

国家自然科学基金 (51404255, 51374198)
国家重点基础研究计划 (973) 项目(2013CB036003)

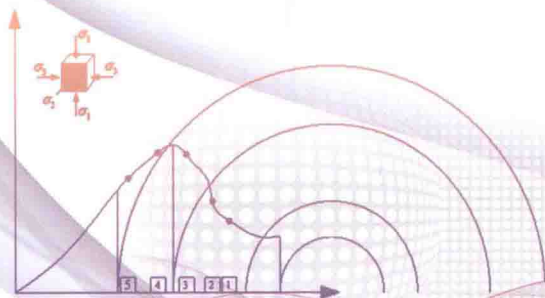
Study on the Fracture Evolution of

Surrounding Rock of Deep Roadway and Its Control Mechanism

深部巷道围岩

破裂演化过程及其稳定控制机理

陈坤福 著



中国矿业大学出版社

深部巷道围岩破裂演化过程 及其稳定控制机理

陈坤福 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书采用大尺度三维模拟试验、原位测试和数值模拟,对深部巷道围岩破坏过程中的应力、变形演化规律和破坏机制进行了探讨,同时对支护结构作用和承载结构形成机理进行了分析,在此基础上,提出了深部高应力巷道破裂岩体的过程控制机理与技术。

本书可为岩土工程相关研究生教学参考,亦可作为从事深部岩土工程研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

深部巷道围岩破裂演化过程及其稳定控制机理 / 陈坤福著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3301 - 1

I. ①深… II. ①陈… III. ①巷道围岩—井壁破裂—研究②巷道围岩—围岩稳定性—研究 IV. ①TD262.5
②TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 240489 号

- 书 名 深部巷道围岩破裂演化过程及其稳定控制机理
著 者 陈坤福
责任编辑 吴学兵
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 188 千字
版次印次 2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着煤炭开采向深部发展,解决深部特殊环境下的巷道稳定问题及减少开采中的灾变事故成为当前面临的主要任务。针对深部工程的复杂性,现有的深部巷道围岩非线性破坏机理相关研究尚不成熟,缺乏对围岩破坏过程的应力、变形等非线性演化规律相关研究。

本书结合国家自然科学基金重点项目子课题“深部采动覆岩移动规律与巷道稳定性控制研究”(50490273)与面上项目“深部巷道围岩变形、破坏全过程及其稳定控制机理”(50674083),以平煤集团四矿千米埋深的巷道为工程背景,采用大尺度三维模拟试验、原位测试和数值模拟,对深部巷道围岩破坏过程中的应力、变形演化规律和破坏机制进行了探讨,同时对支护结构作用和承载结构形成机理进行了分析,在此基础上,提出了深部高应力巷道破裂岩体的过程控制机理与技术。

本书共分为六章,第一章主要介绍了深部巷道开挖与稳定控制研究现状;第二章介绍了能够真实模拟深部巷道开挖和支护物理过程的大尺度三维地下综合模型试验系统和相似材料选择与配比设计;第三章重点介绍了深部巷道围岩破裂演化过程中的应力演化和变形破坏规律;第四章通过数值模拟研究分析了应变软化模型下的围岩破坏规律和支护作用;第五章针对试验中得到的深部巷道分区破裂现象,对其产生的条件和破坏机制作了分析和探讨,并根据深部巷道变形破裂特征提出了相应的控制原理和技术措施;第六章分析了平煤四矿三水平轨道下山的矿压规律,提出了相应的深部巷道围岩控制技术支护设计,验证了相关研究成果的

实用性与可靠性。

深部巷道围岩变形破坏过程是一个非常复杂的非线性过程，本书仅在试验和数值模拟上作了初步探讨与研究，由于所涉及的问题难度大，还有待从广度和深度上进行更多的研究。

该书可供岩土工程相关研究生学习参考，亦可作为从事深部岩土工程研究人员的参考用书。

本书成果主要为博士论文研究成果，恩师靖洪文教授付出了大量的心血，也得到中国矿业大学研究生院的出版资助，在此表示感谢。

由于作者水平所限，本书难免存在缺点和错误，敬请读者不吝指正。

作 者

2016年7月

目 录

1 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 深部巷道开挖与稳定研究现状	3
1.3 需要进一步研究的问题	18
1.4 主要研究内容与方法	19
2 三维模拟试验台系统及试验设计	20
2.1 大尺度三维模型试验台的研制	20
2.2 单元应力计的设计及测试方法	28
2.3 相似准则导出	31
2.4 模型模化设计	35
2.5 相似模型的制作	43
2.6 参数量测	45
2.7 本章小结	51
3 深部巷道围岩破裂演化规律及机理的试验研究	52
3.1 试验规划及研究内容	52
3.2 巷道围岩应力演化规律	54
3.3 巷道围岩内部变形规律	98
3.4 巷道围岩破坏特征与机制	112
3.5 支护作用机理及承载结构特性分析	124
3.6 本章小结	127

