

- 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2007CB209400)
- 中央高校基本科研业务费专项资金
- 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题
- 北京市优秀人才培养计划

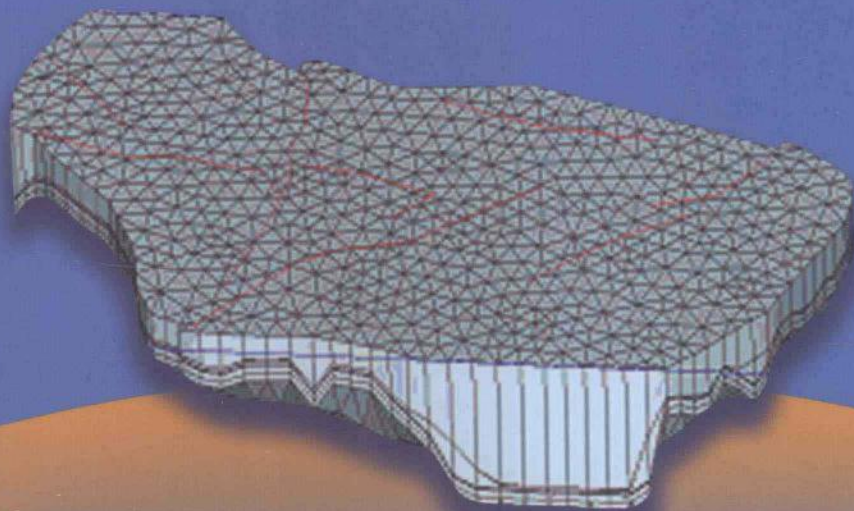
资助

典型煤矿

地下水运动及污染数值模拟:

Feflow 及 Modflow 应用

董东林 王存社 陈书客 宋颖霞 寇玉贤 孙文洁 著



地质出版社

国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400)
中央高校基本科研业务费专项资金
煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题
北京市优秀人才培养计划
资助

典型煤矿地下水运动及 污染数值模拟： Feflow 及 Modflow 应用

董东林 王存社 陈书客 宋颖霞 寇玉贤 孙文洁 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统地介绍了我国煤矿水害分布特点、地下水运动的有限差分 and 有限元模型、Feflow 及 Modflow 软件功能与特点、典型煤矿区地下水运动规律、突水危险性评价和煤矿区地下水污染扩散规律,为煤矿区地下水运动演化规律、突水危险性评价、矿井水害防治水、地下水的污染评价及预测提供了一整套的研究方法。

本书适合作为高等院校地质工程、水文水资源、环境地质、地球科学信息系统、环境科学等专业研究生的参考书,还可供研究水文地质、地下水运动、地下水污染、水害防治等专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

典型煤矿地下水运动及污染数值模拟:

Feflow 及 Modflow 应用/董东林等著. —北京:地质出版社,2010.6

ISBN 978-7-116-06719-6

I. ①典… II. ①董… III. ①煤矿—地下水运动—数值模拟—研究②煤矿—地下水污染—数值模拟—研究
IV. ①P641.4②X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 115810 号

DIANXING MEIKUANG DIXIASHUI YUNDONG JI WURAN SHUZHIZHONG

责任编辑:李丛蔚

责任校对:杜悦

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324573(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm¹/₁₆

印 张:9.5

字 数:230 千字

印 数:1—800 册

版 次:2010 年 6 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:26.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06719-6

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

目 录

| | |
|---|--------|
| 绪论 | (1) |
| 一、煤矿水文地质模拟的重要意义 | (1) |
| 二、煤矿地下水模拟研究现状 | (5) |
| 第一章 中国煤矿水害分布特点 | (8) |
| 第一节 中国煤矿水害分布 | (8) |
| 第二节 各水害区的综合水文地质环境 | (8) |
| 一、华北石炭系—二叠系岩溶—裂隙水水害区(I 区) | (8) |
| 二、华南上二叠统岩溶水水害区(II 区) | (9) |
| 三、东北—内蒙古下侏罗统—上白垩统碎屑岩砂砾岩裂隙水水害区(III 区) | (9) |
| 四、西北下、中侏罗统碎屑岩裂隙水水害区(IV 区) | (10) |
| 五、西藏—滇西中生界裂隙水水害区(V 区) | (10) |
| 第三节 煤矿水害防治方法 | (10) |
| 第二章 地下水运动的数值模型 | (14) |
| 第一节 地下水有限差分模型 | (14) |
| 一、差分原理 | (14) |
| 二、差分格式 | (16) |
| 三、显式差分算法 | (17) |
| 第二节 地下水有限元模型 | (19) |
| 第三章 Feflow 软件功能与特点 | (25) |
| 第一节 Feflow 的特点及功能 | (25) |
| 一、Feflow 的地下水模拟功能 | (25) |
| 二、Feflow 的特点和功能 | (25) |
| 三、系统模型求解特点 | (25) |
| 四、输出特点 | (26) |
| 第二节 Feflow 数据交换和文件格式 | (26) |
| 第三节 特殊水文地质建模处理 | (27) |
| 一、复杂含水层的处理 | (27) |
| 二、河流的处理 | (28) |
| 三、地层数据最佳适线法 | (29) |
| 四、第三类混合边界处理 | (29) |
| 五、断层处理 | (30) |
| 第四章 Modflow 软件功能与特点 | (31) |
| 第一节 Visual-Modflow 软件发展历程 | (31) |

