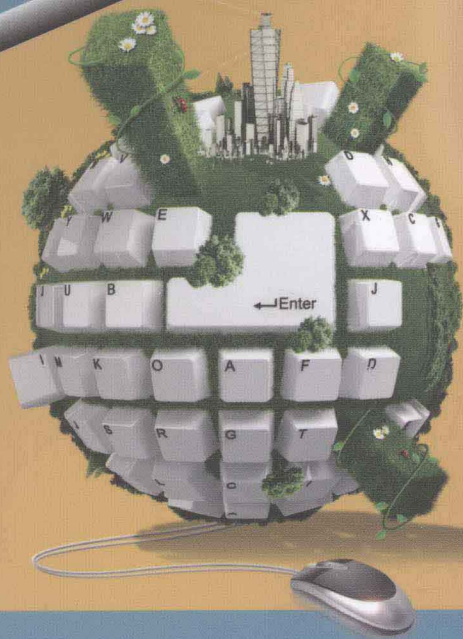


<http://www>



矿山瓦斯灾害神经元 网络理论与方法

戴洪磊 陈兰森 徐泮林 刘文宝 著

地震出版社

山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助
国家自然科学基金资助项目（编号 40671149）

矿山瓦斯灾害神经网络理论与方法

戴洪磊 陈兰森 徐泮林 刘文宝 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山瓦斯灾害神经网络理论与方法/戴洪磊等著. —北京:地震出版社. 2011. 10

ISBN 978-7-5028-3521-7

I. ①矿… II. ①戴… III. ①人工神经网络—应用—煤矿—瓦斯监测 IV. TD712-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 163478 号

地震版 XM2295

内 容 摘 要

本书首先介绍了世界各国矿山瓦斯灾害的发生现状,综述了当前国内外对瓦斯灾害机理成因研究和预测预报工作的相关研究进展。其次论述了当前数据挖掘和空间数据挖掘的概念、挖掘的知识类型和挖掘的技术方法等,尤其讨论了神经网络技术的特点、独特性及其预测预报功能。然后,详细探讨了人工神经网络技术在矿山瓦斯灾害预测预报工作中的应用问题。最后,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、神经网络研究、矿山瓦斯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。

矿山瓦斯灾害神经网络理论与方法

戴洪磊 陈兰森 徐泮林 刘文宝 著

责任编辑:王 伟

责任校对:庞亚萍

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部:68423031 68467993

邮编:100081

门市部:68467991

传真:68467991

总编室:68462709 68423029

传真:68455221

专业图书事业部:68721991 68467982

E-mail: 68721991@sina.com

网址: <http://www.dzpress.com.cn>

经销:全国各地新华书店

印刷:北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次:2011年10月第一版 2011年10月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:187千字

印张:7.5

印数:0001~1000

书号:ISBN 978-7-5028-3521-7/TD (4570)

定价:30.00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

“数字地球”的概念促进了空间数据挖掘学科的出现和迅速发展。作为空间信息应用技术，空间数据挖掘已被广泛应用于社会、经济、环境和工程等多个领域的建模和辅助决策中，例如金融、市场营销、远程通讯、交通管理、质量监督等。作为空间信息应用学科，空间数据挖掘的领域越来越广，本书探讨空间数据挖掘在矿山瓦斯灾害预测预报中的应用问题。

本书共分6章。第1章介绍了当前全世界矿山瓦斯灾害的发生现状和国内外研究进展。第2章介绍了数据挖掘和空间数据挖掘的概念、挖掘对象、挖掘的知识类型、挖掘方法、挖掘流程和数据挖掘的应用领域。第3章探讨了人工神经网络的概念、特点、类型、学习规则、应用领域、BP算法及其优缺点等基础知识。第4章首先讨论了瓦斯各影响因素及其参数计算方法，建立了矿山GIS瓦斯灾害空间数据库，并基于ArcGIS9.2开发了空间数据库瓦斯数据的查询模块。第5章详细介绍了本书建立的几种矿山瓦斯灾害神经网络预测模型，并比较模型的应用有效性。最后，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。

本书系国家自然科学基金资助项目“矿山灾害空间数据挖掘的神经元理论与方法”（编号40671149）的主要研究成果。

本书可供从事地理信息系统、空间数据挖掘、神经网络研究、矿山瓦斯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

2011.05.01

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 煤瓦斯突出概况	(1)
1.2 瓦斯突出研究现状	(3)
1.3 瓦斯突出预测方法的研究概况	(5)
1.4 煤与瓦斯突出机理研究进展	(10)
1.5 我国煤矿瓦斯灾害研究概况	(14)
1.6 本章小节	(19)
第2章 数据挖掘基础	(20)
2.1 数据挖掘	(20)
2.2 空间数据挖掘	(32)
2.3 本章小节	(38)
第3章 神经网络基础知识简介	(39)
3.1 神经网络的概念与特点	(39)
3.2 神经网络的进展概况	(40)
3.3 神经网络技术的应用领域	(42)
3.4 神经网络的结构	(43)
3.5 神经网络在各领域预测中的应用研究	(48)
3.6 BP 算法	(50)
3.7 本章小节	(53)
第4章 矿山瓦斯空间数据库的建立	(54)
4.1 矿井瓦斯	(54)
4.2 瓦斯空间数据库	(68)
4.3 本章小节	(76)
第5章 BP 神经网络瓦斯灾害预测模型的建立及应用分析	(77)
5.1 BP 神经网络瓦斯灾害预测模型的建立	(77)
5.2 自适应 BP 神经网络瓦斯灾害预测模型的建立	(88)
5.3 弹性 BP 神经网络瓦斯灾害预测模型的建立	(94)
5.4 拟牛顿算法 BP 神经网络预测模型的建立	(99)
5.5 LM 算法 BP 神经网络预测模型的建立	(102)
5.6 本章小结	(106)
第6章 总结与展望	(107)
6.1 回顾总结	(107)
6.2 研究展望	(108)
参考文献	(109)

