

文章编号: 1006-6616 (2017) 06-0893-11

木寨岭深埋隧道北段地应力测量与围岩稳定性分析

张 鹏^{1,2}, 孙治国³, 王秋宁⁴, 丰成君^{1,2}, 孙明乾^{1,2}, 谭成轩^{1,2},
吴永东⁵, 甘惟平⁵

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100035;

4. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068;

5. 中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 基于兰渝铁路木寨岭深埋隧道工程区活动断裂调查和 3 个钻孔水压致裂地应力测量, 获得了木寨岭隧道工程区北段的现今地应力分布特征, 结果表明, 北段工程区最大水平主应力为 38.38 MPa, 属于高地应力区; 三个主应力的关系为 $S_H > S_h > S_v$, 表明该区地壳浅表层现今构造活动以水平运动为主, 主应力关系有利于逆断层的发育和活动; 最大水平主应力优势方向为 NE, 反映穿越隧道北段的 NWW 向主要断裂带具有逆冲兼反时针扭动活动特征。根据地应力测量结果、相关理论及判据认为: 隧道北段横截面形状以水平长轴、垂直短轴, 且长短轴之比近似于隧道截面上侧压力系数的椭圆形为宜; 隧道北段在埋深范围开挖时, 硬岩具有岩爆发生的可能性, 软岩具有发生严重挤压变形的背景。该成果为深入研究隧道区应力场特征, 分析隧道围岩稳定性, 科学设计隧道断面形状、结构和强度等工程地质问题提供了依据。

关键词: 木寨岭隧道; 地应力测量; 围岩稳定性; 岩爆; 软岩变形

中图分类号: TU45

文献标识码: A

0 引言

兰渝铁路是我国正在建设的大型重点工程, 是衔接我国西北、西南地域之间的最快速和便捷通道, 也是渝、新、欧国际铁路的重要组成部分, 并将成为与京广线、京沪线并列的三条南北铁路大动脉之一。在建兰渝铁路甘川段地处活动强度较高的南北构造带, 受构造活动的影响, 地壳变形十分强烈、构造应力场复杂, 地质环境非常脆弱, 地质灾害频发。截至 2015 年 11 月, 在建兰渝铁路 99% 的路段已经完工, 仅剩穿越活动断裂带的 3 条长隧道因地质条件复杂和高地应力导致的隧道大变形等重大工程地质问题, 尚未完工, 且已造成建成隧道发生变形破坏, 直接经济损失数亿

元。其中穿越临潭—宕昌断裂带位于岷县境内的木寨岭隧道工程地质问题最为严重。

木寨岭隧道为极高风险双洞单线特长隧道, 长约 20 km, 被称为是全国铁路高风险隧道之最^[1~2]。该隧道构造地质条件复杂, 穿越临潭—宕昌断裂带及多个背斜和向斜构造, 构造应力复杂, 隧道多处可见由于应力集中而造成底鼓、侧胀、顶脱落等破坏形式, 且穿越板岩及炭质板岩等软弱岩体约占隧道长度的一半, 围岩稳定性差, 并具有瓦斯突出的危险。木寨岭隧道因严重的围岩大变形^[3~8], 导致支护破坏、衬砌变形、路面底拱等工程病害问题, 致使施工停滞, 且已建成的隧道衬砌变形破坏段必须炸毁重新施工。

针对以上存在的严重工程地质问题, 通过现场踏勘, 在木寨岭隧道北段开展了 3 个关键点水压

收稿日期: 2017-04-30

基金项目: 中国地质调查局项目 (12120113038000, DD20160271, 1212010914025, DD20160267, 12120113012100)

作者简介: 张鹏 (1986-), 男, 博士, 助理研究员; 主要从事地应力测量与监测、区域地壳稳定性评价、构造应力场等研究工作。E-mail: zhangpeng0713@163.com

致裂地应力测量，获得了木寨岭隧道北段最大、最小水平主应力的方向和大小，揭示了木寨岭隧道北段的现今地应力分布状态。结合区域构造地质作用、断裂活动方式及木寨岭隧道规划线路，计算了沿隧道轴线上横断面应力状态，提出了隧道北段横断面形状为长轴在水平向的椭圆形、避免隧道顶部和底部由于断裂活动诱发应力集中而造成破坏的建议，分析了隧道开挖过程中围岩稳定性问题，得到隧道围岩在现今应力环境下硬岩具备发生岩爆的可能和软岩产生大变形的风险的认识，为科学设计隧道断面形状、结构和强度等提供了地质依据。

1 区域地质背景

木寨岭隧道工程区在大地构造上属于青藏高原东北缘秦岭—昆仑纬向构造体系带，位于鄂尔多斯、祁连、柴达木、巴颜喀拉和华南五个活动

地块的交接区，地处方向和性质不尽相同的活动断裂之间构造转换的地区^[1]；木寨岭隧道处于青藏高原东北隅现今构造强烈活动区，区域构造活动强烈，多期次构造活动叠加，褶皱、断层及其破碎带极其发育^[2,9]（见图1、图2），并被现今强烈活动的区域性地震断裂带所包围：北侧为海原地震断裂带（1920年发生8.5级大地震）和西秦岭北缘地震断裂带（1654年发生8级大地震）、西侧为东昆仑地震断裂带（2001年发生8.1级大地震）、南侧为龙门山地震断裂带（2008年发生8.0级大地震）、东侧为南北地震断裂带之川陕交汇部位（1879年发生8级大地震），木寨岭隧道穿越长期活动的临潭—宕昌地震断裂带（2013年7月22日在岷县境内发生了6.6级大地震）。由于木寨岭隧道外围处于强烈活动的区域性地震断裂带中，而其穿越的是现今仍强烈活动的临潭—宕昌地震断裂带，在二者同作用下，极易造成构造应力和能量集中，导致隧道变形破坏而影响其稳定性。

