

不同主应力方向影响下隧道岩爆能量变化特征研究

李金峰, 代志敏, 张雪, 帅逸诚, 郝天琪, 苏唤东*

西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000

摘 要 : 岩爆是岩体中聚集的变形势能突然释放的一种动力地质灾害。本研究以太平驿水电站隧道为背景, 研究了基于能量原理和不同最大主应力方向下隧道开挖后的能量分布规律。研究发现, 随着最大主应力方向的变化, 隧道不同位置的应变能密度变化多样。在竖向地应力与隧道轴线夹角为 20° ~ 30° 、 40° ~ 60° 、 70° ~ 90° 时, 隧道不同位置能量有不一样的变化趋势。本研究可为相似地质条件下隧道开挖过程中岩爆能量释放提供理论依据。

关 键 词 : 岩爆能量; 数值模拟; 应力方向

Study On The Variation Characteristics Of Rockburst Energy In Tunnel Under The Influence Of Different Principal Stress Directions

Li Jinfeng, Dai Zhimin, Zhang Xue, Shuai Yicheng, Hao Tianqi, Su Huandong*

Tibet university institute of technology, Lhasa, Tibet 850000

Abstract : Rock burst is a kind of dynamic geological disaster caused by sudden release of deformation potential energy gathered in rock mass. Based on the principle of energy and the direction of maximum principal stress, the energy distribution of tunnels in Taipingyi Hydropower Station is studied. It is found that the strain energy density of the tunnel varies with the direction of the maximum principal stress. When the Angle between the vertical ground stress and the tunnel axis is 20° ~ 30° , 40° ~ 60° , 70° ~ 90° , the energy at different locations of the tunnel has different variation trends. This study can provide theoretical basis for rockburst energy release during tunnel excavation under similar geological conditions.

Keywords : rockburst energy; numerical simulation; stress direction

引言

岩爆是高地应力区隧道在人为施工或外界环境扰动下, 岩体中储存的能量突然释放的一种动力地质灾害, 其强大的破坏力和难以预测的突发性, 给作业人员和工程设备带来了严重的威胁^[1-3]。目前, 国内外学者从理论研究、数值模拟、室内试验等多个方面出发, 针对岩爆的发生机理进行了深入地研究。Cook 等人^[4]首先提出了岩爆能量理论, 随后国内外学者根据能量理论研究开展了各种不同的理论方法。N. G. W.Cook^[5]等人发现开采过程中释放的能量是岩爆发生的主导因素, 并根据该理论提出了能量释放率的概念。苏国韶^[6]在总结了 ERR 能量指标的优势后, 提出了岩爆能量释放指数新指标, 这一指标极大地促进了深埋隧道工程理论的发展。蒋邦友等^[7]基于能量原理在 TBM 施工过程中建立了新的岩爆评价方法, 为施工过程中阻断能量传递进而抑制岩爆发生提供了参考。郭建强等^[8]通过分析岩爆的烈度等级, 建立了适用于工程实际的分级模型, 为实际工程施工做出了一定贡献。

上述的研究成果为岩爆的能量机理研究发展注入了新的动力。但目前基于工程背景的岩爆能量分析尚有不足, 本文基于太平驿水电站引水隧洞的岩爆能量变化规律, 来探究能量与岩爆之间相互关联因素, 可为相似地质条件下隧道开挖过程中能量释放提供理论依据。

一、工程地质概况

太平驿水电站位于四川省境内, 隧洞全长10.5km, 隧洞断面为圆形, 开挖直径为10m, 垂直埋深200 ~ 600m。隧洞沿线山

势险峻、地形复杂, 山坡坡度多大于 45° 。岩石类比为花岗岩及闪长岩, 岩体致密坚硬成块状体, 其中储存了岩浆岩的残余应力、构造应力和自重应力, 属于高地应力区域。现场实测地应力最大主应力为31.1MPa, 最小主应力为10.4MPa, 中间主应力

