



河北工程大学  
Hebei University of Engineering

# 硕士学位论文

题目： 基于人工神经网络的陶二矿  
煤与瓦斯突出预测研究

作者姓名： 宋海洋

指导教师： 张景森教授 颜志丰副教授

学科专业： 地质资源与地质工程

所在学院： 资源学院





分类号: TD713

UDC:         

密    级: 公  开

单位代码: 10076

## 工学硕士学位论文

# 基于人工神经网络的陶二矿 煤与瓦斯突出预测研究

作    者    姓    名 : 宋海洋

指    导    教    师 : 张景森教授  
                          颜志丰副教授

申  请  学  位  级  别 : 工学硕士

学    科    专    业 : 地质资源与地质工程

所    在    单    位 : 资源学院

授  予  学  位  单  位 : 河北工程大学

**A Dissertation Submitted to  
Hebei University of Engineering  
For the Academic Degree of Master of Engineering**

**Prediction Research of Coal and Gas Outburst Based  
on Artificial Neural Network in Taoer Coal Mine.**

Candidate : Song Haiyang  
Supervisor : Prof. Zhang Jingsen  
                  Prof. Yan Zhifeng  
Academic Degree Applied for : Master of Engineering  
Specialty : Geological Resources and  
                  Geological Engineering  
College/Department : College of Resource

**Hebei University of Engineering**

**April, 2015**

## 摘 要

国内外大量突出煤层的开采实践表明，煤与瓦斯突出呈现区域性分布，在属于突出危险煤层中有潜在突出危险的区域仅占 10%~30%。进行煤层区域突出危险性预测将大大节约防治突出费用。

论文以陶二煤矿为例对煤与瓦斯突出危险性进行预测评价。在煤与瓦斯突出综合作用假说基础上，依据煤与瓦斯突出危险性预测指标的建立原则，利用灰色关联度分析法的有关理论和知识，筛选出了影响陶二矿煤与瓦斯突出危险性评价的 5 个关联度最高的指标：瓦斯含量、埋深、瓦斯压力、瓦斯放散初速度、坚固性系数。运用 BP 人工神经网络方法，建立煤与瓦斯突出预测的数学模型，并通过数学软件 MATLAB 将其实现。本文选取了陶二矿 1#煤层和 2#煤层共计 10 个预测区域，预测结果分为三类：无突出危险区、突出威胁区、突出危险区。预测结果表明：该方法可以准确将各个预测区域的瓦斯突出危险程度进行分类输出，从输出结果来看，1#和 2#煤层均有突出危险性，且 2#煤层瓦斯突出危险性要高于 1#煤层，而在煤矿实际生产过程中对煤层瓦斯动力现象的记录和统计来看，2#煤层发生瓦斯动力现象的次数和强度也均强于 1#煤层。与矿区采用的单项指标预测法对比，该方法不受单一因素影响，简单易行，预测结果更加直观，同时具有一定的可操作性和实用性，可以用于陶二矿煤与瓦斯突出危险性评价中。

**关键词：**陶二矿；煤与瓦斯突出；灰色关联；BP 人工神经网络；MATLAB

## Abstract

A large number of domestic and international coal mining practices show that coal and gas outburst presents regional distribution. Potentially hazardous areas account for only 10% -30% risk of belonging to prominent seam. By predicting the risk of coal gas outburst, will greatly cut down the cost of prevention and treatment of coal and gas outburst.

Papers to Taoer coal mine as an example to predict coal and gas outburst risk evaluation. In combination of coal and gas outburst based on the hypothesis, according to the principle of the establishment of the danger of coal and gas outburst prediction index, using the grey relational grade analysis of the relevant theories and knowledge. Select affected Taoer coal mine coal and gas outburst danger evaluation index of the five highest correlations: gas content, burial depth of coal-bed, gas pressure, initial speed of methane diffusion, Coal consistence coefficient. Using BP ANN method, established the mathematical model of coal and gas outburst prediction, and through the mathematical software MATLAB to achieve it. This article selects the Taoer coal mine 1 # and 2 # coal seam of coal seam in 10 prediction areas, prediction results are divided into three categories: no highlight the danger zone, highlight the threatened area and highlight the danger zone. The prediction results show: the method can accurately predict the gas each region highlight the degree of risk classification output, 1 # and 2 # coal seam are prominent risk, and 2 # coal seam gas outburst than 1# coal seam, and in the coal mine the frequency and intensity of the actual production process for coal seam gas dynamic phenomena of records and statistics, 2# coal seam gas dynamic phenomena occur were also stronger than a # coal seam. Compared with single index prediction method of mining used, this method is not affected by single factor, a simple, easy to predict the results more intuitive, also has certain operability and practicability, and can be used in pottery in the coal mine coal and gas outburst risk assessment.

**Keywords:** Taoer mine; Coal and Gas outburst; Grey relational; BP Artificial Neural Network; MATLAB

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及研究目的 .....	1
1.2 煤与瓦斯突出概况 .....	1
1.2.1 国外主要产煤国的煤与瓦斯突出概况 .....	2
1.2.2 我国煤与瓦斯突出概况 .....	3
1.3 煤与瓦斯突出的总体规律 .....	5
1.4 煤与瓦斯突出突出机理的研究 .....	6
1.4.1 国外关于煤与瓦斯突出机理的假说 .....	6
1.4.2 我国专家对煤与瓦斯突出机理的解释 .....	6
1.5 煤与瓦斯突出预测方法的研究 .....	7
1.5.1 煤与瓦斯突出预测方法研究现状 .....	7
1.5.2 煤与瓦斯突出预测研究趋势 .....	9
1.6 研究内容及技术路线 .....	9
1.6.1 研究内容 .....	9
1.6.2 技术路线 .....	9
第 2 章 矿区概况 .....	11
2.1 位置范围 .....	11
2.2 井田地质构造 .....	11
2.2.1 地层 .....	11
2.2.2 构造 .....	11
2.3 煤层和煤质特征 .....	14
2.3.1 煤层 .....	14
2.3.2 煤质 .....	14
2.4 矿井瓦斯概况 .....	18
第 3 章 矿井瓦斯地质规律研究 .....	19
3.1 瓦斯含量的测定 .....	19
3.1.1 瓦斯含量的测定方法 .....	19
3.1.2 煤的坚固性系数 ( $f$ ) 值与瓦斯放散初速度 ( $\Delta p$ ) 测定 .....	19
3.2 瓦斯含量分布规律 .....	19
3.2.1 1#煤层瓦斯分布规律 .....	25

3.2.2 2#煤层瓦斯分布规律.....	29
<b>第 4 章 矿井煤与瓦斯突出危险性评价指标的建立 .....</b>	<b>31</b>
4.1 煤与瓦斯突出影响因素分析 .....	31
4.1.1 瓦斯参数 .....	31
4.1.2 地应力因素 .....	31
4.1.3 地质构造 .....	31
4.1.4 煤体结构及物理学性质 .....	32
4.2 煤与瓦斯突出危险性预测指标的建立原则 .....	32
4.3 基于灰色关联度分析法的突出危险性评价 .....	33
4.3.1 灰色关联度分析法概述 .....	33
4.3.2 灰色关联度一般计算步骤 .....	34
4.3.3 灰色关联度的计算 .....	35
4.3.4 计算关联度 .....	37
4.3.5 关联度分析和排序 .....	37
4.4 煤与瓦斯突出预测指标的选取 .....	37
<b>第 5 章 人工神经网络在突出预测中的应用 .....</b>	<b>41</b>
5.1 人工神经网络概述 .....	41
5.1.1 人工神经网络对人脑的智能模拟性 .....	41
5.1.2 神经网络模型的分类 .....	42
5.2 BP 人工神经网络 .....	42
5.2.1 BP 人工神经网络概念 .....	42
5.2.2 系统激活函数的选择 .....	42
5.2.3 BP 网络算法 .....	43
5.3 BP 人工神经网络预测煤与瓦斯突出 .....	45
5.3.1 MATLAB 简介 .....	45
5.3.2 煤与瓦斯突出预测的 BP 神经网络结构设计 .....	45
5.3.3 预测结果 .....	47
<b>结 论 .....</b>	<b>50</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>51</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>52</b>
<b>作者简介 .....</b>	<b>55</b>
<b>发表的论文和参加科研成果 .....</b>	<b>55</b>



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景及研究目的

在煤矿生产的过程中，经常会遇到各种煤矿安全事故的发生，其中煤与瓦斯突出在煤矿各类事故中所占的比例是最高的，同时危害也是最大的。煤与瓦斯突出就是指煤矿在进行掘进过程中，煤层突然涌出大量瓦斯，并向巷道抛出大量煤炭的过程。该过程中瓦斯会携带煤形成冲击波，如遇上火源则有可能引起矿井瓦斯爆炸给矿井造成巨大破坏，并对井下工作人员的生命安全造成非常大的威胁。

国内外大量突出煤层的开采实践表明，煤与瓦斯突出呈现区域性分布，在属于突出危险煤层中有潜在突出危险的区域仅占 10%~30%<sup>[1]</sup>。矿井建设和煤矿生产过程中都要进行煤与瓦斯的突出预测，把煤与瓦斯突出危险区、威胁区和无危险区划分出来，采取不同的管理措施，为煤矿的安全生产的合理安排提供科学依据，减少防治煤与瓦斯突出的工作量与工作时间，保证矿井的安全生产，并对井下工作人员的生命安全提供有效的保障<sup>[2-3]</sup>。

在煤与瓦斯突出预测时，瓦斯突出的指标与级别之间往往是没有线性关系的，对如何充分考虑二者的复杂关系，成为预测过程中必须面对的问题，人工神经网络技术可以较好地解决这个问题<sup>[4-5]</sup>。人工神经网络技术是在 20 世纪 40 年代兴起的一门综合性学科，它的研究领域囊括了心理学、生理学、数学和计算机科学等多种学科。人工神经网络的特点有很多，主要有：可以轻松应对大规模并行处理运算、拥有非常强的自我训练学习的能力、可以进行自组织和极为强大的容错纠错能力等，在多个行业得到广泛的应用<sup>[6-10]</sup>。每个煤矿的地质条件和生产条件的不同决定了不可能有一种完美的预测瓦斯突出的方案，而人工神经网络的突出特点使其成为可以进行瓦斯突出预测的有效方法。

### 1.2 煤与瓦斯突出概况

我国是世界上最早利用煤炭的国家，早在宋代“煤”就成为了专有名词，并且有了一套完整防治瓦斯的配套系统。可查记录中，最早的瓦斯突出事故发生在 1843 年的法国阿克矿井，此后多个国家和地区的矿井发生过煤与瓦斯突出事故，迄今为止世界上最大的一次突出事故发生在 1969 年前苏联的顿巴斯煤矿，突出总煤量多达 1.42 万 t，瓦斯涌出量达 25 万 m<sup>3</sup>，造成众多人员伤亡和资产严重损失<sup>[11]</sup>。

### 1.2.1 国外主要产煤国的煤与瓦斯突出概况

#### (1) 美国：以法律促安全

美国是能源生产和消费大国，除石油和天然气外，煤炭生产和消费在世界上也占到了举足轻重的地位。据相关数据显示，2014 年煤炭产量达到 10.11 亿 t，2015 年预计产量也在 10 亿 t 以上，是不折不扣的煤炭生产大国<sup>[12]</sup>。自美国建国以来煤矿安全事故尤其是瓦斯突出事故不断发生。尤其是在 19 世纪末段一直到 20 世纪前叶，美国煤矿事故频频发生，主要原因除了生产规模的扩大，落后的管理水平也是造成安全事故的重要原因。20 世纪初期是美国煤炭行业发展的黄金时期，与此同时也是煤矿安全事故的高发时期，无序的开采和保护设施的缺乏使得事故伤亡人数不断增高，仅在 1907 年死亡人数就超过了 3000 人。连续的矿难和不断增加的死亡人数给美国煤炭行业蒙上了一层厚厚的阴影，在这种情况下美国国会批准成立了隶属于内政部的美国矿业局，该机构直接服务于煤矿生产企业，制定安全生产标准，研发煤矿安全生产技术，并对煤矿工人实行强制安全培训。20 世纪 60~70 年代，美国先后颁布了多部有关煤矿安全的法律法规：主要有：《联邦煤矿健康与安全法》和《联邦矿业安全与健康修订案》。进入 21 世纪后，又有《矿工法案》、《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》陆续颁布执行。

虽然不能完全杜绝煤矿安全事故的发生，但在一系列相关法律法规的实施和管理技术推广下，2012 年至今美国煤矿鲜有安全事故发生，美国煤炭行业在一系列法律的规范下逐步走上了安全发展的道路。

#### (2) 澳大利亚：注重安全，严惩严戒

澳大利亚是全球重要的煤炭生产国，同时也是煤炭重要的净出口国<sup>[13]</sup>。虽然澳大利亚矿业发达，从业人数也相对较多，但矿山事故率却非常低。在澳大利亚煤矿行业发展早期，煤矿安全事故也是屡屡发生，但近些年来，这一状况得到了极大的改善。这主要得益于澳大利亚对矿业尤其是煤炭行业实行的严格管理制度以及众多法律法规的颁布执行。责任明确制度是澳大利亚煤矿行业管理的特色，在防止煤矿安全事故中，澳大利亚政府的职责只是局限于煤矿相关法律法规的建立和生产技术的支持上，在设计、生产、环保和安全等方面对煤矿进行监管。只要煤矿达不到其中任何一项标准，政府有权利对其下达停产整顿的通知，并强制执行。对企业来说，煤矿所有者必须向政府注册，同时熟知有关的政策法规，并保证达到政府规定的多项要求。此外，许多煤矿企业根据自己的实际情况也建立了企业内部的安全制度，煤矿管理者鼓励员工自查自省，从自身和周边工作环境查找危害人身健康安全的隐患，对任何新的设备、工艺和工作环境都要进行详细

的调查和评估。

### （3）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，2013 年产量达到 3.52 亿 t，2014 年为 3.57 亿 t<sup>[13]</sup>。自前苏联解体后，俄罗斯煤炭行业一度处于发展停滞的地步，随着国家经济的逐步稳定和世界经济的复苏，煤炭行业得到了较快的发展。俄罗斯煤炭工业继承了前苏联的基础，并在此基础上又有了新的变化。煤炭行业从前苏联时期的国有开始慢慢转变为私有化，打破了国家垄断，刺激了煤炭行业的发展。但是高速发展也给煤矿带来了诸多的隐患，在追逐利润的同时忽略了技术的发展和设备的更新换代，缺乏对矿工的安全生产培训，由此导致了一系列煤矿安全事故的发生。政府安全机构工作的不到位，监管力度小，也是造成事故发生的原因。为了改变煤炭行业的窘境，俄罗斯政府投入大量资金对煤炭业进行了全面的整顿，尤其注重对从业人员的安全生产培训。俄罗斯煤矿 78%是高瓦斯矿井，因此对瓦斯突出机理的研究和瓦斯防治技术的应用成为了俄罗斯煤炭安全生产工作的重点。

### （4）印度：推行国有化，矿业发展缓慢

印度是世界第三大产煤国<sup>[14]</sup>。随着经济的发展，印度对能源的需求量也越来越大，在这种形势下，印度加大了国内煤炭的开采力度，据印度煤炭部十二五规划小组的统计 2014 年煤炭产量达到了 5.43 亿 t，至 2017 年，印度原煤产量将达到创纪录的 7.15 亿 t。印度早在 20 世纪 70 年代就开始在全国范围内推行国有化进程。尽管拥有优越的开采条件，但始终“难产”的法律法规和官僚主义作风，使得印度新煤矿开发进程缓慢、老旧煤矿又面临枯竭，严重制约着印度煤炭行业的发展和技术革新。

## 1.2.2 我国煤与瓦斯突出概况

煤炭是我国一次能源消费中占主导地位的能源类型。在 2004~2013 年我国一次能源消费结构中煤炭占全部能源的 70%左右（见表 1-1），可以预见在今后相当长的一段时间内，煤炭仍将是重要的战略资源。

煤与瓦斯突出一直是我国煤矿安全发展的巨大隐患。表 1-2 是我国 1950~1995 年间国有重点煤矿煤与瓦斯突出事故统计表。

煤炭部在 1988 年颁布了《防治煤与瓦斯突出细则》（以下简称细则），自《细则》执行以来，全国范围内煤与瓦斯突出事故在逐年减少，事故死亡人数也有大幅度的下降。20 世纪 90 年代后期，由于国内外市场的一些因素导致煤炭市场表现平淡，煤矿企业经营非常艰难，在生产和安全方面投入十分不足。随着我国煤炭行业在 2000 年之后慢慢复苏，煤炭的产量也在逐年迅速增加，采矿的强度也随之

增大,使得矿山开采水平越来越深,从而新生了大量的突出矿井,由此引发的瓦斯突出事故也有所增加,治理难度变大。表 1-3 为 2001~2011 年我国煤与瓦斯突出伤亡事故统计表:

表 1-1 中国一次能源消费百分比 (%)

Table 1-1 The percentage of primary energy consumption in China (%)

年份	原油	天然气	煤	核能	水电	再生能源
2004 年	22.4	2.5	68.7	0.8	5.6	
2005 年	20.9	2.6	69.9	0.8	5.7	
2006 年	20.4	2.9	70.2	0.7	5.7	
2007 年	19.5	3.4	70.5	0.8	5.9	
2008 年	18.8	3.6	70.2	0.8	6.6	
2009 年	17.7	3.7	71.2	0.7	6.4	0.3
2010 年	17.6	4.0	70.5	0.7	6.7	0.5
2011 年	17.7	4.5	70.4	0.7	6.0	0.7
2012 年	17.7	4.7	68.5	0.8	7.1	1.2
2013 年	17.8	5.1	67.5	0.9	7.2	1.5

表 1-2 1950~1995 年煤与瓦斯突出事故统计表

Table 1-2 1950~1995 Coal and gas outburst accident statistics

瓦斯突出 次数	死亡 人数	瓦斯突出总量 (万 m <sup>3</sup> )	瓦斯突出年平 均值 (万 m <sup>3</sup> )	煤突出总 量 (万 t)	煤突出年平 均值 (t)
10815	1266	6798.3	1.45	81.5	77.5

表 1-3 2001~2011 年煤与瓦斯突出事故统计表

Table 1-3 2001~2011 Coal and gas outburst accident statistics

瓦斯突出事故次数	死亡人数	年均发生次数	年均死亡人数
395	2459	36	223

2005 年后煤矿安全形势在政府一系列的强制性措施下得到好转,但是瓦斯突出事故死亡人数仍然占到了煤矿安全事故总死亡人数的较大比例,并且上升的趋势也非常明显,恶性伤亡事故层出不穷,形成了极为恶劣的社会影响<sup>[15-19]</sup>。

### 1.3 煤与瓦斯突出的总体规律

(1) 煤与瓦斯突出危险性随矿井开采深度增加而加大。当矿井采深增大时,瓦斯压力与地应力也相应增大,煤与瓦斯突出危险性也随之加大。一些高瓦斯矿井甚至个别低瓦斯矿井有可能转变为突出矿井,突出危险性较弱的矿井也可能转变为严重突出矿井。

(2) 煤层突出危险区常成条带状分布。突出煤层中并非处处都是瓦斯突出危险区,反而是大多数地区都没有突出危险。原因是地质构造对煤层突出危险区起到控制作用,地质构造大都具有条带分布的特征,比如地质构造形成的挤压揉搓高瓦斯含量煤与非挤压揉搓低瓦斯含量煤的分布,掘进作业过程中形成的应力叠加区和应力集中带也有条带状分布特点。因此,在地质构造地带,往往可能发展成为煤与瓦斯突出的危险区。

(3) 煤层软分层越厚越容易发生瓦斯突出。煤层软分层越厚,煤层中及煤层表面吸附的瓦斯量就越多,瓦斯释放速度在煤层泄压时会越快,危险性相应就会增大;煤层的软分层越厚,煤层的变形量就会越大,由此造成的顶底板的位移量变大,顶底板中弹性势能积聚的也越多,煤与瓦斯突出危险性也越大。一般来说,矿井中最厚的主采煤层发生瓦斯突出事故的几率是最高的。

(4) 煤体破坏程度越高突出危险性越大。煤体破坏程度高是瓦斯突出煤层的一个显著特点,煤坚固性系数小于 0.5 的Ⅲ类和Ⅳ类煤通常比较容易发生瓦斯突出事故。

(5) 采掘工程布局以应力集中和应力叠加程度影响煤层的突出危险性。采矿工作进行之前,原始的应力场在煤岩体中处于一个稳定平衡状态。采掘活动开始后,这种应力平衡被人为活动打破,此时在煤岩体中会形成次生应力场,即应力会重新达到一种新的平衡态。相较于原始应力来说,应力升高区称为应力集中区,应力降低区被称为卸压区,其中最容易发生瓦斯突出的地点往往是煤层的应力集中区。

(6) 不同巷道类型对瓦斯突出发生频率和强度影响也不同。发生瓦斯突出强度最大和概率最高的巷道类型为石门揭煤工作面,在揭穿突出煤层的整个过程中都可能有突出危险;重力作用在立井揭煤时对瓦斯突出产生激发作用,斜井揭煤的危险性则介于立井揭煤和石门揭煤之间。重力激发作用在上山煤巷掘进过程中会使瓦斯突出频率较高但强度不大。在下山煤巷掘进中重力对突出产生抑制作用,瓦斯突出频率相对较小,但是多数突出属于瓦斯喷出型突出,强度大,危险性高。而平巷掘进则介于上、下山之间。

## 1.4 煤与瓦斯突出机理的研究

### 1.4.1 国外关于煤与瓦斯突出机理的假说

#### (1) 瓦斯主导假说

英国的 Taylor<sup>[20]</sup>在 1852 年发表的研究成果中提出了高压瓦斯包的概念。1899 年 Halbaum 在其著作中提出瓦斯主导论<sup>[21]</sup>。煤层中存在着瓦斯压力与瓦斯含量比邻近区域高的多的煤窝，即瓦斯包。当巷道揭穿瓦斯包时，在瓦斯压力作用下将松软的煤破碎并抛出造成煤与瓦斯突出<sup>[22]</sup>。

#### (2) 地应力占主导地位的假说

1923 年 Loire 和 Laligant 首次提出瓦斯突出受地应力的影响<sup>[23]</sup>。随后众多学者针对地应力对煤层的作用进行了深入的研究和探讨，这种假说认为突出主要是高地应力作用的结果<sup>[24]</sup>。这方面的研究更多是在冲击地压和突出的对比中得到的，甚至有人认为，瓦斯突出就是冲击地压的一种类型，因为两者在发生条件、动力现象和规律上都有许多共同点。

#### (3) 综合作用假说

20 世纪中期，学者们对煤与瓦斯突出机理的认识开始由单因素研究向多因素综合考虑方向发展。1951 年前苏联学者 Khodot 提出能量理论，并在随后进行了多次修改<sup>[25]</sup>，同年 Nekrasovski 提出瓦斯突出是在多因素综合作用下造成的结果，1954 年 Skochinski 完善了该理论<sup>[26]</sup>。该假说以现场实例研究为基础，基本能反映一些特定的真实情况，综合作用假说比单因素假说更为有说服力，其所能解释清楚的突出现象也多于其它假说<sup>[27]</sup>。

### 1.4.2 我国专家对煤与瓦斯突出机理的解释

早在 20 世纪 60 年代起，我国学者就开始了煤与瓦斯突出的研究。尤其是近 40 年来，在众多专家学者的不懈努力下研究成果颇为丰富，产生了许多新的认识，进一步发展了煤与瓦斯突出机理，其中主要的观点有：

#### (1) 中心扩张假说

我国学者于不凡在 1975 年提出了提出中心扩张学说，另在 1979 年进一步完善了该假说。于不凡认为，煤与瓦斯突出存在一个发动中心，这中心距离工作面有一段距离，突出发动时，由中心向四周扩散，发动中心附近的煤、岩石和瓦斯均为突出的发生提供能量并且参与突出<sup>[28]</sup>。

#### (2) 流变假说

1990 年周世宁和何学秋首次提出煤与瓦斯突出流变假说，认为煤层中的瓦斯

在揭穿煤层过程中释放出来，并和地应力相互作用进行一种耦合流变的过程<sup>[29]</sup>。这种假说综合考虑了矿井中诸多可能引发瓦斯突出的因素，此外还考虑了时间对流变过程的影响。

### （3）统一失稳理论

章梦涛等人在 1991 年提出了统一失稳理论，建立了基于 Dirichlet 理论的冲击地压和突出发生的统一能量依据。该理论反应了突出发生前后能量改变的规律，弹性条件下的屈曲失稳是有几何非线性引起的此外还包括材料性质的非线性的影响<sup>[30]</sup>。

### （4）球壳失稳假说

蒋承林和俞启香于 1998 年提出球壳失稳假说，该观点认为突出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的过程<sup>[31]</sup>。

此外，还有学者从地质构造，数值模拟和物理模拟等方面对煤与瓦斯突出进行了研究和分析。

## 1.5 煤与瓦斯突出预测方法的研究

### 1.5.1 煤与瓦斯突出预测方法研究现状

煤与瓦斯突出预测的方法主要有以下 5 种：

#### （1）指标预测法

指标预测法包括单项指标法和综合指标法<sup>[32]</sup>。矿井实测资料是判断煤层突出危险性的首要依据，如资料不足以进行判断时则参考表 1-4 所列数据，预测指标只有达到或超过规定值时，方可划为突出煤层。

表 1-4 预测煤层突出危险性单项临界指标值<sup>[33]</sup>  
Table 1-4 Single critical index values of forecasting danger of coal outburst

煤层突出危险性	煤的破坏类型	瓦斯放散初速度 $\Delta P$	煤的坚固系数 $f$	煤层瓦斯压力 (MPa)
突出危险	III、IV、V	10	0.5	0.7

煤炭科学研究总院抚顺分院与一些突出矿区合作，提出了突出预测的综合指标 K 和 D，并得到了广泛应用<sup>[34-35]</sup>。

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

$$K = \frac{\Delta P}{f} \quad (1.2)$$

式中，D—煤的突出危险性综合指标之一；

K—煤的突出危险性综合指标之二；

H—开采深度，m；

f—煤层软分层的平均坚固性系数；

P—煤层瓦斯压力，取两个侧压孔实测瓦斯压力最大值，MPa；

$\Delta P$ —煤层软分层的瓦斯放散速度指标。

综合指标，D、K 的突出临界值应根据矿井实测资料确定，如无实测资料时，可参考表 1-5 所列临界值来确定煤层的突出危险性。

表 1-5 综合指标法预测煤层突出危险性的临界值<sup>[33]</sup>

Table 1-5 Threshold value of comprehensive index for predicting coal outburst danger

煤层突出危险性综合 指标 D	煤层突出危险性综合指标 K	
	无烟煤	其它煤种
0.25	20	15

## (2) 微震预测法

20 世纪 70 年代初以来，美国矿业局就用标准微震技术研究煤层结构物破坏，同时，采用超声波监测技术来监测岩层响声能量<sup>[36]</sup>。俄罗斯专家通过现场观测，对地震声脉做了大量的概率统计，研究其于动力现象的关系。确定了地震声学预测方法的判断依据，在一些矿区中得到迅速推广应用<sup>[37]</sup>。

## (3) 瓦斯地质单元法

河南理工大学通过对大量矿井的实地研究提出了瓦斯地质区划论，认为突出的分布是不均衡的，具有分区带的特点；瓦斯突出的分区带与地质条件有密切的关系，地质因素的分区带控制着突出的分区分带；进而通过地质因素的区域划分来预测突出区带<sup>[38]</sup>。彭立世等在瓦斯地质区划的基础上提出了用地质构造、煤层厚度及其变化、煤体结构和煤层瓦斯等瓦斯地质参数等进行突出预测的方法，即瓦斯地质单元法<sup>[39-40]</sup>。

## (4) 专家系统预测法

专家系统是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<sup>[41]</sup>。如



英国开发出 UPEL 专家系统, 主要应用于井下作业时煤与瓦斯突出的预报。中国科学院地质研究所也正在研制预测突出的专家系统, 该系统被称为 GASBURST, 它根据用户提供的矿区地质构造、地下水、瓦斯、钻孔粉尘、地应力和已经发生突出的资料, 划出煤矿突出危险区、危险带, 并预测突出危险程度的变化趋势, 预报突出点的位置。

#### (5) 物探法

物探法的原理是: 电磁波能量在煤层突出危险区被大量吸收, 使得电磁波穿越该区域时衰减系数增大, 能量损失也较大, 通过对电磁波衰减系数的变化来预测煤层瓦斯突出<sup>[42]</sup>。在对地质小构造的研究中, 无线电波透视技术取得了较好的预期效果。

### 1.5.2 煤与瓦斯突出预测研究趋势

随着科学技术的不断进步, 煤与瓦斯突出预测研究也在推陈跟新。进入 20 世纪 90 年代后, 利用计算机强大的模拟、运算功能进行瓦斯突出预测成为各国突出预测发展的趋势<sup>[43]</sup>, 目前, 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、人工神经网络、专家系统、分形理论、非线性理论和流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, 这些先进数学方法的优点都是传统方法无法比拟的。

## 1.6 研究内容及技术路线

### 1.6.1 研究内容

(1) 结合陶二矿瓦斯地质规律分析影响煤与瓦斯突出的因素。

(2) 采用灰色关联度分析方法, 对危险性预测指标进行关联度分析, 确定影响煤与瓦斯突出危险性的主控因素, 并确定预测指标。

(3) 根据煤与瓦斯突出与地质参数之间存在的非线性关系, 利用确定的预测指标, 基于人工神经网络对陶二矿进行煤与瓦斯突出进行预测, 并通过 MATLAB 软件给出预测输出。

### 1.6.2 技术路线

前期在矿区收集所需要的数据, 对得到的数据进行整理分析, 并利用灰色关

联分析法选出影响煤与瓦斯突出的主要因素。然后选择适合的数学模型，通过 MATLAB 软件对研究区进行煤与瓦斯突出预测。图 1-1 为本文技术路线图。

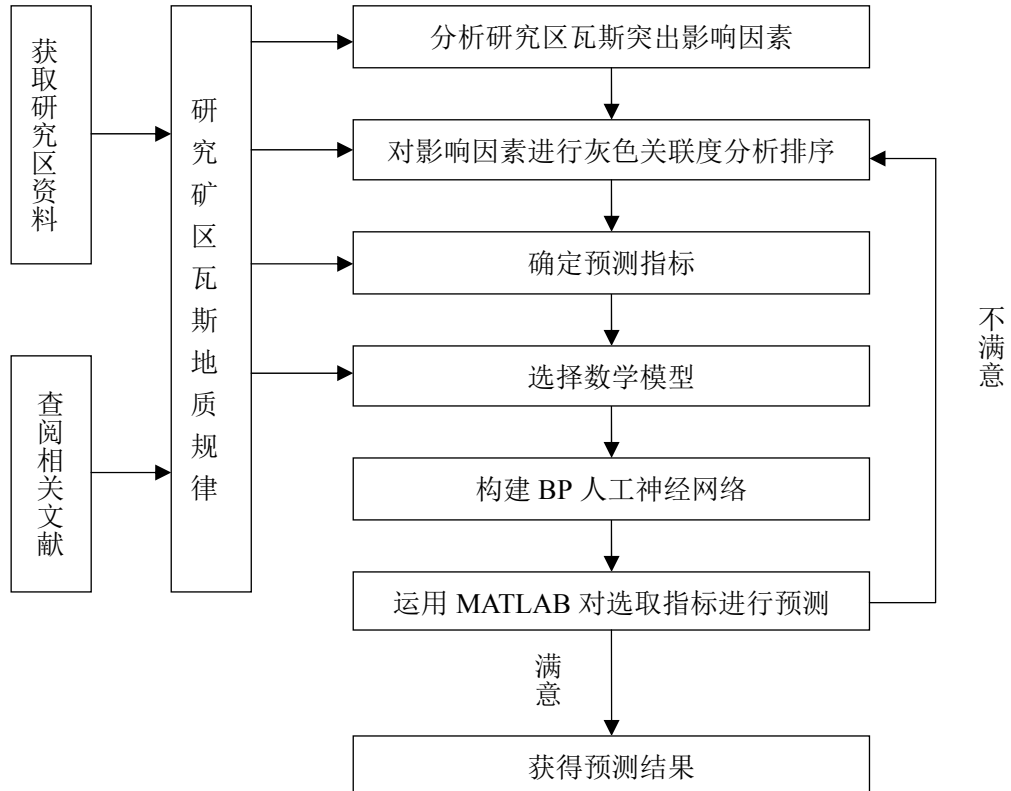


图 1-1 技术路线图

Fig.1-1 Technological road map

## 第2章 矿区概况

### 2.1 位置范围

冀中能源邯矿集团陶二煤矿位于河北省邯郸市，行政区属于邯郸市复兴区康庄乡，矿区东距邯郸市 16km，西距武安市 15km。中部中心位置地理坐标为东经东经  $114^{\circ} 19' 13''$ ，北纬  $36^{\circ} 35' 35''$ ，地面标高为 116.8~245 m，井田走向长 13.4~14.4 km，东西宽 2.9~5.57 km，面积  $39.526 \text{ km}^2$ 。陶二煤矿矿区范围由 29 个拐点组成，北部以 4063200 纬线与永年县焦窑煤矿相接；南部为  $x=4049050$ 、 $y=38529450$  和  $x=4050850$ 、 $y=38525400$  两点连线的人为边界；西部与陶一煤矿相接，以陶一煤矿边界和  $F_{20}$  断层为界；东部以  $F_{32}$  断层和采矿许可证登记的东部边界为界。图 2-1 为陶二矿交通位置图。