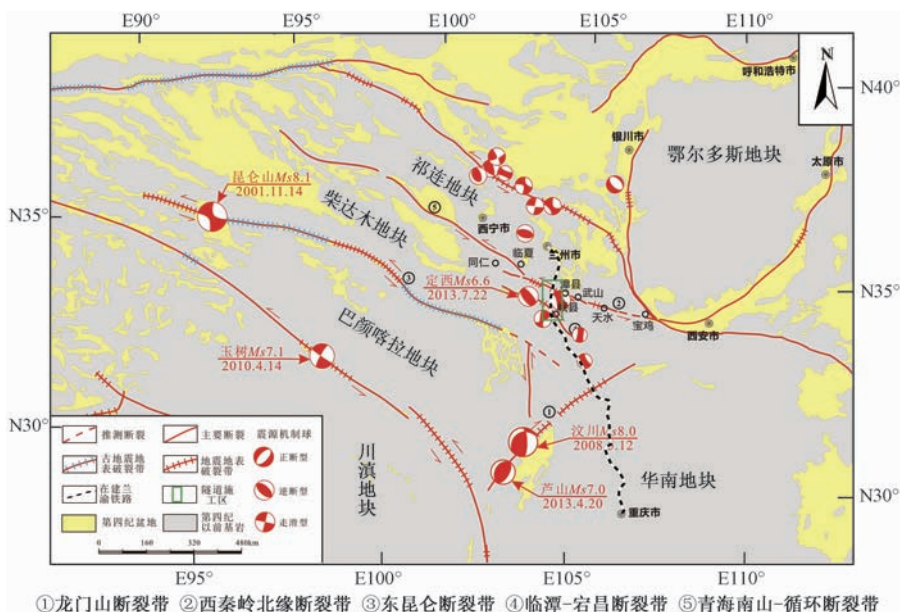
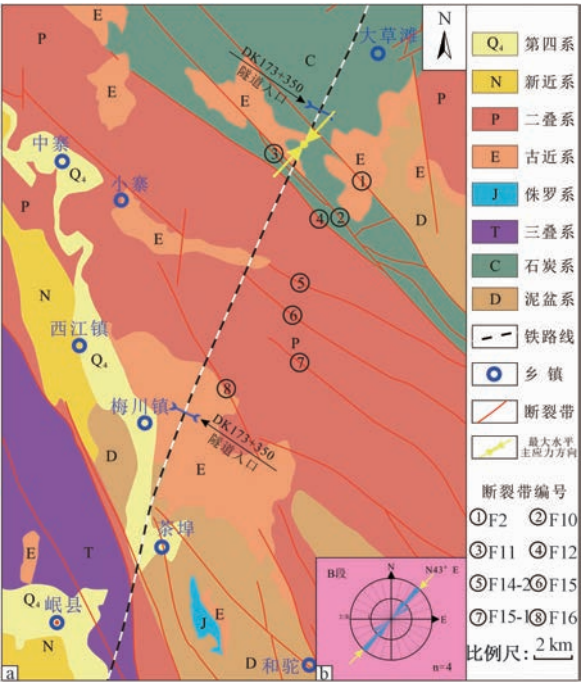


图1 兰渝铁路木寨岭隧道区域地质构造单元划分图

Fig.1 Distribution of regional geological tectonics of the Muzhailing railway tunnel

对木寨岭隧道工程区影响较大的深大断裂带主要有西秦岭北缘断裂带、临潭—宕昌断裂带。西秦岭北缘断裂带既是重要的地震带，也是分隔中国西部地区地质构造、地理及地壳结构的分界线，走向北西西，长约300 km，断裂带由多条次级断裂组成，第四纪晚期以来表现出反时针扭动兼挤压的运动特征^[10~12]。临潭—宕昌断裂带由多条规模不等、互相平行或者斜交的断裂组合而成，

为一向北凸出的弧形构造，该断裂在岷县以西一分为二为南、北2条，在岷县的东南地区归为一体，一直延伸到宕昌；该断裂全长约250 km，走向北西，倾角50°~70°，具逆冲兼反时针扭动性质。该断裂带于2013年7月22日在定西市岷县北部发生的Ms6.6级地震，震中距离在建兰渝铁路木寨岭隧道仅数公里^[13~14]。



a—工程地质图；b—最大主应力方向分布图

图 2 木寨岭隧道工程地质图和北段地应力测量平面图

Fig. 2 Engineering geological plan and in-situ stress measurement of the north section of the Muzhailing tunnel

2 木寨岭隧道北段地应力测量

2.1 测量方法与测点分布概述

测量采取的是国际岩石力学学会试验方法委

员会建议的水压致裂地应力测量方法^[15~20]，该方法是岩体力学方法之一。因该方法无需已知岩石力学参数可以得到应力值，测量结果可靠、操作便捷、可重复与连续性测试，尤其是可直接确定最小主应力和测试深度较深等优点，在矿山、铁路与公路隧道、水利水电、选址建设等工程领域以及区域地壳稳定性评价、地球动力学研究以及地震预报等研究领域得到了广泛应用，是目前深孔地应力测量的先进方法之一^[21]。根据钻孔岩芯的 RQD 值（岩石质量指标）与岩石的力学性质指标选取测试段进行测试，在木寨岭隧道工程区北段共进行了 3 个钻孔水压致裂地应力测量。测量点概况见表 1，其中，三个钻孔岩性均以砂岩为主，并夹有部分板岩互层；三个钻孔的编号分别为 B1、B2 和 B3，对应的深度分别为 66.0 m、63.1 m 和 67.4 m。三个测点在隧道中的相对位置详见图 3。

表 1 木寨岭隧道地应力测量点概况

Table 1 Survey of in-situ stress measurement spots in the Muzhailing tunnel

钻孔编号	钻孔深度/m	钻孔岩性
B1	66	砂岩夹板岩
B2	63.1	砂岩夹板岩
B3	67.4	砂岩夹板岩

2.2 地应力测量结果

本次地应力测量主要分布在木寨岭隧道北段，根据地应力测试选取测试段的条件，结合钻孔详细地质编录、岩石节理裂隙的统计结果、岩芯

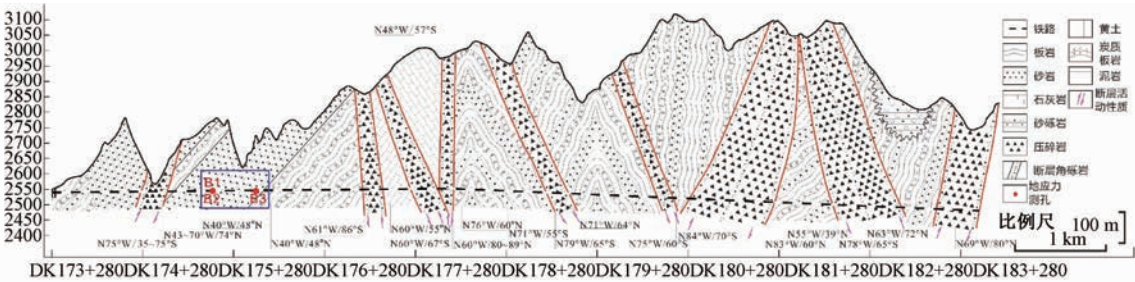


图 3 木寨岭隧道北段测量点及岩性分布图

Fig. 3 Distribution of Lithology and measuring spots in the north section of the Muzhailing tunnel

的 RQD 值及力学性质等，进行随深度系统地水压致裂地应力测量^[22]，在三个钻孔成功进行了 10 段压裂测试。根据压裂测试曲线的初步分析，考虑测量结果随深度分布的合理性和科学性，分别在三个钻孔中选取了 4 个压裂深度段进行印模定向测试，以确定钻孔附近地壳浅表层现今最大