| | | |
|-----|---|---------|
| 第二节 | Visual-Modflow 的特点及运行基本环境 | (31) |
| 一、 | Visual-Modflow 的功能 | (31) |
| 二、 | Visual-Modflow 的特点 | (32) |
| 三、 | Visual-Modflow 的优势 | (32) |
| 四、 | 软件运行基本环境 | (33) |
| 第三节 | Visual Modflow 主要模块简介及主要数据文件 | (33) |
| 一、 | 主要模块简介 | (33) |
| 二、 | 主要数据文件 | (34) |
| 第四节 | Visual Modflow 在我国水资源评价研究中的应用潜力分析 | (34) |
| 第五章 | 基于 Feflow 的煤系含水系统突水危险性分析——以开滦林南仓矿为例 | (37) |
| 第一节 | 研究区自然地理与地质概况 | (37) |
| 一、 | 井田位置、范围和交通条件 | (37) |
| 二、 | 自然地理 | (37) |
| 三、 | 地层 | (38) |
| 四、 | 煤层 | (44) |
| 五、 | 构造 | (46) |
| 第二节 | 水文地质背景条件 | (50) |
| 一、 | 井田水文地质特征 | (50) |
| 二、 | 矿区充水条件分析 | (53) |
| 三、 | 供水水源 | (56) |
| 四、 | 影响林南仓矿煤 14 开采的主要含水层分析 | (56) |
| 五、 | 林南仓矿煤 14 安全回采地质与水文地质问题综合分析 | (59) |
| 第三节 | 基于 Feflow 的林南仓矿地下水数值模拟与分析 | (60) |
| 一、 | 水文地质条件分析与物理模型建立 | (60) |
| 二、 | 数学模型建立与地下水数值模拟模型 | (64) |
| 第四节 | 矿井水害防治 | (84) |
| 一、 | 林南仓矿井主采煤层充水研究存在问题 | (84) |
| 二、 | 矿井水防治需进一步采取的技术 | (87) |
| 第六章 | 基于 Modflow 的污染物运移规律——以郑煤集团新峰一矿为例 | (91) |
| 第一节 | 自然地理 | (91) |
| 一、 | 矿区的位置、范围及交通 | (91) |
| 二、 | 地形地貌 | (91) |
| 三、 | 气象水文 | (91) |
| 第二节 | 地质条件概况 | (92) |
| 一、 | 区域地质条件概况 | (92) |
| 二、 | 井田地质条件 | (94) |
| 第三节 | 井田水文地质条件分析 | (99) |
| 一、 | 井田水文地质概述 | (99) |
| 二、 | 矿井充水条件分析 | (101) |
| 第四节 | 水文地质概念模型 | (105) |
| 一、 | 模型范围和边界条件 | (105) |

| | |
|-----------------------------|-------|
| 二、水文地质结构 | (106) |
| 三、水文地质条件的概化 | (106) |
| 四、水文地质参数 | (108) |
| 五、源汇项的处理与确定 | (108) |
| 第五节 地下水流数值模型 | (109) |
| 一、数学模型 | (109) |
| 二、模型结构 | (109) |
| 三、模型识别及验证 | (112) |
| 第六节 地下水污染物运移模拟 | (119) |
| 一、新峰一矿地下水污染污染源 | (119) |
| 二、地下水污染物及主要的化学过程 | (120) |
| 三、污染物运移模拟 | (121) |
| 第七节 模拟结果分析 | (123) |
| 一、含水层地下水流场分析 | (123) |
| 二、污染物在太原组上段灰岩含水层的扩散分析 | (130) |
| 三、垂直方向上污染物的扩散 | (142) |

绪 论

一、煤矿水文地质模拟的重要意义

据有关数据表明,自 2002 年起到 2008 年,一次性能源消费连续增长,其增幅超过 2.4%。而国际石油价格也在一路攀升,许多国家不得不调整能源使用结构,逐渐降低石油消费比例,转而提高煤炭比重。

煤炭行业是我国国民经济的支柱产业,是关系国计民生的基础性行业,在国民经济中具有重要的战略地位。煤炭作为中国工业化进程的主要能源基础,对整个国家的经济发展起着举足轻重的作用。进入“十一五”规划期,中国的“富煤贫油少气”的能源储备特征和进入“重化工业主导型”经济发展阶段的特点,决定了在较长时期内,煤炭是我国一次能源消费结构中占主导地位的格局将长期保持不变。结合中国经济发展的实际情况和国际形势,国家发改委在《能源发展“十一五”规划》中进一步决定和明确了“坚持节约优先、立足国内、煤为基础、多元发展”的能源方针,提出“2010 年中国煤炭消费量占一次能源消费总量的 66%”。

据国家统计局的数据,2008 年煤炭一次消费增长 5.8%,占全球增长的 2/3 以上。为此我国不断加大投入,增加煤炭产量,到 2008 年原煤产量达到了 27.93 亿吨,同比增长 10.6%。

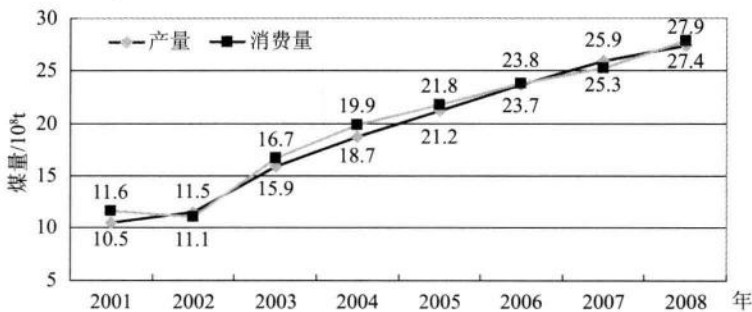


图 1 我国煤炭生产与消费情况

Figure 1 Coal production and consumption in China

如此巨大的需求,就需要不断加大煤炭资源勘探和开发。我国各省、市、自治区,除上海和香港、澳门特别行政区外,都有煤炭产出,但分布不均。特点是西多东少、北富南贫,相对集中。煤炭资源总量中,分布在大兴安岭-太行山-雪峰山一线以西的 12 个省(市、自治区)占有总资源的 89%,保有储量的 87%;而该线以东的 20 个省(市、自治区),仅占总资源量的 11%,总保有储量的 13%。按各省(市、自治区)统计,资源量最多的前十名依次是新疆(16210 亿 t)、内蒙古(12053 亿 t)、山西(6830 亿 t)、陕西(2922 亿 t)、宁夏(1991 亿 t)、甘肃(1905 亿 t)、贵州(1866 亿 t),共计 47108 亿 t,占总资源量的 93.11%。依保有探明储量排

