

② 国家自然科学基金项目 (编号: 40672163)

② 河北省自然科学基金重点项目 (编号: D2004000480) 联合资助

② 石家庄经济学院学术著作出版基金

煤矿底板突水

邵爱军 彭建平 李治广 著
左丽琼 张永强 魏 谨

地 质 出 版 社

国家自然科学基金项目（编号：40672163）

河北省自然科学基金重点项目（编号：D20040000480） 联合资助

石家庄经济学院学术著作出版基金

煤矿底板突水

邵爱军 彭建平 李治广 著
左丽琼 张永强 魏 谨

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

煤矿底板突水是华北型煤田开采中一种严重的地下水患灾害。以河北峰峰煤田万年煤矿为例,在分析井田地质、水文地质条件的基础上,介绍了GMS三维立体地层建模方法,分析了煤矿底板突水的影响因素,介绍了煤矿底板突水预测的理论分析与计算方法,分别采用突水系数法、下三带理论计算法、极限突水系数法、突变理论和协同学理论对煤矿底板突水预测进行理论分析与计算,提出了万年煤矿底板突水和带压开采防治水措施。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿底板突水/邵爱军等著. —北京:地质出版社, 2011.3

ISBN 978-7-116-07158-2

I. ①煤… II. ①邵… III. ①矿井突水-防治 IV. ①TD745

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第036257号

责任编辑:陈磊 祁向雷

责任校对:王素荣

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) 82324577(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×1092mm^{1/16}

印 张:9.5

字 数:220千字

版 次:2011年3月第1版

版 次:2011年3月第1次印刷

定 价:26.00元

书 号:ISBN 978-7-116-07158-2

(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)

前 言

我国的煤炭储量大，煤矿分布广，水文地质条件复杂。近年来，随着开采强度的增加，矿井深度不断延伸，突水事故日益增加。据原煤炭工业部初步统计，全国 600 处国有重点煤矿中受水威胁的矿井达 285 对，占矿井总数的 27.5%，受水威胁储量达数百亿吨。根据新中国成立以来的统计资料，20 世纪 90 年代与 60 年代相比，突水的频率增长了 2.57 倍，一次突水水量也由每分钟 $5\sim 20\text{m}^3$ ，增至 $50\sim 240\text{m}^3$ ，甚至高达 2053m^3 。突水事故的频繁发生和突水量的增大，使国家财产和工人的人身安全受到严重威胁。

对煤矿底板突水进行准确预测与有效治理是有效减少煤矿突水及突水事故的关键，因此，多年来煤矿突水预测与治理一直是国内外学者关注的重大课题。20 世纪 70 年代以前，主要以静力学理论为基础研究底板的破坏机制，如前苏联学者斯列萨列夫将底板视作梁，根据强度理论推导了底板安全隔水层厚度计算公式，匈牙利、原南斯拉夫学者提出预测底板突水的等效隔水层厚度法等等，70 年代后一些学者，如桑托斯 (Santos)、宾尼维斯基 (Bieniawski) 等，引入临界能量释放点的概念，从底板的承载力出发，研究底板的破坏机理。

我国学者在 20 世纪 60 年代提出突水系数法，70 年代开始强调采动对底板的破坏作用，80 年代提出“下三带”理论，重视承压水“导升高度”的作用，同时提出原位张裂与零位破坏理论。90 年代提出岩-水应力关系法，关键层理论等。进入 21 世纪后，突变理论、神经网络、地理信息系统开始应用于底板突水预测。

本书作者从 20 世纪 80 年代以来，就一直从事地下水的研究，并特别注重煤矿地下水及煤矿底板突水的研究。本书是在总结作者多年科研成果的基础上撰写而成的，是一部较为系统地研究和论述当前煤矿底板突水预测理论与方法方面的著作，主要内容有，万年矿地质与水文地质条件，三维可视化地质建模，煤矿底板突水力学分析与计算，协同学理论分析与计算，突变理论分析及计算，万年矿底板突水预测，矿山带压开采与防治水措施。

本研究成果得到国家自然科学基金项目（40672163），河北省自然科学基金重点项目（D2004000480），峰峰矿务局万年矿科研项目以及其他多项科研项目的资助。峰峰矿务局万年矿矿长邵太升教授级高级工程师、万年矿总工张运昌高级工程师给予大力支持，在石家庄经济学院邵爱军教授、彭建平教授的指导下，硕士研究生左丽琼、张永强、魏谨、王丽君、史东生、周永柱等做了大量基础性工作，袁颖副教授、李治广讲师对研究成果进行整理编辑、专著初稿排版和校对，地质出版社陈磊编审为本书的出版付出了辛勤劳动，在此表示感谢。

