

深部岩体动力变形与破坏基本问题

李 杰^{1,2}, 王明洋^{1,2}, 张 宁¹, 范鹏贤¹

(1. 中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007;

2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

[摘要] 深部岩体非线性力学行为是目前岩石力学界研究的重点和难点, 研究的困难在于在很大的动力变形与破坏情况下如何阐述岩体的性质。本文通过对深部围岩变形破坏机理、深部岩体动力破坏过程中的基本问题(时间效应、断裂损伤描述等)以及深部岩体特征科学现象(分区破裂、岩爆理论)等方面的研究成果进行梳理和总结, 指出深部岩体力学问题是有效的四维空间问题, 是在开挖寿命尺度上应力状态的演化, 对深部围岩变形破坏机理的研究必须要建立与时间、空间有关的岩石性质的概念。目前要揭示深部岩体卸荷状态下真实的变形与破坏过程, 必须继续在连续介质力学框架内研究基于微、细观物理力学的理论, 在强度理论中引入时间参数作为塑性流动和破坏过程的特征, 并采用合理的手段描述岩体的断裂损伤, 岩爆和分区破裂是一个科学问题的两个现象, 应当用统一的理论来解释和模拟, 本文研究成果可为今后的研究工作指明方向。

[关键词] 深部岩体; 动力破坏; 时间效应; 断裂损伤; 岩爆; 分区破裂

[中图分类号] TU452 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)05-0071-09

1 前言

随着经济与国防建设的发展, 地下空间开发不断走向深部, 如深逾千米乃至数千米的矿山、大型水电工程的引水隧道、核废料的深层地质处置、深地下防护工程、石油战略储存工程等。伴随着工程埋深的增加, 出现了一些与浅部岩体显著不同的非线性变形破坏现象, 如分区破裂、岩爆、超低摩擦等, 对现有的岩石力学理论与实践提出了巨大的挑战^[1,2]。

深部岩体是长期赋存于高地应力环境中的地质体, 它过去的历史必将一直影响岩体现在和未来的行为^[3]。深部岩体非线性力学行为尽管已受到国内外学者的广泛关注, 但目前还远未得到解决。研究的困难不仅在于如何确定深部岩体固有的非均匀、非连续构造表征, 同时还在于在很大的动力变形与破坏情况下如何阐述岩体的性质: 在微、细观

上这些性状体现为不同尺度和水平上缺陷(裂隙)的存在及扩展、形成构造单元的相互作用等, 在宏观上这些性状表现为粘结力、内摩擦、扩容和能量释放(弹性、塑性、粘性、惯性)等特性。

早在 20 世纪 80 年代初, 国外已经开始注意对深部矿井问题的研究^[4]。我国起步较晚, 但随着近些年来大规模的复杂地质条件下岩石工程的修建, 相关部门和高校等在基础理论、软岩支护、岩爆防治、超前探测、信息化施工等方面进行了大量的研究和实践, 取得了丰硕的成果^[5,6]。本文重点对深部岩体工程变形破坏机理、破坏动力特性、扩容特性、深部围岩分区破裂化现象、深部坑道岩爆理论等方面的研究成果进行梳理, 以期推动后续深部岩体力学的研究和发展。

2 深部围岩变形破坏机理分析

深部岩体力学问题是有效的四维空间问题, 是

[收稿日期] 2013-03-20

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2010CB732003, 2013CB036005); 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(51021001)

[作者简介] 李 杰(1981—), 男, 山东招远市人, 博士, 主要从事防护工程和岩体力学方面的研究工作; E-mail: lijierf@163.com

在开挖寿命尺度上应力状态的演化,对深部围岩变形破坏机理的研究必须要建立与时间、空间有关的岩石性质的概念。深部围岩的变形可归结为因回弹造成的内应力释放、依时间而变化的扩容、塑性楔体沿滑动面向内移动形成的围岩松动等因素的共同作用^[7,8]。