序,前十名依次为山西(2578 亿 t)、内蒙古(2247 亿 t)、陕西(1619 亿 t)、新疆(952 亿 t)、贵州(524 亿 t)、宁夏(309 亿 t)、安徽(245 亿 t)、云南(242 亿 t)、河南(227 亿 t)和山东(227 亿 t),共计 9558 亿 t,占保有储量的 95.34%。

我国煤的种类齐全,从褐煤到无烟煤,各个煤化阶段的煤都有赋存,能为各工业部门提供冶金、化工、气化和动力等各种用途的煤源。其中炼焦用煤占 25.4%,无烟煤和贫煤占 17.2%,褐煤占 13%。低变质的烟煤(长焰煤,不黏煤,弱黏煤等)占 42.5%,低变质烟煤不仅数量大,且煤质好,是煤炭资源中的一大优势煤类。其中大同的弱黏煤,神府和东胜的不黏煤,灰分、硫分很小,被誉为天然精煤。

在开采实践中,我国煤矿生产中事故频发,百万吨死亡率是美国的近 200 倍,是南非的 30 倍,是印度的 12 倍。煤矿突水是矿井五大灾害之一,严重影响生产安全并造成重大的经济损失。例如 1984 年 6 月 2 日,范各庄矿 2171 综采工作面,揭露隐伏导水陷落柱,奥陶系岩溶强含水层的高压水经陷落柱溃入矿井,高峰期突水量达 2053m³/min,造成范各庄、吕家坨二矿淹没,林西停产,唐家庄、赵各庄矿减产,直接经济损失数亿元。据国家煤矿安全监察局的资料统计显示,受当时煤炭市场低迷影响,1995~2000 年全国煤矿水害事故总体上呈逐年下降的趋势;而 2000~2005 年,水害事故总体上呈现逐年上升的趋势(如表 1)。突水仅次于瓦斯事故,已成为名副其实的煤矿第二杀手。并且,突水造成的直接经济损失一直列在各类煤矿灾害之首;过去 20 年间,有 250 多对矿井被水淹没,直接经济损失高达 350 多亿元。

表 1 2000~2006 年间煤矿重特大突水事故统计

Table 1 Statistics of coal mine serious water intruding accident during 2000 to 2006

| 年份 | 事故数/次 | 死亡及失踪人数/个 |
|------|-------|-----------|
| 2000 | 9 | 98 |
| 2001 | 38 | 176 |
| 2002 | 93 | 387 |
| 2003 | 92 | 424 |
| 2004 | 61 | 254 |
| 2005 | 104 | 593 |
| 2006 | 38 | 267 |
| 总计 | 435 | 2199 |

注:引自“973 计划”:煤矿突水机理与防治基础理论研究。

严重的水害和复杂的水文地质条件还使大量的煤炭储量无法开采。据统计,北方石炭系一二叠系是我国主要含煤岩系之一,其预测储量占全国预测储量的 26%,保有储量 4097 亿 t,占全国保有储量 53.8%。但北方一些主要煤矿区,受岩溶水威胁的煤炭资源达 160 亿 t 以上,仅河北、河南、山东、江苏、安徽及渭北等地区,矿井保有储量 384.5 亿 t 中受水威胁的煤炭储量达 149.71 亿 t,占 37%(武强等,1995)。受水威胁的矿井中煤炭大多煤质好,在国民经济建设中具有重要的战略地位。因此对矿井水文地质规律、矿井地下水运动模拟的研究,对于解放我国东部受水威胁的煤炭资源,提高资源回收率具有重要的指导意义。

随着煤矿生产技术的发展,资源开采强度增强、矿井深度不断延伸,多数矿井面临更为复杂的水文地质条件,煤矿水害威胁日趋严重,产生了一系列的水环境问题,具体如下:

1. 采矿对区域地下水位及流场的影响

对我国来讲,煤炭生产以深部开采占大多数。为了维持采矿的正常进行,采煤工作面的横向和纵向的发展以及工业城市生活用水的迅猛增加,必须大量开采地下水或将工作面周围的水、潜在的水排出,这导致矿井排水量逐年加大,排水费用也逐年增多,地下水位急剧下降。相应地,所形成的地下水降落漏斗范围和幅度越来越大,地下水的流场也发生了明显的变化。作为我国特殊现象的汲水井也因为地下水位的大幅度下降而基本消失。自1975~1995年间,河北省煤矿开采区的地下水位急剧下降,其中浅层地下水位由平均5.88m降至11.88m,而深层地下水位则由平均7.37m下降到30.25m,形成了十余个大小不等的降落漏斗。

在我国典型的大水矿区如焦作、峰峰和开滦等,这种情况尤其严重。例如在焦作矿区,1952年排水量仅 $1.501\text{m}^3/\text{s}$,地下水位为105m;1965年矿坑排水量为 $4.96\text{m}^3/\text{s}$,地下水位为93m,地下水位比1952年下降了12m;1978年矿坑排水量增加到 $5.55\text{m}^3/\text{s}$,地下水水位大约在85m左右;1982年矿坑排水量为 $8.463\text{m}^3/\text{s}$,地下水位为83m,并在电厂岗庄水源地大规模集中开采区形成多边形枕状漏斗;1993年矿坑排水量增加,使得地下水位急剧下降,平均地下水位为71m,最低水位位于岗庄水源地,为62.08m。在短短的40年时间里,地下水位下降幅度达43m左右,大大增加了取水的费用,也加速了生态环境的恶化。由于矿坑排水改变了孔隙水的补、径、排方式,目前孔隙水主要接受大气降水、城市排污及矿坑排水渗漏补给,而矿坑排水近山前地段孔隙水基本疏干,其埋深在60m以下,形成了空前的疏干区。作为焦作矿区的大矿之一,九里山矿附近形成了孔隙水降落漏斗,焦作市城区造纸厂、化工一厂及平原光学仪器厂等单位单井涌水量减少,化工一厂有多口井报废,其造纸厂用水量急剧下降,生产用水紧张。