在本书撰写过程中，参阅了大量国内外有关文献资料，相关部门和作者的研究成果，对他们在本书中的贡献一并表示感谢。

鉴于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2010年6月于石家庄

目 录

前 言

1 绪论	(1)
1.1 问题的提出	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 国内研究现状	(3)
1.2.2 国外研究现状	(7)
2 万年矿地质与水文地质条件	(8)
2.1 自然地理与矿井生产概况	(8)
2.1.1 自然地理概况	(8)
2.1.2 矿井生产概况	(12)
2.2 地质概况	(13)
2.2.1 地层	(13)
2.2.2 含煤地层	(13)
2.2.3 构造	(16)
2.2.4 岩浆岩	(18)
2.3 水文地质条件	(18)
2.3.1 边界条件	(18)
2.3.2 含水层与隔水层	(20)
2.3.3 地下水补、径、排条件	(22)
2.3.4 奥陶系灰岩岩溶地下水动态	(23)
2.3.5 矿井涌水与突水概况	(24)
2.4 水化学特征	(26)
2.4.1 水化学组分的构成	(26)
2.4.2 水化学组分背景值	(31)
2.4.3 主要离子水化学成分形成机理	(35)
2.4.4 水化学方法分析水文地质条件	(36)
3 三维可视化地质建模	(40)
3.1 GMS 简介	(40)
3.2 GMS 地层建模相关功能模块	(41)
3.3 钻孔数据库的建立	(41)
3.4 建立地层模型	(42)
3.4.1 剖切地层模型	(43)
3.4.2 旋转地层模型	(48)

3.5 地质模型的阐释	(51)
4 煤层底板突水力学分析	(52)
4.1 煤层底板突水影响因素分析	(52)
4.1.1 底板含水层的水压力	(52)
4.1.2 底板岩性及组合	(52)
4.1.3 地质构造	(52)
4.1.4 矿山压力	(52)
4.1.5 含水层岩溶裂隙发育程度及富水性	(53)
4.1.6 工作面开采空间及开采方法	(53)
4.2 采动矿压对底板岩石的破坏	(53)
4.2.1 采场周围岩体应力与破坏区计算	(53)
4.2.2 底板岩体破坏深度计算	(59)
4.3 水压对煤层底板岩石的破坏	(64)
4.3.1 水压对煤层底板隔水层的破坏	(64)
4.3.2 水流沿煤层底板的水头损失计算	(68)
4.4 煤层底板突水极限压力计算	(74)
4.4.1 正常开采底板突水极限压力计算	(74)
4.4.2 遇断层时底板突水极限压力计算	(77)
5 煤层底板协同学理论分析	(81)
5.1 基本概念及基本原理	(81)
5.1.1 基本概念	(82)
5.1.2 基本原理	(83)
5.2 煤层底板协同学分析	(84)
5.2.1 协同学分析	(84)
5.2.2 支配原理分析	(85)
6 煤层底板突变理论分析	(90)
6.1 基本理论	(90)
6.1.1 基本概念与基本理论	(90)
6.1.2 Thom 的初等突变类型	(94)
6.2 分析方法	(96)
6.2.1 齐曼 (Zeeman) 突变机构分析法	(97)
6.2.2 经验公式分析法	(100)
6.3 突变实验设计	(100)
6.3.1 实验目的与原理	(100)
6.3.2 实验设备与方案	(101)
6.3.3 监测要求	(104)
6.3.4 监测结果分析	(105)
7 万年矿底板突水预测	(107)
7.1 突水系数法	(107)

7.1.1	2 [#] 煤层	(108)
7.1.2	4 [#] 煤层	(109)
7.1.3	6 [#] 煤层	(109)
7.1.4	9 [#] 煤层	(110)
7.2	“下三带”理论计算法	(111)
7.2.1	2 [#] 煤层	(111)
7.2.2	4 [#] 煤层	(112)
7.2.3	6 [#] 煤层	(112)
7.2.4	9 [#] 煤层	(113)
7.3	极限突水系数法	(114)
7.3.1	正常开采底板极限突水系数法	(115)
7.3.2	遇断层底板极限突水系数法	(116)
7.4	突变理论计算法	(118)
7.4.1	数据分析	(118)
7.4.2	单变量序列尖点突变模型	(120)
7.4.3	力学突变模型	(123)
7.4.4	结果分析	(128)
7.5	底板突水分区	(128)
7.5.1	极限突水系数法底板突水分区	(129)
7.5.2	支配原理法底板突水分区	(130)
7.5.3	突变模型法底板突水分区	(133)
8	矿山带压开采与防治水措施	(134)
8.1	带压开采疏水降压措施	(134)
8.2	带压开采工作面斜长的确定	(134)
8.2.1	岩体水力学法	(134)
8.2.2	突水系数法	(135)
8.3	防水安全煤岩柱的设计	(136)
8.4	注浆加固底板	(137)
8.5	选择合理的开采方法与工艺	(138)
8.6	矿山防治水措施与建议	(138)
8.6.1	矿山防治水措施	(138)
8.6.2	矿山防治水建议	(139)
	参考文献及资料	(141)

