

深埋特长公路隧道岩爆预测综合分析

徐建达¹, 朱建才², 唐中华¹, 徐志敏¹, 宋金龙², 陈韩鑫²

(1. 杭州都市高速公路有限公司, 浙江 杭州 310024; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 岩爆预测研究对于地下工程的建设发展具有重要意义。以浙江省某深埋特长公路隧道为例, 在隧址区地质调查的基础上, 结合现场地应力实测数据及室内试验, 通过数值模拟对典型标段隧道开挖后的二次应力场进行分析, 同时根据岩石强度理论判据法及微震监测方法, 对该标段可能发生的岩爆灾害进行综合预测分析, 分析结果可为隧道的设计优化及顺利建设提供依据。同时, 由于岩爆灾害的发生受多种因素影响, 单纯通过理论判据进行预测仍具有不确定性, 因此仍需在施工过程中针对存在岩爆灾害风险的标段加强现场监测。

关键词: 岩爆; 公路隧道; 理论判据; 微震监测

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7195(2020)01-0053-05

作者简介: 徐建达(1967-), 男, 正高级工程师, 注册咨询(投资)工程师, 长期从事高速公路建设的管理及科研工作。E-mail: 1971969251@qq.com。

Comprehensive analysis of rockburst prediction for deep-buried extra-long highway tunnels

XU Jian-da¹, ZHU Jian-cai², TANG Zhong-hua¹, XU Zhi-min¹, SONG Jin-long², CHEN Han-xin²

(1. Hangzhou City Highway Co. Ltd., Hangzhou 310024, China;

2. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310012, China.)

Abstract: Rockburst prediction is of great importance in the construction and development of underground engineering. Taking a deep-buried extra-long highway tunnel in Zhejiang Province as an example, based on the geological survey of the tunnel site area, combined with the in-situ geostress data and indoor tests, the secondary stress field after the excavation of a typical tender tunnel is analyzed through numerical simulation. At the same time, according to the rock strength theory criterion method and microseismic monitoring method, comprehensive prediction and analysis of possible rock burst disasters in the bidding section are performed. The analysis results provide a basis for the design optimization and smooth construction of the tunnel. At the same time, because the occurrence of rock-burst disasters is affected by many factors, it is still uncertain to predict only by theoretical criteria. Therefore, it is still necessary to strengthen on-site monitoring in the construction process for the sections where the risk of rock burst disasters exists.

Keywords: rockburst; highway tunnel; theoretical criteria; microseismic monitoring

0 引言

岩爆是一种由于人类的工程活动而诱发的地质灾害。在高地应力区, 积累于岩体内部的弹性应变能伴随着地下工程的建设施工而释放, 若其释放过程较为突然, 则有可能发生岩体的爆裂松脱、片帮崩落甚至岩块弹射抛掷等现象, 从而形成岩爆现象。由于岩爆对施工人员及施工设备安全会产生直接威胁, 同时岩爆的产生也会影响工程的进度, 因此, 如何预测预报岩爆现象对于保障地下工程的建设施工安全具有重要意义^[1]。

由于岩爆灾害对高应力区地下工程的影响较大, 岩爆的预测预报一直以来都是国内外专家学

者研究的重点及热点, 但该问题较为复杂, 目前尚未形成一套相对成熟的理论方法, 现有的针对岩爆的预测预报研究主要包括以下几个方面:

(1) 依据现场出现的特殊地质现象进行的宏观预测法, 主要通过岩心饼裂、基坑隆起、开挖过程中的异响等特殊地质现象的分析, 结合围岩的岩体结构特征及岩石力学性质进行岩爆的宏观预测^[2];

(2) 岩石力学判据法, 主要包括有岩石强度理论判据法、岩爆倾向性指数判据法以及岩爆临界深度预测法^[3]等;

(3) 非线性理论预测法, 如模糊综合评判预

测^[4-5]、BP神经网络预测^[6-9]、突变理论预测^[10]、分形预测^[11-12]、可拓学预测^[13]、灰色理论预测^[14]等；

(4) 数值模拟预测法，主要通过数值模拟方法对地下洞室围岩应力进行计算，同时结合判别准则或者相应经验公式对岩爆的可能性进行预测^[15]；

(5) 现场监测预报法，主要包括声发射现场监测预报^[16]、微震监测预报^[17]、三维层析 X 射线法^[18]以及电磁辐射监测预报^[19]等。综上所述，针对岩爆预测预报的方法途径研究较多，但其实用性以及准确性尚需进一步的研究和探索。