基金项目: 西藏自治区科技计划项目, 《基于川藏铁路岩芯的深埋隧道岩爆动力灾变机制研究》, (项目编号: JBGS2023000005)。

作者简介: 李金峰(1998—), 男, 汉族, 甘肃天水人, 研究生在读, 单位: 西藏大学工学院, 研究方向: 岩土工程。

代志敏(1997—), 男, 汉族, 湖南省郴州市宜章县人, 研究生在读, 单位: 西藏大学工学院, 研究方向: 岩土体稳定性及工程环境效应。

张雪(2000—), 女, 汉族, 陕西省宝鸡市人, 研究生在读, 单位: 西藏大学工学院, 研究方向: 道路交通运输。

帅逸诚(2001—), 男, 汉族, 重庆市巫溪县人, 研究生在读, 单位: 西藏大学工学院, 研究方向: 道路交通运输。

郝天琪(1999—), 男, 满族, 辽宁省阜新市人, 研究生在读, 单位: 西藏大学工学院, 研究方向: 桥梁与隧道工程。

通讯作者简介: 苏唤东(1999—), 男, 汉族, 河南省开封市人, 研究生在读, 单位: 西藏大学工学院, 研究方向: 防灾减灾及防护工程。

为17.8MPa。其中K2+330~K2+412洞段开挖施工时发生了岩爆，岩爆部位主要靠山坡侧拱部区域^[9]。

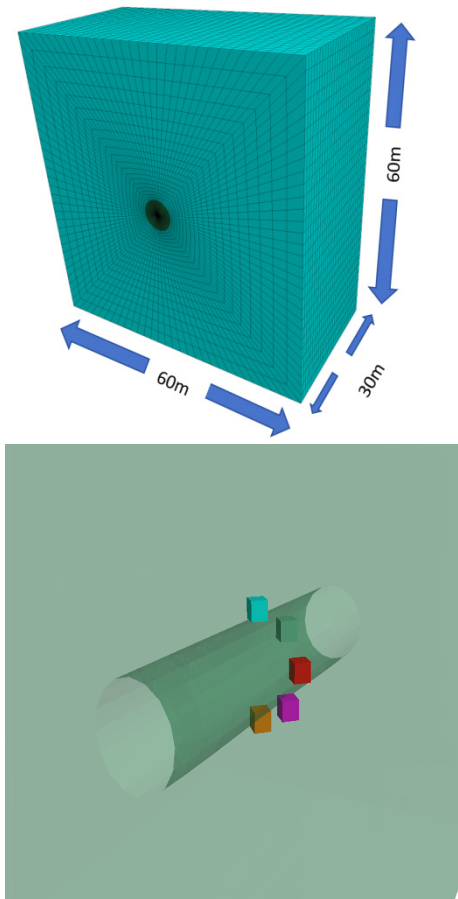
二、数值模拟

(一) Flac3d 简介

FLAC3D 软件是由美国 Itasca 公司研发推出的，该软件主要应用于岩土体的应力分析、动态监测，可以直观的看到岩体应力、能量等云图变化。软件本体自带大量函数，也可通过 FISH 语言进行二次开发，对各个工程案例具有较强的适用性，是岩土工程数值模拟使用最多的软件之一。

(二) 数值模型建立

以太平驿水电站圆形隧道模型为例，建立数值模型，将围岩视为单一、均质的各向同性连续介质，考虑到复杂的地形地貌及其多变的应力环境，数值模型尺寸设计为：X*Y*Z=60m*30m*60m，模型内部含有93600个子单元和96751个节点。为了真实还原地应力场，边界条件主要设置为：底部为三向约束，四周为法向约束，顶部为自由边界。此外分别对拱顶、拱肩、拱腰、拱脚、拱底进行监测，数值模型及监测点具体情况，如图1所示。



> 图1 数值计算模型及监测点分布图

(三) 模型参数

计算模型的岩体采用太平驿水电站隧洞段花岗岩岩体，具体力学参数，见表1。

表1 太平驿水电站花岗岩力学参数^[10]

粘聚力 峰值 / MPa	粘聚力 残余值 / MPa	内摩擦角 峰值 / (°)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
35.5	3.5	42.8	10	31	0.2

三、数据分析

岩石发生变形破坏主要是能量驱动的结果，从能量角度出发，当岩石在外力作用下产生变形，外力功产生的总输入能量为U，根据能量守恒原理得^[11]。

在隧道施工过程中，由于受到外部众多因素的干扰，围岩产生的能量可转为总输入能量U，其中主要包含耗散能U^d和弹性应变能U^e，能量变化关系满足如下公式：

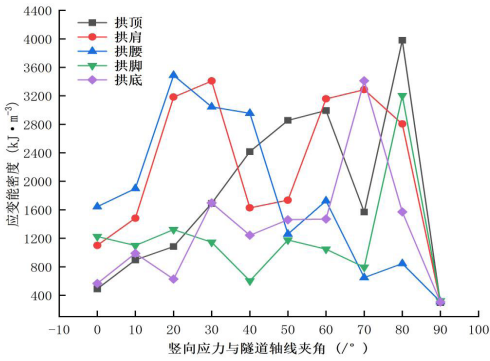
$$U=U^d+U^e$$

耗散能U^d是施工时，造成岩体裂缝产生或破碎等过程耗散的能量。弹性应变能U^e是引起岩爆的决定性因素之一，其主要受控于三向应力、弹性模量和泊松比等因素的影响，主要可表现为如下公式：

$$U^e = \frac{1}{2E_0} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为岩体的3个主应力；E₀为岩体的弹性模量； ν 为泊松比

基于 FLAC3D 软件自带的 FISH 语言进行二次开发，依据公式（3）计算出岩体单元的的弹性应变能，并绘制掘进后隧道纵向的弹性应变能云图，并监测不同应力角度下隧道拱顶、拱肩、拱腰、拱脚、拱底的应变能变化情况。

