



辽宁科协资助

LIAONING KEXIE ZIZHU

辽宁省优秀自然科学著作·2015年

● 付华 徐耀松 王雨虹 著

煤矿瓦斯突出灾害 辨识技术

Identification Technology of Gas Outburst Disaster
in Coal Mine



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

辽宁省优秀自然科学著作

煤矿瓦斯突出灾害辨识技术

付华 徐耀松 王雨虹 著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

© 2016 付华 徐耀松 王雨虹

图书在版编目 (CIP) 数据

煤矿瓦斯突出灾害辨识技术/付华, 徐耀松, 王雨虹著. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2016. 7

(辽宁省优秀自然科学著作)

ISBN 978-7-5381-9873-7

I. ①煤… II. ①付… ②徐… ③王… III. ①煤突出—灾害防治②瓦斯突出—灾害防治 IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 158200 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编: 110003)

印刷者: 鞍山市春阳美日印刷有限公司

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印 张: 12

字 数: 262 千字

印 数: 1~1 000

出版时间: 2016 年 7 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 周 文

书 号: ISBN 978-7-5381-9873-7

定 价: 36.00 元

联系电话: 024-23284526

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

煤炭作为我国的主要能源,有力地支撑了国民经济和社会长期平稳快速发展。2014年,煤炭在我国一次能源生产和消费结构比重占到了73.2%和66%。“十三五”期间,受经济结构调整、能源结构优化等多种因素的影响,煤炭行业面临着巨大的机遇与挑战,但是作为保障国家能源安全基础的重要能源,以“煤为基础,多元发展”的能源战略方针不会也不可能改变,煤炭的主体能源的地位和作用难以动摇。

与世界先进的煤炭安全生产国家相比,我国的煤矿安全生产状况仍存在明显差距。2010年,澳大利亚的煤矿百万吨死亡率已经达到0.01,美国为0.049,南非为0.07,印度为0.15,俄罗斯为0.19,波兰为0.266。2014年,我国百万吨死亡率为0.256。据不完全统计,新中国成立以来,我国煤矿发生的一次死亡百人以上的特别重大事故为25起,其中19起事故是与瓦斯突出或瓦斯爆炸有关。

煤矿瓦斯灾害是煤矿首要的恶性事故,其发生频率高,破坏性广,社会影响大。由于它直接威胁着矿工的生命安全,所以瓦斯事故的发生给我国的国际声望造成了恶劣的影响。长期以来,人们一直是以瓦斯的检测为主,无法提前预测预报。如果能通过瓦斯灾害的机理研究找到瓦斯灾害的一般规律,就可以预防和控制瓦斯灾害的发生。

近年来,本书作者先后承担了多项关于煤矿瓦斯灾害预测与防治方面相关课题的研究。其中,国家自然科学基金项目3项,分别为煤矿瓦斯融合决策与预测控制研究(50874059),煤矿瓦斯灾害动态辨识与预测基础理论研究(51274118)、基于数据挖掘的煤矿安全风险评价体系研究(71371091);省部级课题7项,分别为煤矿瓦斯融合决策与预测控制研究、煤矿安全在线集成决策技术研究、煤矿瓦斯电子监控技术、煤矿瓦斯预测控制关键技术研究、煤矿瓦斯灾害特征提取与信息融合技术研究、煤矿生产安全计算集成控制系统研究、矿井瓦斯监测中的多传感器信息融合的基础理论研究、煤矿瓦斯智能监测与预测预报技术研究。

研究发现,通过对井下现场采集到的大量瓦斯灾害数据信息的分析处理,提取相关的煤与瓦斯突出的特征参数,在瓦斯突出发生之前,就能够早期辨识和预测煤与瓦斯突出灾害,提前做出预报预警,这样就可以适时、合理地采取措施,预防瓦斯突出灾害事故的发生,这为矿井的安全生产和工人的生命安全提供可靠的保障。但是,现有的瓦斯监测系统只是对瓦斯浓度、通风等参数在地面监控计算机上进行了简单的超限报警显示和提示、执行简单的断电功能。对煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸的预测预报指标的测定也大多通过人工进行,只能针对单一灾害的危险源进行静态评价,缺乏动态分析和评价,没有形成在线动态灾前预测预报的系统,缺乏对矿井瓦斯灾害的综合分析判断和在线动态辨识能力,不能对复杂条件下的煤矿井下瓦斯

灾害进行预防和控制。因此,在前期的研究基础上,本书将进一步研究瓦斯突出灾害在线动态辨识关键技术,建立瓦斯突出灾害信息特征辨识模型和煤矿瓦斯突出灾害的预测控制模型,解决煤矿瓦斯突出灾害动态辨识与预测控制的难题。

