

高地应力区洞室围岩开裂问题研究进展

王义昌^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 陈 明^{1,2}, 严 鹏^{1,2}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:综述了近年来国内外高地应力下地下洞室围岩开裂问题的研究进展,重点分析了围岩开裂机理、应力和应变开裂判据,总结了围岩开裂影响因素及工程实际中常用的微震监测、声发射监测等监测与监控手段和常用的数值模拟软件,并指出了当前研究中存在的主要不足之处,包括爆破开挖、邻洞开挖和中间主应力对围岩开裂的影响等,认为爆炸荷载与地应力动态卸荷耦合分析、连续与非连续耦合数值模拟及地下洞室动态设计等将是今后的研究重点和突破方向。

关键词:地下洞室;围岩开裂;高地应力;开裂判据;围岩监测;数值模拟

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)02-0085-10

A review of the rock fracture in cavern under high in-situ stress//WANG Yichang^{1,2}, LU Wenbo^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}, YAN Peng^{1,2}(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 2. *Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: In this paper, a review of recent research progress of rock fracture in underground cavern under high in-situ stress are presented. The mechanism of rock fracture, the stress and strain cracking criterions are thoroughly analyzed. The factors influencing the rock brittle fracture, the common methods of monitoring and control, such as micro-seismic monitoring, acoustic emission monitoring as well as the common numerical simulation softwares are summarized. In addition, the deficiencies of current research are pointed out, including the influence of blasting excavation, adjacent caverns excavation and the intermediate principal stress on the rock fracture. Finally, this paper proposed several major points and breakthrough directions for future research, such as the coupled analysis of the blast loading and the dynamic unloading of the stress, continuous and non-continuous coupled numerical simulation and the dynamic design of underground cavern.

Key words: underground cavern; rock fracture; high in-situ stress; cracking criterion; rock monitoring; numerical simulation

围岩开裂问题是指地下洞室开挖导致围岩应力重分布,诱发围岩出现片帮、剥落、层裂等由岩石裂纹扩展引发的围岩脆性破坏问题^[1-3]。

随着我国西南水电资源的不断开发,深埋岩体工程越发常见,高地应力是这些工程面临的首要问题。高地应力下地下工程围岩的破坏形式与低地应力下明显不同,主要为脆性开裂破坏^[1,4-5],如二滩水电站所处区域地应力为 20~38 MPa,厂房上下游拱座及下游边墙中部多处发生围岩剥落、片帮等破坏现象^[6];瀑布沟水电站的地应力水平为 21~27 MPa,厂房的上游拱角处发生片帮、剥落,厂房下游岩锚梁与围岩结合部位出现明显裂缝^[7];锦屏

Ⅱ级引水隧洞最大地应力超过 70 MPa,隧洞多次发生岩爆,围岩出现多种形式的开裂破坏问题^[8]等。高地应力下地下工程围岩主要发生以开裂为主的脆性破坏,甚至可能诱发岩爆、围岩持续松动、大变形等工程灾害,给地下工程的可靠性和施工人员的安全带来严峻挑战。

对高应力地区围岩开裂问题有一个较为深入的认识始于 20 世纪 80 年代国外对深部岩体开挖扰动区的研究。20 世纪 80 年代,为开展放射性核废物处置系统可行性研究,瑞典、瑞士、加拿大等国家相继建立地下实验室,并对不同断面、不同埋深条件下,洞室围岩开裂机理、扰动区分布以及开裂监测等

进行了研究^[2-3,9-11]。国内对深埋洞室围岩开裂问题的研究始于 20 世纪 90 年代,尤其是近几年国内锦屏、小湾、溪洛渡等大型水电站地下洞室建设,为开展高地应力区围岩开裂问题研究提供了丰富资料 and 良好基础,很多学者采用不同方法,从不同的角度,在围岩的监测与分析、分区破坏、数值模拟等方面取得了很多研究成果^[12-15]。

本文从围岩开裂的机理、判据、影响因素、监测与监控手段、数值模拟等方面简要探讨高地应力区围岩开裂问题的研究进展以及今后的研究重点。

1 高地应力下围岩开裂机制

高地应力区地下工程岩体处于三向受压状态,本身积蓄了大量的能量,洞室开挖使得这些能量得以释放,围岩应力发生重分布。围岩应力状态的改变是导致围岩开裂的直接因素,不同的学者从不同的角度进行了研究。

1.1 压剪开裂破坏机制

Walsh 等^[16]较早将双向受压情况下的二维翼型裂纹扩展模型应用到围岩开裂破坏的分析中。在第一主应力 σ_1 和第三主应力 σ_3 作用下,裂纹先发生闭合而后转换为 I 型张拉裂纹进行扩展,得到裂纹的强度因子为

$$K_I = \frac{2c\tau_{\text{eff}}\cos\alpha}{\sqrt{\pi l}} - \sigma_3\sqrt{\pi l} \quad (1)$$

其中 $\tau_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha -$

$$\mu[\sigma_1 + \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha] \}$$

式中: a 为裂纹长度的一半; α 为裂纹与 σ_3 之间的夹角; μ 为裂纹面的摩擦系数; l 为翼型裂纹的长度。当翼型裂纹满足 $K_I = K_{Ic}$ (K_{Ic} 为岩石的断裂韧度) 时,裂纹发生稳定扩展。在此基础上,Li 等^[17]认为围岩开裂是翼型裂纹扩展、贯通并最终形成宏观剪切带的过程,并研究了岩石的断裂韧度、弹性模量、裂纹密度、裂纹长度等参数对围岩开裂机制的影响。Eberhardt 等^[18]从细观层面分析得到压剪微裂纹的应力集中主要发生在岩石的晶体界面,裂纹长度与岩石晶粒尺寸有着密切关系。有学者在压缩实验中发现,岩石裂纹体积应变 ε_{cv} 先减小后增大,围压开裂破坏过程存在一个裂纹闭合阶段^[19],一定程度上印证了围岩发生压剪开裂破坏机制的合理性。

