

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220420003

特长深埋隧道岩爆倾向性预测与影响因素研究*

陈贤丰¹, 李德武², 刘金松¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 岩爆倾向性预测是深埋硬岩隧道工程施工的难点, 以往研究多以隧道施工中现场监测数据为预测基础, 但预测结果存在时效性和局限性。从西南地区某特长深埋隧道工程区地应力现场实测数据出发, 对区域地应力场进行三维数值反演分析, 获取隧道轴向地应力特征, 从而对隧道施工中岩爆倾向性等级进行预测, 并利用数值模拟手段对岩爆影响因素进行对比分析, 其结果可为类似特长深埋隧道工程提供参考。研究表明: ① 实测点附近三向主应力总体趋势为: $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, 其中最大水平主应力 σ_H 值为 10.96 ~ 17.07 MPa, 方向 $N9^\circ W \sim N7^\circ E$; ② 隧道轴向最大水平主应力 σ_H 最大值为 23.88 MPa, 最小水平主应力 σ_h 较恒定; 竖向主应力 σ_v 最大值为 46.70 MPa, 其量值变化和隧道埋深呈正相关。该隧道具备岩爆发生的基本条件, 施工过程中存在中等、强烈岩爆风险; ③ 侧压系数为 0.8 时, 墙角处岩爆倾向性较大, 其他各部位倾向性相同; 埋深越大, 岩爆倾向性越大, 且各部位岩爆倾向性受埋深的影响程度基本一致; 围岩弹性模量为 40 GPa 时, 岩爆倾向性最大; 围岩内摩擦角大于 40° 时, 隧道断面各部位岩爆倾向性趋于平稳。

关键词: 深埋隧道; 岩爆预测; 地应力场反演; 影响因素

中图分类号: TU456.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1184-09

Prediction of Rockburst Tendency and Study of Influencing Factors in Extra-Long Deep-Buried Tunnels

CHEN Xianfeng¹, LI Dewu², LIU Jinsong¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Rockburst tendency prediction is a challenge in the construction of deep-buried hard rock tunnels. Previous studies have mainly relied on on-site monitoring data from tunnel construction, but these predictions are limited by their timeliness and scope. Based on the field-measured data of geostress from an extra-long deep-buried tunnel engineering area in Southwest China, a three-dimensional numerical inversion analysis of the regional stress field was conducted to obtain the axial stress characteristics of the tunnel. This enabled the prediction of rockburst tendency levels during tunnel construction. Numerical simulation methods were used to compare and analyze the influencing factors of rockburst. The results can serve as a reference for similar extra-long deep-buried tunnel projects. The research results showed that: (1) The overall trend of the three-direction principal stress near the mea-

* 收稿日期: 2022-04-20; 修回日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868038)、中国铁路兰州局集团有限公司科技研究开发计划(2020-41)资助

作者简介: 陈贤丰(1997—), 男, 工程师, 硕士研究生。主要从事铁路隧道设计理论与施工控制研究。

E-mail: chenxf1997@126.com

surement point was $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, with the maximum horizontal principal stress σ_H ranging from 10.96 ~ 17.07 MPa, oriented at N9°W ~ N7°E. (2) The maximum horizontal principal stress σ_H in the tunnel was 23.88 MPa, while the minimum horizontal principal stress σ_h was relatively constant. The vertical principal stress σ_v reached 46.70 MPa, and its variation was positively correlated with the tunnel's burial depth. The tunnel met the basic conditions for rockburst occurrence, with moderate to strong rockburst risk during construction. (3) When the lateral pressure coefficient was 0.8, the rockburst tendency was higher at the wall corners, while other locations exhibited similar tendencies. The greater the burial depth, the higher the rockburst tendency, and the impact of burial depth on rockburst tendency was generally consistent across different locations. When the elastic modulus of the surrounding rock was 40 GPa, the rockburst tendency was the largest. When the internal friction angle of the surrounding rock exceeded 40°, the rockburst tendency across the tunnel section became stable.

Keywords: deep-buried tunnel; rockburst prediction; geo-stress field inversion; influencing factors

0 引言

岩爆是高地应力区域岩体在开挖或其他外部干扰下积累的弹性变形势能突然释放,从而导致岩体破裂和弹射的动态力学现象。随着我国铁路、公路建设逐渐向高原地区、地质复杂地区延伸,沿线深埋、长大、高地应力隧道面临的岩爆风险作为隧道建设的一大难题,亟待研究与解决^[1]。

为有效应对特长深埋硬岩隧道施工中岩爆问题,国内外学者针对岩爆孕育机理、影响因素、预测方法及防治措施等方面进行了研究。冯夏庭等^[2-3]基于室内试验和现场监测将岩爆进行分类,客观描述了岩爆孕育演化的过程。魏英华等^[4]认为隧道施工过程中岩爆的发生是由于最大水平主应力、剪应力在掌子面某部位形成应力集中区,并提供数值模拟等手段验证了该理论。何满潮等^[5]认为岩体脆性程度与峰值应力共同影响不同层理砂岩岩爆的烈度等级。韩侃等^[6]利用微震监测技术对隧道开挖过程中岩体破裂进行实时监测,并有效预测了岩爆发生时间和烈度等级。J. M. Wang等^[7]基于不同隧道支护类型和开挖方式,对比分析了地下洞室岩爆倾向性等级和最优施工方法。王志佳等^[8]通过相似材料配比模型试验对独龙江隧道岩爆倾向性影响因素进行了对比分析,并总结出岩石单轴抗压强度、冲击能量指数的影响规律。张恒源等^[9]综合不同埋深、不同侧压力系数对岩爆倾向性的影响规律,得到了基于多参量的岩爆倾向性判据。田朝阳等^[10]建立了一种岩爆风险量化模型来预测开挖中最大爆坑深度,并利用室内试验和地应力场线性回归反

