



煤矿水害风险评价 与防治决策系统研究

Meikuang Shuihai Fengxian Pingjia
yu Fangzhi Juece Xitong Yanjiu

主 编 李丰军

副主编 翁克瑞 诸克军 柯小玲 龚承柱



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

煤矿水害风险评价与 防治决策系统研究

主 编 李丰军

副主编 翁克瑞 诸克军

柯小玲 龚承柱



中国地质大学出版社有限责任公司

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

煤矿水害风险评价与防治决策系统研究/李丰军主编. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司, 2012. 4

ISBN 978-7-5625-2827-2

I. ①煤…

II. ①李…

III. ①煤矿-矿山水灾-防治

IV. ①TD745

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 044499 号

煤矿水害风险评价与防治决策系统研究

李丰军 主编

责任编辑:蒋海龙

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司

邮政编码:430074

(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

电 话:(027)67883511 传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:880 毫米×1230 毫米 1/32

字数:160 千字 印张:5.5

版次:2012 年 4 月第 1 版

印次:2012 年 4 月第 1 次印刷

印刷:湖北睿智印务有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2827-2

定价:32.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

目 录

第 1 章 导 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究意义	(4)
1.3 研究现状与理论意义	(5)
1.3.1 研究现状	(5)
1.3.2 研究现状评价及理论意义	(20)
1.4 研究目标与研究内容、路线	(20)
1.4.1 研究目标	(20)
1.4.2 研究内容	(21)
1.4.3 主要创新点	(22)
1.5 全书框架	(23)
第 2 章 煤矿水害类型及防治方法	(25)
2.1 问题背景	(25)
2.2 煤矿水害类型及特点	(26)
2.3 煤矿水害防治的主要方法	(29)
2.3.1 顶板水害防治	(29)
2.3.2 底板水害防治	(30)
2.3.3 废弃小煤窑与老空水害防治	(32)

2.4	平煤五矿水害防治介绍	(33)
2.4.1	平煤五矿水文地质特征	(33)
2.4.2	平煤五矿水害类型分析	(35)
2.4.3	平煤五矿防治措施	(38)
2.5	小 结	(43)
第3章	煤矿水害风险评价	(45)
3.1	问题背景	(45)
3.2	水害风险评价体系	(46)
3.2.1	水害形成原理	(46)
3.2.2	水害演化机制	(47)
3.2.3	水害风险评价指标	(55)
3.2.4	水害风险等级划分	(58)
3.3	基于层次分析法的水害风险评价模型	(61)
3.3.1	AHP 原理	(61)
3.3.2	基于 AHP 的水害风险评价过程	(62)
3.3.3	基于 AHP 的水害风险等级评价	(68)
3.4	基于熵权法的煤矿水害风险评价模型	(70)
3.4.1	熵权法原理	(70)
3.4.2	熵权法评价步骤	(70)
3.4.3	基于熵权法的水害风险等级评价	(72)
3.5	基于组合赋权法的煤矿水害风险评价模型	(73)
3.5.1	组合赋权法原理	(73)
3.5.2	组合赋权法评价模型	(74)
3.5.3	基于组合赋权法的水害风险等级评价	(75)
3.6	三种煤矿水害风险评价比较	(77)

3.7 小 结	(79)
第 4 章 煤矿探水技术成本效益分析	(80)
4.1 问题背景	(80)
4.2 基于贝叶斯估计的探水技术可靠性分析	(82)
4.2.1 贝叶斯分析过程	(84)
4.2.2 直流电法可靠性评价	(88)
4.2.3 案例分析	(89)
4.3 基于贝叶斯决策的探水技术成本效益分析	(92)
4.3.1 分析步骤	(93)
4.3.2 案例分析	(94)
4.4 小 结	(97)
第 5 章 煤矿堵水疏水措施的成本效益分析	(98)
5.1 问题背景	(98)
5.2 水害防治成本分析	(100)
5.2.1 固定成本	(101)
5.2.2 变动成本	(102)
5.3 水害防治效果分析	(106)
5.3.1 定量因素	(106)
5.3.2 定性因素	(108)
5.3.3 风险等级变化	(109)
5.3.4 风险等级改进	(109)
5.4 水害防治成本效益分析	(111)
5.4.1 成本效益分析过程	(111)
5.4.2 实例分析	(114)
5.5 小 结	(124)

