

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.006

基于 D-S 证据理论的空区稳定性识别与工程应用

胡建华,张行成,周科平,杜相会,雷 涛

(中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘 要:地下矿山开采时,受采矿方法和开采工艺的影响,产生大量采空区,它是影响井下矿山安全生产的主要因素。群空区稳定性的影响因素主要包括 4 个方面,即:采空区的结构形态参数、群空区的空间分布特征、群空区的应力环境和特征值、采空区的地质环境和矿岩体的物理力学参数,形成了群空区稳定性影响因素的多源信息数据库。为了识别矿山井下空区的稳定性,以 CMS 空区探测、数值模拟和岩体力学属性为多源信息来源,应用层次分析进行因素权值分析,建立了基于 D-S 证据理论多源信息融合的群空区稳定性分析模型。针对某矿山的工程现状,实现了采空区的 4 级稳定性分级。研究表明:群空区稳定性与结构参数、地质参数和应力环境参数有关,是一典型的多源信息融合系统,运用 D-S 证据理论实现了采空区的多源信息融合的稳定性分级,分级结果有利于矿山的安全处置和控制。

关键词:采空区;稳定性;多源信息融合;D-S 证据理论

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)09-035-08

Stability identification and application of goafs based on Dempster-Shafer theory

HU Jianhua, ZHANG Xingcheng, ZHOU Keping, DU Xianghui, LEI Tao

(School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In the process of underground mining, as the effect of mining method and mining technology, massive goafs have been formed in underground mines, which is the main factor influencing the goafs stability in underground mining. Generally, there are four main factors to affect the goafs stability, i. e. structure parameters, space distribution features, stress environment and characteristic value, and geological condition and mechanical parameters of ore and rock mass. There are the sources of the stability identification of goafs based on the multiple source information. Based on CMS technology and engineering geology survey, numerical simulation technology, and using the AHP weight analysis, a D-S evidence classification model is built based on the multisource information fusion in the goafs stability. Take a mine as example, the mining information and the parameters are collected, and the classifications of goafs stability are identified according to a four grade classification method. The result shows that the stability is relative to the structure parameters, geological parameters and the stress environment parameters of goafs. It is a typical problem of the multisource information fusion. Using D-S evidence theory, the classification of the goafs stability is identified, and the results are consistent with the goafs stability in the engineering recognition. It is an effective approach to indentify the classification of the goafs stability involving many factors.

Key words: goafs; stability; multiple information fusion; D-S evidence theory

收稿日期:2013-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074178);湖南省自然科学基金资助项目(09JJ4025);中南大学前沿研究计划资助项目(2010QZZD001);中南大学自由探索计划资助项目(2011QNZT087)

作者简介:胡建华(1975-),男,中南大学副教授,博士,主要从事高效安全采矿技术与岩土工程的稳定性分析研究,
(E-mail) hujh21@csu.edu.cn。

矿产资源地下开采留下了大量的采空区,采空区的存在是影响矿山安全生产最主要的危害源之一。受矿产资源开发的政策、市场和采矿技术的影响,国内大量矿山存在民采、无规划开采以及空场采矿所形成的采空区群,并且有些采空区的信息不明确^[1]。采空区群的采矿空间信息的不确定性、不完备性和相互扰动性等特点,加大了采空区处理与控制的难度,对矿山的正常生产安全构成了巨大威胁。国内外对采空区安全性的研究一直没有间断,并提出了多种理论,目前较常用分析方法有解析法和预计法两种对采空区进行稳定性的判别;另外一种是通过数值模拟软件进行空区的稳定性分析^[2-4]。传统的分析方法从不同的侧面反映出采空区的稳定性状态,但获取手段较为单一,结果往往不十分准确。

采空区稳定性的分析是一个系统问题,信息量大,数据来源复杂多样,主要有矿岩体材料力学参数与工程地质条件信息、采空区结构空间信息、应力环境及力学响应信息等三类。采空区应力环境与力学响应信息对空区的稳定性影响最大,是判断采空区稳定性的最主要的指标^[5],其信息的获取主要包括解析法、预计法以及数值模拟方法^[6-8]。并且,稳定性评价指标选取差异和评价结果直接相关^[9],是一种典型多源和不确定性的信息融合问题。