1 绪 论

1.1 问题的提出

我国的煤炭储量非常巨大，煤矿的分布范围也很广，全国 32 个省（市、区）除上海市外，都分布有煤矿。我国已经查证的煤炭储量达到 $7241.16 \times 10^8 \text{ t}$ ，2007 年度，煤炭勘查净增查明资源储量 $448 \times 10^8 \text{ t}$ ^❶。由于我国北方主要产煤的华北型矿区，东起徐州、淄博，西至陕西渭北，北起辽宁南部，南至淮南、平顶山一带几乎都受石炭纪—二叠纪煤系底部的奥灰强含水层影响。我国南方煤田，煤层下方茅口灰岩厚度达 140~170m，煤层底板至灰岩之间的隔水层极薄，即厚度仅数米甚至无隔水层。例如湖南的涟邵，四川的南桐，广西的合山，江西八景，浙江的长广等数十个煤田。因此，在开采过程中煤矿水害普遍存在，造成大量煤炭资源难以开发。

随着开采强度的增加，矿井深度的不断延伸，突水频率、突水量均不断增加（表 1.1），国家财产和工人的人身安全受到严重威胁。据国家煤炭工业局初步统计，全国 600 处国有重点煤矿中受水威胁的矿井达 285 对，占矿井总数的 27.5%，受水威胁储量达数百亿吨^[1]。根据新中国成立以来的统计资料（表 1.1），20 世纪 90 年代与 60 年代相比，突水的频率增长了 2.57 倍，一次突水水量也由 $5 \sim 20 \text{ m}^3/\text{min}$ ，增至 $50 \sim 240 \text{ m}^3/\text{min}$ ，甚至高达 $2053 \text{ m}^3/\text{min}$ 。突水事故的频繁发生和突水量的增大，使国家财产和工人的人身安全受到严重威胁。

表 1.1 我国国有煤矿底板突水次数^[2]

Tab. 1.1 Times about water intrush of national coal mine

时间	突水次数	淹井次数	年平均突水数/（次·年 ⁻¹ ）	年平均淹井次数/（次·年 ⁻¹ ）
1965~1975	160	62	14.6	5.6
1976~1986	238	61	21.6	5.5
1987~1993	313	48	52.1	8
1994~1996	56	24	18.7	8
1997~2002	107	42	17.8	7

我国北方型煤田为石炭纪—二叠纪煤田，主要受煤系底部巨厚层奥陶系及太原组岩溶含水层的威胁。由于矿床水文地质条件复杂，奥陶纪灰岩含水层富水性强，水压高，可达 2.0~6.5 MPa，下组煤层与其下伏的灰岩岩溶含水层之间的隔水层厚度一般只有 10~

❶ 该数据来源于中国洁净煤技术网，网页地址：<http://www.cct.org.cn/cct/content.asp?ID=14032>

20m，最大可达 50~60m。矿井底板岩溶水害严重，致使占 1/2 以上储量的下部煤层很难开采。20 世纪 50 年代以来，据不完全统计，华北各煤矿北方型煤层底板突水见表 1.2。

表 1.2 华北各煤矿突水概况^[2]

Tab. 1.2 Water brush about coal mine in North China

煤矿区	突水次数	淹井次数	最大突水量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
焦作	900	20	320
峰峰、邯郸、邢台	24	10	>50
井陘	55	6	68
淄博	180	6	
韩城	30	4	200
澄合	15		335
肥城	80	6	>17

峰峰矿区位于太行山东麓，邯邢地区南部水文地质单元（简称南单元）的东南部，矿区主要处于南单元径流区和排泄区，尤其是一矿、二矿、四矿、五矿、牛儿庄矿和王凤矿等处于强径流带。峰峰矿区是突水比较严重的矿区之一，采掘史上曾发生过 30 多次矿井突水，截止到 1996 年底发生比较严重的突水事故 23 起。峰峰矿务局一矿 1985 年 3 月发生的 1686m 山青采煤工作面因为小断层破碎带突水；峰峰矿务局一矿 1960 年 6 月发生的 1532m 工作面突水，薛村矿 1973 年 12 月发生的二盘区山青回风巷突水^[3]；后两次突水都是由于大断层的存在引起的。由于各井田的地质及水文地质条件各具特点，这些突水实例各有代表性。如一矿以小断层破碎带突水为主，四矿以完整隔水岩体突水为主，牛儿庄矿以大断层突水为主等（表 1.3）。

