

DOI: 10.11779/CJGE2016S2018

猴子岩水电站地下厂房岩爆综合预测研究

贾哲强, 张 茹*, 张艳飞, 高明忠, 刘倩颖, 李安强, 谢 晶

(四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 中国西南地区在建的猴子岩水电站地下厂房, 具有高边墙大跨度的特点。且位于高地应力区, 实测最大主应力值高达 36.43 MPa。地下厂房区域的灰岩坚硬完整、脆性程度高, 具备高储能条件, 在施工开挖扰动因素下有可能发生岩爆动力地质灾害。依照岩爆综合预测研究的思路, 结合前期猴子岩水电站地下洞室群岩爆倾向性研究, 开展岩爆趋势预测研究。建立三维有限元计算模型, 根据实测地应力资料进行初始地应力场拟合, 模拟猴子岩水电站地下洞室群分步开挖过程, 选择王兰生二郎山隧道判据进行岩爆趋势预测。通过分析主厂房、主变室、尾调室三大洞室分步开挖过程中的岩爆趋势预测情况可知: 猴子岩地下洞室群开挖过程中主要发生轻微岩爆, 个别区域可能发生中等岩爆, 与实际情况相比仍有一定差异。同时, 归纳已有的多种岩爆预测判据, 结合大量工程资料, 对岩爆判据的适用性进行系统探讨。研究表明, 单一判据在工程中有较大的局限性, 预测结果与实际情况有较大偏差; 而五因素综合判据则能较准确地反映工程的岩爆情况。

关键词: 岩爆; 综合预测; 岩爆倾向性; 岩爆趋势; 岩爆判据; 五因素判据

中图分类号: TV223; TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2016)S2-0110-07

作者简介: 贾哲强(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面研究工作。E-mail: 826387179@qq.com。

Integrated prediction for rockburst of underground powerhouse of Houziyan hydropower station

JIA Zhe-qiang, ZHANG Ru, ZHANG Yan-fei, GAO Ming-zhong, LIU Qian-ying, LI An-qiang, XIE Jing

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University,

Chengdu 610065, China)

Abstract: The underground powerhouse of Houziyan hydropower station under construction in southwest China has the characteristics of a large span and high sidewall. It lies in high geo-stress regions and its maximum measured geo-stress has reached to 36.43 MPa. The complete and hard limestone in this region has a high brittleness and provides a high energy storage condition, which is possible to result in dynamic geological disasters like rockburst because of the excavation disturbance. Based on the integrated prediction approach for rockburst, a research on rockburst tendency is conducted. Considering the strict simulation of topographical and geological conditions, a three-dimensional finite element model for Houziyan underground powerhouse is established. Then the step-by-step excavation process of underground powerhouse is simulated. And the initial geo-stress regression analysis is finished using method of back analysis. Wang Lansheng criterion is selected to evaluate the rockburst tendency. The rockburst tendency prediction of main powerhouse, main transformer chamber and tailrace surge chamber during step-by-step excavation process are analyzed. The results show that the light rockburst occurs during excavation of the underground caverns, and medium rockburst only happens in some areas. There are still some differences between the predicted results and the real situations. At the same time, a summary on various criteria of rockburst prediction and a discussion on the applicability of these criteria based on the existing engineering data are also carried out. It is indicated that there are some limitations using a single criterion to predict the actual projects. The predicted results by using five-factor rockburst criterion can reflect the actual situation more accurately.

Key words: rockburst; integrated prediction approach; rockburst proneness; rockburst tendency; criterion of rockburst prediction; five-factor rockburst criterion

0 引 言

岩爆是高地应力区地下工程开挖时岩体中积聚

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51204113); 国家重点研发计划 (2016YFC0600702)

收稿日期: 2016-05-19

*通讯作者 (E-mail: zhangru@scu.edu.cn)

的弹性应变能突然释放而发生的动力地质灾害现象, 具有突发性和猛烈性, 经常引起人员伤亡或设备损害。目前国内外岩爆研究工作主要集中于两个方面: 一是岩爆发生机理的探讨; 二是岩爆的预测预报研究^[1-2]。

由于岩体特征的复杂性和岩爆影响因素的多样性, 准确地预测岩爆的时空分布困难较大, 单一的方法在实际工程应用中存在一定局限性。因此针对某一具体工程, 笔者提出岩爆综合预测研究的思路和流程, 即在不同的研究、设计和施工阶段, 各种预测方法和理论研究成果应当进行综合分析和讨论: 可行性研究和初步设计阶段, 进行岩爆倾向性研究, 此阶段仅有少量的勘探平硐等开挖工程, 岩体没有大范围的应力调整, 大量的能量储存于岩体中; 初步设计和施工初期, 进行岩爆趋势预测研究, 此阶段围岩进入应力调整期, 随着开挖的进行发生能量耗散, 局部地域有一定的能量释放; 大规模开挖阶段, 进行岩爆现场监测预测研究, 此阶段围岩将出现明显的应力集中区域, 能量进一步耗散, 局部地域将有剧烈的能量释放现象。