水平主应力方向。其中，钻孔 B1 进行了 4 段压裂测试和 2 段印模定向测试；钻孔 B2 进行了 3 段压裂测试和 1 段印模定向测试；钻孔 B3 进行了 3 段压裂测试和 1 段印模定向测试。在测量过程中，严格按照国际岩石力学学会的规范和行业标准进行。地应力测试水压致裂测量曲线如图 4

所示，各钻孔测量深度段测量曲线上的特征点在测量曲线上较为明确，测量结果可靠。三个钻孔

随深度段水压致裂测量曲线与测试结果见图 4、图 5 和表 2。

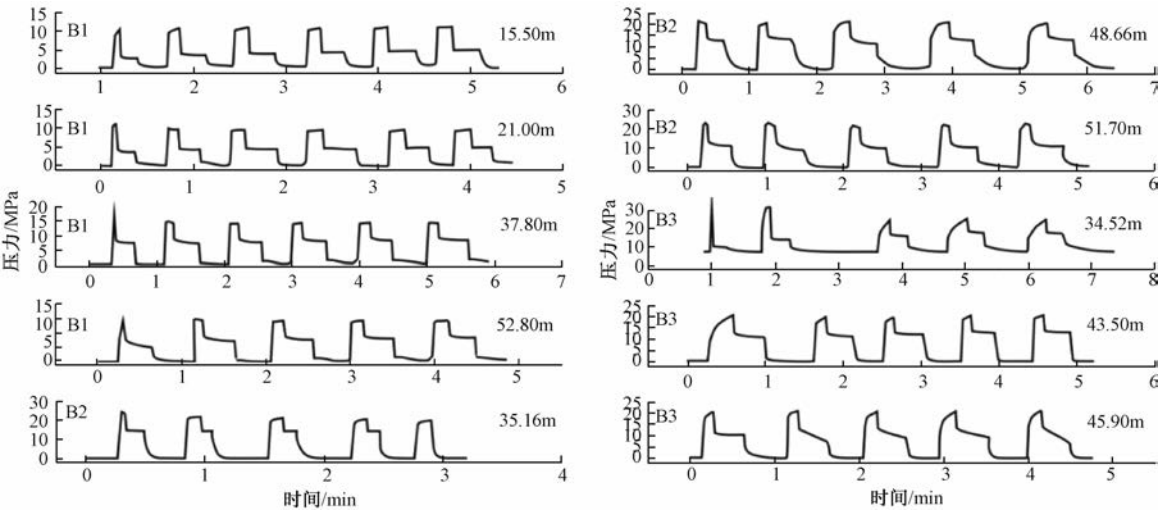


图 4 木寨岭隧道北段钻孔随深度段水压致裂测量曲线

Fig.4 Curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurement with depth in the boreholes in the north section of the Muzhailing tunnel

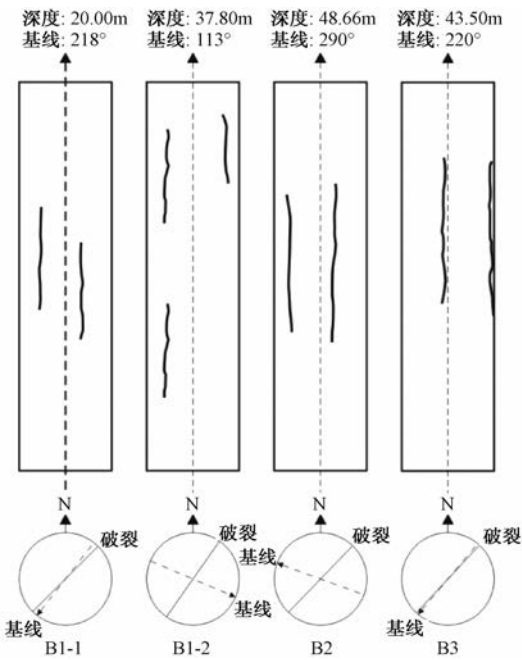


图 5 木寨岭隧道北段钻孔随深度段印模定向测量结果

Fig.5 Impression orientation measurement results with depth in the boeholes in the north section of the Muzhailing tunnel

2.3 结果分析

2.3.1 主应力量值

根据表 2 统计分析三个钻孔地应力测量结果，得到最大、最小水平主应力随钻孔深度变化的分布规律，图 6 为主应力随深度变化的拟合图，得到最大、最小水平主应力随深度的线性回归关系式

如下：

$S_H = 0.6203H + 4.6621, R^2 = 0.6729$

$S_h = 0.2784H + 6.1128, R^2 = 0.6675$

上式中，H 为钻孔深度；R 为相关性系数。

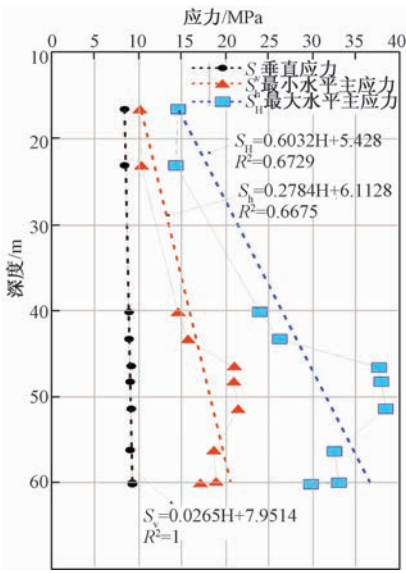


图 6 主应力大小随深度分布图

Fig.6 Curves of in-situ stress with depth in the boreholes

(1) 由表 2 和图 6 可以看出，在测量深度范围内，主应力大小随深度的增加总体上呈增大的趋势，最大水平主应力量值为 14.35 ~ 38.38 MPa，平均为 28.86 MPa，最小水平主应力量值为 10.18 ~ 21.52 MPa，平均为 16.93 MPa。三个钻孔主应力随深度变化的关系表明，木寨岭隧道北段水平主

表 2 钻孔水压致裂地应力试验测试结果													
Table 2 Results of hydraulic fracturing in-situ stress measurement in the boreholes													
钻孔 编号	测段 序号	深度 /m	压裂参数/MPa						主应力值/MPa			S _H /S _v	破裂方向/ °
			P _H	P ₀	P _b	P _r	P _s	T	S _H	S _h	S _v		
B1	1	15.50	3.16	1.16	18.76	14.86	10.18	3.90	14.52	10.18	8.36	1.74	
	2	21.00	3.21	2.21	19.46	14.52	10.36	4.94	14.35	10.36	8.51	1.69	N35°E
	3	37.80	3.38	2.38	24.93	18.59	15.73	6.34	26.22	15.73	8.95	2.93	
	4	51.80	3.52	2.52	24.16	19.12	17.17	5.04	29.87	17.17	9.32	3.20	N42°E
B2	1	35.16	3.35	2.35	20.90	17.65	14.66	3.25	23.98	14.66	8.88	2.70	
	2	48.66	3.49	2.49	24.94	21.04	18.70	3.90	32.57	18.70	9.24	3.52	N40°E
	3	51.70	3.52	2.52	27.35	21.28	18.97	6.07	33.13	18.97	9.32	3.55	
B3	1	40.50	3.41	2.41	3.41	23.17	21.09	0.00	37.69	21.09	9.02	4.18	
	2	41.94	3.42	2.42	27.87	22.40	20.92	5.47	37.93	20.92	9.06	4.19	N53°E
	3	44.50	3.45	2.45	32.05	23.73	21.52	8.32	38.38	21.52	9.13	4.20	

