

中国地质大学出版社

煤储层岩石物理研究 与煤层气勘探选区

——以华北若干煤区为例

王生维 陈钟惠 张明 段连秀 庄小丽 张素新 著

前 言

本书作者在参加国家“八五”煤层气攻关项目期间和其后,在我国东部系统地开展了煤储层岩石物理研究,先后参与了十多个煤层气选区的评价工作,积累了较丰富的资料和一定的经验。几年来,从煤储层的孔隙、裂隙系统研究入手,逐步开发出了依托矿井人工煤储层露头进行煤储层岩石物理和煤层气藏研究的具自身特色的技术方法体系。由于我国煤矿星罗棋布,许多矿山开采已达相当深度,因此利用矿井人工煤储层露头是完全可能的。实践业已证明,这套技术方法不仅可在选区阶段避免盲目性,减少不必要的钻井工作量,而且可使煤储层岩石物理研究不受勘探井的限制,取得更多的有用信息,促进气藏封闭特征、煤储层可改造性、煤层气可采性和煤层气富集与高产影响因素的分析和预测。

煤储层具有集生气和储气为一体的特点。煤层气藏既不同于固体矿产煤层,也不同于常规油气藏。它的形成、演化乃至破坏受诸多因素的制约并有其自身的规律。为了顺利开展煤层气的选区、勘探和开发,促进我国煤层气事业的发展,加强基础理论研究,建立煤层气藏形成与演化的理论体系已是当务之急。本书作者几年来在这方面进行了积极的探索,努力将煤储层岩石物理研究从早期主要着眼于含气量和渗透率等扩展到目前重视对煤层气藏封闭特征及其内、外部因素的相互作用和制约,也就是把煤层气藏放在从煤层气开始生成直至今日的地质历史长河中进行研究,同时也探讨人工改造煤储层的前景。本书中将这些思路归纳成为初步的理论框架,并以图 and 简要文字叙述予以说明。尽管由于许多实际资料属于生产、科研单位合作项目的成果,目前尚不宜公开发表,但读者仍不难从本书的简要叙述和有关图件中对这一理论框架的基本思路和内涵有所了解。鉴于煤层气研究在国内起步不久,又具有极大的难度,我们的工作成果肯定只是初步的,希望通过本书的出版,与世界同行进行交流,同时也是对我们自己继续前进的一种鞭策。

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 煤层气勘探研究区概况	(1)
第二节 研究思路与方法技术	(1)
第三节 获得的主要认识与成果	(6)
第二章 研究区煤层气地质特征	(11)
第一节 淮南区	(11)
第二节 太行山东麓煤区	(16)
第三节 鄂尔多斯盆地东缘	(20)
第三章 煤储层岩石物理特征	(29)
第一节 煤储层发育的一般特征	(29)
第二节 煤储层的孔隙、裂隙系统发育特征	(45)
第三节 煤层气的解吸特征	(53)
第四节 煤储层的渗透性	(56)
第五节 含气饱和度	(57)
第四章 煤层气藏的封闭特征与煤储层可改造性分析	(58)
第一节 煤层气藏的封闭特征	(58)
第二节 煤储层的可改造性	(62)
第五章 煤层气可采性综合评价及有利区块的选择	(64)
第一节 各煤区的含气性特征	(64)
第二节 煤层气可采性各评价参数的意义	(64)
第三节 各煤区煤层气可采性综合评价	(67)
第六章 煤层气藏富集与高产影响因素分析	(69)
第一节 概述	(69)
第二节 煤相对煤层气藏富集与高产的影响	(70)
第三节 煤级与煤变质作用类型对煤层气藏富集与高产的影响	(71)
第四节 水文条件对煤层气藏富集与高产的影响	(72)
第五节 构造对煤层气藏富集与高产的影响	(72)
第六节 围岩岩性及厚度对煤层气藏富集与高产的影响	(73)
第七章 主要结论	(75)
第一节 煤储层岩石物理研究的理论框架和方法技术	(75)
第二节 煤储层岩石物理特征及煤层气勘探选区	(76)
参考文献	(78)
英文摘要	(79)
致谢	(82)

CONTENTS

Chapter One	Survey	(1)
Section One	The survey of the research districts of coalbed methane (CBM) exploratory	(1)
Section Two	The basic thinking and technique	(1)
Section Three	The acquired primary knowledge and results	(6)
Chapter Two	The CBM geologic characteristics of the research districts	(11)
Section One	The research district of Huainan	(11)
Section Two	The east side of Taihang Mountain	(16)
Section Three	The east edge of Ordos Basin	(20)
Chapter Three	The petrophysical characteristics of coal reservoirs	(29)
Section One	The general characteristics of coal reservoirs	(29)
Section Two	The developed characteristics of the pore—fracture system of coal reservoirs	(45)
Section Three	The desorption characteristics of CBM	(53)
Section Four	The permeability of coal reservoirs	(56)
Section Five	The gas saturation	(57)
Chapter Four	The seal characteristics of coal reservoirs and the analysis of coal reservoirs stimulation	(58)
Section one	The seal characteristics of coal reservoirs	(58)
Section Two	The stimulation properties of coal reservoirs	(62)
Chapter Five	The synthetical evaluation of CBM extractability and the selection of favorable districts	(64)
Section One	The gas content characteristics of each district	(64)
Section Two	The significances of every evaluation parameter of CBM extracta bility	(64)
Section Three	The synthetical evaluation of CBM extractability of each district	(67)
Chapter Six	The influential factors analysis of the concentration and high production of CBM pool	(69)
Section One	Survey	(69)
Section Two	The coal faces impact on the concentration and high production of CBM pool	(70)
Section Three	The coal rank and its type of coal metamorphism impact on the concentration and high production of CBM pool	(71)
Section Four	The hydrologic condition impact on the concentration and high production of CBM pool	(72)

Section Five	The structure impact on the concentration and high production of CBM pool	(72)
Section Six	The surrounding rock characteristics and its thickness impact on the concentration and high production of CBM pool	(73)
Chapter Seven	Principal conclusion	(75)
Section One	The primary theory and techniques of the petrophysical study of coal reservoirs	(75)
Section Two	The properties of coal reservoirs petrophysics of the three districts and selecting exploring areas of CBM	(76)
References		(78)
English Abstract		(79)
Acknowledgements		(82)