2.1 体积拉伸大变形-张拉性板裂

从图1所示的主应力迹线可知,洞室侧墙附近,在大的垂直应力和小的水平应力作用下,将沿着垂直方向出现裂隙^[9],围岩逐步向内扩容并产生翘曲,造成体积拉伸大变形。

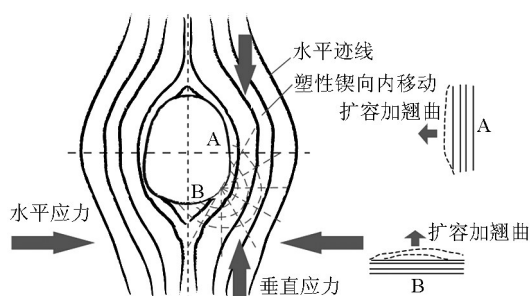


图1 洞室围岩向内移动机理

Fig.1 Mechanism that surrounding rocks moves inward

对于高应力下硬脆性岩体的破坏模式和机制,国际上最具有代表性的是加拿大原子能有限公司地下试验室(URL)开展的相关研究工作^[10]。其中,在420 m水平布置的多条试验隧洞在开挖过程中均形成了V型剥落区,这被认为是高应力作用下典型的张拉脆性破坏现象。图2为试验洞洞室壁围岩破坏后的照片。Diederichs等分析了脆性岩石的破坏过程,认为脆性岩石的损伤破坏过程中,拉伸破坏占主导地位,最终的破坏(劈裂或形成剪切带)主要原因是拉伸破坏的发展、累积和相互作用^[11]。

锦屏二级水电站引水隧洞横穿锦屏山,最大埋深达到2 525 m,开挖卸载过程中围岩主要的破坏模式表现为3种破坏形态:一是片状破坏,二是薄板状破坏(见图3),三是楔形板状破坏。张传庆等^[12]认为,洞壁高应力集中和低围压导致的劈裂拉伸作用是片状破坏和薄板状破坏形成的主要机制,而剥落深度较大的楔形板破坏虽然局部存在剪切面的痕迹,但主导机制仍是低围压下的劈裂拉伸破坏。魏进兵^[13]、吴世勇^[14]和黄润秋^[15]也观察并分析了锦屏电站地下工程围岩的张拉性板裂现象,并分别指出了其时效特征和板裂与岩爆之间的联系。

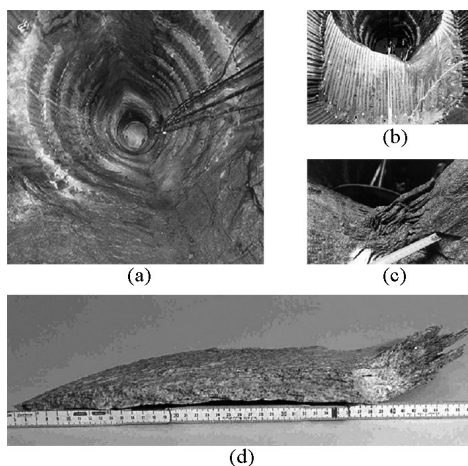


图2 加拿大地下试验室试验洞围岩的破坏形式及其剥落的整块岩板^[9]

Fig.2 The destructional forms of the surrounding rocks in Canadian underground test cavern and the whole piece of peeling rock plates^[9]

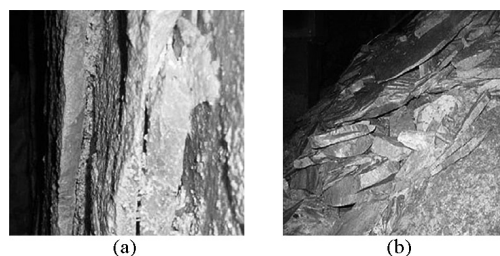


图3 锦屏电站隧洞围岩的板裂现象^[14]

Fig.3 Spalling phenomenon of tunnel surrounding rocks of Jinping power station^[14]

深地下工程围岩的张拉性板裂破坏现象是一种具有普遍性的破坏现象。但对围岩断面的考察表明,在围岩产生较严重的劈裂和剥落时,围岩内部尚未发展成较大的剪切破坏区,变形量也不是很大。洞室岩壁的板裂和剥落只是围岩破坏的第一阶段。随着时间的推移,围岩内部的应力状态不断调整、转移,深地下围岩将发生进一步的破坏,而这种后续的破坏往往表现为具有较大变形(或位移)的剪切大变形。

2.2 剪切滑移大变形-塑性楔体向内移动

侧墙附近的围岩,由于剪切应力的增长及扩容和挠曲导致的岩体松动,因而产生滑移面,形成如图1所示的塑性楔体,其在压力作用下,楔体向内移动,产生剪切滑移大变形^[16]。

随着岩石工程不断深入地下和初始地应力的增大,即使是比较坚硬的岩体,其围岩的位移或变

形也会达到相当的量值^[17]。图4为南非 Hartebeestfontein 金矿硬岩巷道发生大变形的情况,其高地应力(100 MPa左右)造成的围岩剪切大变形的时效性非常明显,巷道最大收缩率高达每月 500 mm。锦屏电站的相关地下工程也出现了非常严重的松动圈随时间扩大以及围岩的大变形问题,其松动圈的范围和变形量均远大于一般地下工程的松动圈及按照弹塑性理论计算的数值。



图4 南非 Hartebeestfontein 金矿硬岩巷道围岩的大变形^[15]

Fig.4 Large deformation of surrounding rocks for Hartebeestfontein gold mine in South Africa^[15]

