储层大裂隙系统,并且在系统解剖晋城3#煤储层的基础上,给出了模式图。为了进一步检验煤储层大裂隙系统发育是否具有普遍性,是否是煤层气产出的主要通道等关键地质问题,作者又展开了沁水盆地大部,如阳泉、西山、和顺、鄂尔多斯盆地的韩城、柳林、保德、准格尔、大柳塔,以及内蒙霍林河等地的煤储层大裂隙系统解剖,结果发现煤储层大裂隙系统在上述广大地区不同煤阶煤储层中普遍发育,并且同样是控制煤层气产出的主要通道。因此,本书详细地介绍了不同煤阶的煤储层大裂隙系统的发育特征、成因、研究意义及其控制因素。

矿井条件下所发现的煤储层大裂隙系统发育规律对地面煤层气勘探开发的指导意义一直是油气勘探技术人员质疑的焦点。为了验证煤储层大裂隙系统发育规律对地面煤层气勘探开发的指导作用,作者通过多年不同煤区的生产实践检验认为,在同一地质条件下,仅有埋藏深度不同的区块,矿井条件下所发现的煤储层大裂隙系统发育规律,对地面煤层气勘探开发具有

无可替代的预测功能。这一点,华北油田的生产实践已经给出了明确的答案,越来越多的煤层气产业工作者认识到了矿井煤储层解剖研究的重要性。

尽管煤储层大裂隙系统的研究成果逐步被同行广泛认同,但是由于其研究条件比较苛刻,首先要具有矿井综采工作面,其次是研究技术难度大,周期长,远远满足不了地面煤层气勘探开发的迫切需要。有没有一种途径能够解决这个难题呢?近些年的实践发现,煤储层的小微构造与大裂隙系统发育特征之间存在着比较稳定的关系,作者称之为伴生关系。而小微构造可以通过二维地震技术、地面特大比例尺填图、密集的煤层气井等一系列技术手段相对容易发现和描述。换句话说,抓住了小微构造这个关键环节,揭示小微构造与大裂隙系统发育特征之间存在的内在关系,就有可能扩大煤储层大裂隙系统研究成果的应用价值。本书以晋城煤储层的解剖研究成果为例进行了比较详细的阐述。

煤储层小微构造——节理,为构造应力场的确定提供了重要信息。根据节理的成因联系、不同期次节理之间的交切关系,以及同期节理的运动学特征,确定不同期次构造变形及其各期节理所对应的主应力方向,进而确定各相应期次的构造应力场。本书以晋城成庄煤矿为例,从确定主应力方向的基本原则与方法、不同期次节理的时空分布规律、节理内摩擦角分布特征与古构造应力场特征等方面进行了较为系统的总结。构造应力场模拟的思路是根据地质历史时期构造作用所留下的构造形迹,恢复或反演古构造应力作用方式、方向、大小、边界条件及其介质所处环境、力学性质在内的构造作用过程。在对古构造应力场数值模拟分析中,关键问题是地质建模时如何考虑边界条件的应力量值大小和应力加载顺序,同时必须保证数值模拟体与地质原型间满足相似性原理。

为了推动煤储层评价在煤层气开发中的应用,本书对众多煤储层参数描述与测定的一些适用技术加以集中阐述。其中少数是比较成熟的技术或者国家标准,而多数是我们在实践中遴选出的一些适用技术,这些技术包括:煤储层大裂隙的现场观测技术;煤基岩块孔隙度测定技术;煤储层内生裂隙孔隙度统计技术与孔隙度测定技术;煤坚固性系数测定技术;高精度地震技术;小微构造与煤储层大裂隙系统关系解剖技术;煤储层裂缝连通探测示踪技术;煤层气压裂井开挖观测技术;煤储层大裂隙系统的测井识别技术;地应力与有裂缝井的压裂关系以及煤储层大裂隙系统压裂曲线识别技术;构造、裂缝行迹地面观测填图技术;煤层瓦斯钻孔内窥技术;增加煤层瓦斯钻孔孔壁稳定性若干技术;煤层瓦斯压力快速探测技术;超低频电磁探测煤层含气量技术;含气量测定技术;等温吸附线的测定;渗透率测定技术。