4 深部巷道围岩破裂演化规律的数值模拟研究	129
4.1 数值模拟内容及计算模型	129
4.2 应变软化模型概述	132
4.3 采用应变软化模型的围岩应力演化规律	135
4.4 不同残余强度对围岩变形破坏的影响	147
4.5 后期强化模型分析	155
4.6 本章小结	161
5 深部巷道分区破裂化现象探讨及围岩过程控制技术	162
5.1 深部巷道围岩分区破裂化探讨	162
5.2 深部巷道围岩过程控制机理与技术	182
5.3 本章小结	193
6 深部巷道围岩控制技术及工程应用	194
6.1 工程概况	194
6.2 原位实测分析	194
6.3 巷道支护方案设计	205
6.4 支护效果	209
6.5 本章小结	211
参考文献	212

1 绪论

1.1 问题的提出

随着能源、交通、国防等国民经济各行业的迅速发展,全球性的地下工程的开发利用势在必行,1991年东京“城市地下空间利用”国际学术会议通过的《东京宣言》提出:21世纪是人类地下空间开发利用的世纪^[1]。目前国防、冶金、交通、煤炭、水利等各行业地下工程的规模和深度均呈增大趋势,深部地压越来越突出,特别是煤炭行业,矿井开采深度还在逐年增加^[2-4]。近年来,国外一些主要产煤国家均已进入深部开采,其中开采深度较大的德国,目前平均采深已超过900 m,最大采深达到1 443 m,超过1 000 m采深的工作面占20%;在1 000 m以上采深的国家还有俄罗斯、波兰、日本、比利时等国。我国其他矿种的开采也在向深部发展,如金川镍矿、铜陵狮子山铜矿、抚顺红透山铜矿等开采深度已超过千米。在水利建设中,锦屏二级水电站引水隧道埋深达2 600 m,金沙江溪洛渡水电站地下厂房设计的最大埋深为700 m,西部开发战略中引水工程遇到的高地应力隧洞稳定问题也日显突出。由此可见,当前的能源开发、水电开发、战略石油储备、核废料地下处置等一系列国家战略性深部工程的建设与规划使得高地应力背景下大型地下工程的稳定性分析成为亟待解决的关键技术。

深部开采是采矿业未来发展的必然趋势。伴随着深部矿业发展的一个负面效应就是深井开采困难和事故亦越来越严重。事故起数统计表明,顶板事故是最严重的,事故发生的频率较高,死亡

总人数较多,分别占煤矿事故次数和死亡人数的 50% 和 40% 左右^[5]。导致深部开采中灾变事故出现多发性和突发性的根本原因在于深部岩体处于高地应力、高温、高渗透压以及较强的时间效应的恶劣环境中,从而使深部岩体的组织结构、力学性态和工程响应均发生根本性变化,围岩表现出特殊的非线性力学行为,使得传统的岩体(石)力学理论与分析方法面临着新的挑战。

随着岩体力学、地下工程等多学科快速发展,国内外学者在地下工程岩体非连续性质和状态、岩体卸荷、工程岩体破坏机制、支护理论和支护机理、深埋岩体热-力-水的相互作用、非线性科学及其他软科学理论等方面取得了大量的研究成果,推动了巷道围岩稳定和控制技术的发展。但目前我国已有深部开采的矿井实践表明:现有巷道支护理论和技术更多的是仅从支护前的巷道工程地质条件出发,多数采用静态的观点分析问题,很少从巷道变形的全过程出发,也很少考虑开挖后围岩对支护的动态响应,因而很多高应力巷道稳定性问题都解决得不够理想,如平顶山四矿、铁法矿、平凉新安煤矿等部分深埋(高应力)巷道(如图 1-1 所示)。因