多源信息融合技术是近些年来蓬勃发展的一种新型数据处理技术,主要研究对多源不确定性信息进行综合处理和利用的理论与方法,对来自多级别、多层次、多方面的多个信息源(传感器)的信息进行处理,得到新的有意义的信息^[10-12]。其在民用应用领域有机器人、智能制造、智能交通、无损检测(non-destructive Testing)、环境监测、医疗诊断、遥感、刑侦和保安工作等。矿山领域的多源信息融合技术刚刚兴起,主要集中在空区探测、遥感、矿山三维仿真等方面^[13]。

地下群采空区安全识别与预测时,不应仅对一种特定的信息独立地做出处理决策,而且需要对来自多方面多层次的信息进行综合分析处理,运用多源信息融合决策理论,消除数据中信息的不确定因素,提高识别结果的准确性^[9],增加采空区稳定性评价结论的可信度和实用性。笔者引入多元信息融合的 D-S 证据理论辨识方法,在空区结构信息、地质环境信息和应力环境信息的基础上,利用 D-S 证据理论在不确定性的量测、表示和组合方面的独特的优势,在方法应用上不仅可以实现像贝叶斯推理那样结合先验信息,而且能够处理像语言一样的模糊概念证据,以及解决应用上可以对不同层次的数据

的分类识别^[14],从而实现了空区稳定性辨识。

1 D-S 证据理论识别方法

多源信息融合是对多源信息进行信息处理和利用的理论和方法的总称,其关键在于提出一种理论方法,对相似或不同的特征模型的信息进行处理和加工融合,获得进一步的结论^[15]。它的优点可以实现信息的容错性和互补性等。在矿山的采空区安全多源信息处理上,其多源信息融合的思路如图 1。

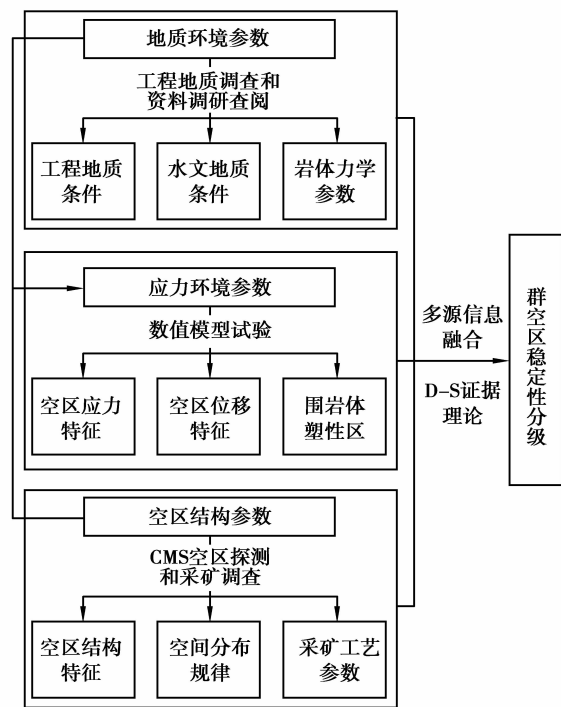


图 1 群空区稳定性多源信息融合分析图

1.1 D-S 证据理论基本概念

登普斯特-谢弗(D-S)证据理论又称证据理论或信任函数,是一种不确定性推理方法,它为不确定信息的表达和合成提供了强有力的方法,特别适用于决策级信息融合。

D-S 证据理论用“识别框架 Θ ”来表示所研究的命题集,定义一个 mass 函数:

$$m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1], \text{ 满足: } m(\emptyset) = 0; \sum A \Theta m(A) = 1.$$

其中: m 为识别框架 Θ 上的基本可信度分配,若 A 属于识别框架 Θ ,则 $m(A)$ 称为 A 的基本可信数。

对于任何的命题集, D-S 证据理论还提出了信任函数的概念: $\text{Bel}(A) = \sum B \subseteq A m(B)$, 即 A 的信任函数为 A 中每个子集的信任值之和^[16-18]。即:

$$\text{Bel}: \Omega(\Theta) \rightarrow [0, 1]$$

$$\text{且} \quad \text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B), \quad (1)$$

Bel(A)是对A(包括其子集)的全部信任,是信任区间的下限函数(悲观估计)。

$$PI(A) = 1 - Bel(-A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B), A \subseteq \Omega, \quad (2)$$

