

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S1.053

层状岩体深埋长隧道锚杆支护优化设计

韩昌瑞¹, 白世伟², 王玉朋¹, 张东焕¹

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要:层状岩体是地下工程中经常遇到的一种岩体,力学性质具有明显的各向异性。选择合适的屈服准则和强度参数变化规律,结合各向异性弹性本构方程,获得横观各向同性弹塑性本构关系,利用该本构模型对共和隧道锚杆支护方案进行数值计算。首先考虑地应力、岩性的影响,从围岩的变形、破坏形式、塑性区及锚杆拉力的大小等方面改进、优化支护设计方案;其次从实际工程出发,考虑施工难度、工程造价等因素的影响,得到改进方案 效果较理想,通过试验段现场监测确定改进方案 I。本构模型对计算结果的影响很大,正确模型的计算结果可以为实际工程提供科学依据。

关 键 词:层状岩体;各向异性;锚杆支护;优化设计

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0409 - 06

Optimum design of rock bolts supporting long-deep tunnel in layered surrounding rock mass

HAN Chang-rui¹, BAI Shi-wei², WANG Yu-peng¹, ZHANG Dong-huan¹

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Layered rock mass is a kind of common rock mass in underground engineering, and its mechanical properties often take on distinct anisotropy. Selecting appropriate yield function and suitable strength parameters variable law, combining elastic constitutive function of anisotropy, then elastoplastic constitutive function of anisotropy is obtained. Gonghe tunnel is numerically modeled by utilizing this constitutive function. Firstly considered the influence of crustal stress and rock property, support design scheme is modified and optimized from these aspects such as deformation of surrounding rock mass, style of failure, magnitude of yield field and bolts tension; secondly considered the influence of construction difficulty and engineering cost from the actual project, it is concluded that the modified design I is better. Modified scheme I is even adopted in the process of tunnel construction. So constitutive model has great effect on the result of calculation, calculation result of appropriate model can provide scientific proof for the actual project.

Keywords: layered rock mass; anisotropy; bolt support; optimum design

1 引 言

隧道开挖引起围岩的卸荷回弹、应力重新分布,可以导致围岩发生塑性变形和破坏。围岩的变形破坏通常是从洞室周边开始,后逐步向围岩内部发展^[1-3]。锚杆支护是一种常用的支护手段,是一种柔性支护,能够与围岩共同变形。锚杆支护设计不仅关系到隧道的安全性,而且对支护材料、施工速度、隧道维护状况等都有直接或间接的影响。国

内外学者多年的研究和完善已经形成以实测地应力为基础进行地质力学评估,以数值模拟为手段进行初始设计,并通过现场监测检验或修改初始设计的锚杆支护设计方法^[4-5]。

层状岩体是地下工程中经常遇到的一种岩体,地下工程中经常遇到的许多岩体力学问题均与层状岩体的强度条件等力学性质有着密切的关系^[6-14],这种岩体容易引起隧道的地质偏压。引起隧道承受偏压载荷的原因主要有地形原因引起偏压、地质构

收稿日期: 2015-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(No.50334060); 山东省自然科学基金(No.ZR2011EEM020)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (50334060) and the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2011EEM020).

第一作者简介: 韩昌瑞,男,1971年生,博士,副教授,主要从事岩土工程研究及教学方面的研究工作。E-mail: hanchangrui@163.com

造引起偏压和施工原因引起偏压^[15-16]。由地形引起的隧道偏压问题已有成熟的计算方法，对于由地质因素引起的隧道偏压隧道及其围岩应力的计算方法目前还处于研究阶段，通常采用数值分析或模型试验的方法进行计算^[17-22]。本文以渝-沙（重庆至长沙）高速公路彭-武（彭水至武隆）段武隆隧道为工程背景^[23-24]，采用数值分析结合现场监测资料，给出了合理的支护设计。

2 围岩的力学模型

层状岩体具有明显的各向异性的变形和强度特征，与各向同性岩体相比，其稳定性和破坏条件表现得较为复杂。理论上可将层状岩体处理成横观各向同性介质，本文采用 Mohr-Coulomb 屈服准则描述岩体的破坏特征，岩体的剪切强度为

$$\tau = c(\alpha) + \sigma \tan \varphi(\alpha) \quad (1)$$

式中： τ 为破坏面上的剪应力； σ 为破坏面上的正应力； c 为破坏面上的黏聚力； φ 为破坏面上的摩擦角； α 为破坏面与岩体层面的夹角。此时 c 、 φ 不是常量，而是破坏面与层面或最大主应力方向的函数。

