

山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助



# 矿井突水灾害蚁群算法

## 理论与方法

戴洪磊 王春玉 刘洪滨 牟乃夏 著

地震出版社

# 矿井突水灾害蚁群算法理论与方法

戴洪磊 王春玉 刘洪滨 牟乃夏 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

矿井突水灾害蚁群算法理论与方法/戴洪磊等著. —北京:地震出版社, 2015. 12  
ISBN 978-7-5028-4689-3

I. ①矿… II. ①戴… III. ①人工智能—算法理论—应用—矿井突水—处理  
IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 254304 号

地震版 XM3680

矿井突水灾害蚁群算法理论与方法

戴洪磊 王春玉 刘洪滨 牟乃夏 著

责任编辑: 赵月华

责任校对: 凌 樱

---

出版发行: 地震出版社

北京市海淀区民族大学南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

专业部: 68467971

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大天成印务有限公司

---

版 (印) 次: 2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月第一次印刷

开本: 710 × 1000 1/16

字数: 96 千字

印张: 4.75

书号: ISBN 978-7-5028-4689-3/TD (5384)

定价: 28.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

# 前 言

空间数据挖掘作为空间信息应用技术,已被广泛地应用于社会、经济、环境和工程等多个领域的建模和辅助决策中,本书探讨空间数据挖掘中近年来发展起来的蚁群算法技术与 GIS 技术融合在矿井突水灾害预测预报中的应用问题。

本书共分 6 章。第 1 章介绍了当前我国矿井突水灾害的发生现状和国内外研究进展。第 2 章介绍了空间数据挖掘蚁群算法技术的概念、特点、类型、学习规则、应用领域及其优缺点等基础知识。第 3 章讨论了矿井突水灾害的各主要影响因素,及其当前国内外研究采用的影响因素定量分析方法。第 4 章详细介绍了作者采用当前商业软件 ArcGIS 推广用的水文数据模型 (ArcHydro) 规范,结合矿井地下水的独特性建立的矿山水文空间数据库的设计方法。第 5 章介绍了蚁群算法技术融合 GIS 技术进行矿井突水灾害预测预报的预测模型,并测试了模型的应用有效性。第 6 章简单总结了本书中的主要研究成果,并给出了该领域中需要进一步研究的问题和方向。

本书可供从事地理信息系统、空间数据挖掘、蚁群算法研究、矿井突水灾害预测等理论研究和应用开发的科研和技术人员、管理人员,以及大专院校师生参考。

作者受水平和时间所限,书中错误难免,望读者批评指正。

戴洪磊

2015 年 6 月 1 日

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第1章 绪 论 .....                   | 1  |
| 1.1 矿井水害概述 .....                | 1  |
| 1.1.1 我国煤矿水害概述 .....            | 1  |
| 1.1.2 我国煤矿水害防治技术现状 .....        | 2  |
| 1.2 矿井水害的类型 .....               | 8  |
| 1.3 采矿与矿井突水机理研究进展 .....         | 9  |
| 1.4 矿井突水预测理论的研究概况 .....         | 11 |
| 1.4.1 预测理论概述 .....              | 11 |
| 1.4.2 预测理论方法介绍 .....            | 11 |
| 1.5 国内外矿井突水灾害预测研究概况及发展展望 .....  | 15 |
| 1.5.1 预测研究概况 .....              | 15 |
| 1.5.2 存在的问题及展望 .....            | 17 |
| 1.6 本章小节 .....                  | 17 |
| 第2章 蚁群算法基础知识简介 .....            | 18 |
| 2.1 蚁群算法的概念及其系统学特征 .....        | 18 |
| 2.1.1 蚁群算法的概念 .....             | 18 |
| 2.1.2 蚁群算法的系统学特征 .....          | 19 |
| 2.2 蚁群算法的研究进展与应用领域 .....        | 21 |
| 2.2.1 蚁群算法的进展 .....             | 21 |
| 2.2.2 蚁群算法的应用领域 .....           | 23 |
| 2.3 基本蚁群算法模型 .....              | 24 |
| 2.4 蚁群算法的改进算法 .....             | 26 |
| 2.4.1 信息素挥发因子的自适应调整 .....       | 26 |
| 2.4.2 信息素增量的动态自适应调整 .....       | 27 |
| 2.4.3 信息素量的更新调整 .....           | 29 |
| 2.5 基于蚁群算法矿井突水预测模型建立的应用分析 ..... | 30 |
| 2.6 本章小节 .....                  | 32 |
| 第3章 矿井突水灾害概述 .....              | 33 |
| 3.1 矿井突水水源 .....                | 33 |