国内朱维申等学者^[20-22]基于压剪开裂破坏模型,对复杂应力状态下围岩的开裂机制及不同强度准则下的开裂判据进行了研究;刘宁等^[23]在此基础上将开裂围岩视为薄板组合,确定了相应的开裂判据,计算得到围岩的临界应力、应变和围岩开裂的范围。

压剪裂纹扩展模型较好地解决了单一裂纹的扩展情况,但实际岩石包含多种不同程度的缺陷,受压条件下围岩的真实开裂过程是多条裂纹相互聚集、贯通的结果。近年来,不少学者通过试验和数值模拟等方法,对两条或多条裂纹的扩展、贯通进行了研究。Morgan 等^[24]通过高速摄影仪,研究了包含两条预制裂纹的花岗岩在单轴压力作用下,裂纹的开裂和贯通情况,结果表明两条裂纹贯通过程中,张性裂纹、剪切裂纹或二者的混合型裂纹都可能出现,裂纹的类型与微裂纹的方向度、两裂纹夹角及距离有关;在此基础上,Lee 等^[25]选用 3 种不同材料试样对同样问题的试验研究表明裂纹的类型与材料的性质也有直接关系。

1.2 劈裂拉伸破坏机制

实际工程中,洞室开挖将导致围岩应力场发生调整,隧洞围岩径向应力 σ_3 卸载,切向应力 σ_1 发生加载,且靠近轮廓面处 σ_3 的值接近零,而 σ_1 和 σ_2 则远大于零,很多学者以此作为突破口,研究了当 σ_3 等于或接近零时围岩的开裂情况。Sahouryeh 等^[26]的双轴压缩试验结果表明,当 σ_3 等于零时,中间主应力 σ_2 对裂纹的扩展有明显影响,裂纹扩展平行于两个加载方向。Cai^[27]考虑岩体的不均匀性,采用数值计算工具模拟研究了类似应力状态下岩石的开裂情况,结果显示 σ_2 抑制了垂直于 σ_2 方向裂纹的扩展,裂纹扩展方向平行于 σ_1 和 σ_2 。这些研究解释了围岩沿平行于轮廓面方向发生开裂、出现层裂破坏的原因,表明在双向受压、另一个方向压应力较小或接近零的情况下,围岩发生劈裂拉伸破坏。

不少学者从细观层面解释了围岩以拉裂为主的原因。Diederichs^[28]采用 PFC 软件模拟了受压花岗岩的开裂破坏过程,结果显示即使围压为 20 MPa,围岩开裂破坏中的张拉型裂纹的数量也远大于剪切型裂纹的数量,认为岩石的非均质性(包括晶粒尺寸、矿物成分)是导致裂纹以张型裂纹为主的主要原因;Lan 等^[29]则研究了岩石细观结构(细观尺寸、力学属性、接触属性)的各向异性对开裂破坏的影响,结果也表明岩石的细观各向异性导致了岩石内部拉应力的产生和相关裂纹的扩展。

国内钱七虎等^[12,30-31]基于连续介质力学和模型试验,采用简化的圆形巷道模型,分析了围岩的应变场和能量场,发现在围岩的极限平衡区边界存在径向应变不连续和弹性应变能聚集的情况,导致围岩拉应变超过其极限拉应变,发生劈裂破坏,而极限平衡区向深处的不断发展最终导致了围岩多次发生劈裂破坏,产生多个平行于轮廓面的深部裂纹。王明洋则^[32]基于自相似构造模型,在考虑了岩石内的缺

陷后,发现在不同的受力和卸载速率下,岩石内的缺陷部位会产生局部拉应力,当局部拉应力超过岩石的抗拉强度时,岩石发生脆性劈裂破坏。吴文平等^[8]对锦屏Ⅱ级水电站隧洞开挖过程中遇到的片帮、剥落等围岩破坏问题的分析也认为高地应力条件下,围岩开裂破坏的主要机制是劈裂拉伸;而对于存在节理面或结构面的围岩,开裂破坏机制才转为剪切破坏。

1.3 弯折断裂机制

孙广忠等^[33]假定围岩由洞顶拱条和边墙板条组合而成,各板条切向连续径向不连续,具有一定的抗弯能力,当洞壁围岩变形过大,导致围岩应变超过其极限张应变时,围岩发生开裂;吴文平等^[8]认为层状或薄层状围岩在高围压下产生差异回弹,导致围岩发生弯曲、折断,最终导致围岩开裂;侯哲生等^[34]在研究圆形断面隧洞的围岩开裂问题时,则采用弧形岩板进行简化分析,隧洞开挖导致洞壁附近围岩径向应力减小,切向应力增大,随着切向应力的进一步集中,岩板内鼓弯曲,最终发生断裂。弯折断裂简化了围岩开裂问题,从而可以采用传统解析法来解决复杂的围岩开裂问题;但与实际围岩的开裂情况还是存在明显的差异,实际工程中并不是所有围岩均发生明显的弯折变形,如围岩的深部开裂问题。

总的来说,实际地下工程中,不同应力状态下围岩的破坏机制不尽相同,低围压高集中应力下,围岩破坏的主导机制是拉伸破裂,随着围压的提高,逐渐转变为以剪切破坏机制为主;而受岩石的晶粒结构、矿物成分,岩体中的节理、结构面的影响,围岩开裂破坏是个复杂的过程,伴随着张拉开裂、剪切开裂及二者结合情况的发生,最终导致围岩发生开裂破坏。

2 围岩开裂判据

根据岩石的受压破裂试验研究成果,岩石脆性开裂破坏过程大致可分为4个阶段:裂纹闭合阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段和宏观剪切破坏阶段;裂纹起裂的应力值被定义为起裂应力 σ_{ci} ,裂纹进入非稳定扩展阶段的应力值被定义为破损应力 σ_{cd} 。以岩石的受压试验为基础,很多学者提出了围岩开裂的两种主要判据:应变判据和应力判据。

