

# 煤层气 地面开发决策系统 技术与应用

倪小明 王延斌 宋金星 著

Technology and Application of Coalbed Methane  
Ground Development Decision System



化学工业出版社

# 煤层气地面开发决策 系统技术与应用

倪小明 王延斌 宋金星 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书以煤层气地面勘探开发的“选区评价—井型选择—储层改造—排采工艺”等关键技术为主线,系统分析了这些关键工艺技术实施过程中对煤储层导流能力的正、负效应,构建了相应的数理模型,提出了相应的技术方案,借助 Visual Basic、C#、SQL Server 2000、MapInfo 等程序语言和开发平台,集成了这些技术方案,研发了煤层气地面开发决策系统。全书共分七章,包括绪论、煤层气地面开发决策系统设计、煤层气有利区块优选子系统、煤层气井型选择子系统、煤层气储层改造工艺技术、煤层气储层改造优选子系统的开发与应用、煤层气排采控制决策子系统等。

本书可供从事煤层气地质、勘探开发和利用领域的研究人员、工程技术人员和管理人员使用,也可作为能源地质领域的高年级本科生、研究生的教学参考书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

煤层气地面开发决策系统技术与应用/倪小明,王延斌,宋金星著. —北京:化学工业出版社,2014.1  
ISBN 978-7-122-18931-8

I. ①煤… II. ①倪…②王…③宋… III. ①煤层-地下气化煤气-资源开发-决策系统 IV. ①P618.110.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 265126 号

责任编辑:窦臻

文字编辑:刘砚哲

责任校对:蒋宇

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张20¼ 字数414千字 2013年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:59.00 元

版权所有 违者必究

# 序

煤层气与煤炭的密切关系以及对煤炭生产的重要影响，多年来一直受到各煤炭生产国的广泛关注。但直到美国形成了新兴煤层气产业后，人们才逐渐完成了其从“灾害气体”到“优质能源”的认识转变并积极投入到煤层气勘探开发的重要实践中。1989年原能源部召开“第一次全国煤层气研讨会”，拉开了我国煤层气勘探开发的序幕。

我国煤层气的发展经历了“消化吸收美国低、中煤阶基础理论”——“有序的煤层气勘探”——“拓展高煤阶基础理论和开发技术”——“基础理论、煤层气开发常规技术实施与新技术研发并进”等几个阶段，这其中有成功的经验，更有失败的教训。为了缓解能源紧张、从根源上有效防治瓦斯，国家制订了煤层气（煤矿瓦斯）开发利用“十二五”规划，规划到2015年，煤层气（煤矿瓦斯）产量实现300亿立方米的发展目标（其中地面抽采160亿立方米，井下瓦斯抽采140亿立方米）。2012年，全国煤层气（煤矿瓦斯）产量仅126亿立方米，其中地面抽采25.7亿立方米，井下瓦斯抽采量100.3亿立方米，与国家发展目标有一定差距。井下瓦斯抽采量由于受到井下工作面长度、宽度、数量等客观条件的限制，同时又要兼顾煤矿开采及煤矿安全，提升的空间相对较小；地面煤层气抽采量不受井下开采场地、瓦斯治理等方面的限制，产气总量提升空间很大。要实现既定的发展目标，除了积极投身于煤层气钻完井工程外，更重要的是充分总结先期成功的经验和失败的教训，精细刻画已经投产井后期的工艺技术和即将开始施工井的工程工艺方法，使每一口井的产气潜力发挥到极致。

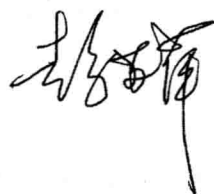
目前，全国煤层气井的单井平均产气量从2007年的 $476\text{m}^3/\text{d}$ 增加到2010年的 $838\text{m}^3/\text{d}$ ，2011年单井产气量约为 $815\text{m}^3/\text{d}$ ，出现下降的趋势。究其原因，除了新增井未达到产气高峰等客观条件外，另一个重要的原因在于未充分发挥已投产井的产气能力，使地质与工程未较好地匹配。我国经过30余年的煤层气地面开发，积累了海量的地质、勘探开发原始数据信息，如何把目前的勘探开发积累的海量数据进行归总，并积极分析、揭示其潜在的特征和动态变化规律，对于高效、合理地进行后期工程的操作意义重大。

《煤层气地面开发决策系统技术与应用》正是基于此种状况，既考虑煤层气地面开发的特殊性、系统性，又重视与软件工程的有机结合，是集专业理论与系统开发于一体的学术专著。作者以煤层气勘探开发工艺流程的关键环节为主线，系统分析了关键工程工艺对产能的影响，构建了包括有利区块优选、井型选择、储层改造工艺方法、排采控制等在内的数理模型及评价体系，借助C#程序设计语言、GIS