### 2.2 井田地质构造

陶二井田地处紫山至半个山东倾单斜构造的东部。地层总体走向为北东向、北北东向，地层倾角一般  $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ，在断层附近地层倾角可达  $30^{\circ}$  左右。井田内构造以断裂为主，并伴有轴向近东西向的宽缓褶皱构造。图 2-2 为陶二煤矿井田构造纲要图。

#### 2.2.1 地层

陶二煤矿地表出露地层有二叠系上石盒子组、石千峰组，三叠系刘家沟组、和尚沟组，余者均被第四系地层覆盖。石炭系中统本溪组、上统太原组和二叠系下统山西组为井田的含煤地层，含煤 23 层，其中可采和局部可采 6 层，属海陆交互及陆相含煤沉积建造。

#### 2.2.2 构造

根据已有的资料，陶二矿迄今为止发现断层 29 条，其中影响到煤系地层的有

17 条，在已发现的断层中，断层性质均为正断层，倾角大都在  $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ，属于高角度正断层；断层走向除小部分为北西及北北西向，其余均为北东及北北东向。陶二矿总体构造为单斜，形态大致为由西北向东及南东倾斜，其构造类型中等。见表 2-1。

表 2-1 陶二煤矿断层统计表

Table 2-1 Fault statistics in Taoer coal mine	
落差	断层
<30m	$F_{31}$ 、 $F_{35}$ 、 $DF_{36}$ 、 $DF_{23}$ 、 $DF_{44}$ 、 $DF_{40}$ 、 $DF_{22}$ 、 $DF_3$ 、 $DF_{30}$ 、 $DF_{52}$ 、 $DF_{62}$ 、 $DF_{74}$ 、 $F_{27}$ 、 $F_{29\sim 1}$
30~50m	$F_{37}$ 、 $F_{12\sim 1}$ 、 $F_{23\sim 1}$ 、 $DF_9$
50~100m	$F_{33}$ 、 $F_{26}$ 、 $F_{25}$ 、 $F_{23}$ 、 $DF_{75}$ 、 $F_{28}$ 、 $F_{29}$
>100m	$F_1$ 、 $F_{20}$ 、 $F_{32}$ 、 $F_{28\sim 1}$

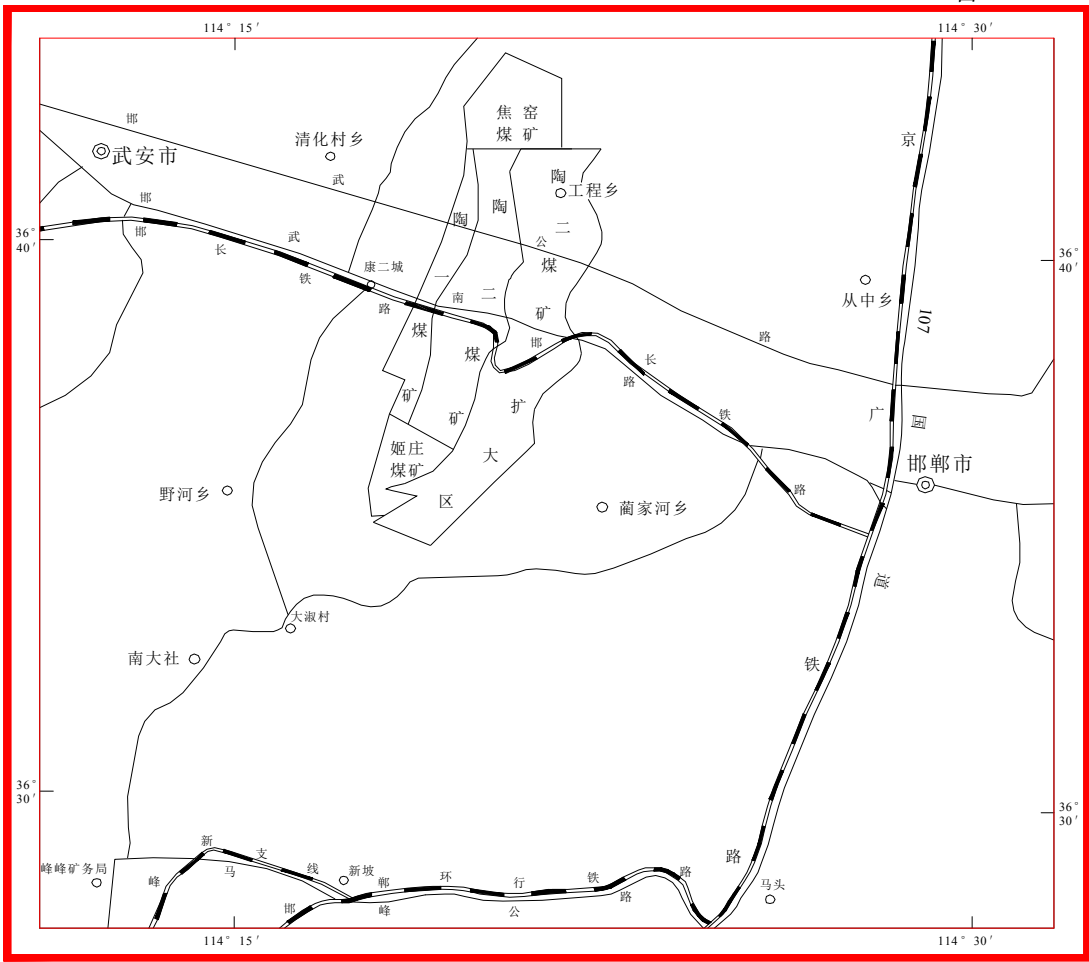


图 2-1 陶二矿交通位置图  
Fig.2-1 Access map of Taoer mine

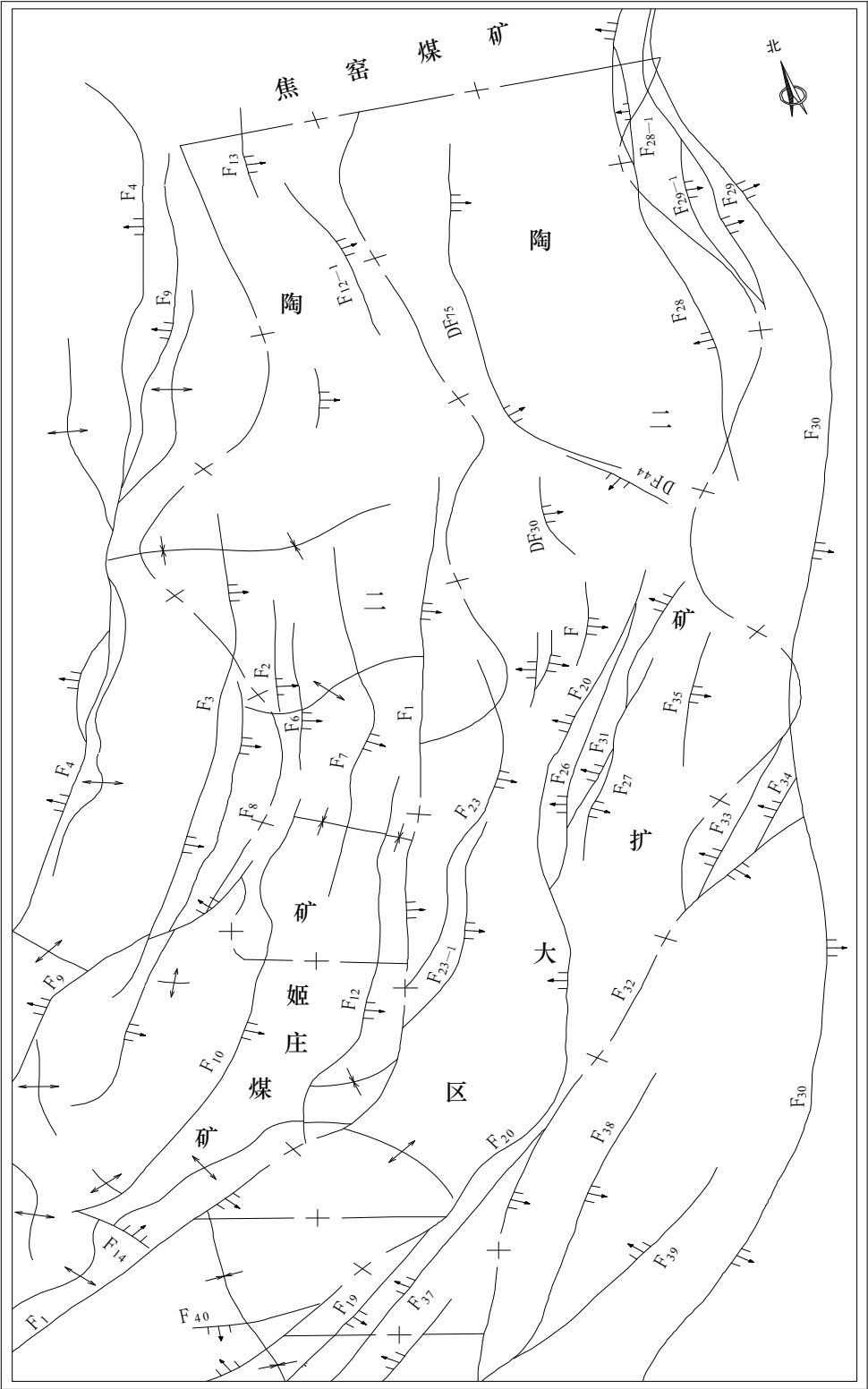


图 2-2 陶二煤矿井田构造纲要图

Fig.2-2 Structural outline map of Taoer coal mine

本区主要有两个向斜构造，分别为北牛叫～葛岩崾向斜和史村向斜；两个背斜构造，分别为南牛叫背斜和店子背斜。

矿井开采过程中，已揭露陷落柱 3 个，其中一采区两个，六采区一个，一采区陷落柱冒落高度大，岩石再生胶结好，分解石充填裂隙。这些陷落柱位于采区上山附，形状为椭圆形，长轴 200～250m，短轴 80～120m，对煤矿开采产生一定影响。

据钻探资料，本区岩浆岩东厚西薄成扇形由东向西侵入最后尖灭。北部受红山侵入体的影响，南部受白沙侵入体的影响，致使火成岩广布。由于火成岩的侵入使各煤层不同程度的被挤薄、分叉、吞蚀、特别是对主采煤层 2#煤破坏严重，对开采影响较大。

## 2.3 煤层和煤质特征

### 2.3.1 煤层

本区含煤地层共 23 层，1、2、6、8、9 煤层为可采煤层和局部可采煤层。煤层平均总厚度 18.95m，含煤系数 9.1%。表 2-2 为陶二矿各煤层特征。1#煤层和 2#煤层为陶二矿主要开采煤层。

(1) 1#煤层位于山西组地层中部，煤层厚度为 0.19～2.36m，平均厚度为 1.04m，厚度变化不明显，基本不含夹矸。煤层顶板以粉砂岩、泥岩为主，局部为中～细粒砂岩，底板岩性为富含植物根部化石的粉砂岩。

(2) 2#煤层位于山西组下部，煤层厚度 0.26～7.71m，平均厚度 3.17m，为中厚～厚煤层，煤层厚度变化较大，普遍含一层夹矸。煤层顶板为中、细粒砂岩、泥岩和粉砂岩砂，局部为岩浆岩；底板岩性多为粉砂岩和泥岩。

### 2.3.2 煤质

#### (1) 物理性质

煤层颜色为黑色或灰黑色，条痕为灰黑色及灰色，具玻璃光泽、沥青光泽及似金属光泽，条带状结构，块状或层状构造，贝壳状、眼球状及参差状断口，性脆，内、外生裂隙发育。各煤层的平均真密度在 1.61～1.88 之间，视密度在 1.48～1.76 之间。见表 2-3。

表 2-2 陶二矿煤层特征

Table2-2 Coal seam features in Taoer coal mine

煤层	煤层厚度 (m)	煤层结构		煤层可采情况					
	最小~最大 平均	夹矸 层数	结构类 型	可采点数 见煤点数	断失(冲 刷)未到	可采 比例	可采 程度	煤层稳 定程度	煤层顶底 板岩性
1	<u>0.19~2.36</u> 1.04	0-1	简单	<u>61</u> 89	15(5)4	72.1%	大部 可采	较稳定	细、粉砂岩 粉砂岩
2	<u>0.26~7.71</u> 3.17	0-2	较简单	<u>99</u> 103	7(2)4	96.1%	可采	稳定	细、粉砂岩 粉砂岩
4	<u>0~2.09</u> 0.71	0-1	简单	<u>22</u> 70	9(4)25	35.6%	局部 可采	不稳定	石灰岩 粉砂岩
6	<u>0.15~4.53</u> 0.80	0-2	简单	<u>30</u> 70	11(1)27	43.2%	局部 可采	较稳定	粉、石灰岩 泥岩
8	<u>0~1.89</u> 0.90	0-1	简单	<u>11</u> 22	8(2)75	70.8%	大部 可采	较稳定	石灰岩 砂质泥岩
9	<u>0.56~3.64</u> 2.12	0-4	复杂	<u>21</u> 25	8(0)74	86.9%	可采	稳定	细、石灰岩 粉砂岩

表 2-3 各煤层真密度及视密度汇总表

Table2-3 True density and apparent density of coal seams

煤层	1	2	4	6	8	9
真密度	1.65	1.79	1.88	1.88	1.61	1.73
视密度	1.53	1.66	1.70	1.76	1.48	1.59

## (2) 煤岩特征

宏观煤岩特征：以亮煤为主，镜煤及暗煤次之，属半亮型~半暗型。受区域热变质影响，煤层均为高变质无烟煤。具体煤岩特征见表 2-4 和表 2-5：

表 2-4 各煤层镜质体最大反射率及显微硬度表

Table2-4 Largest vitrinite reflectance and microhardness of coal seams

煤层	1	2	4	6	8	9
镜煤最大射率	<u>2.679~5.357</u>	<u>2.909~10.30</u>	<u>5.853~6.736</u>	<u>2.837~6.950</u>	<u>2.658~5.131</u>	<u>2.791~4.392</u>
(R° max%)	3.735(13)	5.671(20)	6.295(2)	4.401(4)	3.554(3)	3.248(6)
显微硬度	<u>38.0~108.4</u>	<u>36.7~198.6</u>	<u>164.0~196.3</u>	79.1(1)		<u>81.0~81.7</u>
(Kg/mm <sup>2</sup> )	71.2(6)	103.5(12)	180.1(2)			81.3(3)

表 2-5 主要煤质分析成果汇总表

Table2-5 Summary of the main coal quality analysis

煤号	工 业 分 析 (%)						元 素 分 析 (%)						
	水份 Mad	灰份 Ad	挥发份 Vdaf	固定碳 Fcd	全硫 St, d	磷 Pd	发热量 (MJ/kg)		碳 Cdaf	氢 Hdaf	氮 Ndaf	氧+硫 (O+S)daf	
							Qb • daf	Qgr • daf					
1	原煤	<u>0.38~6.19</u> 2.52(35)	<u>12.32~35.81</u> 21.65(35)	<u>2.79~9.76</u> 6.68(35)	<u>62.03~81.04</u> 75.62(18)	<u>0.29~4.78</u> 0.77(30)0.80	<u>0.007~0.059</u> 0.018(20)	<u>32.83~38.82</u> 34.24(18)	<u>33.36~35.25</u> 34.51(9)	<u>90.76~94.1</u> 92.42(4)	<u>1.61~3.67</u> 2.84(4)	<u>0.66~1.48</u> 1.12(4)	<u>3.17~4.09</u> 3.62(4)
	浮煤	<u>0.49~5.16</u> 2.15(17)	<u>4.03~13.22</u> 7.53(17)	<u>0.93~8.31</u> 4.65(24)	<u>84.02~90.10</u> 87.09(10)	<u>0.40~0.92</u> 0.61(12)		34.723(1)		<u>91.69~94.13</u> 93.01(15)	<u>1.41~3.58</u> 2.70(22)	<u>0.61~1.59</u> 1.12(12)	<u>2.24~4.06</u> 3.04(12)
2	原煤	<u>0.40~5.43</u> 2.46(62)	<u>12.86~34.54</u> 21.71(63)	<u>2.95~14.0</u> 6.83(62)	<u>57.07~82.59</u> 71.94(37)	<u>0.04~6.23</u> 0.68(54)0.92	<u>0.000~0.119</u> 0.042(32)	<u>29.26~38.07</u> 33.74(38)	<u>31.37~34.76</u> 33.48(18)	<u>90.85~94.68</u> 92.84(6)	<u>1.88~3.59</u> 2.60(6)	<u>1.29~1.71</u> 1.46(6)	<u>2.12~4.00</u> 3.12(6)
	浮煤	<u>0.18~5.25</u> 1.97(34)	<u>3.81~15.99</u> 8.18(34)	<u>1.08~10.69</u> 5.47(46)	<u>80.25~93.62</u> 85.82(26)	<u>0.14~2.54</u> 0.76(28)		<u>34.65~36.442</u> 35.26(7)	<u>33.37~34.04</u> 33.71(2)	<u>90.99~96.30</u> 93.33(20)	<u>1.06~3.65</u> 2.35(32)	<u>0.61~1.70</u> 1.25(16)	<u>1.69~5.62</u> 3.04(16)
4	原煤	<u>0.67~5.74</u> 2.96(15)	<u>13.15~35.43</u> 22.78(15)	<u>3.51~15.28</u> 8.42(14)	<u>52.55~76.94</u> 69.04(11)	<u>0.49~3.43</u> 2.21(9)0.87	<u>0.004~0.032</u> 0.014(9)	<u>31.38~34.548</u> 33.25(7)	<u>32.21~32.74</u> 32.48(2)	92.49(1)	1.63(1)	0.85(1)	2.60(1)
	浮煤	<u>1.14~5.48</u> 2.81(8)	<u>3.12~14.68</u> 9.20(8)	<u>2.91~11.03</u> 5.15(8)	<u>77.42~93.14</u> 85.14(6)	<u>0.46~2.56</u> 1.70(5)		<u>34.015~34.637</u> 34.33(2)		<u>94.24~95.54</u> 95.01(4)	<u>1.20~1.53</u> 1.34(4)	<u>0.62~1.2</u> 0.92(4)	<u>2.64~5.03</u> 3.39(4)