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 3.2   | 矿井突水地质构造 .....               | 35 |
| 3.3   | 矿井突水水压 .....                 | 36 |
| 3.4   | 矿井突水矿压 .....                 | 36 |
| 3.5   | 矿井突水隔水层 .....                | 37 |
| 3.6   | 矿井突水影响因素综合分析 .....           | 37 |
| 3.7   | 本章小结 .....                   | 39 |
| 第4章   | 矿山水文空间数据库设计 .....            | 40 |
| 4.1   | 矿山空间数据库设计总则 .....            | 40 |
| 4.1.1 | 矿山空间数据库建库要求 .....            | 40 |
| 4.1.2 | 矿山空间数据库建库原则 .....            | 40 |
| 4.1.3 | 矿山空间数据库用户和用途要求 .....         | 41 |
| 4.2   | 矿山实体空间数据库设计 .....            | 41 |
| 4.3   | 矿山水文空间数据库设计 .....            | 43 |
| 4.4   | 矿山水文空间数据库建设 .....            | 46 |
| 4.4.1 | 矿山水文空间数据库的建立依据 .....         | 46 |
| 4.4.2 | 矿山水文空间数据库的数据采集 .....         | 46 |
| 4.5   | 本章小节 .....                   | 48 |
| 第5章   | 矿山突水灾害蚁群算法预测模型的建立及应用分析 ..... | 49 |
| 5.1   | 矿山突水灾害蚁群算法预测模型建立的基本思路 .....  | 49 |
| 5.2   | 矿山突水蚁群算法预测模型改进算法及实例 .....    | 49 |
| 5.2.1 | GIS 空间关系分析 .....             | 49 |
| 5.2.2 | Matlab 工具及其应用函数 .....        | 52 |
| 5.2.3 | 信息素挥发因子的自适应调整 .....          | 55 |
| 5.2.4 | 信息素增量的动态自适应调整 .....          | 57 |
| 5.2.5 | 信息素量的自动更新调整 .....            | 60 |
| 5.3   | 蚁群算法预测模型各改进算法优劣对比 .....      | 63 |
| 5.3.1 | 信息素因子的动态更新算法 .....           | 63 |
| 5.3.2 | 信息素增量的动态自适应调整算法 .....        | 63 |
| 5.3.3 | 信息素量的更新调整算法 .....            | 63 |
| 5.4   | 本章小结 .....                   | 63 |
| 第6章   | 总结与展望 .....                  | 64 |
| 6.1   | 回顾总结 .....                   | 64 |
| 6.2   | 研究展望 .....                   | 65 |
| 参考文献  | .....                        | 66 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 矿井水害概述

煤炭行业一直都是我国国民经济发展中的支柱产业。当前,煤炭占能源结构的70%以上,在今后几十年内仍会是我国的主要能源来源。随着我国经济的快速发展,煤炭的需求量与日剧增,开采也达到了前所未有的速度。然而我国许多煤矿开采目前都存在矿井水害问题。

矿井水害是指矿山在建设 and 生产过程中,不同水源的水通过不同的途径以不同的方式进入矿井,并给矿山正常生产带来影响和灾害的过程与结果。由于我国很多煤矿井下水文地质条件异常复杂,在煤层开采过程中,受到多种水害的威胁,尤其随着近年来矿井开采深度的不断加深,煤层承受的矿压、水压也显著增加,开采水文地质条件更趋复杂化,使得我国煤矿防治水的形势严峻,同时治理难度也逐步升级,导致各类矿井水害事故频繁发生,并且矿井突水量有增大的趋势,突水类型也趋向多元化,造成重大人员伤亡事故和经济损失,矿井水害已成为煤矿安全生产的重大隐患之一。