第 6 章 水害防治辅助决策系统开发设计	(125)
6.1 系统需求分析	(125)
6.1.1 系统功能需求分析	(125)
6.1.2 非功能需求分析	(126)
6.1.3 系统初始化数据	(126)
6.1.4 系统设计硬件及软件要求	(127)
6.1.5 系统开发技术	(127)
6.2 系统结构设计	(129)
6.2.1 系统总体结构设计	(129)
6.2.2 数据库设计	(131)
6.3 系统功能模块	(142)
6.3.1 系统登录模块	(142)
6.3.2 指标管理模块	(143)
6.3.3 风险评价模块	(144)
6.3.4 防治决策模块	(144)
6.3.5 方案输出模块	(146)
6.4 系统运行报告	(147)
6.4.1 系统登录	(147)
6.4.2 指标管理	(149)
6.4.3 风险评价管理	(150)
6.4.4 防治决策管理	(152)
6.4.5 系统输出	(157)
第 7 章 总结与展望	(162)
参考文献	(164)

第1章 导论

1.1 研究背景

我国少油、缺气、富煤的能源结构,决定了煤炭产业现在和将来都是国家能源的支柱产业,煤炭能源为我国经济发展作出了巨大贡献。建国50多年来,煤炭在一次性能源消费构成中一直占70%左右,2010年我国能源消费总量达32.5亿吨标准煤,其中煤炭消费量22.1亿吨,占一次能源消费总量的68.0%《《中国统计年鉴2011》》)。随着煤炭行业的迅速发展,采矿业逐渐引起采矿地区工程地质条件复杂化,对矿山开采威胁日益加重。煤矿中由于井筒和巷道本身穿越不同的地质单元体,在掘井、掘进和生产过程中揭露与含水层连通的断层,从而将不可避免地遇到涌水、岩爆、坍塌及地热等地质灾害,其中水害事故最为普遍和严重。煤矿水害事故的发生,不仅造成生产损失和人员伤亡,导致多种环境负效应,而且还威胁着大量煤炭资源的开采,对矿井安全生产构成严重威胁。

我国煤矿生产的水害威胁非常严重。从国家安全监管总局的安监规划可知,国有重点煤矿中,水文地质条件属于复杂或极复杂的矿井占27%,属于简单的矿井占34%。地方国有煤矿和乡镇煤矿中,水文地质条件属于复杂或极复杂的矿井占8.5%。

煤矿水害普遍存在,其中大中型煤矿有 500 多个工作面受水害威胁。在近 2 万处小煤矿中,有突水危险的矿井 900 多处,占总数的 4.6%。前国家煤矿安监局局长赵铁锤曾指出:受地质条件和煤矿开采历史等客观因素的影响,我国煤矿水文地质条件极为复杂,无论是受水害威胁的面积、类型,还是水害威胁的严重程度,都为世界罕见。

煤矿水害事故不仅影响煤炭行业的连续稳定生产,还造成重大财产损失和生命安全威胁。长期以来,因为煤矿水害给国家和人民带来的人身伤亡和经济损失极为惨重。据不完全统计,在过去 10 年里,共发生各类矿井水害事故 1 400 余起,死亡近 6 000 人,经济损失高达 35 亿元人民币。每生产 100 万吨原煤因水害死亡 0.375 人,因水害造成经济损失达 2 000 万元人民币。尤其是在煤炭生产基地的华北、华东地区,承受水害威胁的煤炭资源占已探明资源量的 27%。无论是水害发生的次数或死亡人数均居高不下,矿井水害已经成为制约我国煤矿安全的重大隐患。在 2010 年,全国煤矿共发生水害事故 38 起、死亡 224 人,同比减少 9 起、多死亡 58 人,分别下降 19.1%和上升 34.9%;其中较大(3~9 人)水害事故 13 起、死亡 60 人;发生重大(10 人以上)以上水害事故 6 起、死亡 137 人,同比增加 2 起、多死亡 83 人,分别上升 50%和 153.7%,占重大以上事故总数的 25%和 25.8%;发生 30 人以上特别重大透水事故 2 起,死亡 70 人。如,2010 年 3 月 28 日,华晋焦煤公司王家岭矿重大透水事故,死亡人数 38 人,透水水源为老空水;2010 年 3 月 1 日,神华集团乌海能源有限公司骆驼山煤矿重大突水事故,死亡人数 32 人,突水水源为底板奥灰水。

为此,我国各煤矿企业和有关部门制定了《煤矿防治水规定》及各项要求,努力防范矿井水害事故,加强煤矿安全生产工作。同时,有关水害防治技术研究逐步增多,并形成了以钻探、物探、化探为主导的探测手段。然而,目前我国众多煤矿现有水害防治过程中,仍存在以下几个方面的弊端。

