

邓寅生 王焕忠 文广超 著
胡 城 别玉平



煤矿水害防治 信息化

MEIKUANGSHUIHAIFANGZHI
XINXIHUA

煤炭工业出版社

煤矿水害防治信息化

邓寅生 王焕忠 文广超 胡 城 别玉平 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿水害防治信息化/邓寅生等著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2011

ISBN 978-7-5020-3913-4

I. ①煤… II. ①邓… III. ①煤矿-矿山水灾-防治-信息化 IV. ①TD745-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 164759 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 29¹/₄

字数 700 千字 印数 1—600

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 6723 定价 80.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书针对我国煤矿安全生产技术数字化、定量化、模型化、可视化、网络化与信息化,进而实现现代化的需求,基于地理信息系统(GIS)、煤矿安全生产的理论和技術方法,就煤矿水害防治的基础理论、防治技术、煤矿矿井防治水信息化系统的总体结构、系统设计、研究开发与实现等进行了详细阐述,并进行了煤矿矿井防治水信息化系统的应用案例分析。

本书可作为从事矿山开采、矿山地质、矿井水害防治的工程技术、科研与管理人员的参考书,也可供高等院校相关专业的师生参考使用,尤其适合装备了煤矿矿井防治水信息化系统的煤炭企业员工培训使用。

前 言

煤矿矿井水害是与瓦斯、火灾、粉尘、动力地质灾害并列的影响和威胁煤矿安全、高效生产的五大灾害之一。长期以来，煤矿水害给国家和人民带来的经济损失和人身伤亡极为惨重。特别是近年来，随着煤炭工业的迅速发展，开采水平不断延深，开采范围逐渐扩大，煤矿水害威胁越来越严重，水害产生的条件及形成的机理都在发生着很大的变化。如何充分收集、管理、利用已有信息，使煤矿防治水工作由定性到定量，由经验到科学，变被动为主动，全面提高我国煤矿水害防治技术水平，已经成为亟待解决的问题。

本书是著者多年来从事矿井水害防治工作经验的总结。它以煤矿矿井防治水信息化系统的设计、研发与实现为主线，详细介绍了集计算、分析、判断、推理、决策、设计、优化与咨询为一体的煤矿水害防治信息化的建立过程及其主要内容，以期为煤矿管理者提供一种方便快捷的科学决策工具，使矿井水文地质数据管理科学化、规范化、系统化、自动化，提高矿井水害预测与防治的数字化、定量化、模型化、网络化、可视化与信息化水平。希望在我国矿山水害防治技术的进步与推广应用方面起到积极的推动作用。全书共分11章，其中第1章简要分析了我国矿山水害的基本类型与分布；第2章介绍了矿井防治水信息化系统的研究内容、技术路线与适用范围；第3章从我国的主要含煤地层、煤矿水文地质特征与区域类型、煤矿水害发生的条件及主要影响因素、矿井水文地质条件探测、矿井水害预测、矿井水文地质条件的数值模拟、矿井水害防治的科学决策等方面介绍了煤矿水害防治的理论基础；第4章介绍了防水煤（岩）柱留设、矿井涌水量预测、矿井注浆堵水、矿井疏水降压、矿井防排水、井下探放水及带压开采等煤矿常用的水害防治技术；第5章从地理信息系统（GIS）的基本概念、煤矿GIS与数字矿山建设、矿井防治水基础地理信息平台设计等三个方面介绍了矿井防治水信息化建设的GIS基础；第6章介绍了矿井防治水信息化系统的总体设计；第7章介绍了矿井基础水文地质数据管理的内容、设计与实现过程；第8章介绍了煤矿水害预测子系统的内容、设计与实现过程；第9章介绍了矿井防治水辅助决策子系统的内容、设计与实现过程；第10章介绍了矿井水文地质实用服务模块的内容、设计与实现过程；第11章介绍了矿井防治水信息化系统在中国平煤神马能源化工集团有限责任公司五矿、梨园矿的应用情况。

中国平煤神马能源化工集团有限责任公司能源化工研究院、技术中心、地质测量处、五矿、七矿、梨园矿等为煤矿矿井防治水信息化系统的研究开发、推广应用给予了大力支持。本书编写过程中,河南理工大学李栋臣教授给予了精心指导,金毅老师参与了部分代码调试,许江涛、张永辉、杨海明、牛薛峰、陈永波、骆吉荣、骆国辉、李锋、张承国、乔斌、胡东辉、王刚刚等同学参与了部分代码调试和图件处理工作。书中参阅了众多前人的研究成果。本书著者在此一并表示衷心感谢。

