

文章编号: 1673-3363-(2016)01-0172-07

屈曲型岩爆的发生机制及其时效性研究

翁磊, 李夕兵, 周子龙, 刘科伟

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要 为分析深部巷道围岩层裂薄板结构的形成机制和屈曲型岩爆发生的力学机理, 采用数值模拟方法对深部巷道开挖过程中围岩主应力的分异演化规律进行了研究。基于三参量黏弹性本构关系, 以屈曲型岩爆的层裂薄板结构为力学模型, 推导出了二向受力下屈曲型岩爆的压屈时效方程, 探讨了不同应力状态下屈曲型岩爆的时效特征。结果表明: 在以垂直应力为主导的巷道在掘进过程中, 巷道顶部和底部的主应力水平在逐步减小, 岩体能量逐步释放; 而巷道两侧边墙的主应力出现严重的分异现象, 切向应力变大而轴向应力减小, 岩体能量向两侧转移并大量积聚。以水平应力为主的巷道在掘进过程中, 围岩应力状态的演化过程及能量积聚特征与此相反。围岩层裂薄板结构形成后, 在切向应力和轴向应力的二向应力作用下发生蠕变弯曲变形, 经过一段时间, 当变形达到某一限值时, 层裂薄板结构就会发生屈曲失稳破坏并释放岩体内积聚的弹性变形能, 产生延迟岩爆现象。

关键词 屈曲型岩爆; 应力分异; 层裂板结构; 延迟效应; 弯曲蠕变

中图分类号 TU 45 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2016.01.027

Occurrence mechanism and time-dependency effect of buckling rock burst

WENG Lei, LI Xibing, ZHOU Zilong, LIU Kewei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract To analyze the formation mechanism of slabbing thin plate in surrounding rock and the mechanical mechanism of bulking rock burst, the differentiation law of principle stresses during the deep roadway excavation was studied by numerical simulation. Based on three-parameter viscoelasticity constitutive relationship and the slabbing thin plate mechanical model for buckling rock burst, the buckling time-dependency equation of buckling rock burst under two dimensional stress state was theoretically derived, and the time-dependency features of bulking rock burst under different stress states were discussed. Simulated results indicate that for the roadway where vertical geo-stress is greater than horizontal geo-stress, the principle stresses decrease and the rock energy releases gradually in the roof and floor with the excavation process, while the principle stresses in sidewalls appear to be largely different, the tangential stress increases while the axial stress decreases in sidewalls where the rock mass energy accumulates massively. On the contrary, for the roadway where horizontal geo-stress is greater than vertical geo-stress, the differentiation evolution process of stresses and the characteristics of energy accumula

收稿日期: 2014-04-02

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272304); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732004); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014zzts057)

作者简介: 翁磊(1987—), 男, 湖北省武汉市人, 博士, 从事深部岩石力学与采矿方面的研究。

E-mail: wenglei08@gmail.com

Tel: 13875946450

tionare the opposite. The results illustrate the mechanism of delayed rock burst, that is, when the slabbing thin plate structure in surrounding rock forms, the thin plate starts to bend and creep under the action of two-dimensional stress state, after the deformations reach to a limited value in a period of time, the slabbing thin plate structure will bulking fail and release massive elastic strain energy simultaneously.

Key words buckling rock burst; stress differentiation; slabbing plate structure; time delayed effect; bending creep