## 第2章 矿区概况

续表 2-5

煤号	工 业 分 析 (%)						元 素 分 析 (%)						
	水份 Mad	灰份 Ad	挥发份 Vdaf	固定碳 Fcd	全硫 St, d	磷 Pd	发热量 (MJ/kg)		碳 Cdaf	氢 Hdaf	氮 Ndaf	氧+硫 (O+S)daf	
							Qb • daf	Qgr • daf					
6	原煤	0.62~4.40	11.20~37.29	2.41~14.67	63.53~78.64	0.45~5.47	0.000~0.539	16.20~35.04	25.64~34.55	87.98~93.42	1.32~3.44	0.71~1.25	3.99~8.23
		2.23(27)	2128(24)	6.84(25)	72.80(13)	2.56(23)1.27	0.053(13)	32.32(17)	32.16(7)	90.78(4)	2.41(4)	1.05(3)	6.03(4)
	浮煤	0.53~3.90	6.05~17.8	3.21~11.08	74.72~89.27	0.47~1.88				90.01~94.87	1.00~3.90	0.65~1.50	2.55~5.18
		1.88(16)	9.51(16)	6.17(15)	84.20(9)	1.27(12)		35.00(2)	33.15(1)	92.67(7)	2.07(14)	1.12(6)	3.86(6)
8	原煤	0.68~3.32	8.45~39.93	5.31~16.05	56.34~83.70	3.12~4.12	0.006~0.013	33.88~34.77	34.12~34.76				
		1.88(7)	20.70(7)	8.10(7)	71.93(5)	3.54(4)0.36	0.009(6)	34.44(4)	34.44(2)	90.25(1)	2.81(1)	0.95(1)	5.99(1)
	浮煤	0.58~2.53	2.16~5.23	3.31~6.8	88.86~94.5	1.44~3.41				90.68~92.28	2.57~3.58	1.04~1.15	4.07~4.94
		1.37(5)	3.50(5)	5.64(5)	90.93(4)	2.67(3)		34.70(1)		91.28(3)	3.01(6)	1.11(3)	4.59(3)
9	原煤	0.54~4.26	15.47~38.09	4.58~16.29	53.27~72.12	1.33~5.89	0.001~0.029	32.01~34.22	21.07~33.49	88.05~89.83	1.55~3.43	0.10~1.28	6.93~8.52
		2.37(18)	27.48(17)	9.34(18)	62.92(8)	3.56(16)1.28	0.012(10)	33.60(11)	29.73(6)	88.75(3)	2.73(4)	0.69(2)	7.67(3)
	浮煤	0.61~3.27	3.72~10.4	1.57~7.84	82.99~91.3	1.34~3.11		34.05~35.01					
		1.82(12)	6.70(12)	5.05(16)	87.88(7)	2.25(10)		6	34.26(1)	89.92~93.66	1.19~3.40	0.92~1.21	2.72~5.51
							34.47(3)		91.87(7)	2.55(12)	1.06(7)	4.29(7)	

## 2.4 矿井瓦斯概况

陶二煤矿投产时设计按低瓦斯矿井设计，随着开采深度增加，瓦斯涌出量也随之加大，1994 年开始为高瓦斯矿井（当年  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  绝对涌出量平均值分别为  $13.96\text{m}^3/\text{min}$ 、 $4.96\text{m}^3/\text{min}$ ）；2007 年由于发生瓦斯突出事故被确定为煤与瓦斯突出矿井。表 2-6 为陶二矿历年瓦斯等级鉴定表。

表 2-6 陶二矿历年瓦斯等级鉴定结果

年度	绝对涌出量( $\text{m}^3/\text{min}$ )		相对涌出量( $\text{m}^3/\text{t}$ )		矿井等级	
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$
2000	21.81	5.99	13.81	3.79	高	低
2001	14.98	5.39	10.44	3.76	高	低
2002	14.61	5.22	11.82	3.91	高	低
2003	19.23	8.66	10.34	4.66	高	低
2004	18.64	8.73	10.39	4.87	高	低
2005	18.64	8.73	10.39	4.87	高	低
2006	18.64	8.73	10.39	4.87	高	低
2007	/				煤与瓦斯突出矿井	
2008	19.88	7.58	10.56	4.03	煤与瓦斯突出矿井	
2009	20.31	4.06	12.95	2.59	煤与瓦斯突出矿井	
2010	/	/	11.97	4.20	煤与瓦斯突出矿井	

## 第3章 矿井瓦斯地质规律研究

### 3.1 瓦斯含量的测定

#### 3.1.1 瓦斯含量的测定方法

煤层瓦斯含量是指单位质量煤体所含有的瓦斯量，瓦斯含量的常用计量单位为  $\text{m}^3/\text{t}$  或  $\text{ml/g}$ 。对陶二矿瓦斯含量测定时采用井下解吸法，首先实测现采煤样的瓦斯解吸量，然后根据瓦斯解吸规律推算损失瓦斯量最后测定煤样的残存瓦斯量，最后根据煤样的取样损失瓦斯量计算出煤层瓦斯含量。

利用该方法，对 1#煤层、2#煤层瓦斯含量进行了测定，测定地点和测定结果如表 3-1 所示。

#### 3.1.2 煤的坚固性系数 ( $f$ ) 值与瓦斯放散初速度 ( $\Delta p$ ) 测定

煤坚固性系数 ( $f$ ) 是表示煤抵抗外力破坏能力大小的一项综合指标，它由煤的物理力学性质决定。煤的瓦斯放散初速度 ( $\Delta p$ ) 是表征煤层暴露时瓦斯放散快慢指标。

采用落锤法对煤的坚固性系数 ( $f$ ) 进行测定，瓦斯放散初速度测定用专用的  $\Delta p$  测定仪在实验室测定。

1#和 2#煤层煤的坚固性系数  $f$  值与瓦斯放散初速度  $\Delta p$ ，测定结果见表 3-2。

### 3.2 瓦斯含量分布规律

煤层中的瓦斯，由煤层深部向地表流动。而地表的气体，则沿煤层和煤层围岩向下运动，因此造成了煤层中各种瓦斯成分，由浅到深有规律地变化，形成了煤层瓦斯的带状分布。煤层中瓦斯的分布状况由浅到深可划分为四个带（如图 3-1），由上而下依次为：二氧化碳-氮气带；氮气带；氮气-甲烷带；甲烷带。前三个带统称为瓦斯风化带。其划分标准如表 3-3。

表 3-1 1#和 2#煤层测定瓦斯含量统计表  
Table3-1 Measured gas content of 1# and 2# coal seams

煤层	采样位置	Mad (%)	Aad (%)	Vf (%)	瓦斯成分(%)			残存瓦 斯含量 (m <sup>3</sup> /t)	井下瓦 斯解吸 量(ml)	瓦斯损 失(ml)	煤样重 量(g)	瓦斯含 量(m <sup>3</sup> /t)
					CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>					
1#	11417 上巷距切眼 20m	1.56	35.45	8.66	45.05	50.28	4.67	1.72	12	9.956	274.45	1.80
	11418 上巷距切眼 10m	2.32	25.65	9.82	39.24	58.39	2.37	2.25	14	16.243	232.64	2.38
	11422 上巷停采线	1.88	30.12	12.04	20.25	75.28	4.47	2.48	14	8.098	276.23	2.56
	11422 下巷距切眼 30m	3.05	18.08	9.78	25.26	69.89	4.85	2.71	20	10.385	253.21	2.83
	四下小煤皮带巷揭煤处	2.16	28.24	10.6	35.23	62.05	2.72	3.95	24	20.106	275.66	4.11
	11417 工作面切眼	0.77	54.55	19.21	43.43	54.37	2.2	1.5	12	13.912	336.8	1.577
	11417 工作面里下巷上部	1.84	15.05	6.02	15.5	70.48	14.02	2.07	13	4.965	211.1	2.155
	11418 上巷上帮处孔深 13 米	0.64	30.22	14.92	48.43	43.72	7.85	1.5	24	13.958	284.6	1.63
	11418 上巷切眼 13 米深	2.12	37.69	15.32	36.94	55.65	7.41	1.75	104	2.056	297.8	2.106
	12429 里下巷顶板穿层 1 号孔	3.65	22.56	6.22	53.52	36.44	10.04	1.59	16	17.144	205.14	1.752
	12429 里下巷顶板穿层 2 号孔	2.36	61.16	20.89	15.68	15.68	68.64	1.92	20	2.736	112.43	2.122
	22201 下巷开口里 900m 标高 -482m 顶板穿层钻孔	3.01	32.43	6.11	6.83	73.68	19.49	0.15	24	1.385	153.39	0.315
	22201 下巷开口里 50m 标高 -481m 顶板穿层钻孔	3.34	41.47	7.82	15.27	65.15	19.58	0.37	25	3.097	145.48	0.563
	北二采区皮带下山拐点前 150m 标高-560m 顶板穿层钻孔	4.27	35.64	6.5	16.82	68.05	15.13	0.32	50	7.19	153.71	0.692
	北二采回风下山 150m 顶板穿层 钻孔	3.81	24.37	6.8	17.25	66.95	15.80	0.28	84	19.58	199.20	0.80
	22201 回风石门距 201 上巷 40m 标高-510m 顶板穿层钻孔	2.16	35.98	6.61	10.81	65.92	23.27	0.42	26	2.192	155.58	0.601

## 第3章 矿井瓦斯地质规律研究

续表 3-1

煤层	采样位置	Mad (%)	Aad (%)	Vf (%)	瓦斯成分(%)			残存瓦 斯含量 (m <sup>3</sup> /t)	井下瓦 斯解吸 量(ml)	瓦斯损 失量 (ml)	煤样重 量(g)	瓦斯含 量(m <sup>3</sup> /t)
					CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>					
1#	22201 上巷开口里 270m 标高	5.77	14.25	4.74	16.49	63.93	19.58	0.3	25	3.344	202.51	0.44
	-449m 顶板穿层钻孔											
	井底车场北大巷	3.78	21.4	11.13	/	/	/	/	/	/	/	10.195
2#	22202 下巷掘进迎头	1.21	27.74	7.59	6.33	88.18	5.49	0.71	32	0.3	181.1	0.888
	12429 外下巷	2.33	35.51	15.01	24.63	73.33	2.04	1.3	50	7.445	212.1	1.571
	12426 工作面	1.05	24.46	11.33	10.81	68.09	21.1	0.84	52	3.267	301.3	1.023
	北二采皮带下山 22201 下巷口拐 点前 150m 标高-560m	0.32	13.72	6.25	4.3	84.12	11.58	0.41	50	1.838	244.7	0.622
	北二采回风下山 150m 顶板穿层 钻孔	2.14	15.3	6.53	1.76	87.25	10.99	1.06	64	10.34	206.5	1.42
	12429 里上巷	4.08	11.83	6.12	30.17	61.6	8.23	0.75	51	9.119	221.2	1.022
	12418 上巷迎头切眼	1.63	18.43	6.74	62.23	27.6	10.17	1.81	68	15.281	302.8	2.085
	22201 工作面下巷 1 号孔	2.41	52.92	12.69	8.75	69.39	21.86	0.67	18	2.411	137.27	0.819
	22201 工作面上巷 1 号孔	2.48	52.56	12.51	4.31	74.36	21.33	0.98	19	1.38	128.95	1.138
	22201 工作面上巷 2 号孔	1.55	67.34	21.45	6.05	73.12	20.83	0.51	22	1.68	134.21	0.686
	22201 工作面下巷 2 号孔	2.54	53.86	13.02	18.33	61.05	20.62	1.09	24	5.09	138.69	1.3
	22202 工作面上巷	2.42	21.6	7.02	4.28	80.44	15.28	0.1	32	0.203	269.4	0.22
	22202 上巷迎头	1.98	35.28	9.72	10.28	85.22	4.5	1.34	12	6.283	283.58	1.40
	22200 上巷迎头	2.26	20.82	12.29	12.09	84.13	3.78	1.85	14	5.804	279.65	1.92
	12429 里下巷	3.67	25.35	7.24	56.41	33.2	10.39	5.53	44	26.061	202.5	5.876

续表 3-1

煤层	采样位置	Mad (%)	Aad (%)	Vf (%)	瓦斯成分(%)			残存瓦 斯含量 (m <sup>3</sup> /t)	井下瓦 斯解吸 量(ml)	瓦斯损 失 量 (ml)	煤样重 量(g)	瓦 斯 含 量 (m <sup>3</sup> /t)
					CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>					
2#	北二采区 202 皮带下山	2.03	12.7	6.11	1.09	88.31	10.6	0.52	50	0.3334	203.1	0.768
	北二采区 202 下巷掘进头	0.52	21.21	6.95	5.14	82.77	12.09	0.36	32	0.244	176.1	0.543
	南采皮带辅助下山	1.55	15.5	12.37	81.83	14.95	3.22	6.39	960	571	240	12.77
	2211 下巷距口 65 米	1.27	12.78	13.07	80.38	15.51	4.11	5.57	670	176	304.5	8.35
	2211 下巷距机巷 305 米	1.51	13.22	14.28	82.81	14.85	2.34	9.24	350	89	437.6	10.28
	2212 下巷 3.11 号新掘位置	2.92	25.37	10.38	86.12	13.2	0.68	4.01	281	74	305.6	5.18
	2212 车场距南采辅巷 65m	1.83	15.62	11.24	94.46	5.37	0.17	10.88	135	114	225	11.94
	22211 工作面	4.3	16.26	12.97	/	/	/	/	/	/	/	7.809
	井底车场北大巷绕道	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	13.102

表 3-2 煤的坚固性系数( $f$ )值与瓦斯放散初速度( $\Delta p$ )测定结果Table3-2 Measured consistent coefficient ( $f$ ) of coal and initial velocity of gas emission ( $\Delta p$ )

煤层	采样地点	坚固性系数 $f$ 值	瓦斯放散初速度 $\Delta p$
1#	2213 上巷	1.59	28.5
	22202 上车场	0.34	26.5
	11417 上巷	1.64	33
	1111	1.67	23.34
	1413	1.49	14.07
	1412	1.67	18.394
	812	1.09	37.88
	扩大区南大巷	2.5	22.94
	水仓联络巷	---	22.37
2#	12429 里上巷	0.88	25.5
	2214 下巷	1.75	26
	22202 下巷	1.43	32
	2211 下巷距机头 305m	1.83	25
	2212 车场距南采辅巷 65m	1.62	26
	2212 下巷 3.11 号新掘位置	1.49	26
	2211 下巷 3.12 号新掘位置	1.74	24
	南采皮带 3.13 新掘位置	1.65	25
	2211 上巷 880m (突出点)	0.23	
	扩大区井地北大巷绕道	2.22	19.07
	首采皮带上山掘进	1.47	26.94
	2614	0.72	0.7
	1611	1.67	3.3
	1612	2.22	7.2
	2613	1.06	10.14
	2412	2.4	12.14
	1411	2.14	29.81
	1811	2.22	2.6
	2211 辅助上山 212 车场向上 30 米 1 号样	1.58	26
	2212 车场 2 号样	1.62	21
	2212 上巷皮带机头向里 3 米处 1 号样	1.46	11
	2212 平巷机尾向下 55 米处 2 号样	1.54	12
	2212 下巷联眼向里 100 米处 1 号样	1.28	13
	2212 下巷联眼向里 320 米处 2 号样	1.2	13
	2210 工作面上巷坎外向前 105 米处 1 号样	1.76	22
	2210 工作面液压支架 37 号处 2 号样	1.5	20
	2210 工作面下巷向前 12 米处 3 号样	1.54	19