本文以猴子岩水电站地下厂房洞室群为例, 结合猴子岩水电站地下厂房工程前期岩爆倾向性研究, 按照岩爆综合预测的思路完成了岩爆趋势预测研究工作, 主要通过建立三维有限元计算模型, 进行初始地应力反演, 模拟现场地质条件和分步开挖过程, 对围岩二次应力调整等进行计算, 应用岩爆理论和经验判据, 大致判定岩爆高发区域和范围, 并结合实际岩爆发生情况进行相关分析, 具有很强的理论研究和工程实用价值。同时, 由于岩爆的预测判据较多, 不同判据的使用会对预测结果的准确性产生较大影响, 适用性也各不相同, 所以本文归纳已有多种岩爆预测判据, 通过收集大量工程资料重点对单一判据和岩爆五因素综合判据进行适用性探讨, 对高地应力区大型地下工程的岩爆预测和防治具有重要的借鉴意义。

1 工程概况及现场岩爆情况

猴子岩水电站位于四川甘孜康定县境内大渡河干流上游, 其引水发电系统布置于河道右岸雄厚的山体内部, 地下厂房最小垂直埋深 380 m, 最小水平埋深 250 m。厂房洞室群规模巨大, 主厂房、主变室、尾调室三大洞室平行布置, 三者之间岩柱厚度均为 45 m。

猴子岩水电站工程区位于多条构造带的交接复合部位, 区域地质构造背景较复杂^[3]。地下厂房主要布置于微新中厚层灰岩内, 岩石坚硬, 岩体完整, 单轴抗压强度一般在 100 MPa 以上, 围岩总体以Ⅲ₁类为主, 成洞条件较好。实测初始地应力值相对较高, 右岸地应力在水平埋深 250 m 以后为高地应力, 地下厂

房一侧最大主应力实测值高达 36.43 MPa, 而且局部有应力集中带。围岩为坚硬较完整的变质灰岩, 易于蓄集较高的弹性应变能, 且猴子岩地下厂房区域均位于高地应力区, 因此具备了发生岩爆的条件, 受外界扰动因素的影响, 易发生岩爆动力地质灾害现象。

据猴子岩地下厂房现场统计, 施工过程中^{#4}公路隧道、进厂交通洞、厂房第一层上游侧(厂横)某些分段均在爆破后一段时间内发生了多次不同程度的岩爆现象, 脱落岩块大小差异较大, 但多表现为中间厚两边薄的片帮状, 有一定弹射距离; 主厂房在前三层的开挖过程中出现的岩爆现象相对较多, 且下游侧多于上游侧; 地下厂房中导洞洞段边墙均发生过轻微—中等岩爆; 开挖尾水连接管, 尾水洞期间也出现了多次岩爆现象, ^{#1}尾水洞的完整岩体开挖后因应力集中发生岩爆, 并导致顶拱塌方。这些岩爆现象对施工人员和设备的安全造成了一定威胁。

2 猴子岩水电站地下洞室群岩爆倾向性研究

按照岩爆综合预测研究的思路, 首先进行岩爆倾向性研究。此研究主要通过取自猴子岩水电站地下洞室现场的灰岩开展多方面多角度试验, 对岩石岩爆倾向性进行了系统的研究, 具体研究指标及结论如下^[3]: 依据岩石力学实验和现场地应力测量结果, 结合修正巴顿判据得出猴子岩地下厂房区域岩爆等级为中等岩爆; 从岩性角度反映灰岩发生急剧失稳破坏的机率较大, 即现场围岩发生岩爆的可能性较大; 灰岩的平均 W_{et} 值达 4.71 接近高烈度岩爆临界值 5, 所以猴子岩地下洞室群灰岩发生中等岩爆的可能性较大; 该灰岩为脆性岩石, 脆性度达到 28.54, 接近中等岩爆临界值 26.7, 具备了发生弱岩爆的可能性; 样品断口电镜扫描分析表明断面破坏形以拉张破坏为主, 伴随着较少张剪破坏, 根据断裂方式和破坏机制与工程宏观岩爆特征的对应关系, 容易发生以穿晶解理断裂和沿晶脆性断裂方式为主的岩爆; 通过对岩样的典型应力—应变和声发射全过程试验结果进行分析, 得出猴子岩水电站地下厂房的灰岩表现出典型的脆性破坏特征。所以该工程区灰岩具有发生中、低岩爆倾向。

