

深部非均匀岩体卸载拉裂的时间效应和主要影响因素

范鹏贤^{1, 2}, 王明洋¹, 钱七虎¹

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 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 221008)

摘要: 深部地下工程围岩的拉伸破坏是一个常见的但没有得到充分研究的科学现象。岩石内部包含的缺陷和缺陷处的应力集中被认为与岩石在压应力作用下的拉伸破坏密切相关。基于应力集中的非均匀岩石拉伸破坏模型的理论框架, 系统的研究 3 个影响岩石拉伸破坏的主要因素: 加卸载速率(偏应变率)、缺陷尺度和初始地应力, 对岩石内部缺陷处拉应力的产生和发展过程的影响。研究表明: (1) 偏应变率对缺陷处附加拉应力具有显著的影响, 偏应变率越高, 缺陷处的附加拉应力越大; (2) 不同层次的缺陷对应于不同大小的偏应变率, 偏应变率越高, 对应缺陷的尺寸就越小; (3) 缺陷处的附加拉应力与初始应力成正比, 缺陷较大时, 岩体是否发生卸载破坏由初始应力、应力集中系数和抗拉强度间的关系决定。引用模拟试验和现场观测的结果和现象对理论分析结果进行讨论, 试验现象和现场观测数据均与理论分析基本吻合。

关键词: 岩石力学; 非均匀岩石; 卸载; 拉破坏; 影响因素

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1389 - 08

TIME EFFECT AND MAIN INFLUENCE FACTORS OF UNLOADING SPLITTING OF DEEP-SEATED ROCK WITH NONUNIFORMITIES

FAN Pengxian^{1, 2}, WANG Mingyang¹, QIAN Qihu¹

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: The splitting of stressed rock in the neighborhood of underground openings is a common phenomenon that is not well explained theoretically up to the present. The stress concentration at nonuniformities is believed to be the crucial one among the factors influencing the tensile failure process under pressure conditions. Based on the model of rock with nonuniformities, three main factors of the splitting fracture of rock, including unloading duration(or deviator strain rate), scale of nonuniformities and initial geostress, are detailed investigated in order to reveal the mechanism behind the phenomenon of splitting. The results of theoretical analysis show that: (1) The excess tension stress of nonuniformities is affected by deviator strain rate significantly; and it increases nonlinearly as the unloading duration shrinks. (2) There is a nonlinear corresponding relationship between the scale of nonuniformities and the magnitude of deviator strain rate; and higher deviator strain rate tends to excite

收稿日期: 2010 - 01 - 18; **修回日期:** 2010 - 03 - 23

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(50825403); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732003); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDEK0907)

作者简介: 范鹏贤(1983 -), 男, 2004 年毕业于大连理工大学土木水利学院土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事深部岩体力学方面的研究工作。
E-mail: fan-px@hotmail.com

smaller nonuniformities. (3) If there exist nonuniformities with big scale enough, the maximum excess tension stress is proportional to the initial geostress. Therefore, the possibility of unloading splitting is determined by the relation among the three parameters: initial geostress, stress concentration coefficient and tensile strength. Results of an unloading test, in which the axial stress of hydraulic stressed rock samples is unloaded with different control modes, and data of in-situ core dishing observation, are cited to verify the analytical analysis results. The main phenomena and critical stress condition of core dishing predicted by the theoretical model coincide well with the results of the cited experiments and in-situ observation data.

Key words: rock mechanics; rock with nonuniformities; unloading; splitting; influence factor

1 引言

在岩石力学领域,长期以来对地下坑道周围岩石应力应变状态和破坏的研究主要是利用弹塑性力学的知识,在连续介质力学框架内进行,但是岩石内部包含了大量的节理、微裂纹、包含物、结晶缺陷等尺度不同的构造缺陷。岩石的破坏与均匀连续介质具有本质的区别。大量研究^[1~6]表明,岩石的破坏往往是从局部发展起来的,导致这种现象的原因可归结为 2 个方面:一是由于岩石材料的非均匀性导致的抗力大小差异,二是由于内部缺陷处变形不协调造成的应力起伏。

近十几年来,前一方面的研究取得了重大的进展,在对岩石材料强度不均匀性分布进行假设的研究基础上,结合有限元程序,形成了较成熟理论体系和有限元软件^[7]。但是对后一方面的研究一直困难重重。以 Griffith 理论为代表的微观力学对微裂纹的大小、形状、倾角等进行假设,研究单个裂纹周边的应力分布和扩展准则,而宏观力学则在试验和观测的基础上对岩石进行唯像和经验性的描述。两类理论在近乎平行的道路上各自向前发展。但是,研究人员一直没有放弃沟通两类理论。岩石细观力学的提出和兴起即反映了这种趋势。

在研究细观力学的过程中,M. A. Grinfeld 等^[8, 9]指出:即使是单个的缺陷也是极端复杂的,具体的考虑种类繁多、性状各异的缺陷的形状和特性既无可能也无必要。很多情况下,一些简化描述方法是必要的。基于这种实用主义的思想,一些新方法被提出并付诸应用,具有较大影响的有统计分形强度理论^[10],代表性体元法^[9, 11]等。基于缺陷处应力集中的非均匀岩体拉破坏模型^[12]也是建立岩体细观非均匀性与宏观力学性质之间联系的有益尝试。