应力值随深度增加呈线性增大，且最大、最小水平主应力变化梯度分别为 0.6203 和 0.2784，与全国平均值相比均处于较高水平^[23]，且相同深度的地应力量值高于 2010 年已测结果。

(2) 测量深度范围内，水平主应力与垂直应力的关系为 $S_H > S_h > S_v$ ，表明木寨岭北段现今构造活动以水平应力作用为主导，反映了横穿隧道北段的活动断裂带具有利于逆冲断层的活动特征。

(3) 最大水平主应力与垂直应力 S_H/S_v 的值：在深度 30 米以内， S_H/S_v 值为 1.69 ~ 1.74，平均为 1.71，比值较低，这是由于原岩体内因隧道开挖会产生一定范围内的扰动；为减小扰动对原岩应力测量的影响，取试验深度大于 30 米的数据进行分析得到： S_H/S_v 值为 2.70 ~ 4.20，平均为 3.56，表明隧道区北段应力场分布较均匀，且水平应力作用很强。

2.3.2 最大主应力方向

由图 5 和表 2 表明，木寨岭隧道北段工程区洞身埋深段最大水平主应力方向为北东向，该结果与其他学者^[23~24]于 2010 年在木寨岭隧道区采用水压致裂地应力测量得到的最大主应力方向（结果为北东向）较为一致。此次测量得到地壳浅表层的最大水平主应力方向与震源机制解所反映的深部构造应力环境总体一致，表明木寨岭隧道北段工程区的现今区域构造应力场的最大水平主应力方向为北东向^[25~26]。结合穿越隧道北段工程区的主要断裂呈北西西向展布的平面几何形态，表明穿越隧道北段工程区的北西西向主要断裂带具有逆冲兼反时针扭动活动特征。

3 地应力测量结果应用

木寨岭隧道工程区地层条件复杂，隧道未贯

通段地层岩性以二叠系板岩、炭质板岩和二叠系砂岩为主，木寨岭隧道在后续开挖过程中所遇到的工程地质问题主要产生在这两种岩性的地层中^[28~29]。结合当前地应力状态，对二叠系板岩和砂岩地层在开挖过程中可能产生的工程地质问题进行分析，对工程的后续进行有一定的参考意义。试验测得木寨岭隧道砂岩饱和抗压强度 R_c 为 94.5 ~ 98.5 MPa，板岩饱和抗压强度 R_c 取 10.48 ~ 12.56 MPa^[23]。根据《工程岩体分级标准》（GB/50218-94）^[29]结合当前应力值，分别对板岩和砂岩的 R_c 和 S_H 进行比较，结果如表 3 所示：

表 3 木寨岭隧道典型工程区地应力环境和工程岩体分级					
Table 3 Crustal stress environment and engineering rock mass classification in typical engineering area of the Muzhailing tunnel					
岩性	S_H /MPa	R_c /MPa	R_c/S_H	应力环境	坚硬程度
砂岩	33.68	94.5 ~ 98.5	2.81 ~ 2.92	高应力区	坚硬岩
板岩	33.68	10.48 ~ 12.56	0.31 ~ 0.37	高应力区	软岩

3.1 最大水平主应力方向与隧洞轴线夹角的影响

已有学者根据不同的主应力大小关系，研究了在高地应力地区关于最大水平主应力方向与隧洞轴线夹角（ α ）对隧洞围岩稳定性的影响^[30]。提出以下三种影响类型：

(1) 当 $S_H > S_h > S_v$ 时，即最大、中间和最小主应力分别为 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 ，对应关系为 $\sigma_1 = S_H$ ， $\sigma_2 = S_h$ ， $\sigma_3 = S_v$ ，在这种应力场环境下，隧道横截面正应力 σ_n 与 S_v 的比值等于 1 是不可能的，只能接近 1，故只能使 $\sigma_n = S_h$ 时，最大水平主应力方向与隧洞轴线夹角等于 0。因此，在 $S_H > S_h > S_v$ 这种主应力关系下，最大主应力方向与洞轴线平行，即夹角 $\alpha = 0^\circ$ 时最有利于洞室围岩的稳定，随着 α 增大至 90° ，地应力对洞室围岩稳定性的影响越来越大。

(2) 当 $S_H > S_v > S_h$ 时, $\sigma_1 = S_H$, $\sigma_2 = S_v$, $\sigma_3 = S_h$ 。在这种应力场中可以满足 $\sigma_n/S_v = 1$ 。根据任意斜面上的法向应力与主应力的关系,可确定出最优的最大水平主应力与隧洞轴线夹角 α 为:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \frac{S_H + S_h - 2S_v}{S_H - S_h}$$

由上式可以看出, α 的变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。在钻孔深度一定,即 S_v 为定值,当 S_h 一定时,随着 S_H 的增加, α 逐渐减小,即最优方向逐渐接近 S_H 方向;当 S_H 一定时,随着 S_h 减小, α 增大,最优方向逐渐偏离 S_H 方向。

(3) 当 $S_v > S_H > S_h$ 时, $\sigma_1 = S_v$, $\sigma_2 = S_H$, $\sigma_3 = S_h$ 。在这种应力场条件下无法使 $\sigma_n = S_v$,只能接近 S_v ,故在 $\sigma_n = S_H$,即 $\alpha = 90^\circ$,也即最大水平应力与隧洞轴线垂直时最有利于围岩的稳定;当 α 由 90° 逐渐减小至 0° 时,地应力对隧洞围岩的稳定性影响越来越明显。

木寨岭隧道北段工程区现今三个主应力关系为 $S_H > S_h > S_v$,在这一应力场条件下,当最大主应力方向与隧洞轴线平行时最有利于洞室围岩的稳定,随着 α 增大至 90° ,地应力对洞室围岩稳定性的影响越来越大。实地测量得出,隧道轴线走向 $N30^\circ \sim 40^\circ E$,取其平均值 $N35^\circ E$ 。此次试验测得的水平主应力方向与隧洞轴线夹角关系如图 7 所示。可以看出,B1 钻孔四个测量深度,垂直于隧道轴线方向上的截面最大水平主应力方向基本平行于隧道轴线方向,夹角为 $0^\circ \sim 2^\circ$,有利于隧道围岩的稳定;B2 钻孔三个测量深度,垂直于隧道轴线方向上最大水平主应力方向与隧道轴线方向夹角约为 5° ,夹角数值较小,有利于隧道围岩的稳定;B3 钻孔三个测量深度,垂直于隧道轴线方向上截面最大水平主应力方向与隧道轴线方向夹角约为 18° ,夹角数值小于 20° ,有利于隧道围岩的稳定。三个钻孔所测得的应力椭圆形状均为椭圆形,最大水平主应力方向与隧洞轴线的夹角 α 均不大,变化范围在 $3.5^\circ \sim 18^\circ$ 之间,现今最大主