本书2、3.7、6.1、6.2、6.3.6、8、9.3.1由邓寅生编写,1、3.1~3.3、3.8、4.1、4.2、4.4、4.5、4.7、9.3.3、9.3.4由王焕忠编写,5、6.3.1~6.3.5、6.3.7、7、9.3.5由文广超编写,3.6、4.3、10、11.1由胡城编写,3.4、3.5、4.6、9.1、9.2、9.3.2、9.3.6、11.2由别玉平编写。全书由邓寅生、王焕忠统稿。

由于作者水平所限,书中错误和不足之处在所难免,如蒙赐教,将不胜感激。

著 者

2011年9月

目 次

1 绪论	1
1.1 研究的目的是和意义	1
1.2 矿井水害防治的研究现状	2
1.3 矿井水害防治存在的问题	12
1.4 矿井水害研究的发展趋势	13
2 矿井防治水信息化系统的研究内容	16
2.1 研究内容	16
2.2 实验内容	16
2.3 技术路线	17
2.4 适用范围	18
3 煤矿水害防治的基础理论与方法	19
3.1 我国的主要含煤地层	19
3.2 我国煤矿的水文地质特征与区域类型	20
3.3 我国煤矿水害的主要类型及特点	24
3.4 煤矿水害发生的条件及主要影响因素	26
3.5 矿井水文地质条件探测	37
3.6 矿井水害预测	50
3.7 矿井水文地质条件的数值模拟	67
3.8 矿井水害防治的科学决策	79
4 煤矿水害防治技术	95
4.1 防水煤(岩)柱留设	95
4.2 矿井涌水量预算	101
4.3 矿井注浆堵水技术	111
4.4 矿井疏水降压技术	138
4.5 矿井防排水技术	144
4.6 井下探放水技术	151
4.7 带压开采技术	157

5 矿井防治水信息化建设的 GIS 基础	161
5.1 GIS 概述	161
5.2 煤矿 GIS 与数字矿山建设	166
5.3 矿井防治水基础地理信息平台设计	174
6 矿井防治水信息化系统的设计与技术方法	181
6.1 总体设计	181
6.2 设计特色	186
6.3 系统的部分分析方法与技术	187
7 矿井基础水文地质数据管理的设计与实现	242
7.1 总体设计	242
7.2 数据库设计	243
7.3 功能设计	255
7.4 系统实现	256
8 矿井水害预测子系统的设计与实现	285
8.1 系统概述	285
8.2 研究内容	286
8.3 系统设计	287
8.4 系统实现	290
9 矿井防治水辅助决策子系统的设计与实现	324
9.1 概述	324
9.2 系统设计	324
9.3 系统实现	325
10 矿井水害防治信息化系统服务支持模块的设计与实现	375
10.1 总体结构	375
10.2 功能设计	375
10.3 系统实现	376
11 矿井防治水信息化技术的应用案例	394
11.1 五矿应用案例	394
11.2 梨园矿应用案例	414
参考文献	455

1 绪 论

1.1 研究的目的是和意义

煤炭作为我国的基础能源，在国民经济中占有重要地位。随着我国经济建设的高速发展，煤炭资源供不应求的现象越来越严重。前所未有的需求量和生产目标给煤矿发展带来了新的机遇，同时也给煤矿安全生产带来了严峻的挑战，作为我国工业生产中最危险、伤亡事故最严重的行业之一，煤矿安全事故严重影响了煤炭企业的生产能力与生产经营（表 1-1，来自国家安全生产监督管理总局网站事故查询系统）。

表 1-1 2005—2010 年全国煤矿事故统计

年份	合 计		较大事故		重大事故		特别重大事故		透水事故	
	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数	事故次数	死亡人数
2005	1438	3372	184	771	37	608	8	663	67	597
2006	327	1530	176	766	29	458	5	186	37	270
2007	170	1152	141	649	22	329	3	171	27	156
2008	116	759	91	421	17	268	2	66	16	90
2009	98	676	75	335	10	147	2	186	20	101
2010	108	604	74	347	11	180	2	66	13	66