3 猴子岩水电站地下洞室群岩爆趋势预测研究

3.1 三维初始地应力场的拟合分析

根据现场地质图、地形图等资料, 真实模拟了现场山体形态, 选取范围的科学性排除了边界条件的影响, 使得计算结果尽可能真实可靠。计算坐标和方向

为: Z轴负方向为N61°W, 与厂房轴线方向重合, X轴正方向为N29°E, Y轴铅直向上。根据地下厂房的几何尺寸, 结合地形条件, 三维模型的计算范围选取值为: X、Y、Z轴三个方向的计算范围分别为824 m, 1657 m, 764 m。如图1和图2所示分别为外部山体和内部厂房结构。采用4节点4面体单元, 共划分791368个单元, 132365个节点。材料为III₁类围岩。

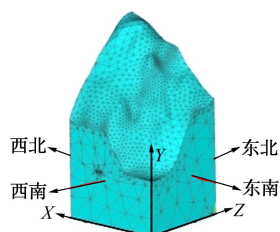


图1 外部山体模型

Fig. 1 Model of external mountain

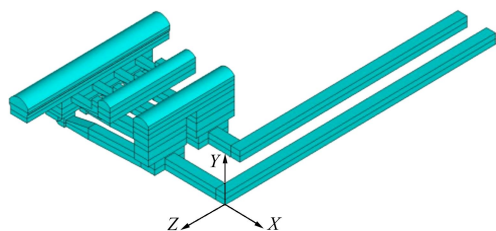


图2 厂房结构

Fig. 2 Structure of power house

工程中所考虑的地应力的主要来源是地质构造运动和岩体自重^[5]。根据已知的地应力数据和拟合过程, 我们选择同时结合实测初始地应力值与有限元计算方法, 运用统计回归分析来反演岩体初始地应力场^[4]。这种方法中根据施加的边界条件不同, 又分为线性拟合测点应力法、初始位移优化法和初始荷载优化法, 经比较本文选用初始位移法进行地应力拟合。

猴子岩水电站右岸地下厂房区域共有6个地应力实测点, 采用初始位移优化法进行初始地应力场拟合。根据地质调查结果及施工区域地应力实测数据, 在模型东南方向、东北方向以及模型底部施加垂直的法向位移约束, 同时在模型的西南方向和西北方向施加向内的单位位移。同时选用6个实测地应力测点中位于地下洞室区域内或附近的五个测点数据, 按照自重应力和边界位移组合作用的拟合思路, 采用多元线性回归的方法进行计算^[5]。根据多元回归分析的原理, 将计算结果看作多个影响因素的线性组合形式:

$$\sigma_k = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i, \quad (1)$$

式中 k 为观测点的序号; σ_k^i 为第 k 观测点的回归计算目标值; L_i 为相应于自变量的多元回归系数; σ_k 为考虑自重应力、边界位移等在初始给定单位值条件下得

到的有限元计算值。

通过应力分量的坐标变换将测点的应力矩阵转化为模型坐标系下的应力矩阵, 为了简化计算过程, 拟合过程中仅考虑各个测点3个方向上的应力值进行拟合, 且将重力加速度 A 和水平面两个方向上的位移值 S_X 和 S_Z 看成未知量, 初始条件为重力加速度 10 N/kg, $S_X=S_Z=1$ m, 将3个未知数在给定数值条件下独立作用的计算结果线性拟合, 得到观察方程组^[7] (式(2)), 采用最小二乘法进行优化求解。求解结果为重力加速度 14.474 N/kg, $S_X=0.253$ m, $S_Z=0.067$ m。将计算结果带入模型计算, 得到地应力计算值与实测值进行比较。

$$\begin{bmatrix} 4.81 & 59.46 & 15.76 \\ 16.39 & 3.25 & 3.23 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 4.64 & 13.30 & 63.78 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ S_X \\ S_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19.64 \\ 12.81 \\ \vdots \\ 22.36 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中地应力测点1与洞室区域距离相对较远, 所以拟合误差较大, 但对结果分析影响较小 (见表1), 拟合结果总体上与实测情况相符。通过前面的地应力拟合结果与实测值对比和分析得出猴子岩地下厂房区域地应力分布特征。根据模拟结果得出竖向应力与埋深大致的线性规律为 $\sigma_y(\text{MPa}) = 0.048h - 1.341$, 厂房区域竖向应力和水平向应力数值上差距不大, 这反映出应力场是在自重应力、构造应力、残余应力等多方面共同作用的结果。以二号机组为剖面图例, 给出第一、第三主应力云图, 见图3。