深部岩体围岩组构随时间增长而不断调整重组,导致其变形亦随时间持续增长。只要岩石的应力水平值达到或超过某种极限,就将产生随时间而增长发展的流变大变形。进入深部以后,在高地应力和开挖扰动的作用下,岩石实际表现出的就是它的峰后强度特性,破坏时其不可逆变形量通常较大。用以小变形假设为前提的弹塑性理论来解决深部工程岩体大变形问题是不合适的。

图5为高围压下岩石试样的压缩破坏模式。在较高的围压下,岩石的压缩破坏模式表现为沿两簇相互斜交的滑移线的非连续塑性大变形。试样的塑性大变形与某些表面上的局部剪切联系在一起。在发生剪切滑移的表面上,位移矢量经受着很大的间断^[18]。这种间断表现得非常突出,必须在描述塑性变形时加以考虑。

2.3 围岩回弹-时间效应

洞室开挖卸荷破坏了地壳内原有的应力平衡状态,从而产生深部围岩的回弹及应力的重分布。应力的调整和传递具有时间效应,围岩垂直应力峰值随着时间的增长向岩体深部转移,强度随着时间的

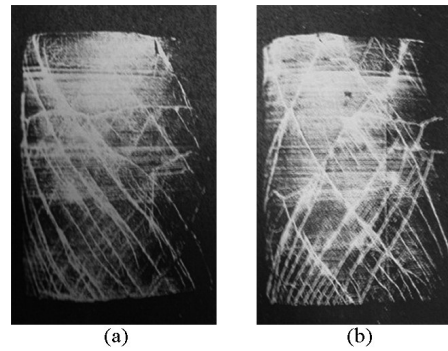


图5 高围压压缩破坏试验破坏模式

Fig.5 Failure mode of high confining pressure compression destruction test

的增长而降低,最终趋向于一个稳定值。

以图6所示的应力图来说明洞室开挖前后围岩应力状态的变换,设在开挖前洞室内部的初始应力状态为应力圆①,洞室开挖破坏了地壳内原有应力的平衡状态,在较大范围发生应力重分布。洞室开挖后瞬时,洞壁处水平应力为0,由于应力集中,垂直应力大大增加,此时围岩的应力状态为图6中应力圆②,围岩的强度以 $t \sim 0$ 的强度包络线表示,其实这样的应力状态是维持不了的,随着应力的调整和传递,其结果围岩将产生回弹,侧墙向内移动,靠近洞壁处的垂直应力也突然下降,此时的应力圆②突然下降为应力圆③,强度包络线也下降为 $t > 0$,这是刚成洞时围岩暂时能够维持的应力状态,要长期维持并最终保持稳定的应力状态乃是与 $t \rightarrow \infty$ 长期强度包络线相切的应力圆④。

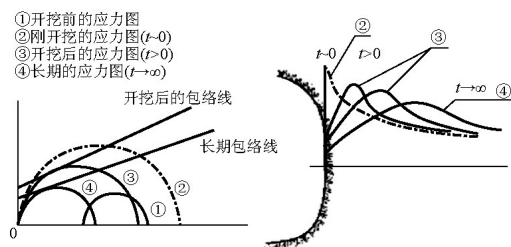


图6 洞室围岩垂直应力随时间变换曲线

Fig.6 Curves that vertical stress of surrounding rock changes with time

综上,深部岩体工程围岩变形破坏是一个在上述多种因素共同作用下应力应变时空演化的复杂问题,深部岩体特征科学现象如分区破裂(空间效应)、岩爆(内应力释放-动力效应)、大变形等只是这些演化过程的外在表现,是一个科学问题的多个

现象,应当用统一的理论来解释和模拟,对深部围岩变形破坏的分析必须考虑深部岩体加卸荷呈现的动力现象,考虑与时间相关的体积扩容及摩擦滑移,以及考虑体积与剪切变形曲线峰值后大变形等。

3 动力破坏过程研究中的基本问题

3.1 动力破坏过程研究的试验手段

室内试验是研究岩石动力特性的重要手段,目前多采用此类方法,针对不同加载率或应变率段的动力学试验,需要借助不同的加载试验机进行, Li等^[19]利用动载试验机系统研究了应变率小于 $10^0/s$ 时岩石的动力学特性;应变率在 $10^0\sim 10^3/s$ 的试验研究主要利用SHPB试验机及轻气炮等进行^[20], Li等最早提出了获得岩石动态应力-应变全图测试的合理加载波形的试验方法,提出利用半正弦波加载是SHPB岩石冲击试验的理想波形^[21]。许多学者在室内试验的基础上提出了岩石动力破坏本构模型,例如单仁亮等^[22]结合对花岗岩和大理岩实测冲击破坏本构曲线的分析,将统计损伤模型和粘弹性模型相结合,建立了一个考虑应变率效应的岩石冲击破坏时效损伤模型。