第1章 绪论

1.1 煤瓦斯突出概况

1.1.1 世界各国煤瓦斯突出概况

根据记录资料,自1834年法国鲁阿雷煤田阿克矿井发生第一次煤瓦斯突出以来,先后发生突出灾害的国家有:苏联、中国、法国、波兰、日本、英国、印度、美国等19个国家和地区,据不完全统计发生的总数已达4万次左右,最大的突出发生在1969年苏联的顿巴斯煤矿,突出煤(岩)量达1.42万吨,瓦斯涌出量达25万吨,造成众多人员伤亡,资产损失严重。

1. 美国:法律强化,日趋完善

美国是世界第二大煤炭生产国,也是煤炭净出口国。美国能源信息署公布的数据显示,2009年美国全年产煤量为9.73亿吨,国内煤炭库存量达到了2.166亿吨的历史高位。

作为世界主要产煤大国之一,美国煤矿业也曾经历过安全事故频发的阶段。19世纪后期到20世纪初期,由于生产技术和管埋都比较落后,美国煤矿处于安全事故多发期。1907年,美国煤矿事故死亡人数达3242人,创下历史最高纪录,其中西弗吉尼亚州一个煤矿发生瓦斯爆炸事故造成362人死亡。所以在1907年,美国总统罗斯福就提议成立美国矿业局(USBM),在1907~1909年3年期间,美国连续发生4起重大矿难,死亡人数超过1000人,在内政部下成立了美国矿业局。主要职责是提供煤矿生产爆破物安全标准、研发防止煤矿内瓦斯爆炸和粉尘爆炸的技术,以及矿难发生后的事故救援和矿工逃生手段等。1917年美国矿业局在奥克兰的匹兹堡成立了中心实验站,开始对各种矿井内的突发状况进行模拟,以期找到解决办法。1968年西弗吉尼亚州矿难,78人死亡直接导致国会在第二年通过《1969联邦煤矿健康与安全法》,又称《煤炭法案》,成立直属劳工部美国矿山安全和健康管理局。1970年,260名矿工遇难。1977年,议会通过《联邦矿业安全与健康修订案》,美国的第一部综合性矿业生产法律从此诞生。2006年,又是西弗吉尼亚萨戈矿难,12人遇难,之后颁布了《矿工法案》。2010年4月12日,西弗吉尼亚州矿难过后不久,矿山安全和健康管理局就连续颁布了《高压连续采矿机械最终法规》和《煤矿粉尘采样设备最终法规》。

在一系列管埋和技术推动下,美国煤矿生产日益安全,美国矿山安全和健康管理局(MSHA)公布,美国2009年煤矿事故遇难工人数降至历史新低的18人,百万吨死亡率为0.018。

2. 印度:国有矿多,法规健全

印度是世界第三大产煤国。印度的煤炭产量从20世纪70年代初的7000万吨增加到了2007年的4.78亿吨、2008年的4.9亿吨。煤炭是印度的主要能源,超过了该国能源总需求的一半。1973年煤矿实行国有化后,印度煤炭产量迅速增长,1975年煤炭产量突破亿吨大关,安全状况也大为好转。1981年煤矿事故死亡184人,百万吨死亡率降至1.45。值得注意的是,继1994年煤矿事故死亡241人以后,印度煤矿事故死亡人数逐年下降,2001~

2003 年千人死亡率平均为 0.27。2007 年印度煤矿事故死亡 69 人。主要是因为现在印度生产的煤炭主要来自露天煤矿, 露天煤矿占到了总产量的 81%。大部分煤炭资源的地质构造比较简单, 现采的煤层多为厚煤层, 且赋存较浅, 适宜露天开采, 如贾里亚矿区的露天矿开采深度一般在 60~160m, 矿山灾害事故较低。

3. 澳大利亚: 惩戒严厉, 安全先行

澳大利亚是世界第四产煤大国, 最大的煤炭出口国, 同时澳大利亚在煤矿安全管理方面处于领先地位。据统计, 澳大利亚全国矿山从业人员多达 10 万, 但事故率却很低。2000~2001 年间, 产煤大州新南威尔士州煤矿每百万吨死亡率为 0.014 左右。资料显示, 澳大利亚曾频发严重矿业事故, 从 1875 年到 2002 年, 澳大利亚共发生了 2000 多起严重的矿山生产事故, 伤亡人数过万。澳大利亚 1984 年颁布了《职业安全卫生法》, 1994 年联邦政府又参照该法制定了《矿井安全健康法》, 并每 5 年修订一次。在联邦政府颁布的法律基础上, 联邦各州也根据各自的实际情况制定相关法规。州政府在执行联邦法律的同时, 对本州内的矿业公司在政策、安全管理上有着绝对的发言权。例如新南威尔士州先后颁布了《煤矿管理法》《煤矿监督员资格管理条例》等法律法规。

4. 俄罗斯: 煤矿私有, 管理国有

俄罗斯是世界第五大煤炭生产国, 2008 年产量超过 2.47 亿吨, 约为中国产量的 1/11, 美国的 1/4, 印度的 1/2。俄罗斯煤炭工业正在经历私有化进程。1996~2001 年间, 俄罗斯一直同世界银行合作, 试图重组它的煤炭行业。2004 年以来, 俄罗斯大部分煤矿转型为私有, 煤矿国家垄断被打破。在私有化进程中, 各煤矿为追求利润, 盲目扩大煤炭开采量, 而不重视采矿设备和技术的更新, 也不加强对采矿人员的技术培训, 采矿中违章操作的情况较多, 煤矿安全出现巨大事故隐患。而相关的安全检查机构却放松了对采矿企业的安全监督, 导致煤矿频繁发生生产安全事故。为了提高煤矿的安全生产, 俄罗斯政府把大量资金投入 to 改善煤矿的工作条件、事故善后处理、开展相关科研和购置各种防灾救灾设备中来。

俄罗斯煤矿的瓦斯含量丰富, 俄现有矿井中 78% 左右为高瓦斯矿, 防治瓦斯爆炸是俄罗斯煤炭安全工作的重点。为了减少矿井中瓦斯的含量, 俄采用了全新的方法, 对没有常设性煤层消毒装置的煤矿, 则采用行政手段禁止其进行煤炭开采活动。从另一方面讲, 瓦斯是清洁能源, 俄政府不断采取措施, 刺激煤矿企业将瓦斯分离出来并加以回收利用, 还不断吸引外资投入到俄瓦斯开发中来。同时俄罗斯加强了对煤矿职工的安全培训。经过这些努力, 俄罗斯的煤矿安全生产状况明显转好。在 2009 年, 俄罗斯煤炭工业安全状况较好, 百万吨死亡率在 0.5 左右。