### 1.1.1 我国煤矿水害概述

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做出了巨大贡献。建国60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,对矿山开采日益加重。煤矿中由于井巷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,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%。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威胁。长期以来,因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,共发生各类矿井事故 1400 余起,死亡近 6000 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 2000 万人民币。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探明资源量的 27%。无论是水害发生的次数或死亡人数均高居不下,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,死亡多 58 人,分别下降 19.1% 和上升 34.9%;其中重大水害事故(一次死亡 3~9 人)13 起、死亡 60 人;发生特大(一次死亡 10~49 人)及以上水害事故 6 起、死亡 137 人,同比增加 2 起、死亡多 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 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;2012 年 1 月 7 日山东嘉祥新河矿业发生顶板突水事故,最大涌水量达到  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$  以上,1 名矿工遇难;2012 年 12 月 1 日黑龙江七台河煤矿由于越界开采,与一废弃煤矿挖通导致透水,造成 8 人遇难。由此可见,水害发生的次数或死亡人数均高居不下,矿井水害已经成为制约我国煤矿安全的重大隐患。

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。

### 1.1.2 我国煤矿水害防治技术现状

矿井水害与水害形成的条件有直接对应关系。矿井水害充水条件包括充水水源、涌水通道和充水强度(涌水量)。这三个条件在特定条件下的不同组合决定了不同的矿井水害类型和灾害程度,即充水条件决定水害类型,有什么样的涌水通道和充水强度就存在什么样的水害特征。因此,矿井充水三条件也叫作矿井充水三要素。



我国现行常用的煤矿水害防治技术经验丰富。国内外矿井水文地质工作者 60 多年的不懈努力,特别是从 20 世纪 60 年代至今的 40 多年来,我国煤矿水文地质工作者通过国家“六五”“七五”等科技攻关项目、国家大型工业性试验、联合国资助项目等重大课题,在各类煤矿水害防治的基础理论、探测方法、预测方法、快速综合治理等技术研究和应用及新技术、新装备的开发和引进方面进行了大量的、有效的工作,并取得长足发展,形成了适合我国矿山水害不同阶段预测、评价与治理的较完整理论体系及与之配套的技术方法,并在全国大部分矿区得到较好的推广和应用。特别是在华北地区,通过各方面共同努力,数十亿吨煤炭资源承受的奥陶系灰岩水害威胁得以解除。

概括地讲,矿井水害防治技术包括矿井水文地质条件探查、水文地质类型及矿井水害评价、矿井水害治理等。

### 1.1.2.1 水文地质探查技术

根据我国现阶段煤矿水害的主要类型和特点,矿井水文地质勘探的主要任务就是针对这些类型和特点开展探查工作。具体探查内容包括采矿影响到的含水层及其富水性,隔水层及其阻水能力,构造及“不良地质体”控水特征,老窑分布范围及其积水情况等方面。勘探范围包括区域、井田、采区及工作面。工作顺序应由面到点,由大到小,先区域后井田,先采区后工作面。

传统技术和手段在矿井水文地质勘探中发挥了极为重要的作用,随着科学技术的进步和发展,特别是电子技术、计算机技术的突飞猛进,水文地质勘探技术和手段发生了质的飞跃。现在有物探、化探、钻探、测试与试验及模拟计算等技术方法和手段,特别是这些方法和手段的综合应用已能比较好地解决矿井水文地质勘探中的大部分问题。

#### 1) 水文地质试验技术

水文地质技术的基本方法是以水文地质理论为基础,以水文地质钻探、抽注水试验、底板岩石力学试验为主要手段,探查含水层及其富水性,主要含水层水文地质边界条件,各含水层之间的水力联系等,并获取建立水文地质概念模型的相关资料,同时探查煤层底板隔水层岩性、厚度、结构及阻水能力。在钻探过程中,测试承压水原始导升高度,通过采取岩芯测试岩石物理、力学性质等。

抽注水试验是水文地质技术中最核心的方法,它不仅能为水文地质计算提供资料,而且重要的是抽注水试验过程本身就能反映含水层的水文地质特性。因此,抽注水试验是水文地质勘探最为有效和首选的技术方法之一。但该方法的缺点是历时长、费用高。所以近 20 年来又推出脉冲干扰试验法,在一定的条件下可以替代抽注水试验。

脉冲干扰试验是一项新的水文地质连通测试技术,其原理是通过水文地质观测

点对地下水流场进行脉冲激发,根据波的衍射、叠加与消减等原理,计算水文地质参数,评价水文地质条件。该方法快捷、准确、工程量小、时间短、费用低,可弥补抽注水试验时因钻孔出水量小而不能反映水文地质条件的弊端。

## 2) 地球物理勘探技术

地球物理勘探技术经过多年的发展,在地质、水文地质探查中的地位和作用越来越明显,越来越重要,加上方便、快捷的优势,近几年在煤矿防治水领域得到了极大推广和应用。常用的效果比较好的方法有以下几种:

(1) 地震勘探:包括二维和三维地震勘探,是弹性波地面探查构造及不良地质最有效的方法。在新采区设计前必须用三维地震进行勘探,主要应用于以下 8 个方面:①查明潜水面埋藏深度;②查明落差大于 5 m 的断层;③查明区内幅度大于 5 的褶曲;④查明区内直径大于 20 m 的陷落柱;⑤探明区内煤系地层底部奥陶系灰岩顶界及岩溶发育程度;⑥探测采空区和岩浆侵入体;⑦查明基岩起伏形态、古河道、古冲沟延伸方向;⑧了解基岩风化带厚度。

(2) 瞬变电磁 (TEM) 探测技术:TEM 法观测的是二次场,因此对低阻体特别灵敏,是地面探测含水层及其富水性、构造及其含水情况、老窑及其积水多少的主要手段。

(3) 高密度高分辨率电阻率法探测技术:使用单极—偶极装置,通过连续密集地采集线的电响应数据,实现了地下分辨单元的多次覆盖测量,具有压制静态效应及电磁干扰的能力,对施工现场适应性强。该法使直流电法在探测小体积孤立异常体方面取得了突破,可准确直观地展现地下异常体的赋存形态,是地面、井下探测岩溶、老窑及其他地下洞体的首选方法。

(4) 直流电法探测技术:属于全空间电法勘探,可在地面及井下使用。主要应用在 4 个方面:①巷道底板富水区探测;②底板隔水层厚度、原始导高探测;③掘进头和侧帮超前探测,导水构造探测;④潜在突水点、老窑积水区、陷落柱探测。

(5) 音频电穿透探测技术:由于探测深度的限制,一般只应用于井下。主要探查:①采煤工作面内及底板下 100 m 内的含水构造及其富水区域分布范围,并进行富水块段深度探测;②工作面顶板老窑、陷落柱、松散层孔隙内含水情况及平面分布范围探测;③掘进巷道前方导水、含水构造探测;④注浆效果检查。

(6) 瑞利波探测:探测对象是断层、陷落柱、岩浆岩侵入体等构造和地质异常体,以及煤层厚度、相邻巷道、采空区等,探测距离 80~100 m,优点是可进行井下全方位超前探测。

(7) 钻孔雷达探测技术:通过钻孔探查岩体中的导水构造、富水带等。

(8) 坑透:采面掘透后,要进行坑透,查明采面内的构造发育情况。

(9) 地震槽波探测技术:可用于:①探明煤层内小断层的位置及延伸方向;

②陷落柱的位置及大小；③煤层变薄带的分布；④可进行井下高分辨率二维地震勘探，探测隔水层厚度、煤层小构造及导水断裂等。

另外，还有其他一些地球物理勘探方法，如超前机载雷达、建场法多道遥测探测技术等。

### 3) 地球化学勘探技术

主要通过水质化验、示踪试验等方法，利用不同时间、不同含水层的水质差异，确定突水水源，评价含水层水文地质条件，确定各含水层之间的水力联系。主要的技术方法包括：

(1) 水化学快速检测技术：用于井下出水点、钻孔水样水质的快速检测。

(2) 突水水源快速识别技术：通过水化学数据库，利用水质判别模型快速判别突水水源。

(3) 连通试验：是查明含水层内部、含水层之间、地下水与地表水之间相互联系的一种见效快、成本低的试验手段。它对判断矿井充水水源、分析含水层之间的水力联系等都具有很重要的意义，该方法通常在放水试验过程中使用。

### 4) 钻探技术

最近十几年来，国内外钻探技术飞速发展。从适合地面、井下探放水，探构造及不良地质体到水文地质勘察、注浆堵水成孔等用途的地面钻机、坑道钻机，其能力和性能均有极大加强，同时定向钻进技术随着钻孔测斜技术的提高也逐步走向成熟。现在不管是地面用钻机还是井下坑道钻机均可实现“随钻测斜、自动纠偏”，可以说现有钻探技术已能很好地满足水文地质探查中对钻探手段的技术要求。

### 5) 监测测试技术

(1) 基本水文地质监测：主要仪器设备包括水位水压遥测系统、水位水压自记仪和水量监测仪（电磁量仪）。主要监测内容有：①矿井各含水层和积水区水位水压变化情况；②矿井所在地区降水量、矿井不同区域涌水量及其变化情况；③矿井受水害威胁区水文地质动态变化情况；④矿井防排水设施运行状况；⑤地面钻孔水位、水温监测等。