(1)水害风险评价体系不健全。煤矿水害的形成与发生是一种具有非线性动力的复杂自适应现象,本书研究对象平顶山煤矿五矿(下文简称为平煤五矿)尚未形成考虑多种水害因素的水害风险综合评价体系,主要依靠经验丰富的工程师、技术人员的主观判断,其特点是主观因素权重大,客观因素相对较少,无法科学的给出水害风险等级。

(2)水害防治投入体系不完善。由于水害存在突发性,其防治过程考虑到因素复杂、防治方案多样、防治收效周期长,现有防治决策难以准确评估水害防治过程中的安全成本投入以及其投入成本效益。

(3)缺乏水害的动态监测和辅助决策手段。目前,缺乏一套完善的水害预测和防治信息支持系统,某些水文信息数据未进行有效管理,尚不能对水害关键影响因素进行动态监测,且无法根据矿区环境动态更新水害影响因素的权重,缺少辅助决策的动态信息支持,水害防治方案的成本与效益也缺乏科学的分析手段。

在此背景下,本书以系统仿真、系统评价、系统设计、贝叶斯决策等理论为基础,深入分析煤矿水害的演化机理,构建水害风险评价体系,剖析水害治理的成本效益,并将研究方法集成到水害防治决策辅助系统,为水害风险监控、防治决策提供有效的信息基础和决策支持。

1.2 研究意义

煤矿水害风险评价和防治措施成本效益评估是一项既分散又系统的研究。由于矿井地质条件复杂,分散在不同采区和采面的探测试验往往存在显著差异,只有结合多种探测技术从不同角度进行系统分析,才能更大程度地认识矿区的水文地质条件,为水害风险评价和防治措施提供合理的依据。因此,研究煤矿水害事故对保障财产生命安全和认知矿区水文地质条件有着重大的现实意义。

(1)本研究运用多主体系统建模和仿真来模拟水害形成过程及要素之间的作用系统,这一研究有助于我们深入认识水害的演化机理和影响因素。

(2)本研究建立的水害风险评价体系可以直观反映水害风险等级,为风险监控、防治管理提供有效的信息基础。

(3)本研究构建的水害防治决策的成本及效益评估方法可以对水害防治的科学管理提供指导作用。

(4)本研究开发的水害风险防治决策系统可以管理水文地质数据,直观显示和监控风险等级,为水害防治提供辅助决策功能。

总之,由于煤矿水害事故是一种具有非线性动力复杂自适应现象,其形成与发生过程具有复杂机制。本研究从系统分析角度,对煤矿水害的演化过程进行分析,对煤矿水害事故的主控因素进行风险评价,有利于确定采区水害影响因素之间的脆弱性关系。同时,研究煤矿水害防治措施的成本效益,是煤炭企业从粗放式管理到精细化管理模式的一种过渡,有利于当前管理理念向

煤炭行业渗透,促进煤炭行业科学发展。

1.3 研究现状与理论意义

1.3.1 研究现状

随着开采深度的下延,煤矿水文地质条件更趋复杂,水害事故频发,为有效地防患于未然,国内外学者对煤矿水害作了大量研究。总结起来,包括水害风险的评价、防治对策和决策支持系统三个方面。

(1)从水害的产生因素入手,对煤矿水害风险进行评价

在对煤矿水灾事故发生的必要条件和类型分析的基础上,研究者认为对煤矿水灾安全评价主要从客观条件和人为因素两个方面进行考虑。冯治斌从追根溯源的角度,基于事故树分析法构造出事故树,通过逻辑运算找出导致矿井水灾事故发生的各种可能途径,由基本因素结构重要度分析计算每个因素对矿井水灾发生的影响程度,以此对每个因素进行排序。该方法通过事故树分析法确定每个因素对矿井水害发生的影响程度,但对应的防治措施只是按照“规程”提出要求,没有深入探讨具体操作及其实施可行性。王长申等将煤矿突水事故危险源划分为突水水源、突水通道、突水诱因和应急失效四类,基于事故致因理论建立煤矿突水事故树模型,以杨庄矿及其周边6个地方煤矿为例,分析最小割集评价最危险突水路径,利用最小径集提出最有效防治措施。煤矿突水事故树能深入地揭示突水事故发生源,但其确定基本事件的过程属于定性分析,而且其结构重要度的计算是在不考虑基本

事件发生概率或假定各基本事件的发生概率相等的情况下进行的。该研究提出基于结构重要度比较得出防治方案是当前要做的工作,但并没有详细地介绍如何做,以及对这样做的效果如何评估等。

