

河北省自然科学基金  
河北省博士基金 联合资助  
石家庄经济学院学术著作出版基金

# 煤矿地下水

邵爱军 张发旺 邵太升 刘唐生 著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书结合华北型煤田岩溶充水矿床的实例，将一系列新理论和新方法应用于煤矿地下水的研究。内容包括：裂隙岩体渗透张量理论及其应用，模糊数学在岩溶地下水系统研究中的应用，同位素数学模型及其应用，矿坑突水、矿坑放水的数值模拟，矿坑涌水量预测的人工神经网络模型，矿坑底板突水的突变模型，矿山环境的研究现状与发展趋势。

本书虽然针对煤矿地下水撰写，但其理论和方法具有普适性，可供水文地质工程地质、煤田地质、冶金地质、石油地质、工程勘察和水电工程等相关专业的工程技术人员、高校教师、研究生和高年级学生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿地下水/邵爱军等著. —北京: 地质出版社,

2005. 10

ISBN 7 - 116 - 04659 - 3

. 煤... . 邵... . 煤矿 - 地下水 - 研究  
. P641. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116309 号

---

责任编辑: 陈 磊

责任校对: 郑淑艳

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) 82324565 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京印刷学院实习工厂

开 本: 787 mm× 1092 mm

印 张: 7.5

字 数: 190 千字

印 数: 1—600 册

版 次: 2005 年 10 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 20.00 元

ISBN 7-116-04659-3 / P · 2619

---

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

# 序

我国是世界上的煤炭资源大国之一，居世界第三位。煤炭年生产量自20世纪80年代末以来就一直保持在 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 以上，居世界第一位。华北型煤田则是我国最重要的煤炭工业基地，已探明的煤炭储量占全国总储量的60%以上，煤炭产量占全国总产量的2/3。

华北型煤田多为岩溶充水矿床，随着矿山开采深度的增加，出现的水文地质问题愈来愈多，解决这些问题也变得愈来愈困难。因此，在传统水文地质条件研究的基础上，进一步运用新的理论和技术方法，深入系统地研究矿区的水文地质条件，查清矿床充水水源、充水通道及充水强度，准确地预测矿坑涌水量、底板突水，解决出现的各种水文地质问题，有效地遏止底板突水造成的危害，合理地解决带压开采中防治水的问题是当前一项非常重要和紧迫的任务。

本书的作者从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的研究工作，在做博士和博士后研究期间，加强了这方面的研究工作。针对煤矿地下水研究中存在的问题，在理论认识上，不论是研究的深度和广度，均有所发展、有所创新，提出了不少新观点、新思路，把对煤矿地下水的研究提高到了一个新的水平，为煤矿制定防治水措施和安全带压开采提供了科学依据。

全书在系统总结国内外大量有关文献资料的基础上，主要针对矿区地下水的运动规律，岩溶充水矿床矿坑涌水量的预测预报，煤层底板突水的突变理论研究，矿山环境保护与治理等一系列亟待解决和关注的问题进行了研究，其研究成果具有重要的理论意义和实用价值。

本书有以下特点和创新：

(1) 在矿区地质、水文工程地质条件研究的基础上，推导了渗透张量的渗透主值和渗透主方向的计算公式，根据野外实测数据计算了奥陶系石灰岩的渗透张量，提出了远离岩溶大泉排泄区各向异性明显，岩溶大泉排泄区趋于各向同性的新见解。

(2) 在应用模糊数学方法研究岩溶地下水系统的过程中，使用“频数统计法”确定隶属度，取得了较好的效果，为隶属度的确定提供了一种新的方法，特别是在径流分区的研究上，提出不仅奥陶系厚层灰岩存在岩溶水强径流带，而且煤系薄层灰岩也存在岩溶水强径流带，上下两套岩溶水强径流带系统在分布上位置大体一致，但规模上前者较大。

(3) 利用正态分布密度函数表征地下水的混合模式，在此基础上提出的正态同位素模型(NDM)具有新意，实际应用效果较好。

(4) 利用矿坑突水资料，用不规则网格有限差分法，对矿坑地下水所进行的数值模拟，不仅节省了大量资金，而且取得了更好的数值仿真效果，计算结果和实际吻合。

(5) 将人工神经网络模型(ANNM)用于矿坑涌水量的预测，并根据B-P算法公式的缺陷，提出了一种新的、收敛速度快、误差小的联合学习算法(ULD)，为矿坑涌水量

的预测提供了一条新的途径。

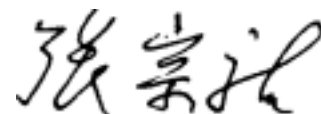
(6) 矿坑底板突水具有复杂性、突发性和随机性, 准确地进行预测预报十分困难, 作者应用突变理论, 结合材料力学、弹性力学, 建立了一种新的底板突水预测模型——尖点突变模型 (CCM), 具有新意和实用价值, 为定量研究底板突水问题, 开辟了一条新的途径。

(7) 随着煤矿开采规模的扩大和开采时间的延长, 引起的矿山环境问题日益突出, 书中对矿山环境污染治理、环境地质问题、矿山土地复垦、矿山环境质量评价和地质生态环境保护等问题, 也进行了全面而深入的探讨。

总之, 这部著作内容丰富新颖, 理论研究深入, 观点鲜明, 资料翔实, 具有实用性, 其研究成果具有明显的经济效益和社会效益。这部著作的出版, 必将对煤矿地下水的研究、底板突水的预测、煤矿水资源的合理开发利用和科学管理、矿山生态环境的保护与治理等方面起到积极的推动作用。

