

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0001-06

# 软岩巷道锚注支护智能设计专家系统及应用

王连国, 陆银龙, 孙小康

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 软岩巷道锚注支护设计是一个涉及水文地质、工程地质、开采条件、岩石力学等诸多因素的复杂非线性难题。针对这一难题, 将人工智能领域中专家系统技术与煤矿软岩巷道锚注支护领域专家理论研究成果、实践经验相结合, 提出了软岩巷道锚注支护设计专家系统结构模型。基于软岩巷道锚注支护工程知识的特点, 建立了软岩巷道围岩地质力学性质知识库、软岩巷道锚注支护设计工程案例知识库以及软岩巷道锚注支护设计专家知识库; 同时, 运用计算模式推理、BP神经网络推理以及产生式规则推理等3种推理策略, 构建了锚注支护专家系统的核心推理机, 实现了对软岩巷道锚注支护方案与参数的优化设计。将该专家系统应用于淮北矿区某矿井软岩巷道锚注支护设计中, 显著地提高了软岩巷道锚注支护结构和参数选择的科学性与合理性, 有效地维护了该软岩巷道围岩的稳定。

**关键词** 软岩巷道; 锚注支护; 专家系统; 智能设计

**中图分类号** TD 31      **文献标志码** A      **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.001

## Intelligent expert system for designing bolt-grouting support of soft-rock roadways and its applications

WANG Lianguo, LU Yinlong, SUN Xiaokang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** The bolt-grouting support design for soft rock roadway is a complicated non-linear problem which relates to many factors, such as hydrogeology, engineering geology, mining condition, rock mechanics, etc. To solve this problem, expert system technology in artificial intelligence field has been combined with theoretical research results and practical experience of soft rock roadway bolt-grouting support, due to which an intelligent expert system model for bolt-grouting support design of soft rock roadways has then been proposed. Based on the knowledge of soft rock roadway support engineering, the database of geomechanical properties of soft rock roadway, the database of project cases of soft rock roadway bolt-grouting support design and the database of expert experience knowledge of soft rock roadway bolt-grouting support design have been established. Furthermore, by using three kinds of reasoning strategies (theoretical calculation, BP-ANN and production rule), the core reasoning mechanism of the proposed expert system has been built to optimize the design of the parameters of bolt-grouting support for soft rock roadways. The proposed expert system has then been employed to design a soft

收稿日期: 2014-01-13

责任编辑: 王江涛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046905); 国家自然科学基金项目(51274191); 教育部博士点基金项目(20130095110018)

作者简介: 王连国(1964—), 男, 山东省高唐县人, 教授, 博士生导师, 从事工程力学与采矿工程、岩土工程交叉学科方面的研究。

E-mail: lgwang@cumt.edu.cn

Tel: 13115225568

rock roadway bolt-grouting support for a soft rock roadway in Huaibei coal mine area and the scientificity and reasonability of the selected parameters of bolt-grouting support for this roadway has been significantly improved. This system has also effectively maintained the stability of the soft rock roadway in the zone.

**Key words** soft rock roadway; bolt-grouting support; expert system; intelligent design

软岩巷道锚注支护技术是一种基于主动支护原理的联合支护方式,其基本原理是利用锚杆与注浆相结合的方法,实现锚、注一体化,将松散破碎的围岩胶结成整体,改变围岩内部松散结构,提高围岩的强度和承载能力,进而增强锚杆支护效果<sup>[1-2]</sup>。大量的工程实践表明,锚注支护技术是改善和维护软岩巷道围岩稳定性的有效方法之一<sup>[3-4]</sup>。然而,尽管目前国内外学者已经对锚注支护理论与技术进行了深入的研究,但是由于煤矿现场工程地质条件的复杂性以及现场工程技术人员数学、力学知识水平的限制,大量的软岩巷道锚注支护新成果不能被很好地运用于现场工程实际中。目前,绝大多数矿区对软岩巷道锚注支护设计仍主要依据经验类比的方法进行,无法用定量或统一的方法来设计锚注支护参数,从而导致锚注支护效果不能得到充分发挥,软岩巷道围岩稳定性不能得到有效保障。