胡永达在对突水危险源分析的基础上,建立了杨庄煤矿突水事故模型,基于事故树的煤矿水害危险性评价方法,建立了水害安全检查表,采用安全检查表分析评价法对杨庄煤矿周边6个地方煤矿进行了危险性评价,针对杨庄煤矿的不同水害类型及危害程度提出了煤矿水害防治措施。

煤矿水害的定性分析揭示了水害发生的源头和关键因素,从逻辑的角度指明了水害预防和治理的方向。如何用更直观量化的方式刻画煤矿水害影响因素的重要性程度和评判煤矿发生水害的风险大小,就是下一步所要研究的工作。很多学者尝试用不同方法或多种方法的组合来解决这一问题。

煤炭的开采大多是井下作业,矿井的水文地质条件极其复杂,这是导致矿井突水的直接原因。鉴于此,很多学者运用数值模拟的方法对发生突水的水文地质条件进行了模拟。Wang等通过数值模拟软件ANSYS,对开采过程中煤层底板断层活跃规律进行了模拟。结果表明,横向、纵向和剪应力的变化以及水平和垂直位移,同综采工作面上下的断块几乎是相同的。通过应力等值线分析工作面断层上下盘在横向和纵向上的应力区和位移情况,判断煤层底板发生突水的概率。Dong等鉴于以往的研究和采矿工作面典型的地质条件,模型实验模拟了开采过程中第四纪地层及以上基岩、沙、突水底部的黏土层裂隙发展情况,揭示了黏土层裂缝产生的周期性规律以及黏土层的通透性对突水的影

响。Zhu 等指出奥陶系灰岩水是中国北方矿山安全生产的隐患之一,根据煤矿工作面的底板岩石结构特点和力学性能建立了关键层的数值模型,用来预测故障模式并帮助建立含水层上安全开采的规则。通过故障过程分析软件(RFPA2D)模拟变形、故障和渗水的分布情况,同时获得应力分布、变形和流向量,最终分析得出矿山压力和水压力的共同作用是最终导致底板突水的原因。Sun 等针对河南新安煤矿面对的突水风险,为预测水灾害,通过岩相分析和地表水、地下水的长期观测,确定水渗透的限制。通过实地监测、物理和数值模拟实验,得出一个公式来计算水流量的不同高度,并基于地理信息系统建立了预测模型。通过实例应用,将煤矿区分为不同子区,不同子区对应着不同突水的潜力。Xu 等基于新安煤矿煤炭开采中覆岩故障和裂隙带发展的信息,结合物探方法和数值模拟研究煤矿突水风险,获得不同的开采条件下裂隙带的发展规律。这些结果成功地应用于新安煤矿的决策,同时为大型水库下煤炭开采提供了一个评估和应用的成功案例。Jiang 等为了分析正在开采的煤层隔水地层的破坏程度,实现深含水层上的安全开采,考虑到结构特点和软硬岩分层底板的机械性能,建立了隔水地层的数值模型,使用 FLAC 的流体—结构相互作用分析模块模拟变形、故障和渗水的分布特征,得到了相应的应力分布特征,研究结果为矿井地面突水机制提供参考。

运用数值模拟的方法对矿井突水的水文地质条件进行模拟,也是学者研究矿井水害的重要方法。Zhu 等基于地下压力的分析,在弹性理论的基础上建立了煤层底板应力计算模型。模型给出了采煤层相对固定位置上的应力分布规律。随着工作面的推进,最大主应力变化逐步从垂直方向向水平方向改变。通过对比

主应力的差异,即可得到煤层底板岩体的变形和渗透性。这种方法是防治承压含水层突水的一个重要机制。Miao 等根据渗流在破碎岩石中非达西的属性,建立了非达西非稳定流动的动力学方程。通过无量纲变换,可以得到满足给定的边界条件下稳定状态的解决方案图。利用低松弛迭代数值分析,可以获得不同的流量参数下的动态反应。利用突变理论,构建渗流不稳定的折叠突变模型,最终可以画出不同控制参数下渗流系统的分岔曲线。针对破碎岩石的渗流动态系统,也可得出考虑一般折叠突变状态变量的标准的潜在函数。Wang 等使用 FLAC3D 软件模拟了由于工作面采矿导致的深部采场底板变形和破坏的规则。在增长方向和倾斜方向上模拟了工作面的水平应力、垂直应力、剪应力、水平位移、垂直位移和塑性区分布。以实际案例计算了突水系数,通过与临界值的对比,判断底板含水层突水的可能性,确定是否采取有效措施,确保工作面安全开采。Han 等使用矿井工作面含水层地层力学原则和突水的路径,通过底板故障研究了矿井突水的机制,以中国肥城煤田为例,描述了底板发生故障与否是判断地面突水的一个标准。Tang 等为了从机械的角度研究隐蔽崩溃支柱突水机制,基于弹性力学、厚板理论力学建立了崩溃支柱突水模型,以获得水压作用下耐水性岩层的变形情况和崩溃支柱突水的临界水压力。研究表明:在崩溃支柱突水影响因素中,边界条件和耐水性地层的力量发挥着重要的作用,关键突水的压力是由两个相对的厚度和耐水性地层的绝对厚度来决定的。