表1 第一应力不变量实测值与计算值的比较

Table 1 Comparison of first stress invariant between measured and calculated values (MPa)

测点号	1	2	3	4	5
实测值	-40.57	-61.35	-67.03	-70.19	-88.55
计算值	-63.26	-63.86	-63.31	-64.15	-65.15
误差	55.9%	4.09%	5.55%	8.60%	26.43%

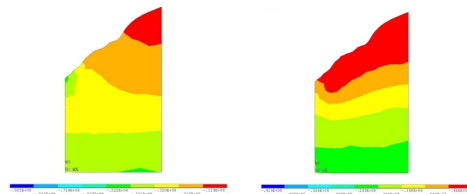


图3 二号机组横剖面第一、第三主应力云图

Fig. 3 First and third principal stresses of cross section of second unit

3.2 岩爆趋势预测判据选择

岩爆预测判据的种类较多, 本文选择应力判据进行岩爆预测, 对比多种应力判据的不同情况及工程经验, 同时结合前期开挖的现场岩爆情况, 选取王兰生二郎山隧道判据对猴子岩水电站岩爆进行趋势预测,

σ_{θ} 为围岩切向应力, σ_c 为岩石单轴抗压强度, 但本文中均以第一主应力的大小替代围岩切向应力。根据实验室得出的岩石单轴抗压强度为 149.39 MPa, 得出的岩爆判据临界值如表 2。

表 2 二郎山隧道判据标准及应力临界值

Table 2 Standards and critical values of stress of Wang Lansheng criterion

预测标准	应力临界值/MPa	预测结果
$\sigma_{\theta} / \sigma_c < 0.3$	<44.82	无岩爆
$0.3 < \sigma_{\theta} / \sigma_c < 0.5$	44.82~74.70	轻微岩爆
$0.5 < \sigma_{\theta} / \sigma_c < 0.7$	74.70~104.57	中等岩爆
$0.7 < \sigma_{\theta} / \sigma_c < 0.9$	104.57~134.45	强烈岩爆
$0.9 < \sigma_{\theta} / \sigma_c < 1.0$	>134.45	剧烈岩爆

3.3 施工开挖布置

猴子岩地下厂房系统共分为 10 级开挖, 其中厂房分 9 层开挖, 母线洞分 3 层开挖, 主变室分 3 层开挖, 尾调室分 9 层开挖, 尾水连接管分 4 段开挖, 尾水管分 2 层开挖, 具体就开挖分级及开挖顺序见图 4。

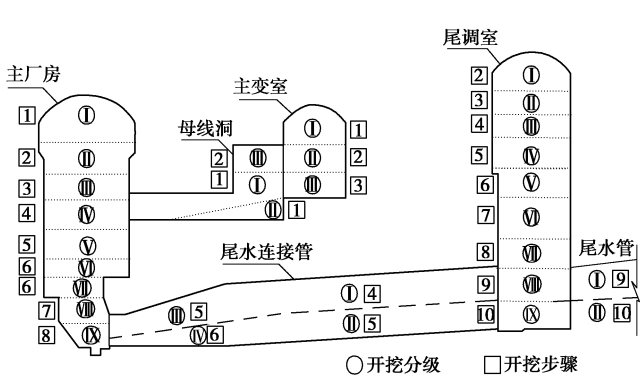


图 4 猴子岩地下厂房开挖分级及开挖顺序图

Fig. 4 Excavation classification and sequence of Houziyan underground powerhouse

3.4 岩爆趋势预测

在初始地应力场拟合的基础上, 综合分析岩爆判据, 对本工程的初期岩爆情况进行判断, 根据以上列出的开挖工序对地下洞室群的开挖过程进行了模拟, 通过开挖过程中围岩应力情况, 选择采用二郎山隧道岩爆判据, 对地下洞室群分步开挖过程进行岩爆预测。

如图 5, 为第一、二步开挖主厂房的岩爆趋势预测图, 可以看出前两步开挖可能发生岩爆的区域较多, 所以开挖初期应做好相应的支护和安全措施。之后的开挖步骤中会发生岩爆的区域相对减少, 由于母线洞影响, 主要可能发生在主厂房下游侧的边墙, 且靠近底板的部位由于应力更集中, 发生岩爆的可能性更大。