深部岩体经由卸荷扰动而产生破坏,采用加载试验得到的破坏理论和本构模型应用在深部岩石工程受到了诸多质疑,一些学者开始展开岩石卸载力学响应的研究。由于试验仪器的限制,有关深部岩体卸载试验以卸围压试验为主,即利用MTS试验机将试件加载到一定的应力水平,然后以一定的速率降低围压,例如李天斌等^[23]通过保持轴压或增加轴压同时卸载围压的试验研究了玄武岩的变形破坏特征,发现卸荷条件下扩容膨胀和破坏过程更加强烈;尤明庆等^[24]通过对大理岩卸围压破坏过程的研究发现卸围压会导致试样本征强度的降低。由于卸围压试验应力路径受到较大限制,近几年来,一些学者开展了真三轴加卸载试验,例如冯夏庭课题组^[25,26]开展了一系列真三轴条件下硬岩的破坏过程及其声发射特征研究,试验发现应力路径和应力水平对岩石发生脆性破坏具有重要影响,长江科学院^[27]和太原理工大学^[28]也研发了真三轴试验系统,并开展了相应的试验,这些试验成果都对加深岩石卸载破坏机制及其影响因素的认识起到了重要作用。然而目前的卸荷试验也还是存在一定的缺陷,最主要的在于深部岩体是在漫长的地质史中形成

的自然造物,其在地应力长期压缩作用下的构造特征和含能特性等显著区别于实验室经历短期加载的岩样。汤雷等^[29]曾经分析岩石本构试验与工程实际工程岩体之间的区别,尤其指出了常规本构试验在高应力和峰后非线性段与实际情况的偏差。

3.2 动力破坏过程中的时间效应

文献[30,31]指出,在研究材料的动力破坏机理时,须要将时间引入到强度理论中,并作为塑性流动和破坏过程的特征之一。动态加卸载情况下,不仅应力波的传播需要时间,塑性流动和断裂区域的发展及迁移都需要时间,在此时间内应力和应变状态的宏观参数达到某极限值,并对材料的结构发生作用,使结构发生位错累积、微细宏观孔隙和裂纹等变化^[30]。

深部岩体动力破坏的时间效应可以从下列现象中得到启示:在大埋深岩体中取出的岩样,在一定时间内可以保持其完整性,但在没有任何外部作用下会自发地快速崩解,采用特殊的措施(例如在完整岩样的表面刻痕或轻微扰动)会加速这种崩解。从这种现象可以分析出:岩样完全卸荷后仍有较高的残留应力,残留应力释放具有时间后效效应,外部扰动(边界的改变、动力作用等)对岩体内应力释放起着“解除约束”的影响作用,并与岩样自行崩解的时间效应存在着极其复杂的相互作用关系。

文献[30]把材料破坏过程分为3个阶段,其组成为 $t=t_e+t_p+t_r$, t_e 为形成位错结构型微观裂纹所需要的时间(弹性时间), t_p 为宏观裂纹开始传播所需要的滞后时间(微细观缺陷萌生和成长所需要的时间), t_r 为破碎时间(宏观裂纹扩展到相互贯通及将时间切割成碎块所需要的时间),利用这3个时间参数可以建立材料的微细观缺陷发展与宏观破坏之间的联系,然而遗憾的是目前对这3个时间的研究甚少。

对于 t_p 的研究可以找到零星的研究资料,按照文献[32,33], t_p 可以按照下列的方法进行估算

$$t_p = \frac{\eta}{\mu} \quad (1)$$

式(1)中, η 为介质的动态粘度。

陈宗基于大量试验和现场监测数据建议下列长期破坏计算公式^[34]

$$\left(\frac{t_p}{t_{p0}}\right)^r = \frac{Const}{(\tau/f_3 - 1)^n} \quad (2)$$

式(2)中, t_{p0} 为短期快速试验所得的破裂滞后时间; τ 为剪应力强度; f_3 为长期强度; r 为工程岩体

与岩样相似性条件, $r \approx 1$; $Const = 0.5 \sim 1$; n 对于花岗岩为 4~5, 对于软弱岩石为 6~7, 由有限元计算能够估算平均值 \bar{t} , 因此能够粗略的预报 t_p 。

从物理意义上讲 t_p 为破裂的孕育、成长时间, 这一时间内声发射的计数随应力偏量增加而增加, 准确的估算 t_p 对预测岩爆和掌握有效的衬砌时间至关重要。在列宁格勒 Zhurkov 为首的学派里, 按作用力和温度的关系, 对结构和物理性质完全不同的固体“寿命”进行了大量的系统的研究, 提出了著名的 Zhurkov 寿命函数, 可以用来描述开裂裂纹的萌生过程, 这在一些动态断裂模型, 例如 NAG (Nucleation and Growth) 模型^[31]中已经实现, 也可以提供借鉴。