开发平台，开发了集有利区块优选、井型选择、储层改造、排采控制于一体的煤层气勘探开发决策系统。

该书立足于我国特殊的煤储层地质条件，与目前的开发工艺技术紧密结合，通过输入参数，得出一些具有工程实践指导意义的结论。内容丰富，数据翔实，深信这本书的出版对我国煤层气的勘探开发和深入研究将起到积极的推动作用，对从事煤层气地质及勘探开发的科技工作者及现场工作人员具有很高的参考价值。

中国工程院院士



2013年6月

# 前言

我国经过多年的煤层气基础理论与勘探开发实践,逐渐形成了“地震勘探—选区评价—钻井取心—分析化验—储层改造—单井、井网试采—产能数值模拟—经济评价—滚动开发”的煤层气开发的一般工艺技術流程。但煤储层本身特征的多样性、地质条件的复杂性、赋存环境的差异,都决定了煤层气的开发需要在遵循煤储层特征、地质条件、赋存环境等规律基础上,找到与之相匹配的开发工艺技术。因此需要对每一个工程环节进行精细刻画。

煤层气有利区块优选是进行精细刻画的第一步。我国煤层气工作者在借鉴美国煤层气有利区块优选方法的基础上,形成了“五指标优选法”、“阶梯优选法”、“BP神经网络法”、“多层次模糊综合评价法”等评价方法。但对于每种评价方法的优缺点及适用性,却不能给出较正确的回答。基于此,笔者以煤层气选区评价的理论为基础,系统总结了目前有利区块优选常用方法的基本原理、评价体系的构建方法、评价方法的特点和适用性,借助地理信息系统(Geographic Information System,简称GIS)开发平台,构建了煤层气有利区块优选子系统。该系统不仅提高了区块评价工作的效率,而且能根据不同的开发阶段,选择不同的评价方法进行评价,评价的方向性更强。

煤储层特征、地质条件的差异性及地形、地理位置、交通等客观条件的限制决定了开发时井型选择的多样性。如何针对不同的储层、地质及环境条件,找到既经济又有效的开发井型是煤层气开发精细刻画的第二步。为了快速、经济、合理、有效地开发出煤层气,我国煤层气工作者在借鉴美国、澳大利亚、英国等国外开发成功的井型和常规油气开发井型基础上,从最初的“裸眼洞穴井”逐步发展到“垂直压裂井”、“水平井”、“丛式井”、“U型井”等多种井型。目前对从这些众多的井型中找到较适合于特定储层、地质等条件的井型的选择方法更多依赖于现场的经验,主观性及随意性较大。为了使选择结果更接近客观事实,笔者在系统分析垂直井、水平井、J型井等井型技术特点、对比其差异性的基础上,构建了井型选择评价指标体系,借助GIS开发平台,初步开发了煤层气井型选择子系统,一定程度上减少了井型选择的主观性和盲目性。

我国煤储层普遍具有低渗的特点。要获得具有工业性的气流,对煤储层的改造必不可少,而且非常重要。我国煤层气工作者在借鉴美国、澳大利亚等国外储层改造工艺技术的基础上,从最初的“裸眼洞穴储层改造技术”发展到目前的“活性水压裂”、“胍胶压裂”、“氮气泡沫压裂”、“二氧化碳泡沫压裂”、“限流压裂”等储层改造工艺技术。不同的煤储层特征、地质条件等,决定了需要采取不同的储层改造

措施。即使同一地区,选择同一种储层改造工艺技术,储层或地质的细微差异可能决定了不同的泵注参数,最终都影响着产气效果。如何针对不同地区的特点,选择出与之相匹配的储层改造工艺是减少投资、提高效率的重要保障。如何针对同一地区,在对储层精细描述的基础上,制定出最优的泵注参数则是提高煤层气井产气量的关键之一。目前煤层气井的压裂设计多数基于现场经验或国外的压裂模拟软件,国外储层与国内储层特征的明显差异决定了模拟结果与实际结果偏差较大。同一地区,同一种压裂液采取的几乎是相近的压裂工艺技术,压裂效果大打折扣。为了使压裂工艺体现“一井一策”的技术特点,笔者充分考虑煤储层横向和纵向上的差异性,分别进行了单一煤层、煤层与围岩、气体增能压裂工艺技术和水平井压裂工艺技术方面理论的探讨,提出了不同储层、地质条件下的最优泵注参数,为不同储层地质条件下储层改造工艺优化提供了理论依据。并介绍了借助C#程序语言,开发的煤层气储层改造系统,为不同地质、储层条件下压裂工艺技术选择及泵注参数优化提供了指导。

煤储层低渗、低强度的特点决定了排采过程中储层对应力十分敏感。作者立足于煤层气排采过程中煤储层导流能力变化的主控因素,根据煤储层原始渗透率、改造后渗透率及围岩含水层与煤层的补给情况,划分了排采储层类型。根据不同排采储层类型特点,重新划分了不同排采储层类型下的排采阶段。系统分析了不同情况下煤层气垂直井的排采特征,提出了相应的排采工作制度。借助开发工具,初步开发出煤层气垂直井排采控制系统,使排采工作制度的制定有据可依。