中国科学院院士

中国工程院院士



2005年3月31日

# 目 录

绪论 .....	(1)
第一节 中国煤炭资源概况 .....	(1)
第二节 华北石炭二叠纪煤田分布及其特征 .....	(3)
一、华北石炭二叠纪煤田的分布 .....	(3)
二、华北石炭二叠纪煤田的特征 .....	(4)
第三节 煤矿地下水研究新进展 .....	(6)
参考文献 .....	(8)
第一章 裂隙岩体渗透张量理论及应用研究 .....	(9)
第一节 裂隙几何参数的确定及其统计分析 .....	(10)
一、基本概念 .....	(10)
二、裂隙几何参数的确定及其统计分析 .....	(10)
第二节 裂隙水运动的基本方程 .....	(16)
第三节 裂隙岩体渗透张量的计算 .....	(18)
一、单组裂隙岩体的渗透张量 .....	(18)
二、多组裂隙岩体的渗透张量 .....	(19)
三、裂隙介质渗透主值及渗透主方向的确定 .....	(20)
四、方向渗透系数与渗透椭球 .....	(21)
五、隙面粗糙度对渗透张量的影响 .....	(22)
第四节 峰峰矿区奥陶系灰岩分段渗透张量计算 .....	(23)
一、测点的选择 .....	(23)
二、峰峰矿区奥陶系灰岩分段渗透张量计算结果及其分析 .....	(24)
参考文献 .....	(26)
第二章 模糊数学在岩溶水系统中的应用 .....	(28)
第一节 综合评判原理 .....	(28)
一、综合评判原理 .....	(28)
二、隶属度的确定 .....	(30)
第二节 岩溶径流带的分区 .....	(30)
第三节 结果分析 .....	(33)
参考文献 .....	(33)

第三章	同位素数学模型及其应用研究 .....	(34)
第一节	同位素水文地质学的发展与研究现状 .....	(34)
一、	概述 .....	(34)
二、	同位素水文地质学的发展与研究现状 .....	(35)
第二节	测定地下水年龄的同位素数学物理模型 .....	(38)
一、	氡浓度单位 .....	(38)
二、	同位素数学物理模型 .....	(39)
第三节	正态同位素模型 .....	(40)
第四节	正态同位素模型的应用 .....	(41)
参考文献	.....	(48)
第四章	地下水渗流数值模拟 .....	(50)
第一节	矿坑突水数值模拟 .....	(51)
一、	56603 工作面突水情况简介 .....	(51)
二、	水文地质条件概述 .....	(51)
三、	数值模拟 .....	(53)
第二节	矿坑放水试验数值模拟 .....	(65)
一、	东翼区大青灰岩放水试验简介 .....	(65)
二、	东翼区水文地质条件概述 .....	(66)
三、	数值模拟 .....	(67)
参考文献	.....	(70)
第五章	涌水量预测的人工神经网络模型 .....	(72)
第一节	B - P 网络的结构与数学模型 .....	(74)
一、	神经元的结构与数学模型 .....	(74)
二、	B - P 网络的结构与数学模型 .....	(74)
三、	B - P 算法 .....	(75)
第二节	算法的改进 .....	(78)
第三节	B - P 网络的设计 .....	(80)
第四节	矿坑涌水量预测 .....	(82)
一、	矿区水文地质条件概况 .....	(82)
二、	用 B - P 网络模型预测矿坑涌水量 .....	(82)
三、	小结 .....	(84)
参考文献	.....	(84)
第六章	矿坑底板突水的突变模型研究 .....	(86)
第一节	突变理论的数学模型 .....	(87)
第二节	矿坑底板突水的尖点突变模型 .....	(89)
一、	煤矿底板突水的力学模型 .....	(89)

## 目 录

---

二、煤矿底板突水的尖点 (Cusp) 突变模型 .....	( 90)
三、小结 .....	( 92)
参考文献 .....	( 93)
第七章 矿山环境的研究现状与发展趋势 .....	( 94)
第一节 矿山环境污染治理的现状与趋势 .....	( 95)
一、矿山废水污染 .....	( 95)
二、矿山固体废物污染 .....	( 96)
三、矿山大气污染 .....	( 96)
四、矿山噪声及其防治 .....	( 97)
第二节 矿山开发中的环境地质问题的研究 .....	( 97)
一、煤炭开发对水环境的影响及其保护技术 .....	( 98)
二、煤炭开发对土地环境的影响及其保护 .....	( 100)
三、矿山的地热灾害 .....	( 101)
四、矿山的塌陷灾害 .....	( 102)
第三节 我国矿山土地复垦研究现状与发展趋势 .....	( 104)
一、土地复垦技术 .....	( 104)
二、土地复垦的基础理论研究 .....	( 105)
三、我国土地复垦工作面临的问题 .....	( 105)
四、土地复垦的发展趋势 .....	( 106)
第四节 矿山环境质量评价与地质生态环境保护 .....	( 107)
一、矿山环境质量评价 .....	( 107)
二、矿山环境地质图编制研究 .....	( 108)
三、矿山地质生态环境保护 .....	( 108)
参考文献 .....	( 110)

# 绪 论

## 第一节 中国煤炭资源概况

目前,我国使用的新矿产储量分类标准是中华人民共和国国家标准《固体矿产资源/储量分类》(GB/T17766—1999),新标准于1999年12月1日开始实施,该标准将矿产资源储量分为储量、基础储量和资源量3类。储量是经过详查或勘探,达到控制或探明的程度,扣除了设计和采矿损失,能实际采出的矿产资源数量;基础储量是经过详查或勘探,达到控制和探明的程度,是当前技术经济条件下可经济利用的矿产资源数量;资源量是指经过勘查后,经济可利用性差或经济意义未确定的那部分矿产资源数量。基础储量与储量的区别一是没有扣除影响因素;二是估算范围不同。而储量是基础储量中扣除各种损失后可以经济采出的部分。资源量是除去基础储量后的那部分资源数量。

