

西安科技大学

硕士学位论文

煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测技术研究

姓名：王栓林

申请学位级别：硕士

专业：采矿工程

指导教师：伍永平

20090519

论文题目：煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测技术研究

专 业：采矿工程

硕 士 生：王栓林

(签名) 

指导教师：伍永平

(签名) 

摘 要

我国高瓦斯突出矿井分布广，且随着开采力度的加大，突出危险性明显增大，严重威胁煤矿工人的生命安全，阻碍煤矿安全生产的正常进行，因此致力于煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测技术研究，了解突出机理、积极开发基于声发射和瓦斯实时动态预测新技术的研究有重要的现实意义。

本文对煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测方法和数据分析进行深入研究，在煤与瓦斯突出机理分析基础上，通过数值试验了解突出前后应力分布、瓦斯压力变化及声发射特征，总结突出机理；分别对声发射和瓦斯单项指标进行了研究，利用概率分布建立声发射基础参数判定模型；运用时间序列分析对瓦斯涌出进行分析，建立指数平滑预测模型和瓦斯涌出变化模型对掘进工作面瓦斯涌出特征进行评价。

在瓦斯和声发射各自参数确定的前提下，分别以声发射基本参数为基础，运用层次分析-模糊综合法建立声发射项综合指标 AE (Acoustic Emission)，并根据现场实际需要，设定 8h 长时指标和 3h 短时指标。以瓦斯评价参数偏差和方差为基础，提出了瓦斯项综合指标 WS (Wa Si) 和基于声发射项综合指标和瓦斯项综合指标的煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测新综合指标 DI (Dangerous Index)，实现对掘进工作面的突出危险性进行评价，提高了实时预测的准确性。

对比常规预测指标，验证了瓦斯项综合指标 WS 及声发射项综合指标 AE 用于突出危险性实时跟踪预测的可行性和准确性。

关 键 词：煤与瓦斯突出；预测；声发射；实时跟踪

研究类型：应用研究

Subject : Study on Real-time Trace Techniques in Risk Prediction of Coal and Gas Outburst

Specialty : Mining Engineering

Name : Wang Shuanlin

(Signature) 

Instructor: Wu Yongping

(Signature) 

ABSTRACT

High coal and gas outburst mine distribute widely around our country, meanwhile with deep mining, burst risk heavily increased, threatened coal workers and heavily blocked safety production, so it is great significant to study real-time trace techniques in risk prediction of coal and gas outburst and mechanism, develop new real-time dynamic prediction skills.

Detailed study is implemented to the real-time trace techniques in risk prediction methods and data analysis of coal and gas outburst in the paper, and based on analysis of the outburst mechanism, find out the stress distribution, the changes of gas pressure and the status of AE(Acoustic Emission) before-after the outburst. Studied the single index of AE and gas emission, and established the basic parameters determined model using probability distribution. In order to evaluating the gas emission quantity in driving face, built the exponent smoothing prediction model and gas emission model applying time series analysis.

Under precondition of gas and AE parameters, established the item of AE comprehensive index using AHP (analytic hierarchy process) analysis and fuzzy synthetic method, and set long index in 8h and short index in 3h. On the basis of the parameters of deviation and variance, built the item of gas comprehensive index, put forward the new comprehensive index DI (Dangerous Index) based on the comprehensive index of AE and gas emission.

Comparing with the routine prediction index, it has proved the feasibility and accuracy of *WS* and *AE* in the application of real-time trace techniques in risk prediction of burst, and the real-time property is much better than the routine predicted index.

Keywords: Coal and gas outburst Prediction Acoustic emission Real-time trace

Thesis : Application Study

西安科技大学

学位论文独创性说明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得研究成果。尽我所知，除了文中加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人或集体已经公开发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得西安科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：王柏林 日期：2019.6.3

学位论文知识产权声明书

本人完全了解学校有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于西安科技大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版。本人允许论文被查阅和借阅。学校可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时本人保证，毕业后结合学位论文研究课题再撰写的文章一律注明作者单位为西安科技大学。

保密论文待解密后适用本声明。

学位论文作者签名：王柏林 指导教师签名：何小军
2019年6月3日

1 绪论

1.1 选题背景及研究意义

煤与瓦斯突出是发生在煤矿井下的一种极其复杂的动力现象，它能在很短的时间内由煤层突然喷出大量的瓦斯及碎煤，在煤层中形成特殊形状的空洞，并造成强大的动力破坏，突出后形成的瓦斯煤粉流可以逆风运行，突出煤粉可以充满数千米长的巷道，突出是威胁煤矿安全生产的严重矿山灾害之一。

世界上第一次典型的煤与瓦斯突出事故 1834 年发生在法国鲁阿雷煤田伊萨克矿井（Wallsend），前苏联的顿巴斯在本世纪初开始发生突出。据统计，至今发生突出的国家有 20 多个，突出较为严重的国家有中国、法国、俄罗斯、波兰、日本。

我国的突出比较严重，有记载的第一次突出是 1939 年 11 月 20 日发生在辽源矿务局富国二井，突出强度为 7t。随着煤炭工业的发展以及新矿区的开发和老矿区的延深，采掘规模不断扩大，突出矿井数和突出次数逐渐增多。1958 年 6 月 3 日，重庆地区南桐矿务局直属一井+150m 水平揭开四号煤层时，发生了强度 1646t 的特大型突出，而后在湖南红卫煤矿、辽宁北票矿务局、江西乐平矿务局、贵州六枝矿务局都相继发生 3000t 级的特大型突出。据不完全统计，到目前为止，已发生突出的矿井 200 多个，突出总数超过 12000 多次，强度在 1000t 以上的特大型突出近 100 次，其中最大的一次突出是 1975 年 8 月 8 日在四川天府矿务局三汇一矿发生的，突出强度 12780t，瓦斯量 140 万 m^3 ^[1]。

我国吉林营城五井在 1975 年 6 月 13 日于垂深为 439m 处掘进巷道时第一次发生了砂岩与二氧化碳突出，突出砂岩 1005t，涌出的二氧化碳量为 11000 m^3 ^[3]。之后在延边和龙矿也发生了煤岩与二氧化碳突出。1977 年 2 月 3 日，窑街三矿皮带斜井 1650 北大巷发生煤岩与二氧化碳突出，20min 内突出二氧化碳 4920 m^3 ，突出二氧化碳逆风流 300m，波及四条巷道共计 1920 m，1978 年 5 月 24 日，仍在皮斜 1650 北大巷发生特大型煤岩与二氧化碳突出事故，突出煤岩 1030.32 t，当日突出二氧化碳达 24 万 m^3 ，逆风距离达 1700 m，波及 13450 m 巷道^[7]。

近年来煤与瓦斯突出事故频发，给煤矿安全生产带来巨大阻碍。据报道，窑街煤电集团公司金河煤矿 2007 年 4 月 6 日 23 时 05 分，在中班和夜班的交接时，16203 运输顺槽掘进工作面发生自发性煤与瓦斯（ CO_2 ）突出，突出煤量为 300t，堵塞巷道 40m，当班下井 226 人，经抢救 1 人受伤，9 人死亡，报道称“4·6”瓦斯突出事故。

2008 年 9 月 21 日 1 时 10 分，河南郑州登封市新丰二矿掘进工作面发生煤与瓦斯突出事故。事故当班入井 108 人。事故发生后，64 人安全升井。经抢救，7 人脱险，共造成 37 人死亡。

2008年12月17日15时15分,湖南娄底涟源市伏口镇挂子岩煤矿2152回采工作面区域发生煤与瓦斯突出事故,当班下井32人,14人安全升井,18人遇难。

根据国家安监总局官方网站调查的煤与瓦斯突出事故调查统计情况来看,突出事故处于平稳增加的状态(如图1.1)。

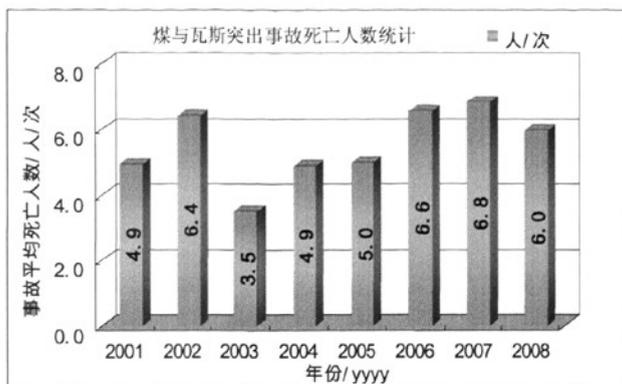


图 1.1 我国近几年煤与瓦斯突出事故死亡人数(数据来源:安监总局网站)

目前,无论从数量上看还是从规模上看,我国已经成为世界上煤与瓦斯突出最为严重的国家之一^[2]。我国煤与瓦斯突出南北都有分布,但南强北弱。在突出煤层形成的地质年代上,南方主要发生在早石炭世测水组、晚二迭世龙潭组和晚三迭世安源组的含煤地层中,北方则主要发生在早二迭世山西组、侏罗世北票组合晚三迭世安源组的含煤地层中。在构造上各种类型构造体系下的煤田都有突出分布。其中以华夏系和新华夏系构造控制下的煤田突出最为严重,不过,突出区并不位于构造活动(特别是剧烈活动)的地区,多数位于地台区,也常见突出区位于复式褶皱中的短轴向斜区域内。

以上资料表明,突出不仅发生在世界主要产煤国家,而且随着采深的增加,突出的严重性会进一步增大,由于煤与瓦斯突出能在一瞬间向采掘工作面空间喷出巨量煤和瓦斯流,不仅能严重摧毁巷道设施,毁坏通风系统,而且会使附近区域的井巷全部充满瓦斯和煤粉,造成瓦斯窒息和煤流埋人,甚至还会造成煤尘和瓦斯爆炸等严重后果,不仅威胁到煤矿工人的生命安全,同时还严重阻碍了煤矿生产的正常进行,造成巨大的经济损失。因此,深入而全面的研究突出问题具有巨大的经济效益和社会效益,而致力于研究煤与瓦斯突出的机制、预测预报和预处理的理论及方法、积极开发应用新的防突预测技术、建立突出敏感性指标判据及临界值是防突工作的基础,可以指导人们更加合理地应用防突措施、减少防突工作的盲目性、节约防突工程费用,从而有效地保障矿井安全生产,提高矿井经济效益。

1.2 煤与瓦斯突出预测技术的研究动态及新进展

煤与瓦斯突出的预测预报是煤与瓦斯突出研究的一个主要方面,世界各国关于煤与瓦斯突出的预测预报研究方法都是建立在地应力、瓦斯以及煤体结构和性能的基础上,利用煤体强度、地应力状态、瓦斯赋存状况以及它们在突出前所出现的异常变化及时地判断是否发生突出。

根据煤与瓦斯突出预测预报的地点和范围,突出危险性预测可分为区域预测和工作面预测。前者主要是预测煤层和煤层区域(包括井田、新水平和新采区)的突出危险性,后者主要预测工作面(包括石门揭开工作面、煤巷掘进工作面和回采工作面)附近煤体突出危险性。从已有的研究成果来看,前者所采用的主要预测指标有地应力指标(包括各主应力分量,最大剪应力,弹性应变潜能密度,强度参数等)、瓦斯指标(包括瓦斯含量及瓦斯压力等)以及煤体结构和性能指标(包括煤体的各物理力学参数、煤体结构参数及煤化学参数等);后者采用的主要预测指标有煤粉钻屑量、钻屑瓦斯解析参数、钻孔瓦斯涌出量、瓦斯涌出初速度以及煤层温度等^[2]。

煤与瓦斯突出的区域预测一般在地质勘探、新井建设、新水平和采区开拓时进行,区域预测只能较大范围地划分出煤层的突出危险区域,给工作面突出危险性预测提供参考,原煤炭工业部制定的《防治煤与瓦斯突出细则》中将突出煤层经过区域预测后分为突出危险区、突出威胁区和无突出危险区^[5]。

国内外首先是根据煤的物理性质及地质构造特征划分煤层突出危险性,随着对突出认识深入,逐渐向综合因素发展。目前,区域预测技术主要有:单项指标、综合指标和物探技术。

1.2.1 煤与瓦斯突出工作面预测

在区域预测出的煤层突出危险区内,工作面进行采掘之前,进行工作面预测,及时发现采掘工作面前方的突出危险地带、确保采掘过程中及时采取防突措施、避免发生煤与瓦斯突出事故。

统计表明,煤巷掘进时发生的煤与瓦斯突出次数占矿井突出总数的首位,因此煤巷掘进工作面是突出预测的重点。工作面预测按照其与煤体的关联程度分为接触式预测与非接触式预测^[3]。

(1) 接触式预测

我国从 20 世纪 70 年代末开始对工作面突出危险性预测进行研究,至 20 世纪 80 年代后期基本形成了以钻屑量、钻孔瓦斯涌出初速度和钻屑瓦斯解析特征等指标进行工作面预测的方法,另外也有利用钻屑温度、钻孔内壁温度和钻孔涌出瓦斯中 He、Ar 同位素含量等参数预测的方法,但应用不太广泛。我国现行《细则》中规定,进行煤巷掘进

工作面突出危险性预测时可采用钻孔瓦斯涌出初速度法、R 值指标法和钻屑指标法等，由于这些方法都是在向煤层打钻的基础上进行的，因此也统称为钻孔法。

(2) 非接触式预测

通过向煤层打钻孔测定相关参数预测采掘工作面突出危险性技术，研究了不同突出类型、不同煤层赋存条件、不同工作面类型的突出预测指标工艺和判断分析方法，并研究了预测突出危险较敏感指标的适应条件和临界值确定技术，已形成了一套较为完整的突出预测技术体系，在全国大多数突出矿井得到普遍推广应用。

根据突出预测过程及其连续性，工作面预测又可以分为静态不连续预测和动态连续预测两种预测方法。

实时跟踪预测，即连续动态预测是指通过动态连续地监测能综合反映含瓦斯煤岩体所处(应力或应变)状态的某种指标而确定工作面附近煤层突出危险性的方法。目前突出的连续动态预测有三条途径：一是声发射(AE)监测技术；二是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，从而预测瓦斯突出；三是电磁辐射(EME)监测技术^[4]。

1.2.2 突出危险性预测技术

1.2.2.1 AE 声发射预测突出危险性技术

采掘工作面前方煤岩体由于受到采掘活动的影响将产生应力重新分布，使得在离工作面不远的一段范围内形成应力集中，煤岩体发生变形而积聚大量的弹性潜能。当这种变形达到极限时，煤岩体将失稳破坏，弹性潜能部分释放，促使煤岩体质点产生振动而转变成声响，并在煤岩体中传播，甚至传入采掘空间、这就是我们通常所说的煤炮声。AE (Acoustic Emission)声发射正是基于这一原理，采用速度计(或加速度计)测量质点振动速度(或加速度)和频率，以此来判断煤岩体的破坏情况，并预测其破坏发展趋势，也即可用来预测煤与瓦斯突出危险性^[6]。

早在 20 世纪 40 年代初，美国就将声发射技术监测系统用于岩爆预测。法国的研究人员也做了很多这方面的研究工作。声发射用于煤与瓦斯突出预测在前苏联的顿巴斯煤矿进行的研究工作比较多，1974 年突出严重的中央区有 121 个工作面采用了这项技术。20 世纪 80 年代初，澳大利亚研究了一种双声道声发射突出预测系统，英国的声发射突出预测系统从 1983 年到 1987 年在南威尔士煤田的 Cynheidre 矿进行了试验，但在试验过程中没有发生突出。美国、德国、日本和波兰等在这方面也有不同程度的研究。前苏联用记录噪声脉冲数的方法预报煤与瓦斯突出并在顿巴斯煤田进行了推广应用^[3]。

我国的研究起步较晚，在现场应用也较少。平顶山矿务局从俄罗斯引进了声发射监测系统，并用于煤与瓦斯突出预报试验研究。煤炭科学研究总院重庆院研制的声发射监测系统“九五”攻关期间在平顶山矿区进行了应用^[27]。煤炭科学研究总院西安院也研制了

MJY—1 型声发射实时监测系统, 并在平顶山十矿进行了现场实验。

声发射方法虽然能够连续、较有效地评估煤层边缘的突出危险性, 但存在许多缺点, 主要是仪器结构及信号接收、转换都很复杂, 且要求压电传感器与煤壁能够很好地耦合, 这实际上是非常困难的。声发射技术用于矿井已有几十年的历史, 在岩爆监测方面已取得了一些成果。尽管很多人认为声发射突出预测系统是一种很有发展前途的预测方法, 各国也都投入了大量的人力物力进行了广泛的研究, 但目前其突出预测的可靠程度与生产实际的需要存在一定差距。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^[8]。

1.2.2.2 工作面瓦斯涌出动态变化特征预测突出危险性技术

大量的理论研究和现场观测表明, 采掘工作面前方煤体瓦斯涌出量的动态变化与煤体的突出危险性相一致, 无论瓦斯涌出量上升或上下起伏, 都是突出危险的前兆信息。因此, 国内外广泛采用与之相关的瓦斯涌出特征指标进行突出预测, 如 $V_{30}(V_{60})$ 、 K_v 指标及钻孔瓦斯涌出初速度等, 取得了一定效果, 但仍未完全实现对突出动态前兆连续变化规律和特征的考察^[12]。

1) $V_{30}(V_{60})$ 及 K_v 指标法

V_{30} (或 V_{60})是指掘进煤巷炮后 30min(或 60min)内的吨煤瓦斯释放量。德国研究表明, 如果 V_{30} 值达到崩落煤可解析瓦斯量的 40%, 则说明存在突出可能性, 如果达到 60%, 则表示有突出危险。国内重庆、抚顺院利用 WTC 瓦斯突出参数仪和矿井环境监测系统, 通过对煤巷掘进工作面瓦斯动态涌出的连续观测和分析, 用掘进煤巷炮后 V_{30} (或 V_{60})来反映出瓦斯涌出量的上升幅值, 将其作为一项突出预测指标。俄罗斯斯阔钦斯基矿业研究院根据连续监测掘进煤巷每个落煤循环的瓦斯涌出量数据, 采用相对均方根偏差公式计算瓦斯涌出变动系数 K_v 表征瓦斯涌出增减的变化幅度。国内将 V_{30} (或 V_{60})和 K_v 两个指标相结合, 在部分矿区进行了突出预测试验, 并取得了一定的效果。

2) 瓦斯涌出动态特征法

根据工作面瓦斯涌出特征, 利用模式识别技术对基于矿井监测系统的突出预测系统进行了研究, 认为在现有矿井监测系统基础上考虑工作面瓦斯涌出特征, 利用计算机模式识别技术研究非接触式煤与瓦斯突出预测系统可行^[13]。

国家“十五”科技攻关计划也将瓦斯动态涌出判识突出的技术列入了研究内容, 随着对工作面瓦斯涌出状态与煤与瓦斯突出危险程度关系及突出判识技术的深入研究, 可以利用现有瓦斯监测系统对突出进行预测。

1.2.2.3 电磁辐射法预测突出技术

国内外理论研究和实践表明, 煤岩受力破坏过程中会产生电磁辐射, 电磁辐射的强弱和脉冲数取决于外加载荷的大小和煤岩体的力学特征。前苏联和德国在井下对岩石破裂电磁辐射特征进行了观测试验, 国内中国矿业大学和煤炭科学研究总院重庆院也对煤

岩变形破坏电磁辐射特征、电磁辐射法预测工作面突出危险技术和装备进行了研究。

以电磁辐射强度和脉冲数两项指标为依据的电磁辐射法预测煤与瓦斯突出是有中国矿业大学的何学秋、王恩元提出的，尤其是基于含瓦斯煤岩体流变破坏机理和煤岩破坏电磁效应理论的物理探测法，它具有测试时间短、预测工作量小、不影响工作面高效生产的特点，可实现采掘工作面前方煤岩体突出危险的动态连续预测和远程监测。目前研制出的 KBD5 型煤与瓦斯突出和冲击地压电测辐射仪已经在我国十余个矿区得到推广和应用。

煤炭科学研究总院重庆院研制了 KJ54 型矿井安全监测系统，该系统不仅具有环境参数监测和控制的功能，更具有对突出、冲击地压，火灾等灾害进行实时监测和趋势分析预报的特点，为非接触式突出预测技术的研究和推广创造了条件^[6]。同时开始出现将专家分析系统应用于煤与瓦斯突出预测中，实现工作面煤与瓦斯突出的实施跟踪预测。

电磁辐射预测技术是一种完全的非接触式监测方法。该方法技术可行，测试技术先进，不受人工和工作面煤岩体分布均匀及不稳定的影响，预测准确率高，无需打钻，操作简单，对生产影响小，使预测费用大幅度降低。电磁辐射监测技术是一种很有前途的地球物理方法^[8]。

1.2.2.4 根据煤层温度状况预测突出危险性

原苏联 N.A 雷任科等学者在很多煤矿中，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，利用温度梯度值的预测方法被全苏联防突委员会推荐使用。

我国湖南等矿区也进行了这方面的研究。利用温度状况预测突出危险性的理论根据是：瓦斯解吸时吸热，导致煤层温度降低。温度降低越多，说明煤层瓦斯解吸能力越强，则突出危险性越大。实践表明，煤层瓦斯含量越高，这一效应越明显。换句话说，采掘工作引起工作面前方煤体中应力变化，导致瓦斯存在状况变化，当压力降低时吸附瓦斯解吸为游离瓦斯，吸收周围煤体的热量，因而煤体温度降低。煤温降低多少，反映了煤中瓦斯含量大小与应力状态的变化情况。实践还表明，凡是煤温突然大幅度降低，就预示着工作面附近有较大的地质构造(煤层突然变厚、变薄、倾角突变等)，有发生突出的可能性。

1.2.2.5 利用煤层中涌出的氦体积或氦浓度的变化预测突出

原苏联学者考察了顿涅茨煤田中 2 个不突出煤层和 4 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。近来一些国家有人假设煤中涌出的氦体积可以作为预测突出的一个指标^[9]。

1.3 煤与瓦斯突出预测中运用的数学物理方法

1.3.1 众多统计学方法应用于煤矿瓦斯评价预测

数据统计方法是最常用的评判方法,随着统计学理论由低维空间向高维空间、线性向非线性方向发展,现有的各类统计学相互融合,目前,已有不少统计学数学模型应用于瓦斯评价之中。例如,利用类比法分析瓦斯与地质因素间的相关性时,可实现由定性向定量转化,获得了对瓦斯赋存规律的认识;非线性矿井瓦斯涌出量预测数学模型的建立提高了预测的准确性;多参数综合分析法为煤与瓦斯突出危险性预测准确性的提高提供了保障。

