

文章编号:1672-3961(2009)04-0102-05

# 深部圆巷开挖围岩能量耗散特征数值模拟分析

崔兰<sup>1</sup>,王树仁<sup>2\*</sup>

(1. 山西省交通规划勘察设计院, 山西 太原 030012;  
2. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**深部高应力巷道岩爆灾变机理及其控制对策研究,是目前国内外采矿工程所急待解决的重点难题.应用 UDEC 计算程序,分析了深部圆巷随开挖半径大小、应力水平高低和应力不均匀程度,围岩内主应力分布和能量耗散特征,发现随应力水平由低至高和应力不均匀程度的加剧,巷道围岩能量耗散值和能量耗散率均成凹形特征曲线急增;随开挖半径由小至大,能量耗散值成凹形曲线急增,但能量耗散率变化却很小;随着应力水平不均匀程度的加剧,在巷道围岩内部形成的主应力差值封闭包核区,呈现由围岩浅部向围岩深部跃移现象;当水平应力大于垂直应力时,在巷道顶板产生主应力差值封闭包核区的范围和量值大小,相对于巷道两帮更为严重.

**关键词:**深部开采;圆形巷道;数值模拟;能量耗散;主应力差值

**中图分类号:**TU457      **文献标志码:**A

## Numerical simulation of the energy dissipation characteristics of an excavated circular tunnel under high stress conditions

CUI Lan<sup>1</sup>, WANG Shu-ren<sup>2\*</sup>

(1. Shanxi Design Institute of Communications, Taiyuan 030012, China;  
2. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** It is the key important problems in the world for research on rockburst disaster mechanism and control countermeasure of the deep mining tunnel under high stress conditions. The principal stresses distribution and energy dissipation was analyzed according to the cases of the excavated radius, the stress level, and the non-uniform stress field of the tunnel with the UDEC technique. The growth curves of the energy dissipation quantity and the energy dissipation ratio were concave with stress level increasing and the non-uniform stress field aggravating. The growth curve of the energy dissipation quantity was also concave, but the energy dissipation ratio with the excavated radius increasing was almost holding constant. The concentrating zones of principal stress difference were extended and gradually migrated from the outside to the inside in the tunnel surroundings with the non-uniform stress field aggravating. When the horizontal stresses are greater than vertical stresses, the concentrating zones of principal stress difference in the roof usually have more serious consequences than those in both sides of the tunnel.

**Key words:** deep mining; the circular tunnel; numerical simulation; energy dissipation; principal stress difference

## 0 引言

自 1738 年英国某锡矿记录到世界上第一次岩

爆以来,岩爆现象就一直困扰着矿业开发工程.由于岩爆具突发性和动力破坏的特点,它直接威胁到施工人员、设备的安全,破坏工程结构,影响工程进度,至今仍是世界性的地下工程难题之一<sup>[1-2]</sup>.在深部高

收稿日期:2009-05-21

基金项目:燕山大学博士基金项目资助(B245)

