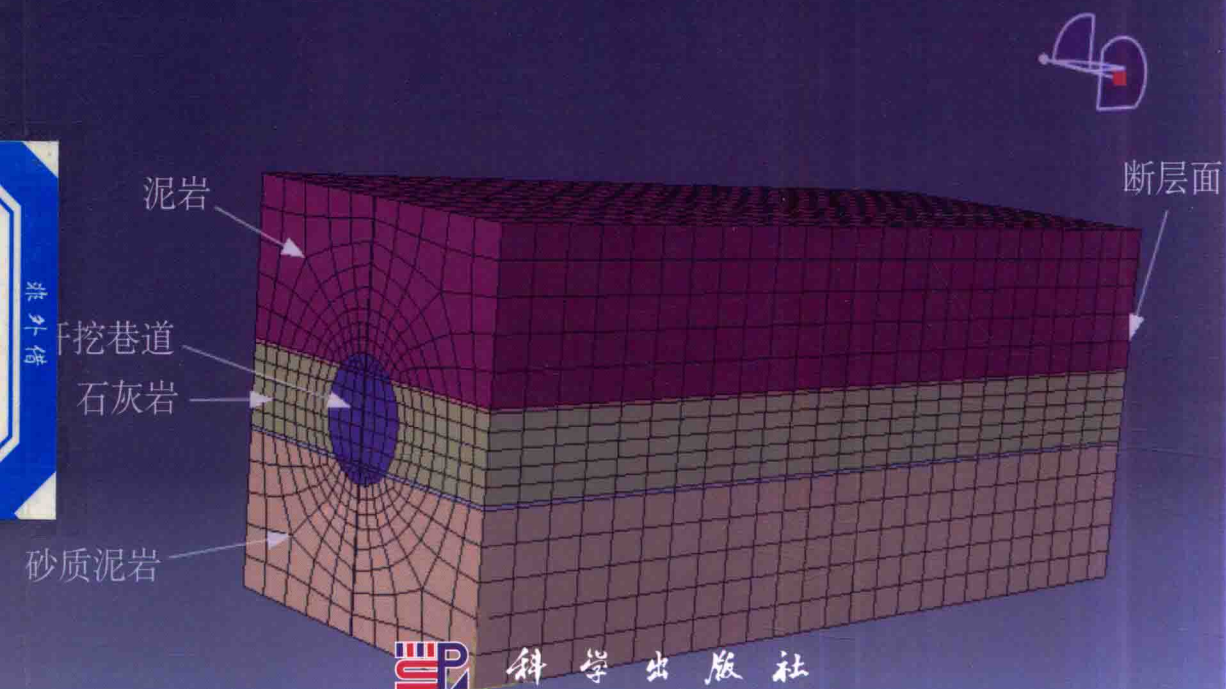


“三软” 矿区瓦斯与围岩相互驱动机制及应用

王志荣 陈玲霞 著



“三软” 矿区瓦斯与围岩相互驱动 机制及应用

王志荣 陈玲霞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

构造煤瓦斯突出一直是河南省“三软”矿区多年面临的严重地质灾害。作者运用工程地质学、弹塑性力学、断裂力学、流体力学以及岩石试验和计算机数值模拟等理论与方法,对开放式构造条件下煤与瓦斯突出的成因、时空规律及驱动因素展开了系统深入研究。阐明了区内构造煤与构造岩顶板的变形特征;确立了区内瓦斯生成条件的构造控制模式;揭示了断层带煤(岩)与瓦斯突出的方式与力学驱动机制;建立了“三软”矿区瓦斯地质灾害预测模型。以软煤塑性软化性能与流变性能的耦合变形特征为切入点,着重研究回采工作面煤体破裂、瓦斯运移及二者相互作用的时程效应。此外,对低渗条件下构造煤瓦斯的压裂抽采与平顶山薄层状盐穴储气库围岩稳定性进行了初步讨论。

本书可供矿山工程勘察、设计、施工、监理、安全、矿井地质工程技术人员参考,也可作为大中专院校有关专业师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

“三软”矿区瓦斯与围岩相互驱动机制及应用/王志荣,陈玲霞著. —北京:科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055645-5

I. ①三… II. ①王… ②陈… III. ①矿区-瓦斯煤层-相互作用-围岩稳定性-地质灾害-防治 IV. ①TD823.82②TD325

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第288631号

责任编辑:王 运 刘浩旻/责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:12 1/4 插页:8

字数:260 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

瓦斯突出的力学驱动机制一直是岩土界有关岩体与气体相互作用理论的深层次问题，而构造作用的叠加使得这一问题变得更加具有挑战性。豫西芦店滑动构造位于河南嵩山-五指岭和箕山-风后岭之间的登封市、新密市境内，东起于新密市大槐镇，西止于登封市南嵩山断层带的玉皇庙断层，西宽东窄，总体展布近东西向，呈向北凸出的弧形，滑动系统面积 260km^2 。作为引张作用下形成的包括拉张带、挤压带和剪切带等单元的伸展构造组合体，其完整的构造形态和应力分区、典型的“生、储、盖”气田构造以及罕见的瓦斯动力现象，使之成为研究应力变质作用、构造煤（岩）与瓦斯突出驱动机制、“三软”矿区瓦斯地质灾害动力效应，以及复杂地质条件下煤层气综合利用等工程地质学和瓦斯地质学领域一系列基础问题的理想场所。