本文以浙江省某深埋特长公路隧道为例，在隧址区地质调查的基础上，结合现场实测地应力数据，通过室内试验、数值模拟及多种方法，对隧道开挖过程中的典型工段可能发生的岩爆灾害进行综合分析，从而为隧道的设计优化施工提供依据。

1 工程概况及隧址区工程地质条件

在建某浙江省隧道为左右线设置，近 NW-SE 走向，全长 7388 m，最大埋深达 750 m，属于深埋特长公路隧道，是目前浙江省在建的第二长公路隧道。



图 1 隧道掌子面附近围岩结构

Figure 1 Surrounding rock structure near the tunnel face

隧址区属中-低山地貌区，其中隧道沿线山体最高点标高为 1003.7 m，具有典型的江南古陆强烈上升山地的地貌特征。隧道区域所处大地构造单元系扬子准地台~钱塘台褶带~常山~诸暨拱褶带，位于江山~绍兴深断裂西北侧。隧址区未见深大断裂通过，但受江山~绍兴深断裂影响，发育多条 NE 向压性断层，断层带节理裂隙较为发育。隧道沿线基岩主要由中风化、微风化、新鲜多斑流纹岩，晶屑、玻屑凝灰岩，角砾凝灰岩，凝灰质砂岩等岩体组成，局部穿过断裂带及破碎带。勘察资料表明，在断层附近岩体裂隙发育，岩体相对破碎；在远离

断层的位置，岩体相对较为完整，强度较高。

2 隧道围岩地应力条件分析

对于岩爆灾害，地应力是导致其产生的重要因素，因此对于隧道围岩地应力条件的准确分析是岩爆预测的基础。本研究在现场实测地应力数据的基础上，通过数值模拟分析隧道开挖过程中的隧道围岩应力分布特征，从而对隧道围岩的地应力条件进行进一步分析。

2.1 初始地应力场的实测分析

对该隧道隧址区的 3 个钻孔采用水压致裂法进行地应力测量，根据现场各钻孔实测数据，隧址区最大水平主应力变化范围为 3.9~21.36 MPa，最小主应力变化范围为 3.45~12.46 MPa，垂直应力为 1.48~12.7 MPa。对比各钻孔中所测数据，可以发现隧址区初始地应力场具有以下特点：①最大水平主应力以及最小水平主应力均高于岩体的自重应力；②随着深度的逐渐增加，水平主应力亦迅速增大；③实测数据表明，最大主应力方向为 NW13°~52°，即隧址区地应力以 NW 向挤压为主。

2.2 隧道开挖后的围岩应力分析

在地应力现场测试结果的基础上，可根据隧道开挖前的初始应力场通过数值模拟分析其开挖后的围岩地应力变化。

在数值模拟中，模型选取标号 K2468+250~K2468+430 段作为计算标段，计算模型取隧道横截面位置 80 m 高，80 m 宽的范围，按照平面应变问题分析，采用平面四节点单元划分网格，共得到 3474 单元，5684 节点。

计算模型的下边界施加竖直方向的光滑约束，左边界施加水平方向的光滑约束，上边界施加向下的竖直方向均布力，大小竖直应力取为竖向应力最大值 16.9 MPa，右边界根据地应力实测数据施加水平方向向左的均布力，计算模型及其网格划分如图 2 所示。

在初始应力计算结果的基础上，选择隧道典型的开挖断面，按照初始应力场确定的竖向和横向水平向应力进一步计算开挖后的二次应力场，开挖后的围岩最大主应力分布图如图 3 所示。

结果表明，在自重和构造作用下，大部分的隧道围岩开挖后处于受压应力状态。在隧道开挖断面的拱脚部位有压应力集中，其中最大主压应力峰值为 45.5 MPa，洞壁切向应力峰值为 33.2 MPa。

