



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112329219 A

(43) 申请公布日 2021.02.05

(21) 申请号 202011155995.0

(22) 申请日 2020.10.26

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 郑思平 林緬 江文滨 姬莉莉  
曹高辉 徐志朋

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G01N 3/08 (2006.01)

G06F 119/04 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

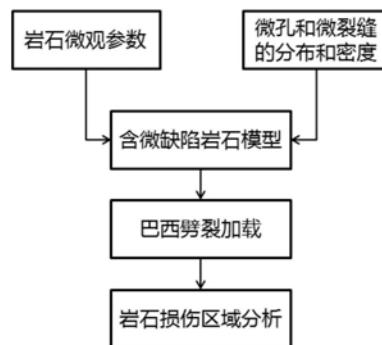
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法

(57) 摘要

本发明属于岩石物理性质技术领域,针对岩石微缺陷对岩石力学性质和变形性质产生明显的影响,本发明具体涉及一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,具体包括如下步骤:(1)通过在二维离散元颗粒单元中加入微孔和微裂缝单元构建含微缺陷岩石模型;(2)在巴西劈裂加载模式下得出岩石次生微裂缝网络和宏裂缝的开度和走向;(3)计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域,实现岩石损伤区域分析。本发明能够准确计算出含微缺陷岩石拉伸损伤区域的位置,从而帮助室内实验和工程应用中了解含微缺陷岩石的断裂机理。



1. 一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,具体包括如下步骤:

- (1) 通过在二维离散元颗粒单元中加入微孔和微裂缝单元构建含微缺陷岩石模型;
- (2) 在巴西劈裂加载模式下得出岩石次生微裂缝网络和宏裂缝的开度和走向;
- (3) 计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域,实现岩石损伤区域分析。

2. 根据权利要求1所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述步骤(1)中构建含微缺陷岩石模型的具体步骤如下:

在颗粒*i*边界的节点上设置法向弹簧刚度 $k_i^n$ 和切向弹簧刚度 $k_i^s$ ,边界长度为 $l_i$ ,模型加载过程中,相接触颗粒节点间的相对法向位移 $U_i^n$ 和相对切向位移 $U_i^s$ ,通过公式(1-2)得出颗粒法向作用力 $F_i^n$ 和切向作用力 $F_i^s$ :

$$F_i^n = k_i^n \times U_i^n \times l_i \quad (1)$$

$$F_i^s = k_i^s \times U_i^s \times l_i \quad (2)$$

当颗粒边界受到的拉伸应力 $\sigma_i$ 超过拉伸强度 $\sigma_n$ ,岩石形成I型断裂次生微裂缝,公式(3) $W_i$ 为颗粒边界的应变能,通过公式(4)摩尔库伦准则判断颗粒之间的剪切作用力 $\tau_i$ 是否超过剪切强度 $\tau_n$ ,从而形成剪切裂缝, $c$ 为粘聚强度,剪切裂缝出现在相互接触的两个颗粒之间;

$$W_i = \frac{1}{2} \left( \frac{F_i^{n2}}{k_i^n U_i^n} + \frac{F_i^{s2}}{k_i^s U_i^s} \right) \quad \sigma_i \leq \sigma_n$$

$$W_i = 0 \quad \sigma_i > \sigma_n \quad (3)$$

$$\tau_n = \sigma_n \times \tan\theta + c \quad (4)$$

3. 根据权利要求1所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述步骤(1)中构建含微缺陷岩石模型,含微缺陷岩石模型内部设置微孔和微裂缝,其中,微孔是指在岩石模型中散布一定孔径的小孔;微裂缝指在岩石模型中设置开度、平均长度一定的原生微裂缝;

巴西劈裂加载过程中岩石垂直方向受到压缩载荷,微孔和微裂缝边界发生微缺陷接触,通过计算接触边界两端节点的位置关系,求解颗粒间的相互作用,同时模型考虑了接触时微孔和微裂缝边界出现磨损的影响,下述公式(5-7)为微缺陷接触时,求解颗粒边界产生的力 $F_i^d$ 、力矩 $M_i^d$ 和边界的应变能 $W_i^d$ ,

$$F_i^d = W_c (s_1 h_1 + s_2 h_2) \times \frac{l_i^d k_i^n W_s \sqrt{1 + \mu_i^2}}{s_1 + s_2} \quad (5)$$

$$M_i^d = W_c (s_1^2 h_1 - s_2^2 h_2) \times \frac{(l_i^d)^2 k_i^n W_s \sqrt{1 + \mu_i^2}}{(s_1 + s_2)^2} \quad (6)$$

$$W_i^d = W_c l_i^d \left( \frac{l_i^d}{\sqrt{(l_i^d)^2 - (h_1 - h_2)^2}} + \frac{\mu_i}{2} \right) \times \int_{ABCD} k_i^n W_s ds \quad (7)$$

其中,颗粒*i*微缺陷的接触边界长度为 $l_i^d$ ,颗粒边界的两节点与接触颗粒边界的垂向距离分别为 $h_1$ 和 $h_2$ ,与颗粒质心距离分别为 $s_1$ 和 $s_2$ ,微缺陷边界的摩擦系数 $\mu_i$ ,磨损系数 $W_c$ ,弹

簧减弱系数 $W_s$ 。

4. 根据权利要求1所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述步骤(1)中微孔和微裂缝单元在加载过程发生颗粒闭合,传递颗粒之间的力和力矩,在构建微孔和微裂缝岩石中利用分布和数量实现对岩石指定位置构建微缺陷区域。

5. 根据权利要求1所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述步骤(2)中通过岩石次生微裂缝网络明确岩石在受拉伸应力时的损伤区域,同时依据宏裂缝的开度和走向,得到岩石在受到加载载荷时主裂缝宽度和延伸方向。