大量试验结果^[1, 4, 13, 14]表明,岩石的拉伸破坏在所有破坏形式中是最基本和普遍的,甚至在宏观

压应力作用下,拉伸破坏在脆性断裂的起始阶段也是主要的破坏形式^[1, 13, 14]。岩石的宏观压应力条件和拉破坏模式之间的悖论引起了学界广泛的讨论。先后有等效拉应力理论^[15]、极限拉应变理论^[16]、剪胀角理论^[17]等被提出,用于分析岩石在宏观压应力作用下的拉伸破坏机制和现象。部分理论由于其简明性已经得到许多学者和工程师的认同,但是在解释一些深地下岩石力学现象时,这些理论显得过于简化,甚至与某些试验现象相抵触^[14]。

非均匀岩体拉破坏模型^[12]认为岩石在压应力下发生拉伸破坏的主要原因是缺陷处的应力集中,建立了缺陷处应力状态的微分方程,推导了岩石在轴向加载和卸载情况下缺陷处局部拉应力的解析表达式,为解释完整岩块的劈裂和卸载张拉破坏提供了新的理论视角。

需要说明的是,王明洋等^[12]和本文中的缺陷并不是特指某种具体形状的微裂纹,而是一个不均匀材料占据和影响的区域。为简化分析,假设岩块内部缺陷稀疏分布,缺陷应力场之间不发生相互作用^[5]。变形过程中,材料不均匀性将引起一个局部的自平衡附加应力场,该应力场有可能导致较高的局部应力,从而引起材料的微观动力断裂。同时,应力集中系数 K 也并不对应某种几何形状的缺陷,而应看作是缺陷的整体效应,是一种宏观的材料参数。

本文在王明洋等^[12]的基础上对具有初始应力的岩块卸载时发生拉伸破坏的 3 个主要影响因素(卸载速率、缺陷尺度和初始应力)进行了进一步探讨。

2 非均匀岩体模型及其主要结果

2.1 基本公式

具有内部缺陷的脆性岩体宏观上的应力-应变关系服从胡克定律,但缺陷附近有应力的起伏分布,

缺陷处的不协调变形和应力集中导致的拉应力是岩石发生拉伸破坏的主要原因^[12]。

岩体内部的局部应力 σ_{ij}^{loc} 可分为 2 个部分：一是弹性应力 σ_{ij}^e ，遵循胡克定律，在整个区域内均匀分布；二是缺陷引起的附加应力 $\Delta\sigma_{ij}$ ，仅在缺陷区域内不为 0。忽略脆性岩石拉伸破坏过程中的塑性变形，局部应力 σ_{ij}^{loc} 可表示为两部分之和：

$$\sigma_{ij}^{\text{loc}} = \sigma_{ij}^e + \Delta\sigma_{ij} \quad (1)$$

在准静态加卸载或较低应变率情况下，缺陷处应力集中的演化方程^[12]可近似为

$$\frac{d\Delta\sigma_{ij}}{dt} = K\rho c_s^2 \dot{e}_{ij} - \eta \frac{\Delta\sigma_{ij}}{l} \quad (2)$$

式中： e_{ij} 为偏应变，且 $e_{ij} = u_{ij} - (1/3)\delta_{ij}u_{ij}$ ， δ_{ij} 为 Kronecher 符号， \dot{e}_{ij} 为 e_{ij} 随时间的变化率； $\Delta\sigma_{ij}$ 和 K 分别为特定尺寸的缺陷上的附加应力和材料的应力集中系数； ρ 为介质的密度； c_s 为剪切波波速； η 为影响附加应力松弛速率的材料参数； l 为缺陷尺度。

式(2)右侧第一项代表剪切应变导致的附加应力，其形式类似于胡克定律；第二项描述了附加应力的松弛，假设附加应力松弛速率 $d\Delta\sigma_{ij}/dt$ 的大小与缺陷尺寸成反比。该模型考虑了缺陷处的应力集中和松弛对材料应力场的影响，也考虑了加卸载速率或应变速率对附加应力的影响。

2.2 应力集中产生机制及相关参数说明

陈宗基^[18]很早就注意到深部岩体与一般岩石不同，并提出了“封闭应力”的概念。他认为，由于岩石是非均匀材料，在变形过程中，晶体间存在摩擦力，局部变形将受到阻碍，从而引起应力积累。因此岩体中有部分应力被封存着，并处于平衡状态。岩爆和岩芯饼化即是封闭应力释放的结果。