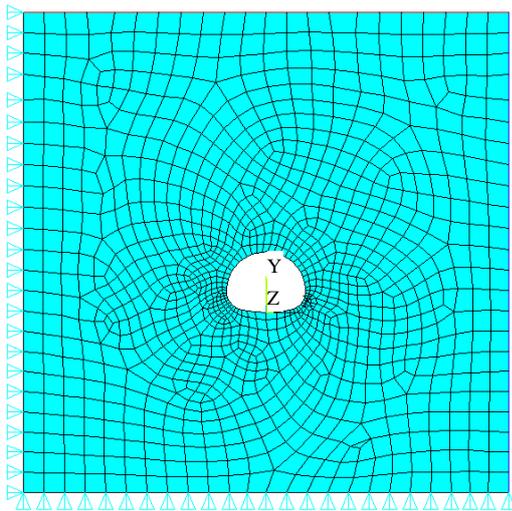


图 2 开挖前围岩应力计算模型的网格划分

Figure 2 Meshing of the calculation model of surrounding rock stress before excavation

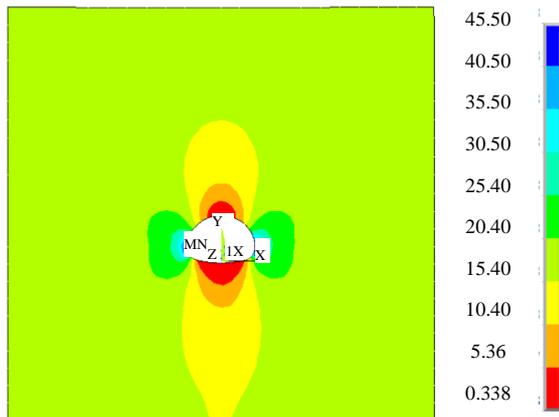


图 3 开挖后围岩最大主应力分布图 (单位: MPa)

Figure 3 Distribution of maximum principal stress of surrounding rock after excavation

3 基于强度理论判据的岩爆预测分析

基于对岩爆灾害的形成机理的研究, 同时结合实际已发生过的岩爆灾害的具体情况, 国内外的学者对岩爆的预测评价进行了大量的探索。结合本工程特征, 本文综合采用多种代表性的岩石强度理论判据法对本工程中可能发生的岩爆灾害进行分析。

目前常用到的岩石强度理论判据主要包括以下几种:

(1) Russense 判据

挪威学者 Russense 根据洞室最大切向应力 σ_θ 与岩石单轴抗压强度 σ_c 的比值判断岩爆烈度, 并提出了相应的岩爆烈度分级方法, 其判别关系如下:

$$\begin{cases} \sigma_\theta / \sigma_c < 0.2 & (\text{无岩爆}) \\ 0.2 \leq \sigma_\theta / \sigma_c < 0.3 & (\text{弱岩爆}) \\ 0.3 \leq \sigma_\theta / \sigma_c < 0.55 & (\text{中岩爆}) \\ \sigma_\theta / \sigma_c \geq 0.55 & (\text{强岩爆}) \end{cases}$$

(2) Hoek 判据

Hoek 在调查南非矿井巷道破坏情况的基础上, 根据岩石单轴抗压强度和洞室切向应力的关系建立了岩爆分级标准:

$$\begin{cases} \sigma_\theta / \sigma_c \leq 0.34 & (\text{无岩爆}) \\ 0.34 < \sigma_\theta / \sigma_c \leq 0.42 & (\text{少量片帮, I 级}) \\ 0.42 < \sigma_\theta / \sigma_c \leq 0.56 & (\text{严重片帮, II 级}) \\ 0.56 < \sigma_\theta / \sigma_c \leq 0.70 & (\text{需重型支护, III 级}) \\ \sigma_\theta / \sigma_c \geq 0.70 & (\text{严重岩爆, IV 级}) \end{cases}$$

(3) 陶振宇判据

陶振宇在前人 (Barton, Russense, Turchaninov) 的研究基础上, 结合国内岩爆实际情况, 建立了如下分级标准:

$$\begin{cases} \sigma_c / \sigma_1 > 14.5 & (\text{无岩爆, 没有声发射现象}) \\ 14.5 \geq \sigma_c / \sigma_1 > 5.5 & (\text{轻岩爆, 轻微声发射现象}) \\ 5.5 \geq \sigma_c / \sigma_1 > 2.5 & (\text{中岩爆, 较强声发射现象}) \\ \sigma_c / \sigma_1 \leq 2.5 & (\text{高岩爆, 很强声发射现象}) \end{cases}$$

通过采用上述几种理论判据对岩爆进行预测中, 最大主应力 σ_1 以及洞室最大切向应力 σ_θ 采用数值模拟计算的结果。岩石单轴抗压强度根据室内试验结果, 取 150 MPa, 各理论判据预测结果如表 1 所示。