6. 根据权利要求1所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述步骤(3)中采用微孔模型计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域的具体步骤为:在微孔模型中构建孔含量,孔含量表示为孔面积与岩石全部面积的比值,孔含量 $p$ 分布设置为0.007、0.028、0.062和0.11的四种岩石模型,平均孔径0.3mm,岩石模型直径25mm。

7. 根据权利要求6所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述孔含量 $p=0.007$ ,在微裂缝集中汇聚出裂缝的两侧存在面积较大的损伤区域;所述孔含量 $p=0.11$ ,次生微裂缝主要出现在宏裂缝汇聚的路径上,拉伸破碎区域内的次生微裂缝萌生范围明显减少。

8. 根据权利要求1所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述步骤(3)中采用微裂缝模型计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域的具体步骤为:在微裂缝模型中构建微裂缝数目 $f$ 分别为1000、2000、3000和4000的四种岩石模型,裂缝平局长度0.3mm,岩石模型直径25mm。

9. 根据权利要求8所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,所述微裂缝数量增加控制次生裂缝发育更集中在岩石模型纺锤区域的内裂缝汇聚的路径上,进而控制岩石中心发育多条宏裂缝。

10. 根据权利要求1-9任意一项所述一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法,其特征在于,针对大缺陷的岩石模型或含微孔和微裂缝的岩石模型均适用于采用此方法进行计算。

## 一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于岩石物理性质技术领域,具体涉及一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法。

### 背景技术

[0002] 巴西劈裂实验是国际岩石力学协会 (ISRM) 推荐的一种间接测量岩石抗拉强度和断裂特性的一种方法。通过在推荐尺寸的圆柱形岩样的上下两端施加线性载荷,使岩石沿垂向方向发生拉伸破坏。由于巴西劈裂方法在测量岩石抗拉强度和拉伸裂缝走向上具有实验简单和材料构型方便的特点,所以在室内试验和工程建造等进行广泛的使用。巴西劈裂实验的应力分布如图1所示。加载过程中在岩石上下加载点附近 $\sigma_y$ 的压应力较大,在岩石中心位置压应力数值明显减少。 $\sigma_x$ 方向的拉应力在岩石中心很长一段距离上呈现均匀分布。虽然岩石的拉应力数值小于岩石的压应力,但由于岩石的拉伸强度通常远小于抗压强度,导致岩石受到x方向拉应力而发生垂向的拉伸破坏。岩石中心出现劈裂裂缝。

[0003] 离散元方法由Cundall和Strack首次提出,是经典的解决不连续介质力学问题的数值模拟方法。通过在圆形或多边形颗粒施加多种接触来模拟真实加载过程颗粒间的相互作用。利用不同的断裂准则和屈服准则模拟颗粒间的相互破裂。随着离散元方法的快速发展,已经在实际工程应用中扮演越来越关键的作用。

[0004] 目前已经开展大量基于离散元方法的巴西劈裂加载下岩石断裂的模拟。尤其是针对含缺陷的一些岩石或者混凝土进行抗拉强度和裂缝开裂特性的研究。上述研究通过在模型内部设置大孔或者层理方向等模拟岩石的大缺陷,而自然界中岩石存在大量矿物颗粒尺度的微孔和微裂缝等微缺陷。众多研究结果也表明岩石微缺陷对岩石力学性质和变形性质产生明显的影响。所以有必要构建含微孔和微裂缝岩石模型,研究巴西劈裂实验中含微缺陷岩石损伤区域的变化。

[0005] 单孔、多孔和层理是现有岩石和混凝土模型中常见缺陷。如图2所示为不同的岩石缺陷下劈裂裂缝的发育走向。上述构建的岩石模型在巴西劈裂加载模式下岩石的损伤区域和无缺陷岩石完全不同。所以缺陷形式和大小的变化对岩石的拉伸力学性质和次生裂缝生长都产生明显的影响。因此,如何研发一种针对岩石拉伸损伤区域的新型计算方法,准确得出次生微裂缝和宏裂缝的生长区域和路径,为工程实际应用提供参考,具有重要的现实意义。

### 发明内容

[0006] 针对现有技术中存在的问题,本发明的目的在于提供一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法。该方法能够给出含微孔和微裂缝岩石在巴西劈裂加载后次生微裂缝分布和宏裂缝的走向。从而可以预测含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域。为实际工程应用中预防和解决含微缺陷岩石拉伸破裂提供帮助。

[0007] 本发明采取的技术方案为：

[0008] 一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法，具体包括如下步骤：

[0009] (1) 通过在二维离散元颗粒单元中加入微孔和微裂缝单元构建含微缺陷岩石模型；

[0010] (2) 在巴西劈裂加载模式下得出岩石次生微裂缝网络和宏裂缝的开度和走向；

[0011] (3) 计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域，实现岩石损伤区域分析。

[0012] 进一步的，所述步骤(1)中构建含微缺陷岩石模型的具体步骤如下：

[0013] 在颗粒*i*边界的节点上设置法向弹簧刚度 $k_i^n$ 和切向弹簧刚度 $k_i^s$ ，边界长度为 $l_i$ ，模型加载过程中，相接触颗粒节点间的相对法向位移 $U_i^n$ 和相对切向位移 $U_i^s$ ，通过公式(1-2)得出颗粒法向作用力 $F_i^n$ 和切向作用力 $F_i^s$ ：

$$[0014] \quad F_i^n = k_i^n \times U_i^n \times l_i \quad (1)$$

$$[0015] \quad F_i^s = k_i^s \times U_i^s \times l_i \quad (2)$$

[0016] 当颗粒边界受到的拉伸应力 $\sigma_i$ 超过拉伸强度 $\sigma_n$ ，岩石形成I型断裂次生微裂缝，公式(3) $W_i$ 为颗粒边界的应变能，利用公式(4)摩尔库伦准则判断颗粒之间的剪切作用力 $\tau_i$ 是否超过剪切强度 $\tau_n$ ，从而形成剪切裂缝， $c$ 为粘聚强度，剪切裂缝出现在相互接触的两个颗粒之间；

