# 煤油气共生矿井油型气涌出危险性定量评价技术

摘要：为评估油型气涌出危险性使防治措施更加具有前瞻性、有效性，本文提出一种对油型气涌出危险性的定量评价方法。将油型气涌出危险因素分为岩层电性、稳定性、渗透性及本身的地质构造，其中以岩层电性为主采用基于变权理论的层次分析法计算出各因素对于总评价指标的权重并得到最终的定量评价指标。通过上述理论对黄陵矿区的314及北2巷道进行油型气涌出的危险性评价确定巷道的整体危险性，并于现场底板钻孔的实际抽采量进行验证，其结果表明该定量评价技术得到的评价指标与实际抽采量相吻合。所以通过对油型气涌出危险性进行定量评价能够准确反映油型气的赋存规律，为油型气防治提供科学依据。

关 键 词：油型气；变权理论；电法探测；危险性评价

**Quantitative evaluation technology of oil-type gas emission risk in mine with coal-oil-gas coexistence**

**Abstract:** In order to evaluate the risk of oil-type gas gushing and make the prevention and control measures more forward-looking and effective, this paper proposes a quantitative evaluation method for the risk of oil-type gas gushing. The risk factors for oil-type gas gushing are divided into rock formation electrical properties, stability, permeability and its own geological structure. Among them, the rock formation electrical properties are the main ones, and through the AHP based on variable weight theory, the weight of each factor on the overall evaluation index and the final evaluation index can be calculated. Based on the above theory, the risk assessment of oil-type gas gushing in the 314 and B2 roadways of the Huangling mining area is carried out to determine the risk of the roadway, and finally verified by the actual extraction volume of the floor drilling on the site. The results show that the quantitative evaluation technology The obtained evaluation index is consistent with the actual extraction volume. Therefore, the quantitative evaluation of the risk of oil-type gas gushing can accurately reflect the occurrence law of oil-type gas and provide a basis for the prevention of oil-type gas.

**Keywords:** oil gas; Variable weight theory; Electrical detection; Risk assessment

油型气是天然气中分散的腐泥型有机质和以腐泥型为主的混合型有机质，在一系列高温作用下由液态烃和有机质裂解所形成,重烃含量高，油性大，其主要成分为CH4、C2H6、C3H8、C4H10、C5H12、N2。油型气作为煤油气共生矿井安全生产过程中的重要致灾因素，油型气的涌出通常具有突发性、隐蔽性、涌出位置集中及涌出量大等特点[1-2]。

近年来许多学者对油型气的研究逐步深入，如在煤型气和油型气分辨方面韩中喜[3]除常见碳同位素法、轻烃法和生物标志化合物法之外在实际工作中利用天然气的汞含量作为判识指标进行辅助有一定的适用性；在工作面顺槽掘进中发生底板油型气涌出时通过打钻探测情况，殷明胜等[4]提出采掘超前预抽、回采钻孔抽放油型气的治理方案并取得了很好的效果，这也表明了油型气治理的初步探索取得一定成果。对油型气的治理不仅仅是提出临时应对对策而更应该从更深层次的规律进行研究，孙四清等[5]通过建立巷道开挖后数值模拟物理模型分析底板围岩应力、应变变化特征得出了底板油型气涌出机理，为抽采钻孔的合理布置提供了有效的分析依据，防止掘进工作面底板油型气异常涌出。张俭让等[6-7]则通过应用计算流体力学模拟不同油型气形状涌出时CH4浓度的分布规律，并在此基础上提出了对油型气涌出矿井局部通风的优化方案。王军辉等[8]在殷明胜油型气治理方案的基础上对油型气涌出治理进行了加强，提出了掘进工作面采取“先探后掘、边抽边掘”措施, 回采工作面采用“采前预抽、边采边抽及采后抽采”等立体化多方位抽采的综合治理技术。为使油型气治理工作由“治得住”向“治得准、治得快、治得省”转变，闫赞等[9]不仅是在煤矿上应用油型气治理的新技术与管理新模式，更为重要的是提出了瓦斯抽采的达标评判以及对工作面回采过程瓦斯治理工作及效果的总结评价。司俊鸿等[10]对矿井油型气监测进行进一步探索，提出了基于CH4浓度和采空区煤自燃联合防控的瓦斯-油型气混合气体爆炸预警技术，通过气象色谱分析仪对采空区的气体进行分析并判断是否达到预警浓度阈值。在煤炭安全精准智能开采协同创新的模式是未来的必然发展趋势下[11]，对于油型气涌出预警的研究仍然面临诸多问题和挑战。大多数专家学者聚焦于油型气涌出规律及原因的分析和对油型气涌出后的综合治理，缺少油型气涌出危险性的定量评估，无法实现油型气涌出灾害的精准治理。

