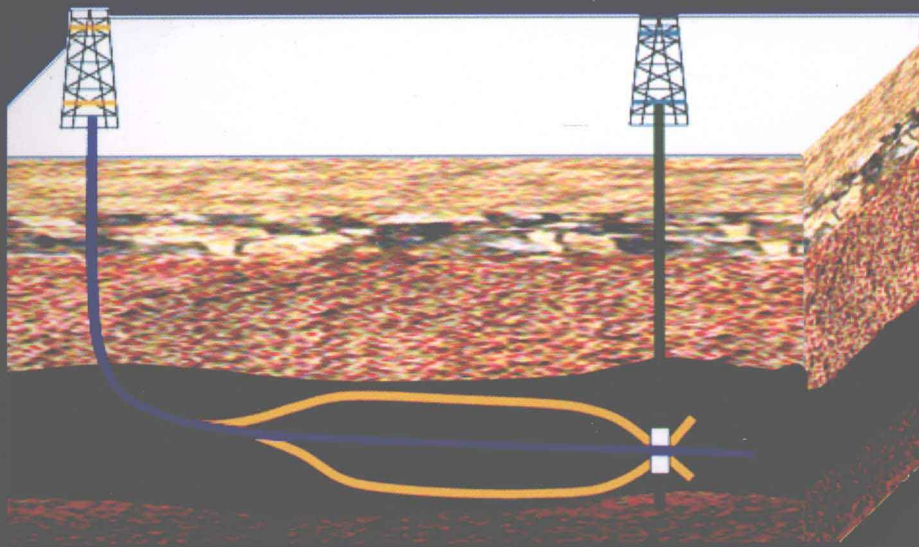




2010年全国煤层气学术研讨会论文集

煤层气勘探开发 理论与技术

主 编 孙粉锦 冯三利 赵庆波 鲜保安 李五忠 叶建平



石油工业出版社

煤层气勘探开发理论与技术

主 编 孙粉锦 冯三利 赵庆波
鲜保安 李五忠 叶建平



石油工业出版社

内 容 提 要

本书收录了2010年全国煤层气学术研讨会论文80篇,内容包括地质理论新认识,煤层气的选区评价和经济评价、煤层气勘探开发适用工艺技术、地面集输技术、煤层气综合利用技术以及我国煤层气开发前景展望等方面的文章。

本书可供从事煤层气勘探、开发、工程等方面的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤层气勘探开发理论与技术/孙粉锦主编.

北京:石油工业出版社,2010.9

ISBN 978-7-5021-7994-6

I. 煤…

II. 孙…

III. ①煤层-地下气化煤气-地质勘探-研究

②煤层-地下气化煤气-资源开发-研究

IV. P618.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第168730号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523539 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:31

字数:770千字

定价:95.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)


版权所有,翻印必究

序

世界很多国家都在研究和开发煤层气,尤以美国显著,2009年煤层气年产量已达到493亿立方米。我国煤层气资源量位居世界第三,为36.8万亿立方米,孕育着多种类型的煤炭资源和煤层气成因类型,煤层气分布极为广泛,成藏类型极其复杂。针对我国煤层气地质特点,经过近20年的探索和勘探实践,现已初步总结了煤层气成藏理论、高产富集规律、开采特征及开发排采技术,并步入产业发展的快车道。2009年地面开采煤层气产量10.17亿立方米,实现商品量5.82亿立方米,利用率达57.3%;矿井下抽采64.5亿立方米,利用率由几年前的19.7%提高到30%;2005年以来,地面开发产量每年约翻一翻,井下抽采每年约增加10亿立方米;2009年百万吨煤死亡率首次小于1.0。现已钻井4000余口,其中定向羽状水平井100余口,发现两个千亿立方米大气田:沁水气田已探明储量1107亿立方米;鄂尔多斯东部气田基本探明1100亿立方米。

为充分利用煤层气有效资源,保护大气环境,遏制瓦斯灾害,中国石油学会石油地质专业委员会和中国煤炭学会煤层气专业委员会,双方多年来友好协作,相互配合,共同举办了一些有关的国际、国内学术活动与交流,定期召开年会,有力促进了煤层气产业化的积极发展。通过行业学会组织来汇集国内外从事煤层气勘探开发与研究的专家及有志之士,相互交流、共同讨论煤层气地质理论、适用技术应用、政策与管理等方面问题,分析研究我国煤层气发展的难点和制约因素,提出发展措施和建议等,形成了跨部门、跨专业、跨学科的学术交流平台。