我国成煤建造多赋存在华北地层区，属石炭二叠含煤建造，灰岩水害非常典型，在煤炭生产过程中，常常会遇到突水危害，发生不同程度的突水事故，轻者增加排水泵数，增加电耗，提高煤矿生产成本，影响煤矿稳定生产；重者直接危害职工生命安全和国家财产安全，造成人员伤亡或淹井事故，严重影响矿井的正常生产。而且，随着开采水平的延深和开采范围的扩大，这种威胁越来越严重。据不完全统计，在过去的 20 多年里，我国共有 250 多对矿井因突水而淹没，经济损失高达 350 多亿元人民币，同时对矿区水资源和环境造成巨大的破坏。进入 21 世纪以来，煤矿突水事故频繁发生，2000—2006 年底，全国共发生重特大突水事故 435 起，死亡及失踪 2199 人。2005 年 8 月 7 日广东省梅州市兴宁市黄槐镇大兴煤矿发生透水事故，造成 123 名矿工遇难，直接经济损失达 4725 万元；2006 年 5 月 18 日山西省左云新井煤矿发生特大透水事故，造成 58 人死亡，直接经济损失达 5312 万元；2007 年 3 月 10 日辽宁省抚顺老虎台煤矿发生特大透水事故，造成 24 人死亡，5 人下落不明；2008 年 7 月 21 日广西壮族自治区那读发生特大透水事故，造成 36 人死亡，直接经济损失达 989.8 万元；2009 年黑龙江省鸡西金利煤矿、湖南省常宁市三角

塘镇煤矿等均发生特大透水事故；2010年3月28日山西省王家岭煤矿发生透水事故，造成38人遇难。目前，全国受水害威胁的大、中型矿井有222处，华北型煤田受底板灰岩承压水威胁的煤炭储量在16 Gt以上。这种局面严重阻碍着煤炭生产和发展，影响了矿井的生产连续性。尽管多年来矿业工作者一直致力于矿井水害治理的研究，但是由于我国的地质条件复杂，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，对矿井水害的分布及富水性分区未能深入研究，对矿井水害的预测不当，要么过分增大安全系数而极大地增加了防治工程的费用，要么安全系数过小，矿井（采区）防排水能力不足，导致煤矿突水事故时有发生。随着经济改革的逐步深入，市场经济的进一步规范化，降低生产成本，提高经济效益，才是企业正确的发展方向。因此，考虑生产过程中的环境时变性及模糊性，查清矿区水文地质条件，研究矿井突水机理、水害产生的条件及富水性分区，准确预测生产区域的涌水量及危害性等级，制定防治水方案，采取有效手段，正确设计和安排防排水工程，减少防排水费用和灾害事故，确保安全生产，降低生产成本，提高矿井经济效益，已成为目前采矿企业的重要课题，也是煤矿安全生产管理的重要工作之一。

随着计算机技术的飞速发展及其在各领域得到广泛应用，人类进入信息时代，矿井水害预测与防治的思路和方法也紧跟时代步伐，不断更新和提高。但由于地下水运动的复杂性、不确定性和水害类型的多样性，目前我国的煤矿水害防治仍停留在经验治水的水平上，国内外还没有关于集水文地质数据管理、水害预测评价、水害治理等于一体的综合性水害防治的信息化系统。因此，建立一个具备上述功能的煤矿矿井防治水信息化系统对于提升煤矿安全生产水平，推动行业科技进步是非常必要的。

煤矿矿井防治水信息化系统的研发，一方面为煤矿管理者提供一种方便快捷的科学决策工具；另一方面使矿井水文地质数据的管理工作更加科学化、系统化、规范化、自动化，高效、经济、充分利用各种相关信息，从而使矿井的防治水工作由定性到定量，由经验到科学，变被动为主动，为煤矿水文地质工作者提供一个解决煤矿水害问题的计算机人工智能环境，它使煤矿水文地质工作者在掌握一定矿井水文地质资料和系统操作方法以后，便能方便地利用系统功能进行高效率地计算、分析、判断、推理、决策、设计与咨询，从而把煤矿防治水技术推进到以信息化为标志的现代化水平。

1.2 矿井水害防治的研究现状

1.2.1 主要的理论研究成果

1. 底板相对隔水层理论

世界上许多国家如匈牙利、波兰、南斯拉夫、西班牙等，在煤矿开发中都不同程度地受到底板岩溶水的影响。在国外，对煤矿底板岩溶水的研究已有100多年的历史。在底板岩体结构的研究、探测技术及防治水措施等方面，积累了丰富的经验。早在20世纪初，国外就有人注意到底板隔水层和底板突水的相关性，并从若干次底板突水的资料中认识到，只要煤层底板有隔水层，突水次数就减少，突水量就减少，隔水层越厚突水量越小。在这之后，国外许多国家的学者就开始注意底板突水理论的研究。

1944年，匈牙利韦格·弗伦斯第一次提出底板相对隔水层的概念，建立了水压、隔水层厚度与底板突水的关系，后被许多岩溶水上采煤的国家引用。20世纪50年代后，国外用现场和实验室相结合的方法研究了隔水层的作用，研究的主要问题有两个：一是岩体