本书撰写工作的分工如下:倪小明负责第四章至第六章,王延斌负责前言及第七章,宋金星、倪小明负责第一章至第三章,全书由王延斌教授统一审核定稿。

中国工程院院士彭苏萍欣然为本书作序。与本书内容相关的研究工作得到了中国矿业大学秦勇教授、姜波教授、韦重韬教授、杨永国教授、傅雪海教授、桑树勋教授、朱炎铭教授、吴财芳教授、陈玉华老师、申建老师、杨兆彪老师,中国地质大学(北京)汤达祯教授、刘大锰教授、唐书恒教授、黄文辉教授,姚艳斌副教授、许浩副教授,煤炭科学研究总院西安研究院张群教授,中国石油大学张遂安教授,中国地质大学(武汉)王生维教授,中联煤层气有限责任公司吴建光教授级高工、叶建平教授级高工,北京奥瑞安能源技术有限公司杨陆武教授级高工,北京九尊能源技术开发有限公司李玉魁教授级高工,山西蓝焰煤层气集团有限责任公司王保玉教授级高工、田永东教授级高工,晋城煤业集团煤层气产业发展局李国富教授级高工,中国矿业大学(北京)邵龙义教授、孟召平教授的悉心指导和帮助;河南理工大学的景国勋教授、张子敏教授、苏现波教授、勾攀峰教授、魏平儒教授、李化敏教授、郝吉生教授、曹运兴教授、张玉贵教授、潘结南教授、张小东副教授、林晓英副教授、郭红玉副教授、刘晓老师对本书的编写提出了许多宝贵意见;硕士研究生陈鹏、毕科柯、林然等在计算机编程、实验室分析和现场测试等方面做了大量的工作,在此一并致以衷心感谢!笔者借鉴了大量国内外参考文献,借此机会对

这些文献的作者表示感谢。

本书由油气重大专项基金“煤层气开发动态评价模型与软件系统”（编号：2011ZX05034-005）、油气重大专项基金“深煤层 CO<sub>2</sub> 注入置换甲烷技术及装备研究”（编号：2011ZX05042-003）、河南省教育厅自然基金项目“煤层气勘探信息系统研究”（编号：12B440003）和河南理工大学杰出青年基金项目（编号 J2013-03）共同资助。

煤层气地面开发决策系统是集煤层气有利区块优选、井型选择、储层改造工艺、排采控制于一体的。作者试图立足地质条件，与实际开发工艺有机结合，充分发挥计算机的作用，得出一些对现场开发具有指导意义的结论。煤储层内部结构的复杂性、空间位置的多变性、工艺技术的多样性，加之实验仪器设备、作者水平等的限制，有些结论还不够准确和具体，还需在今后做进一步和深入细致的研究。书中不足之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教！