研究表明,软岩巷道锚注支护设计是一个涉及水文地质、工程地质、开采条件、岩石力学等诸多因素的复杂问题,目前还很难在锚注支护与这些因素之间建立统一、合理的数学模型,属非线性问题。因此,将人工智能领域中专家系统技术<sup>[5-6]</sup>应用到软岩巷道锚注支护设计中具有重要的理论和生产应用价值。目前,国内外学者对专家系统应用于煤矿地下巷道支护设计这一课题已进行了大量研究和实践,研制出了很多巷道支护设计专家系统,如冯夏庭等<sup>[7]</sup>利用 Turbo Prolog 语言开发了采矿巷道围岩支护设计专家系统(MSDES),何水源等<sup>[8]</sup>研制了一个具有多模块的锚喷支护设计专家系统(SBSDES),李效甫等<sup>[9]</sup>开发了回采巷道支护形式与参数合理选择专家系统,以及其他一些研究<sup>[10-12]</sup>等。但是,现有的这些专家系统涉及的对象仅是煤矿巷道锚杆支护,而对煤矿软岩巷道锚注支护则没有涉及。

为此,本文提出一种专门针对煤矿软岩巷道锚注支护设计的智能专家系统。该系统将人工智能技术与煤矿软岩巷道锚注设计相结合,在充分收集软岩巷道锚注支护专家的丰富经验以及地质学和岩石力学信息知识的基础上,构建锚注支护设计知识

库,并依据一定推理机制来模拟“专家”思维,进行软岩巷道锚注支护技术方案与参数的设计和优化,最后根据设计结果自动进行锚注支护设计报告编制和工程施工布置图形绘制。该系统对于实现软岩巷道锚注支护设计的科学化、规范化和系统化,促进锚注支护技术的健康发展具十分重要的意义。

## 1 软岩巷道锚注支护设计专家系统结构模型

基于面向对象编程和人工智能专家系统的基本原理,并结合软岩巷道锚注支护设计的基本过程,建立软岩巷道锚注支护设计专家系统结构模型,如图 1 所示。该系统模型结构主要包括 4 个部分,即人机界面模块、知识库模块、推理机模块和后处理模块等。

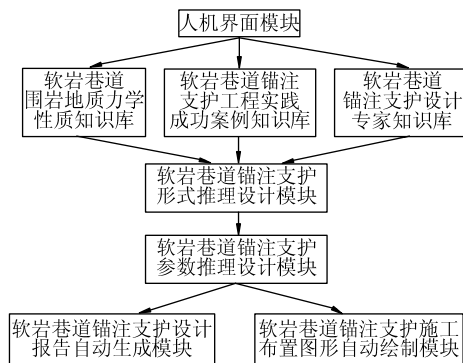


图 1 软岩巷道锚注支护设计专家系统结构模型

Fig.1 The expert system model for soft rock roadway bolt-grouting support design

### 1.1 人机界面模块

界面设计模块主要包括启动、地质力学参数输入、数据库存取等操作。软岩巷道锚注支护专家系统软件的使用对象为矿区现场工程技术人员,因此在进行界面设计时需遵循以下原则,即易用性、低出错率、合理性、高适应性和美观性等,从而使得用户自如地完成操作,而用户不需要有较高的计算机专业知识和技能。本专家系统基于 VC++ 中的“对话框”架构平台,建立一个能够被矿区工程技术人员理解的界面,实现了软岩巷道锚注支护设计

的基本输入与输出功能。软岩巷道的原始数据输入及锚注支护参数设计的系统界面如图 2 所示。

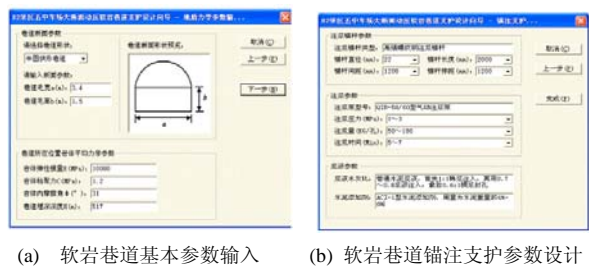


图 2 软岩巷道锚注支护设计专家系统人机交互界面  
Fig.2 The man-machine interface of expert system for designing the bolt-grouting support of soft rock roadway