强度参数方程^[23]为

$$c = \sqrt{c_{\max}^2 \sin^2(\alpha - \alpha_0) + c_{\min}^2 \cos^2(\alpha - \alpha_0)} \quad (2)$$

$$\varphi = \sqrt{\varphi_{\max}^2 \sin^2(\alpha - \alpha_0) + \varphi_{\min}^2 \cos^2(\alpha - \alpha_0)} \quad (3)$$

式中： c_{\max} 、 c_{\min} 分别为平行于最大主应力和垂直于最大主应力方向的黏聚力； φ_{\max} 、 φ_{\min} 分别为平行于最大主应力和垂直于最大主应力方向的摩擦角； α_0 为层面与最大主应力方向的夹角。

3 锚杆支护的优化设计

共和隧道埋深大且受顺层偏压，开挖到埋深超过 500 m 出现大变形和围岩破坏现象后进行现场地应力测量，经过反演与现场测量结果比对^[24]，最终得到地应力侧压系数 $K_x = 0.8$ ， $K_y = 0.9$ ，里程 K42+500 处理深 950 m 地应力最高， $\sigma_x = -13.25$ MPa， $\sigma_y = -18.50$ MPa， $\sigma_z = -19.38$ MPa， $\tau_{xy} = -0.18$ MPa， $\tau_{zx} = -1.24$ MPa， $\tau_{yz} = 0.61$ MPa。

里程 K42+500 处地应力的数值对于分析隧道的支护设计和稳定性具有代表性，将其施加在隧道的局部模型（毛洞）上，横观各向同性计算参数选取：岩层倾向 $dd = 90^\circ$ ，岩层倾角 $dip = 30^\circ$ ，弹性模量 $E_1 = 24$ GPa， $E_3 = 18$ GPa，剪切模量 $G_{13} = 7.14$ GPa，泊松比 $\mu_{12} = 0.26$ ， $\mu_{13} = 0.36$ ，黏聚力 $c_{\min} = 1.6$ MPa， $c_{\max} = 2.4$ MPa，内摩擦角 $\varphi_{\min} = 24^\circ$ ， $\varphi_{\max} = 36^\circ$ ，抗拉强度极限 $T = 1.1$ MPa。

3.1 原支护设计方案

原隧道的衬砌支护参数见表 1，断面支护设计方案如图 1 所示，采用 $\phi 22$ mm 砂浆锚杆支护，每根长 3.0 m，纵向间距为 1.2 m，环向间距为 1.0 m，梅花型布置。

表 1 隧道衬砌支护参数

Table 1 Liner support parameters of tunnel

衬砌类型	初期支护								二衬厚度/cm			
	C20 喷混厚度/cm		锚杆		钢筋网 ($\phi 8$ mm)		格栅钢架		C25	C25		
	拱墙	仰拱	部位	长度/m	间距(m×m)	部位	间距(m×m)	部位	间距/m	拱墙砼	仰拱砼	
III(A)	10		拱墙	3.0	1.0×1.2	拱墙	25×25			35	35	
III(B)	10		拱墙	3.0	1.0×1.2	拱墙	25×25	拱墙	1.0	5	35	35
III(C)	20		拱墙	3.0	1.2×1.0	拱墙	25×25	拱墙	1.2	5	40	40
III(D)	20		拱墙	3.0	1.2×1.2	拱墙	25×25	拱墙	1.0	5	40	40
IV(B)	20	20	拱墙	3.0	1.0×1.0	拱墙	25×25	拱墙	1.0	8	40	40
V(B)	25	25	拱墙	3.0	0.8×0.8	拱墙	25×25	拱墙	0.8	8	45	45