随着岩体工程开挖活动越来越频繁地向地下深入, 由地下深部开挖而造成的岩体工程灾害也日益增多, 特别是岩爆这种动力地质灾害, 一旦发生, 就会给地下工程造成损失, 对人员安全构成威胁。深部岩体开挖过程中发生的岩爆, 实际上是围岩应力分异条件下, 岩体内裂隙发育、扩展、贯穿而出现的整体失稳破坏, 表现为围岩系统的能量在空间上非均匀积累、时间上非稳定转化的过程^[1]。研究表明, 岩爆大多发生在开挖面后方一定范围内, 并随着开挖面位置的前进而被动前移。李忠等^[2]对陆家岭隧道施工中的岩爆进行了总结, 发现岩爆大多发生在距掌子面 6~15 m(0.5~1 倍洞径)的拱角及两侧壁上, 且一般在掌子面开挖后 24 h 内发生。何川等^[3]总结了苍岭隧道的岩爆多发生在开挖后 4~6 h 内, 距离掌子面约 2 倍洞径范围内。曹强等^[4]也总结锦屏水电站辅助洞的岩爆多发生在距掌子面 6~12 m(1~2 倍洞径)的范围内, 掌子面开挖后的 5~20 h 内。可见, 岩爆的发生存在时间上的延迟效应, 并表现为空间上的不确定性, 这无疑加大了地下工程岩爆灾害预测、预报及防治的难度。

岩爆发生的时效性是相对于岩爆发生距开挖掌子面的距离和开挖面形成时间而定的, 发生时往往在空间上滞后掌子面一定距离, 时间上滞后开挖区域形成后一段时间^[5]。对岩爆时效机制的研究, 国内外学者做了一些工作。何满潮等^[6]对高应力状态下的花岗岩进行了岩爆实验研究, 根据卸荷开始至发生岩爆的时间, 将岩爆分类瞬时岩爆、标准岩爆和滞后岩爆 3 种类型。陈炳瑞等^[5]提出了时滞型岩爆的概念, 对锦屏 II 级水电站引水隧洞的岩爆展开了研究。刘立鹏等^[7]利用洞室开挖围岩应力释放率, 以围岩应变能分布为出发点对岩爆的滞后特征进行了研究。张晓春等^[8-10]采用黏弹性本构方程, 开展了中厚板、板梁和薄板等结构失稳破坏的时间相关性研究。深部高应力环境中, 岩石的变形表现出明显的流变效应, 有关资料表明^[11-12], 即便是质地

非常坚硬的花岗岩, 长期处在不利因素的作用下, 也会对开挖区围岩的强度产生很大的削弱作用, 岩石发生蠕变变形。巷道在高应力脆性围岩中掘进时, 巷道壁受到的切向应力变大, 而径向应力变小, 围岩应力分布状态恶化, 岩体微裂纹受自由面和最大主应力的影响而发生沿平行于开挖面的扩展、贯穿, 宏观上即表现为岩体失稳破坏具有时间滞后效应。可见, 产生岩爆延迟发生效应的原因可以分为 2 个方面: 一方面, 深部工程中原岩开挖的过程是地应力重分布的过程, 也是围岩结构的能量重新调整的过程, 包含了能量的转移、耗散和积聚以及微裂纹的发育、扩展和贯穿, 是一个滞后于开挖扰动的复杂过程; 另一方面, 岩体本身具有流变性, 即其自身的物理力学性能具有随时间变化的特性, 而这一特性在深部高应力环境下表现得更加明显。

目前, 人们对于屈曲型岩爆有了较为全面的认识, Nemat-Nasser 等^[13]认为岩爆是一种板状屈曲破坏, 受到平行于自由面方向的初始裂纹的影响。Vardoulakis^[14]根据分叉理论分析了岩爆是一种表面失稳现象。冯涛和潘长良^[15]提出了岩爆发生机理的层裂屈曲模型。左宇军等^[16]建立了洞室岩爆层裂屈曲破坏的突变模型。以上均就岩爆的层裂屈曲失稳破坏过程做了细致的研究, 但针对巷道屈曲型岩爆发生的时效机制研究比较匮乏。本文首先分析了巷道屈曲型岩爆的发生机制, 采用数值模拟方法研究了采动过程中围岩主应力的分异演化规律, 阐述了围岩层裂板的形成机制; 然后采用三参量黏弹性本构模型, 对屈曲型岩爆的薄板力学失稳时效机制进行了研究, 从理论上推导出了二向受力下黏弹性薄板的压屈时效方程, 探讨了延迟岩爆发生的条件并通过算例对理论公式作了进一步的解释。

