

关于脆性岩体岩爆成因的理论分析*

伍法权^① 伍 劫^② 祁生文^①

(^①中国科学院工程地质力学重点实验室 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(^②中国地质大学(武汉) 武汉 430074)

摘 要 大型工程开挖中,高地应力环境下高储能脆性岩体通常会通过脆性破裂快速释放应变能,产生岩爆。针对这类岩爆现象进行了一系列理论探讨,认为:(1)开挖条件下脆性岩体的岩爆破坏主要为张破裂或者张剪性破裂,破裂角一般较小,呈薄片状或刀口状。笔者认为开挖产生次生张应力和压剪应力条件下微裂纹裂尖出现张应力是可能的,因此采用格里菲斯强度理论研究开挖岩体破裂是有效的;(2)以格里菲斯强度理论为基础,分析了岩体在二维和三维情形下的岩爆破裂应力判据和破裂角,指出在有张应力的条件下,岩体的剪破裂角会减小,直至为零,这就解释了开挖面附近薄片状、刀口状破裂现象的原因;(3)分析了脆性岩体岩爆破裂的能量过程,指出张性破裂所耗能量较小,而张剪性和压剪性破裂耗能较高。认为岩爆破裂消耗的能量主要转化为新生裂纹的表面能和破裂碎片的动能,并指出表面能所占比例较动能为小。由此解释了脆性岩体岩爆破坏以动力效应为主的特征;(4)本文理论分析成果的工程应用价值在于:可以预示开挖脆性岩体破裂部位、破裂方式和破裂范围;提出岩爆破裂的张性应力控制依据。

关键词 岩爆 破裂判据 破裂角 动能

中图分类号:P642 **文献标识码**:A

THEORETICAL ANALYSIS ON MECHANISM OF ROCK BURST OF BRITTLE ROCK MASS

WU Faquan^① WU Jie^② QI Shengwen^①

(^①Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(^②China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract Brittle rock mass generally reserves high strain energy under high ground stress condition. As it is excavated, rock burst will take place, as a rapid release of the reserved strain energy. This paper explores the mechanism of rock burst and obtained the following points: (1) Phenomena have shown that rock burst is possibly a kind of tensile and tension-shear failure and the failure angle is relatively small. It is pointed out that excavation can induce tensional stress state in rock mass. (2) Two and three dimensional criteria for rock burst based on Griffith theory have been proposed, and the theoretical analysis has confirmed that the failure angle will be reduced with the occurrence of tensional stress state, till zero while pure tensional state. (3) The energy analysis has shown that the energy consumed for pure tensional failure is relatively less than that for tension-shear failure of compressive-shear failure. And the strain energy dissipated in failure will mainly transferred into surface energy for newly created cracks and

* 收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030749)、铁道部重大科技攻关项目(2009G005-A)资助.

第一作者简介: 伍法权, 工程地质专业. Email: wufaquan@mail.igcas.ac.cn

the kinetic energy of the failure pieces of rock. Theoretical analysis has proved that the proportion of kinetic energy is much bigger than that for surface energy. (4) The probable applications of this theory include: prediction of the failure mode, location and size of rock burst; and theoretical basis of stress control for excavation design.

Key words Rock burst, Failure criterion, Failure angle, Kinetic energy

1 引言

中国西南部大型水电工程大多选择在具有较高强度的坚硬脆性岩体中,而且由于中国西南地区活跃的地质构造背景原因,工程大多处在较高地应力环境中。众所周知,在高地应力环境中,坚硬脆性岩体往往储存较高的应变能;当在岩体中进行大型工程开挖时,开挖卸荷将导致岩体破裂而快速释放应变能,即所谓岩爆现象。

但是,对于这些破裂现象的认识和解释大多停留在定性分析和判断的水平。

人们试图采用库仑强度理论分析这类现象的形成原因,预测破坏范围,寻求工程控制措施,都遇到严重的理论困难。库仑理论遇到的主要困难是:

(1) 库仑理论主要用于研究压剪破坏,而实际上单轴抗压强度为近百兆帕的硬脆性岩石,常常在开挖面附近最大主压应力远低于其抗压强度的条件下发生了破坏。

(2) 按照库仑强度理论,岩石的破裂角 θ ,即破裂面与最大主压应力的夹角为

$$\theta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$$

式中, φ 为岩石内摩擦角,对硬脆性岩石常常较大,但较少超过 60° ,因此破裂角一般应大于 15° 。而实际上开挖面岩石破裂角往往可以小到 $3^\circ \sim 5^\circ$,被称为“刀口状”破裂,在地下洞室直墙部位可以达到 0° ,即为劈裂状态。