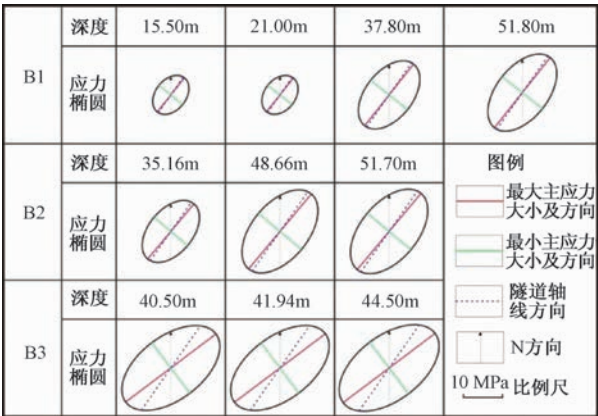


图 7 水平主应力与隧洞轴线夹角关系图
Fig. 7 Correlation between horizontal principal stress and axis angles of the tunnel

力方向有利于隧道围岩的稳定。

3.2 岩爆危险性探讨

应岩爆是一种复杂的岩体动力失稳现象^[31~33],发生岩爆的开挖区常具备以下三个条件:一是工程区为高地应力环境,开挖引起局部区域高度的应力集中,即具备岩爆发生所需能量;二是围岩抗压强度高,导致岩体发生脆性破坏;三是围岩岩体储能能力强,在岩体破坏时可为临空面的岩体发生弹射等动力破坏现象提供能量,且发生破坏时要具有较强的冲击性。

结合地应力测量数据及已有隧道地层岩石力学实验数据,采用 E. Hoek 法、Turchaninov 法、陶振宇判据法三种方法^[34~36],对比分析木寨岭隧道硬岩区发生岩爆的可能性。三种方法的岩爆等级划分及相应依据见表 4 其中,E. Hoek 法将围岩断面的切向应力与岩石的抗压强度之比作为判断依据;Turchaninov 提出了岩爆活动性由洞室横截面切向应力与轴向应力之和与岩石单轴抗压强度之比确定;陶振宇在其他学者研究基础上,结合国内工程经验,提出以岩石单轴抗压强度与地应力中最大主应力之比为判断是否发生岩爆的依据。三种方法的计算结果详见表 5。

表 4 岩爆等级划分表
Table 4 Classification of rockburst grades

E. Hoek 法		Turchaninov 法		陶振宇法	
$\sigma_{\max}/R_c$	岩爆等级	$(\sigma_{\max} + \sigma_L)/R_c$	岩爆等级	R_c/S_H	说明
<0.34	无岩爆	≤ 0.3	无岩爆	≥ 14.5	无岩爆发生
$0.34 \sim 0.42$	少量岩爆	$0.3 \sim 0.5$	可能有岩爆	$5.5 \sim 14.5$	低岩爆活动
$0.56 \sim 0.70$	中等岩爆	$0.5 \sim 0.8$	肯定有岩爆	$2.5 \sim 5.5$	中等岩爆活动
>0.70	强烈岩爆	>0.8	有严重岩爆	<2.5	高岩爆活动

表 5 隧道围岩岩爆发生可能性分析

Table 5 Possibility analysis of rockburst of tunnel surrounding rocks

位置	主应力/MPa			$\alpha/^{\circ}$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	σ_L/MPa	R_c/MPa	E. Hoek	Turchani-nov	陶振宇法
	S_H	S_h	S_v							
B1	26.22	15.73	8.95	3.5	69.59	26.18	94.5 ~ 98.5	强烈岩爆	严重岩爆	中等岩爆
	29.87	17.17	9.32	3.5	80.15	29.82		强烈岩爆	严重岩爆	中等岩爆
B2	23.98	14.66	8.88	5	62.85	23.91	94.5 ~ 98.5	中等岩爆	严重岩爆	中等岩爆
	32.57	18.7	9.24	5	88.15	32.46		强烈岩爆	严重岩爆	中等岩爆
	33.13	18.97	9.32	5	89.75	33.02		强烈岩爆	严重岩爆	中等岩爆
B3	37.69	21.09	9.02	18	99.29	36.10	94.5 ~ 98.5	强烈岩爆	严重岩爆	中等岩爆
	37.93	20.92	9.06	18	99.86	36.31		强烈岩爆	严重岩爆	中高岩爆
	38.38	21.52	9.13	18	101.18	36.77		强烈岩爆	严重岩爆	中高岩爆

注: 表 4、表 5 中 $\sigma_{\max}$ 为隧道围岩切向应力, 根据实测的原地应力, 利用线弹性理论计算得到 $\sigma_{\max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$; R_c 为岩石的抗压强度; σ_L 为隧道横截面方向的水平应力; α 为隧道轴线方向与水平最大主应力方向的夹角。

通过 E. Hoek 法、Turchaninov 法、陶振宇判据法三种方法对木寨岭隧道的计算分析显示: 隧道北段三个钻孔 B1、B2 和 B3 发生岩爆可能性及其强烈程度基本相同, 其中, E. Hoek 法和 Turchaninov 法的预测结果所显示的岩爆可能性要比陶振宇判据法的预测结果高, 总的来说, 木寨岭隧道未贯通段砂岩区存在发生中强岩爆活动的可能性较大, 在隧道后续施工时需要加以防范, 以免发生事故, 造成不必要的人员财产损失。

3.3 软岩变形分析

木寨岭隧道工程区所在区域为高地应力环境, 软岩分布较广, 板岩及炭质板岩区占隧道总长的 46.5%, 木寨岭隧道未贯通区板岩饱和抗压强度 R_c 取 10.48 ~ 12.56 MPa。

国内外学者关于围岩变形量大小的计算方面做了较多研究^[37~39]。国内主要分析方法有隧道围岩变形模型预测法、经验回归法以及基于数值分析的预测预报方法^[40]。Singh 通过多个工程计算分析, 提出了与隧道埋深有关的预测公式^[41]; Goel 提出了隧道围岩变形量的预测公式; Hoek 分析了大量岩体, 利用轴对称有限元法得到在原地应力和支护压力作用下隧道围岩的变形预测公式^[42~43], 相较于其他预测公式, Hoek 的公式所考虑的因素更为全面。

$$\varepsilon_t(\%) = 0.15(1 - p_i/p_0) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-(3p_i/p_0 + 1)/(3.8p_i/p_0 + 0.54)}$$