著者  
2013 年 6 月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| <b>第一章 绪论</b>            | 1  |
| 第一节 煤层气地面开发决策系统研究的背景与意义  | 1  |
| 第二节 煤层气领域信息化的研究现状        | 3  |
| 一、管理信息系统的技术研究现状          | 3  |
| 二、煤层气数值模拟技术研究现状          | 4  |
| 三、GIS 在煤层气领域中的应用         | 6  |
| 第三节 煤层气勘探开发领域信息化存在的问题    | 9  |
| 第四节 煤层气地面开发决策系统的概念及其实现途径 | 10 |
| 一、煤层气地面开发决策系统释义          | 10 |
| 二、实现途径                   | 11 |
| <b>第二章 煤层气地面开发决策系统设计</b> | 12 |
| 第一节 系统组成                 | 12 |
| 第二节 数据库设计                | 15 |
| 一、数据库设计的一般步骤             | 15 |
| 二、煤层气空间数据库管理的内容          | 15 |
| 三、数据管理模式设计               | 16 |
| 四、数据库的访问与操作              | 17 |
| 第三节 系统实现方法               | 18 |
| 一、系统开发方式                 | 18 |
| 二、系统开发环境需求               | 19 |
| 三、系统开发平台的选择              | 19 |
| 四、系统部分功能实现方法             | 21 |
| 第四节 系统的特点                | 22 |
| <b>第三章 煤层气有利区块优选子系统</b>  | 24 |
| 第一节 煤层气有利区块评价特点          | 24 |
| 第二节 煤层气有利区块评价方案          | 25 |
| 一、煤层气有利评价单元划分的基本原则       | 25 |
| 二、煤层气有利区块优选方案            | 26 |
| 第三节 煤层气有利区块评价方法          | 26 |
| 一、“五指标法”                 | 29 |
| 二、“阶梯优选法”                | 32 |
| 三、“多层次模糊综合评价法”           | 35 |
| 四、“灰色系统法”                | 39 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 五、“BP神经网络法” .....              | 41  |
| 第四节 煤层气有利区块优选子系统的开发与应用 .....   | 43  |
| 一、煤层气有利区块优选子系统的总体结构及功能 .....   | 43  |
| 二、煤层气有利区块优选子系统数据库设计 .....      | 45  |
| 三、系统实现的关键技术 .....              | 52  |
| 四、煤层气有利区块优选子系统的应用 .....        | 80  |
| <b>第四章 煤层气井型选择子系统</b> .....    | 88  |
| 第一节 煤层气地面开发井型及抽采工艺技术概况 .....   | 88  |
| 一、直井抽采煤层气工艺 .....              | 89  |
| 二、定向井抽采煤层气工艺 .....             | 95  |
| 三、一井多用抽采煤层气工艺 .....            | 100 |
| 第二节 煤层气地面开发井型选择评价方法 .....      | 100 |
| 一、煤层气地面开发两种井型的异同 .....         | 101 |
| 二、煤层气地面开发井型选择的评价方法 .....       | 103 |
| 第三节 煤层气地面开发井型选择子系统的开发与应用 ..... | 111 |
| 一、煤层气地面开发井型选择子系统的总体结构及功能 ..... | 111 |
| 二、煤层气地面开发井型选择子系统数据库设计 .....    | 112 |
| 三、系统实现的关键技术 .....              | 118 |
| 四、煤层气井型选择子系统的应用 .....          | 127 |
| <b>第五章 煤层气储层改造工艺技术</b> .....   | 129 |
| 第一节 煤层气储层改造的主要方式简介 .....       | 129 |
| 一、常规水力压裂技术 .....               | 129 |
| 二、气体增能压裂技术 .....               | 131 |
| 三、多分支水平井技术 .....               | 134 |
| 四、裸眼洞穴增产技术 .....               | 135 |
| 第二节 煤储层改造效果的主要影响因素 .....       | 136 |
| 一、常规水力压裂储层效果的主要影响因素 .....      | 136 |
| 二、气体增能压裂储层改造效果的主要影响因素 .....    | 139 |
| 三、定向水平井储层改造效果的主要影响因素 .....     | 140 |
| 四、裸眼洞穴储层改造的主要影响因素 .....        | 141 |
| 第三节 压裂液 .....                  | 141 |
| 一、水基压裂液综合评价 .....              | 142 |
| 二、泡沫压裂液综合评价 .....              | 144 |
| 第四节 支撑剂 .....                  | 148 |
| 一、支撑剂的类型 .....                 | 148 |
| 二、支撑剂的性能评价指标 .....             | 151 |
| 三、支撑剂的选择与压裂效果的关系 .....         | 152 |
| 第五节 压裂施工工艺参数优化 .....           | 153 |
| 一、常规水力压裂工艺参数优化 .....           | 153 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 二、多煤层或煤层与围岩合层水力压裂工艺参数优化 .....       | 220        |
| 三、气体增能压裂工艺参数优化 .....                | 227        |
| 四、多分支水平井工艺参数优化 .....                | 238        |
| <b>第六章 煤层气储层改造优选子系统的开发与应用 .....</b> | <b>242</b> |
| 第一节 煤层气储层改造子系统的特点 .....             | 242        |
| 第二节 储层改造子系统的总体结构与功能 .....           | 243        |
| 第三节 煤层气储层改造子系统的开发 .....             | 244        |
| 一、单一煤层水力压裂优化模块实现的关键技术 .....         | 244        |
| 二、煤层与围岩合层水力压裂优化模块实现的关键技术 .....      | 247        |
| 三、气体增能压裂优化模块实现的关键技术 .....           | 248        |
| 四、多分支水平井工艺参数优化模块实现的关键技术 .....       | 249        |
| 五、辅助模块实现的关键技术 .....                 | 251        |
| 第四节 煤层气储层改造子系统的应用 .....             | 251        |
| 一、沁水盆地煤储层概况 .....                   | 251        |
| 二、单一煤层水力压裂优化模块运行结果 .....            | 251        |
| 三、煤层与围岩合层水力压裂优化模块运行结果 .....         | 257        |
| 四、气体增能压裂优化模块运行结果 .....              | 262        |
| 五、多分支水平井参数优化模块运行结果 .....            | 264        |
| <b>第七章 煤层气排采控制决策子系统 .....</b>       | <b>267</b> |
| 第一节 煤层气井排采的特点 .....                 | 267        |
| 第二节 煤层气垂直井排采过程储层压力传播变化规律 .....      | 268        |
| 一、煤层气井排采过程压力传播的主要影响因素 .....         | 269        |
| 二、煤层气垂直井排采过程储层压力传递的数学模型 .....       | 272        |
| 三、煤层气垂直井排采过程储层压力传播变化规律 .....        | 277        |
| 第三节 煤层气垂直井排采控制理论 .....              | 283        |
| 一、煤层气垂直井排采阶段重新划分 .....              | 283        |
| 二、煤层气垂直井各排采阶段划分标识 .....             | 286        |
| 三、有无越流补给条件下煤层气垂直井各个阶段排采特征 .....     | 288        |
| 四、不同条件下煤层气垂直井排采工作制度制定 .....         | 293        |
| 第四节 煤层气垂直井排采控制决策子系统的开发与应用 .....     | 303        |
| 一、系统总体结构设计及各部分主要功能 .....            | 303        |
| 二、排采控制决策子系统实现的关键技术 .....            | 303        |
| 三、煤层气垂直井排采控制决策子系统的应用 .....          | 307        |
| <b>参考文献 .....</b>                   | <b>314</b> |