而在新矿产储量分类标准实施之前,我国执行1993年制定的《固体矿产地质勘探规范总则》(GB13908—92)规定(旧矿产储量分类标准)。根据地质勘查的程度,旧标准将经过地质勘探的煤炭储量分成A、B、C、D、E五级,其中A+B类相当于美国分类中的确定(Measured)储量和西欧分类中的证实(Proved)储量;C类相当于美国分类中的推定(Indicated)储量和西欧分类中的概略(Probable)储量;D类相当于美国分类中的推测(Inferred)储量和西欧分类中的可能(Possible)储量。

目前,中国有关部门公布的煤炭保有储量,是指A、B、C、D四类煤炭储量的总数;中国有关部门所说的煤炭工业储量或精查储量,是指A、B、C三类煤炭储量的总数;而国际上公认的煤炭探明储量,大体上仅相当于A、B两类煤炭储量的总数,即相当于中国有关部门所说的可采储量(已为矿山占用的储量)与可供设计储量的总数(中国环境与发展国际合作委员会,1997)。

中国煤炭资源相当丰富,据地质工作者对煤炭资源进行远景调查结果,在距地表以下2000m深以内的地壳表层范围内,预测煤炭资源远景总量达 $50592 \times 10^8$  t。到1996年底止,探明储量的矿区5345处,保有储量总量 $10025 \times 10^8$  t。我国保有储量总量中的精查储

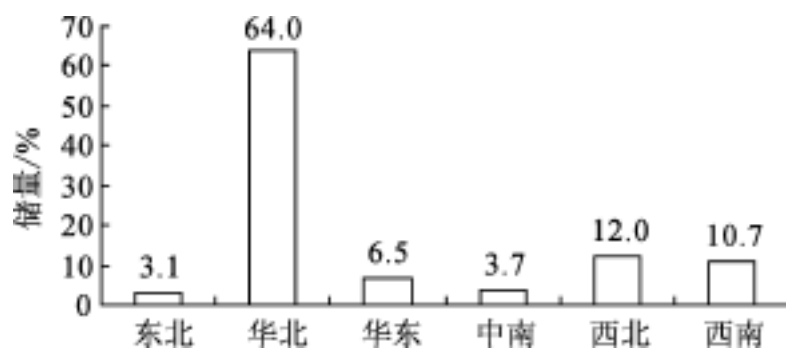


图1 中国各大区探明储量分布图

## 煤矿地下水

量  $2299 \times 10^8 \text{ t}$ ，与世界探明可采储量相比，中国煤炭储量位于前苏联、美国之后，居世界第三位（引自朱训主编，1999年《中国矿情》第一卷）。

从探明储量看，主要聚煤期（北方侏罗纪、华北石炭二叠纪和华南晚二叠世）的储量约占总探明储量的90%以上。在地理分布上，以华北居首位，占全国总探明储量的64%，并集中在山西和内蒙古，其中山西的煤炭储量最多，相当于全国煤炭探明总量的30%，而南方八省一市仅占1.5%（王煦曾、朱榔如、王杰，1992）。

新中国成立以来，我国煤炭工业有了突飞猛进的高速发展，特别是在20世纪70年代开始进行综采技术后，中国的煤产量直线上升，到80年代末，中国的煤产量已跃居世界第一，突破  $10 \times 10^8 \text{ t}$  大关，至今仍保持着这一地位（表1）。

表1 中国1949~1999年煤产量 (单位:  $10^4 \text{ t}$ )

年份	原煤产量	年份	原煤产量	年份	原煤产量	年份	原煤产量	年份	原煤产量
1949	3243								
1950	4292								
1951	5308	1961	27762	1971	39230	1981	62163	1991	108428
1952	6649	1962	21955	1972	41047	1982	66632	1992	111455
1953	6968	1963	21707	1973	41697	1983	71453	1993	115137
1954	8366	1964	21457	1974	41317	1984	78923	1994	122953
1955	9830	1965	23180	1975	48224	1985	87228	1995	129218
1956	11036	1966	25147	1976	48345	1986	89404	1996	137408
1957	13073	1967	20570	1977	55068	1987	92809	1997	137300
1958	27000	1968	21959	1978	61786	1988	97987	1998	125000
1959	36879	1969	26595	1979	63554	1989	105415	1999	104500
1960	39721	1970	35399	1980	62013	1990	107930		

注：资料来源：煤炭工业部，转引自：<http://www.cct.org.cn/cct/index.htm>。

煤、石油、天然气是当今世界社会运行的三大支柱能源。中国是世界上的煤炭大国，在中国一次能源的生产和消费构成中，煤炭占70%以上（表2），这就决定了煤炭生产在中国能源工业中的地位。由于其他能源资源条件的限制，以煤为主要能源的格局将在中国长期存在。

表2 全国国内生产总值（GDP）增长率、能源生产及消费状况一览表

年份	GDP 年增长率 %	能源消费总量 $10^4 \text{ t}$ 标准煤	煤炭消费量 $10^8 \text{ t}$	煤炭消费量占能源消费总量的比例 %
1985	13.5	76682	8.16	76.0
1986	8.8	80850	8.60	76.0
1987	11.6	86632	9.28	76.5
1988	11.3	92997	9.94	76.3
1989	4.1	96934	10.34	76.2
1990	3.8	98703	10.55	76.4

续表

年份	GDP 年增长率 %	能源消费总量 10 <sup>4</sup> t 标准煤	煤炭消费量 10 <sup>8</sup> t	煤炭消费量占能源消费总量的比例 /%
1991	9.2	103783	11.04	76.0
1992	14.2	109170	11.41	74.6
1993	13.5	115993	12.09	74.5
1994	12.7	122737	12.85	74.8
1995	10.5	131176	13.77	75.0
1996	9.6	138948	14.47	74.4
1997	8.8	138173	13.92	72.0
1998	7.8	132214	12.88	69.6
1999	7.1	122000	11.46	67.1

注：表中数据来源于 1985 ~2000 年《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴 1991 ~1996》。