上式中: ε_t —隧道周边应变; σ_{cm} —岩体单轴抗压强度; p_i —支护压力; p_0 —原岩应力, 取 $3\sigma_1 - \sigma_3$, 即 $\sigma_{\max}$; p_i/p_0 取值方法参照相关文献^[42], 取 0.05。

木寨岭隧道为单线双洞隧道, 从水压致裂试验的三个钻孔从布孔位置来看, B1、B2 和 B3 钻

孔分别在隧道的左线和右线洞中, B1、B2 在隧道的同一侧隧洞且前后相隔 10 m。试验的三个钻孔数据分为两组: I 组: B1 和 B2, II 组 B3 分别算出每组最大水平主应力、最小水平主应力, 采用 Hoek 提出的隧道围岩变形分级标准^[44], 对隧洞北段和南段板岩区的围岩大变形进行预测, 预测结果见表 6。

表 6 隧洞板岩区围岩大变形分析

Table 6 Analysis of large deformation of surrounding rocks in the slate area of the tunnel

分组	埋深	S_H	S_h	S_v	R_c	ε_t	变形等级
	/m	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/%	
I	300	29.15	17.05	7.95	1.73 ~ 2.39	41.37 ~ 68.83	极度挤压变形
II	300	38	21.18	7.95	1.73 ~ 2.39	62.81 ~ 104.51	极度挤压变形

由表 6 可以看出, 隧道北段围岩在开挖后均可能产生极度挤压变形, 并且, 北段 B3 钻孔板岩区挤压变形量要大于 B1 和 B2 钻孔板岩区挤压变形量。由于木寨岭隧道板岩区占隧道总长度的 46.5%, 且主要为二叠系板岩, 因此, 这些预测结果可以较好的反应整个隧道工程区软弱围岩在高地应力环境下的变形情况, 在隧道后续施工过程中要采用科学的开挖工序和合理的支护方法, 结合定期或者实时监测掌握隧道围岩动态变化, 及时采取动态补强控制变形, 确保隧道工程安全施工^[45]。

3.4 隧道横截面形状讨论

基于水压致裂试验测量结果, 由二维平面应力分量的坐标变换公式计算出木寨岭隧道北段洞室内横截面上的水平应力、轴向应力及垂直应力(近似等于上覆岩层的重量), 可得到垂直隧道轴线的隧道横断面水平应力 σ_H 及其与垂向应力的侧压力系数比值为 2.88。其中, 最大主应力方向和

主应力值均取各段平均值。故为使隧道洞室在开挖后能够达到较好的稳定性,应使隧道洞室形状设计为水平长轴、垂直短轴,且长、短轴之比最好与横截面上侧压力系数比值(2.88)相近的椭圆形或似圆形。

4 结 论

(1) 木寨岭隧道北段洞室区属于高应力区,现今构造应力场以水平作用为主导,三个主应力的关系为 $S_H > S_h > S_v$;水平主应力随深度的增加呈增加的趋势,最大、最小水平主应力变化梯度均处于较高水平;最大水平主应力与垂直应力 S_H/S_v 的值2.70~4.20,表明隧道区北段应力场分布较均匀,且水平应力作用很强。

(2) 木寨岭隧道北段工程区洞身埋深段最大水平主应力方向为北东向,与区域构造应力场方向基本一致,揭示穿越隧道北段工程区的北西西向主要断裂带具有逆冲兼反时针扭动活动特征。

(3) 木寨岭隧道北段工程区现今最大水平主应力方向有利于隧道围岩的稳定;隧道洞室的截面形态应选取与侧压力系数比值(2.88)相近的椭圆形为宜;而隧道洞室埋深位置硬岩区砂岩具有发生中等岩爆的可能,同时软岩区(炭质)板岩具有发生严重变形的风险。应加强隧道施工过程中开挖工序、支护方法以及动态补强等有效措施,控制可能产生软岩大变形,确保隧道工程安全施工。

(4) 由于木寨岭隧道外围处于强烈活动的区域性地震断裂带中,而其穿越的是现今强烈活动的临潭—宕昌地震断裂带,在二者共同作用下,极易造成构造应力和能量集中,导致隧道变形破坏而影响其稳定性。建议加强该区域活动断裂的调查和实时监测,保障铁路隧道工程建设的安全性及长期稳定性。

参考文献/References

[1] 铁道第一勘察设计院. 新建铁路兰州至重庆线兰州至广元段施工图预设计木寨岭隧道说明书[R]. 西安, 2008. 1~30.
China Railway First Survey and Design Institute Group. Preliminary Design of Construction Drawing of Lanzhou to Chongqing Line of Lanzhou to Guangyuan Line of New Railway [R]. Xi'an, 2008. 1~30. (in Chinese)

[2] 黄勇. 综合勘查技术在木寨岭特长隧道中的应用[J]. 重庆交通大学学报, 2009, 28(6): 1011~1015.
HUANG Yong. Application of comprehensive investigation in Muzhailing super long tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Nature Science), 2009, 28(6): 1011~1015. (in Chinese with English abstract)

[3] 赵玉凤. 木寨岭隧道地质分析及预防措施[J]. 科协论坛, 2011, (12): 4~6.
ZHAO Yufeng. Geological analysis and preventive measures of the wood walled Ridge Tunnel [J]. Science & Technology Association Forum, 2011, (12): 4~6. (in Chinese with English abstract)

[4] 张献伟. 木寨岭隧道炭质板岩段大变形控制技术[J]. 隧道建设, 2010, (6): 683~686.
ZHANG Xianwei. Large deformation control technology of carbonaceous slate section in Mu Ling tunnel [J]. Tunnel Construction, 2010, (6): 683~686. (in Chinese with English abstract)

[5] 邹翀, 王超鹏, 张文新等. 兰渝铁路木寨岭隧道炭质板岩段应力控制实验研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(2): 120~124.
ZOU Chong, WANG Chaopeng, ZHANG Wenxin, et al. Experimental study on stress control of carbonaceous slate section of tunnel in Lanzhou Chongqing Railway [J]. Tunnel Construction, 2010, 30(2): 120~124. (in Chinese with English abstract)

[6] 张文新, 张建国, 唐绍武, 等. 木寨岭隧道地应力特征及对隧道变形影响的研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(2): 116~121.
ZHANG Wenxin, ZHANG Jianguo, TANG Shaowu, et al. Study on characteristics of ground stress and influence on tunnel deformation [J]. Tunnel Construction, 2013, 33(2): 116~121. (in Chinese with English abstract)

[7] 杨会军, 王梦恕. 隧道围岩变形影响因素分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 92~96.
YANG Huijun, WANG Mengshu. Analysis of influencing factors of tunnel surrounding rock deformation [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(3): 92~96. (in Chinese with English abstract)

[8] 刘高, 张帆宇, 李新招, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5521~5526.
LIUGao, ZHANG Fanyu, LIXinzhao, et al. Characteristics and mechanism analysis of large deformation of the Mu Ling tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5521~5526. (in Chinese with English abstract)