全书分五个部分：绪论和第一章由郑州大学陈玲霞撰写，首先介绍了浅层脆性条件下，不同类型构造应力对瓦斯形成的影响机理与控制模式，其次丰富与完善了瓦斯突出方式，即高压瓦斯逐步“击穿”岩体中的损伤裂隙，而并非通过“中心式”或“球壳状”方式来击碎整个岩柱，最后阐明了瓦斯突出冲击波对巷道围岩的三维动力效应；第二章由郑州大学王志荣、陈玲霞撰写，全面阐述了“三软”矿区瓦斯延期突出机理，提出了“突出滞后时间为第一阶段卸压带形成时间与第二阶段应力集中带软煤蠕变失稳时间之和”这一重要结论；第三章由郑州大学王志荣撰写，针对防突岩柱安全厚度以及与时间的非线性耦合问题，通过对经典流变组合模型的分析及 Matlab 最小二乘迭代法的拟合，建立了改进的七元件非线性黏弹塑性本构模型，并以此建立起基于岩体流变性的岩柱临界安全厚度的计算模型；第四章由郑州大学王志荣撰写，着重介绍了低渗煤层压裂抽采的基本工作原理及施工技术参数的计算方法，明确指出矿井瓦斯治理必须结合矿区环境保护和矿区煤层气资源开发，走具有河南省特色的综合治理之路；第五章由郑州大学王志荣、陈玲霞撰写，在查明平顶山盐田工程地质条件的基础上，对薄层状盐岩地下储气库建设进行了详细的可行性分析。确切地说，以上内容为多年奋战在工程地质前缘的科研团队集体智慧的结晶。

在当前全国上下深入开展“学习实践科学发展观”活动的新形势下，笔者依托国家自然科学基金项目“豫西滑动构造区‘三软’煤层瓦斯地质灾害成因及动力性机制（编号：41272339）”，将近年来取得的有关成果编辑出版。在本书完成过程

中，得到了中国矿业大学（北京）资源与安全学院、郑州大学水利与环境学院的老师和同学们的关心与帮助。在此，首先感谢悉心培养笔者的博士研究生导师胡社荣教授及中国矿业大学（北京）资源与安全学院院长曹代勇教授，正是在他们的学术熏陶下，笔者才走上了地质科学的研究道路。同时，笔者还要感谢李潇璇博士，孙龙、李树凯、韩中阳、李亚坤、贺平、郭志伟、王永春和石茜茜等硕士，他们在本书绘图制表与数据处理过程中给予了充分的帮助和支持！

河南省煤田地质局地质处刁良勋教授级高级工程师、胡向志高级工程师、河南省能源钻井工程技术研究中心张振伦工程师，对笔者给予关心、支持、指导，并热情回答问题；河南省煤矿安全监察局黄体信教授级高级工程师、严振声高级工程师以及郑州矿务局刘忠英、陈平工程师、刘士军高级工程师对笔者给予热情指导和帮助；河南省煤矿系统各级领导和工程技术人员给予热情接待并慷慨提供大量资料和工作条件，在此一并致谢！

王志荣

2018年1月

目 录

前言

绪论	1
第一节 “三软” 矿区瓦斯突出的驱动机制	1
第二节 “三软” 矿区煤层气开发利用	4
第三节 地下盐穴储气库的工程地质条件分析	5
第一章 “三软” 矿区瓦斯突出的驱动作用	7
第一节 瓦斯生成的构造驱动模式	8
一、地质背景	8
二、测试结果与分析	10
第二节 瓦斯突出的力学驱动特征	17
一、裂隙弹塑性变形特征	18
二、地质背景	20
三、断层带瓦斯运移特征	22
第三节 瓦斯突出的动力驱动效应	28
一、断层瓦斯突出的冲击波特征	29
二、瓦斯突出的波动特征	31
三、冲击波对巷道围岩的动力效应	33
第二章 “三软” 矿区瓦斯突出的时间效应	40
第一节 瓦斯延期突出的研究概况	40
一、瓦斯延期突出研究意义	40
二、瓦斯延期突出研究进展	41
第二节 基于蠕变试验的围岩本构模型	43
一、岩石的流变模型	44
二、岩体流变模型辨识	52
第三节 延期突出的时间分析模型	54
一、蠕变失稳对延期突出的影响	54
二、卸压区演化对延期突出的影响	62
三、延期突出的滞后时间预测	64