$$[0017] \quad W_i = \frac{1}{2} \left( \frac{F_i^{n2}}{k_i^n U_i^n} + \frac{F_i^{s2}}{k_i^s U_i^s} \right) \quad \sigma_i \leq \sigma_n$$

$$[0018] \quad W_i = 0 \quad \sigma_i > \sigma_n \quad (3)$$

$$[0019] \quad \tau_n = \sigma_n \times \tan\theta + c \quad (4)$$

[0020] 进一步的，所述步骤(1)中构建含微缺陷岩石模型，含微缺陷岩石模型内部设置微孔和微裂缝，其中，微孔是指在岩石模型中散布一定孔径的小孔；微裂缝指在岩石模型中设置开度、平均长度一定的原生微裂缝；

[0021] 巴西劈裂加载过程中岩石垂直方向受到压缩载荷，微孔和微裂缝边界极易发生“小范围”接触，即微缺陷边界小角度、小距离的相互侵入，通过计算接触边界两端节点的位置关系，求解颗粒间的相互作用，同时模型考虑了接触时微孔和微裂缝边界出现磨损的影响，公式(5-7)为微缺陷接触时，求解颗粒边界产生的力 $F_i^d$ 、力矩 $M_i^d$ 和边界的应变能 $W_i^d$ ，

$$[0022] \quad F_i^d = W_c (s_1 h_1 + s_2 h_2) \times \frac{l_i^d k_i^n W_s \sqrt{1 + \mu_i^2}}{s_1 + s_2} \quad (5)$$

$$[0023] \quad M_i^d = W_c (s_1^2 h_1 - s_2^2 h_2) \times \frac{(l_i^d)^2 k_i^n W_s \sqrt{1 + \mu_i^2}}{(s_1 + s_2)^2} \quad (6)$$

$$[0024] \quad W_i^d = W_c l_i^d \left( \frac{l_i^d}{\sqrt{(l_i^d)^2 - (h_1 - h_2)^2}} + \frac{\mu_i}{2} \right) \times \int_{ABCD} k_i^n W_s ds \quad (7)$$

[0025] 其中，颗粒*i*微缺陷的接触边界长度为 $l_i^d$ ，颗粒边界的两节点与接触颗粒边界的垂

向距离分别为 $h_1$ 和 $h_2$ ,与颗粒质心距离分别为 $s_1$ 和 $s_2$ ,微缺陷边界的摩擦系数 $\mu_i$ ,磨损系数 $W_c$ ,弹簧减弱系数 $W_s$ 。

[0026] 进一步的,所述步骤(1)中微孔和微裂缝单元在加载过程发生颗粒闭合,传递颗粒之间的力和力矩,在构建微孔和微裂缝岩石中利用分布和数量实现对岩石指定位置构建微缺陷区域。

[0027] 进一步的,所述步骤(2)中通过岩石次生微裂缝网络明确岩石在受拉伸应力时的损伤区域,同时依据宏裂缝的开度和走向,得到岩石在受到加载载荷时主裂缝宽度和延伸方向。

[0028] 进一步的,所述步骤(3)中采用微孔模型计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域的具体步骤为:在微孔模型中构建孔含量,孔含量表示为孔面积与岩石全部面积的比值,孔含量 $p$ 分布设置为0.007、0.028、0.062和0.11的四种岩石模型,平均孔径0.3mm,岩石模型直径25mm。

[0029] 更进一步的,所述孔含量 $p=0.007$ ,在微裂缝集中汇聚出裂缝的两侧存在面积较大的损伤区域。表明微孔数目较少时,拉伸破碎区主要由次生微裂缝网络形成。次生微裂缝的不断拉伸闭合最终汇聚成宏裂缝。

[0030] 所述孔含量 $p=0.11$ ,次生微裂缝主要出现在宏裂缝汇聚的路径上,拉伸破碎区域内的次生微裂缝萌生范围明显减少。表明岩石模型微孔数目增加,次生微裂缝在破碎区内主要起到连接和补充的作用。观察岩石模型的宏裂缝可知微孔的存在影响着裂缝的走向。当岩石孔含量较低,导致微孔间距较大。微孔间的裂缝很难相互连接形成完整的裂缝。孔含量进一步增加,微孔之间距离减小。裂缝整体由岩石中心较大孔端部相连延伸,形态比较光滑。

[0031] 进一步的,所述步骤(3)中采用微裂缝模型计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域的具体步骤为:在微裂缝模型中构建微裂缝数目 $f$ 分别为1000、2000、3000和4000的四种岩石模型,裂缝平局长度0.3mm,岩石模型直径25mm。

[0032] 更进一步的,所述微裂缝数量增加控制次生裂缝发育更集中在岩石模型纺锤区域的内裂缝汇聚的路径上,进而控制岩石中心发育多条宏裂缝。即相比微孔在拉伸破碎区外受到复杂的混合方向拉伸应力也会萌生少量的次生裂缝,微裂缝的开裂更容易受到拉伸应力方向的影响,导致在拉伸破碎区外岩石两侧很难出现次生裂缝萌生。观察岩石模型的宏裂缝可知微裂缝模型形成的宏裂缝易发生间断。相比微孔模型,微裂缝数量增加使岩石上出现更多的离散微裂缝网络,导致岩石中心发育多条宏裂缝。

[0033] 进一步的,针对大缺陷的岩石模型或含微孔和微裂缝的岩石模型均适用于采用此方法进行计算。适用性广泛。

[0034] 本发明的有益效果为:

[0035] 本发明提供一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法。能够准确计算出含微缺陷岩石拉伸损伤区域的位置。从而帮助室内实验和工程应用中了解含微缺陷岩石的断裂机理。例如,在岩样较少或取样困难的情况下,如果获悉单位面积内岩石微缺陷分布和数量后可以利用该方法构建岩石模型。通过模型劈裂加载了解岩石抗拉性质和拉伸损伤区域的发育过程。又例如,本发明的含微缺陷岩石模型适合于多种不同方式的加载,可以帮助进一步了解含微缺陷岩石在不同应力状态下的破碎模式。

[0036] 本发明提供的微孔和微裂缝单元可以提供准确的含微缺陷岩石的拉伸损伤区域，主要优点有：

[0037] (1) 能够计算含大缺陷的岩石模型，还可计算含微孔和微裂缝的岩石模型。

[0038] (2) 微孔和微裂缝可依据密度和分布加入岩石模型，从而更贴近真实岩石的微缺陷分布情况。

[0039] (3) 能够提供岩石次生微裂缝和宏裂缝破裂结果，准确确定岩石的拉伸损伤区域。

[0040] 总的来说，本发明在传统二维离散元模型的基础上通过加入微孔和微裂缝单元来模拟含微缺陷岩石，并考虑颗粒和微孔及微裂缝单元的相互接触和分离过程，岩石模型加载后可以准确得出次生微裂缝和宏裂缝的生长区域和路径，能够准确计算含微缺陷岩石的拉伸损伤区域，即得到岩石特定微孔和微裂缝密度和分布后可以判别岩石的易拉伸损伤区域。在室内实验和工程应用中进行大范围的推广。

## 附图说明

[0041] 图1为巴西劈裂实验的应力分布图。

[0042] 图2为现有技术中不同的岩石缺陷(单孔、多孔和层理)下劈裂裂缝的发育走向图。

[0043] 图3为本发明中的技术方案流程示意图；

[0044] 图4.a为本发明实施例中颗粒间相连节点法向弹簧和剪切弹簧的设置示意图；

[0045] 图4.b为本发明实施例中相连颗粒间边界断裂形成拉伸裂缝示意图；

[0046] 图5.a为本发明实施例中颗粒间的微孔示意图；

[0047] 图5.b为本发明实施例中颗粒间的微裂缝示意图；

[0048] 图6为微缺陷接触时，颗粒间相互作用的计算方法；

[0049] 图7为利用不同孔径印第安纳州环形石灰石进行巴西劈裂实验的部分结果图；

[0050] 图8为现有方法模拟巴西劈裂加载下不同孔径中心孔岩石模型的损伤区域图；

[0051] 图9为本发明方法模拟巴西劈裂加载下不同孔径中心孔岩石模型的损伤区域图；

[0052] 其中，图9中，上面4幅图为次生微裂缝示意图，黑色表示拉伸断裂的微裂缝；下面4幅图为宏裂缝示意图；

[0053] 图10为本发明中微孔岩石模型的次生微裂缝和宏裂缝图像；

[0054] 其中，图10中，上面4幅图为次生微裂缝图像；下面4幅图为宏裂缝图像；

[0055] 图11为本发明中微裂缝岩石模型的次生微裂缝和宏裂缝图像；

[0056] 其中，图11中，上面4幅图为次生微裂缝图像；下面4幅图为宏裂缝图像。

## 具体实施方式

[0057] 下面结合附图进一步说明本发明。

[0058] 实施例1

[0059] 一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法，具体包括如下步骤：

[0060] (1) 通过在二维离散元颗粒单元中加入微孔和微裂缝单元构建含微缺陷岩石模型；

[0061] (2) 在巴西劈裂加载模式下得出岩石次生微裂缝网络和宏裂缝的开度和走向；

[0062] (3) 计算含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域,实现岩石损伤区域分析。

[0063] 进一步的,所述步骤(1)中构建含微缺陷岩石模型,含微缺陷岩石模型内部设置微孔和微裂缝,其中,微孔是指在岩石模型中散布一定孔径的小孔;微裂缝指在岩石模型中设置开度、平均长度一定的原生微裂缝。

[0064] 本发明属于岩石物理性质领域,提供一种计算巴西劈裂实验中含微孔和微裂缝岩石拉伸损伤区域的方法。通过在二维离散元颗粒单元中加入微孔和微裂缝单元构建含微缺陷岩石模型,在巴西劈裂加载模式下得出岩石次生微裂缝的分布和宏裂缝的走向。从而可以预测含微缺陷岩石在拉应力作用下的损伤区域。岩石模型的构建和加载过程如图3所示。

[0065] 本发明主要针对自然界含微缺陷岩石的拉伸断裂性能,具有适用范围广,计算准确的特点。

[0066] 实施例2

[0067] 在实施例1的基础上,下面结合附图进一步说明本发明。

[0068] 如图4.a所示在颗粒*i*边界的节点上设置法向弹簧刚度 $k_i^n$ 和切向弹簧刚度 $k_i^s$ ,边界长度为 $l_i$ ,模型加载过程中,相接触颗粒节点间的相对法向位移 $U_i^n$ 和相对切向位移 $U_i^s$ ,通过公式(1-2)得出颗粒法向作用力 $F_i^n$ 和切向作用力 $F_i^s$ :

$$[0069] \quad F_i^n = k_i^n \times U_i^n \times l_i \quad (1)$$

$$[0070] \quad F_i^s = k_i^s \times U_i^s \times l_i \quad (2)$$

[0071] 当颗粒边界受到的拉伸应力 $\sigma_i$ 超过拉伸强度 $\sigma_n$ ,岩石形成I型断裂次生微裂缝,如图4.b所示。公式(3) $W_i$ 为颗粒边界的应变能。利用公式(4)摩尔库伦准则判断颗粒之间的剪切作用力 $\tau_i$ 是否超过剪切强度 $\tau_n$ ,从而形成剪切裂缝。 $c$ 为粘聚强度。剪切裂缝可以出现在相互接触的两个颗粒之间。