Wang 等运用量化理论(II)研究有关煤矿透水的风险预测问题,解决了定型数据的定量化问题。以肥城矿区为例,通过煤矿透水主要影响因素的调查,确定了 8 个风险评估项目,把风险

程度分为4个等级,建立煤矿透水的风险预测模型,预测结果表明了模型的有效性。王家海等针对矿井突水事故影响因素存在的灰色不确定性特征,选取王河煤矿井田内和相邻的开采同一煤层且处于同一水文地质单元内的矿井,并对其已发生的突水事故资料进行整理和分析,采用灰色风险模型对王河煤矿煤层发生矿井突水的可能性进行了评价,通过计算灰色风险率和灰色风险度,描述灾害出现的可能性和风险,为王河煤矿制定矿井水害防治规划提供依据。He采用系统动力学的理论和方法,动态模拟分析不同因素对煤矿安全管理的影响力,找出不同因素在复杂的安全管理制度中的实际效果,给煤矿企业和有关政府部门制定煤矿安全管理和决策提供了一个新的视角。李云龙以江苏姚桥煤矿问题为背景,采用多源信息融合技术,分别基于GIS的层次分析法AHP型脆弱性指数法和GIS的“三图法”对其西翼采区7号煤层底板涌(突)水进行综合评价。在评价的过程中,均通过AHP确定煤层底板突水影响因子权重贡献率。周胜利根据危险指数评价方法各个因素间均以加或乘的处理方式,忽视各因素间重要性差别的不足,提出了基于关键指标的水害危险性评价方法:建立了水害评价指标体系,采用相对比较法来确定一级评价指标的权重,专家咨询法确定二级指标的权重;对指标进行了量化,利用安全检查表的形式对二级指标进行量化,通过二级指标的函数关系对一级指标量化;计算出了水害危险性评价分值,并与专家划分的水害等级对比确定水害等级。韩进等采用概率统计与专家分析相结合的方法,确定影响底板突水各种因素的权重,获得底板突水概率指数,在此基础上基于D-S证据理论,建立系统的识别框架,构建底板突水融合决策模型。通过肥城煤田

陶阳煤矿 9901 工作面应用实例,证明基于多属性决策和 D-S 证据理论建立底板突水两级融合决策模型在底板突水决策的有效性和可行性。

由于矿井水害的影响因素既有水文地质条件,又有技术因素和管理水平,有些因素难以量化或难以有一个确定的值,考虑到这种情况,有学者引入模糊理论,以解决这些难以准确刻画的因素的描述问题。史晓明在对煤矿水害事故致因分析的基础上,应用模糊层次分析方法对其进行了评价,对水害致因因素的相对重要性进行了排序。刘伟韬等根据底板突水各因素之间的相互关系,构建突水评价因素指标体系,结合层次分析和模糊评判评价矿井底板突水安全性。该方法首先根据层次分析法求得各级指标的权重系数,再运用模糊综合评判的隶属函数计算每个评价因素隶属度值,构造评价矩阵,最后通过合成运算层次分析法与模糊综合评判求得的权重矩阵,根据最大隶属度原则,评判底板突水危险性的关键因素。Liu 等提出了一种煤炭开采安全性评价的指标体系,综合层次分析法和灰色聚类方法的优点,保证权重系数的准确性和客观性。该体系首先通过层次分析法确定指标权重,然后运用灰色聚类方法对安全进行评估。该模型从定性和定量两个角度分析了煤矿的安全状况,实时监控煤炭生产线的情况,以辅助决策。Wei 等为评估兖州矿区下组煤层突水的风险,在系统收集水文地质资料和开采工作面数据的基础上,使用无量纲分析方法评价该地区煤炭层突水的影响因素,通过多元线性回归分析得到煤层突水因素的秩序和破坏层深度,并分析了较低煤层开采工作面的突水系数,提高了突水系数法的评价标准,最后使用突水系数法和模糊聚类方法对煤炭底板突水风险进行了综