演等理论与已开通高岩爆风险隧道进行了对比分析。朱金养等^[11]利用钻孔摄像技术对深埋硬岩隧道围岩内结构面进行展布模型可视化分析,并深入研究了岩爆孕育过程中结构面的控制作用。

以上对于岩爆孕育机理和防治措施的研究成果颇丰,但是针对工程区地应力场对岩爆倾向性等级影响程度的研究尚不够深入,岩爆倾向性影响因素的研究不够全面和细致,且没有将系统的理论有效运用到岩爆预测工作中。有鉴于此,本文以我国西南地区某特长深埋隧道为工程背景,通过对工程区地应力的现场测量和三维数值反演分析,对该隧道施工中岩爆倾向性等级进行预测,并利用数值模拟手段对工程区侧压系数、隧道埋深、围岩弹性模量和内摩擦角对岩爆倾向性的影响规律进行系统分析,为类似高原高地应力隧道工程建设提供参考。

1 工程背景

工程区地表高程3 250 ~ 5 500 m,高差2 300 m,是典型的高山峡谷地貌,隧道工程区等高线分布如图1所示。工程区岩性单一,多为中粒角闪石-黑云母花岗岩,部分地段夹少量石英。该隧道起止里程为DK190+388 ~ DK203+461,其中单线隧道长12 482 m,车站三线隧道长591 m^[12]。隧道在其里程DK200+006处几乎垂直穿过断层破碎带。隧道最大埋深2 080 m,隧道进口处的高程为3 284 m,在进出口处分别设置2座平行导坑作为辅助坑道^[13]。隧道全长13 073 m,其中存在岩爆风险的隧道长度高达93%,被建设者称为“石头像炮弹一样飞的隧道”。

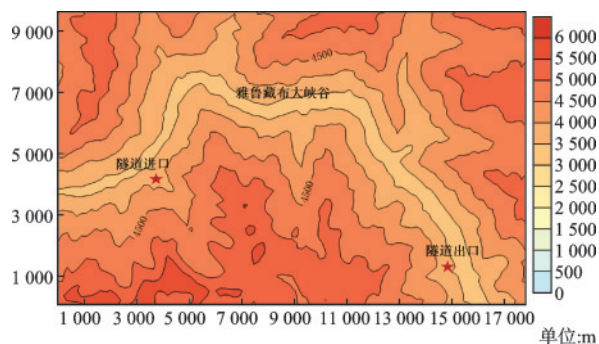


图1 隧道工程区等高线

Fig.1 Contour map of tunnel engineering area

2 工程区地应力场分析及岩爆预测

2.1 实测地应力资料分析

结合隧道工程区域及临近工程的地应力实测资料,以准确分析该区域内地应力场整体特征。通过综合分析DK-SZLSD-2钻孔、σSPD03-1钻孔和σSPD05-1钻孔的现场地应力实测数据,得到三维地应力场数值反演的基础资料^[14]。

(1)DK-SZLSD-2钻孔位于工程区附近区域DK186+327里程处,距离隧道进口约5 km。钻孔实际深度为604.45 m,静水位为68.50 m,在此钻孔的中下部选取5个位置进行基于水压致裂法的地应力测量,现场地应力测量结果见表1。深度分别为

582.60、476.90、391.80、297.40、205.60 m。此钻孔最大水平主应力 σ_H 值为10.96~17.07 MPa,最小水平主应力 σ_h 值为4.37~12.86 MPa,竖向主应力 σ_v 值为5.38~15.14 MPa,最大主应力方向 $N9^\circ W \sim N7^\circ E$ ^[15]。

(2)σSPD03-1钻孔位于隧道出口端某水电站左岸SP003洞0+94 m处,利用水压致裂法进行地应力场测量。此钻孔最大主应力 σ_1 值为11.70 MPa,方向为 $N80^\circ W$,倾角为俯角 10.6° 。中间主应力 σ_2 值为5.93 MPa,倾角为俯角 76.9° ;最小主应力 σ_3 值为1.82 MPa,倾角为仰角 7.2° 。

(3)σSPD05-1钻孔位于隧道出口端某水电站右岸SPD05洞0+89 m处,利用水压致裂法进行地应力场测量^[16]。此钻孔最大主应力 σ_1 值为7.52 MPa,方向为 $N52.1^\circ W$,倾角为仰角 17.6° ;中间主应力 σ_2 值为3.27 MPa,倾角为仰角 66.7° ;最小主应力 σ_3 值为1.58 MPa,倾角为仰角 16.2° 。

由此可知,工程区地应力测量中钻孔附近的最大水平主应力的主导方向大致是南北走向 $N9^\circ W \sim N7^\circ E$,由于峡谷断裂带的影响,北东方向的构造地应力场发生了向西的偏转。测点埋深较浅时最大水平主应力起主导作用,三向主应力值大小关系为最小水平主应力 $\sigma_h < \text{竖向主应力} \sigma_v < \text{最大水平主应力} \sigma_H$ 。此结果与断裂力学理论非常吻合,可以应用于区域三维地应力场反演工作中。

