

圆形洞室岩爆成因分析及其地质灾害研究

缪晓军¹, 吴继敏², 李景波²

(1. 广州市水利局, 广东 广州 510640; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 在详细分析岩爆形成机制和传统经验判据的基础上, 对岩爆产生条件及其产生部位作了预测, 并提出了岩爆预防对策。设计阶段应对洞轴线进行选择、对洞室断面进行优化。施工阶段应进行超前应力解除、围岩软化, 以及采用合理的开挖方式。合理选择围岩加固措施。

关键词 岩爆 机制 判据 预测 对策

中图分类号: P633

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2002)05-0037-04

岩爆是埋藏深度大且地应力比较高的地下工程开挖过程中常遇到的工程地质问题, 是一种由人类活动而诱发的地质灾害。在地下工程中, 岩爆的各种不良影响受到普遍重视。岩爆是由岩体内积聚的弹性应变能突然释放而引起的, 具有爆裂或弹射现象。岩爆会使围岩呈片状脱落, 影响围岩的稳定性, 破坏施工设备, 造成人身伤亡。无论岩爆为剪切破坏还是脆性破坏, 其性质都是脆性岩石的破坏。岩爆与很多因素有关, 如原地应力状态、地层岩性、开挖断面形状、开挖方式、地形等。本文在分析岩爆成因的基础上, 对岩爆可能发生部位进行了预测, 并提出了相应的预防措施。

1 岩爆发生机制

岩体中储存的能量, 通常是以弹性应变能的形式储聚于围岩内的高应力集中区内。弹性变形愈大, 储备的能量就愈多, 因此, 岩体内某些地区形成高储能体。高储能体具备 2 个条件^[1]: (a) 岩体能储聚较大的弹性应变能; (b) 岩体内应力高度集中。从储聚弹性应变能的能力分析可知: 弹性岩体, 在受力(在加荷与卸荷过程中)变形时, 常能储聚较多的弹性应变能, 大部分高强度块状脆性岩体属此类。弹-塑性岩体, 在受力变形时, 也能储聚一定的弹性应变能, 一些层状沉积岩属此类。塑性岩体, 在受力变形时, 由于变形为塑性变形, 无储聚弹性应变能的能力。对于已集聚高弹性应变能的坚硬、完整岩体, 由于开挖等人工作用, 使岩体处于径向应力为零的双轴应力状态和径向应力为最小的真三轴应力状态, 同时, 也使岩爆具有发生的空间。即岩爆的应力条件和空间条件同时具备时, 岩体发生岩爆。岩爆的发生往往滞后于洞室开挖几小时甚至几十小时, 这是因为应力的集中和重分布有一个取决于洞室周围岩体的过程。

2 岩爆预测

2.1 岩爆发生部位的预测

岩爆发生部位的预测方法有多种, 采用何种方法, 需结合实际工程具体分析后确定。如果地质条件了解得比较详细, 又有较多的实测地应力资料, 则可根据地下工程围岩的岩性和强度、洞室开挖后可能出现的应力情况以及围岩的完整程度等作出预测判断。当垂向地应力很大、水平地应力很小时, 在边拱上发生岩爆, 当水平地应力很大、垂向地应力很小时, 在顶板上发生岩爆。如果没有实测地应力资料, 可从以下几方面作出预测。

a. 地形条件 垂向地应力与地形有关, 一般埋深越大, 地应力也越大, 在平缓的山头下, 垂向地应力接近上覆岩石的重量, 斜坡地形则不然, 应考虑垂直地应力大于上覆岩石的重量, 在山坡坡脚处还要注意沟谷地形引起的应力集中问题。

b. 构造情况 地震区和构造活动区的地应力一般要大些。水平地应力增大时, 垂直地应力可能相应增

大. 洞室轴线垂直于最大构造主应力布置时, 比平行主应力方向布置时开挖周边应力大.

c. 洞室开挖情况: 平行洞室间的岩柱(厚度较小的)、隧洞从两头开挖接近贯通时的部位、建筑物形体变化处(如洞线转弯处)等, 都是应力集中较大的地点, 易于发生岩爆.

d. 在隧洞中, 垂直地应力很大、水平地应力很小时, 常会发生岩爆. 在地应力非常不等向的区域, 平行最大主应力或中间主应力方向的洞壁常发生岩爆. 而在水平地应力很大、垂直地应力很小时, 在顶拱和底板部位易发生岩爆. 在隧洞掘进中, 端面应力较高, 整个端面上易发生岩爆. 隧洞与陡坡平行, 则靠近陡坡一侧的边顶拱易发生岩爆. 脆硬岩石比软弱岩石易产生岩爆, 因为后者在低应力时即可屈服, 不易发生岩爆或岩爆不强烈. 另外, 在隧洞分岔处的尖角部位, 应力较大, 易发生岩爆.