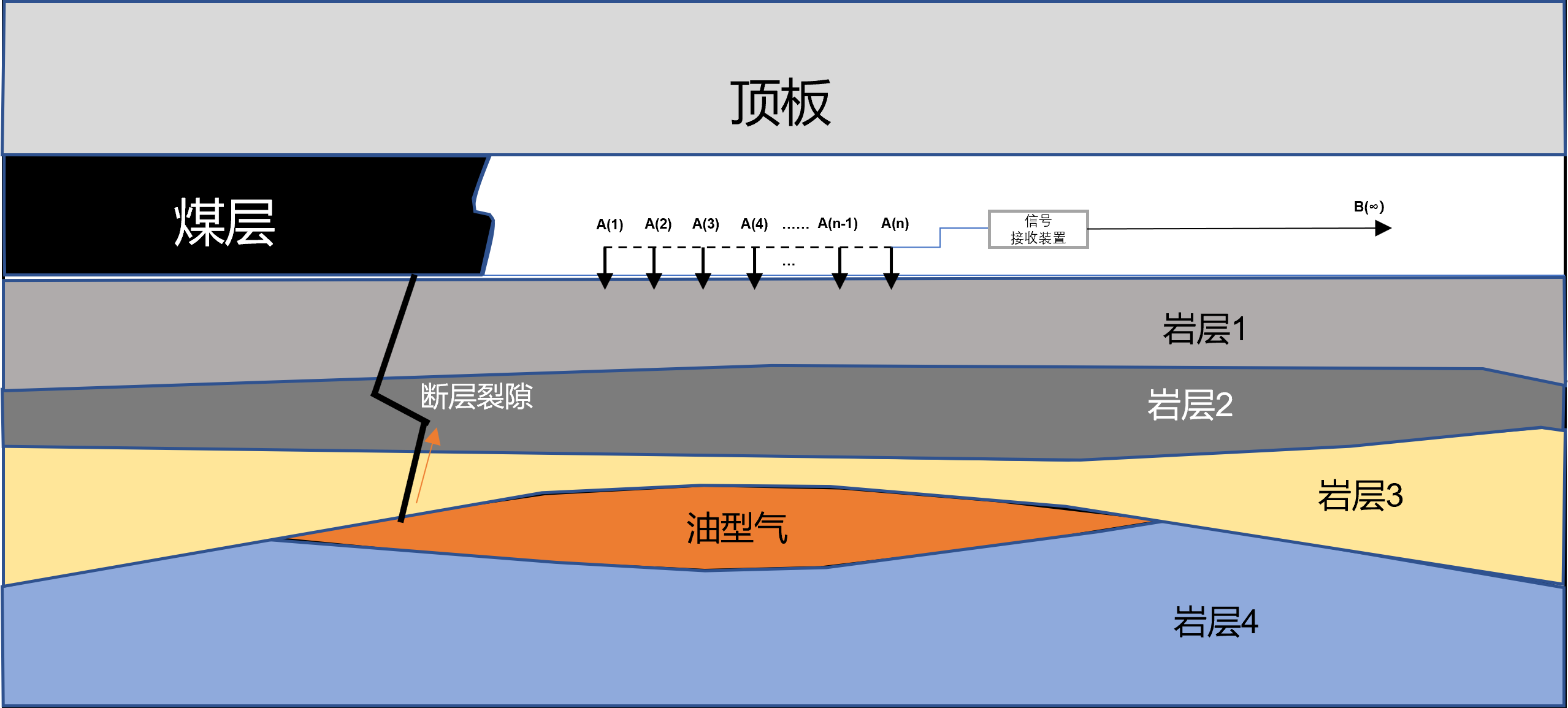
因此本文通过对油型气治理相关资料的查询以及对油型气涌出机理进行分析，采用基于变权理论的层次分析法分析主要因素赋予权重并对油型气涌出指标进行定量计算，评估油型气涌出的危险性。

1 油型气涌出危险性影响因素分析

煤层采动过程中，地应力、采动应力以及油型气压力等力的作用下底板岩层发生变形破坏，而当煤层采动破坏深度达到油型气储层时，形成断层、裂隙等构造为油型气涌出提供运移通道，在压力梯度的作用下最终导致油型气涌出，如图1所示。故本文拟从岩层稳定性、渗透性、地址构造、电性等方面对油型气涌出危险性进行分析。

图1 油型气涌出示意图

Fig.1 schematic diagram of oil-type gas emission



1.1 岩层稳定性与油型气涌出危险性关系分析

油型气涌出是一种复杂的地质现象，受采动效应影响尤为明显，是煤层底板下伏岩层中油型气通过破碎岩体中大量的裂缝、裂隙进入开采工作面，造成油型气涌出量异常的现象。煤层未开采之前，煤层与周围岩体处于原始应力平衡的状态，开采过程中，原有的平衡被打破，由于矿山压力的作用，底板岩体受到破坏，岩体的破坏程度与岩层稳定性息息相关[12]。根据煤矿的底板破坏研究观测结果[13-14]，煤层底板破坏效应主要取决于底板岩体的抗剪切破坏能力和采动应力效应，而这两方面因素受制约于岩层的容重、弹性模量、泊松比、摩擦角、内聚力等力学参数密不可分。故通过统计底板岩层的力学参数计算底板破坏深度来表征岩层稳定性计算油型气的涌出危险性有其必要性。