1.3.2 数学及物理理论推动煤与瓦斯突出预测

煤与瓦斯突出内在机理极为复杂,突出影响因素与突出事件之间相关规律存在一定的不精确性和模糊性,基于经验的传统预测技术和基于数学建模的统计预测方法的应用已受到了很大的限制。目前,一些先进的理论方法如计算机模拟、模糊数学理论、灰色系统理论、神经网络、专家系统、分形理论和非线性理论、流变与突变理论等已开始应用于煤与瓦斯突出的定量评价与分析中,并取得了一定的研究成果。

关于含瓦斯煤岩突出机理的研究方法,总归起来主要有观察统计法、逻辑演绎法、实验法和数值分析法。

霍多特等人基于实验室模拟,用数学方法计算煤层的变形潜能、围岩的动能、瓦斯的膨胀功和造成突出所需的功,提出能量假说,但仍无法解释含瓦斯煤岩的渐近破坏过程和破坏条件。何学秋教授等提出的突出流变假说,对含瓦斯煤岩突出过程和突出机理作了较形象的描述。就目前数学力学发展的水平而言,要想通过解析理论的方法对具有工程背景的含瓦斯煤岩的突出问题进行定量的描述为时尚早,而数值模拟方法在某种程度上起了一种良好的桥梁作用。

唐春安、芮勇勤等运用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统,对含瓦斯煤岩突出问题进行了初步探索,该系统的显著特点是在模型中考虑材料的非均匀特性,主要包括以下几方面的功能:应力分析、变形分析、声发射和结构破坏分析等^[16]。

模糊数学理论由美国控制论专家 L.A.Zadeh 首先提出,是表达与处理不精确数据、模糊信息条件的重要手段。国内外不少学者采用模糊评判理论结合统计学方法定量评价矿井地质变化、瓦斯赋存规律、瓦斯灾害危险性等问题。

煤与瓦斯突出预测指标涉及到许多模糊性、随机性即呈现灰色特征的因素,应用灰色关联方法进行煤与瓦斯突出预测指标的优选,即可以从理论上定量地处理设计中的灰色因素^[28]。

神经网络是 20 世纪 80 年代后期迅速发展起来的人工智能科学的重要分支,除在模式识别、非线性动态处理及自动控制等领域显示出了强劲的生命力外,在预测、评价等方面也取得了良好的应用效果。最近几年,以自适应突出强度预测的 BP 神经网络模型为代表的模糊神经网络技术在煤与瓦斯突出预测领域里也取得了令人关注的成效^[25]。

专家系统是一个模拟人类专家解决某一问题所用知识和经验的计算机程序。英国煤炭公司的 UPEL 专家系统可用于预报井下开采过程中煤与瓦斯突出危险性。中国科学院地质研究所也正在研制预测突出的专家系统 GAS-BURST,它根据用户提供的矿区地质构造、地下水、瓦斯、钻孔粉尘、地应力和已发生突出的资料,划出煤矿突出危险区、危险带,预测突出危险程度随采深增加的变化趋势,预报突出点的位置,同时还能在计算机屏幕上显示突出危险区的位置、井下突出点的位置、各次突出间的相互联系等。

层次权重决策分析法(简称层次分析法)是由美国 A.L.Saaty 教授提出的一种科学决策方法^[29]。该方法在专家知识和经验基础上,利用具有严密思维的数学方法,使各因素之间相互联系,可以尽量剔除主观成分,并且可以根据判断矩阵是否具有—致性来检验权重系数的合理性,使权重系数比单纯的专家评分确定更合理,从而提高模糊综合评判的准确性^[29]。

分形几何理论作为研究非线性问题的有力的理论工具和方法,近几年在煤炭业也得到了广泛的应用。如吕绍林^[24]等进行了突出煤体的粒度分形研究。此外,分形几何理论在断层网络复杂程度、煤与瓦斯突出区域分布特征方面的分析应用也比较广泛。

1.3.3 数据库、数据挖掘等信息技术发展为煤与瓦斯预测开辟新的途径

目前数据库技术已由单一的商用数据库技术发展到了与分布式技术相结合的分布式数据库技术、与并行技术相结合的并行数据库技术。利用数据库技术对煤与瓦斯突出进行统计分类,实现地层、煤层、煤质、瓦斯灾害的综合管理和相关图件的绘制。

在数据库技术基础上发展起来的数据挖掘技术是近几年来快速发展的一种分析和决策手段,它以大量的、模糊的、经常变化的基础数据为基础,与数据库技术相结合,利用计算机技术实现对历史数据的分析和挖掘,找出隐藏在历史数据内部的关系模式以辅助最优化决策,这一技术可将煤与瓦斯突出的影响因素组成一组记录集合并进行挖掘,以实现煤与瓦斯突出危险性预测。

1.4 煤与瓦斯突出预测新技术

各种新技术应用于煤与瓦斯突出预测当中, GIS 技术、三维地学模拟技术为煤矿瓦斯的定量研究提出了新的思路;无线电波透视探测技术在煤与瓦斯突出预测研究中取得成果;以地震波为主的弹性波技术对煤与瓦斯突出预测理论和方法有新的拓展。

1.4.1 GIS 技术、三维地学模拟技术

1963年由加拿大测量学家 B.F.Tomlinson 首先提出的 GIS 技术是集地理学、绘图学、遥感学、图形图像学以及计算机科学于一身的边缘学科。20 世纪 90 年代随着信息的全球化和标准化, GIS 及有关工具软件相继诞生,在许多领域都有了长足的发展。在矿业方面, GIS 技术在矿产资源评价、矿区瓦斯含量分布规律探讨、安全生产信息管理系统的建立等方面都有较为成功的应用。

张宏伟结合平顶山矿区的生产实际,将 GIS 技术引入煤与瓦斯突出区域预测工程中,建立了相应的信息管理系统,对实现区域预测的定量化、科学化、动态监测,以及多目标、多维方向的发展有巨大的促进作用,通过地质构造划分、岩体应力状态评估,为煤与瓦斯突出区域预测开辟了一条新途径^[17]。

国内外尚有不少学者依靠 GIS 的技术支持,建立了地质灾害勘察综合地球物理信息管理解释系统,其强大的空间信息管理和分析功能使地质灾害研究进入了一个崭新的信息化、数字化、定量化阶段。

科学计算可视化自 20 世纪 80 年代中期诞生以来,在许多领域得到了广泛的应用,对于三维地震理论来说,可视化以易于人们感知的三维地震波场和数据关系的描述,为勘探人员提供反映地层构造形态和属性特征的三维图像,是三维地震解释的重要手段。最近几年在煤矿,以高分辨率三维地震为主的地面综合探测技术已基本成熟,能够查明落差小至 5m 左右的断层和直径 30m 左右的陷落柱、冲刷无煤区等,并逐步往更细致的方面发展。

1.4.2 无线电波透视探测技术

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。在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差异,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^[18]。

关于非接触式探测构造煤的研究,国外未见成功的报导,煤炭科学研究总院重庆院和西安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,如煤炭科学研究总

院重庆院的 MTT-92 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。

1.4.3 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、胶结物和胶结状况、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。在监测仪器方面,由最初的 3YA-1 型发展到 3YA-6 型,又成功地研制出 CAK-1 型自动化地震声学监测系统,从方法上讲,目前主要有声发射方法和声学方法两种。据专家介绍,目前地震声学预测法尚存在许多问题亟待解决,重点应着手解决信号源、通信线路和传感器本身的诸多问题。

我国煤炭科学研究总院抚顺院在声发射法(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。

非接触式预测是煤与瓦斯突出预测技术的一场重大革命,也是煤与瓦斯突出危险性评价技术发展的必然趋势。目前以地震波为主的弹性波探测技术在石油勘探开发中已取得了长足的进展并成为一种不可缺少的检测方法,以高分辨率三维地震为主的地面综合探测技术在煤炭工业领域中已基本成熟。在优化理论和方法、现代分析理论和方法、随机理论和方法、混沌与分形理论和方法的数学基础上,构造新的算法以解决弹性波非线性反演中的非弱散射问题,以突破应该属于 21 世纪的地球层析成像问题,必将使弹性波 CT 预测煤与瓦斯突出变成现实^[10]。

煤与瓦斯突出预测的发展趋势是,利用声发射监测技术对变形破裂剧烈区域进行定位,利用电磁辐射监测技术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，并在综合研究基础上，开发出预测方法的集成监测技术和判识软件，形成煤与瓦斯突出实时分析专家诊断系统。

1.5 突出预测敏感性指标及其临界值

目前我国大多数突出矿井，在进行突出危险性预测时所采用的预测指标及其临界值基本上都是按照《防治煤与瓦斯突出细则》所推荐的。但是，针对不同的矿井或煤层，突出预测指标的敏感性及其临界值可能是不同的，甚至存在很大的差异。矿井在使用中应通过现场试验，摸索和确定适合本矿煤层实际情况的突出预测指标及其临界值。否则，可能因指标不敏感或临界值不合适而造成预测结果不准确或误判，发生突出事故或增加不必要的防突措施工程^[14]。所以，确定矿井突出预测敏感指标及其临界值是防突工作中十分重要的内容。

所谓敏感指标，从数学和优化的角度有两种说法，数学的描述认为敏感指标是对某一矿井煤层工作面进行预测时，能够明显区分出突出危险和非突出危险预测指标，该指标的值在突出危险和非突出危险工作面应无交叉或交叉区域较少。从优化的角度定义则认为敏感指标是能够最准确的预测突出危险性，且所需采取的防突工程费用最为经济的指标，能够确定突出是否发生的敏感指标的最小值即称为它的临界值，通常同时确定敏感指标及其临界值^[3]。

国外对于突出预测指标的敏感性和临界值研究较少，在这方面我国的研究较为深入。煤炭科学研究总院抚顺分院在“八五”期间，采用模式识别的方法，基于模糊数学理论，提出的模糊识别模式和指标。煤炭科学研究总院重庆分院引入喷孔率（工作面发生喷孔的钻孔数与钻孔总数之比）的概念表示工作面突出危险性，采用数理统计的手段分析各项指标能够反映突出危险性的程度，以此来选择预测突出的敏感指标并确定其临界值。王凯，俞启香将人工神经网络理论运用于煤与瓦斯突出危险性的判定和识别。

1.6 研究方案及技术路线

1.6.1 研究内容

在收集现场地质资料的基础上，应用声发射（AE）技术和工作面瓦斯涌出动态变化特征预测突出危险性技术，以含瓦斯煤岩体的声发射事件数和瓦斯动态涌出量为预测的基本参数，采用现有的数理统计学理论建立单项和综合参数动态预测的数学模型。

辅助以 RFPA^{2D} 数值模拟试验，运用理论分析、现场实测、数值模拟的综合手段，研究煤与瓦斯突出的实时动态特征和变化规律，找准某矿区某矿点的突出敏感指标和临界值，在初步建立突出预测模型的基础上，不断优化敏感性指标，提高预测准确率，并为防突措施提供一定理论支持。

本论文的主要研究内容如下：

- 1) 选择新开工、具有突出危险性的掘进工作面作为试验区域，方便收集完整的资料；
- 2) 以声发射(AE)和瓦斯动态涌出量为主要分析参数，应用数理统计方法，建立煤与瓦斯突出实时跟踪预测的数学模型；
- 3) 研究实时数据分析方法；
- 4) 收集常规点预测技术和设备资料，进行对比分析，验证指标可行性；
- 5) 辅助以 RFPA^{2D}-GasFlow 版数值模拟实验突出机理探索。

1.6.2 技术路线

采用实验室开发和在现场试验—验证—修改—再试验—再修改的技术路线，再辅助以 RFPA^{2D} 数值模拟试验，了解煤与瓦斯突出机理，为突出预测模型及敏感性指标的优化提供基础。具体技术路线图见图 1.2。

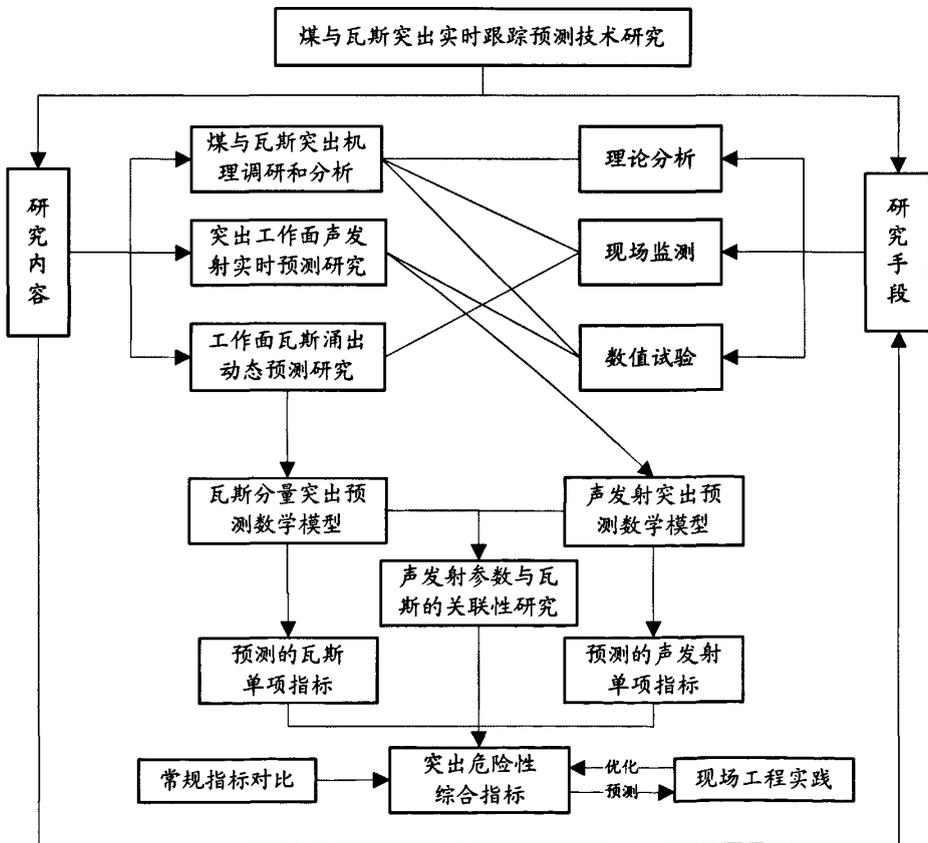


图 1.2 本文研究的技术路线

2 煤与瓦斯突出工作面的声发射实时预测研究

煤与瓦斯突出是由地应力、瓦斯与煤的物理力学性质三者综合作用的结果，即综合假说，这是国内外多数研究人员所持有的观点。

采掘工作面应力集中是煤与瓦斯突出发生的一个必要的先决条件；瓦斯也是发生煤与瓦斯突出过程中的又一个不可缺少的要素，它的作用是利用瓦斯压力梯度破碎煤体和瓦斯由煤中快速的解吸所形成的瓦斯气流，将被破碎的煤搬运出突出工作面，其搬运距离取决于所形成的瓦斯流的强弱。实验表明，当瓦斯压力梯度足够大时，就可以破碎煤样，并可从卸载孔喷出，这也表明纯瓦斯因素也可以发生煤与瓦斯突出，最近几年来频繁发生的钻孔内的煤与瓦斯突出主要是瓦斯因素引起的；煤的物理性质是指煤层对瓦斯的吸附能力与解吸速度，而力学性质是指煤层的强度，当煤的力学性质较弱时，煤层受力容易破坏，而突出就是煤层遭受破坏突然释放能量的一种现象。在应力与瓦斯共同作用下，且煤体强度较差时，即抵抗突出能力较弱时，就易发生突出，这就是煤与瓦斯突出预测预报的理论根据。

煤与瓦斯突出实质上是一种能量突然释放的现象，从能量平衡角度出发，能量有释放就有集中。煤体声发射现象是煤体在一定地应力和瓦斯压力作用下，煤体弹性能量集中，当煤体力学强度较弱如存在软分层等缺陷时，煤体局部破坏从而释放应力波的现象。煤体声发射现象是地应力、瓦斯压力和煤的物理力学性质综合作用的结果，与煤与瓦斯突出综合假说相对应，故利用煤体声发射特征规律预测煤与瓦斯突出在机理上可行。

从国内外大量突出前的预兆统计规律可以看出，突出前一般都会产生频繁的煤炮声、支架发出的吱吱声、煤壁因破坏出现掉渣等有声预兆，这些有声预兆都是工作面来压、应力活动活跃和煤层破坏、断裂等产生的声发射现象，这些信号一般能量都比较大，AE 声发射监测装备是完全可以监测到的，而且在产生这些有声预兆乃至发生突出前，存在一个从量变到质变的过程，在此过程中，必然会产生大量的能量相对较小的声发射信号（该能量使人耳不足听到，但监测装备可检测），而且该声发射信号比较集中，呈现出急剧增加的趋势。由此可知，AE 信号与突出预兆之间紧密相关，根据 AE 信号规律预测煤与瓦斯突出理论上是可行的^[51]。

煤岩体声发射信号是煤岩体平衡系统失稳的条件下，岩体断裂发出的，因此研究掘进工作面前方声发射规律，对于预防煤与瓦斯突出灾害事故有着极其重要的意义。

2.1 AE 声发射技术

声发射是固体材料变形过程中，其弹性应变能以应力波的形式在介质中传播的一种现象。大量的经验表明，绝大部分固体材料受力变形时均会产生声发射。20 世纪 30 年

代末美国矿山局的两位研究人员 L.Obert 和 W. IDuval 发现了岩体声发射现象,他们开创性的工作导致了岩土工程中一门独特的技术——岩体声发射技术的发生和发展^[45]。

我国从 20 世纪 70 年代开始进行声发射技术的研究工作,到目前为止,在许多领域取得了令人满意的成果,研制出多种声发射信号监测仪器。但用发展的眼光看,从处理方面,目前还必须着重研究其抗干扰能力、参数提取及波形识别的能力。

美国的声发射监测网络已形成大型网络化系统,井下、地面计算机操作员可以提取任何一个节点进行处理分析,并且该网络通过电话线与科罗拉多丹佛中心相连,实现了在现场和丹佛中心同时进行实时分析。由此可见,网络化的声发射系统是声发射仪发展的成果标志。

近年来声发射技术已广泛应用于冲击地压、煤与瓦斯突出及顶板大面来压等预测预报、地应力测试、岩体稳定性评价等方面。

2.1.1 声发射机理

许多研究者研究发现,煤岩压缩破坏实质是固有缺陷(如局部的微小孔洞和裂纹等)受到拉伸作用扩展汇合而最后贯通的结果,微观断裂形态是拉伸损伤破坏特征。

根据连续介质损伤力学理论,损伤因子是煤岩材料损伤形成的微孔洞、微裂纹面积与材料损伤前总承载面积之比^[46]:

$$D = V_n / V \quad (2.1)$$

式中, V 为原始无损伤时材料面积, mm^2 , V_n 为损伤面积 mm^2

当 $D=0$ 时,对应于煤岩完全无损伤状态,这只是一种参考状态; $D=1$ 时对应于煤岩完全损伤状态,煤岩完全丧失任何拉应力的能力, 0 和 1 之间的中间值则代表不完全断裂。

实际的煤岩一般均有初始损伤 D_0 , 在受到拉应力作用时会产生应变,它由模量 E_f 决定。 E_f 小于材料的固有弹性模量 E 。 D 决定了断裂损伤材料已经减小的模量,即 $E_f = E(1-D)$, 因而外应力作用下储存的弹性能为:

$$U = E(1-D)\epsilon^2 / 2 \quad (2.2)$$

式中, ϵ 为应变,材料开始破坏发生断裂时 D 可看成是表征损伤断裂瞬态水平的内状态变量,根据热力学关系,得到损伤本构关系

$$\left(\frac{dU}{d\epsilon} \right)_D = E(1-D)\epsilon = \sigma \quad (2.3)$$

对材料含缺陷的微元,当应力超过极限破坏强度时,缺陷就可激活,引起损伤破坏或缺陷的演化,同时释放应变弹性能,激发声发射煤岩等材料缺陷的分布常常选用双参数的威布尔分布(Jaeger 和 Cock)

$$n(\epsilon) = k\epsilon^m \quad (2.4)$$

$$n'(\varepsilon) = km\varepsilon^{m-1} \quad (2.5)$$

式中, $n(\varepsilon)$ 为拉应变 ε 就能激活的缺陷数目, 常数 k 与 m 表征断裂活动的材料性质, $n'(\varepsilon)$ 为缺陷随应变的变化率。

当拉伸应变增加一个增量 $d\varepsilon$ 时, 参加断裂活动的新的缺陷数为:

$$dn = n'(\varepsilon)d\varepsilon \quad (2.6)$$

由于过去的损伤, 占总体积百分数为 D 的材料中, 应力已经释放, 因此实际参加激活的缺陷数目将减少, 因而乘以因子 $(1-D)$, 假定一个缺陷激活损伤破坏对应一个声发射计数, 则相应的声发射计数为:

$$dN = (1-D)n'(\varepsilon)d\varepsilon \quad (2.7)$$

将(2.5)式代入(2.7)式得

$$dN = km(1-d)\varepsilon^{m-1}d\varepsilon \quad (2.8)$$

考虑材料缺陷分布、激活的随机性及各种随机因素, 加入随机因子 $r(\varepsilon)$, 由式(2.8)可导出累计声发射计数 N 为: $r(\varepsilon)$

$$N = r(\varepsilon) \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} km(1-D)\varepsilon^{m-1}d\varepsilon \quad (2.9)$$

式中, ε_0 为材料初始损伤的应变, 随机因子 $r(\varepsilon)$ 是 $[0, 1]$ 区间上随机数。相应的声发射变化率为:

$$N(t) = \frac{dN}{dt} = r(\varepsilon)km(1-D)\varepsilon^{m-1} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.10)$$

式(2.9)、(2.10)即为煤岩等材料加载破坏过程中的声发射理论模型这个模型说明声发射计数和声发射变化率主要取决于损伤因子、瞬态应变和应变速率, 而且还与材料性质固有缺陷总数、材料尺度、均质度等关系密切。