表 1.3 峰峰矿区突水情况表

Tab. 1.3 Water brush about Fengfeng coal mine

地点	时间/(年·月·日)	水源	突水量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	突水原因	治理情况
峰峰一矿 1532m 工作面	1960.6	野青灰岩水		大断层	强排
薛村矿	1973.12	野青灰岩水		大断层	强排
-100m 峰峰四矿井	1978.10.23	伏青灰岩水	3316	施工不规范	强排
峰峰一矿 1686m 工作面	1985.3	伏青灰岩水	2520	小断层	强排
陶一矿-85m 南翼	1990.8.7	野青水	8100	独头掘进	强排
梧桐庄矿	1995.12.3	奥灰水	5400	断层	强排
孙庄矿	1996.11.24	奥灰水	2400	断层	强排

长期以来对奥陶系灰岩岩溶承压水威胁煤层的开采问题存在两种观点^[1]，一是主张“深降强排”，二是“带压开采”。深降强排的优点是彻底根除水害，确保开采安全；但其缺点在于工程投资大，开采成本高，而且易产生环境地质问题。带压开采的优点在于经济

效益好，但危险性大，突水事故发生几率大，需要弄清底板突水机理和突水条件^[1]。目前煤矿底板突水机理与预测是一个复杂的难题，是国内外学者一直关注的重大课题之一。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内研究现状

在带压开采理论方面的研究起步较晚，其主要原因在于 20 世纪 70 年代后期，开采向深部发展，突水日趋严重，人们才认识到底板突水规律的重要性，以前的工作忽视了顶底板变形的统一性，缺乏对底板岩体移动的内在规律认识；底板的现场观测资料零散，采集难度大、费用高，因而使的煤矿底板岩溶水的研究工作进展缓慢，成效不大。近几十年，我国煤炭科技工作者在与底板承压水长期斗争中，进行了大量的研究工作，并初步形成了如下几种理论。

1.2.1.1 突水系数方法

我国学者早在 1964 年焦作水文地质会战时就开始采用突水系数作为煤层底板突水与否的标准^[4,5]，突水系数就是单位隔水层所能承受的极限水压值：

$$T_s = \frac{p}{h} \tag{1.1}$$

式中： T_s 为底板突水系数，MPa/m； p 为极限水压力，MPa； h 为底板岩层厚度，m。

由于式（1.1）没有考虑矿压和岩性组合对底板破坏的影响，20 世纪 70～80 年代，煤炭科学研究总院西安分院水文所引用了匈牙利学者的“等效隔水层厚度”的概念对公式进行了修正，即

$$T_s = \frac{p}{\sum h_i a_i - h_p} \tag{1.2}$$

式中： h_i 为隔水层第 i 分层厚度，m； a_i 为隔水层第 i 分层等效厚度的换算系数； h_p 为矿压对底板的破坏深度，m。

1.2.1.2 “下三带”理论

根据部分现场实测资料和试验研究成果，李白英等^[6~9]提出了“下三带”理论。该理论认为开采煤层底板也像采动覆岩一样，由上至下存在着“三带”，即上部底板采动裂隙带，中部完整岩层隔水带和下部承压水导升裂隙带。其中完整岩层隔水带对阻隔底板突水起着主要的保护作用。“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导高所致。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。在突水判据上，采用完整岩层阻水带平均每米岩层阻水能力作为预测突水与否的根据。实际上，“下三带”理论是突水系数法的扩展，比较适合煤层采动条件下底板破坏突水的规律，在生产实践中得到较为广泛的应用。

1.2.1.3 原位张裂与零位破坏理论

王作宇等提出了底板移动的原位张裂和零位破坏理论^[10,11]。该理论认为在岩体的自重力和下部水压力的联合作用下,使其超前压力压缩段岩体整个结构呈现上半部受水平挤压,下半部受水平引张的状态,因而在其中部附近的底面上的原岩节理、裂隙等不连续面就产生岩体的原位张裂,研究者认为,底板结构岩体由超前压力压缩段的过度引起其结构状态的质变,处于压缩的岩体应力急剧增加,围岩的贮存能大于岩体的保留能,便以脆性破坏的形式释放残余弹性应变能以达到岩体能量的重新平衡,从而引起采场底板体的零位破坏;并且认为顶板自重应力场的采场支承压力是引起底板产生破坏的基本前提,煤柱体的塑性破坏宽度是控制底板最大破坏深度的基本条件,底板岩体的内摩擦角是影响零位破坏的基本因素。该理论进一步引用塑性滑移线场理论分析了采动底板的最大破坏深度。在突水判据上仍归结到突水系数的概念。

1.2.1.4 板模型理论

刘天泉、张金才等提出了底板岩层由采动导水裂隙带和底板隔水带组成的概念^[12~14]。并采用半无限体上一定长度上受均匀竖向荷载的弹性解,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,将底板隔水带看作四周固支、受均布荷载的弹性薄板,然后采用弹塑性理论分别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。