如图 6, 为第一、二步开挖主变室的岩爆趋势预测图。第一步开挖可能发生岩爆的区域较大, 第二、三步情况类似, 在开挖过程中主要由于母线洞的开挖,

上游边墙下部出现部分区域应力集中的现象, 部分区域可能发生轻微和中等岩爆。

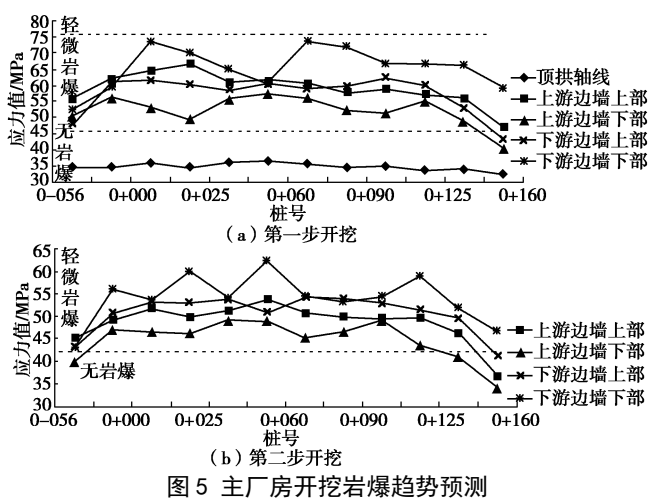


图 5 主厂房开挖岩爆趋势预测

Fig. 5 Predicted rockburst tendency of main powerhouse during step-by-step excavation

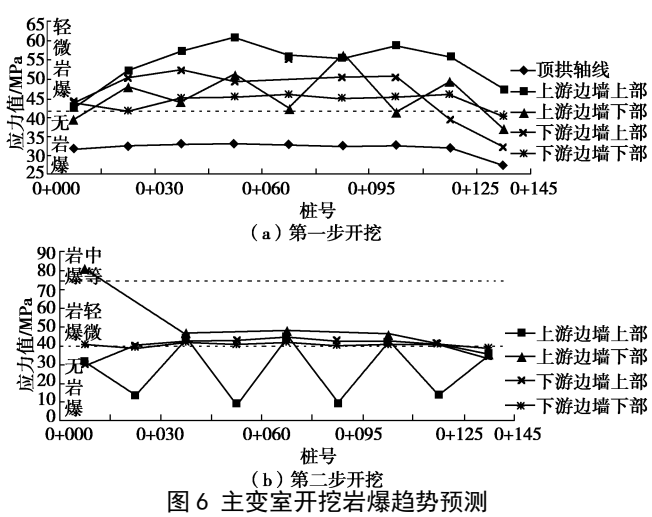
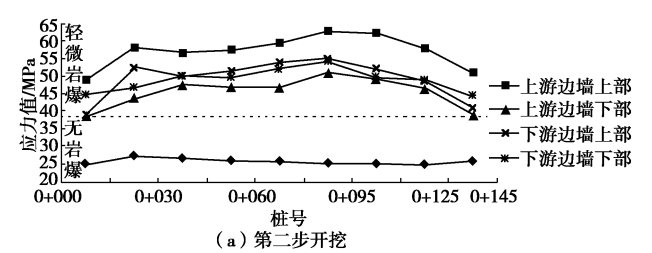


图 6 主变室开挖岩爆趋势预测

Fig. 6 Predicted rockburst tendency of main transformer chamber step-by-step excavation

如图 7, 为第二、九步开挖尾调室的岩爆趋势预测图。尾调室在第二步开挖之后 (即尾调室第一层开挖) 可能发生轻微岩爆灾害, 中期开挖可能发生岩爆的区域较少, 而后期开挖过程中主要在靠近底板的下部发生轻微岩爆。

综上可知, 猴子岩地下洞室群不具备发生大规模岩爆的可能性, 但在开挖初期较多区域可能发生轻微岩爆, 个别开挖部位可能发生中等岩爆, 中后期开挖后边墙底部处应力集中容易发生岩爆。



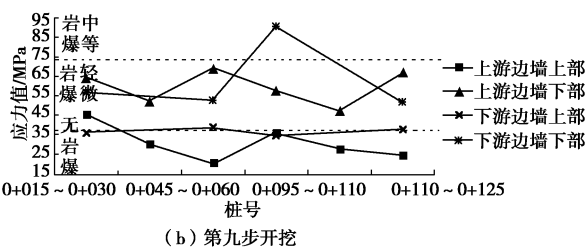


图7 尾调室开挖岩爆趋势预测

Fig. 7 Predicted rockburst tendency of tailrace surge chamber step-by-step excavation