表1 工程区地应力实测数据

Table 1 Measured data of geo-stress in the engineering area

序号	测量深度/m	地应力值/MPa									破裂方位
		σ_H	σ_h	σ_v	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{xz}	τ_{yz}	
1	205.60 ~ 206.10	9.57	5.64	5.38	4.05	10.97	5.34	-0.59	0.00	0.00	$N9^\circ W$
2	297.40 ~ 298.00	10.58	7.70	7.72	5.88	12.42	7.72	-0.32	0.00	0.00	
3	391.80 ~ 392.40	11.36	8.61	10.18	8.65	11.34	10.18	-0.29	0.00	0.00	$N6^\circ W$
4	476.90 ~ 477.50	12.58	9.70	12.39	9.71	12.56	12.39	0.03	0.00	0.00	
5	582.60 ~ 583.10	17.67	13.17	15.14	13.18	17.67	15.13	0.56	0.00	0.00	$N7^\circ E$

注: σ_H 、 σ_v 、 σ_h 分别表示钻孔截面最大水平主应力、竖向主应力和最小水平主应力; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别表示钻孔截面在计算坐标系下的三向正应力; τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 分别表示钻孔截面在计算坐标系下的剪切应力

2.2 三维地应力场反演分析

通过对隧道工程区内工程地质条件、区域范围大小、实测地应力测点分布等因素进行综合分析,以隧道工程区平面 $15\ 300\text{ m} \times 9\ 000\text{ m}$ 的矩形区域作为计算域。利用AutoCAD软件将工程区等高线图导入Rhino^{3D}软件中进行模型三维化处理,得到高精度三维地质力学模型,其中模型下表面高程为

2 000 m,上表面为利用等高线图拟合出的三维曲面,可以准确表现处工程区地形地貌特征。将得到的三维地质力学模型导入FLAC^{3D}有限差分软件并进行网格划分,隧道工程区三维地质力学模型如图2所示。以高精度的六面体网格划分三维数值模型,并增加断层破碎带及峡谷断裂带的网格密度,断层破碎带在模型中的具体位置和走向如图3所示。

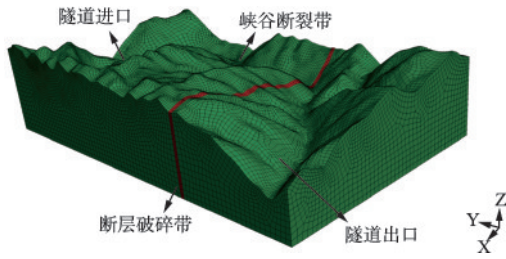


图2 三维地质力学模型

Fig.2 3D geomechanical model

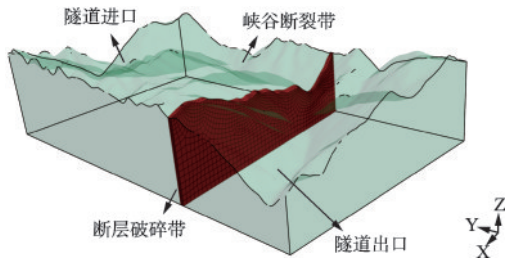


图3 断层具体位置及走向示意

Fig.3 Specific location and orientation of the fault

本次三维数值计算利用边界荷载(位移)调整法进行地应力的反演分析。具体反演过程为:①根据现场地应力数据,选择隧道进口端附近DK190+388处、且隧道出口处河谷两侧的地质环境与某水电站的实际测量钻孔情况类似的测点作为数值计算点。②在不同的边界条件下,对隧道工程区域地应力场的变化规律进行分析,并确定最优边界荷载

(位移)条件及其组合方式。③将上一步所确定的边界荷载(位移)条件施加到三维模型各边界上,并适当调整边界荷载(位移)的大小,使计算结果在方向与量值上与实测地应力值及断层力学理论分析结果达到最佳拟合。由此可反演获得较为准确可靠的隧道工程区初始地应力场,沿隧道轴线方向纵剖面上的应力分布云图如图4所示。

可以看出,工程区最大主应力 σ_1 量值呈现出随隧道埋深增加而增高的趋势,沿隧道轴线方向分布范围为4.24~49.61 MPa。竖向应力 σ_z 沿隧道轴线方向分布范围为1.25~46.70 MPa,随着埋深的变化,其变化趋势与最大主应力云图基本一致。最大主应力量值与地层岩性关系不大,但在断层破碎带处发生明显降低,断层两侧的里程则趋于正常。中间主应力 σ_2 量值随着隧道埋深增加而增高,沿隧道轴线方向分布范围为1.55~15.93 MPa,但是在河谷附近,河谷下切过程中的卸荷作用导致工程区局部区域存在应力松弛现象。最小主应力 σ_3 沿隧道轴线方向分布范围为0.61~13.10 MPa,其变化趋势与最大主应力类似。

从图4应力分布云图中以里程DK190+200进口端作为起点,取隧道轴线方向每600 m为一个段落,提取该段落隧道轴线方向上的最大地应力分量,将其进行坐标转换后得到隧道轴线方向地应力分布特征曲线,如图5所示。可以看出,沿隧道轴线

