

# 太平驿隧洞岩爆特征及防治措施

周德培

(西南交通大学岩土工程研究所 成都 610031)

洪开荣

(隧道工程局科研所 洛阳 471009)

**提要** 本文根据太平驿隧洞在施工期间记录到的大小400多次岩爆的资料,总结了该隧洞的岩爆特征。测定了花岗岩的变形和强度指标,并做了声发射试验。花岗岩的全应力—应变曲线具有第Ⅰ类的性质,建议用释放的弹性能 and 消耗的非弹性能之比作为这种岩石的岩爆判据。另外,还提出了防治岩爆的一些工程措施。

**关键词** 岩爆, 弹性能, 防治措施

## 1 前言

岩爆是在高地应力岩体中开挖地下洞室时,围岩发生脆性破坏而突然释放弹性能所造成的一种动力失稳现象,是一种工程地质灾害,直接威胁施工人员和设备的安全,因此对岩爆的研究具有重要实际意义。一些研究资料表明围岩应力和岩性条件是形成岩爆的重要原因,还提出了一些岩爆失稳模式和判别准则<sup>[1~5]</sup>。这些研究成果对于认识岩爆成因、机制等方面是很重要的。但为了工程的需要,还应结合现有研究成果和施工现场的经验,总结出岩爆特征和防治岩爆的有效措施。太平驿电站引水隧洞在施工期间,坚持观察和记录岩爆现象,先后积累了大小400多次岩爆的资料,本文根据这些资料总结出了该隧洞岩爆特征。结合花岗岩的室内试验成果和施工现场的经验,给出了防治岩爆的一些工程措施。这对于进一步研究岩爆和岩爆地区地下洞室的施工都有一定参考价值。

## 2 太平驿隧洞的岩爆现象及特征

太平驿引水式电站位于四川省汶川县境内,引水隧洞沿岷江左岸布置,全长10.5km,成型洞径9m。隧洞沿线山体雄厚,地势陡峻,河谷深切。洞室埋深200—600m。施工区地处龙门山断折带中段,茂汶断裂与映秀断裂围限的断块上。断块主体由晋宁—澄江期岩浆岩组成。地震基本烈度为Ⅶ度。在隧道工程局中标的二工区施工段内,隧洞围岩主要为花岗岩和花岗闪长岩,岩体完整新鲜,岩质坚硬。实测资料表明该地区属高地应力区。最大主应力31.3MPa,其方向基本上垂直于河流流向,倾角7°;中间主应力17.8MPa,约平行于河流流向,倾角64°;最小主应力10.4MPa。

1994年4月18日收到初稿,1994年10月28日收到修改稿。

在二工区的施工期间，第一次发生岩爆是在 2 号支洞距洞口 326.2m 处，时间为 1991 年 9 月 17 日，岩爆部位为掌子面，但其规模相对较小，此处垂直埋深为 260m。自 1991 年 12 月 26 日进入正洞施工以来，岩爆发生的频率显著提高，岩爆规模也明显增大，其危害性也大。在施工过程中，对每次岩爆现象都进行了详细观察与记录。根据记录到的大小 400 多例岩爆的资料，总结出发生在该隧洞的岩爆具有如下特征：

(1) 岩爆仅发生在干燥无水的花岗岩岩带中，而在洞线的闪长岩、石英富集的岩带中均不发生岩爆。发生岩爆的部位基本在图 1 所示的 A、B 两个部位。而 A 位发生岩爆的频率高于 B 位，其规模也比 B 位大。B 位的破坏全为劈裂破坏，而 A 位既有小规模的劈裂破坏，又有大规模的剪切破坏。且在岩性变化的交界处的花岗岩中，岩爆发生得更为频繁。

(2) 当围岩内部发生爆裂声清脆，声响极大时，岩爆主要表现为劈裂破坏。其规模不大，多呈片状或贝壳状从母岩中以劈裂的形式剥落下来，且岩块剥落的时间几乎与爆裂声同步。当围岩内部发生的爆裂声沉闷，声响较小时，岩爆主要表现为剪切破坏，其规模也大，并伴随有烟状粉末弹射。此时由岩爆产生破坏的岩块体一般都滞后于爆裂声 20 分钟到一小时才会从母岩上掉落。两种破坏形式的典型断面如图 1 所示。