2.1 应变判据

2.1.1 体积应变 ε_v

Brace等^[35]在分析花岗岩、大理岩等多种岩石的应力-应变曲线时,发现体积应变曲线起初表现为线性,而后曲线会脱离线性,围岩开始发生扩容,不同岩石的扩容点对应的应力值约为峰值强度的50%。此后,Martin等^[36]提出了能够反映加载过程

中裂纹闭合与扩展的裂纹体积应变 ε_{cv} 的概念,定义 ε_{cv} 的计算公式为

$$\varepsilon_{cv} = \varepsilon_v - \frac{(2\nu - 1)}{E}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \tag{2}$$

式中: ε_v 为体积应变; E 为弹性模量; ν 为泊松比。通过式(2)计算得到岩石的 ε_{cv} 与应力的关系曲线,当 ε_{cv} 开始脱离零时,岩石裂纹发生开裂,进而可以确定岩石的起裂点;但由于裂纹体积应变 ε_{cv} 是由岩石固有弹性参数计算得到的,导致 ε_{cv} 容易受岩石参数的影响,且由 ε_{cv} 确定的起裂应力 σ_{ci} 难以忽略已有裂纹的影响^[18]。

2.1.2 横向应变 ε_1

实际试验中,岩样的横向应变 ε_1 要比体积应变 ε_v 敏感,但直接采用 ε_1 来判断岩石是否开裂有很大的主观性。Nicksiar等^[37]假定轴向应力从零变化到 σ_{cd} 的过程中,横向应变 ε_1 是线性变化的,从而得到一条参考直线,计算实际应力-横向应变曲线与参考线之间的差值,由差值与轴向应力关系曲线的峰值点作为岩石起裂点,对应的应力值为岩石的起裂应力 σ_{ci} 。该法较好地排除了人为主观性的干扰。Nicksiar测试了多个岩样的 σ_{ci} 值,并拟合直线,得到 σ_{ci} 约为单轴抗压强度的49%,与现场测试得到的围岩开裂应力值(单轴抗压强度 σ_c 的55%)比较接近。

2.2 应力判据

2.2.1 最大主应力法

Diederichs等^[2]通过对应力-应变曲线切线模量的分析,提出“系统开裂”点的概念,并得到其值为单轴抗压强度的35%~50%。Cai等^[3]总结了多个单轴或三轴压缩试验,得到 σ_{ci}/σ_c 的变化范围为0.36~0.6。实际工程中,如果最大主应力满足 $\sigma_1 \geq \sigma_{ci}$,则围岩发生开裂,对不同的岩石, σ_{ci} 的取值范围为单轴抗压强度的35%~60%。

2.2.2 最大剪应力法

Martin等^[38]研究认为围岩发生脆性破坏时,黏聚力和摩擦力并不同时起作用,裂纹在起裂后发生扩展和张开,此时岩石主要靠黏聚力起作用,只有当裂纹扩展到一定程度,岩体破裂至产生相互摩擦时,摩擦力才发挥作用。结合Heek-Brown强度准则,Martin发现脆性破坏条件下,Heek-Brown强度准则中的参数 m 要取一个几乎等于零的值,参数 s 则取0.11,进而提出了岩石开裂的应力准则:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 0.33\sigma_c \tag{3}$$

瑞典硬岩实验室(HRL)通过声发射监测得到围岩开裂的应力值满足 $\sigma_1 - \sigma_3 \approx 25 \text{ MPa}$ ^[39],约为 $0.13\sigma_c$,与式(3)有明显差异。Cai等^[3]通过与地质

强度指数(GSI)的结合,进一步提出了更加符合实际的应力判据:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k\sigma_{cm} \tag{4}$$

其中

$$\sigma_{cm} = \frac{2c_m \cos \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}$$

式中: σ_{cm} 为考虑节理裂隙的岩体单轴抗压强度; c_m 为岩体的黏聚力; φ_m 为岩体的内摩擦角。对一般硬岩,当 k 取0.4~0.6时,围岩开裂;当 k 达到0.8~1.0时,裂纹聚集,岩石破裂。

值得注意的是,实际围岩的剥落开裂强度要明显低于岩石抗压强度峰值^[40],这与围岩脆性破坏强度关系密切,目前以双线性或“S”形岩石强度包络线的研究最为大家所认同^[29,41]。

3 围岩开裂的影响因素

3.1 初始地应力

a. 初始地应力的大小对围岩开裂情况有着直接的影响。岩体本身积蓄了大量的能量,地应力越高能量越大,洞室开挖为岩体增加了自由面,这必然导致岩体能量的释放,改变原始岩体的赋存状态,围岩初始应力场发生调整,并最终通过开裂、变形甚至岩爆等形式表现出来。Martin 等^[1,38]基于一定的理论和工程经验,提出了围岩开裂最深点半径 d_f 与围岩应力之间的关系:

$$\frac{d_f}{a} = 1.25 \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} - 0.5 \pm 0.1 \tag{5}$$

其中

$$\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$$

式中 a 为隧洞的半径。

b. 初始地应力与岩体强度的比值与围岩开裂破坏形式有着密切的关系。Hoek 等^[4]在研究隧洞支护时,发现在较低应力条件下,洞室围岩主要发生块体脱落破坏,而高地应力下,围岩表现为明显的脆性开裂破坏;Martin 等^[1]在此基础对地应力与岩体强度之比进行细化分类,考虑节理对围岩开裂的影响,提出节理岩体在不同的应力强度比下,围岩破坏的形式和范围明显不同。

c. 主地应力相对隧洞轴线的方向对围岩开裂范围有直接的影响。由式(3)和式(4)不难发现,对于同一个断面,围岩所受的主应力差越大,围岩开裂的情况越严重,而围岩的应力差与主应力相对于隧洞轴线的方向有着直接的关系,Martin 等^[9]在研究中发现:当隧洞轴线与最大主应力 σ_1 的方向垂直或夹角接近90°时,隧洞的开裂破坏范围要明显大于轴线与最大主应力 σ_1 平行或夹角较小的情况;对锦屏Ⅱ级地下隧洞开挖损伤区范围的声波监测结果也表明,隧洞轴线垂直于最大主应力时,钻爆开挖损伤