2. 采矿对周围河川径流的影响

由于煤层浅埋藏区煤矿采空范围扩大,采空区星罗棋布,其引发的裂缝(董兆祥,1997),甚至地面塌陷范围也逐渐扩大,造成了周边河川径流量大量减小,在个别区域甚至出现河流断流的情况,农业灌溉和部分城市的生活用水受到严重影响。西山矿区的西山冶峪沟董茹站以上的流域,面积达 18.9km^2 ,在不同时段流域平均降水量与实测河川径流量的关系见图2所示。

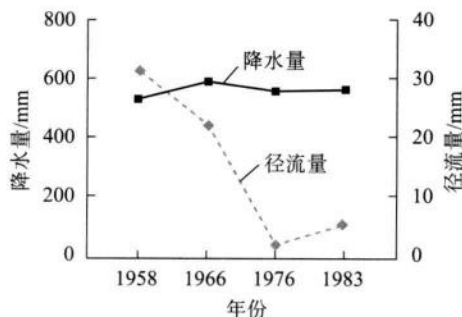


图2 西山矿区流域不同时段流域平均降水量与实测河川径流量的关系

Figure 2 Relationship between average rainfall and run-off in Xishan mining area

3. 煤矿排渣对水源的污染

采矿的排渣主要是各种矸石。对煤矿来说,煤矸石是煤矿采掘和洗选加工过程中排出

的废渣。它的排放量与煤的埋藏条件、开采方式等因素有关。煤矸石是由灰分高、发热量低的炭质煤岩和少量煤块组成,其主要成分为碳、氢、氧、硫、铁、铝、硅、钙等常量元素和镉、铬、砷、铅、汞、铜、锰、氟等痕量有毒元素(刘国昌,1998;张忆晋,1990;国家环保局监督理司,1992;程胜高,1999;中国环境科学学会,1984)。目前,由于利益的驱使,小煤窑这个顽疾屡禁不止,矿山千疮百孔,乌烟缭绕。在采掘和洗煤过程中排出的煤矸石都未经处理,直接排放在水沟、山坡和平川。煤矸石长期露天堆放,经日晒雨淋、风化侵蚀,天长日久便发生自燃,释放出大量的有害气体,严重地影响了矿区及周围的大气质量,进而污染了大气降水。一部分有害元素经雨水或地表水的淋滤作用,给地下水造成严重污染。在我国大型露天煤田——神木的石圪台矿区,这种情况更为严重。在对该矿的环境调查过程中,发现在该矿周围分布着许多大小不一的小煤窑。这些煤窑只追求效益,对煤层不全采(留有大量不好采的煤),大大浪费了煤炭资源,同时其分选更是浪费惊人,将其认为赚不了钱的许多可利用的煤块丢在道路两旁和河道里。经过长期的风吹日晒,淋滤的水直接排到河道和渗到地下含水层中,使地表水和地下水受到严重的污染。据群众反映,以前河里的水非常清澈,可以直接饮用,而现在却变成了黑乎乎的污水。

煤矸石自燃是一种普遍现象,这在神木的石圪台矿区也非常典型。青烟缕缕随处可见,对环境的污染相当严重,主要是硫、碳、氮、氧化物和烟尘对大气的污染。被污染的大气通过降水,间接地污染靠大气降水补给的地表水和地下水。

4. 采矿对矿区外围水源的影响

随着煤矿开采深度的不断增大,排水量也在不断增加。疏干区形成相对低压带,破坏了原来的地下水系统循环和存储条件,在一定的水文地质条件下,地下水有可能穿透原有的相对隔水层而发生突水灾害。

资料表明,太原西山地区岩溶水在构造裂隙的综合作用下,形成统一的水动力系统,具有一致的补给径流和排泄条件。一旦发生突水,势必要影响整个系统的补、径、排条件,从而使原有的排泄点流量减少,矿区外水源受到严重威胁。根据晋祠水源保护办公室调查的结果,风峪沟内乡镇小煤窑采煤排水很大程度地影响着晋泉出水量。

在我国有着悠久采矿历史的唐山,其问题就更加明显。据有关资料,唐山市的大部分矿坑排水、生活污水以及工业废水没有经过处理或处理不达标就直接排放,对周围水质造成较为严重的污染。比较突出的是陡河市区段,其酚含量超过国家标准的173倍,氰化物含量超标6倍,而且还出现了镉和氟的污染区。

随着西部大开发政策的实施,在西部国民经济中占重要地位的神府煤田的煤炭生产对生态环境的影响也被逐渐重视起来。特别是在缺水的西部,如何保护好水源已成为最迫切的问题。经测定在沿乌兰木伦河上游和下游分布的补连、大柳塔和敏盖兔3个矿点中CODMn、NO₃-N等成分的含量呈递增趋势。另外从各河、沟、川大量的水分析结果看,无论是枯水期和平水期,其水质几乎都超出地表水二级标准。经分析认为,产生以上后果的原因主要归结为乌兰木伦河两岸及沟岔分布有比较密集的煤矿点,矿坑排水、工业设施附属厂及生活排污对乌兰木伦河造成重复污染。尽管有些有害元素和离子未超标,却已经有超标的发展趋势。