计算机技术、电子技术、现代检测技术、信息科学技术的发展为煤与瓦斯突出准确的辨识、实时的预测及科学有效的防治都提供了新的思路和方法,本书将多学科交叉和融合,利用现代信息处理技术来研究煤矿瓦斯突出辨识问题,既突破了煤矿瓦斯灾害辨识的关键技术,也丰富了系统辨识理论的内涵。因此,本书的研究成果具有深远的科学意义。

本书所介绍的煤矿瓦斯灾害辨识技术为遏制煤矿重特大瓦斯突出事故提供理论依据和技术支撑,对煤矿的安全生产具有重要意义,它可最大限度地降低或排除煤矿瓦斯的危险因素,保障煤矿企业的安全生产和煤矿工人的生命安全。因此,本书的研究成果具有广泛的社会应用前景,能够为煤矿企业带来极大的社会效益和经济效益。

在本书出版之际,特别感谢辽宁省科学技术协会著作出版基金、国家自然科学基金基金的资助。

著者

2015年5月

目 录

1 绪论	001
1.1 煤矿瓦斯突出灾害机理	001
1.2 瓦斯突出灾害系统辨识的原理与方法	007
2 瓦斯突出灾害辨识系统特性	015
2.1 瓦斯突出辨识系统动态特性方程	015
2.2 瓦斯突出非线性系统辨识	020
2.3 瓦斯突出辨识系统建模举例	026
3 煤矿瓦斯突出信号检测方法	029
3.1 声发射检测瓦斯突出	029
3.2 电磁辐射检测瓦斯突出	042
3.3 超声波检测瓦斯突出	047
3.4 核磁法检测瓦斯突出	052
3.5 压电法检测瓦斯突出	054
4 瓦斯突出灾害信号辨识方法	065
4.1 微弱信号检测方法	065
4.2 耦合噪声信号的辨识方法	068
4.3 微弱激励响应信号辨识方法	074
5 瓦斯突出多源信息融合辨识模型	078
5.1 辨识原理	078
5.2 瓦斯突出多源信息特征级融合模型	083
5.3 瓦斯突出多源信息决策级辨识模型	101
6 瓦斯突出耦合辨识模型	120
6.1 耦合辨识的基本原理	120

6.2	基于 CIPSO-ENN 的瓦斯突出耦合辨识模型	122
6.3	基于 CSO-RVM 的瓦斯突出耦合辨识模型	135
7	瓦斯突出混沌动力学辨识模型	140
7.1	混沌动力学辨识原理	140
7.2	改进极端学习机与混沌时间序列的瓦斯突出辨识模型	148
7.3	改进支持向量机与混沌时间序列的瓦斯突出动态辨识	154
8	瓦斯突出软测量辨识模型	163
8.1	瓦斯突出软测量辨识原理	163
8.2	基于软测量和数据融合的瓦斯突出辨识模型	171
8.3	基于 PCA 和 PSO-ELM 的瓦斯突出软测量辨识	175
参考文献		182

1 绪论

1.1 煤矿瓦斯突出灾害机理

1.1.1 煤矿瓦斯突出特征

煤与瓦斯突出是指煤与瓦斯在一个很短的时间内突然地连续地自煤壁暴露面抛向巷道空间所引起的动力现象。在煤与瓦斯突出的过程中,抛出的煤有的只有几吨、几十吨,有的则达到上千吨,甚至高达几千吨以上,同时涌出大量的瓦斯充满整个巷道空间。根据我国煤矿事故统计分类,煤矿瓦斯事故分为瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出、瓦斯燃烧和瓦斯窒息。煤与瓦斯突出可分为煤的压出伴随瓦斯涌出(简称“压出”)、煤的倾出伴随瓦斯涌出(简称“倾出”)和煤与瓦斯突出喷出(简称“突出”)3种类型。

1.1.1.1 压出的基本特征

压出有两种形式,即煤的整体位移和没有一定距离的抛出,但位移和抛出的距离都较小;压出后,在煤层与顶板之间的裂隙中常留有细煤粉,整体位移的煤体上有大量的裂隙;压出的煤呈块状,无分选现象;巷道瓦斯涌出量增大;压出可能无孔洞或呈孔大腔小的楔形、半圆形孔洞。

1.1.1.2 倾出的基本特征

倾出的煤就地按自然安息角堆积、无分选现象;倾出的孔洞多为口大腔小,孔洞轴线沿煤层倾斜或铅垂方向发展;无明显动力效应;倾出常发生在煤质松软的急倾斜煤层中;巷道瓦斯涌出量明显增加。

