

# 采矿巷道围岩支护设计 专家系统\*

冯夏庭 林韵梅

(东北工学院 沈阳 110006)

**摘要** 本文在收集、总结和分析大量资料和经验的基础上,全面研究了各因素与支护型式之间的关系,提出了合理进行采矿巷道围岩支护设计的基本观点和原则,在 SUN 386 计算机上用 Turbo Prolog 智能推理语言开发了采矿巷道围岩支护设计专家系统(称作 MSDES),利用该系统对程潮铁矿等矿区的部分巷道进行了支护设计咨询,结果令人满意。

**关键词:** 专家系统, 采矿巷道围岩支护。

## 1 前言

综观我国目前采矿巷道围岩支护设计的特点,支护设计方法不外乎三种:工程类比设计,位移监测设计和理论校验设计。由于地质生产条件极其复杂,用数学方法以及实验室模拟方法来分析和研究巷道围岩与支护体系之间的关系,其结果往往与实际有一段差距。因此,目前支护设计主要是工程类比设计(经验设计),必要时辅以位移监测设计和理论校验设计。很显然,专家的知识在支护设计过程中起着重要的作用。

另一方面,随着采矿围岩支护设计工作的不断开展,在问题的定性分析上积累了大量的知识与专家经验。这些经验与知识对解决支护设计问题具有十分重要的意义。这是因为此类设计具有结构性差,不易定义,设计者的主观意志和经验有直接影响等特点。

因此,充分收集专家的丰富经验以及地质学和岩土力学信息知识,结合理论、试验研究等多方面的研究成果,将其总结分析,归纳成系统的知识,研究与开发采矿巷道围岩支护设计的专家系统已成了十分重要的课题。

本文采用类似于经验丰富的专家对问题的推理和作出决策的思维过程,综合运用人工智能和知识工程技术,把收集到的资料和专家知识进行抽象与表达,开发了一个简称为 MSDES 的采矿巷道围岩支护设计专家系统。这一系统将有助于工程师们在巷道围岩支护设计方面作出更多更好的智能决策。

1991年5月28日改到初稿,1991年11月29日收到修改稿。

\* 博士点专项科研基金资助项目。

## 2 支护设计的基本观点和原则

### 2.1 支护设计的基本观点

**2.1.1 研究局部、兼顾整体** 采矿工程与回采工艺过程的稳定性问题可视为由若干有机联系的要素组成的一个整体。因此,在进行支护设计时,只有把局部设计与整体设计结合起来,才能充分发挥整体支护的功能。这就是说,要按照岩体地质条件特征,对巷道(硐室)围岩进行分级分区,研究各分级区域内各要素之间的关系,确定支护设计的可选方案,又在充分研究局部区域的同时,兼顾整体,才能使系统(整个研究区域上的支护设计)在整体上达到最佳状态。

**2.1.2 支护设计的科学化、系统化和智能化** 在充分考虑地质条件和生产需要的情况下,支护设计应做到经济上合理,技术上安全可靠,而且有一定的先进性。为了不断提高支护设计的技术水平,应广泛收集多年从事支护设计实践的专家的经验,将其与现代计算机技术和人工智能技术相结合,开发采矿巷道围岩支护设计的计算机智能软件,使支护设计科学化、系统化和智能化。

**2.1.3 充分发挥围岩的作用** 支护与围岩应视为统一的整体。围岩是承载的主体,支护设计应以维护围岩的稳定为目的,要在时间和空间上充分发挥围岩的承载能力。从设计到施工的全过程中都应尽量减少对围岩的破坏,防止围岩恶化,保护和提高围岩的稳定能力。因此,支护设计不仅要完成支护类型和参数的确定,而且还要对施工提出要求,充分保证支护施工质量。