多年来矿业工作者一直致力于地下水方面的研究工作,但由于我国煤矿地质条件(尤其是构造条件)非常复杂,开采方式各异,再加上生产技术、探测技术、监测技术水平的限

制,矿井突水事故时有发生。因此,煤矿地下水模拟技术的研究是我国乃至世界的重大难题,对其研究将对我国受水威胁的煤矿安全开采和水环境的保护有着重要的意义。

二、煤矿地下水模拟研究现状

目前国外水文地质研究和防治水方法主要采用钻探、物探结合及主动防护法,即采用地面垂直钻孔,用潜水泵专门疏干含水层。为了适应预先疏干方法,国外生产了高扬程(达1000m)、大排水量(达 $5000\text{m}^3/\text{h}$)、大功率(2000kW)的潜水泵,其疏干工程已逐渐采用电脑自动控制。

国外堵水截流的方法也有很大发展,建造地下帷幕的方法愈来愈受到重视。为充分利用隔水层厚度,减少排水量,国外正在对隔水层的隔水机理、突水量与构造裂隙的关系、高水压作业下的突水机理、隔水层稳定性与临界水力阻力的综合作用等进行研究。

纵观几十年来我国矿井水文地质的发展概况,在当时开采规模和勘探条件下,用各种数学模型所预测的矿井涌水量对矿山开采起到了某种积极的指导作用。但随着煤田开采深度的加大和水文地质勘探所提供的不同性质的信息资料,一些用以预测涌水量的数学模型难以全面描述有关地质体的水文地质特征,因此必须从解析模型向数值模型发展。

总的来说,华北型煤田矿井涌水量预测的数学模型经历了以下几个发展阶段:

1. 稳定流阶段

在20世纪50~60年代,我国煤矿矿井涌水量预测的数学模型基本以稳定流理论为基础,主要包括统计模型、经验比拟模型以及稳定井流解析法模型。

(1)统计模型。建立统计模型的基本思路就是根据矿井已知的某开采水平的矿井涌水量资料,推算下一个开采水平或与其条件相类似的另外矿山的未来矿井涌水量。统计模型的使用条件是已知模型与预测模型的条件大致相同,而且往往需要较多的已知观测资料才能得出比较正确的预测结果。所以又可分为:①水文地质比拟法模型。此模型是在水文地质条件相近和开采方法相同的条件下,利用原有的矿井涌水量和其他资料,采用经验比拟公式,预测未来的矿井涌水量。②相关分析法模型。利用同一体中的各种变量之间的相互关系,如抽水或放水试验中的降深与抽水或放水量的关系。在矿井涌水量预测的研究领域,相关分析法通过建立矿井排水量与对应的疏降水位的相关关系的数学模型,预测不同开采水平的对应矿井排水量。此类模型虽然计算方法简单,容易被人接受,但是它有比较严格的条件限制,不能随意无限制的推断预测未知。

(2)稳定井流解析法模型。在矿井疏降排水过程中,形成疏干(降压)漏斗,当漏斗扩展到补给边界,将出现矿井涌水量呈相对稳定且地下水水位不随时间变化的动平衡状态。这种状态可以用稳定流解析法预测矿井涌水量。在自然界,稳定是相对的,绝对稳定的地下水流运动极为少见,满足稳定流解析法模型的实际水文地质条件几乎不存在。因而,稳定流理论的进一步应用和发展受到了限制。

2. 非稳定流解析法阶段

地下水非稳定流理论于20世纪70年代初,开始在我国矿床水文地质领域得到初步地普及和推广。因为它能比较符合实际地反映自然界中地下水的非稳定运动特征,能够比较全面地描述地下水疏降漏斗随时间不断扩展的全过程。所以,该理论发展很快,取得了一些

较为满意的科研成果。但是自然界中的地下水流运动十分复杂,矿井水文地质条件千变万化,且实际地质条件与解析解假设条件相差甚远,这些都给它的发展带来了难以克服的困难。

3. 单层数值解阶段

自 20 世纪 70 年代中后期,随着电子计算机的发展和离散数学的引用,数值解被广泛应用于矿坑涌水量预测中。由于它适应边界条件能力强,善于描述含水介质的非均质和各向异性特征,容易处理控制性方程中的源、汇项,并且考虑了矿井在大的降深疏降过程中所出现的承压转无压的非线性问题,所以能够较好的解决复杂条件下的各种地下水流状态,因此在理论和实际应用方面都发展较快。

在矿井涌水量预测的单层数值解方法中,值得提到的是“地下水不稳定流有限单元计算法——B T 法”。该方法首先应用解析解来确定渗流计算区第一类边界上个别节点的变水头值(BT 值),根据这些信息再用有限单元数值法计算内节点及渗流计算区第二类边界的变水头值。

但在绝大部分矿区,由于含水层往往是非均质且各向异性,水文地质边界的性质和形状复杂多变,各种线状、面状的源、汇项随处可见。所以,利用解析法求解如此复杂的水文地质模型第一类边界的变水头值是不可能的。即使简化模型求得了结果,其仿真度也是可以想象的。既然所求的 BT 值可信度差,那么根据 BT 值再计算得到的数值解,在实际应用中误差很大,结果就更难令人信服。

4. 多层数值解阶段

分析四十多年来矿坑涌水量预测数学模型的各个发展阶段,具有一个共同特点,即考虑范围均局限于某个直接充水的单层充水含水层。显然所用的数学模型不能真实地反映华北型煤田客观存在的多层充水含水层的立体充水地质模型,未能用数学语言翔实地描述出主要水文地质概念模型,这可能是造成以往矿坑涌水量预测失真的主要原因之一。