## 第二节 华北石炭二叠纪煤田分布及其特征

### 一、华北石炭二叠纪煤田的分布

由于华北地区煤炭的储量和产量在全国占的比重较大，所以下面主要阐述华北石炭二叠纪煤田的分布及其特征。华北石炭二叠纪聚煤区是我国最主要的煤田分布区（简称为华北型煤田），其轮廓大致相当于“中朝地台”的范围。其北界为阴山、燕山及长白山东段，南界为秦岭、大别山，西界为贺兰山、六盘山，东临黄海、渤海（图 2）。横跨 14 个省、市、自治区，即：京、津、晋、冀、鲁、豫的全部，辽、吉和内蒙古的南部，甘、宁的东部，陕、苏、皖的北部（武强、金玉洁，1995）。

华北聚煤区主要有四个含煤时代。以海陆交替相的石炭二叠纪煤田分布最广，储量最多，占全区储量的 80% 以上。属于这个时代的煤田有山西的沁水、大同、宁武、太原西山、平朔、阳泉、霍县、黄河东、运城、潞安、晋城；山东的济宁、兖州、淄博、新汶、莱芜、肥城、枣庄；河南的平顶山、焦作、鹤壁、安阳、永城、禹县、密县；河北的开滦、兴隆、峰峰、邯郸、邢台、井陘；安徽的淮南、淮北；江苏的徐州、丰沛；辽宁的本溪、沈南、南票；吉林的浑江、长白；陕西的府谷、吴堡、渭北；宁夏的贺兰山及内蒙古桌子山、准格尔等。这些煤田含煤程度较高，煤层稳定，煤质良好，储量丰富，为我国重要的能源基地。

其次为内陆盆地型的早、中侏罗世煤田，储量相当丰富。主要分布在鄂尔多斯盆地、燕山南麓、内蒙古大青山、豫西、山东、辽宁等地。其中以内蒙古东胜，陕西神木、榆林、黄陵、彬县以及大同、京西煤田最为著称。尤其是东胜—神木煤田，储量之大，煤质之好，为世界所罕见。

陆相晚三叠世煤田分布于陕北和豫西一带。此外，在山西、内蒙古、河南、河北及山

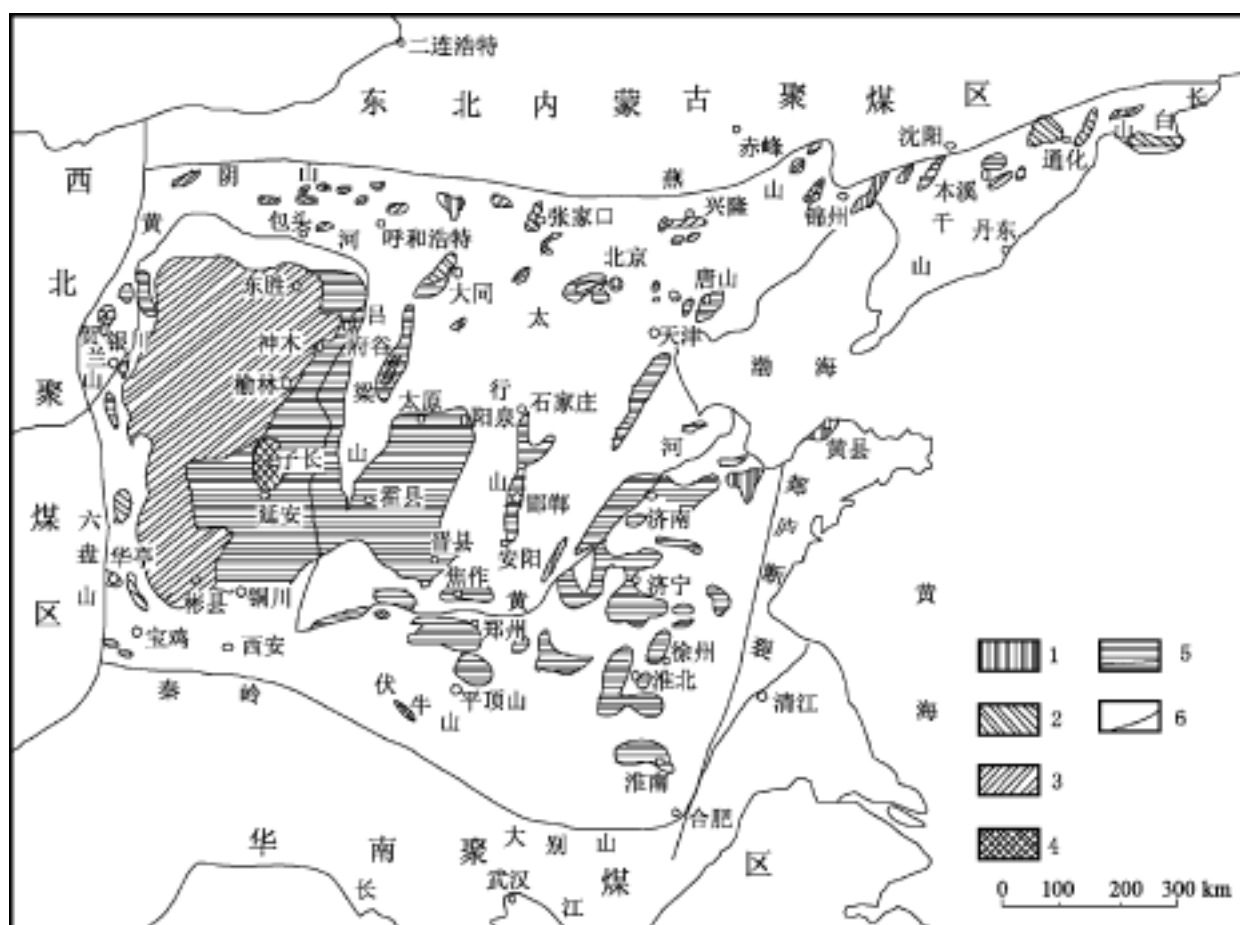


图2 华北石炭二叠纪聚煤区煤田分布示意图

1—第三纪煤田；2—晚侏罗世煤田；3—早、中侏罗世煤田；4—晚三叠世煤田；  
5—石炭二叠纪煤田；6—聚煤区界线

东等地有零星第三纪煤田，在聚煤区北缘的固阳、张家口、通化一带有一些晚侏罗世煤田。它们均系小型陆相煤田，横向上无成因联系，孤立存在。

华北聚煤区的勘探开发工作开始最早，如开滦、大同、京西、峰峰、焦作、铜川、枣庄等煤矿都有悠久的开采历史，有的长达几百年。但大规模勘探开发，是解放以后进行的。据统计，目前该区探明储量约占全国探明储量的二分之一。