明显要大于轴线平行于最大主应力时的情况^[42];在水电站地下厂房的建设中,一般厂房轴线与主应力方向都接近平行或夹锐角,尽可能地减小围岩开裂的范围。

3.2 围岩特性

a. 围岩的地质构成与围岩开裂有着直接关系。岩石由多种不同的矿物晶体混合胶结而成,岩石的矿物成分、晶粒尺寸、微观结构导致了岩石的各向异性,对围岩的开裂造成影响。有研究表明,不同粒度的花岗岩体开裂情况明显不同^[43];岩石本身包含大量的微裂纹,实际典型岩样光片或薄片显微观察结果表明,微裂纹不仅在晶面之间存在,也从晶体内部穿过。这些因素导致岩石的各向异性,影响岩石的抗裂性能。

b. 岩体的质量是影响围岩开裂的另一重要因素。岩体是由岩石和结构面混合形成的一种复杂的不连续介质,岩体中包含大量的节理、断层,这些结构面在很大程度上决定了岩体的质量。与完整岩体相比,包含节理、断层的岩体更容易沿节理或缺陷区域发生开裂,如:白鹤滩水电站所处区域岩体,拥有着十分特殊的柱状节理,表现出明显的各向异性,开挖造成的裂纹扩展很大程度上是沿着本身已有的柱状节理面进行的;岩体中的结构面也直接导致实际围岩强度的下降,影响围岩的开裂情况。

3.3 开挖方式

a. 开挖方式对围岩开裂情况有明显影响。工程中常见的开挖方式有两种:钻爆开挖、机械开挖。Emsley 等^[39]的声发射监测结果表明,爆破开挖导致的声发射活动深度与机械开挖相比要深得多;加拿大 AECL 地下实验室的研究结果显示钻爆开挖更易造成围岩拉伸开裂,精细控制爆破可以减小钻爆开挖引起的围岩开裂;结合 Griffith 强度准则,严鹏等^[44]从钻爆开挖引起围岩动态卸荷的角度,对开挖引起的围岩破损范围进行了研究,表明钻爆开挖造成的围岩破损范围更大。

b. 支护的及时与合理性对围岩的开裂也会产生影响。围岩的开裂多伴随着变形、剥落等破坏现象,这个过程实际是围岩应力再平衡的过程。Read^[11]对 AECL 地下实验室的围岩开裂情况进行了总结,发现对已发生开裂的围岩,围岩的剥落会进一步引发更为明显的剪切破坏,形成深“V”形开裂破坏区,开裂的深度会不断加深直到围岩达到新的稳定。实际工程中,锚杆和钢筋网等支护手段的使用会明显减小和控制围岩的变形,给围岩提供足够的支持,保证围岩的稳定,进而减小和控制围岩开裂破坏的发生和扩展^[8]。

3.4 隧洞的断面形状

不同断面形状下围岩的开裂情况明显不同。围岩开裂破坏多发生在开挖自由面切向应力集中区域,而开挖断面不同,围岩的应力重分布不同,导致围岩开裂破坏的区域也不同^[11];Martin 等^[38]对不同 Hoek-Brown 参数下围岩的开裂破坏情况进行的研究表明,方形隧洞的边角区域出现明显的应力集中现象,极易使围岩发生脆性开裂破坏,这也表明合理的隧洞断面形式设计对预防围岩的开裂有着重要的作用。

3.5 其他因素

影响围岩开裂的因素还有含水率、温度及化学、生物等因素。在开挖过程中新的开挖面不断形成,开挖自由面的含水率、温度不断变化、波动,进而影响和改变洞室围岩的强度和稳定性,加剧洞室围岩的开裂;围岩自然化学性质的改变和生物的生长也会造成破损岩体性质的改变,降低围岩的强度,加剧已有裂纹的扩展。

4 围岩开裂的监测与监控

地下工程围岩监测对洞室的喷锚支护、围岩稳定以及工程施工期、运营期的安全都有着重要的作用。相比一般地下工程,高应力区地下洞室开挖多伴随着围岩深部开裂,甚至可能引发岩爆,一般的围岩监测技术已经不能满足其需要,必须用新的技术和方法来监测和监控围岩开裂。

4.1 微震监测

微震是指岩体在外力作用下,一个或多个局域源以弹性波的形式迅速释放能量的过程。微震监测技术起源于采矿诱发地震监测,后来被推广应用至隧道、核废料深埋等地下工程监测中,相比常规的变形监测,微震监测能够获得岩体发生破裂的分布区域和密集程度等信息。AECL 地下实验室在巷道密封试验中运用微震监测技术来监控整个试验区域的围岩稳定与脆性破裂情况^[45];Cai 等^[46]则将微震事件的数量转化为参数考虑到岩石的本构关系中,对开裂区域岩体的属性进行校正,得到了围岩开裂范围;国内有学者将微震监测技术应用到隧洞开挖引发岩爆的预测和厂房围岩的安全性评估中^[47]。由于在围岩开裂监测、岩爆预测等领域的良好应用,微震监测技术在深埋地下工程围岩监测中应用越来越广泛。