[9] 夏玉胜, 李智敏, 屠泓为, 等. 东昆仑断裂带古地震综合研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(1): 146~154.
XIA Yusheng, LI Zhiyi, TU Hongwei, et al. A comprehensive study of the Paleo Earthquake in the eastern Kunlun fault zone [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 146~154. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [10] 陈长云, 贺建明. 西秦岭北缘断裂分段运动变形特征分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36 (9): 784 ~ 788. CHEN Changyun, HE Jianming. Deformation characteristics of sectional movement in northern margin of West Qinling Mountains [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36 (9): 784 ~ 788. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘锁旺, 甘家思, 姚运生, 等. 西秦岭北缘断裂和海原断裂的走滑转换变形及其与陇山地块的相互作用 [J]. 地壳形变与地震, 1997, 17 (3): 73 ~ 83. (in Chinese with English abstract).
- LIU Suowang, GAN Jiasi, YAO Yunsheng, et al. Strike-slip transform deformation along the northern boundary fault of western Qinling MT and Haiyuan fault and interaction between them and Longshan block [J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1997, 17 (3): 73 ~ 83. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邵延秀, 袁道阳, 王爱国, 等. 西秦岭北缘断裂破裂分段与地震危险性评估 [J]. 地震地质, 2011, 33 (1): 79 ~ 90. SHAO Yanxiu, YUAN Daoyang, QANG Aiguo, et al. The Segmentation of rupture and estimate of earthquake risk along the north margin of western Qinling fault zone [J]. Seismology and Geology, 2011, 33 (1): 79 ~ 90. (in Chinese with English abstract)
- [13] 何文贵, 郑文俊, 王爱国, 等. 临潭-宕昌断裂新活动特征与岷县漳县 $M_s 6.6$ 级地震关系研究 [J]. 地震工程学报, 2013, 35 (4): 751 ~ 760. HE Wengui, ZHENG Wenjun, WANG Aiguo, et al. A study on the characteristics of Minxian $M_s 6.6$ earthquake activity in Lintan-Zhangxian new Dangchang fracture [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 35 (4): 751 ~ 760. (in Chinese with English abstract)
- [14] 高明星, 陈桂华, 徐锡伟. 地貌参数指示的临潭-宕昌断裂带最新构造隆升差异与地震活动 [J]. 地震地质, 2015, 37 (3): 709 ~ 718. GAO Mingxing, CHEN Guihua, XU Xiwei. Geomorphic indices indicated recent differential tectonic uplift of the Lintan-Dangchan fault and the Minxian-Zhangxian earthquake [J]. Seismology and Geology, 2015, 37 (3): 709 ~ 718. (in Chinese with English abstract)
- [15] Haimson B C, Cornet F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation. Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF) [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40 (7/8): 1011 ~ 1020.
- [16] 丰成君, 张鹏, 孙伟峰, 等. 日本 $M_w 9.0$ 级地震对中国华北-东北大陆主要活动断裂带的影响及地震危险性初步探讨 [J]. 地学前缘, 2013, 20 (6): 123 ~ 140. FENG Chengjun, ZHANG Peng, SUN Weifeng, et al. The impact of the Japan $M_w 9.0$ earthquake on the main active fault zones in North China and Northeast China and the preliminary exploration of seismic risk [J]. Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals, 2013, 20 (6): 123 ~ 140. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张鹏, 秦向辉, 丰成君, 等. 郯庐断裂带东段深孔地应力测量及其现今活动性分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (8): 2329 ~ 2335. ZHANG Peng, QIN Xianghui, FENG Chengjun, et al. Deep crustal stress measurement and its present activity analysis in Shandong section of Tan Lu fault belt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (8): 2329 ~ 2335. (in Chinese with English abstract)
- [18] 谭成轩, 孙叶, 王连捷. 地应力测量值得注意的若干问题 [J]. 地质力学学报, 2003, 9 (3): 275 ~ 280. TAN Chengxuan, SUN Ye, WANG Lianjie. Some problems of in-situ crustal stress measurements [J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9 (3): 275 ~ 280. (in Chinese with English abstract)
- [19] 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等. 龙门山断裂带东北段现今地应力环境研究 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (3): 1109 ~ 1121. FENG Chengjun, CHENG Qunce, TAN Chengxuan, et al. Analysis on current in-situ stress state in northern segment of Longmenshan fault belt [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28 (3): 1109 ~ 1121. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈庆宣, 王伟襄, 孙叶. 岩石力学与构造应力场分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1998. 159 ~ 186. CHEN Qingxuan, WANG Weixiang, SUN Ye, et al. Rock Mechanics and Analysis on Tectonic Stress Field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 159 ~ 186. (in Chinese)
- [21] 张鹏, 曲亚明, 郭长宝, 等. 西藏林芝地应力测量监测与尼泊尔 $M_s 8.1$ 级强震远场响应分析 [J]. 现代地质, 2017, 31 (5): 900 ~ 910. ZHANG Peng, QU Yaming, GUO Changbao, et al. The analysis of in-situ stress measurement, real-time monitoring results and its response to Nepal $M_s 8.1$ earthquake, Nyingchi, Tibetan Plateau, China [J]. Geoscience, 2017, 31 (5): 900 ~ 910. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张鹏, 胡秋韵, 丰成君, 等. 海峡西岸长乐-南澳断裂带中段现今原位地应力测量 [J]. 地球学报, 2015, 36 (4): 483 ~ 490. ZHANG Peng, HU Qiuyun, FENG Chengjun, et al. Present in-situ stress measurement in middle segment of Changle-Nan'ao fracture belt along the western coastal region of Taiwan strait and an analysis of its activity [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2015, 36 (4): 483 ~ 490. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王建军, 黄勇. 兰渝铁路木寨岭隧道工程地质勘察报告 [R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2009. WANG Jianjun, HUANG Yong. Report on engineering geological investigation of Mu Ling tunnel in Lanzhou Chongqing Railway [R]. Xi'an: China Railway First Survey and Design Institute Group, 2009. (in Chinese)