在煤岩体的受力破坏过程中, 其内部将产生微破裂, 同时原始的裂隙、裂纹不断扩展、断裂、汇合贯通。其间, 以弹性波的形式释放应变能的现象为声发射。根据声发射信号的特征可以推断出受力岩石内部的性态变化, 反演出岩石的破坏机制及破坏程度。具有突出危险的煤体内部存在大量裂隙等原始损伤, 其声发射现象十分显著, 利用声发射特征可作为新的探测途径进行煤岩动力灾害预测预报^[47]。

采掘工作面前方煤岩体由于受到采掘活动的影响将产生应力重新分布, 使得在离工作面不远的范围内形成应力集中, 煤岩体发生变形而积聚大量的弹性潜能。当这种变形达到极限时, 煤岩体失稳破坏, 弹性潜能部分释放, 促使煤岩体质点产生振动而转变成声响, 并在煤岩体中传播, 甚至传入采掘空间, 这就是我们通常所说的“煤炮声”。

声发射正是基于这一原理, 采用速度计测量质点振动速度(或加速度)和频率, 以此来判断煤岩体的破坏情况, 并预测其破坏发展趋势, 也即可用来预测煤与瓦斯突出危

险性^[48]。

另外，煤与瓦斯突出的环境因素主要包括：地应力、瓦斯压力、地质构造、地下水、地温及煤的力学性质^[49]。地应力增大时，声发射信号必然增大，瓦斯压力越大、煤质越软、造成的声发射信号也越多，所以可认为声发射突出预测指标是一种综合指标，提供突出的前兆信息，基本监测原理如图2.1。

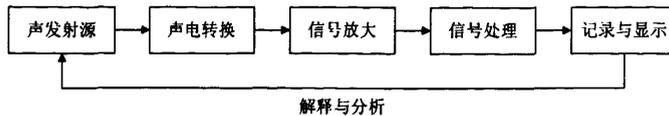


图2.1 声发射监测原理

2.1.2 声发射基础参数

根据参数本身的内涵和对声发射过程描述的方式和角度不同，声发射参数可以分为基本参数和特征参数两类。基本参数指通过测试仪器直接得到的时域或频域参数，而声发射特征参数则是指从声发射基本参数序列中提取的有关过程或状态变化的信息。

基本参数和特征参数又可进一步分为过程参数和状态参数。过程参数是对整个声发射过程或某个子过程的描述，是过程总体行为的反映。而状态参数反映的则是在声发射过程中的某一状态下（瞬间）的声发射行为，是瞬时量。在常用的声发射基本参数中，累积参数（如累积事件数、振铃计数和累积释放能量等）和统计参数（如幅度分布、频率分布和上升时间分布等）都属于过程参数，而声发射事件率、声发射率和能率等则应属于状态参数。

在实际应用中，不仅要选择合适的基本参数，而且要根据需要选取和构造合理的特征参数。由于特征参数是相对量，不同的特征参数便有不用区分的能力，在构造和选取特征参数时，一方面应以声发射过程的基本属性为根据，即应最大限度地反应声发射过程的基本属性，以尽可能地提取声发射信号中所包含的有用信息；另一方面，应根据目的选择最具有区分性的特征^[52]。

声发射通常用与声发射事件的发生率和大小有关的参数及与单一事件或一组事件的频率有关的参数来描述，见表2.1。通常规定了下列参数^[50]：

- (1) 累计事件数——某特定时间内观测的事件总数；
- (2) 声发射事件率——每单位时间(Δt)内观测到的声发射次数；
- (3) 声发射幅度——在任一时间内所记录到每一事件的最大振幅；
- (4) 声发射能量——在任一时间内事件振幅的平方；
- (5) 累计能量——在某一特定时间间隔内所有事件的声发射能的和；
- (6) 能率——单位时间(Δt)内所观察到全部事件的声发射能。

表2.1 声发射常用参数^[51]

参数	含义	特点及用途
事件计数	岩石等材料一个固有缺陷被激活, 释放一次弹性应力波称为一个声发射事件	反映材料固有缺陷的总量和频度, 用于缺陷源的活动性和缺陷动态变化趋势评价
振铃计数	越过门槛信号的振荡次数, 可分为总计数和计数率	信号处理简便, 适于两类信号, 又能粗略反映信号强度和频度, 因而广泛用于声发射活动评价, 但受门槛值大小的影响
能量	信号检波包络线下的面积	反映声发射事件的相对能量或强度, 传播距离和衰减对能量影响很大
持续时间	信号第一次越过门槛至最终降至门槛所经历的时间间隔	与振铃计数十分相似, 但常用于波形特征分析、特殊波源类型识别和噪声的鉴别
上升时间	信号第一次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔	因受传播的影响而其物理意义变得不太明确, 如上升时间长可能传播距离较远, 但它也可能是其它连续性噪声干扰
到达时间	一个声发射波到达传感器的时间	决定于波源的位置、传感器间距和传播速度, 用于破坏源的位置解算
幅度	信号波形的最大振幅值	与事件大小有直接的关系, 直接决定事件的可测性, 常用于波源的类别鉴别、强度和衰减的测量

在声发射预测煤与瓦斯突出中, 通常用的监测参数有大事件、小事件和能量。其中大事件指有矿压显现的大型破坏信号, 小事件指煤岩体的微观破碎信号, 能量是煤岩体声发射产生的能量。其中, 大、小事件是根据岩石力学试验的强度破坏情况确定的临界值进行区分的。

2.1.3 声发射监测传感器

在实际使用过程中, 需要对声发射的各种参数进行选择、数据分析, 并建立预测模型, 进而研发出相应的传感器, 如西安科技大学西科测控的GDD-1型矿用动态传感器就是其中的一种^[53], 如图2.2。

应用声发射技术开发的传感器, 其原理是监测煤岩破坏时的声波; 煤岩破坏时的声波与矿山压力的活动密切相关, 其声波强度的大小又反映了矿山压力显现的大小, 因此把这种传感器称为矿压动态传感器。该传感器可单独运行自成体系, 也可挂接已有煤矿环境监控系统。

2.1.3.1 用途

该传感器是为监控矿井顶板受集中应力作用发生大面积冒顶事故而研制的专用仪表, 自动将顶板受动压作用破坏而产生的弹性应力波(声发射)转变为标准电信号输送给关联设备, 具有就地显示矿压动态值的功能。经国家防爆检验单位进行联机检验后, 可与国内各类型的监测监控系统及分站配套, 适合顶板压力大、有突出和冲击地压危险

的煤矿井下作业点矿压动态的监测和监控。

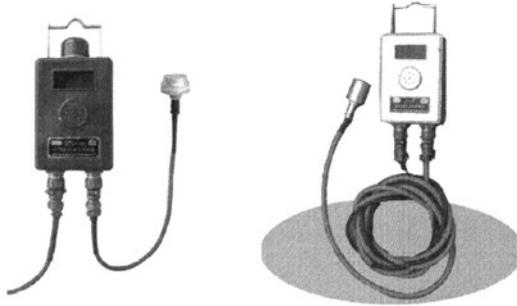


图 2.2 GDD-1 型矿用动态传感器

2.1.3.2 性能特点

该传感器采用了新型单片机和高集成智能电路，结构简单、性能可靠、便于维护与调试；锌铜合金压铸模外壳，由于密封性好，彻底解决了传感器的防潮、防尘问题，传感器的使用寿命得到提高，特别适合于综采放顶煤等煤尘大、潮湿工作面动态监控；采用新型无源压电晶体元件，传感元件寿命大于三年，传感器性能更加稳定，调校周期大大延长；传感器的功耗较低，大大增加传感器的传输距离。

2.1.3.3 技术参数

GDD-1型矿用动态传感器适用与环境温度为 $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 98\%$ （ 25°C ）含有甲烷或煤尘爆炸危险的矿井环境中，主要技术参数见表2.2。

表2.2 动态传感器的主要技术参数

名称	技术指标值	名称	技术指标值
灵敏度	$\leq 2\text{g}$	通讯方式	2线时分制，1200bit/s或200~1000hz
监控频率范围	100Hz~5000Hz	显示方式	5位数码管显示，指示灯显示
信号类型	脉冲量	工作电压	9~18V DC
信号带载能力	$\geq 500\Omega$	工作电流	$\leq 70\text{mA}$ （18V DC）
元件监测速度	$\leq 10\mu\text{s}$	防爆等级	Exib I 矿用本安型

2.1.3.4 工作原理

GDD-1矿用矿压动态传感器通过监控在矿压作用下岩石破坏产生的弹性应力波的原理测量矿压动态变化。当人员采动或工作面推进到地质构造区时，受集中应力作用岩石发生破坏（微观破碎称小事件，有明显矿压显现的破坏称为大事件）时，产生弹性应力波（弹性应力波强度与破坏程度成正比），应力波在岩石中传播，由安装在岩石中的传感元件——压电晶体将接收到的应力波转变为电信号，该信号经放大处理，以脉冲量的方式输出电讯号，该电信号就反映了此时环境矿压动态的大小。

该信号经A/D转换后，送入单片机进行分析和运算，将分析结果通过数码管显示出

来。并根据报警值的设置情况进行相应处理。

该传感器电气原理方框图如图2.3:

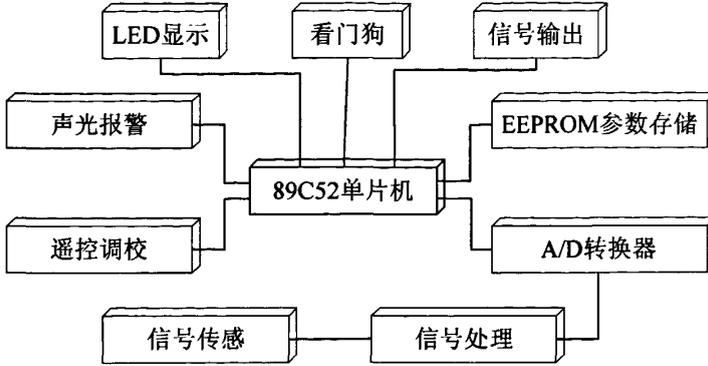


图 2.3 GDD-1 型矿用动态传感器电气原理示意

2.1.3.5 测试系统

煤与瓦斯突出预测中，矿压动态传感器信号采集及传输过程如图 2.4 所示。本文主要通过搭接在西安西科测控设备有限责任公司的 KJ110N 型矿井安全监控系统来采集数据的，如图 2.5 所示。KJ110N 型矿井安全综合监控系统是在现有监测系统的基础上，根据我国煤矿生产的实际和多年来与自然灾害斗争的实际经验，以多种自然灾害的预报为目标而研制的新一代安全监控系统^[54]。

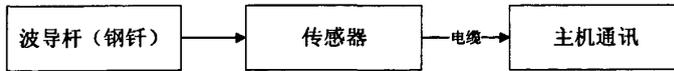


图2.4 试验系统示意图

整个系统具有三级网络结构形式，是一个先进的集散型系统。先进可靠的软件，总线型的分站和传感器使系统保持领先的技术水平。局部传感器及其连接线的故障不影响系统的正常工作，从而确保整个系统的可靠性；井下传感器以分站为单位（包括该分站）集中供电，这样确保了系统的安全性能，也提高了整个系统的抗干扰能力；系统配有多种智能化传感器，可以直接挂接总线。总线型瓦斯传感器具有记忆(如量程、报警、断电值等)、显示、报警、断电、传感和红外设定各种参数等功能；监测数据采用不变不存的技术，即保证了数据的真实性，又节省了存贮空间，因此，该系统对数据存贮时间基本没有限制；能够以跟踪曲线、历史曲线、数据表、柱状图的方式查询原始数据；以平均值日报表、监测日报表、设备运行日报表、抽放监测日报表、故障诊断日报表方式输出分析、统计的数据；以采区布置图、设备动化图的方式显示矿井设备运行工况。

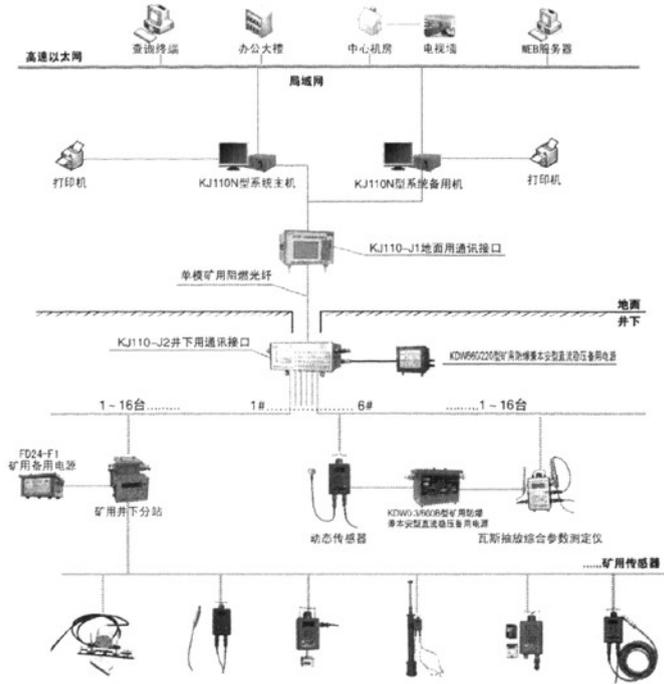


图 2.5 KJ110N 型矿井安全综合监控系统

2.2 掘进工作面的声发射预测单项指标

声发射技术监测过程中影响数据有效性的主要因素是井下噪音，主要包括放炮、风钻作业、刮板运输机、锚杆（索）钻机作业支护等。机械噪音因其设备运行的固有频率决定而具有周期性，而人工作业与煤岩破坏产生的声发射信号极为相似，但是具有很强的偶然性，可以通过数据分析进行剔除。另外，由于安装工艺及安装位置的变动，对声发射结果会有一定的影响。

西科测控的 GDD-1 型矿压动态传感器日常监测采集到的基础数据包括大事件数、小事件数和能量三种。由于生产变化、矿井停电、系统故障、数据丢失、动态传感器安装位置、井下外界噪音及地质构造影响等诸多原因，监控系统采集到的动态数据具有下列特点：

- (1) 由于安装工艺、地质因素等，采集到的动态数据离散度大，真值的可参考性较差；
- (2) 日常掘进过程中以声发射数据以小事件数居多；
- (3) 事件数曲线较为密集的时段，对应常规预测指标中的钻屑量也较大，有较好的一致性。

2.2.1 声发射指标的建立

基于 AE 传感器所采集数据的上述特点，建立煤与瓦斯突出实时跟踪预测几个单项指标：大、小事件的频数 f 和趋势 Q 、能量和 E 。

各参数的含义如下：

动态频数 f ——单位时间内采集到数据的个数；通过对数据库建立用户表及存储过程的方式，当事件数变化一次，则频数增加一次，可以通过 SQL 语句对动态频数进行查询并做出相应的频数曲线；

动态趋势 Q ——单位时间内比前一个值大的值个数与单位时间段内正常值个数的比值；

能量和 E ——一定时间长度内能量的累计值。

2.2.2 突出危险的声发射指标判定模型

研究资料表明：在具有突出危险的煤层中掘进，真正具有突出危险的区域，在全部掘进巷道中所占的比例很小，不足 10%，有的资料认为仅有 5% 左右，大部分巷道都是在没有突出危险的正常区域，声发射和瓦斯涌出的测定值的分布形状正是形似正态分布的图形，因此用正态分布函数来描述突出实时监测系统采集到的数据是很合适的^[11]。

正态分布有如下特点：

①标准正态分布时区间 $(-1,1)$ 或正态分布时区间 $(\mu-1\sigma,\mu+1\sigma)$ 的面积占总面积的 68.27%；

②标准正态分布时区间 $(-1.96,1.96)$ 或正态分布区间 $(\mu-1.96\sigma,\mu+1.96\sigma)$ 的面积占总面积的 95%；

③标准正态分布时区间 $(-2.58,2.58)$ 或正态分布时区间 $(\mu-2.58\sigma,\mu+2.58\sigma)$ 的面积占总面积的 99%。 $(\mu-3\sigma)$ 的面积比例为 99.74%， $(\mu-2\sigma)$ 面积比例为 95.44%。

基础数据处理后的基础参数动态频数 f 、趋势 Q 以及能量和 E ，依据正态分布的建立突出危险性预测的单项指标预测模型：

$$|X_{i,h} - \mu_i| > \alpha \cdot S \quad (2.11)$$

式中： $X_{i,h}$ —— t 时刻包含 h 时长范围历史数据的 AE 参数均值的离群值；

μ_i —— t 时间长度内的 AE 参数总体均值；

α ——随机误差的范围系数，根据正常范围的 2σ 原则，取值为 2；

S ——测定值的样本值标准差。

在坏值滤除的情况下建立的 AE 基础参数，为了避免离群值的误报影响，选择长时指标进行评价，若单项动态大事件频数 La_j 的长时指标出现离群点，则系统报警，以此

来起到一定的警示作用,这里根据矿井现场“三八制”掘进作业的模式,选择 8h 作为长时指标,即相应的包含大事件频数 La_f 、大事件趋势 La_Q 、小事件频数 Lo_f 、小事件趋势 Lo_Q 以及能量和 E 。但是仅有长时指标,系统敏感性就较低,因此为增加其实时性,同时选用了短时指标,短时指标的选取需要一定的现场经验,本文中选用 3h 作为其短时指标。

一般情况下,长时指标数据量多,不易受到新数据的影响,但灵敏度差,短时指标准确性差,但灵敏度好。

2.2.3 模型检验及危险性判断

假设检验是数理统计学中根据一定假设条件由样本推断总体的一种方法。具体作法是:根据问题的需要对所研究的总体作某种假设,记作 H_0 ;选取合适的统计量,这个统计量的选取要使得在假设 H_0 成立时,其分布为已知;由实测的样本,计算出统计量的值,并根据预先给定的显著性水平进行检验,作出拒绝或接受假设 H_0 的判断。常用的假设检验方法有 u —检验法、 t —检验法、 X^2 检验法、 F —检验法等。

由于对于模型的检验主要是对参数值总体的统计平均值代替样本平均值,采用适用于当方差未知时检验期望的 t 检验,可以判断监测区域某参数是否发生实质性变化,监测工作面是否进入突出危险区域。

单总体 t 检验模型:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S/\sqrt{n-1}} \quad (2.12)$$

式中: \bar{X} ——监测值的样本均值;

μ_0 ——总体均值;

S ——监测值值的样本值标准差;

n ——监测值的样本个数。

显著水平为 α ($0 < \alpha < 1$) 的检验,假设为: $H_0: \mu = \mu_0$, $H_1: \mu \neq \mu_0$, 在 H_0 成立的情况下, $t \sim t(n-1)$, 当 $t > t_{1-\alpha}(n-1)$ 时,样本均值与总体均值相比,发生显著变化;当 $t < -t_{1-\alpha}(n-1)$ 时,样本均值与总体均值相比,未发生显著变化。

2.3 声发射项综合指标

煤与瓦斯突出危险性预测可视为一个多因素决定的模糊事件^[63]。目前国内外有关煤与瓦斯突出预测方法很多,层次分析-模糊综合评判方法是一种对多个因素所影响的事物进行综合评判的有效方法,可以综合考虑多种因素的共同作用,判别工作面的突出危险性。

2.3.1 层次分析-模糊综合法

层次分析法^[64]又称多层次权重解析法,是将决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法,由美国著名运筹学家、匹兹堡大学萨蒂教授于20世纪70年代初首次提出。

模糊综合评判^[65]就是应用模糊变换原理和最大隶属度原则,首先考虑与被评价事物相关的各个因素,对其进行综合评价,然后对这些因素进行综合分析,最终得出综合评判结果。它作为模糊数学的一种具体应用方法,最早是由我国学者汪培庄提出,是一种对多个因素影响的事物进行综合评判的方法。

层次分析-模糊综合模型的建立过程:

- (1) 建立影响因子集。影响评判对象的各个因素构成因子集,用 U 表示: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$;其中, u_m 表示第 m 个影响因子, m 表示影响因子数;
- (2) 建立危险性评价等级。评判结果组成危险性评价等级集合,用 V 表示: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$;其中, v_n 表示第 n 个评价结果, n 表示评价结果数。模糊综合评判的目的是在综合考虑所有因子,从中选出一个最佳评价结果。
- (3) 确定单因素权重向量。单因素权重向量的大小反映了煤与瓦斯突出因子的权重,即对煤与瓦斯突出危险性影响程度的大小。
- (4) 构造关系模糊矩阵。单因子标准隶属度模糊矩阵由各单因子隶属度组成。一个具体的模糊对象,首先确定合理的隶属函数,然后应用模糊数学方法进行定量分析;
- (5) 模糊综合评判。模糊综合评判方法应用模糊变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,对其进行综合评价。首先要考虑各个相关因素,然后对这些因素进行综合分析,最终得出综合评判结果。

下面运用层次分析-模糊综合模型建立声发射综合指标和瓦斯综合指标。

2.3.2 声发射项综合指标

通过对煤与瓦斯突出声发射基础数据的处理,建立了大、小事件的频数 f 和趋势 Q 、能量和 E 三类声发射单项实时预测指标,并根据现场实际需要,设定8h的长时指标和3h的短时指标。这样声发射指标在实际应用中就包含8h长时指标以及3h短时指标的大事件频数 La_f 、大事件趋势 La_Q 、小事件频数 Lo_f 、小事件趋势 Lo_Q 、能量和 E ,综合起来共十种基本指标参数。

(1) 建立煤与瓦斯突出影响因子集

$$U = \{La_{f,8}(i), La_{Q,8}(i), Lo_{f,8}(i), Lo_{Q,8}(i), E_8(i), La_{f,3}(i), La_{Q,3}(i), Lo_{f,3}(i), Lo_{Q,3}(i), E_3(i)\} \quad (2.13)$$

(2) 建立煤与瓦斯突出危险性评价等级

《防治煤与瓦斯突出细则》中将掘进工作面突出危险性分为无突出危险和突出危险

两个等级, 本文依据实际情况将危险性等级划分为一般突出危险、中等突出危险、严重突出危险三个等级, 即 $V = \{v_1, v_2, v_3\}$ 。

(3) 确定单因子权重向量 B

采用层次分析法的九级分制构造影响因子判断矩阵 A [63], 如表 2.3。根据现场实践经验构造如表 2.4。

① 计算判断矩阵 A 的特征向量 W , 特征向量计算公式:

$$\bar{W}_i = \sqrt[10]{\prod_{j=1}^{10} a_{ij}}, i = 1, 2, \dots, 10 \quad (2.14)$$