**2.1.4 设计的信息化与信息反馈** 供支护设计的知识信息大部分是不确定的,例如节理是发育的或是不发育的等等,都是不确定性的信息,也就是说,对于受一系列有机联系的自然因素所控制的岩体,目前还不可能,将来也很难对这种不确定问题给出确定的精确的本构方程。要使这些不确定问题逐步向确定的转化,只有通过大量的信息反馈才能实现。因此,根据地质特征和工程的性质确定初步设计,再根据位移监测提供的反馈信息合理地进行二次支护设计,这样的信息化设计是势在必行的。

**2.1.5 支护设计的解释** 支护设计所面临的问题是结构不良问题(ill-structured problem),所包含的知识是不完备和不一致的。正因为如此,在这种结构不良问题的求解过程中,如对其求解结果不做解释,其结果是难以令人信服的。因此,支护设计不仅要给出支护设计方案,而且要对其设计方案作出解释。不仅如此,还应对支护设计过程中涉及各个变量和概念进行解释,不断增加支护设计的透明度,从而使设计结果极易被现场施工人员理解和接受,并在施工中得到很好的贯彻。

**2.1.6 知识的完善与丰富** 支护设计知识需通过不断的积累学习,去伪存真、去粗取精,才能够逐步完善和丰富。因此,先进的支护设计方法还应具有充分积累知识和学习知识的能力。利用人工智能思想将收集到的专家知识和工程信息(如工程地质特征、支护类型及参数、施工时机及工序、支护用量及支护效果等)进行整理,并将其存储在一个结构化的系统中。同时还应记录施工过程中出现的特例及其解决措施,以便将来遇到此类情况时,可以调用这些信息,以帮助工程师们处理问题。

根据上述的基本观点, 我们建立了如图 1 所示的巷道围岩支护设计专家模型。

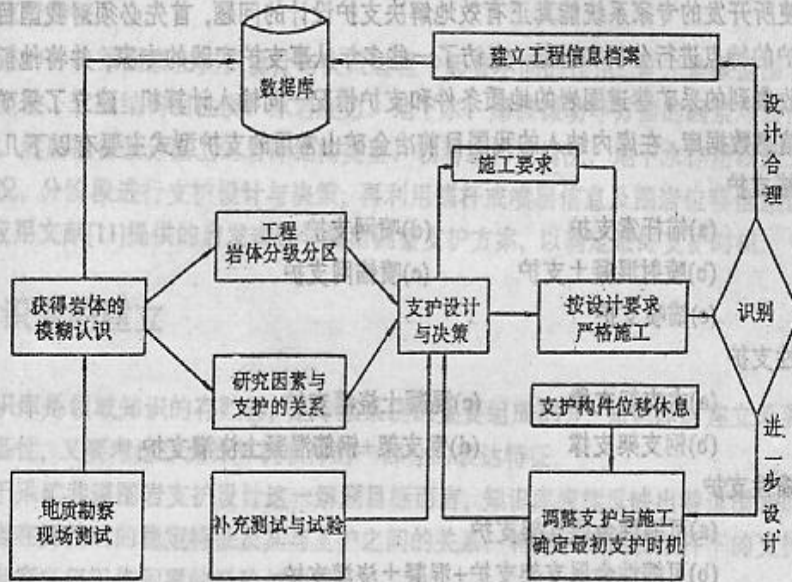


图 1. 采矿巷道围岩支护设计专家模型

Fig. 1 Expert model for designing support system

## 2.2 模型的设计原则

在该模型中遵循的设计原则如下:

2.2.1 进行支护设计时, 应根据围岩的稳定性、岩体结构、围岩工程的性质和使用要求来确定支护类型和支护参数, 并对施工方法提出要求。

2.2.2 采用现场勘察、实验和力学计算相结合的方法, 充分认识围岩, 系统地研究影响围岩支护的主要因素。被选作支护决策的因素应能反映支护的适应型式, 而且保持各自的独立性和便于现场收集。

2.2.3 采用两种不同性质的支护型式:

(1) 对于中硬以上围岩的支护原则是局部破坏、局部加固, 尽早顶住危害, 采用刚性支护。

(2) 对于软岩则按以柔克刚、先泄后抗的支护准则, 采用可缩性支护。这样既可允许围岩有适量的变形, 缓解变形压力, 同时又具有一定的刚性可约束围岩变形, 以防止围岩过度松弛。

2.2.4 一般设计与重点设计相结合。根据需要, 对已进行一般设计和支护的围岩进行位移监测, 再根据收敛位移特征确定二次支护时机与最佳支护参数。



### 3 我国目前矿山支护的类型——支护设计目标分析

为了使所开发的专家系统能真正有效地解决支护设计的问题,首先必须对我国目前冶金矿山支护的特点进行分析和总结.走访了一些多年从事支护实践的专家,并将他们的经验以及所收集到的采矿巷道围岩的地质条件和支护情况一同输入计算机,建立了采矿巷道围岩支护信息数据库.在库内纳入的我国目前冶金矿山常用的支护型式主要有以下几种:

(1)喷锚支护

- (a)锚杆索支护
- (b)喷射混凝土支护
- (c)锚喷支护
- (d)喷网支护
- (e)喷锚网支护

(2)刚性支护

- (a)木支架支撑
- (b)钢支架支撑
- (c)混凝土浇灌支护
- (d)钢支架+钢筋混凝土浇灌支护

(3)可缩性支护

- (a)可缩性金属支架支护
- (b)可缩性金属支架支护+混凝土浇灌支护
- (c)可缩性金属支架支护+喷射混凝土支护
- (d)可缩性金属支架支护+喷锚(网)支护

按支护构件的类型,还可对上述的支护型式做进一步的划分.例如,锚杆支护可分为早强砂浆锚杆支护、摩擦锚杆支护、可伸长锚杆支护、预应力锚杆支护等,可缩性金属支架支护又可分为梯形、拱形、封闭形等形状的可缩性金属支架支护等.以这些支护类型或某几种支护类型的组合作为支护设计(MSDES系统)的目标,各种不同的目标可用一个目标集合来描述,即:

$$Y = \{Y_i | i=1, 2, \dots, m\}$$

其中的  $Y_i$  为第  $i$  种支护类型,如  $Y_1$  为锚杆支护.

### 4 支护设计的决策因素

上面提到的支护型式有着不同的特性.因此,用 MSDES 系统进行支护设计时应考虑的因素很多.根据对支护信息数据库的检索以及目前我国现阶段支护的特点,选取 11 个决策因素,并用一个决策因素集合  $X$  来表示.

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}\}$$

其中,

$x_1$ ——围岩稳定性分级分区级别;  $x_2$ ——分级分区内的岩体结构;  $x_3$ ——主要结构面方位和倾角;  $x_4$ ——岩层走向与巷道轴线的夹角;  $x_5$ ——软弱岩层在巷道中出露的位置;  $x_6$

——围岩工程的性质和使用要求;  $x_7$ ——软弱岩层的矿质性质及其含量;  $x_8$ ——巷道断面面积;  $x_9$ ——收敛位移特征和支护构件信息;  $x_{10}$ ——地下水的作用;  $x_{11}$ ——围岩的膨胀性或塑性流变特征。

上述的各决策因素在支护设计与决策过程中起着不同的作用。首先是根据围岩的坚硬性、完整性、软弱结构面性质、原岩应力、地下水、爆破振动等方面的因素对岩体进行分级分区; 然后视各级分区上的岩体结构类型、软弱结构面情况、地下水作用以及工程因素分区情况, 分阶段进行支护设计与决策; 再利用锚杆或喷层信息及围岩位移信息识别支护效果, 应用文献[11]提供的启发式数学模型调整支护方案, 以确定最终支护时机。

