

煤系地层大跨度隧道围岩结构稳定性研究

康 勇^{1,2}, 杨春和¹, 何 正³, 姜永东²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2.重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 3.重庆市安全生产监督管理局执法大队, 重庆 400020)

摘 要: 针对目前大跨穿煤隧道的研究热点, 以重庆市绕城高速公路环山坪隧道为研究对象, 在界定大跨度隧道及分析其围岩稳定性关键影响因素的基础上, 结合现场监测和数值模拟对大跨度穿煤隧道围岩结构稳定性进行了分析。结果表明, 大跨度隧道各处等效应力集中对扁平率变化敏感程度不同, 拱脚最为敏感, 拱顶基本不随扁平率的改变而变化。隧道穿越软弱煤层段时, 围岩应力重分布受影响明显, 拱顶位移随开挖面不断推进急剧增加, 且隧道围岩塑形圈不断向拱顶围岩内部发展。尤其当煤层软弱带与隧道顺层相交时, 隧道荷载结构偏压效应凸显, 偏压荷载随煤层倾角变陡而增大, 易造成支护结构失稳破坏, 在设计及施工中应特别加以重视。

关 键 词: 煤系地层; 大跨度隧道; 偏压; 围岩稳定性

中图分类号: U 459.4

文献标识码: A

Stability analysis of surrounding rock structure of large-span tunnel passing through coal seams

KANG Yong^{1,2}, YANG Chun-he¹, HE Zheng³, JINAG Yong-dong²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Exploitation of Southwest Resources and Environment Disaster Control Project, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Chongqing Administration of Work Safety, Chongqing 400020, China)

Abstract: Focusing on the research hotspot of large-span tunnel passing through coal seams, and taking Chongqing Huanshanping tunnel for example, some works on defining the large-span tunnel and the mechanism of interaction between surrounding rock and support structure was primary conducted, and then on-site monitoring and numerical simulation of the stability of large-span tunnel passing through coal seams were carried out. The results show that the effect of equivalent stress concentration in different part of the tunnel structure has different sensitivities to the change of flat rate, the most sensitive is arch spring, and the crown is the least. Due to sharp stress redistribution when the tunnel is excavated through coal soft rock mass, tunnel crown settlement increases greatly; and the plastic zone can also quickly expand along the coal seam. Specially when the weak coal layer is intersected by the tunnel, the effect of bias pressure becomes much larger and the bias pressure increases with the coal seam steepens, so as to easily lead to the failure of surrounding rock and support structure. Therefore, it should be dealt with carefully during the design and construction.

Key words: coal seams; large-span tunnel; bias pressure; stability of surrounding rock

1 引 言

国内外已兴建了大量的大跨度隧道, 如西德 Wuppertal 市跨度为 36 m 的 Hohnerberg 4 车道公路隧道^[1], 中国辽宁沈阳一大连高速公路开挖宽度达 22.482 m 的 4 车道韩家岭隧道^[2-3], 以及土耳其北部 Bolu 山 Anatolian 高速公路跨度为 16 m 的 3 车道双洞隧道等^[4]。挪威的大跨度地下空间发展迅速且

较为成熟, 已实现在 Barton 岩体质量指标为 4~40 (勉强达到“好”) 的岩体中进行 50 m 超大跨度地下空间的开发利用, 并认为只有将一定量级水平应力保持在稳定状态, 拱形顶部才可用有限长度的锚杆结合钢纤维加强混凝土支护以实现长期稳定^[5]。

对于大跨度隧道, 现有研究的重点集中在施工工艺的优化上^[6-7], 意大利 Pietro Lunardi 针对当时常用的隧道施工方法只适合特定地质条件的缺陷提

出了一种可以修建跨度为 15~50 m 隧道的修建方法, 该法的核心是将众多相邻管棚通过合适的结构在轴向集成为一个强度很高的蜂窝状拱顶^[8]; 斯洛文尼亚 Golover 双洞 3 车道公路隧道施工中采用 3D 收敛测量方法, 监测隧道断面位移、衬砌和围岩应力, 检查 NATM 施工支护的稳定性; 日本建造断面为 200 m² 的公路隧道时, 采用 TBM 法先掘进直径为 5 m 的导巷, 然后用 NATM 施工扩大断面, 依据导巷内监测的位移预测断面扩大后的围岩变形行为^[3]。