第一章 概述

第一节 煤层气勘探研究区概况

80年代美国煤层气工业的迅速发展促进了世界各国对煤层气的研究。在我国煤层气的研究开发也已全面展开。“八五”期间,国家组织实施了“煤层气勘探开发评价选区及工程工艺技术研究(85-102-11)”课题。1990年以来,在地质矿产部、石油天然气总公司和煤炭工业部等各部门各单位的支持下,笔者先后对华北十多个煤区进行了不同程度的煤层气勘探选区及研究,这些煤区主要分布在北京、天津、唐山、沁水南部、河南平顶山、淮北、淮南、太行山东麓和鄂尔多斯盆地东缘等地,各煤区的煤层气孔施工情况及分布见图 1-1。

从图 1-1 中不难看出,有 30 多个煤层气孔集中在淮南、太行山东麓和鄂尔多斯盆地东缘,占现有煤层气孔的 $1/4 \sim 1/3$ 。本研究选择淮南、太行山东麓和鄂尔多斯盆地东缘进行重点解剖与总结,以期得出煤层气藏形成、发育和保存的基本规律。

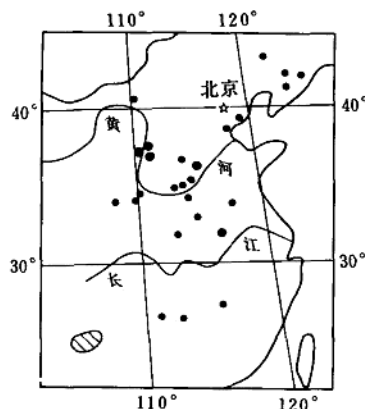


图 1-1 各煤区煤层气孔分布图
Fig. 1-1 Show the districts had been explored by drilling CBM wells

第二节 研究思路与方法技术

对于淮南、太行山东麓和鄂尔多斯盆地东缘煤储层岩石物理研究和勘探选区的总体思路为:通过观察和解剖煤储层及相邻围岩人工露头,分析煤储层的物质组成,孔隙、裂隙系统的发育特征,渗透性和可改造性,煤层气的解吸特征,以及煤层气藏的封闭特征与含气饱和度。综合评价煤层气藏类型及其可采性,进而分析影响煤层气藏富集与高产的主要地质因素。

在煤层气勘探选区中,煤层气可采性评价必然涉及到煤层气藏分析。煤层气藏的发育形成与保存受到外部封闭条件和内部煤生气及煤储层特征这两大因素的制约。煤相、煤级与煤变质作用类型控制了煤层气的生成和储集层的发育;而外部条件则对煤层气藏的封闭与保存起至关重要的作用。外部封闭条件主要包括:煤储层邻近围岩的岩性及厚度、构造条件及与围岩和构造条件相伴的水文地质条件。

煤层气藏的发育与形成过程必然在煤储层或邻近围岩中留下种种痕迹,而煤层气藏的破坏也会在煤储层及邻近围岩中残留种种地质痕迹,并伴随有比较明显的封闭条件变化。本研究正是通过识别煤储层及邻近围岩中能反映煤层气藏形成与变化的各种有效标志,并结合宏观地质条件分析,揭示煤层气藏形成、破坏及与外部封闭条件相互作用的特点,弄清煤层气藏的发育特征,评价煤层气的可采性,确定煤层气勘探的有利区块及勘探重点。