5. 南非: 对症下药, 获得新生

地处非洲大陆南端的南非煤炭资源丰富, 储量排世界第五位。在 20 世纪 50~80 年代, 南非煤矿事故还很频繁, 每年煤矿事故死亡人数都在千人以上。1974 年, 该国某煤矿发生瓦斯事故, 一次死亡 424 人之众。南非煤炭安全可谓病入膏肓。

1987 年南非当局在全世界范围内招标寻求技术解决方案, 同时将军事上的防爆技术应用到煤矿瓦斯防治上。此后, 南非在 1996 年通过了《矿山健康与安全法》, 并于 2002 年通过了《矿山与石油资源开发法》。在科研层面上, 建立了煤矿瓦斯治理实验室, 加大对瓦斯的研究和监控力度。国家制定各类煤矿井下爆炸和危险事件的模拟实验, 让相关人员现场感受到爆炸的威力, 并“近距离”接触死亡。经过“精心调养”南非煤矿事故得到有效控制,

死亡人数大幅下降,百万吨死亡率进入先进国家水平。特别是煤矿的瓦斯事故得到有效控制,安全水准已达到美国、澳大利亚、加拿大等发达矿业大国的程度。与过去每年煤矿事故死亡成百上千人相比,2005年南非煤矿事故死亡仅15人。如今南非底气十足地宣布,到2013年煤矿事故百万吨死亡率控制在0.003人以内,力争零伤害。

1.1.2 我国煤瓦斯灾害概况

中国是产煤大国,占全部能源中的70%以上,由于世界石油持续涨价,已经启动“煤炼油”的批量生产,预示今后将仍有扩大开采的趋势,同时我国也是世界上煤瓦斯突出最严重的国家之一。

随着科技水平的提高和企业管理的规范,我国煤矿安全生产状况从总体上讲,出现了不断好转的局面。在开展机械化生产、原煤产量不断提升的情况下,1949~2000年全国煤矿百万吨死亡率总体趋于稳步下降态势。1999年煤矿的百万吨死亡率为6.08,2000年为6.0,2001年为5.85,2002年为5.0。“九五”期间比“六五”期间煤矿百万吨死亡率下降32.19%,比建国初期下降52.94%。但是煤矿灾害事故仍然频繁发生,煤矿企业2000年发生伤亡事故2863起、死亡5798人;2001共发生死亡事故3082起、死亡5670人;2002年共发生死亡事故4344起,死亡6995人。从经济类型看:乡镇煤矿发生的事故占绝大多数,如2002年,在全年发生的321起一次死亡3~9人的重大事故中,乡镇煤矿259起,占80.69%;在全年发生的56起一次死亡10人以上特大事故中,乡镇煤矿40起,占71.43%;乡镇煤矿百万吨死亡率高达12.12,是国有重点煤矿的9.7倍,是国有地方煤矿的3.2倍。从事故的分类看:在2002年煤矿企业的4344起,死亡6995人死亡事故中,瓦斯灾害死亡事故325起,占煤矿死亡事故的7.48%,死亡1703人,占煤矿死亡事故的24.35%。从以上数据可以看出,瓦斯灾害事故是煤矿企业中危害最大、死亡比例最高的重大事故之一。

应该特别指出,建国50年来煤矿死亡率以乡镇煤矿最高,平均达10.35人/Mt,其次地方国有煤矿平均为6.17人/Mt,国有重点煤矿仅为2.13人/Mt。特别是近年来,村镇小矿违纪开采,基本处于失控状态,死亡人数剧增,甚至无法获得确切统计人数。近年来尽管国家关闭小矿政策执行不力,但也取得了明显下降效果,如2006年与2005年相比,死亡人数减少了20%左右。

1.2 瓦斯突出研究现状

各国对于瓦斯突出预测的研究,主要围绕地质因素、煤结构应力和瓦斯等方面开展实验室和现场的实验工作,进行区域性预测和日常预测,有些方法已在生产实际中使用并取得成效。近年来,由于计算机技术的发展,提高了计算的速度和精度,使煤与瓦斯的突出预测更加及时和准确。

1. 煤结构研究

由于地质构造的运动,使突出危险煤层的突出危险区煤体结构受到破坏,这是造成危险区物理力学性质和瓦斯动力特性发生很大变化的主要原因。因此,顿涅兹克工学院研究利用煤体的两个主要变形指标弹性模量 E 和剪切模量 G 来确定煤层突出危险性,研究者对180个煤层进行了采样,包括顿涅兹克、马凯耶夫、苏维埃和奥尔忠尼启泽等几个煤炭联合公司所属矿井65个突出危险煤层和115个无突出危险煤层。煤样纵向和横向弹性波传播速度测

定是在 K-1011 超声波检测装置上进行的, 并采用专用计算机程序进行数据处理, 用回归方法得出无突出危险煤层的变形指标与煤的变质程度的关系曲线, 此曲线称为上限分界线。如果煤层的弹性模量和剪切模量分布在此曲线的上方, 则说明此煤层有突出危险。

2. 钻粉法

这种方法是在煤层中打一组直径在 50 ~ 150mm 的钻孔, 在高应力区可能造成钻进困难, 并随着应力的释放, 产生不成比例的大量钻屑。根据钻孔产生的钻粉量和钻粉瓦斯解吸量来判断突出倾向。根据波兰的研究, 当钻粉瓦斯的解吸强度大于 1.18kPa, 钻粉量大于 4g/L 时, 认为有突出危险。联邦德国对本国突出危险煤层研究得出的钻粉量临界值如下: 140mm 直径钻孔为 90dm³/m, 95mm 直径钻孔为 50dm³/m, 50mm 直径钻孔为 6 ~ 8dm³/m。如果超过上述值, 说明该区域煤层应力处于危险状态, 将会发生突出危险。