1 屈曲型岩爆的发生机制

1.1 采动过程中围岩主应力的分异

地下巷道开挖时, 原本处于原岩应力状态下的

岩体,在开挖卸荷扰动下,其初始应力状态发生变化,特别是靠近巷道洞壁的岩体单元所处的三维应力状态逐渐转化为二维应力状态,并随着巷道开挖面的继续推进,其二向应力状态进一步分异。

采用 GTS/NX 有限元软件对埋深为 1 100 m 的巷道在连续开挖掘进过程中,洞壁岩体单元应力状态的分异演化过程进行了计算。数值模拟的模型尺寸为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 40\text{ m}$,巷道断面为直墙拱形,尺寸为 $2.6\text{ m} \times 2.2\text{ m}$,岩体的破坏遵循摩尔-库仑准则,密度为 $2\,680\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 45 GPa,泊松比为 0.26,内聚力为 6 MPa,内摩擦角为 35° 。考虑巷道分 40 步开挖的情况,每步开挖进尺 1 m。模型顶部施加的垂直地应力为 30 MPa,侧向水平地应力为 10 MPa,底部边界为全位移约束,数值模拟的力学模型及网格划分见图 1。

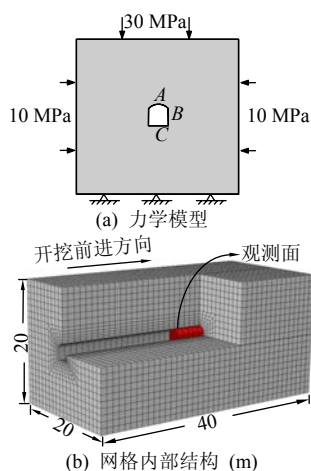


图 1 数值模型

Fig.1 The numerical model

分别选取第 21 步开挖步巷道周边顶部 A、中部 B 和底部 C 的岩体单元作为观测点,记录了其最大主应力(即切向应力 σ_θ)和最小主应力(即轴向应力 σ_z)随开挖面推进的变化情况,将结果汇总于图 2a。从图 2a 中可看出,当开挖面距离观测点较远时,岩体处于初始地应力状态。随着开挖面的继续向前推进,当开挖面前方距离观测点只有 3~4 个开挖步距时,观测点的主应力值开始出现变化:巷道壁底部(单元 C)和上部(单元 A)岩体的主应力均减小,且切向应力减小幅度远大于轴向应力的减小幅度;巷道壁中部边墙(单元 B)岩体的切向应力急剧增加,而轴向应力有所减小。当开挖面后方距离超过观测点 4~5 个开挖步时,巷道岩壁各部位岩体调整后的应力状态再次趋于稳定。

图 2b 为巷道壁顶部、中部和底部岩体单元切

向应力与轴向应力之差($\sigma_\theta - \sigma_z$)的变化情况,可以看到巷道底部和顶部的主应力之差随着开挖面的形成而随之减小,而巷道水平中部的主应力之差则显著增大。值得注意的是,当计算模型施加的水平地应力为 30 MPa,垂直地应力为 10 MPa 时,计算得出的结果刚好与上述相反。在以垂直应力为主导的巷道在掘进过程中,巷道顶部和底部的主应力水平在逐步减小,岩体能量逐步释放;而巷道两侧边墙的主应力出现严重的分异现象,切向应力变大而轴向应力减小,岩体能量向两侧转移并大量积聚。以水平应力为主的巷道在掘进过程中,围岩应力状态的演化过程及能量积聚特征与此相反。