煤储层评价的原理认识以及技术的形成,来源于沁水盆地的地面煤层气开发与煤矿区煤层气规模开发(包括地面井煤层气开发、矿井煤层瓦斯抽放以及两者的有机衔接)的大量实践。本书所阐述的煤储层评价的原理认识及技术的应用也在地面煤层气开发与煤矿区煤层气规模开发两个主要方面。需要指出的是,煤储层评价的一些基本原理在地面煤层气勘探开发方面已经得到了很好的应用,煤储层评价将会在煤层瓦斯抽放方面发挥更大的作用。由于篇幅和主题所限,有关这方面的研究将另著述。

煤储层小微构造及大裂隙系统研究与煤储层评价是为了满足煤层气产业需求,满足煤矿安全生产煤层瓦斯抽放需求推动的产物,同时丰富了煤层气地质学、瓦斯抽放地质学的内容,也是学科发展的必然。

随着煤层气产业的发展及煤层瓦斯抽放需求多样性的增加,煤层气勘探开发与煤层瓦斯抽放实践中遇到的煤储层问题会更多、更复杂,这也是推动本学科进一步发展的内在动力。

第二章 煤储层的孔隙特征与分类

煤储层是由孔隙、裂隙组成的双重结构系统(Tremain & Whitehead, 1990; Kulander & Dean, 1993; Laubach & Marrett, 1998; 张慧, 2001)。煤中的基质孔隙是吸附态和游离态煤层气的主要储集场所, 吸附能力与煤的孔隙发育程度和孔隙结构特征有关。据测定, 煤的孔内表面积最高可达 $425\text{m}^2/\text{g}$, 煤基质孔隙孔径小, 数量多, 是孔内表面积的主要贡献者, 为煤层气的储集提供了充足的空间。这些基质块内部吸附态气体与游离态气体处于非平衡状态; 微孔隙系统中气体迁移的性质是扩散, 又可分为拟稳态和非稳态两类; 开采前微孔隙与大孔隙中的气体处于平衡状态(King & Ertekin, 1989)。

第一节 煤储层孔隙系统分类

煤孔隙的研究包括孔隙大小、形态、结构、类型、孔隙度、孔容、比表面积及孔隙的分形特征。在目前技术条件下, 多采用普通显微镜、扫描电镜(SEM)、压汞法及低温氮吸附法来研究煤的孔隙特征。孔隙的分类因其研究方法手段和应用不同而有别。霍多特 B. B. (1966) 曾经按尺度将煤孔隙划分为大孔(孔径 $> 1\,000\text{nm}$)、中孔(孔径 $100 \sim 1\,000\text{nm}$)、小孔(孔径 $10 \sim 100\text{nm}$)、微孔(孔径 $< 10\text{nm}$)。

在沁水盆地, 煤孔隙分布总体特征是: 微孔-过渡孔($0 \sim 200\text{nm}$)发育, 占孔隙的 80% 以上, 而大孔和中孔(孔径 $> 200\text{nm}$)不发育。在鄂尔多斯盆地东缘, 煤储层孔隙以小孔、微孔含量为主, 尤以小孔含量占优, 其孔隙体积百分含量为 26.06%~66.78%, 均值为 48.75%, 微孔含量变化为 14.89%~39.39%, 平均为 27.47%; 大孔次之, 介于 5.56%~44.24%, 均值为 16.43%; 中孔最弱, 变化于 2.35%~32.98%, 平均为 7.33%。

Gan 等(1972)按孔隙成因将孔隙分为分子间孔、煤植体孔、热成因孔和裂隙孔。郝琦(1987)划分的成因类型为植物组织孔、气孔、粒间孔、晶间孔、铸模孔、溶蚀孔等。张慧(2001)以煤岩显微组分和煤的变质、变形特征为基础, 以大量的扫描电镜观察结果为依据, 按成因特征将煤的孔隙分为原生孔、变质孔、外生孔及矿物质孔等四大类十小类(表 2-1)。