华北聚煤区目前年产  $1000 \times 10^4 \text{ t}$  以上的大型煤矿区有 8 个，即大同、开滦、平顶山、淮北、阳泉、徐州、太原西山及峰峰；年产  $500 \times 10^4 \text{ t}$  以上的煤矿区有 13 个，即淮南、义马、铜川、潞安、新汶、枣庄、汾西、京西、晋城、石炭井、通化和兖州（图 2）。这 21 个矿区的总产量，占全国煤产量的 50% 以上（王煦曾、朱榔如、王杰，1992）。

华北聚煤区不失为我国目前最大的煤仓，每天有大量煤炭从这里源源不断运往四面八方。

## 二、华北石炭二叠纪煤田的特征

石灰岩在我国广泛分布，出露面积达  $200 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占我国领土的 1/5。这些地区也正是我国重要的煤炭产地，有 60% 的煤矿不同程度地受到底板岩溶承压水的威胁（彭苏萍、王金安，2001）。在南方的贵州、广西、四川、滇东大面积分布有 110 ~ 220m 厚的茅口灰岩。在北方的华北型煤田区，厚度 600 ~ 800m 的奥陶系灰岩，对煤矿的安全开采威胁最大。在北方，河北的井陘、邢台、邯郸、峰峰、开滦，河南的安阳、鹤壁、焦作、平顶山、新密、豫西，山东的淄博、肥城、莱芜、新汶、枣庄，江苏的徐州、大屯以及安

徽淮南、淮北，山西霍县、轩岗，陕西渭北，辽宁本溪、南票，吉林通化等三十多个煤田均处于石灰岩区。石灰岩地区丰富的岩溶水是矿井充水的主要水源（李金凯等，1990）。

北方石炭二叠纪煤田（华北型煤田）多属岩溶充水矿床，此类煤田在采矿中有两套石灰岩含水层组威胁生产，一是石炭二叠纪煤系基底的奥陶系厚层石灰岩，二是太原组煤系地层中的薄层石灰岩，对采矿威胁性最大的是前者。当薄层灰岩与厚层灰岩发生密切水力联系时，薄层灰岩也会对矿井安全造成严重威胁。

煤矿水害事故是影响煤矿安全生产的五大灾害之一（王永红、沈文，1996）。华北型煤田最突出的问题就是矿坑涌水量大、底板突水严重。

目前，在北方已开采的岩溶充水矿床，水量最大的是河南焦作矿区，矿坑排水量达  $89.13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，其中95%为岩溶水，即  $84.67 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。主要开采的是二叠纪山西统大煤。主要直接水源为石炭纪太原组薄层灰岩，但得到中奥陶统灰岩水广泛的补给。其次水量较大的为峰峰矿区，开采石炭纪上部煤层，矿坑总排水量  $34.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，其中74.76%为岩溶水，即  $22.10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，主要为太原组灰岩水、中奥陶统灰岩水。

从太行山东麓的井陘、邢台、峰峰到南麓的安阳—鹤壁、焦作五个矿区矿坑排岩溶水总量为  $114.449 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。已开采的煤矿中，岩溶水排水量超过  $50000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  的有以下矿区（表3）（刘启仁等，1995）。

表3 太行山东麓、南麓煤矿排水量较大的矿区

矿区名称	最低开采水平 m	排岩溶水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	矿区名称	最低开采水平 m	排岩溶水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
焦作矿区	- 300	846792	邯郸矿区		76002
峰峰矿区		221040	荥巩矿区	- 150	56491
徐州矿区		184579	淮南矿区	- 600	55469
平顶山矿区	- 430	159292	枣庄矿区		51754
肥城矿区		86630	淮北矿区	- 400	50386
开滦矿区	- 905	51955			

华北型岩溶充水煤矿床，不仅矿坑涌水量大，而且底板突水灾害也很严重，对煤矿安全生产构成严重威胁。据不完全统计，自新中国成立以来至1988年，北方已发生岩溶水灾害性突水事故130次，淹没矿井60次，局部淹井70次，直接经济损失达30亿元以上（刘启仁等，1995）。并且，突水量逐年有所增加，20世纪50至60年代，矿井的突水量一般为  $5 \sim 20 \text{ m}^3/\text{min}$ ，个别达  $50 \text{ m}^3/\text{min}$ ；70年代的突水量一般为  $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{min}$ ，个别超过  $100 \text{ m}^3/\text{min}$ ；80年代的突水量已上升到  $50 \sim 200 \text{ m}^3/\text{min}$ ，最高达  $2053 \text{ m}^3/\text{min}$ 。从突水水源来看，50年代的突水主要是老窑、老空水，其次是煤层顶板砂岩裂隙水以及地表水、冲积层水等；60年代，地表水、薄层灰岩水、煤层顶底板水和冲积层水的突水比例有所上升；70年代的突水主要是薄层灰岩水；80年代，奥陶系灰岩水的突水比例有较大的增长，而且薄层灰岩水和厚层灰岩水已成为这一时期较大突水事故的主要水体，开滦范各庄矿2171工作面陷落柱奥陶系灰岩突水，是这一时期突水事故的突出代表（中国煤矿防治水技术经验汇编编委会，1998）。

