

底板突水的非线性特征及预测

王连国 宋扬 著

煤炭工业出版社

21
53

底板突水的非线性特征及预测

王连国 宋 扬 著

煤 炭 工 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

底板突水的非线性特征及预测/王连国, 宋扬著.
北京: 煤炭工业出版社, 2001
ISBN 7-5020-2043-8

I. 底… I. ①王…②宋… III. 矿山突水—研究
N. TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 053189 号

底板突水的非线性特征及预测

王连国 宋 扬 著

责任编辑: 王铁根 史 彦

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100025)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $7\frac{1}{8}$

字数 152 千字 印数 1—1,000

2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

社内编号 4814 定价 15.00 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

本书基于大量的实测信息,对底板岩层变形破坏过程中岩移、注水量观测时序进行了关联维及 Lyapunov 指数的提取,并对其运动性态进行了分析;详细讨论了底板岩层破裂过程的自组织临界特性;由力学模型得到的突水临界条件出发,导出了底板突水的势函数,并对其突变学特征进行了分析,在此基础上应用数学方法,建立了底板岩层水压应力比的尖点突变模型;为了弥补 BP 网络自身的缺陷,采用遗传算法训练 BP 网络,建立了底板突水量预测的组合人工神经网络模型。

本书可供矿井安全、采矿工程、工程地质、岩土工程、岩石力学等专业的研究人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生使用。

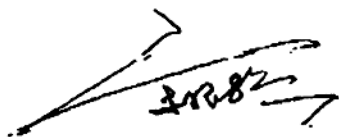
序

底板突水是我国煤矿的重大灾害之一，煤炭科技工作者在大量突水灾害和控制实践基础上，针对这一课题，进行了持久、深入的研究，并取得了一定成效。但由于底板突水受到含水层富水性、隔水层厚度、构造断裂、水压及矿压等诸多因素的影响，且各因素之间存在着复杂的关系，目前的理论与方法还不够成熟，很难普遍解决底板突水问题。大量的实践表明，研究底板破坏及突水机理，实现底板突水的有效预测预报，是解决底板突水问题的关键，因而一直是我国矿业界、地质界十分关注的问题。本书作者抓住底板突水的非线性本质，创造性地将非线性科学理论与底板突水研究相结合，着重从理论上研究了底板破坏及突水机理，对底板突水前的裂隙发展和损伤过程进行了详细的混沌数学及自组织临界分析，特别是运用突变和人工神经网络等理论，建立了突水突变和组合人工神经网络预测模型，对底板突水预测和突水防治途径，从理论上给出了科学的解释，这对把我国底板突水防治的研究，从主要依靠人工决策推进到由计算机进行定量决策阶段具有重要作用。书中取得了多方面的创新性成果，这是一项开拓性的工作，因此读后深

感欣慰。

本书是国内有关非线性科学在矿井水害防治中应用方面的第一部专著，它必将为矿井水害防治领域增添新的芬芳，相信本书的出版会对矿井水害防治及相关学科的发展起到积极的推动作用。

中国科学院院士、教授

A stylized handwritten signature in black ink, appearing to read '王荣' (Wang Rong), with a long horizontal stroke extending to the right.

2001年4月26日

前 言

底板突水是在采动矿压和承压水的共同作用下底板岩层变形破坏,导致承压水大量涌入采掘空间的现象,严重影响着煤矿生产和建设的发展。我国华北煤田位于复杂的岩溶水文地质类型区,由于受煤系底部灰岩强岩溶含水层的威胁,突水事故频繁发生且突水量大。随着矿井向深部延伸,华北地区开采煤层所承受的岩溶含水层水压将越来越大,受底板突水的威胁也将更加严重。因此,对煤层底板突水机理及预防技术的研究是保证我国煤矿安全生产的重大课题。

由于底板突水演化过程的复杂性,描述底板突水演化过程的数学物理方程一般是高度非线性的,因而底板突水是一个非线性开放系统,故采用非线性科学的理论与方法对底板突水问题进行研究是符合其本质特征的。本书作者就是在国家自然科学基金(项目批准号 59774001)资助下,针对在采动矿压和承压水作用下,从底板岩层变形→裂隙扩展→形成导水通道→引发底板突水这一过程,对底板突水的非线性动力学特征进行了较全面系统的研究,在此基础上提出底板突水预测预报的新方法。本书就是该研究工作的总结。

在本书的完成过程中得到了山东科技大学高延法教授、俞书伟教授、姜福兴教授、谭云亮教授、吕爱钟教授及中国矿业大学缪协兴教授的大力支持和帮助，在此一并致谢。由于作者水平所限，书中缺点和不足之处在所难免，恳请各位专家、学者和读者指正。