煤层气可采性评价的流程见图 1-2,其具体内容如下。

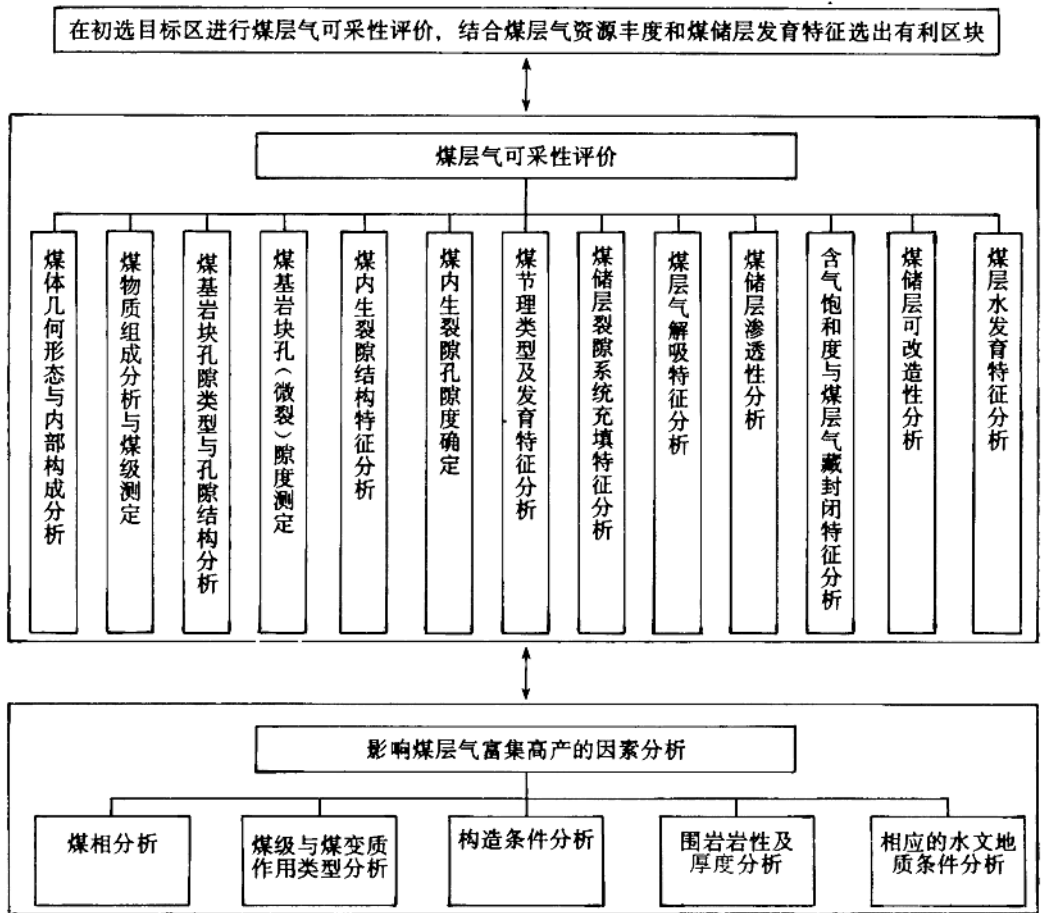


图 1-2 煤层气可采性评价流程框图

Fig. 1-2 The frame chart of the evaluation of CBM extractability

一、煤储层的物质组成和孔隙、裂隙系统发育特征分析

煤储层不同于常规砂岩和碳酸盐岩储层(表 1-1)，它是集烃源岩和储集层为一体的特殊储层，因此煤储层的物质组成研究既是煤层气藏分析和煤层气可采性评价的基础，又是煤层气藏封闭类型和煤层气富集与高产特征分析的前提。此外，由于煤的物质组成是煤储层中孔隙、裂隙系统发育的载体，影响到煤中节理的发育特征和煤的机械力学性质，而煤中矿物质是压裂设计中必须考虑的有效保护煤储层免受污染的重要方面，因此，煤的物质组成研究是煤储层岩石物理分析和煤层气藏分析的基础，详细的煤岩学分析尤为必要。

煤是一种多孔隙的物质，前人对煤中孔隙、裂隙的划分与命名有多种方案。笔者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，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新的分类与命名方案(见表 1-2)。煤中的孔隙、裂隙系统既是煤层气储存的场所，也是煤层气产出的重要通道。以往的研究证明：煤的比表面比无机岩石的大许多，而且微米级以下的孔隙所占的比表面较大。换句话说，大部分煤层气是储存于微米级以下的孔隙中和吸附在煤的内表面上。从煤层气储存角度考虑，直径在微米级以下的孔隙应

表 1-1 煤储层与砂岩和碳酸盐岩储层特征对比

Table 1-1 The characteristics of coal reservoirs contrast with that of sandstone and carbonate reservoirs

	砂岩储层	碳酸盐岩储层	煤储层
各向异性	均一性好,规律性好	均一性差,规律性取决于碳酸盐岩类型	极不均一,但有规律
孔隙度	大	小—大	极小—中等
孔隙、裂隙类型	粒间孔隙、杂基微孔隙、矿物解理缝、纹理及层理缝、溶蚀孔隙、裂缝等	原生孔隙、溶蚀孔隙、生物钻孔和潜穴孔隙、收缩孔隙、裂缝等	植物细胞残留孔隙、基质孔隙、次生孔隙、微裂隙、内生裂隙和节理等
主要孔隙组合类型	粒间孔隙型	孔隙—裂隙型或裂隙型	孔隙—裂隙型
喉道类型	颈状、片状、弯曲状和管状喉道	管状、片状及孔隙缩小形成的喉道	针管网状小颗粒间收缩喉道
喉道弯曲度	小	变化大	小—极大
渗透性	好	差—好	极差—较好
孔隙度与渗透性的关系	相关性较好	— 相关性差	具相关性,可预测
采用的强化工艺措施	容易	要有针对性	更要注意针对性
主要地质控制因素	沉积	沉积、构造、生物	煤相、煤级与煤变质作用(类型)、构造作用、地下流体充填和围岩岩性等

表 1-2 煤储层孔隙、裂隙系统划分及术语表

Table 1-2 The classification and terminology of the pore—fracture system of coal reservoirs

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

是研究的重点;但从煤层气产出角度考虑,微米级以上的孔隙、裂隙系统更为重要。由于煤层气的扩散速度可达到渗流速度的 2 个数量级水平,所以本方案重点考虑微米级以上的孔隙与裂隙系统的分类与命名。

煤储层孔隙、裂隙系统分析既是煤层气藏分析和煤层气可采性评价的核心内容之一,又是煤储层渗透性分析和可改造性评价的基础,也是评价与预测煤层气解吸特征,煤层气藏封闭类型和含气饱和度研究的重要方面。因此,只有较好地查清煤储层原有大裂隙系统的发育特征和煤层气藏的封闭类型,才能做出好的压裂设计,收到好的压裂增产效果。

煤储层孔隙、裂隙系统分析的主要内容包括:孔隙与裂隙类型分析、孔隙结构分析、裂隙空间展布与配置分析、内生裂隙孔隙度测定与计算、煤基岩块孔(微裂)隙度测定、裂隙充填物及充填机制分析等。完成上述研究的理想样品采自矿井下新鲜的煤储层露头,这是钻孔岩芯所不能完全取代的。科学合理地获取各类样品及设置相宜的室内分析也是非常重要的。

二、煤层气的解吸特征分析

煤层气的解吸特征是煤层气可采性评价的一个重要参数,它包括煤层气的解吸率和解吸速度。所谓解吸率是指煤层气中逸散气和解吸气之和与总含气量之比。控制煤层气解吸率的关键因素是煤基岩块的大小和基岩块内孔隙与微裂隙发育程度。煤基岩块小,其解吸率高,解吸速度快,煤基岩块内广泛发育的微裂隙对提高煤层气的解吸率和解吸速度均十分有益。不同类型的孔隙所起的作用不尽相同,保存较好的植物细胞残留孔隙使有效孔隙率增高,有益于煤层气的解吸;基质孔隙的有效孔隙通常很低,孔隙结构差,不利于煤层气的解吸;次生孔隙对煤层气解吸特征的影响比较复杂:一种情形是次生孔隙的适度发育在提高煤基岩块总孔隙度的同时,也增加了相当比例的有效孔隙,这有益于提高煤层气的解吸率;另一种情形是煤储层遭受岩浆侵入热接触变质作用,形成天然焦或半天然焦,煤基岩块的总孔(微裂)隙度显著增加,煤储层中的气孔十分发育,但含气量很低,煤孔隙结构严重恶化,其解吸率也低。

综合研究煤层气解吸速度和解吸率,以及煤基岩块的大小和内部孔(微裂)隙的发育特征得出:高煤级的无烟煤和贫煤的解吸率通常低,解吸速度慢;矿物质含量高和以基质孔隙为主的煤,其煤层气解吸速度慢;煤基岩块内植物细胞残留孔隙和微裂隙发育的中煤级煤,不仅解吸速度快,而且解吸率高。