$$[0072] \quad W_i = \frac{1}{2} \left( \frac{F_i^{n2}}{k_i^n U_i^n} + \frac{F_i^{s2}}{k_i^s U_i^s} \right) \quad \sigma_i \leq \sigma_n$$

$$[0073] \quad W_i = 0 \quad \sigma_i > \sigma_n \quad (3)$$

$$[0074] \quad \tau_n = \sigma_n \times \tan\theta + c \quad (4)$$

[0075] 构建含微缺陷岩石模型,含微缺陷岩石模型内部设置微孔和微裂缝,其中,微孔是指在岩石模型中散布一定孔径的小孔;微裂缝指在岩石模型中设置开度、平均长度一定的原生微裂缝;

[0076] 微孔是指在岩石模型中散布一定孔径的小孔。微裂缝指在岩石模型中设置开度、平均长度一定的原生微裂缝。岩石模型内部设置的微孔和微裂缝如图 5a和5b所示。

[0077] 巴西劈裂加载过程中岩石垂直方向受到压缩载荷,微孔和微裂缝边界极易发生如图6所示的“小范围”接触,即微缺陷边界小角度、小距离的相互侵入,通过计算接触边界两端节点的位置关系,求解颗粒间的相互作用,同时模型考虑了接触时微孔和微裂缝边界出现磨损的影响,下述公式(5-7)为微缺陷接触时,求解颗粒边界产生的力 $F_i^d$ 、力矩 $M_i^d$ 和边界的应变能 $W_i^d$ ,



$$[0078] \quad F_i^d = W_c(s_1 h_1 + s_2 h_2) \times \frac{l_i^d k_i^n W_s \sqrt{1 + \mu_i^2}}{s_1 + s_2} \quad (5)$$

$$[0079] \quad M_i^d = W_c(s_1^2 h_1 - s_2^2 h_2) \times \frac{(l_i^d)^2 k_i^n W_s \sqrt{1 + \mu_i^2}}{(s_1 + s_2)^2} \quad (6)$$

$$[0080] \quad W_i^d = W_c l_i^d \left( \frac{l_i^d}{\sqrt{(l_i^d)^2 - (h_1 - h_2)^2}} + \frac{\mu_i}{2} \right) \times \int_{ABCD} k_i^n W_s ds \quad (7)$$

[0081] 其中,颗粒*i*微缺陷的接触边界长度为 $l_i^d$ ,颗粒边界的两节点与接触颗粒边界的垂向距离分别为 $h_1$ 和 $h_2$ ,与颗粒质心距离分别为 $s_1$ 和 $s_2$ ,微缺陷边界的摩擦系数 $\mu_i$ ,磨损系数 $W_c$ ,弹簧减弱系数 $W_s$ 。

[0082] 岩石中分布的微孔和微裂缝极易在受到载荷形成初始的裂缝尖端,依据线弹性力学最大切向应力准则,岩石加载过程中裂缝尖端的弹性切向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 描述为:

$$[0083] \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) + T \sin^2 \theta + O(r^{\frac{1}{2}}) \quad (8)$$

[0084] 公式(8)中, $r$ 和 $\theta$ 是以裂缝尖端为原点的极坐标, $K_I$ 和 $K_{II}$ 分别为岩石的I型和II型断裂的应力强度因子, $T$ 为外部施加应力, $O$ 为高阶项;在最大切向应力准则中,假设裂缝尖端沿 $\theta_0$ 方向,且距离裂缝尖端的临界距离 $r_c$ 的切向应力达到 $\sigma_{\theta\theta_c}$ 时裂缝尖端发生扩展,则满足公式(9-10)

$$[0085] \quad \sigma_{\theta\theta}(r_c, \theta_0) = \sigma_{\theta\theta_c} \quad (9)$$

$$[0086] \quad \sqrt{2\pi r_c} \sigma_{\theta\theta} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left( K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right) + \sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_0 \quad (10)$$

[0087] 利用公式(11-13)计算岩石的I型断裂的断裂韧性 $K_{Ic}$ 和表面断裂能 $G_f$ , $E$ 为岩石的弹性模量, $\nu$ 为泊松比。

$$[0088] \quad K_{Ic} = \cos \frac{\theta_0}{2} \left( K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right) + \sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_0 \quad (11)$$

$$[0089] \quad E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (12)$$

$$[0090] \quad G_f = \frac{K_{Ic}^2}{E'} \quad (13)$$

[0091] 模型加载过程中微缺陷相连接的颗粒会发生逐渐断裂,脆性材料颗粒的拉伸断裂满足公式(14), $a$ 为颗粒的边界长度;

$$[0092] \quad \sigma_n = \sqrt{\frac{E' G_f}{\pi a}} \quad (14)$$

[0093] 通过公式(13-14)可知,采用二维离散元方法描述内部具有微缺陷的裂缝扩展过程。

[0094] 由于采用微孔和微裂缝单元来描述岩石的微缺陷结构,所以在描述岩石微缺陷引起的拉伸损伤区域更加准确。同时针对较大的岩石缺陷也可以采用此方法进行计算。通过

模拟中心孔岩石在巴西劈裂模式加载下的裂缝扩展走向,来比较现有方法的损伤区域结果和本发明采用微缺陷单元之间的差异。图7为加载不同孔径中心孔径砂岩的实验结果。岩石在相同的外部加载下随孔半径升高岩石水平边界受到的拉伸应力逐渐增加。岩石模型中心颗粒的缺失,导致在相同的加载过程中岩石模型左右水平边界颗粒承受更多的垂向拉伸作用。岩石模型由孔径较小时发育劈裂裂缝为主,转化为从边界逐步出现水平裂缝,形成对岩石模型明显的十字形切割。