中国石油学会石油地质专业委员会和中国煤炭学会煤层气专业委员会,确定2010年9月在苏州召开煤层气学术研讨年会,届时将有各方面的代表参加,会议将对煤层气地质理论新认识、煤层气的选区评价和经济评价、煤层气勘探开发适用工艺技术、地面集输技术、煤层气综合利用技术以及国外煤层气发展和我国煤层气开发前景展望等方面进行研讨,以此推动我国煤层气产业的快速发展。为了使与会代表及广大读者能及时了解本次会议内容,特将收到的各位专家论文稿件编辑出版,用最新研究成果满足关心者之急需,限于时间和条件等原因,文集中有不妥之处,望广大读者谅解。



二零一零年九月

中国石油学会石油地质专业委员会
中国煤炭学会煤层气专业委员会

《煤层气勘探开发理论与技术》编委会

主 编:孙粉锦 冯三利 赵庆波 鲜保安

李五忠 叶建平

副主编:李安启 穆福元 田文广 王一兵

孙 斌 房 超 李贵中 鲍清英

编 委:秦 勇 李景明 申瑞臣 胡向志

傅在林 马财林 孟召平 孙晗森

刘贻军 王兴隆 李辛子 尹中山

余维初 张建民 黄 勇 石惠宁

王红霞 张继东 张 义 陈 刚

孙钦平 王 勃 邓 泽 庚 勳

目 录

第一篇 煤层气地质理论与选区评价

- 基于动力学条件的煤层气富集高渗区优选理论与方法 秦 勇 吴财芳 韦重韬等(3)
- 煤层气开发地质学及其研究的内容与方法 孟召平 田永东 李国富(10)
- 煤层含气量校正系数研究 傅雪海 周宝艳 雷 波等(19)
- 我国煤层气选区评价参数标准初步研究 田文广 李五忠 孙 斌(25)
- 基于压汞毛细管压力曲线的煤储层孔隙结构特征研究 孙晗森 罗陶涛(32)
- 煤层气物质平衡方程通式的推导与动态地质储量预测 穆福元(40)
- 煤中残余气含量预测方法研究 邓 泽 宜 伟 李贵中等(48)
- 几种关键压力的控制因素及其对煤层气井产能的影响 许 浩 汤达祯 唐书恒等(53)
- 煤变质作用对煤吸附能力的控制作用机理 赵兴龙 汤达祯 许 浩等(59)
- 高温高压煤层岩心动态污染评价系统的研制与应用 余维初 胡 琼(66)
- 水饱和和煤样三轴力学实验研究 朱宝存 黄 勇 唐书恒等(72)
- 利用测井、气测资料评价煤层含气性研究与应用 李五忠 赵玉红 刘 蔚(78)
- 国内外中煤阶煤层 CO₂ 气体埋存可行性分析 庚 劭 李贵中 杨 泳等(82)
- 黔西比德向斜煤层气的吸附/解吸特征研究 欧 正 吴财芳 姜 伟等(87)
- 沁水盆地不同煤阶煤相渗规律实验和模型研究 申 建 秦 勇 傅雪海等(93)
- 沁水盆地煤层气成藏控气作用研究 王 勃 孙粉锦 李贵中等(99)
- 沁水盆地南部含气饱和度研究 高和群 韦重韬 曹 佳等(107)
- 深部煤层含气性及其地质控因 赵丽娟 秦 勇(112)
- 深部煤层孔渗特征研究现状及展望 杨 松 秦 勇 申 建等(117)
- 云南昭通盆地新近系褐煤地球化学特征 王爱宽 秦 勇 兰凤娟等(122)
- 恩洪向斜煤层重烃浓度异常及其成因探讨 兰凤娟 秦 勇 林玉成等(128)
- 山西柳林地区煤层气储层特征 林 亮 黄晓明 赵玉峰等(135)
- 山西柳林地区煤系地层对比特征 黄晓明 林 亮 王赞维等(141)
- 华北陆块煤层气勘探方向及高效开发潜势 琚宜文 李小诗 卫明明等(147)
- 晋陕蒙地区煤层气资源评价及勘探开发方向 顾娇杨 叶建平 熊德华等(153)
- 鄂尔多斯盆地侏罗系煤层气勘探开发潜力评价 马财林 张铭记 权海奇等(157)
- 大宁—吉县地区煤层气地质特征及富集高产主控因素分析
..... 陈 刚 李五忠 孙 斌(167)
- 山西省沁水煤田煤层气资源量预测及开发潜力 刘 正 张庆辉 王海生(176)
- 沁水盆地柿庄南区块固县地区煤层气资源潜力评价 侯岩波 孙建平 张 健等(184)
- 河南省焦作区块煤层气开发潜力评价及市场前景分析 张文忠 傅小康 贾高龙(189)