(3) 岩爆发生的频率随岩体开挖暴露后的时间增长而降低，如图 2 所示。大部分岩爆发生在开挖后 16 天内，占记录到的岩爆的 90%，其中尤以 1 天内最高，占 22%，8 天内占 62%。同时也发现围岩即使暴露一个月甚至数月后，仍会发生岩爆，但为数不多。此外在图 2 中还绘出了一天内发生岩爆在 24 小时上的分布规律。从图中可以看出其高峰期在放炮后的 4 小时之内。

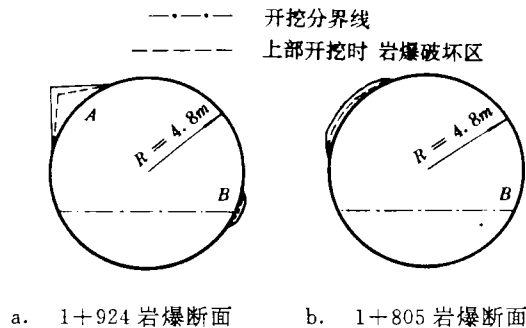


图 1 两种岩爆破坏形式的典型断面

Fig. 1 The typical failure locations caused by rockburst

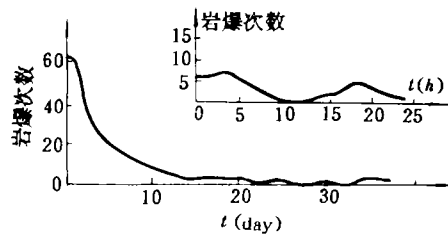


图 2 岩爆与开挖后的时间关系

Fig. 2 The relationship of rockburst and time after cutted

(4) 图 3 画出了岩爆发生次数与距掌子面的距离的关系曲线。由此图可知，就距离而言，有两个高峰期。第一个岩爆高峰期在距掌子面 2m 以内，然后逐渐减小；第二个高峰期在距离掌子面 1.2—1.4 倍洞径的范围内，随后也逐渐减小。但也有在距掌子面数百 m 处发生岩爆的情况。

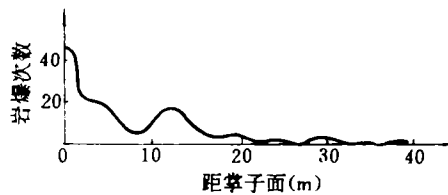


图 3 岩爆与距离关系

Fig. 3 The relationship of rockburst and the distance

(5) 太平驿电站引水隧洞由岩爆所产生的破坏规模大小不一。一次岩爆破坏的面积为 0.5m<sup>2</sup> 到几百平方米不等，其破坏厚度也从数厘米到 2—4m 不等。爆落的岩块体从零点几立方米到数百立方米都有。一般而言，破坏厚度较小的岩爆大多数发生在完整的脆性花岗岩中，而破坏厚度较大的岩爆发生在有少量节理的脆性花岗岩中。图 4 为其分布状况，部分破坏厚度较大的因篇幅所限未绘在图上。

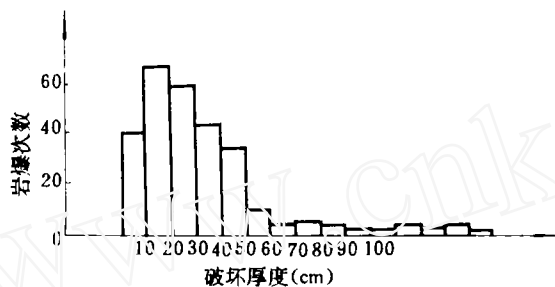


图 4 岩爆破坏厚度分布

Fig. 4 The distribution of fracture thickness caused by rockburst

(6) 众所周知，埋深大的地方因地应力可能较大，容易发生岩爆。但在发生岩爆的区域内，岩爆发生次数和其剧烈程度是否也随埋深增大而增大？从该隧洞记录到的岩爆资料看，并不一定如此。如图 5 所示，岩爆区间的洞室覆盖层深度为 260—600m 左右，但岩爆发生次数及其剧烈程度与覆盖层深度不存在对应关系，似乎无规律可循。这说明岩爆发生次数和其剧烈程度不单纯受埋深影响，可能还与其它诸因素的综合影响有关。