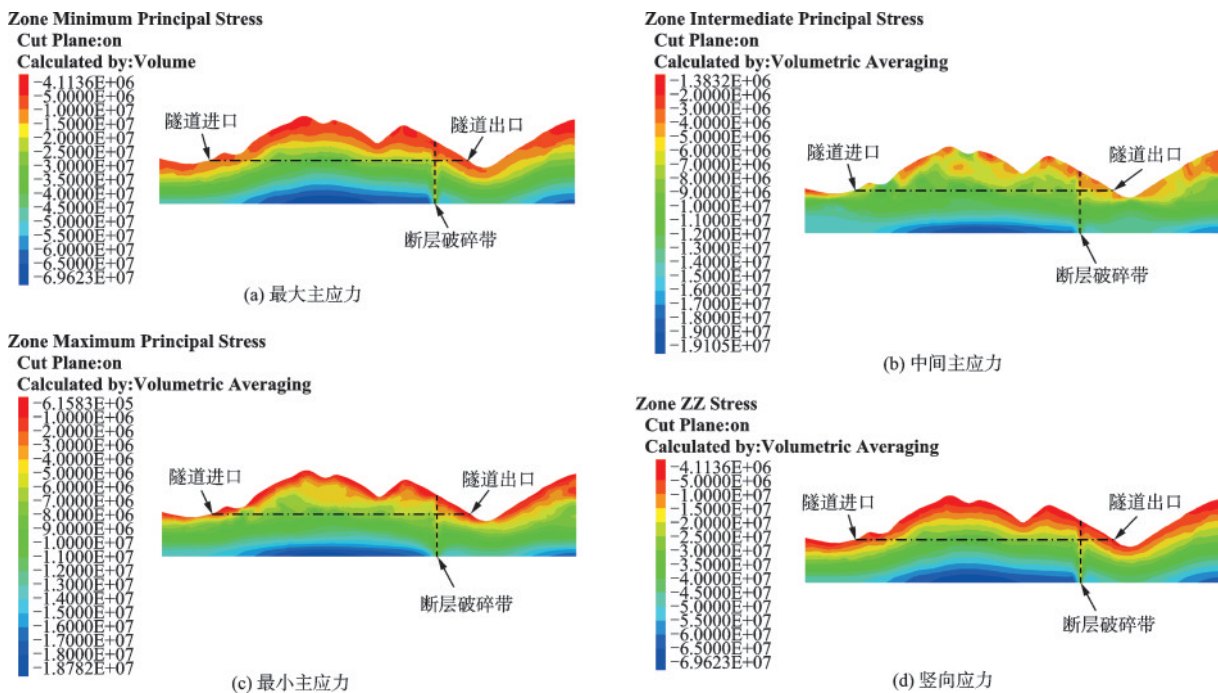


图4 隧道轴向纵剖面应力分布云图

Fig.4 Stress distribution cloud map of axial longitudinal section of the tunnel

方向,最大水平主应力 σ_H 从最大埋深附近向进出口端逐渐减小,DK194+400~DK198+600深埋段,最大水平主应力数值范围为18.53~23.88 MPa,处于较恒定状态;最小水平主应力 σ_h 值为6.96~12.86 MPa,分布较均匀;竖向应力 σ_v 从最大埋深处向进出口端逐渐减小,在里程DK200+006断层破碎带附近骤降至31.49 MPa,由于隧道埋深较大且构造作用不明显,此时竖向主应力仍占主导地位。隧道的深埋段主要受竖直的重力应力场影响,在进口和出口端附近的水平构造应力占主导地位。

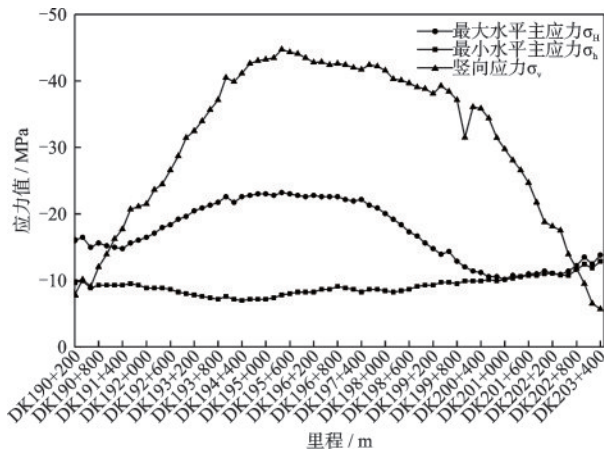


图5 隧道轴向初始地应力分布特征曲线

Fig.5 Curves of initial geo-stress distribution along the tunnel axial direction

2.3 基于地应力特征的岩爆预测

由于岩爆的成因复杂,控制因素多样,且地层岩性和地应力状态在岩爆的形成过程中起着决定性的作用。Russense判据主要从围岩应力的角度来评估岩爆倾向性,为了真实反映围岩的应力状态,计算中通常采用描述硬岩力学行为的弹塑性模型。由于隧道工程区侧压系数较大、水平切向应力分布较明显,选用Russense应力强度比判据作为岩爆倾向性等级预测的准则。首先对隧道轴向不同里程处围岩进行采样,通过点荷载试验计算出岩石单轴抗压强度 R_c ,其判别关系式如下:

$$\frac{\sigma_{\theta \max}}{R_c} \begin{cases} < 0.2 & \text{无岩爆} \\ [0.2, 0.3) & \text{轻微岩爆} \\ [0.3, 0.55) & \text{中等岩爆} \\ \geq 0.55 & \text{强烈岩爆} \end{cases} \quad (1)$$