结构——阻水能力，二是岩体强度——抗破坏能力。有人根据现场观测，提出运用阻水系数表示隔水层的突水条件、隔水层的水力阻抗程度，并从能量平衡观点解释底板隔水层的破坏条件，1974年，匈牙利国家矿业技术鉴定委员会将相对隔水层厚度概念列入《矿业安全规程》。

20世纪70年代后，苏联等国家也开始研究相对隔水层的作用，包括采空区引起的应力变化对相对隔水层厚度的影响，以及水流和岩石结构的关系。关于煤矿开采底板变形与破坏，M·鲍莱茨基等给出了不同的概念，如底板开裂、底鼓、底板断裂和大块底板突起。多尔恰尼诺夫等认为，在高应力作用下（如深部开采），岩体或支承压力区出现渐进的脆性破坏，其破坏形式是裂隙渐渐扩展并发生沿裂隙的剥离和掉块，从而为底板高压水突入矿井创造了条件。

在理论研究的同时，世界各国也十分重视水害的防治和岩溶及断裂的探测技术等工作。随着电子技术的发展，国外岩溶探测技术有了很大进步。尤其是20世纪80年代后，多种类型的探测仪器如雨后春笋，迅速发展，如美国GI公司制造的Petro-sonde地电探测仪，GD公司研制的ES-1225、ES-2401型多道信息增强型地震仪，美国军工生产的地质雷达，德国的SEAMEX-85型槽波地震仪，日本VIC公司研制的GR-810型全自动地下勘探仪，美国产EH4连续电导率剖面仪等，这些仪器能较准确地探查采前煤层底板岩溶发育特点及分布规律，超前探测构造的导水性，并且向“无损”探测技术发展。此外，偶极电阻率法、激发极化法等也在匈牙利、南斯拉夫等国用于探测地下含水岩层，无线电波透视法用于探测孔距小于200m的岩溶、不连续面，近期澳大利亚利用微震法探测采场围岩破坏范围等。

2. 突水系数法

20世纪60年代，以煤炭科学研究总院西安分院为代表的学者们注意到匈牙利底板相对隔水层理论在实践中的应用，在焦作矿区水文地质大会战期间，他们在综合考虑水压、底板隔水层厚度、岩性等因素的基础上，提出了进行煤层底板突水预测的突水系数法。

突水系数就是煤层底板单位隔水层厚度所承受的水压，它是带压开采条件下衡量煤层底板突水危险程度的定量指标。对于华北石炭二叠系煤田，突水系数主要是计算某一煤层关于奥陶系灰岩含水层或与其有密切水力联系的薄层灰岩含水层的突水系数，如在焦作矿区主要是计算煤层对石炭系太原组八灰、二灰和奥灰的突水系数，在肥城矿区主要是计算煤层对太原组五灰和奥灰的突水系数。突水系数计算公式如下：

$$T = \frac{P}{M} \quad (1-1)$$

式中 T ——突水系数，MPa/m；

P ——煤层底板隔水层承受的水压力，MPa；

M ——煤层底板隔水层厚度，m。

突水系数越大，煤层底板突水的危险性越大。采用突水系数预测煤层底板突水的关键问题是确定临界突水系数 T_c 。临界突水系数 T_c 定义为单位隔水层厚度所能承受的最大水压力。如果计算的突水系数 T 小于或等于临界突水系数 T_c （即 $T \leq T_c$ ），说明底板一般不会突水；如果突水系数 T 大于临界突水系数 T_c （即 $T > T_c$ ），说明底板可能突水。表1-2列出了焦作矿区水文地质大会战时对几个矿区突水资料统计分析得出的临界突水系数。

表 1-2 某些矿区的临界突水系数

矿 区	临界突水系数 $T_s / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	矿 区	临界突水系数 $T_s / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$
峰峰、邯郸	0.066 ~ 0.076	淄博	0.06 ~ 0.14
焦作	0.06 ~ 0.1	井陘	0.06 ~ 0.15

20 世纪 70 年代, 考虑到采矿对底板破坏的影响, 煤炭科学研究总院西安分院和其他有关单位对式 (1-1) 进行了修正, 提出了以下突水系数计算公式:

$$T = \frac{P}{M - C_p} \quad (1-2)$$

式中 C_p ——采矿对底板扰动的破坏深度, m。

20 世纪 80 年代初期, 考虑到底板隔水层往往是由强度和阻水能力不同的岩层组成的这一特点, 采用类似于匈牙利等国的方法, 将突水系数计算公式再次修改为

$$T = \frac{P}{\sum_{i=1}^n M_i d_i - C_p} \quad (1-3)$$

式中 M_i ——各底板隔水层分层厚度, m;

n ——分层数;