1.2 岩层渗透性与油型气涌出危险性关系分析

天然岩体大多数为不均匀的各向异性不连续体，所以其内部分布有许多裂隙，当气体在岩体中运移时会产生相互作用对岩体内裂隙的分布产生一系列影响。例如油型气在裂隙岩体中运动时，导致岩体内裂隙扩张使岩体强度降低，反过来再影响气体渗透率变化，在应力场、渗流场耦合作用的情况下进而对岩体产生变形破坏，使得油型气异常涌出[14-15]。所以岩层的渗透性决定了流体通过岩石的能力，是油型气涌出危险性评价的一个重要因素。

1.3 地质构造与油型气涌出危险性关系分析

岩层的不同类型地质构造在同条件下可以形成油型气聚集，密闭性地质便于气体聚集，而开放性有利于气体的排出[16]，所以在油型气涌出危险性分析中是不可或缺的因素之一。原生构造裂隙的存在处更加容易产生新生裂隙，而裂隙间的流体压力位原生裂隙的扩张剂新生裂隙的产生提供了外部应力作用。且距离回采面越近，岩体本身完整程度越差，裂隙也就越发育。随着回采面逐渐靠近，扰动应力逐渐累积，岩体破碎程度越大，裂隙逐渐增加，最终导致油型气涌出。

2 岩层电性与油型气涌出危险性探测方法

2.1 电法探测技术

岩层电性是地下勘探体积范围内电性不均匀体和地形起伏的一种综合反映[12]，以岩层导电性差异为基础确定岩体物性和地质构造的特征，由此可以反映出地下不均匀体的位置和不均匀体电阻率的相对高低。电法勘探可以对工作面的内部构造进行解释，可探测顶底板一定距离内的地质信息如裂隙、断层等构造出现的地方会呈现出高阻；相反含水体部分则呈现低阻。所以将岩层电性作为一种表征能从一定方面评估油型气的涌出危险性。而直流电法探测作为一种应用广泛、施工简便、准确有效的探测手段，具有范围大、成本低等优点。故本章通过直流电法实地进行探测并判断其地质异常情况。

图2为413巷道测定布置图。在413瓦斯专用辅运巷共布置3个测点，两次在距离反掘辅运巷迎头200 m、250 m处，一次在辅运巷迎头位置。图3至图4为413辅运巷底板电阻率探测图。根据前两次的直流电法探测结果，可以看出在距离迎头位置200 m和250 m处底板较近位置阻值较高，为采动卸压影响。距离底板大约3~9 m为低阻层，岩层分布相对较平稳，推测为泥岩层。12 m以下岩层阻值相对较高，岩层起伏较小。图4为413辅运巷迎头位置直流电法探测图。可以看出在联络巷位置受采动影响，电阻率较高。底部电阻率值分布基本一致，阻值较低，结合该处附近钻孔信息与其他地质资料推断该区域为泥岩层。