格里菲斯强度理论^[1]在解释脆性材料破坏机理方面得到了一系列较好的理论结果。但是,这一理论未能很好地应用于解释岩体开挖破裂现象和形成原因,指导工程灾害控制。

在应用格里菲斯理论主要研究张性-张剪性破裂,而人们通常认为工程岩体多数处在压剪应力环境中;或者认为由于结构面的切割,岩体的抗拉强度极低,一旦出现张应力,岩体即会破坏,因此岩体中不能形成张应力。所以,对于岩体破裂现象不适合采用格里菲斯理论进行研究。但是,研究表明这是一种误解。

本文试图以格里菲斯理论为基础,分析脆性岩体开挖卸荷破裂现象的力学原因,解释小破裂角现象,并为破坏现象的控制提供理论依据。

2 脆性岩体开挖卸荷引起的岩爆破裂现象特征

2.1 坝基岩体开挖卸荷破裂现象

小湾水电站建于中国西南云南省的澜沧江上,是一座坝高292m的双曲拱坝。坝基岩体为混合花岗岩,岩块单轴抗压强度一般为95~170MPa,内摩擦角 $50^\circ \sim 57^\circ$,弹性模量34~42MPa,岸坡实测地应力最大主压应力在20~35MPa之间,河谷底部50m深度最大主应力值达到57.37MPa,钻孔岩芯强烈饼化。坝基开挖最大铅直厚度达到90m。

坝基开挖中,在开挖面上可见一系列岩体破裂现象(图1)。一种破裂方式是开挖面岩体挤压上拱折断破裂,伴随岩爆能量快速释放(图1a)。另一种破裂形式是刀口状片状剪出,破裂角一般小于 10° ,常为 $3 \sim 5^\circ$ 左右,并伴随一定的张开和剪出位移(图1b)。

此外,还出现一些较少见的破裂现象,如大量与开挖面近于平行的薄板状张性剪切破裂,在钻孔中,可以看见破裂面张开数厘米,并错断钻孔的现象;又如所谓的“葱剥皮”现象,即在两个爆破孔之间,出现一系列叠瓦状的曲面破裂现象,瓦片厚度一般仅为几个厘米。

2.2 大型地下洞室围岩破裂与岩爆现象

在锦屏一、二级水电站地下洞室开挖中,围岩开挖面出现一系列破裂现象(图2):(1)在顶拱拱脚等曲率较大的部位刀口状薄片张剪性剥离;(2)在直墙部位出现平行于开挖面的薄板状劈裂破坏。这些破裂面都与开挖面呈较小的夹角,形成破裂面与开挖面近于平行的环状定向性特征;并且破裂过程都呈现突发性特征。

锦屏一级水电站是中国西南部四川省雅砻江上的一座坝高305m的大型水电站。电站地下厂房洞室群由主厂房、主变室、尾水洞和一系列隧洞组成,



图1 坝基开挖岩体岩爆和张性剪切破裂现象
Fig. 1 Phenomena of rock burst and tension-shear failure in dam site excavation

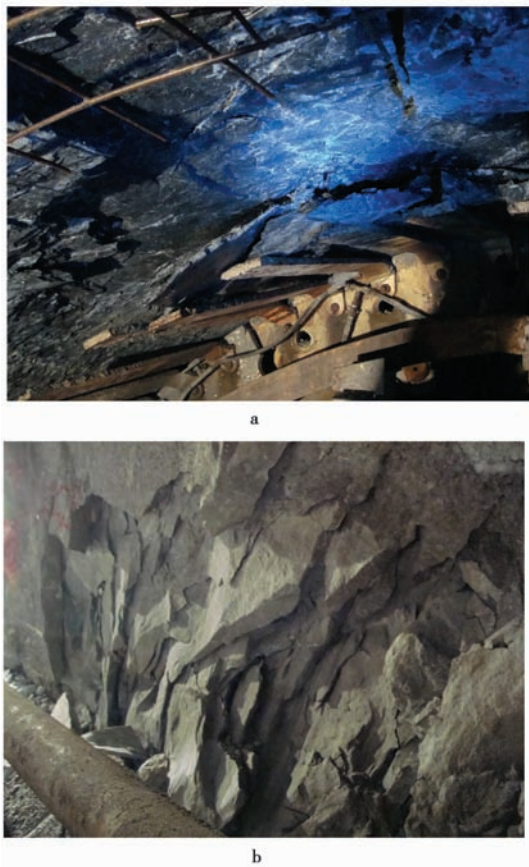


图2 地下厂房开挖岩体岩爆和张性剪切破裂现象
Fig. 2 Rock burst and tension-shear failure in underground powerhouse excavation