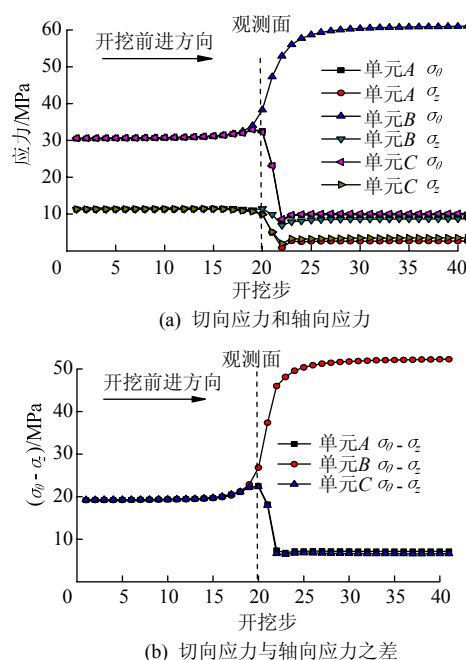


图 2 应力随开挖面推进的变化曲线

Fig.2 The stress curves with the advance of excavation face

1.2 围岩层裂板的形成及屈曲岩爆的产生

如前文所述,在地下巷道开挖过程中,巷道围岩表面某些部位应力集中,最大主应力急剧增大,最小主应力反而减小,其所处的应力状态趋近于单轴压缩状态。当最大主应力达到一定值时,岩体内的初始微裂纹将会在平行于或偏向最大主应力的方向上扩展,新生裂纹不断扩展、分支、合并直至贯通,形成各种不同程度的张性破裂面。当破裂面的裂纹增长到一定长度时,张性破裂面就会受到自由表面的影响,将岩体分裂成与自由面平行的薄板层状岩块。外层薄板形成后,又为里层薄板的形成提供了新的自由表面,内层岩体在新自由面的作用下发生平行于自由面的劈裂扩展,如此将最终在巷

道洞壁附近岩体形成层裂板状结构。

在深部地下采矿时，由这种自由面附近的层裂板状结构发生失稳破坏而形成的岩爆现象较为常见。在采场主要表现为采场的顶板发生薄板片状冒落，在巷道内一般表现为巷道洞壁发生薄板状片落等现象。当初始应力很大，与层裂板平行的切向应力在短时间内达到岩体的极限强度时，就会发生以剪切破坏为主的强烈岩爆，并伴随猛烈的能量释放；当初始应力很小，切向应力达到最大值时仍远小于岩体极限强度时，岩体积聚的能量也很小，岩体将不会发生明显的岩爆现象。当切向应力达到相当大的水平但仍低于岩体极限强度时，此时岩体处于围岩应力分异演化之后的稳定阶段，岩体在切向应力作用下发生蠕变变形，层裂板逐渐向自由表面产生较小的弯曲挠度，当弯曲变形达到极限时，就会发生岩爆并伴随有明显的能量释放过程。这种薄岩板的屈曲岩爆现象，实际上是巷道洞壁岩体在较大的恒定切向应力的作用下发生弯曲蠕变效应，而最终导致洞壁层裂板结构发生失稳破坏。这类问题可归结为具有流变性质的薄岩板在单向或二向应力状态下的稳定性问题，下面将对此作详细研究。

2 屈曲型岩爆的失稳控制方程

2.1 三参量黏弹性本构关系

采用三参量固体模型，由弹性单元和黏缸单元并联后再与弹性单元串联组成(如图 3)，其本构关系可表达为

$$\frac{\eta}{E_1} \dot{\sigma} + (1 + \frac{E_2}{E_1})\sigma = \eta \dot{\varepsilon} + E_2 \varepsilon \quad (1)$$

式中： E_1 为弹性体 1 的弹性模量； E_2 为弹性体 2 的弹性模量； η 为黏缸单元的黏滞系数。

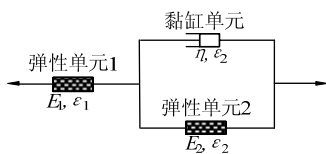


图 3 三参量黏弹性本构模型

Fig.3 Three-parameter viscoelasticity constitutive model

根据式(1)给出的本构关系，采用 Laplace 变换后得到模型相空间的松弛模量为

$$\bar{E}_t(s) = \frac{\eta s + E_2}{s \left[\frac{\eta}{E_1} s + \frac{E_1 + E_2}{E_2} \right]} \quad (2)$$

再对式(2)进行 Laplace 逆变换，可得到与时间

相关的松弛模量为

$$E_t(t) = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} + \frac{E_1^2}{E_1 + E_2} \exp \left[-\frac{(E_1 + E_2)}{\eta} t \right] \quad (3)$$