表 1 K2468+250~K2468+430 段理论判据预测结果
Table 1 Prediction results of rockburst along K2468+250~K2468+430 based on theoretical criterions

判据类别	$\sigma_\theta(\sigma_1)$ /MPa	R_c /MPa	σ_θ/R_c /(R_c/σ_1)	预测结果
Russense 判据	33.2	150	0.22	弱
Hoek 判据	33.2	150	0.22	无
陶震宇判据	45.5	150	3.30	中

预测结果表明, 在隧道标号 K2468+250~K2468+430 段, 不同的判据所得到的预测结果存在较大差异, 对于实际应用而言, 此预测结果较难进行直接应用, 但从安全角度考虑, 仍有可能存在发生岩爆的风险。同时考虑在高地应力条件下, 岩石的破坏机制较为复杂, 其力学特征存在较高的非线性特征, 而岩爆的发生受多种因素的影响^[20], 单纯考虑岩石强度特征对于岩爆的预测具有片面性。因此, 本文在基于强度理论判据进行岩爆预测的同时,

对该区段进行开挖过程中的微震监测预报,从而对可能发生的岩爆灾害进行综合性分析。

4 基于微震监测的岩爆预报分析

岩体结构在破坏过程中总是伴随着微震现象,在较高的应力或应力变化水平的岩体内,特别是在开挖的影响下,岩体发生破坏或者原有的破裂被激活产生错动或进一步发展,在这个过程中,能量以弹性波的形式释放并传播出去。通过对弹性波信息进行采集处理,即可获取微震事件发生的位置、大小、能量、视体积、地震矩、非弹性变形及震源机制等数据。相关研究表明,对于岩爆灾害,其发生之前会伴有大量的微震现象的密集产生以及相关能量的提高,因此,可以通过地下工程施工过程中围岩所产生微震现象的采集与分析来进行岩爆灾害的预测。

本文针对该隧道典型标段采用微震监测技术进行岩爆的监测预报。所监测到的微震事件的能量及震级分布见表2、图4及表3、图5。

监测结果表明:(1)微震事件的能量分布较为分散,但位于 $1E2 \sim 1E4$ 之间的微震事件占总事件的57%;(2)微震事件的震级分布相对比较明显,位于 $-2 \sim 0$ 级之间的微震事件占总事件的80%。与同类型隧道的微震活动性相比较,该段隧道开挖施工过程中呈现一般弱微震强度特征。结合现场实际情况,施工过程中未发现明显岩爆灾害。微震监测结果及理论判据中的Hoek判据预测结果与实际情况较为吻合。

表2 微震事件能量分布情况

能量分级/J	频次	所占比例
$E < 1E1$	0	0%
$1E1 < E < 1E2$	6	11%
$1E2 < E < 1E3$	19	34%
$1E3 < E < 1E4$	13	23%
$1E4 < E < 1E5$	11	20%
$1E5 < E < 1E6$	7	12%

表3 微震事件震级分布情况

震级分级	频次	所占比例
$M < -3$	0	0%
$-3 \leq M < -2$	2	4%
$-2 \leq M < -1$	30	53%
$-1 \leq M < 0$	15	27%
$0 \leq M < 1$	9	16%
$1 \leq M$	0	0%