似然测度PI(A)表示对A非假的信任程度,又称上限函数(乐观估计)。

D-S证据理论的基本融合规则如下。

设 m_1, m_2 是同一识别框架上的两个mass函数,则其正交和 $m = m_1 \epsilon m_2$ 定义为:

$$m(\emptyset) = 0,$$

$$m(A) = \frac{1}{N} \sum_{x \cap y = A} m_1(x) m_2(y) \quad (A \neq \emptyset), \quad (3)$$

其中 $N = 1 - \sum_{x \cap y = \emptyset} m_1(x) m_2(y) = \sum_{x \cap y \neq \emptyset} m_1(x) m_2(y)$ 。

若 $N \neq 0$,则正交和 m 是融合后的mass函数,若 $C \neq 0$,则正交和 m 不存在,称 m_1 和 m_2 矛盾。

多个mass函数的正交和 $m = m_1 \epsilon m_2 \epsilon \dots \epsilon m_n$ 定义为:

$$m(\emptyset) = 0,$$

$$m(A) = \frac{1}{N} \sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) \quad (A \neq \emptyset), \quad (4)$$

其中: $N = 1 - \sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) = \sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i \neq \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$ 。

1.2 融合步骤

将识别分类的多源信息,利用计算机技术对按时序获得的若干多类别、同异质传感器观测的信息,在一定准则下加以自动分析、综合,建立D-S证据理论分析模型。融合分析过程如下:

1) 确立识别框架。

确立识别的分级系统,如采空区的4级稳定性分级,即稳定、较稳定、一般、危险性较高。

确定识别框架: $\Theta = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$,其中, A_1 表示稳定, A_2 表示较稳定, A_3 表示一般危险, A_4 表示较高危险,故 $\Theta = [1, 2, 3, 4]$ 。

2) 确定证据体。

采空区稳定性识别,主要根据数值分析、激光探测、矿山资料等相关信息,应用层次分析法确定影响因素的权重,确定基于D-S证据理论的识别证据体。利用这些证据体形成每一空区的证据组,构成识别目标模式的信度函数分配,从而获得某一目标模式假设的可信程度。

3) 数据的归一化处理。

为保证分析过程中量纲的统一,对于越大越危险和越小越危险的评判指标分别采用式(5)和式(6)进行归一化处理^[19]。

$$x_{ij}^* = \frac{\max(x_{ij}) + \min(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n), \quad (5)$$

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n), \quad (6)$$

式中: i 为第 i 个采空区; j 为第 j 个分析类指标。

4) D-S证据理论的多源信息融合。

建立证据体的mass函数,根据式(3)进行数据融合处理,并依次对识别框架进行分析融合,获得新的融合mass函数序列;并根据式(4)进行多组mass函数的融合处理,得到最终融合结果,由式(1)和(2)计算融合后的M函数信任测度Bel和似然测度PI。

2 空区稳定性的多源信息获取

2.1 工程概况

某铜矿于2003年建成投产,目前的生产能力为 65×10^4 t/a。矿体属于中稳-稳固,主要有全面法、留矿法和分段凿岩阶段空场等空场采矿法^[20],下盘平硐竖井联合开拓,阶段高50 m。目前主要有3 450、3 400、3 350、3 300和3 250 m 5个生产中段。该矿区由北西向延伸,轴向 315° ,长约10 km雪青沟复式背斜,和北西-南东的赛什塘背斜。岩体质量与分类评价见表1。

表1 主要岩体类型的结构特征参数与评价分析表

岩石质量指标 RQD/%	岩石类型	岩石性质评价
0~25	石英斑岩类、黑云母千枚岩、变质粉砂岩	很不好
25~50	黑云母千枚岩、变质粉砂岩、中细粒石英闪长岩	不好
50~75	大理岩、砂卡岩、石英闪长岩、变质粉砂岩	较好
75~90	透辉石砂卡岩、大理岩、石英闪长岩、硅化变质粉砂岩	好
90~100	石榴石砂卡岩	很好

该矿区5个中段的开采,形成了大量形态各异的采空区,空区结构变化较大。其中有些采场采空区已与地表形成贯通塌透,有些相邻采空区连成一片,另外还有一些边远的盲矿体的独立存在的采空区。除贯通塌透的空区自然处理外,5个中段的空区均没做过实质性的处理。大面积和众多数量的群空区长期存在,不仅影响资源的高效回收,而且很容

易造成井下事故的发生,严重影响和制约矿山的安全生产。研究表明^[21]采空区的稳定性与矿山的工程地质环境和采矿活动有关,主要包括采空区的工程地质条件、水文地质条件、采空区地应力、采空区岩体的力学特性、采矿方法及次生采动应力场、施工技术与生产工艺等。