扫描电镜下, 沁水盆地高煤阶煤储层的主要孔隙类型有原生孔、变质孔及外生孔。其中原生孔主要有胞腔孔和屑间孔; 变质孔主要有气孔等, 气孔在所有样品中发育最为普遍, 气孔是煤变质作用过程中有生气和聚气作用而形成的孔隙; 外生孔有角砾孔和碎粒孔等, 它们均是由于煤受构造压力破坏而形成的孔隙。孔隙的成因类型及发育特征是煤储层生气储气和渗透性能力的直接反映。

陈萍等(2001)研究了煤孔隙的形态分类。桑树勋(2004)等分别探讨了煤中固气作用类型分类。傅雪海等(2005)对煤孔隙进行了分形及自然分类(表 2-2)。煤孔隙成因类型多, 形态

复杂,大小不等,各类孔隙都是在微区发育或微区连通,它们借助于裂隙而参与煤层气的渗流系统。

表 2-1 煤孔隙类型及成因

类 型		成 因 简 述
原生孔	胞腔孔	成煤植物本身所具有的细胞结构孔
	屑间孔	镜屑体、惰屑体和壳屑体等碎屑状颗粒之间的孔隙
变质孔	链间孔	凝胶化物质在变质作用下缩聚而形成的链之间的孔隙
	气孔	煤变质过程中由生气和聚气作用而形成的孔隙
外生孔	角砾孔	煤受构造应力破坏而形成的角砾之间的孔隙
	碎粒孔	煤受构造应力破坏而形成的碎粒之间的孔隙
	磨擦孔	压应力作用下面与面之间因磨擦而形成的孔隙
矿物质孔	铸模孔	煤中矿物质在有机质中因硬度差异而铸成的印坑
	溶蚀孔	可溶性矿物在长期气、水作用下受溶蚀而形成的孔
	晶间孔	矿物晶粒之间的孔

(据张慧,2001)

表 2-2 煤岩孔隙分类表

分类方案	研究者	级 别								
孔径结构分类		微 孔		小孔(或过渡孔)		中 孔		大 孔		
	Ходот(1961)	<10		10~100		100~1 000		>1 000		
	Gan 等(1972)	<1.2				1.2~30		>30		
	国际理论应用化学联合会(1972)	<0.8(亚微孔)		0.8~2(微孔)		2~50		>50		
成因分类	Gan 等(1972)	分子间孔		煤植体孔		热成因孔		裂缝孔		
	张慧(2001)	原生孔		变质孔		外生孔		矿物质孔		
	郝琦(1987)	植物组织孔	气 孔		粒间孔		晶间孔		铸模孔	溶蚀孔
孔隙形态分类	陈萍等 (2001)	Ⅰ类孔 (两端开口圆筒形孔及 四边开放的平行板状孔)			Ⅱ类孔 (一端封闭的圆筒形孔、平行 板状孔、楔形孔和锥形孔)			Ⅲ类孔 (细颈瓶形孔)		
固气作用 类型分类	张红日	吸附孔(<50)				渗流孔(>50)				
	桑树勋等 (2004)	吸收孔隙 (<2)		吸附孔隙 (2~10)		凝聚吸附孔隙 (10~100)		渗流孔隙 (>100)		
分形分类及 自然分类	傅雪海、秦勇等 (2005)	扩散(半径)				渗流(半径)				
		微 孔 <8 表面扩散	过渡孔 8~20 混合扩散	小 孔 20~65 Kundsen 扩 散	中 孔 65~325 稳定层流	过渡孔 325~1 000 剧烈层流	大 孔 >1 000 紊流			

注:分类未标明者均为直径,单位为 nm。

第二节 煤储层孔隙测定方法

研究表明,采用压汞法可定量得到孔半径大于 3.75nm 以上范围内有关孔隙大小、孔隙分布、孔隙类型等孔隙分布参数信息;用液氮法可测到更小孔径孔隙。通常采用压汞法及低温液氮法进行分析研究。