续表 3-2

煤层	采样地点	坚固性系数 $f$ 值	瓦斯放散初速度 $\Delta p$
	428 工作面上巷钻窝向外 7.5 米处 3 号样	1.2	12
	428 工作面上巷向里 50 米处 1 号样	1.88	11
	428 工作面上巷液压支架 60 架处 2 号样	1.1	13
	2211 掘进巷上巷机头向里 200 米处 2 号样	2	24
	2211 掘进巷上巷机头向里 590 米处 1 号样	1.82	25
	北二采轨道 1182 偏口往下 28 米处	1.5	13
	北二采皮带联眼向下 28 米处	6	13
	1182 掘进头上巷距切眼向后 252 米处 1 号样	1.76	5
	1182 掘进头切眼下口向上 66 米处 2 号样	1.22	6
	1182 掘进头下巷距切眼 210 米处 3 号样	0.82	6
	22210 工作面 1 号样	0.52	21
	22210 工作面 2 号样	0.55	9.4
	22210 工作面 3 号样	0.58	6.5
	22210 上巷 1 号样	0.55	12.8
	22210 上巷 2 号样	0.53	11.4
	22210 上巷 3 号样	0.71	6.8
	22210 上巷 4 号样	0.56	4.9
2#	22210 上巷 5 号样	0.54	25.2
	22210 上巷 6 号样	0.61	21.3
	22210 下巷 1 号样	0.56	14
	22210 下巷 2 号样	0.71	17.6
	22210 下巷 3 号样	0.57	25.4
	22210 下巷 4 号样	0.54	22.1
	22210 下巷 5 号样	0.59	23.7
	22210 下巷 6 号样	0.59	19.3
	12428 工作面 1 号样	0.46	4.9
	12428 工作面 2 号样	0.57	7.1
	12428 工作面 3 号样	0.62	4.1
	12428 工作面 4 号样	0.56	9.7
	12428 上巷 1 号样	0.55	7.4
	12428 上巷 2 号样	0.5	6.4
	12428 上巷 3 号样	0.6	6.5
	12428 下巷 1 号样	0.91	5.6
	12428 下巷 2 号样	0.39	8.6
	12428 下巷 3 号样	0.73	3.1



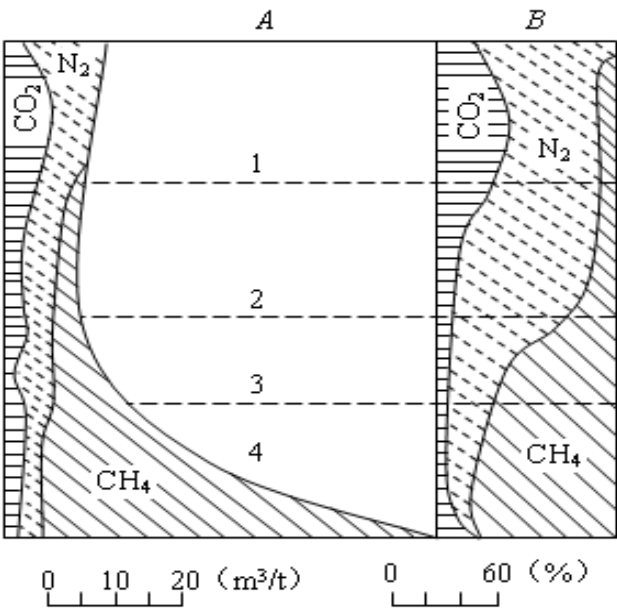


图 3-1 瓦斯分带<sup>[45]</sup>

Fig.3-1 Gas zonation

A—含量， $\text{m}^3/\text{t}$ ；B—占总瓦斯成分的百分比；  
1—二氧化碳-氮气带；2—氮气带；3—氮气-甲烷带；4—甲烷带

表 3-3 按瓦斯成分划分瓦斯带的标准

Table 3-3 The compositional standards of gas zonation

瓦斯带名称	组分含量 (%)		
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
二氧化碳-氮气带	0~10	20~80	20~80
氮气带	0~20	80~100	0~20
氮气-甲烷带	20~80	20~80	0~20
甲烷带	80~100	0~20	0~10

通过对陶二矿前期勘探时期和补充探测得到的瓦斯含量数据进行统计，分析和整理得到井田合格瓦斯含量表。见表 3-4：

3.2.1 1#煤层瓦斯分布规律

陶二煤矿 1#煤层瓦斯含量分布不均，具有明显分区、分带的特征，总体上表现为，南部高、北部低，深部高、浅部低。划分为 3 个瓦斯地质单元（如图 3-2 所示）。

表 3-4 井田合格瓦斯含量汇总表  
Table 3-4 The qualified gas content in the mine field

煤层	序号	采样位置	标高 (m)	埋深 (m)	Mad (%)	Aad (%)	Vf (%)	瓦斯成分(%)			瓦斯含量 (m <sup>3</sup> /t)	备注
								CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
1#	1	22201 下巷开口里 900m 标高-482m 顶板穿层钻孔	-482	650	3.01	32.43	6.11	6.83	73.68	19.49	0.315	合格
	2	22201 下巷开口里 50m 标高-481m 顶板穿层钻孔	-481	636	3.34	41.47	7.82	15.27	65.15	19.58	0.563	合格
	3	北二采区皮带下山拐点前 150m 顶板穿层钻孔	-560	745	4.27	35.64	6.5	16.82	68.05	15.13	0.692	合格
	4	北二采回风下山 150m 顶板穿层钻孔	-600	785	3.81	24.37	6.8	17.25	66.95	15.80	0.80	合格
	5	22201 回风石门距 201 上巷 40m	-510	660	2.16	35.98	6.61	10.81	65.92	23.27	0.601	合格
	6	22201 上巷开口里 270m 顶板穿层钻孔	-449	530	5.77	14.25	4.74	16.49	63.93	19.58	0.44	合格
	7	604	-905	1059.7	4.64	12.82	3.34	1.98	4.93	93.09	0.04	合格
	8	11422 上巷停采线	-395	556	1.88	30.12	12.04	20.25	75.28	4.47	2.56	合格
	9	11417 上巷距切眼 20m	-348	505	1.56	35.45	8.66	45.05	50.28	4.67	1.80	合格
	10	11418 上巷距切眼 10m	-375	550	2.32	25.65	9.82	39.24	58.39	2.37	2.38	合格
	11	11417 工作面切眼	-347	508	0.77	54.55	19.21	43.43	54.37	2.2	1.577	合格
	12	11417 工作面里下巷上部	-439	503	1.84	15.05	6.02	15.5	70.48	14.02	2.155	合格
	13	11418 上巷上帮处孔深 13 米	-370	545	0.64	30.22	14.92	48.43	43.72	7.85	1.63	合格
	14	11418 上巷切眼 13 米深	-388	558	2.12	37.69	15.32	36.94	55.65	7.41	2.106	合格
	15	1001	-405	552	2	13.76	4.64	62.48	9.69	27.83	2.36	合格
	16	11422 下巷距切眼 30m	-410	545	3.05	18.08	9.78	25.26	69.89	4.85	2.83	合格
	17	四下小煤皮带巷揭煤处	-500	655	2.16	28.24	10.6	35.23	62.05	2.72	4.11	合格

第3章 矿井瓦斯地质规律研究

续表 3-4

煤层	序号	采样位置	标高 (m)	埋深 (m)	Ma (%)	Aad (%)	Vf (%)	瓦斯成分(%)			瓦斯含量 (m <sup>3</sup> /t)	备注
								CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
1#	18	12429 里下巷顶板穿层 1 号孔	-493	645	3.65	22.56	6.22	53.52	36.44	10.04	1.752	合格
	19	12429 里下巷顶板穿层 2 号孔	-480	630	2.36	61.16	20.89	15.68	15.68	68.64	2.122	合格
	20	1002	-900	1037.8	1.48	16.55	5.25	73.35	4.37	22.27	5.39	合格
	21	井底车场北大巷	-655	781	3.78	21.4	11.13	/	/	/	10.195	合格
	22	1203	-787.9	926.9	1.8	59.16	21.93	51.63	22.22	26.2	0.64	断层附近
	23	1204	-430	754.25	4	9.24	5.98	88.66	5.79	5.55	8.37	合格
	24	普 13-2	-560	695.61	0.8	18.41	6.5	88.76	2.79	8.45	12.86	合格
	25	1302	-900	1045.1	1.41	28.79	10.74	90.52	1.42	8.06	11.00	合格
	26	2003	-773	956.9	1.7	8.78	6.5	66.78	3.66	29.56	6.22	断层附近
2#	1	22202 里下巷掘进头	-539	744	1.21	27.74	7.59	6.33	88.18	5.49	0.888	合格
	2	北二采区 202 皮带下山 1#罐	-545	750	0.32	13.72	6.25	4.3	84.12	11.58	0.622	合格
	3	22201 工作面下巷 1 号孔	-560	750	2.41	52.92	12.69	8.75	69.39	21.86	0.819	合格
	4	22201 工作面上巷 1 号孔	-446	736	2.48	52.56	12.51	4.31	74.36	21.33	1.138	合格
	5	22201 工作面上巷 2 号孔	-455	645	1.55	67.34	21.45	6.05	73.12	20.83	0.686	合格
	6	22201 工作面下巷 2 号孔	-505	690	2.54	53.86	13.02	18.33	61.05	20.62	1.3	合格
	7	22202 工作面上巷掘进面	-493	700	2.42	21.6	7.02	4.28	80.44	15.28	0.22	合格
	8	22202 工作面上巷掘进面	-480	685	2.65	22.02	7.12	5.86	79.85	14.29	0.335	合格
	9	22202 上巷迎头	-360	630	1.98	35.28	9.72	10.28	85.22	4.5	1.40	合格
	11	北二采区皮带下山	-545	748	2.03	12.7	6.11	1.09	88.31	10.60	0.768	合格
	10	22200 上巷迎头	-460	670	2.26	20.82	12.29	12.09	84.13	3.78	1.92	合格

续表 3-4

煤层	序号	采样位置	标高 (m)	埋深 (m)	Mad (%)	Aad (%)	Vf (%)	瓦斯成分(%)			瓦斯含量 (m <sup>3</sup> /t)	备注
								CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>		
2#	12	北二采回风下山 150m 顶板穿层钻孔	-600	803	2.14	15.3	6.53	1.76	87.25	10.99	1.42	合格
	13	22202 下巷掘进头	-535	740	0.52	21.21	6.95	5.14	82.77	12.09	0.543	合格
	14	604	-925	1074	1.22	70.81		4.29	7.95	87.8	0.05	合格
	15	12418 上巷迎头切眼	-370	545	1.63	18.43	6.74	62.23	27.6	10.17	2.085	合格
	16	12426 工作面	-446	630	1.05	24.46	11.33	10.81	68.09	21.1	1.023	合格
	17	1001	-429	578	2.2	16.05	4.53	51.98	19.71	28.31	2.17	合格
	18	12429 里上巷	-460	605	4.08	11.83	6.12	30.17	61.6	8.23	1.022	合格
	19	12429 外下巷	-470	618	2.33	35.51	15.01	24.63	73.33	2.04	1.571	合格
	20	12429 里下巷	-480	630	3.67	25.35	7.24	56.41	33.2	10.39	5.876	合格
	21	南采皮带辅助下山	-610	736	1.55	15.5	12.37	81.83	14.95	3.22	12.77	合格
	22	2211 下巷距口 65 米	-430	553	1.27	12.78	13.07	80.38	15.51	4.11	8.35	合格
	23	2211 下巷距机巷 305 米	-440	573	1.51	13.22	14.28	82.81	14.85	2.34	10.28	合格
	24	2212 下巷 3.11 号新掘位置	-580	631	2.92	25.37	10.38	86.12	13.2	0.68	5.18	合格
	25	2212 车场距南采辅巷 65m	-516	621	1.83	15.62	11.24	94.46	5.37	0.17	11.94	合格
	26	2211 工作面	-426	565	4.3	16.26	12.97	/	/	/	7.809	合格
	27	井底车场北大巷绕道	-700	821	/	/	/	/	/	/	13.102	合格
	28	1002 下	-993	1062	0.81	16.81	10.89	54.13	11.05	34.82	5.34	合格
	29	普 13-2	-580	720	0.88	21.26	6.67	89.2	3.48	7.32	9.16	合格
	30	1802 上	-575	744	0.73	18.18	3.75	0.75	11.82	87.43	0.05	断层附近
	31	2401	-692	892	1.88	19.87	12.12	64.29	4.41	31.29	4.88	断层附近
	32	2402	-562	773	1.73	21.38	6.19	72.59	5.28	22.13	1.25	断层附近

第一单元：DF<sub>44</sub>断层和薄煤带连线以北；甲烷成分最大值为17.25%，最小值为1.98%，平均为12.21%；氮气成分最大值为73.68%，最小值为4.93%，平均为58.37%；二氧化碳成分最大值为93.09%，最小值为15.13%，平均为29.42%；根据瓦斯带的划分标准，此单元处于二氧化碳-氮气带、氮气带和氮气-甲烷带，均属瓦斯风化带。

第二单元：DF<sub>44</sub>断层和薄煤带连线以南，F<sub>1</sub>断层和F<sub>23</sub>断层连线以浅；甲烷成分最大值为48.43%，最小值为15.50%，平均为35.55%；氮气成分最大值为75.28%，最小值为43.72%，平均为58.31%；二氧化碳成分最大值为14.02%，最小值为2.20%，平均为6.14%；根据瓦斯带的划分标准，此单元处于氮气带和氮气-甲烷带，均属瓦斯风化带。此单元位于煤层的浅部，在采掘期间，没有发生瓦斯动力现象，属于低瓦斯区。

第三单元：DF<sub>44</sub>断层和薄煤带连线以南，F<sub>1</sub>断层和F<sub>23</sub>断层连线以深。甲烷成分最大值为90.52%，最小值为15.68%，平均为59.26%；氮气成分最大值为69.89%，最小值为1.42%，平均为21.27%；二氧化碳成分最大值为68.64%，最小值为5.50%，平均为19.47%；根据瓦斯带的划分标准，此单元处于氮气-甲烷带和甲烷带。

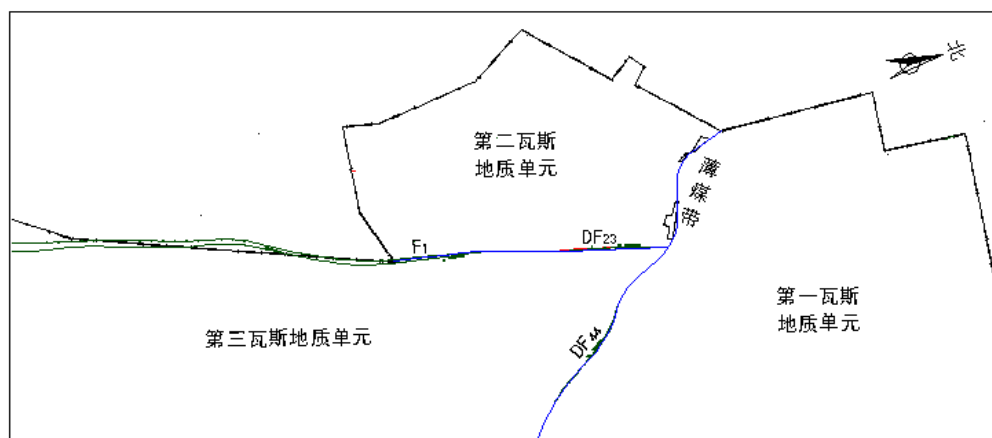


图 3-2 1#煤层瓦斯地质单元划分示意图

Fig.3-2 Schematic map of the geological gas units of 1# coal seam

### 3.2.2 2#煤层瓦斯分布规律

陶二煤矿 2#煤层瓦斯含量分布不均，具有明显分区、分带的特征，总体上表现为，南部高、北部低，深部高、浅部低。划分为 3 个瓦斯地质单元（如图 3-3 所示）。

第一单元：DF<sub>44</sub>断层和薄煤带连线以北；甲烷成分最大值为62.23%，最小值为1.09%，平均为10.37%；氮气成分最大值为88.31%，最小值为7.95%，平均为

71.36%；二氧化碳成分最大值为 87.80%，最小值为 3.78%，平均为 18.27%；根据瓦斯带的划分标准，此单元处于二氧化碳-氮气带、氮气带和氮气-甲烷带，均属瓦斯风化带。

第二单元：DF<sub>44</sub> 断层和薄煤带连线以南，F<sub>1</sub> 断层和 DF<sub>23</sub> 断层连线以浅；位于煤层的浅部，已回采结束，在采掘期间，没有发生瓦斯动力现象，属于低瓦斯区。