作 者

2001 年 4 月

目 录

1 概 述	1
1.1 我国底板突水问题研究现状	1
1.2 非线性动力学发展综述	4
1.3 本书特色	6
2 底板岩层变形破坏过程中混沌动力学特征	10
2.1 概 述	10
2.2 混沌理论基础	11
2.3 重建相空间	40
2.4 底板岩层变形破坏过程中混沌吸引子分维特征	42
2.5 底板岩层变形破坏过程中混沌性态的 Lyapunov 指数描述	54
2.6 本章小结	64
3 底板突水自组织临界特性	66
3.1 概 述	66
3.2 重整化群方法	68
3.3 底板破坏型突水岩层破裂过程的自组织临界特性	72
3.4 断层采动型突水断层破裂过程的自组织临界特性	80
3.5 本章小结	85

4 底板突水的突变机理	86
4.1 概 述	86
4.2 突变理论的数学基础与几种基本的突变类型	87
4.3 底板突水的突变特征	126
4.4 涨落对底板突水的诱导作用	137
4.5 应用数学方法建立底板突水突变模型	143
4.6 实例分析	151
4.7 本章小结	157
5 底板突水量组合人工神经网络预测	159
5.1 概 述	159
5.2 人工神经网络	161
5.3 遗传算法	185
5.4 底板突水量预测的组合人工神经网络模型	196
5.5 本章小结	206
参考文献	207

1 概 述

1.1 我国底板突水问题研究现状

我国是煤炭大国，煤炭一直是我国的主要能源，由于埋藏深度和煤层赋存条件的限制，开采煤炭资源主要以井工开采为主。对于受水体威胁的煤层而言，井工开采带来的最大安全问题就是矿井突水事故的发生。我国许多煤田的水文地质条件十分复杂，在煤层开采过程中受到多种水体的威胁，但影响范围最广的主要是灰岩强岩溶含水层对上覆煤层开采的威胁，几乎所有大的突水及淹井事故都是由这类水害引起的。目前，全国煤矿遭受水害威胁的储量高达 250 亿 t，主要分布在约占全国产量 50% 的华北地区石炭二叠纪煤田。该煤田位于复杂的岩溶水文地质类型区，主要受煤系底部灰岩强岩溶含水层的威胁，突水事故频繁发生且突水量大。据不完全统计，自 1956 年到 1994 年内，我国北方开采山西组与太原组煤层时，来自煤层夹层灰岩和基底中奥陶统灰岩岩溶水的底板突水 1300 余次，其中淹井 200 余次，造成的经济损失几十亿元，造成人员伤亡达几千人。例如：河北开滦范各庄矿^[85]于 1984 年 6 月 2 日发生了称之为“举世罕见”的特大突水灾害，仅 20 小时 55 分就淹没了整个矿井，而后涌水又冲破井田边界煤柱溃入相邻的一个矿井，使之被淹，进而涌水渗入另一个矿井，迫使该矿井停产；同时还威胁其他两矿的安全，

使之处于半停产状态，造成直接经济损失达 5 亿元以上。针对华北型煤田的煤层底板突水问题，我国学者经过艰苦不懈的努力，在煤层底板突水的机理及突水预测方面的研究取得了可喜的进展。我国对突水规律方面的研究始于 60 年代，当时统计了峰峰、焦作、淄博和井陘四个矿区与突水密切相关的水压和底板隔水层厚度资料，并将其比值，即突水系数作为预测突水与否的标准，这是我国广大第一线生产技术、科学研究工作者，从长期大量的突水实际资料统计分析中得出的一个规律性的认识。70 年代中后期，人们发现利用突水系数进行突水预测结果不准确，究其原因，由于突水系数中未考虑一个根本性的问题——矿压对底板的破坏深度，为此经西安分院水文所考虑了矿压破坏因素，又提出了修正的突水系数公式。山东矿院、峰峰矿务局、井陘矿务局的科研人员于 80 年代初期提出了“下三带”观点，后由山东矿院荆自刚、李白英、孙振鹏、高航、高延法等人，深入隔水层内部经过几年综合观测并结合相似材料模拟有限元分析等研究工作后上升为理论的高度，即“下三带”理论^[86~87]。该理论将煤层底板分为底板破坏带、完整岩层带、承压水导高带。“下三带”理论比较符合煤层采动条件下底板破坏突水的规律，在生产实践中得到了较为广泛的应用。北京煤科院张金才、刘天泉详细分析了底板采动裂隙带的深度及分布形态，并得出了导水裂隙带深度的计算公式^[88]，在此基础上采用板的弹塑性理论得出了底板突水的综合判据^{[89][90]}。高延法、李白英采用断裂力学方法分析了采动裂隙带的深度及破坏机制^[91]；另外，高延法等人还对突水优势面、突水类型划分、水压在突水中的力学作用^[92]等方面进行了研究。煤炭科学总院西安分院李抗抗等采用岩体的原位测试技术对煤层底板突水机理进