工程实例 福建某水电站, 地下主厂房交通洞 335 m 左右的洞顶部位发生岩爆. 交通洞围岩 10 m 深度左右, 最大主应力 σ_1 为 17.68 MPa, 中间主应力 σ_2 为 9.53 MPa, 最小主应力 σ_3 为 7.45 MPa. σ_1, σ_3 近于水平方向, 中间主应力 σ_2 倾角较陡, 近似为垂直主应力. 显然, 该地区不是高应力地区, 但该地段地形复杂, 也可作为边坡陡峭, 而且洞轴线方向(N72°E)与最大水平主应力方向(NW 向)大角度相交.

2.2 岩爆发生的主要理论依据

a. 强度理论观点 岩爆是重分布应力达到岩石强度时而产生的破坏. 用格里菲斯理论解释, 岩爆为拉伸破坏; 用摩尔-库仑准则解释, 岩爆为剪应力作用产生的剪切破坏. 陈宗基教授提出的扩容理论也可作为解释岩爆发生机制的一种理论.

b. 能量理论观点 岩石在破坏前积聚的变形能 W_E 与破坏后消耗的塑性变形能 W_P 之比 $R (R = W_E / W_P)$, 是衡量岩石是否在破坏时产生冲击以及冲击程度的重要指标.

2.3 岩爆发生的主要经验判据

a. 岩爆变量公式预测 岩爆变量公式预测岩爆的方法新颖^[2], 实践证明它是一种预测岩爆的有效手段. 岩爆变量公式为

$$K_W = \frac{\sigma_{\max}^2}{E} (P \cos \alpha) \quad (1)$$

式中: K_W ——岩爆变量系数; $\sigma_{\max}$ ——应力场最大主应力; P ——侧应力系数(水平应力/垂直应力); E ——弹性模量; α ——主应力水平夹角.

岩爆预测判断依据: (a) $K_W < 0.1$ 时, 围岩稳定, 预测无岩爆发生; (b) $K_W = 0.1 \sim 0.3$ 时, 围岩基本稳定, 预测可能发生弱岩爆; (c) $K_W > 0.3 \sim 0.6$ 时, 围岩稳定性差, 预测可能发生中等岩爆.

b. 伊·阿·多尔恰尼诺夫判据: (a) $\sigma_g \leq 0.3\sigma_c$ 时, 无岩射、剥落; (b) $\sigma_g = (0.5 \sim 0.8)\sigma_c$ 时, 岩射、剥落; (c) $\sigma_g > 0.8\sigma_c$ 时, 岩爆、强烈岩射. 其中 σ_g 为围岩最大压应力, σ_c 为岩块单轴抗压强度.

c. 霍克判据: (a) $P_c/\sigma_c = 0.1$ 时, 稳定巷道; (b) 当 $P_c/\sigma_c = 0.2$ 时, 少量片帮; (c) 当 $P_c/\sigma_c = 0.3$ 时, 严重片帮; (d) 当 $P_c/\sigma_c = 0.4$ 时, 需加强支护; (e) 当 $P_c/\sigma_c = 0.5$ 时, 可能出现岩爆. 其中 P_c 为原岩垂直应力.

d. 巴顿判据: 巴顿按 σ_c (单轴抗压强度) 或 σ_t (抗拉强度) 分别与 σ_1 (最大初始应力) 的比值来预测岩爆, 且规定: (a) $\sigma_c/\sigma_1 = 5 \sim 2.5$ 或 $\sigma_t/\sigma_1 = 0.33 \sim 0.16$ 时, 有中等岩爆发生; (b) $\sigma_c/\sigma_1 < 2.5$ 或 $\sigma_t/\sigma_1 < 0.16$ 时, 有严重岩爆发生.

e. 国内使用的经验判据: $\sigma_1 \geq (0.15 \sim 0.2) R_t$ 时, 发生岩爆. 其中 σ_1 为岩体初始应力, R_t 为岩块单轴抗压强度.