[0095] 图8是现有方法的岩石模型损伤区域图像。现有方法可以反应岩石中心孔径逐渐升高岩石次生裂缝走向的变化过程。但是只能给出岩石模型次生宏裂缝走向和破裂,裂缝的延伸和开裂比较粗糙。图9是本发明方法的岩石模型损伤区域图像。本发明设计的方法可以得到岩石破裂过程中生成的次生微裂缝网络和宏裂缝的开度和走向。微裂缝网络可以明确岩石在受拉伸应力时的损伤区域。同时依据加载过程颗粒不断的移动可以得到岩石形成宏裂缝的开度和走向,帮助了解岩石在受到加载载荷时主裂缝宽度和延伸方向。本发明设计的方法更有利于评价含缺陷对于岩石拉伸损伤区域的影响。

[0096] 如图9所示,上面4幅图为次生微裂缝示意图,黑色表示拉伸断裂的微裂缝,下面4幅图为宏裂缝示意图。

[0097] 接下来通过本发明方法分别计算微孔和微裂缝岩石模型来展示受拉伸应力时含微缺陷岩石的损伤区域。微孔和微裂缝单元在岩石模型中随机分布。微孔模型中构建孔含量(注:孔含量表示为孔面积与岩石全部面积的比值) $p$ 为0.007、0.028、0.062和0.11的四种岩石模型。平均孔径0.3mm,岩石模型直径25mm。模型损伤区域的次生微裂缝和宏裂缝图像如图10所示。为比较不同孔含量的微孔对岩石模型次生微裂缝生长区域影响,利用棕色线段将岩石中心拉伸破碎区圈出。 $p=0.007$ ,在微裂缝集中汇聚出裂缝的两侧存在面积较大的损伤区域。表明微孔数目较少时,拉伸破碎区主要由次生微裂缝网络形成。次生微裂缝的不断拉伸闭合最终汇聚成宏裂缝。 $p=0.11$ ,次生微裂缝主要出现在宏裂缝汇聚的路径上,拉伸破碎区域内的次生微裂缝萌生范围明显减少。说明岩石模型微孔数目增加,次生微裂缝在破碎区内主要起到连接和补充的作用。观察岩石模型的宏裂缝可知微孔的存在影响着裂缝的走向。当岩石孔含量较低,导致微孔间距较大。微孔间的裂缝很难相互连接形成完整的裂缝。孔含量进一步增加,微孔之间距离减小。裂缝整体由岩石中心较大孔端部相连延伸,形态比较光滑。

[0098] 如图10所示,上面4幅图是微孔岩石模型的次生微裂缝图像;下面4幅图是微孔岩石模型的宏裂缝图像,微裂缝模型中构建微裂缝数目 $f$ 为1000、2000、3000和4000的四种岩石模型。裂缝平局长度0.3mm,岩石模型直径25mm。模型损伤区域的次生裂缝和宏裂缝图像如图11所示。与微孔模型相同,微裂缝数量增加使次生裂缝发育更集中在岩石模型纺锤区域的内裂缝汇聚的路径上。相比微孔在拉伸破碎区外受到复杂的混合方向拉伸应力也会萌生少量的次生裂缝,微裂缝的开裂更容易受到拉伸应力方向的影响,导致在拉伸破碎区外岩石两侧很难出现次生裂缝萌生。观察岩石模型的宏裂缝可知微裂缝模型形成的宏裂缝易发生间断。相比微孔模型,微裂缝数量增加使岩石上出现更多的离散微裂缝网络,导致岩石中心发育多条宏裂缝。

[0099] 如图11所示,上面4幅图为微裂缝岩石模型的次生微裂缝图像,下面4幅图为微裂缝岩石模型的宏裂缝图像,从上述的模型计算和分析可知,现有的方法描述巴西劈裂加载