1.1.1.3 突出的基本特征

突出的煤向外抛出的距离较远,具有分选现象;抛出的煤堆积角小于自然安息角;抛出的煤破碎程度较高,含有大量碎煤和一定数量手捻无力感的煤粉;有明显的动力效应,如破坏支架、推倒矿车、损坏或移动安装在巷道内的设施等;有大量的瓦斯涌出,瓦斯涌出量远远超过突出煤的瓦斯含量,有时会使风流逆转;突出孔洞呈口小腔大的梨形、舌形、倒瓶形、分岔形以及其他形态。我国特大型煤与瓦斯突出有下述特点:绝大多数特大型煤与瓦斯突出都发生在石门穿过危险煤层的过程中,在采煤工作面也发生过特大型突出;绝大多数特大型煤与瓦斯突出都是爆破引起的。爆破与突出往往有几分钟甚至几小时的延迟时间;特大型煤与瓦斯突出时的瓦斯量都很大,可达到吨煤 80~

100 m^3 ；多数特大型突出都发生在由地质构造变化而引起的煤层厚度变化地带；发生特大型突出的煤层几乎都有厚度不等的软分层存在，或是煤层本身就比较松软，破坏类型较高。尤其是软分层结构分散，多呈粒状或粉末状，易于破碎。在地质构造变化带，往往形成强烈的揉皱煤，层理和节理遭到破坏。

1.1.2 煤矿瓦斯突出假说与突出机理

煤与瓦斯突出是一种非常复杂的动力现象，目前为止，对各种地质、开采条件下突出发生的机理还没有完全掌握，大部分是根据现场统计资料及实验研究提出的各种假说。简单地总结这些假说可以分为4类：以地应力为主导作用的假说（地应力作用说）、以瓦斯为主导作用的假说（瓦斯主导说）、化学本质假说、综合作用假说，其中，综合作用假说得到了国内外多数学者的认可。

1.1.2.1 地应力作用说

这类假说主要有：俄罗斯的梅德维杰夫提出的“拉应力波”说；俄罗斯的瓦尔琴等人提出的“塑性变形”说；俄罗斯的别楚克和阿尔沙瓦等人提出的“岩石变形潜能”说；日本矢野贞三提出的“应力叠加”说；俄罗斯的别洛夫和卡尔波夫提出的“应力集中”说；俄罗斯奥西波夫提出的“振动波动”说；俄罗斯的包利生科提出的“冲击式移近”说等。对于高地应力的构成有不同的说法，一种认为除自重应力外，还存在着地质构造应力，包括残余构造应力和现代构造应力，如岩石变形潜能说。当巷道接近储存构造应变能高的硬而厚的岩层时，后者将像弹簧一样伸张，将煤破坏和粉碎，引起瓦斯剧烈涌出而形成突出。另一种认为，采掘工作面前方存在着集中应力，当弹性厚顶板悬顶过长或突然冒落时，可能产生附加的应力，如应力集中说。这些假说的共同特征是认为突出是高地应力作用的结果，特别是各种压力的叠加部位，极易发生瓦斯突出。

1.1.2.2 瓦斯主导说

瓦斯主导说认为，煤体内存在的高压瓦斯是突出的必要条件，瓦斯在突出中占有主导作用。瓦斯主导说主要包括俄罗斯的沙留金和英国的威廉姆斯等提倡的“瓦斯包”说；俄罗斯的赫里斯基阿诺维奇提出的“突出波”说；俄罗斯的舍尔巴尼提出的闭合孔隙“瓦斯释放”说；俄罗斯的尼柯林等人提出的“瓦斯膨”说；俄罗斯的里热夫斯基提出的“卸压瓦斯说”；日本兵库信一郎提出的“地质破坏带”说；德国的克歇尔提出的“瓦斯解吸”说等。这类假说中“瓦斯包”说占重要地位，认为煤层中存在高瓦斯压力和高瓦斯含量的煤窝团，煤松软且裂隙发育，有较强的瓦斯存储能力，被透气性差的煤岩所包围，开采过程中揭穿“瓦斯包”，煤壁会发生破坏，瓦斯将松软的煤窝破碎并抛出煤岩形成突出。

1.1.2.3 化学本质说

化学本质说主要有“爆炸的煤”说、地球化学说和硝基化学说。“爆炸的煤”说认为突出是由于煤在地下深处变质时发生的化学反应而引起。地球化学说认为瓦斯突出是煤层中不断进行的地球化学过程：煤层的氧化—还原过程，由于活性氧及放射性气体的存在而加剧生成一些活性中间物，导致瓦斯高速形成。中间产物和煤中有机物质的相互作用，使煤分子得到破坏。硝基化学说认为突出煤中积蓄有硝基化合物，只要有不大的活化能量，就能产生发热反应；当其热量超过分子间活性能时，反应将自发地加速进行，从而发生。这类假说的观点认为突出现象是煤层中不断进行地球化学过程，或化学连锁反应过程。