四、结论	65
第三章 “三软”矿区瓦斯突出的防护岩柱	66
第一节 断裂带瓦斯突出的驱动方式	66
一、裂隙的应力状态	66
二、裂隙的破裂过程	70
第二节 基于断裂理论的岩柱安全厚度计算模型	73
一、岩体中的有效应力	74
二、岩体中的裂隙变形	77
三、安全厚度算例	80
第三节 基于流变理论的岩柱安全厚度计算模型	80
一、含煤岩系的蠕变试验	81
二、含煤岩系的蠕变模型	83
三、岩柱安全厚度计算	88
第四节 断裂带防突岩柱的安全设置	90
一、岩柱突出的破坏方式	90
二、岩石与瓦斯突出危险性预测	91
三、岩石与瓦斯突出防治	94
第四章 “三软”矿区低渗煤层气抽采技术	102
第一节 “三软”矿区煤层气的赋存特征	102
一、研究靶区的选择	102
二、焦作矿区瓦斯地质背景	104
三、郑州矿区瓦斯地质背景	107
第二节 构造煤起裂压力计算模型	108
一、射眼垂直井起裂压力	108
二、射眼水平井起裂压力	112
三、实例应用	114
第三节 碎裂煤渗透计算模型	116
一、压裂模型	116
二、渗透模型	118
第四节 碎粉煤压裂参数数值分析	123
一、气源岩变形特征	123
二、瓦斯抽放数值分析	127
第五节 基于 PKN 分析的压裂时间计算模型	135
一、垂直井延伸压力模型	136
二、垂直井压裂时间模型	138

第五章 地下盐穴储气库围岩稳定性分析	142
第一节 互层状盐岩的蠕变试验	144
一、地质背景	144
二、蠕变试验过程	146
三、蠕变试验结果	147
四、蠕变试验模型	152
第二节 地下溶腔形态三维探测	153
一、CSAMT 地下溶腔探测方法	155
二、CYT 地下溶腔探测方法	158
第三节 地下溶腔变形数值分析	161
一、盐岩试验参数	161
二、溶腔缩减的数值模拟	164
第四节 储气库地面沉降的数值分析	168
一、生长曲线法	169
二、数值计算法	173
参考文献	183
彩图	

绪 论

第一节 “三软”矿区瓦斯突出的驱动机制

矿难事故一直是困扰我国煤矿安全生产的最严重问题，事关我国国际声誉和人民生命安全。尤其是近年来，已发生多起死亡百人以上的重大矿难。而煤与瓦斯突出（以下简称“瓦斯突出”）恰恰是造成这些重大矿难的主因！因此，研究瓦斯突出的成因机理，建立相应的瓦斯突出预测模型，无论是对工程地质的基础理论研究，还是对煤矿安全生产，都具有重大的理论与实践意义。

“三软”矿区一般指赋存“三软”煤层的煤矿区。在我国采矿界，“三软”煤层这一术语虽然由来已久，但至今尚无公认的确切定义。通常认为，“三软”煤层指一定开采技术条件下由软煤、软顶和软底构成的特殊地质体。

“三软”煤层的关键内容是软煤。软煤的通俗含义即受构造作用改造，强度低、变形大且易破碎的煤体。也就是说，软煤即地质意义中的构造煤，是在一期或多期构造应力作用下，在一定的工程环境中，煤体的原生结构、构造遭到不同程度的破坏，同时引起物理力学性能极大变化的一类煤。从瓦斯地质学角度，构造煤尚包括瓦斯含量、瓦斯压力及瓦斯渗透性能等内容，是煤层气开发领域的一个综合性范畴。曹运兴等根据煤体原生结构的破坏程度不同，将构造煤划分为碎裂煤、碎斑煤、鳞片煤、碎粉煤、非均质结构煤与揉流糜棱煤等六种基本成因类型。

长期以来，在人们的一般概念中，褶皱构造的轴部和逆断层发育区是瓦斯与油气聚集的有利部位；而伸展构造区，往往具有各种开放式的渗透边界，是瓦斯和油气的逸散区，因而难以富集成藏或聚集成灾。这一认识产生的背景是早期的煤田地质学家们发现，高煤级煤（高瓦斯源岩）通常发育在强烈的褶皱变形区，而伸展构造区的煤，结构简单，变质程度较低，因此他们假定褶皱压力（fold pressure）形成了圈闭构造并促进了变质成烃作用。然而，在河南芦店滑动构造区，近年来各煤矿相继发生了众多触目惊心的瓦斯地质灾害，郑州煤炭工业集团的告成煤矿、太平煤矿和超化煤矿皆为豫西罕见的突出矿井或高瓦斯矿井（其中大平煤矿是全国五个防突示范矿井之一）。煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸、煤层自燃发火及煤尘爆炸等恶性事故频频出现。2004年10月20日，大平煤矿发生的148人死亡的特大瓦斯突出事故，向人们提出了伸展构造区为何会发生如此重大瓦斯地质灾害的严峻问题！