从矿区突水次数分布来看，矿区水害集中在太行山东麓和南麓一带，截止1988年北

方全部突水约 1207 次，其中焦作矿区 707 次，峰峰、邯郸矿区 75 次，井陘矿区 50 次，安阳、鹤壁矿区 46 次，合计 870 次以上，占北方全部突水次数的 71.4%；其次是山东和徐淮各矿区共发生 295 次，占整个突水次数的 17.5%；山西高原各矿区最少，总共 19 次，占 1.5%，原因是大多数矿区主采煤层位于中奥陶统灰岩水位以上。最大突水量的分布情况与上述基本相同，如太行山东麓和南麓各矿区最大突水量累计达  $764\text{m}^3/\text{min}$ ；山东累计  $1176\text{m}^3/\text{min}$ ，其中仅淄博矿区高达  $560\text{m}^3/\text{min}$ 。山西仅有霍县矿区突水量较大，最大  $41\text{m}^3/\text{min}$ 。此外燕山南麓的开滦矿区，奥陶系突水虽发生过 4 次，但突水量均较大，1984 年范各庄突水最大达  $2053\text{m}^3/\text{min}$ ，为国内外之冠（刘启仁等，1995）。

我国北方的许多岩溶充水矿床，特别是一些老矿区，如淄博、焦作、峰峰、邯郸矿务局等，随着开采深度的不断增加和开采层次的逐渐下移，煤层底板受煤系薄层灰岩和奥陶系厚层灰岩岩溶水的威胁日益严重，突水事故日趋频繁，给国家和人民的生命财产造成的损失越来越大，已成为亟待解决的重要生产实际问题和急需开展研究的重大理论课题。因此，除运用传统勘探手段外，必须运用新的理论和技术方法，深入系统地研究矿床水文地质条件，为矿山安全带压开采和防治水提供科学依据（邵爱军、刘唐生、邵太升等，2001）。

### 第三节 煤矿地下水研究新进展

本书以河北峰峰煤田五矿为典型实例，同时结合华北型煤田的其他矿山，将一系列新的理论和先进的技术方法应用于矿区地下水的研究之中，本书在煤矿地下水的研究中取得一系列新进展和新成果，其内容和特点主要有：

(1) 在裂隙介质岩体水力学方面，应用概率统计对裂隙几何参数进行了统计分析，推导了部分参数的统计计算公式。根据渗透性可叠加原理，由裂隙水运动的基本方程，推导了裂隙岩体渗透张量的计算公式，较详细地推导了渗透主值、渗透主方向的计算。公式简单实用，利用野外实测的裂隙产状要素和其他几何参数，即可计算裂隙岩体的渗透张量，为裂隙介质各向异性的研究提供了基础。依据野外实测资料，分岩性段（ $O_2^2$ 、 $O_2^4$ 、 $O_2^5$ 、 $O_2^7$ ）计算了奥陶系石灰岩（简称奥灰）裂隙岩体的渗透张量，结果表明，渗透主值的大小主要受岩性和构造的控制，渗透主方向主要受构造的控制。在平面图上渗透性表现为，远离岩溶大泉排泄区渗透椭圆为一扁平椭圆，各向异性明显；岩溶大泉排泄区渗透椭圆接近圆形，趋于各向同性。

(2) 应用模糊数学方法进行岩溶地下水系统的研究，特别是径流分区的研究。不仅奥灰存在岩溶径流带，而且薄层灰岩也存在岩溶径流带，在分布上两者的大体位置（平面上）基本一致，规模上奥灰岩溶径流带较大。研究表明五矿中央区为上下两套岩溶径流带系统，属于中强径流区；东翼区属于极弱区。研究中使用“频数统计法”确定隶属度，取得了较好的效果，“频数统计法”为隶属度的确定提供了一种新的方法。

(3) 环境同位素在地下水的研究中具有独到之处，用放射性同位素的计时性，以放射性衰变定理为基础的同位素数学模型在有关地下水的定量评价方面具有其他方法无法比拟的优越性。考虑到同位素在随地下水的运移过程中存在着水动力弥散混合作用，本文应

用一种新的同位素模型——正态同位素模型 (NDM) 于地下水的定量计算 (如年龄、储存量等) 之中。该模型物理概念清晰, 数学解释明确, 文中对模型的具体应用, 求解方法等都作了较详尽的论述。模型的参数由实测数据拟合确定, 通过所建模型计算的理论输出曲线与实测值拟合较好。与此同时, 还应用指数—活塞流模型 (EPM) 对计算结果进行了验证。最后用所建模型对 1952 ~1997 年地下水中氡的输出进行了计算, 计算曲线与大气降水氡值曲线形状基本相同, 但峰值有所滞后。正态同位素模型的提出和应用, 是对同位素水文地质理论的补充和完善, 根据现有文献资料, 应用正态同位素模型进行有关地下水定量方面的计算, 在国内尚属首次。

(4) 众所周知, 突水给国家造成的经济损失是巨大的, 其后果是极其严重的, 但另一方面突水也给我们积累了极其珍贵的水文地质资料。突水具有水流量大、时间延续长、水位降深大、降落漏斗影响范围大、暴露水文地质问题全面、反映水文地质条件清楚等特点, 如果进行同等规模的放水试验, 不仅影响生产, 而且其投资之巨也是生产单位难于承受的。因此利用突水资料进行地下水渗流的数值模拟, 对于查清矿床充水条件, 制定科学合理的矿山防治水措施是有很大帮助的。书中选取中央区 56603 工作面突水资料进行数值模拟, 不仅节省了大量投资, 而且取得了较好的效果。通过数值模拟, 对条件有了进一步的认识, 中央区大青灰岩 (石炭系—薄层石灰岩) 含水层以边界断层侧向补给为主, 垂向越流补给为辅; 东翼区大青灰岩含水层以垂向越流补给为主。通过数值模拟认为, 弱区水压高、水量小, 具备带压开采的基本条件; 强区水压高、水量大、开采成本高。