## 5 知识库的建立

知识库是领域知识的存贮器, 是专家系统的重要组成部分。知识库的建立既要考虑知识的完备性, 又要考虑作为计算机软件的一部分的表达特征。

对于采矿巷道围岩支护设计这一解题目标而言, 知识库应能反映出巷道围岩的地质条件、围岩在开挖后的稳定特征及其与支护之间的关系、特定区域地质条件下的支护要求以及领域专家多年工作积累的经验与知识。

支护设计知识库的建立始于 1988 年, 先后经历了问题的确定、知识的识别、信息采集、概念化、形式化、实现与测试几个阶段。这里主要讨论知识结构的识别与知识获取, 以及知识的概念化与形式化, 实现与测试则将在以后讨论。

### 5.1 知识的识别

在与领域专家充分交谈的基础上, 我们认为采矿巷道围岩支护设计领域的问题具有以下特征:

(1) 可分解性 支护设计是一个多因素相互影响的复杂决策问题, 它可以分解成若干个子问题, 问题的求解归结为子问题的求解。问题与子问题之间存在着分解与求解的关系(图 2)。通过分解关系, 可实现父问题到子问题的分解; 而通过求解关系, 则可实现由子问题的属性值求父问题的属性值。

(2) 多样性 支护设计领域知识十分丰富, 有分解知识, 求解知识和求解策略知识, 其知识结构如图 3 所示。分解知识是如何把复杂的支护设计分解成若干个子问题求解的知识; 求解知识是指与问题求解有关的知识; 求解策略知识是控制求解知识的知识; 求解方法是指求解问题的具体方法, 包括逻辑推理方法和算法模型方法; 属性值指属性的取值及其类型, 如数值型、向量、文字或更复杂的数据结构; 属性描述可用以描述问题的各个属性。