上述3类主导假说都是只强调了某一单一因素在瓦斯突出中的主导作用。任何单一假说都不能充分解释所有的现象，瓦斯主导说不能解释岩石声响和煤层自行揭开的动力现象；地压主导说无法解释“断层处富集瓦斯”“封闭性的断层”和开采深度数百米以上的低瓦斯矿井不发生突出的事实；化学本质说因缺乏现场实践和实验室研究数据未能得到广泛支持，逐渐被研究者所淘汰。因此，突出机理的综合作用假说就成为突出机理理论研究发展的必然。

1.1.2.4 综合因素主导说

综合假说认为突出是地应力、瓦斯和煤岩物理性质等综合因素作用的结果，这一假说全面考虑了瓦斯突出的动力因素和阻力因素两方面的作用。这类假说主要有振动说、分层分离说、破坏区说、动力效应说、游离瓦斯压力说、能量假说和应力分布不均匀说，其中以苏联学者B. B. 霍多特提出的“能量假说”影响最为广泛。另外，我国科学家还提出了发动中心说、流变假说、球壳失稳假说和煤与瓦斯突出的力学作用机理等。

(1) 流变假说。我国科学家何学秋和周世宁两位教授利用流变学观点分析了突出过程中含瓦斯煤受力的时间和空间过程，对含瓦斯煤体进行三轴受力状态实验，通过对流变性的观察研究，得出了含瓦斯煤流变特性的数学模型，提出煤与瓦斯突出的流变机理。该假说认为：含瓦斯煤体在大于或等于其屈服载荷时，则明显地表现为时间上的3个阶段：变形衰减阶段、均匀变形阶段和加速变形阶段。突出是含瓦斯煤体快速流变的结果，流变行为取决于其外部条件和自身的物理力学性质，不存在突出煤和非突出煤差别。而且流变假说还认为煤与瓦斯突出影响因素不仅包括瓦斯、地应力和煤的物理力学性质，还应考虑时间因素。该观点对延期突出给予了很好的解释。

(2) 二相流体假说。西安科技大学的李萍丰教授提出了“二相流体假说”的瓦斯突出机理。通过对突出特征的研究分析，该假说认为：突出的本质是在瓦斯压力的作用下，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，二相流体所产生的膨

胀能量远超过煤体本身的弹性能和瓦斯膨胀能之和,这3种能量之和足以超出煤体强度,冲出阻碍区,导致突出。它能较好地解释突出的现象和规律。

(3) 球壳失稳说。“球壳失稳假说”是由中国矿业大学蒋承林博士提出的,他认为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使形成的球盖状煤壳失稳破坏,抛向巷道空间,使应力峰移向煤体内部,继续破坏后续的煤体的持续发展过程。地应力在突出中的作用是破坏煤体,煤体的破坏是发生突出的必要条件,产生突出的充分条件是煤体受地应力破坏后能释放出大量的瓦斯气体,使煤体裂隙扩展并使形成的球盖状煤壳失稳抛出。

(4) 固流耦合理论。辽宁工程技术大学章梦涛和梁冰两位教授提出了“固流耦合理论”。他们认为,煤与瓦斯突出是煤与瓦斯固流耦合作用下煤岩体变形失稳破坏问题,是由于煤岩体局部区域的应力超过峰值强度,物理力学性质发生变化,呈现应变软化性质而造成的,故也将这种变形失稳破坏称为物理上的失稳破坏。

(5) 应力分布不均说。该假说是由苏联马凯耶夫煤矿安全研究所的包布洛夫提出的。他认为突出煤层的围岩中具有较高的不均匀分布的应力,其主要原因是地质构造运动,个别情况下是由于采掘过程引起的(如留煤柱、冒顶等)。该假说将掘进工作面前方煤层分为两个带:压出带、压缩带和未扰动带。当煤体深部应力分布不均匀时,就会产生围岩的不均匀移动,围岩位移减缓或“停滞”,从而建立了不稳定平衡状态。其特点是压出带的尺寸大大减小和缺少压缩带,离工作面不远处具有较高的、稳定的瓦斯压力。突出前,由于对工作面的机械作用,破坏了围岩的稳定平衡,使含瓦斯的煤暴露和破碎。突出后,恢复了两个带,并且压出带和压缩带的尺寸有些扩大。围岩移近(冲击)和随后的瓦斯压力变化,说明突出的首要原因是围岩应力释放,突出过程仿佛是带有脉冲性质的岩石变形。瓦斯是突出的基本能源之一。在煤体破坏过程中,形成的暴露面附近的瓦斯压力梯度,能破坏并分离这些分层,使饱含瓦斯的分层又重新暴露,从而破坏过程连续进行,并向煤层深部扩展。这种破坏过程,数学上可用破碎波来描述。在煤体破坏时,在暴露面附近形成瓦斯压力梯度,引起很薄的分层分离并破坏,饱含瓦斯的分层又重新暴露,破坏过程反复进行,并以突出波的形式向深部传播,释放出大量瓦斯把碎煤抛出。