2.2 采空区结构信息

采空区结构形态信息的收集主要依靠 CMS 系统,结合已有的矿山资料,利用 3DMine 构建了矿山的群空区的三维结构信息和分布图,整合空区、中段以及地表信息后的三维空区模型如图 2 所示。根据建立的空区模型,实现中段空区的体积、长度、高度及暴露面积等信息进行统计。

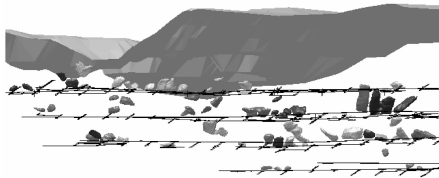


图 2 空区(部分)及地表三维模型

2.3 采空区力学信息

考虑计算区域影响,简化模型为三类岩石材料,即矿体和上盘、下盘围岩,运用 Midas-FLAC^{3D} 数据耦合方法,建立某矿山的群空区 FLAC^{3D} 数值模型,如图 3,矿岩计算力学参数如表 2。模拟自重应力场下的分步开挖,实现采空区的应力环境模拟,模型底部为固定约束及四周为水平位移约束。

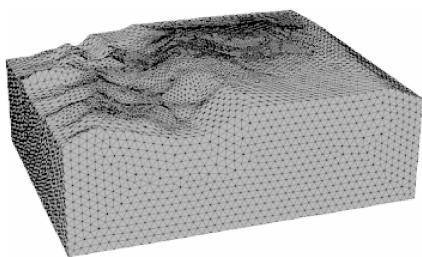


图 3 FLAC^{3D} 中重构的矿区地质网格模型

表 2 计算岩体力学参数表

矿岩名称	弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(t·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
矿体	7 220	0.28	3.1	39	3.21	3.1	40.6
上盘围岩	6 980	0.26	3.7	36	2.87	4.6	53.8
下盘围岩	6 400	0.38	2.2	42	2.62	2.9	89.2

1) 应力分析。

针对空区的地质结构特点,统计分析空区最大、最小主应力的分布特征,见图 4(a)和(b)。

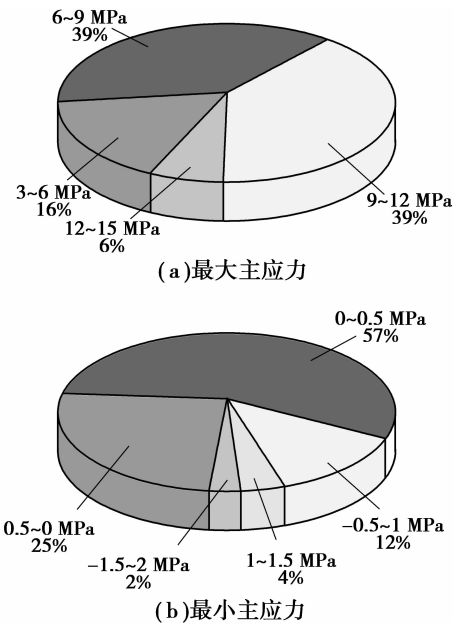


图 4 空区最大和最小主应力分布图

由图 4(a)可知,采空区最大主应力主要表现为压应力,其值集中在 6~12 MPa,约占采空区总数的 78%;各个中段都有应力集中较大的空区,其中中段应力较大的采空区数目较多,且多集中在 9~12 MPa。最小主应力表现出不同的发展,其中表现出压应力状态的约占空区总数的 40%,有利于保持空区稳定性;约有 25%的采空区出现拉应力,拉应力值在 1 MPa 以内,低于围岩的单轴抗拉强度,但这种拉应力将对岩体结构产生破坏,并且有部分拉应力大于 1 MPa,从分布的区域发现采空区的拉应力主要集中出现在二、三中段,见图 4(b)。

2) 位移分析。

由图 5 可知,大部分采空区顶板发生了沉降位移,位移值大小集中在 5~15 cm,占空区总数的 75%。少数空区位移较大,其中沉降位移 15~20 cm 的空区有 7 个、超过 20 cm 的有 2 个。随着埋深增加,采空区沉降位移逐渐加大,不利于采空区的稳定。