3.5 岩爆趋势预测结果与实际岩爆情况初步对比

现场实际发生的岩爆情况为：厂房中导洞开挖过程中出现了轻微和中等的岩爆，同时主厂房顶拱扩挖过程中出现中等岩爆，主厂房开挖过程中主要在Ⅰ～Ⅲ层开挖过程中发生弱、中等岩爆，且相对于上游侧，下游侧岩爆更多，Ⅳ层及以后开挖过程中岩爆现象不明显，但较多岩体出现平行于临空面的片帮和劈裂现象；尾水调压室开挖过程中的岩爆现象不明显，但出现高地应力下的拉张、张剪破坏现象；其它洞室中压力管道、尾水连接管和尾水洞出现了较多的岩爆现象。

而预测结果可知主厂房开挖的岩爆主要可能发生在前Ⅲ步开挖，后期开挖预测的岩爆较少，岩爆整体上以轻微岩爆为主，且下游侧多于上游侧。

总体而言，岩爆预测发生部位和趋势与实际岩爆发生情况能较好的吻合；预测结果显示主变室部分区域可能发生轻微岩爆，而实际发生岩爆极少；预测结果显示尾调室开挖过程中主要在靠近底板的边墙下部可能发生岩爆，以轻微岩爆为主，而实际情况发生较多片帮和劈裂的破坏形式。

研究表明，根据岩爆发生的时空特点，岩爆主要发生在开挖不久且未支护的围岩边墙上，而在岩爆现象不明显的区域表现出岩体劈裂和片帮的现象，或者在支护后发生墙体开裂或者变形较大的现象，这均是岩体对高地应力响应的表现形式。研究表明可能发生岩爆的区域在开挖过程中需做好岩爆预防措施，同时支护过程中要进行相应的加固以防止围岩发生开裂或

者较大变形。本文仅考虑了毛洞分级开挖，同时由于三维数值建模没有考虑整个区域上的裂隙和结构面的影响，且现场有开挖速度、超欠挖以及支护影响，并且由于岩爆判据选取的局限性和单一性，所以得出的岩爆趋势预测跟实际岩爆发生情况仍有一定的差异。

4 岩爆预测判据研究

4.1 预测判据

目前已有的判据主要包括规范中的强度应力比岩爆判据、王兰生二郎山隧道判据^[1]等应力判据、能量判据^[6]、岩爆风险指数^[7]及各种多元复合判据如天生桥二级水电站引水隧洞判据（1991）^[11]、秦岭隧道岩爆判别方法（谷名成等，2002）^[8]、修改的谷-陶岩爆判据（张镜剑等，2008）^[1]等，其中张镜剑又对修改的谷-陶岩爆判据进行完善，提出岩爆五因素综合判据和岩爆分级^[9]，并对锦屏一级水电站地下厂房和锦屏二级水电站辅助洞的岩爆情况进行了有效验证^[9]。

4.2 岩爆判据适用性探讨

(1) 单一判据适用性研究

根据各种经验判据与多个工程实例相结合分析，考虑岩性判据和二郎山隧道应力判据单独使用的条件和范围，得出图8、9。岩性判据在岩性一致的同一工程中只能大致判定工程发生岩爆的可能性和岩爆等级，不能对开挖后围岩岩爆情况作出实时预测，图8中单独运用岩性判据虽然整体上满足正确趋势变化，但较多工程显现一定的离散。而二郎山隧道判据与岩石单轴抗压强度有关，同时加入了围岩应力条件，这样综合了岩爆发生的岩性条件和应力情况这两个决定性内外因素。而且运用应力判据可以根据开挖后围岩应力情况作出相应的岩爆预测，图9可以看出，二郎山隧道应力判据对岩爆的预测较为准确，但部分工程预测结果与实际岩爆情况仍存在显著偏差。总体而言，单一岩爆判据在实际工程运用中，预测结果有待商榷，应针对具体的工程综合各个判据进行分析，必要时还需进行阈值的调整后才能使用。