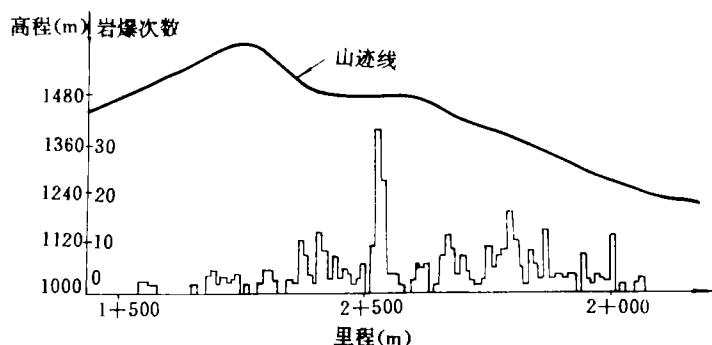


图 5 岩爆沿里程分布图

Fig. 5 The rockburst counts vs. the mileage

### 3 花岗岩室内试验成果

如前所述，该隧洞的岩爆仅发生在干燥无水的花岗岩岩带中，岩性是产生岩爆的一个重要因素。为了解其岩性，用岩样在 MTS 岩石刚性试验机上做了单轴和三轴抗压试验以及声发射试验，下面分析试验成果。表 1 给出了花岗岩的单轴和三轴抗压强度。图 6 是由试验得出的莫尔圆及其包络线。花岗岩的单轴抗压强度  $\sigma_c \approx 168\text{MPa}$ ，弹性模量  $E_{50} \approx 31\text{GPa}$ ， $\mu_{50} \approx 0.15$ 。粘聚力  $C \approx 35.5\text{MPa}$ ，内摩擦角  $\varphi \approx 42.8^\circ$ 。岩石在破坏后呈碎块状，具有明显的脆性破坏特征，即使在 50MPa 围压作用下，仍具有脆性破坏特征。

表 1 花岗岩的三轴抗压强度  
Table 1 Triaxial compression strength of granite

围压(MPa)	0	5	10	20	30	40	50
强度(MPa)	168	197	272	291	345	378	442

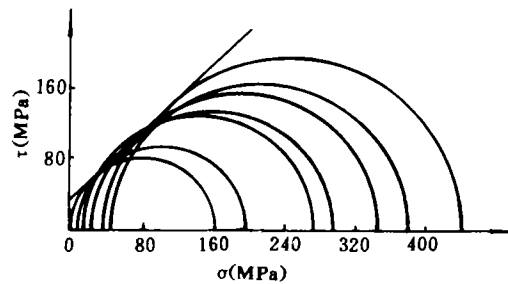


图 6 花岗岩的莫尔包络线  
Fig. 6 Mohr envelope curve of granite

图 7 是测得的应力—应变曲线，这些曲线都具有第 I 类曲线的特征。根据文献[6]的观点，岩石表现出第 I 类曲线特征的原因可解释为：在破坏后区，因岩石承载能力降低，弹性应变将趋于减少。如果非弹性应变增加比弹性应变减小慢，那么岩石将表现出第 I 类曲线的特征。按照这个观点，花岗岩在破坏后区，非弹性变形增加很慢，不能及时通过非弹性变形来消耗能量，使弹性能不得不很快释放出来，这就形成岩爆。另外，具有第 I 类特征曲线的岩石，在破坏后区，由于岩石内部裂纹的产生与扩展处于不稳定状态，因此其破坏也是非稳定的。不稳定的原因就是岩石内部在向外释放弹性能，造成岩石的破坏过程是自身产生的。不像具有第 I 类特征曲线的岩石那样，在破坏后区，要使破坏过程继续下去，需要不断消耗外加的能量。因此单轴压缩下表现为第 I 类特征曲线的岩石，具备了产生岩爆的岩性条件。在三轴压缩下，随着围压的升高，岩石的特征曲线将由第 I 类转化为第 II 类，产生岩爆的可能性会减小。因此为了判断在多大围压下不会产生岩爆，建议用破坏后区释放的弹性能和消耗的非弹性能之比来判断。