对于 t 目前研究更是匮乏, 依据现有的资料仅能进行大致的数量级评估^[35]

$$t_s \approx \frac{l}{C_T} \quad (3)$$

式(3)中, l 为破坏块体特征尺寸; C_T 为裂尖的运动速度, $C_T = (0.6 \sim 0.9)C_R$, C_R 为瑞利波速。

考虑时间效应的强度演化可以基于著名的裂纹运动散布理论^[32]给出

$$\frac{dY}{dt} = f(Y_s, Y_p, Y, l), Y = \begin{cases} Y_s & t \leq t_0 \\ Y_p & t \geq t_0 + t_s \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, Y 为破坏过程中的强度, Y_s 、 Y_p 分别为破坏完整密实介质和破坏疏松介质的动态流动极限; l 为块体特征尺度; $t_0 = t_e + t_p$ 。

$f(Y_1, Y_2, Y, l)$ 为松弛速度函数, 文献[32]给出了 3 种形式的演化方程

$$\begin{aligned} f_1 &= cons \\ f_2 &= -\beta(Y - Y_2) \\ f_3 &= -\beta \sqrt{(Y_1 - Y)(Y - Y_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 动力破坏过程中断裂损伤的描述

达到弹性极限后, 岩体内部的微裂纹将开始发育和传播, 由内部裂纹萌生和岩石块体相对运动引起的体积扩容是岩石破坏的本质问题之一^[36]。研究表明^[37, 38], 高初始应力岩石的卸荷会造成强烈扩容, 其产生的破坏程度比加载更为强烈。许多学者认识到问题的重要性, 采用不同途径研究了岩石变形破坏过程中的扩容效应, 但目前此类研究的一个不足是大多数研究都建立在唯象的基础上, 缺乏足够的物理基础, 例如陈宗基很早就注意到岩石的扩容现象, 并在试验的基础上提出了用张量表示的、具有普遍性的岩石本构方程(经验方程)^[8]。

更具物理意义的岩石扩容现象的研究需要采用合理的手段描述岩体的断裂损伤, 岩体变形破坏过程中的裂纹发育演化非常复杂, 涉及多种因素和多个尺度, 目前没有有效的分析方法, 文献[31]指出在连续介质框架内对固体变形和断裂过程的描述方法主要有 3 个基本途径: 第一种途径应用传统的强度及塑性屈服判据估算引起固体塑性流动和断裂的条件, 这对于很多种类的材料及实际应用范围来说(材料微结构、微细宏观缺陷、周围介质温度、荷载作用时间等因素影响具有次要意义)是合理的, 传统的强度和塑性屈服判据所依据的相似性条件与物体的特征尺寸无关, 原则上不能描述带有尺度效应的断裂现象; 第二种途径应用断裂力学判据分析固体断裂过程, 此时认为固体通过裂纹快速宏观传播而断裂, 断裂力学的拟静态判据可以估算与结构尺寸及构形、所作用荷载等因素有关的裂纹不扩展的极限状态条件, 断裂力学的动态判据则可用于估算裂纹萌生及其传播过程的条件, 深部岩体动力变形破坏产生很多裂纹, 如果在目前断裂力学框架内把每条裂纹单独地进行研究, 则实际上构成了无法解决的问题, 断裂力学途径只适用于主裂纹传播的模拟; 第三种途径又称为散布损伤力学, 通过裂纹特性参数(如单位体积或面积上的裂纹个数、裂纹平均尺寸、裂纹按尺寸和方向的分布规律等)随时间的变化描述裂纹体系随时间的变化发展情况。对于描述动力变形破坏可变形固体中产生大量断裂的破坏过程而言, 目前情况下第三种途径是最切实可行的, 一些动态断裂情况下, 可以采用两种途径的组合, 例如把主裂纹的传播用断裂力学判据考虑, 而微损伤的发展过程则用散布损伤力学模型研究。

在散布损伤力学框架内描述受损伤的连续介质模型, 必须解决两个问题^[31-33]: 第一对作为损伤变量的具体的物理力学量值的选取, 以及给出适合的动力演化方程来描述物体变形破坏时定义损伤度的定量变化; 第二给出与所选度量相适应的方程来描写损伤连续介质的变形过程。

孔隙介质模型($p-\alpha$ 模型)在描述材料动态断裂中的应用是一个新的课题, 近来俄罗斯学者专注于这个领域的工作。它可以为描述岩体断裂损伤(体积扩容)提供一种新的思路^[31]。