缺陷处的应力集中和起伏与封闭应力类似，也是由于材料的非均匀性引起的。由于材料的非均匀性，不同部位的变形是不协调的，这就不可避免的会在缺陷内部和边界产生应力集中和次生应力场。由于变形不协调而导致的应力集中不仅和缺陷的尺寸有关，还与应力的变化速率有关，不同尺度的缺陷处附加应力的大小和消散的快慢也必定是不一样的。岩石内部包含了大量的缺陷，其大小形状各异，既无可能也无必要对其一一考察。充分利用岩石内部缺陷的自相似构造特性，在细观机制和宏观力学表现之间建立简洁但基本符合实际的定量联系，通过尽可能少的参数来反映尽可能多的特性是必要且

可行的。

图 1 概略描绘了不均匀材料中缺陷处应力集中的一种特殊情况：在 z 轴应力卸载过程中，由于不同材料之间变形的不协调，将在 z 轴方向引起自平衡局部附加应力场 $\Delta\sigma_{zz}(x, y, z, t)$ 。如果附加应力和平均应力的合力超出了材料的局部抗拉强度，则将发生微观裂纹的生成和扩展。 $\Delta\sigma_{zz}(t)$ 则特指 t 时刻应力集中区 z 方向附加应力的最大值。

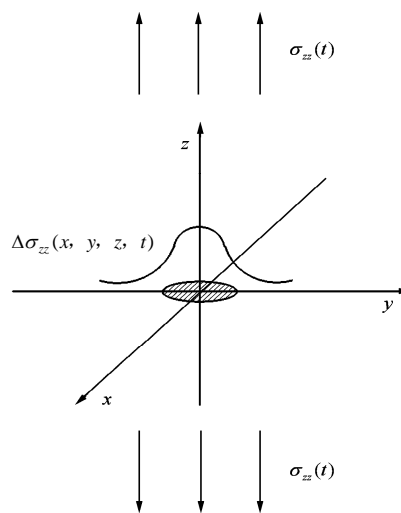


图 1 缺陷处的应力起伏

Fig.1 Stress fluctuation of nonuniformity

式(2)中出现的岩石参数有 5 个，分别是密度、剪切波速、材料应力集中系数、材料应力松弛系数和缺陷尺度。其中材料应力集中系数 K 和材料应力松弛系数 η 可以通过宏观试验确定，如轴压变形试验和弹性后效试验等。

缺陷尺度的物理意义不同于断裂力学的微裂纹尺寸，而应该看作是一种材料脆性断裂过程的特征参数。在不同的变形速率下，起到决定作用的缺陷具有不同的尺度。

岩石具有复杂的构造层次，这种内部构造层次显著影响岩石的物理力学性质^[19]。不同的构造层次对应着不同的强度、黏性及应变率。通常随着变形速度的增大，发生变形破坏的优势构造层次将逐渐由宏观向微观层次过度，并表现在破坏后块体的尺寸上^[20]。岩石结构的层次结构至少在 5~6 个数量级上具有自相似性，其分布可以通过分析弹性波在岩石中的衰减规律确定^[21]。由于确定岩石中缺陷的分布方法及其原理比较复杂，本文中假设缺陷尺度及其分布是已知的。

2.3 围岩的卸载拉裂

假设岩体受静水压力 $-\sigma_0$ 的作用，应力作用的

时间足够长, 岩体中的缺陷处的应力集中已经完全松弛, 在其中一个方向上卸载(见图 2), 考察岩石的应力-应变状态。试验研究表明, 卸载引起的破坏一般为垂直于卸载方向的拉裂, 因此仅考虑 z 方向的附加应力。

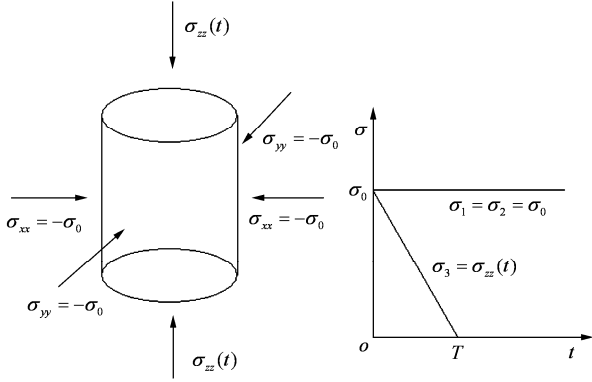


图2 卸载示意图

Fig.2 Sketch of unloading

令岩体 x, y 轴方向应力保持不变, z 轴方向线性卸载, 卸载公式为

$$\sigma_{zz}(t) = \begin{cases} -\sigma_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) & (0 < t \leq T) \\ 0 & (t > T) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T 为卸载持续时间。

缺陷处 z 方向的局部附加拉应力^[12]为

$$\Delta\sigma_{zz} = \begin{cases} \frac{K}{3} \frac{\sigma_0}{T} \frac{l}{\eta} \left(1 - e^{-\frac{\eta}{l}t}\right) & (0 < t \leq T) \\ \frac{K}{3} \frac{\sigma_0}{T} \frac{l}{\eta} \left(1 - e^{-\frac{\eta}{l}T}\right) e^{-\frac{\eta}{l}(t-T)} & (t > T) \end{cases} \quad (4)$$