# 第一章 绪 论

煤层气作为一种高效、洁净能源，三十多年来引起了人们广泛的关注，人们纷纷投入到开发煤层气这一行业中来。经过多年的艰难探索，同时借鉴国外先进的煤层气勘探开发技术经验，我国部分地区取得了商业性突破。但由于我国成煤环境的复杂性、地质构造的多期性、地质构造条件的不确定性、煤储层条件的差异性等都决定了不同地区、不同工艺技术的局限性。煤层气井产气量的影响因素众多，很难有非此即彼的结论。煤层气的勘探开发是一项系统工程，涉及煤层气资源评价、有利区块优选、钻井工程、测井工程、储层改造工程、排采工程、数值模拟、集输工程、经济评价等一系列工程，任何一个环节的失误都可能导致最终的失败。如何针对不同的储层条件、地质构造条件，得出与之相匹配的工艺、技术和方法，则是目前亟待解决的难题。

管理信息系统，在强调信息的现代社会中变得越来越普及，但在煤层气勘探开发研究领域几乎处于停滞状态，国内外还没有成套的、针对煤层气勘探开发决策的信息系统软件。本书立足于我国特殊的煤储层、地质条件，针对煤层气勘探开发的关键技术环节，分析其对煤层气井产气量的主要影响因素。在此基础上，根据前人的研究成果和笔者对煤层气地质与开发方面的理解和认识，结合地理信息系统（Geographic Information System, GIS）等高新技术，借助计算机软件开发工具，集成开发出一套具有一定普适性的煤层气地面开发决策系统软件，以便为煤层气的勘探开发工艺选择提供指导。

## 第一节 煤层气地面开发决策系统研究的背景与意义

我国经过 30 多年的煤层气的勘探开发，在一些地区取得了可喜的成绩，但在多数地区，得到的结果与期望之间却相距甚远。回头看看走过的路，笔者认为，煤层气勘探开发失败的原因主要来自以下 4 个方面。

（1）煤层气开发基础理论尚不完善 开发煤层气首先是一个“地质诊断”的过程。要开发煤层气，必须对煤层气的生成、赋存、储集等静态条件下的富集规律进行研究；同时需对不同水文地质、构造地质条件下煤层气富集的二次分配进行研究；再者，还要对由于人为活动造成煤层气的三重渐变进行研究<sup>[1]</sup>。因此，煤层气的生成、赋存首先是在原地的三重渐变，其次才是在其基础上的人为改造。煤层气开发基础理论的不完善导致人们在进行煤层气开发时不能准确地根据煤层气赋存的具体情况选择相应的开发工艺，“地质诊断”的结果与实际之间偏差较大是造成

开发失败的首要原因。

(2) 开发工艺与基础理论匹配度不够 如果把煤层气开发基础理论的研究比作对开发对象——煤层气的“地质诊断”的过程,那么,正确选择煤层气的开发工艺则是根据煤层气的“症状”采取的“对症下药”。基础理论的不完善,可能造成开发靶区选择的失误;即使开发靶区选择比较合理,还需找到与基础理论匹配的开发工艺。开发工艺技术研究相对滞后,开发基础理论的相对匮乏,可能导致目前的工艺无法满足更多地区不同的地质条件,这是导致煤层气开发失败的另一主因。

(3) 煤层气统一协调组织管理不到位 开发煤层气是一项系统工程,不仅涉及储层的精细描述、煤层气资源评价、选区等基础理论,还涉及钻井、完井、储层改造、排采、集输等工程,还涉及经济政策、法律法规等,最终的目标是让煤层气井产气并及时、充分地加以利用。这就需要涉及煤层气勘探开发的每一个技术环节进行“精耕细作”,要求统一协调、统一组织管理。但目前的煤层气基础理论研究、钻井施工队伍、测试队伍、储层改造队伍、排采、集输及销售、政策法规等分属不同部门、不同领域,增加了协调组织管理的难度,这也是造成目前煤层气开发失败的又一重要因素。

(4) 相关政策法规鼓励力度不够 煤层气产业是一个“高投入、高风险、回收周期长”的产业,这一特点决定了地面煤层气开发初期,需要相关政策法规对其进行鼓励。美国煤层气产业在 20 世纪 90 年代初期,就是由于有了相关政策法规的支持,才促进了煤层气基础理论的发展,在基础理论指导下,探索出适合美国煤层气开发的工艺技术,使美国的煤层气产业得以蓬勃发展。我国煤层气开发除了上述几个关键因素外,相关政策法规鼓励力度不够,煤层气开发成本显著增加。同时,下游市场体制不健全,开发出的煤层气不能及时、有效地加以利用,这些都将影响煤层气的投资力度,也是煤层气产业进展缓慢的原因之一。