(2) 煤层底板或防水煤（岩）柱突水监测：主要设备为底板突水监测仪。监测方法是：通过埋设在钻孔中的应力、应变、水压、水温传感器监测工作面回采过程中应力、应变、水压、水温的变化情况，数据传送到地面中心站后，利用专门的数据处理软件判断能否发生突水。主要应用于具有底板突水危险的工作面回采过程中的突水监测。

(3) 原位地应力测试：主要设备是原位应力测试仪，是一种以套筒致裂原理为基础的原位地应力测试仪器。通过监测工作面回采前、回采过程中的地应力变化，应用专门数据处理软件判断是否发生突水，该技术主要用于底板突水监测。

(4) 岩体渗透性测试: 主要设备是多功能三轴渗透仪。通过调节岩体的三向应力机态, 测试不同应力状态下的水压、水量变化, 以反映岩体渗透性随应力的变化规律。

### 1.1.2.2 矿井水害评价理论及技术

#### 1) 矿井充水类型评价

矿井充水类型按充水水源类型可分为岩溶充水型、裂隙充水型、孔隙充水型、老空充水型, 按水文地质条件复杂程度可分为简单、中等、复杂、极复杂 4 种类型。

#### 2) 突水机理及预测预报技术

(1) 突水预测理论, 主要有: ①经验理论, 即突水系数理论、“下三带”理论、递进导升理论; ②以力学模型为基础的突水机理与预测理论, “薄板结构理论”“关键层理论”“强渗通道”说和“岩水应力关系”说等。

(2) 突水预测预报方法, 主要有“五图-双系数”法, “三图-双预测法”, 模糊综合评判法, 人工神经网络方法等。

#### 3) 涌水量计算与评价

(1) 建立在地下水渗流理论基础之上的解析法和数值法。

(2) 建立在回归分析等数理统计理论之上的经验公式法、比拟法、 $Q-S$  曲线外推法。

(3) 建立在质量守恒定律基础上的水均衡法。解析法和数值法一般应用在严格按稳定流、非稳定流标准观测的抽注水试验后预测涌水量。经验公式法、比拟法、 $Q-S$  曲线外推法应用在大量统计资料的矿区。由于各种方法对资料和相关条件的要求不尽相同, 可选择适合特定某矿的计算方法。综合比较, 数值法建立在严格的数据观测基础上, 充分考虑了含水层的非均质性、各向异性和水文地质系统的边界条件等, 计算结果比较准确, 已得到广泛应用。

### 1.1.2.3 煤矿水害防治技术

#### 1) 水害防治工作的基本方针

煤矿水害防治以“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”为基本原则, 并根据矿井水害实际情况制订相应的“防、堵、疏、排、截”综合防治措施。

“预测预报”就是要在查清矿井水文地质条件的基础上, 对矿井的水文地质类型、水害隐患、严重程度进行分析研究, 并通过相应的水文地质工作, 对矿井水文地质条件进行分采区、分工作面, 评价圈定安全区、临界危险区和危险区, 并标注于相关图纸上, 排除开采活动的盲目性。“有疑必探”是指在预测预报工作的基础上, 对没有把握的区域或块段, 采用物探、化探、钻探等方法 and 手段进行综合探查, 以探明水害疑点或可疑作业区域。“先探后掘”是指在综合探查的基础上, 在确保巷道掘进或工作面回采没有水患威胁时, 可实施掘进及回采作业。“先治后采”是指在综合探查的基础上对有水害隐患区域, 必须采取有针对性的措施, 直到完全消

除水害威胁后才能组织正常作业。

“防、堵、疏、排、截”五项综合治理措施,简单地讲,“防”,就是对矿井边界、导水断层、高压强含水层、导水陷落柱等一定要采取留设防水煤柱或通过改变采煤方法来预防,并对其他可能诱发矿井水害的水源、通道实施加固、隔离、阻断等措施;“堵”,即针对有安全隐患的矿井充水水源、涌水通道,必须超前进行注浆封堵,或对强含水层、隔水层进行注浆封闭或加固处理;“疏”,主要指能疏干的充水源要坚决疏干,不能疏干的如华北型奥陶系灰岩水要结合安全带压开采上限要求,采用疏水降压等措施实现安全作业;“排”,既指排水相结合,使矿区水资源得到综合利用,又指建立安全可靠的矿井排水系统;“截”,即通过开挖沟渠,修筑堤坝、防水帷幕等截流措施,拦截地表河流、水库等地表水及松散层孔隙水。