3. 瓦斯泄出速度

煤层中瓦斯泄出速度是突出危险性的一个重要指标。在初步评价时通常使用 V_{30} 指数, 它是根据真空的解吸容器在开始解吸的前 60s 内的汞柱的升高值 (mm) 来确定的。当 ΔP_{0-60} 值超过 2kPa 时, 说明该区的煤层具有突出倾向。

4. 微震监测

在突出之前, 一般是煤层及其相邻的岩层出现应力重新分布, 煤和岩层中出现断裂, 岩层在断裂发展过程中产生微震。在微震波中, 有 P 波 (纵波) 和 S 波 (横波), 但主要能量在横波。煤层中声发射的频率极宽, 为 100Hz 至 1MHz, 但微震事件频率一般为 500 ~ 2000Hz, 利用传感器可以检测到微震波。

5. 煤层温度状况预测

研究者在很多煤矿中, 对采掘工作面近工作面地段的煤体温度状况进行了考察研究。回采工作面是在深达 6m 的钻孔中测温的, 掘进工作面是在 2.2m 深的钻孔中测温的。根据测温结果认为: 在回采工作面近工作面地段煤体温度梯度 $\Delta T_{2-0} \approx \Delta T_{3-1}$ (ΔT_{3-1} 为煤层钻 3m 处与 1m 处之间的温度梯度, ΔT_{2-0} 为煤体钻孔 2m 处与钻孔口处之间的温度梯度)。当 $\Delta T_{3-1} \leq 3^\circ\text{C}$ 时没有突出危险性, 在 $\Delta T_{2-0} < 2^\circ\text{C}$ 掘进面则无突出危险征兆, $\Delta T_{2-0} = 2 \sim 2.5^\circ\text{C}$ 有突出威胁征兆, $\Delta T_{2-0} = 2.5^\circ\text{C}$ 有突出危险征兆。在用该法试验期间共掘进 620m 巷道, 其中 230m 进行了突出危险性日常预测, 掘进中发生的 6 次突出全部作出了预报。在加里宁等矿的 7 次突出中都用该法及时作出了预报。一些研究者采用近工作面地带的温度与煤体原始温度之差作为突出预测指标, 认为在距煤壁 2.0 ~ 3.5m 的煤岩中温差 $\geq 4.5^\circ\text{C}$ 就有突出危险。

由于地震现象伴随有氡 (Rn) 和氦 (He) 的涌出变化, 所以人们常利用煤层中涌出的氦体积或氦浓度的变化预测突出, 目前氦的活动已普遍地作为地震来临的一个预兆。有些科学家还认为, 在地震之前不仅有氦的反常涌出现象, 而且有氡的反常涌出。研究者考察了顿涅茨煤田中两个不突出煤层和四个突出煤层的氦含量后指出, 自由释放的瓦斯中, 氦含量高, 瓦斯压力也相应地高。

另外国外在不断完善突出跟踪预测的基础上, 开展了研究瓦斯突出的动态预测技术和突出危险区域的预测技术。俄罗斯已建立了区域预测预报的专家系统, 将突出煤层划分为突出危险区 (占突出煤层面积的 20% ~ 30%) 和非突出危险区 (占突出煤层面积的 70% ~ 80%), 从而解决了一大片煤层, 降低了防突工作量。德国应用 V_{30} 等瓦斯涌出动态参数连续

预报突出,已有较成熟的经验,并纳入规程。俄罗斯、波兰、日本、德国、美国等产煤国将声发射技术应用于工作面突出预测,已达到实用化程度,正在向自动化方向发展。这些国家针对不同突出煤层研究了相应的配套防突措施及装备。利用声发射监测系统对采掘工艺进行随机控制,实现工作面作业的自我保护。波兰和法国已对煤层突出危险进行了分级,实现了科学管理。

1.3 瓦斯突出预测方法的研究概况

1.3.1 国内外研究进展

国内外开采突出煤层的实践都表明,突出事故发生在煤层的某些地带,人们称之为突出的区域性分布或带状分布,突出危险带的面积还达不到突出煤层总面积的10%,突出危险带之间往往相隔很远(有时甚至达到1000m),而突出危险带之间的地带,危险煤层往往是很平静的。无论是打直径250~300mm的超前钻孔,还是采煤和震动放炮,都见不到任何突出征兆。因此,近年来世界上主要产煤国家都加强了煤层突出危险性的研究,并特别注意发展和改进煤与瓦斯突出的预测预报方法,据现有的统计资料,关于煤与瓦斯的突出预测预报方法主要分为静态预测和动态预测两大类。

1. 静态(不连续)预测

静态预测的根据就是含瓦斯煤体性质及其赋存条件的某些量化指标。这些指标主要包括瓦斯指标、煤层性质指标、地应力指标或它们的综合指标,预测则是考察其中的单个或同时多个指标是否超过临界值。具体说来,目前较多采用的指标有钻屑量 S 、钻孔瓦斯涌出初速度 q 、瓦斯放散指数 ΔP 、煤体坚固性系数 f 、瓦斯压力 P 。

1) 单项指标法

在该法中预测的基础是含瓦斯煤体性质及其赋存条件的某些量化指标,包括瓦斯指标、煤层性质指标、地应力指标和综合指标,Paul、Noack和王佑安等学者研究了瓦斯含量指标,提出了不同的瓦斯突出临界值,于不凡和俞启香详细地讨论了瓦斯压力指标,但认为瓦斯压力不能单独用作突出预测指标。苏联科学院地质所于1958年提出了煤体结构指标并把煤分成五种破坏类型:认为四、五两类煤具有突出危险,在国内外受到广泛重视,中国矿业学院瓦斯组1979年把煤体结构划分为三种破坏类型,其丙类煤为突出危险煤,焦作矿业学院瓦斯地质研究室1991年根据煤的宏观特征以构造煤类型为基础,以突出的难易程度为依据把煤体结构分为四种类型,其中两类为突出危险煤,取得了较好的应用效果。采用煤的破坏类型、瓦斯放散初速度 ΔP 、煤的坚固性系数 f 和煤层瓦斯压力 P 作为预测指标,各种指标的突出危险临界值应根据实测资料来定,无实测资料可参考表1.1所列数据,只有全部指标达到或超过临界值时方可划为突出煤层,表1.1给出了这四个单项指标的具体划分标准。