黑龙江省煤层气勘探开发前景展望	曲延林	闫伟	高占楼等(194)
黑龙江省东部三江地区煤层气潜力分析	孙斌	杨敏芳	邵龙义等(199)
郟县安良寺镇狮王寺勘查区煤层气浅析	傅在林	雷华友	侯立国等(206)
沁水盆地南部柿庄南区块煤层气勘探开发现状与展望	孙强	王建中	孙建平等(210)
水城矿区煤层气赋存特征及控气因素	王宝文	秦勇	申建等(214)
吐哈盆地低煤阶煤层气成藏条件及勘探思路建议	李贵中	孙粉锦	王勃等(219)
新疆淮南煤田煤层气资源赋存特征及开发条件分析	杨曙光	邵洪文	周梓欣(226)
准噶尔盆地煤层气勘探潜力分析	薛冽	张塞	其其格(231)
准噶尔盆地南缘煤储层特征及有利目标区分析	吴见	叶建平	马银起等(236)
川南煤田煤层气勘探进展与建议			尹中山(242)

第二篇 煤层气开发与工艺技术

国内外煤层气开发技术综述	左景荣	孙晗森	(249)
我国煤层气勘探开发工艺技术展望	刘贻军	李曙光	(254)
中国煤层气开发模式对比及开发技术研究	房超	陈贵峰	孙铭伟(259)
中国石油煤层气钻井技术发展现状研究	申瑞臣	董建辉	乔磊等(266)
煤层气直井开发概要	李景明	巢海燕	聂志宏(275)
煤层气多分支水平井技术在沁水盆地南部的试验和应用	叶建平	石慧宁	(283)
多分支水平井技术在樊庄—郑庄区块应用中存在的问题及改进设想	刘建军	高正虹	刘俊(288)
高陡构造煤层气钻采工艺技术研究	鲜保安	夏柏如	张义等(293)
韩城地区煤层气井空气螺杆定向钻井工艺技术优化	鲍清英	张义	何伟平等(299)
煤层气掏穴井钻井工艺浅析	胡向志	张峰	(304)
煤层气井空气动力造穴应用实践	雷华友	傅在林	(307)
浅谈寄生管欠平衡水平井在煤层气井中的应用	石继峰	胡向志	(312)
大倾角地层煤层气钻井施工中的防斜工艺探讨	胡向志	张峰	(316)
煤层气羽状井欠平衡钻井新技术研究	张义	鲜保安	孙粉锦等(320)
煤层气井固井工艺新技术	王兴隆	刘明宇	宋一男(327)
煤层气注入/压降试井分析中几个问题的探讨	安杰	柳光伟	(330)
韩城地区漏失原因分析及对策	刘明宇	王兴隆	宋一男(335)
三维离散元在煤层水平井井壁稳定的应用	屈平	申瑞臣	杨恒林等(339)
多功能煤层气等温吸附与钻井液污染评价系统的研究与应用	余维初	胡琼	赖晓芹等(346)
煤层气清洁压裂液破胶剂室内研究	王航	刘萍	梁利等(352)
影响煤层气井压裂效果的主要因素分析	赵文秀	秦义	(357)

煤层用黏弹性表面活性剂压裂液适应性评价	管保山 郭丽梅 梁利等(370)
变频控制系统在煤层气电潜泵井上的研究与应用	周帅(375)
多功能柔性排采系统的研究	李晓东 韩修廷 李俊亮等(380)
樊庄煤层气井专用电潜泵排采系统研究	石惠宁 王胜利 梅永贵等(385)
煤层气井小排量举升工艺研究与应用	王丽娜 崔金榜 段宝玉等(390)
樊庄区块及其周边煤层气井产能影响因素分析	吕玉民 汤达祯 许浩等(399)
构造煤类型及其煤层气开发研究	李辛子 龙胜祥 吴群(405)
基于产能变化的煤储层渗透率动态变化定量—半定量表征	陶树 汤达祯 吕玉民(411)
井筒直径对煤层气藏多分支水平井产能和井筒压降的影响	张健 孙建平 侯岩波等(417)
煤层气多分支水平井煤粉形成机理初步认识	白建梅 陈浩 祖世强等(425)
黔西煤层气产能数值模拟	雷波 秦勇 傅雪海等(432)
沁南地区典型煤层气井历史拟合及储层压力动态变化	邹明俊 韦重韬 李来成等(437)

第三篇 煤层气地面工程、产业政策、煤矿瓦斯治理

煤层气田地面集输低成本战略的探讨	陈仕林(445)
煤层气钻井井场信息远程传输系统	冯坤宁 秦俭(450)
三甘醇脱水装置在山西沁水盆地煤层气处理中心的应用	王红霞 许茜 李娜等(455)
煤层气产业发展比较研究	李昕(461)
中国煤层气产业现状及政策分析	王一兵 王金友 赵娜等(467)
分源预测法应用于厚煤层瓦斯涌出量预测	罗跃 朱炎铭 王怀勳等(476)
阜新采动区混合煤层气井部署、实施和抽采技术研究	张建民 贾耀惠 夏艳东(482)