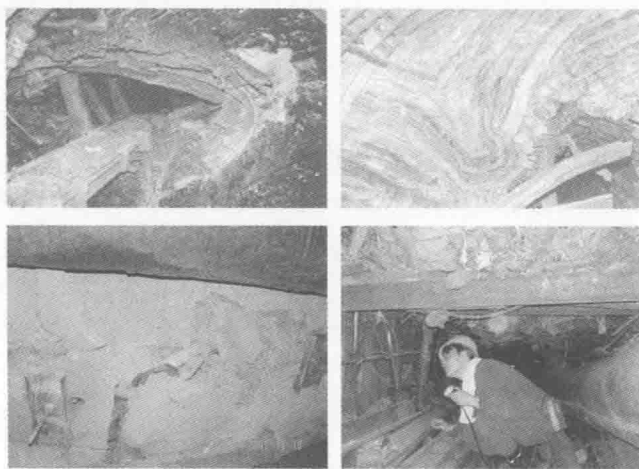


图 1-1 变形破坏严重巷道

此,深入研究巷道开挖、围岩破坏及其破坏后发展全过程决定的支护对象和支护作用机理问题,寻找高应力巷道合理的稳定原理和方法,从而解决严重影响深部高应力巷道围岩稳定的安全和经济效益问题,具有重要的理论和实际应用价值。

1.2 深部巷道开挖与稳定研究现状

1.2.1 深部的界定及工程特点

1.2.1.1 深部的界定

在矿山开采中,一般认为深度超过 600 m 即为深井开采,但对于南非、加拿大等采矿业发达的国家,矿井深度达到 800~1 000 m 才称为深井开采;德国将埋深超过 800~1 000 m 的矿井称为深井,将埋深超过 1 200 m 的矿井称为超深井开采;日本把深井的“临界深度”界定为 600 m;而英国和波兰则将其界定为 750 m。根据目前和未来的发展趋势,结合当前矿山开采的客观实际,大多数专家认为^[6],我国的深部资源开采的深度界定为:煤矿 800~1 500 m,金属矿山 1 000~2 000 m。

上述关于“深部”的概念均以具体的工程深度或地应力值为指标进行定义,在工程应用中具有一定的局限性。何满潮等结合深部工程所处的特殊地质力学环境,通过对深部工程岩体非线性力学特点的深入研究,提出工程岩体开始出现非线性物理和力学现象的深度称之为临界深度(H_{cr})^[6]。其中,工程最先开始出现非线性物理和力学现象(工程围岩第一次出现顶沉、冒顶、缩帮、底鼓等非线性大变形现象或岩爆、冲击地压等)的深度称之为上临界深度(H_{cr1});工程开始出现非线性物理和力学现象突变(工程围岩出现大面积、大范围顶沉、冒顶、缩帮、底鼓等非线性大变形现象或岩爆、冲击地压等)的深度称之为下临界深度(H_{cr2})。且当巷道周边

的应力集中系数 $\alpha=0.5$ 时,临界深度为:

$$H_{\text{cr1}} = \frac{2C}{[1 - (1 + \alpha)\tan \varphi]\gamma} \quad (1-1)$$

式中 C ——岩石的黏聚力, kN/m^2 ;

γ ——上覆岩层平均容重, kN/m^3 ;

α ——地下工程开挖后的应力集中系数;

φ ——岩石内摩擦角, ($^\circ$)。

钱七虎院士则根据对深部工程分区破裂化等响应特征的研究,提出了界定“深部”岩体的范围^[7]。

1.2.1.2 深部地质环境

深部地下工程与浅部工程的明显区别在于深部岩石所处的特殊环境(“三高一扰动”),即高地应力、高地温、高渗透压以及较强的时间效应的恶劣环境中,且受开采扰动明显^[8]。与浅部岩体相比,深部岩体更突显出具有漫长地质历史背景、充满建造和改造历史遗留痕迹等。

深部工程中,由重力引起的垂直原岩应力通常就超过工程岩体的抗压强度(按古典压力理论计算,大于 20 MPa),而由于工程开挖所引起的应力集中水平则更是远大于工程岩体的强度;随着深度的增加,地温以约为 $30\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 的梯度升高,岩体在超出常规温度环境下,表现出的力学、变形性质与普通环境条件下具有很大差别;伴随着地应力和地温的升高,岩溶水压也会升高,使得矿井突水灾害更为严重;另外,受开采引起强烈的支承压力作用,深部巷道围岩压力会以数倍、甚至近十倍于原岩应力升高,从而造成深部围岩表现出软岩大变形、难支护的特征。