(3) 当支护设计存在着多种求解方法冲突集时, 从中择一而解决冲突的途径仍需要依靠专家经验, 本系统有解决冲突的功能。

(4) 支护设计的各个子任务是相互独立的。尽管支护设计过程中各个子任务之间相互联系, 但每一个子任务有其一定的独立性, 前面子任务的输出为后面子任务的输入。

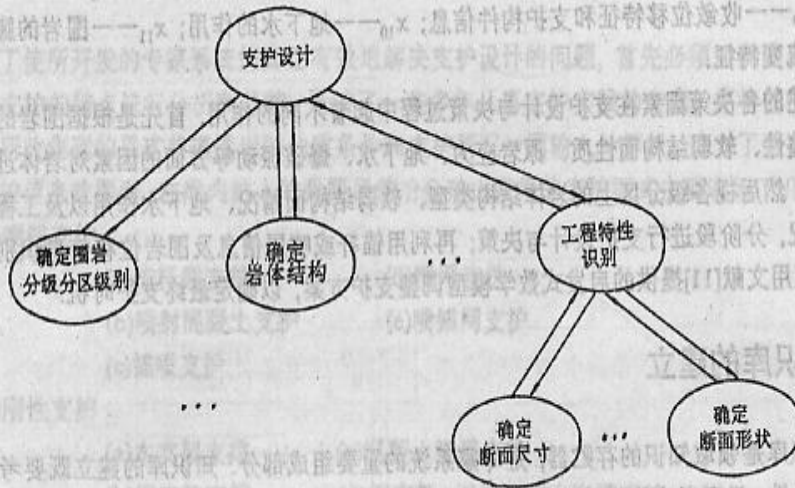


图 2. 支护设计问题的分解与求解关系  
 Fig 2. Decomposition and solving relation of problems

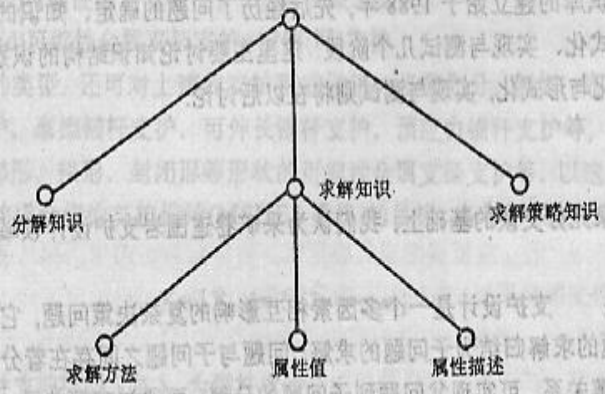


图 3. 支护设计领域知识结构图  
 Fig 3. The structure of domain knowledge

5.2 信息(知识)的采集

知识获取是从具有丰富经验的专家那里抽取启发式知识的过程。在现实生活中,一个能有效地解决问题的专家却不一定能有效地组织他的知识。这正是导致知识获取是建立专家系统的瓶颈问题的主要原因。

本知识库中的知识主要通过以下几种方式获取:

- (1) 在专家的指导下, 直接从教科书、技术规范 and 标准、技术报告和其它收集到的资料中总结部分知识。虽然这样获取的知识大部分是公开性的知识, 但它们却是支护设计所

必要的。

(2) 通过现场实测和取样, 充分获取反映岩体特性的基本参数。

(3) 向专家本人介绍知识工程的基本概念和基本方法, 帮助专家总结他们的知识。这实际上是一个诱导专家对以往经验加以回忆并表达的过程。专家愈有经验, 解决问题的能力就愈强, 但描述他的思维过程就愈难。因此, 为了使专家能有效地进行回忆和表达, 必须做到以下几点:

(1) 提供有利于专家回忆的线索和意境(启发式回忆);

(2) 每次回忆的范围尽可能小, 回忆的目标尽可能具体;

(3) 专家每次回忆经过的中介要尽可能地少。

根据图 3, 采用分级分层抽取知识。每次只向专家提一个父问题(或子问题), 即图 2 中的某个节点和它的直接后继之间的内容。通过其上下节点的关系提供上下文意境, 从而大大缩小了专家每次回忆的深度或宽度。

### 6 MSDES 系统构造

#### 6.1 系统结构

MSDES 的总体结构可用图 4 所示的信息流表示。

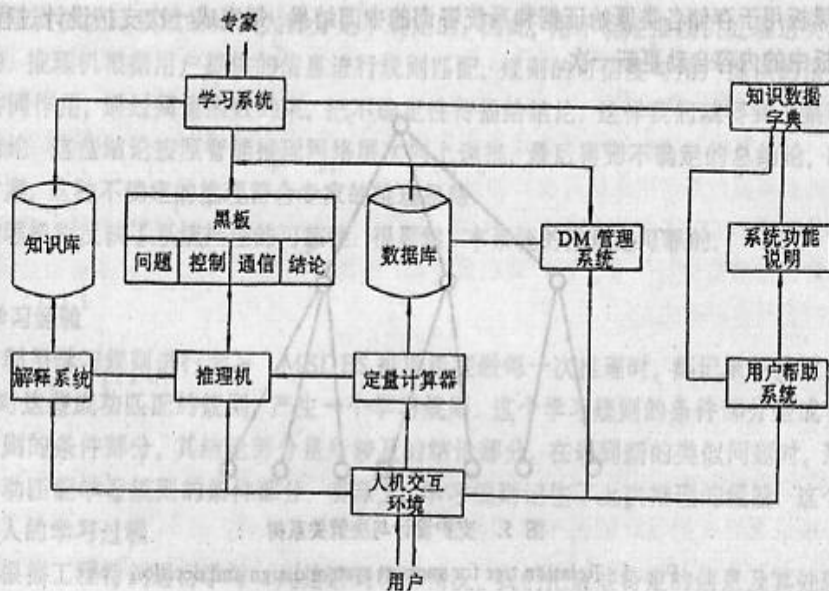


图 4 MSDES 系统结构

Fig. 4 Structure of MSDES



### 6.2 知识库

MSDES 系统综合了国内一些专家进行支护设计的方法和过程的知识经验,其中包括该领域的一般性知识和专门性知识。这些知识是 MSDES 系统赖以取得高性能的基础。这些知识主要是规则、事实、图表以及计算式等,具有多阶段多层次等特点。根据知识的这些特征,我们采用广义多级综合知识表达模式来表达领域知识。这个综合表达模式集框架结构、规则、教学模型、图形模型于一体。这里的多级指的是支护设计推理知识分为元级和目标级两级。推理知识用产生式规则表示,其形式为:

IF <条件> THEN <结构> 不确定度  $\alpha$

其中,不确定度  $\alpha$  描述了规则条件对结论的重要程度(可信度),在一定程度上也反映了各决策因素在不同条件下的权值问题。例如,知识库中有一规则:

如果 结构面微张开,且结构面为岩屑充填,那么 结构面结合程度较差,且不确定度  $\alpha = 0.75$ 。用对应形式的 Turbo Prolog 语言谓词规则集合存储在计算机中形成系统的知识库。

每个规则均可用“与或树”描述,所有规则形成一棵倒立的规则关系树。整个知识库以支护设计的具体方案为目标,以围岩地质生产条件为信息源,以支护的基本类型为中间运行节点(图 5)。知识库中不同层次上的节点(结论)通过产生式规则相互联系。

### 6.3 黑板

黑板用于存储各类原始证据和系统咨询的中间结果。每完成一次支护设计过程,系统将黑板中的内容自动更新一次。

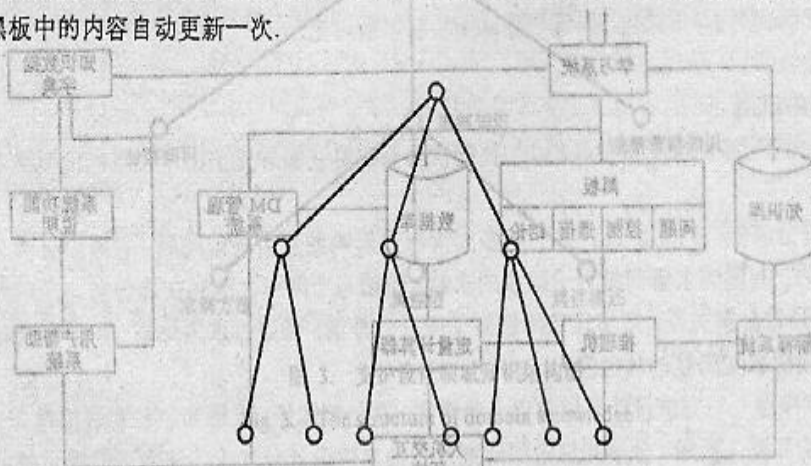


图 5. 支护设计与决策关系树

Fig. 5 Relation tree for support system design and decision

### 6.4 支护设计信息数据库

MSDES 系统还专门提供了供查询、分析与处理的各种信息数据库。

6.4.1 特殊处理数据库 专门存储设计中出现的特殊情况,以及解决这些特殊情况的措施及其成功性。本数据库是专为解决难点而设置的。



**6.4.2 支护设计事例库** 存储采矿巷道围岩地质生产条件、支护类型和参数、施工方法及支护效果。

**6.4.3 信息编码库** 存储各种信息的编码。各数据库具有各自的参数,各参数均具有特定的属性和类型。

## 6.5 推理机制

专家系统解决问题的能力取决于专家知识的水平和推理机制的科学性,系统的核心部分是知识库和推理机制。MSDES系统采用了以下推理机制。

**6.5.1 缩小证据搜索空间策略** MSDES系统在每一推理过程中利用启发性知识正向提出反向推理的假设。随着推理的进行,推理机将处理完的证据从证据搜索空间中撤消,后续的推理将在新的证据搜索空间中进行。这实质上是使反向推理过程中深度优先搜索的深度变浅或宽度变窄,从而提高搜索效率。