第一篇

煤层气地质理论与选区评价

基于动力学条件的煤层气富集高渗区优选理论与方法

秦 勇 吴财芳 韦重韬 傅雪海 姜 波

(中国矿业大学资源与地球科学学院,煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室,徐州 221116)

摘要: 根据对煤层气成藏效应与聚散机制的分析和理解,建立了以煤层气成藏效应三元判别模式和能量聚散模式为核心的煤层气富集高渗区优选动力学方法。在此基础上,分析了沁水盆地、鄂尔多斯盆地东缘和织纳煤田的煤层能量条件,评价了煤层气富集高渗区带发育特点及其分布。

关键词: 煤层气 动力学条件 成藏效应 沁水盆地 鄂尔多斯盆地 织纳煤田 地质选区

从 20 世纪 70 年代末到 21 世纪初,煤层气地质选区理论与方法先后经历了单因素机械叠加和多因素递阶分析两个发展阶段^[1,2]。但是,“表象 + 表象”的描述与单因素机械叠加的方式尽管有其方便直观、简洁易明的优点,但依然停留在“只知其然,不知其所以然”的认识阶段,导致国内大量选区未达到预想效果。煤层气成藏效应是含气性、渗透性、储层能势三者关系的耦合体现,受控于各类动力学条件之间的匹配关系,地质选择过程则是其中的核心问题。为了解这一问题进而发展更为接近于实际的优选方法,作者以动力学条件分析为基础进行了长达 10 年的探讨,建立了集表象动力条件叠合、成藏效应分析、能量聚散判识为一体的煤层气富集高渗区优选理论与方法,并对典型盆地进行了系统剖析与综合评价。

1 有利区优选的动力学原理

1.1 煤层气成藏过程是一个能量动态平衡过程

在含煤层气地质系统中,煤层气的富集成藏依赖于地层压力系统的逐步强化,而煤层气保存的基本地质条件是系统内部压力达到动态平衡。换言之,煤层气成藏过程就是压力系统逐渐调整的地质过程,含气系统就是一个能量动态平衡系统;煤层气成藏的过程,实质上是地质动能向含气系统静能转化的动态平衡过程。

在系统内部,煤层气的成藏过程和破坏过程,都是围绕着地层压力场和弹性能量场(系统内能)的动态平衡进行的。在成藏过程中,宏观动力学因素作用于煤层,使煤层中微观动力学条件之间的耦合关系不断发生变化,这种动态平衡变化特征体现为固、液、气三相物质弹性能综合而成的煤层弹性能,并控制着煤层气的成藏效应。因此,煤层弹性能在本质上是联系煤层气成藏动力学条件与成藏效应之间的纽带,也是解译煤层气成藏动力学条件耦合特征的关键。

作者简介:秦勇,1957 年生,博士,教授,博士生导师,从事煤与煤层气地质教学与科研工作。E-mail: yongqin@cumt.edu.cn。

煤层弹性能由三部分能量构成,即煤基块弹性能、水体弹性能和气体弹性能,三者严格受控于构造应力能、热应力能和地下水动力能。煤基块弹性能受到地应力、温度、煤岩弹性模量、泊松比等的影响,与构造—埋藏史(埋深)和受热—生气史(煤级)密切相关。水体弹性能主要受流体压力、水压缩系数、热膨胀系数影响,流体势也是水体弹性能的一个组成部分,同样受到埋深、流体压力、流体密度的控制。气体弹性能受流体压力、压缩系数、热膨胀系数、煤层温度以及煤层含气量的影响。当地质选择过程使煤层弹性能量场逐渐增高时,煤层气就会相对富集。反之,煤层气将会逸散,即含煤层气系统被破坏的过程就是消耗系统中煤层弹性能的过程。

煤层气成藏过程的实现,依赖于含煤层气系统的有形载体,载体核心正是包括煤基块、地层水和煤层气在内的煤储层。进一步来看,煤层气成藏效应是煤层中固—液—气三相物质在动能作用下耦合关系的具体体现。煤基块的固体弹性能、地层水的液体弹性能和煤层气的气体弹性能三者之间的耦合关系或互动过程,控制着各类宏观地质动力能的作用结果;其能量动态平衡的效应,表现为煤层气的各种成藏类型。

换言之,要阐释动力条件对煤层气成藏作用的耦合控藏效应和实质,必须先要阐明煤层气成藏能量有效传递的显现特征、动力学因素之间组合关系及其地质选择过程,其重点在于科学描述有效压力系统中能量的传递、汇聚和分配方式。

1.2 煤层气成藏效应及其地质选择过程

进一步来说,煤层气成藏效应是含气性、渗透性、储层能势三者关系的耦合体现,受控于各类动力学条件之间的匹配关系,地质选择过程是其中的核心科学问题,直接关系到煤层气有利区带科学预测和勘探开发战略部署。