1.2 知识库模块

知识库是软岩巷道锚注支护智能设计支护专家系统的核心，它直接决定系统设计结果的合理性。通过对淮北矿区、皖北矿区等 100 余对软岩巷道锚注支护基本情况的深入调研分析，将收集到的软岩巷道锚注支护设计经验与知识归纳为 3 个方面，即软岩巷道地质力学参数知识、一次锚喷支护知识以及二次锚注支护知识，如表 1 所列。

表 1 软岩巷道锚注支护设计专家知识整理  
Table 1 The expert knowledge arrangement for soft rock roadway bolt-grouting support design

类 别	项 目	具体内容
软岩巷道地质力学参数	巷道类型	新掘巷道，计算潜在松动破坏范围；返修巷道，确定巷道破坏类型
	采动影响	采动影响等级
	岩体裂隙	岩体裂隙发育等级
	巷道断面	断面形状、断面尺寸
	围岩性质	围岩弹模、黏聚力、内摩擦角等
一次锚喷支护	围岩应力	巷道埋深、水平应力等
	锚杆(索)结构	锚杆(索)类型、直径、长度
	锚杆(索)布置	锚杆(索)间距、排距、安装预紧力
二次锚注支护	护表构件	钢筋网、钢筋梯梁、混凝土喷层等
	注浆锚(索)杆结构	注浆锚(索)杆类型、直径、长度
	注浆锚(索)杆布置	注浆锚(索)杆布置位置、间距、排距
	注浆参数	注浆时间、浆液扩散半径、注浆量、注浆压力、注浆泵、浆液水灰比、水泥添加剂

针对表 1 给出的软岩巷道锚注支护工程知识的特点，在专家系统中分别按照“基础知识”和“推理知识”2 种模式进行存储。其中，基础知识主要用于存储描述对象的属性或者条件的知识，如“桃园煤矿 10 煤直接顶板的中砂岩的单轴抗压强度是 41.87 MPa”。这类知识的存储方式很简单，通常只需一张二维关系表就能实现在数据库中的存储。推

理知识是将基础知识通过一定的逻辑关系组合起来而形成的知识，它主要通过对矿区井下实际调查和访问矿区现场具有丰富实践经验的工程技术人员以及专家等途径获得，是专家系统知识库的核心，如“若软岩巷道围岩潜在松动破坏范围  $R_p>3.0\text{ m}$ ，则巷道需采用二次锚注加固技术”。对于推理知识，采用产生式规则法(Production Rules)来实现其在数据库中的存储，其基本模式为：IF <前提> THEN <结论>。

根据以上定义的软岩巷道锚注支护知识的基本类型以及表达方式，通过充分收集和利用现有的软岩巷道锚注支护设计方面的知识、经验和教训，同时吸收当前国内外巷道锚注支护方面的最新研究成果，并采用 Microsoft Access 关系型数据库作为数据存储和管理的后台，建立了软岩巷道锚注支护智能设计支护专家系统的 3 个知识库，包括软岩巷道围岩地质力学性质知识库、软岩巷道锚注支护设计工程案例知识库、软岩巷道锚注支护设计专家知识库。其中，软岩巷道围岩地质力学性质知识库主要用于存储软岩巷道的基本工程地质概况数据、地应力数据、围岩力学性质数据、围岩结构性质数据等；软岩巷道锚注支护设计工程案例知识库主要用于存储全国范围内各大煤矿成功的软岩巷道锚注支护工程实践的案例资料，包括软岩巷道的基本工程地质资料、软岩巷道的锚注支护形式以及支护参数等；软岩巷道锚注支护设计专家知识库主要用于存储煤矿软岩巷道锚注支护领域中知名专家与学者的设计经验与知识。