(6) 力学破坏说。胡千庭认为突出是一个力学破坏过程,该理论结合已经发生的大量突出动力现象的特征和规律。通过对突出过程的分析,认为突出的发动和发展是两个存在较大差别的突出过程,应该分别进行研究。初始失稳条件、破坏的连续进行条件和能量条件是突出发生的必要条件。突出的发动是从工作面周围支承压力极限平衡区煤壁的失稳开始的,煤的应变软化与流变特性则是这种失稳的基础。突出的发展是煤壁由浅

入深逐渐破坏并抛出的过程,煤体的破坏主要是在瓦斯压力作用下的拉伸破坏。在突出发展前期,孔洞内气压和孔洞壁孔隙瓦斯压力相差很大,且孔洞壁受到堆积碎煤的反作用力较小,孔洞壁煤体将呈剧烈的粉化破坏;在突出发展后期,孔洞壁煤壁将出现层裂破坏。通过简化的突出模型,给出了突出发生的能量条件的解析表达式,并解释了突出时瓦斯涌出量相对于抛出煤体瓦斯含量成倍增加的原因。

突出的发生是一个复杂的非线性动力系统在时空演化过程中的失稳和突变行为。其过程可划分为4个阶段,分述如下:

(1) 准备阶段。突出煤体经历着能量的积聚过程,使之逐渐发展到临界破坏甚至过载的脆弱平衡状态。在工作面附近的煤壁内形成高的地应力与瓦斯压力梯度。在这个阶段,会显现多种有声的与无声的突出预兆。准备阶段的时间可在很大范围内变化,在震动爆破或顶板动能冲击条件下,仅几秒钟即可完成。

(2) 激发阶段。该阶段的特点是地应力状态改变,即极限应力状态的部分煤体突然破坏,卸载(卸压)并发生巨响和冲击,向巷道方向作用的瓦斯压力的推力由于煤体破裂,顿时增加几倍到十几倍,伴随着裂隙的生成与扩张,膨胀瓦斯流开始形成,大量吸附瓦斯进入解析过程而参与突出。大量的突出实例表明,工作面的多种作业都可以引起应力状态的突变而激发突出。例如各种方式的落煤、打眼、刨柱窝、修正工作面煤壁等都可以人为激发突出,而统计表明,应力状态变化越剧烈,突出的强度越大,因此,震动爆破、一般爆破是最易引起突发的工序。

(3) 发展阶段。该阶段具有两个互相关联的特点:一是突出从激发点起向内部连续剥离并破碎煤体,二是破碎的煤在不断膨胀的承压瓦斯风暴中边运送边粉碎。前者是在地应力与瓦斯压力共同作用下完成的,后者主要是瓦斯内能做功的过程。煤的粉化程度与游离瓦斯含量、瓦斯放散初速度、解吸的瓦斯量以及突出孔周围的卸压瓦斯流,对瓦斯风暴的形成与发展起着决定作用。在该阶段中煤的剥离与破碎不仅具有脉冲的特征,而且有时是多轮回的过程。这可以从突出物的多轮回堆积特征中得到证实,也可以从突出过程实测记录中找到依据。造成脉冲与轮回性的原因主要是地应力、瓦斯压力与煤的强度的不均匀分布等所致。连续剥离并破碎煤体以及突出孔周围的卸压瓦斯流是产生瓦斯风暴的前提,而瓦斯风暴连续不断地把破碎的煤及时运走,是使剥离与破碎煤体连续向内部发展的必要条件,因为这样才能使突出孔壁近处煤体保持着一个较高的地应力梯度和瓦斯压力梯度。

(4) 终止阶段。突出的终止有以下两种情况:一种在剥离与破碎煤体扩展终于到了较硬的煤体或地应力与瓦斯压力降低不足以破坏煤体;二是突出孔道被堵塞,其孔壁有突出物支撑建立起新的拱平衡或孔洞瓦斯压力因其被堵塞而升高,地应力与瓦斯压力梯

度不足以剥离与破碎煤体。但是,这时突出虽然停止了,而突出孔周围的卸压区与突出的煤涌出瓦斯的过程并没有停止,异常的瓦斯涌出还要持续相当长时间。

从系统的观点来看,突出是相应的瓦斯煤岩系统在外力扰动下,发生的动力失稳现象。从突出准备到激发以至发展的过程中,系统内部各要素之间及其外部系统的相互作用具有明显的非线性特征。从本质上看,煤与瓦斯突出是一个力学过程。影响突出的主要控制因素如地应力场、瓦斯压力场和煤的物理力学性质为力学量,采掘效应、瓦斯渗流、煤体破坏和失稳以及突出物的抛射等都可以用力学过程或力学状态来描述。突出在力学上表现为强度和失稳两种机制。强度机制即突出是在地应力、瓦斯压力作用下瓦斯煤体的强度破坏,失稳机制即地应力、瓦斯压力作用下瓦斯煤体自由表面的失稳。