假设隧道断面形状为圆形,式(1)中 σ_{θ} 为隧道洞壁最大切向应力,可以按照式(2)得到^[17]。在此基础上,通过坐标变换得到的最大主应力为 σ_H ,竖向

主应力为 σ_v 。

$$\sigma_{\theta} = \begin{cases} 3\sigma_b - \sigma_v, & \sigma_H \geq \sigma_v \\ 3\sigma_v - \sigma_H, & \sigma_v > \sigma_H \end{cases} \quad (2)$$

结合隧道里程DK190+200~DK203+400轴线方向最大切向应力和周围岩石单轴饱和抗压强度,根据Russense岩爆判据,可对该隧道施工中岩爆倾向性等级进行预测,如图6所示。

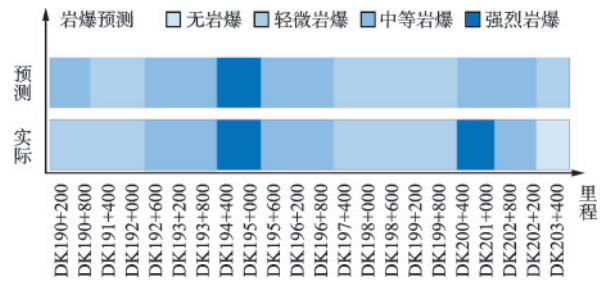


图6 隧道轴向分段岩爆预测结果

Fig.6 Segmented rockburst prediction results along the tunnel axial direction

可以看出,预测所得的岩爆等级与实际施工中岩爆等级吻合度较高,该结论与工程经验中数值计算和工程实际存在较大离散性的认识不一致,这是由于本文在进行隧道施工中岩爆等级划分时,取隧道轴向某一段落(600 m)中岩爆最高等级为预测结果,而非某一具体里程处岩爆发生等级。在实际施工中,可以参考该段落岩爆风险最高等级进行有针对性的岩爆防治措施。由图6可以看出,在该隧道里程DK190+200~DK190+800、DK200+400~DK201+000和DK202+200~DK203+400三处岩爆分级预测出现了误判,一方面是由于勘察前期室内试验岩石样本较少,导致隧道浅埋段岩石单轴抗压强度取值偏高;另一方面,现场实际施工中采用的开挖方法、断面形式、超挖和欠挖等因素都会对岩体破裂产生影响。基于地应力反演的岩爆趋势预测精度很高,预测结果与实际情况相比相对安全,对施工控制中的防治措施具有较高的科学指导意义。

3 隧道岩爆倾向性影响因素分析

由于工程区地应力场特征和地层岩性是影响隧道施工中岩爆倾向性的两个决定性因素,所以此处基于第2章FLAC^{3D}三维地质力学模型进行数值建模,针对工程区不同侧压系数、不同隧道埋深、不同围岩弹性模量和不同围岩内摩擦角等因素进行

岩爆倾向性对比分析,并进一步总结出不同影响因素下岩爆倾向性等级的变化规律^[18]。在数值建模参数选取时采用控制单一变量的方法,当单一变量取多参数进行分析时,其他变量若无特殊标注,则埋深为1 200 m,侧压系数取1,围岩内摩擦角为50°,围岩弹性模量取36 GPa。首先在该三维数值模型中提取DK195+100里程处隧道监测断面拱顶、拱肩、边墙和墙角四个部位的最大切向应力值,将其代入到Russense判据中即可进行岩爆倾向性等级预测,从而得到各因素对岩爆倾向性的影响规律。

3.1 侧压系数对岩爆的影响

选取0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6这六组侧压系数进行分析,以此来研究侧压系数对隧道岩爆倾向性的影响规律。提取隧道监测断面拱顶、拱肩、边墙、墙角四个部位的最大切向应力,基于Russense判据绘制隧道监测断面各部位岩爆倾向性随侧压系数的变化规律曲线,如图7所示。

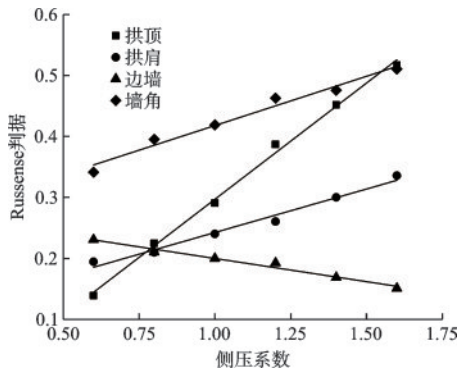


图7 侧压系数和Russense判据关系曲线

Fig.7 Relationship between lateral pressure coefficient and Russense criterion

可以看出,随着侧压系数的增大,拱顶、拱肩和墙角部位的Russense判据值逐渐增大,而边墙部位的Russense判据值却逐渐减小。在侧压系数小于0.8的情况下,隧道断面不同部位岩爆倾向性大小排序为:墙角>边墙>拱肩>拱顶;而当侧压系数大于0.8的情况下,隧道断面不同部位岩爆倾向性大小排序却变成了墙角>拱顶>拱肩>边墙;当工程区侧压系数等于0.8时,隧道断面拱顶、拱肩、边墙部位的岩爆倾向性大小相同。除此之外,从各个拟合曲线的斜率可知,在拱顶处的Russense判据值随侧压系数的变化最为显著,表明侧压系数的增加对拱顶部位岩爆倾向性的影响最大,而墙角、拱肩部