1.3 推理机模块

推理机是专家系统的另一个核心部分，软岩巷道锚注支护专家系统的水平和实用化程度取决于推理机制的科学性。根据软岩巷道锚注支护工程专家在处理锚注支护问题时的基本思维过程，并结合目前流行的专家系统推理机的设计方法，设计了锚注支护专家系统的 3 类基本推理机制，即计算模式推理、BP 神经网络推理和产生式规则推理。

计算模式推理是一种正向推理的形式，方法比较简单，即由用户输入所需的条件，然后系统自动搜索知识库中相应的计算模式，并经过相应的计算后即可得出所需的结果。例如，对于新掘巷道，可用下式计算巷道围岩潜在的松动破坏范围：

$$R_p = R_0 \left[ \frac{(q + c \cdot \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cdot \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}$$

式中:  $R_0$  为软岩巷道半径, m;  $q$  为原岩应力, MPa;  $c$  为岩体黏聚力, MPa;  $\varphi$  为岩体内摩擦角, ( $^\circ$ )。该公式已被作为一种计算模式固化到程序中, 当用户输入一些基本的必需参数以后, 系统会自动进行相应推理和搜索, 找到该模式并进行计算, 然后将计算结果返回给用户或者存入数据库。

BP 神经网络推理是系统基于 BP 神经网络的基本原理<sup>[13-14]</sup>, 以软岩巷道围岩地质力学参数作为输入层, 以锚注支护参数作为输出层, 利用知识库中各大煤矿成功的软岩巷道锚注支护工程实践的案例作为学习样本, 通过对 BP 网络的学习和训练, 当网络误差满足一定要求后, 可实现对软岩巷道锚注支护参数的准确预测。

产生式规则推理是本专家系统中最主要的一种推理机制, 它利用知识库中的专家经验知识, 并结合数据库中的已知事实, 按照“IF-THEN”模式进行推理。

根据以上这 3 种基本的推理机制, 并结合软岩巷道锚注支护专家系统的具体功能与要求, 设计了如图 3 所示的软岩巷道锚注支护形式和支护参数推理机。该推理机能够较好地模拟软岩巷道锚注支护工程专家的思维过程, 并能够对一般情况下的软岩巷道锚注支护问题做出判断和决策, 具有较高的准确性和可靠性。

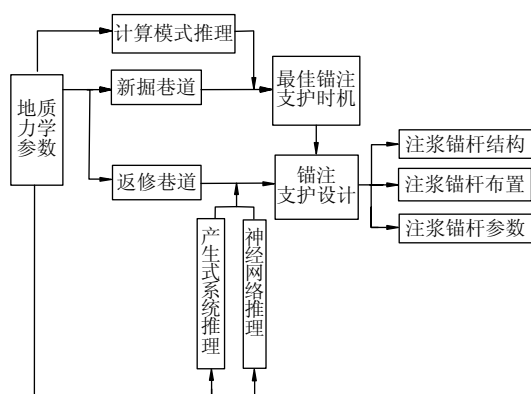


图 3 软岩巷道锚注支护设计专家系统的推理机

Fig.3 The reasoning mechanism of expert system for soft rock roadway bolt-grouting support design

#### 1.4 后处理模块

系统的后处理模块主要实现软岩巷道锚注支护设计报告自动生成和软岩巷道锚注支护施工布置图形绘制两大功能。其中, 软岩巷道锚注支护设计报告自动生成功能是利用 Microsoft Office Word 软件提供的 OLE Automation 自动化程序接口, 建

立专家系统与 Microsoft Office Word 软件之间的数据交换接口, 然后系统自动地将锚注支护设计过程中所涉及的全部计算公式、分析图表以及推理解释文字等内容填写到支护设计报告的模板中, 最后快速地输出生成准确、规范的软岩巷道锚注支护设计报告。软岩巷道锚注支护施工布置图形绘制功能是利用 AutoCAD 软件提供的 ActiveX Automation 自动化界面技术<sup>[15]</sup>, 建立专家系统与 Auto-CAD 软件之间的数据交换接口, 然后系统自动地将软岩巷道锚注支护设计方案与参数输入到 AutoCAD 软件中, 最后快速地输出规范的软岩巷道锚注支护施工布置平面图、断面图以及支护材料消耗图表等。