值得一提的是,煤矿水害防治技术中的疏水降压和注浆封堵技术,经过多年的探索已取得长足发展。疏水降压技术可以根据不同的水害类型和疏降目的,采取针对性的方式和类型。疏干降压是我国矿井防治水害的主要技术措施。国内外普遍地采用经常性疏干排水外,先后还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勘探方法。20世纪80年代初,在淮南矿区还总体研究了太原群灰岩水的疏干问题。注浆封堵技术不但在工艺上有大的改进,如“立体注浆”技术、“导流”和“引流”注浆技术等。同时,一些封堵效果好、成本低廉的注浆新材料也相继推出,如水泥-粘土浆、粉煤灰浆等。在“动水”条件下的注浆封堵也有许多新方法,而且效果都不错。

堵水截流是我国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,近年来又成功地封堵了开滦范各庄矿特大突水。从20世纪60年代起在徐州、枣庄、新汉等煤矿和张马屯铁矿、水口山铅锌等不同水文地质条件下灰岩地层中成功地建造了大型堵水截流帷幕,取得了良好的堵水效果。近年来,峰峰四矿对煤层底板注浆截断岩溶水垂向补给通道,取得了明显的效果,提供了一种截流方法。

在井下排水技术方面,已普遍采用了国产高效率离心水泵,一些矿区已开始使用高扬程、大流量的潜水泵。除上述水害防治技术外,水害较大矿区都因地制宜采用了井下放水、留设各种防水煤柱、修筑防水闸门等安全技术措施。

## 2) 水害防治基本技术路线

在矿井开发的不同阶段,由于任务不同,相应的防治水要求也不一样,一般的水害防治技术路线有以下3种:

(1) 建矿中或建井前,应进行矿井水文地质综合勘探,查清矿井的水文地质条件;预测评价矿井涌水量,进行矿井防排水系统的设计。在此基础上根据矿井的未

来（如5年）采掘计划制订矿井的总体防治水规划，确定不同阶段防治水项目。

（2）开采过程中，应建立水害安全保障体系，包括物探探测器、钻探、注浆设备、排水设施、水闸门、水闸墙、防治水组织结构、安全避灾路线等，以及巷道掘进前方超前探测、采区采面精细探查，以查清掘进头、采区及工作面的水文地质条件，并对有突水危险的工作面进行突水监测，根据监测结果及时调整优化防治方案，编写救灾预案。

（3）闭井前或采矿完成后，要对矿井闭井安全条件进行评价，制定矿井关闭过程安全措施，监测拟关闭废井与邻近矿井水情水况，制订废弃矿井防范措施。并将废弃矿井采空区准确地标绘在地质图、采掘工程平面图等图纸上，同时将相关资料报送上级管理部门进行备案。

1.2 矿井水害的类型

造成矿井水害的水源有大气降水、地表水、地下水和老空水，其中地下水按其储水空隙特征又分为孔隙水、裂隙水和岩溶水等。现根据水源分类，把我国矿井水害分成若干类型（见表1-1），作为防治矿井水害时的参考。

表 1-1 矿井水害类型

| 类别    | 水源                                   | 水源进入矿井的途径或方式                               | 发生过突水、淹井的典型矿区                      |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| 地表水水害 | 大气降水、地表水体（江、河、湖泊、水库、沟渠、坑塘、池沼、泉水和泥石流） | 井口、采空冒裂带、岩溶地面塌陷坑或洞、断层带及煤层顶底板或封孔不良的旧钻孔充水或导水 | 水城汪家寨矿、内蒙古平庄古山矿、辽源梅河一井等            |
| 老空水水害 | 古井、小窑、废巷及采空区积水                       | 采掘工作面接近或沟通时，老空水进入巷道或工作面                    | 山西陵川县关岭山煤矿、徐州旗山矿、峰峰四矿等矿区都发生过老空水的水害 |
| 孔隙水水害 | 第三系、第四系松散含水层孔隙水、流沙水或泥沙等，有时为地表水补给     | 采空冒裂带、地面塌陷坑、断层带及煤层顶、底板含水层裂隙及封孔不良的旧钻孔导水     | 吉林舒兰煤矿、淮南孔集矿、徐州新河煤矿                |
| 裂隙水水害 | 砂岩、砾岩等裂隙含水层的水，常常受到地表水或其他含水层水的补给      | 采后冒裂带、断层带、采掘巷道揭露顶板或底板砂岩水，或封孔不良的老钻孔导水       | 徐州大黄山煤矿、韩桥煤矿，开滦范各庄矿等煤矿区都有裂隙水水害     |