第三单元：DF<sub>44</sub> 断层和薄煤带连线以南，F<sub>1</sub> 断层和 DF<sub>23</sub> 断层连线以深。甲烷成分最大值为 94.46%，最小值为 0.75%，平均为 62.48%；氮气成分最大值为 73.33%，最小值为 3.48%，平均为 19.91%；二氧化碳成分最大值为 87.43%，最小值为 0.17%，平均为 17.61%；根据瓦斯带的划分标准，此单元处于二氧化碳-氮气带、氮气带、氮气-甲烷带和甲烷带。

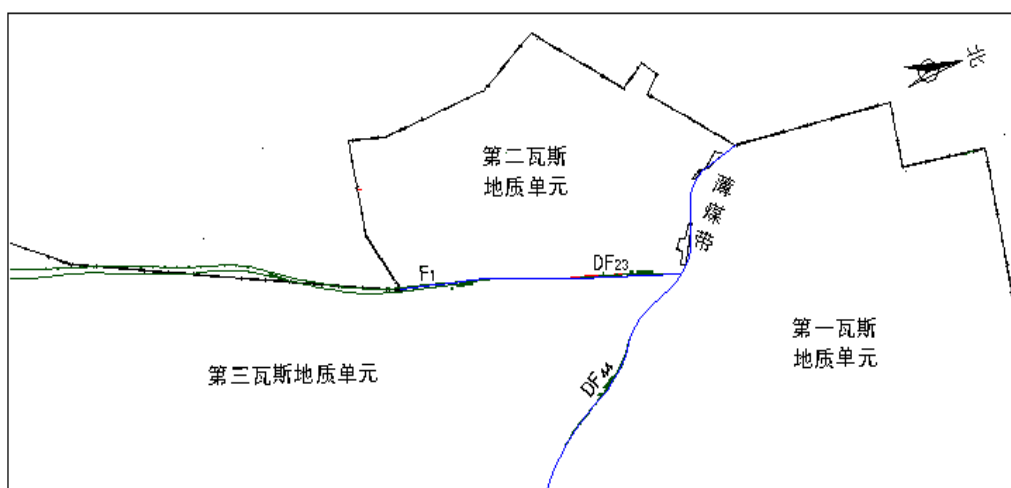


图 3-3 2#煤层瓦斯地质单元划分示意图

Fig.3-3 Schematic map of the geological gas units of 2# coal seam

## 第4章 矿井煤与瓦斯突出危险性评价指标的建立

### 4.1 煤与瓦斯突出影响因素分析

目前,国内外对煤与瓦斯突出的研究都是建立在各种假说之上的,综合作用机理是现代学者都普遍接受的一种假说,认为煤与瓦斯突出的发生是由煤的瓦斯参数、地应力、地质构造和煤体本身的物理力学性质等多种因素共同作用的结果。

#### 4.1.1 瓦斯参数

在煤与瓦斯突出过程中,瓦斯起着重要作用。煤层中游离瓦斯空隙压力对煤的作用和对围压的作用正好相反,空隙压力增加,有效应力减小,使煤抵抗破坏的能力降低<sup>[44]</sup>。

在煤与瓦斯突出过程中,煤体长时间储存的瓦斯潜能得到突然释放,加上煤层瓦斯解吸促使了煤体的破碎和移动,进而形成瓦斯流,将煤体抛出,使瓦斯突出孔洞的压力梯度始终维持在一个较高的水平。地应力、瓦斯压力和煤体物理力学性质的差别等条件决定着瓦斯突出发展速度总是在不断变化过程中。此外,通道阻力的大小也对突出的发展速度产生影响,因此煤与瓦斯突出的过程可以看做是一种脉冲式的变化。

#### 4.1.2 地应力因素

较高的地应力是瓦斯突出发生的条件之一。突然改变的应力场,会使得煤体或围岩受到不同程度的刺激,释放出足够多的弹性势能,使煤体发生突然破坏,由此引发煤与瓦斯突出。

大体上说,地应力在煤与瓦斯突出发生的过程中起到的作用主要有3个方面:

- (1) 在弹性变形能做功的情况下,煤体产生破坏并发生位移。
- (2) 地应力场产生的瓦斯压力梯度对煤体破坏过程中起到决定作用。
- (3) 煤层的透气性随地应力变化而变化。地应力变大,煤层的透气性呈负指数下降。

#### 4.1.3 地质构造

褶曲、节理和断层是煤矿中主要的地质构造,这些构造是在成煤过程后期形

成的。地质构造作用对矿井的控制主要表现在对瓦斯突出的条件和地点分布上。所以，在分析矿区煤与瓦斯突出因素时要详细考虑地质构造对煤层的影响。从诸多国内外典型案例可以观察到，地质构造的类型不同、封闭情况不同、构造部位及力学性质不同，对瓦斯释放或储存的影响也不相同。在封闭性的地质构造中往往造成煤层瓦斯积聚，相反，开放性的地质构造则有利于瓦斯的释放。

#### 4.1.4 煤体结构及物理学性质

在长期的地质演化过程中，煤层受到了各种地质作用的影响，由此表现出来的结构特征我们称之为煤体结构。通过大量研究表明，具有层理紊乱和煤质松软是瓦斯突出发生地点煤层的共性，构造煤都有一定的厚度，而且构造煤的突出危险性程度随其破坏程度增加而增加。根据煤体结构的宏观特征，可以将煤体分为四种类型（见表 4-1）。

### 4.2 煤与瓦斯突出危险性预测指标的建立原则

煤与瓦斯突出是多因素综合作用的结果，在选择评价指标应该遵循以下原则 3 个原则：

（1）整体规划性原则：煤与瓦斯突出是多种因素综合作用的结果，单一考虑其中某一个因素会使得评价结果显得片面不准确，因此在选择预测指标时要综合考虑每一种可能的因素，力争做到整体规划，使预测系统成为一个整体。此外，预测指标的选择也不是简单的要素堆积，还要考虑所选取的预测指标是否服从整体的功能和目的。

（2）可操作性原则：煤与瓦斯突出预测评价指标的建立过程中除了要避免选择的单一性，还要保证普遍性，选取的预测指标能够表现出矿井瓦斯的总体概况，指标的选择要有利于采集和量化，此外还要考虑到所选择的指标能被使用者理解和接受，减少选取过程中的冗余化和复杂化。

（3）系统稳定性原则：在指标选取过程中对矿井的特征要从不同角度出发，力争将矿井的实际情况准确的反映出来。综合考虑后要抓住事物的主要矛盾，即选取影响瓦斯突出的主要因素，对影响很小的因素可以不予考虑，直观的表现出预测指标的科学性和稳定性。



表 4-1 煤体结构类型<sup>[45]</sup>

Table 4-1 Coal structure type

编号	类型	赋存状态和分层特点	光泽和层理	煤体破碎程度	裂隙和揉皱的发育程度	手试强度	坚固性系数	瓦斯放散指数	突出危险程度
I	原生结构	层状、似层状，与上下分层呈整合接触	煤岩类型界限清晰、原生条带状结构明显	呈较大的保持棱角的块体，块体间无相对位移	内、外生裂隙均可辨认，未见揉皱镜面	捏不动，或呈厘米级块状	>0.8	<10	非突出
II	碎裂煤	层状、似层状、透镜状，与上下分层呈整合接触	煤岩类型界限清晰原生条带状结构断续可见	呈棱角状块体，但块体已有相对位移	煤体被多组互相交切的裂隙切割未见揉皱镜面	可捻成厘米、毫米级碎粒	0.3-0.8	10-15	过度
III	碎粒煤	镜状、团块状，与上下分层呈构造不整合接触	光泽暗淡，原生结构遭到破坏	煤被揉搓捻碎，主要粒级在1mm以上	构造镜面发育	易捻搓成毫米级碎粒或煤粉	<0.3	>15	易突出
IV	糜棱煤	透镜状、团块状，与上下分层呈构造不整合接触	光泽暗淡，原生结构遭到破坏	煤被揉搓捻碎的更细小，主要粒级在1mm以下	构造、揉皱镜面发育	极易捻搓成粉末或粉尘	<0.3	>20	易突出

### 4.3 基于灰色关联度分析法的突出危险性评价

#### 4.3.1 灰色关联度分析法概述

近年来，灰色关联度分析法在诸多领域得到了十分广泛的应用。灰色关联度分析法实质上是一种因素比较分析法，通过对模糊不清的灰关系进行序列化、模型化，继而建立分析模型，从而达到灰关系的量化，给系统的进一步建模提供分析手段。该方法对解决客观世界广泛存在的灰色性的问题非常有效果，而且此方法还可以同系统科学中的其它原理相结合，使得灰色关联度分析法的应用范围进一步拓宽。

在一个呈现出动态发展变化的系统中,系统的变化和发展是由系统内所包含的众多子因素共同作用的结果。此时准确找出影响系统变化的主次因素,成为我们在分析该系统时首要解决的问题。此外在分析这些影响因素的过程中,还要对各个因素对系统的影响程度进行排序;辨别出哪些因素对系统起推动作用,哪些因素对系统起阻碍作用等问题。灰色关联度分析法,是将各个因素之间的“灰色关联度”,即各个子因素与行为序列之间发展趋势的相异程度或相似程度,作为衡量各个因素间关联程度的一种方法。该理论意图通过一定的方法,定量的计算出各个子因素与行为序列之间的数值关系。由此可以看出,灰色关联度分析法尤其适合动态系统的分析,为动态系统的发展变化提供量化度量。

根据煤与瓦斯突出综合作用机理可知,突出的发生是由多个因素综合的结果,但各个因素之间的关系往往是动态变化和非线性的,尤其是关于煤与瓦斯突出的统计数据十分有限,而且现有数据灰度较大,再加上数据获取过程中人为因素的干扰,许多数据并不能准确的反应出其对瓦斯突出的影响,且数据没有典型的分布规律,因此采用数理统计的方法往往难以凑效。而灰色关联度分析法就是对这种动态的、小样本、贫信息的不确定性系统的一种非常有效的分析手段。通过该方法可以对引起矿井煤与瓦斯突出的各个动态因素进行筛选,确定影响瓦斯突出的主次因素以及各个子因素对系统的影响程度大小。

灰色关联度分析法的应用可归纳为3个方面<sup>[46]</sup>。

#### (1) 因素分析

任何一种系统都是多因素集合体,多种因素的综合作用决定着系统的发展趋势。事物的主要矛盾决定着事物的发展方向,同理在分析一个完整系统的过程中,我们只需要找出系统的主要矛盾,即影响系统发展的的主要因素。对将主要因素确定为系统的参考序列,次要因素作为比较序列与母因素做关联度比较,计算两者的灰色关联度,关联度的大小决定着主次因素的关系亲疏。

#### (2) 方案决策

备选方案的提出是进行系统分析的第一步,想要选择一个最佳方案就要对前期提出的方案进一步的优化分析。灰关联度分析以一个理想化的方案为参考序列,对备选方案与理想方案进行灰色关联度,进而选出最优方案。

#### (3) 优势分析

所有母因素与所有子因素之间的关联不止一个,它们共同构造了一个关联矩阵。如果在矩阵中某一行的每个元素都大于其它各行元素,则将该行确定为优势母因素。

### 4.3.2 灰色关联度一般计算步骤

(1) 系统行为特征量和影响因素集的确定。首先应选取间接地表征系统行为的时序数据序列和影响系统主行为的有关因素的时序数据序列。

(2) 进行数据预处理。在进行灰色关联度量化分析之前,需要对系统行为特征和各个因素进行处理,使其化为无量纲数据并且数量级大体相近。

(3) 计算关联度。灰色关联度是序列之间联系紧密程度的数量表征,不同问题根据其特性有不同的关联度计算方法。

(4) 关联度分析和排序。关联度分析的目的就是将系统特征行为序列与各相关因素行为序列关联度大小排根据关联度的大小次序,对各因素在系统中的地位做出判断。

### 4.3.3 灰色关联度的计算

确定参考序列和比较序列。考虑  $m$  个时间序列:

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), i = 1, 2, 3 \quad (4.1)$$

这  $m$  个序列代表  $m$  种因素。

给定时间序列:

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)) \quad (4.2)$$

使其为参考序列(或者称为母序列)。则  $X_i$  称为比较序列,统称为系统因素序列。

进行系统分析。对确定好的参考序列和比较序列进行归一化处理,归一化处理常用的方法有以下几种。

(1) 初值变换

设  $X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)]$  为因素  $X_i$  的行为序列,  $D_1$  为序列算子且

$$X_i D_1 = (x_i(1)d_1, x_i(2)d_1, \dots, x_i(n)d_1) \quad (4.3)$$

其中,

$$x_i(k)d_i = \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, x_i(1) \neq 0, k = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

则称  $D_1$  为初值化算子,  $X_i D_1$  为行为序列  $X_i$  在初值化算子  $D_1$  下的像,简称初值像,这种映射称为初值化变换,其优点是各值均大于 0,并且序列有共同的起点。

(2) 均值变换

设  $X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)]$  为因素  $X_i$  的行为序列,  $D_2$  为序列算子且

$$X_i D_2 = (x_i(1)d_2, x_i(2)d_2, \dots, x_i(n)d_2) \quad (4.5)$$

其中,

$$x_i(k)d_2 = \frac{x_i(k)}{X_i}, X_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k), k=1,2,n \quad (4.6)$$

则称  $D_2$  为均值化算子,  $X_i D_2$  为行为序列  $X_i$  在均值化算子  $D_2$  下的像, 简称均值像, 这种映射称为均值化变换。

### (3) 区间值变换

设  $X_i = [x_i(1), x_i(2) \cdots x_i(n)]$  为因素  $X_i$  的行为序列,  $D_3$  为序列算子且

$$X_i D_3 = (x_i(1)d_3, x_i(2)d_3, \cdots, x_i(n)d_3) \quad (4.7)$$

其中,

$$x_i d_3 = \frac{x_i(k) - \min_k x_i(k)}{\max_k x_i(k) - \min_k x_i(k)}, k=1,2,\cdots,n \quad (4.8)$$

则称  $D_3$  为区间值化算子,  $X_i D_3$  为行为序列  $X_i$  在区间值化算子  $D_3$  下的像, 简称区间值像, 这种映射称为区间值变换。

### (4) 逆变换

设  $X_i = [x_i(1), x_i(2) \cdots x_i(n)]$  为因素  $X_i$  的行为序列,  $D_4$  为序列算子且

$$X_i D_4 = (x_i(1)d_4, x_i(2)d_4, \cdots, x_i(n)d_4) \quad (4.9)$$

其中,

$$x_i(k)d_4 = 1 - x_i(k), k=1,2,\cdots,n \quad (4.10)$$

则称  $D_4$  为逆化算子,  $X_i D_4$  为行为序列  $X_i$  在逆化算子  $D_4$  下的像, 简称逆化像, 这种映射称为逆变换。

### (5) 倒数变换

设  $X_i = [x_i(1), x_i(2) \cdots x_i(n)]$  为因素  $X_i$  的行为序列,  $D_5$  为序列算子且

$$X_i D_5 = (x_i(1)d_5, x_i(2)d_5, \cdots, x_i(n)d_5) \quad (4.11)$$

其中,

$$x_i(k)d_5 = \frac{1}{x_i(k)}, k=1,2,\cdots,n \quad (4.12)$$

则称  $D_5$  为倒数化算子,  $X_i D_5$  为行为序列  $X_i$  在倒数化算子  $D_5$  下的像, 简称倒数化像, 这种映射称为倒数变换。

### 4.3.4 计算关联度

(1) 求序列初值像

令:

$$X'_i = \frac{x'_i - \min_k x'_i(k)}{\max_k x'_i(k) - \min_k x'_i(k)} = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)), i = 0, 1, 2, \dots, m \quad (4.13)$$

(2) 求差序列

记:

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|, \Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)), i = 1, 2, \dots, m \quad (4.14)$$

(3) 求两极最大差和最小差

记:

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k) \quad (4.15)$$

$$m = \min_i \min_k \Delta_i(k) \quad (4.16)$$

(4) 求关联系数

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4.17)$$

(5) 计算关联度

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{0i}(k), i = 1, 2, \dots, m \quad (4.18)$$

称为第*i*个子序列相对参考序列 $X_0$ 的关联度。

### 4.3.5 关联度分析和排序

对时间序列因素做相关性比较是关联度分析的主要内容, 如果在每个时刻点两序列都是重合的, 也就是关联系数都是1, 两序列的关联度也必等于1, 此外, 两个比较序列在任何时刻也不可能垂直, 所以关联系数和关联度均大于0。大于0且小于等于1的 $\gamma_{0i}$ 全体便构成关联序关系, 从中可确定关联性最大, 隶属程度最高的某个序列。