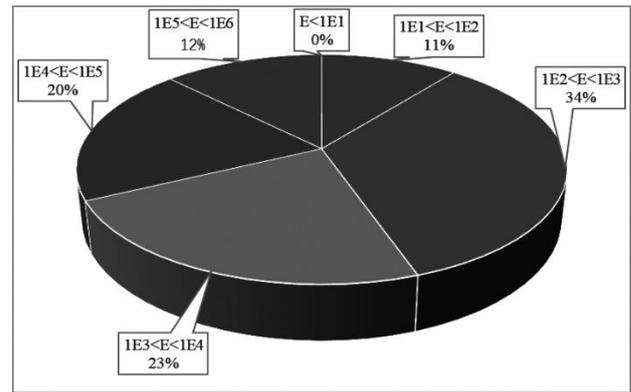


图4 能量分级统计饼状图

Figure 4 Energy grading statistics pie chart

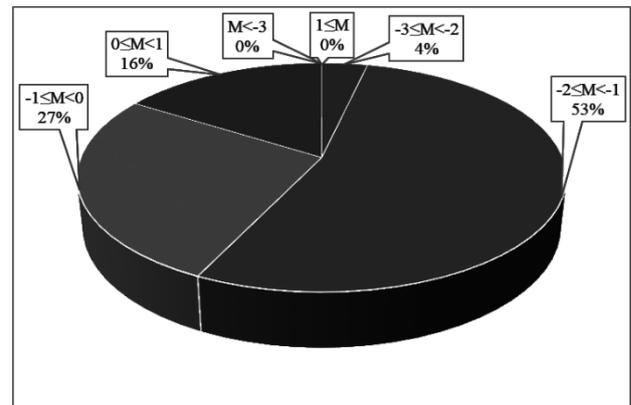


图5 震级分级统计饼状图

Figure 5 Magnitude grading statistics pie chart

5 结 语

本文在现场地质调查的基础上,结合现场测试、室内试验及数值模拟,将依据理论判据所得的岩爆预测结果与现场微震监测结果综合分析表明,不同理论判据在实际应用当中预测结果仍会存在一定差异,尤其实际应用当中,单纯采用一种理论判据可能会导致预测结果与实际情况产生较大区别。因此在采用理论判据进行岩爆预测分析的基础上,需要与现场监测进行有机结合,从而更能准确得对岩爆灾害进行预测和分析,为设计及施工优化提供依据。

由于岩爆对地下工程的危害较大,对于深埋特长公路隧道在开挖前进行岩爆灾害的预测研究具有重要意义。同时,岩体具有明显的各向异性,在岩体形成及演化过程中,受构造及地下水影响明显,且在高地应力条件下,其性质也呈现明显的非线性特征,仅通过理论判据进行岩爆预测仍然具有不确定性,并且无法准确得出可能发生岩爆的部位及相对于施工过程更加准确的时间。为保证地下工程的顺利建设,应在施工过程中针对可能发生岩爆的重

点区段, 加强现场监测及超前预报, 并进一步结合工程的具体特征开展岩爆灾害的防治研究。

参考文献:

- [1] 姜耀东. 关于煤矿冲击地压机理、预报与防治的思考[C]//中国科协学会学术部. 岩爆机理探索: 新观点新学说学术沙龙文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 23-31.
- [2] 李天斌, 肖学沛. 地下工程岩爆预测的综合集成方法[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 97-104.
- [3] 侯发亮, 王敏强. 圆形隧洞中岩爆的判据及防治措施[C]//全国岩石力学与工程学术会议. 1989.
- [4] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989(1): 34-38+54.
- [5] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493.
- [6] 彭琦, 钱爱国, 肖钰. 基于人工智能方法的岩爆预测系统[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(4): 18-24.
- [7] 陈海军, 郇能惠, 聂德新, 等. 岩爆预测的人工神经网络模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 229-232.
- [8] 孟陆波, 李天斌, 李永林, 等. 公路隧道信息化施工与计算机辅助决策系统研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(S1): 79-83.
- [9] 雷松林, 郑永来. 基于遗传算法和 BP 网络的岩爆预测[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 267-271.
- [10] 李长洪, 张立新, 张磊, 等. 灰色突变理论及声发射在岩爆预测中的应用[J]. 中国矿业, 2008, 17(8): 94-97.
- [11] 谢和平, W Pari. 岩爆的分形特征和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28-37.
- [12] 田杰, 王威, 郭小东, 等. 基于分形插值模型的岩爆预测研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 7-13.
- [13] 张德永, 张乐文, 邱道宏. 基于粗糙集的可拓评判在岩爆预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(9): 1461-1465.
- [14] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 基于组合赋权的岩爆倾向性预测灰评估模型及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 49-56.
- [15] 陈文亮, 章青, 刘仲秋. 深埋隧洞开挖岩爆数值模拟与预测[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(5): 40-44.
- [16] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1436-1440.
- [17] 马天辉, 唐春安, 唐烈先, 等. 基于微震监测技术的岩爆预测机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 470-483.
- [18] 秦剑峰, 卓家寿. 岩爆问题研究现状[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 132+136-139.
- [19] 田俊斌, 郜保平, 李宁, 等. 深部高应力区岩爆预测及防治技术研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(5): 7-12.
- [20] 胡威东, 杨家松, 陈寿根. 锦屏辅助洞(西端)岩爆分析及其防治措施[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 830-841.
- [21] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 等. 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2982-2988.