2.2 黏弹性薄板的压屈时效方程

巷道层裂板状结构的力学模型可见简化为图 4a 所示的薄板结构，围岩壁外层板梁发生向自由面的变形，这一过程还受到相邻内层板梁的约束作用。若巷道没有支护时，可忽略相邻内层板梁对外层板梁的作用，即外层板梁沿隧道径向不受荷载，其力学模型可简化为两向受力的薄岩板，如图 4b 所示，长和高分别为 a 和 b ，厚度为 h ，分别受主应力 σ_x 和 σ_y 的作用。

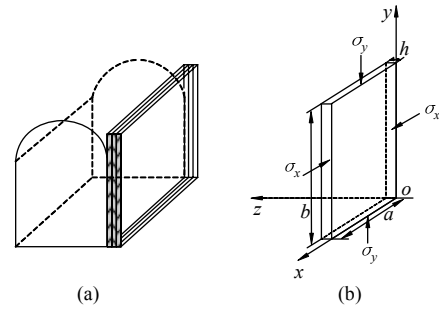


图 4 巷道围岩层裂薄板力学模型

Fig.4 Thin plate mechanical model for rock slabbing structure

根据材料力学平面假设，黏弹性板的微分平衡方程为

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - \sigma_x b h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \sigma_y a h \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

式中： M_x 、 M_y 和 M_{xy} 分别为单位板宽上的弯矩和扭矩； w 为垂直于中面的挠度。

根据弹性力学理论，考虑时间因素后，薄板横截面上的内力为：

$$\begin{cases} M_x = -D(t) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_y = -D(t) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy} = -D(t) (1 - \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (5)$$

其中， $D(t)$ 为岩板的弯曲刚度，且

$$D(t) = \frac{E(t) h^3}{12(1 - \mu^2)} = \frac{(1 + \mu) h^3}{6(1 - \mu^2)} G(t) \quad (6)$$

式中 $E(t)$ 和 $G(t)$ 分别为与时间有关的弹性模量和剪切模量。

式(4)、(5)中，各内力均以拉为正，分析此类稳定问题时，在规定压力为正方向后，将式(5)代入式

(4), 则式(4)可变为薄板的挠曲平衡微分方程, 即

$$D(t) \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \sigma_x b h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y a h \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

对于薄板四边均为简支约束时, 其边界条件为

$$\left. \begin{aligned} x=0, a \text{ 时, } w=0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= 0 \\ y=0, b \text{ 时, } w=0, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据巷道屈曲变形时的特点, 由于内层岩体对岩板的横向约束作用, x, y 方向半波数只能为 1, 因此假设挠度的表达式为

$$w = g \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (9)$$

显然, 式(9)可以满足式(8)的边界条件, 将式(9)代入式(7), 得

$$g \left(\frac{\pi^4}{a^4} + 2 \frac{\pi^4}{a^2 b^2} + \frac{\pi^4}{b^4} - \frac{\sigma_x b h \pi^2}{a^2 D(t)} - \frac{\sigma_y a h \pi^2}{b^2 D(t)} \right) \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} = 0 \quad (10)$$

要使式(10)在域 $(0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b)$ 内恒成立, 则必须满足

$$\frac{\pi^4}{a^4} + 2 \frac{\pi^4}{a^2 b^2} + \frac{\pi^4}{b^4} - \frac{\sigma_x b h \pi^2}{a^2 D(t)} - \frac{\sigma_y a h \pi^2}{b^2 D(t)} = 0 \quad (11)$$

整理式(11)后, 可得

$$\sigma_x b^3 + \sigma_y a^3 = \frac{\pi^2 \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2}{h} D(t) \quad (12)$$

对于三参量黏弹性模型, 存着如下关系^[17]:

$G(t) = \frac{1}{3} E_t(t)$, 将松弛模量函数式(3)代入弯曲刚度函数式(6)后, 可得

$$\begin{aligned} D(t) &= \frac{(1+\mu)h^3}{18(1-\mu^2)} E_t(t) \\ &= \frac{(1+\mu)h^3}{18(1-\mu^2)} \left\{ \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} + \frac{E_1^2}{E_1 + E_2} \exp \left[-\frac{(E_1 + E_2)}{\eta} t \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