d_i ——各分层的强度比值系数, 见表 1-3。

表 1-3 不同岩层的强度比值系数

岩石名称	强度比值系数	岩石名称	强度比值系数
砂岩	1.0	断裂带	0.35
砂质页岩	0.7	灰岩	0
页岩 (黏土)	0.5		

20 世纪 80 年代中期, 在研究底板承压水导升高度的基础上, 将突水系数计算公式改写成如下形式:

$$T = \frac{P}{M - (C_p + h_1)} \quad (1-4)$$

式中 h_1 ——底板承压水导升高度, m。

针对一些矿区奥灰含水层顶部存在相对隔水风化壳的情况, 将突水系数计算公式写成:

$$T = \frac{P}{M - C_p + h_2} \quad (1-5)$$

式中 h_2 ——奥灰顶部相对隔水段厚度, m。

由于与式 (1-2) 至式 (1-5) 相对应的临界突水系数在不同地区差异很大, 很难取统一值。国家安全生产监督管理总局和国家煤矿安全监察局颁布的《煤矿防治水规定》(2009 版) 的附录中, 规定采用式 (1-1) 计算突水系数, 并给出了临界突水系数参考值: 底板受构造破坏块段临界突水系数取 0.06 MPa/m, 正常地段取 0.1 MPa/m。

突水系数在应用中尚存在以下问题:

(1) 突水系数是用来判别突水与否的一个指标,在实际应用中,常常根据一个矿区的水文地质条件、底板保护层的承压水头、厚度及岩性组合计算出一个确定的值。但是突水事件发生的随机性与突水系数的确定性在某些情况下是有矛盾的。统计资料表明,在突水系数值小于这一地区的经验值时,有的工作面也会发生突水;反之,当突水系数值大于该经验值时,也可能不发生突水。这说明突水事件是由矿区的地质、构造、岩体应力场和含水层水动力场等确定性和随机因素综合作用的结果。一个定性的突水系数值还不能全面地反映这些因素,所以给实际的突水预报判别带来了一些偏差。

(2) 突水系数临界值是根据华北的几个大水矿区突水点的数据统计而来的经验值,其中绝大多数突水点处的保护层厚度在 20 m 左右,它反映的是近地表的突水条件,随着矿井向深部发展,其预测的准确性会有所下降,在实际应用中把握性也就不是很大。

(3) 突水系数仅仅考虑了采动破坏、水压、底板岩体岩性与结构等因素,而对含水层的富水性、水动力学特征、边界条件、隔水层阻水性能、采煤方法及矿床充水特征等要素未作分析,因此在利用突水系数临界值判别底板突水与否时,所得的结果缺乏完满性。但要把多因素考虑在一个判别式中,一时也难以解决,只有对其不断补充和逐步完善。

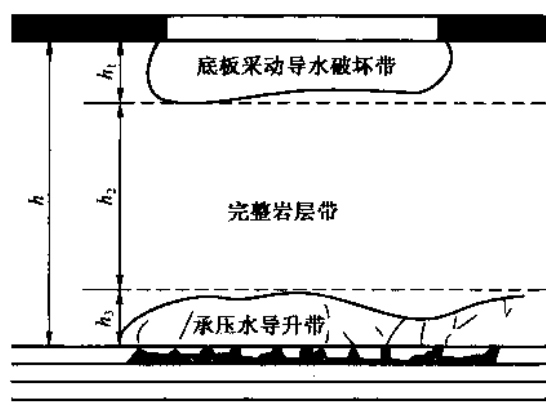


图 1-1 开采煤层底板“三带”划分示意图

3. “下三带”理论

20 世纪 80 年代初,根据部分现场实测资料和实验研究成果,李白英等提出了

“下三带”理论,该理论认为开采煤层底板由上至下存在着“三带”(图 1-1),即底板采动导水破坏带、完整岩层带和承压水导升带。

1) 底板采动导水破坏带

底板采动导水破坏带(h_1)即由于采动矿压的作用,底板岩层连续性遭到破坏,导水性发生明显改变的层带。采动底板破坏带包含有层向断裂带和竖向断裂带,它们相互穿插无明显界线。层向裂隙主要是底板受矿压作用,并经压缩→膨胀→压缩,产生反向位移所致;竖向裂隙主要是剪切及层向拉力破坏所致。底板采动导水破坏带的厚度受多种因素影响,但主要受采面斜长的影响。

2) 完整岩层带

完整岩层带(h_2)即底板岩层保持采前的完整状态及其阻水性能的部分。它包含上部采动底板破坏导水带中的下部影响带及未变形部分,其特点是保持采前岩层的连续性,且阻水性能未发生变化。