4.2 声发射监测

声发射现象是由 Kaiser 发现的,原理与微震现象基本一致,是指材料由于变形、晶界移动、裂纹起裂与扩展等造成的局部弹性应变能瞬态释放的现

象^[48]。声发射监测技术在围岩开裂监测中的应用有很多,Eberhardt 等^[18]将岩石声发射事件数与轴向压力曲线斜率的突变点作为岩石的开裂点,但 Kaiser 效应及突变点判断的主观性导致其在实际应用中存在一定的误差;也有学者基于声发射及其定位技术,研究了受压岩石的裂纹萌生、扩展和贯通情况^[49];AECL 地下实验室在隧洞围岩监测中也广泛使用了声发射监测技术^[45]。相比微震监测,声发射频率较高,在小范围精细监测和实验室研究中应用更多。

4.3 声波监测

与声发射监测被动接收不同,声波监测采取主动发射弹性波,由声波参数的变化情况来判断岩体的力学特性及结构特点。实际工程中多用声波监测围岩损伤区的范围、深度,如:锦屏 II 级地下隧洞的损伤区范围监测采用了声波测速法;Meglis 等^[50]采用超声波速度层析成像技术对围岩的边墙、顶部区域微裂纹分布情况进行了研究;张国华等^[51]将现场声波监测数据和数值模拟结合起来,对推进式往复爆破作业下围岩的累积损伤范围进行了研究,取得良好成果。

除了以上几种监测技术,钻孔取芯、钻孔成像等也被应用到围岩开裂监测中。这些技术都有各自的特点。实际应用中,多根据具体情况选择一种或多种围岩开裂监测技术以达到更准确的监测效果。

5 围岩开裂的数值模拟

结合围岩开裂机制方面的研究进展不难发现,数值模拟在围岩开裂各方面研究中的应用越来越多。相比传统力学分析、试验研究等手段,数值模拟有很多优势,因而在近十几年里得到快速发展,根据介质是否连续,数值模拟方法主要分为连续介质法、非连续介质法以及二者相结合的方法^[52],以下对基于不同方法的常用软件进行分析。

5.1 连续介质法

连续介质法主要包括有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM),其中 BEM 主要用来模拟等效弹性连续体的远场岩石,在此不作详细论述。

FLAC 是一种基于拉格朗日差分法的显式有限差分程序。它除了内置的多个力学模型外,用户也可使用自带 FISH 语言来自定义模型,用来研究岩土领域中的各种非线性问题十分合适。Cai 等^[46]将裂纹密度 ω 考虑到岩石的本构关系中,采用自定义模型对围岩的开裂情况进行了模拟,与实际情况比较接近。在研究不同应力路径对围岩开裂的影响时,Cai^[53]采用 FLAC 与 Phase² 进行了对比分析,发

现在在张拉和剪切两种破坏形式下,围岩的开裂范围有明显差异,究其原因主要是两种软件算法的差异造成的,FLAC 软件可以模拟围岩的动态卸荷,而 Phase² 只能以一种准静态的方式对围岩开裂破坏范围进行模拟。

Phase² 是一种平面隐式有限元程序,在围岩稳定性分析、开裂范围等方面有广泛应用。Hidalgo 等^[54]采用 Phase² 软件,对围岩容易开裂的区域网格进行加密,选用最大主应变 ε_1 、最小主应变 ε_3 与试验得到开裂应变阈值进行对比,得到围岩开裂的深度,与实测结果十分接近。Cai 等^[46]在对围岩实际开裂强度的研究中也采用了 Phase² 软件,并考虑钻爆开挖导致围岩轮廓面不平整对围岩开裂的影响,得到了不同时期围岩的开裂深度和范围,与实测数据十分吻合。

RFPA 是基于有限元和统计损伤理论,考虑单元的细观本构关系,将缺陷分布的随机性等统计分布规律结合到数值计算中开发的程序^[55]。Tang^[55]从岩石的各向异性、岩石变形的非线性、岩石的破坏过程等 3 个方面详细介绍了 RFPA 是如何满足岩石脆性破坏的各方面要求的;RFPA 对计算单元的力学参数(弹性模量、强度等)采用 Weibull 分布,充分考虑了岩石的非均匀性,并采用一种接近弹-脆性的应力应变关系来模拟岩石的非线性特性;在裂纹扩展、平行于轮廓面深部裂纹等方面,RFPA 有广泛的应用^[56]。

5.2 非连续介质法

非连续介质法主要有离散元法(DEM)和离散裂隙网络法(DFM),前者在围岩开裂研究中的应用较多,后者多用于岩体渗流分析中。

PFC 是颗粒流分析软件,主要从微观结构角度研究介质的力学特性和行为,颗粒之间的接触破坏形式可以分为剪切和张开两种,比较适合用来研究岩体的破裂问题。运用 PFC 研究岩石在压力作用下发生开裂破坏以及裂纹贯通的研究有很多,但 PFC 数值模拟最重要的问题就是颗粒细观参数的确定,研究中多通过实际压缩试验与 PFC 模拟的对比,得到一个合理的细观力学参数^[57];Cho 等^[58]提出了一种特殊的集群粒子模型,通过数值模拟与实际试验的对比,表明这种模型更能反映岩石的宏观力学特性。此外,PFC 在多条裂纹扩展的聚集和贯通、裂纹方向角、围压对扩展机理的影响等方面也有较好的应用^[59]。

显式 DEM 软件 UDEC、3DEC 等在岩石的破裂、围岩的稳定分析等方面的研究应用很多,特别是用于研究岩石材料的各向异性对围岩开裂的影响^[29]、

岩石不同受力状态的开裂破坏过程^[60];Kazerani 等^[61]还将集群粒子模型引入到 UDEC 中,通过接触参数(剪切模量、摩擦角、黏聚力、抗拉强度等)的调整模拟获得岩石的宏观参数(弹性模量、泊松比等);朱焕春等^[62]采用 3DEC 软件,分析了结构面对高应力区地下洞室围岩稳定的影响。此外,基于扩展 DEM 和隐式 DEM 的数值模拟方法在岩石开裂等方面的研究也越来越多^[63-64]。