缺陷处的局部应力 σ_{zz}^{loc} 是由 σ_{zz}^e 和 $\Delta\sigma_{zz}$ 组成的。考虑到 $\sigma_{zz}^e \approx \sigma_{zz}(t)$, 可得

$$\sigma_{zz}^{\text{loc}} = \sigma_{zz}^e + \Delta\sigma_{zz} \cong \sigma_{zz}(t) + \Delta\sigma_{zz} = -\sigma_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) + \frac{K}{3} \frac{\sigma_0}{T} \frac{l}{\eta} \left(1 - e^{-\frac{\eta}{l}t}\right) \quad (5)$$

3 深部围岩卸载拉伸破坏的影响因素

依据节 2 的模型结果, 岩体中缺陷处的局部拉应力与很多因素有关, 主要包括缺陷处的应力集中系数、缺陷的尺寸、缺陷处应力松弛的速度、初始应力和加卸载时间等。下面分别对 3 个影响岩体卸

载破坏的主要因素: 卸载速率、缺陷尺寸分布和初始地应力进行分析。

3.1 卸载速率

设岩体参数为: $\eta = 2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $K = 1$, $l = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$, 初始应力 $\sigma_0 = 50 \text{ MPa}$, 卸载模式采用图 2 所示形式, 持续时间分别为 50, 100, 200 和 400 s。

图 3 为不同卸载时间卸载时缺陷处轴向附加拉应力的时程曲线。图 3 表明: 卸载速率越快, 缺陷处的附加应力增长越快, 附加拉应力峰值越高, 卸载速率对缺陷处的附加应力具有显著影响。在快速卸载的情况下($T = 50 \text{ s}$), 平行于卸载方向的拉应力峰值可达近 11 MPa, 超过一般岩石的抗拉强度, 将导致一定尺度范围内的缺陷被激活, 触发岩石内部微裂纹的不稳定发展过程, 进而可能导致岩石在快速卸载情况下的拉伸破坏。卸载结束后, 附加应力逐步松弛, 松弛的速度随附加应力峰值的增大而增大。

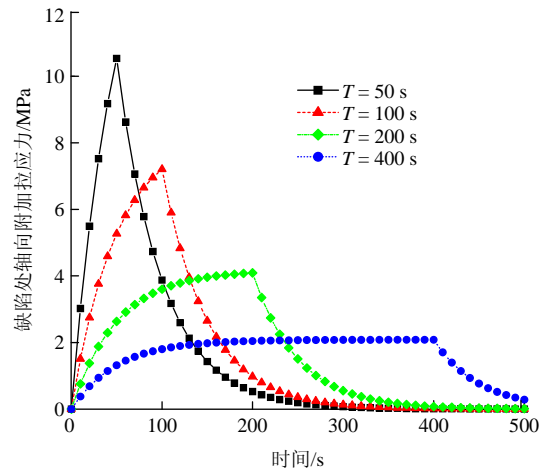


图3 不同卸载时间卸载时缺陷处轴向附加拉应力的时程曲线

Fig.3 Time-history curves of excess tension stress with different unloading durations

图 4 为具有初始应力的岩石试件卸载时缺陷处轴向局部应力的时程曲线。从图 4 可以看出, 卸载速率较快时(如 $T = 50 \text{ s}$), 缺陷处的局部应力迅速从压应力转变为拉应力, 并在卸载结束时达最大值, 之后逐步松弛。如果局部应力超过缺陷处材料的抗拉强度, 将使岩体在缺陷处发生破坏, 进而导致裂纹的扩展。而卸载速率较慢时(如 $T = 400 \text{ s}$), 缺陷处的附加拉应力较小, 并在卸载结束后逐渐松弛, 较难引起岩体的破坏。

3.2 缺陷尺度

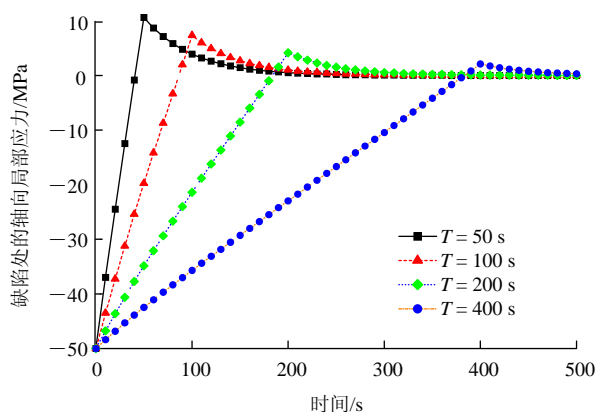


图4 卸载时缺陷处轴向局部应力的时程曲线

Fig.4 Time-history curves of local stress of nonuniformities

设定应力松弛速率 $\eta = 2 \times 10^{-8}$ m/s, 应力集中系数 $K = 1$, 初始应力 $\sigma_0 = 50$ MPa, 变化加卸载速率和缺陷尺寸大小, 分别考察附加拉应力与卸载速率及最大附加拉应力与缺陷尺寸之间的关系曲线。卸载模式仍采用图2所示形式。