多层数值解模型从立体空间的尺度刻画了地质实体,既注意了浅部条带状隐伏露头内边界所引起的多层充水含水层之间的水力联系,又考虑了深部点、线状导水内边界的水力交换,同时还叠加了呈整体面状展布的裂隙网格型内边界的越流,从而彻底结束了传统的仅考虑单层充水含水层预测该类型煤田矿井涌水量的历史,克服了前人在这个问题研究上的缺陷,更确切地反映了客观实际,减小了由于数学模型假设条件与地质模型客观条件相差太大而引起的计算误差,圆满地解决了多年来一直未能妥善处理的数学模型与地质模型的脱节问题,使矿井涌水量预测研究工作进入了一个新的发展阶段。

1997 年,周如禄、戴振学等在分析集贤煤矿水文地质条件和地下水动态的基础上,建立了矿区地下水运动的概念模型和拟三维的有限元数值模型,推导出了矿井涌水量预测表达式。

由于研究问题的目的和要求各不相同,研究区的矿床水文地质条件复杂多样,研究程度也各有差异。因此,建立模型要依据具体条件,用真实、客观的水文地质概念模型和数学模型进行客观描述。只有这样,才能为矿井水的涌水量预报和水位预测奠定可靠基础。

总之,其今后的主要发展趋势可以概括为以下 5 个方面:

(1)更加实时的模拟过程的信息需求分析,强调信息查询与模型仿真相结合,尤其注重复杂庞大的仿真模型的开发。

(2)日益重视图形、图像技术及多媒体技术的应用开发。主要包括图形用户界面、多窗口技术、信息的图形图像表示和快速查询,以及 GIS 结合的地理空间数据处理技术、配合模型的信息处理及反馈信息的图形图像表达等。

(3)采用先进的信息集成处理技术。将信息的收集、传送、处理、结果表达等集成在统一的计算机网络环境中,以加快信息运用的速度,满足实时模拟快速响应的要求。

(4)在库管理技术方面,通过方案管理技术来改善模型管理系统的功能,采用面向对象的数据库管理技术及 SQL 查询方式,增加数据更新的灵活性,提高信息查询速度,减少数据冗余,提高数据的安全性。

(5)应用范围将更为广泛。尤其在煤矿的矿井水水量预报与防治方面将发挥重要作用。

综上所述,矿井水文地质工作和防治水工作已经从定性逐渐向定量过渡。但从上述研究来看,其所见模型基本上以一维流、平面二维流、拟三维流为主,未能完全真实地对含水层进行刻画,尤其是在高水压、构造复杂的矿区,更难以真实地刻画其含水层。

本次研究将针对在大采深、高水压、构造复杂的矿区,利用目前流行的 Feflow 和 Modflow 的地下水模拟软件,对地下水运动和地下水污染进行研究。

参 考 文 献

- 程胜高,张聪辰.1999.环境影响评价与环境规划.北京:中国环境科学出版社
- 董兆祥,王彦祺,张明义.1997.矿区环境地质问题的预测与防治.北京:地质出版社
- 郭向东.1997.应用模糊数学法进行辽河下游段水质综合评价.水文科技信息,2(10):23~26
- 国家环保局监督管理司.1992.环境影响评价技术原则和方法.北京:北京大学出版社
- 刘国昌.1988.中国工程地质发展的回顾、反思与展望.河北地质学院学报,(3):32~36
- 马倩如,程声通.1990.环境质量评价.北京:中国环境科学出版社
- 毛文永.生态环境影响评价概论.1998.北京:中国环境科学出版社
- 武强,董东林,傅耀军等.2002.煤矿开采诱发的水环境问题研究.中国矿业大学学报,31(1):19~22
- 武强,金玉洁.1995.华北型煤田矿井防治水决策系统.北京:煤炭工业出版社
- 张忆晋.1990.环境影响评价实用方法.太原:山西科学教育出版社
- 中国环境科学学会.1984.中国环境科学合订本.北京:中国环境科学出版社
- 中国科学院黄土高原综合科学考察队.1990.黄土高原地区水资源问题及其对策.北京:中国科学技术出版社

第一章 中国煤矿水害分布特点

第一节 中国煤矿水害分布

我国煤矿床分布范围很广,储量丰富,除上海市外,全国其他 33 个省市自治区都有煤矿床。根据我国聚煤煤田的不同煤系地层、水文地质环境特征和矿井充水对矿井安全生产构成的水害的危害程度,将我国煤矿区划分为六大矿井水害区,即华北石炭系一二叠系岩溶-裂隙水害区、华南上二叠统岩溶水害区、东北侏罗系裂隙水水害区、西北侏罗系裂隙水水害区、西藏一滇西中生界裂隙水水害区和台湾省第三系裂隙-孔隙水水害区。我国矿井水害主要集中在华北和华南两大区,这些区域矿井水文地质条件极为复杂,水害相对严重,其他水害区域发生的水害相对较小且比较稳定(商登堂,2006;武强,2007)。

第二节 各水害区的综合水文地质环境

一、华北石炭系一二叠系岩溶-裂隙水水害区(I区)