以掀斜断块为主要标志的伸展构造和沿盖层中软弱层位发育的重力滑动构造,是河南省煤田尤其是豫西煤田内最富特色的构造现象(马杏垣,1981;李万程,1979;胡社荣,1992;曹代勇,1990;王桂梁等,1992)。豫西芦店滑动构造早在20世纪70年代就已经闻名遐迩。滑动构造的主滑脱面沿二₁煤顶面及附近层位发育,钻孔揭露平均厚为40m的碎裂岩带,岩心破碎,结构松软。经多期重力滑覆作用后的软煤,以“片状-鳞片-碎粒-碎粉”结构为主,煤级一般从高级烟煤到无烟煤。煤体质松性脆,揉搓现象严重,且小挠曲和劈理构造异常发育,碎裂后断面光滑,伴生有大量摩擦镜面、擦痕及擦槽,厚度一般为7~8m,是我国典型的“三软”煤层。

芦店滑动构造的多次滑动造就了研究区丰富的构造现象。滑动构造带在垂向上普遍出现分带现象,大致呈上部岩层裂隙带、中部构造破碎带和底部构造煤岩带(滑动构造带主体)的共生组合,从而在空间上构成典型的瓦斯“生、储、盖”三元结构。在漫长的地质时期中,煤层中瓦斯向多空隙的构造岩顶(底)板运移,并富集于各类边界断层,最终形成豫西独特的“煤、岩石与瓦斯”耦合突出现象。

煤与瓦斯突出的超前地质预测一直是矿山安全领域多年试图解决的难题。在生产实践中,矿井地质条件与开采条件的耦合互动,增加了解决这一问题的难度,由滑动构造形成的“三软”煤层的叠加使得这一问题的研究难上加难。总体来说,有关瓦斯成因机理研究的难点主要体现在以下方面:

(1) 瓦斯突出的滞后性:滑覆作用在主滑面附近产生大量次生断层,而90%的瓦斯突出与这类断层构造有关,并且从掌子面揭露断层到瓦斯突出这一段时间存在一个明显的滞后期。因此,这类事故容易造成人们思想上的麻痹大意,是危害最大,发生最频繁的一种矿井地质灾害。

(2) 瓦斯突出的强烈性:在开拓阶段的煤巷掘进过程中,尤其是岩巷揭煤时经常发生强烈的瓦斯动力现象。受滑动构造影响,二₁煤层原生结构遭到彻底破坏,一般呈粉状与团块状,因而透气性极差,瓦斯压力大,动力性强。一旦采掘活动揭穿断层,附近高压瓦斯将迅速解析释放,产生冲击地压造成人员伤亡。

(3) 瓦斯突出的多元性:构造岩顶板松软破碎,采掘过程中随采随落,极难控制,因而无严格的伪顶、直接顶和基本顶之分,也无真正意义的冒落带和裂隙带之分。尤其是构造岩顶板垮落后,由于缺乏裂隙带垂直逸散通道,瓦斯向上运移受阻并滞留于冒落带或冒落带之下,煤层回采时在通风负压作用下,随着采空区漏风大量涌向工作面隅角,致使回采工作面瓦斯涌出量骤增,一般为正常煤壁的几倍甚至几十倍,从而形成新的二次瓦斯源。

显然,单单从瓦斯的生成条件和运移条件等传统思路来探讨滑动构造带瓦斯突出成因机理已失之偏颇,仅仅用煤体破碎、比表面积增大、孔隙率和吸附容量增大、渗透率降低等煤岩物理特征也难以解释许多实际现象。笔者认为,瓦斯突

出的控制因素众多,滑动构造区应该牢牢抓住滑动作用形成的滑动带软煤(岩)这一问题的特殊性,从瓦斯的赋存条件,即构造空间、开采环境以及介质的力学性能等方面,积极开拓新的思路与新的途径来解决这一难题。

滑脱构造是 20 世纪 80 年代以来我国煤田地质领域所取得的最重要进展之一。芦店滑动构造已有众多的研究成果(马杏垣,1981;王桂梁,1992;李万程,1995;王昌贤,1989;曹代勇,1990;胡社荣,1992),但主要侧重于构造特征及其控煤规律方面的研究。20 世纪 70 年代以来,焦作矿业学院、西安矿业学院、中国矿业大学的一批研究者在矿井地质灾害(包括煤与瓦斯突出)影响因素、发生发展机理、预测模型与方法等方面做过大量工作。彭立世(1985)、胡社荣(1992)、曹运兴(1995,1996,1999)、曹代勇等(2002,2006,2005)曾通过滑动构造区瓦斯生成条件的研究,指出构造应力对煤体变形变质及煤化进程有很大影响,强烈变形的构造煤瓦斯含量高,且灾害性大;20 世纪 90 年代早期,焦作矿业学院瓦斯地质研究所通过对煤体结构的力学特征及破坏规律的研究,模拟了瓦斯的渗透运移问题。苏现波和吴贤涛(1996)根据煤体结构渗透理论和瓦斯在构造裂隙中的运移特征,对河南省主要煤田的煤层气可采性做出了评价。郭德勇等(1998,2002,2007)系统研究了地质构造对煤与瓦斯突出的控制作用,提出了瓦斯预测的构造物理学新方法,并在预测数理模型、计算机应用方面有所创新。21 世纪初,河南省一些有远见的瓦斯地质工作者,如张子敏等(1998)、张铁岗(2001)、王恩义(2005)从构造角度探讨了瓦斯突出机理与突出规律。尤其是国内著名学者夏玉成、袁崇福、张子戌、徐风银等均提出影响因素量化的新思路,也相应开展过该方面研究,甚至采用了人工智能方法,但实际应用并没有取得理想效果,学术上也有待同行公认。