图2 413巷道测定布置图

Fig.2 Layout of device in 413 roadway

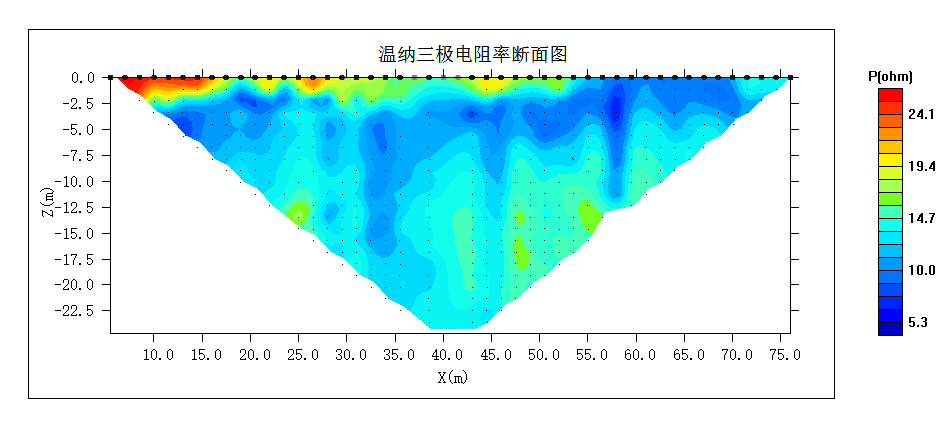


图3 413辅运巷反掘底板200 m电阻率探测图

Fig.3 Resistivity detection map of 200 m floor in 413 roadway

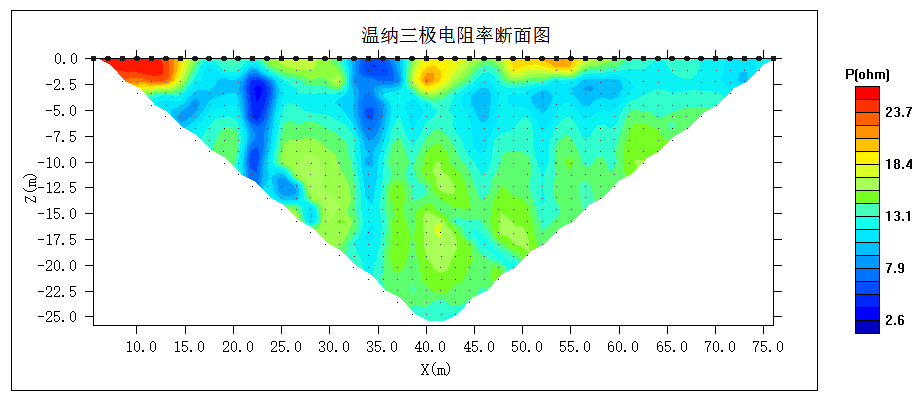


图4 413辅运巷反掘底板250m电阻率探测图

Fig.4 Resistivity detection map of 250 m floor in 413 roadway

图5为北二巷道测定布置图。在北二辅运巷共设置5个测点，从得出的探测结果可以看出北二巷道在不同测点位置测量结果有显著差别。图6至7可以看出电阻率整体分布不均匀，受采动影响，距离底板较近位置的电阻率值偏高，底板深部位置电阻率值较低。结合该矿井地质资料可知，该底板深部附近为泥岩和砂岩层。图6至图7分别为北二辅运巷连巷底板490 m和520 m电阻率探测图，可以看出整体电阻率分布很不均匀，其中对于图6可以看出受地质结构影响，从底板下方大约3m~13 m处呈现低电阻区，岩层之间电阻率值波动变化较大。图7为北二辅运巷底板520 m电阻率探测图。同样也呈现出整体电阻率分布不均匀，受地质结构影响底板深部电阻率值也较低。由电阻率的差异区可以看出存在部分孤立的低阻区，形状类似透镜体，因此推测此孤立区为砂岩上倾尖灭端或砂岩透镜体。



图5 北二巷道测定布置图

Fig.5 Layout of device in B2 roadway

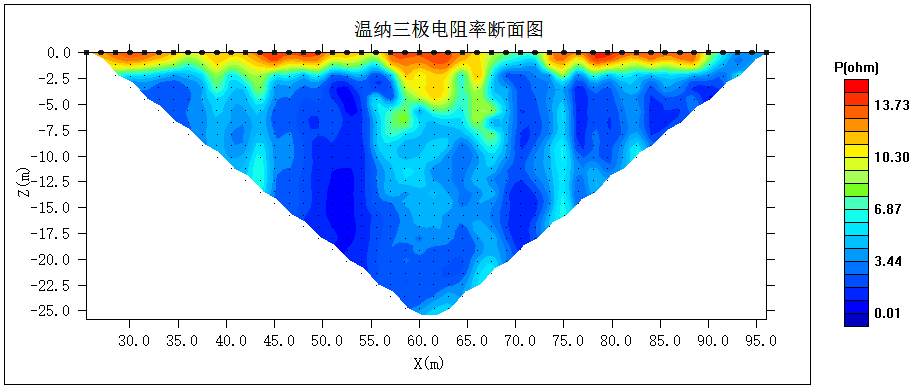


图6  北二辅运巷14连巷底板200 m电阻率探测图

Fig.6 Resistivity detection map of 200 m floor in B2 roadway

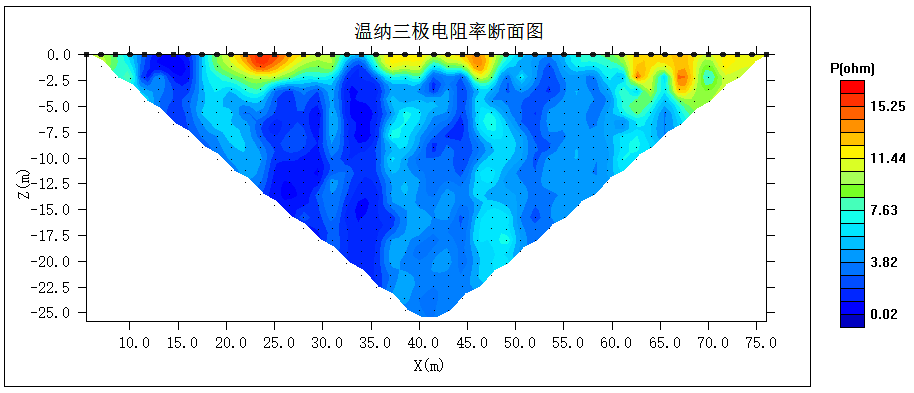


图7 北二辅运巷400 m底板电阻率探测图

Fig.7 Resistivity detection map of 400 m floor in B2 roadway

3 油型气涌出危险性评价总指标计算方法

3.1 影响因素变权重计算

静态的常权评价方法往往受个人的主观判断干扰，对单个因素的偏好过于明显而忽略了多种因素的共同作用，使用常权评价方法所确定的指标权重往往过于片面，不变的权重在评价中也无法起到好的效果[17]。所以在本次研究中采用变权综合权重对主观静态赋权的评价方法进行改进，变权综合模型最早是在系统研究因素空间理论中所提出的概念，其基本思想是在考虑因素本身及各个因素之间的关系所计算得出权重。变权的目的就是根据因素状态之间的均衡水平调整各因素在综合决策中的作用。所以在对油型气涌出危险性评价的基本思路为：首先通过主观赋权方法获得指标的初始权重值，再构造均衡函数，通过常权向量到变权向量的转化最终得到较为科学的各因素权重值。