1.2.1.5 关键层理论

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)理论^[15~17]。该理论提出在底板岩层中找出一层强度最高的岩层作为底板关键层,将这一关键层看作薄板,很好地满足了薄板理论的基本要求。这样,便可以利用薄板强度理论对底板破坏进行研究和计算。由于底板关键层强度最高,因此,当其达到极限破断步距时,煤层至含水层之间的其他岩层均早已达到极限破断步距。这样对底板突水机理的研究就转化为:在无断层构造条件下,底板关键层破断机制的研究;当有断层切割时,对断层两盘关键层破断机制与承压水对关键层的张开或断层重新活化与承压水在断层带中渗透冲刷的研究。

1.2.1.6 突变理论

桑博得、阿诺尔德创立了突变理论^[18,19],我国许多学者将突变理论成功引入到岩体工程的稳定性研究中来。青岛建筑工程学院的潘岳^[20]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,此外也分析了岩石破裂时,断层围岩所施加的负载和约束的影响。东北大学的康春安等^[21]利用突变理论,对岩石在加载系统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。邵爱军^[22]进一步将突变理论引入到煤矿承压水底板突水破坏的研究中,通过研究煤矿底板系统能量的失稳变化,建立了预测矿井突水尖点突变模型。为研究煤矿底板突水引入一种新的理论分析方法。

1.2.1.7 固-液耦合理论

刘建军等^[23]将渗流力学与弹塑性力学相结合,考虑地下水和岩土骨架之间的相互作用,建立地下水流固耦合渗流数学模型,根据有限元原理得出其计算方法,并给出耦合求解方法。仵彦卿^[24]指出岩体水力学是一门研究岩体内一定温度条件下渗透力与应力相互作用关系及其耦合作用对岩体及岩体工程稳定性影响的交叉学科。依据岩体的水力学特征,把岩体的结构分为五类,即:准孔隙连续介质、裂隙网络介质、双重介质、岩溶管道网络介质以及岩溶溶隙—管道介质。较全面地引入渗流与应力之间的相互作用关系,同时考虑渗透静水压力和切向拖曳力的作用,以裂隙(等效)隙宽与岩体应变的关系为桥梁,建立裂隙网络岩体渗流场与应力场耦合分析的数学模型,并采用有限元数值方法进行某工程实例的双场耦合分析,验证所建立模型的可靠性^[25]。杨天鸿等^[26]利用耦合分析软件F—RFPA,通过对孔隙水压作用下岩石试件加载破坏过程的数值模拟,研究了孔隙水压力对岩石强度、应力—应变曲线和破坏模式的影响,再现了受压试件在孔隙水压力作用下破坏过程及其逐步演变的应力场和渗流场。王芝银等^[27]指出位于地下水位线以下的岩体洞室围岩承受应力场与渗流场的耦合作用,而且其变形随时间的持续而发展。以岩体水力学和流变力学的基本理论为基础,研究建立了岩体应力场与渗流场耦合作用下的流变分析模型,导出了相应的流变有限元计算格式。

综合国内目前固—液耦合模型,主要分为以下几种:

(1) 连续介质数学模型:它是建立在经典的多孔介质和岩体裂隙渗透系数等效张量的理论基础上。其优点是可以直接应用较成熟的孔隙介质饱和渗流分析方法来求解裂隙岩体饱和渗流问题;不足之处主要是:把裂隙网络等效为连续介质,不能很好地刻画出裂隙的特殊导水作用,故拟真性不好,适用范围受到很大限制,不是所有岩体都可等效为连续介质。

(2) 离散裂隙网络模型:在不考虑岩体基质渗透性的情况下,该模型在调查清楚岩体每条裂隙的空间方位,隙宽等几何参数的条件下,以单裂隙水流公式为基础,利用流入和流出各裂隙交叉的流量相等来求其水头值。其优点是较好地描述了裂隙岩体的非均匀各向异性,故当岩块很致密,确实可忽略其渗透性时,具有拟真性好、精度高的优点;其不足之处在于研究域内全部裂隙的几何参数很难获得;另外,模型的计算量较大。

(3) 双重介质模型:该模型认为流体不仅通过岩体的裂隙面流动,而且还通过结构体流动。显然,它能较为全面地反映裂隙岩体的渗流特征。据岩体不同的渗透率又可分为双孔隙度/单渗透率模型和双孔隙度/双渗透率模型。其一定程度上刻画出优先流现象,并且考虑了岩块裂隙间的流体交换,故有较好的拟真性。把裂隙网络等效为连续介质来研究,故可操作性好。但双重介质中流体交换项较难确定,而此项的值又影响该模型的拟真性。