近年来,随着岩石力学试验和计算机模拟技术的发展,工程界开始出现为数不多的煤矿灾害学和岩体力学交叉研究成果,国外有 W. J. Sommerton 等研究应力对煤体渗透性的影响;W. E. Brace 进行了应力作用下岩体渗透率变化规律研究;C. R. McKee 等开展了应力与煤体孔隙度和渗透率间关系研究;J. R. E. Enever 和 A. Henning 得到煤体有效应力与渗透率间影响规律。国内刘保县(2002)提出了利用突变理论来研究煤与瓦斯延期突出的机理;景国勋(2005)从孕育和突出两个阶段阐述了气体在煤与瓦斯突出中所起的作用,指出了煤层吸附瓦斯和裂隙瓦斯对煤的物理力学性质的影响;唐巨鹏等(2006a,2006b)通过煤层气在压力作用下的解析渗流试验研究,得到有效应力与煤层气解吸渗流特性间的关系,并拟合了其关系表达式,从而揭示出煤体破坏前,一些新的流固相互作用规律;徐涛和唐春安(2005)分析了岩体破裂过程中,有效应力与孔隙应力的耦合变化规律;马中飞和余启香(2007)利用水力超前压力对于承压散体煤和瓦斯的突出机理做了初步探讨;尹光志等(2008a)、胡国忠等(2009)对于低渗透条件下的渗流作

用进行了进一步模拟研究。

综合前人的学术成就,虽然在“瓦斯形成的构造应力降解机制”和“应力作用下瓦斯渗流特征”方面取得重大进展,也强调了“层滑作用使得煤层遭受破坏,煤体强度变低,从而成为诱发突出的地质因素之一”,但尚未就“应力作用对煤化进程的影响方式”、“软煤强度降低对瓦斯突出的影响程度”以及“岩体破裂后尤其是软岩破裂后气体运移及固流相互作用关系”等一系列关键科学问题做出系统的论述,关于“滞后突出的原因”以及“突出后岩体的急剧开裂等动力学过程”的研究更是处于空白。实际上,滑动构造作为包括前缘挤压带、中部顺层剪切带和后缘拉张带等变形单元的构造组合体,其各部分的应力应变分布和构造样式具有自身规律,本身产生的“三软”物质载体,即构造煤岩对矿井瓦斯突出的控制必然有其独特之处,具体表现为以下两个方面。

首先是应力变质问题。众所周知,温度、压力及其温度作用的时间是决定煤化作用进程的基本地质因素,其中温度对有机质演化所起的主导作用得到普遍的认同,而压力因素在煤化作用和成烃过程中的意义尚存在较大的争议。压力是促进成烃(瓦斯的形成)过程还是抑制煤化作用进程?静压力(地层压力)与动压力(正应力、剪应力和压应力),应力作用与热力作用对煤大分子结构的影响差异如何及其原因何在?鉴于“三软”矿区含煤岩系构造变形的显著特色,上述问题的深入研究和深刻探索,对于全面认识煤化作用的实质和科学分析瓦斯生成的应力模式,无疑具有重要的理论意义。

其次是瓦斯动力性问题。针对构造区瓦斯突出问题的特殊性(滞后性、强烈性与多元性),瓦斯预测应该遵循“因地制宜”与“因时制宜”的原则。实际上,瓦斯突出本身就是一个涉及固体与流体二相平衡的动力学过程,而“三软”煤层的软化性能与黏塑性能应该是滑动构造区瓦斯突出的最直接和最关键影响因素。我们认为,滑覆作用使煤体强度变得很低且具有流变性能,煤层开采诱发的断层带应力集中又使得软煤(岩)剧烈变形且强度迅速衰减(即软化性能与黏塑性能),从而导致固体有效应力剧降而瓦斯孔隙压力剧增,煤(岩)破裂后最终产生气体与固体的耦合动力现象。

第二节 “三软”矿区煤层气开发利用

近年来,我国社会经济的飞速发展对能源的需求与日俱增,随之而来的大量燃煤排放造成了严重的大气污染,暖温与雾霾等极端气候日益严重。在化石能源枯竭和环境污染问题的严重困扰下,世界各国纷纷致力于研究开发清洁能源。煤层气又叫瓦斯,其主要成分是甲烷,是一种储藏在煤层中高热值、无污染的新能源气体。煤层气开发能够有效降低瓦斯矿难的发生和温室气体的排放,因此具