主厂房高73m,跨度28.9m,长238m。厂房洞室群布置在单轴抗压强度50~129MPa,弹性模量20~45GPa,内摩擦角 45° ~ 56° 的巨厚层大理岩中,实测厂房周边初始地应力最大主压应力达到35.7MPa。锦屏二级水电站与锦屏一级相邻,是一截取河湾的隧洞引水式发电站。引水隧洞最大埋深达到2500m,估计地应力最大可达到70MPa以上。隧洞穿过不同围岩,其中大理岩的工程地质特性与锦屏一级相基本一致。

2.3 脆性岩石开挖卸荷岩爆破裂现象的共同特点

由上述可见,脆性岩石在开挖卸荷条件下的破裂具有如下共同特点:

(1)破裂方式为刀口状薄片剪出、薄板状剥离,以及挤压拱裂。破裂碎片形态为薄片状、薄板状,或折断的不规则板片状。剪裂薄片破裂角可以小到 3° ~ 5° ,乃至为 0° 。挤压拱裂本质上是张性劈裂后的挤压折断,破裂角为 0° 。

这些极小破裂角的破裂面往往形成与开挖面近于平行的破裂面强烈定向性特征。

(2)从破坏运动方式上看,破裂碎片多存在张开位移和剪切位移,反映出破裂的张性剪裂特征。同时也反映出开挖卸荷应力调整使得开挖面附近出现次生张应力状态。

(3)这类破坏往往伴随着或多或少的突发性能量释放。

3 脆性岩石开挖卸荷破裂的应力过程分析

3.1 开挖卸荷应力场中张性应力状态的客观性

众所周知,地下厂房开挖过程中围岩可能出现张应力状态,通常张应力出现在开挖面曲率较小的部位,如直墙部位。对锦屏一级水电站地下厂房围岩弹性应力场分布计算表明,在直墙部位张应力值达到1.127MPa。事实上,图1和图2的破裂现象都清晰地显现出岩体破裂的张性特征,表明存在张性应力。

即使张应力状态不存在,在压剪应力状态下,由于微裂隙的错动,也可能在裂尖引起局部张应力,导致岩体破坏。

本文是为了强调开挖卸荷岩体的破坏是可能由张应力状态引起的。这就可以采用格里菲斯理论对脆性岩体卸荷破裂进行分析。

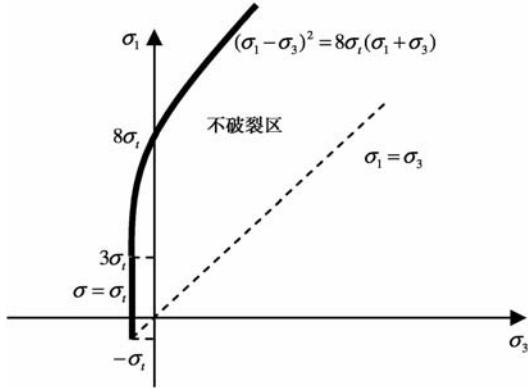


图3 开挖岩体岩爆和张性剪切破裂
Fig. 3 Rock burst and tensional shear fracture of excavated rock mass

$\leq 70.8\text{MPa}$ 之内,而发生纯张破裂时应力值 σ_1 可以更小。但是,按照库仑强度理论,当考虑出现开挖次生张应力 $\sigma_3 \geq -\sigma_t$ 的情况下,至少要求 $\sigma_1 = 11.12\sigma_3 + 168 \geq 69.59\text{MPa}$ 。这么大的主压应力值在坝基开挖岩体表面几乎是不可能出现的,这正是过去无法解释小湾水电站坝基岩体破坏的困难所在。