5.3 连续与非连续介质结合法

连续介质法在实际工程中用来分析围岩的稳定、小变形有自身的优势,非连续介质法在模拟包含多个裂纹、节理岩体的开裂破坏,且破裂块体伴随着大的位移等方面更加适合,因此采用二者结合的方法可以扬长避短,取得更好成果。

不少学者通过不同软件的耦合计算研究围岩的开裂,如 Potyondy 等^[57]在围岩开裂分析中,对可能发生开裂的区域采用 PFC 模拟,其他区域采用 FLAC 模拟,初始地应力加在 FLAC 模型外边界,模拟结果比较接近实际;Cai 等^[65]用 FLAC/PFC 耦合研究了大型地下洞室开挖过程中岩体的开裂及声发射过程,研究中通过位移、速度、力在每一步计算中的数据交换来实现耦合,声发射传感器周围的岩体采用 PFC 建模,其余岩体采用 FLAC 建模并考虑复杂地质条件和开挖顺序,分析结果表明与现场实测数据十分吻合;Cai^[27]采用一种结合 FEM/DEM 的软件 ELFEN 模拟了岩石双向受压应力状态下的开裂情况。Lisjak 等^[66]采用 FEM/DEM 的方法对页岩的开挖损伤区分布和岩石破裂机制进行了模拟和研究,取得较好成果。

6 存在的问题及展望

目前,国内外关于高地应力下围岩开裂问题的研究,在围岩开裂的机制、判据等方面已取得重要进展,但对围岩开裂问题的研究还不够系统、全面。随着我国西南地区水电资源的不断开发,面临高地应力问题的地下工程越来越多,进一步推进高地应力下围岩开裂问题相关研究的不断深入十分重要。

6.1 爆破开挖对围岩开裂问题的影响

爆破开挖首先不能忽视爆炸动荷载对围岩开裂的影响。炸药在岩体中爆炸,产生冲击波,造成近区岩体发生压碎破坏,往外冲击波衰减为应力波,在应力波扰动下围岩发生应力调整甚至产生拉应力,造成岩石微裂纹扩展;炸药爆炸同时,产生大量高温、高压气体,高速膨胀的气体渗入冲击裂纹中,增大其尖端的应力强度因子而使其进一步扩展,这些因素都将加剧围岩的开裂破坏。

爆破开挖引起围岩应力的动态调整对围岩开裂也有影响。钻爆开挖下,新的开挖面在数毫秒至数十毫秒时间内形成,伴随开挖进行的岩体应力场的调整是一个动态过程^[67],而目前研究多考虑为准静态过程。不少学者的研究表明,高地应力下采用准静态研究爆破开挖对围岩开裂的影响,忽略动态卸荷及其引起的附加动应力的作用,显然是不完整的^[68-69],事实上,岩体应力动态释放将导致开挖面岩体法向卸载、切向加载效应的加强,且爆炸荷载与附加动应力的耦合作用也会加剧围岩的开裂。

6.2 邻洞开挖对围岩开裂问题的影响

随着地下工程洞室规模的不断扩大,洞室密集程度的不断提高,相邻洞室间隔或同时开挖的情况时有发生。当水平应力较高时,对于已开挖完毕形成自由面的隧洞,距离较近的相邻洞室开挖容易引起围岩应力的二次分布,造成岩体的进一步开裂;相距较远的洞室钻爆开挖,易引起已开挖隧洞围岩发生振动,也可能加剧围岩的开裂情况;已形成的洞室自由面还会造成相邻洞室钻爆开挖过程中产生的压应力波反射成为拉应力波,进一步加剧围岩开裂,由此可见,邻洞爆破开挖对围岩开裂问题的影响还需进一步研究。

6.3 中间主应力对围岩开裂问题的影响

目前针对围岩开裂应力准则方面的研究,多基于平面问题分析,没有考虑第二主应力 σ_2 对围岩开裂的影响;实际高地应力区地下工程,中间主应力的值一般比较大,甚至接近最大主应力,中间主应力对围岩开裂的判据、范围及裂纹的扩展等方面的影响不容忽视^[27]。进一步通过力学试验、三维数值模拟来研究岩石的开裂及裂纹扩展过程,确定中间主应力对围岩开裂的影响是对围岩开裂问题研究的完善。

6.4 数值模拟的继续研究及发展

数值模拟极大地推动了围岩开裂、裂纹扩展等问题的研究,但也还存在一些不足,如:数值模拟在一定程度上简化了实际工程中的问题,忽略了部分重要因素(如岩石材料的各向异性等)对围岩开裂问题的影响;目前常用的数值模拟软件都有各自的优势和不足,不能全面、综合地反映围岩开裂问题。因此,在岩石的材料不均匀性和力学各向异性对围岩开裂机理的影响、开裂问题的三维数值模拟等研究领域,数值模拟虽已取得部分成果,但仍将会是以后围岩开裂问题研究的重点和突破口。

6.5 减少、控制围岩开裂问题方面的研究

围岩开裂问题研究的最终目的是解决实际工程中给工程的安全、质量带来一系列隐患的围岩脆性开裂破坏问题,因而如何有效地减少、控制地下工程

洞室围岩的开裂,有着十分重要的现实意义。由于地下工程的复杂性,单纯的依靠前期勘测和室内试验获得的地质条件和岩石参数显然是不够的,必须结合原位测试与现场监测技术手段,综合各种影响因素,获得及时、准确的围岩力学参数和破坏形式,并及时反馈到工程的设计、施工中,局部优化工程设计,指导具体施工措施,形成一个综合、可靠的优化设计系统^[70],尽可能减小、控制围岩开裂带来的一系列问题对地下工程的影响,促进深埋高地应力地下工程的发展。