有很好的经济效益和环境效益。

我国煤层气资源丰富,开发潜力巨大,埋深在 2000m 以浅煤层气资源量约 36.81 万亿 m^3 ,居世界第三位。随着我国对地质规律认识的提高和勘探及开采技术的不断创新,煤层气等非常规油气资源的勘探取得了重要的进展。2015 年我国煤层气探明地质储量达到 602 亿 m^3 ,较 2014 年增长 155%。根据我国煤层气资源条件、勘探程度、开发技术发展现状及产业发展的需要,“十三五”期间煤层气勘探范围将进一步扩大,逐步推进到新疆、安徽、河南、贵州等地区,到 2020 年,国内将建成 3~4 个煤层气产业化基地,新增探明煤层气地质储量达 1 万亿 m^3 。

河南省是我国产煤大省,也是全国瓦斯重灾区之一。煤层气资源极其丰富,埋深 2000m 以上的蕴藏量约 1 万亿 m^3 ,平均资源丰度达 $1.97 \text{ 亿 m}^3/\text{km}^2$ 。但是,煤层气开发技术的落后造成煤层气产业发展缓慢,全省煤层气田尤其是“三软”矿区普遍存在的“低渗、低压、低饱和以及高构造变动”,即“三低一高”等技术难题尚未很好地解决。地面井的产能总体上十分低下,抽采率一般保持在 25%左右,尚不能实现煤层气的有效抽采和高效利用。

目前在河南省焦作试验区已施工 90 口煤层气井,主要分布在九里山、古汉山、恩村、位村等矿区。由于缺乏成熟的勘探、抽采、资源评价以及储层改造技术,抽采试验只能参照沁水盆地的施工工艺,加上含煤地层储藏特征、水文地质与构造地质等复杂因素,多数煤层气井出现涌水与突水现象,产气量很小,总体上并未达到理想的抽采效果。

笔者在系统分析“三软”矿区以往煤层气勘探与抽采资料的基础上,基于煤层气地质学、断裂力学、弹塑性力学、流体力学等多学科理论,分析了低渗煤储层在水力压裂条件下裂缝的起裂、扩展机理,构建了“三软”煤层的水力裂缝扩展模型和压裂后储层渗透率模型,从而建立了适合焦作矿区“三软”条件的施工技术参数体系,诸如起裂压力(P)、压裂长度(L)、施工排量(Q)与压裂时间(t)以及各参数间的优化组合模型,以指导实际施工,全面提高地面井的产能与抽采率。研究成果对区域内煤层气资源的勘探开发具有一定的理论与实际指导意义。

第三节 地下盐穴储气库的工程地质条件分析

当前,我国能源消费与日俱增,对进口能源的依赖程度不断提高,而当前国际政治经济局势正在发生深刻的变化,特别是主要能源产区的不稳定因素明显增加,对我国能源尤其是天然气进口安全造成巨大的潜在风险。几乎可以肯定,在我国能源产业结构战略调整的新形势下,为保证能源安全和供需平衡,促进我国经济的持续发展,建立能源战略储备库已迫在眉睫。天然气的消费具有明显季节

性和时段性特点,建立天然气储备库对合理调度天然气使用和应对突发事件均具有重要意义。同时我国的环境状况持续恶化,工业废气的排放造成了严重的空气污染。因此,地下空腔因其安全经济的特点,在能源存储和有毒工业废气的处置方面具有良好的应用前景,目前已经逐步成为全球能源储备领域的研究热点。

河南省地下盐岩资源十分丰富,但在盐岩溶腔的再利用方面却起步较晚,直到20世纪90年代才逐步开始有相关研究。随着国家能源战略储备计划的逐步实施,盐岩地下储气库的建设发展迅猛,西气东输二线上平顶山和应城两个储气库正在建设之中。盐岩具有致密低渗的特点,使地下盐穴储气库具有经济与安全的显著优势。但同时由于储气库埋深较大,地层结构复杂,使储气库存在着许多潜在的地质问题。首先,盐岩溶腔的库容会由于蠕变作用而有所减少,影响到储气库的存储能力与经济效益。其次,蠕变严重时可能引起上覆岩层的断裂,进而引起地表大面积变形和塌陷,严重时可能会引起储气库渗漏、爆炸等严重的安全和环境事故。

因此,地下储气库的围岩变形和地面沉降研究,包括蓄气运行期间的动态监测,均关系到储气库的安全使用与日常维护,具有十分重要的现实意义。同时,平顶山盐田具有独特的地质构造,盐岩和泥岩互层分布,单层厚度小,埋藏深,促使变形影响因素复杂化。在此背景下进行储气库变形、沉降等机制的研究,可以为储气库的建设和运营提供技术参考和支持。