三、煤储层渗透性分析

煤储层的渗透率常用注入压降法实测获得,在实验室内用煤标本测得的渗透率称为标本渗透率。基于本研究的主要任务是煤层气勘探选区的评价,在没有特别指出时,均为绝对渗透率,而并非指相渗透率。

煤储层的渗透率主要由其中的裂隙提供。渗透率的大小取决于裂隙系统的发育程度,而裂隙系统在某种程度上又受到地应力作用的影响。以往的研究表明,就浅埋(小于1000m)的煤储层而言,地应力作用主要影响节理缝的张开-闭合程度。在地应力作用较强的某些煤区,地应力对比较发育的内生裂隙缝的张开-闭合程度也有明显影响。在我国已进行煤层气勘探的大部分煤区,还没有发现地应力对煤基岩块中孔(微裂)隙的张开-闭合程度有影响的实例。

煤储层的渗透率可用不同的方法在煤层气井中实测,此外也可用比较分析法做出十分近似的预测,特别是在既有部分煤层气井实测渗透率资料(华北几个主要煤区均有这方面资料),又有可能进行煤储层裂隙系统分析对比的煤区,比较分析法可以获得较好的效果。煤储层渗透性分析与预测的关键是要查清储层中大裂隙的类型、规模及发育密度、空间配置方式,以及大裂隙网络与煤基岩块内骨干微裂隙、大孔隙的连接状况。

四、煤层气藏封闭特征与含气饱和度分析

煤层气藏的封闭方式与常规天然气藏的封闭方式不同,煤层气主要以吸附状态储存于煤储层中。它有两种基本的封闭类型:一种是由于煤储层内部岩石组成和孔隙结构的不均一性形成的自封闭,即煤储层自身对煤层气进行封闭;另一种是由于围岩或它与相应的水力学条件共同组成的封闭,这在本质上与常规天然气藏封闭是相同的。上述两种基本的封闭类型可以组合成多种形式的复合封闭类型,而大多数煤层气藏都属于复合封闭类型。与常规天然气藏封闭相类似,煤层气藏的封闭也有一级封闭、二级封闭和三级封闭之分。所谓一级封闭是指煤系上下相邻围岩及相应的水文地质条件对煤系中各个煤层气藏的封闭;二级封闭是指特定煤层的间

接围岩和相应的水力学条件所构成的封闭；三级封闭是煤层直接顶底板围岩对煤层气藏的封闭。对于一个煤区而言，往往是一个一级封闭条件下有多个二三级封闭，换句话说，一个一级封闭可封闭多个煤层气藏，一个二级封闭可封闭两个或两个以上的煤层气藏，而一个三级封闭仅封闭一个煤层气藏。上述三级封闭往往是相互作用并共同对一个或若干煤层气藏形成封闭。

含气饱和度是指某一深度煤层的实际含气量与在该深度对应的压力下在相应的等温吸附曲线上确定的理论含气量之比(图 1-3)。含气饱和度 $S_g > 1$ ，为过饱和， $S_g = 1$ ，为饱和， $S_g < 1$ ，为欠饱和。利用含气饱和度的值就可直观地了解煤层气藏中的压力状态。

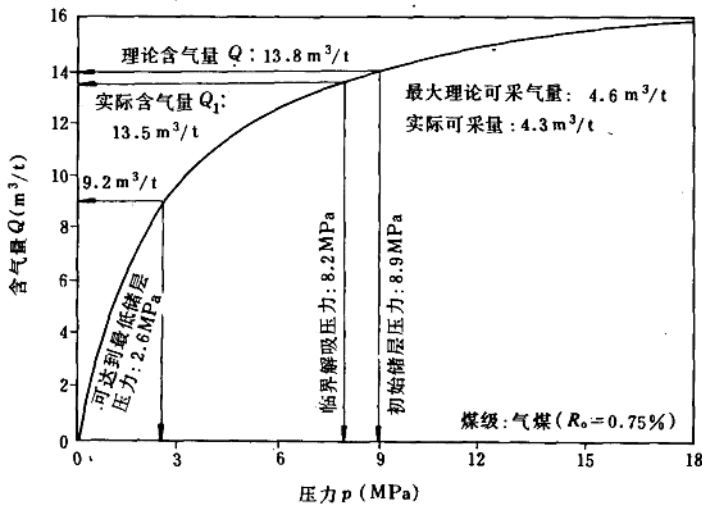


图 1-3 压力 (p) 与含气量 (Q) 关系图

Fig. 1-3 Show the relationship between the pressure and CBM contents
(据 Close *et al.*, 1989)

自封闭作用对煤层气藏封闭保存的能力极强，它可以在构造条件复杂的高煤级煤(如无烟煤)中保存相当数量的煤层气。但是以自封闭为主的煤层气藏通常含气饱和度低、煤层气解吸率低、解吸速度慢、煤储层可改造性和煤层气的可采性均很差。以围岩或它与相应的水力学条件组成的煤层气藏封闭，其含气饱和度可有较大幅度的变化。若在煤层气藏初始形成之后，水力学体系长期处于相对稳定状态，煤层气藏可有较高的含气饱和度；若煤层气藏形成后出现过大的构造活动，特别是强烈的断裂构造活动，以及相应水力学体系的重大改变，煤层气藏就可能遭到破坏，煤层气就可能解吸与逸散，最终导致其含气饱和度很低。因此，在煤层气大量生成之后，构造及相应的水力学体系是否稳定就成为决定煤层气藏含气饱和度大小的关键。通过煤层气藏封闭条件的分析，可以确定煤层气藏欠饱和的地质原因。

五、煤储层可改造性评价

煤储层可改造性评价主要涉及两个方面：一是改造后的煤储层渗透率可提高到什么水平？二是增产效果如何？改造煤储层的最终目的是大幅度提高煤层气的产量。就煤层气增产而言，除考虑有效提高煤储层渗透率外，还必须考虑煤层气藏的封闭类型及含气饱和度。