(4) 离散介质—连续介质耦合模型:该模型将岩体中的裂隙根据其迹长和开度等划分为主干和次要裂隙。用离散裂隙网络模型描述主干裂隙中的流体运动,用等效连续介质模型描述次要裂隙和孔隙中的流体运动,由次要裂隙和孔隙等效成的连续介质充满整个研究域,离散的主干裂隙按产状分布于连续介质中。该模型的耦合条件是:裂隙流体压力作为连续介质域的压力边界,离散介质域与连续介质域间的流体交换作为离散介质域的流量边界。该模型综合了连续介质模型和离散介质模型的优点,既能反映裂隙特殊的导流作用,又能体现岩块的贮藏作用,故很好地解决了精度与可操作性之间的矛盾。但由于描述连续

介质域的流体运动和描述离散介质域流体运动方程不同,给数学处理带来困难。另外,该模型同样存在双重介质模型中的流量交换的问题。

带压开采的影响因素较多,涉及工程地质、水文地质、渗流理论、岩体力学、流体力学和煤矿开采等方面知识,则其预测预报理论的研究就必须考虑多种因素和综合作用的影响,要以突水机制与理论为基础研究,以突水判据为标准,并针对矿区的实际情况,进行可行性分析与预测预报。从目前的研究状况来看,预测预报模型种类繁多,其研究概况如下。

(1) 概率统计与综合分析为主的方法:陈泰生等^[28]用模式判别方法预测煤矿突水,其预测的基本思路是利用大量已开采过的煤矿的多种水文地质资料构成模式分类的训练标准,对其突水与否进行判别。山东矿院的施龙青等^[29]在基于大量案例的基础上,根据突水各因素的作用,利用概率统计的方法及专家经验法确定各种因素在底板突水中所占的权重,建立了计算突水概率指数的数学模型,提出了突水概率指数来预测带压开采底板突水;韩进^[30]利用 VB 开发了该预测系统的软件。江苏徐州的高卫东等^[31]运用信息符合法(选取突水主要因素,复合成一个综合指数来说明突水事件的研究方法),根据由已知到未知的原理,通过对某一事件,进行多因素的综合分析,选取其中主要因素复合成一个综合指数,绘制突水指数等值线图,对煤层底板带压开采进行分区,以预测带压开采底板突水。王作宇等^[32]归纳了底板突水的 10 个特征、6 种因素,作为带压开采底板突水监测预报系统考虑的因素。山东烟台的孙苏南等^[33],淮南矿院的汪茂连等^[34],江东等^[35]分别利用 GIS 技术在分析矿区地质、水文地质突水资料的基础上,建立了能够反映多因素综合作用的突水模式,此模式是研究空间数据的技术系统,能够通过计算建立数据库,将各种地质要素进行综合分析。张永双等^[36],刘伟韬等^[37]利用层次分析—模糊评判建立多因素之间的层次分析结构模型,对于单个定性描述的因素,采用模糊综合评判的隶属函数进行量化,从而得出突水评价的量化指标,最终进行矿井底板突水的安全性评价。段水云^[38]运用多元统计的方法建立了矿压对煤层底板破坏深度的计算式,对以往煤层底板突水计算公式进行对比、分析、推理和总结,得出了考虑因素较全面和较科学的突水系数计算公式。

(2) 模型与公式推导为主的方法:张金才等^[39~42]把煤层底板突水系统看做一种非线性系统,利用神经网络系统作出综合决策,即把 11 个特征变量作为神经网络模型的输入量,并对对实际矿区进行了检验。黄国民等^[43]、江东等^[44~47]在这方面也做了相似的工作。北京煤科总院的张金才等^[12~14]利用薄板模型及理论,推导出了底板突水的预测预报公式。王秀辉^[48]利用煤层底板在采动过程中岩层内部参数值在突水前的变化,采用数值模拟和现场测试的方法来分析预测底板突水的可能性;陈学星等^[49]利用专家系统建立了煤层底板突水预测模型,由专家的知识、推理来寻求底板突水的可能性,这一方法在 20 世纪 70 年代应用比较广泛。邵爱军^[22]将突变理论引入到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的尖点突变模型,为研究煤矿底板突水引入了一种新的理论分析方法。冯利军^[50]采用可变精度的 rough 集模型,经过对原始决策信息表的数据预处理,属性约简、值约简和规则生成等主要步骤,最终获取与样例子集相适应的突水规则,覆盖了样例子集所包含的突水信息,具有同等的分类决策效果。靳德武等^[41]的华北型煤田煤层底板突水预测信息分析理论、方法及应用,采用了信息分析——熵的方法对底板突水预测信息进行了较为新的研究。