## 2 软岩巷道锚注支护设计专家系统应用实例

### 2.1 工程地质概况

淮北矿区某矿井 82 采区五中车场的大断面动压软岩巷道位于井田西南部, 井下位置在 82 采区中下部, 拨门于 82 采区轨道上山, 跨过 82 采区运输上山(两巷道净岩柱设计为 2.6 m), 与 82 采区回风上山贯通。该巷道井下标高-521.4~-514.6 m, 位于 72 煤层底板下 30~50 m 范围内, 巷道穿过岩层岩性以泥岩和细砂岩为主, 次为薄层粉砂岩、砂岩, 并穿过 1 层铝质泥岩, 局部可见 1~2 层煤线。岩层倾角  $6^\circ\sim 10^\circ$ , 平均  $7^\circ$ , 局部为薄层中粒砂岩, 砂岩裂隙较为发育。巷道断面为半圆拱形, 净宽 3.4 m, 净高 3.3 m。巷道所处区域局部构造复杂, 岩石破碎, 岩性条件比较差, 地压较大, 需对该巷道采用锚注联合支护技术进行治理。

### 2.2 软岩巷道锚注支护设计专家系统决策

为确定该大断面动压软岩巷道的合理锚注支护方式与参数, 采用研制的软岩巷道锚注支护设计专家系统进行推理、决策。首先, 依据该软岩巷道的具体工程地质条件, 输入系统所需的基本参数, 如表 2 所列。

系统根据已输入的围岩地质力学参数, 启用计算模式推理机制, 计算得出围岩潜在松动破坏范围  $R_p=3.17$  m。据此, 结合该巷道的变形破坏特点, 系统启用产生式规则推理机制和神经网络推理机制, 推荐以锚注为核心的锚、喷、索、注联合支护方案来维护该巷道围岩稳定, 并给出了详细的锚注支护参数, 如表 3 所列。依据推理所得的最终锚注支护方案, 系统自动绘制巷道锚注支护施工布置图形, 如图 4 所示, 直接指导井下施工。

表 2 专家系统的基本输入参数

Table 2 The basic input parameters of the expert system

名 称	值
巷道形状	半圆拱形
巷道断面尺寸(毛宽×毛高)	3400 mm×1500 mm
巷道埋深, $H$	517 m
围岩弹性模量, $E$	10 GPa
围岩黏聚力, $c$	1.2 MPa
围岩内摩擦角, $\varphi$	31°
围岩裂隙发育程度	较发育
采动影响程度	中等

表 3 专家系统推荐的锚注支护参数

Table 3 The bolt-grouting support parameters from the expert system

名称	具体参数
高强 螺纹钢锚杆	规格 $\Phi 20$ mm×L2000 mm; 间排距 700 mm×700 mm; 锚固剂 2 卷
树脂锚索	规格 $\Phi 15.24$ mm×L6000 mm; 间排距 2400 mm×3200 mm; 锚固剂 4 卷
喷射混凝土	强度 C20; 初喷层厚 50 mm; 复喷层厚 50 mm
高强 注浆锚杆	规格 $\Phi 22$ mm×L2050 mm; 间排距 1600 mm×1600 mm; 锚固剂 1 卷 材质为无缝钢管制作, 壁厚 4 mm, 杆体上顺序钻有 $\Phi 6$ mm 注浆孔
注浆参数	注浆材料为 42.5#普通硅酸盐水泥浆液+ACZ-1 型水泥添加剂; 浆液水灰比 0.7:1~1:1; 注浆量为每孔 2 袋水泥; 注浆压力为 2.0~3.0 MPa; 单孔注浆时间为 3~5 min