释放的弹性能的大小可由图 8 中的曲边形 ABCA 的面积来计算, 用  $W_e$  表示。曲边形 OABCEO 可用来计算破坏过程中非弹性变形所消耗的能量, 用  $W_p$  表示。如果  $W_e/W_p = 1$ , 表示破坏后区释放和消耗的能量相等。考虑到裂纹的产生与扩展并导致破坏的过程中, 还会因摩擦等原因消耗能量, 故将此比值取为 1.5 作为发生岩爆的临界值。因此如果下式

$$W_e/W_p > 1.5 \quad (1)$$

满足, 则会产生岩爆。花岗岩的  $W_e/W_p$  的值如表 2 所示。可以看出在单轴应力状态下, 产生岩爆是无疑的。当围压为 5MPa 时, 处于产生岩爆的临界值。当围压大于 5MPa 时, 已不会产生岩爆了。由图 7 还可以看出, 随着围压的增加, 弹性能的释放逐渐减少。由此可推知, 当围压超过 50MPa 而达到某个值以后, 花岗岩的应力—应变曲线将从 II 类曲线转化为 I 类曲线。因此从弹性能释放的角度看, 太平驿花岗岩具有产生岩爆的条件, 在单轴压缩下容易发生岩爆。但在三轴压缩下, 围压超过 5MPa 时不会发生岩爆。

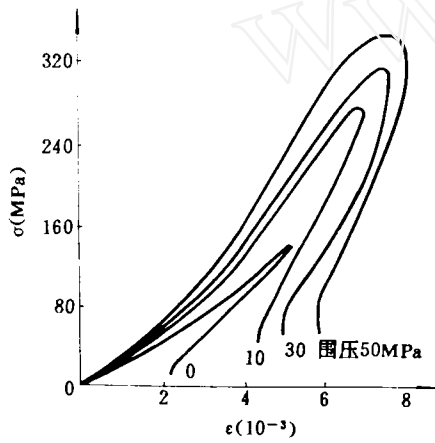


图 7 不同围压下花岗岩的应力—应变曲线

Fig. 7 The stress-strain curves of granite under different confining pressures

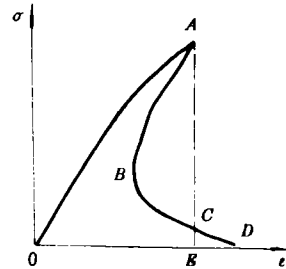


图 8 由实验曲线计算  $W_e$  和  $W_p$  的图示

Fig. 8 The illustration of evaluation of  $W_e$  and  $W_p$  from the test curve

表 2 花岗岩在不同围压下的  $W_e/W_p$  的值

Table 2 The values of  $W_e/W_p$  of granite under different confining pressures

围压 (MPa)	0	5	10	20	30	40	50
$W_e/W_p$	3.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.95	0.8

图 9 是花岗岩的声发射试验结果。图中曲线 a、b 和 c 分别是轴向应力、相对声能和相对声能率随时间的变化曲线。由此可知, 这种花岗岩具有如下的声发射特征。当应力  $\sigma$  达到约 20MPa 时, 岩石中开始出现声发射现象。以后随着应力的增加, 声发射活动加剧。岩石破坏后, 声发射活动虽有减弱, 但仍较为频繁。这和前面花岗岩单轴压缩时在破坏后期大量释放弹性能的试验结果是一致的。