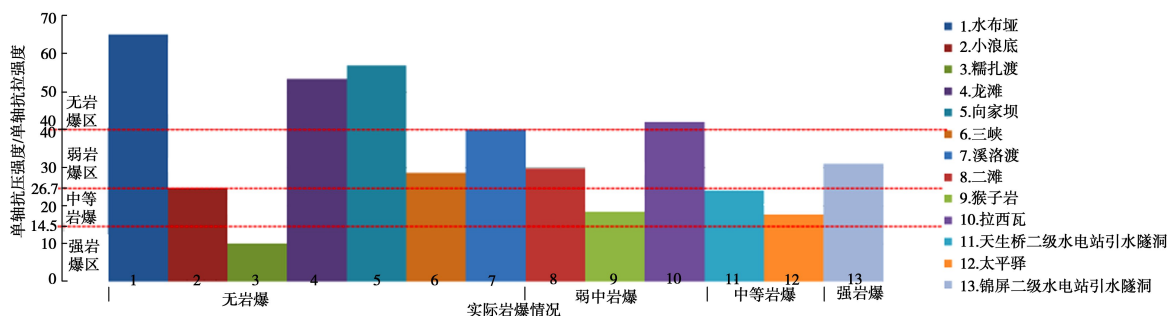


图8 岩性判据

Fig. 8 Lithological criterion

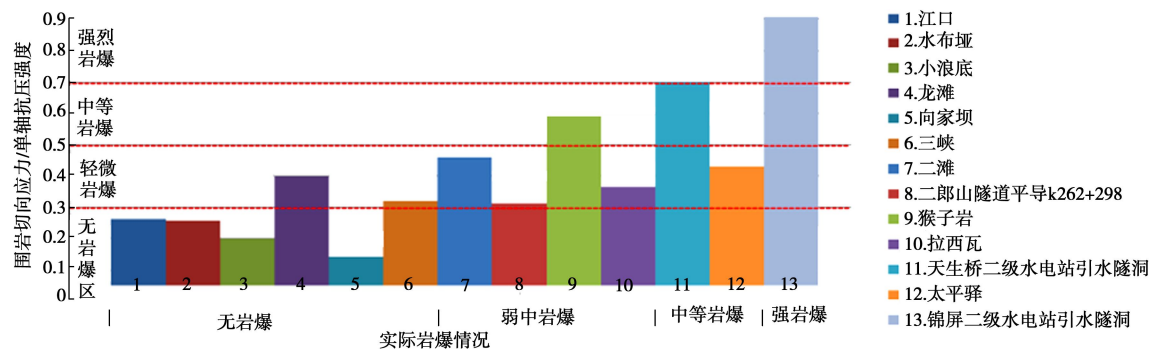


图 9 二郎山隧道判据

Fig. 9 Wang Lansheng criterion

(2) 岩爆五因素综合判据适用性研究

岩爆五因素综合判据增加了围岩洞壁最大切向应力与岩石单轴抗压强度的比值^[9]。表 3 为岩爆五因素综合判据和岩爆分级。运用岩爆五因素综合判据提出的五个不同的指标分别判定工程岩爆情况，其中岩爆等级最低的即为整体判定结果。表 4 通过相关资料得到几个典型地下工程的判据参数，并进行深入分析。

表 3 岩爆五因素综合判据

Table 3 Five-factor rockburst criterion				
影响因素	无岩爆	弱岩爆	中岩爆	强岩爆
σ_1/σ_c	<0.15	$0.15\sim0.20$	$0.20\sim0.40$	>0.40
σ_θ/σ_c	<0.20	$0.20\sim0.30$	$0.30\sim0.55$	>0.55
σ_c/σ_t	<15	$15\sim18$	$18\sim22$	>22
W_{ET}	<2	$2\sim3.5$	$3.5\sim5$	>5
K_v	<0.55	$0.55\sim0.60$	$0.60\sim0.80$	>0.80

五因素综合判据充分考虑了岩石的抗压、抗拉、能量储存释放等能力，同时考虑了地应力和岩体的完整性等因素。当这些岩爆影响因素同时满足时，发生对应岩爆的可能性极大，而不能完全满足的情况下，发生岩爆的可能性随之减小。但由于工程区域较大，工程环境复杂，若针对具体工程可进行更加细致的分段分步监测，获得各个区域的具体参数，依照本方法进行实时监测和预报。如表 4 所示，其中锦屏二级水电站辅助洞得出的判据结果说明工程建设过程中必定

发生岩爆灾害，其影响因素中高地应力占主导地位；从瀑布沟水电站地下厂房的四项数据中可以看出围岩的脆性大和地应力值高，但岩石的储能性不太高，可发生弱、中等岩爆；二郎山隧道得到三项相关数据资料，岩石的储能性较好，地应力高，可发生弱、中等岩爆。从以上三个工程而言，岩爆五因素综合判据预测结果较为准确。

5 结 论

(1)猴子岩地下洞室群不具备发生大规模强烈岩爆的可能性，但在开挖初期较多区域可能发生轻微岩爆，个别开挖部位可能发生中等岩爆，中后期开挖墙底脚处应力集中容易发生岩爆。

(2)岩爆趋势预测结果显示：整体而言，三大洞室顶拱均不发生岩爆；主厂房开挖过程中可能发生的岩爆为轻微岩爆，主要集中在前三部开挖过程中，中期开挖过程中下游边墙应力集中明显更容易发生轻微岩爆；主变室可能发生的岩爆集中在第一步开挖后的上下游边墙区域，均为轻微岩爆，后两步开挖过程中发生岩爆较少，以轻微岩爆为主，个别区域可能发生中等岩爆；尾调室岩爆主要可能发生在前期第一、二步和后期的开挖中，中期岩爆较少，整体上以轻微岩爆为主，个别区域可能发生中等岩爆。因为没有考虑