1.1.3 煤矿瓦斯突出发生规律

煤与瓦斯突出的发生有如下规律:

(1) 突出发生在一定深度上。开始发生突出的最浅深度成为突始深度,一般比瓦斯风化带的深度深1倍以上。随着深度的增加,突出的危险性增高,这表现在突出的次数增多,突出的强度增大,突出煤层数增加,突出危险区域扩大(从点突出发展到多点突出甚至再发展到深部的几乎点点突出)。始突深度标志着突出需要起码的地应力和瓦斯压力。

(2) 突出的次数和强度随着煤层厚度特别是软分层的厚度的增加而增多,厚煤层或相互接近的煤层群突出危险性比单一薄煤层大,对于同一煤层,当其厚度由薄变厚时,突出危险性有增大趋势,突出最严重的煤层一般是最厚的主采煤层。

(3) 突出的煤层中瓦斯压力越高,突出的危险性越大。根据目前统计,发生突出时伴随涌出的气体种类主要是瓦斯,个别矿井涌出的则是二氧化碳。煤层对这些气体都有吸附性,并且吸附性越强,同等条件下突出的危险性越大。在这些含瓦斯的煤层中,煤层孔隙内瓦斯压力越高,就越容易发生突出,并且其突出的强度也越大。

(4) 突出时的吨煤瓦斯涌出量均比该处煤层的原始瓦斯含量高,甚至高得多。发生煤与瓦斯突出后,用涌出的瓦斯体积除以抛出孔洞外的煤的质量得到吨煤瓦斯涌出量,它比煤层的原始瓦斯含量高许多,达到每吨煤数十至数百立方米瓦斯。

(5) 突出煤层的特点是强度低。在地应力较大时,透气性低,而当地应力减小时,煤体内裂隙大量增多,透气性增大,瓦斯放散初速度较高,煤的原生结构遭到破坏,层理紊乱,有遭受搓揉的迹象,裂隙面上有滑动镜面。有的煤层是整个煤层都具有这种特征,而有的只是在软分层中才具有。在一些经受过多次地质构造破坏的煤层中,软硬煤体相互参混,很不均匀。

(6) 由上向下的突出占大多数,由下向上的突出是极少数。突出的危险性随着煤层

的倾角增大而增加。

(7) 突出与地质构造有密切的关系。尽管在煤层赋存稳定的地方也有突出,但是突出更多是发生在有地质构造的地方。

(8) 由采掘形成的应力集中的地区,突出危险性剧增。

(9) 绝大多数突出发生在落煤时,尤其在爆破时。

(10) 从巷道类型来看,石门揭煤的全过程中突出危险性最大,突出强度也最大,一般在 100 吨/次以上,喷出瓦斯超过 1 万立方米,瓦斯逆流数百米,易造成重大事故,必须防止其发生。

(11) 突出危险性随着煤层顶底板存在硬而厚的围岩(硅质灰岩、砂岩)而增加。

(12) 绝大多数突出都有预兆。地压显现方面的预兆有:煤炮声、支架声响、掉渣、岩煤开裂、底鼓、岩与煤自行剥落,煤壁外鼓、来压、煤壁颤动、钻孔变形、垮孔顶钻、夹钻杆、钻粉量增大、钻机过负荷等;瓦斯涌出方面的预兆有:瓦斯涌出异常、瓦斯浓度忽大忽小、煤尘增大、气温与气味异常、打钻喷瓦斯、喷煤、哨声蜂鸣声等;煤力学性能与结构方面的预兆有:层理紊乱、煤强度松软或软硬不均、煤暗淡无光泽、煤厚度变化大、倾角变陡、波状隆起、褶曲、顶(底)板阶状凸起、断层、煤干燥等。

1.2 瓦斯突出灾害系统辨识的原理与方法

1.2.1 系统辨识原理

对于许多领域,由于系统比较复杂,不能用理论分析的方法获得数学模型。凡是需要通过实验数据确定数学模型和估计参数的场合都要利用辨识技术,辨识技术已经推广到工程和非工程的许多领域,不仅是航空、航天、电力、化工、海洋工程等工程技术领域,还延伸到认知科学、生物信息学、医学工程、经济、社会、生态环境、水文、地质等各个学科。