成藏的前提是煤层气富集,宏观上受沉积埋藏史、构造演化史、煤化作用史、地下水活动史和有机质生气史“五史”配置关系的控制,其实质是构造应力场、热力场、流体化学场、流体动力场“四场”互动的过程。配置关系的地质选择过程不同,成藏宏观动力学机制存在极大差异,必然形成具有不同开发潜力的煤层气“藏”。

富集的基础是要有合适的储集条件,产出的基础是要有一定的渗流通道与驱动能势,煤储层储集性、渗透性和可驱动性“三性”协同发展的关系,受煤结构演变、煤层孔隙—裂隙系统的发生与发展、煤层气吸附状态、煤基质吸附能力、储层压力系统、流体成分与状态变化等控制,体现为煤层气成藏的微观动力学机理。

我国晚古生代以来构造运动对含煤盆地的多期叠加与改造,导致煤层气成藏条件异常复杂。反演“五史配置”控制下的煤层气富集地质选择历程,揭示“三性协同”作用下煤储层储集性、吸附性、渗透性的发展演化特征,耦合分析宏观/微观动力学机理对成藏效应的控制作用,是阐明煤层气成藏机理、类型和分布规律的必要基础。

从结果来看,动力条件是煤层气成藏的根源,成藏效应是煤层气富集高产的表象;就过程而言,动力条件却只是煤层气成藏的表象,成藏效应却是地层能量动态平衡的结果。连接表象与效应的传统做法,是将单因素机械地叠加。这种方法固然有其简便易懂的优点,但实质上存在三方面不可避免的弊端:其一,“表象+表象”仍然是表象,只知其然,不知其所以然;其二,在单因素机械叠加过程中,有利或不利因素常常不能完全重合,不同因素指示的结果往往发生矛盾;其三,单因素机械叠加类似于“黑箱”操作,只知其输入和输出,不知其作用过程,缺乏连接原因与结果的纽带,导致所谓的“动力”条件虚幻化。

真正的耦合方法,却要求通过对作用过程或科学内涵的深刻理解来求得因果关系。就煤层气成藏作用而言,只有通过能量动态平衡过程这一纽带才能将地质动力条件与成藏效应耦合起来,并通过分析能量动态平衡系统及其地质选择过程来解决“煤层气成藏动力条件与聚散机制”这一科学问题。为此,通过能量动态平衡系统来耦合分析动力条件控藏效应的科学含义在于三个方面:其一,阐明表象,即通过对现象的探讨阐明各类单因素动力条件对煤层气成藏的控制规律;其二,揭示实质,即通过对能量转化与平衡过程的研究深入探讨动力学因素的控藏机制;其三,建立方法,即通过对科学内涵的理解建立基于成藏过程的煤层气富集高渗区带科学预测方法。

2 优选方法体系

基于基本原理和关键参数的分析,结合研究区具体的煤层气地质条件,本项目建立了基于动力条件的煤层气有利区带评价方法,其评价流程为:

首先,从岩石力学、渗流力学、物理化学等的经典定律出发,通过对煤储层弹性能地质影响因素的系统分析,分别建立煤基块弹性能、水体弹性能、气体弹性能和综合弹性能的地质—数学模型。

第二,基于“五史配置”、“四场互动”表象(宏观)动力学条件的分析,结合煤岩体多相介质渗透率物理模拟和岩石力学性质测试成果,开展煤层气地质演化动态平衡史数值模拟,从而取得不同地质时期煤层弹性力学性质、含气性、渗透性、储层压力等内在(微观)动力学参数。

第三,将上述内在(微观)动力学参数带入弹性能数学模型,分别求得不同地质历史时期的煤基块弹性能、水体弹性能、气体弹性能和综合弹性能,并编制相应的弹性能地质历史曲线和平面等值线图件,从而将表象/内在动力学条件耦合起来。

第四,根据上述阶段评价成果,建立由煤层气压力系统发育系数、煤层裂隙开合系数、煤层裂隙发育系数构成的煤层气成藏效应三元判识模式,由此将成藏效应划分为不同类型。

最后,根据研究区具体地质条件厘定三元判识标志分割值,建立煤层气成藏效应类型分类系统,编绘研究区不同地质历史时期的三元判识参数平面分布图件,分析煤层弹性能区域分布规律及其地质演化历史,进而评价煤层气富集高渗有利区带发育所需的动力条件,预测煤层气有利区带的特征和区域分布规律。