下含缺陷岩石的破裂比较粗糙,同时无法计算含微缺陷岩石的破裂过程。

[0100] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

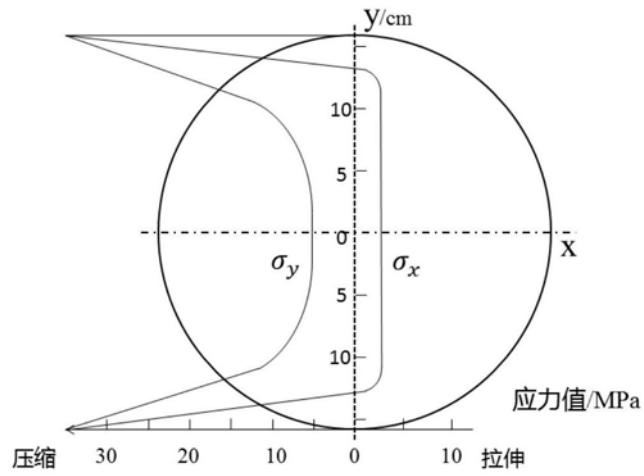


图1

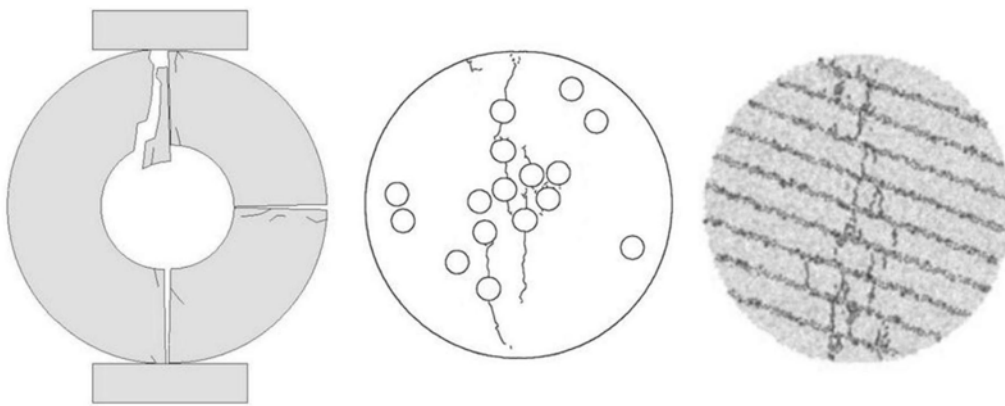


图2

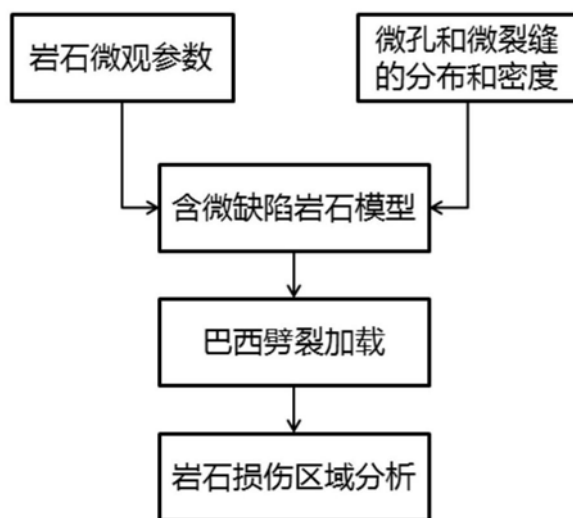


图3

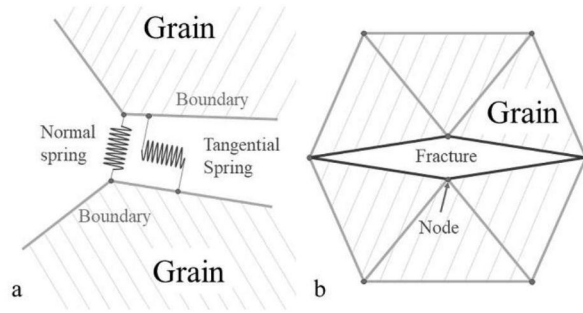


图4

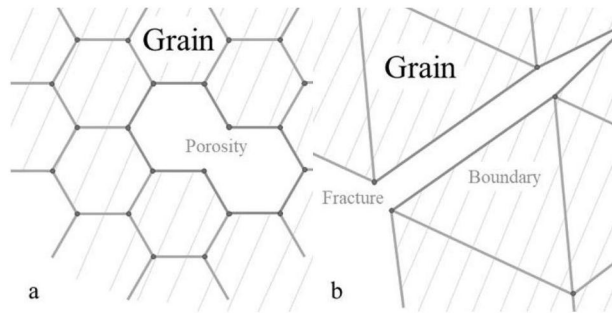