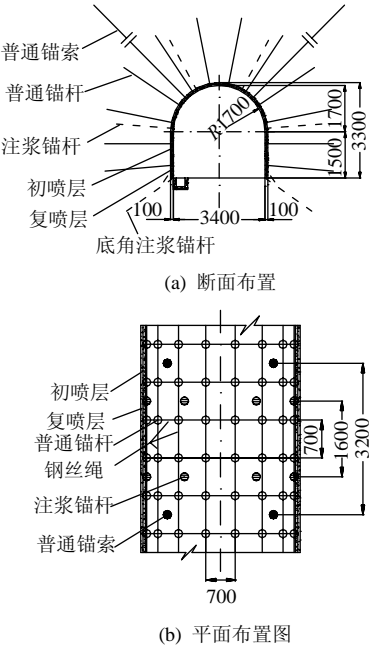


图 4 系统绘制的巷道锚注支护施工布置图 (mm)  
Fig.4 Layout drawing of bolt-grouting support from expert system

2.3 支护效果监测及分析

当采用专家系统推荐的锚注支护方案在现场实施以后, 为掌握锚杆的承载工况、围岩的变形特征以及巷道支护状况, 对巷道支护效果进行了现场监测。表 4 给出了 82 采区五中车场中部 2 个观测断面中的注浆锚杆受力观测结果。可以看出, 注浆锚杆的轴力在 55~68 kN 之间, 注浆锚杆的锚固作用良好。

表 4 注浆锚杆受力观测结果

Table 4 The observed axial force of grouting bolts

观测断面	锚杆编号	初始值/kN	最终值/kN
1#断面	1#	22	58
	2#	21	55
	3#	22	63
	4#	23	65
2#断面	1#	20	55
	2#	25	58
	3#	23	60
	4#	24	62

图 5 为 82 采区五中车场中部 2 个观测断面巷道围岩的表面位移随观测时间的变化曲线。

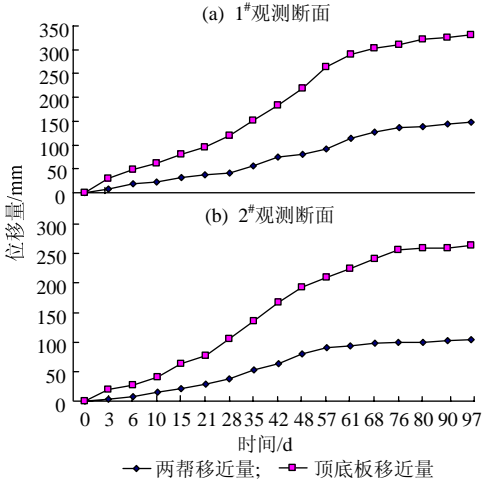


图 5 巷道表面位移观测结果  
Fig.5 The observed displacement of the soft rock roadway surface

从图 5 可看出: 在观测期内 1#观测点处两帮移近量为 148 mm, 顶底板移近量为 331 mm; 2#观测点处两帮移近量为 104 mm, 顶底板移近量为 264 mm。平均日移近量为: 1#观测点两帮移近速度为 1.52 mm/d, 顶底板移近速度为 3.41 mm/d; 2#观测点两帮移近速度为 1.07 mm/d, 顶底板移近速度为 2.72 mm/d, 巷道在成巷 50 d 后基本趋于稳定。这

表明了采用专家系统推荐的锚注支护方案后,巷道围岩变形速度、变形量明显得到控制,基本保持了巷道围岩的稳定,从而也证明了研制的软岩巷道锚注支护设计专家系统的合理性和可靠性。