不同时期不同学者对辨识有着不同的定义。系统辨识的鼻祖 Zadeh 曾给辨识作如下定义:“辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型中,确定一个与所测系统等价的模型。”这个定义明确了辨识的三大要素,即输入输出数据、模型类和等价准则。其中数据是辨识的基础,准则是辨识的优化目标,模型类是寻找模型的范围。P. Eykhoff 所作的定义:“辨识问题可以归结为用一个模型来表示客观系统(或将要构造的系统)本质特征的一种演算,并用这个模型把对客观系统的理解表示成有用的形式。”V. Strejc 对该定义作如下解释:“这个辨识定义强调了一个非常重要的概念,最终模型表示动态系统的本质特征,并且把它表示成适当的形式。这就意味着,并不期望获得一个物理上实际的确切地数学描述,所要的只是一个适合于应用的模型。”L. Ljung 所作的

定义更加实用：“辨识有3个要素，即数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则在一组模型类中选择一个与数据拟合得最好的模型。”L. Ljung的定义为大家普遍接受，认为是对系统辨识最确切的定义。简单地说，辨识就是从所观测到的含有噪声的输入输出数据中提取数学模型的方法。

1.2.2 瓦斯突出灾害系统辨识的意义

煤与瓦斯突出受到地质条件、煤层瓦斯含量、日进度、埋藏深度、煤层厚度及开采技术等多种因素影响，各因素间相互影响和制约，煤与瓦斯突出系统是一个非常复杂的非线性动力系统。对于瓦斯突出灾害的预测预报一直以来都是国内外专家学者致力研究的科学问题。长期以来，人们一直是以瓦斯的检测为主，无法提前预测预报。如果能通过瓦斯突出灾害的机理研究找到瓦斯突出发生的一般规律，就可以预防和控制瓦斯突出灾害的发生。通过对井下现场采集到的大量的瓦斯突出相关数据信息的分析处理，提取相关的瓦斯灾害的特征参数，在发生瓦斯灾害之前，就能够早期辨识和预测瓦斯灾害隐患，提前做出预报预警，可以适时、合理地采取措施，预防瓦斯灾害事故的发生，为矿井的安全和工人的生命安全提供可靠的保障。

由相互作用又相互依赖的诸要素组成的具有相对独立的整体可以认为是一个系统。通常我们把所研究的对象看成一个系统，为了能有效地定量地研究系统的性能，从而进行系统分析、预报等数学模型的引入是相当重要的。系统辨识主要考虑描述系统运动规律的数学模型，因此，瓦斯突出灾害系统建模是瓦斯突出灾害辨识的基础，如果模型不够准确，在临界情况下有可能改变定性结论，或者掩盖一些重要现象。不恰当的模型会使得计算与实际情况不相一致，或偏乐观、或偏保守，也有可能造成潜在的危险。随着系统辨识理论、计算机技术和现代应用数学方法的不断成熟和应用，为煤与瓦斯突出灾害系统辨识提供了新的技术支撑。

1.2.3 瓦斯突出灾害系统辨识的步骤

瓦斯突出灾害系统建模主要是两个方面的任务：一是构建描述系统的模型方程；二是确定模型方程中的参数，实际中两个问题密切相关。从这两个角度考虑，煤与瓦斯突出的辨识步骤主要包括实验设计、数据采集、数据预处理、结构辨识、参数估计、模型验证等。过程如图1-1所示。

1.2.3.1 实验设计并获取数据

辨识是从系统的输入输出数据提取数学模型的过程，实验设计就是使所得到的数据能包含系统充分多的信息，可以根据已有煤与瓦斯突出系统的先验知识，知道瓦斯灾害发展变化规律的一些信息，将有利于设计合理的实验。如系统的快慢性可以帮助选择输入信号频带和输入输出信号的采样周期，系统先验知识可以向现场工程师了解，可以通

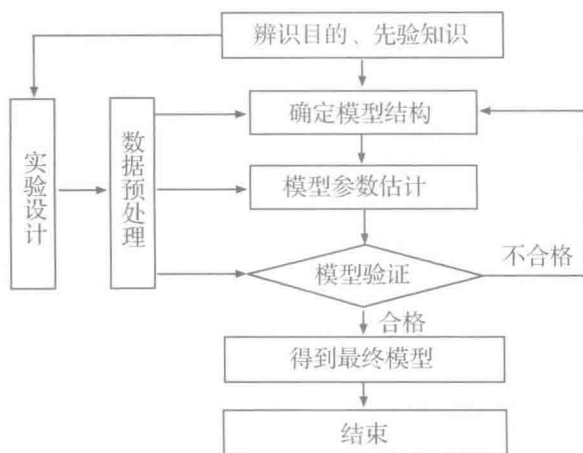


图 1-1 瓦斯突出灾害辨识系统辨识步骤

过多次反复实验，摸索瓦斯突出灾害系统的运动变化规律，进一步设计一个合理的实验。设计实验对瓦斯突出灾害系统辨识是极其重要的。系统日常的运行数据可能并不包含系统的本质特征，用于辨识往往达不到预期效果，原因在于系统稳态运行，输入信号幅值变化不够大，也不满足持续激励信号要求，造成噪信比太大、信息被噪声淹没等。