联立式(12)和式(13)后, 有

$$\begin{aligned} \sigma_x b^3 + \sigma_y a^3 &= \frac{(1+\mu)\pi^2 h^2 \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2}{18(1-\mu^2)} \cdot \\ &\quad \left\{ \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} + \frac{E_1^2}{E_1 + E_2} \exp \left[-\frac{(E_1 + E_2)}{\eta} t \right] \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

若将式(14)右边项的松弛模量函数记作 $f(t)$,

其中 $f(t)$ 为随时间 t 增加的非递增函数, 则式(14)可表达为

$$\sigma_x b^3 + \sigma_y a^3 = \frac{(1+\mu)\pi^2 h^2 \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2}{18(1-\mu^2)} f(t) \quad (15)$$

通过移项, 可得到时间 t 关于 σ_x 和 σ_y 的表达式

$$t = f^{-1} \frac{18(1-\mu^2)}{(1+\mu)\pi^2 h^2 \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2} (\sigma_x b^3 + \sigma_y a^3) \quad (16)$$

式(16)即为二向应力状态下黏弹性薄板的压屈时效方程, 表明在二维应力 σ_x 和 σ_y 的共同作用下, 经过一段时间 t 后, 当由式(15)确定岩板受力状态满足其失稳破坏条件时, 岩板才会发生失稳破坏。

3 屈曲型岩爆的时效性

3.1 屈曲型岩爆的时效机制分析

从压屈时效方程的推导过程可以知道, 屈曲型岩爆的发生不仅与岩板所处的应力大小和边界条件有关, 还与岩石的流变性能有关。分析式(15)可知, 黏弹性岩板处于不同应力荷载水平时, 其屈曲失稳问题可按以下 3 种情况讨论:

1) 巷道开挖过程中围岩应力分异过程还未达到稳定时, 层裂板所处的应力水平已足够大, 而导致层裂板在一开始形成或者形成后很短的时间内 ($t \rightarrow 0$) 就发生了失稳破坏。这种情况下, 岩爆发生的位置往往离新开挖面很近, 且发生的时间与新开挖面形成的时间间隔很短, 可称为瞬时岩爆。

2) 巷道开挖后, 围岩的应力分异作用并未使围岩壁产生薄层状岩板, 或者围岩应力调整后的应力状态在很长一段时间内 ($t \rightarrow \infty$) 都不足以导致岩板发生屈曲失稳, 从而仅出现流变现象, 不产生岩爆。

3) 若巷道岩壁的应力状态介于上述 2 种情况之间, 即在围岩应力分异稳定后的某一状态, 在经历了一段时间 t 后, 围岩层裂板发生失稳破坏。这种情况下, 岩壁岩板在一定的切向应力和轴向应力作用下发生蠕变变形, 当弯曲变形达到极限时, 就会发生平行于临空面的屈曲型岩爆并伴随有明显的能量释放过程, 是一种延迟岩爆现象。

对于第 3 种情况下的延迟岩爆现象, 为了进一步讨论荷载水平与失稳时间之间的关系, 引入侧压力系数 k , 且 $k = \sigma_x / \sigma_y$, 代入式(15)后, 可得到不同侧压力系数 k 下, σ_y 与屈曲失稳时间 t 的变化关系曲线, 如图 5 所示。

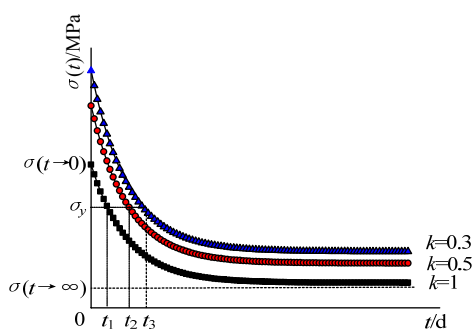


图 5 不同侧压力系数下荷载与屈曲失稳时间的变化关系

Fig.5 Relationship between stresses and bulking time under different lateral stress coefficients