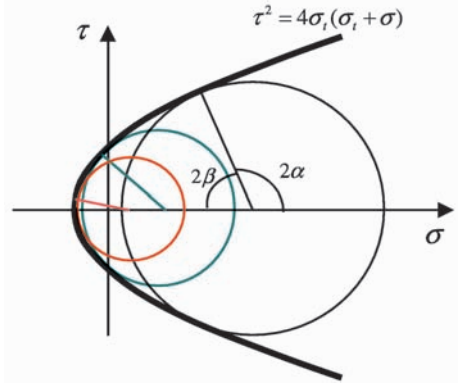


图4 格里菲斯剪切强度曲线
Fig. 4 Chart of Griffith strength theory

3.2 脆性岩石开挖卸荷破裂的平面格里菲斯理论分析

3.2.1 破裂应力条件

格里菲斯强度理论是从研究玻璃类脆性材料张剪性破裂现象提出的,认为材料的破裂是从微裂纹开始的,当裂纹尖端周向拉应力达到岩石的抗拉强度时破裂过程启动。平面格里菲斯破裂判据可以表述为主应力形式(以压为正):

$$\sigma = -\sigma_t, 3\sigma_3 + \sigma_1 \leq 0 \quad (1)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_3), 3\sigma_3 + \sigma_1 > 0 \quad (2)$$

式中, σ_t 为岩石的抗拉强度。图3表示了破裂时两个主应力之间的关系。

图3表明,当 σ_1 和 σ_3 的组合落在强度曲线右侧时,岩体不会破裂;落在左侧时则破裂;而在曲线上为临界状态。由此可见,若岩体中出现张应力 $\sigma_3 = -\sigma_t$,无论 σ_1 取什么数值,都会出现岩体破裂,并为张性破裂。

事实表明,岩体可以在最大主压应力小于单轴抗压强度的条件下发生破坏。因为岩体的抗拉强度 σ_t 通常是不大的,因此这个 σ_1 值并不会太高。例如,在小湾水电站坝基,新鲜花岗片麻岩岩块的实测单轴抗压强度为 168MPa ,内摩擦角 $\varphi = 56.6^\circ$,而抗拉强度约为 8.85MPa 。按照上述理论,使岩石发生张剪性破裂的最大主压应力可以在区间 $26.55 \leq \sigma_1$

3.2.2 破裂角分析

式(2)也可以表述为式(3)的斜面法向应力 σ 和剪应力 τ 关系的形式

$$\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma_t + \sigma). \quad (3)$$

可以求得剪切破裂角的表达式(4):

$$\beta = \frac{1}{2} \arccos \frac{4\sigma_t}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (4)$$

强度曲线和破裂角的几何图示如图(4)。由图可见,岩体破裂角随着破裂面上的法向应力 σ 减小而减小;当法向应力为张应力时,破裂角可以逐渐减小到 0° 。这就是刀口状破裂乃至板裂、拱裂发生的力学原因。

3.2.3 三维破裂应力条件分析

Murrell(1963)曾经对平面格里菲斯理论进行了三维推广,得到破裂判据

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 = 24\sigma_t(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

和

$$\sigma_1 = -\sigma_t, \sigma_2 = -\sigma_t, \sigma_3 = -\sigma_t. \quad (6)$$

在几何上,这是由一个抛物面(5)和三个平面组成的棱锥面(6)相交,联合构成三维格里菲斯强度曲面。

分析可以证明,式(5)抛物面与式(6)3个平面的切点坐标为 $(5\sigma_t, -\sigma_t, -\sigma_t)$, $(-\sigma_t, 5\sigma_t,$

$-\sigma_i), (-\sigma_i, -\sigma_i, 5\sigma_i)$ 。

4 脆性岩石岩爆破裂的能量过程分析

4.1 破裂的应变能密度判据

将式(5)两边同时乘以 $\frac{1+\nu}{6E}$, 可将其改写成能量判据

$$u_s = u_{sc} = \frac{4\sqrt{6}(1+\nu)}{\sqrt{(1-2\nu)E}} \sigma_i \sqrt{u_v}, \quad (7)$$

其中

$$u_s = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2],$$

$$u_v = \frac{3(1-2\nu)}{2E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 = 12(1+\nu) \frac{\sigma_i^-}{E} \sigma_o.$$

分别为畸变能和体变能。

对于抗拉强度棱锥面(6)作为合理的延伸可写出张破裂能量判据方程

$$u_{i1} = u_{ic}, u_{i2} = u_{ic}, u_{i3} = u_{ic} \quad (8)$$

式中根据弹性理论令

$$u_{ii} = \frac{1}{2} \sigma_i \varepsilon_i = \frac{1}{2} \sigma_i \frac{\sigma_i}{E} = \frac{\sigma_i^2}{2E}, u_{ic} = \frac{\sigma_i^2}{2E}$$