遗憾的是, 目前国内关于大跨(大断面)隧道划分尚无统一标准, 国内外 3 车道大断面公路隧道目前主要采用两种断面形式: 一种是三心圆断面形式, 这种构造可以适当降低高跨比, 减少断面开挖面积, 降低建设工程造价, 但扁圆状隧道支护衬砌结构体系的受力状况不利。另一种是单心圆断面形式, 其横断面积要大些, 建设经费较高, 但它结构简单, 施工方便, 在受力状态和运营通风效果方面有明显优势。3 车道及其以上的公路隧道和 3 线以上的铁路或地铁隧道因具有扁圆状结构而常常采取非单一、非常规的施工方法, 连拱隧道的设计与施工难度更加大于双线分离修建隧道^[9-10]。我国公路隧道规范也只提供了 3 车道及以下隧道的支护设计参数, 3 车道以上大跨度的隧道设计理论和计算只能通过工程类比法进行考虑。4 车道公路隧道的设计理论和施工工艺是借鉴 3 车道公路隧道的理论, 3 车道公路隧道的设计理论和施工工艺又是借鉴双车道隧道的理论。大跨隧道岩石力学性质和支护作用的机制研究仍然较为滞后, 国内无统一的勘察设计规范, 同类工程在设计和施工方面差别很大^[11],

尤其是穿越煤系地层时, 更无成熟的规范可循, 故开展煤系地层大跨度隧道结构稳定性的相关研究十分必要。

2 环山坪大跨度穿煤隧道概况

重庆环山坪隧道为双洞人字坡曲墙拱形隧道, 左、右线内边墙相距约 40 m, 单洞路面宽 15 m, 净高 8 m, 净空断面为 124 m², 属大断面公路隧道, 其地质剖面图如图 1 所示, 隧道穿越观音峡背斜东西两翼 T₃xj¹ 含煤地层总长 190 m, 含煤段煤 2~4 层, 属露相含煤地层, 为区域上含煤性较差地段, 局部可采, 须家河组平均总厚度为 505 m, 其中 T₃xj^{1,3,5} 为含煤段, 部分采区被煤矸石、顶底板弃渣回填, 开采后自流排水, 部分垮塌地段可能天然形成老窑积水。历史上曾经开采的煤层厚度均较薄, 可采段一般为 0.2~0.5 m。区内原有小煤窑已全部关闭, 均为低瓦斯矿井, 未出现过瓦斯爆炸、燃烧等事故。

隧址区内煤层均属烟煤, 因而区内煤层所形成的瓦斯总量有限, 属低瓦斯工区, 加之隧道穿越的含煤段均位于背斜翼部, 倾角多为 50°~60°, 埋深在 200 m 以内, 节理裂隙发育, 因此, 瓦斯封闭条件较差, 大量瓦斯聚集的可能性较小。本区煤层属有煤尘爆炸危险性煤, 煤层自燃倾向等级属不易自燃~不自燃, 因煤层薄, 倾角陡, 隧道垂直穿越煤层, 历史上也未发生过煤尘爆炸。据初勘对正线 S20402 号孔中揭露的 T₃xj¹ 煤层的瓦斯压力测试, 煤层瓦斯压力为 0.09 MPa, 压力值较低, 无突出危险性。



图 1 环山坪隧道地质剖面图
Fig.1 The geological profile of Huanshanping Tunnel

3 大跨穿煤隧道稳定性影响因素分析

3.1 跨度影响系数 ω

隧道跨度与隧道埋深、上覆地层的水文地质与工程地质特征、松散状况, 围岩结构特征及风化、破碎程度, 断层影响的程度, 结构强度以及地下水等因素密切相关。在破碎或膨胀性等劣质围岩中, 隧道跨度对围岩压应力大小影响较大; 在完整坚硬

的围岩中开挖隧道时, 隧道跨度对压应力的影响不大^[12]。均布松散荷载等效高度 L 按下式进行计算:

$$L = 0.45 \times 2^{S-1} \omega \quad (1)$$

式中: S 为围岩级别; ω 为宽度影响系数, $\omega = 1 + i(B - 5)$; B 为隧道宽度 (m); i 为 B 每增减 1 m 时的围岩压力增减率 (以 $B = 5$ m 的围岩垂直均布压力为准, 当 $B < 5$ m 时, 取 $i = 0.2$; $B > 5$ m 时,