3 关键参数求取

基于动力条件的煤层气有利区带优选方法涉及三类关键技术,一是煤层气地质演化动态平衡历史数值模拟,二为能量动态平衡系统,三是煤层气成藏效应分析。

3.1 煤层气地质演化历史参数及其数值模拟

在构造演化史、煤层埋藏史和热场演化史的控制之下,煤层气地质演化历程包括煤中有机质生气、煤层气在煤层中赋存和从煤层中逸散三个主要过程。准确定量描述这三个过程,是建立煤层气地质演化史模型的关键,也是深刻认识煤层气成藏过程的重要技术手段。鉴于此,本课题自主研发了国际上第一套用于煤层气地质演化历史数值模拟的专用软件,2006年获国家软件著作权(登记号:2006SR18157)。

基于质量守恒原理,建立了煤层气聚散历史动态平衡动力学模型。该模型包括五个子模型:煤层气聚散子模型、煤中有机质成熟生烃子模型、煤层压力和煤层气赋存子模型、煤层气逸

散子模型、基本参数子模型。在此基础上,根据软件功能,对软件结构进行设计,包括如下主要模块:基础数据读取模块,读取数据库中煤层和岩层地质参数;参数计算模块,计算地质历史时期煤层厚度、孔隙度、埋深、地温等参数;有机质成熟生烃计算模块,计算地质历史时期成熟度、煤层生气量等参数;储层压力计算模块,计算地质历史时期各煤层储层压力;扩散散失计算模块,利用数值方法解算扩散方程,计算扩散散失量;动态平衡模块,利用物质平衡原理计算煤储层中游离气和吸附气量、渗流散失量和盖层突破散失量;数据生成和显示模块,将计算结果写入硬盘,在屏幕上动态显示计算结果。

该软件是在 Windows 系统下运行的可视化软件,具有如下功能:强大的计算功能,对模拟研究区各个模拟点多达九个煤层进行模拟计算;模拟计算过程中,按照一定的地质历史时间间隔,计算并记录煤层埋深、镜质组反射率、累计生气量、煤层含气量、煤储层压力、累计扩散散失量、累计渗流散失量、累计突破散失量等数据;简洁实用的数据结构,能方便地利用结果数据绘制各种演化历史曲线图,通过简单的操作可提取用于绘制平面等值线图的数据;可靠的数据接口,利用 ODBC 技术编制的 Access 数据库与 VC 的连接程序,可准确地读取基础数据进行模拟计算;作为基础数据载体的 Access 数据库,可方便地进行基础数据录入和编辑。

通过数值模拟,求取不同地质历史时期的煤级、煤层含气量、煤储层压力、煤储层渗透率等关键参数,一方面为定量了解煤层气地质演化历史提供科学依据,另一方面为进一步计算煤基块弹性自调节效应、煤储层弹性能、煤层气成藏效应三元判识参数等提供基础依据,为煤层气成藏动力学研究提供关键支持。

3.2 煤层弹性能及其数学模型

关键参数包括三个组成部分,依次为煤层弹性能、煤层气有效压力与运移系统和煤层气能量聚散模式。

煤层弹性能包括煤基块弹性能、水体弹性能和气体弹性能,其总体关系式表达为

$$E_{\text{总}} = E_{\text{煤}} + E_{\text{水}} + E_{\text{气}}$$

其中,煤基块弹性能为

$$E_{\text{煤}} = \frac{C_v}{2} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]$$

式中 C_v ——煤基块体积压缩系数;

ν ——泊松比;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——三轴应力。

水体弹性能为

$$E_{\text{水}} = RT_0\varphi \left[\frac{p_1}{p_0} (1 + \alpha\Delta T) (1 - \beta\Delta p) \right]$$

式中 p_1 ——变化后的流体压力;

p_0 ——原始水体压力;

T_0 ——原始水体温度;

α ——初始时刻水的热膨胀系数;

β ——初始时刻水的压缩系数;

ΔT ——温度变化量;

Δp ——压力变化量;

R ——摩尔气体常数,其值为 $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

φ —— 1m^3 煤基块中束缚水饱和度。

气体弹性能包括游离态和吸附态气体两部分,即

$$E_{\text{气}} = E_{\text{游}} + E_{\text{吸}} = E_{\text{游}} \left[1 + \frac{a}{v} (\sqrt{p_0} - \sqrt{p}) \right]$$

式中 α ——温度从 T_0 到 T 时甲烷的热膨胀系数。

其中,游离态甲烷弹性能为

$$E_{\text{游}} = \frac{\beta R T_0 \varphi (1 + \alpha \Delta T) (1 - \beta \Delta p)}{k - 1} \frac{p}{p_0} \frac{\Delta T}{T}$$

式中 β ——压力从 p_0 到 p 时甲烷的压缩系数;

T ——气体状态变化后的环境温度;

p_0 ——气体状态变化前的气体压力;

p ——气体状态变化后的气体压力;

ΔT —— $T - T_0$, 温度变化量;

Δp —— $p - p_0$, 压力变化量;

k —— $\frac{C_p}{C_v}$, 多变指数,其中 C_p 为甲烷气体定压热容(甲烷的 $k = 1.30$);