轴向卸载时不同卸载周期的岩石内部不同尺寸缺陷处附加拉应力的时程曲线见图5。从图5可以得出如下结论:

(1) 若卸载速率相同, 则卸载持续过程中, 较大尺寸缺陷处的局部附加应力与时间基本成正比, 而较小尺寸缺陷处的局部附加应力与时间的关系则是非线性的;

(2) 卸载速率相同的情况下, 缺陷的尺寸越大, 则同一时刻缺陷处局部附加拉应力的数值就越大;

(3) 缺陷尺寸较大时, 卸载过程完成后其局部应力集中衰减较慢;

(4) 缺陷尺寸大小与局部附加拉应力之间的关系是非线性的, 缺陷尺寸很小或很大时, 局部附加拉应力对缺陷尺寸的变化不敏感。

图6为轴向卸载情况下卸载结束时的最大局部附加拉应力和缺陷尺寸之间的关系。

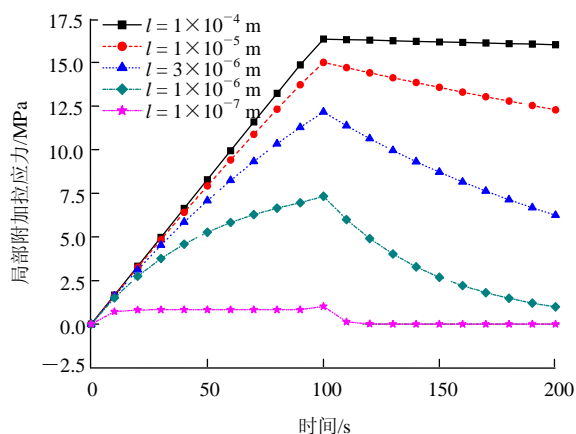
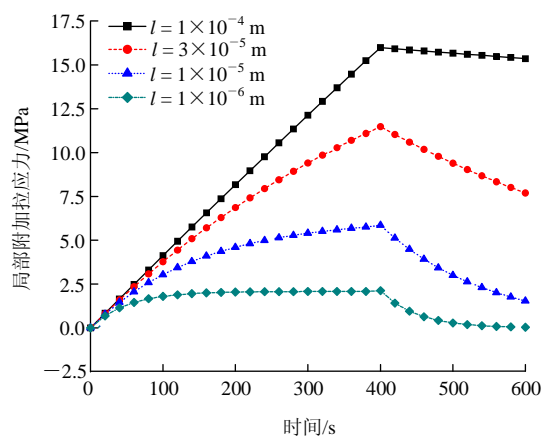
(a) $T = 100$ s(b) $T = 400$ s

图5 卸载时不同尺寸缺陷处附加拉应力的时程曲线

Fig.5 Time-history curves of access tension stress of nonuniformities with different scales during unloading

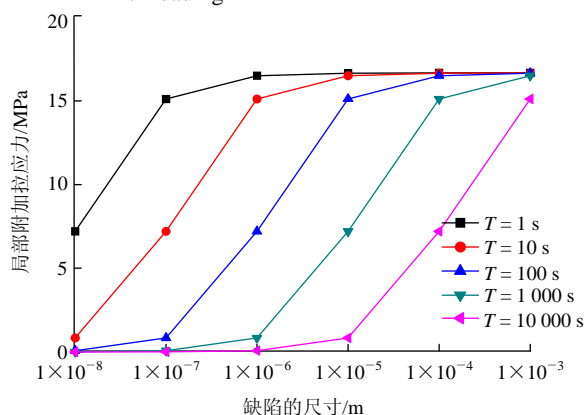


图6 卸载时最大局部附加拉应力与缺陷尺寸之间的关系

Fig.6 Relationships between the maximum access tension stress and the scale of nonuniformities during unloading

从图6可以看出, 不同加卸载速率激活的缺陷尺寸不同; 对于一定的卸载速率, 只有大于一定尺寸的缺陷处才会产生较大的附加拉应力; 卸载速率越快, 被激活的缺陷的临界尺寸越小。也就是说, 当偏应变率较高时, 细观和微观层面上的缺陷被同时激活, 均产生较大的局部拉应力; 而在偏应变率较小的情况下, 只有尺寸较大的缺陷才会被激活。

依据王明洋等^[12]模型的公式, 假设岩石的剪切波速为 3 000 m/s, 密度为 2 500 kg/m³, 则当 $T = 1$ s 时, 岩石的偏应变率约为 10^{-3} 量级。对照图6中的曲线和偏应变率量级, 可得偏应变率量级与被激活缺陷的临界尺寸的量级之间的大致对应关系(见表1)。

3.3 初始地应力

若缺陷尺寸较大, 卸载过程中始终有 $l \gg \eta t$, 则可将式(4)中的第一式作迈克劳林展开:

表 1 偏应变率和被激活的缺陷尺寸量级对应关系

Table 1 Relationship between the scale of excited nonuniformities and the deviator strain rates