据统计^[9],俄罗斯因井深增加而引起的支护压力增加了 $0.8\sim 2\text{ MPa}$,尽管支护的承载能力增加了一倍,费用增加 1.4 倍,但矿井的巷道复修量仍然超过 40% 以上,我国统计的深井巷道翻修率甚至高达 200%,还有巷道因难以维护而最终被遗弃的例子。

由于深部的特殊和恶劣的条件,岩石冲击性行为(岩爆、煤岩突出)的频率、强度、规模几乎和深度成正比增加,灾害性事故越来越频繁,规模越来越大。统计结果表明,800 m 深部以上的巷道有60%存在底鼓倾向,有的深矿底鼓20余年不止,总底鼓量累计达数十米。深部岩石工程问题不仅只是经济上的损失和技术上的困难,由于深部开采引起的围岩破坏事故(片帮、冒落、煤岩突出、崩塌等),占矿山建设、生产事故总数的40%以上。

1.2.1.3 深部岩体力学特点

深部岩体在“三高一扰动”的复杂地质力学环境中,表现出与浅部岩体不同的大变形、非连续与非协调的变形特征。包括微裂缝的产生和发展,原生裂缝的张拉与剪错等各种变形,在高地应力的状态下发生时,它与无初应力或低应力下的介质与块体的相应变形、塑性力学的流变和断裂力学微裂缝的产生发展具有不同的发展模式与表现形态,具有与时间相关的过程性质。南非深部开采实践表明,深部环境下硬岩同样会产生明显的时间效应,且支护极其困难巷道,最大收缩率曾达到了500 mm/月的水平^[10,11]。对于软岩巷道,翟新献、姜耀东等对深井巷道围岩变形的流变特性进行了研究^[12,13];Muirwood提出了一个用岩体的承载因子(岩体强度和地应力的比值)来衡量巷道围岩的流变性^[14],Barla讨论了该参数的适用范围^[15];Aydan等通过对大量日本的典型软岩如泥岩、凝灰岩、页岩和粉砂岩等调查后得出,发生明显流变的巷道围岩承载因子都小于2,且埋深都小于400 m,该准则是否适用于深部硬岩目前尚无定论^[16]。

试验研究表明^[17-19],岩石在不同围压条件下表现出不同的峰后特性。较低围压下表现为脆性的岩石可以在高围压下转化为延性,且脆-延转化通常与岩石强度有关。随着开采深度的增加,岩石破坏机理也随之转化,由浅部的脆性能或断裂韧度控制的破坏转化为深部开采条件下由侧向应力控制的断裂生长破坏,由浅部

的动态破坏转化为深部的准静态破坏,以及由浅部的脆性力学响应转化为深部的潜在的延性行为力学响应^[20]。Singh 等用岩石破坏时的应变值作为脆-延转化判别标准^[19];Kwasniewski 等通过众多砂岩试件的试验数据,对岩石的脆-延转化规律进行了深入研究,系统分析了脆-延转化临界条件,并研究了脆-延转化过程中的过渡态性质^[17];陈颢等认为过渡态中,通常具有脆性破坏的特征,也具有延性变形的性质^[21];而 Ranalli 等则认为当摩擦强度与蠕变强度相等时岩石即进入延性变形状态^[22]。目前这方面的研究大多集中在脆-延转化的判断标准上,而对于脆-延转化的机理却研究较少,目前还没有比较成熟的成果。

深部岩体破坏适合应用非线性的岩石强度准则。Singh 根据大量试验数据,总结了在非常高的侧向应力下的岩石强度准则,提出了一个非线性的岩石强度准则^[1];Shimada 根据试验发现,在 200~280 °C 和不同围压的条件下,花岗岩具有较低的强度值,据此提出了地壳强度结构的圣诞树模型^[23],合理解释了大陆地壳多震层的成因,并给出了地球岩石各种强度的推测曲线;周小平结合 RMR 岩体地质力学分类指标,考虑岩体拉压不同强度特性和中间主应力的影响及剪缩破坏,对 Griffith 强度准则和统一强度理论进行了完善和修正,提出了一种能用于浅部岩体的脆性破坏,也适用于深部岩体的延性或脆性破坏的强度准则^[24]。