φ —— 1m^3 煤基块中的游离气含量。

吸附态甲烷弹性能为

$$E_{\text{吸}} = \int_p^{p_0} E_{\text{游}} \frac{a}{2v\sqrt{p}} dp = E_{\text{游}} \frac{a}{v} (\sqrt{p_0} - \sqrt{p})$$

式中 p ——煤储层流体压力;

a ——甲烷含量系数,其值为 $3.16 \times 10^{-3} \text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{Pa}^{0.5})$;

v ——标准状态下甲烷的摩尔体积, $22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{mol}$;

$E_{\text{游}}$ ——游离态甲烷弹性能。

3.3 煤层气成藏效应三元判别模式

根据对煤层弹性成藏贡献及其地质演化特征的分析,进一步建立了煤层气成藏效应三元判别模式。三元参数的定量表达式分别为:

煤层压力系统发育系数, $\xi_2 = E_{\text{气}}/E_{\text{总}}$, 指数越高, 气体弹性能在综合弹性能中所占比重越大, 在忽略温度变化的情况下表明煤层压力就越大;

煤层裂隙发育系数, $\xi_1 = E_{\text{煤}}/E_{\text{破}}$, $E_{\text{破}}$ 为煤基块破裂能, 通过物理模拟实验求得, 反映煤层裂隙发育的能力;

煤层裂隙开合系数 Δ , 即煤基块弹性自调节效应, 体现出煤层裂隙系统的开合程度。

利用三元判别模式, 进一步建立了煤层气有效压力系统和煤层气有效运移系统两个组合参数。有效压力系统可用压力系统发育系数 ξ_2 来衡量, 系指在表象动力条件作用下, 构造应力、上覆地层重力、热应力、地下水动力等共同构成的煤层压力体系。指数越高, 有效压力系统发育就越好, 对煤层气成藏更为有利, 反之则不利于煤层气成藏。煤层气有效运移系统采用裂

隙开合系数 Δ 和裂隙发育系数 ξ_1 两个参数加以衡量,指示煤层允许煤层气扩散渗流或导流的能力。

根据煤层气能量平衡系统三元判识标志,将煤层气成藏效应分为有利、较有利、不利三个级别,三个级别的组合构成 27 种成藏效应类型。进一步排除低 ξ_1 、低 Δ 和低 ξ_2 三种不利于煤层气成藏的情况,有利或较有利于煤层气成藏的条件组合只有 8 种类型。这 8 种成藏类型的动力学特征,可通过煤层气运移系统—压力系统的有效性反映出来。

4 典型盆地实例分析

4.1 沁水盆地煤层气富集高渗区带

根据动力学条件的叠合配置特征与煤层气富集高渗条件之间的关系,从表象动力条件选择过程的角度,认为沁水盆地煤层气富集高渗最有利地带发育在南部晋城新区—沁源一线,呈 NNW 向条带状展布,宽数十公里。

耦合分析三元参数,沁水盆地存在煤层气有效压力系统—有效运移系统和较有效压力系统—较有效运移系统两种类型。第一种类型仅分布在盆地南部大宁—潘庄—樊庄地区,具有高主应力差、地下水滞流封闭以及浅埋深的特点,煤层裂隙发育程度、开合程度、压力系统均发育良好,属于典型的有效压力系统—有效运移系统组合类型。第二种类型分布相对较广,在南部的沁水—郑庄—樊庄以及中部西段的沁源—安泽之间均有发育,具有中主应力差、地下水缓流封闭、中等埋深的特点,煤层裂隙发育程度和开合程度、压力系统的发育程度都较好,属于较有效压力系统—较有效运移系统组合。

结合能量系统不同演化阶段能量的聚散特征,提炼出两种煤层气能量聚散模式,即大宁—潘庄—樊庄模式和沁源—安泽模式。其中,大宁—潘庄—樊庄模式分布于盆地南部,存在有利于煤层气富集高渗的动力条件;沁源—安泽模式位于盆地南部的沁水—郑庄—樊庄北及中部西段的沁源—安泽一带,煤层气富集高渗的动力条件较为有利。两种模式在初期阶段的储层能量差别不大,皆处于聚集状态;不同之处在于,大宁—潘庄—樊庄模式中,受埋深影响的煤基块弹性能和受煤级影响的气体弹性能要略强于沁源—沁水模式。在关键阶段,两者的储层能量皆处于“平衡—聚集—失稳—放散”的循环状态;不同之处在于,受储层弹性能控制,前者的有效运移系统和有效压力系统要好于后者。现今阶段,两者的储层能量皆处于保持状态;不同的是,前者偏于封闭体系,保存条件好于后者。