表 1.1 单项指标标准

煤层突出危险	破坏类型	ΔP	f	P/MPa
突出煤层	3、4、5	≥ 10	0.5	≥ 0.6
非突出煤层	2、1	< 10	< 0.5	< 0.6

2) 瓦斯地质统计法

该方法主要用于突出煤层的区域预测,以划分突出危险区域和突出威胁区域。该方法的基本原理是依据瓦斯地质统计资料(包括突出带的突出情况统计、突出点与地质构造关系统计、突出点与煤层及煤层结构关系统计、突出点与开采深度关系统计以及突出点的地质特征统计等),瓦斯地质观测资料(包括煤层的瓦斯压力、瓦斯含量及其瓦斯涌出量等)和瓦斯地质图(包括瓦斯带分布图、瓦斯含量分布及预测图、瓦斯涌出量分布及预测图和瓦斯突出点分布及预测图),经过综合分析,具体给出该区域是突出危险区域还是突出威胁区域。

3) 综合指标 D 与 K 法

抚顺分院、北票矿务局与红卫矿提出用综合指标 D 与 K 来预测煤层的突出危险性,预测综合指标 K 和 D 已被列入我国的防突细则,得到了广泛的应用。

$$D = \left(0.0075 \frac{H}{f} - 3 \right) (P - 0.74) \quad (1.1)$$

式中, D 为综合指标之一; H 为煤层开采深度 (m); P 为煤层瓦斯压力 (MPa); f 为煤层软分层的平均坚固性系数,如打钻所取煤样的粒度达不到测试 f 值所要求的粒度标准 (10 ~ 15mm) 时,可取粒度为 1 ~ 3mm 粒度煤样进行 f 值测定。所得结果按下式进行换算:

当 $f_{1-3} \leq 0.25$ 时, $f = f_{1-3}$;

当 $f_{1-3} \geq 0.25$ 时, $f = 1.57$, $f_{1-3} = 0.14$ 。

f_{1-3} 用粒度为 1 ~ 3mm 煤样测出的煤坚固性系数值。

$$K = \Delta P / f \quad (1.2)$$

式中, K 为综合指标二; ΔP 为煤层软分层的瓦斯放散初速度指标。其临界值参照数值见表 1.2。

表 1.2 判断突出危险性的综合指标临界值

煤层突出危险性指标		危险性程度
D	K	
< 0.25		无突出危险性
≥ 0.25	< 15	无突出危险性
≥ 0.25	≥ 15	突出危险性

4) R 值综合指标法

采用这一方法预测工作面突出危险性时,要求在工作面打两个直径为 42mm、深 5.5 ~ 6.5mm 的钻孔。一个孔位于工作面中部,孔平行于掘进方向,另一钻孔的终孔点应位于巷道轮廓线外 1.5m 处。钻孔每打 1m,测定钻屑量和钻孔瓦斯涌出初速度。测定钻孔瓦斯涌出初速度时,测量室长度应为 1m。每米钻孔的打孔时间应保持约 2min。根据沿孔深测出的最大钻屑量和最大钻孔瓦斯涌出初速度,按下式确定突出危险性:

$$R = (S_{\max} - a)(Q_{\max} - b) \quad (1.3)$$

式中, R 为考虑煤屑量和钻孔瓦斯涌出初速度的综合指标; $S_{\max}$ 为每个钻孔长测出的最大钻

屑量； $Q_{\max}$ 为每个钻孔长测出的最大瓦斯涌出初速度； a 、 b 为经验常数。原煤炭部制定的《防灾细则》中，提出的 R 值临界指标为 6，可供参考。

5) 钻屑单项指标法

采用钻屑单项指标法进行工作面突出危险性预测时，作为钻屑单项指标，按《防突细则》有以下几种： $S_{\max}$ 、 Δh_2 、 C 和 K_1 值。各指标的突出危险临界值应根据实测数据确定。无实测数据时，可按表 1.3 的数据确定工作面的突出危险性。

表 1.3 用钻屑指标法预测工作面突出危险性的临界值

$\Delta h_2/\text{Pa}$	最大钻屑量		K_1	危险性程度
	kg/m	L/m	mL/(g·min)	
≥ 200	≥ 6	≥ 5.4	≤ 0.5	突出危险性工作面
< 200	< 6	< 5.4	> 0.5	无突出危险性工作面

6) 钻屑综合指标法

该法是通过综合考虑每钻孔最大钻屑量 $S_{\max}$ ，钻屑瓦斯解吸指数 K_1 ，钻屑瓦斯解吸衰减系数 C 和启动解吸仪 2min 时的解吸仪读数 Δh_2 ，来预测工作面的突出危险性。

7) 钻孔瓦斯涌出初速度法

利用该法进行煤巷掘进工作面突出危险性预测时，应在距巷道两侧 0.5m 处，各打一个平行于巷道掘进方向，直径 42mm，深为 3.5m 的钻孔。用胶囊封孔器进行封孔，孔后测量室的长度应为 0.5m。钻孔瓦斯涌出初速度用流量计进行测定，测定工作应在打完钻孔后 2min 内完成。判断有突出危险的钻孔瓦斯涌出初速度的临界值 q_m ，应根据矿井实测资料分析确定。如果无实测资料时，可参考表 1.4 中的临界值。

表 1.4 钻孔瓦斯涌出初速度的瓦斯突出危险临界值

煤的挥发分 V/%	5 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 30	> 30
$q_m/(L/\text{min})$	5.0	4.5	4.0	3.5

8) 掘进钻屑指标法

该方法主要用来预测煤巷工作面的突出危险性，其基本原理与石门钻屑指标法相同，若任一钻孔中的 $S_{\max}$ (kg/m)， Δh_2 ， C 和 K_1 之最大值大于或等于其临界值，则该工作面就确定为突出危险工作面；反之，则确定为突出威胁工作面。

9) 瓦斯地质单元法

该法是由焦作矿业学院瓦斯地质研究室提出来的，自 1977 年以来他们一直用瓦斯地质的观点来研究煤与瓦斯突出，通过对湘赣豫三省 12 个矿区 61 对突出矿井进行研究，提出了瓦斯地质区划理论。1985 年，彭立世认为突出的分布是不均衡的，具有分区分带的特点，瓦斯突出的分区分带与地质条件有密切的关系。地质因素的分区分带控制突出的分区分带，进而通过地质因素的区域划分来预测突出区带。彭立世等 1987 年在瓦斯地质区划的基础上，