从我国多数地区煤层气勘探开发失败的主要原因可以看出,我国政府对煤层气开发的重视及支持程度、煤层气开发基础理论研究的深度、开发工程实践与基础理论的匹配程度、煤层气开发工艺的正确选择程度等都决定了煤层气开发的成败。开发工艺选择的盲目性,可能会造成经济投入的巨大损失,同时也会使国民逐渐对煤层气这一朝阳产业丧失信心。我国成煤环境、构造运动类型、样式及煤层气的生成、演化的地域差异性,决定了针对不同的煤储层、水文、地质构造等条件下煤层气开发工艺的多样性。如何针对不同的储层条件、地质条件,选择适合的开发模式,则是摆在我们面前亟待解决的问题。

在强调信息的现代社会中,决策者所面临的问题是如何把信息看做是一种有价值的基础性资源,如何发挥信息在现代社会中的重要作用。建立计算机信息系统是完成这一使命的重要途径,也是实现管理现代化的重要步骤,它已成为管理部门和决策部门的客观需要,也是一种基础性工作。本书以煤层气勘探开发基础理论和方法为基础,借助 GIS 技术,构建煤层气勘探开发决策系统。该系统的成功开发不

但能够实现“科学、规范、准确、经济利益最大化”的工艺选择原则，而且能够提高煤层气开发工艺选择的智能化水平。

## 第二节 煤层气领域信息化的研究现状

能源在世界经济可持续发展的战略中具有举足轻重的作用，随着我国经济的飞速发展，煤层气开发利用的紧迫性和重要性日益显现出来。作为国家能源发展战略之一，我国政府采取多项政策措施鼓励煤层气产业发展。在这一背景下，煤层气生产规模得以不断扩大，但同时煤层气企业面临的竞争也越来越大。与煤层气开发的重要性相比，我国煤层气行业在信息收集、汇总、监测、企业管理等方面却严重滞后，和煤层气产业的快速发展不协调，并将严重影响企业在国际和国内的竞争力。因此，煤层气企业急需提高信息化水平<sup>[2]</sup>。

信息系统在国外的研究和应用起步比较早。发达国家从 20 世纪 60 年代初开始着手管理信息系统的研究，经历了由初级到高级逐步完善的发展过程后，利用其先进的管理技术、通信技术和计算机网络技术使管理信息技术在制造业、军事、电子或电器行业、交通运输、服务等业务领域得到广泛应用。煤层气领域信息化的研究首先是从煤层气数值模拟技术研究开始的，但到目前为止，国产的数值模拟软件由于诸如功能有限，稳定性不好等原因没有得到推广。国内主要使用的软件是从美国引进的 COMET2.0、COMET3、Eclipse、Coalgas 等模拟软件，这些软件主要是针对美国储层、地质条件开发的，我国的煤储层特征、地质条件与美国的煤储层、地质条件差异较大，导致使用这些软件在国内进行预测时，预测结果与实际结果偏差较大。同时，这些软件没有源代码，无法进行再开发。如何开发出适合我国煤储层、地质特征的模拟软件已经是摆在我们面前的加快推进煤层气产业化的主要障碍之一。

### 一、管理信息系统的技术研究现状

20 世纪，随着全球经济的蓬勃发展，众多经济学家纷纷提出了新的管理理论，但直到 1985 年，管理信息系统的创始人，美国明尼苏达大学的管理学教授 Gordon B. Davis 才给出了一个完整的管理信息系统的定义。即管理信息系统是一个利用计算机软硬件资源以及数据库的人-机系统。它能提供信息支持企业或组织的运行、管理和决策功能。这个定义全面地说明了管理信息系统的目标、功能和组成，而且反映了管理信息系统在当时达到的水平<sup>[3]</sup>。

信息系统的发展经历了以下几个阶段。

(1) 统计系统 统计系统是信息的初级阶段。所研究的内容是数据间的表面规律。它把数据分成较相关和较不相关的组，然后把数据转换为信息。

(2) 数据更新系统 信息系统发展的第二阶段是数据更新系统。它能够通过插入、删除、修改、保存等操作实现数据文件或数据库中数据项或记录的录入、存

储、更新等功能。它仅能实现对数据的实时更新,不能对数据进行分析等操作。

(3) 状态报告系统 信息系统发展的第三阶段是状态报告系统。它能对信息的状态进行描述,它可以分为生产状态报告、服务状态报告和研究状态报告等系统。相对前两种系统而言,无疑是一种进步。