图5

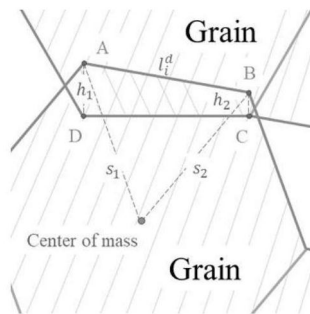


图6

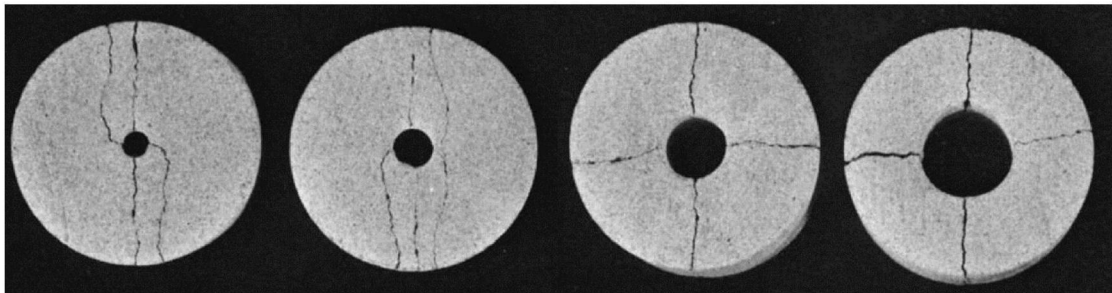


图7

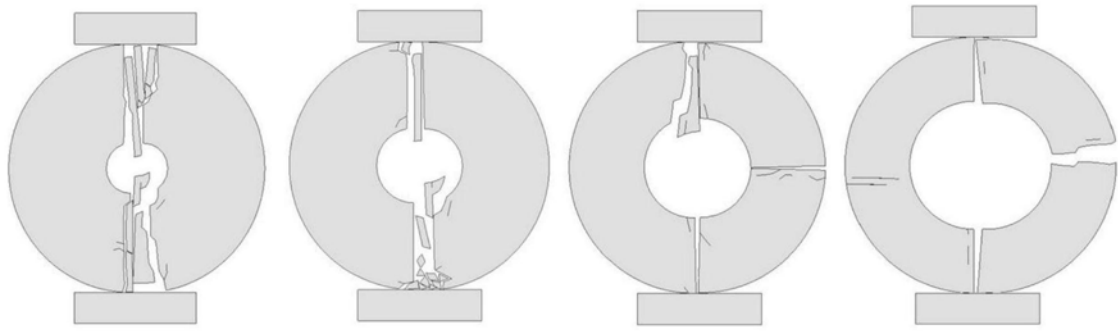


图8

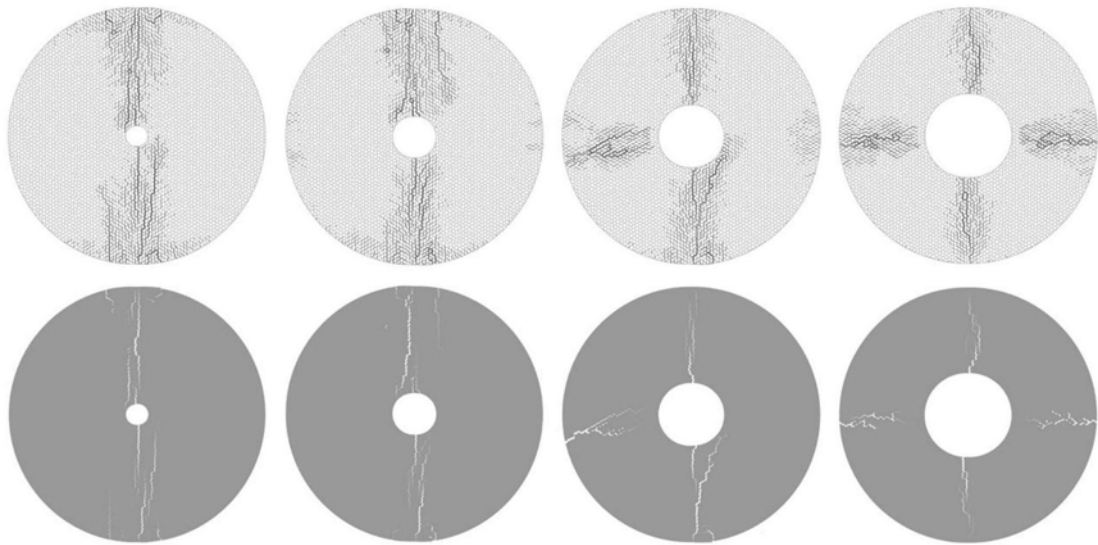


图9

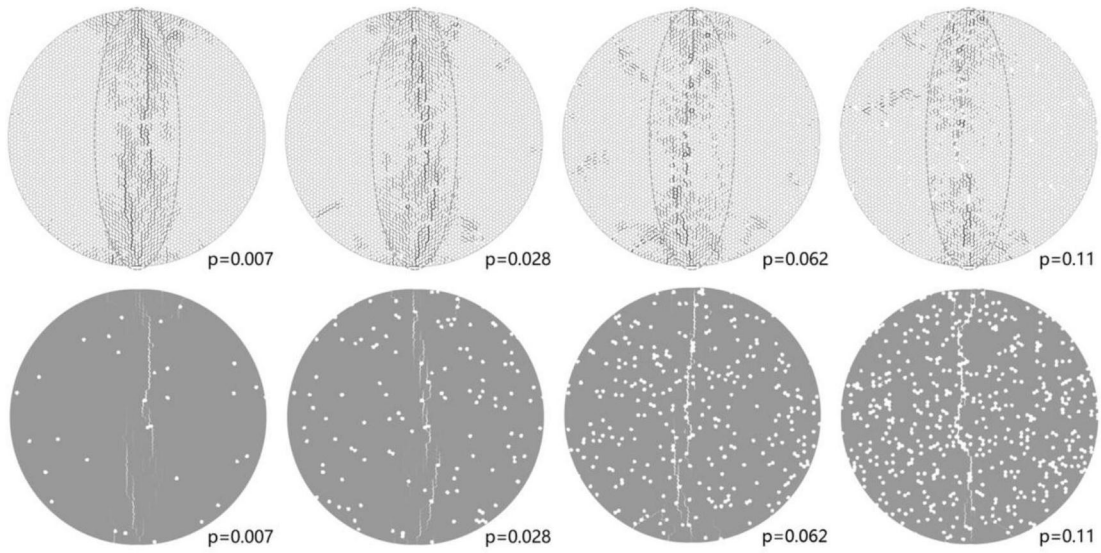


图10

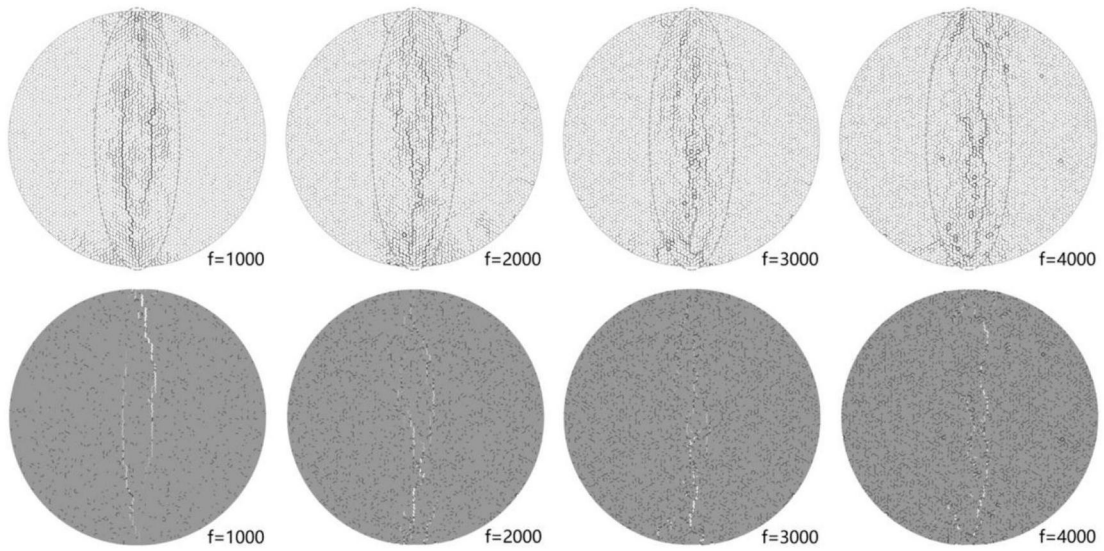


图11