分别为各张性主应力引起的应变能和岩体的张性破裂应变能。

可见,格里菲斯判据实际上既是应力判据,又是能量判据。当式(8)满足,即任一主张应力引起的应变能达到张破裂应变能时,岩体优先发生张性破裂,采用张性破裂能量判据(8);在(8)式不满足时,采用张剪性畸变能判据(7)。

对上述能量判据进行分析,当岩体开挖导致开挖面附近岩体张应力 σ_3 (< 0) 降低(张应力增加),张破裂能量判据(8)中 $u_{i3} - u_{ic} = \frac{1}{2E} (\sigma_3^2 - \sigma_i^2)$ 趋向于0,岩体可能产生张破裂;即使不能满足判据(8)对于判据(7)也会一方面增大岩体畸变能 u_s , 同时降低体变能 u_v , 使得岩体更易发生张剪性破裂。因此无论从哪个角度看,开挖卸荷都会促使岩体向破裂方向转化。

4.2 破裂能量分级

由(7)(8)式有,岩体发生非张性破坏时的应变能密度为

$$u_{sc} = 12(1+\nu) \frac{\sigma_i^-}{E} \sigma_o, \quad (9)$$

而张性破裂时的应变能密度为 $u_{ic} = \frac{\sigma_i^2}{2E}$ 。由此

可得剪性破裂与张性破裂释放的应变能密度的关系为

$$u_{sc} = 24(1-\nu) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_i} u_{ic}. \quad (10)$$

可见就一般情况而言,剪性破裂释放的应变能将大于张性破裂,且随着平均应力的增加而增加。

鉴于此,可以将岩爆按破坏的能量,即应变能密度作出大致排序:

基本情形:张性破裂,释放应变能密度 $u_{ic} = \frac{\sigma_i^2}{2E}$;

较强情形:张剪性破裂,释放应变能密度 $u_{sc} = 24(1-\nu) \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_i} u_{ic}$, $24(1-\nu) \bar{\sigma} \geq \sigma_i$;

强情形:压剪性破裂。按照统计岩体力学理论^[4],当岩体中微裂纹因受压闭合,裂面产生摩擦效应条件下的破裂应变能密度为:

$$u_{sc} = \frac{16(1-\nu^2)}{3E(1-2\nu)} \tau_s^2 a^3$$

式中, a 为微裂纹半径(m),而 $\tau_s = \tau - (C \tan \phi + C)$ 为微裂纹表面剩余剪应力。压剪性破裂情形较为复杂,可以进一步研究。

由(9)还可以看出,剪性破裂释放的应变能大小受到平均应力 $\bar{\sigma}$ 的影响,因而也受中间主应力 σ_2 的影响。中间主应力的影响程度与最大及最小主应力等同。

4.3 三维破裂过程的能量分解

岩体破裂过程是一个应变能释放过程。当岩体表面某一微元体发生破裂,解除应力约束使各向应力为0后,该单元体的应变能即完全释放。若忽略破裂过程中的热耗散,由此释放出的张破裂应变能 $u_i = u_{ic}$ 和张剪性应变能 $u_s = u_{sc}$ 可能转化为破裂碎片的表面能 S 和块体运动的动能 K 。对于判据(7)和(8)破裂能量转化关系可写为

$$u_{ic} = S + K, \text{ 即 } \frac{\sigma_i^2}{2E} = S + K, \quad (11)$$

$$u_{sc} = S + K, \text{ 即 } 12(1+\nu) \frac{\sigma_i^-}{E} \sigma_o = S + K. \quad (12)$$