(4) 决策支持系统 信息系统目前已发展到决策支持系统。它是用来辅助决策的信息系统。该系统可以计划、分析方案,审查解答和求解的误差。它应用较好的人机对话方式,可以与不太熟悉计算机操作的管理人员会话。它一般包括一些模型用以产生决策信息,但不强调全面的管理功能。

从国际技术发展趋势来看,管理信息系统的发展有以下几个方向。

(1) 信息综合集成 随着信息技术的发展,越来越强调信息综合集成。即管理信息系统在计算机网络和分布式数据库管理系统的支持下,与企业其他的系统,如 OA、CAD、CAM、CAPP 形成一般企事业单位的综合信息系统,实现办公、管理、计算、设计、控制、监测以及决策等功能综合。

(2) Internet/Intranet Internet 已被广大用户所熟悉,而以 Internet 技术为基础的企业内部信息系统——Intranet 既可以通过接入的方式成为 Internet 的一部分,也可以自成体系,实现企业内部的管理。它可以克服传统的管理信息系统存在的系统封闭、用户界面形式不统一、多种软件版本并存、维护困难等问题,为新一代企业管理信息系统的开发注入了强劲的活力。

(3) 媒体技术 随着计算机性能的提高,管理信息系统采用越来越多的多媒体技术,用图像、图形、声音替代原来单调的字符形式,给用户提供了更加生动真实的应用环境。

(4) 地理信息系统技术 与传统的信息管理软件相比,基于地理信息系统的信息管理软件有不可比拟的优点,其主要优点是存储和输出信息的多样化(数、文、图均可),查询界面的图式化,查询方式的工具化和对用户素质要求的简单化,具备较强的地图数据分析功能,可以同时管理空间数据和属性数据。

开发煤层气是一个新兴朝阳产业,技术人员在管理煤层气开发相关图件和报表数据时,通常使用的软件只涉及 Office 办公软件、Origin、CorelDraw、Suffer、AutoCAD 等绘图软件,没有将图件和报表统一组织管理起来,而是零散地堆放在计算机硬盘上,导致数据查询困难,数据存放冗余、不一致、丢失等现象时有发生。目前国内外还没有成套的、针对煤层气资源评价、有利区块优选、井型选择、钻井工程、储层改造优化、排采控制等方面集成的决策支持系统。加快进行煤层气领域信息化研究已经刻不容缓。

## 二、煤层气数值模拟技术研究现状

煤层气藏数值模拟是以计算机技术为基础,根据煤层气藏地质模拟及煤层气运动过程数学模型算法思想编制程序以模拟煤层气运移、产出全过程定量描述的计算机模型。此模型可以客观地对煤层气井一定时期及条件下的气、水产出量进行定量

描述<sup>[4]</sup>。

最初煤层气藏数值模拟是以控制瓦斯灾害和解决煤矿安全问题为目的,建立合理有效的通风系统展开的。国外相对起步较早,Chamberlin (1907)等首先总结了煤层甲烷聚集运移的机理,为进一步煤层气运移研究奠定了坚实基础<sup>[5]</sup>。Rice (1928)针对采煤过程中瓦斯涌出影响煤矿安全生产问题,为减少采煤过程中瓦斯涌出量,提出了采煤前应用垂直钻孔除去煤层甲烷的设想<sup>[6,7]</sup>。

Lindine (1964)首次基于含气量与深度之间关系提出预测采煤过程中矿井瓦斯涌出量的经验模型<sup>[8]</sup>,仍然是为安全生产服务。Airey (1968)首次推导出预测静止工作面瓦斯涌出量的偏微分方程,并通过解析法求解建立了一维、单孔隙、气相的产量预测解吸模型<sup>[9]</sup>。Price (1973)提出二维、单孔隙、气-水两相的产量预测数学模型并开发了相应的数值模拟软件 INTERCOMP-1<sup>[10]</sup>。

煤层气藏数值模拟研究日益受到重视,1981年,美国天然气研究所、美国钢铁公司和宾州大学开发了 ARRAYS 煤层气模拟软件<sup>[11]</sup>。Ertekin 等开发了单井煤层气模型 PSU-1<sup>[12]</sup>。而后,PSU-1 和 ARRAYS 被组合成 GRUSSP 软件包广泛应用。在应用的过程中,PSU-1 被不断发展完善,Sung (1987)在 PSU-1、PSU-2 基础上发展完善到 PSU-4 模型。ICF Lewin Energy (1987)基于 SUGARWAT 模型开发了界面友好的煤层气模拟的双孔隙、二维、气-水两相模型 COMET (TM) (Coalbed Methane Technology) 模型<sup>[13]</sup>。