首先主观赋权法采用层次分析法将油型气涌出的主要影响因素构建成油型气涌出危险性评价体系如图8所示，将综合评价指标划分为A层目标层、B层指标层两个层次。



图8 油型气涌出危险性评价体系

Fig.8 Risk assessment system of oil-type gas emission

得到每两个指标相比对油型气涌出的重要程度，取值范围从1/9~9之间；1 表示两个元素相比，具有相同的重要性；3 表示两个元素相比，前者比后者稍重要；5 表示两个元素相比，前者比后者明显重要；7 表示两个元素相比，前者比后者强烈重要；9 表示两个元素相比，前者比后者极端重要；其他数值表示介于相邻重要等级之间的重要程度。

表1 油型气涌出各因素权重矩阵

Table 1 Weight matrix of various factors for oil-type gas gushing

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 影响因素 | 电性m | 稳定性g | 渗透性c | 地质构造s |
| 电性m | 1 | Pmg | Pmc | Pms |
| 稳定性g | Pgm | 1 | Pgc | Pgs |
| 渗透性c | Pcm | Pcg | 1 | Pcs |
| 地质构造s | Psm | Psg | Psc | 1 |

得到各因素判断矩阵后对其进行一致性检验，一致性检验的目的是防止出现各个因素之间出现不协调的情况，计算一致性指标C.I.计算各因素判断矩阵的最大特征值*λmax*，然后计算一致性指标C.I.

(1)

其中n为矩阵阶数

然后计算一致性比率C.R.。当一致性比率值小于0.1时则认为因素矩阵通过一致性检验，否则需要重新调整判断矩阵直至满足于条件。

(2)

在判断矩阵一致性检验通过后采用Saty开方法[18]，将各因素权重矩阵的每行单元进行连乘，再将乘积开n次方得到单因素权重wi，最后对其进行归一化处理后所求的的特征向量即为初始常权向量记为*Aj*, 具体计算步骤如下：

(3)

(4)

在确定常权向量后，引入变权综合评价方法，合理研究所选择指标的不均衡性，参考经验选取的均衡函数：

(5)

其中*bj*为调整水平阈值，当因素状态过差时进行调整。

随后，将所求出的常权向量*Aj*与均衡函数进行Hadamard乘积变权，在进行归一化后求得变权向量*W*如下式所示：

(6)

3.2 总评价指标计算

总评价指标Q的计算通过岩层电性参数、稳定性参数、渗透性参数、地质构造等参数值得出。

其中岩层电性参数m通过求地层电阻率的不均匀度所得，假设底板地层分为*j*层，探测得地层为[*Y1, Y2, Y3…Yj*]，每一层*Y*由若干单位的电阻率单元*X*组成，*Y*为[*X1, X2,X3…Xk*]，将每一层的电阻率进行归一化处理后对地层电阻率进行总不均匀度Ue计算，具体计算过程如下：

(7)

(8)

其中*imax*为单个不均匀度计算次数；z为集中系数，经测试z取4-6为最佳值。

稳定性参数值g通过计算底板的最大破坏深度值，根据电法探测获取可能存在的油型气区域即电阻率异常位置来对比修正，得出地层的稳定性参数值。

渗透性参数值c通过底板地质参数值获取后根据低渗、中渗、高渗进行划分取值。

地质构造参数值根据实际情况取0或1表示地质构造存在或不存在。

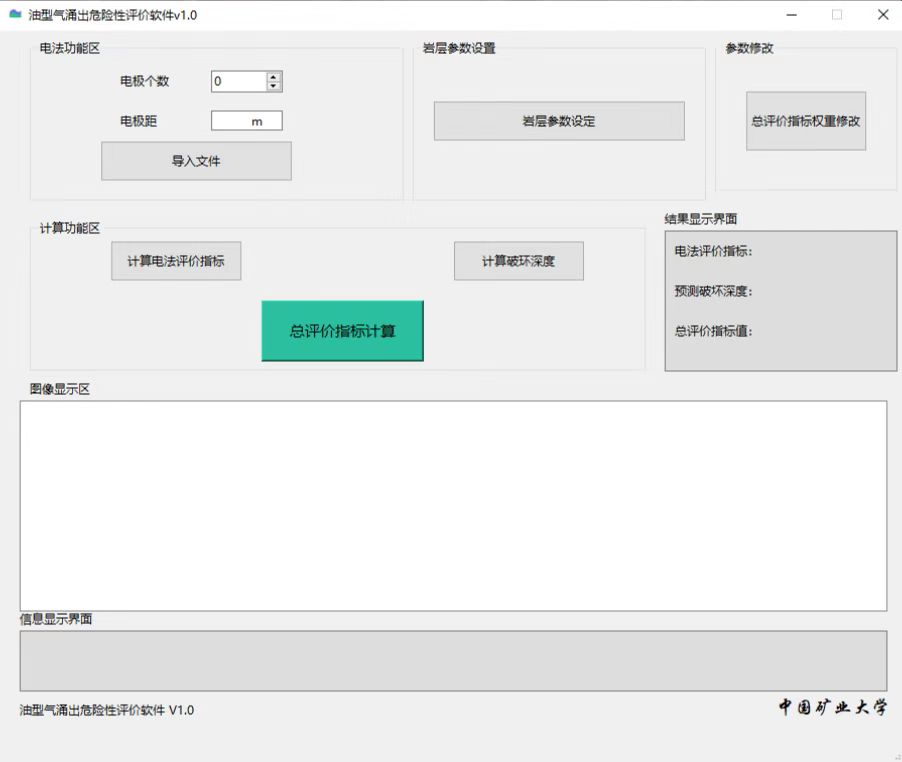
最后四个影响参数值可表示为*η*，*η*为[电性参数值、稳定性参数值、渗透性参数值、地质构造参数值]，则总评价指标Q就由变权重计算所得各影响因素的权重分别乘以其参数值后相加所得：