提出了用地质观点进行突出预测的方法,即瓦斯地质单元法。这种方法根据地质构造煤层厚度及其变化煤体结构和煤层瓦斯等瓦斯地质参数,把煤层按照突出危险程度划分为不同的瓦斯地质单元,从而实现突出的区域预测。

10) 现代数学理论预测法

主要是对突出接触性预测指标利用数学上的一些方法进行处理而得出一些判断结论。如吴斌等应用模糊数学方法对煤层进行区域预测,将煤层局部地区分为非突出、一般突出危险、严重突出危险;焦作矿业学院的王运泉提出积分法,将瓦斯涌出量、瓦斯含量、瓦斯压力、瓦斯放散初速度、煤的坚固性系数等多种指标,根据数值大小分为四个等级,每个等级有不同的积分,将各种指标的积分相加,利用其总积分将煤层分为非突出、突出危险性小、突出、严重突出四个等级;刘建平采用灰色理论,用灰色聚类法对掘进工作面和采区的突出危险性进行分析,使其与实际所测的突出危险参数相符;冯小平对各种瓦斯突出指标进行灰色优选,用灰色系数对突出危险性进行评分,将突出规模分为无突出、小型突出、中型突出、次大型突出、大型突出、特大型突出;孟贤正用综合指标记分法预测急倾斜煤层上山掘进的突出危险性,将其突出危险性分为突出可能性极小、一般突出危险、严重突出危险。近来在突出危险性的预测上,较多地采用模糊数学方法,如重庆大学的冯涛等人将模糊数学的方法应用于煤与瓦斯突出预测,对煤与瓦斯突出进行三级模糊综合评判,将工作面前方的危险程度分为安全区、威胁区、危险区三个等级;吴海清在“模糊数学在煤与瓦斯突出预测中的应用”中,通过对丰城尚庄矿 32 起煤与瓦斯突出事例进行统计分析,借助于模糊数学有关隶属度的知识,对该矿煤与瓦斯突出做出早期预测预报;吴斌用模糊数学方法,对大同一矿的各区域突出危险指标进行分析,使之与实际揭露过程中的突出危险状况相符;张宏伟、李胜基于模式识别对潘一矿 13-1 煤层煤与瓦斯突出的区域进行预测,得到的突出危险区与实际发生的突出点分布范围相吻合。

2. 动态(连续)预测

当前所采用的静态工作面突出危险预测方法,都是通过钻孔来实现的,因此又可称为静态的钻孔法。静态法打钻及参数测定需占用作业时间和空间,工程量大,预测作业时间也较长,对生产有一定的影响,预测所需费用也较高,并且这种静态法的准确性不是很高,易受人工影响。近几年来出现了 100 多次预测指标未超过临界值而发生突出的事故,如芙蓉矿务局白蛟煤矿 1993 年 3 月 27 日发生的重大恶性事故就是一例,死亡人数 11 人,直接经济损失数百万元。究其原因,煤层或煤体及其内部所含有的瓦斯并不是均匀分布的,也不是稳定的。在钻孔附近取得的预测结果仅仅是局部的,并不能完全代表整个预测步长范围内的突出危险性,在预测时刻取得的结果也只是静态的,并不能完全代表煤体稳定前整个时期内的突出危险性,因为煤体处于动态变化之中,延期突出就是例证。因此动态连续预测的研究正日益引起人们的重视。目前突出的连续预测有三条途径:①声发射监测技术;②利用环境监测系统连续监测工作面的瓦斯涌出变化特征,分析瓦斯涌出与突出的关系从而预测突出;③电磁辐射监测技术。

1) 声发射技术

煤和岩石内部存在大量的裂隙等缺陷。煤岩变形及破坏的结果就是裂隙的产生、扩展、汇合贯通。研究表明,裂隙的产生和扩展都将以弹性波的形式产生能量辐射,这就是声发射,可以利用它对破裂源进行定位。早在 20 世纪 40 年代初,美国就利用声发射技术监测金

属矿井的岩爆。随着计算机技术的应用,该项技术在矿井中的应用更加广泛。近年来加拿大的研究人员研究了多种声发射监测系统,用于岩爆预测。

焦作工学院的汤友谊、陈江峰等学者,曾以“瓦斯突出煤体无线电波透视探测技术研究”作为国家“九五”科技攻关项目,结合不同矿区、不同煤种、不同破坏类型的煤体,对突出煤体物性参数进行了系统的测试研究。结果表明煤种及破坏类型相同的煤,电阻率较接近,突出煤体与非突出煤体的电阻率存在较大的差异,不同变质程度的煤的电阻率表现出不同的特征。利用无线电波坑道透视技术对由突出煤体和非突出煤体组成的突出煤层的电性响应特征的研究中发现,突出煤体与非突出煤体的电导和介电常数存在明显的差异,故突出煤层属于各向异性的层状介质,不同破坏类型的煤体组合的无线电波响应具有一定的规律性。

关于非接触式探测构造煤的研究,国外未见成功的报道,煤炭科学研究院重庆分院和西安分院在矿井物探手段上做了大量的研究工作,并在无线电波坑道透视采煤工作面地质构造、溶洞、煤厚变化等方面收到了良好的效果,不少学者也曾尝试将物探技术用于煤与瓦斯突出危险性预测,取得了一定的成效,也研制出了相关产品,如重庆煤科分院的MTT292型煤与瓦斯突出危险性探测仪、中国矿业大学研制的KDB5本安型煤与瓦斯突出电磁辐射监测仪等。随着大容量、高速度计算机系统的引入和声接收技术的发展,用声发射技术进行突出预测可望获得突破。