位次之,侧压系数对边墙岩爆倾向性的影响最小。

3.2 隧道埋深对岩爆的影响

为了探究隧道埋深和Russense岩爆判据值之间的影响规律,选取400、600、800、1 000、1 200、1 400 m六组隧道埋深量值进行分析。提取隧道监测断面拱顶、拱肩、边墙、墙角四个部位的最大切向应力和轴向应力值,基于Russense判据绘制隧道监测断面各部位岩爆倾向性随隧道埋深的变化规律曲线,如图8所示。

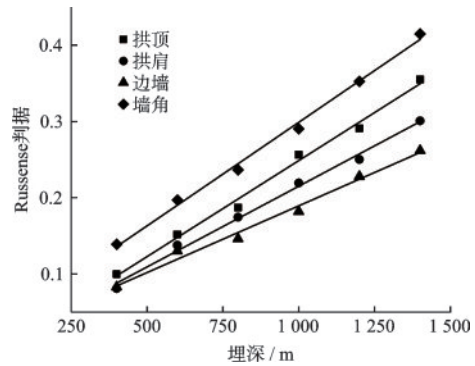


图8 隧道埋深和Russense判据关系曲线

Fig.8 Relationship between tunnel depth and Russense criterion

可以看出,随着隧道埋深的增大,在隧道监测断面上,岩爆倾向性的判据值是线性增加的,即岩爆的倾向性是逐步增高的。随着隧道埋深的增大,监测断面各部位岩爆倾向性大小排序保持不变,依次是墙角>拱顶>拱肩>边墙。不同隧道埋深对其断面不同部位发生岩爆倾向性大小的影响也各不相同,在隧道埋深由400 m变化为1 400 m的过程中,拱顶处的Russense判据值增幅为0.255 2,拱肩处的Russense判据值增幅为0.219 9,边墙处的Russense判据值增幅为0.178 9,墙角处的Russense判据值增幅为0.275 8,其岩爆倾向敏感性排序为墙角>拱顶>拱肩>边墙。此时,该隧道发生岩爆的临界埋深为650 m,这一数值大于国际岩石力学学会研究得出的临界深度,这是由于本文数值模型的其他参数取值对岩爆风险有较强的趋向性。

3.3 围岩弹性模量对岩爆的影响

弹性模量是岩体变形的重要物理力学参数,在抵抗岩体剪切、拉压等构造作用中充当重要角色,所以隧道断面各部位岩爆倾向性大小也会受其影响。为了探究地层岩体弹性模量对岩爆倾向性的

影响规律,选取 28、32、36、40、44、48 GPa 这六组弹性模量进行对比分析。提取隧道监测断面拱顶、拱肩、边墙、墙角四个部位的最大切向应力和轴向应力值,基于 Russense 判据绘制隧道监测断面各部位岩爆倾向性随围岩弹性模量的变化规律曲线,如图 9 所示。

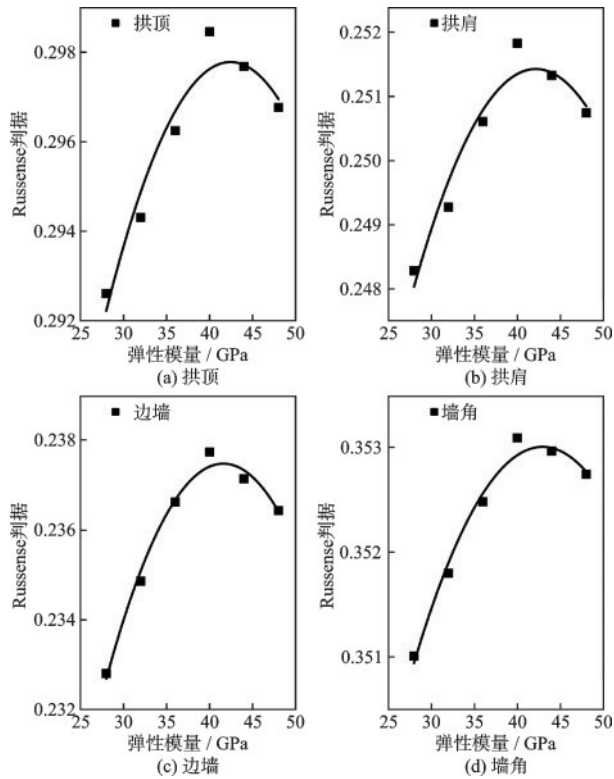


图9 弹性模量和 Russense 判据关系曲线

Fig.9 Relationship between elastic modulus and Russense criterion

可以看出,当弹性模量增大时,监测断面各部位的岩爆倾向性判据值不会持续上升,而是呈现出先增大后减小的变化趋势。在隧道工程区地层弹性模量为 28~40 GPa 的情况下,随着弹性模量的增加,监测断面各个部位的岩爆判据值随之增大,即岩爆的倾向性随之持续增高。这是由于在地应力条件不变的情况下,岩体刚度逐渐增大,岩体内的弹性变形能逐渐积聚,导致岩爆倾向性逐渐增高。当地层岩体弹性模量为 40 GPa 时,其岩爆倾向性最高。在 40~48 GPa 的弹性模量条件下,监测断面各个部位的岩爆倾向性判据值随弹性模量的增加而逐渐减小,即岩爆的倾向性逐渐降低。这是因为地层岩体弹性模量逐渐增高,在地应力条件不变的情况下,围岩开挖卸荷导致岩体内释放的弹性变形能尚未达到岩体破裂基本条件,所以此时岩爆倾向性