1.2.2 深部巷道围岩变形破坏机理研究

1.2.2.1 弹塑性理论研究

岩石力学领域长期以来,对地下工程巷道周围岩石的应力-应变状态变化的研究主要是利用弹塑性力学知识在连续介质力学框架内进行,并划分为破裂区、塑性区和弹性区(如图 1-2 所示),区域状态由岩体的应力场和变形-强度特征值来决定。

Fenner、Kastner、Talober 等人提出的理想弹塑性模型,假设

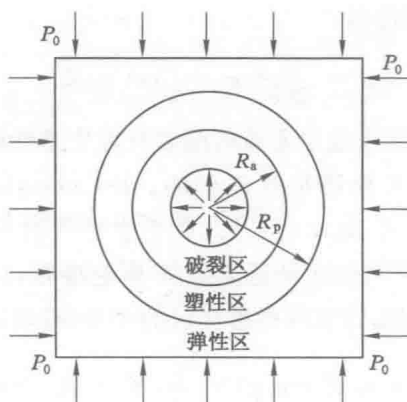


图 1-2 圆形巷道的分析模型

岩体服从摩尔-库仑屈服条件,分析计算了围岩的应力,推导出目前工程上广泛用来求围岩弹塑性区应力和弹塑性区半径的卡斯特纳(Kastner)方程。

圆形巷道两向等压情况下,根据卡斯特纳方程,可求得围岩内部应力和表面位移的解析解为:

① 弹性区内应力分布:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta} \\ \sigma_r \end{cases} = \sigma_0 \pm (C \cos \varphi + \sigma_0 \sin \varphi) \left[\frac{(\sigma_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi} \right]^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \quad (1-2)$$

② 塑性区内应力分布:

$$\sigma_r = C \cot \varphi \left[\left(\frac{r}{R_s} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right] \quad (1-3)$$

$$\sigma_{\theta} = C \cot \varphi \left[\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left(\frac{r}{R_s} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right] \quad (1-4)$$

③ 塑性区的半径 R_p :

$$R_p = R_s \left[\frac{(\sigma_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1-5)$$

④ 巷道围岩位移:

$$u = \frac{\sin \varphi}{2Gr} (\sigma_0 + C \cot \varphi) R_p^2 \quad (1-6)$$

但以上的计算是假定巷道的围岩只发生塑性破坏而没有发生破裂,这与实际工程还是有差别的。B-Ladanyi, K-Daemen, H-Wilson(1980), E-T-Brown(1982)和李世平等对以上的塑性分析进行一定的修正^[25],但还是遵循摩尔-库仑准则,只是在准则中引入残余强度的计算,计算所得破坏区的半径(松动圈大小)为:

$$R_p = R_a \left[\frac{(\sigma_0 + K_b \cot \varphi) - \frac{1}{g^m} (K_b - K_w) \cot \varphi}{P_s + K_w \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1-7)$$

式中, K_b 和 K_w 为强度衰减系数, g 为破裂区岩石性质相关的常数,取值区间为 $[0, 1]$,破坏偏脆性时靠近 1 取值,脆性偏弱时靠近 0 取值。

在理想弹塑性情况下,由于破裂和塑性范围不能确定,在理论上可对应不同的围岩应力和变形状态。为了更为准确地描述巷道破坏的实际情况,蒋斌松和张强采用非关联弹塑性分析,获得了应力和变形的封闭解^[26],并分析了破裂范围对围岩应力和应变的影响(如图 1-3 所示)。

另外, L-Stile(1989)采用了弹脆塑性应力-应变模型和摩尔-库仑准则,并考虑岩体屈服后的剪胀扩容特点,对用衬砌支护和岩石锚杆加固隧道围岩的应力与位移以及锚杆的应力特征作了较全面的分析,但未考虑围岩所表现出的显著的蠕变特性;朱维申、李建华在圆形巷道黏弹性解的基础上研究了围岩中出现了峰值后软化区的解析解,在软化区采用了带扩容性的黏弹性模型,得到了巷道围岩应力状态的解析解,从理论上揭示了巷道围岩的变形机理,为巷道的合理支护提供了指导作用。