综上所述,河南省“三软”矿区瓦斯突出防治、煤层气高效开发,以及平顶山薄层状盐穴储气库围岩稳定性评价这三方面的研究内容,都涉及复杂地质条件下“多场(裂隙场、应力场、渗透场)多相(固体、液体、气体)”耦合作用机理等基础理论,也是我国目前能源领域亟待解决的深层次地质问题。芦店滑动构造事实上已经成为探讨瓦斯地质灾害防治,以及低渗煤层气综合利用等工程地质学和瓦斯地质学领域一系列热点问题的理想场所;而平顶山薄层状盐穴储气库为解决深部岩体与气体相互作用问题提供了天然实验室。上述科学问题的研究进展,对于揭示构造应力影响成烃作用的方式和途径、探索“三软”矿区瓦斯地质灾害超前预报方法、开发低渗煤层的瓦斯抽采技术以及改进薄层状盐穴储气库储藏工艺均具有重要理论意义与现实意义。

第一章 “三软” 矿区瓦斯突出的驱动作用

煤与瓦斯突出是指在煤矿井下采掘过程中煤和瓦斯（以甲烷为主的烃类气体）混合物在很短时间内连续地从煤（岩）壁内部向采掘空间突然大量喷出的动力现象。煤与瓦斯突出的作用介质为煤和瓦斯，作用力包括地应力和瓦斯压力等。其一般特征表现为抛出固体物质，气体搬运特征显著，突出物中表现出显著的高压气体爆炸，突出的孔洞具有一些特殊的形状及突出过程中伴随有大量的瓦斯涌出。煤与瓦斯突出是采矿生产过程中经常出现的一种非常复杂的动力现象，不仅是严重威胁煤矿安全生产的自然灾害之一，同时也是一直以来世界采矿界面临的巨大难题之一。

作为世界上煤与瓦斯突出灾害最为严重的国家之一，我国仅 2008 年就发生煤矿瓦斯突出事故 180 起，死亡 781 人，其中：较大瓦斯事故 63 起，死亡 290 人；重大瓦斯事故 18 起，死亡 352 人，给人民生命财产造成巨大损失（姜波等，2005）。近年来，随着我国现代工业的发展导致煤矿矿井开采深度和强度大幅度的增长，瓦斯压力的增大和开采条件的日趋复杂，煤与瓦斯突出发生的强度及造成的伤亡不断增长，迫使人们对煤与瓦斯突出机理进行研究，以便采取相应的措施来防治煤与瓦斯突出。

探索矿井瓦斯突出与驱动元素的内在关系一直是工程地质学关注的重要课题之一，此问题在当今岩土学术界仍是一个尚未彻底解决的难题。新中国成立以来，广大科技工作者与瓦斯地质灾害进行了不懈的斗争，在总结新中国成立以来历次突出事故经验教训的基础上，逐渐摸索和形成了一套适合中国实际情况的防治理论和方法。

迄今为止，前人的学术成就在“瓦斯形成的构造应力降解机制”和“应力作用下瓦斯渗流特征”方面取得重大进展，强调了“层滑作用使得煤层遭受破坏，煤体强度变低，从而成为诱发突出的地质因素之一”。本书就“应力作用对煤化进程的影响方式”、“煤强度降低对瓦斯突出的影响程度”以及“岩体破裂后尤其是软岩破裂后气体运移及固流相互作用关系”等一系列关键科学问题做出进一步的论述，对“滞后突出的原因”以及“突出后岩体的急剧开裂等动力学过程”也进行了初步的讨论。

第一节 瓦斯生成的构造驱动模式

煤体瓦斯含量是矿井形成各种瓦斯地质灾害的物质基础,目前已经明确瓦斯含量的大小取决于煤的变质作用阶段。有机质在高温高压条件下经过一系列的物理、化学以及生物因素的作用,随着时间推移逐步形成游离瓦斯。温度、时间和应力是变质作用过程中的关键因素,其中温度提供了有机质转化的主要能量源,其主导作用得到学术界的普遍认同。而关于压力因素,尤其是浅层脆性条件(即地表常温条件)下构造应力在煤化作用和成烃过程中的意义,尚存在较大的争议。

豫西滑动构造区是我国典型的浅层“表皮构造”发育区,区内火成岩体极不发育,主采二₁煤层基本没有受到热异常的影响,但因受后期滑动构造和断块掀斜的强烈改造,全区基本构造煤化。煤体变形复杂、质松性脆,一般呈“片状-鳞片-碎粒-碎粉”结构,碎裂后断面极其光滑,摩擦镜面、擦痕及擦槽极其发育;镜下观察时揉搓现象严重,且小挠曲和劈理构造非常发育,是我国典型的“三软”煤层。