行了研究，并从力学角度给出煤层底板突水判据的表达式^[93]。中国矿业大学钱鸣高、缪协兴等将破断前的老底视作板结构，破断后的块体视作“砌体梁”结构对采场底板岩层破断规律进行了研究，认为底板中含水层以上承载能力最高的一层岩层是控制突水的关键层，一旦关键层破裂，就会引发突水，并将关键层看成薄板，在力学手段上采用薄板模型建立了关键层理论^{[94][135]}。北京煤科院王作宇、刘鸿泉从矿山压力及承压水压力角度，解释了煤层开采过程中的底板破坏过程，提出了原位张裂与零位破坏理论^[95]。陈秦生、蔡元龙^[127]用模式识别方法预测底板突水取得了一定的成效。李金凯、王延福对华北型的岩溶煤矿提出一种底板突水量的预测方法。张玉卓、朱泽虎及黎良杰等对底板突水机理也做了一些研究工作。郭维嘉、施龙青、肖洪天、李家祥、连传杰、娄华君、张文泉等从不同角度，并注意结合现代力学与计算机应用，对底板突水机理及预测方法研究做了一些工作。另外，许多现场工作人员如张希平、卜昌森、杨善安、于树春等在突水机理研究方面也做了一定的工作。总之，这些研究成果，对减少煤层底板突水事故的发生，改善我国煤矿安全状况起到了重要的作用。

近几年来，随着矿井向深部延伸，华北地区开采煤层所承受的岩溶含水层水压将越来越大，受底板突水的威胁也将更加严重。因此，对煤层底板突水机理及有效预测进行研究，仍旧是我国煤矿生产安全所面临的十分迫切的问题。

目前，在对煤层底板突水机理及预测研究上，主要是给定简化条件，建立相应的力学模型。然而岩石是一种十分复杂的地球介质，其复杂性、模糊性和不确定性，使得传统的力学方法难以很好的应用，因此造成其计算结果准确度低，工

程应用“信誉不高”^[96]。非线性是岩石体力学行为的本质特征，煤层底板岩体系统是高度非线性复杂大系统，并处于动态不可逆演化之中。因此，对底板突水机理和预测的研究，必须借助当代非线性科学，充分研究底板突水的非线性动力学特征，即从非线性角度探讨底板突水的机理、寻求底板突水预测的新方法。

1.2 非线性动力学发展综述

20 世纪 70 年代前后，关于系统的演化问题及过程的非线性引起了人们极大的关注，出现了以耗散结构、协同、突变、混沌、重整化群、分形和神经网络为核心的非线性科学理论。如果说一般系统科学研究的是系统的物理状态构成，要素之间的作用与联系，那么非线性科学理论研究的就是系统的性质及其演化，如何从一种状态达到另一种新的状态，从纷繁复杂的现象中，揭示出事物发展的规律性。近 20 年来，非线性科学理论取得了令人瞩目的成就，有人称之为在本世纪内继量子力学、相对论两项重大科学发展的第三次科学革命。

20 世纪 60 年代以前，对于复杂的非平衡系统，在物理学界常常认为是不可捉摸、杂乱无章的。然而 1969 年 Prigogine 首先提出了耗散结构的概念，并逐渐发展形成的耗散结构理论^{[1][2]}，使得对非平衡系统的认识，取得了重大突破。接着 Haken 的协同学^{[3][4]}问世，它克服了耗散结构理论的局限性，从物理系统出发，研究了系统如何在子系统的协同下，由无序走向有序的过程。1972 年 Thom 提出了研究连续发展过程中出现的突变现象以及它与连续变化因素之间关系的突变理

论^[5]。1963年美国气象学家 Lorenz^[6]在分析天气预报模型时,得出气象不可预测的结论,第一次发现了混沌,但直到1975年李天岩和 York 才提出了描述确定性系统表现出“初值敏感性”的随机行为(或无规则运动)的混沌理论^[136],从而提供了把复杂行为理解为有目的某种行为的方法,而不是理解为外来的偶然行为。1974年 Wilson^[20]提出了处理各种相变和临界点问题的重整化群方法。1982年 Mandbrot 提出了分形几何理论^[7],它通过自相似性为我们描述复杂性又提供了一种方法。人工神经网络^[8](ANN)创立于80年代中期,它试图模拟人脑的一些基本特性,如自适应、自组织、容错性等,已在模式识别、数据处理、自动控制等领域得到广泛应用。