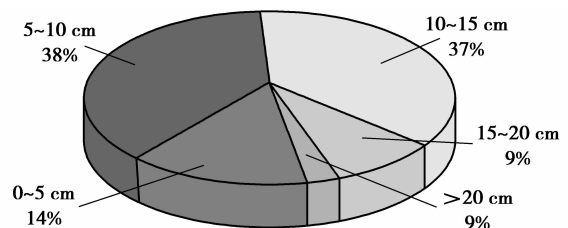


图 5 空区位移分布饼图

3)塑性区分析。

以空区的潜在危险截面剖切各个空区,得到采空区塑性区云图,选取塑性区较多的采空区进行分析,典型采空区塑性区域如图6。分析发现,塑性区多分布在采空区两帮围岩及保安矿柱中,并且剪切塑性区居多,也有少部分拉伸塑性区。

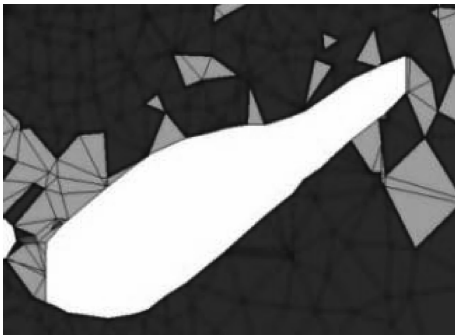


图6 典型(205-下)塑性区图

3 工程应用与结果分析

3.1 融合步骤

将采空区三维探测结果以及岩体结构与工程信息,以及力学信息等各种空区信息,进行识别框架的构建,确定证据体,数据归一化和融合计算,从而对采空区的稳定性状态做出评估,得出采空区稳定性的决策。具体分析过程如下。

1)确立识别框架。

将采空区的稳定性状态分为稳定、较稳定、一般、危险性较高4种状态,其识别框架如下:

$$\Theta = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}.$$

2)影响因素权重分析。

在对采空区证据体进行描述之前先对采空区影响因素进行权重分析,以确定各证据体之间的重要程度,分析层次图如图7。

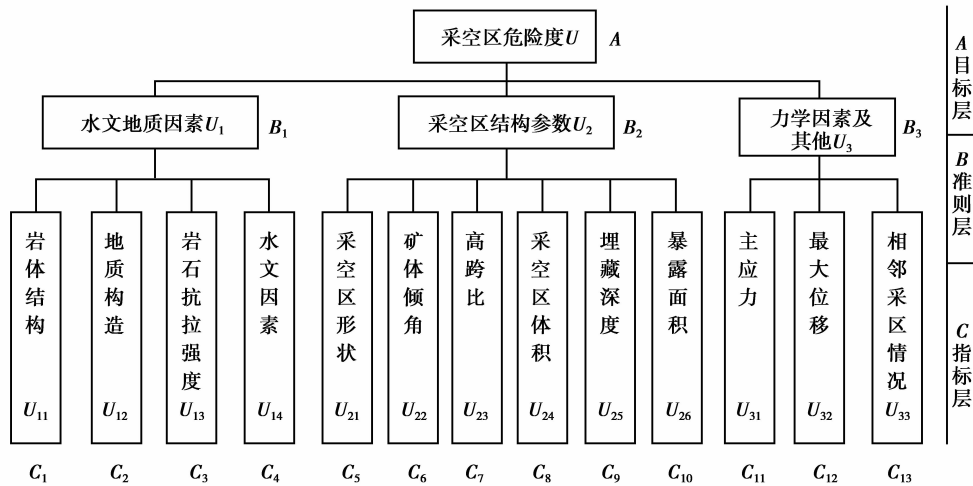


图7 权重分析层次图

通过层次分析法,得出影响采空区稳定性的各因素权重,排序如下:地质构造(0.26) > 高跨比(0.22) > 岩体结构(0.13) > 最大主应力(0.06) > 岩石抗拉强度 = 采空区体积(0.05) > 水文因素(0.03) > 埋藏深度(0.02) > 相邻采区情况(0.016) > 最大位移(0.01) > 矿体倾角(0.009)。

3)确定证据体。

基于数值分析、激光探测、矿山资料等相关信息,根据权重的赋值,选取权值 > 0.01 的影响因素作为群空区稳定性的评判证据体,即定证据体有:地质构造 m_1 、高跨比 m_2 、岩体结构 m_3 、最大主应力 m_4 、采空区体积 m_5 、水文因素 m_6 、埋藏深度 m_7 、相