把受损介质表示为带微裂纹(孔洞)的连续介质, 则受损介质的单位体积 V 可以写成单位体积内裂隙(孔洞)的容积 V_p 和基体体积 V_m 之和

$$V = V_p + V_m \quad (6)$$

这种描写的优点在于:能够对非完全(部分)损伤状态下物质受损程度进行试验测量(哪怕试验结束后),以便检验损伤过程与微孔体积之间的相互关系。

几乎所有动载下孔隙介质弹塑性形变理论的基础都是Herrmann-Carroll-Holt的 $p-\alpha$ 模型^[39]或该模型的某些推论,孔隙介质中平均应力 p 与比容 V 的函数关系可以写成

$$p = f(V, \alpha) \text{ 或 } \alpha = g(p) \quad (7)$$

式(7)中, α 为表征孔隙度的参数,常被赋予为受损介质的孔隙率

$$\alpha = V_m/V \quad (8)$$

表示不可逆压缩的关系式 $\alpha = g(p)$ 可以根据球形压缩模型分析或通过试验数据近似获得。不同研究者得出函数 g 的具体形式既有解析表达式,也有试验数据的拟合式^[31]

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - \exp(3p/2Y) \\ \alpha &= 1 - (1 - \alpha_e) \exp\left(\frac{p - p_e}{Y}\right) \\ \alpha &= 1 - (1 - \alpha_e) \exp[1.67\Delta e_s \cdot sh(3p/2Y)] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中,下标 e 表示孔隙材料变形的弹性部分; Y 为动态流动极限。

包含张量球量和偏量分量之间关系的流动函数(塑性势) F 通常可通过两个相近的途径写出。

第一种途径利用Green类型的流动判据

$$F = S_{ij}S_{ij} + \varphi p^2 - \frac{2}{3}(\psi Y_s^2), \quad \psi Y_s = Y_p \quad (10)$$

式(10)中, S_{ij} 为应力偏量; ψ 、 φ 都是孔隙度参数 α 的函数。

第二种途径利用传统的塑性流动增量理论的关系式,包含流动极限对压力的依赖关系

$$F = S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3}(Y(\alpha, p))^2 \quad (11)$$

为了确定应变分量,式(10)和式(11)应当满足弹性应变张量的胡克定律以及相关联的不可逆应变增量的流动定律: $de_{ij}^p = d\lambda \partial F / \partial \sigma_{ij}$ 。文献[31~33]采用了描述各种孔隙介质力学特性与自身损伤度之间关系的更为详尽的定量数据,给出了孔隙弹塑性材料数学模型的公式。

4 深部工程围岩变形破坏特征现象

4.1 分区破裂

分区破裂化现象最早于20世纪70年代在南非

2 073 m深的金矿中首次被发现。近年来,随着国内深部工程的不断增加,中国的学者开始关注分区破裂化现象。以钱七虎院士为首的学术团队在国内率先介绍了国外学者关于分区破裂化现象研究的成果,但由于问题的复杂性,目前对分区破裂化的机理各执其词,研究理论也不统一,按照研究理论的不同,大致可以分为基于支撑压力区的劈裂破坏的解释^[40];基于能量破坏的解释^[41];基于断裂力学的解释^[42];基于主应力方向的解释^[43];基于非欧几何的解释^[44]等。

钱七虎院士^[40,42]指出深部围岩分区破裂化现象是一个与空间、时间效应密切相关的科学现象,分区破裂化效应的产生,一方面是由于高地应力和开挖卸荷导致围岩的“劈裂”效应,另一方面是由于围岩深部高地应力和开挖面应力释放所形成的应力梯度而产生的能量流,分区破裂化的定性规律中应该考虑巷道洞室开挖的速度的影响,分区破裂化与应变型岩爆是一个问题的两个侧面,都取决于岩体开挖后岩石积聚的变形势能转变为动能和破坏能的分配比例,为本文的研究指明了方向。

4.2 岩爆现象

岩爆是一种世界性的地质灾害,极大地威胁着矿山和岩土工程施工人员和设备的安全。目前,国内外在岩爆方面做了大量的研究工作^[45-48]。但是,由于岩爆问题极为复杂,还没有成熟的理论和方法。

研究岩爆发生的原因、条件以及各种因素的相互作用,是预测、预报和控制岩爆发生的理论基础,在实验室研究和现场监测与调查的基础上,各国学者从不同的角度先后提出强度理论、刚度理论、能量理论、岩爆倾向理论、“三准则”理论、失稳理论、三因素理论、孕育规律等一系列重要成果,其中强度理论、能量理论和冲击倾向理论占主导地位。