对应于上述屈曲失稳问题的 3 种情况，图 5 也可以分别给出以下 3 种解释：① 若岩板所受应力超出其弹性临界应力 $\sigma_{t \rightarrow \infty}$ 时，巷道岩壁立刻就发生了屈曲失稳，这就是高应力下的瞬时岩爆；② 若岩板所受应力小于其长期稳定应力 $\sigma_{t \rightarrow \infty}$ ，则巷道岩壁不会发生岩爆，仅仅只出现流变现象；③ 若岩板所受应力处于弹性临界应力 $\sigma_{t \rightarrow \infty}$ 和长期稳定应力 $\sigma_{t \rightarrow \infty}$ 之间的某一值时，在经历一段时间的蠕变后岩板才发生失稳，即发生了延迟岩爆现象。

从图 5 中还可以看出，岩壁受到不同的应力状态时，其岩爆的发生时间也不同。对于同一垂直应力 σ_y ，侧压力系数 k 越小，发生岩爆的时间就越推后 ($t_3 > t_2 > t_1$)，这是因为岩板所受的应力越小，其达到极限变形破坏所需的时间就越多，岩爆就越滞后发生甚至不发生。

3.2 算例分析

山东玲珑金矿西山坑口的 -50 m 中段大巷处于石英矿脉下盘的花岗岩岩体中，巷道在掘进过程中发生了岩爆现象，现场观察到 1 块弯曲折断的层裂岩板，尺寸长×高×厚为 1.27 m×1.56 m×4.7 cm。现采用薄板压屈时效方程对该花岗岩岩板破坏前的状态进行分析，本构关系采用三参量黏弹性固体模型，根据文献[17]，可取 $E_1=60$ GPa， $E_2=30$ GPa， $\eta=31\,500$ MPa·d，泊松比 $\mu=0.26$ ，代入式(15)后可得

$$3.8\sigma_x + 2.05\sigma_y = 136.4 + 272.8e^{-2.857t} \quad (\text{MPa}) \quad (17)$$

现场岩爆地点埋深约 500 m，可估算出巷道所处垂直应力 σ_y 为 13.13 MPa，则可由式(17)计算出该岩板的弹性临界应力为(100.6 MPa，13.13 MPa)和长期稳定应力为(35.89 MPa，13.13 MPa)，也即当水平应力 σ_x 介于 35.89 MPa 和 100.6 MPa 之间时，岩板不会立即失稳破坏，而是经过一段时间的变形

后才屈曲失稳。巷道开挖中，如测得水平应力积聚到 33 MPa 时该岩板形成，经计算该岩板的屈曲失稳时间为 0.99 d，即巷道边墙的层裂岩板在形成 0.99 d 后才发生岩爆现象，也即上述的延迟岩爆现象。然而，巷道实际所处的应力状态受到多种因素的影响，玲珑金矿在深部地压控制中，以实测的地应力代入理论公式中进行计算，即可推算出巷道层裂岩板发生岩爆的时间，对其深部开采岩爆的控制具有重要指导意义。

4 结 论

1) 在以垂直应力为主导的巷道在掘进过程中，巷道顶部和底部的主应力水平在逐步减小，岩体能量逐步释放；而巷道两侧边墙的主应力出现严重的分异现象，切向应力变大而轴向应力减小，岩体能量向两侧转移并大量积聚。以水平应力为主导的巷道在掘进过程中，围岩应力状态的演化过程及能量积聚特征与此相反。岩爆通常就发生在这个应力状态发生转化过程中，且常常滞后开挖面一段距离。

2) 采用三参量黏弹性本构方程，建立了屈曲型岩爆的层裂薄板力学模型，从理论上推导出了二维受力状态下屈曲型岩爆的压屈时效方程，据此可计算出层裂岩板在恒定应力作用下发生失稳破坏的时间。