### 3 结 论

基于人工智能专家系统的基本原理,结合软岩巷道锚注支护设计的基本过程,建立了软岩巷道锚注支护设计专家系统结构模型。针对软岩巷道锚注支护工程知识的特点,在充分收集和利用现有的软岩巷道锚注支护设计方面的知识、经验和教训,同时吸收当前国内外巷道锚注支护方面的最新研究成果的基础上,建立了软岩巷道锚注支护智能设计支护专家系统的 3 个知识库。设计了软岩巷道锚注支护设计的 3 类基本推理机制,即计算模式推理、BP 神经网络推理以及产生式规则推理,据此构建了专家系统的核心推理机,实现了对软岩巷道锚注支护方案与参数的优化设计。结合 Word 软件和 CAD 软件的二次开发技术,实现了专家系统自动生成软岩巷道锚注支护设计报告以及自动绘制巷道锚注支护施工布置图形的功能。将研制的软岩巷道锚注支护智能设计专家系统软件应用于淮北矿区某矿井 82 采区五中车场的大断面动压软岩巷道锚注支护设计中,并进行了现场施工与监测,取得了良好的效果。本专家系统的开发和应用为数字矿山技术的发展提供了有益的参考,同时也为科学、规范、系统地进行软岩巷道锚注支护设计提供了一种新的方法。

### 参考文献:

- [1] 王连国,李明远,王学知.深部高应力极软岩巷道锚注支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2889-2893.  
WANG Lianguo, LI Mingyuan, WANG Xuezh. Study on mechanisms and technology for bolting and grouting in special soft rock roadways under high stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2889-2893.
- [2] 李明远,王连国,易恭猷,等.软岩巷道锚注支护理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2001:19-29.
- [3] 王连国,张连勇,李明好.高应力软岩巷道锚、梁、喷、注支护技术研究[J].矿山压力与顶板管理,2001,18(4):14-15.  
WANG Lianguo, ZHANG Lianyong, LI Minghao. Study on technology for bolting, beam, shotcrete, grouting in soft rock roadways under high stresses[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2001, 18(4): 14-15.
- [4] 刘长武,褚秀生.软岩巷道锚注加固原理与应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000:75-96.
- [5] 冯夏庭,刁心宏.智能岩石力学(1):导论[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):222-226.  
FENG Xiating, DIAO Xinhong. Intelligent rock mechanics(1): introduction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 222-226.
- [6] 尹朝庆,尹皓.人工智能与专家系统[M].北京:中国水利水电出版社,2002:134-209.
- [7] 冯夏庭,林韵梅.采矿巷道围岩支护设计专家系统[J].岩石力学与工程学报,1992,11(3):243-253.  
FENG Xiating, LIN Yunmei. An expert system for the design of surrounding rock support system in mine entries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 243-253.
- [8] 何水源,邓安福.锚喷支护设计专家系统及工程应用[J].重庆建筑大学学报,1997,19(2):36-41.  
HE Shuiyuan, DENG Anfu. An expert system and engineering application for design of bolt-grouting support[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1997, 19(2): 36-41.
- [9] 李效甫,姚建国.回采巷道支护形式与参数合理选择专家系统[M].北京:煤炭工业出版社,1993:216-246.
- [10] 乔春生,魏莉萍.岩石地下工程锚喷支护设计的人工智能方法及其集成[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):781-785.  
QIAO Chunsheng, WEI Liping. Intelligent methods and its integration for bolt-shotcrete support design of under ground rock excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 781-785.
- [11] 肖福坤,孙豁然,刘晓军,等.煤矿巷道支护智能决策系统[J].辽宁工程技术大学学报,2004,23(3):294-295.  
XIAO Fukun, SUN Huoran, LIU Xiaojun, et al. Intelligence decision system for tunnel supporting in coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(3): 294-295.
- [12] 朱川曲,缪协兴,谢东海.软岩巷道支护方式优化的神经网络模型[J].岩土工程学报,2001,23(6):708-710.  
ZHU Chuanqu, MIAO Xiexing, XIE Donghai. A model for optimization of support patterns of soft rock roadway based on neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 708-710.
- [13] 朱大奇.人工神经网络原理及应用[M].北京:科学出版社,2006:68-78.
- [14] 谭云亮,王泳嘉.回采巷道分类指标的神经网络聚类分析模型[J].岩石力学与工程学报,1995,14(2):139-144.  
TAN Yunliang, WANG Yongjia. Neural network mode of cluster analysis for the classification indexes of gate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 139-144.
- [15] 王玉琨.矿图CAD开发技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002:59-75.