作者简介:崔兰(1965-),女,山西翼城人,高级工程师,学士,主要从事岩土工程、岩土力学等方面的研究. E-mail: cui lan318@163.com

\* 通讯作者:王树仁(1968-),男,河北唐山人,副教授,博士,主要从事岩土工程、岩土力学等研究. E-mail: w\_sr88 @ 163.com

应力条件下开挖地下工程,由于开挖卸荷导致巷壁周边应力在重新分布的过程中分异,致使储存于岩体中的弹性应变能突然释放,产生动力失稳的即岩爆现象.对岩爆机理研究,国内的王耀辉等通过编写有限元程序,考虑开挖速率影响,对岩爆破坏过程中的能量释放进行了数值模拟分析<sup>[3]</sup>;赵忠虎等人通过室内试验证实,能量耗散将导致岩石强度降低,能量释放是造成岩石灾变破坏的真正原因<sup>[4]</sup>;徐松林<sup>[5]</sup>、张艳博<sup>[6]</sup>、潘一山<sup>[7]</sup>和潘岳<sup>[8]</sup>等人,分别采用卸载方法、声发射监测、能量判据和突变理论等进行了大量试验研究;徐成光<sup>[9]</sup>、杨承祥<sup>[10]</sup>、申骞<sup>[11]</sup>、徐林生<sup>[12]</sup>和杜子建<sup>[13]</sup>等人,分别对岩爆进行了预测和防治研究探索.国外 Cook 等人较早进行了岩爆试验研究<sup>[14]</sup>,Ryder 和 Spottiswoode 等人,发现矿震事件的数量、能量释放率、岩爆事件与 ESS 相关性较好,而与 ERR 相关性不高等研究成果<sup>[15]</sup>.到目前为止,无论对岩爆机理的研究、还是对岩爆预测和防治研究,虽然取得了不少进展,但还远未达到成熟程度.由于岩爆动力失稳过程,即采动围岩内部能量的积聚、迁移和释放过程,因此,进行采动围岩内部能量变化特征研究,对揭示岩爆形成条件、孕育发展过程、以及致灾机理意义重大.随着浅部矿产资源的日益枯竭,深部开采必将成为我国未来采矿发展的主要方向.在深部开采中,研究如何有效地防治诸如岩爆等采矿动力地质灾害,不仅对保障深部开采过程的安全具有重要的理论价值,而且对开发利用深部矿产资源具有重要的战略意义.研究地下工程动力失稳,由于卸荷与连续加载遵循不同的应力路径和破坏效应,在高应力巷道围岩中产生的能量积聚、迁移和耗散过程也有不同的特征,因此,沿用加载力学来研究开挖卸荷破坏的力学特性及其稳定性,往往不能得出与实际工程一致的结果.工程实践表明,高应力巷道工程的开挖卸荷特性更接近工程实际.应用 UDEC 程序中的能量计算模块,分析圆形巷道随开挖半径大小、应力水平高低和应力不均匀程度,围岩中显现出的主应力分布规律和能量耗散特征,对揭示岩爆机理及其演化行为有借鉴意义.

## 1 巷道开挖围岩能量平衡方程及能量释放率计算

### 1.1 能量平衡方程

萨拉蒙(M. D. Salamon)认为,巷道开挖后,由于开挖卸荷导致的围岩中能量平衡方程式如下<sup>[15]</sup>:

$$W + U_m = U_c + W_r, \quad (1)$$

式中, $W$ 即由于巷道开挖诱发围岩产生位移外力或体力所做的功(J); $U_m$ 为储存在开挖岩体内部的应变能(J); $U_c$ 为巷道开挖后围岩内重新积聚的应变能(J); $W_r$ 即由于巷道开挖以各种形式释放的能量(J).

### 1.2 能量释放率计算

UDEC 程序自带的能量计算模块,数值解与解析解吻合较好,通过验证计算误差在 3.0% 以内,该误差范围完全能够满足工程计算要求.

为了有效反映伴随任意形状、任意开挖体积,导致的能量释放量的变化,Hodgson 和 Joughin(1967年)等人提出了能量释放率的概念,即开挖单位体积岩体导致的能量释放量,它常被用作评价围岩岩爆的一个定量指标<sup>[12]</sup>.

$$k = dw/dv, \quad (2)$$

式中, $k$ 即为能量释放率(J/m<sup>3</sup>); $dw$ 为开挖岩体导致的能量释放(J); $dv$ 为开挖掉的岩体体积(m<sup>3</sup>).

## 2 深井圆巷开挖围岩能量计算及主应力变化特征分析

### 2.1 深井圆巷开挖围岩能量释放特征分析

#### (1) 计算模型与参数选择

某矿开采延伸水平为 1 000 m 深的圆形岩巷,围岩为完整性较好的砂岩,其容重为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,岩体弹性模量为 90 GPa,泊松比为 0.3,粘聚力为 10 MPa,摩擦角为 43°,张拉强度为 2 MPa.模型计算范围为半径 10 m 的圆形,模型四周固定,处于静水自重场应力状态.建立数值计算模型及其网格划分如图 1 所示.