要提高煤储层的渗透率，必须通过人工压裂在煤储层中产生人造裂隙，其效果不仅取决于煤的机械力学性质及其与围岩机械力学性质之间的差异，而且还取决于煤储层的埋深、原地应

力的大小和煤储层中原有大裂隙的发育程度。值得强调的是,煤储层中原有大裂隙对人造裂隙的形成与延展起着决定性的作用,因为压裂液最容易沿原有破裂面流动,因此煤储层原有大裂隙系统的分析是做好压裂设计必不可少的。此外,还必须考虑压裂操作所能打通裂隙通道的级别和规模,以及煤层气藏的封闭类型。以自封闭为主的煤层气藏,压裂后的增产效果差。压裂操作应主要集中于煤层气藏含气饱和度高且以它封闭为主的煤层气藏,打开或疏通主干大通道,压裂实践证明其效果良好。

六、煤层气藏形成的地质条件分析

一个发育良好的煤层气藏的形成必须具备良好的生气和有效的封闭这两个地质条件。由于煤层既是生气烃源岩,又是煤层气的储集层,煤层气的生成与储集封闭同时进行,所以必须同时考察煤层气生成或煤层气藏封闭时的热动力学特点,注意研究煤层气生成与煤成气藏封闭条件及煤储层固体本身的相互作用过程及特点。煤层气生成条件主要包括煤相和煤级。外部封闭条件主要为围岩岩性、厚度、构造条件及相应的水文地质条件。煤层气成藏的热动力学主要包括煤物质组成、煤级、煤变质作用类型,以及外部封闭条件之间的相互作用。其中最重要的是煤级和煤变质作用类型,这里的煤级主要是指一次变质作用所能增高的煤级,而对于叠加变质作用,则是指叠加变质作用所增加的煤级。煤级与煤层气的生成总量关系密切,而煤变质作用类型则主要是与热流值大小和煤变质时的温度、压力有关,它反映了煤层气的生成速率,也间接反映出煤层气藏形成时的热力学特点。

煤层气藏形成的外部条件主要影响煤层气藏的封闭,而煤层气藏形成的内部条件则主要决定煤储层岩石物理的诸方面。不同的外部条件间接地影响着煤储层岩石物理性质(如煤储层的孔隙、裂隙系统发育特征和渗透性等),也影响到煤层气藏的封闭类型及含气饱和度。相反,不同的煤层气生成热力学条件对外部封闭条件的要求也不同。总之,解剖各种煤层气藏典型,分析作用于煤层气藏形成与保存过程中各种内部、外部地质条件,找出导致煤层气藏发育不良或破坏的关键地质因素,概括出具有富集与高产特征的煤层气藏所必备的各种地质条件是本研究的重要思路之一。

七、煤层气可采性评价和煤层气勘探选区及开发

煤层气可采性评价是确定煤层气勘探选区的重要基础,要做好煤层气可采性评价,不仅要考虑煤储层岩石物理性质、煤层气藏的封闭与含气饱和度、煤储层的可改造性,而且要考虑煤层气的资源丰度和形成煤层气藏的各种地质条件在空间上是否具有稳定性。煤层气勘探选区及开发是建立在对煤层气藏全面分析研究的基础上的,所以煤层气勘探有利区块的选择不仅要考虑上述煤层气可采性评价的内容,而且要考虑其他外部因素(如经济、地理因素等)。

第三节 获得的主要认识与成果

一、煤储层的孔隙、裂隙系统发育特征

1. 淮南区

淮南煤区煤基岩块的孔隙以基质孔隙为主,植物细胞残留孔隙欠发育,微裂隙尚不发育。煤基岩块孔(微裂)隙度变化幅度大,大致为两种情况:一是无外力作用形成的碎裂煤中的孔

(微裂)隙度较低、孔隙结构差;二是碎裂煤中的孔(微裂)隙度较高。内生裂隙尚不发育,表现为裂隙的载体比例小、分布零星,内生裂隙线密度低、张开度小,孔隙度低、孔隙结构差、充填现象普遍。外生节理的发育不均匀,主要集中于断层附近的背斜倾伏端,节理面上多有擦痕,部分节理缝被充填。

淮南煤区煤储层孔隙、裂隙系统的总体特征为:孔隙与内生裂隙不发育,而外生节理局部发育;孔隙与裂隙之间、外生节理与内生裂隙之间缺乏有效连接;孔隙与裂隙的结构差,不利于煤层气的产出。此外,在下石盒子组各煤储层中B组煤略优于C组煤,而A组煤比B组煤和C组煤的孔裂隙系统发育;在B组煤内部,下部煤层比上部煤层的孔隙、裂隙系统发育稍好。

2. 太行山东麓煤区

本区主要煤储层为山西组二₁煤,该煤储层孔隙裂隙系统的发育程度主要与煤级和煤变质作用类型有关。在肥焦煤至无烟煤的各煤级中,焦煤的孔隙、裂隙系统较为发育,其主要表现为:煤基岩块中微裂隙极发育,孔(微裂)隙度较高,特别是有效孔隙率较高;内生裂隙不论是在镜煤中还是在亮煤中都比较发育,且张开度大、孔隙度较高;外生节理在大部分中煤级煤中也发育。在贫煤和无烟煤中,煤基岩块中的植物残留孔隙不发育,孔隙结构恶化;内生裂隙不发育,裂隙张开度明显减少、孔隙度低;外生节理也欠发育。与上述由区域岩浆热叠加变质作用形成的煤的孔裂隙发育特征相比,侵入接触变质作用形成的变质带内煤储层中次生气孔极为发育,且大部为孤立孔,虽然使煤基岩块的孔(微裂)隙度明显增加,但有效孔隙率较低;而植物细胞残留孔隙和微裂隙则极为少见,内生裂隙不发育,但发育密集的小断层。这些大裂隙中常见有方解石等充填物。

3. 鄂尔多斯盆地东缘煤区

本区煤储层主要为山西组(具简单结构的中厚煤层)和太原组(具复杂结构的厚—巨厚煤层)。煤储层的孔隙、裂隙系统主要受煤级的控制,其次也受煤岩成分的控制。从山西北部到渭北近南北向的条带中,中部柳林—三交至乡宁一带的焦煤中煤储层的孔隙、裂隙系统最为发育;北部低煤级煤区和南部中高煤级煤区(贫煤)煤储层的孔隙、裂隙系统的发育程度都不及中部地区。