1989年,美国 ARI 公司等基于 COMET、COMPETPC 发展开发了三维、气-水两相流的煤层气数值模拟软件 COMETPC-3D<sup>[14]</sup>。同年,一款具有模拟平衡吸附和拟稳态非平衡吸附的 COALGAS 软件诞生<sup>[15]</sup>。美国 Schlumberger 公司开发了具有三维、双重介质、气-水两相、非平衡拟稳态吸附模型 Eclipse (2003A) 软件。2000年,美国天然气研究所对 COMET2 进行了成功升级,升级后的版本为 COMET2.10<sup>[16]</sup>,又于2005年,发布了 COMET3 版本储层模拟器<sup>[17]</sup>。美国科莱国际股份有限公司先后开发了基于 Warren 和 Root 裂缝的双孔模型的 CBM-SIM 软件,该软件是一个模拟煤层,泥盆纪页岩和常规油藏中的气体和液体生产的三维、两相、单、双、三孔隙模拟器<sup>[18]</sup>,而后,发展完善其应用领域,开发了应用于裂缝性油气藏、煤层气藏、页岩气藏、砂岩及碳酸盐岩油气藏的数值模拟软件 CBM-SIM2。

煤矿瓦斯是制约我国矿井高效快速生产的主要因素之一,我国学者针对煤层气藏数值模拟进行了大量研究以缓解瓦斯突出带来的矿井安全问题。

周世宁院士 (1999) 提出将瓦斯在煤层中的运移视为单纯渗流的线性达西定律渗流模型<sup>[19]</sup>。何继善等 (1999) 从瓦斯突出的物理基础、物理场、物理场能量标志等方面对瓦斯突出进行了研究,为预测瓦斯突出奠定了理论基础<sup>[20]</sup>。王凯等 (2005) 从煤与瓦斯突出突变特征、钻孔瓦斯动态涌出的非线性特征及瓦斯突出非线性预测模型等方面对瓦斯预测进行了研究<sup>[21]</sup>。宋建成 (2007) 基于计算机网络

技术、GIS 技术实现了以数字化为手段对煤矿生产采掘作业过程中煤与瓦斯突出的预测、预报、预警与预防<sup>[22]</sup>。

虽然我国从“六五”、“七五”就不断开展了矿井瓦斯防治、煤层气资源勘探开发等相关领域的一些研究，但是煤层气藏数值模拟研究起步相对较晚，真正开展以来是从 1992 年在“八五”中专门设立煤层气藏数值模拟进行科技攻关的研究，期间原地质矿产部华北石油地质局与清华大学联合开发了煤层气软件 CMS (1994)<sup>[23]</sup>，实现了我国煤层气藏数值模拟软件领域的零突破。CMS 采用二维、单层煤层气藏进行模拟，具有一定的局限性。虽然随后一些学者也针对煤层气藏数值模拟从模型及软件都进行了大量的研究。

张群 (2002) 建立了描述三维、双孔隙、非平衡吸附、拟稳态条件下气、水两相流运移规律的煤层气储层的数学模型，并进行了数值求解<sup>[24]</sup>。许广明等 (2003) 将非平衡吸附模型与裂隙中气-水两相渗流模型联立建立了煤层气数值模拟的耦合模型<sup>[25]</sup>。韦重韬等 (2004) 建立了定量表述煤层气地质演化过程的动态平衡动力学模型，使查明煤层气生成、运移、聚集和散失的地质演化过程表征成为可能<sup>[26]</sup>。孙培德 (2007) 从地下煤层气越流多物理场耦合模型及数值模拟进行了研究<sup>[27]</sup>。冯文光 (2009) 建立了煤层气解吸的物质平衡方程及煤层气藏解吸产气的三维数学模型，并采用最佳松弛法对产气数学模型进行了求解<sup>[28]</sup>。

但是由于功能或算法的不完善，我国至今没有一个可以普遍应用的煤层气藏数值模拟软件。国内矿井模拟大部分引进国外软件，如美国 ARI 公司的 COMET3、美国科莱国际股份有限公司的 CBM-SIM2 等。由于国外地质条件与国内地质条件的明显差异，国外软件不能较好地适用于我国煤层气藏低渗透率、低压力、低含气饱和度等复杂“三低”地质条件。国产的煤层气数值模拟软件急需得到进一步的发展。

### 三、GIS 在煤层气领域中的应用

1963 年，加拿大学者 R. F. Tomlinson 首先提出了 GIS 这一概念，并开发出了世界上第一个 GIS (CGIS)。

随着计算机软硬件和通信技术的不断进步，GIS 的理论和技術方法已得到了飞速的发展，其研究和应用已渗透到自然科学及应用技术的很多领域，如土地利用、城市规划、环境监测、交通安全、地理学、地质学、采矿科学等，并日益受到各国政府和产业部门的重视。自 GIS 这一术语及相关技术诞生以来，一直受到科学界和工程界的高度重视。

经过多年的发展，GIS 在理论上已经成为地球空间信息科学的重要分支。应用技术上已成功研制出一系列的商品化软件。例如 ArcView、MapInfo、MapGIS、SuperMap、GeoStar 等通用软件<sup>[29]</sup>。就国内外发展现状而言，GIS 理论和软件系统的研究已经较为成熟。

GIS 在煤层气专业领域中已有较多的应用。程东 (2002) 等人根据对沁水煤田