f. 切向应力准则 将围岩中的切向应力(σ_θ)和岩石抗压强度(σ_c)之比定义为 $T (T = \sigma_\theta/\sigma_c)$, 根据 T 值来判据: (a) $T < 0.3$, 无岩爆; (b) $T = 0.3 \sim 0.5$, 弱岩爆; (c) $T = 0.5 \sim 0.7$, 中等岩爆; (d) $T > 0.7$, 强烈岩爆.

g. 考虑损伤的圆形洞室解析解判据^[3]:

$$P^* = \sigma_c \left\{ -\frac{1}{q-1} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + 0.5 \frac{q+1}{q-1} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \left(1 + \frac{E}{\lambda} \right)^{\frac{q-1}{2}} - 0.5 \frac{\lambda}{E} \left(1 + \frac{E}{\lambda} \right)^{\frac{q+1}{2}} \right\} \quad (2)$$

$$q = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

式中: P^* ——岩爆发生时的临界荷载; λ ——降模量; E ——弹性模量; σ_c ——单轴抗压强度.

h. 复合判据:

$$\sigma_\theta \geq K_J \sigma_\theta \quad W_{ET} \geq 5 \quad (3)$$

式中： σ_{θ} ——围岩切向应力； K_f ——根据围岩切向应力与洞轴线方向应力之比而确定的系数； W_{ET} ——单轴应力下测得的岩石弹性能量指数，它是在实验室对试件加载到 $(0.7 \sim 0.8) \sigma_c$ 时，再卸荷到 $0.05 \sigma_c$ 时，卸荷释放的弹性应变与耗散的弹性应变能之比。

3 岩爆防治对策

岩爆防治方法很多，可根据工程进展和不同部位，采取不同的方法。现从设计阶段、施工阶段和支护方式几个方面分别进行讨论。

3.1 设计阶段的预防对策

a. 洞轴线的选择^[4]。圆形洞室断面受力条件是否合理主要取决于 2 点：一是围岩不产生拉应力；二是洞室周边压应力均匀分布，并使切向压应力最小，不产生过大的应力集中。通过理论分析，可得出洞室轴线方向选择关系式为

$$\alpha = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_v B/H}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \tag{4}$$

式中： α ——洞室轴线与最大主应力的夹角； σ_1 ——最大水平主应力； σ_3 ——最小水平主应力； σ_v ——垂直主应力。

当 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_v B/H}{\sigma_1 - \sigma_3} < 0$ 时，则 $\alpha = 90^\circ$ ；当 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2\sigma_v B/H}{\sigma_1 - \sigma_3} > 0$ 时， $\alpha = 0^\circ$ 。

显然，合理的洞轴线方向与 $\sigma_1, \sigma_3, \sigma_v, B/H$ 多种因素有关。在高地应力区选择洞室方向时，可采用式(4)估算洞室轴线的方向。由于洞室轴线的选线还受地形条件和线路总的方向的制约，因此，在选择轴线方向时应多方面比较选择确定，尽量接近 α 角，以减少高地应力带来的诸多不利因素。

b. 洞室断面形态的优化。在高地应力地区，由于水平应力大于垂向应力，有的地区水平应力甚至为垂向应力的 3~4 倍。文献[5]研究发现：当断面的宽高比等于侧压系数(λ)时，可使围岩应力场达到最佳受力状态，即在断面周边不连续处有较大的应力集中，这些应力集中使围岩产生局部破坏。因此， $0.42 < \lambda < 2$ 时，现行标准衬砌断面处于压应力场中，虽然从受力条件看，不如椭圆断面好，但可降低工程数量 and 成本。而当 $\lambda > 2$ 时，断面应进行特殊设计。

3.2 施工阶段的防治对策

a. 超前应力解除法。高地应力地区，隧道开挖后易产生超高应力集中。为了有效降低应力集中程度，可采用超前应力解除法，如预切槽法和超前钻孔应力解除法，开挖时可分步进行^[6]。这样，就可人为地主动给岩体提供一定的变形空间，使其内部的高应力得到有效降低，从而达到预防岩爆的目的。预切槽的布置方式如图 1 所示。

b. 喷水或钻孔注水促进围岩软化。在隧道易发生岩爆地段，爆破发生后立即向工作面新出露围岩喷水湿润，既可降尘又可缓释围岩应力。因为注水使裂纹尖端能量降低，并使裂纹突然传播的可能性减小。裂纹传播速度的降低，使裂纹周围的势能转为地震能的效率随之降低，从而减少剧烈爆裂的危险性。