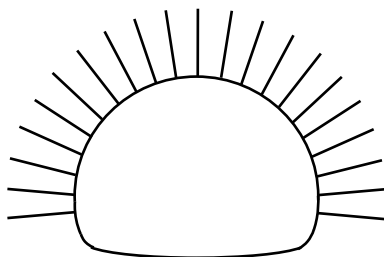
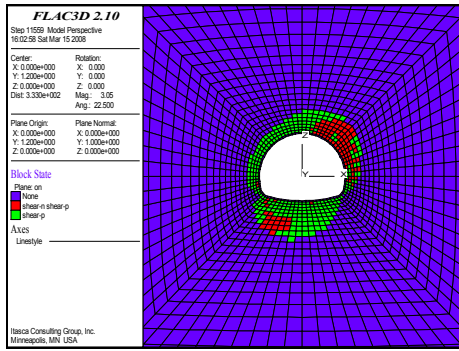


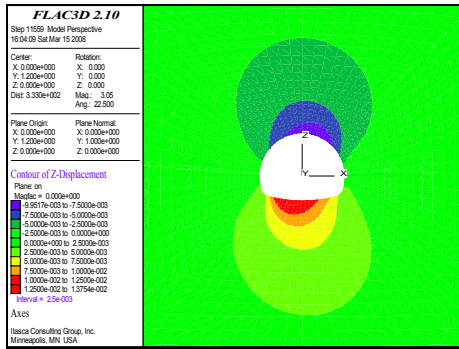
图 1 原设计支护

Fig.1 Scheme of initial support design

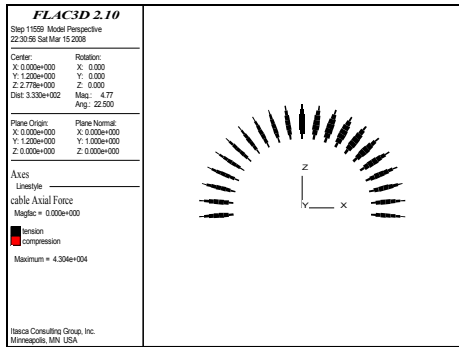
围岩的计算参数与前述相同，锚杆的计算参数为：横截面积 $A = 3.80 \times 10^{-4}$ m²，单位长度极限拉力 $F_t = 100$ kN/m，弹性模量 $E = 200$ GPa，砂浆刚度 $k_g = 35$ MPa，砂浆周长 $p_g = 0.316$ m，砂浆黏聚力 $c_g = 500$ kN/m，砂浆内摩擦角 $\varphi_g = 40^\circ$ 。计算时只考虑初期支护的衬砌，二衬作为安全储备一般不考虑。衬砌的计算参数为：当量体积模量 $E_{kc} = 33.33$ GPa，当量剪切模量 $G_c = 15.35$ GPa，计算结果见图 2。



(a) 塑性区



(b) Z方向位移场 (单位：m)



(c) 锚杆拉力 (单位：N)

图 2 原设计方案的计算结果

Fig.2 Calculating results of initial support design scheme

由图 2 可以看出，隧道破坏区较大的右拱肩，锚杆受力明显大于其他部分。由于锚杆长度不足，未能起到真正的支护作用，且现场监测数据显示有 70% 以上的锚杆受力较小或出现压应力，说明部分锚杆位于松动圈内，锚杆处于整体支护失效状态，没有起到锚杆的支护作用，才会出现初期支护完成后在拱部喷射混凝土表面出现纵向开裂、拱架内侧喷层局部掉块和局部拱架变形，按原隧道支护设计，围岩的稳定性不能满足要求。

3.2 改进支护设计方案 I

基于围岩偏压严重、松动圈的范围局部较大以及锚杆支护失效等因素，有必要对围岩支护进行优化设计。在施工过程中发现隧道靠河侧拱肩部位支护发生破坏，因此对该部位增加锚杆的支护长度及提高初衬的支护强度，即靠河侧与隧道中线夹角