岩石作为能量源介质,其储能能力非常显著地影响了变形的稳定性^[49],岩爆以能量的突然释放为主要特征,建立并研究岩爆过程中的能量储存、耗散和转移的规律及其与岩爆倾向、强度、形式和发生范围之间的联系,是岩爆研究中的主要内容和必经途径。但目前即使关于岩爆产生的能量也存在分歧,一般认为岩爆过程释放的能量是由于地应力及开挖后的应力重分布引起的宏观围岩的弹性应变能或变形能,但徐则民等^[50]通过实测的地应力资料和相关的岩石力学试验认为围岩积蓄的弹性应变能或变形能远远达不到岩爆释放能量的水平,提

出岩爆能量应属于断裂面两侧断裂晶体的应变能,并非围岩整体的应变能。但断裂晶体的应变能是否能满足岩爆释放能量量级,并没有足够的佐证。

岩爆的室内试验也是岩爆机理研究的难点,何满潮等研发了应变岩爆机理试验系统和冲击型岩爆试验系统^[51],在室内完成了近300次岩爆试验,并为意大利、伊朗、新加坡、加拿大等国家做了岩爆试验。

深部岩体工程的分区破裂和岩爆机理虽然复杂且研究理论众多,但仍存在一个必须遵循的研究脉络,对深部岩体动力破坏过程中的时间效应以及动态的断裂损伤过程进行合理的描述是分区破裂和岩爆机理研究的必经之路。

5 结语

综上所述,深部岩体动力变形破坏研究尽管取得了许多成果,但研究方法和理论尚未统一,并留有空白,通过本文对深部围岩变形破坏机理、深部岩体动力破坏过程中的基本问题(时间效应、断裂损伤描述等)以及深部岩体特征科学现象(分区破裂、岩爆理论)等方面研究成果的梳理和总结,可以得到下列结论。

1)深部岩体力学问题是有效的四维空间问题,是在开挖寿命尺度上应力状态的演化,对深部围岩变形破坏机理的研究必须要建立与时间、空间有关的岩石性质的概念。深部围岩的变形可归结为因回弹造成的内应力释放、依时间而变化的扩容、塑性楔体沿滑动面向内移动形成的围岩松动等因素的共同作用。

2)由于数学发展的限制,目前缺少一种能有效模拟岩体中非贯通裂隙扩展、连接和贯通全过程的数值方法,基于连续介质力学的数值方法仅能解决连续介质问题,基于离散元等不连续介质力学的数值方法只能解决离散块体运动问题。要揭示深部岩体在卸荷扰动状态下真实的变形与破坏过程,目前情况下必须继续在连续介质力学框架内研究基于微、细观物理力学的理论,将时间引入到强度理论中,作为塑性流动和破坏过程的特征之一,并采用合理的手段(采用散布损伤力学途径选取合适的度量和动力演化方程)描述岩体的断裂损伤。

3)关于岩爆和分区破裂的机理研究虽然取得了长足发展,但研究的方法和理论不统一,在定量的数值分析和预测上更是远未达到解决问题的程度。岩爆和分区破裂是一个科学问题的两个现象,

应当用统一的理论来解释和模拟,对深部岩体动力破坏过程中的时间效应以及动态的断裂损伤过程进行合理的描述是分区破裂和岩爆机理研究的必经之路。

参考文献

- [1] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(1): 1-5.
- [2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [3] 王思敬. 论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 433-450.
- [4] 赵生才. 深部地下空间开发利用——香山科学会议第230次学术讨论会侧记[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 115-118.
- [5] Qian Q H. New developments of rock engineering and technology in China [C]// Harmonising Rock Engineering and the Environment. 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. Beijing, 2011.
- [6] Feng X T. New rock mechanics development in China [C]// Harmonising Rock Engineering and the Environment. 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics. Beijing, 2011.
- [7] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1-20.
- [8] 陈宗基. 岩爆的工程实录、理论与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(1): 1-18.
- [9] 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.
- [10] Read R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41: 1251-1275.
- [11] 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 & Mining Sciences, 2004, 41: 785-812.
- [12] 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): 2064-2069.
- [13] 魏进兵, 邓建辉, 王佛割, 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.
- [14] 吴世勇, 龚秋明, 王鸽, 等. 锦屏II级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对TBM开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1089-1095.
- [15] 黄润秋, 黄达, 段少辉, 等. 锦屏I级水电站地下厂房施工期围岩变形开裂特征及地质力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 23-35.
- [16] 李杰, 宋春明, 胡啸, 等. 深部巷道围岩变形破坏机制分析, 岩土力学, 2012, 33(s2): 365-370.
- [17] Bosman J D, Malan D F, Drescher K. Time-dependent tunnel deformation at Hartebeestfontein Mine [C]// Stacey T R, Stimpson R G, Stimpson J L, eds. Proc. AITES-ITA 2000-World Tunnel Congress, Durban: Tunnels under Pressure, 2000: 55-62.
- [18] 李杰, 李文培, 施存程, 等. 基于剪切滑移的圆形洞室应力状态研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3271-3277.
- [19] Li H B, Zhao J, Li T J. Triaxial compression tests of a granite at different strain rates and confining pressures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1057-1063.
- [20] Paterson M S, Wong T F. Experimental Rock Deformation—The Brittle Field [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [21] Li X B, Zhou Z L, LOK T S, et al. Innovative testing technique