2) 以地震波为主的弹性波技术

弹性介质中物质粒子间有弹性相互作用,当某处物质粒子离开平衡位置,即发生应变时,该粒子在弹性力作用下发生振动,同时又引起周围粒子的应变和振动,这样形成的振动在弹性介质中的传播过程称为“弹性波”。从弹性力学理论的研究中,人们了解到弹性波在岩体中的传播规律与岩石介质本身的性质紧密相关。随着地震波动力学理论在地震勘探中的迅速发展,岩芯弹性波技术也随之得到了广泛的应用。弹性波不仅对岩石具有一定的穿透力和分辨力,它在介质中传播时与介质相互作用,检测得到的岩体弹性波传播速度,将反映与岩石物理力学性质紧密相关的各种信息,岩石内在和外部特征上的差异(包括矿物成分、化学成分、胶结物胶结状况、颗粒度、密度、孔隙率、天然裂隙、硬度和强度、风化程度、变质程度)以及结构和构造的影响,都将引起波速值的差异。因此作为一种传播速度快、可保证检测系统实时性的信息载体,弹性波在突出煤体与非突出煤体中传播时,必然表现出不同的响应特征,突出地球物理场响应特征的研究为地球物理研究煤与瓦斯突出预测理论和方法提供了科学思路。

在俄罗斯,以地震声学方法为主的弹性波技术在煤与瓦斯突出危险性预测领域中的研究与应用已有半个多世纪的历程,1965年地震声学预测方法的判断准则问世,该方法随即成为标准的预测方法并迅速得到广泛的应用。

在我国,煤炭科学研究总院抚顺分院在声发射法(AE)预测煤与瓦斯突出方面做过许多工作,国内不少学者也进行了弹性波技术预测煤与瓦斯突出方面的研究,但总体上讲,该项技术尚不成熟,属于前探性工作。安徽理工大学的刘盛东教授以此方面的研究内容为主,作为安徽省自然科学基金项目立项,正在进行深入细致的研究。

3) 无线电波透视探测技术

该技术在国内外都进行了较为广泛的研究及推广应用。苏联早在1923年就开始这方面

的研究工作,20世纪70年代中期在东顿涅茨无烟煤矿区进行了系统试验。煤炭科学研究院重庆分院等单位在1976年研制成功我国第一台无线电波坑道透视仪,随后煤炭科学研究总院重庆分院河北煤炭科学研究所相继对仪器进行换代改造,推出了第三第四代产品,并在全中国范围内煤矿井下探测陷落柱断层及其他地质构造等方面得到了广泛的推广应用。该技术的应用为采煤工作面的高产高效提供地质保障,即预先探明采煤工作面内地质构造以保证采煤的顺利进行,来达到预测煤与瓦斯突出危险区域的目的。

1.3.2 预测技术发展趋势

综上所述,静态预测方法所有指标都建立在经验的基础之上,指标的临界值都建立在对大量实验数据统计分析的基础上,还不能从理论上较好地确定突出临界值,突出指标的可靠程度取决于实验数据的多少、范围和代表性。因此静态方法受人工、煤体分布不均匀和应力分布不均匀等因素的影响,预测的准确率难以提高。动态预测技术是比较良好且很有发展前途的预测方法。

利用监测系统动态监测瓦斯的涌出并对突出进行识别、预测,还需要进行深入的研究和现场实践并不断总结,建立对煤与瓦斯突出的模式识别技术并开发相应软件势在必行。

声发射法和电磁辐射法是很有发展前途的连续预测方法,这两种方法属于地球物理方法,是近几年才发展起来的最有前途的预测预报煤矿动力灾害现象的方法。声发射和电磁辐射是突出这一不可逆能量耗散过程中的两种重要的能量耗散形式,对它们作深入细致的研究是认识突出过程的重要技术手段。

目前对声发射已有广泛的研究,并在突出机理认识和突出预测及监测方面取得了一些成果,尤其是声发射方法能够对煤岩体变形破裂剧烈区进行定位的特点更受研究人员的欢迎。与声发射法相比,利用煤岩变形及破裂过程中产生的电磁辐射预测煤与瓦斯突出等动力灾害现象的电磁辐射法有许多优点:①可实现真正的无接触;②更有效;③信息的接收、传输等比较简单,且易于实现定向接收;④信息丰富,即使在含瓦斯煤体缓慢的变形过程(或流变过程)中也有信号产生;⑤可望实现从理论上确定预测指标及其临界值。与现行的预报方法相比,其更有效快捷,大大减少了工作量,基本不受人工等外界干扰(对于井下机电设备等电磁干扰,则可采取屏蔽或定向接收技术来排除),可实现连续监测及预报,不影响生产,既能探测煤壁附近的突出危险性及突出危险带的方位,又能检验防突措施的效果。声发射和电磁辐射预测技术要获得进一步推广应用,需要进行预测指标及预测设备的标准化和统一化工作。

所以,未来突出预测的发展趋势是,利用声发射连续监测技术对变形破裂剧烈区进行定位,利用电磁辐射监测技术对工作面非接触连续预测,再结合现有的环境监测系统监测的瓦斯涌出动态对煤与瓦斯突出现象进行准确预测。在综合研究基础上,开发出上述3种预测方法的集成监测技术和判识软件,这样既可以减轻现场工作人员的劳动强度,又可以提高预测的准确程度,将大大提高矿井的经济及社会效益。

1.4 煤与瓦斯突出机理研究进展

1.4.1 煤与瓦斯突出的一般规律

(1) 突出的次数和强度随开采的深度增加而增加。

- (2) 突出多发生在地质构造地区,如褶曲、断层处及岩浆侵入地区。
- (3) 煤体破坏程度越严重,煤的强度越小,突出危险性越大。
- (4) 煤层中的厚度大、倾角大或其厚度和倾角发生变化以及煤层中的软分层由薄变厚的地区,容易发生突出。
- (5) 掘进工作面应力集中的地区易发生突出。
- (6) 在外力冲击作用下,如放炮或采煤机割煤时煤体受到震动,诱导瓦斯发生突出。
- (7) 围岩的透气性越差、致密的岩层越厚,煤层的瓦斯含量越高,其突出的危险性也就越大。
- (8) 突出多发生在揭煤和煤层掘进工作面。
- (9) 在突出前大都出现预兆。

1.4.2 国外研究进展

世界上一些煤与瓦斯突出严重的国家均采用突出实例的统计分析、实验室研究和现场观测相结合的方法,对煤与瓦斯突出机理进行了广泛深入的研究,提出了各种关于突出机理的假说,综合起来主要分为以下四种:

1) 瓦斯主导假说

瓦斯主导假说认为在煤体中存在着高压瓦斯,它是破坏工作面和高压瓦斯之间的煤体的主要因素。这种假说主要包括:“瓦斯包”说、“粉煤带”说、“煤空隙结构不均匀”说、“裂缝堵塞”说、“闭合孔隙瓦斯释放”说、“瓦斯膨胀”说、“卸压瓦斯”说、“地质破坏带”说和“瓦斯解吸”说等。

2) 应力主导假说

这种假说认为煤和瓦斯突出主要是高地应力作用的结果,高地应力包括两个方面,一方面指自重应力和构造应力,另一方面指工作面前方存在的应力集中。地应力主导作用假说主要有:岩石变形潜能说、应力集中说、塑性变形说、冲击式移近说、拉应力波说、应力叠加说、放炮突出说、顶板位移不均匀说等八种假说。苏联的别楚克、法国的莫连、加拿大的伊格那季耶夫和日本的外尾善次郎分别提出了含瓦斯煤体贮存了大量的弹性势能,当工作面接近该区域时,高应力区的弹性势能释放使煤体发生破坏而发生突出。这种假说主要包括:“岩石变形潜能”说、“集中应力”说、“应力叠加”说、“顶板位移不均匀”说、“塑性变形”说、“振动波”说、“放炮突出”说、“剪切应力”说、“冲击式移近”说和“拉应力波”说等。

3) 化学本质假说

化学本质假说认为煤质在煤与瓦斯突出过程中起主导作用,即煤体破坏时是否发生煤与瓦斯突出现象主要是由煤质决定的。还有学者认为煤体破坏发生煤与瓦斯突出是煤体内部本身的特殊化学变化引起的,化学本质假说主要包括:“瓦斯水化物”说、“爆炸的煤”说、“重煤”说、“地球化学”说和“硝基化合物”说等。

4) 综合假说

苏联学者聂克拉索夫在20世纪50年代提出地压和瓦斯综合作用假说后,苏联学者斯柯斯基根据突出煤层的经验和当时的科研成果提出煤与瓦斯突出是地压、包含在煤体的瓦斯、煤的物理力学性质、煤的微观结构、宏观结构、煤层构造及煤的自重应力等因素综合作用的综合假说。综合假说中最具有代表性的是苏联马可耶夫研究所巴甫洛夫提出的地应力不

均假说和苏联 B. B. 霍多特提出的能量假说。地应力不均假说认为围岩中不均匀分布的地应力、高的瓦斯压力和低的透气性变形、破坏的松软煤体是产生突出的有利条件。应力不均匀分布主要是由于围岩中存在着垂直应力、水平构造应力和采动应力的影响,促使应力重新分布,在工作面附近形成卸压区、增压区(应力集中区)和正常压力区,这三个区域的大小和范围与煤层赋存的顶底板岩性有关。能量假说认为煤与瓦斯突出是煤的变形潜能和瓦斯内能突然释放引起的近工作面煤体的高速破碎现象,在煤层应力状态发生突然变化时,潜能释放引起煤体破坏。煤层埋深、瓦斯压力、瓦斯含量、煤的强度等是突出激发和发展的主要因素,采矿因素也有一定的影响。

1.4.3 国内研究进展

我国从 20 世纪 60 年代起就对煤与瓦斯突出煤层的应力状态、瓦斯赋存状态、煤的物理力学性能等开展了研究,并根据现场资料和实验研究对突出机理进行了探讨,特别是近几年随着研究的深入及新手段的应用,产生了许多新的认识,目前已经对突出发生的原因、条件、能量来源作出定性的解释和近似的定量计算,为防治措施的选择及效果检验提供了理论依据,主要观点有:

1. 于不凡提出中心扩张学说

煤与瓦斯突出是从离工作面某一距离处的发动中心开始的,而后向四周扩散,由发动中心周围的煤—岩石—瓦斯体系提供的能量并参与活动。在煤和瓦斯突出地点,地应力场、瓦斯压力场、煤结构和煤质是不均匀的。煤和瓦斯突出发动中心就处在应力集中点,且该点向各个方向的发展是不均匀的。

2. 李萍丰提出了二相流体假说

突出的本质是在突出中心形成了煤粒和瓦斯的二相流体,二相流体受压积蓄能量,卸压膨胀放出能量,冲出阻碍区,导致突出。突出的主要动力源是二相流体压缩积蓄,卸压膨胀放出的能量,而不是瓦斯膨胀能和煤岩膨胀能。

3. 周世宁和何学秋提出了流变假说

煤与瓦斯突出是含瓦斯煤体受采动影响后地应力与孔隙瓦斯气体耦合的一种流变过程。在突出准备阶段中,含瓦斯煤体在采动影响区域内就开始了蠕变破坏,使煤体进一步被切割,形成发育的裂隙网。在某区域加速破坏发生时,如果该区域瓦斯能量足够冲跨已遭破坏的煤体,则突出发生发展,突出过程中的瓦斯气体部分由前一蠕变区域通过发育的裂隙网补给。周世宁研究了瓦斯在煤层中流动的机理,认为瓦斯在孔隙结构中的流动主要是扩散,符合菲克定律。在煤层裂隙系统的流动属于渗流符合达西定律。煤层瓦斯的流动决定于裂隙系统的特性,而不决定于孔隙结构。

4. 蒋承林和俞启香提出地壳失稳假说

煤和瓦斯突出过程的实质是地应力破坏煤体,煤体释放瓦斯,瓦斯使煤体裂隙扩张并形成的煤壳失稳破坏,煤体的破坏以球盖状煤壳的形成、扩展及失稳为主要特点,破坏的煤体抛向巷道后,煤体内部继续破坏后续的煤体。

5. 梁冰和章梦涛提出煤与瓦斯突出固流耦合失稳理论

突出是含瓦斯煤体在采掘活动影响下,局部发生迅猛、突然破坏而造成的,是地应力、瓦斯及煤体三个主要因素作用的结果,采深和瓦斯压力的增加都将使突出的危险增大。

还有郑哲敏院士从力学角度对突出问题进行研究,通过量纲分析给出了突出判据的一般