邻采区情况 m_8 。利用这些证据可构成识别目标模式的信度函数分配,表示某一目标模式假设的可信程度,每一空区信息形成一证据组。

4)参数归一化处理。

根据工程地质调查、CMS空区探测和演示力学强度参数等收集的矿山群空区3类信息,结合数值模拟分析的结果,将评价指标分为定性和定量指标分类,定性指标采用专家打分法取值,定量指标依据数值模拟结果以及现场资料取值,采空区影响因素信息获取方法及量化原则如表3~5。并根据参数的性质,选用式(5)和式(6)进行归一化处理。

表 3 基于力学指标的空区危险性分级标准

危险性分级	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	位移/cm	塑性区分布
1	12~15	-2~-1	>15	分布范围较大,且集中在空区顶板位置(10)
2	9~12	-1~-0.5	10~15	分布范围一般(10~8)
3	6~9	-0.5~0	5~10	分布较分散(8~6)
4	3~6	0~0.5	<5	塑性区很少(<6)

表 4 基于空区形态指标的危险性分级标准

危险性分级	埋深(m_7)/m	暴露面积(m_4)/m ²	空区体积(m_5)/m ³	空区高跨比(m_1)
1	>350	>2 500	<1 000	$\lambda \geq 2$
2	300~350	1 500~2 500	1 000~2 500	$1 \leq \lambda < 2$
3	250~300	1 000~1 500	2 500~6 000	$0.5 \leq \lambda < 1$
4	<250	<1 000	>6 000	$\lambda < 0.5$

表 5 基于空区环境指标的危险性分级标准

危险性分级	RQD/%	相邻空区值(m_8)	地质构造(m_1)	地下水(m_6)
1	>60	孤立的、临近无空区(0)	无大的构造(8~10)	干燥(<35)
2	50~60	影响范围内空区数目较少、暴露面积不大(2~1)	褶皱构造影响较小(5~8)	潮湿或点滴状出水(55~35)
3	40~50	影响范围内采空区数目较多、暴露面积较大,但分散(3~2)	断层部分切割或褶皱影响大(3~5)	淋状或涌状,水压 ≤ 0.1 MPa(70~55)
4	<40	采空区影响范围内空区多、暴露面积大,且较集中,为空区群(>4)	断层贯穿围岩(0~3)	淋状或涌状,水压 > 0.1 MPa(85~70)

5) 数据融合分析。

按前文获取的信息,将证据体分为以下几种,根据先验知识,得到各组信息的 mass 函数,计算融合结果和求取 M 的信任测度 Bel 和似然测度 PI。

3.2 融合结果与分析

以 205 下采空区为例对空区稳定性识别。

各影响指标的 mass 函数如下:地质构造(m_1), $m_1\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.50, 0.20, 0.20, 0.10)$;高跨比(m_2), $m_2\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.50, 0.20, 0.20, 0.10)$;岩体结构(m_3), $m_3\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.50, 0.30, 0.10, 0.10)$;最大主应力(m_4), $m_4\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.40, 0.30, 0.20, 0.10)$;采空区体积(m_5), $m_5\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.50, 0.20, 0.20,$

$0.10)$;地下可见水, $m_6; m_6\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.60, 0.20, 0.10, 0.10)$;埋深(m_7), $m_7\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.40, 0.30, 0.25, 0.15)$;相邻采空区情况(m_8), $m_8\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.50, 0.30, 0.10, 0.20)$ 。

依次对 mass 函数的 4 个识别框架进行融合后的 mass 函数为 $M(A_1) = 0.80, M(A_2) = 0.16, M(A_3) = 0.03, M(A_4) = 0.01$, 新 mass 函数为 $M\{A_1, A_2, A_3, A_4\} = (0.80, 0.16, 0.03, 0.01)$ 。同理,根据多个 mass 函数的融合公式(4),根据前两个 mass 函数的融合结果,将其与第 3 个 mass 函数进行融合,依次融合 m_2, m_3, \dots, m_8 , 得最终的融合结果 $M(A_1, A_2, A_3, A_4) = (0.90, 0.04, 0.03, 0.03)$ 。由式(1)、式(2)计算融合后 M 的信任测度 Bel 和似