4.4 煤与瓦斯突出预测指标的选取

遵循上述煤与瓦斯突出预测指标的选取原则，采用灰色关联度分析法对收集到的陶二矿原始资料数据进行筛选。采用的预测数据来自陶二矿生产过程中所记录的数据，共计 8 个样本。突出危险程度用阿拉伯数字 1、2、3 来表示，分别代表无突出危险性、一般突出危险性、严重突出危险性。以突出危险程度为参考序列，比较序列为 6 项突出预测指标：瓦斯含量、煤层埋深、瓦斯压力、瓦斯放散初速度、坚固性系数、煤体结构类型。表 4-2 为采集的原始数据。

表 4-2 原始数据  
Tab4-2 Original data

编号	瓦斯放散初速度( $\Delta p$ )	坚固性系数( $f$ )	瓦斯含量( $m^3/t$ )	瓦斯压力(M/Pa)	煤体结构类型	煤层埋深(m)
1	28.5	1.59	10.195	0.81	I - II	781
2	37.88	1.09	8.37	0.68	II	754.25
3	22.94	2.5	12.86	1.02	I - II	695.1
4	13	1.2	12.77	0.82	II	736
5	25.5	0.88	8.35	0.96	I - II	553
6	26	1.49	5.18	1.24	I - II	631
7	26	1.62	7.809	1.04	I	565
8	25.4	0.57	13.102	0.89	II	821

(1) 由公式 4.13 得到比较数列的初值像。表 4-3 为关联度分析样本

表 4-3 关联度分析样本

Tab4-3 Relational Analysis of samples

参考数列		比较数列				
突出危险程度	瓦斯放散初速度( $\Delta p$ )	坚固性系数( $f$ )	瓦斯含量( $m^3/t$ )	瓦斯压力(M/Pa)	煤体结构类型	煤层埋深(m)
1	7.58	7.58	5.59	4.59	19.6	5.83
1	6.57	5.15	5.13	5.59	13.42	6.32
2	5.30	5.57	5.31	4.91	20.6	4.73
2	4.89	8.91	5.56	5.31	14.42	7.85
2	5.11	7.07	4.91	8.40	20.6	5.92
2	6.14	10.63	4.37	5.71	20.6	5.51
2	7.06	8.57	4.73	5.50	7.53	2.59
3	8.31	6.93	4.54	6.49	15.42	5.74

(2) 由公式 4.14 求的样本的差序列，见表 4-4。

表 4-4 差序列

Tab4-4 Difference sequence

编号	瓦斯放散初速度( $\Delta p$ )	坚固性系数( $f$ )	瓦斯含量( $\text{m}^3/\text{t}$ )	瓦斯压力(MPa)	煤体结构类型	煤层埋深(m)
1	6.58	6.58	4.59	3.92	18.6	4.83
2	5.57	4.14	4.13	4.58	12.42	5.32
3	3.30	3.57	3.31	2.91	18.6	2.73
4	2.89	6.91	3.56	3.31	12.42	5.85
5	3.11	5.07	2.90	6.40	18.6	3.92
6	4.14	8.63	2.37	3.71	18.6	3.51
7	5.06	6.57	2.73	3.50	5.32	0.59
8	5.31	3.93	1.54	3.49	12.42	2.74

(3) 求两极最大差和最小差

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k) = 24.8416$$

$$m = \min_i \min_k \Delta_i(k) = 0$$

(4) 求关联系数

取  $\zeta = 0.5$ , 由公式 4.17 得到各因素关联系数, 见表 4-5。

表 4-5 关联系数

Tab4-5 Correlation coefficient

编号	瓦斯放散初速度( $\Delta p$ )	坚固性系数( $f$ )	瓦斯含量( $\text{m}^3/\text{t}$ )	瓦斯压力(MPa)	煤体结构类型	煤层埋深(m)
1	0.65	0.65	0.73	0.76	0.4	0.72
2	0.69	0.75	0.75	0.73	0.5	0.70
3	0.79	0.69	0.79	0.81	0.4	0.82
4	0.81	0.64	0.69	0.79	0.5	0.68
5	0.80	0.71	0.81	0.66	0.4	0.76
6	0.75	0.59	0.84	0.77	0.4	0.78
7	0.71	0.65	0.82	0.78	0.7	0.96
8	0.70	0.76	0.89	0.78	0.5	0.82

(5) 计算关联度并排序

依据煤与瓦斯突出危险性预测指标的建立原则, 并利用灰色关联度分析法的相关知识和理论, 由公式(4.18)对影响煤与瓦斯突出危险性指标进行关联度计算, 并对各因素进行关联度排序(见表 4-6): 瓦斯含量>埋深>瓦斯压力>瓦斯放散初速

度>坚固性系数>煤体结构类型，其中瓦斯含量的关联度最大，达到了 0.79，其次是煤层埋深和瓦斯压力分别为 0.78 和 0.76，排第 4-5 位的预测指标为瓦斯放散初速度为 0.75 与煤坚固性系数 0.68，最后为煤体结构类型是 0.45。剔除关联度小于 0.5 的因素，最后选择的预测指标为 5 个，分别为：瓦斯含量、埋深、瓦斯压力、瓦斯放散初速度、坚固性系数。

表 4-6 各影响因素的关联度的排序

Tab4-6 Sort correlation degree of each factor

影响因素	关联度	排序
瓦斯放散初速度 ( $\Delta p$ )	0.75	4
煤坚固性系数 ( $f$ )	0.68	5
瓦斯含量 ( $\text{m}^3/\text{t}$ )	0.79	1
瓦斯压力 ( $\text{M}/\text{Pa}$ )	0.76	3
煤体结构类型	0.45	6
埋深 ( $\text{m}$ )	0.78	2



## 第5章 神经网络在突出预测中的应用

### 5.1 神经网络概述

20 世纪 80 年代以来神经网络在人工智能领域掀起了研究热潮。它从信息处理角度对人脑神经元网络进行抽象, 建立某种简单模型, 按不同的连接方式组成不同的网络。学界对人工神经网络的定义目前还不统一, 综合各种解释可以将神经网络表述为: 人工神经网络就是一种旨在模仿人脑结构及其功能的信息处理系统。

#### 5.1.1 神经网络对人脑的智能模拟性

人工神经网络在以下 4 个方面模拟人脑的智能行为:

##### (1) 物理结构

大脑皮层是一个非常复杂的系统, 现代科学研究认为, 它包含有约一千亿个神经元, 所有这些神经元相互连接又构成了一个巨型的神经网络系统。与此相似的是, 人工神经网络也是通过大量的人工神经元联接构成系统, 在人工神经网络中人工神经元替代生物神经元的作用。人工神经元不仅具有单独进行局部处理的功能, 而且在一定的条件下还可以向其它的神经元传递自己的信息。

##### (2) 模拟计算

人脑的计算看似简单, 其实在计算过程中需要人脑众多神经元的高速运转和并行模拟处理。每个神经元通过处理从其它神经元处接收的信息产生一个结果, 再结果通过神经联接送出去。对每个神经元来说, 所有这些活动都是在同时进行的。

##### (3) 存储与操作

科学研究发现, 神经突触联接强度的变化影响着人类大脑对信息的处理和记忆。神经元之间传递的信号的能力是由其联接强度所决定的, 而神经突触恰恰决定着神经元的联接强度, 换句话说, 存储部分与操作部分是合二为一的。

##### (4) 训练

后天因素对人脑的影响往往大于先天因素, 每一个人的成长都是在后天训练过程中完成的, 由此可以看出, 人的后天训练的重要性。所以, 人工神经网络会结合自身的特性, 自动挑选使用不同的训练方法和学习过程, 在多次训练过程中积累相关的知识, 并储存在网络系统内, 这就是人工神经网络的训练过程。

### 5.1.2 神经网络模型的分类

神经网络有多种分类方式，目前已知的神经网络模型就有近 40 种。最常见的分类有两种：一种是按照网络连接方式分类，另一种是按照信息流向分类。

按照网络连接的拓扑结构分类，可将神经网络结构分为两大类：层次型结构和互联型结构。层次型结构按照神经元功能和顺序的不同将其分为输入层、中间层（隐层）和输出层，输入层神经元负责接收来自外界传入的信息，并将信息传给中间层神经元，中间层将信息处理转换后传递给输出层，输出层进一步处理后向外界输出信息；对于互连型网络结构而言，结构中任意两点都存在连接路径，根据两点间的连接程度可以将互连型网络细分为：全互连型、局部互连型和稀疏互联型三类。

按照信息流向分类也可以将神经网络分为两种类型：前馈型网络和反馈型网络。前馈型网络中前一层的输出是下一层的输入，信息的处理具有逐层传递进行的方向性，一般不存在反馈环路。因此这类网络很容易串联起来建立多层前馈网络；反馈型网络的结构中所有节点都具有信息处理功能，而且每个节点既可以从外界接受输入，同时又可以向外界输出。

## 5.2 BP 人工神经网络

### 5.2.1 BP 人工神经网络概念

1986 年 Rumelhart 和 McClelland 首次提出 BP 人工神经网络的概念，它是一种基于误差反向算法的多层前馈型的网络，是目前应用最为广泛的神经网络模型之一。BP 神经网络能够对大量的输入-输出模式映射关系进行存储和学习，通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值，使网络的误差平方和最小。BP 神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐含层和输出层。

### 5.2.2 系统激活函数的选择

在人工神经网络中，神经元是构成系统的基本单元，激活函数则是神经网络的核心部分，它决定着神经网络的功能，尤其非线性激活函数能够模拟非线性问题。

设  $n$  个输入分别用  $x_1, x_2, \dots, x_n$  表示，它们对应的联接权值依次为  $w_1, w_2, \dots, w_n$  所有的输入及对应的联接权值分别构成输入向量  $X$  和联接权向量  $W$ ：

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.1)$$

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (5.2)$$

用  $\theta$  表示该神经元所获得的输入信号的累积效果，我们称之为该神经元的网络输入：

$$\theta = \sum x_i w_i \quad (5.3)$$

写成向量形式则有：

$$\theta = XW \quad (5.4)$$

当输入信号的累积超过神经元的阈值时，神经元就处于激发状态，达不到阈值时就处于被抑制状态。此时输入和输出间的关系就要借助激活函数来决定。激活函数用  $o = f(\theta)$  表示。其中， $o$  是该神经元的输出。激活函数包括有线性函数、非线性斜面函数、阶越函数和  $s$  型函数等四种。本文采用  $s$  型函数作为激活函数，它的一般形式为：

$$f(\theta) = a + \frac{b}{1 + \exp(-d \times \theta)} \quad (5.5)$$

其中， $a$ 、 $b$ 、 $d$  为常数。

$S$  型函数之所以被广泛地应用，重要的一点在于函数对信号有一个较好的控制作用：可以根据  $|\theta|$  的变化随时给定函数的权值域，为防止网络进入饱和状态提供了良好的支持。

### 5.2.3 BP 网络算法

BP 网络算法由两部分组成：信息正向传播和误差反向传播。信息正向传播是从输入层输入的向量经过隐含层的逐步计算，最后再传向输出层，在输出层得到实际输出值，每层神经元的状态仅对下一层的神经元状态有影响。假若在输出层得到的结果与期望输出误差没有在设定的范围内，则将误差的信号通过网络反向传播，然后修改神经元的突触阈值，重新计算直至输出结果达到期望目标。

BP 网络有三层组成，分别为输入层、隐含层和输出层，各层网络中神经元与神经元之间是通过突触阈值相连接的，在网络的学习过程中，通过不断改变突触阈值的大小来达到运算要求，使其限制在一个比较小的变化范围内。

具体实现过程如下：

#### (1) 初始化

选定一个结构合理的网络，设置每个连接权值  $v_{ij}(n)$ 、 $w_{ij}(n)$ ，阈值  $y_1$ 、 $o_m$  为区间  $(-1, 1)$  内均匀分布的数值。

## (2) 计算隐含层和输出层的各节点输出

对于隐含层神经元  $j$ :

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^k w_{ji}(n)x_i(n) \quad (5.6)$$

$$y_j(n) = \theta(v_j(n)) \quad (5.7)$$

式中,  $\theta$  为隐含层的激活函数即  $S$  函数;  $k$  为迭代次数。

对于输出神经元  $i$ :

$$v_i(n) = \sum_{k=0}^l w_{ik}(n)x_k(n) \quad (5.8)$$

$$o_i(n) = f(v_i(n)) \quad (5.9)$$

## (3) 计算隐含层和输出层的节点误差

当网络输出与期望输出不等时, 就会存在误差向量的瞬间值  $\varepsilon(n)$ , 其定义为

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (d_j(n) - o_j(n)) \quad (5.10)$$

令神经元  $j$  在迭代  $n$  次的输出误差信号表达式如下:

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n)^2 \quad (5.11)$$

根据上述公式得到:

$$\frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w_{jk}(n)} = -e_j(n) f'(v_j(n)) y_k(n) \quad (5.12)$$

误差权值的调整原则是使误差逐渐变小, 因此应使误差的负梯度与权值的调整为正比, 即:

$$\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w_{jk}(n)} \quad (5.13)$$

式中,  $\eta$  是误差反向传播算法的学习速率参数。

$$\Delta w_{jk} = \eta \delta_j y_k(n) \quad (5.14)$$

此处的局域梯度  $\delta_j(n)$  定义为:

$$\delta_j = e_j(n) f'(v_j(n)) \quad (5.15)$$

上式为当前神经元  $j$  为输出层节点时的局域梯度。

当神经元  $j$  为隐含层节点时:

$$\delta_k(n) = \theta'(v_k(n)) \sum_j \delta_j w_{kj}(n) \quad (5.16)$$

$$\Delta v_{kj}(n) = \eta \delta_k(n) y_i(n) \quad (5.17)$$

(4) 调整隐含层和输出层节点权值和阈值

$$v_{kj}(n+1) = v_{kj}(n) + \Delta v_{kj}(n) \quad (5.18)$$

$$y_r(n+1) = y_i(n) + \eta \delta_k(n) \quad (5.19)$$

$$w_{jk}(n+1) = w_{jk}(n) + \Delta w_{jk} \quad (5.20)$$

$$o_j(n+1) = o_j + \eta \delta_j \quad (5.21)$$

检查是否所有的输入向量都完成了一次训练, 检查网络总误差是否达到精度要求。若否, 令  $n=n+1$ , 输入新样本进行训练, 直到网络误差达到预定的要求。

## 5.3 BP 神经网络预测煤与瓦斯突出

### 5.3.1 MATLAB 简介

MATLAB 是一种集数值计算、符号运算、图形处理、建模、仿真和原型开发等多种功能于一体的科学计算软件包。它功能强大, 操作简单, 可以用于数值的计算、可视化和应用程序开发, 并可以提供一种交互式的学习环境用于迭代式探查、设计及问题求解, 也用于线性代数、统计、筛选、优化、数值积分以及常微分方程求解等问题。

### 5.3.2 煤与瓦斯突出预测的 BP 神经网络结构设计

影响煤与瓦斯突出的因素很多, 到目前为止有的影响因素还没有找到。BP 人工神经网络模型是一种非线性预测模型, 在进行煤与瓦斯突出预测时可以综合多种影响因素, 对煤与瓦斯突出的预测更为全面和准确。

#### (1) 输入与输出层的设计

以前文第4章中, 通过灰色关联度分析法筛选出的5个预测指标(瓦斯含量、埋深、瓦斯压力、瓦斯放散初速度、坚固性系数)作为输入层神经元个数; 输出层由2个节点  $y_1$ 、 $y_2$  ( $y_1$ 、 $y_2$  的输出值为0和1)组成, 其作用是给出预测的3种结果, 以分别表示煤与瓦斯突出区域预测中的突出危险区、突出威胁区和无突出危险区3种情形。

输入算法:

```
for(int k=0;k<IN;k++)
```

```
OT_IN=(double)indata[loopl].input[k];
```

输出算法:

```
for(int k=0;k<ON;k++)
```

```
{inival=0.0;
```

```
for(int m=0;m<HN;m++)
```

```
inival+=(W_HN_OT[k][m]*OT_HD[m]);
```

```
inival+=CW_OT[k];
```

```
OT_OT[k]=sigmf(sig,inival);}
```

## (2) 隐层的设计

隐层可以是一层或多层。隐层单元数太多或太少都会对预测结果产生影响,单元数增多会延长学习时间,而单元数过少,又会使得系统的容错性变差。这里采用了有 2 个神经元的隐层。

隐层单元的算法如下:

```
for(int k=0;k<HN;k++)
```

```
{inival=0.0;
```

```
for(int m=0;m<IN;m++)
```

```
inival+=(W_IN_HD[k][m]*OT_IN[m]);
```

```
inival+=CW_HD[k];
```

```
OT_HD[k]=sigmf(sig,inival);}
```

## (3) 网络初始权值的选择。

初始权值的选择对非线性系统影响很大,直接决定着学习能否达到局部最小和系统的收敛关系。这里对网络的权值  $W_{ji}$  和  $V_{kj}$  以及偏置值  $\theta_j$  和  $\gamma_k$  的初始权值选择采用了较小的随机数,可以保证神经元一开始都在它们的转化函数变化最大的地方进行。