② 向量正规化计算公式:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^{10} \bar{W}_i}, i = 1, 2, \dots, 10 \quad (2.15)$$

③ 特征向量计算结果见表 2.3;

④ 求最大特征值 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

经计算得 $\lambda_{\max} = 10.394$

⑤ 一致性检验。为了检验上述特征向量 W 的可信度, 需要对判断矩阵进行一致性检验。当 CR 值小于 0.1 时, 判断矩阵才具有满意的一致性; 否则就需要调整判断矩阵, 检验公式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.17)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2.18)$$

式中, 平均随机性 RI 值见表 3.4

利用公式 2.17、2.18 及表 2.5、2.6 计算出 $CR = 0.075 < 0.1$, 满足一致性要求, 所以单因子权重向量 B :

$$B = W = \{0.083, 0.220, 0.103, 0.141, 0.221, 0.034, 0.060, 0.024, 0.042, 0.067\}。$$

表 2.3 九级分制

甲指标与乙指标比	极重要	很重要	重要	略重要	相等	略不重要	不重要	很不重要	极其不重要
评价值	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9
备注: 取 9, 6, 4, 2, 1/2, 1/4, 1/8 为上述评价值的中间值									

表 2.4 煤与瓦斯突出影响因子判断矩阵

A	$La_{f,8}$	$La_{Q,8}$	$Lo_{f,8}$	$Lo_{Q,8}$	E_8	$La_{f,3}$	$La_{Q,3}$	$Lo_{f,3}$	$Lo_{Q,3}$	E_3
$La_{f,8}$	1	1/2	2	2	2	1/4	6	2	7	3
$La_{Q,8}$	2	1	4	2	1/4	6	2	7	3	1/2
$Lo_{f,8}$	1/2	1/4	1	1/2	1/4	2	1/2	3	2	1/6
$Lo_{Q,8}$	1/2	1/2	2	1	1/4	3	2	6	3	1/6
E_8	4	4	4	4	1	9	8	9	8	3
$La_{f,3}$	1/3	1/6	1/2	1/3	1/9	1	1/2	2	2	1/7
$La_{Q,3}$	1/2	1/2	2	1/2	1/8	2	1	2	1/2	1/8
$Lo_{f,3}$	1/3	1/7	1/3	1/6	1/9	1/2	1/2	1	1/2	1/6
$Lo_{Q,3}$	1/2	1/3	1/2	1/3	1/8	1/2	2	2	1	1/5
E_3	4	2	6	6	1/3	7	8	6	5	1

表 2.5 特征向量计算结果显示

\bar{W}_1	\bar{W}_2	\bar{W}_3	\bar{W}_4	\bar{W}_5	\bar{W}_6	\bar{W}_7	\bar{W}_8	\bar{W}_9	\bar{W}_{10}	$\sum_{i=1}^{10} \bar{W}_i$
1.06	2.81	1.32	1.81	2.83	0.44	0.77	0.31	0.54	0.86	12.75
W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	
0.083	0.220	0.103	0.141	0.221	0.034	0.060	0.024	0.042	0.067	

表 2.6 平均随机性 RI 值^[63]

维数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI 值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(4) 构造突出影响因子模糊关系矩阵

$$\circ R = \begin{pmatrix} La_{f,8}(i)La_{f,8}(i) & La_{f,8}(i)La_{Q,8}(i) & \cdots & La_{f,8}(i)E_3(i) \\ La_{Q,8}(i)La_{f,8}(i) & La_{Q,8}(i)La_{Q,8}(i) & \cdots & La_{Q,8}(i)E_3(i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_3(i)La_{f,8}(i) & E_3(i)La_{Q,8}(i) & \cdots & E_3(i)E_3(i) \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

模糊关系矩阵中的各分量表示因素的相对重要性,即 R 是因子集 U 到评价集 V 的一个模糊关系,表示因素 U 对 V 的隶属度。各因子对突出的影响均为正相关的,因此运用升半梯形分布建立各因子对突出危险评级等级的隶属函数 $f(x)$,其值 β 定义为单因子突出危险度,隶属函数如图 2.6。

$$f(x) = \begin{cases} 1 & , x_i \leq \sigma \\ \frac{2\sigma - x_i}{\sigma} & , \sigma \leq x_i \leq 2\sigma \\ 0 & , x_i > 2\sigma \end{cases} \quad (AB2\sigma\alpha - \text{无突出危险}) \quad (2.20)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , x_i \leq \sigma \\ \frac{x - \sigma_i}{\sigma} & , \sigma < x_i \leq 2\sigma \\ \frac{3\sigma - x_i}{\sigma} & , 2\sigma < x_i < 3\sigma \\ 0 & , x_i \geq 3\sigma \end{cases} \quad (o\sigma C3\sigma\alpha - \text{中等突出危险}) \quad (2.21)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , x_i \leq 2\sigma \\ \frac{x - 2\sigma_i}{\sigma} & , 2\sigma \leq x_i \leq 3\sigma \\ 1 & , x_i > 3\sigma \end{cases} \quad (o2\sigma DE - \text{严重突出危险}) \quad (2.22)$$

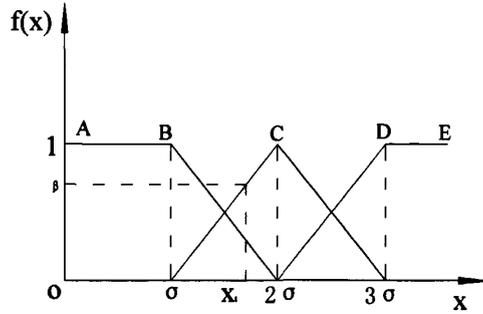


图 2.6 突出危险评价等级梯形隶属函数

(5) 突出危险单级模糊综合判据指标

$$C = B \circ R = (La_{f,8}(i), La_{Q,8}(i), Lo_{f,8}(i), Lo_{Q,8}(i), E_8(i), La_{f,3}(i), La_{Q,3}(i), Lo_{f,3}(i), Lo_{Q,3}(i), E_3(i))$$

$$\begin{pmatrix} La_{f,8}(i)La_{f,8}(i) & La_{f,8}(i)La_{Q,8}(i) & \cdots & La_{f,8}(i)E_3(i) \\ La_{Q,8}(i)La_{f,8}(i) & La_{Q,8}(i)La_{Q,8}(i) & \cdots & La_{Q,8}(i)E_3(i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_3(i)La_{f,8}(i) & E_3(i)La_{Q,8}(i) & \cdots & E_3(i)E_3(i) \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_{10}) \quad (2.23)$$

C 为抉择评语集 U 上的等级模糊子集, b_j 为等级 U_j 对综合评估所得等级模糊子集的隶属度。 B 为因子重要程度(被评判因素对煤与瓦斯突出危险综合指标的权重)向量。

(6) 判据指标结果处理采用最大隶属度法: $MAX(b_1, b_2, \dots, b_{10})$, 根据对应的等级类型确定突出危险性, 最终以 $AE = MAX(b_1, b_2, \dots, b_{10})$ 来表现。

2.4 本章小结

分析了声发射采集事件数的特点，建立了大、小事件的频数 f 和趋势 Q 、能量和 E 三类声发射单项实时预测指标，并根据现场实际需要，设定 8h 长时指标和 3h 短时指标。初步设定影响因子权重向量 B 及梯形突出危险性隶属函数 $f(x)$ ，建立了声发射项综合指标 AE ，其中 $B = \{0.083, 0.220, 0.103, 0.141, 0.221, 0.034, 0.060, 0.024, 0.042, 0.067\}$ 。

3 煤与瓦斯突出工作面的瓦斯动态涌出预测研究

大量的理论研究和现场考察都表明,掘进工作面前方煤体瓦斯涌出的动态变化与煤体的突出危险性相一致,为煤与瓦斯突出预测提供前兆信息^[55-57]。《防治煤与瓦斯突出细则》中规定的钻孔瓦斯涌出量指标虽简单实用,但仍需一定的工程量,如需打测定钻孔等,预测作业时间较长,对生产有一定的影响。因此基于矿井安全监控系统的瓦斯涌出动态特征分析指标作为非接触式连续预测工作面突出危险性预测是完全可行的。

另外,矿井瓦斯涌出情况是瓦斯特征的一个结果表现,选择其作为煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测中的一个基础参数有着重要的合理性。

从统计意义上讲,所谓时间序列就是将某一个指标在不同时间上的不同数值,按照时间的先后顺序排列而成的数列。时间序列是所研究系统的历史行为的客观记录,因而它包含了系统结构特征(如周期、振幅、趋势等);揭示其运行规律,可以用以预测、控制其未来行为。

时间序列具有如下特点^[59-60]:

- (1) 序列中的数据或数据点的位置依赖于时间,即数据的取值依赖于时间的变化,但不一定是时间 t 的严格函数;
- (2) 每一时刻上的取值或数据点的位置具有一定的随机性,不可能完全准确用历史值预测;
- (3) 前后时刻的数值或数据点的位置有一点的相关性,这种相关性就是系统的动态规律;
- (4) 从整体上看,时间序列往往呈现某种趋势性或出现周期性变化的现象。

基于时间序列的上述特点,从系统的观点看,突出是一个复杂的非线性动力系统在时空演化过程中的灾变行为,作为这一过程的力学响应(突出前兆),煤体瓦斯涌出动态数据这一时间序列必然按照其数据顺序和数据大小蕴含大量有关系统动态演化过程的痕迹和特征信息。因而将时间序列分析应用在防突掘进工作面瓦斯动态涌出规律研究有着重要的合理性。

实际上目前煤矿现场均安装有煤矿综合安全监控系统,包括煤矿安全生产所需要的瓦斯等井下气体环境监测以及开停、风门、馈电、皮带等工况监测,均以实时数据的形式存储在数据库中,并有相应的数据报表。瓦斯监测传感器不仅监测到瓦斯浓度值,而且能够监测到瓦斯浓度变化信息。如果在煤与瓦斯突出的孕育发展过程中,实时跟踪煤矿井下瓦斯浓度数据的变化,提取其中的潜在信息,能够实现煤与瓦斯突出的实时预报。

本文以监测的瓦斯浓度数据为研究对象,建立了突出异常信息提取模型,实证分析了有突出危险的异常信息,并构造瓦斯单项指标,为利用监控系统预报煤与瓦斯突出提

供了方法基础和理论依据。

3.1 时间序列分析

不论是经济领域中每年的产值、国民收入、某一商品在某一市场上的销量、价格波动，或是社会领域中某一地区的人口数、铁路旅客流量等，还是自然领域的月降雨量、河流流量以及煤矿中的瓦斯涌出量等等，都形成了一个时间序列。所有这些序列的基本点就是每一个序列包含了产生该序列的系统的历史行为的全部信息。问题在于怎样根据这些时间序列，较精确的找出相应系统的内在统计特性和发展规律，尽可能多地从中提取我们所需要的准确信息。

用来实现上述目的整个方法称为时间序列分析。它是一种根据动态数据揭示系统动态结构和规律的统计方法，是统计学的一个分支。其基本思想是根据系统的有限长度的运行记录（观察数据），建立能够精确地反映时间序列中所包含的动态依存关系的数学模型，并借以对系统的未来行为进行预报。

时间序列分析的作用主要有以下几个方面^[59]：

- (1) 对理论模式与数据进行适度检验，以讨论模式是否能正确地表示所观测的现象；
- (2) 刻画系统所处的状态及其结构性，从而达到认识和解释系统的目的；
- (3) 描述系统的运行规律性，从而达到认识规律和掌握规律性的目的；
- (4) 预测系统的未来行为，从而达到利用规律的目的；
- (5) 控制系统的未来行为，从而达到利用和支配系统的目的。

时间序列分析处理加工的是来自所研究系统的时间序列数据。因此，建立一个时间序列是时间序列分析的第一步。一般来说，研究者是运用记录仪或通过观察量来获取所研究系统的真实有限的数据集合的。不论通过哪一种途径获取的时间序列，在进行分析处理前，必须对所依据的资料进行认真的检查、整理，有时还需要进行适当的预处理（如缺少数据的补足）。

3.1.1 时间序列数据的采集

对于所研究系统来说，相应于时间的连续性，系统在不同时刻上的响应通常是时间 t 的连续函数。为了数字计算处理上的方便，往往只按照一定的时间间隔对所研究系统的响应进行记录和观察，我们称之为采样。相应地把记录和观察的时间间隔称为采样间隔。

时间序列包含了系统的全部信息，因而人们可以借以研究系统的动态结构和运行规律。但是，采样得到的离散时间序列丢失了系统的一部分区间信息。显然，在合理的范围内，采样间隔越小，采样值越多，信息损失就越少，数据处理量越大，处理时间、人力、财力消耗越大。在实际中，研究者只能根据所研究系统的具体特征和经验，在不过

分减少信息损失和不过分增加数据量之间做出合理选择。

3.1.2 离群点的检验与处理

离群点(outlier)是指一个时间序列中, 远离序列一般水平的极端大值和极端小值。因此, 也称为奇异值, 有时也称其为野值。

概括的说, 利群点是系统受外部干扰而造成的, 可能是采样中的误差, 如记录仪出现偏差、工作人员失误、计算差错等, 也可能是被研究现象本身由于受各种偶然非正常因素的影响而引起的, 如炮掘工作面放炮后或发生突出后瓦斯浓度急剧增大, 形成离群点。

从获得信息来看, 离群点提供了很重要的信息, 它不仅提示我们认真检查采样中是否有差错, 在进行时间序列分析前, 认真确认序列, 而且, 当确认离群点是由于系统受外部突发因素刺激而引起的时候, 它会提供关于系统稳定性、灵敏性等重要信息。

检验离群点并对其进行处理的方法很多, 但归纳起来大致有两类: 一是根据数据取值进行检查, 如果某一时刻的数值超出了一定的范围, 则认为该点是一个离群点, 并用一定的方法进行剔点(剔除离群点)处理; 另一类是对数据进行模型分析, 然后根据拟合模型后的剩余序列计算特定的统计量, 测出显著的离群点及其类型, 并用相应的模型进行修正, 然后再对修正模型进行修正, 然后再对修正的剩余序列重复上述程序, 依次测出各个离群点。

3.1.3 单变量时间序列分析流程

对未知数学模型的混沌动力系统, 通过观察或实验手段可以获得单变量时间序列 $\{x_n\}$, 做以下相空间重构: $x_n = (x_n, x_{n-\tau}, \dots, x_{n-(m-1)\tau})$, 从而形成 m 维状态空间, 在重构的 m 维状态空间中可以建立数学模型: $x_{n+1} = G(x_n)$ 。F.Takens 和 R.Mane 证明了只要适当选取 m 和 τ , 原未知数学模型的混沌力学系统的几何特征与重构的 m 维状态空间的几何特征是等价的。具体的分析流程如图 3.1。

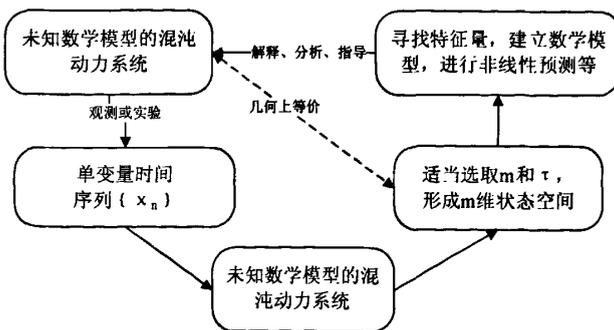


图 3.1 单变量时间序列分析流程图

3.2 掘进工作面瓦斯涌出特点

3.2.1 掘进巷道瓦斯涌出的构成

掘进巷道的瓦斯涌出包括巷道煤壁和采落煤炭的瓦斯涌出。煤为多孔介质，其裂隙构成了煤中游离瓦斯流动的通道，煤体瓦斯总是由高压瓦斯区向低压瓦斯区流动。在巷道掘进过程中，巷道周围煤体中的应力和瓦斯平衡状态被破坏，由于煤体内部到煤壁之间存在着瓦斯压力梯度，故煤体内部瓦斯沿煤体裂隙及孔隙向巷道涌出(煤壁瓦斯涌出)。

巷道掘进时，煤体被破碎成各种粒度的块状煤，提高了煤的瓦斯解吸强度，煤中瓦斯迅速涌入巷道，这部分瓦斯涌出为落煤瓦斯涌出。

3.2.2 瓦斯涌出特点

煤巷掘进工作面前方含瓦斯煤岩体的动态变化及其自然显现大致有如下三种现象：相形推移现象、应力停滞现象、“瓦斯包”现象^[61]。

① 相形推移现象

在无地质破坏和产状变化的均质煤体中等速推进时，每一个掘进循环之后，工作面前方的卸压带、应力集中带和原始应力带也相应向前推移。此时，顶底板的移近速度大体相等，煤体中的瓦斯均匀涌出，工作面的瓦斯涌出动态、声发射(AE)活动及钻孔法各项指标值均在临界值水平线下呈小幅度波动，在这种情况下，工作面处于无突出危险或突出威胁状态。

② 应力停滞现象

当工作面前方出现某种类型的地质构造破坏带时，随掘进向前推进，有时候会出现顶底板移速度减慢，甚至不移近，这就是所谓的移近停滞现象，也即是应力集中带不前移的应力停滞现象。这种现象产生的前兆信息是：随着工作面的推进，应力集中系数呈增长趋势，卸压带和应力集中带不明显；瓦斯保持较高压力且压力梯度增大，放炮时瓦斯涌出量大且衰减快，无作业时瓦斯涌出量小；声发射活动由强而弱。出现应力停滞现象后，于工作面前方不远处形成能量积聚，在这种情况下工作面很容易诱发突出。前苏联红色国际工会矿捷列卓夫卡煤层，曾 10 次观察到工作面前方出现应力停滞现象，其中 6 次在 2~6 天内发生了突出。

③ “瓦斯包”现象

煤层由薄变厚或工作面前方存在早已被构造应力高度揉皱的软煤体时，往往使人们感到有瓦斯包存在。当工作面接近瓦斯包时，集中应力部位的支撑煤柱逐渐缩短，由于地应力和瓦斯压力的作用支撑煤柱处于似稳非稳的状态，煤体裂隙时张时闭，工作面瓦斯涌出量总的呈上升趋势，有时伴随忽大忽小的现象；声发射活动由弱而强。当支撑煤

柱缩短到一定程度时, 煤体应力状态发生急剧变化, 导致潜能突然释放而发生突出。

3.2.3 突出发生前后瓦斯涌出特点

分析突出事故前后的瓦斯涌出量曲线, 都能看到一个共同的特点: 就是在突出事故发生前数天或几个小时前, 瓦斯涌出量与正常情况相比出现了明显的忽高忽低的变化 (如图 3.2), 甚至出现超限报警。

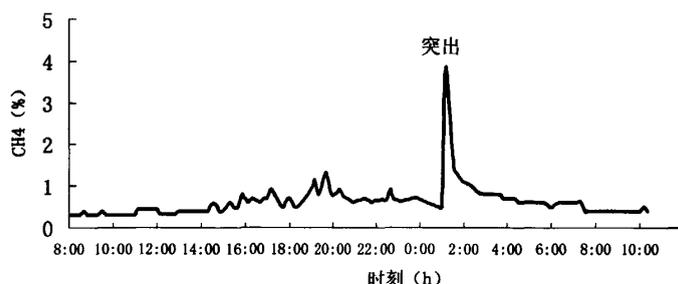


图 3.2 突出发生前后瓦斯浓度曲线^[11]

3.3 异常信息提取模型

通过对瓦斯动态涌出特点的分析以及时间序列分析本身的作用进行对比分析, 根据巷道瓦斯涌出情况实现煤与瓦斯突出的动态趋势性预报, 由于在一定时段内具体掘进工作面的瓦斯浓度会处于一定的水平, 即表现为一定的特征值, 这样当瓦斯浓度值偏离次特征值, 表现为离群点, 这些离群点所表现的异常信息可以作为预警煤与瓦斯突出的前兆信息。

本文依据瓦斯浓度变化的这种特征, 提出了煤与瓦斯突出预测预报的瓦斯单变量时间序列分析模型, 即指数平滑模型和瓦斯涌出变化模型。

3.3.1 指数平滑预测模型

3.3.1.1 模型的建立

趋势类指标通过瓦斯浓度在一定时期内的变化状况(上升、水平走向、下降), 来反映煤层中影响煤与瓦斯突出的各因素与突出的相互关系。

指数平滑是利用现有数据的加权平均数来构造趋势方程的统计方法^[59]。指数平滑值和平滑系数是该法的两个主要参数。计算公式如下:

$$\hat{y}_{t+1} = \alpha y_t + (1-\alpha)\hat{y}_t \quad (3.1)$$

式中: \hat{y}_{t+1} 为 t+1 期预测值; y_t 为 t 期监测值; \hat{y}_t 为上期平滑值; α 为平滑系数, 其取值决定了模型的含义。当观测数据序列呈现不规则变动, 但波动不大, 长期趋势变动

缓慢时,一般取 $\alpha=0.05\sim 0.45$,此时指数平滑模型是“重老信息、轻新信息”的;当观测序列波动较大,长期趋势变动明显时,一般取 $\alpha=0.55\sim 0.90$,此时平滑指数模型是“轻老信息、重新信息”的^[61]。因此,平滑指数的选择决定了模型的预测精度。

3.3.1.2 最佳平滑系数的确定

最佳的平滑常数应使实际瓦斯浓度值和预测值之间的误差最小,通常是预测误差(平均误差和标准误差)的平方和的平方根(RMSPE)最小, \bar{y} 为实际值的均值。

$$S_{\text{总}}^2 = \left(\frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t (y_i - \hat{y}_i) \right)^2 + \frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.2)$$

$$RMSPE = \sqrt{S_{\text{总}}^2}$$

3.3.2 瓦斯涌出变化模型

模型的指标主要有:偏差和方差。

偏差:一组数据偏离其平均数的值,对于不同的矿井,在使用滑动平均线判断突出发生的过程中即使曲线趋势是一致的,但矿井的煤层瓦斯含量、煤层渗透性系数等不一样,监控系统所测得的瓦斯浓度也会存在着差别。偏差反映实时瓦斯浓度偏移该区域瓦斯浓度特征值的量,这里用 Δh 时长内的瓦斯浓度滑动平均来代替瓦斯浓度特征值。

$$y(\Delta h)_t = \frac{x_t - A(\Delta h)_t}{A(\Delta h)_t} \quad (3.3)$$

式中: $A(\Delta h)_t = \frac{1}{\Delta h} \sum_{i=1}^{\Delta h} x_{t-i+1}$ (最近 Δh 时长内的瓦斯浓度滑动平均); t 为当前时刻;