在中部焦煤中煤储层的孔隙、裂隙系统发育良好,煤基岩块小,煤基岩块中除发育植物细胞残留孔隙外,还发育微裂隙和次生气孔孔隙,其孔裂隙度较高,且有效孔隙率高,孔隙结构好;内生裂隙不论是在镜煤还是在亮煤分层中都广泛发育,内生裂隙张开度大,孔隙度高,两组极发育的内生裂隙几乎覆盖了煤岩组成的一半以上,内生裂隙缝的绝大部分未被充填。

本区外生节理不发育,仅发育成因、产状与内生裂隙相似、规模与外生节理相近的气胀节理。就鄂尔多斯盆地东缘同一地点的山西组煤与太原组煤相比,前者的孔隙、裂隙系统明显优于后者。

二、煤层气的解吸特征

淮南煤区不同煤储层中煤层气解吸特征虽略有差异,但其共同特征是解吸速度慢。在煤级和含气量大致相同的情况下,淮南的煤层气平均解吸速度仅为太行山东麓煤的 $1/3 \sim 1/2$,在三个煤区中最低。

太行山东麓不同煤级的煤层气解吸速度差别很大,解吸率差异也十分明显,其中焦煤的解吸速度最快,解吸率也高;而无烟煤的解吸速度慢,解吸率也最低。

鄂尔多斯盆地东缘煤的煤层气不仅解吸速度快,逸散气比例高,而且解吸率也是最高的,

其解吸速度在 3 个煤区中也是最快的,尤以中部的焦瘦煤最为典型。

三、煤储层的渗透性

淮南煤区下石盒子组煤储层的渗透率比较低,仅有 $4 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 。这与其内生裂隙和微裂隙系统尚不发育、外生节理受地应力作用影响张开度小有密切关系。

太行山东麓二₁煤储层的渗透率变化比较大,为 $1.5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2$ 。本区煤储层的渗透率受地应力释放与否的影响较大,如高渗区主要处于地下采煤引起的地应力明显释放和煤储层内大裂隙系统明显扩张的部分残留区块。高煤级的煤储层和煤的灰分产率较高的煤储层中渗透率最低;中煤级、中灰分的煤储层中渗透率为 $4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 。

鄂尔多斯盆地东缘山西组和太原组煤储层的渗透率普遍较高,特别是中部和南部的中—中高煤级煤区,渗透率一般为 $2 \times 10^{-3} \sim 18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;而北部低煤级煤区,虽没有实测的煤层气井渗透率资料,但从煤储层孔隙、裂隙系统发育特征分析,其渗透率在 $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 以下。本区煤储层的高渗区均为煤层气藏发育和保存良好的地区,其孔隙、裂隙系统极为发育。就山西组煤与太原组煤的渗透率相比,山西组煤的渗透率普遍高于太原组煤。

四、煤层气藏的封闭特征与含气饱和度

淮南区煤层气藏外部封闭的条件差,其封闭特征以自封闭为主。在构造抬升剥蚀至下沉积埋藏这一漫长地质历史时期,原有煤层气藏遭到严重破坏,外部封闭条件几乎丧失,致使原有煤层气藏的大量煤层气解吸逸散。在煤系再次沉降埋藏之后至今,未发生煤的二次叠加变质作用,在原有煤层气藏中没有新的煤层气生成。加之,煤系与第三系之间的不整合面距下石盒子组煤储层较近,煤储层之上有效围岩的厚度比较薄,而第三、第四系较厚的松散沉积物也不能有效地封堵煤层气的逸散。因此,本区煤层气藏的含气饱和度仅有 0.4 左右或更低,严重欠饱和。

太行山东麓煤层气藏的封闭主要受断裂与裂隙发育特征控制。本区北东向台阶状正断层在张性构造应力作用下均成为破坏煤层气藏封闭的主要通道,在浅部和有岩浆侵入接触变质作用的区块,其张性裂隙极为发育,成为破坏煤层气藏的主要构造。此外,本区大部分地区在二₁煤储层之上无重要的含水层(或由于采掘而遭破坏),水文条件总体上不利于煤层气的封闭。因此,太行山东麓二₁煤层气藏的含气饱和度差别很大(为 0.1~0.6)。含气饱和度低的小区块,一是断层密集或近断层的部位;二是岩浆侵入热接触变质作用导致的热致裂隙发育区;三是受地下人工采动影响的区块。本区煤层气藏保存特征是解吸的不均一性,并主要反应在含气量的明显变化上,在上述低饱和度区其含气量明显减少。

鄂尔多斯盆地东缘煤层气藏的封闭特征受构造、水文地质条件和煤级的控制明显。在构造复杂区,煤层气藏的封闭被破坏,其含气饱和度低,残留气藏主要是以自封闭方式保存,复杂的构造常破坏了原来十分有利的水文地质封闭条件。在没有叠加变质作用的低煤级煤区,煤层气藏发育不良,含气饱和度低,自封闭作用十分明显;在有叠加变质作用、构造稳定和有承压水条件的中煤级煤区,煤层气藏的一、二、三级封闭良好,含气饱和度高,部分地段的煤层气藏呈过饱和状态。由于煤储层内部孔隙、裂隙系统发育,所以这类气藏为它封闭气藏。

五、煤储层的可改造性

淮南煤区煤储层的内生裂隙与微裂隙不发育,外生节理分布不均,并主要与相应的高级别

构造关系密切。孔隙、裂隙系统内各种裂隙之间缺乏有效连接,既使产生几条人造大裂缝,也很难从根本上改善原有裂隙的结构,并增加渗透率。加之本区原地应力高,煤层气藏遭破坏后原生煤层气未很好地保存,含气饱和度低,残留气藏以自封闭为主。因此,压裂后很难大幅度增加煤层气源头的解吸体积,增产效果不好,这类煤储层属于改造难度大而增产效果不佳的煤储层。

太行山东麓二、煤储层裂隙系统较发育,经压裂后虽然可以有效地提高渗透率,但由于本区断层密布,很难形成一定规模的井网和井间干扰;加之本区不少断层为导水断层,若压裂操作不慎,也会将煤层气井中的裂隙与导水断层压通,造成排水困难,从而使渗透率提高受到严重限制。此外,由于本区煤层气藏含气饱和度低且变化大,其压裂后的增产效果很不明显,特别是在岩浆侵入接触变质带的无烟煤和高煤级煤区,其增产效果更差。