3) 承压水导升带

承压水导升带(h_3)即含水层中的承压水沿隔水底板中的裂隙或断裂破碎带上升的高度(即由含水层顶面到承压水导升上限之间的部分)。有时受采动影响,采前原始导高还可再导升,但上升值很小,由于裂隙发育的不均匀性,故导高带的上界是参差不齐的。

不同的矿区,因其底部岩层性质及地质构造差异,承压水原始导高大小不一,有的矿区甚至无原始导高带存在。

“下三带”理论认为,底板突水机理不仅是底板在水压力作用下由于底板强度低于水压力的失稳现象,而且也是由于底板含水带在水压力和矿山压力共同作用下产生了升高所致。当底板含水带与底板采动裂隙带沟通时,就会发生底板突水事故。

该理论存在以下几点不足:

(1) 理论基础为弹性力学理论,而弹性力学是建立在一系列基本假定的基础上的,如假定物体是均匀的、各向同性的等。这些假定不适合岩体的力学特征,因此,基于弹性力学推导出的底板破坏深度理论计算公式实用性不强。

(2) “下三带”理论没有考虑承压水对底板岩层的破坏作用,而底板承压水水压是底板突水的重要影响因素。

(3) 该理论模型是在开采浅部煤层的基础上提出的,而深部地质特征和浅部地质特征相差很大。生产实践证明,随着煤层开采深度的不断加深,“下三带”模型越来越与实际情况不一致。

(4) “下三带”理论仅仅定性分析了“三带”的存在,而对第一带与第三带的承载特性及作用,第二带如何破坏、破坏特征及破坏后的结构,以及开采边界条件等对它的影响的分析比较模糊。

4. “岩水应力关系”学说

20 世纪 90 年代,煤炭科学研究总院西安分院提出了“岩水应力关系”学说,认为底板突水是岩(底板砂页岩)、水(底板承压水)、应力(采动应力和地应力)共同作用的结果。而底板突水需具备两个条件:①存在导水破裂带,无论是地质构造作用还是采掘引起的岩体破坏,只要使底板隔水层破坏至一定深度,且与下部导升高度相通或波及下部含水层,就具备了突水的必要条件;②水压与应力关系,当承压水压力大于或等于水平最小主应力时,才会具备突水的充分条件。该学说从物理和应力概念出发,给出了用突水临界指数(即底板承压水压力与水平最小主应力的比值)作为突水的判据,其表达式为

$$I = \frac{P_w}{z} \quad (1-6)$$

式中 I ——突水临界指数;

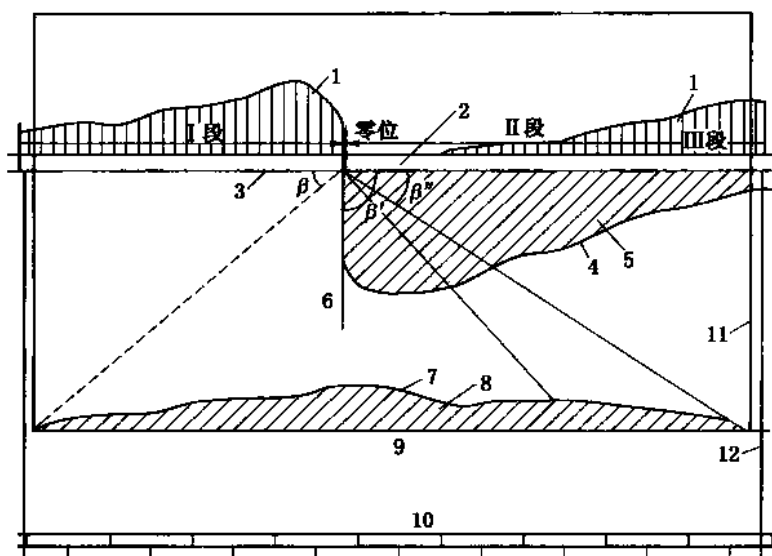
P_w ——底板隔水岩体承受的水压, MPa;

z ——底板岩体的最小主应力, MPa。

当突水临界指数 $I > 1$ 时,底板发生突水。该突水判据是将采动过程中底板隔水层的原位应力测试技术与数值计算方法相结合,得到采动底板隔水层应力与破坏,综合分析突水环境,给出定量评价。它综合考虑了岩石、水压及地应力的影响,揭示了突水发生的动态机理,不足之处是对采动导水断裂带及承压水的再导生,以及岩体的抗张强度等问题未得出定量结论。

5. 原位张裂与零位破坏理论

20 世纪 90 年代初,煤炭科学研究总院北京开采所王作宇等提出了底板移动的原位张裂和零位破坏理论。该理论认为,矿压、水压联合作用于工作面对煤层的影响范围可分为三段:超前压力压缩段、卸压膨胀段和采后压力压缩—稳定段,如图 1-2 所示。