本区位于中国华北断块分布范围之内,北以阴山构造带为界,西以贺兰山构造带为界,南至秦岭构造带,东临黄海。区内主要煤田(矿区)有 97 个,其中晚古生代石炭纪一二叠纪煤田 70 个,占 72%,分布区属亚湿润-亚干旱气候区,年降水量为 600~1000mm 的约占 70%,200~600mm 的约占 20%。石炭纪一二叠纪煤系基底岩层除西部贺兰山-桌子山一带是震旦系之前或震旦系的粗碎屑岩系外,其他大部分地区是中奥陶统碳酸盐岩(南界的宜洛、平顶山等地是寒武系碳酸盐岩)。寒武系、奥陶系碳酸盐岩地层是区域富水性最强的含水层,它们是开采石炭-二叠纪煤层时,造成矿井水害的最主要的水源。在华北地区中奥陶统碳酸盐岩与太原组之间是本溪组。在隆起区,本溪组的厚度只有 20m,而在拗陷区可达 120m 以上,一般为 40~50m。岩性大致分为 3 段;下段为砂岩、页岩、砂质页岩互层,底部有一层粘土层,局部有山西式铁矿层,该段为一相对隔水层;中段为厚层页岩夹砂岩,亦是相对隔水层;上段为砂岩、砂质页岩及灰岩段,灰岩含水性较强,在辽东、山东、苏北等地为富水性强的含水层(如山东淄博煤田本溪组徐家庄灰岩),而其他地区本溪组上段均为相对隔水的砂质页岩或砂质泥岩。太原组内含有 1~15 层灰岩,在本区北部太原组以碎屑岩为主,夹 5 层以下的灰岩,灰岩总厚度在 10m 以下;南部则以灰岩为主,灰岩层数均在 10 层以上,多者超过 15 层,灰岩总厚度均大于 10m。淮南和淮北地区的太原组灰岩厚度可达 70m 以上,含

水性由弱到强,是矿井充水的主要水源之一。

在华北断块内黄淮平原新生界松散沉积层下部的河流相和山麓冲洪积相砂砾含水层,是开采浅部煤层时矿井水害的主要水源地。

由于华北型石炭纪—二叠纪煤田多属滨海平原沉积,分布面积较大,煤系内有多层灰岩含水层,煤系基底奥陶系灰岩岩溶发育、含水性强,煤系形成后又经历多期构造运动的影响,加剧了灰岩内岩溶、裂隙的发育,加强了含水层之间的水力联系,使华北石炭纪—二叠纪太原组水文地质环境具有现在的特点。煤矿开采时,矿井涌水、突水频率高,涌水量达 $1000 \sim 120000\text{m}^3/\text{h}$,断层带突水占80%以上,突水水源以奥灰岩岩溶裂隙水为主要水源,防水治水工作相当困难。

二、华南上二叠统岩溶水水害区(Ⅱ区)

华南上二叠统岩溶水水害区位于中国淮阳古陆以南、川滇古陆以东的长江流域的苏南、皖南、江西、湖南、广东、广西、贵州、云南、四川等地。水害最严重的是上二叠统龙潭煤系的主要煤田(或矿井)。该水害区属湿润气候区,区内年降水量 $1200 \sim 2000\text{mm}$ 的地区占总区面积的95%以上。这类矿区的水文地质环境特征是:单个煤田(或矿区)分布范围都不大,属滨海三角洲沉积环境,因此储水构造一般较小;煤系底部和顶部都有巨厚的碳酸盐岩岩溶含水层,属上、下部岩溶充水的煤矿床;地表沟谷、溪流分布较多,地表岩溶发育;第四系松散层一般不厚,直接受大气降水和地表水影响。矿井正常涌水量达 $3000 \sim 8000\text{m}^3/\text{h}$,突水量在 $2700 \sim 27000\text{m}^3/\text{h}$,地表塌陷严重,井下突水伴有泥沙,雨季矿井水害发生的频率最大。

三、东北-内蒙古下侏罗统一上白垩统碎屑岩砂砾岩裂隙水水害区(Ⅲ区)

本区位于中国的东北和内蒙古东部的新华夏系巨型或一级沉降带内,属湿润—亚湿润气候区,年降水量 $400 \sim 600\text{mm}$ 的占60%, $600 \sim 800\text{mm}$ 的占25%。按煤系形成条件和含煤沉积特征可分4个类型:

1. 以阜新、铁岭为代表的断陷盆地

该断陷盆地早期为山间盆地,晚期演化为山间谷地。煤系基底为义县组火山岩系(安山岩及火山碎屑岩),含水一般较弱。主要含煤岩系是阜新组,是河床相沉积的砂岩,含水性中等。煤系上部常为新生界的松散层覆盖,浅部煤系受山间谷地的溪流地表水和第四系松散层地下水影响,有时造成淹井事故。

2. 以元宝山、胜利为代表的断陷型盆地

该断陷盆地煤系基底为兴安岭火山岩系,含水性弱,主要含煤岩系是上侏罗统九佛堂组及白垩系阜新组(元宝山组)。代表性的煤田有内蒙古的扎赉诺尔、伊敏、霍林河、元宝山、胜利和巴彦等。九佛堂煤系位于新华夏系第三巨型沉降带与阴山巨型纬向构造复合部位的西部边缘,岩性一般为山麓冲洪积相粗碎屑的砂砾岩和砂岩,含水性中等,横向岩性变化大。阜新组岩性较细,为湖相砂泥的互层,含水性弱。该煤系上部是新生界松散层,地表溪流较

发育,地表水和松散层地下水常为矿井充水的主要水源。

3. 以营城、辽源为代表的拗陷型陆相盆地

该盆地煤系基底为晚侏罗世早期的火石岭组中基性火山岩系,含水性弱。主要含煤岩系为沙河组,由含凝灰质湖相泥岩、粉砂岩、薄层细砂岩和煤层组成,含水性弱,煤矿区水文地质条件简单。

4. 三江-穆棱河近海环境下形成的拗陷型煤盆地

该煤盆地位于黑龙江省北部三江(黑龙江、松花江、乌苏里江)范围内,包括鸡西、勃利、双桦、双鸭山、集贤等已开发的煤田,是新华夏系与弧形构造相叠加而形成的拗陷型聚煤盆地。含煤岩系为鸡西群(或龙爪沟群),以陆相为主的含煤建造。下部为滴道组中性、中酸性火山岩和火山碎屑岩,含水性弱。含煤盆地两端岩石组合以中粗粒砂岩为主,含水性中一弱;盆地中部拗陷中心岩性变为粉砂岩、细砂岩、泥岩,含水性弱;煤系基底为震旦系变质岩系,含水性极弱。煤矿水文地质环境属于较简单。