“准三维”不规则网格有限差分方程的推导, 以三角形单元为基础, 假设单元内的参数是均质的, 参数的取值在三角形内, 而不是取两结点参数的调和平均数, 因此可以更好地用单元边界逼近非均质边界。模型识别的检验从两个方面进行: 各观测孔水位随时间的变化过程 (从时间上); 地下水流场 (从空间上), 通过模型识别不仅各观测孔的水位动态曲线拟合较好, 而且流场 (平面图和三维立体图) 拟合也较好。通过模型识别对条件的认识更加定量化, 模拟突水期间通过断层边界进入中央区的流量为  $18.6\text{m}^3/\text{min}$ , 以越流方式进入的流量为  $6.4\text{m}^3/\text{min}$ 。

东翼区放水试验的数值模拟表明, 东翼区属于相对封闭块段, 以垂向越流补给为主。

带压开采预测。根据回采时临界突水系数所确定的安全水压, 模型识别后, 中央区分三个水平 (-120m、-150m、-200m 水平) 进行了疏放水量、水位的预测, 结果表明, 中央区开采 -100m 水平以下山青煤排水量较大, 所以成本较高; 东翼区大青灰岩含水层具有水压大、水量小、易于疏降的特点, 只要措施得当, 充分做好预防奥灰水突入的工作, 带压开采 -100m 水平以下山青煤是可行的。

数值模拟过程中将模拟程序与计算机绘图程序相连接, 大量读入的数据以图形方式进行检查, 如剖分图、初始流场图等, 以确保数据的准确无误。计算结果也以图形的方式输出, 如动态曲线拟合图、流场图 (包括平面图和三维立体图) 等, 整个过程由计算机自动完成, 从而大大提高了工作效率。

(5) 将一种新的模型——人工神经网络模型 (ANNM) 用于矿坑涌水量的预测, 还属首次。文中推导了 B-P 算法公式, 指出了该算法的缺陷和改进措施。基于梯度下降法的标准 B-P 算法, 在接近局部极小点时, 由于其一阶导数趋近于零, 导致了训练时间长, 收敛速度慢的缺陷, 为此, 书中提出了一种新的学习算法——采用变步长、加 因子

与共轭梯度算法相结合的联合学习算法 (ULA), 用于矿坑涌水量的预测表明, 该算法具有收敛速度快、误差小的优点。

(6) 神经网络理论为地下水的研究提供了一条崭新而有效的途径, 但是, 应该看到神经网络在地下水科学中的应用研究才刚刚起步, 就目前情况看, 这些研究是初步的, 还存在不少问题。一般来讲, 地下水研究中应用 B - P 网络, 输入层、输出层的节点数常可依据实际情况加以确定, 而有关隐层节点的数目尚无公认的理论。B - P 网络训练时存在速度慢的缺陷, 其推广能力与样本特性 (样本系列的长度、代表性、正态性、平稳性)、网络结构、节点作用函数、学习算法、数据归一方式等因素有关, 所有这些问题尚需进一步的探讨。

(7) 矿坑底板突水具有突发性, 是一种不连续现象。以突变理论为基础, 将底板简化为梁的变形, 应用材料力学、弹性力学建立了一种新的底板突水模型——底板突水的尖点突变模型 CCM (Cusp Catastrophic Model), 就作者掌握的现有资料来看, 将突变理论用于矿坑底板突水方面的研究尚属首次。文中导出了系统失稳时, 受力的临界值及失稳时底板变形量和能量释放的表达式, 为定量研究底板突水问题, 奠定了坚实的理论基础。

底板的稳定性与底板的力学性质和作用力有关, 作用力的渐变可导致状态的突变, 水平力、垂直力在控制空间的运动途径, 对于决定底板是动态平衡, 还是失稳有重要意义。以往突水公式讨论底板受力是以垂直应力为主体的, 忽略了水平应力的作用。而随着煤矿开采深度的增加, 如河北的峰峰矿区开采深度在 200 ~300m, 开滦矿区达 800 ~900m, 水平应力往往不容忽视, 特别是褶皱 (向斜、背斜)、逆断层、倾斜岩层等, 由于水平力起很大的作用, 故用以往的公式预测时, 准确率较低。本书推出的公式, 既考虑到垂直力的触发作用, 同时也考虑水平力的联合作用, 因而更加符合实际情况。

(8) 随着矿产开发的进行, 矿产开发引起的环境问题日益突出。最后本书论述了矿山环境污染治理的现状与趋势, 矿山开发过程中的主要环境地质问题, 我国矿山土地复垦研究现状与发展趋势以及矿山环境质量评价与地质生态环境保护等。

### 参考文献

- 李金凯等. 1990. 矿井岩溶水防治. 北京: 煤炭工业出版社
- 刘启仁等. 1995. 中国固体矿床的水文地质特征与勘探评价方法. 北京: 石油工业出版社
- 彭苏萍, 王金安. 2001. 承压水体上安全采煤. 北京: 煤炭工业出版社
- 邵爱军, 刘唐生, 邵太升等. 2001. 煤矿地下水与底板突水. 北京: 地震出版社
- 王煦曾, 朱榔如, 王杰. 1992. 中国煤田的形成与分布. 北京: 科学出版社
- 王永红, 沈文. 1996. 中国煤矿水害预防及治理. 北京: 煤炭工业出版社
- 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
- 中国环境与发展国际合作委员会. 1997. 中国自然资源定价研究. 北京: 中国环境科学出版社
- 中国煤矿防治水技术经验汇编编委会. 1998. 中国煤矿防治水技术经验汇编. 北京: 煤炭工业出版社