续表

| 类别        |         | 水源                                                                          | 水源进入矿井的途径或方式                                 | 发生过突水、淹井的典型矿区                                                    |
|-----------|---------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 岩溶水<br>水害 | 薄层灰岩水水害 | 主要为华北石炭二叠纪煤田的太原群薄层灰岩岩溶水（山东省一带为徐家庄灰岩水），并往往得到中奥陶系灰岩水补给                        | 采后冒裂带、断层带及陷落柱，封孔不良的老钻孔，或采掘工作面直接揭露薄层灰岩岩溶裂隙带突水 | 徐州青山泉二号井，淮南谢一矿，肥城大封煤矿，杨庄矿（徐灰），新蜜芦沟矿                              |
|           | 厚层灰岩水水害 | 煤层间接顶板厚层灰岩含水层，并往往受地表水补给                                                     | 采后冒裂带、采掘工作面直接揭露或地面岩溶塌陷坑                      | 江西丰城云庄矿                                                          |
|           |         | 煤系或煤层的底板厚层灰岩水 [在我国煤矿区主要是华北的中奥陶系厚层（500～600 m）灰岩水和南方晚二叠统阳新灰岩水]，对煤矿开采威胁最大，也最严重 | 采后底隙裂隙、断层带、构造破碎带、陷落柱或封孔不佳的老钻孔和地面岩溶塌陷坑吸收地表水   | 峰峰一矿，焦作演马庄矿、冯营矿、中马村矿，淄博北大井均为断层导水淹井；开滦范各庄矿，安阳铜冶矿为中奥灰水通过陷落柱、探孔进入矿井 |

注：①表中矿井水害类型系指按某一种水源或某一种水源为主命名的。然而，多数矿井水害往往是由2～3种水源造成的。单一水源的矿井水害很少。

②顶板水或底板水只反映含水层水与开采煤层所处的相对位置，与水源丰富与否、水害大小无关。同一含水层水既可以是上覆煤层的底板水，又同时是下伏煤层的顶板水。例如，峰峰矿区的大青灰岩水，既是小青煤层的底板水，又是大青煤层的顶板水。因此，不按此分类。

③断层、旧钻孔、陷落柱等都可能成为地表水或地下水进入矿井的通道（水路），它们可以含水或导水，但是以它们命名的水害，既不能反映水源的丰富程度，又不能表明对矿井安全危害和威胁的严重性。因为由它们导水造成的矿井水害有大有小，有的造成不了水害。其危害或威胁程度决定于通过它们的水的来源丰富与否。

### 1.3 采矿与矿井突水机理研究进展

矿井水害是指矿山在建设生产过程中，不同水源的水通过不同的途径，以不同的方式进入矿井，并给矿山正常生产带来影响和灾害的过程与结果。矿井水害总是伴随着矿山的生产和建设发生的。研究矿井水害与采矿活动的关系是分析矿井水文地质条件，提出矿井防治水措施的关键内容，而这一研究工作的重点是研究充水



水源与采矿活动的空间位置关系、天然条件下充水水源与采矿空间的导水连通关系、采矿活动诱发的水源与导水通道变化规律及其产生变化的原因等。

采矿工作面或掘进巷道揭露地层在完整岩体中形成自由临空面后,由于应力平衡关系被破坏,必然会造成围岩的变形、位移、破坏和压力的重新分布,而在这一变化过程中难免会形成采矿空间与不同类型充水水源之间的新导水通道或激活原有的地质构造,进而诱发矿井水害。

人们对矿井突水机制的认识是一个渐近的过程。早期的研究仅限于对突水资料整理、归类,然后加以分析、综合,导出经验公式。自 20 世纪 40 年代,人们开始用力学的观点探讨突水成因,1944 年匈牙利学者韦格·弗伦斯第一次提出了相对隔水层的概念,认识到煤层底板突水不仅与隔水层厚度有关,还与水压有关。苏联学者斯列沙辽夫以静力学理论为基础,研究了煤层底板在承压水作用下的破坏机制,将煤层底板视作两端固定的承受均布载荷作用的梁,并结合强度理论导出底板理论安全水压值的计算公式:

$$H_{an} = 2K_p t^2 / L^2 + rt \quad (1)$$

式(1)中  $H_{an}$  为安全水头压力, MPa;  $K_p$  为隔水层的抗张强度, MPa;  $t$  为煤层底(顶)板隔水岩层厚度, m;  $L$  为巷道宽度或工作面最大控顶距, m;  $r$  为隔水岩层的容重,  $\text{kN/m}^3$ 。