1.2.2 国外研究现状

前苏联, В. Д. Слесарев^[51]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。将煤层底板岩层视为两端固支的受均布荷载作用的梁,并结合强度理论,推导了底板理论上的安全水压值计算公式。之后,就一直沿用基于水压力平衡的理论公式来评价采煤工作面的围岩破裂值,其他采用线性经验公式或经验数值;在20世纪80年代末,前苏联地质力学和测量科学研究院突破传统线性关系,指出导水裂隙和采厚呈平方根关系。

煤矿突水问题在东欧的匈牙利、波兰、原南斯拉夫等国家大量存在。特别是匈牙利,其岩溶含水层对煤矿的威胁程度不亚于我国。20世纪60年代至70年代,匈牙利、原南斯拉夫学者提出的预测底板突水的“保护层的特殊厚度法”,采用的是相对隔水层厚度(相当于突水系数的倒数)。以泥岩抗水压的能力为标准隔水层厚度,将其他不同岩性的岩石换算成泥岩厚度,称换算后的岩层厚度为等效厚度。相对隔水层厚度,即单位水压所允许的等效隔水层厚度。20世纪80年代以后,很多国家的地质学者在研究矿柱的稳定性时研究了底板破坏机理,如 R·H·G·布雷迪和 E·T·布朗,他们基于改进的 Hoek-Brown 岩体强度准则,并引入临界能量释放点的概念和岩体指标 RMR 相关的无量纲参数 m 和 s ,分析了底板的承载能力^[52]。

欧美各国技术经济条件较好,对该问题的研究资料较少,主要用经验公式和经验值评价。以 Darcy 定律和 Terzaghi 原理为基础,岩水应力耦合作用开始被引入煤矿开采研究中。Schme Hers. C. 和 Pariseau. W. G.^[53]在试验中分析了在煤矿开采过程中岩体应力、应变及位移的变化和水压力及流速的变化的相互关系,他们认为在矿井围岩稳定性的研究中,水是矿井围岩稳定的主要决定因素,在研究中应充分考虑高吸水率的问题,裂隙岩体的水力传导系数,也应该在实验结果前得到准确的确定。此外,20世纪60年代出现一门新兴学科——岩体水力学,自1968年 Show D. T.^[54,55]通过试验发现平行裂隙中渗透系数的立方定律以后,人们对裂隙流的认识从多孔介质流中转变。1974年 Louis 根据钻孔抽水实验得到裂隙中水的渗透系数和法向地应力服从指数关系^[56]。以后德国的 Erichsen^[57]又从裂隙岩体的剪切变形分析出发建立了渗流和应力之间的耦合关系。1986年, Oda 教授由裂隙几何张量来统计表达岩体渗流与变形之间的关系,运用渗透率张量的应力张量法,提出了岩体渗流场与应力场耦合分析的等效连续介质模型^[58]。1992年 Derek Elsworth 将拟双重介质岩石格架的位移转移到裂隙上,再根据裂隙渗流服从立方定理的关系,建立渗流场计算的固-液耦合模型,并开发了有限元计算程序^[59]。Pariseau. W. G.^[60]认为在岩体-流体的问题中,流体的压缩系数应该被考虑进去。从此,采用固-液耦合模型就成为突水过程的一个主要方面。

2 万年矿地质与水文地质条件

2.1 自然地理与矿井生产概况

2.1.1 自然地理概况

2.1.1.1 区域自然地理

邯郸市位于河北省南部，地处北纬 $36^{\circ}20'$ ~ $36^{\circ}44'$ ，东经 $114^{\circ}03'$ ~ $114^{\circ}40'$ 之间，总面积 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，邻接晋、鲁、豫三省，北距省会石家庄市 150km，距首都北京 450km，现辖 4 区、1 市、14 县，其交通位置图见图 2.1。本区矿产资源丰富，尤以煤铁资源著称，矿产资源开发已经成为该区主要产业之一。依靠资源优势，目前初步形成了煤炭、冶金、电力、陶瓷、建材、纺织等门类较为齐全的工业体系。

本区属北温带季风气候区，夏季炎热，冬季寒冷，多年平均气温 13.1°C ，最高气温 42°C ，最低气温 -24.3°C 。年降水量一般为 400~700mm，年平均降水量 531~552mm。年降水量呈周期性变化，降水量年际变化大，年内分配集中。百年一遇的洪水年降雨超过 1400mm（1963 年），8~10a 出现一次的丰水年降雨量为 900mm 左右，而最枯年份降雨仅 200mm（1986 年），年内降雨集中在 7~10 月份，占全年雨量的 70%~80%，一次性连续降雨可达 200~600mm。