Δh 为时间长度; x_t 为 t 时刻的瓦斯浓度值,本文中依据“三八”制掘进方式选用 $\Delta h=8h$ 来对实时值和特征值进行偏差分析。

方差:统计学中的方差最能描述瓦斯浓度的变化情况。因为一方面,它反映的是序列的离散程度,也即各值偏离均值的程度。方差越大,数据序列波动性越大,即瓦斯浓度变化幅度越大;方差越小,瓦斯浓度变化幅度越小。一定时间步长的瓦斯浓度值的方差表明了瓦斯涌出的变化程度。

$$\mu = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t x_i \quad (3.4)$$

$$s^2 = \frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t (x_i - \mu)^2$$

式中: μ 为序列的样本均值; s^2 为序列的样本方差; t 为时间步长,本文选用时间步长为 $1h$ 来体现实时监测值的波动情况。

3.4 瓦斯项综合指标

通过第四章对煤与瓦斯突出瓦斯数据模型的处理，建立瓦斯实时预测突出危险性的单项评价指标，包括偏差 y 和方差 S^2 两项。

瓦斯综合指标是煤与瓦斯突出非线性动力前兆信息表现的评价标准，以往的瓦斯评价停留在瓦斯曲线分析，通常通过观察的方式来实现，即通过瓦斯浓度偏离平均值的程度和偏离幅度值的大小来观察，瓦斯涌出变化模型中的偏差和方差就是这两项内容的体现，所以以此为基础，通过数据分析及函数构造建立瓦斯综合指标的评价模型。

由于煤与瓦斯突出的非线性特征，并观察正常掘进过程中的偏差-方差散点图形状特点，如图 3.3，与伯努利双纽线在第一象限的形状类似，建立数学模型。

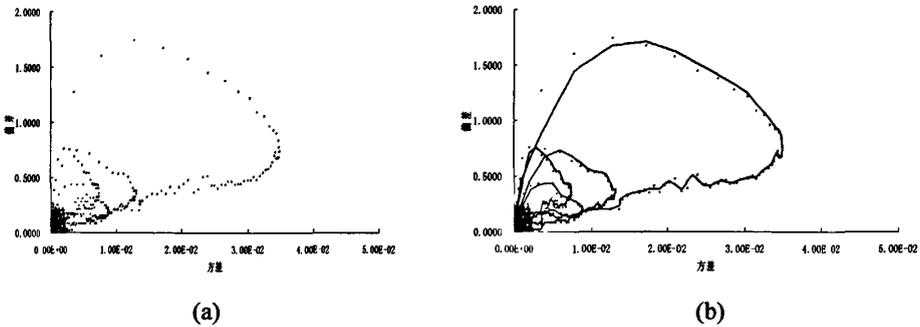


图 3.3 正常掘进过程中偏差-方差散点图示例

伯努利双纽线的标准形式为：

$$(x^2 + y^2)^2 = 2a^2xy \quad (3.5)$$

将偏差 y 和方差 S^2 进行替换，令 $x = y$ ， $y = S^2$ ，则的瓦斯项综合指标 WS 模型表达式为：

$$WS = \frac{y^2 + S^4}{S\sqrt{y}} \quad (3.6)$$

3.5 本章小结

建立了瓦斯浓度预测模型： $\hat{y}_{t+1} = \alpha y_t + (1-\alpha)\hat{y}_t$ ，并用预测误差（平均误差和标准误差）的平方和的平方根（RMSPE）最小来确定最佳平滑系数；建立了瓦斯动态分析模型，包括偏差 $y(\Delta h)_t = \frac{x_t - A(\Delta h)_t}{A(\Delta h)_t}$ 和方差 $s^2 = \frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t (x_i - \mu)^2$ 指标来检查突出前兆的瓦斯

浓度变动信息；建立了瓦斯项突出危险性实时预测综合指标 $WS = \frac{y^2 + S^4}{S\sqrt{y}}$ 。

4 突出危险工作面声发射与瓦斯涌出关联分析

前面章节分别就煤与瓦斯突出中地应力、瓦斯压力分别通过掘进工作面声发射规律和瓦斯涌出规律分析, 尽管声发射以及瓦斯动态分析均可以反应煤与瓦斯非线性动力系统发生灾变的前兆信息, 作为工作面突出危险性实时跟踪预测的两个基础指标, 目前应用较多的都是声发射和瓦斯序列单独应用分别来捕捉煤与瓦斯突出的前兆信息, 调查资料显示也很少对二者进行对比关联分析。可以结合来进行预测, 本文就声发射和瓦斯的关联规律进行分析, 并得出相应的综合指标。

4.1 煤与瓦斯突出机理

国外关于煤和瓦斯突出机理的认识包括: 地应力假说、瓦斯作用假说、化学本质假说、综合作用假说。其中前三种假说为单因素假说, 随着研究的不断深入, 目前支持综合作用假说的学者增多。综合假说认为, 煤和瓦斯突出是由瓦斯、地应力和煤的物理力学性质等多因素共同作用的结果。

国内学者根据现场资料和试验对突出机理进行研究, 提出了一些新的观点, 特别是近几年随着研究的深入及新技术手段的应用, 产生了许多新认识, 目前已能对突出发生的原因、条件、能量来源做出定性的解释和近似的定量计算, 为防治措施选择及效果检验提供理论依据, 概括起来主要有以下几方面: 中心扩张学说、流变假说、二相流假说、固流耦合失稳理论、球壳失稳观点^[35-41]。

综上所述, 综合作用假说的主要论点是:

(1)煤与瓦斯突出是地应力、高压瓦斯、煤的结构性能等三个因素综合作用的结果, 除了地压和瓦斯压力外, 在煤层中不存在任何其他导致突出的能源。

(2)地压破碎煤体是造成突出的首要原因, 而瓦斯则起着抛出煤体和搬运煤体的作用, 从突出的总能量来说, 瓦斯是完成突出的主要能源。

(3)煤的强度是形成突出的一个重要因素, 只有当煤的强度很低、煤与围岩的摩擦力不大时, 地压造成的变形潜能才能使煤体破碎。

目前, 虽然对于突出机理有着不同的观点, 但随着研究的深入, 越来越多的学者认同: 煤与瓦斯突出是由地应力、瓦斯和煤体的物理力学性质等因素综合作用的结果。

4.2 突出机理的数值试验分析

4.2.1 煤岩体非均匀性统计理论描述

煤岩体介质的非均匀性, 就是其基元体内包含的矿物、胶结物和微缺陷的物理力学

性质的差别，基元的力学性质，如弹性模量、强度、泊松比和容重等在空间上分布的不连续、不均匀性。

RFPA^{2D}-GasFlow 中利用的是 Weibull 统计分布函数来进行描述^[42]，即

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m} \quad (4.1)$$

式中： α ——煤岩体基元体力学性质参数（强度、弹性模量等）；

α_0 ——基元体力学性质的平均值；

m ——分布函数的形状参数，其物理意义反映了煤岩体的均质性，定义为煤岩体的均匀性系数；

$\varphi(\alpha)$ ——煤岩体基元力学性质 α 的统计分布密度（单位 MPa^{-1} ）。

式 2.1 反映了煤岩体细观力学性质非均匀分布的情况，随着均匀性系数 m 的增加，基元体的力学性质将集中于一个狭窄的范围之内，表明煤岩介质的性质较均匀；而当均匀性系数 m 值减小时，则基元体的力学性质分布范围变宽，表明煤岩介质的性质趋于非均匀。图 4.1 给出了不同均匀性系数岩石介质的强度或弹性模量的分布图(α 代表强度或弹性模量等力学性质参数)。

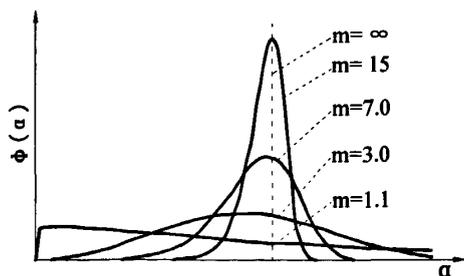


图 4.1 具有不同均匀系数材料基元体力学性质分布形式

4.2.2 煤岩-瓦斯固-气耦合模型

本文采用参考文献[4]中的煤岩体变形与煤层瓦斯流动的固-气耦合数学模型，式(4.2)~(4.5)：

$$\alpha_p \cdot \nabla^2(\lambda_i \cdot P) = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4.2)$$

其中 $\alpha_p = 4A^{-1}P^{\frac{3}{4}}$

式中， λ ——透气系数张量， $m^2/(MPa^2 \cdot d)$ ；

A ——煤层瓦斯含量系数， $m^3(t \cdot MPa^{1/2})$ ；

P ——煤层瓦斯压力的平方, $P = p^2$, MPa^2 。

$$(\kappa + G) \cdot u_{j,j} + Gu_{i,j} + f_i + (\alpha \cdot \sqrt{P})_i = 0 \quad (4.3)$$

式中, G, κ ——剪切模量和拉梅常数;

u ——煤岩体的变形位移;

f ——煤岩体的体积力分量, MPa ;

α ——煤层瓦斯压力系数, $0 < \alpha < 1$;

p ——瓦斯气体压力, MPa

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)}, D = 0 \\ \xi \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_1 - \alpha p)}, D > 0 \end{cases} \quad (\text{单轴压缩}) \quad (4.4)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)}, D = 0 \\ \xi \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - \alpha p)}, 0 < D < 1 \\ \xi' \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_3 - p)}, D = 1 \end{cases} \quad (\text{单轴拉伸}) \quad (4.5)$$

式中, λ_0 ——无应力状态下的初始透气系数;

ξ ——单元损伤情况下的透气突跳系数;

ξ' ——单元完全破坏情况下的透气突跳系数

f ——煤岩体的体积力分量, MPa ;

α ——煤层瓦斯压力系数, $0 < \alpha < 1$;

β ——应力对煤层瓦斯压力系数的影响系数, 即耦合系数。

4.2.3 煤与瓦斯突出数值模拟

(一) 数值模型

为了模拟煤与瓦斯突出过程的应力场演化、瓦斯流动过程、压力梯度分布以及瓦斯突出过程中伴随的声发射模式探测, 进一步认识突出机理。

本文采用如图 4.2 所示的数值模型, 利用西部矿井开采与灾害防治重点实验室的 RFPA^{2D} 进行模拟, 参数选用海石湾煤矿, 煤层原始瓦斯压力 7.2 MPa, 顶底板岩层不含瓦斯。采用平面应变分析, 模型尺寸 10 m × 20 m, 划分为 100 × 200 个单元。煤层厚度 2 m, 模型中岩层边界为不透气的岩层, 即瓦斯气体流量为零; 煤层掘进面瓦斯压力为 0.1 MPa, 而远离掘进工作面的煤层边界瓦斯压力为 7.2 MPa, 即处于原始瓦斯压力状态, 上覆岩体的重量通过模型的边界条件给定, 假定为 7.2 MPa。数值模型中煤岩层的力学及渗流参数见表 4.1。

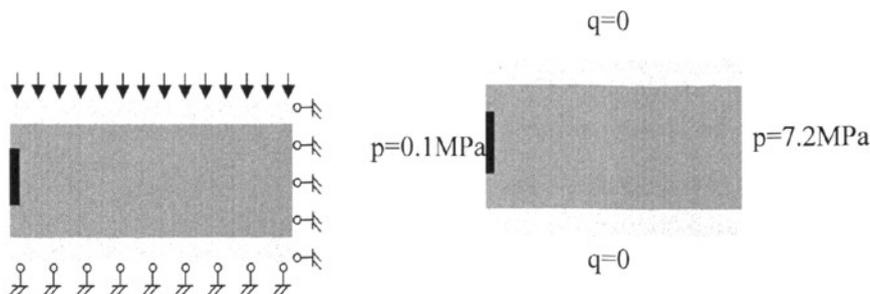


图 4.2 煤与瓦斯突出数值模型

表 4.1 煤与瓦斯突出数值模型力学及渗流参数

参数	煤体	顶底板	参数	煤体	顶底板
均值度/m	5	20	泊松比 μ	0.3	0.25
弹性模量均值 E_0 /Gpa	5	50	密度 $\gamma/10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.33	2.7
抗压强度均值 σ_0 /MPa	15	300	瓦斯含量系数 A	2	0.01
摩擦角 φ (°)	20	32	瓦斯压力系数 α	0.5	0.01
强度压拉比	25	10	耦合系数 β	0.2	0.1
透气系数 $\lambda/\text{m}^2\cdot(\text{Mpa}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0.1	0.01			

(二) 突出过程分析

数值模型计算十五步，第二步进行工作面开挖，具体突出过程中的应力及声发射、煤岩体弹性模量如图 4.4 所示。

(1) 突出过程描述

大量实际发生的煤与瓦斯突出案例以及许多学者的研究成果分析认为：煤与瓦斯突出的力学作用过程可用图 4.3 描述^[42-44]，对比数值试验进行对比。

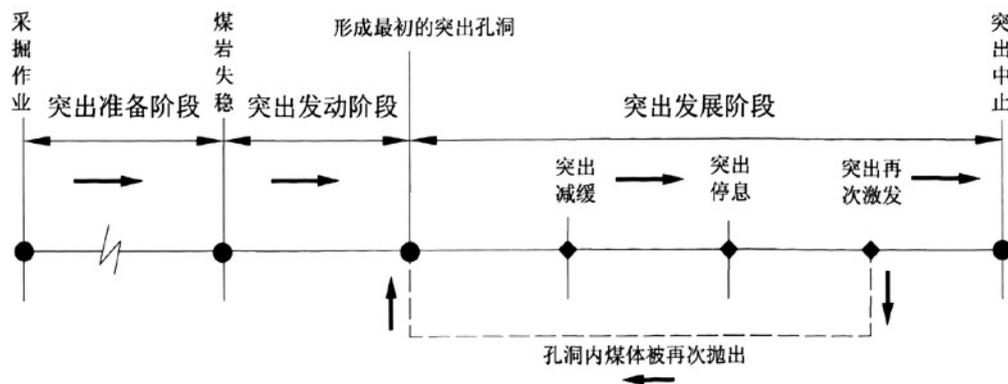


图 4.3 煤与瓦斯突出作过程描述

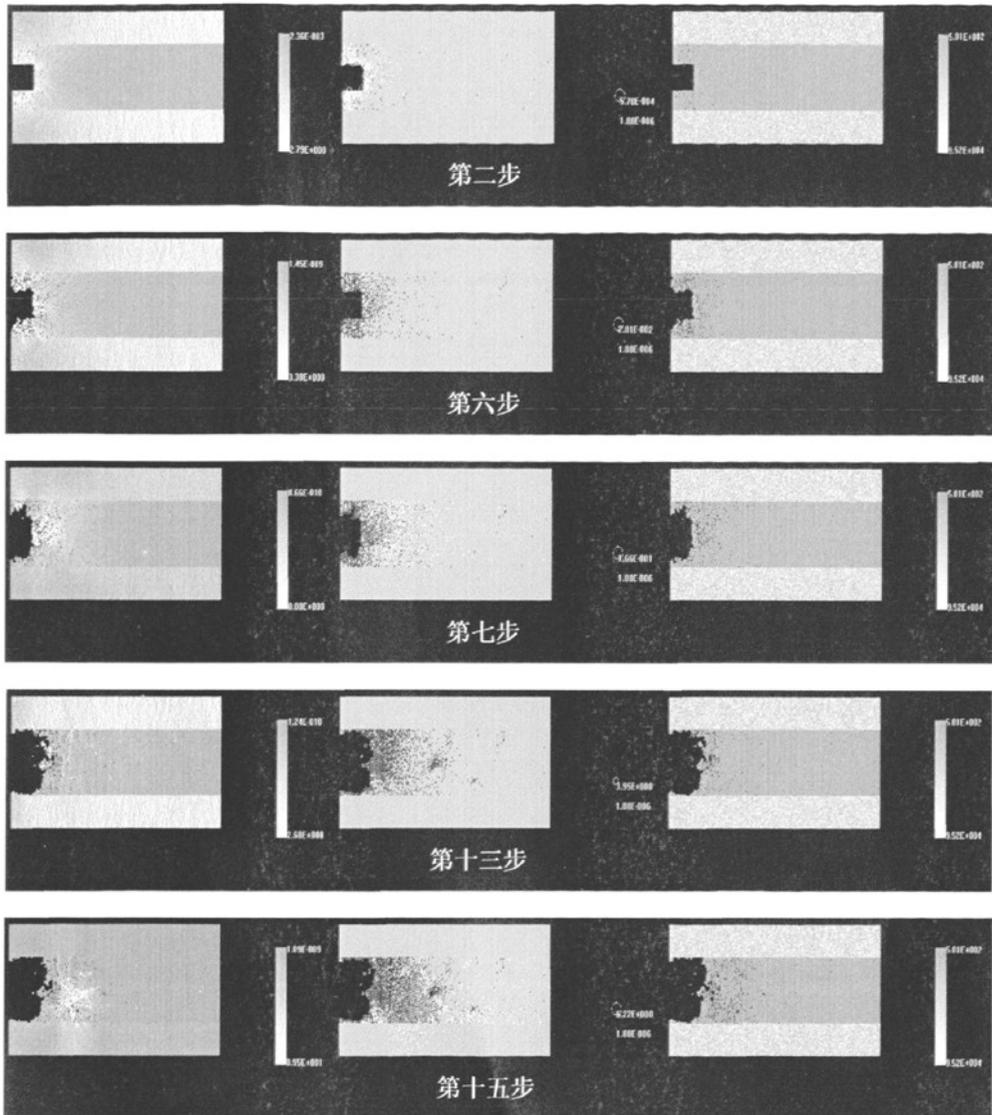


图 4.4 突出过程中的应力及声发射、煤岩体弹性模量变化

突出准备阶段：即为发生煤与瓦斯突出创造条件的阶段，包括采掘作业影响、瓦斯解析、瓦斯压力、煤体物理力学性质变化等，当地应力和瓦斯压力的动力足以破坏煤体结构并将含瓦斯煤岩体抛出、压出、倾出时，含瓦斯煤岩失稳，具备发生煤与瓦斯突出的准备条件，图 4.4 数值试验中的第二步开挖到第五步突出发生前的过程，在开挖的工作面前方出现大量的裂纹，同时伴随有声发射现象。

突出发动阶段：随着裂纹的扩展，瓦斯涌出量大量增加，瓦斯压力增大，煤体开始趋向失稳，逐渐形成工作面前方煤体的变形和脱落，图 4.4 第六步所示。

突出发展阶段：煤岩体失稳，碎裂煤块的不断抛出的过程，图 4.4 第七步所示为突

出发生，并不断向掘进工作面前方延伸。突出发生后，应力得到释放，瓦斯涌出后，瓦斯压力也相应的减小，动力和阻力达到新的平衡状态，此时突出就会逐渐停息，但是当这种力学平衡再次被打破的时候，新的突出过程又会继续。

第十五步所示在突出发展过程中向深部发展，工作面前方煤体出现较大范围的小型断裂现象，同时伴随有大量的声发射事件数和能量显示，随着地应力、瓦斯压力、煤体作用的加强，必然会继续发展。

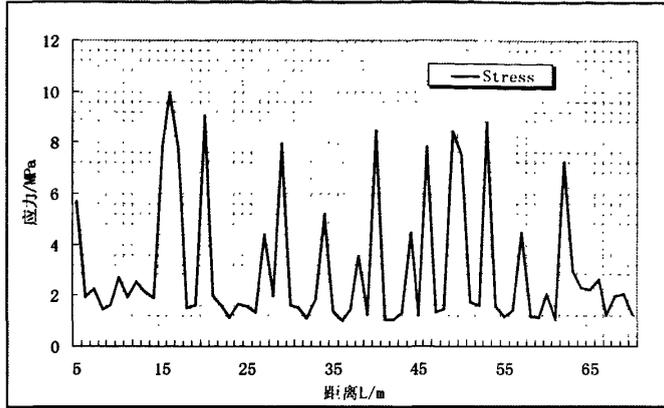


图 4.5 煤层瓦斯在突出过程中应力变化

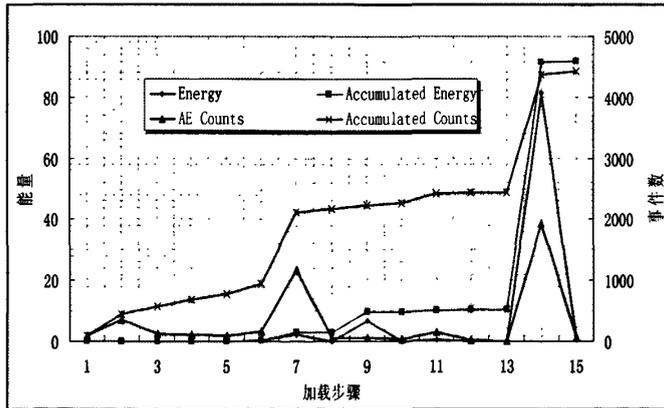


图 4.6 加载过程中声发射变化

(2) 应力与声发射分析

数值试验结果显示，在突出发生以后煤层应力变化较为频繁的变化，如图 4.5，同时声发射事件数、总事件数、能量和能量累计值也出现较大幅度的增加，如图 4.6。

(3) 瓦斯压力变化分析

原始煤层压力为 7.2MPa，巷道开挖以后受外力影响，煤体物理力学结构遭到破坏，含瓦斯煤岩体逐渐失去动力平衡状态，瓦斯迅速发生解析，瓦斯压力急剧增加，这样为发生煤与瓦斯突出创造动力。

4.3 突出综合指标

本文基于突出综合学说，分别就声发射和瓦斯两项影响因素进行研究，表明声发射是煤与瓦斯突出综合因素作用的体现，而瓦斯浓度序列分析也包含有整个煤与瓦斯突出系统动力失稳过程中的综合前兆信息，因此两者是同一实质过程的两种不同的表现方式，所以就突出危险性预测技术本身而言，应该具有相同的体现。