表 4 五因素综合判据实际工程运用^[10-11]

Table 4 Practical application of five-factor rockburst criterion										
工程名称 岩爆因素	锦屏二级水电站 辅助洞		锦屏一级水电站地下 厂房		瀑布沟水电站 地下厂房		猴子岩水电站 地下厂房		二郎山隧道	
	数值	分级	数值	分级	数值	分级	数值	分级	数值	分级
	σ_1/σ_c	0.47 强岩爆	0.34 中等岩爆	0.24 中等岩爆	0.24 中等岩爆	0.17 弱岩爆	σ_θ/σ_c	0.7 强岩爆	0.96 强岩爆	0.7 强岩爆
σ_c/σ_t	21 中等岩爆	11 不发生岩爆	28.81 强岩爆	28.54 中等岩爆		W_{ET}	3.5 中等岩爆	3.5 中等岩爆	3.02 弱岩爆	4.71 中等岩爆
K_v	0.75 中等岩爆	0.53 不发生岩爆		0.55 弱岩爆		实际岩爆情况	中、强岩爆		无岩爆	
					弱、中等岩爆		弱、中等岩爆		弱、中等岩爆	

工程区域内的裂隙和结构面,以及开挖速度、超欠挖和支护等施工影响因素,同时由于岩爆判据选取的局限性和单一性,预测结果要比实际发生岩爆情况多,另一方面也反映出可能发生岩爆的区域在开挖过程中需要做好岩爆预防措施。

(3) 现有岩爆预测判据较多,从单因素判据到多因素综合判据不断发展。整体上单一判据表现出正确的预测趋势,但对个体数据而言离散性较大,预测结果存在较大的误差;复合判据从多因素多角度对岩爆进行了预测,运用其中的岩爆五因素综合判据对5个实际工程进行了预测研究,得到的结果较为准确。

参考文献:

- [1] 张镜剑,傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 2034 - 2042. (ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(10): 2034 - 2042. (in Chinese))
- [2] 徐林生,王兰生,李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(3): 300 - 303. (XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Yong -lin. Study on mechanism and judgement of rockbursts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(3): 300 - 303. (in Chinese))
- [3] 张艳飞,李治国,张茹,等. 猴子岩水电站地下厂房岩爆倾向性研究[J]. 西南交通大学学报, 2013, **48**: 42 - 49. (ZHANG Yan-fei, LI Zhi-guo, ZHANG Ru, et al. Rockburst tendency research in underground powerhouse of Houziyan hydropower station[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, **48**: 42 - 49. (in Chinese))
- [4] 郭怀志,马启超,薛玺成,等. 岩体初始地应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, **5**(3): 64 - 75. (GUO Huai-zhi, MA Qi-chao, XUE Xi-cheng, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **5**(3): 64 - 75. (in Chinese))
- [5] 何江达,谢红强,王启智,等. 官地水电站坝址区初始地应力场反演分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 166 - 171. (HE Jiang-da, XIE Hong-qiang, WANG Qi-zhi, et al. Inversion analysis of initial geostress in dam site of Guandi hydropower project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 166 - 171. (in Chinese))
- [6] 陈卫忠,吕森鹏,郭小红,等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1530 - 1540. (CHEN Wei-zhong, LU Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(8): 1530 - 1540. (in Chinese))
- [7] HE Man-chao, SOUSA R E, MIRANDA T, et al. Rockburst laboratory tests database-Application of data mining techniques[J]. Engineering Geology, 2015, **185**: 116 - 130.
- [8] 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 Ming-cheng, HE Fa-liang, CHEN Cheng-zong. Study on rockburst in Qingling tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(9): 1324 - 1329. (in Chinese))
- [9] ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun, LI Zhong-kui, et al. Criterion and classification for strain mode rockbursts based on five-factor comprehensive method[J]. News Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **88**(1): 27 - 37.
- [10] 王兰生. 二郎山隧道高地应力与围岩稳定问题[M]. 北京:地质出版社, 2006. (WANG Lan-sheng. High geostress and surrounding rock stability in Erlang-mountain highway tunnel[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. (in Chinese))
- [11] 武选正,李名川,伍宇腾. 锦屏水电枢纽辅助洞工程岩爆现象分析及防治措施[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, **38**(3): 28 - 33. (WU Xuan-zheng, LI Ming-chuan, WU Yu-teng. Analysis and prevention measures for rock-burst in the auxiliary tunnel of the Jinping hydropower state[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, **38**(3): 28 - 33. (in Chinese))

(责任编辑 明经平)