卸载时间/s	偏应变率量级/s ⁻¹	被激活缺陷的尺寸量级/m
10 ⁰	10 ⁻³	>10 ⁻⁷
10 ¹	10 ⁻⁴	>10 ⁻⁶
10 ²	10 ⁻⁵	>10 ⁻⁵
10 ³	10 ⁻⁶	>10 ⁻⁴
10 ⁴	10 ⁻⁷	>10 ⁻³

$$\Delta\sigma_{zz} = \frac{1}{3T} \frac{l}{\eta} K\sigma_0 \left(1 - e^{-\frac{\eta}{l}t}\right) = \frac{1}{3T} \frac{l}{\eta} K\sigma_0 \left(1 - 1 + \frac{\eta}{l}t + R_n\right) \cong \frac{1}{3} K\sigma_0 \frac{t}{T} \quad (6)$$

当 $t=T$ 时, 缺陷处的局部拉应力最大, 岩体在缺陷处发生破坏的临界条件可表示为

$$\sigma_{zz \max}^{\text{loc}} = \sigma_{zz}(T) + \Delta\sigma_{zz}(T) = \frac{K}{3} \sigma_0 = \sigma_t \quad (7)$$

初始静水压力的临界值为

$$\sigma_{0c} = \frac{3}{K} \sigma_t \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 如果岩体中包含有较大尺度的缺陷, 则岩体是否发生破坏主要是由初始应力的、应力集中系数和岩石的抗拉强度 3 个参数之间的相对关系决定的。式(8)可以用来估计能够发生岩芯饼化现象的临界地应力条件和临界深度。

对于特定的岩石材料, 应力集中系数和抗拉强度是固定的, 在初始静水压力的作用下某一方向的快速卸载能否导致岩体在垂直于卸载方向的拉伸破坏的决定性因素是初始压力的大小。

4 讨 论

4.1 卸载试验现象及其理论解释

岩石在卸载条件下的破坏是一个采矿和其他地下工程中经常遇到的现象, 产生的拉裂缝往往平行于地下工程的边界。卸载破坏现象虽引起了学术界的注意, 但相关研究还不够充分, 对卸载拉裂机制认识不深。为检验本文理论的适用性, 下面讨论一个国外报道的具有初始应力岩石的轴向卸载试验, 并给出试验现象的定性解释。

为模拟岩石的卸载拉裂, E. Bauch 和 C. Lemmp^[14]利用直径为 70 mm, 长径比为 2:1 的德

国红砂岩试件进行了一系列加卸载试验。试验岩石的力学参数见表 2。

表 2 试验岩石的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of sample sets used

试件组别	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
1	54	3.9
2	88	4.9

所有的试件均在静水压力($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)的基础上开始加载或卸载。为比较不同影响因素对岩石拉伸破坏模式的影响, 设计了 3 种卸载方式, 它们分别是: (1) 围压不变, 卸载速率或应变率控制下的轴压缓慢卸载; (2) 围压不变, 轴压的突然卸载; (3) 轴压不变, 围压的逐步加载。

第一种卸载方式下, 卸载以准静态的方式进行。虽然尝试了不同的围压和卸载速率或应变率的组合, 但始终未观察到岩石试件的张性破坏。在卸载过程中, 试件的主应力差最大达到 75 MPa, 平均轴向拉应变达到 0.7%, 最大轴向应变则达到 1.5%。

第二种卸载方式下, 围压保持不变, 轴向压力快速卸载到 0。在这种情况下, 2 组岩石试件均发生了快速的拉裂破坏, 其中储存的能量以爆炸性的形式快速释放。2 种组别的岩石试件, 发生拉裂破坏的静水压力强度分别大于 20 和 25 MPa。一般情况下, 0.1% 的应变足以导致试件的破坏。试件的破裂面为单个或数个平行于端面的拉伸裂缝, 破坏后的试件如图 7 所示。

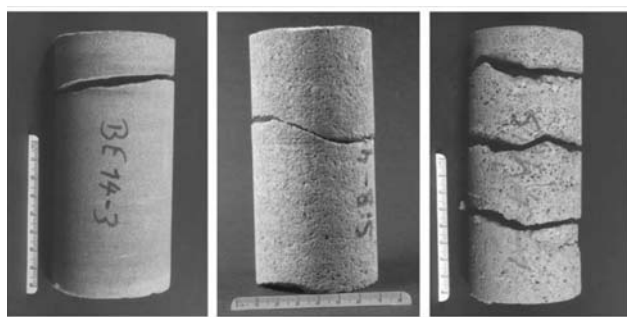


图 7 围压恒定时轴压突然卸载后试件的拉伸破坏

Fig.7 Tensile fracture of samples due to abrupt unloading of axial stress with constant radial stress