在鄂尔多斯盆地东缘中部煤区,煤储层的封闭条件良好,煤层气藏的含气饱和度高、可改造性好,煤储层中孔隙与微裂隙很发育,内生裂隙不仅分布广,而且张开度大,气胀节理普遍发育于各煤岩分层内部,不足的仅是气胀节理之间的有效连接差,若将这个级别的裂隙连通,那么煤储层中整个裂隙体系将成为一个分级明显、连接有序的裂隙体系,为煤层气的产出提供良好的通道。连接气胀节理的最有效的裂隙是垂直层理面的长大主干裂隙,而本区煤储层的埋深有利于这种裂隙的形成,所以本区煤储层压裂后的渗透率增加幅度较大。此外,本区煤与围岩的机械力学性质差异大,压裂操作较易实现,加之煤层气藏含气饱和度高,所以增产效果十分显著。值得指出的是,在华北目前所有已勘探的煤区中,仅有鄂尔多斯盆地东缘中部煤储层的可改造性好。

六、煤层气可采性综合评价

综合分析淮南、太行山东麓和鄂尔多斯盆地东缘等煤区的地质特征,特别是各煤区的含气性特征、煤储层岩石物理、煤层气解吸特征、煤层气藏封闭和煤储层可改造性等资料后,可以认为:鄂尔多斯盆地东缘中部的中煤级煤区可采性最好;淮南煤区的煤层气可采性最差,在目前的技术与经济条件下,还不属于有工业价值的煤区;太行山东麓煤区煤层气可采性较差,不大可能形成工业规模的开发区,有待进一步深入研究才能确定其工业价值。

七、煤层气藏形成条件分析

淮南煤区的煤层气藏属发育不良或被严重破坏的类型。从煤层气藏形成的内部条件看,煤层气藏发育不良主要受控于煤相和煤级。本区煤层气藏的煤级偏低,特别是在原煤层气藏形成后,长期抬升剥蚀造成的煤层气大量解吸逸散,以及在重新埋藏后又无二次叠加变质作用发生。此外,本区煤储层的灰分产率和基质孔隙载体的比例明显高于其他两个区。这两个内部条件造成了煤储层孔隙、裂隙系统不发育和煤层气藏严重欠饱和。从煤层气藏形成的封闭条件看,本区煤储层之上有效围岩的厚度薄,原有的构造和水文条件也不利于气藏的封闭。因此,上述各种地质条件的配置不利于煤层气藏的良好发育与保存。

太行山东麓山西组煤层气藏曾发育良好,不仅有大量的煤层气生成,而且煤储层的孔隙、裂隙系统也发育较好,煤的物质组成也有利于煤层气的发育。但是,由于二次叠加变质作用过程中不少地段有岩浆侵入热接触变质作用,这种叠加变质的热力学条件在促使气藏发育的同时,也较严重地破坏了煤层气藏的封闭,特别是伴生断裂与热致裂隙的开启,导致气藏在高温条件下破坏,煤层气大量逸散;从变质高温状态回落到正常地温条件后,气藏出现明显的欠饱

和,后期的构造抬升剥蚀及相应的水文条件的变化,特别是地下水位的明显降低,使气藏的外部封闭条件受到更严重的破坏,造成煤层气的解吸逸散,所以本区煤层气藏破坏严重。

鄂尔多斯盆地东缘中部的煤层气藏发育良好,它是各种煤层气藏形成条件有利配置的典型。本区煤层厚度较大,煤的灰分产率中等偏低,在区域岩浆热变质作用叠加变质条件下形成的中煤级煤,其生气量达到高峰,煤中裂隙系统发育充分,致使煤层气的解吸率高、渗透性好,且具备了良好的可改造性。由此可知:区域岩浆热变质作用促进了气藏发育,改善了煤储层岩石物理性质,气藏温度变化幅度比较小,未破坏原有的外部封闭条件。相对稳定的构造条件为煤层气藏的保存创造了良好的先决条件。煤系之上较厚而致密(或含水)的围岩和相应的水文地质条件构成了煤层气藏的一级封闭,特别是承压水条件有效地调节和缓解了深度变化和构造整体抬升过程对煤层气藏的不利影响,致使气藏得以较好地保存。

鄂尔多斯盆地东缘南部,虽然也有类似中部的煤相、煤级、煤变质作用类型和围岩岩性封闭等有利条件,但相对复杂的构造和不利的水文地质条件使煤层气藏遭到严重破坏。在渭北一带,煤层气藏的保存条件虽比南部好,但也受到一定程度的破坏。

鄂尔多斯盆地东缘北部煤区也有与中部煤区类似的稳定构造条件、围岩岩性和大致相近的水文地质条件,煤层发育也尚属良好。但由于缺乏叠加变质作用,致使煤级偏低,煤层气藏发育不良,煤储层物性差,含气饱和度偏低。

整体而言,鄂尔多斯盆地东缘山西组煤储层的孔隙、裂隙系统、渗透性和可改造性要比太原组煤发育好些。

第二章 研究区煤层气地质特征

第一节 淮 南 区

一、含煤岩系和主要煤储层

淮南煤区的含煤岩系为二叠系山西组、下石盒子组和上石盒子组(图 2-1)。煤系底部为太原组和本溪组,煤系之上在淮南大部分地区为上二叠统石千峰组及第三系和第四系。

中石炭统本溪组:厚 3~22m,由铁铝质粘土岩及薄层灰岩组成。

上石炭统太原组:厚 115~148m,由灰岩、砂岩、泥岩及煤组成。灰岩 10~13 层,并有局部可采及不可采煤层 1~10 层。

下二叠统山西组:厚 52~88m,由砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩及煤层组成,含煤 1~3 层,其中 A_1 煤层全区可采;厚 7m 左右。

下二叠统下石盒子组:厚 191~265m,由泥岩、粉砂岩、鲕状泥岩、砂岩及煤组成。含煤 13~16 层,大部分为可采或局部可采煤层,煤层总厚在 19m 左右。本组主要煤储层有 B_9 、 B_7 、 B_6 、 B_4 煤层。