### 4 防治岩爆的工程措施

在岩爆区开挖隧洞，必须采取有效的防治措施，确保人员和设备安全。下面根据太平驿隧洞的岩爆现象、岩性特征以及施工经验，总结出如下一些防治岩爆的工程措施。

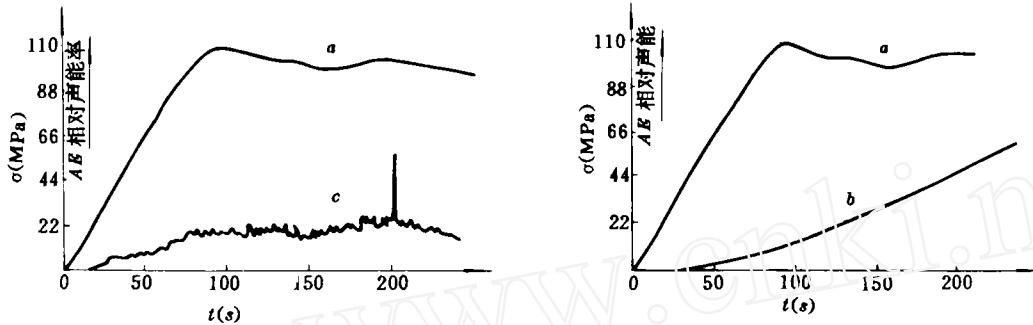


图 9 声发射测试记录  
Fig. 9 AE test results

(1) 分部开挖，在施工中还应尽量减少爆破振动触发岩爆的可能性。根据弹性理论的计算，因开挖产生的高应力在围岩中的影响是有限的。如图 10 所示，围岩中的应力集中最严重的区域为  $r/r_0 \approx 1.5$ 。太平驿隧洞的  $r_0 = 4.8\text{m}$ ，若一次开挖，则影响区  $r = 7.2\text{m}$ 。若先开挖半径  $r_0 = 1\text{m}$  洞室，则  $r = 1.5\text{m}$ 。影响区减小，围岩中释放弹性能的区域也相应减小，有利于抑制岩爆或降低其程度。根据工程实际的具体情况，太平驿隧洞采用二次分部开挖的方法，并采用光面控制爆破，减少同段位一次起爆药卷的最大装药量来降低爆破振动诱发表面岩爆的可能性。由图 1 可以看出，上部开挖的面积较大，在 A、B 两处岩爆破坏坑的范围也大。下部开挖面积很小，在 A、B 两处岩爆破坏范围也显著减小。因此采用分部开挖能够降低岩爆的破坏程度。

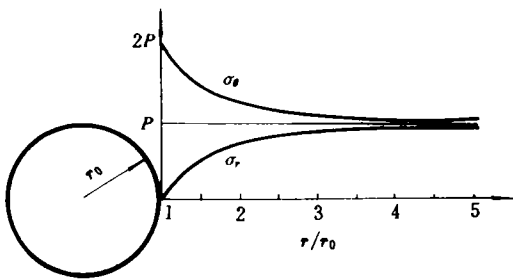


图 10 在均匀地压 P 作用下洞室应力分布  
Fig. 10 The stress distribution around a circular tunnel under hydraulic pressure

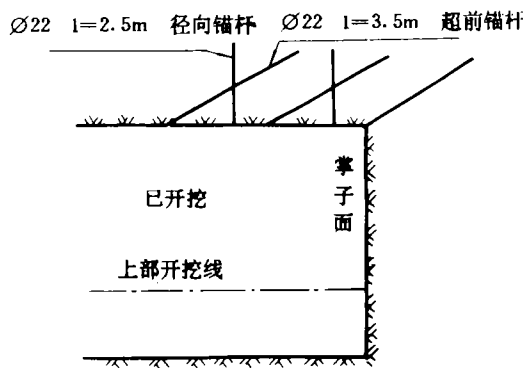
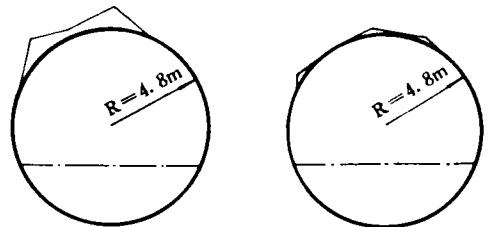


图 11 岩爆区段支护示意图  
Fig. 11 The tunnel support at the rockburst zone

(2) 如图 11 所示, 在可能发生岩爆的部位打斜向超前锚杆, 开挖后视具体情况, 局部补打径向锚杆。锚杆采用  $\varnothing 22$  的螺纹钢, 长度为 2.5—3.5m 不等, 间距为 0.9—1.5m。这样做的目的是加固围岩, 防止岩块动力失稳而引起岩爆。

(3) 太平驿隧洞岩爆表现为劈裂破坏和剪切破坏。劈裂破坏发生在洞壁, 因动力失稳引起弹性能释放, 使小块状岩石弹射出去, 声音清脆, 响声大; 剪切破坏一般发生在围岩内一定深处, 声音沉闷, 若向洞壁扩展, 将造成大块状岩石塌落。从剪切破坏引起的岩爆规模分析, 在围岩内发生岩爆的深度最大不超过 4m, 一般在 1m 左右, 因此采用短而密的锚杆来加固围岩。实际施工中在岩爆区采用了钢筋网、锚杆和喷混凝土的支护方法。这样做不仅可防止劈裂破坏引起岩爆的可能性, 还可向围岩提供一定的支护反力, 并使围岩处于三轴压缩的应力状态, 以有利于提高岩石的强度, 减少剪切破坏产生岩爆的可能性。由表 2 看出, 提供的支护反力只要大于 5MPa, 就有可能抑制由劈裂和剪切破坏引起的岩爆。施工情况表明, 锚杆支护体系对防治岩爆是有效的, 图 12 是其效果对比情况。图中 a 是未采用锚杆的区间岩爆破坏断面, b 为开挖后及时采用锚杆的区间岩爆破坏断面。这两段的地质条件很相似, 开挖方法也一样。另外, 在开挖下半断面前, a 处也采用了锚杆和网喷混凝土, 下半断面开挖时尽管发生多次爆裂声, 但没有发生任何破坏性岩爆。



a 2+030—2+035      b 1+955—1+960

图 12 锚杆防治岩爆效果的对比

Fig. 12 The comparison of the effects between support and un-support with rock bolts