(9)

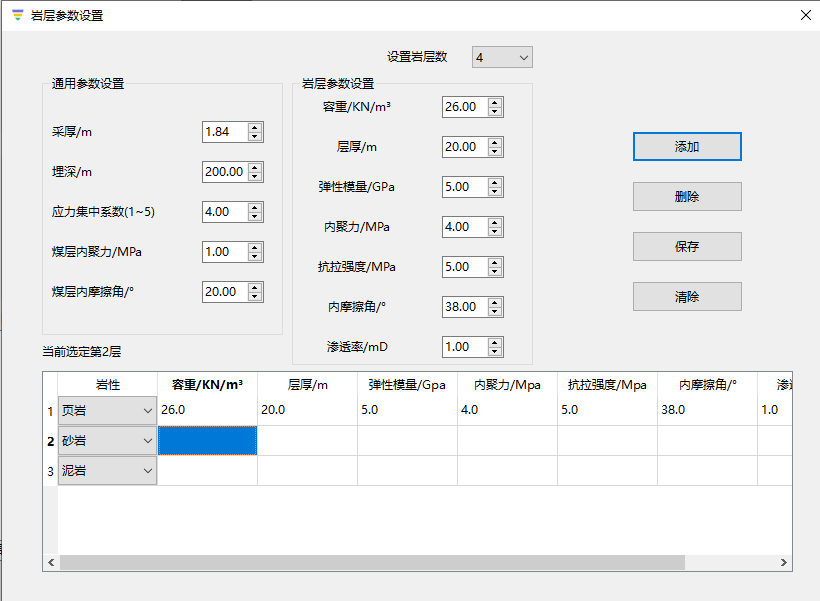
3.3 危险性评价软件

为方便数据采集工作后的数据处理，基于以上计算理论编写了软件，包含油型气涌出危险性的各项危险因素计算和总评价指标的显示，并将电法探测结果可视化。软件界面的编写使用的是PySide6图形化界面库，是一个基于Qt的Python计算机语言库，Qt在多种计算机语言中推出了对应使用方法，所以能够做到多平台互通，其扩展性强大，除此之外控件以及使用文档丰富，使用用户基数大，故采用Pyside6作为本次油型气涌出危险性评价软件编写的主要工具。

主界面主要由电法功能区、岩层参数设置、参数权重修改、计算功能区以及结果显示区组成，其中电法功能区主要是用于输入电法探测所获得的地层电阻数据，根据测量过程使用的电极个数、电极距等参数作为前导条件，最后利用计算功能区中的电法评价指标计算按钮对地层电阻率的不均匀度进行计算得出其电法评价指标；岩层参数设定界面如图所示，设定岩层内的相关参数后，可通过计算功能区破坏深度计算得到计算破坏深度值表征岩层稳定性因素以及岩层的渗透性；参数权重修改用于手动修改各因素权重和确定岩层地质构造是否存在；计算功能区涵盖了基于电法探测数据的指标计算、基于岩层参数的破坏深度计算功能以及基于所有影响因素及权重的总评价指标计算；最后结果显示区包含电法指标值、计算破坏深度值、总指标计算值的结果显示，基于电法探测数据视电阻率值的可视化展示图像，文件导入、数据处理过程中的进度信息展示。

****

（a）油型气涌出危险性评价软件主界面图



（b） 岩层参数设定界面图

图9 油型气涌出危险性评价软件界面图

Fig.9 Interface diagram of risk assessment software for oil-type gas gushing

4 工程应用

根据黄陵二号煤矿的实际情况，本文对电法探测指标、岩层稳定性、岩层渗透率、力学参数及地质构造进行系统分析，综合考虑以上影响因素及其耦合关系。以413巷道及北二巷道为研究对象进行油型气涌出危险性综合评价。

在413瓦斯专用辅运巷共布置3个测点，两次在距离反掘辅运巷迎头200 m、250 m处，一次在辅运巷迎头位置; 在北二辅运巷共设置5个测点，分别在200 m、400 m、460 m、490 m、520 m处进行测量。经计算不同测量地点的油型气涌出危险性评价指标得下表：

表2 油型气涌出指标

Table 2 Oil type gas gushing index

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测量区域 | 测量地点 | 油型气涌出危险性评价指标 |
| 413巷道 | 胶带巷630m | 0.19 |
| 胶带巷660m | 0.34 |
| 瓦斯专用巷200m | 0.15 |
| 瓦斯专用巷反掘250m | 0.13 |
| 瓦斯专用巷迎头 | 0.18 |
| 北二巷道 | 北二辅运巷十四联巷490m | 0.43 |
| 北二辅运巷400m | 0.44 |
| 北二辅运巷520m | 0.42 |
| 北二辅运巷十四联巷200m | 0.35 |
| 北二辅运巷十四联巷430m | 0.39 |