1—应力分布;2—采空区;3—煤层;4—零位破坏线;5—零位破坏带;6—空间剩余完整岩体(上);7—原位张裂线;
8—原位张裂带;9—空间剩余完整岩体(下);10—含水层;11—采动应力场空间范围;12—承压水运动场空间范围

图 1-2 底板岩体的原位张裂与零位破坏示意图

该理论引用塑性滑移线场理论分析了采动底板的最大破坏深度,综合考虑了采动效应及承压水运动,阐明了底板岩体移动发生、发展、形成和变化的过程,揭示了矿井突水的内在原因,对承压水上采煤实践具有重大的指导意义,但在突水判据上,仍然采用的是突水系数的概念。尽管解释了煤层底板在超前支承压力和水压力作用下的破坏过程,却同样没有考虑底板作为层状岩体的结构特征和破坏机制,仍存在突水系数法和“下三带”理论中存在的不足,对原位张裂发生发展过程缺乏深入研究,其发育厚度难以确定,限制了该理论在实际中的应用。

6. 薄板模型理论

20 世纪 90 年代,刘天泉、张金才等从力学的角度出发,提出了底板岩层由采动导水断裂带和底板隔水带组成的概念,并采用半无限体上一定长度上受均匀竖向载荷的弹性解,结合 Coulomb - Mohr 强度理论和 Griffith 强度理论分别求得了底板受采动影响的最大破坏深度。在此基础上,采用薄板理论结合弹塑性理论得到了以底板岩层抗剪及抗拉强度为基准的预测底板所能承受的极限水压力的计算公式。该理论首次运用板结构研究底板突水机制,发展了突水理论。由于厚板理论尚不成熟,所以计算时可以选择其中较薄的一层进行分析,应用薄板理论可以得出足够满足精度的解。但在一般情况下,底板隔水带不满足薄板条件——厚宽比小于 $1/5 \sim 1/7$,只有在较薄隔水层条件下才能应用。另外,该理论未考虑承压水导水带及渗流的作用,故使应用受到一定限制。

7. 关键层 (KS) 理论

20 世纪 90 年代中期,钱鸣高、黎良杰等根据底板岩体的层状结构特征,建立了采场底板突水机理的关键层 (Key Stratum, KS) 理论。该理论认为煤层底板在采动破坏带之下,含水层之上存在一层承载能力最高的岩层,称为底板关键岩层 (图 1-3)。提出在底

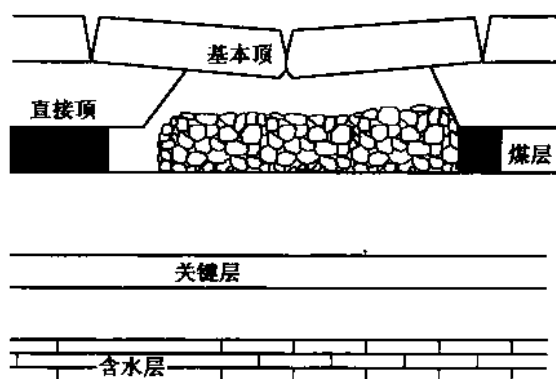


图 1-3 关键层示意图

板岩层中找出一层强度最高的岩层作为底板关键岩层，将这一关键层看做薄板，很好地满足了薄板理论的基本要求，便可以利用薄板强度理论对底板破坏进行研究。在采动条件下，将底板关键层简化为一个四周固支的矩形薄板，然后按弹性理论和塑性理论，利用正演与反演方法分别求得底板关键层在水压等作用下的极限破断跨距（只要实际开采进尺不超出这个跨距，便可安全生产），并分析关键层破断后岩块的平衡条件，建立无断层条件下采场底板的

的突水准则和断层突水的突水准则。该理论根据底板岩体具有层状结构的特点，结合底板中的强硬岩层在抑制突水中的作用，揭示了在采动条件和承压水作用下采场底板的突水机理。

该理论尚存在以下不足：

（1）将煤层底板破裂突水仅仅归结为关键层的破断有些过于简化。

（2）在底板为多层岩性层的情况下，关键层的选取存在一定的难度，在实践中往往不易掌握。

（3）底板突水与否不仅由关键层所控制，还由一些承载能力不是很强，但阻水性能好的岩层所控制，理论模型与实际地质环境存在一定的差异。

8. “强渗通道”理论

20 世纪 90 年代，中国科学院地质与地球物理研究所提出了“强渗通道”理论，认为底板是否发生突水关键在于是否具备突水通道。通过突水通道发生突水有两种情况：①底板水文地质结构存在与水源勾通的固有突水通道，当其被采掘工程揭穿时，即可产生突破性的涌水，造成突水事故；②底板中不存在这种固有的突水通道，但在工程应力、地壳应力及地下水共同作用下，沿底板岩体结构和水文地质结构中原有的薄弱环节发生形变、蜕变与破坏，形成新的贯穿性强渗通道而诱发突水。该理论考虑了地质构造（包括断层和节理）这一薄弱面对突水的影响，但对采动和水压对其产生的影响的研究，尤其是对采动矿压的作用研究有待进一步加强。