4.3.1 声发射-瓦斯单项指标对比

对 SQL Server 2000 数据库已建立的动态频数表、瓦斯数据表以及相应的存储过程编写 SQL 查询语句，对声发射单项指标和瓦斯进行查询，并绘制曲线进行分析，随机选取 6222 工作面回风顺槽 2008 年 4 月 18 至 25 日以及 9 月 1 日至 12 日的瓦斯数据与小事件频数 Lo_f 数据，绘制同一时刻对应下的瓦斯与小事件活动频数 Lo_f 对比曲线，如图 4.7、4.8 所示；同一时刻对应下的瓦斯与动态活动趋势 Lo_Q 对比曲线，如图 4.9、4.10。

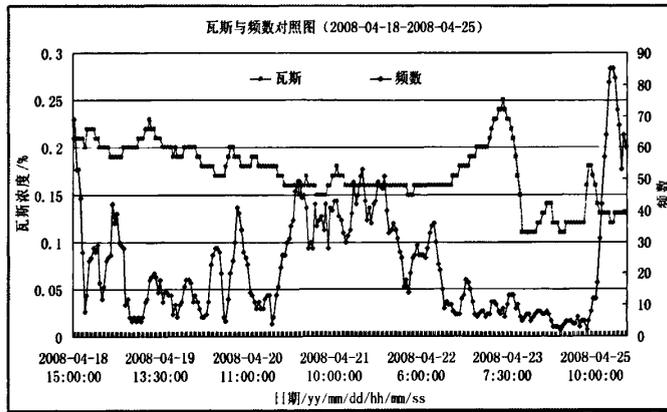


图4.7 瓦斯与11[#]动态小事件活动频数 (4月18-25日)

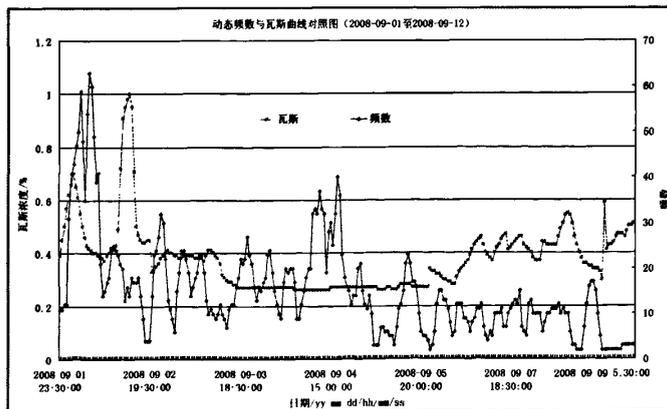
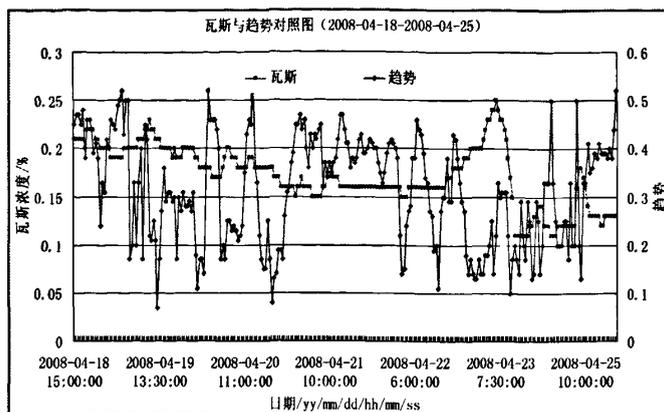
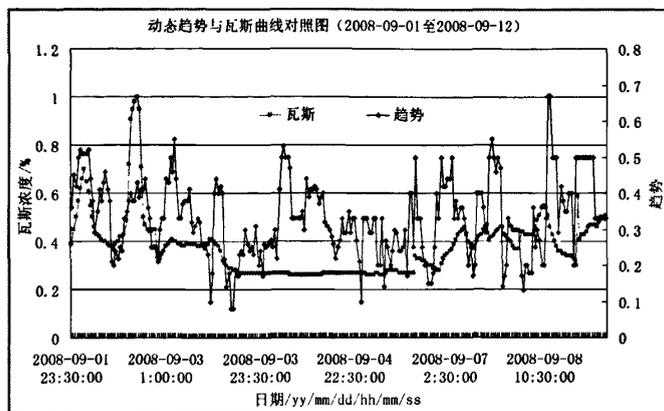


图4.8 瓦斯与11[#]动态小事件活动频数 (9月1-12日)

图 4.9 瓦斯与 11[#]动态小事件活动趋势 (4 月 18-25 日)图 4.10 瓦斯与 11[#]动态小事件活动趋势 (9 月 1-12 日)

曲线对比初步分析显示：声发射指标与瓦斯有很好的—致性，即声发射活动频繁的情况下，瓦斯涌出量也相应的发生增大，这样可以考虑建立综合指标的方向。

4.3.2 突出综合指标的建立

根据单项指标的对比分析结果情况，可以将声发射综合指标和瓦斯综合指标经过无量纲分析以后进行相比来得出以声发射和瓦斯涌出为基础参数的煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测综合指标 DI (Dangerous Index)：

$$DI = \frac{AE}{WS} \quad (4.3)$$

式中： DI ——煤与瓦斯突出实时预测综合指标；

AE ——声发射项综合指标；

WS ——瓦斯项综合指标。

综合指标 DI 取值范围初定分析，由于监控现场防突措施比较到位，监测试验期间未发生煤与瓦斯突出，因此综合指标的评价标准尚需要经过现场实践的检验。

前面分析到声发射是煤与瓦斯突出综合因素作用的体现，而瓦斯浓度序列分析也包含有整个煤与瓦斯突出系统动力失稳过程中的综合前兆信息，因此两者是同一实质过程的两种不同的表现方式，所以就突出危险性预测技术本身而言，应该具有相同的体现，这样当声发射参数和瓦斯参数都经过无量纲转化分析以后，其比值应为 1，这样初步选定突出危险指标为 1，即声发射和瓦斯所表现出来的前兆信息完全一致的情况下，有发生煤与瓦斯突出危险，其危险程度可以通过 DI 与 1 的接近程度来进行分级。

4.4 本章小结

提出了以声发射和瓦斯为基础参数的煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测综合指标 DI (Dangerous Index): $DI = \frac{AE}{WS}$ ，初步拟定突出危险指标为 1，即声发射和瓦斯所表现出来的前兆信息完全一致的情况下，发生煤与瓦斯突出，其危险程度可以通过 DI 与 1 的接近程度来进行分级。

5 突出危险性实时跟踪预测技术现场试验研究

5.1 防突工作面概况

6222 工作面位于二采区西部,即海石湾矿井西部边缘地带。地面处于捷路沟沟底及其以东斜坡地。地面标高为 1920~1975m 之间,沟底局部出露有白垩系下统(K₁hk)河口群地层,其它坡地均为黄土覆盖,地面无任何可保护的建筑物。

6222 工作面地表位于尕桌子山~石草湾沟脑一带,地表标高为 1925~2100m,工作面标高为 1320~1365m,煤层以上的覆盖层厚度为 605~735m,地表无任何保护建筑。工作面东部 6212 工作面正在开采外,再无采掘活动。

工作面内煤层总体呈单一走向 NE,倾角 5~68°,平均倾角为 14°的单倾斜构造形态。工作面水文地质条件简单;矿井属于高瓦斯突出矿井,煤一层无突出危险性;煤二层混合瓦斯含量 22.59m³/t,瓦斯压力 7.2MPa,为煤与瓦斯突出煤层。

5.1.1 煤层产状及赋存

煤层:煤二层厚度变化一般在 5.20~11.00m 之间,平均厚度 8.65m,煤层倾角一般在 7~15°之间,平均 11°30',煤二层均有东厚西薄之变化趋势。煤二层容重 1.33T/m³,坚固性系数为 0.49~0.52,平均 0.51。

顶板:煤二层之上局部有伪顶炭质泥岩,厚 0~0.4m,呈片状、鳞片状,局部夹有煤线、松软,易跨落。直接顶为灰~深灰色粉~细砂岩,较致密坚硬,厚度 4.65~7.87m,普氏硬度系数 $f=4\sim6$ 。老顶多为煤二层之上的油页岩或含油质粉砂岩,厚 5~7m,再上为煤一层。普氏硬度系数 $f=3.46\sim5.03$,平均 4.16。

底板:煤二层直接底板多为灰~灰白色含砾粉~细砂岩或鲕状细砂岩。含有煤屑和炭化的植物根痕,胶结致密、坚硬,普氏硬度系数 $f=4\sim6$,厚 0.42~1.8m。再下为老底,为灰白色细砂岩或含砾细砂岩,厚度变化大,一般在 10m 左右。

5.1.2 地质概况

褶曲:工作面地质构造复杂,煤二层起伏变化大,断裂发育。在 6222 施工联络巷一带,煤层产状为 N20~30°E/SE \angle 10~13°。中部产状为 N5~10°W/NE \angle 7~13°。在 6222 工作面开切眼附近有挠曲构造,煤层倾角急剧增大至 65°,将煤层翘起。产状为 N40°E/SE \angle 15~65°。

断层:根据现有的施工巷道资料分析,工作面内有较大的断层 2 条,分别为 F7 和 F12。F7 为一正断层,见于 6222 回风顺槽 K7 点前 26.3 米窝头内,其产状为:

N30~38°E/SE∠32°, 落差 5~14m。F12 正断层所见于 6212 工作面回风顺槽 11~14 点前 3.6mm (右帮), 产状: N60°E/SE∠30°, 落差约 4~5m。对掘进和回采影响比较大。

5.1.3 掘进与通风

矿井属于高瓦斯突出矿井, 煤一层无突出危险性; 煤二层混合瓦斯含量 22.59m³/t, 瓦斯压力 7.2MPa, 为煤与瓦斯突出煤层。6222 工作面 CO₂ 吨煤含量在 2~8m³/t 之间, CH₄ 吨煤含量在 4~7m³/t 之间, 均属于瓦斯地质复杂地带。工作面采用钻眼光面爆破法掘进, 采用 YT-24 型风钻; 采用局部通风机压入式通风方式, 风筒采用抗静电、阻燃的胶质风筒。

5.2 传感器安装

5.2.1 传感器的安装方式

将波导杆打进煤层中, AE 信号通过波导杆传至孔口安装的声发射传感器, 在保证尽量减少噪音信号的前提下, 在孔口用木楔进行封孔, 将 AE 传感头安装在孔口, 便于维护, 并适当采取保护措施。

5.2.2 传感器合理安装参数

(1) 安装位置选择

在安装地点, 选择一个煤层原始结构没有破坏 (煤柱或工作面两巷), 打一个 Φ42 的钻孔; 将波导杆放入孔内, 把木板垫在波导杆尾部, 用榔头将波导杆顶端打入煤层; 在波导杆上装上传感器安装座, 在安装座上抹上粘合剂凡士林; 将传感器放到安装座上, 上紧保护罩; 轻敲波导杆, 检测传感器是否采集到信号。检查传感器是否有信号输出。采集有信号并有数据通讯时, 传感器安装正常。安装方法见图 5.1。

(2) 传感器安装个数

根据试验需要分别在 6222 工作面的运输和回风顺槽各安装两个断面, 每个断面两个 AE 传感器 (GDD-1 型矿用动态传感器), 即每个掘进头安装 4 个 AE 传感器, 可以有效避免单个传感器误报的问题。

(3) 瓦斯传感器安装情况

根据现场试验需要分别在每个掘进头正前和后巷的位置分别安装一个瓦斯传感器, 即每个掘进头安装 2 个瓦斯传感器。

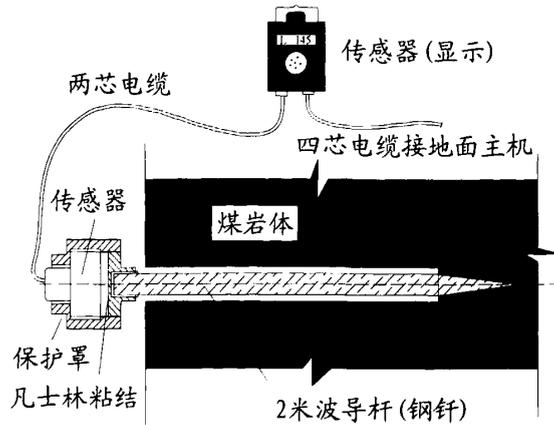


图5.1 GDD-1型矿压动态传感器安装图

5.3 声发射指标分析

试验工作面掘进期间，日进尺 1.8~3m，“三八”制炮掘作业，工作面突出危险性预测采用常规预测和声发射预测两种方法，常规预测的指标为最大钻屑量 S 和 K_1 两种（见附录一的海石湾矿井防突预测检验报告单），声发射指标为大事件数、小事件数和能量三种。

考察声发射指标与突出危险性关系最有效的方法就是通过连续监测掘进工作面从非突出危险区域进入突出危险区域过程中声发射的变化情况，并与突出发生情况进行对比，统计分析出有效的声发射指标危险预测方法及指标临界值。由于试验工作面突出危险性较大，工作面正常掘进过程中采取了一系列的防突措施，如松爆、打超前孔卸压来降低工作面的突出危险性。所以本实验实际是在超前钻孔控制区内进行的，没有监测到突出发生的情况，只是有一定程度上的动力现象发生，即压出或倾出。为此在监测过程中，将声发射指标与钻屑量指标进行对比来考察声发射指标与突出的相关性。

5.3.1 测点布置

根据监测巷道的瓦斯地质资料，分别在6222工作面的运输和回风巷进行测点布置安装，距离掘进工作面15~20m的位置布置两个监测断面。6222工作面共设4个断面，每个断面安装2个GDD-1型矿压动态传感器。

(1) 初次安装

初次安装时，按图 5.2 所示安装两组动态传感器，4 个传感器的通讯线并接在 1 对电缆线上，每 2 个传感器接 1 组 18V 电源。

这 4 个传感器分别设站号为 5、6、7、8。

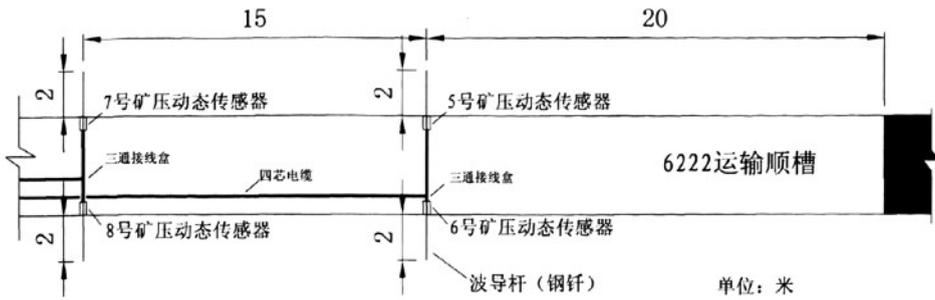


图 5.2 动态传感器初次安装位置图

(2) 传感器移动方式

当工作面推进 15 米时（即第 1 组的传感器距工作面 30 米时），前移第 2 组传感器到距工作面 15 米处。依次类推。如图 5.3。

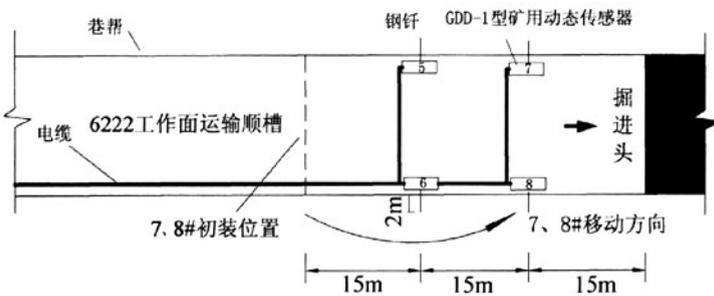
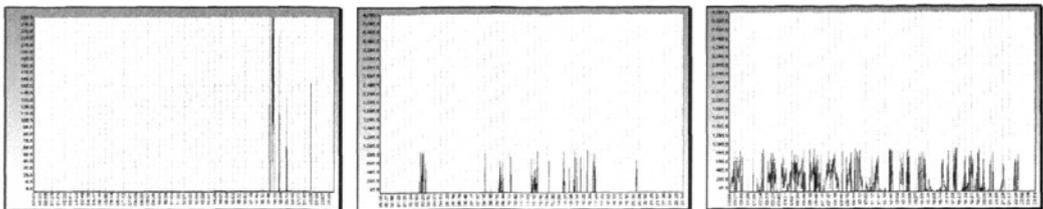


图 5.3 动态传感器前移安装位置图

5.3.2 数据整理分析

5.3.2.1 原始典型数据分析

依据KJ110安全综合监控系统的原始监测数据情况来看，6222工作面运输顺槽从4月22日开始出现大事件数，剔除工作面放炮引起的事件，大事件数明显增加，相应的小事件数也增加，如图5.4。4月27日凌晨开始出现较多的大事件数，小事件数密集，此时6222工作面运输巷由于放炮诱发掘进头的小型动力现象“压出”，进而连续发生由掘进头至后巷长达8m的冒顶，相应的CH₄浓度达到16.9%，CO₂浓度5.1%。



(a) 4月22日大事件数 (b) 4月26日小事件数 (c) 4月27日小事件数

图 5.4 掘进工作面“压出”过程中动态事件数曲线

5.3.2.2 监测区域动态频数 DF 曲线

直接对 KJ110 监控系统采集到的动态数据整理的动态频数 DF(Dynamic Frequency) 进行对比分析, 图 5.5 所示, 4 月 16 日至 9 月 11 日的数据统一绘制成对照曲线, 曲线显示处于同一监测断面的两个动态曲线有很好的 consistency, 同一监测区域的四个动态传感器活动情况一致的情况下, 即可以对工作面突出情况有一定的警示作用, 也避免乱报错报造成的偶然性。

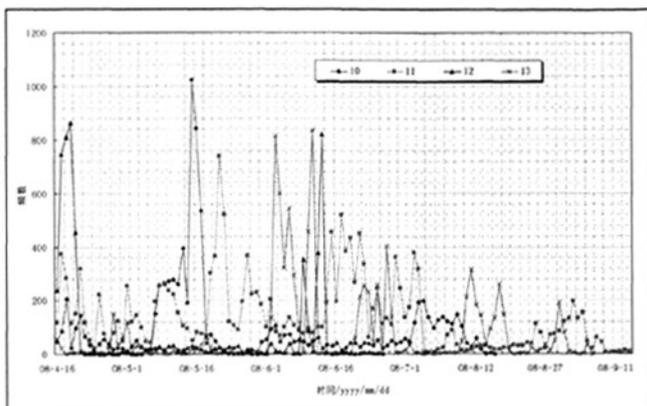
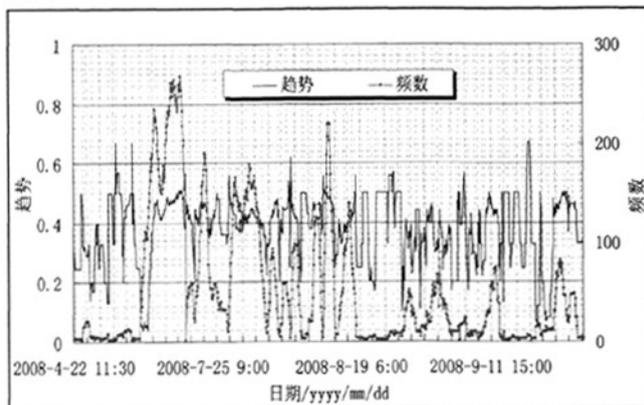


图5.5 回风顺槽动态曲线对照图 (10#-13#)

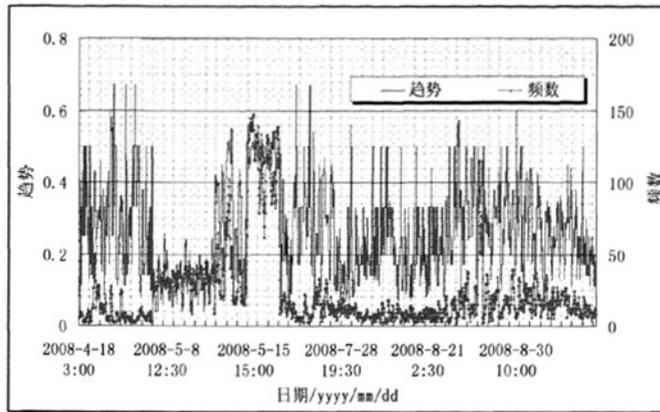
5.3.2.3 动态指标与常规预测指标的试验对比分析

对现场数据的分析整理应用动态频数 DF(Dynamic Frequency) 和趋势 DT(Dynamic Tendency) 两项指标对煤与瓦斯突出前兆的敏感程度来确定其指标。

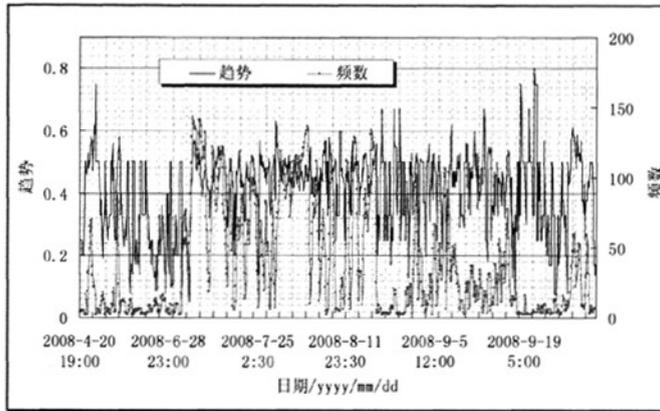
通过对现场动态数据的分析发现, 动态小事件数的频数 DF 和趋势 DT 指标对煤与瓦斯突出日常监测较为敏感, 其变化情况能够反映掘进工作面前方煤岩体的突出危险性, 并且依据海石湾煤矿通灭部提供的防突报告单及测点分布图绘制的常规预测指标曲线的对应性较好, 而大事件数和能量仅作为辅助对比, 小事件数 DF 和 DT 指标对比曲线如图 5.6 和 5.7。