应该指出的是关于混沌现象的研究,由于 Feigenbaum 得到对单峰映射的出色结果,而在80年代掀起了一个高潮。对于低维离散动力系统,我们可以较容易地通过映象函数的分类,将各种动力系统分作一些行为相似的类,而单峰映象就是其中最重要的类之一。Feigenbaum 利用尺度变换和重整化群的方法,发现了单峰映象中通过倍周期分岔进入混沌的一系列普适律^[9]。随后人们通过这个映象进一步研究,又发现了通过“阵发”现象进入混沌^[10],通过危机进入混沌^[11]等一系列现象及普适律。在对于混沌的度量方面也取得了重大进展,Packara^[12]1980年提出用时间序列重新构造吸引子的相空间图像的方法。Takens^[13]1981年提出了嵌入定理,表明只要相空间的维数足够大,就可以刻划 D_0 维的混沌吸引子。1984年,Grassberger 和 Procaccia^[14]提出从时间序列中提取关联维数的方法。1987年 J. D. Farmer^[15]研究了如何预测混沌时间序列问题。在我国,郝柏林院士^[16]等率先对分岔混沌、

奇怪吸引子之间的关系等进行系统研究。郑伟谋、郝柏林^[17]等创立了实用符号动力学方法来研究混沌性态，刘式达等^[18]对大气湍流发生的问题进行了探讨。杨维明^[19]利用偶合映象格子模型对时空混沌进行了研究。

非线性科学作为一门旨在应用的科学，近年来在气象^[21~27]、地震^[28~43]、生物^[44~47]、岩土力学^[48~67]、工程地质^[68~84]等领域得到了广泛的应用，取得了丰硕的成果。

1.3 本书特色

1.3.1 目前的研究方法

如前所述，目前煤层底板突水机理及预测的研究方法与突水形成过程（图 1-1）如下：

（1）承压水上煤层开采后，由于矿山压力作用，底板岩层发生变形、破坏而形成导水裂隙。对矿山压力作用下底板岩层的变形破坏特征，目前主要采用弹塑性力学方法进行研究。

（2）在矿压及水压的作用下底板岩层中的裂隙扩展并贯通，形成导水通道时，就会发生底板突水。对底板岩层裂隙扩展的条件及判断依据，目前主要采用断裂力学方法进行研究。

（3）承压水上煤层开采将受到底板突水的威胁，因此对煤层底板突水可能性的预测预报是承压水上安全开采的关键。目前对于底板突水可能性的预测，主要是采用薄板理论进行研究。

（4）若煤层开采存在突水危险，会发生底板突水，那么

预测其底板突水量将对有效采取防范措施有重要意义。对煤层底板突水量预测，目前主要采用数理统计与模糊数学方法进行研究。

1.3.2 本书的特色

针对以上过程，本书的特色（图 1-1）在于：

（1）首先基于大量的实测信息，对底板岩层变形破坏过程中岩移、注水量（渗透性）等矿压显现的观测时序进行关联维及 Lyapunov 指数的提取，若关联维存在，说明所研究的系统具有混沌性，且关联维愈大说明系统愈复杂，因此可以用关联维来描述底板岩层变形破坏的状态及其发展程度。同样，亦可用 Lyapunov 指数对此予以描述。

（2）研究表明，由于从底板岩层裂隙扩展到贯通形成导水通道，发生底板突水，处处都存在自组织过程。本文将利用重整化群方法对底板岩层破裂过程的自组织临界特性进行研究，即通过研究底板岩层单元体的破坏率的变化来判断单元体破裂的随机性和关联性，从而可以描述底板导水裂隙的扩展情况。

（3）底板破坏发生突水，是一种突变现象，属突变理论研究的范畴。故本文拟首先采用拓扑学的方法建立底板突水的势函数，分析、证实底板突水具有尖点突变特征。在此基础上，建立底板岩层水压应力比的尖点突变模型，以此研究底板突水可能性的预测问题。

（4）为了弥补一般统计方法预测底板突水量的缺陷，本文采用优越的遗传算法训练人工神经网络，建立底板突水量预测的组合人工神经网络模型，解决突水量的有效预测问题。为了保证预测模型的实用性，本文综合考虑水源、水压、隔