然测度 PI, 如表 6。

表 6 融合后各命题信任测度和似然测度

命题	Bel	PI
命题 A_1	0.90	0.95
命题 A_2	0.07	0.08
命题 A_3	0.03	0.03
命题 A_4	0.02	0.02

由表 6 可知, 命题 A_1 的信任区间 $[Bel(A_1), PI(A_1)]$ 为 $[0.91, 0.94]$, 表明在采空区多种影响因素的共同作用下, 随着融合信息的增加, 识别结果准确可靠。通过对 205-下采空区的稳定性分析, 其稳定的可信度大小为 0.9, 该空区稳定安全。

采用相同的方法, 对其他采空区进行稳定性辨识, 具体分析结果如表 7 所示, 从而获得了其他各空区的危险性等级识别, 其中 1、2、3、4 分别代表稳定、较稳定、一般和危险性较高。

表 7 D-S 证据理论的采空区稳定性分析结果

采空区名称	命题 A_1	命题 A_2	命题 A_3	命题 A_4	危险性等级	工程识别结果
305-2、308 合并	0.85	0.10	0.02	0.03	1	1
201、203 合并	0.81	0.10	0.04	0.05	1	1
205-下	0.90	0.04	0.03	0.03	1	1
309-2 下	0.80	0.14	0.02	0.04	1	2
120-2	0.91	0.05	0.02	0.02	1	1
304-2-2	0.60	0.35	0.02	0.03	2	2
204-4	0.55	0.42	0.01	0.02	2	2
419 下	0.35	0.50	0.12	0.03	4	2
309-2 下	0.38	0.50	0.10	0.02	4	4
320-2	0.30	0.50	0.10	0.10	4	4
320	0.34	0.55	0.06	0.05	4	4
106 南	0.19	0.70	0.01	0.10	4	4
302-6 北、304-3 合并	0.46	0.50	0.02	0.02	3	4
208 北-2	0.45	0.43	0.02	0.10	3	3
304	0.41	0.52	0.05	0.02	3	3
302、310 合并	0.38	0.52	0.05	0.05	4	4
124-1	0.32	0.52	0.06	0.10	4	4
218 下	0.39	0.52	0.07	0.02	4	4

根据应力、变形和采空区的大小, 利用专家经验法对采空区稳定性进行了识别^[22], 其结果见表 7 的工程识别结果。判别的采空区中存在 3 个空区稳定性识别不一致, 分析存在差异的 3 个空区结果可知, 主要是由于在工程识别中没有考虑岩体结构、水文和空区的相邻关系等因素。因此, 利用 D-S 证据理论对采空区的识别, 更加有利于对采空区稳定性的多层次多因素的分析, 获得可靠的识别结果。

4 结 论

1) 空区稳定性的影响因素信息多源复杂, 基于 CMS 空区探测、工程地质调查和数值模拟方法, 获得了空区稳定性识别的多源信息数据。

2) 在层次分析法确定采空区各影响因素的权重基础上, 确定了空区稳定性识别的主要影响因数和 D-S 证据理论识别的证据体, 建立了基于 D-S 证据理论的采空区稳定性多源信息融合的识别模型。通过典型的空区稳定性判别的分析结果表明: 在识别的 18 个采空区中, 较高危险的空区有 419 下, 309-2 下, 320-2, 320, 106 南, 302、310 合并, 124-1, 218 下 8 个空区; 危险性较高的空区有 302-6 北、304-3 合并, 208 北-2, 304 空区, 建议对这些空区采取处理措施, 消除安全隐患。

3) 基于 D-S 证据理论的信息融合技术应用于采空区稳定性评价中, 实现了空区稳定性的多类多层次信息综合评判和识别, 获得了更加有效的空区稳定性识别, 能够减少传统分析中的误差, 具有工程实用性。

参考文献:

- [1] 吴启红, 彭振斌, 陈科平, 等. 矿山采空区稳定性二级模糊综合评判[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 662-667.
WU Qihong, PENG Zhenbin, CHEN Keping, et al. Synthetic judgment on two-stage fuzzy of stability of mine gob area [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(2): 662-667.
- [2] 彭欣. 复杂采空区稳定性及近区开采安全性研究[D]. 长沙: 中南大学博士学位论文, 2008.
- [3] 刘希灵. 基于激光三维探测的空区稳定性分析及安全预警的研究[D]. 长沙: 中南大学博士学位论文, 2008.
- [4] Le Hegarat-Masclé S, Bloch I, Vidal-Madjar D. Application of Dempster-Shafer evidence theory to unsupervised classification in multisource remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and