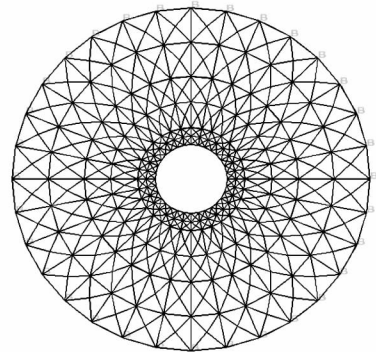


图 1 计算模型及网格划分图

Fig. 1 Computational model and meshes

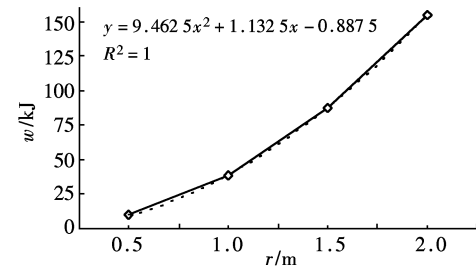
#### (2) 模拟分析方案

首先,在圆形岩巷开挖半径  $r$  分别为 0.5 m、1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 条件下,计算巷道围岩的能量释放值  $w$  和分析能量释放率  $k$  变化;接着,分析随着圆巷围岩应力  $\sigma$  (垂直应力和水平应力同步) 提高,即分别由 25 MPa、50 MPa、75 MPa 增加到

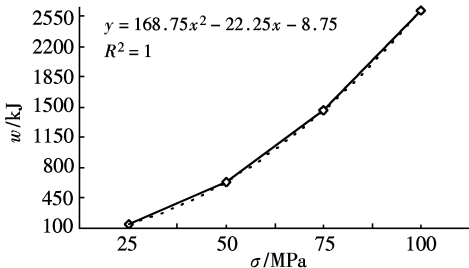
100 MPa,计算围岩能量释放值  $w$  和分析能量释放率  $k$  变化;最后,分析随着圆巷围岩应力不均匀程度的提高,即保持垂直应力为 25 MPa 不变,围岩水平应力  $\sigma_h$  分别由 25 MPa、35 MPa、45 MPa 提高到 55 MPa,计算能量释放值  $w$ ,并分析能量释放率  $k$  变化;然后,对巷道围岩内部产生的最大主应力差值及其分布特征进行分析。

(3) 深井圆巷开挖围岩能量释放特征分析

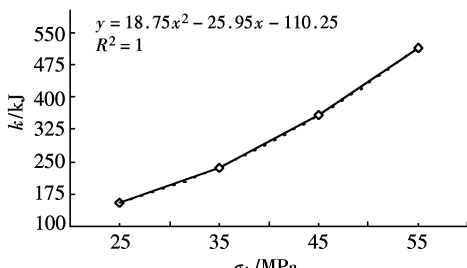
如图 2 所示,深部开采圆巷开挖,随开挖半径  $r$  由小至大、围岩应力  $\sigma$  由低至高和围岩水平应力  $\sigma_h$  增加变化,围岩能量耗散量均成二次多项式凹形曲线急增,且随应力水平提高能量耗散量凹形变化曲线增长显著.表明深部开采,随应力水平的不断提高,巷道开挖能量耗散值将呈非线性不稳定曲线显著增长,发生岩爆的潜在危害性增强。



(a) 开挖半径变化



(b) 围岩压力变化



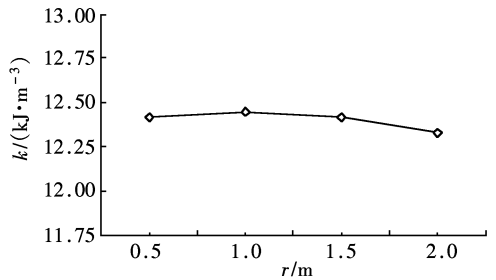
(c) 水平应力增加

图 2 圆巷开挖围岩能量释放量变化曲线图

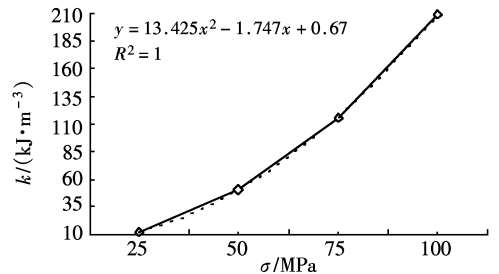
Fig.2 The energy dissipation quantity in the tunnel surroundings