**6.5.2 元规则控制策略** MSDES系统在推理时不仅使用了一般规则,还使用了一种控制规则的规则,称作元规则。元规则也是用产生式规则表示的,如:

IF 围岩稳定性分级级别已知,且岩体结构已知,

THEN 使用规则集合 B。

**6.5.3 不确定推理** MSDES具有强有力的推理能力,特别是根据不精确或模糊前提推理的能力。

由于支护设计领域的知识大部分是不确定的,因此,用不确定推理机处理这类问题是合适的。推理机根据用户提供的信息进行规则匹配,规则的可信度与用户提供的信息的可信度共同作用,通过阈值函数约束,把不确定性传播给结论。这样我们就得到了某种不确定的结论。这些结论按照智能推理网络层次向上递推,最后得到不确定的总结论,即支护设计方案。这种不确定的推理符合专家的推理思路。

推理机制反映了系统推理的可靠性。很显然,本系统的推理是可靠的。

## 6.6 学习经验

**6.6.1 利用学习规则进行学习** MSDES推理机在做每一次推理时,都记录下推理成功的规则,对这些成功匹配的规则,产生一个学习规则。这个学习规则的条件部分是成功推理时各规则的条件部分,其结论部分是所涉及的结论部分。在遇到新的类似问题时,系统就只需自动匹配学习规则的条件部分。实际上,学习规则记住了上次推理的经验。这个过程类似于人的学习过程。

**6.6.2 根据工程特例进行学习** 凡是遇到特殊情况,我们把这些特定的信息及其处理方法存储在特殊处理数据库中。以后遇到类似的问题,我们可以调用这个特殊处理数据库对工程进行支护设计和处理。这种学习符合专家知识积累的功能。

## 7 工程应用实例

武钢程潮铁矿为接触交代型的砂卡岩矿床, 矿石平均容重为  $3.75 \text{ t/m}^3$ , 东区有 I、II、III 三个矿体, 目前开采的是 II 号矿体, 所采用的采矿方法为分段崩落采矿法, 阶段高度 70 m, 分段高度 8—14 m, 进路间距为 10 m, 采区长度 40—60 m, 有 4—6 条进路, 现阶段水平为 -220 m 水平, 在该水平 6 川—9 川, 由于 ① 裂隙断层发育, 有 5 条主要断层斜交通过进路、川脉与联络巷; ② 进路采用菱形交错布置, 上几分段残采不全, 应力沿矿柱集中向下传递, 引起局部应力集中; ③ 爆破振动产生动载; ④ 支护不及时、施工质量不好等几方面原因, 造成进路破坏严重, 有时掘不出进去, 有时整条进路被丢掉, 据不完全统计, 29<sup>#</sup>—34<sup>#</sup> 进路冒落长度达 150 m, 37<sup>#</sup>—39<sup>#</sup> 进路冒落长度 20 m, 41<sup>#</sup>、42<sup>#</sup> 进路冒落长度 70 m, 45<sup>#</sup>、46<sup>#</sup> 进路冒落长度 30 m, 冒落高度 0.8 m 到 15 m 不等, 其中冒落高度大于 3 m 的有 5 处, 小于 3 m 的有 10 多处, 本文将 MSDES 系统应用于这种复杂情况下的回采进路支护设计。

首先通过工程地质调查和现场试验, 充分获取岩体特性参数, 并建立数据库系统, 利用获得的岩体信息, 综合考虑地下水条件以及工程和生产(爆破振动及上几分段的残采不全)因素, 对矿岩进行稳定性分级分区, 建立分级分区图, 然后分区进行支护设计与决策, 系统推荐的支护型式为喷锚支护, 在破碎带、进路与联络巷交叉处采用超前锚杆掘进, 按 IV、V 类分区岩体设计、施工, 对于特别松软的地段, 必要时可增设可缩性金属支架, 采用简易光面爆破掘进, 支护施工的要点在于适时、有效, 系统推荐的锚杆为管缝式摩擦锚杆, 一是因为它能主动加固岩体, 提高岩体的  $c$ 、 $\phi$  值; 二是可以避免砂浆不注满等支护质量问题, 可使支护能较快地起到稳定围岩的作用, 一年多的实践表明, 采用管缝式摩擦锚杆支护的效果要比采用砂浆锚杆支护的好。