上两式中的动能 K 值的大小决定了破裂碎片的运动状态,但是 K 值的大小取决于岩体破裂吸收的表面能 S 。

图5所示,首先考察开挖面上的微元体张性破裂中的能量关系。设微元体为边长为 $a=1$ 的立方

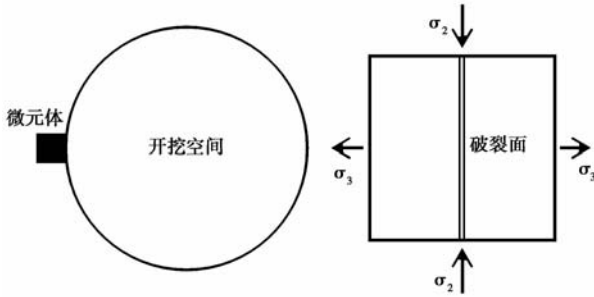


图5 开挖面微元体张破裂示意图

Fig. 5 Chart for tensile failure of a micro unit at excavated surface

体,由于开挖使得临空面产生法向张应力 $\sigma_3 = -\sigma_t$, 则微元体发生张性破裂,根据(11)式,释放应变能 $\frac{\sigma_t^2}{2E}$ 。破裂将沿 σ_1 与 σ_2 构成的平面方向形成一对面积为 $a^2 = 1$ 的破裂表面。若形成单位表面积需吸收表面能 α , 则本次破裂转化为表面能的应变能为

$$S = 2\alpha a^2 = 2\alpha_0 \quad (13)$$

微元体破裂后将有部分剩余应变能可以转化为破裂面外侧部分的动能,即

$$K = \eta(u_{tc} - 2\alpha) = \eta\left(\frac{\sigma_t^2}{2E} - 2\alpha\right) \quad (14)$$

式中, $\eta = V_k/V$ 为微元体破裂面外侧部分的体积所占比例。对于一种特定的岩石,可以分别测得 σ_t 和 α , 由此就可以计算出开挖面处张破裂引起的碎片的动能 K 。

断裂力学对岩石应变能释放率 G_{lc} 有专门的确定方法。该方法通过测试岩石的 I 型断裂韧度 K_{Ic} , 由式 $G_{lc} = \frac{1-\nu^2}{2E} K_{Ic}^2$ 计算应变能释放率。实际上,这个应变能释放率就是岩石的表面能 α , 即有

$$\alpha = G_{lc} = \frac{1-\nu^2}{2E} K_{Ic}^2 \quad (15)$$

带(15)式入(14)式可得

$$K = \eta\left(\frac{\sigma_t^2}{2E} - 2\alpha\right) = \frac{\eta}{2E} [\sigma_t^2 - 2(1-\nu^2)K_{Ic}^2] \quad (16)$$

目前尚较少有同时获得式(16)各项参数数据的试验。根据经验数据和部分试验数据换算^[2,3] 取各参数的中值可以粗略估算几种岩石的张破裂动能如表1。

由表可见,岩石开挖脆性张破裂释放的动能 K 可能远大于其形成新表面所消耗的应变能 2α 。这就是为什么脆性破裂总是会产生较强的冲击荷载和冲击波的原因。

表1 几种岩石开挖脆性张破裂动能估计

Table 1 Estimation for kinetic energy of rock bursts

岩石	$\sigma_t /$ MPa	$E /$ GPa	ν	$K_{Ic} /$ MPa·m ^{1/2}	$u_{tc} /$ N·m	$2\alpha = 2G_{lc} /$ N·m (取 $\eta = 1$)	$K / N \cdot \sigma_3$
花岗岩	2~10	33~69	0.18~0.33	1.88	353	65	288
大理岩	5~9	47~67	0.28~0.35	1.37~1.89	430	42	388
砂岩	2~6	12~54	0.29~0.30	1.67~1.68	242	78	164

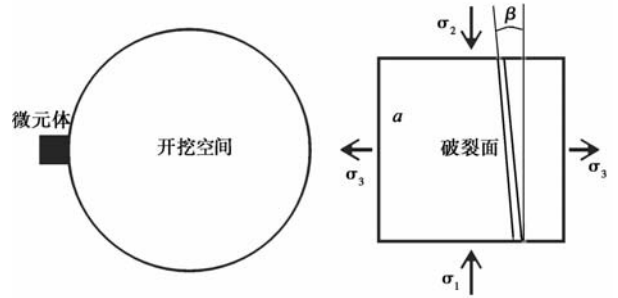


图6 开挖面微元体张剪破裂示意图

Fig. 6 Chart for tension-shear failure of a micro unit at excavated surface

对于张剪性破裂(图6),破裂面与 σ_1 的夹角即破裂角为 β , 则在微元体中破裂面面积为 $a^2 / \cos \beta = 1 / \cos \beta$ 。破裂释放的张剪性应变能由(12)式确定。于是有微元体破裂面外侧部分的动能为

$$K = \eta\left(u_{sc} - \frac{2\alpha}{\cos \beta}\right) = \eta \frac{1+\nu}{E} \left[12\sigma_t \bar{\sigma} - \frac{1-\nu}{\cos \beta} K_{Ic}^2 \right] \quad (17)$$