如图 3 所示,深部开采圆巷开挖,随应力水平由低至高和力场不均匀程度的加剧,围岩能量耗散率均成二次多项式凹形曲线增长,但随开挖半径由小至大的能量耗散率却变化很小,基本保持在一个常值附近波动。

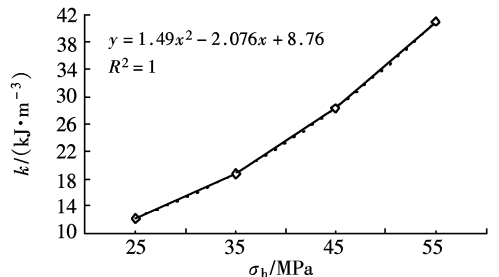
在二次多项式拟合曲线中,二次项系数的大小决定凹形曲线的曲率变化.由围岩能量耗散量和围岩能量耗散率变化曲线可见,相对其它因素而言,应力水平高低是决定凹形不稳定曲线增长的关键因素.这也反映了深部开采地下工程岩爆现象多于浅部开采,主因是应力水平增加的缘故。



(a) 开挖半径变化



(b) 围岩压力变化



(c) 水平应力增加

图 3 圆巷开挖围岩能量释放率变化曲线图

Fig.3 The energy dissipation ratio in the tunnel surroundings

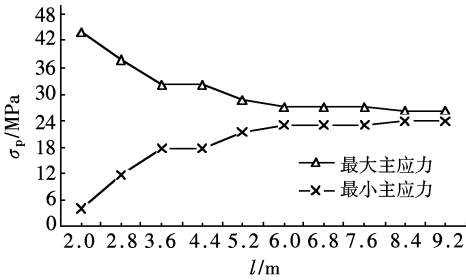
2.2 深井圆巷开挖围岩主应力分布特征分析

(1) 最大主应力和最小主应力分布特征

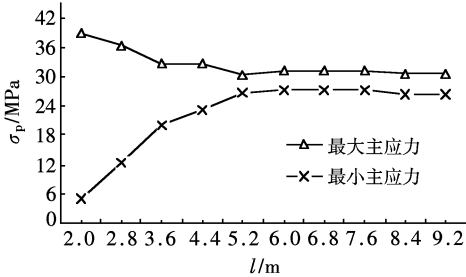
如图 4 所示,保持圆巷围岩的垂直应力为 25 MPa 不变,随着圆巷围岩水平应力逐渐由 25 MPa、35 MPa、45 MPa 到 55 MPa 的提高,围岩产生的主应力值  $\sigma_p$  随着距离圆巷周边长度  $l$  而变化.在围岩浅部(距圆巷周边小于 5 m 左右)产生的最大主应力值逐渐减小,在圆巷围岩深部(距圆巷周边大于 5 m 左右)产生的最大主应力值逐渐增大,而圆巷围岩中产生的最小主应力值则变化不大,由此造成如下结果:  
① 巷道围岩内部产生的最大主应力差值逐渐由围岩浅部向深部跃移;② 巷道围岩内部产生最大主应力差值的位置呈现非连续跃移现象.可见,在巷道围岩内部,出现最大主应力差值位置呈现非连续跃移

的现象,与国内外学者发现的围岩内部拉、压应力域相互交替出现,分区裂化现象相吻合。

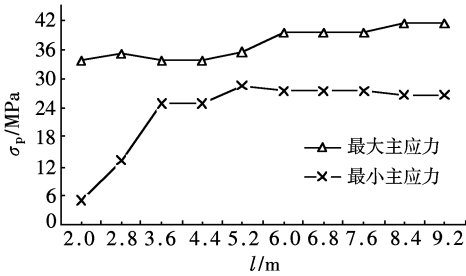
由于巷道围岩内部产生的最大主应力差值大小、位置与岩爆现象密切相关,因此,在巷道围岩内部产生的由浅部向深部跃移的主应力差值的渐增和进一步集中,将是诱发岩爆的潜在直接因素。