413巷道不同位置的探测结果表明413巷道500-700 m此区域范围内油型气涌出危险性均较低。北二巷道5个测点，分布较集中，可知本区域的电阻率波动较大，地质结构变化明显，由危险性指标表明此区域底板构造复杂，油型气涌出量高。并对油型气涌出危险性指标进行分类得下表：

表3 油型气涌出危险性分类

Table 3 Hazard classification of oil type gas gushing

|  |  |
| --- | --- |
| 涌出危险性评价指标Q | 涌出危险性类型 |
| 0.0<Q≤0.2 | 巷道顶底板稳定，油型气涌出危险性低。 |
| 0.2<Q≤0.4 | 巷道顶底板较稳定，油型气涌出危险性较低。 |
| 0.4 <Q≤0.7 | 巷道顶底板不稳定，存在断层等地质构造，油型气涌出危险性高。 |
| 0.7<Q≤1.0 | 巷道顶底板极度不稳定，存在大尺度断层构造，油型气涌出危险性高。 |

采集了现场底板抽采钻孔的油型气抽采的流量和浓度数据，计算得到了探测区域的油型气抽采纯量。通过与测量时钻孔对油型气的平均抽采量数据对比如图11所示，可以看出所探测的油型气危险性指标与抽采纯量基本规律一致。表明采用直流电探测方法评价底板油型气涌出危险性具有较高准确。



图10 危险性指标与抽采纯量对比图

Fig.10 Comparison chart of risk index and amount of drainage

5 结论

本文针对油型气涌出危险性无法定量评价的问题，分析了油型气涌出的危险因素与地层稳定性有直接关系，提出了基于电法、渗透率、构造等多指标的定量评价方法。采用直流电法探测技术测量底板岩层电阻率分布，以此作为地层稳定性的直接评价因素，并采用基于变权理论的层次分析法获得各影响因素的权重系数，综合计算出总体评价指标，划分了不同指标范围内所对应的危险等级。并编写了油型气涌出危险性评价软件方便数据处理及可视化结果。最后通过该评价方法对实地巷道应用，结果表明计算所得的油型气危险性指标与抽采纯量基本规律一致，说明计算出的危险性指标能够准确反映油型气的赋存和涌出规律。同时证明了油型气涌出危险性定量评价的可行性，可以为油型气涌出防治提供可靠依据，降低开采成本。

参考文献

[1]方祖康,庞雄奇,高春文. 煤型气和油型气的概念及其类型划分[J]. 天然气工业,1988,(01):13-17+4.

Fang Zukang, Pang Xiongqi, Gao Chunwen. The concept and classification of coal-type gas and oil-type gas[J]. Natural Gas Industry, 1988, (01): 13-17+4.

[2] 赵继展,张群,郑凯歌,李川,陈冬冬. 黄陵矿区煤矿井下围岩喷涌气体致灾机理及防治措施[J]. 天然气工业,2018,38(11):114-121.

Zhao Jizhan, Zhang Qun, Zheng Kaige, Li Chuan, Chen Dongdong. Disaster-causing mechanism and prevention measures of gas gushing from surrounding rocks in coal mines of Huangling mining area[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(11):114-121.

[3]韩中喜,李剑,严启团,王淑英,葛守国,王春怡. 天然气汞含量作为煤型气与油型气判识指标的探讨[J]. 石油学报,2013,34(02):323-327.

Han Zhongxi, Li Jian, Yan Qituan, Wang Shuying, Ge Shouguo, Wang Chunyi. Discussion on Mercury Content in Natural Gas as Identification Index of Coal-type Gas and Oil-type Gas[J]. Acta Petroleum Sinica, 2013,34(02):323-327.

[4]殷民胜. 黄陵矿业公司二号煤矿201工作面底板油型气治理技术研究[A]. 国家煤矿安全监察局、中国煤炭工业协会.探索建立煤矿区煤层气立体抽采与经济利用产业化体系，推动煤矿瓦斯治理、立体抽采技术示范与煤层气资源综合利用——全国煤矿瓦斯抽采利用与通风安全技术现场会煤矿瓦斯抽采与通风安全论文集[C].国家煤矿安全监察局、中国煤炭工业协会:中国煤炭工业协会,2013:95-100.

Yin Minsheng. Research on oil-type gas control technology on the floor of No. 2 coal mine 201 working face of Huangling Mining Company [A]. National Coal Mine Safety Supervision Bureau, China Coal Industry Association. Exploring the establishment of an industrialization system for coalbed methane three-dimensional drainage and economic utilization in coal mining areas, Promoting Coal Mine Gas Control, Three-dimensional Drainage Technology Demonstration and Comprehensive Utilization of Coalbed Methane Resources - National Coal Mine Gas Drainage Utilization and Ventilation Safety Technology Field Conference Coal Mine Gas Drainage and Ventilation Safety Papers [C]. National Coal Mine Safety Supervision Bureau, China Coal Industry Association: China Coal Industry Association, 2013:95-100.