综合分析,可将盆地内存在煤层气成藏有利动力学条件的区带分为三个层次:第一层次为最有利区带,位于阳城地区,包括潘庄、郑庄、大宁、成庄等区块;第二层次为有利区带,位于沁源—安泽之间地区;第三层次是可能有利区带,包括寿阳和长子—屯留—丰宜—中村两个区带。目前,第一层次区带的前景已得到煤层气商业性开发成果的证实与验证,已进入规模性商业开发阶段;第二层次区带只有少量煤层气勘探工作,建议作为盆地内下一步煤层气开发试验的重点区带;第三层次区带已进行了长期的煤层气开发试验,但效果不甚理想,建议加强煤层气成藏地质条件精细研究,开展煤层气开发动态地质条件与开发技术研究。

4.2 鄂尔多斯盆地煤层气富集高渗区带

基于单因素叠合分析,研究区动力条件与煤层气成藏效应之间关系为:其一,三种有利因素耦合的区域位于大宁—吉县—蒲县—隰县之间地带,且发育地下水等势面“洼地”与高矿化度中心,即该区域存在煤层气富集高渗的动力条件;其二,前两种因素之一与后一种因素分别

有利配置的地带出现在吴堡—石楼之间地区,即研究区北段煤层气富集,且可能存在高渗的动力条件。

耦合分析三元参数,本区存在煤层气有效压力系统—较有效运移系统和较有效压力系统—较有效运移系统两种类型。其中:前一类型只发育在东南部的蒲县附近,存在有利于煤层气富集、较有利于煤层高渗的动力条件;后一种类型分布在南部的乡宁和吉县以及北部的柳林和吴堡附近,可能存在煤层气富集高渗的动力条件;中部地区煤层压力系统和煤层气运移系统都发育较差,动力条件既不利于煤层气富集,也不利于煤层渗透性的发展。

综合分析能量聚散模式评价结果,区内煤层气富集高渗动力条件具有“南北较好,中部较差,其中南部最好;东部较好,西部较差,其中东南部最好”的分布规律。具体表现为:在南部东段的隰县—蒲县—乡宁—大宁之间地区,能量系统较有利煤层气富集高渗;在北部东段的柳林一带,可能具备煤层气富集高渗的能量聚集条件;在中部的永和—石楼一带,基本上不存在煤层气富集高渗的动力条件。

综合分析认为:东南部的隰县—蒲县—吉县—大宁一带,煤层气富集高渗动力条件在区内最为有利,但仅相当于沁水盆地北部的阳泉—寿阳地区,与沁水盆地南部的沁水—郑庄—樊庄地区或沁源—安泽地区也有一定相似性;在北部东段的柳林南附近,可能存在有利于煤层气富集高渗的动力学条件。建议进一步加强该区与沁水盆地相似动力条件地区之间的精细对比研究,分析两个地区煤层气地质条件的特殊性和开采技术的针对性。

4.3 织纳煤田煤层气富集高渗区带

织纳煤田位于贵州省西部,是我国储量最大的无烟煤赋存区。煤田总体上是一个复式向斜残留盆地,主要发育 NW 向和 NE 向两组构造线,由比德、加戛、水公河、白泥菁、三塘、阿弓、珠藏等向斜构成。含煤地层为上二叠统龙潭组和长兴组,发育煤层 25~57 层,煤层总厚 20~40m;可采煤层 3~17 层,可采总厚 9.4~23.35m;以无烟煤为主,在盆地西缘有贫煤和瘦煤呈 NW 向条带状分布^[3]。

织纳煤田含煤地层富水性普遍较弱,与上覆、下伏含水层一般缺乏水力联系。煤层含气量普遍较高,大于 24m³/t 的地带主要分布于西部的比德—三塘盆地深部,12~24m³/t 之间的地带广泛分布在煤田南部、西部和北部。根据测井曲线解释,西北部的的水公河向斜、中西部的三塘向斜以及东部的肥三勘探区煤层结构完整,煤层渗透率可能相对较高。

煤层气成藏动力学分析显示:煤层气体弹性能对煤层能量系统的贡献率在 80% 以上,煤基块弹性相对较低,总体上具有煤层气富集高渗的能量条件,且西南部和西北部更好;与沁水盆地南部相比,织纳煤田煤层渗透率动力条件可能相对较好,但煤层流体动力条件可能稍有逊色;最有利于煤层气地面开发的地层能量条件存在于煤田西部,尤其是比德向斜南段东北翼、阿弓向斜南段、珠藏向斜以及水公河向斜南段地区。

参考文献

- [1] 秦勇. 中国煤层气地质研究进展与述评. 高校地质学报, 2003, 9(3): 339~358
- [2] 秦勇, 朱旺喜. 中国煤层气产业发展所面临的若干科学问题. 中国科学基金, 2006, (3): 148~152
- [3] 徐彬彬, 何明德编. 贵州煤田地质. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002, 79