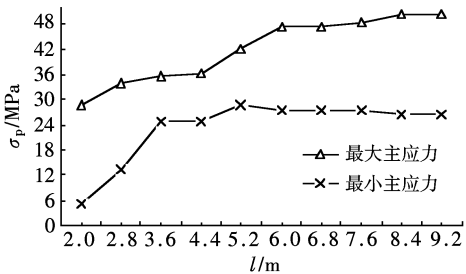
(a) 水平应力 = 垂直应力



(b) 水平应力 = 1.4 x 垂直应力



(c) 水平应力 = 1.8 x 垂直应力



(d) 水平应力 = 2.2 x 垂直应力

图4 随应力场不均匀变化圆巷围岩主应力分布曲线图

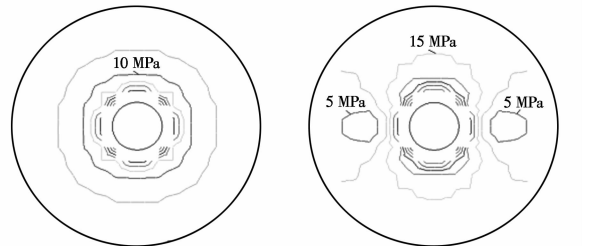
Fig.4 The principal stresses distribution in the tunnel surroundings

(2) 最大主应力与最小主应力差包核分布

如图5所示,保持圆巷围岩的垂直应力为25 MPa不变,随着圆巷围岩水平应力逐渐由25 MPa、35 MPa、45 MPa到55 MPa的提高,圆巷围岩两侧水

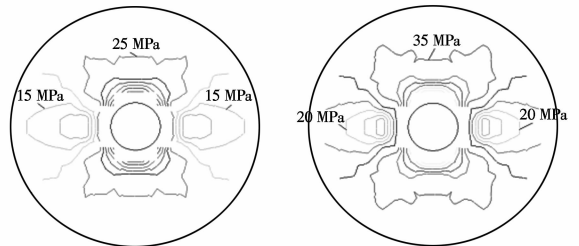
平方向产生了主应力差值封闭包核区,而且该包核区的范围和数值大小均呈现增长趋势.同时,在圆巷围岩顶板也产生主应力差值封闭包核区,且在该部位产生主应力差值包核区的范围和数值大小,相对于圆巷围岩两侧水平方向更为剧烈.由此可见,随着圆巷围岩水平应力的逐渐增大,更应加强对巷道顶板部位产生岩爆的监测 and 关注。

数值模拟结果表明,巷道开掘后发生准静态失稳时,巷道围岩中能量的积聚、迁移和耗散,是随着时间增长逐渐孕育、生长而后突发的过程.现场实践证明<sup>[12]</sup>,岩爆一般滞后于工程开挖几小时到几十小时;此外,巷道开挖后,巷道围岩中产生主应力集中现象和主应力重新分布的过程与围岩条件有关。



(a) 水平应力 = 垂直应力

(b) 水平应力 = 1.4 x 垂直应力



(c) 水平应力 = 1.8 x 垂直应力

(d) 水平应力 = 2.2 x 垂直应力

图5 随应力场不均匀变化圆巷围岩主应力差分布图  
Fig.5 The zones of the principal stresses difference in the tunnel surroundings

3 结论

应用 UDEC 计算程序,分析了圆形巷道随开挖半径大小、应力水平高低和应力不均匀程度变化,巷道围岩中显现出的主应力差值分布规律和能量耗散特征,得出如下主要研究结论:

(1) 深部开采中圆形巷道开挖,随应力水平由低至高和应力场不均匀程度的加剧,能量耗散值和能量耗散率均成凹形曲线急增;随开挖半径由小至大,除能量耗散值有类似特征外,能量耗散率却变化很小。

(2) 圆形巷道开挖后,随着应力场不均匀程度的加剧,在巷道围岩浅部和深部形成非连续跃迁的主应力差值封闭包核区范围和量值逐渐增大;主应

力差值集中程度的提高,为岩爆能量的孕积提供了条件。

(3) 当巷道围岩中水平应力大于垂直应力时,在巷道顶板产生主应力差值封闭包核区的范围和量值大小,相对于巷道围岩两侧水平方向更为严重,因此,此时更应加强对巷道顶板部位岩爆的监测和关注。