7 结 语

随着我国西南地区水电资源的不断开发,深部岩体工程将会是未来研究的重点,同时这个领域的研究也将带动其他行业的进一步发展,如深部采矿、交通建设、核废料处置等,而围岩开裂是这些工程不可避免的问题。本文就高地应力区围岩开裂的机制、判据、影响因素等方面的研究进行了综述和总结,对研究中的不足和今后的重点进行了展望,相信这一问题的继续研究对推进水电等相关行业深部岩体工程的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R, SÖDERHÄLL J. Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository based on experiences from Aspö HRL, AECL's URL, tunnelling and mining [R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 2001.
- [2] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 785-812.
- [3] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 833-847.
- [4] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock [M]. Rotterdam: Balkema Press, 1995.
- [5] BÄCKBLÖM G, MARTIN C D. Recent Experiments in hard rocks to study the excavation response implications for the performance of a nuclear waste geological repository [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1999, 14(3): 377-394.
- [6] 史红光. 二滩水电站地下厂房围岩稳定性因素评价 [J]. 水电站设计, 1999, 15(2): 75-78. (SHI Hongguang. Accession the wall rock stability of the Ertan underground powerhouse [J]. Stagedesign, 1999, 15(2):

- 75-78. (in Chinese))
- [7] 王佛凯,彭琦,汤荣,等. 地下厂房岩锚梁裂缝成因分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(10):2125-2129. (WANG Dikai, PENG Qi, TANG Rong, et al. Causes analysis of cracking of rock-bolted crane girder in an underground powerhouse [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2125-2129. (in Chinese))
- [8] 吴文平,冯夏庭,张传庆,等. 深埋硬岩隧洞围岩的破坏模式分类与调控策略[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1782-1802. (WU Wenping, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Classification of failure modes and controlling measures for surrounding rock of deep tunnel in hard rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1782-1802. (in Chinese))
- [9] MARTIN C D, CHRISTIANSSON R. Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 219-228.
- [10] KAISER P K, DIEDERICH S M, MARTIN C D, et al. Underground works in hard rock tunnelling and mining [C]//Melbourne: International Society for Rock Mechanics, 2000.
- [11] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1251-1275.
- [12] 钱七虎,李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(6):1278-1284. (QIAN Qihu, LI Shuchen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1278-1284. (in Chinese))
- [13] 张传庆,冯夏庭,周辉,等. 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10):2063-2068. (ZHANG Chuanqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Brittle failure of surrounding rock mass in deep test tunnels and its numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2063-2068. (in Chinese))
- [14] 唐春安,赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D} [J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(5):507-508. (TANG Chun'an A, ZHAO Wen. RFPA^{2D} system for rock failure process analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 507-508. (in Chinese))
- [15] 魏进兵,邓建辉,王佛凯,等. 锦屏一级水电站地下厂房围岩变形与破坏特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(6):1198-1205. (WEI Jinbing, DENG Jianhui, WANG Dikai, et al. Characterization of deformation and fracture for rock mass in underground powerhouse of Jinping I Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1198-1205. (in Chinese))
- [16] WALSH J B. The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks [J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70(2): 399-411.
- [17] LI C, PRIKRYL R, NORDLUND E. The stress-strain behaviour of rock material related to fracture under compression [J]. Engineering Geology, 1998, 49(3): 293-302.
- [18] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2): 222-233.
- [19] 刘泉声,胡云华,刘滨. 基于试验的花岗岩渐进破坏本构模型研究[J]. 岩土力学,2009,30(2):289-296. (LIU Quansheng, HU Yunhua, LIU Bing. Progressive damage constitutive models of granite based on experimental results [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 289-296. (in Chinese))
- [20] 朱维申,陈卫忠,申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. 固体力学学报,1998,19(4):355-360. (ZHU Weishen, CHEN Weizhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1998, 19(4): 355-360. (in Chinese))
- [21] 李术才,朱维申. 复杂应力状态下断续节理岩体断裂损伤机理研究及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2):142-146. (LI Shucan, ZHU Weishen. Fracture damage mechanism of discontinuous jointed rock mass under the state of complex stress and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 142-146. (in Chinese))
- [22] 李建林,孙志宏. 节理岩体压剪断裂及其强度研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(4):444-448. (LI Jinlin, SUN Zhihong. Study on crack and strength of joint rock under compression-shear stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 444-448. (in Chinese))
- [23] 刘宁,朱维申,于广明,等. 高地应力条件下围岩劈裂破坏的判据及薄板力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):3173-3179. (LIU Ning, ZHU Weishen, YU Guangming, et al. Research on mechanical model of thin plate and splitting failure criterion for surrounding rocks with high geostress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supl): 3173-3179. (in Chinese))
- [24] MORGAN S P, JOHNSON C A, EINSTEIN H H. Cracking processes in Barre granite: fracture process zones and crack coalescence [J]. International Journal of Fracture, 2013, 180(2): 177-204.
- [25] LEE H, JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression [J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(6): 979-999.
- [26] SAHOURYEH E, DYSKIN A V, GERMANOVICH L N.