55°范围内的锚杆加长至每根 4.5 m，其他部位及衬砌的参数不变。设计方案见图 3，计算结果见图 4。

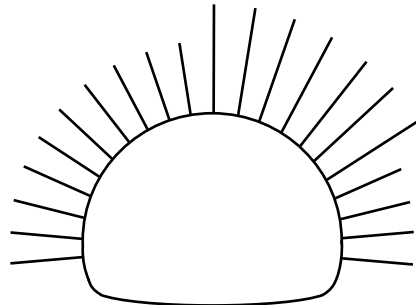
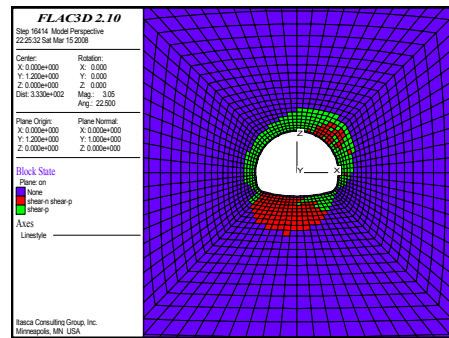
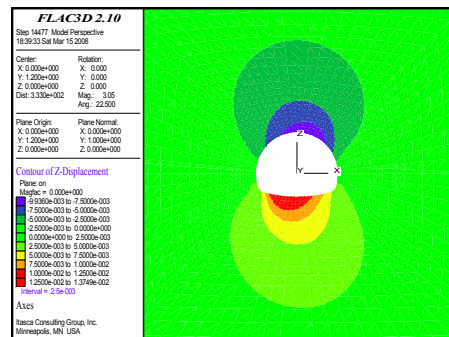


图 3 改进设计支护方案

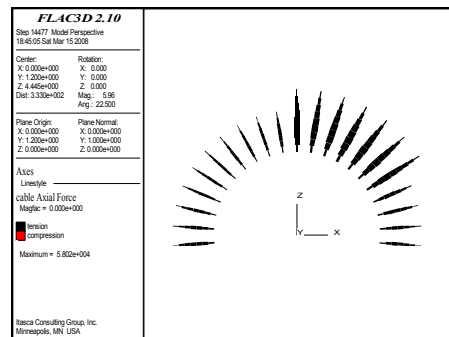
Fig.3 Modified scheme I of support design



(a) 塑性区



(b) Z方向位移场 (单位：m)



(c) 锚杆拉力 (单位：N)

图 4 改进方案 I 的计算结果

Fig.4 Calculating results of modified scheme I

从图 4 可以看出，采用改进方案 I 中，围岩的塑性区特别是当前剪切塑性区范围明显减小，锚杆

拉力以及拉应力显著增大，其支护效应能够得到充分的发挥。现场监测表明，当隧道采用优化设计方案 I 进行施工后，H 型钢实验段围岩变形得到一定控制，围岩变形速率与其他各段相比有较明显的改善，并且断面注浆后，围岩变形速率下降明显。在采取注浆小导管注浆加固后，各监测断面，特别是左右线各 20 m 内全断面段，围岩变形速率下降明显。

3.3 改进支护设计方案 II

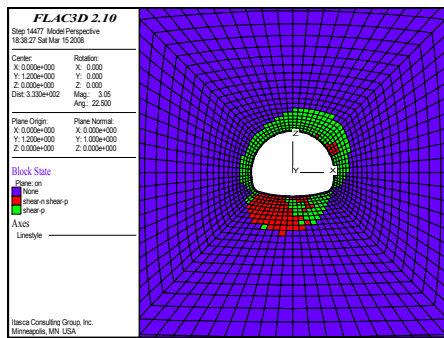
与改进方案 I 类似，即靠河侧与隧道中线夹角 55° 范围内的锚杆每根加长至 6.0 m，其他部位及衬砌的参数不变。计算结果见图 5。采用改进方案 II，围岩的塑性区特别是当前剪切塑性区范围进一步减小，且小于锚杆长度为 4.5 m 的塑性区范围，锚杆拉力以及拉应力继续增大，因此随着薄弱部位锚杆长度的增加，支护效应增强。

以上 3 种支护方案的计算结果表明，隧道围岩以剪切破坏为主要形式，随着靠河侧拱肩部位锚杆长度的增加，当前剪切破坏的区域（塑性区）逐渐变小，锚杆拉力（应力）逐渐变大，变化相对明显，其支护作用得到充分发挥；衬砌的应力逐渐变大，最大竖向位移逐渐变小，变化相对不明显，数值比较见表 2。对比结果可知，两种改进方案均优于原设计方案，且两种改进方案的塑性区相差不大。考虑现场施工的复杂性和节约成本等因素的影响，改进方案 I 优于方案 II，应作为首选方案。通过试验段采用改进方案 I 施工后，现场监测表明能够满足隧道稳定性的要求，亦证明优化设计方案 I 是合理的、正确的。