- Remote Sensing, 1997, 35(4):1018-1031.
- [5] 齐福荣, 李忠, 武强. 信息融合技术在采空区安全评价中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(1):13-16.
QI Furong, LI Zhong, WU Qiang. Information fusion and it's application in evaluation of coal-goaf safety [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(1):13-16.
- [6] 李学锋, 徐必根, 唐绍辉, 等. 大型复杂群空区下采场稳定性分析[J]. 采矿技术, 2010, 10(3):52-55.
LI Xuefeng, XU Bigen, TANG Shaohui, et al. Mining Technology, 2010, 10(3):52-55.
- [7] 丁陈建, 汪吉林. 神经网络法的采空区地基稳定性评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2):209-211.
DING Chenjian, WANG Jilin. Using artificial neural network to assess the stability of goaf foundation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2):209-211.
- [8] Fan X F, Zuo M J. Fault diagnosis of machines based on D-S evidence theory. part 1: D-S evidence theory and its improvement [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(5):366-376.
- [9] 黄书岭, 张勇, 丁秀丽, 等. 大型地下厂房区域地应力场多源信息融合分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(7):2057-2065.
HUANG Shuling, ZHANG Yong, DING Xiuli, et al. Analytical methods of multi-source information fusion for in-situ stress field of large underground powerhouse region and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7):2057-2065.
- [10] Wu D S. Supplier selection in a fuzzy group setting: a method using grey related analysis and dempster-shafer theory [J]. Expert Systems with Applications: An International Journal, 2009, 36(5):8892-8899.
- [11] 赵雅明, 刘贺平, 张冰. 多源信息融合技术及其工业应用[J]. 自动化仪表, 2010, 31(9):1-5.
ZHAO Yaming, LIU Heping, ZHANG Bing. Technology of multi-source information fusion and its industrial application [J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(9):1-5.
- [12] 简小刚, 贾鸿盛, 石来德. 多传感器信息融合技术的研究进展[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(2):229-232.
JIAN Xiaogang, JIA Hongsheng, SHI Laide. Advances on multi-sensor information fusion technologies [J]. Sponsored by China Construction Machinery, 2009, 7(2):229-232.
- [13] 寇向宇, 贾明涛, 王李管, 等. 基于 CMS 及 DIMINE-FLAC3D 耦合技术的采空区稳定性分析与评价[J]. 矿业工程研究, 2010, 25(1):32-34.
KOU Xiangyu, JIA Mingtao, WANG Liguang, et al. Evaluation and analysis of stability of mined-out area based on the CMS and DIMINE-FLAC3D coupling technique [J]. Mineral Engineering Research, 2010, 25(1):32-34.
- [14] 徐翻翻. 基于 D-S 证据理论的模式分类问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2010.
- [15] Parikh C R, Pont M J, Jones N B. Application of dempster-shafer theory in condition monitoring applications: a case study [J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22(6/7):777-785.
- [16] Guan J W, Bell D A. Approximate reasoning and evidence theory [J]. Information Sciences, 1997, 96(3/4):207-235.
- [17] 刘海燕, 赵宗贵, 刘熹. D-S 证据理论中冲突证据的合成方法[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(5):701-704.
LIU Haiyan, ZHAO Zonggui, LIU Xi. Combination of conflict evidences in D-S theory [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(5):701-704.
- [18] 段凯, 刘德顺, 何先可. 基于 D-S 证据理论的冲击凿岩状态多源信息融合辨识方法[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(5):64-67.
DUAN Kai, LIU Deshun, HE Xianke. Identification method of percussive drilling conditions of rock using multi-source information fusion based on D-S evidence theory [J]. Mining Research and Development, 2010, 30(5):64-67.
- [19] 陈文伟. 复杂度、归一化方法及其应用[D]. 上海: 复旦大学硕士学位论文, 2006.
- [20] 张宝. 赛什塘铜矿采矿方法优化研究[J]. 矿业工程, 2011, 9(2):18-21.
ZHANG Bao. Optimization of mining method of Saishitang Copper Ore Mine [J]. Mining Engineering, 2011, 9(2):18-21.
- [21] 杜坤, 李夕兵, 刘科伟, 等. 采空区危险性评价的综合方法及工程应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(9):2802-2811.
DU Kun, LI Xibing, LIU Kewei, et al. Comprehensive evaluation of underground goaf risk and engineering application [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(9):2802-2811.
- [22] 张行成. 基于多源信息融合理论的采空区稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2011.