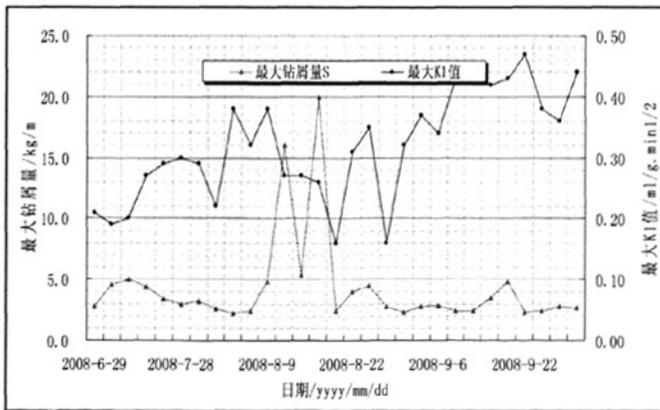
(a)13#动态大事件频数与趋势



(b) 10[#]动态小事件频数与趋势

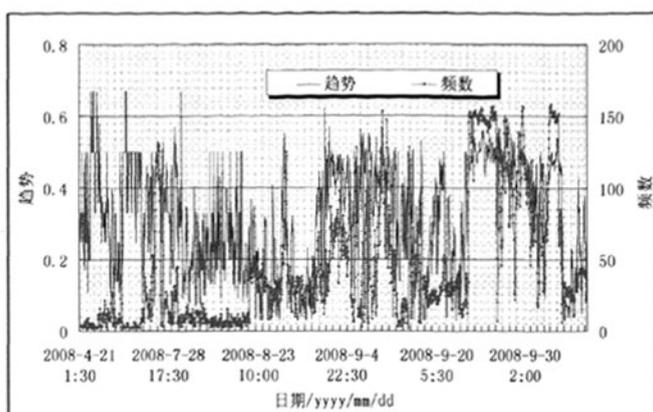
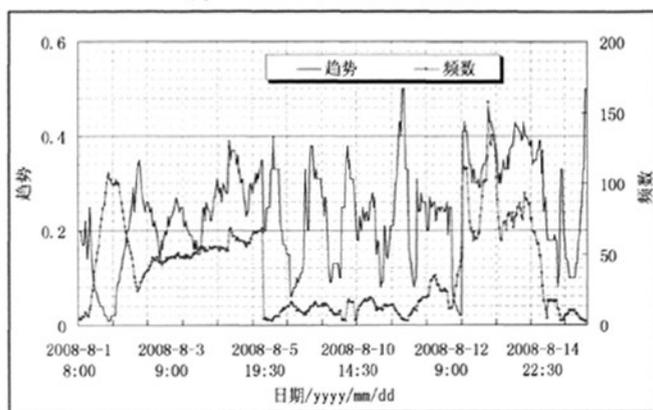
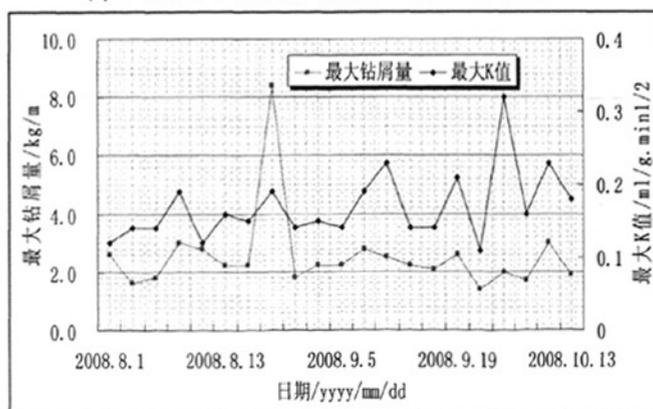


(c) 13[#]动态小事件频数与趋势



(d) 6222工作面回风顺槽K值与钻屑量曲线

图5.6 回风顺槽动态曲线与常规指标对照图

(a) 7[#]动态小事件频数与趋势(b) 8[#]动态小事件频数与趋势 (4月18~9月23日)

(c) 6222工作面进风顺槽K值与钻屑量曲线

图5.7 进风顺槽动态曲线与常规指标对照图

对比图以及试验期间获得的声发射与常规预测的测试结果可以看出, 声发射与常规预测指标之间的变化趋势基本一致, 动态频数 DF 较强的地点, 常规预测指标值也较大。在工作面出现喷孔、夹钻或煤炮声等突出征兆时, 声发射传感器的频数 DF 和趋势 DT

相应较强,表明声发射信号反映了工作面前方煤体在集中应力、瓦斯压力和煤岩体结构性质等影响因素综合作用下的变化规律,用声发射预测煤与瓦斯突出是完全可行的。

5.3.2.4 AE 动态综合指标分析

依据突出危险性的声发射指标判定模型(2.1)~(2.10),选择典型数据点 2008 年 4 月 27 日运输顺槽及 10 月 2 日回风顺槽进行实时分析。通过第二章计算得出各因子的权重向量 $B = \{0.083, 0.220, 0.103, 0.141, 0.221, 0.034, 0.060, 0.024, 0.042, 0.067\}$, 首先计算大、小事件频数 f 和趋势 Q 及能量和 E 各单项值的标准差 σ , 再利用隶属度函数构造模糊关系矩阵 R , 为增加突出危险性预测的实时性, 每 0.5h 计算一次隶属度, 并利用式(2.10)有相应的声发射项突出危险性综合指标 $AE = \text{MAX}(b_1, b_2 \dots, b_{10})$ 。

通过计算长、短时指标在 2008 年 9 月 7 日零时的监测数值并结合相应的隶属函数, 建立其模糊关系矩阵 R :

$$\text{则 } C = B \circ R = \{0.083, 0.220, 0.103, 0.141, 0.221, 0.034, 0.060, 0.024, 0.042, 0.067\}$$

$$\circ R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0.7 & 0.3 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.5478, 0.1708, 0.2764);$$

依据最大隶属度原则,判断该时刻 6222 掘进工作面回风顺槽为一般突出危险, 同时 $AE = \max(0.5478, 0.1708, 0.2764) = 0.5478$ 。其余时刻计算结果见表 5.1, AE 值曲线如图 5.8。

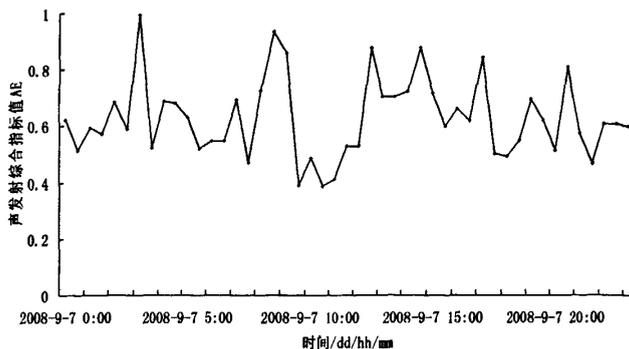


图5.8 进风顺槽声发射项综合指标AE (9月7日)

表 5.1 08 年 9 月 7 日 6222 工作面回风顺槽突出危险性评价等级及 AE 值

时刻	一般	中等	严重	AE	等级	时刻	一般	中等	严重	AE	等级
0:00	0.0483	0.3223	0.6244	0.6244	严重	12:00	0.532	0.0801	0.3829	0.532	一般
0:30	0.0621	0.5116	0.4213	0.5116	中等	12:30	0.8783	0.1167	0	0.8783	一般
1:00	0.0721	0.5928	0.3301	0.5928	中等	13:00	0.7056	0.2429	0.0465	0.7056	一般
1:30	0.012	0.5738	0.4091	0.5738	中等	13:30	0.7056	0.2321	0.0573	0.7056	一般
2:00	0.05	0.6867	0.2583	0.6867	中等	14:00	0.721	0.23	0.044	0.721	一般
2:30	0.044	0.5918	0.3592	0.5918	中等	14:30	0.8783	0.1047	0.012	0.8783	一般
3:00	0.995	0	0	0.995	一般	15:00	0.7159	0.2413	0.0378	0.7159	一般
3:30	0.5229	0.406	0.0661	0.5229	一般	15:30	0.3586	0.5962	0.0402	0.5962	中等
4:00	0.28	0.0252	0.6898	0.6898	严重	16:00	0.6607	0.3343	0	0.6607	一般
4:30	0.274	0.0378	0.6832	0.6832	严重	16:30	0.6178	0.3552	0.022	0.6178	一般
5:00	0.6324	0.2273	0.1353	0.6324	一般	17:00	0.8433	0.1313	0.0204	0.8433	一般
5:30	0.3179	0.1561	0.521	0.521	严重	17:30	0.1013	0.3902	0.5035	0.5035	严重
6:00	0.5478	0.1708	0.2764	0.5478	一般	18:00	0.028	0.4916	0.4694	0.4916	中等
6:30	0.171	0.2753	0.5487	0.5487	严重	18:30	0.0303	0.5476	0.4171	0.5476	中等
7:00	0.695	0	0.3	0.695	一般	19:00	0.022	0.6949	0.2781	0.6949	中等
7:30	0.288	0.2383	0.4687	0.4687	严重	19:30	0.022	0.6207	0.3523	0.6207	中等
8:00	0.7268	0.2579	0.0103	0.7268	一般	20:00	0.094	0.5132	0.3878	0.5132	中等
8:30	0.9363	0.0587	0	0.9363	一般	20:30	0.8066	0.1706	0.0178	0.8066	一般
9:00	0.8615	0.1335	0	0.8615	一般	21:00	0.5723	0.3546	0.0681	0.5723	一般
9:30	0.325	0.3899	0.2801	0.3899	中等	21:30	0.4659	0.3712	0.1579	0.4659	一般
10:00	0.4891	0.2697	0.2362	0.4891	一般	22:00	0.6103	0.192	0.1927	0.6103	一般
10:30	0.2269	0.3866	0.3815	0.3866	中等	22:30	0.6103	0.1653	0.2194	0.6103	一般
11:00	0.1934	0.4118	0.3898	0.4118	中等	23:00	0.5962	0.2169	0.1819	0.5962	一般
11:30	0.532	0.074	0.389	0.532	一般	23:30	0.532	0.0801	0.3829	0.532	一般

5.4 瓦斯指标分析

利用矿井安全监控系统自动连续获取掘进工作面瓦斯涌出动态时间序列数据时,要求矿井监控系统应具有较高的可靠性,监测数据可直接调用,可提供的数据量较大,监测记录连续、完整且为等间隔巡检记录,此外还需要有与监测记录相对应的完整准确工作面突出预测记录。海石湾矿采用的西安科技大学西安西科测控设备有限责任公司研发的 KJ110 矿井综合安全监控系统采样间隔为 2ms,系统较为稳定,数据存储为 SQL Server

2000 数据文件，易于调用分析，数据存储较完整。同时海石湾煤矿 6222 工作面运输、回风顺槽一直处于掘进状态，相关工程、地质和日常预测资料较为齐全，因此选用 6222 工作面的瓦斯监测数据作为进行瓦斯时间序列分析的原始数据。

5.4.1 瓦斯原始监测数据的获取

海石湾煤矿采用的 KJ110 矿井综合安全监控系统采样时间间隔为 200ms，数据存储为 SQL 文件格式，瓦斯浓度传感器为 GJ100-302 型矿用低浓度甲烷传感器，其主要技术参数如下：测量范围 0~100%CH₄；相对误差±5%。

掘进工作面瓦斯浓度传感器以及风速传感器分别 6222 掘进工作面回风巷的开口处和掘进工作面正前安装一个 GJC4/100 型高低浓度瓦斯传感器和风速传感器，具体安装位置如图 5.9 所示。

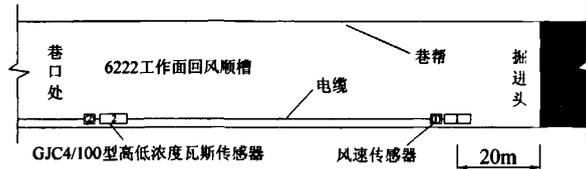


图 5.9 瓦斯及风速传感器安装位置图

从监控系统提取 6222 工作面进、回风掘进工作面自 2008 年 4 月至 2008 年 9 月的瓦斯监测数据。

5.4.2 实时数据分析

依据已建立的瓦斯动态时间序列预测煤与瓦斯突出的趋势模型和摆动模型对海石湾煤矿 6222 工作面突出危险性进行分析。实际监测过程中由于防突措施比较到位，并未发生突出，但是在从 2008 年 4 月 27 日 6222 工作面运输巷由于放炮诱发掘进头的小型动力现象“压出”，现通过模型参数分析，验证其有效性。

5.4.2.1 指数平滑模型分析

该模型主要是用来预测未来时刻瓦斯监测值的，因此可选择监控系统日常数据作为示例进行分析，一定区域范围内瓦斯浓度有一定的稳定特征，即可以依据“重老信息，轻新信息”的原则对监控系统的瓦斯监控值进行预测，初步选用平滑系数 $\alpha = 0.3$ 。

随机在监控系统中选择 2008 年 5 月 30 日 6222 工作面回风顺槽正前的甲烷浓度进行分析。监控系统的瓦斯数据为每分钟记录一次，应用 SQL 语句直接在 SQLServer2000 备份数据库中进行查询，利用公式 (3.1) 趋势模型计算瓦斯浓度预测值，预测值和原始浓度对比曲线如图 5.10。

分别运用 Excel 中的 AVERAGE、STDEV、SQRT 计算平均误差、标准误差和 RMSPE，在式 (3.2) 基础上利用运用 Excel 中的“单变量求解”，设定目标值即最佳 RMSPE 为零

来寻找最佳平滑系数，得出预测的最佳平滑系数 $\alpha = 0.35$ ，即指数平滑模型为：
 $\hat{y}_{t+1} = 0.35y_t + 0.65\hat{y}_t$ 。

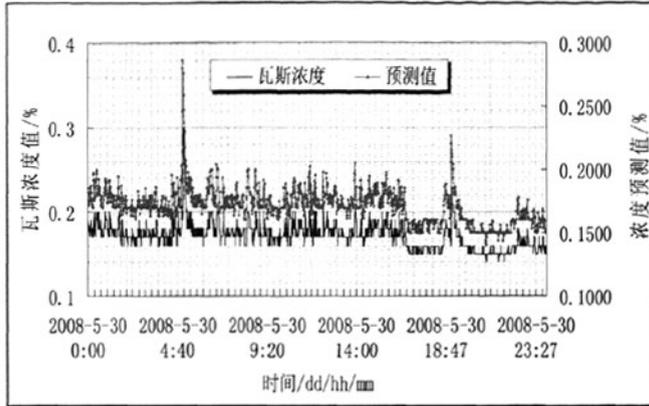


图 5.10 6222 工作面回风顺槽瓦斯浓度与预测值 (5 月 30 日)

5.4.2.2 瓦斯涌出变化模型分析

该模型主要是用来描述瓦斯浓度变化情况，依据式 (3.3)、(3.4) 进行实时数据分析，2008 年 9 月 7 日至 10 月 3 日 6222 工作面回风顺槽正前的甲烷浓度数据进行分析，原始瓦斯浓度曲线如图 5.10。

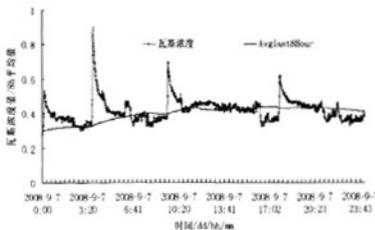
(1) 偏移率分析

不同掘进区域瓦斯涌出情况不同，但在一定范围之内瓦斯浓度会表现为一定的特征常数，式 (3.3) 中 Δh 依据工作面的“三八”制掘进选择为 8h，即选择时刻向历史时刻滑动 8h 监测值的平均值作为最近 8h 内的滑动平均值 $A(\Delta h)$ 。

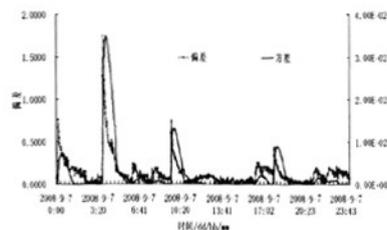
(2) 方差变化分析

监测时刻最近最近 1h 内的滑动平均值作为方差计算中的样本平均值 μ ，依据式 (3.3) 计算最近 1h 时间间隔内瓦斯浓度变化的方差。

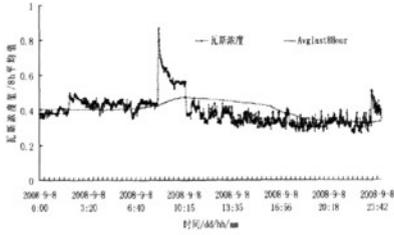
偏差和方差均以实时数据的方式显示，应绘制成实时曲线，如图 5.11 所示，包括瓦斯浓度、8h 滑动平均值、偏差和方差。



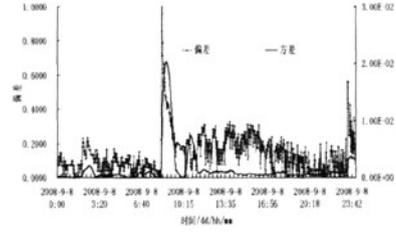
(a) 实时浓度与 8h 均值 (9 月 7 日)



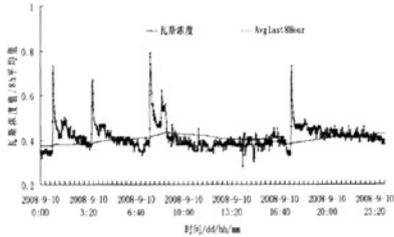
(a') 浓度偏差与方差 (9 月 7 日)



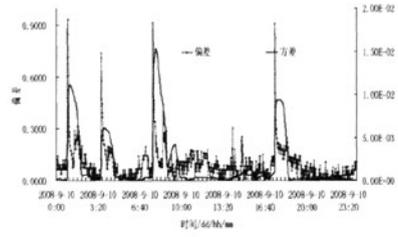
(b) 实时浓度与 8h 均值 (9 月 8 日)



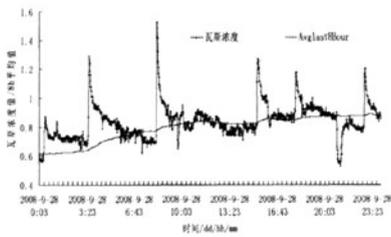
(b') 浓度偏差与方差 (9 月 8 日)



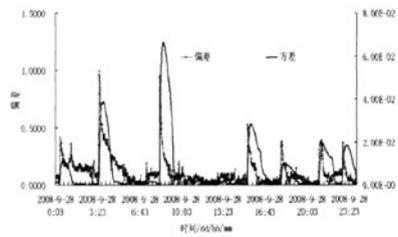
(c) 实时浓度与 8h 均值 (9 月 10 日)



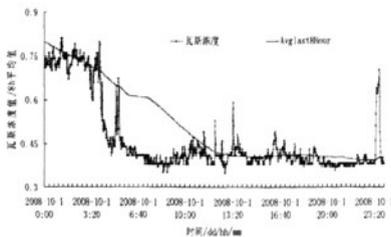
(c') 浓度偏差与方差 (9 月 10 日)



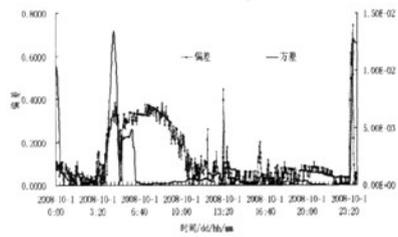
(d) 实时浓度与 8h 均值 (9 月 28 日)



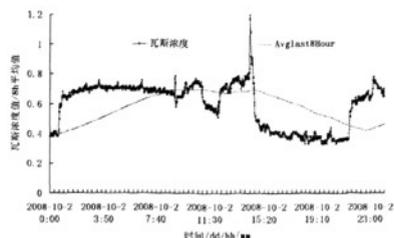
(d') 浓度偏差与方差 (9 月 28 日)



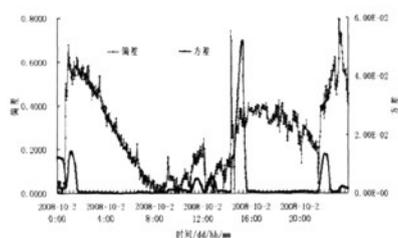
(e) 实时浓度与 8h 均值 (10 月 1 日)



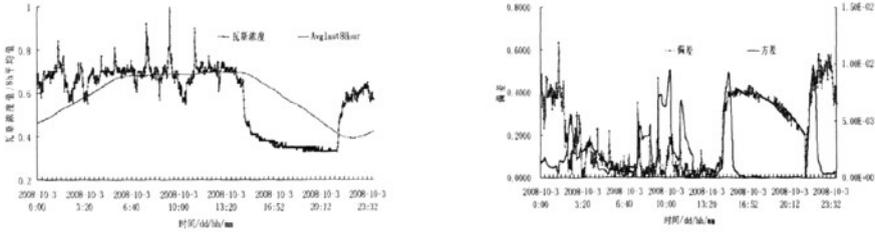
(e') 浓度偏差与方差 (10 月 1 日)



(f) 实时浓度与 8h 均值 (10 月 2 日)



(f') 浓度偏差与方差 (10 月 2 日)



(g) 实时浓度与 8h 均值 (10 月 3 日)

(g') 浓度偏差与方差 (10 月 3 日)

图 5.11 6222 工作面回风顺槽瓦斯涌出模型参数曲线

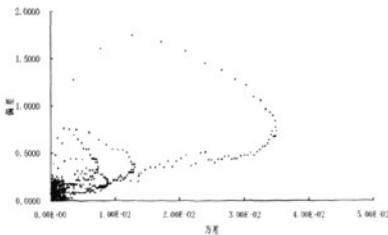
分析曲线知, 9 月 7 日瓦斯浓度出现三次峰值, 与海石湾煤矿掘进放炮台帐记录的放炮时间完全一致, 偏移率基本保持在零值附近, 方差多数处于时间轴上, 无突出危险征兆; 10 月 2 日未有放炮发生, 0 时 59 分, 偏移率为 0.6780, 同时方差也较大, 依据现场实际情况知出现小型“压出”动力现象, 发生压出前有明显的前兆信息。

根据海石湾煤矿调度台帐, 2008 年 10 月 1 日 23 时 18 分工作面进风顺槽掘进放炮, 在放炮 78min 后, 即次日 0 时 32 分出现应力变化引起 AE 信号增加后又达到新的平衡, 瓦斯涌出量下降。37min 钟后, 随着瓦斯解析的进行, 瓦斯压力增大, 再次激发使含瓦斯煤岩系统失稳, 瓦斯大量涌出; 在 2 时 56 分瓦斯涌出量达到最高值 0.58%; 到 5 时 54 分, 动力现象停息。