3) 分 3 种情况探讨了不同应力状态下岩爆发生的时效特征，延迟岩爆现象的产生是有条件的：只有当层裂岩板所处应力状态位于弹性临界应力和长期稳定应力之间时，才会发生延迟岩爆现象。对玲珑金矿 -50 m 中段大巷的岩爆现象进行了分析，进一步解释了理论公式的应用前景。

参考文献：

- [1] 谷明成，何发亮，陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(9): 1324-1329.
GU Mingcheng, HE Faliang, CHEN Chengzong. Study on rockburst in Qinling tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1324-1329.
- [2] 李忠，汪俊民. 重庆陆家岭隧道岩爆工程地质特征分析与防治措施研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(18): 3398-3402.
LI Zhong, WANG Junmin. Geological characters of rockburst in Lujialing tunnel and its prevention methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3398-3402.
- [3] 何川，汪波，吴德兴. 苍岭隧道岩爆特征与影响因素的相关性及防治措施研究[J]. 水文地质工程地质，

- 2007(2): 25-28.
- HE Chuan, WANG Bo, WU Dexing. Research of relativity between rockburst character and influence factor and prevention measure in Cangling tunnel[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007(2): 25-28.
- [4] 曹强, 贾海波, 廖卓. 锦屏辅助洞岩爆特征及防治措施研究[J]. *隧道建设*, 2009, 29(5): 510-512.
- CAO Qiang, JIA Haibo, LIAO Zhuo. Case study on characteristics and prevention and control measures of rock bursts in Jinping auxiliary tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2009, 29(5): 510-512.
- [5] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(3): 561-570.
- CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: time delayed rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 561-570.
- [6] 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): 865-876.
- HE Manchao, MIAO Jinli, LI Jiande, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 865-876.
- [7] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 锦屏二级水电站施工排水洞岩爆机理及特征分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(10): 3150-3156.
- LIU Lipeng, WANG Xiaogang, JIA Zhixin, et al. Analysis of mechanism and characteristic of rockburst in drainage-hole of Jinping II hydropower station[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology Edition)*, 2011, 42(10): 3150-3156.
- [8] ZHANG Xiaochun, MIAO Xiexing, YANG Tingqing. A time-dependent study for rockburst in coal mines[C]// *The 1st International Conference on Advance in Structural Engineering and Mechanics*. Seoul: [s.n.], 1999: 1447-1452.
- [9] 杨挺青, 张晓春, 刚芹果. 黏弹性薄板蠕变屈曲的载荷-时间特性研究[J]. *力学学报*, 2000, 32(3): 319-325.
- YANG Tingqing, ZHANG Xiaochun, GANG Qinguo. Temporal characteristics of loading for creep buckling plates[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2000, 32(3): 319-325.
- [10] 张晓春, 张东升, 缪协兴. 井巷围岩的延迟失稳机理分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 830-833.
- ZHANG Xiaochun, ZHANG Dongsheng, MIAO Xiexing. Study on delay instability on surrounding rock masses of roadway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 830-833.
- [11] MALAN D F, VOGLER U W, DRESCHER K. Time-dependent behaviour of hard rock in deep level gold mines[J]. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1997, 97: 135-148.
- [12] MALAN D F. Time-dependent behaviour of deep level tabular excavations in hard rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1999, 32(2): 123-155.
- [13] NEMAT-NASSER S, HORII H. Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation and rockburst[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(B8): 6805-6821.
- [14] VARDOULAKIS I. Rockbursting as a surface instability phenomenon[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*, 1984, 21: 137-144.
- [15] 冯涛, 潘长良. 洞室岩爆机理的层裂屈曲模型[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(2): 287-290.
- FENG Tao, PAN Changliang. Lamination spallation buckling model for formation mechanism of rockburst [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(2): 287-290.
- [16] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 洞室层裂屈曲岩爆的突变模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2005, 36(2): 311-317.
- ZUO Yujun, LI Xibing, ZHAO Guoyan. A catastrophe model for underground chamber rock burst under lamination spallation buckling[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology Edition)*, 2005, 36(2): 311-317.
- [17] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 12-23.