- of rock subjected to coupled static and dynamic loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(5): 739-748.
- [22] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1771-1776.
- [23] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1993, 12(4): 321-327.
- [24] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(1): 24-29.
- [25] 陈景涛, 冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8): 1537-1543.
- [26] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞. 开挖与支护应力路径下硬岩破坏过程的真三轴与声发射试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 25(S): 500-506.
- [27] 李维树, 黄书岭, 丁秀丽. 中尺寸岩样真三轴试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2197-2203.
- [28] Zhao Y S, Wan Z J, Feng Z J, et al. Triaxial compression system for rock testing under high temperature and high pressure [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2012, 52: 132-138.
- [29] 汤雷, 洪晓林. 地下工程岩石力学本构试验的失真过程[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(3): 335-339.
- [30] 尼基福罗夫斯基 C B, 舍马金 H E. 固体动力破碎 [M]. 余静, 彭庆霖, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
- [31] 奥尔连科 И П (俄). 爆炸物理学 [M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [32] 王明洋, 葛涛, 戚承志, 等. 爆炸荷载作用下岩石的变形与破坏研究(I) [J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(2): 43-54.
- [33] 王明洋, 王立云, 戚承志, 等. 爆炸荷载作用下岩石的变形与破坏研究(II) [J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(3): 9-20.
- [34] 陈宗基. 根据流变学与地球动力学观点研究新奥法[J]. *岩石力学与工程学报*, 1988, 2(7): 97-106.
- [35] 戚承志, 钱七虎. 岩体动力变形与破坏的基本问题 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [36] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 448-455.
- [37] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(1): 21-33.
- [38] 黄伟, 沈明荣, 张清照. 高围压下岩石卸荷的扩容性质及其本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(s2): 3475-3481.
- [39] Carroll M M, Holt A C. Static and dynamic pore collapse relations for ductile porous materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43(4): 1626-1635.
- [40] 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.
- [41] 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): 2369-2376.
- [42] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 878-885.
- [43] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(3): 433-438.
- [44] Qian Qihu, Zhou Xiaoping. Non-euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state [J]. *Journal of Mining Science*, 2011, 47(1): 37-46.
- [45] Stacey T R, Ortlepp W D, Kirsten H. Energy-absorbing capacity of reinforced shotcrete, with reference to the containment of rockburst damage [J]. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1995, 95(3): 137-140.
- [46] Kaiser P K, McCreath D R, Tannant D D. Canadian rockburst support handbook [R]. Sudbury: Geomechanics Research Centre, Laurentian University, 1996.
- [47] 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.
- [48] 冯夏庭, 张传庆, 陈炳瑞, 等. 岩爆孕育过程的动态调控 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 1983-1997.
- [49] 李杰, 王明洋, 范鹏贤, 等. 岩体的加、卸载状态与能量的分配关系, *岩土力学*, 2012, 33(s2): 125-132.
- [50] 徐则民, 吴培关, 王苏达, 等. 岩爆过程释放的能量分析 [J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 104-110.
- [51] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 856-876.

Basic problems for dynamic deformation and fracture of deep rock mass

Li Jie^{1,2}, Wang Mingyang^{1,2}, Zhang Ning¹, Fan Pengxian¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[Abstract] Research on nonlinear mechanical behavior for deep rock mass has become the focus for current international rock mechanics community. The difficulty lies in how to describe the rock mass properties in large dynamic deformation and failure. The test reviews the research results for failure mechanism of deep rock mass, basic problems in dynamic damage process (time effect, fracture description and so on) and characteristic scientific phenomena (zonal disintegration, rock burst). And it shows that: The problems of deep rock mass are

in four dimensional spaces, it is the evolution of the stress state on excavation life scale. To study on the deformation and failure mechanism of deep rock mass, the concept of time and space must be established. To reveal the real deformation and failure process at present, we must continue to study within the framework of continue mechanics based on the theory of micro-meso physics mechanics. Time parameter must be introduced in strength theory as characteristics of plastic flow and failure process, and reasonable means must be adopted to describe the fracture damage of rock mass. The zonal disintegration and rock burst are two phenomena of one scientific problems, they should be explained and simulated by a unified theory.

[Key words] deep rock mass; dynamic fracture; time effect; damage fracture; rock burst; zonal disintegration