9. “下四带”理论

21 世纪初期，山东科技大学施龙青提出了“下四带”理论模型（图 1-4）。该理论将开采煤层底板到含水层之间自上而下划分为四个组成带，即矿压破坏带、新增损伤带、原始损伤带和原始导高带。

1) 矿压破坏带

矿压破坏带（ h_1 ）是指矿山压力对底板的破坏作用显著，底板岩石的弹性性能遭到明显损伤的层带。其特点如下：岩石处于黏弹性状态；各种裂隙不仅交织成网，而且贯通性好、导水性能很强；岩层的连续性彻底破坏，完全丧失了隔水能力。

2) 新增损伤带

新增损伤带（ h_2 ）是指受矿山压力破坏的影响作用明显，岩石弹性性能发生了明显改

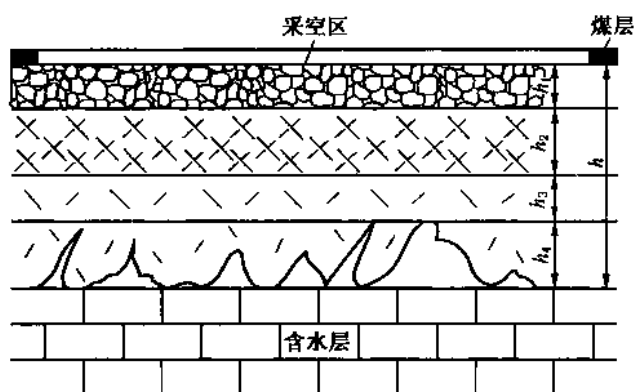


图 1-4 开采煤层底板的“四带”划分示意图

变的层带。其特点如下：底板岩层的原有抗压强度明显降低，但岩层的弹性性能尚未完全丧失；岩层的原有裂隙得到了明显地扩展，但尚未相互贯通；岩层具有一定的连续性和隔水能力；承压水要沿该带突出，其消耗的能量主要用于贯通裂隙。

3) 原始损伤带

原始损伤带 (h_3) 是指不受矿山压力破坏作用的影响或影响甚微，岩石弹性性能保持不变的层带。其特点如下：岩石保持原有弹性性能；岩层内的裂隙保持原先的非相互贯通状态；岩层的连续性和隔水能力良好；底板水要沿该带突出，其消耗的能量主要用于破坏岩石及贯通裂隙。

4) 原始导高带

原始导高带 (h_4) 是指不受矿山压力作用的影响，并发育有承压水的原始导高的层带。其特点如下：因水化学作用，岩石处于弹塑性、塑性状态；裂隙发育参差不齐，并已成为突水通道；岩层的连续性差；底板水从该带突出只需克服沿程阻力。

该理论的力学基础是损伤力学与断裂力学理论，在各带厚度计算公式推导方面采用了较为复杂的理论研究，因此在一定程度上限制了所得公式的现场推广与应用。如何进一步提高该理论的实用性还有待于不断探索和研究。

10. 突变理论

1972 年，法国数学家托姆 (Thom) 创立了突变理论，许多学者将突变理论成功引入岩体工程的稳定性研究中来。青岛建筑工程学院的潘岳根据 Mises 增量理论，对岩体断层破裂的突变进行理论分析，获得了在非均匀围压下断层释放弹性能的数值表达式，并且分析了演示破裂时，断层围岩所施加的负载和约束的影响。东北大学的唐春安利用突变理论，对岩石在加载系统作用下破裂过程的非稳定性问题进行了研究，得到了突变前后岩样的变形突跳量和能量释放量的表达式。中国科学院的邵爱军进一步将突变理论引入煤矿承压水底板突水破坏的研究当中，通过研究煤矿底板系统能量的失稳变化，建立了预测矿坑突水尖点突变模型。为研究煤矿底板突水引入了一种新的理论分析方法。

11. 突水概率指数法

应用赋权的方法，根据影响矿井突水的各种因素在突水中所起的作用进行定量化，通过一定的数学模型求得的总体量化指数即为突水概率指数。它是一种结合现场实际进行突