邯郸市西依太行山，东跨华北平原，以京广铁路为界，西部为中、低山丘陵地貌，东部为华北平原西部为山区丘陵，地势自西向东呈阶梯状下降，高低悬殊，地貌类型复杂多样。以京广铁路为界，西部为中、低山丘陵地貌，东部为华北平原。海拔最高 1898.7m，最低 32.7m，相对高差达 1866m，总坡降为 11.8‰。区内主要河流有漳河、滏阳河、洺河、马会河等，均属海河流域子牙河水系。河流流量变化较大，多为季节性河流，每当雨季暴雨后流量增大，旱季因补给来源减少而使流量变小甚至干涸。这些河流在流经石灰岩地段时，皆有不同程度的渗漏，有的全部漏失。现上游建水库截流，其主要水库见表 2.1。

表 2.1 主要水库一览表
Tab. 2.1 List of major reservoirs

水库名称	所在河流	建成时间/年份	控制流域面积/ km^2	总库容/ 10^8 m^3
东武仕水库	滏阳河	1970	340.0	1.52
岳城水库	漳河	1970	18100.0	10.09
峡沟水库	马会河	1960	11.0	0.057
口上水库	北洺河	1969	139.1	0.246
车谷水库	南洺河	1974	124.0	0.37

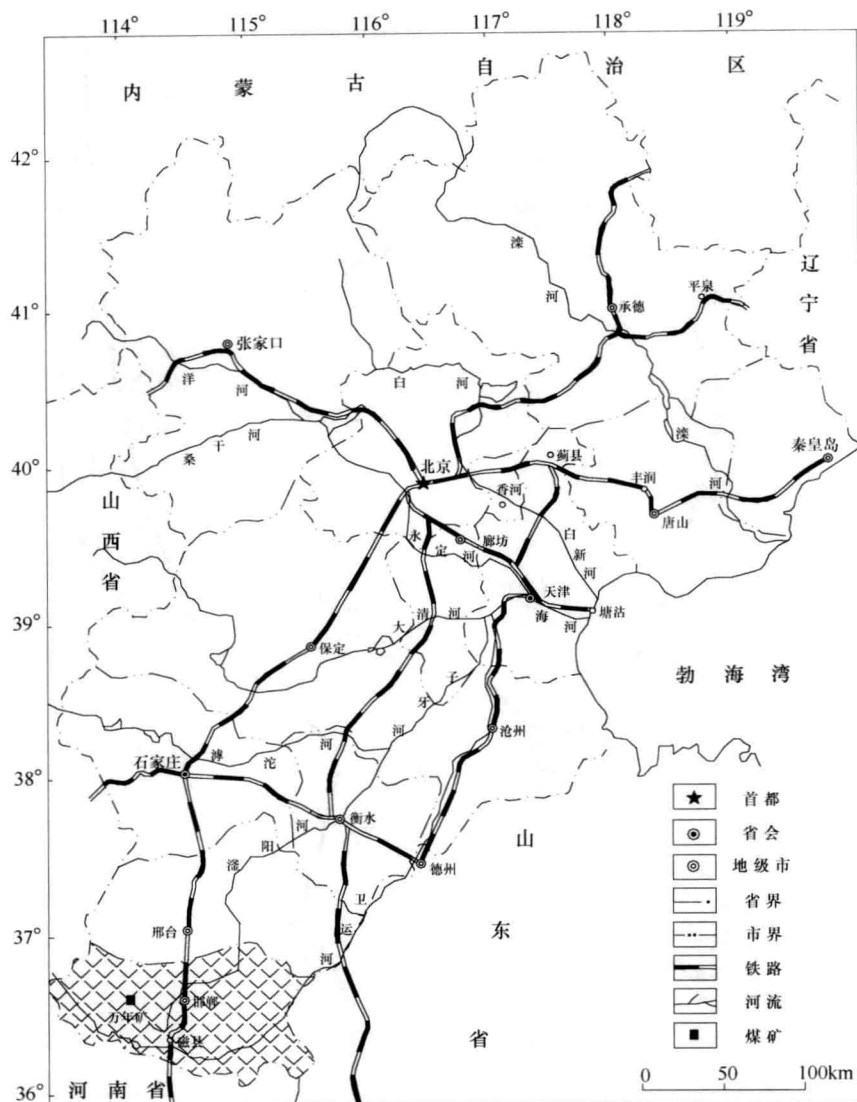


图 2.1 邯郸市交通位置图

Fig. 2.1 Traffic location of Handan city

2.1.1.2 井田自然地理

(1) 位置与交通：河北省峰峰集团公司万年矿位于峰峰矿区北部，隶属武安市伯延、磁山二镇和峰峰矿区和村镇，北距武安市 10km，东距邯郸市 35km，南距峰峰矿务局 20km。

万年矿井田西 2km 为磁山火车站，有邯（郸）长（治）铁路及邯郸环行铁路线经过，公路南通峰峰矿区、北通邯郸市、西通涉县，区内交通十分便利（图 2.2）。

井田西以 F_1 号断层为界；南以 F_{11} 号断层为界与通二矿相邻；东部南段以 F_{15} 号断层