- Crack growth under biaxial compression[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(18): 2187-2198.
- [27] CAI M. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries: insight from numerical modeling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 763-772.
- [28] DIEDERICHS M S. Instability of hard rockmasses: the role of tensile damage and relaxation[D]. Waterloo, Belgium: University of Waterloo, 1999.
- [29] LAN H, MARTIN C D, HU B. Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading[J]. Journal of Geophysical Research 2010, 115(B1): 1-14.
- [30] 贺永年, 张后全. 深部围岩分区破裂化理论和实践的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2369-2375. (HE Yongnian, ZHANG Houquan. Discussion on theory and practice of zonal disintegration in surrounding rocks of deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2369-2375. (in Chinese))
- [31] 陈旭光, 张强勇. 高应力深部洞室模型试验分区破裂现象机制的初步研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 84-90. (CHEN Xuguang, ZHANG Qiangyong. Mechanism analysis of phenomenon of zonal disintegration in deep tunnel model test under high geostress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 84-90. (in Chinese))
- [32] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 234-241. (WANG Mingyang, FAN Pengxian, LI Wenpei. The mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 234-241. (in Chinese))
- [33] 孙广忠, 黄运飞. 高边墙地下洞室洞壁围岩板裂化实例及其力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(1): 15-24. (SUN Guangzhong, HUANG Yunfei. An example slab-rendering in the surrounding rock of underground excavation with high walls and its mechanical analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1988, 7(1): 15-24. (in Chinese))
- [34] 侯哲生, 龚秋明, 矫伟刚, 等. 深埋圆形隧洞板裂化弧形岩板凹曲变形的论证[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 551-558. (HOU Zhesheng, GONG Qiuming, JIAO Weigang, et al. Demonstration of concave deformation of arc-shaped rock slabs in deep circular tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 551-558. (in Chinese))
- [35] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C H. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16): 3939-3953.
- [36] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1994, 31(6): 643-659.
- [37] NICKSIAR M, MARTIN C D. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 607-617.
- [38] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 136-151.
- [39] EMSLEY S, OLSSON O, STENBERG L, et al. ZEDEX: a study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring[R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 1997.
- [40] ROJAT F, LABIOUSE V, KAISER P K, et al. Brittle rock failure in the Steg lateral adit of the Löttschberg base tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(2): 341-359.
- [41] CAI M, KAISER P K. In-situ rock spalling strength near excavation boundaries[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 659-675.
- [42] 严鹏, 卢文波, 单治钢, 等. 深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1552-1561. (YAN Peng, LU Wenbo, SHAN Zhigang, et al. Detecting and study of blasting excavation-induced damage of deep tunnel and its characters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1552-1561. (in Chinese))
- [43] EVERITT R A, LAJTAI E Z. The influence of rock fabric on excavation damage in the Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1277-1303.
- [44] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. TBM 和钻爆开挖条件下隧洞围岩损伤特性研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 121-128. (YAN Peng, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Study of the damage characteristics of surrounding rocks for tunnels constructed using TBM and drill-and-blast[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 121-128. (in Chinese))
- [45] YOUNG R P, COLLINS D S. Seismic studies of rock fracture at the Underground Research Laboratory, Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(6): 787-799.
- [46] CAI M, KAISER P K. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 301-310.
- [47] TANG C A, WANG J M, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II Project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 193-208.
- [48] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 883-899.
- [49] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 944-949. (ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN

- Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 944-949. (in Chinese))
- [50] MEGLIS I L, CHOW T, MARTIN C D, et al. Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 25-34.
- [51] 张国华, 陈礼彪, 夏祥, 等. 大断面隧道爆破开挖围岩损伤范围试验研究及数值计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1610-1619. (ZHANG Guohua, CHEN Libiao, XIA Xiang, et al. Numerical simulation and experimental study of damage range of surrounding rock in large tunnel under blasting excavating[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1610-1619. (in Chinese))
- [52] JING L, HUDSON J A. Numerical methods in rock mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 409-427.
- [53] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response-numerical tool selection and modeling strategy [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 618-628.
- [54] HIDALGO K P, NORDLUND E. Failure process analysis of spalling failure: comparison of laboratory test and numerical modelling data[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 32: 66-77.
- [55] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34: 249-262.
- [56] JIA P, YANG T H, YU Q L. Mechanism of parallel fractures around deep underground excavations [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2012, 61: 57-65.
- [57] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [58] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 997-1010.
- [59] MANOUCHEHRIAN A, SHARIFZADEH M, MARJI M F, et al. A bonded particle model for analysis of the flaw orientation effect on crack propagation mechanism in brittle materials under compression[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, 14(1): 40-52.
- [60] KAZERANI T, YANG Z Y, ZHAO J. A discrete element model for predicting shear strength and degradation of rock joint by using compressive and tensile test data[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 695-709.
- [61] KAZERANI T, ZHAO J. Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 34(18): 1877-1895.
- [62] 朱焕春, PATRICK A, 钟辉亚. 基于 3DEC 节理岩体数值计算方法及其应用(二): 工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 89-96. (ZHU Huanchun, PATRICK A, ZHONG Yahui. Numerical modelling methods and application in jointed rock mass (Part 2): application for engineering practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 89-96. (in Chinese))
- [63] JIANG Y J, LI B, YAMASHITA Y. Simulation of cracking near a large underground cavern in a discontinuous rock mass using the expanded distinct element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 97-106.
- [64] NING Y J, YANG J, AN X M, et al. Modelling rock fracturing and blast-induced rock mass failure via advanced discretisation within the discontinuous deformation analysis framework [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(1): 40-49.
- [65] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(4): 550-564.
- [66] LISJAK A, TATONE B S A, GRASSELLI G, et al. Numerical modelling of the anisotropic mechanical behaviour of opalinus clay at the laboratory-scale using FEM/DEM[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1): 187-206.
- [67] 卢文波, 周创兵, 陈明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2184-2192. (LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, CHEN Ming, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2184-2192. (in Chinese))
- [68] CARTER, J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1990, 27(2): 129-132.
- [69] 范鹏贤, 王明洋, 钱七虎. 深部非均匀岩体卸载拉裂的时间效应和主要影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1389-1396. (FAN Pengxian, WANG Mingyang, QIAN Qihu. Time effect and main influence factors of unloading splitting of deep-seated rock with nonuniformities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1389-1396. (in Chinese))
- [70] 冯夏庭, 江权, 向天兵, 等. 大型洞室群智能动态设计方法及其实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 433-448. (FENG Xiating, JIANG Quan, XIANG Tianbing, et al. Intelligent and dynamic design methodology of large cavern group and its practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 433-448. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-12-26 编辑: 熊水斌)