- [24] 巨小强. 木寨岭隧道越岭区区域地应力特征分析及应用 [J]. 铁道勘察, 2010, (2): 33 ~ 35.
JU Xiaoliang. Analysis on characteristics of ground stress in Muzhailing tunnel around mountainous areas as well as its application [J]. Railway Investigation, 2010, (2): 33 ~ 35. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙叶, 谭成轩, 李开善, 等. 区域地壳稳定性量化评价 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
SUN Ye, TAN Chengxuan, LI Kaishan, et al. Quantitative Assessment and Zonation of Regional Stability in Tangshan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese)
- [26] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. “5.12”汶川 $M_s 8.0$ 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
TAN Chengxuan, SUN Ye, WU Shuren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after $M_s 8.0$ Wenchuan strong earthquake in China [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 142 ~ 150. (in Chinese with English abstract)
- [27] 武建广. 木寨岭隧道软岩段大变形原因分析及对策 [J]. 西部探矿工程, 2011, 23 (2): 199 ~ 202.
WU Jianguang. Cause analysis and countermeasures of large deformation in soft rock section of wooden mountain tunnel [J]. West-China Exploration Engineering, 2011, 23 (2): 199 ~ 202. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张波. 木寨岭隧道板岩变形机理研究 [J]. 铁道建设, 2014, (5): 57 ~ 59.
ZHANG Bo. Study on the deformation mechanism of slate rock tunnel [J]. Tunnel Construction, 2014, (5): 57 ~ 59. (in Chinese with English abstract)
- [29] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50218-94 工程岩体分级标准 [S]. 北京: 国家计划出版社, 1995.
Compilation Group of National Standards of the People's Republic of China. GB 50218-94 Standard for engineering classification of rock masses [S]. Beijing: The Country Plans to Press, 1995. (in Chinese)
- [30] 余莉, 尤哲敏, 陈建平, 等. 高地应力地区隧道围岩分级研究 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (3): 23 ~ 30.
YU Li, YOU Zheming, CHEN Jianping, et al. Rock classification for tunnels in high geostress areas [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (3): 23 ~ 30. (in Chinese with English abstract)
- [31] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (3): 433 ~ 444.
FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (3): 433 ~ 444. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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.
TAN Yi'an. The mechanism research of rockburst [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1989, (1): 34 ~ 38, 54. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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聚理论的岩爆预测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (10): 1973 ~ 1980.
CAI Meifeng, JI Dong, GUO Qifeng. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (10): 1973 ~ 1980. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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 Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (10): 2034 ~ 2042. (in Chinese with English abstract)
- [35] 杜子建. 岩爆预测理论与应用研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007. 13 ~ 30.
DU Zijian. Study on theory and application of rockburst prediction [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2007. 13 ~ 20. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王青海, 李晓红, 顾义磊, 等. 地下工程中岩爆灾害的成因及防治措施 [J]. 重庆大学学报, 2003, 26 (7): 116 ~ 120.
WANG Qinghai, LI Xiaohong, GUYilei, et al. Rockburst hazard and its forecast and treatments in underground engineering [J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26 (7): 116 ~ 120. (in Chinese with English abstract)
- [37] 刘志春, 朱永全, 李文江, 等. 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (5): 690 ~ 697.
LIU Zhichun, ZHU Yongquan, LI Wenjiang, et al. Mechanism and classification criterion for large deformation of squeezing ground tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (5): 690 ~ 697. (in Chinese with English abstract)
- [38] 宋章, 蒋良文, 杜宇本, 等. 成兰铁路软岩隧道大变形特征及成因机制探析 [J]. 工程地质学报, 2016, 24 (S1): 11 ~ 16.
SONG Zhang, JIANG Liangwen, DU Yuben, et al. Analysis on characteristic and dormation mechanism of larger deformation for the tunnel of Chengdu-Lanzhou railway [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24 (S1): 11 ~ 16. (in Chinese with English abstract)
- [39] 包林海, 王成虎, 郭启良, 等. 巴基斯坦某隧洞地应力状态及围岩大变形研究 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (1): 38 ~ 44.
BAOLinhai, WANG Chenghu, GUOQiliang, et al. Research on the geostress state and large-rock deformation of a water conveyance tunnel in Pakistan [J]. Modern Tunnelling

- Technology, 2015, 52 (1): 38 ~ 44. (in Chinese with English abstract)
- [40] Singh B, JethwaJL, Dube AK, et al. Correlation between observed support pressure and rock mass quality [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1992, 7 (1): 59 ~ 74.
- [41] 胡元芳, 刘志强, 王建宇. 高地应力软岩条件下挤压变形预测及应用 [J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (3): 28 ~ 34. HU Yuanfang, LIU Zhiqiang, WANG Jianyu. Squeezing deformation prediction of soft rocks under high ground stress and its application [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (3): 28 ~ 34. (in Chinese with English abstract)
- [42] Hoek E, Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses [J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000, 32 (11): 45 ~ 51.
- [43] Malan DF, Basson FRP. Ultra-deep mining: The increased potential for squeezing conditions [J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 1998, 98 (7): 353 ~ 363.
- [44] 李国良, 刘志春, 朱永全, 等. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (1): 62 ~ 68. LI Guoliang, LIU Zhichun, ZHU Yongquan, et al. On the large squeezing deformation law and classification criteria for the Lanzhou-Chongqing railway tunnels in soft and high geostress rocks [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (1): 62 ~ 68. (in Chinese with English abstract)
- [45] 张梅, 何志军, 张民庆, 等. 高地应力软岩隧道变形控制设计与施工技术 [J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (6): 13 ~ 22. ZHANG Mei, HE Zhijun, ZHANG Mingqing, et al. Design and construction technologies to control the deformation of a soft rock tunnel with high ground stress [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49 (6): 13 ~ 22. (in Chinese with English abstract)

IN-SITU STRESS MEASUREMENT AND STABILITY ANALYSIS OF SURROUNDING ROCKS IN THE NORTH SECTION OF DEEP BURIED TUNNEL IN MUZHAILING

ZHANG Peng^{1, 2}, SUN Zhiguo³, WANG Qiuning⁴, FENG Chengjun^{1, 2}, SUN Mingqian^{1, 2}, TAN Chengxuan^{1, 2}, WU Yongdong⁵, GAN Weiping⁵

- (1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;
3. CCCC Highway Consultants CO., Ltd., Beijing 100035, China;
4. Shannxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shannxi, China;
5. China Railway Tunnel Group, Luoyang 471009, Henan, China)

Abstract: In order to conclude present ground in-situ stress distribution characteristics, data are gathered from active fault investigation and three drilling boreholes for in-situ stress measurement located in the north section of the Muzhailing tunnel engineering area along the Lanzhou-Chongqing railway. Combined with the high in-situ data of $S_H > S_h > S_v$, the core sampling of the structure features of shallow earth crust rock formation reveals that current horizontal principal stress plays a leading role in reverse fault activity. Moreover, measured maximum principal in-situ stress strikes in NE direction and reflects present compressive properties, with sinistral slip activity, of the north segment. Based on the data of crustal stress and the interrelated theories as well as criterions, it is concluded that the favorite shape of the cross-section of the tunnel are ellipses with horizontal long axis, vertical short axis and long to short axis ration as lateral pressure coefficient; when the north section of the tunnel are excavated, the hard rock has the possibility of rock burst, and the soft rock has the background of its occurrence and serious extrusion deformation. The results provide a basis for studying the characteristics of stress field in tunnel area, analyzing the stability of tunnel surrounding rock and designing engineering geological problems such as shape, structure and strength of tunnel section.

Key words: The Muzhailing tunnel; in-situ stress measurement; stability of surrounding rocks; rock burst; soft rock deformation