逐渐降低。隧道断面不同部位岩爆倾向性排序随着围岩弹性模量增长均保持为墙角>拱顶>拱肩>边墙。

3.4 围岩内摩擦角对岩爆的影响

不同围岩内摩擦角对岩体的抗剪强度有一定的影响,从而对隧道施工中的围岩初始地应力、二次应力值有一定影响,进而影响岩爆倾向性的高低^[19]。选取 10°、20°、30°、40°、50°、60° 这 6 组围岩内摩擦角量值进行分析,以此探究地层岩体内摩擦角对岩爆倾向性的影响规律。提取隧道监测断面拱顶、拱肩、边墙、墙角四个部位的最大切向应力和轴向应力值,基于 Russense 判据绘制隧道监测断面各部位岩爆倾向性随围岩内摩擦角的变化规律曲线,如图 10 所示。

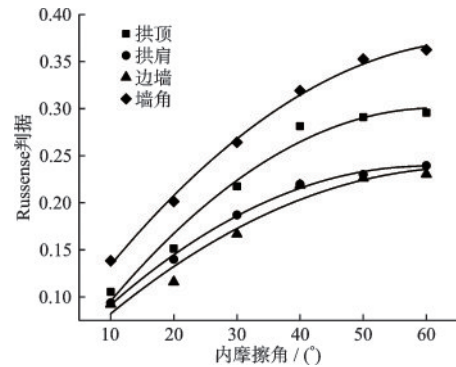


图 10 内摩擦角和 Russense 判据关系曲线

Fig.10 Relationship between internal friction angle and Russense criterion

可以看出,当地层岩体内摩擦角为 10°~60° 时,隧道监测断面各部位岩爆判据值均随着围岩内摩擦角的增加而增大,即岩爆的倾向性随之持续增高,而当岩体内摩擦角大于 40° 时,监测断面各个部位的岩爆倾向性判据值的增幅都会逐步降低,且曲线均逐渐趋于稳定。这是因为当围岩内摩擦角大于 40° 时,在地应力条件不变的情况下,围岩开挖卸荷导致岩体内释放的弹性变形能的变化趋于稳定,所以此时岩爆倾向性的变化趋于稳定。隧道断面不同部位岩爆倾向性排序随着围岩内摩擦角的增大均保持为墙角>拱顶>拱肩>边墙。此时,该隧道围岩发生岩爆的临界内摩擦角为 20°。

4 结 论

以我国西南地区某特长深埋隧道岩爆预测的

研究为背景,从隧道工程区地应力现场实测数据出发,对区域地应力场进行三维数值反演分析,获取隧道轴向地应力特征,从而对隧道施工中岩爆倾向性等级进行预测,并利用数值模拟手段对岩爆影响因素进行了对比分析。得到以下结论:

(1) 钻孔实测点附近测量深度范围内地应力总体趋势表现为:最大水平主应力 σ_H 值为 10.96 ~ 17.07 MPa,最小水平主应力 σ_h 值为 4.37 ~ 12.86 MPa,竖向主应力 σ_v 值为 5.38 ~ 15.14 MPa,最大主应力方向 $N9^\circ W \sim N7^\circ E$ 。三向主应力值的关系总体为: $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 。

(2) 基于三维地应力场数值反演分析得到隧道轴线方向地应力场分布规律为:最大水平主应力 σ_H 最大值为 23.88 MPa,其量值沿最大埋深附近向进出口方向逐渐减小,深埋段最大水平主应力处于恒定状态;最小水平主应力 σ_h 分布较恒定;竖向主应力 σ_v 最大值为 46.70 MPa,其量值变化和隧道埋深呈正相关。隧道具备岩爆发生的基本条件,施工中存在中等、强烈岩爆风险。

(3) 以 Russense 判据为评判标准,采用数值模拟方法对隧道岩爆倾向性影响因素进行分析。侧压系数为 0.8 时,边墙、拱肩、拱顶处岩爆倾向性相同,墙角处较大;埋深越大,岩爆倾向性越大,且隧道各部位岩爆倾向性受埋深的影响程度相同;围岩弹性模量为 40 GPa 时,岩爆倾向性最大;围岩内摩擦角大于 40° 时,隧道断面各部位岩爆倾向性趋于平稳。

参考文献:

- [1] 郭长宝,吴瑞安,蒋良文,等.川藏铁路雅安-林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J].现代地质,2021,35(1):1-17.
Guo C B, Wu R A, Jiang L W, et al. Typical geological hazards and engineering geological problems of the Ya'an-Lyingzhi section of the Sichuan-Tibet Railway [J]. Modern Geology, 2021, 35(1): 1-17. (in Chinese)
- [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(4):649-673.
Feng X T, Xiao Y X, Feng G L, et al. Research on the process of rockburst inoculation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649-673. (in Chinese)
- [3] Feng X T, Liu J B, Chen B R, et al. Rockburst monitoring, early warning and control in deep metal mines [J]. Engineering, 2017, 3(4): 233-249.
- [4] 魏英华,柳飞.高地应力隧道岩爆机理数值模拟分析[J].现代隧道技术,2020,57(6):46-54.
Wei Y H, Liu F. Numerical simulation analysis of rockburst mechanism in high in situ stress tunnels[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(6): 46-54. (in Chinese)
- [5] 何满潮,李杰宇,任富强,等.不同层理倾角砂岩单向双面卸荷岩爆弹射速度实验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(3):433-447.
He M C, Li J Y, Ren F Q, et al. Experimental investigation on rockburst ejection velocity of unidirectional double-face unloading of sandstone with different bedding angles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 433-447. (in Chinese)
- [6] 韩侃,陈贤丰,杨文斌,等.基于微震监测的川藏铁路某隧道岩爆预测研究[J].铁道工程学报,2020,37(11):90-95.
Han K, Chen X F, Yang W B, et al. Research on rockburst prediction of a tunnel of Sichuan-Tibet Railway based on microseismic monitoring [J]. Chinese Journal of Railway Engineering, 2020, 37(11): 90-95. (in Chinese)
- [7] Wang J M, Zheng X H, Zhou J F. Practices on rockburst prevention and control in headrace tunnels of jinping II hydropower station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(3): 258-268.
- [8] 王志佳,揭基红,李胜民,等.独龙江隧道岩爆相似材料配比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(2):279-285.
Wang Z J, Jie J H, Li S M, et al. Experimental study on the proportion of similar materials for rockburst in Dulongjiang tunnel[J]. Chinese Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 279-285. (in Chinese)
- [9] 张恒源,范俊奇,郭佳奇,等.基于多参量判据的深地下工程岩爆倾向性研究[J].高压物理学报,2022,36(2):176-189.
Zhang H Y, Fan J Q, Guo J Q, et al. Research on rockburst tendency of deep underground engineering based on multi-parameter criterion[J]. Acta High-Pressure Physics, 2022, 36(2): 176-189. (in Chinese)
- [10] 田朝阳,兰恒星,张宁,等.某交通线路色季拉山隧道高地应力岩爆风险定量预测研究[J].工程地质学报,2022,30(3):621-634.
Tian C Y, Lan H X, Zhang N, et al. Quantitative pre-

- diction of rockburst risk in high ground stress of Sejila Mountain Tunnel in a traffic line [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30 (3): 621-634. (in Chinese)
- [11] 朱金养, 郭浩森, 罗文俊. 深埋硬岩隧洞岩爆风险与结构面倾角关系探讨[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(1): 60-69.
- Zhu J Y, Guo H S, Luo W J. Discussion on the relationship between rockburst risk and dip angle of structural plane in deep hard rock tunnel [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43 (1): 60-69. (in Chinese)
- [12] 田四明, 赵勇, 石少帅, 等. 川藏铁路拉林段隧道典型岩爆灾害防控方法及应用[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(6): 71-80.
- Tian S M, Zhao Y, Shi S S, et al. The prevention and control method and application of typical rockburst disasters in the Lalin section of the Sichuan-Tibet Railway [J]. *China Railway Science*, 2020, 41(6): 71-80. (in Chinese)
- [13] 陈贤丰, 李德武, 韩侃. 巴玉特长隧道初始地应力场反演及岩爆预测[J]. *铁道建筑*, 2022, 62(1): 101-106.
- Chen X F, Li D W, Han K. Inversion analysis of initial in situ stress field and rockburst prediction for bayu extra long tunnel [J]. *Railway Architecture*, 2022, 62 (1): 101-106. (in Chinese)
- [14] Lin H B. In situ stress measurement and surrounding rock stability analysis of the gaoligong mountain tunnel [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 2974: 501-504.
- [15] 王庆武, 巨能攀, 杜玲丽, 等. 拉林铁路桑日至加查段三维地应力场反演分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(4): 1450-1462.
- Wang Q W, Ju N P, Du L L, et al. Inversion analysis of three-dimensional in situ stress field in the Sangri-Jiacha section of the Lalin Railway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4): 1450-1462. (in Chinese)
- [16] 王庆武, 巨能攀, 杜玲丽, 等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 88-94, 100.
- Wang Q W, Ju N P, Du L L, et al. Research on rockburst prediction and engineering prevention in deep and long tunnels [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2016, 43(6): 88-94, 100. (in Chinese)
- [17] 张敏, 黄健, 巨能攀, 等. 川藏铁路长大深埋隧道地应力场反演分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(4): 1232-1238, 1257.
- Zhang M, Huang J, Ju N P, et al. Inversion analysis of in situ stress field in long and deep buried tunnels of Sichuan-Tibet Railway [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(4): 1232-1238, 1257. (in Chinese)
- [18] Hai Y Z, Guang D W. Surrounding rock stability analysis and rockburst prediction of underground cavity in high in situ stress [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 2091: 594-597.
- [19] 苏永华, 曹卫文, 曾艳剑. 喀喇昆仑公路深埋隧道岩爆特征及影响因素分析[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(6): 2586-2594.
- Su Y H, Cao W W, Zeng Y J. Analysis of rockburst characteristics and influencing factors of deep buried tunnels on Karakoram Highway [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(6): 2586-2594. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)