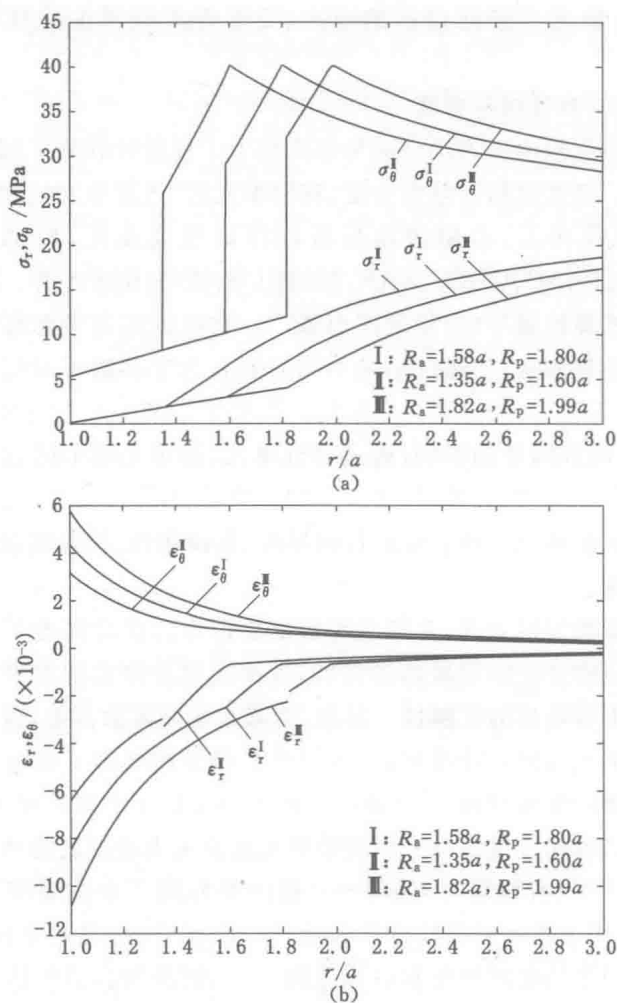


图 1-3 破裂范围对围岩应力、应变的影响

(a) 破裂范围对围岩应力的影响; (b) 破裂范围对围岩应变的影响

针对深部工程的复杂性,现有的深部巷道围岩非线性破坏机理相关研究尚不成熟,大多还停留在连续介质理论和理想弹塑性

研究上,缺乏对破坏过程的应力、变形等非线性演化规律相关研究。

1.2.2.2 数值模拟研究

目前数值模拟方法已成为解决地下工程设计和施工问题的有力工具。通常包括有限差分法、有限单元法、边界单元法和离散元法等,且很多大、中型数值分析程序已经商业化,如 ANSYS、ADINA、FLAC、UDEEC、SAP、ABACUS、2D- σ 、RFPA 等。其中有限单元法提出最早,应用范围也最广。它可以综合考虑影响围岩稳定的各种因素,如通过给定不同的岩石力学参数可以模拟不同的岩性、地应力;通过建立不同的计算模型用来模拟不同岩体的地质结构、时间因素的影响;通过节理单元、薄单元等不同的单元类型可以模拟节理、裂隙、软弱夹层的影响;通过张量运算、迭代运算等运算方法可以考虑岩体的各向异性、黏弹塑性、扩容膨胀性等力学特性等。

大量的实践表明,有限元等数值模拟方法在研究地下工程巷道围岩应力及变形和破坏的发展,进而定量地评价围岩稳定性方面具有十分明显的优越性。目前,为减小单元离散误差,自适应原理已被引入有限元计算中,主导思想是降低前处理工作量和实现网格离散的客观控制^[27];Cundall 提出并发展了离散单元法,现今已出现二维和三维的可变形离散单元法及考虑动荷载的动力离散单元法^[28,29];石根华与 Goodman 提出并发展了块体系统不连续分析法,用于模拟岩石块体的移动、转动、张开、闭和的全部过程,并判定岩体的破坏程度和破坏范围,进而评价围岩的整体和局部稳定性^[30,31]。在局部稳定性研究方面,基于非连续变形理论,Binlin 和 Hoek 等研制开发了块体稳定性分析软件 UNWEDGE^[32];王渭明在结构面的计算机模拟基础上,判定地下硐室中“危石”的存在及稳定性,并建立了“危石”预测的贝叶斯模型^[33]。