第三种试验方式是保持轴向压力不变, 缓慢的增加围压, 试验中试件的应变与第一种加载条件基本相当, 同样没有观察到试件的拉伸破坏。

E. Bauch 和 C. Lemmp^[14]的试验向现有的理论提出了难题。岩石试件在较小的拉应变时拉裂, 却

在 10 倍以上的拉应变情况下保持完好。试验表明, 拉应变、最大最小主应力差值均不是影响岩石试件拉伸破坏的主要因素, 而卸载速度和抗拉强度则具有显著的影响。

如果采用王明洋等^[12]基于应力集中的拉裂准则和本文对卸载拉破坏影响因素的探讨, 试验中发现的这些现象则能在很大程度上得到解释。

首先考察第一种试验条件——缓慢卸载。试验中, 正应变率范围为 $1.2 \times 10^{-7} \sim 2.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。对于试验中试件的应力状态, 偏应变在数值上比正应变稍小。试验中最大偏应变约为 10^{-6} s^{-1} 量级, 根据节 3.2 的分析, 卸载过程中只有远大于 10^{-4} m 的缺陷会被激活产生显著的拉应力。而试验所用试件均匀完整, 无肉眼可见的裂纹和缺陷, 可以认为其中包含的缺陷尺寸达不到 10^{-3} m 量级。试验采用的应变率不足以激活试件中的缺陷, 也就不会出现拉伸破坏。可以推测, 如果进一步增加卸载速率, 也就是增加应变率, 则岩石将会发生卸载拉伸破坏。

在轴压的突然卸载条件下, 试件毫无例外的发生了拉伸破坏。试验没有给出突然卸载的具体速率, 估计其应变率可达 10^{-4} s^{-1} 量级。也就是说, 试件中尺寸大于 10^{-6} m 的缺陷都将被激活, 从而产生拉应力。这样大小的缺陷在试件中是必然存在的。由于卸载持续时间很短, 卸载结束时, 被激活的缺陷处的拉应力可达 $\sigma_{zz \max}^{\text{loc}} = K \sigma_0 / 3$ 。

岩石的应力集中系数可以估算^[12]为

$$K = \frac{6\sigma_t}{\sigma_{ci}} \quad (9)$$

式中: σ_t , σ_{ci} 分别为岩石的抗拉强度和起裂应力。

假设 2 种岩石的起裂应力约为其抗压强度的 70%, 那么两种岩石的应力集中系数分别为 0.61 和 0.47。设局部拉伸破坏发生临界条件为 $\sigma_{zz \max}^{\text{loc}} = \sigma_t$, 可得能够导致试件产生拉伸破坏的临界应力条件分别为 σ_0 / σ_t 大于 4.92 和 6.38。试验测得 2 种岩石的 σ_0 / σ_t 分别大于 5.12 和 5.10, 与理论计算值相差不大。造成偏差的可能原因有: (1) 由于资料匮乏, 对红砂岩起裂应力的判断偏差; (2) 试验应力级差过大, 试验结果精度不够。

4.2 现场观测成果及理论对比

S. S. Lim 和 C. D. Martin^[22]报道了对取自加拿大 Underground Research Laboratory 深地下巷道岩芯的观测统计成果。他们着重研究了岩芯饼化程度与最大主应力的关系及岩芯饼化的临界应力条件, 并将其观测统计成果与 N. Kaga 等^[23]的理论进行了

比较, 发现后者的理论严重高估了岩性饼化现象发生的临界应力条件。

S. S. Lim 和 C. D. Martin^[22]统计得到的主要成果见图 8。其中 σ_1 为最大主应力, d 为饼化厚度, D 为岩芯直径。

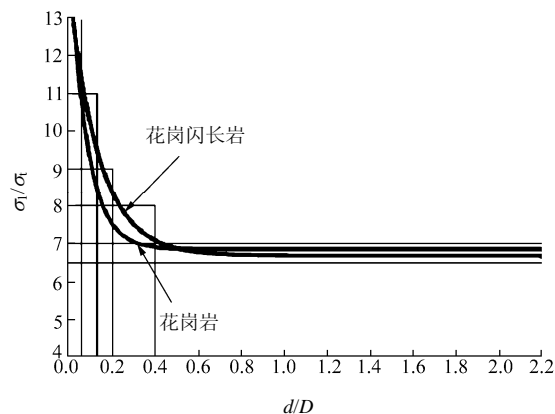


图 8 σ_1/σ_t 与 d/D 的关系^[22]

Fig.8 Relationships between σ_1/σ_t and d/D ^[22]

从图 8 可以看出, 岩芯饼化现象出现的临界应力条件为 $\sigma_1/\sigma_t \approx 6.5$, 岩石的粒径组成对卸载拉裂稍有影响(粒径较粗的岩石临界 σ_1/σ_t 稍低)。

根据 E. Eberhardt 等^[24]对取自 URL 同类岩石破坏过程的研究, URL 产花岗岩抗拉强度 $\sigma_t \approx 9 \text{ MPa}$, 起裂应力 σ_{ci} 约为 104 MPa, 其应力集中系数 $K = -6\sigma_t/\sigma_{ci} \approx 0.52$, 进而可以估计发生卸载拉裂的临界应力条件约为 $\sigma_{oc} = 3\sigma_t/K = 5.77\sigma_t$ 。