(4) 作好岩爆记录, 掌握岩爆规律, 为施工服务。在不断积累和整理分析岩爆记录资料时, 发现产生岩爆的一个低谷时段在放炮后 10 小时左右, 因此支护的施工作业, 基本上安排在这个时间进行。

(5) 利用现场监测作好岩爆预报。因为发生岩爆的地段有较为相似的地质条件和岩性条件, 为短距离预报岩爆提供了依据。该隧洞岩爆预报成功的实例是在 1991 年 12 月 12 日 7 时许, 2 号隧洞下游 2+282 处。当时台车已就位准备钻眼作业, 由于监听到围岩内部有闷雷样的爆裂声, 当即迅速撤离人员和设备。7 时 45 分在 2+264—2+277 段发生了大规模岩爆。岩爆区段长 13m, 宽 3—6m, 破坏厚度 0.5—1.5m。没有造成人员伤亡和设备严重破坏的事故。

(6) 由于岩爆绝大部分发生在洞室近河侧拱腰和拱顶部位, 因此尽可能将施工用的风、水、电管线布置在山侧。特别是经常需要人员维护的照明和施工用电的线路更应布置在山侧, 使其相对安全。

## 5 结束语

综上所述, 太平驿电站引水隧洞岩爆现象具有鲜明的特征。发生岩爆的部位很明确, 即绝大多数发生在洞室近河侧拱腰和拱顶部位, 而且仅在干燥的花岗岩岩带内发生。另

外, 洞室开挖后, 岩爆发生的次数与围岩暴露时间、距掌子面的距离等, 基本上都有规律可循。这说明岩爆虽然是一种较为可怕的地质灾害, 但只要勤于观察、记录和研究, 是能够掌握其特征和规律, 从而找到防治岩爆的有效工程措施。本文总结出的防治岩爆的工程措施, 经该隧洞施工的经验证明是行之有效的。另外, 本文还根据花岗岩在单轴和三轴压缩下表现出第 I 类的应力—应变曲线的特征, 建议用岩石破裂后释放的弹性能和消耗的非弹性能之比作为岩爆判据, 这既可反映岩石在破裂过程中或动力失稳时的能量释放, 又能反映围压对岩爆的影响。

## 6 参考文献

- 1 潘一山, 徐曾和, 章梦涛: 地下洞室岩爆发生的失稳模式及判别准则. 第二届全国岩石动力学学术会议论文集, 宜昌, 1990
- 2 宋一乐, 侯发亮: 天生桥隧洞岩爆与掌子面附近的应力关系. 第二届全国岩石动力学学术会议论文集, 宜昌, 1990
- 3 贾愚如, 范正琦: 水工洞室中岩爆机制与判据. 岩石力学在工程中的应用. 第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集, 知识出版社, 1989
- 4 章梦涛: 冲击地压的失稳理论与数值模拟的研究. 岩石力学与工程学报, 1987; 6(3)
- 5 彭守拙, 谷兆祺: 花岗岩声发射特性和破坏机制的实验研究. 岩石力学与工程学报, 1991; 10(3)
- 6 He C., Okubo S. and Nishimatsu Y.: A study on the class I behaviour of rock. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1990; 23(4): 261—273

## THE ROCKBURST FEATURES OF TAIPINGYI TUNNEL AND THE PREVENTION METHODS

Zhou Depei

(Research Institute of Geotech. Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Hong Kairong

(Scientific Research Institute, Tunnel Engineering Bureau, Luoyang 471009)

### Abstract

The rockburst features of Taipingyi tunnel are summarized with the rockburst data of more than 400 incidents recorded during tunnelling. The deformation and strength of granite are tested, together with the AE characteristics. The complete stress-strain curves of granite have the class I behaviour. It is suggested that the ratio of released elastic energy to dissipated non-elastic energy is used as the rockburst criterion. Some measures of rockburst prevention are also given in the paper.

**Key words** rockburst, elastic energy, rockburst prevention methods