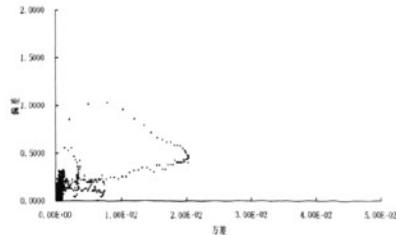
5.4.2.3 瓦斯项综合指标分析

偏差表征当前瓦斯实时监测浓度值偏离最近 8h 的瓦斯浓度滑动平均值的大小, 即表示的是当前监测值超出区域特征瓦斯浓度的幅度所表现除的异常; 方差选用的是最近 1h 的瓦斯浓度情况, 可以较为实时的反映当前监测值是否异常的变动情况。

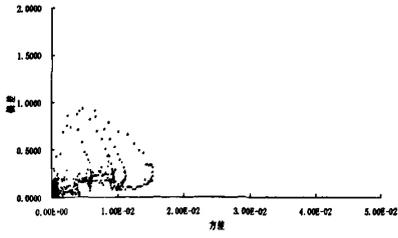
基于瓦斯浓度偏差和方差, 绘制如图 5.12 所示的偏差-方差散点图, 并依据瓦斯项突出危险性实时预测综合指标 WS , 式 (3.6) 进行计算。10 月 1 日、2 日的 WS 实时综合曲线如图 5.13。



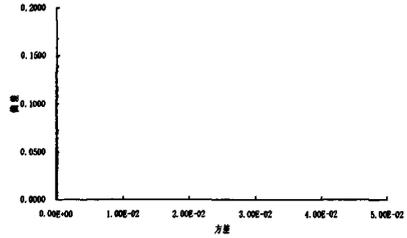
(a) 偏差-方差散点图 (9 月 7 日)



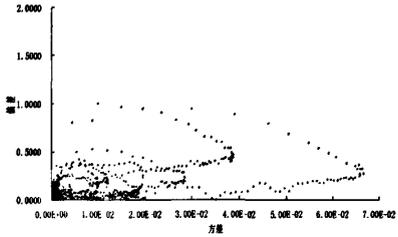
(b) 偏差-方差散点图 (9 月 8 日)



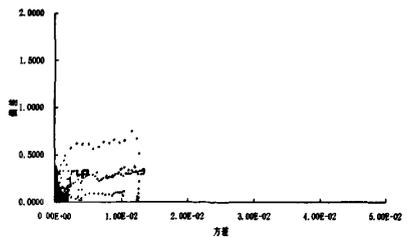
(c) 偏差-方差散点图 (9月10日)



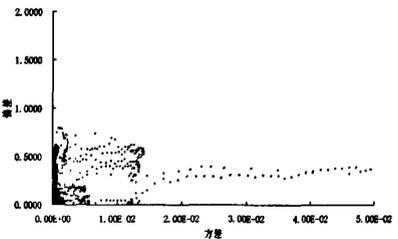
(d) 偏差-方差散点图 (9月20日)



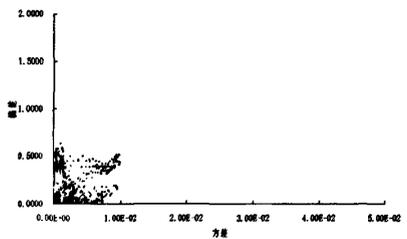
(e) 偏差-方差散点图 (9月28日)



(f) 偏差-方差散点图 (10月1日)

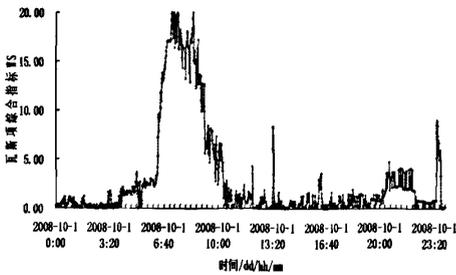


(g) 偏差-方差散点图 (10月2日)

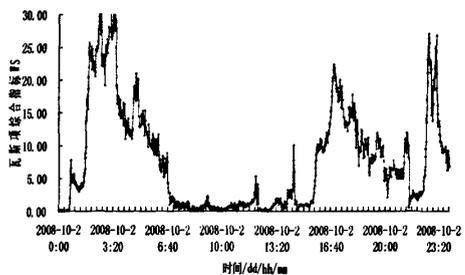


(h) 偏差-方差散点图 (10月3日)

图 5.12 6222 工作面回风顺槽瓦斯涌出偏差-方差散点图

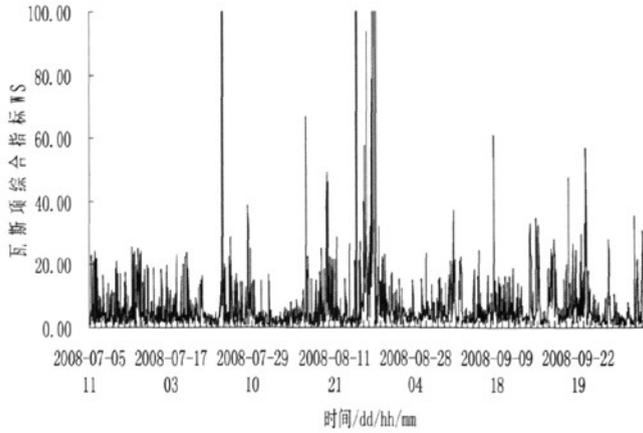


(a) 10月1日

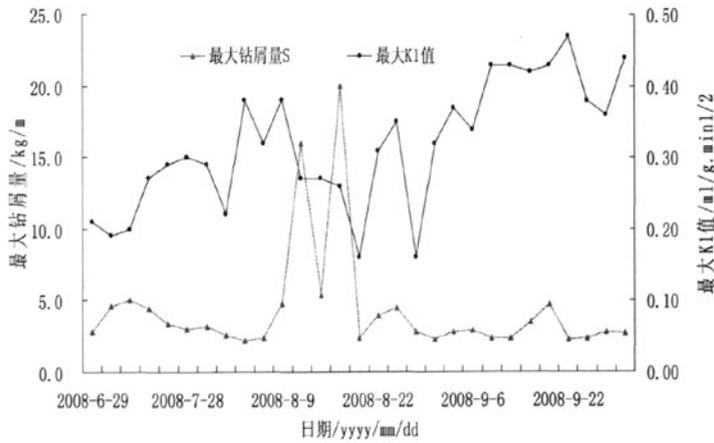


(b) 10月2日

图 5.13 瓦斯项综合指标 WS 实时曲线



(a) 瓦斯项综合指标 WS (7月-10月)



(b) 最大钻屑量和最大K值 (7月-10月)

图 5.14 瓦斯项综合指标 WS 与常规预测指标对比

通过提取小时瓦斯综合指标 WS 最大值绘制曲线，并与单点的常规预测指标进行对比，有较好的一致性，如图 5.14。

5.5 综合指标分析

5.5.1 基础数据综合分析

现场监测工作从 2008 年 3 月至 10 月，日常监测动态及瓦斯数据显示，动态的大、小事件数及能量发生值与瓦斯有着较为良好的对应关系，即动态事件数出现的情况下，瓦斯浓度相应的增加，对比海石湾煤矿具体的调度台帐记录，与井下实际采掘活动情况一致。如图 5.15。

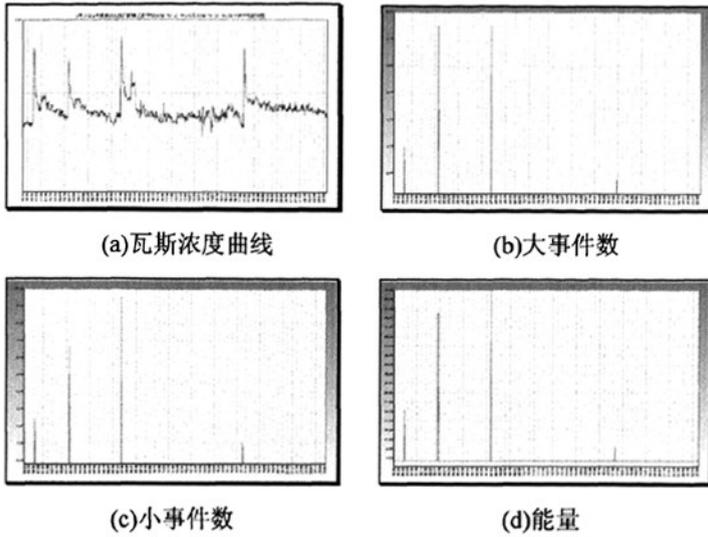


图5.15 9月10日6222工作面回风正前瓦斯与动态曲线

5.5.2 实时跟踪指标 DI 分析

根据瓦斯项综合指标 WS 及声发射项综合指标 AE 对比分析, 如图 5.16, 两种综合指标虽然有一定的差别, 但有着良好的一致性。煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测指标 DI 可以通过瓦斯项和声发射项的接近程度来进行分级评价。

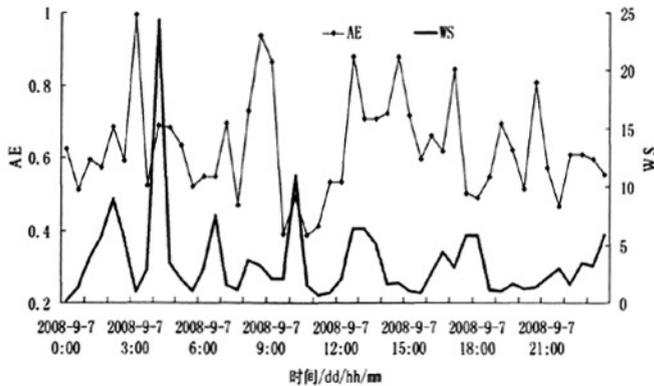


图5.16 AE与WS指标对比曲线(9月7日)

5.6 本章小结

对比常规预测指标, 验证了瓦斯项综合指标 WS 及声发射项综合指标 AE 用于突出危险性实时跟踪预测的可行性和准确性, 实时跟踪预测指标 DI 可以利用瓦斯项和声发射项综合指标的接近程度来进行分级评价。

6 结论

6.1 主要结论

(1) 建立了大、小事件的频数 f 和趋势 Q 、能量和 E 三类声发射单项实时预测指标, 并根据现场实际需要, 设定 8h 长时指标和 3h 短时指标。初步设定影响因子权重向量 B 及梯形突出危险性隶属函数 $f(x)$, 建立了声发射项综合指标 AE , 其中 $B = \{0.083, 0.220, 0.103, 0.141, 0.221, 0.034, 0.060, 0.024, 0.042, 0.067\}$ 。

(2) 建立了瓦斯浓度预测模型: $\hat{y}_{t+1} = \alpha y_t + (1-\alpha)\hat{y}_t$, 并用预测误差(平均误差和标准误差)的平方和的平方根(RMSPE)最小来确定最佳平滑系数; 建立了瓦斯动态分析模型, 包括偏差 $y(\Delta h)_t = \frac{x_t - A(\Delta h)_t}{A(\Delta h)_t}$ 和方差 $s^2 = \frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t (x_i - \mu)^2$ 指标来检查突出前兆的瓦斯浓度变动信息; 建立了瓦斯项突出危险性实时预测综合指标 $WS = \frac{y^2 + S^4}{S\sqrt{y}}$ 。

(3) 提出了以声发射和瓦斯为基础参数的煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测综合指标 DI (Dangerous Index): $DI = \frac{AE}{WS}$, 初步拟定突出危险指标为 1, 即声发射和瓦斯所表现出来的前兆信息完全一致的情况下, 发生煤与瓦斯突出, 其危险程度可以通过 DI 与 1 的接近程度来进行分级。

(4) 验证了瓦斯项综合指标 WS 及声发射项综合指标 AE 用于突出危险性实时跟踪预测的可行性和准确性, 实时跟踪预测指标 DI 可以利用瓦斯项和声发射项综合指标的接近程度来进行分级评价。

6.2 展望

由于现场试验的有限性, 声发射项综合指标 AE 、瓦斯项综合指标 WS 及煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测指标 DI 的突出危险性分级尚需要大量的煤矿现场实践经验进行总结优化, 另外综合指标临界值的确定需进一步进行研究。

致 谢

本文是在导师伍永平教授的精心指导下完成的。从论文选题、现场调研试验、理论分析及论文写作等诸多方面都渗透着伍老师的心血和谆谆教诲。期间，深深感受到伍老师深厚的学术造诣、严谨的科学态度、优秀的个人魅力以及对子弟的严格要求。在伍老师的全面培养和严格要求下，个人在文化课学习和现场实践能力方面都取得了较好的成绩和进步，同时在为人处事方面给予我的影响和感触，将使我今生受用。在此论文完成之际，谨向尊敬的导师—伍永平教授表示我最衷心的感谢！

论文完成过程中，同时得到了苏燹教授的悉心指导和深切关怀，苏老师以丰富的现场知识积累、煤矿监控设备方面突出的研发能力以及个人的事业生涯都给我以无以估量的思考，让我不仅在知识获取上受益匪浅，同时也让我在人生的航程中找到属于自己的灯塔，在这里表示我最诚挚的谢意！

三年的学习、工作生活以及论文完成中有幸聆听来兴平教授、负东风教授、黄庆享教授、柴敬教授、索永录教授、肖江副教授、高喜才老师等的教诲和指导，尤其是解盘石老师在数值试验方面给予的指导和帮助，在此表示真心的感谢！

在学习研究及实践工作中，也得到师兄任世广、曾佑富，同学李开放、邱标、李俊亮、张艳丽以及诸位师弟、师妹的帮助和关心，同时也有同学们的问候和支持，在此表达我真诚的感谢！

此外，窑街煤电集团公司海石湾煤矿矿长罗万忠、总工袁崇亮、通灭部部长张吉福、生产技术部徐创河、通灭队和监测队队长姚素良以及现场师傅在系统现场试验过程中给予了大力支持和帮助，在此也表示感谢！

感谢西安西科测控设备有限责任公司领导的理解和支持，感谢研发部的高级软件研发工程师曾彦、寇祺东等在数据库查询等诸多方面给予的帮助！

最后，感谢今天在百忙之中参加我论文答辩的各位评委、老师和同学们，由于本人水平有限，论文中难免不足之处，敬请老师和同学们不吝赐教！谢谢！

参考文献

- [1] 黄运飞. 煤-瓦斯介质力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.1
- [2] 许江, 尹光志等. 煤与瓦斯突出潜在危险区域预测的研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2004. 6
- [3] 王凯, 俞启香. 煤与瓦斯突出的非线性特征及预测模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005. 3
- [4] 周世宁, 林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [5] 程五一等. 煤与瓦斯突出区域预测理论及技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005
- [6] 胡千庭. 煤与瓦斯突出非接触式预测技术的研究[J]. 煤炭科学研究院重庆分院, 1997
- [7] 李树刚, 常心坦, 徐精彩. 煤岩与 CO₂ 突出特征及其预防技术研究[J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(4): 1~4
- [8] 聂百胜, 何学秋等. 煤与瓦斯突出预测技术研究现状及发展趋势[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(4): 40~43
- [9] 樊栓保. 国内外煤与瓦斯突出预测的新方法[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(5): 17~19
- [10] 漆旺生, 凌标灿, 蔡嗣经. 煤与瓦斯突出预测研究动态及展望[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(12): 1~4
- [11] 苏葵等. 工作面突出危险性实时跟踪预测技术及装备的研究科学技术报告[R]. 煤炭科学研究总院重庆分院. 2000. 2
- [12] 王凯, 王轶波, 卢杰. 煤与瓦斯突出动态前兆的非线性特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2001, 13(4): 22~26
- [13] 刘明举, 刘希亮, 何俊. 煤与瓦斯突出分形预测研究[J]. 煤炭科学技术, 1998, 23(6)
- [14] 赵旭生, 董银生, 岳超平. 煤与瓦斯突出预测敏感指标及其临界值的确定方法[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(3)
- [15] 唐春安, 芮勇勤等. 含瓦斯“试样”突出现象的RFPA^{2D}数值模拟[J]. 煤炭学报, 2000, 25(5): 501~504
- [16] 张宏伟, 陈学华, 王魁军. 地层结构的应力分区与煤瓦斯突出预测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 462~465
- [17] 汤友谊, 陈江峰等. 瓦斯突出煤体探测的物性前提及应用[J]. 焦作工学院学报, 2000, 19(6): 407~410
- [18] Yunxing Cao, Dingdong He, David C. Glick. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults: *International Journal of Coal Geology* 48 (2001) 47~63

- [19] T. Xua, C.A. Tanga, T.H. Yangc, W.C. Zhu, J. Liu. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43 (2006) 905~919
- [20] Xiao-Zhao Li, An-Zeng Hua. Prediction and prevention of sandstone-gas outbursts in coal mines: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43 (2006) 2~18
- [21] Yaqin Wu, Kai Wang, Maoguang Wang. Study on compound genetic and back propagation algorithm for prediction of coal and gas outburst risk: *Intelligent Information Processing III* (2006) 233~241
- [22] M.B. Wold, L.D. Connell, S.K. Choi. The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behavior during coal mining: *International Journal of Coal Geology* (2008)
- [23] 吕绍林, 何继善. 瓦斯突出煤体的粒度分形研究[J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(2): 46~4
- [24] 郝吉生, 袁崇孚. 模糊神经网络技术在煤与瓦斯突出预测中的应用[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 624~62
- [25] 倪小明, 郝吉生. 采掘工作面煤与瓦斯突出预测专家系统的研制[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2004, 12(4): 67~70
- [26] 煤炭科学研究总院重庆分院. AE 声发射监测煤与瓦斯突出技术[R]. 重庆: 煤炭科学研究总院重庆分院, 2003
- [27] 伍爱友, 姚建, 肖红飞. 基于灰色关联分析的煤与瓦斯突出预测指标优选[J]. 煤炭科学技术. 2005, 33(4): 55~58
- [28] 范金志, 郭德勇, 张建国. 层次分析法确定煤与瓦斯突出影响因素的权重[J]. 矿业安全与环保. 2001, 31(3): 4~7
- [29] 成新龙, 何新矿, 白国基. 能量守恒分析在防治煤与瓦斯突出中的研究[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30 (10): 52~55
- [30] 朱连山. 煤与瓦斯突出机理浅析[J]. 矿业安全与环保, 2002, 29(2): 23~25
- [31] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995
- [32] 曹树刚. 煤岩的蠕变损伤、瓦斯渗流和煤与瓦斯突出关系的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1994
- [33] 李中锋. 煤与瓦斯突出机理及其发生条件评述[J]. 煤炭科学技术. 1997, 25(11): 44~47
- [34] 于不凡, 王佑安. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000
- [35] 周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说[J]. 中国矿业大学学报, 1990(2): 1~9
- [36] 李萍丰. 浅谈煤与瓦斯突出机理的假说——二相流体假说[J]. 煤矿安全, 1989 (11): 29~35
- [37] 梁冰, 章梦涛等. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论[J]. 煤炭学报, 1995, 20(5): 492~496
- [38] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说[J]. 煤矿安全, 1995, 16 (2): 17~25
- [39] 卢连宁, 张迎新等. 煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说[J]. 黑龙江科技学院学报, 1995, 17(1): 1725

- [40] 徐学锋. 地质构造对煤与瓦斯突出的影响研究[M]. 阜新:辽宁工程技术大学出版社, 2003
- [41] 唐春安, 王淑红, 傅宇方著. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [42] 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985
- [43] 霍多特 B B. 煤与瓦斯突出[M]. 宋士钊, 王佑安译. 北京: 中国工业出版社, 1966
- [44] 胡千庭. 煤与瓦斯突出的力学作用机理及应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2007
- [45] 刘卫东, 孟晓静, 丁恩杰. 岩体声发射监测系统的设计与实现[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(5): 64~66
- [46] 邹银辉. 煤岩声发射机理初探[J]. 矿业安全与环保, 2004, 31(1): 31~35
- [47] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 26(增 1): 2794~2799
- [48] 胡千庭. 煤与瓦斯突出非接触式预测技术的研究[J]. 煤炭科学研究院重庆分院, 1997
- [49] 黄运飞著. 煤-瓦斯介质力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993
- [50] 黄仁东等. 声发射技术在湘西金矿深井安全开采中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2004, 4(12): 101~103
- [51] 邹银辉, 赵旭生, 刘胜. 声发射连续预测煤与瓦斯突出技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(6): 61~65
- [52] 纪洪广等. 无损监测中常用声发射参数分析与评价[J]. 无损检测, 2001, 23(7): 289~292
- [53] 西安科技大学西安西科测控设备有限责任公司. GDD-1 矿用矿压动态传感器(矿用本质安全型)使用说明书. 2004, 4
- [54] 西安科技大学西安西科测控设备有限责任公司. KJ110N 型矿井安全综合监控系统软件使用说明书. 2004, 8
- [55] 程伟. 煤与瓦斯突出危险性预测及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003, 7
- [55] 王凯, 俞启香, 蒋承林. 钻孔瓦斯动态涌出的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3)
- [56] 俞善炳, 谈庆明等. 含气多孔介质卸压层裂的间隔特征——突出的前兆[J]. 力学学报, 1998, 30(2)
- [57] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001
- [58] 秦汝祥, 张国枢, 杨应迪. 瓦斯浓度序列的煤与瓦斯突出预报方法及应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2008, 28(3)
- [59] 王振龙, 胡永宏主编. 应用时间序列分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 5
- [60] 杨叔子, 吴雅. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003
- [61] 苏文叔. 利用瓦斯涌出动态指标预测煤与瓦斯突出[J]. 煤炭工程师, 1996 (5)
- [62] 史玉峰, 宁津生. 指数平滑法改进灰色模型及其在形变数据分析中的应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30 (2): 206~209
- [63] 郭德勇, 范金志等. 煤与瓦斯突出预测层次分析-模糊综合评判方法[J]. 北京科技大

学学报, 2007, 29 (7): 660~604

- [64] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- [65] 张跃, 皱寿平, 宿芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992

附 录

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 王栓林, 李俊亮, 李开放. 声发射技术在煤与瓦斯突出预测中的应用. 西安科技大学学报[增刊]
- [2] 李俊亮, 王栓林. 防突工作面地应力与瓦斯浓度关联分析. 西安科技大学学报[增刊]
- [3] 伍永平, 王栓林. 突出危险预测中瓦斯浓度实时指标的建立. 西安科技大学学报[录用]

攻读硕士学位期间参与的科研项目

- [1] 神宁集团清水营煤矿软岩巷道多介质耦合支护设计及优化
- [2] 陕煤集团彬长矿区大佛寺煤矿特厚煤层开采技术
- [3] 煤与瓦斯突出危险性实时跟踪预测技术与装备研究