四、西北下、中侏罗统碎屑岩裂隙水水害区(Ⅳ区)

该水害区位于昆仑-秦岭构造带以北中国西部和西北部的新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西北部 and 内蒙古西南部广大地区,包括有准格尔煤盆地、吐鲁番煤盆地、伊宁盆地、塔里木北缘和南缘煤盆地、柴达木北缘煤盆地、青海大通河煤盆地、甘肃靖远-会宁煤盆地、青海的西宁-大通煤盆地,以及陕北的鄂尔多斯煤盆地、内蒙古的大青山煤盆地等。这些煤盆地一般为拗陷型大型山间或山前湖盆地,边缘部位和底部岩性多为粗粒碎屑岩,含水性较强;盆地中心部位和中上部多为细粒碎屑岩,含水性弱。含煤岩系内部的水文地质环境多属水文地质条件简单类型,分布区属于旱气候区,年平均降水量 25~100mm 的占 80%,100~400mm 的占 20%。本区地表和地下均严重缺水,生活用水和工业用水困难,仅少部分地区有地表水和老窑水造成煤矿水害。

五、西藏-滇西中生界裂隙水水害区(Ⅴ区)

本区位于昆仑-秦岭构造带以南、川滇构造带以西的西藏、四川西部和云南西部,属湿润-亚湿润气候区,年平均降水量 300~600mm 的占 55%,800~1000mm 的占 35%,1000~2000mm 的占 10%。区内中生界煤田仅占全国煤炭储量的 0.1%,煤系以陆相碎屑岩为主,含水性弱,水文地质条件简单,煤矿水害不严重。

第三节 煤矿水害防治方法

我国自 20 世纪 70 年代以来,煤矿防治水主要遵循“预防为主,防治结合”的原则,以查清水文地质条件为基础,因地制宜。针对不同的水害类型,采取不同的防治措施,防治水方法多种多样,有疏、有堵、有疏堵结合。在煤矿水害防治工作中坚持“预测预报,有疑必探,先探后掘,先治后采”的 16 字方针,并根据矿井水害实际情况制定相应的“防、堵、疏、排、

截”综合防治措施(钟亚平,2001;赵铁锤,2007)。

在突水机理的研究上,先后提出了“突水系数”、“等效隔水层”和底板隔水层中存在“原始导高”等概念,认为底板突水机理是含水层富水性、隔水层厚度及其存在的天然裂隙、水压、矿压等因素的综合作用结果。在底板突水预测方面,模式识别方法、随机-信息方法和脆弱性指数法等新方法得到了很好的应用(武强,2006,2007a,2007b,2009;靳德武,1998)。

在疏水降压方面,有地表疏干、井下疏干,也有井上、井下联合疏干。疏水降压是我国矿井防治水害的主要技术措施。国内除普遍采用经常性疏干排水外,还先后进行了峰峰矿区和淄博矿区的薄层灰岩水的疏干,和降压及邯郸矿区的疏干工作程序和疏干勘探方法。

在注浆堵水方面,堵水截流是我国矿井防治水害的重要方法。在静水与动水条件下注浆封堵突水点、矿区外围注浆帷幕截流等都有比较成熟的方法和经验。焦作、峰峰、煤炭坝等矿区都进行过这类工作,特别是成功封堵开滦范各庄矿特大型突水。

此外,钻探技术的提高、综合立体勘探方法的采用、计算机技术的应用及各类软件的开发,对定量研究煤矿突水条件起到了重要推动作用。

1. 井下防水煤(岩)柱留设

在水体下、含水层下、承压含水层上或在导水断层附近进行采掘工程时,为了防止地表水或地下水突水、溃入工作地点,需要合理留设一定宽度或高度的防水煤(岩)层不采动,这部分煤(岩)层称为阻隔水煤(岩)柱或防水煤(岩)柱。其中有断层防水煤(岩)柱,井田边界煤柱,上、下水平(或相邻采区)防水煤(岩)柱,水淹区防水煤(岩)柱,地表水体防水煤(岩)柱和冲积层防水煤(岩)柱六种类型。

2. 井下探放水技术

井下探放水系指矿井在采矿过程中用超前勘探方法,查明采掘工作面顶底板、侧帮和前方的含水构造(包括陷落柱)、含水层、积水老窑等水体的具体位置、产状等,其目的是为有效地防治矿井水害做好必要的准备(刘洋,2008)。

3. 疏水降压技术

疏水降压是指通过疏干使煤层底板含水层或煤系地层含水层水压降低至采煤安全水压。疏水降压工程系统包括:排水工程、排水设施和疏水工程3部分^[11]。开滦赵各庄矿就是通过制订合理的疏水降压开采方案,实现了在受底板高压奥灰水威胁下安全带压开采,取得了巨大的经济和社会效益。

4. 注浆堵水技术

注浆堵水技术是煤矿防治水最重要的手段之一,主要应用于井筒掘凿前的预注浆、成井后的壁后注浆、堵大突水点恢复被淹矿井、截源堵水减少矿井涌水、井巷堵水过含水层或导水断层。如皖北矿务局任楼矿1996年3月4日发生的陷落柱特大突水,高峰期突水量达 $576\text{m}^3/\text{min}$,在陷落柱内煤底合适层位采用注浆堵水技术成功堵水(赵铁锤,2007)。

5. 带压开采技术

所谓带压开采就是煤层底板受承压水威胁,充分利用煤层底板至承压含水层间隔水层性能,在不采取,或在国家经济、技术条件许可情况下采取某些技术措施后,实现安全采掘的一种综合性防治水技术。近几年该技术在我国进行了较为广泛而深入的研究,取得了显著成绩^[11]。