为了说明 MSDES 具有广泛的有效性, 我们还对其它一些矿山如莱芜铁矿、抚顺龙凤煤矿等的部分巷道进行了支护设计与决策咨询, 咨询结果表明, 用 MSDES 进行金属矿山巷道支护设计是可行的。

## 8 讨论

在现场勘察测试和全面研究不同因素对支护设计的影响的基础上, 本文提出了合理进行采矿巷道围岩支护设计的基本观点和原则, 并付诸于实践, 在 SUN 386 计算机上用 Turbo Prolog 智能推理语言研制出 MSDES 系统, 利用该系统对程潮铁矿等矿区的部分巷道进行了支护设计咨询, 咨询结果表明, 用 MSDES 进行采矿巷道围岩的支护设计是可行的, MSDES 的研制不仅可以作为围岩支护专家在实践工作中的一个智能助手, 而且是对支护设计方法的一种有益的尝试, 所以我认为, 将人工智能技术应用于采矿围岩支护设计而研制出的 MSDES 具有一定的理论价值和实用价值。



致谢 感谢李北权教授、王维钢副教授、赵文博士、施晓博讲师、武钢矿研所郭仲明和陈清运工程师、程潮铁矿领导、龚亲容科长以及其他一些同志在现场测试方面给予作者的支持和帮助。

## 9 参考文献

- 1 林韵梅等. 数值分类方法及其在岩石力学中的应用. 沈阳: 东北工学院出版社, 1989.
- 2 郑颖人等. 地下工程喷锚支护设计指南. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
- 3 邢念信等. 坑道工程围岩分类与支护设计. 岩石力学与工程学报, 1986, 5(4): 359-376.
- 4 李中林. 矿山岩体工程地质力学. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- 5 林尧瑞等. 专家系统原理与实践. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- 6 Borland International Inc. <Turbo Prolog> 4585, Scotts Valley Drive, Scotts Valley, CA, 95066, USA, 1984.
- 7 Henry Jarobs. Expert systems: how the inference engine works. Texas Instruments Journal, 1985, 2(4).
- 8 King R L. Expert system models applied to mine geologic data. Pro. 3rd Conf. on the Use of Computers in the Coal Industry. West Virginia Uni, Morgantown, Wu, 1989.
- 9 李效甫等. 煤矿回采巷道支护形式与参数合理选择的专家系统. 煤炭科学技术, 1990, (3): 28-32.
- 10 张清等. 铁路隧道围岩分类的专家系统. 见: 岩石力学在工程中的应用, 北京: 知识出版社, 1989, 289-295.
- 11 冯夏庭. 巷道支护优化设计的智能系统研究. 东北工学院博士学位论文, 1991, 10.

## AN EXPERT SYSTEM FOR THE DESIGN OF SURROUNDING ROCK SUPPORT SYSTEM IN MINE ENTRIES

Feng Xiating Lin Yunmei

(Northeast University of Technology, Shenyang 110006)

### Abstract

In an attempt to make full use of the experience of experts in the interpretation of geomechanical information and in the design of surrounding rock support systems, an expert system for the design of surrounding rock support system in mine entries, called MSDES, is developed in this paper. This system adopts uncertain inference strategy to make inference and to get approximate conclusions from uncertain and incomplete evidences. In addition, this system possesses the functions of explaining the process of reasoning, learning experience, etc.

**Key words:** expert system, design of surrounding rock support system in mine entries.