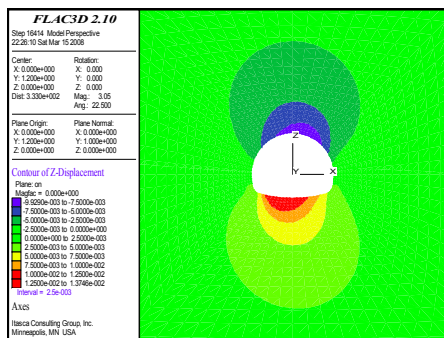
表 2 3 种设计方案的计算结果对比

Table 2 Calculating results compare three design schemes

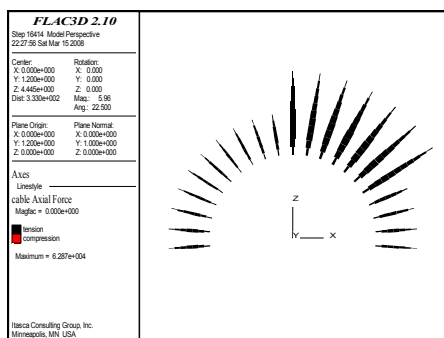
方案	锚杆拉力 /kN	锚杆应力 /MPa	竖向位移 /mm	衬砌应力 /MPa
原方案	43.04	113.2	9.95	90.20
改进方案 I	58.02	152.6	9.94	90.32
改进方案 II	68.27	165.4	9.93	90.34



(a) 塑性区



(b) Z 方向位移场 (单位: m)



(c) 锚杆拉力 (单位: N)

图 5 改进方案 II 的计算结果

Fig.5 Calculating results of modified scheme II

4 结 论

(1) 岩体具有横观各向同性特点，且围岩明显受顺层偏压，应选择及建立横观各向同性弹塑性本构，解决围岩具有横观各向同性力学性质的工程问题，本文计算结果与现场监测的破坏形式和破坏部位完全吻合。

(2) 原支护设计存在缺陷，靠河侧拱肩部位的剪切破坏没有得到根本改善，故原设计方案不能满足隧道围岩稳定性的要求，必须修改其支护方案，采用常用的方式对薄弱部位增加锚杆的长度以及衬砌的支护强度。

(3) 对 3 种支护设计方案的数值模拟表明，考虑到围岩稳定、便于施工及工程造价等因素对比的两种改进方案，方案 I 优于方案 II，最终选择改进支护设计方案 I。

参 考 文 献

[1] 李利平, 李术才, 赵勇, 等. 超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2109 - 2118.

LI Li-ping, LI Shu-cai, ZHAO Yong, et al. Spatial deformation mechanism and load release evolution law of surrounding rock during construction of super-large section tunnel with soft broken surrounding rock

- masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 2109 - 2118.
- [2] 刘泉声, 张伟, 卢兴利, 等. 断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(10): 1954 - 1962.
LIU Quan-sheng, ZHANG Wei, LU Xing-li, et al. Safety monitoring and stability analysis of large-scale roadway in fault fracture zone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 1954 - 1962.
- [3] 朱维申, 孙爱花, 王文涛, 等. 大型洞室群高边墙位移预测和围岩稳定性判别方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(9): 1729 - 1736.
ZHU Wei-shen, SUN Ai-hua, WANG Wen-tao, et al. Study on prediction of high wall displacement and stability judging method of surrounding rock for large cavern groups[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1729 - 1736.
- [4] 杨振茂, 马念杰, 孔恒, 等. 以地应力为基础的锚杆支护设计方法[J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, 22(2): 270 - 275.
YANG Zhen-mao, MA Nian-jie, KONG Heng, et al. Design method of bolt support for coal seam roadway based on geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 270 - 275.
- [5] 余伟健, 高谦, 朱川曲. 深部软弱围岩叠加拱承载体强度理论及应用研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(10): 2134 - 2142.
YU Wei-jian, GAO Qian, ZHU Chuan-qu. Study of strength theory and application of overlap arch bearing body for deep soft surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2134 - 2142.
- [6] 黄书岭, 王继敏, 丁秀丽, 等. 基于层状岩体卸荷演化的锦屏 I 级地下厂房洞室群稳定性与调控[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(11): 2203 - 2216.
HUANG Shu-ling, WANG Ji-min, DING Xiu-li, et al. Stability and control for underground caverns of Jinping I hydropower station based on unloading evolution of layered rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(11): 2203 - 2216.
- [7] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(19): 3281 - 3287.
CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. Excavation and optimization theory for giant underground caverns constructed in high dipping laminar strata[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3281 - 3287.
- [8] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J]. **岩石力学与工程学报**, 2002, 21(3): 335 - 339.
LIU Ka-ding, ZHANG Yu-jun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 335 - 339.
- [9] 黄书岭, 丁秀丽, 邬爱清, 等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(8): 1627 - 1635.
HUANG Shu-ling, DING Xiu-li, WU Ai-qing, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rockmass and experimental verification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(8): 1627 - 1635.
- [10] DUVEAU G, SHAO J F. A modified single plane of weakness theory for the failure of highly stratified rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(6): 807 - 813.
- [11] DUVEAU G, SHAO J F, HENRY J P. Assessment of same failure criteria for strongly anisotropic geomaterials[J]. **Mechanics of Cohesive Frictional Materials**, 1998, 3(1): 1 - 26.
- [12] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 399 - 412.
- [13] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(8): 1163 - 1181.
- [14] LEE Y K, PIETRUSZCZAK S. Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(4): 513 - 523.
- [15] 康勇, 杨春和, 何正, 等. 煤系地层大跨度隧道围岩结构稳定性研究[J]. **岩土力学**, 2010, 31(增刊 1): 266 - 270, 278.
KANG Yong, YANG Chun-he, HE Zheng, et al. Stability analysis of surrounding rock structure of large-span tunnel passing through coal seams[J]. **Rock and Soil**

- Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 266 - 270, 278.
- [16] 周晓军, 高扬, 李泽龙, 等. 地质顺层偏压隧道围岩压力及其分布特点的试验研究[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(1): 13 - 21.
ZHOU Xiao-jun, GAO Yang, LI Ze-long, et al. Experimental study on the uneven rock pressure and its distribution applied on a tunnel embedded in geologically bedding strata[J]. **Modern Tunnel Technology**, 2006, 43(1): 13 - 21.
- [17] 王书刚, 李术才, 王刚, 等. 浅埋偏压隧道洞口施工技术及其稳定性分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 364 - 368.
WANG Shu-gang, LI Shu-cai, WANG Gang, et al. Research on construction technique and stability analysis of outlet in shallow tunnel under unsymmetrical pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.): 364 - 368.
- [18] 周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679 - 683.
ZHOU Yu-hong, ZHAO Yan-ming, CHENG Chong-guo, et al. Optimum analysis on the construction process for joint arch tunnels in partial pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(5): 679 - 683.
- [19] 李志勇, 晏莉, 阳军生. 浅埋偏压连拱隧道中导洞塌方数值分析与处治[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 102 - 106.
LI Zhi-yong, YAN Li, YANG Jun-sheng. Numerical analysis and treatment of a collapsed middle drift for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 102 - 106.
- [20] 赵永国, 邵生俊, 韩常领. 浅埋、偏压隧道开挖施工方案仿真分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 509 - 513.
ZHAO Yong-guo, SHAO Sheng-jun, HAN Chang-ling. Simulation on different excavation construction of the shallow-buried tunnel under the uneven rock pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.2): 509 - 513.
- [21] 邓少军, 阳军生, 张学民, 等. 浅埋偏压连拱隧道施工数值模拟及方案比选[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 940 - 943.
DENG Shao-jun, YANG Jun-sheng, ZHANG Xue-min, et al. Numerical simulation of construction and excavating scheme for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(6): 940 - 943.
- [22] 胡学兵, 乔玉英. 偏压连拱隧道施工方法数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(3): 374 - 378.
HU Xue-bing, QIAO Yu-ying. Numerical analysis of construction method for partial press double-arch tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(3): 374 - 378.
- [23] 韩昌瑞, 张波, 白世伟, 等. 深埋隧道层状岩体弹塑性本构模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2404 - 2408, 2414.
HAN Chang-rui, ZHANG Bo, BAI Shi-wei, et al. Research on elastoplastic constitutive model of layered surrounding rockmass of a deep buried tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2404 - 2408, 2414.
- [24] 白世伟, 韩昌瑞, 顾义磊, 等. 隧道应力扰动区地应力测试及反演研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2887 - 2891.
BAI Shi-wei, HAN Chang-rui, GU Yi-lei, et al. Research on crustal stress measurement and inversion of stress disturbed area of a tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 2887 - 2891.