c. 选择合适的开挖方式。由于岩爆是高应力集中的结果，因此，可采用钻爆法(钻孔爆破卸载法)使高度集中区的应力得以部分释放或转移。然而重复爆破振动，对掌子面前一定范围内的围岩会起到一定破坏作用，因此，建议降低起爆用药量，提高光面爆破效果，使开挖面尽可能圆顺一些，避免局部应力集中。

d. 减少岩体暴露时间和面积。在施工短进尺、多循环作业过程中，应及时支护，以尽量减少岩体暴露时间和面积，可防止或减少岩爆的发生。

e. 岩爆发生时的处理措施。岩爆一旦发生，应彻底停机、待避，补充工作面的观察并记录山鸣、岩爆，且不论在工作面、边墙或拱顶，都要仔细地进行二三次的检查，并选取合理的支护加固措施。

3.3 合理地选择围岩支护加固措施

对已开挖的隧道周边或掌子面前方的围岩进行加固(即超前加固)^[7]，可改善掌子面本身及室周边 1~2

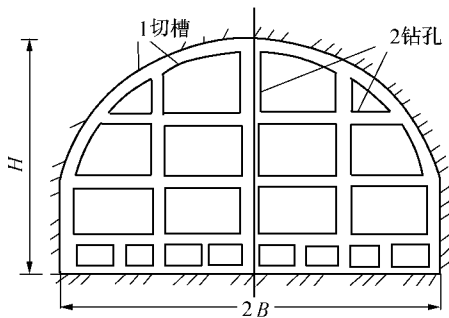


图 1 周边及中间的超前槽缝布置
Fig.1 Pre-arrangement of slots on the perimeter and at center of tunnel face

倍洞径范围内的应力状况,使周边岩体从单向应力状态变为三向应力状态,同时,采用围岩加固措施还具有防护作用,可防止岩体弹射和塌落。主要的支护加固措施有:(a)喷混凝土或钢纤维喷混凝土加固;(b)钢筋网喷混凝土加固;(c)周边锚杆加固,可应付突然发生的岩爆,通常摩擦型锚杆能收到很好的效果,锚杆数量视岩爆级别而定;(d)格栅钢架加固;(e)必要时可采取超前支护。

4 结 语

岩爆是地下工程的主要工程地质问题之一。目前虽基于岩爆理论和岩爆破坏机制提出了许多理论预测预报方法,但用于生产实际都尚有困难。本文在现场调研和查阅国内外文献资料的基础上,对岩爆在实际工程实践中的预测预报及防治对策等进行探讨,并提出一些预测方法和防治对策,这对生产实践具有较大的现实指导意义。

参考文献:

- [1] 崔政权.系统工程地质导论[M].北京:水利电力出版社,1992.239~242.
- [2] 李协生.不衬砌引水隧洞设计中的若干问题[M].成都:西南交通大学出版社,1994.134~153.
- [3] 潘一山.考虑损伤的圆形洞室岩爆分析[J].岩土力学与工程学报,1999,18(2):152~156.
- [4] 张斌.深埋长隧道岩爆的预测预报及防治初探[J].地质灾害与环境保护,1999(1):25~26.
- [5] Kitagawa T. Application of convergence confinement analysis to the study of predicting displacement of a squeezing rock tunnel[J]. Rock Mech and Rock Engineering,1991,24(1):31~35.
- [6] 梅志荣.高低应力条件下巷道周围岩石圈应力解除技术的基本研究[J].隧道译丛,1991(11):12~20.
- [7] Kwasniew M, Wang J A. 3-D numerical modeling and study of mine tremors associated with coal mining in vicinity of major faults[J]. World Tunneling,1995,18(3):21~25.

Causes of rock burst in circular chambers and its geological disaster analysis

MIAO Xiao-jun¹, WU Ji-min², LI Jin-bo²

(1. Guangzhou Water Resources Department, Guangzhou 510640, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the analysis of the conventional criteria for and formation mechanism of rock burst, the conditions under which rock burst takes place and positions of rock burst are predicted. Besides, some countermeasures are proposed for prevention of rock burst, including reasonable determination of the chamber axis and optimization of the chamber section in the design stage, and pre-elimination of stresses, softening of adjoining rocks, and reasonable determination of the excavation mode and reinforcement measures in the construction stage.

Key words: rock burst; mechanism; criterion; prediction; countermeasures