上二叠统上石盒子组:厚 376~507m,中部和下部主要由粉砂岩、泥岩、砂岩及煤层组成。含煤 18~21 层,煤层总厚为 13m 左右。在中上部有极薄的海绵骨针硅质岩或硅质泥岩。最上部为一套不含煤的杂色岩层,主要为灰、紫红、灰绿色花斑状粘土岩、粉砂岩及砂岩。本区上石盒子组含主要可采煤层 2 层,即 C_{13-1} 煤层和 B_{11-2} 煤层。

上二叠统石千峰组:厚 114~270m,以砂砾岩及细砂岩为主,底部为巨厚层状中粗粒砂岩,本组不含煤。

本区 B_9 、 B_7 、 B_6 煤层主要为简单结构煤层。 C_{13-1} 、 B_{11-2} 和 B_4 煤层多为复杂结构煤层。 A_1 煤层在大部分地段为简单结构煤层。

二、构造及岩浆活动

淮南煤区包括 2 个构造区,即淮南断褶带和定远断褶带(图 2-2)。本区主要发育东西向和北北东向两组断层,局部地段发育次级北西向断层。北北东向的正断层多横切褶皱的核部与翼部;东西向断裂多为逆掩断层,其中主要断层有舜耕山断层和田家庵-口孜集断层。舜耕山逆掩断层长 300 多公里,断层面浅陡、深缓。在洞山一带,霍丘群至奥陶系推覆于石炭系一二叠系之上;在寿县见霍丘群推覆于震旦系及古生界之上。岩石挤压破碎,糜棱岩化及揉皱发育,但未影响到白垩纪地层。据此推断,该逆掩断层在聚煤期后至白垩纪前处于强烈活动期。

本区含煤岩系总体为一近东西向的大型复式向斜,其褶皱轴在西部仰起。复向斜发育一系列次级背斜构造,自北向南主要为:尚塘-耿村集向斜、陈桥-潘集背斜、谢桥-古沟向斜和陆唐背斜。它们均被北东向和北西向两组断层切割,对煤层及煤层气藏破坏性大,有不少甚至直接影响到煤层采掘(图 2-3)。

本区的构造发展史主要为三叠系沉积之后的大面积抬升与剥蚀。以及从白垩纪开始的重

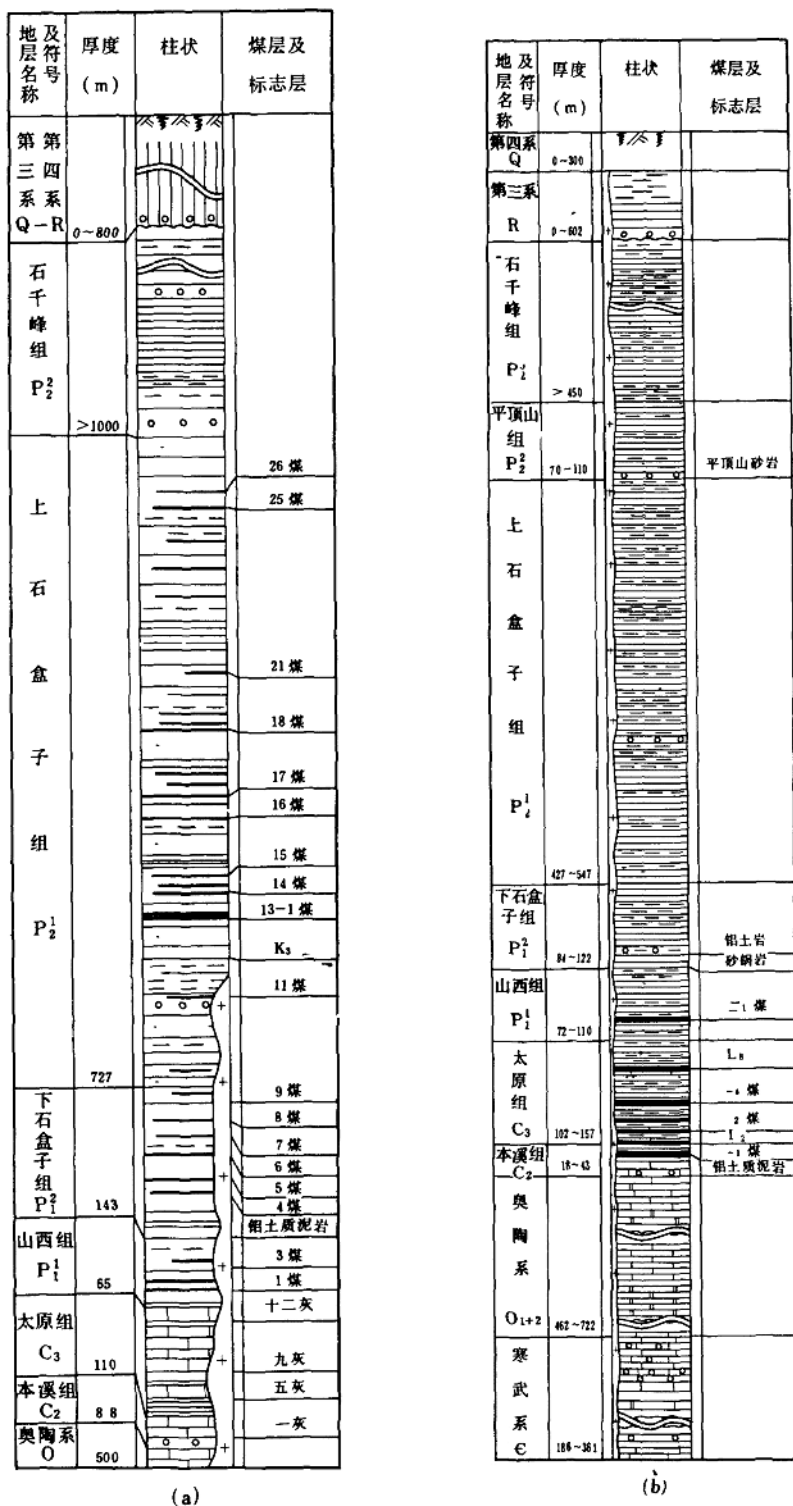


图 2-1 淮南和太行山东麓区的含煤岩系柱状图

Fig. 2-1 The sequence of the coal-bearing strata in Huainan and east side of Taihang Mountain

(a)淮南煤区; (b)太行山东麓区