## (4) 网络样本训练

训练样本集的选择要有完全的代表性。利用训练样本集对网络进行训练,通过对网络模型的训练,使网络追踪到训练样本中的煤与瓦斯突出危险性与影响因素之间的规律,以便对煤与瓦斯突出做出准确预测。

选取国内 10 个典型突出矿井 5 个参数的实测数据为神经网络模型学习的样本集进行训练,神经网络学习训练通过 VLBP 算法迭代 3882 次后收敛,网络准确地识别了学习样本,预测结果与实际情况吻合,建立了影响因素与突出强度等级之间复杂的非线性映射关系。训练结果如表 5-1 所示。

表 5-1 网络样本训练结果

Table 5-1 Training results from sample network

样本号	瓦斯含量 ( $\text{m}^3/\text{t}$ )	埋深 (m)	瓦斯压力 (M/ Pa)	瓦斯放散初速度 ( $\Delta p$ )	煤坚固性系数 ( $f$ )	突出规模	学习结果			
1	1.81	620	2.75	19.0	0.31	大	0.0857	0.1116	0.0899	0.9240
2	0.45	445	0.95	6.0	0.24	小	0.0899	0.9082	0.1404	0.0885
3	0.34	552	3.95	14.0	0.24	小	0.0984	0.9873	0.1142	0.0968
4	0.50	462	1.20	18.0	0.16	小	0.0957	0.9227	0.1448	0.1089
5	0.24	395	1.17	5.0	0.61	无	0.9314	0.0881	0.1730	0.0976
6	0.87	745	1.25	8.0	0.36	大	0.0971	0.1862	0.8878	0.0965
7	0.45	425	2.80	8.0	0.59	小	0.0937	0.9401	0.1026	0.0984
8	0.30	460	2.00	7.0	0.48	无	0.9070	0.1095	0.0973	0.0887
9	1.76	543	3.95	14.0	0.22	大	0.1035	0.1078	0.0995	0.9224
10	1.25	442	2.90	4.0	0.51	大	0.0938	0.0988	0.0966	0.9358

### 5.3.3 预测结果

利用上述完成的 BP 神经网络的设计, 通过 MATLAB 软件对第 4 章筛选出来的预测指标进行煤与瓦斯突出预测, 得到结果如表 5-2 所示。

本次预测共选取了陶二矿 1#煤层和 2#煤层共计 10 个预测区域, 其中 1#煤层 4 个, 2#煤层 6 个, 运用 BP 神经网络的方法对选取的指标进行预测, 预测结果分为三类: 无突出危险区、突出威胁区、突出危险区。预测表明: 该方法可以将各个预测区域的瓦斯突出危险程度进行分类输出。从表 5-2 看出, 陶二矿 1#和 2#煤层均有突出危险性, 其中 1#煤层选取的预测区中 22202 上车巷和 11417 上巷为无突出威胁区, 而 2213 上巷和 1111 的预测结果为突出威胁区; 2#煤层中选取的 6 个预测区中, 三种预测结果均有发生, 22202 下巷和 2671 的结果输出为 (0, 0) 可划分为无突出威胁区, 2212 下巷 3.11 号预测区预测结果为突出威胁区, 而 2211 下巷距机头 305 米处、2212 车场距南采辅巷 65 米处和扩大区井底北大巷绕道 3 个预测区输出结果为 (1, 1) 为突出危险区。总体来看, 2#煤层瓦斯突出危险性要高于 1#煤层, 从煤矿实际生产过程中对煤层瓦斯动力现象的记录和统计来看, 2#煤层发生瓦斯动力现象的次数和强度也均强于 1#煤层。

表 5-2 原始数据和神经网络预测结果

Table 5-2 Raw data and forecasted results from neural network

预测 煤层	编 号	预测区域	原始数据					结果输出		
			瓦斯含 量( $\text{m}^3/\text{t}$ )	埋深 (m)	瓦斯压 力 (M/ Pa)	瓦斯放 散初速 度( $\Delta p$ )	煤坚固 性系数 ( $f$ )	$y_1$	$y_2$	网络预测 结果
1#	1	2213 上巷	0.88	528	0.961	28.5	1.59	1	0	突出威胁 区
	2	22202 上车 巷	0.56	636	0.73	26.5	0.34	0	0	无突出危 险区
	3	11417 上巷	1.80	505	0.65	33	1.64	0	0	无突出危 险区
	4	1111	1.91	998	1.21	23.34	1.67	1	0	突出威胁 区
2#	5	22202 下巷	0.54	740	0.71	32	1.43	0	0	无突出危 险区
	6	2211 下巷 距机头 305 米	10.28	573	1.18	25	1.83	1	1	突出危险 区
	7	2212 车场 距南采辅 巷 65 米	11.94	621	1.24	26	1.62	1	1	突出危险 区
	8	2212 下巷 3.11 号 矿大区井	5.18	631	0.83	26	1.49	1	0	突出威胁 区
	9	底北大巷 绕道	13.10	821	1.41	19.07	2.22	1	1	突出危险 区
	10	2614	2.65	718	0.67	0.7	0.72	0	0	无突出危 险区

陶二矿现在所采用的瓦斯突出预测方法为单项指标法，预测的单项指标为瓦斯压力值（M/Pa）和瓦斯含量值（ml/g）。截止到目前，1#煤层没有发生过煤与瓦斯突出事故，2#煤层 2211 上巷综掘工作面突出点附近瓦斯含量值为 7.81ml/g（2211 上巷距开口 25m）从安全角度考虑，针对这样的煤层开采条件，为确保安全生产，在确定预测指标（瓦斯压力和瓦斯含量）的临界值时，选用了低于《防治煤与瓦斯突出规定》制定的临界值（瓦斯压力 $\geq 0.74\text{MPa}$ ，瓦斯含量 $\geq 8.0\text{m}^3/\text{t}$ ），即瓦斯压力临界值取最小值 0.70MPa，瓦斯含量临界值定为 7.5ml/g。虽然单项指标法已经应用多年，在《防突规定》中也是被认可的预测瓦斯突出的方法之一，但是由于指标本身存在缺陷，有时也会在判断过程中产生偏差和误判。数据测量时，人为的影响会造成测量数据出现误差，此外，对于变质煤来说，单项指标法



很容易对低瓦斯高压煤和高瓦斯低压煤产生误判。陶二矿地质构造复杂，煤层均为高变质无烟煤，而煤与瓦斯突出是多因素综合作用的结果，因此采用单项指标（瓦斯压力和瓦斯含量）进行煤与瓦斯突出预测时，预测结果容易受单一因素影响，不能完全反映矿井瓦斯突出实际情况，预测精度较低。基于 BP 神经网络的煤与瓦斯突出危险性的预测是一个多因素的综合指标方法，不受某单一因素偏差的影响，计算简单、预测结果更直观，预测精度高，是一种实用的方法，可以用于陶二矿煤与瓦斯突出危险性评价中。

## 结 论

煤与瓦斯突出是在多因素综合作用下发生的一种煤矿灾害现象，国内外诸多研究学者从瓦斯突出机理入手提出了数种预测手段，本文建立了基于 BP 人工神经网络的煤与瓦斯突出的预测方法，针对陶二矿煤与瓦斯突出进行了预测研究。取得了以下成果和结论：

(1) 通过对陶二矿瓦斯地质规律的研究，依据煤与瓦斯突出危险性预测指标的建立原则，利用灰色关联法的有关理论和知识，确定了影响陶二矿煤与瓦斯突出危险性评价的主要指标。对影响煤与瓦斯突出危险性指标进行关联度计算，并对各因素进行关联度排序，结果是：瓦斯含量>埋深>瓦斯压力>瓦斯放散初速度>坚固性系数>煤体结构类型，其中瓦斯含量的关联度最大，达到了 0.79，其次是煤层埋深和瓦斯压力分别为 0.78 和 0.76，排第 4-5 位的预测指标为瓦斯放散初速度为 0.75 与煤坚固性系数 0.68，最后为煤体结构类型是 0.45。剔除关联度小于 0.5 的因素，最后选择的预测指标为 5 个，分别为：瓦斯含量、埋深、瓦斯压力、瓦斯放散初速度和坚固性系数。

(2) 运用 BP 人工神经网络的方法对选取的指标进行矿区瓦斯突出预测，共选取了陶二矿 1#煤层和 2#煤层共计 10 个预测区域，预测结果分为三类：无突出危险区、突出威胁区、突出危险区。结果表明：该方法可以准确将各个预测区域的瓦斯突出危险程度进行分类输出，从输出结果来看，陶二矿 1#和 2#煤层均有突出危险性，2#煤层瓦斯突出危险性要高于 1#煤层，在煤矿生产过程中对煤层瓦斯动力现象的记录和统计来看，2#煤层发生瓦斯动力现象的次数和强度也均强于 1#煤层，预测结果与实际生产中的情况基本吻合。

(3) 陶二矿地质结构复杂，而煤与瓦斯突出是多因素综合作用的结果，各个因素之间的关系往往是动态变化和非线性的。采用传统的预测方法进行煤与瓦斯突出预测时，预测结果容易受到单一因素影响，不能完全反映矿井瓦斯突出情况，预测精度较低，难以揭示矿井瓦斯突出的发生规律。BP 人工神经网络具有高度的非线性映射特征和强大的函数拟合特性，以及强大的自学习、自组织、自适应和并行处理的能力，可以弥补传统预测方法的不足，从而更准确更可靠的实现煤与瓦斯突出危险性预测。基于 BP 神经网络的煤与瓦斯突出危险性的预测是一个多因素的综合指标方法，不受某单一因素偏差的影响，计算简单、预测结果更直观，预测精度高，是一种实用的方法，可以用于陶二矿煤与瓦斯突出危险性评价中。

## 致 谢

三年的研究生生活学习即将结束，在论文完成之际，对所有帮助过我的老师、家人、同学和朋友表示最衷心的感谢和最真诚的祝福！

论文是在尊敬的张景森老师和颜志丰老师悉心指导下完成的。三年来，老师在日常的学习、工作上都给予无微不至的关怀和谆谆教导，从课程的安排到论文选题、课程进展等方面都精心安排和指导，学生的每一点进步都凝聚了老师大量的心血与辛勤的汗水，再次向老师致以深深的谢意和崇高的敬意！

感谢我最亲爱的家人，他们给予了我无尽的关爱和支持，我的每一点进步都包含着他们无私的奉献，在此对他们表示衷心的感谢和祝福！

感谢贾银虎、翟艳超、高明尚及地质专业全体同学对我学习上的热情帮助。感谢 2012 级资源学院全体研究生在生活和学习中给予我的关心和帮助，能在这样一个和睦融洽、扎实肯干的集体里学习和工作，是我莫大的荣幸。

感谢各位专家、教授、评委，在百忙之中审阅我的论文并参加答辩会。最后，感谢关心我、支持我、鼓励我的人，你们的帮助，使我有今天的进步，你们的鼓励，使我对美好的明天充满憧憬。

## 参考文献

- [1] 程五一, 张序明, 吴福昌. 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. 12~15
- [2] 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): 1~7
- [3] 聂百胜, 何学秋, 王恩元等. 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 (06): 40~43
- [4] 曲方, 张龙, 李迎业等. 基于 BP 神经网络的煤与瓦斯突出预测系统开发[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22 (01): 11~16
- [5] 赵延明. 基于改进 BP 神经网络的瓦斯含量预测模型[J]. 工矿自动化, 2009 , 04: 10~13
- [6] 董长虹. 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 26~28
- [7] Luo Z. On the Convergence of the LMS Algorithm with Adaptive Learning Rate for linear Feedforward Networks[J]. Neural Computation, 1991, 3: 226~245
- [8] Wang Q, Wu J T. Research on applied model and its management in GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 26(3): 280~283
- [9] 苏高利, 邓芳萍. 论基于 MATLAB 语言的 BP 神经网络的改进算法[J]. 科技通报, 2003, 19 (2): 130~135
- [10] 吴财芳, 曾勇, 秦勇等. 神经网络分析方法在瓦斯预测中的应用[J]. 地球科学进展, 2004, 19 (5): 860~866
- [11] 任浩源. BP 神经网络在煤与瓦斯突出危险性预测中的应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2007
- [12] 美国能源署下调全美煤炭消费预期. [EB/OL]. <http://news. Gath. com/ news/20140721/ 非金属 115350616. Html>. 2014~07~21
- [13] 陈勇. 世界煤炭大国煤矿安全生产调查[J]. 劳动保护, 2005, (6): 98~99
- [14] 董维武. 印度煤矿的安全监管[J]. 现代职业安全, 2004, (4): 60~62
- [15] 煤炭科学研究总院重庆分院全国煤与瓦斯突出突出档案室. 全国国有重点煤矿煤与瓦斯突出情况调查报告[R]. 重庆, 1997, 10
- [16] 李希建, 徐明智. 近年我国煤与瓦斯突出事故统计分析及其防治措施[J]. 矿山机械, 2010, 38, (10): 13~16
- [17] 国家煤矿安全监测局. 2011 年全国煤矿事故分析报告[R]. 2012
- [18] Creedy D P, Gamer K, Edward J S, et al. Methane control technology for improved gas use in coal mines in China [M]. COAL R257, Wardell Armstrong, 2004
- [19] 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理[M]. 北京: 科学出版社 2013. 3~4

- [20] Taylor T J. .Proofs of subsistence of firedamp at coal mines in a state of high tension institute [M]. The North of England Institute of Mining and Mechanical Engineers, 1852, 1. 275-299
- [21] Halbaum H W. discussion of J. Gerrard' s paper Instantaneous Outbursts of Fire-damp and Coal, Broad Oak Colliery[C]. Institute of Mining and Mechanical Engineers, 1899, 10522. 258~265
- [22] 李希建. 煤与瓦斯突出机理研究现状及分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(1): 7~13
- [23] Loiret J, Laligant G. General report: Review of Instantaneous Outbursts of gas in certain coal mines of Europe and Western Canada[R]. the American Institute of Mining and Metall Engineers, 1931, 94: 102~136
- [24] 戴洪磊. 矿山瓦斯灾害神经网络理论与方法[M]. 北京: 地震出版社, 2011. 5~19
- [25] 霍多特 B B. (宋士钊, 王佑安译.) 煤与瓦斯突出[M]. 北京: 中国工业出版社, 1966
- [26] Skochinski A A. Modern concepts on the nature of sudden outbursts of gas and coal and control techniques[J]. Ugol, 1957, (7): 4~10
- [27] 何继善, 吕少林. 瓦斯突出地球物理研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999. 48~49
- [28] 赵涛. 基于多因素概率预测的瓦斯突出预警方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007
- [29] 宋卫华. 煤与瓦斯突出区域预测研究[D]. 沈阳: 辽宁工程技术大学, 2004
- [30] 章孟涛, 徐增和, 潘一山等. 冲击地压和突出的统一失稳理论[J]. 煤炭学报, 1991, 16(4): 48~52
- [31] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998. 17~23
- [32] 中华人民共和国煤炭工业部. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995
- [33] 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. 39~42
- [34] 煤炭科学研究总院抚顺分院等. 关于煤层和区域突出危险性预测方法的建议[A]. 煤与瓦斯突出机理和预测预报第三次科研工作及学术交流会议论文选集[C]. 重庆: 煤炭科学研究总院重庆分院, 1983
- [35] 王佑安, 杨其奎. 煤和瓦斯突出危险性预测[J]. 煤矿安全, 1988, 04: 35~35
- [36] 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(05): 17~19
- [37] 魏风清, 张建国. 俄罗斯地震声学预测方法的研究现状及发展前景[J]. 煤矿安全, 1999, 11: 44~46
- [38] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995. 54~59
- [39] 彭立世. 用地质观点进行瓦斯突出预测[J]. 煤矿安全, 1985, 2: 6~10
- [40] 煤与瓦斯突出预测资料汇编[C]. 重庆: 煤炭科学研究总院重庆分院编, 1987
- [41] 秦汝祥. 煤与瓦斯突出预报研究现状综述[J]. 矿业技术, 2005, 01: 7~9
- [42] 王显政. 煤矿安全新技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002. 18~21

- [43] Sun Y J, Qian J S. Forecast the Dangerous Level of Gas Outburst Based on GASA Neural Networks in Coal Mine[C]. 3rd International Conference on Natural Computation (ICNC2007), vol2; August 24-27, 2007; Haikou, Hainan, China
- [44] 景国勋, 张强. 煤与瓦斯突出过程中瓦斯作用的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 169~172
- [45] 张子敏, 张玉贵. 瓦斯地质规律与瓦斯预测[M]. 北京, 煤炭工业出版社, 2007. 46~47
- [46] 肖新平. 灰技术基础及其应用[M]. 北京, 科学出版社, 2005. 47~49



立德立志

善学善行