#### 参考文献:

- [1] SHABAROV A N. On formation of geodynamic zones prone to rock bursts and tectonic shocks[J]. *Journal of Mining Science*, 2001, 37(2):129-139.
- [2] SINGH S P. Burst energy release index[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1988, 21(2):149-155.
- [3] 王耀辉,陈莉雯,沈峰. 岩爆破坏过程能量释放的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2008, 29(3):790-794.  
WANG Yaohui, CHEN Liwen, SHEN Feng. Numerical modeling of energy release in rockburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3):790-794.
- [4] 赵忠虎,谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. *四川大学学报:工程科学版*, 2008, 40(2):26-31.  
ZHAO Zhonghu, XIE Heping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2008, 40(2):26-31.
- [5] 徐松林,吴文,张华. 大理岩三轴压缩动态卸围压与岩爆模拟分析[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2002, 21(5):612-615.  
XU Songlin, WU Wen, ZHANG Hua. Experimental study on dynamic unloading of the confining pressures for a marble under triaxial compression and simulation analyses of rock burst[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2002, 21(5):612-615.
- [6] 张艳博,徐东强. 岩爆在不同岩石中的模拟实验[J]. *河北理工学院学报*, 2002, 24(4):8-11.  
ZHANG Yanbo, XU Dongqiang. The analysis of the experiment of rock burst on different rocks[J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2002, 24(4):8-11.
- [7] 潘一山,章梦涛,王来贵,等. 地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(4):49-56.  
PAN Yishan, ZHANG Mengtao, WANG Laigui, et al. Study on rockburst by equivalent material simulation tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(4):49-56.
- [8] 潘岳,张勇,于广明. 圆形硐室岩爆机制及其突变理论分析[J]. *应用数学和力学*, 2006, 27(6):115-123.  
PAN Yue, ZHANG Yong, YU Guangming. Mechanism and catastrophe theory analysis of circular tunnel rock burst[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2006, 27(6):115-123.
- [9] 徐成光. 岩爆预测及防治方法综述[J]. *现代隧道技术*, 2005, 42(6):80-85.  
XU Chengguang. Present situation of rockburst forecasting and its countermeasures [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2005, 42(6):80-85.
- [10] 杨承祥,罗周全. 有岩爆倾向深井矿山采矿巷道的失稳模式分析及其控制技术[J]. *矿冶工程*, 2007, 27(2):1-4.  
YANG Chengxiang, LUO Zhouquan. Analyses and control of unstable mode of laneway with rock-burst possibility in deep mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2007, 27(2):1-4.
- [11] 申骞,张小明,申玉良. 岩爆的研究现状及展望[J]. *山西建筑*, 2006, 32(22):117-118.  
SHEN Qian, ZHANG Xiaoming, SHEN Yuliang. Research present and prospect of rock outburst[J]. *Shanxi Architecture*, 2006, 32(22):117-118.
- [12] 徐林生,王兰生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施研究[J]. *中国公路学报*, 2003, 16(1):74-76.  
XU Linsheng, WANG Lansheng. Research on rockburst character and prevention measure of Erlang mountain highway tunnel[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2003, 16(1):74-76.
- [13] 杜子建,许梦国,刘振平. 岩爆动力源分析及岩爆防治原则探讨[J]. *矿业研究与开发*, 2007, 27(3):8-9.  
DU Zijian, XU Mengguo, LIU Zhenping. Analysis on energy source of rock burst and its prevention principle[J]. *Mining Research and Development*, 2007, 27(3):8-9.
- [14] JAEGER J C, COOK G W. *Fundamentals of rock mechanics* [M]. London: Chapman and Hall Press, 1979: 466-470.
- [15] 高明仕,张农,窦林名,等. 基于能量平衡理论的冲击矿压巷道支护参数研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(4):426-430.  
GAO Mingshi, ZHANG Nong, DOU Linming, et al. Study of roadway support parameters subjected to rock burst based on energy balance theory[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 36(4):426-430.

(编辑:陈燕)