芦店重力滑动构造作为引张作用下形成的包括后缘拉张带、前缘挤压带和中部顺层剪切带等变形单元的伸展构造组合体,其完整的构造形态、典型的应力分区以及罕见的瓦斯异常现象,为研究不同类型应力对瓦斯形成的控制作用提供了十分便利的条件。鉴于构造区显著的应力分区特色,通过测定煤样的物理化学特性,从分子结构深入分析构造应力对瓦斯形成的影响,从而筛分出地层压力(自重压力)和构造应力,以及从构造应力中进一步筛分出压应力、张应力和剪切应力,为进一步完善瓦斯“应力成藏模式”提供必要的宏观和微观信息支持。

一、地质背景

重力滑动构造的一般成因模式为:界面发育,具有软弱夹层的岩体,在地下水浮力效应的托浮下,在合适的斜坡上,再有其他因素触发诱导,经重力的下滑力长期作用,岩体逐渐滑移,蠕动,流变,形成各式各样的重力构造(曹代勇,1990;王桂梁等,1992)。重力作为一种无处不在的体力,在地球浅层低温条件下,仍然可以参与地壳表层的运动过程,在塑造各类构造中起着重要作用(马杏垣等,1981)。

国外学者在深入研究欧美众多山前滑脱构造的基础上,提出了著名的重力滑动构造的构造动力分区模式,明确指出滑动构造的应力应变分布和构造样式具有自身规律,一般前缘为挤压段,可出现以地层重复和缩短为特征的逆冲推覆作用;中部为顺层剪切滑移段,滑动带遭受强烈剪切作用,但滑体、滑床的构造变形和地层异常相对较弱;后缘为拉张段,可发育一系列反向阶梯状断层,在张应力作

用下以地层缺失为特征。因此，就豫西煤田而言，一个完整的重力滑动构造系统，其上覆系统正是拉张、挤压和剪切等力学单元的有机组合（图 1-1）。

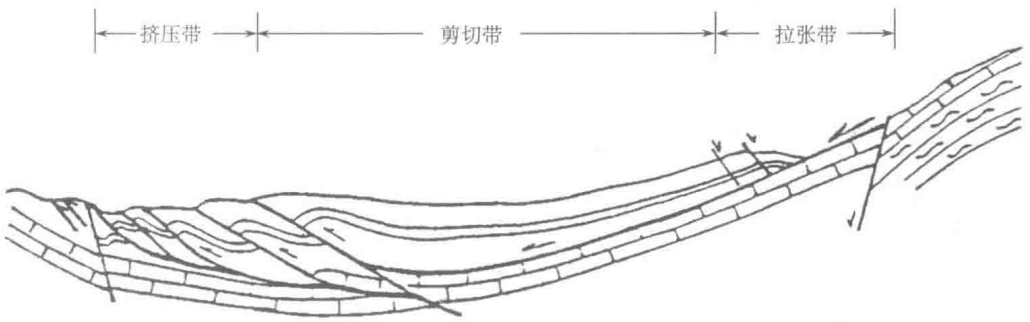


图 1-1 重力滑动构造形成示意图

豫西芦店滑动构造的几何形态十分独特，滑动构造的剖面形状为舟状，中部平缓，两端翘起，并交于边界正断层之上。滑动系统由二叠系至古近系组成，芦店-告成区总体构造形态为不对称的朝阳沟背斜。下伏原地系统为一个不完整的向斜，南翼保留有逆冲断层，而北翼正断层发育，总体上具有北深南浅的箕状断陷性质（图 1-2）。

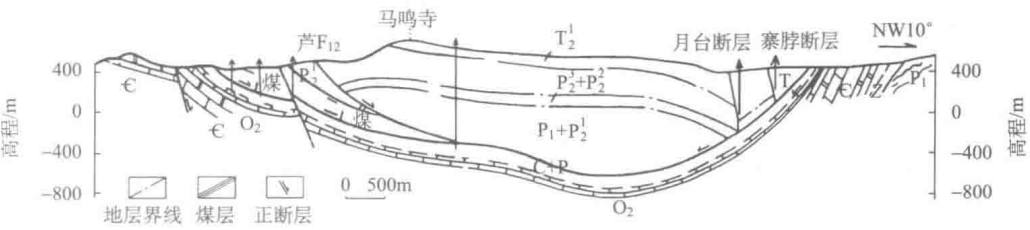


图 1-2 芦店滑动构造勘探线剖面图

芦店滑动构造作为引张作用下形成的包括拉张带、挤压带和剪切带等变形单元的伸展构造组合体，其完整的构造形态和应力分区，使之成为研究应力变质作用的理想场所。鉴于研究区典型的构造与变质特征，本次测试煤样均按构造变形单元分类采集，第一类是张性构造区煤样，采自滑动构造后缘拉张带和以掀斜断块为主要标志的区域伸展构造区[图 1-3（a）]，这类区域主要发育引张机制下形成的具有地层缺失效应的高角度正断层和铲式断层；第二类是剪切变形区煤样，该区以发育缓倾角顺层断层为主要特征[图 1-3（b）]；第三类是前缘挤压带煤样，该带以发育逆冲断层和褶皱构造为主要特征[图 1-3（c）]。