当实际水头压力  $H_{sh} > H_{an}$  时会产生失稳破坏,反之则安全。公式(1)计算简单,对巷道或控顶距较小的工作面较为适用。但因未考虑矿山压力等因素对底板破坏的影响,其计算结果与实际情况差别较大,因此使用受到很大限制。但它开创了用力学法研究底板突水的先例。20 世纪 60~70 年代,仍以静力学理论为基础,但加强了地质因素——主要是隔水层岩性和强度方面的研究。在匈牙利、南斯拉夫等国,广泛采用相对隔水层厚度,即以泥岩抗水压的能力作为标准。该方法不仅考虑了水压的隔水层厚度的作用,而且将岩层的岩石力学强度放在重要位置,且计算简便,具有较好的实用性。但因同样未考虑矿山压力的影响以及平面尺寸效应,也未考虑岩层的原生破坏,因此亦不全面。

70、80 年代,许多国家的岩石力学工作者在研究矿柱的稳定性时研究了底板的破坏机理。C. F. Santos, Z. T. Bieniawski 等人基于改进的 Hoek-Brown 岩体强度准则,并引入临界能量释放点的概念和取决于岩石性质的承受破坏应力前岩石已破裂的程度以及与岩体指标 RMR 相关的无量纲常量  $M. S$ , 分析了底板的承载能力,对研究采动影响下的底板破坏机理有一定参考价值。



## 1.4 矿井突水预测理论的研究概况

### 1.4.1 预测理论概述

在过去几十年里,经过科技工作者的不断实践和研究,在矿山水害治理的各个环节都取得了巨大的成就,但在突水预测方面还是始终缺乏行之有效的预测方法。基于突水机理进行预测的方法,存在的缺陷在于研究大多从力学角度出发,通过试验和数值模拟来建立和改进力学模型,考虑突水影响的因素往往不全面,建立的模型并不能真实地反映实际情况,一般不考虑岩层中裂隙发育对导水性和岩层整体强度的影响,较少考虑岩层与水的相互作用,从而将岩层与水分开来研究,就像临界突水系数法,虽简单实用,却存在着明显的缺陷。只考虑水压和隔水层,忽视地质构造、矿压、水文地质复杂程度、矿压等因素的影响。此外,临界突水系数还不能确切反映突水危险性的。基于数学原理的突水预测方法,是将某种理论进行优化和改进来建立预测模型,并且需要总结大量的突水资料,对于新开采矿或无足够突水资料的矿区来说,这种模型不适用。

目前,突水预测方法忽视了对矿井工程地质条件及所建模型的基础研究,弱化了地质条件、岩体结构、地应力情况、地质构造、单元特征及开采条件整体对突水的影响,同时对工程地质建立模型的重视程度不够,从而使得预测模型难以全面并真实反应突水实际情况。矿井突水作为一个典型的水文地质工程问题,应在对水文地质结构分析和建立工程地质模型的基础上进行研究。

### 1.4.2 预测理论方法介绍

#### 1) 底板相对水层

欧洲一些专家、学者于20世纪初期就意识到了底板隔水层在煤矿防水过程中的作用,并从矿山收集到的大量底板突水水文资料中分析得出:当煤层底板存在隔水层,矿井发生突水次数就少,并且出现的突水水量也会减小,隔水层厚度越厚则突水次数越少,并且突水水量也会越小。在20世纪四五十年代,匈牙利人韦格弗伦斯首次提出了“底板相对隔水层”的概念,即煤层底板突水与水压力、隔水层厚度有关,而且突水条件还会受到相对隔水层厚度的影响,相对隔水层厚度是等值隔水层厚度与水压力值之比。

20世纪60、70年代,相对隔水层厚度的概念被匈牙利国家矿业技术鉴定委员会收入进《矿业安全规程》,并对不同矿井条件做了规定和说明。紧接着南斯拉夫、苏联等国家的专家、学者也开始对相对隔水层的作用进行相关性研究,包括采空区