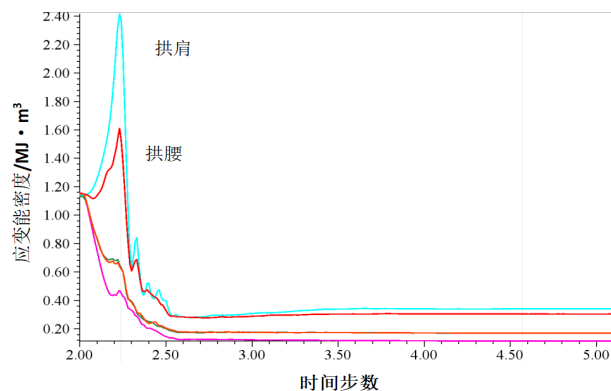


> 图2 不同应力角度太平驿隧道关键位置围岩应变能密度曲线

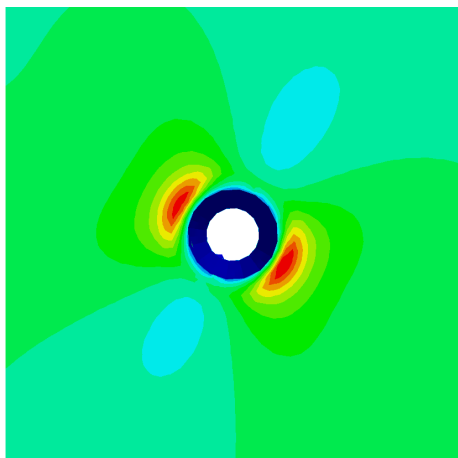
应变能密度是直接反映岩爆倾向性的重要依据，由图2可知，随着地应力方向的变化，隧道各个关键位置的应变能变化差异较大。在竖向地应力与隧道轴线夹角为20° ~ 30° 时，拱肩和拱腰的应变能密度急剧增加，其他位置变化不明显；在竖向地应力与隧道轴线夹角为40° ~ 60° 时，拱顶处应变能密度逐渐增加，拱肩处应变能密度有一个先降低后增加的趋势，拱腰处应变能密度急剧下降；在竖向地应力与隧道轴线夹角为70° ~ 90° 时，拱顶、拱肩、拱脚、拱底处应变能密度都激增至峰值点，随后又快速降低，只有拱腰位置处的应变能密度逐步降低。

地应力场方向决定了岩爆发生的位置^[9]，太平驿水电站隧道最

大主应力与山坡面近似平行（30°左右），如图，最小主应力与最大主应力垂直。通过改变应力方向，利用 FLAC3D 软件真实模拟了太平驿隧道的实际应力环境。



> 图3 拱肩部位的应变能变化情况



> 图4 最大主应力与隧道夹角 30 度的应变能云图

通过数值计算记录了最大主应力与隧道轴线方向夹角为 30 度时隧洞开挖全过程的应变能密度变化情况，在开挖过程中，拱肩的应变能密度 2.25 步时发生急剧的增加和降低，其次是拱腰，先逐渐增加，随后慢慢降低，最后都趋于平衡。拱顶、拱脚、拱底处应变能密度变化不大，在开挖过程中慢慢释放能量并区域稳定。由应变能云图（如图 4）也可发现，在隧道拱肩和拱腰位置处，应变能密度较为集中，这也与太平驿水电站隧道真实的岩爆区域相一致。

结论

通过运用 FLAC3D 有限差分软件建立太平驿水电站隧道模型，研究了基于能量原理和不同最大主应力方向下隧道开挖后能量的分布规律，随着最大主应力方向的变化，隧道不同位置的应变能密度变化多样。在竖向地应力与隧道轴线夹角为 20° ~ 30°、40° ~ 60°、70° ~ 90° 时，隧道不同位置有不一样的变化趋势。本次数值模拟所得到的应变能密度数据和云图与太平驿水电站真实发生岩爆的区域相一致，再次印证了岩爆与能量之间的密切关系。后续隧道工程发生岩爆的区域应根据具体工程实际具体讨论。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型 [J]. 岩土力学, 2014, 35(01): 1-6. DOI: 10.16285/j.rsm.2014.01.028.
- [2] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(04): 649-673. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0103.
- [3] 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积累理论的岩爆预测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1973-1980.
- [4] Cook N G w, Hock E, Pretorius J P G. Rock Mechanics applied to the study of rock bursts. J. S. Afr. Inst. Min. Metall, 1965, 66: 435-528.
- [5] COOK N G w. The design of underground excavations [C] / Proceedings of Eighth Rock Mechanics Symposium. Minnesota: American Rock Mechanics Association, 1966: 45-52.
- [6] 苏国韶. 高地应力下大型地下洞室群稳定性分析与智能优化研究 [博士学位论文] [D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2006.
- [7] 蒋邦友, 王连国, 顾士坦, 等. 基于能量原理的深埋隧洞 'TBM 施工岩爆机理分析 [J. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(06): 1103-1109+1115.
- [8] 郭建强, 赵青, 王军保, 等. 基于弹性应变能岩爆倾向性评价方法研究 [J. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(09): 1886-1893.
- [9] 万姜林, 洪开荣. 太平驿水电站引水隧洞的岩爆及其防治 [J]. 西部探矿工程, 1995(01): 87-89.
- [10] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006(12): 2453-2460. (图标)
- [11] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.