# 第一章 裂隙岩体渗透张量理论 及应用研究

对裂隙介质和裂隙水运动的系统研究，国外也仅开始于20世纪40年代。由于裂隙岩层是世界上许多油田的主要油、气储集层，因而该项研究首先由石油地质学家开创和发展起来，并在矿山坑道、水库、隧洞等工程的地质评价中得到进一步发展和补充。所以早期有关裂隙介质和裂隙水的研究成果，多出现在石油地质、工程地质和岩石力学等学科的文献中。

从20世纪60年代中期开始，进入到主要在定量和微观基础上研究裂隙岩层和裂隙介质的阶段，裂隙水的渗流理论得到了迅速发展，各国学者分别建立了裂隙水流的数学模型。室内对裂隙水力学性质的模拟，也取得了很大进展。但是相比之下有关裂隙渗流的物理模拟，现场测量、试验的理论和技术研究方面，进展较慢。60年代中期美国学者斯诺(D. T. Snow)、前苏联学者罗姆(E. C. Pomm)、法国学者路易斯(C. Louis)等为评价裂隙岩石的渗透性，都先后应用张量方法提出了描述各向异性裂隙介质渗透性的数学模型。

70年代加拿大学者帕森斯(M. L. Parsons)首次应用张量法确定爱德华太子岛区域裂隙的渗透性，并试图解决该岛地下水资源的评价问题。

应该指出，尽管不少国外学者的主张对基岩水文地质学的基础理论和应用技术的发展起了促进作用，但大多数研究成果和模型是由力学家和数学家提出的，有些过于理想化，和实际地质体相差甚远；有些又过于复杂，其中有些参数在野外难以获得，应用于实际解决具体的基岩水文地质问题仍有许多困难。

我国学者田开铭教授、万力教授等人，自80年代开始，进行了大量的野外裂隙统计工作及室内外试验研究，发现了各向异性裂隙介质渗透性随埋深的变化规律，以及大裂隙系统与微裂隙系统在同一地质剖面上渗透张量随埋深变化的相似原理。在测定岩石渗透张量的现场试验技术和方法上，取得了下列成果：在斯诺(D. T. Snow)和罗克哈(M. Rocha)工作的基础上，提出了利用单柱塞常规压水试验资料计算岩石渗透张量的方法，并修改了罗克哈的校正系数计算公式；依据路易斯(C. Louis)三段压水试验的基本原理，与合作单位共同研制了三段压水试验器，并给出了试验和计算方法；应用谢(P. A. Hsieh)的交叉孔压水试验方法，并根据地质条件简化了他的公式，提出了考虑压水段和观测段长度的渗透张量计算方法和公式；在裂隙含水层中进行了以求各向异性渗透张量为目的的抽水试验，并在理论上用单纯形法求解非稳定不完整井各向异性越流承压含水层中的井流公式，取得了良好的效果。这方面的代表性专著有《各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价》(田开铭、万力著，1989)。在理论研究方面，通过模型试验，提出了“裂隙水偏流理论”。在隙宽不等的交叉裂隙中，宽缝进水量 $q_w$ 与其泄水量 $q_w + q$ 不等；窄缝进水量 $q$ 与其泄水量 $q_w - q$ 不等，裂隙水交叉流过隙宽不等

的裂隙交叉部分时，水流向宽缝偏流为  $q$ ，这种现象称为裂隙水偏流。偏流理论为可溶岩的差异性溶蚀作用奠定了理论基础，揭示了岩溶分异发育和分布的水动力条件是裂隙水的偏流，偏流理论是唯一能阐明巨大形态的岩溶与未被溶蚀的隙缝系统在碳酸盐岩类地层中为什么同时并存的科学原理。这方面的代表性专著为《裂隙水偏流》（田开铭、陈明佑、王海林，1989）。

## 第一节 裂隙几何参数的确定及其统计分析

### 一、基本概念

自然界中，裂隙（节理、断层等）常常沿一定方向延伸，具有一定的方向性，曲率很小，成群展布，裂隙的宽度远远小于自身的延伸长度。通常用裂隙的方位、隙宽、密度等参数来描述裂隙的几何特征，称为裂隙的几何参数。

（1）方位（orientation）：是描述裂隙在三维空间中方向性的几何要素，裂隙的方位是以裂隙面的产状要素（ $\alpha$  为倾向方位角， $\beta$  为倾角）来表示的，所以也称为裂隙面产状。在实际应用中，通常将裂隙面的产状转化为裂隙面法向矢量的方向余弦  $n = (n_x, n_y, n_z)$  来表示。

（2）张开度（aperture）或裂隙宽度（简称隙宽）：隙宽指两裂隙面之间的垂直距离，用  $b$  表示。

（3）密度（density）：定义为沿主隙面法线方向上单位长度裂隙条数（条/m），用  $d$  或  $\rho$  表示。实际应用中常用到间距（spacing）的概念，它是指在同一组裂隙中相邻两条裂隙之间的距离（m），用  $s$  表示。间距与密度在数值上互为倒数（ $s = 1/d$ ）。

（4）粗糙度（roughness），简称糙率：它是指裂隙面相对于裂隙面平均平面的凹凸不平程度。裂隙面的粗糙度大致可分为两类，一类称为微观粗糙度（micro-roughness）；另一类为肉眼可以观察到的宏观粗糙度（macro-roughness）。在研究裂隙面的粗糙度对水流的影响时，常用到绝对粗糙度（absolute roughness）和相对粗糙度（relative roughness），绝对粗糙度指裂隙面的凹凸程度，常用  $e$  表示，相对粗糙度由  $e$  除以水力直径  $D$ （等于两倍张开度）而得到。

（5）迹线长度（trace length）：简称迹长，裂隙面与岩石露头面的交线称为迹线，其长度称为迹长，用  $l$  表示。因此，用迹线长度可以表征裂隙的规模。迹长的一半称为半迹长。

### 二、裂隙几何参数的确定及其统计分析

渗透张量的计算是在裂隙分组的基础上进行的，所涉及的参数也都为分组后的参数，主要参数有裂隙面产状、隙宽、密度等。