1.2.3.2 数据预处理

由于瓦斯灾害的监测方法和手段不同，所获得的信号是多种多样的。如探地雷达接收的电磁波信号、声发射仪器接收的声波信号、井下日常监测系统采集的是瓦斯浓度、温度、风速信号等。这些监测信号从不同侧面、不同角度、不同层次来反映瓦斯灾害信息，它们分别具有不同的性质。由于直接通过传感器和数据采集装置获得的原始数据量很大，而且其中包含的冗余信息太多，不能有效地反映煤矿瓦斯灾害所处的真实状态，所以有必要对瓦斯灾害信息进行数据处理、特征分析，以便提取其特征信息。

用于瓦斯突出辨识的数据需要经过数据处理，因为这个处理在辨识之前，故称为数据预处理。输入输出数据通常都含有直流成分或高频成分，或由于数据采用了不同量纲，可能导致错误的辨识结果。因此，为使所辨识的模型不受这些因素的影响，必须对数据进行预处理，如数据零均值化、数据滤波等，以提高辨识的精度和辨识模型的可用性。

1.2.3.3 结构辨识

瓦斯突出灾害系统模型结构辨识依赖于辨识的目的或模型的用途。如果该模型用于瓦斯灾害预测或者监测过程变量，模型阶次就可以选择大一些；如果模型用于控制，模型阶次就应适当，因为阶次太高会给系统设计和分析造成困难。

系统阶次辨识的方法很多，一般的模型结构主要通过先验知识来得到。对于离散时间线性系统和线性参数模型，一种方法是通过分析输入输出数据的相关性确定系统的阶次。

如果知道系统变化规律的解析表达式:

$$\begin{cases} x(t+1)=f(x(t),u(t),\theta) \\ y(t)=g(x(t),u(t),\theta) \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, $x(t)$ 是系统状态向量; $u(t)$ 和 $y(t)$ 是系统的输入和输出; θ 是系统参数向量; 函数 f 和 g 的形式就是模型的结构。那么, 线性参数系统或经过变换获得的线性参数系统的结构可以通过输入输出数据进行辨识。

1.2.3.4 模型参数估计

知道模型的结构后, 模型中可能还会有一些参数的值是未知的, 例如前面所列举的动态模型中的参数向量 θ , 用输入输出数据确定模型中的未知参数 θ 的过程, 就是参数估计。因为实验数据总是有误差的, 这种误差具有随机性, 所以参数估计以统计方法为主, 只有使用大量的数据才能得到良好的结果。对参数进行辨识, 有关辨识方法将在后续章节中详细介绍。

1.2.3.5 模型验证

辨识获得的模型必须进行模型验证, 模型验证就是检验模型的有效性和适应性。通过参数估计得到的模型, 虽然是在某种准则下优化得到的“最好”的模型, 但是并不一定能达到建模的目的, 所以还必须进行适用性检验, 即模型验证。这是辨识过程的重要一环, 只有通过适用性检验的模型才是最终的模型。

模型验证的基本原则: 必须承认辨识得到的模型只是实际系统的一个近似, 不能期望找到一个和实际系统完全一致的模型。如果模型的输入输出特性与实际系统基本一致, 那么就认为模型是满意的。影响模型效果的因素是多方面的, 主要有模型结构选择不当, 实验数据误差过大或数据代表性太差, 辨识算法存在问题等。

模型验证主要有利用先验知识检验和利用数据检验两类。利用先验知识是模型适用性检验的一条重要途径。一些模型从数据的拟合上看不出问题, 但是根据对模型已有的知识却可以断定模型是否适用。

数据检验有离线数据检验和在线数据检验。通常先进行离线数据检验, 基本合格后, 再进行在线数据检验。

(1) 离线数据检验。当采集到一批数据, 把数据分为两组, 一组数据用于辨识建模; 另一组用于模型验证。离线数据检验就是在同一输入下, 计算模型的输出与系统真实输出进行比较, 通过输出残差的白色性来检验。模型验证必须使用与建模不同的数据集, 因为建模一般是极小化误差准则函数, 用于建模的数据往往有很好的拟合性。

(2) 在线数据检验。就是将离线检验后的模型接于实际系统, 用于输出预测, 模型输入就是系统的输入, 如果模型输出与系统真实输出很接近, 得到实际工程师的认可,