相比于 N. Kaga 等^[23]的理论, 本文理论预测结果大为接近, 稍小于基于观测数据的条件。但考虑到: (1) 现场地应力条件不规则, 最大最小主应力相差较大, 统计结果采用最大主应力; (2) 岩芯套取时轴向应力的卸载是一个渐进的过程; (3) 现场取芯难以保证岩芯轴向与最大主应力平行, 因此, 有理由相信, 观测结果高估了岩芯发生饼化的临界应力条件, 理论预测的结果基本可信。

5 结 论

利用基于应力集中的非均匀岩体模型对卸载速率(偏应变率)、缺陷尺寸和初始应力对岩石卸载过程中缺陷处的应力集中的影响进行了研究, 分析结果表明: (1) 偏应变率对岩石内部缺陷处附加拉应力的影响具有显著的影响, 偏应变率越高, 缺陷处的附加拉应力越大; (2) 不同层次的缺陷对应于不同大小的偏应变率, 一定的应变率条件下, 只有

大于对应层次的缺陷被激活,产生较明显的拉应力,加卸载速率或偏应变率越高,其所激活的缺陷的尺寸就越小;(3)岩石包含较大缺陷时,缺陷处的局部拉应力与初始应力成正比,岩体是否能发生卸载破坏主要由初始应力、应力集中系数和抗拉强度 3 个参数之间的相对关系决定的。

卸载试验^[14]和现场观测^[22]的结果和现象初步验证了本文模型和分析的正确性。不过,由于试验设计缺乏明确的理论指导,以及现场地应力条件的复杂性和不确定性,其结果对确定模型参数的作用有限。为充分探讨本文模型适用范围,确定不同岩性岩石的相关参数,并进一步研究几个主要因素之间的相互关系,笔者设计了针对性的具有初始应力岩石的卸载破坏试验。试验研究已获得深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目的资助,将于近期开展。

参考文献(References):

- FAIRHURST C. Experimental physics and rock mechanics: results of laboratory study[M]. Tokyo: A. A. Balkema, 2001.
- BAHAT D, RABINOVITCH A, FRID V. Tensile fracturing in rocks[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- BAZANT Z. Scaling laws in mechanics of failure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(9): 1 828 - 1 844.
- PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation—the brittle field[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- DYSKIN A V. On the role of stress fluctuations in brittle fracture[J]. International Journal of Fracture, 1999, 100(1): 29 - 53.
- RODIONOV V N, SIZOV I A. Model of a rigid body with dissipative structure for geomechanics[J]. Journal of Mining Sciences, 1989, 25(6): 491 - 501.
- ZHU W C, TANG C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(1): 25 - 56.
- GRINFELD M A, WRIGHT T W. Morphology of fractured domains in brittle fracture[J]. Metallurgical and Materials Transactions A—Physical Metallurgy and Material, 2004, 35(9): 2 651 - 2 661.
- DYSKIN A V, VANVLIET M, VANMIER J. Size effect in tensile strength caused by stress fluctuations[J]. International Journal of Fracture, 2001, 108(1): 43 - 61.
- XIE H P, GAO F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 477 - 488.
- 朱珍德, 渠文平, 蒋志坚. 岩石细观结构量化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 313 - 1 324.(ZHU Zhende, QU Wenping, JIANG Zhijian. Quantitative test study on mesostructure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 313 - 1 324.(in Chinese))
- 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))
- CHEN Y Q. Observation of microcracks patterns in westerly granite specimens stressed immediately before failure by uniaxial compressive loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 440 - 2 448.
- BAUCH E, LEMMP C. Rock splitting in the surrounds of underground openings: an experimental approach using triaxial extension test[C]// HACK R, AZZAM R, CHARLIER R ed. Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 244 - 254.
- BROWN E T, TROLLOPE D H. The failure of linear brittle materials under effective tensile stress[J]. Felsmechanik and Ingenieurgeologie, 1967, 6(1): 229 - 241.
- STACEY T R. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 1981, 18(6): 469 - 474.
- LEMPP C, MÜHLHAUS H B. Splitting and core diskling in deep boreholes[C]// Proceedings of 2nd International Symposium on Observation of the Continental Crust through Drilling. [S.l.]: [s.n.], 1985: 94.
- 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.(TAN Tjong-kie. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1 - 20.(in Chinese))
- 戚承志, 钱七虎, 王明洋. 岩体的构造层次及其成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 838 - 2 846.(QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang. Structural hierarchy of rock massif and mechanics of its formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 838 - 2 846.(in Chinese))
- QI C Z, WANG M Y, QIAN Q H. Strain-rate effects on the strength and fragmentation size of rocks[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1 355 - 1 364.
- 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.(QI Chengzhi, QIAN Qihu. Basic problems of dynamic deformation and fracture of rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2009.(in Chinese))
- LIM S S, MARTIN C D. Core diskling and its relationship with stress magnitude for Lac du bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 254 - 264.
- KAGA N, MATSUKI K, SAKAGUCHI K. The in-situ stress states associated with core diskling estimated by analysis of principal tensile stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 653 - 665.
- EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3): 361 - 380.