一、压汞法孔隙参数

压汞法的基本原理是毛细管现象,汞对煤无湿润能力,只有在外力作用下,汞才能进入煤的孔隙之中。同时,在压力和汞所能进入的孔隙大小之间存在着固定关系。因此,根据压汞实验过程中的压力和进汞量,可以计算出孔隙的半径和相应的孔隙体积。根据毛细管束模型,汞进入孔隙时所克服的毛细管阻力为:

$$\pi r^2 P_{(r)} = -2\pi r \sigma \cos\theta \quad (2-1)$$

式中: r 为孔隙半径($\text{\AA}$);

θ 为汞对煤的湿润边缘角,一般可取平均值为 140° ;

σ 为汞的表面张力, $4.8 \times 10^{-3} \text{ N/cm} = 4.8 \times 10^{-11} \text{ N/\AA}$;

$P_{(r)}$ 为进汞压力(MPa)。

负号表示进汞压力与毛细管阻力的方向相反。

将各项参数值代入上式后可得:

$$r = \frac{2 \times 4.8 \times 0.766}{P_{(r)}} = \frac{7.350}{P_{(r)}} \quad (2-2)$$

汞的压力越大,汞能进入的孔隙直径越小。

样品测试采用 Micromeritics Proesizer 9310 压汞仪,试样尺寸为 $11\text{mm} \times 11\text{mm}$,汞压力由小到大逐渐增大,在某一压力 $P_{(r)}$ 下,已注入的水银体积就是煤样中半径大于 r 的孔隙的总体积。

通过压汞法实测沁水盆地煤的孔隙度范围为 $0.90\% \sim 10.90\%$,平均 3.35% ,总体较低。仅就孔隙度而言,沁水盆地储层孔隙度发育状况对煤层气产出不理想。

压汞测试的其他参数,包括喉直径均值(μm)、排驱压力(MPa)、退汞效率(%)、分选系数(μm)及均质系数。喉直径均值变化范围为 $0.01 \sim 0.56 \mu\text{m}$,平均值为 $0.071 \mu\text{m}$ 。鄂尔多斯盆地中低煤阶煤孔隙系统喉直径均值变化范围为 $5.92 \sim 14.69 \mu\text{m}$,显然沁水盆地高煤阶煤储层的孔喉均值比鄂尔多斯盆地中低煤阶煤孔隙系统喉直径均值低 2~3 个数量级,体现了高煤阶煤孔隙系统以微孔-过渡孔为主的明显特征。排驱压力的变化范围为 $0.99 \sim 11.55 \text{ MPa}$,排驱压力由小到大的变化表明,孔隙系统中大中孔含量减少,而过渡孔含量增加。排驱压力越小,表明孔隙结构越有利。退汞效率的变化范围为 $45.46\% \sim 79.52\%$,平均值为 61.47% ,而鄂尔多斯盆地中低煤储层孔隙系统的退汞效率绝大多数在 80% 以上,部分样品在 90% 以上,这表明沁水盆地煤储层由于变质程度的明显升高导致了退汞效率的明显降低。一般退汞效率越高,表明孔隙系统的渗透性能越好,所以沁水盆地高煤阶煤储层孔隙系统总体偏低的退汞效率表明,其渗透性能变差。

二、低温氮等温吸附法孔隙参数

煤储层比表面积及孔径分布利用低温氮吸附仪(ASAP2000 型)测定,孔径测试范围在 1.7~300nm,采用 SY/6154-1995 标准。其测试原理是:多孔岩石及其表面分子存在剩余的表面自由场,气体分子碰到固体表面时,部分气体分子被吸附于固体表面且释放出吸附热。在温度和压力恒定的情况下,气体在固体表面达到吸附平衡,吸附量是相对压力(平衡压力 P 与饱和蒸汽压力 P_0 的比值)的函数。测得不同的相对压力下的吸附量即可绘出吸附曲线。根据得到的吸附等温线,按兰格缪尔方程计算出比表面积,再利用 BJH 法计算孔径分布。

第三节 煤储层孔裂隙系统分类

煤的裂隙和孔隙共同构成了煤层气在煤储层内的赋存空间和运移通道。王生维等(1997)从煤层气产出特征分析的需要出发,广泛地研究了煤储层孔隙、裂隙的特征后,提出了适用于煤储层岩石物理研究和煤层气产出特征分析的煤储层孔隙、裂隙分类与命名方案(表 2-3)。