5 工程意义

(1) 工程开挖的不同部位可能产生不同的应力状态,这是可以通过数值计算结果的应力分区得到的。对此人们也有了许多根据开挖形态和背景应力组合判断开挖面应力状态的经验。在此基础上,可以预测破坏类型的分区和部位,以及可能的岩爆等级。例如,对于顶拱直墙洞室,直墙部位常常可能为张性破裂,而拱脚等曲率较大的部位则可能为剪性破裂。

(2) 根据开挖岩体应力场计算结果,可以采用上述破裂判据判断发生破裂的深度,圈定破裂范围。

(3) 控制张应力的出现,显然是控制岩爆破坏的有效途径。由此,可以根据张破裂判据设计锚固支护力,控制张性破裂的发生。

6 结 论

脆性岩体在高地应力环境下通常积聚较高的应变能,在经历大型工程开挖时,高储能岩体会通过脆性破裂快速释放应变能,产生岩爆。

本文针对这类岩爆现象进行了一系列理论探讨,主要认识和结论如下:

(1)以一系列现象说明了开挖条件下脆性岩体的岩爆破坏主要为张破裂或者张剪性破裂。认为开挖产生次生张应力和压剪应力条件下微裂纹裂尖出现张应力是可能的,因此采用格里菲斯强度理论研究开挖岩体破裂是有效的。

(2)以格里菲斯强度理论为基础,分析了岩体在二维和三维情形下的岩爆破裂应力判据和破裂角,指出在有张应力的条件下,岩体的剪破裂角会减小,直至为零,这就解释了开挖面附近薄片状、刀口状破裂现象的原因。

(3)分析了脆性岩体岩爆破裂的能量过程,指出张性破裂所耗能量较小,而张剪性和压剪性破裂耗能较高。认为岩爆破裂消耗的能量主要转化为新

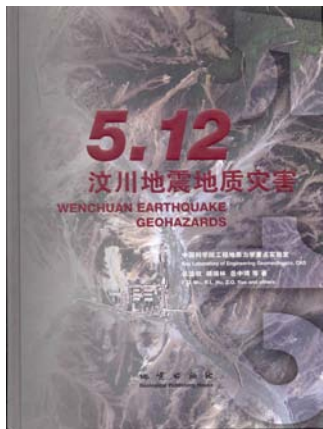
生裂纹的表面能和破裂碎片的动能,并指出表面能所占比例较动能为小。由此解释了脆性岩体岩爆破坏以动力效应为主的特征。

(4)指出了本文理论分析成果的工程应用价值在于:可以预示开挖脆性岩体破裂部位、破裂方式和破裂范围;提出岩爆破裂的张性应力控制依据。

参 考 文 献

- [1] J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, Fundamentals of Rock Mechanics [A]. Third Edition Chapman and Hall[C]. London, 1979.
- [2] 王桂尧. 岩石Ⅱ型(剪切)断裂及工程应用研究[D]. 博士论文,中南工业大学,1996.
G. Wang. On type II fracture of rock and its engineering applications, Ph. degree thesis, Zhongnan University of Technology, 1999.
- [3] Q. H. Rao. Pure shear fracture of brittle rock, a theoretical and laboratory study[D]. doctoral thesis, Lulea University of Technology, Lulea. Sweden, 1999.
- [4] 伍法权著. 统计岩体力学原理[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993.
F. Wu. Principle of Statistical mechanics of rock mass. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1993.

新书介绍



《5.12 汶川地震地质灾害》

作者:伍法权,胡瑞林,岳中琦等,地质出版社出版

本图集着重反映此次地震的次生地质灾害状况,主要内容包括汶川地震地质背景、滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等地质灾害的特点,以及这些次生地质灾害对建筑物、路面、桥梁等造成的破坏背景。本图集科学、系统地反映了汶川地震地质灾害的形成、发育规律,既有直观表述,又有一定深度的分析,可供地震、地理、地质、地质工程、岩土工程等地球科学的科研、教学人员参考使用,也可供减灾、防灾及相关业务人员使用。

全书定价:150元,邮费20元。

有需要的读者,请与工程地质专业委员会、工程地质学报编辑部联系购买事宜。

汇款邮寄地址:100029,北京9825信箱《工程地质学报》编辑部

联系电话及邮箱:010-82998121 Email:gcdz@mail.igcas.ac.cn