[5]孙四清. 煤油气共存矿井掘进工作面底板油型气涌出机理探讨[J]. 矿业安全与环保,2017,44(04):90-94.

Sun Siqing. Discussion on the mechanism of oil-type gas gushing out from the floor of coal-oil-gas coexisting mine excavation face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2017,44(04):90-94.

[6]张俭让,张荃,董丁稳,陈伟. 油型气涌出矿井CH\_4扩散规律数值模拟[J]. 煤炭技术,2015,34(10):136-138.

ZHANG Jianrang, ZHANG Quan, DONG Dingwen, CHEN Wei. Numerical simulation of CH\_4 diffusion law of oil-type gas gushing out of mine[J]. Coal Technology, 2015,34(10):136-138.

[7]张俭让,张玲洁,李倩玉. 油型气涌出矿井局部通风排瓦斯优化[J]. 西安科技大学学报,2017,37(06):823-828.

ZHANG Jianrang, ZHANG Lingjie, LI Qianyu. Optimization of Local Ventilation and Methane Discharge in Mine with Oil-type Gas Eruption[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017,37(06):823-828.

[8]王军辉. 浅谈煤油气共生矿井瓦斯油型气综合治理技术[J]. 内蒙古煤炭经济,2019,(06):49-52+64.

Wang Junhui. Brief Discussion on the Comprehensive Control Technology of Coal-oil-Gas Coexistence Mine Gas Oil-type Gas[J]. Inner Mongolia Coal Economics, 2019, (06): 49-52+64.

[9]闫赞,马功社,张维. 黄陵矿区瓦斯(油型气)治理技术和管理新模式[J]. 陕西煤炭,2021,40(03):26-32+50.

Yan Zan, Ma Gongshe, Zhang Wei. Gas (oil-type gas) control technology and new management model in Huangling mining area [J]. Shaanxi Coal, 2021,40(03):26-32+50.

[10]司俊鸿,许敏,郑凯凯,褚廷湘. 黄陇矿区瓦斯-油型气混合气体爆炸特性及预警技术研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(08):251-256.

Si Junhong, Xu Min, Zheng Kaikai, Chu Tingxiang. Research on Explosion Characteristics and Early Warning Technology of Gas-Oil Gas Mixture in Huanglong Mining Area[J]. Coal Science & Technology, 2019,47(08):251-256.

[11]袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. 中国煤炭,2021,47(06):1-6.

Yuan Liang. Research on my country's Coal Mine Safety Development Strategy[J]. China Coal, 2021,47(06):1-6.

[12]李毛飞,刘树才,姜志海,苏本玉,陈爽爽. 矿井直流电透视底板探测及三维反演解释[J]. 煤炭学报,2022,47(07):2708-2721.

Li Maofei, Liu Shucai, Jiang Zhihai, Su Benyu, Chen Shuangshuang. Mine direct current perspective floor detection and 3D inversion interpretation[J]. Journal of Coal Science, 2022,47(07):2708-2721.

[13]刘伟韬,穆殿瑞,杨利,李留洋,史晨昊. 倾斜煤层底板破坏深度计算方法及主控因素敏感性分析[J]. 煤炭学报,2017,42(04):849-859.

Liu Weitao, Mu Dianrui, Yang Li, Li Liuyang, Shi Chenhao. Calculation method of failure depth of inclined coal seam floor and sensitivity analysis of main controlling factors[J]. Journal of Coal Science, 2017,42(04):849-859.

[14]闫小龙. 屯兰矿巷道顶板岩层稳定性分析研究[J]. 能源技术与管理,2017,42(05):51-53.

Yan Xiaolong. Stability Analysis of Roof Strata in Tunlan Coal Mine [J]. Energy Technology and Management, 2017,42(05):51-53.

[15]候三中,刘德民,李金岭. 掘进工作面煤层渗透率变化对瓦斯涌出量的影响分析[J]. 矿业安全与环保,2010,37(05):7-10+95.

Hou Sanzhong, Liu Demin, Li Jinling. Analysis of the Influence of Coal Seam Permeability Variation on Gas Emission in Driving Face[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2010,37(05):7-10+95.

[16]戚晟德. 地质构造对煤层瓦斯赋存与分布的控制作用[J]. 能源与节能,2022,(11):47-49+75.

Qi Shengde. The Controlling Effect of Geological Structure on the Occurrence and Distribution of Coal Seam Gas [J]. Energy and Conservation, 2022, (11): 47-49+75.

[17]马进功. 基于变权模糊理论的残煤连采可行性评价研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(08):30-37.

Ma Jingong. Research on Feasibility Evaluation of Continuous Mining of Residual Coal Based on Variable Weight Fuzzy Theory [J]. Coal Science and Technology, 2021,49(08):30-37.

[18]李德清,崔红梅,李洪兴. 基于层次变权的多因素决策[J]. 系统工程学报,2004,(03):258-263.

Li Deqing, Cui Hongmei, Li Hongxing. Multi-factor decision-making based on hierarchical variable weights [J]. Journal of Systems Engineering, 2004, (03): 258-263.