表 2-3 煤储层孔隙、裂隙系统划分及术语表

类 型	孔 隙、裂隙名称		尺 度	分布位置
孔 隙	植物细胞残留孔隙		几微米—零点几毫米	煤基岩块内
	基质孔隙			
	次生孔隙(气孔)			
裂 隙	微裂隙		几毫米—几厘米	煤岩分层内
	大裂隙	内生裂隙(割理)		
		节理(外生节理、 气胀节理)	零点几米—几十米	整个煤储层

沁水盆地煤储层显微裂隙比较发育,而北部又比中部和南部发育。显微裂隙是沟通孔隙与宏观裂隙的桥梁,其发育程度影响储层的渗透性能(图 2-1)。

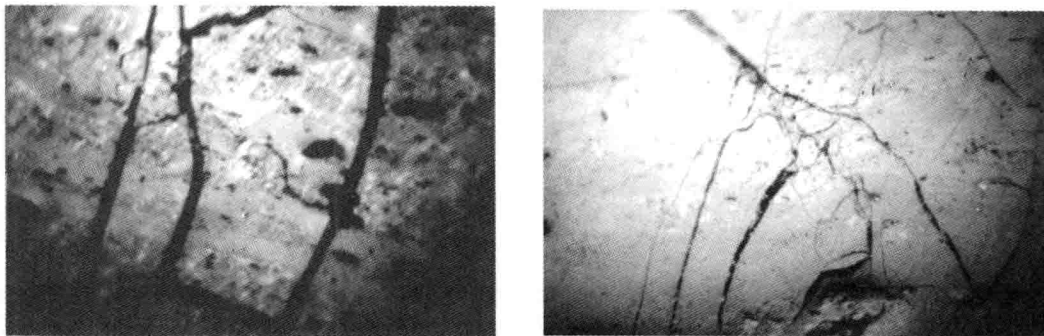


图 2-1 沁水盆地高煤阶煤储层微裂隙镜下特征(500×)

在显微镜下识别的微裂隙按照其延展性和开放性,可从实用角度划分为 A、B、C、D 四类(表 2-4)。

表 2-4 煤储层微裂隙实用分类简表

微裂隙类型	微裂隙特征
A 类	宽度 $>5\mu\text{m}$,且长度 $>10\text{mm}$
B 类	宽度 $\geq 5\mu\text{m}$, $10\text{mm}\geq$ 长度 $>1\text{mm}$,且连续较长
C 类	宽度 $<5\mu\text{m}$,且 $1\text{mm}\geq$ 长度 $>300\mu\text{m}$,有时时断时续延伸
D 类	宽度 $<5\mu\text{m}$,长度 $<300\mu\text{m}$,且延伸较短

鄂尔多斯盆地东缘煤储层显微裂隙 A 类裂隙少见;B 类裂隙约占 0~46.7%,裂隙密度大多小于 5 条/ 9cm^2 ,以柳林密度为高,多大于 5 条/ 9cm^2 ;C 类裂隙约占 7.9%~60.7%,平均 33%,裂隙密度部分小于 10 条/ 9cm^2 ,多数在 10~30 条/ 9cm^2 之间,其中以澄合及蒲县较高;D 类裂隙约占 13.5%~90.7%,平均 60.0%,裂隙密度多小于 30 条/ 9cm^2 ,蒲县、河曲火山村裂隙密度较高,多处在 50~100 条/ 9cm^2 之间,韩城桑树坪裂隙密度较低。

本书采用的煤储层孔隙、裂隙系统分类不属于完美的分类,而是一个充分考虑煤层气产出通道的实用分类,它在满足本研究理论体系的同时,也充分考虑了各大煤层气开发公司现有的煤储层以及相关研究资料。此外,本分类将有效孔隙与大裂隙作为一个整体,也为杜绝矿井现场观测研究与实验室分析脱节现象,加强矿井现场观测研究与实验室分析两者之间的紧密联系,从理论体系分析到煤储层评价、指导钻井、压裂以及排采提供了一揽子解决方案。对于指导煤层的钻井、增产压裂以及合理排采比较实用。