取 $i = 0.1$ 。

对于大跨度隧道, B 均大于 10 m, 故可取 $i = 0.1$, 从而式 (1) 可简化为

$$L = 0.045 \times 2^{S-1} (5 + B) \quad (2)$$

对于环山坪隧道, $S = 4$, $B = 15$ m, 故 $L = 7.2$ m。

3.2 扁平率 P

地下结构朝着大跨度、小净高的方向发展是必然的趋势, 通常大跨度隧道在宽度增加的同时, 为节省拱部净空, 高度变化不大, 建筑限界变得越来越扁平, 大断面隧道就不得不做成具有扁平形状的拱形结构, 致使围岩和衬砌结构的力学特性发生很大变化。扁平率 (隧道开挖断面圆弧拱弧高与圆弧拱跨度一半之比, 也即高跨比的两倍) 是评价隧道结构稳定性及经济性的一个重要指标^[13], 扁平率越低, 越不利于隧洞的稳定, 并且其开挖后的应力重分布变差, 底脚处的应力集中过大, 因要求较大的地基承载力, 拱顶范围不稳定, 会形成较大的松弛地压等^[11]。扁平率的公式为

$$P = \frac{H}{0.5B} \quad (3)$$

式中: P 为扁平率; H 为隧道拱弧高 (m)。对环山坪隧道, $H = 8$ m, $B = 15$ m, 故 $P = 1.07$ 。

已有研究表明, 大跨度隧道最大等效应力集中系数随隧道扁平率的减小而增大, 二者接近于直线关系。扁平率为 0.5 时, 洞室最大等效应力集中是相同跨度圆形洞室的 1.5 倍以上。大跨度隧道拱顶至拱脚各处的等效应力集中对扁平率变化的敏感程度并不相同, 拱脚附近围岩的等效应力集中对扁平率变化最为敏感, 拱顶附近的等效应力集中基本上不随扁平率的改变而变化。

3.3 偏压效应

隧道结构一般呈马蹄形, 由于地形不对称、上覆岩层倾角、地层岩性等因素的影响以及由于煤层和断层的存在破坏了原岩体介质的“连续性”^[14], 从而造成隧道结构两面荷载不对称, 就形成了偏压。对于大跨度隧道, 偏压情况更为普遍和严重。故在施工中, 针对岩层倾角的不同, 采取合理的开挖方式相较普通跨度隧道更为重要^[15]。隧道跨度大而且结构扁平, 拱腰及边墙处的应力集中较大, 容易造成该处支护结构的破坏, 隧道的开挖和支护方式应相应的调整。由于结构扁平, 尤其是浅埋地段的偏压现象明显, 导坑的围岩应力分布呈不对称分布, 内部围岩应力大于边墙, 应采用不均衡支护体系^[16], 并且高边坡松散土体引起偏压, 极易导致隧道衬砌

出现裂缝^[17]。

根据隧道设计规范, 偏压浅埋 (埋深小于 $(2 \sim 2.5)h$), 隧道垂直压力计算公式如下:

$$Q = \frac{\gamma}{2} [(h + h')B - (\lambda h^2 + \lambda' h'^2) \tan \theta] \quad (4)$$

式中: Q 为偏压隧道荷载; h 、 h' 分别为内、外侧拱顶水平至地面高度 (m); γ 为围岩重度 (kN/m^3); θ 为顶板土柱两侧摩擦角 ($^\circ$); λ 、 λ' 分别为内、外侧的侧压力系数 (m)。

对于非浅埋整体顺层穿煤大跨度隧道, 偏压荷载与煤层倾角密切相关, 煤层可以看成假想的浅埋隧道地面水平, 假设煤层倾角为 α , 则有: $\tan \alpha = (h - h')/B$, 即 $h' = h - B \tan \alpha$ 。

同时, 还可忽略内外侧由侧压力系数和摩擦角所引起的对偏压荷载的修正值, 故式 (4) 可简化为

$$Q = \gamma h B - \frac{\gamma}{2} B^2 \tan \alpha \quad (5)$$

式中: α 为煤层倾角 ($^\circ$)。

对于环山坪隧道: 由于隧道垂直穿越煤层, 故由煤层引起的偏压效应较小。

4 环山坪隧道围岩支护体监测分析

根据环山坪隧道的岩体结构特征和工程地质特征建立了三维数值分析模型 (图 2), 隧道轴线平行和垂直的水平初始地应力如表 1 所示, 隧道围岩类别为 IV 级, 其中煤层的真厚度为 2 m, 相关材料参数见表 2。计算域 xyz 为 $110 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 140 \text{ m}$ 。模型边界 x 方向位移面约束, z 方向位移面约束, 上覆地层厚度 200 m 的荷载压力, 底部边界 y 方向位移面约束。隧道施工按上下台阶法开挖, 加初衬、锚杆和进行仰拱施作, 有限元分析本构模型采用 D-P 屈服准则, 模型共有 11 988 个单元和 52 372 个节点, 计算结果分别见图 3~5。

图 3 表明, 含煤岩层引起围岩应力分布的变化, 导致局部应力集中, 当含煤岩层处于隧道断面拱顶时, 应力集中程度较小, 影响范围较小; 而当含煤岩层接近开挖断面时, 应力集中的范围扩大, 应力集中程度加剧。主应力等值线基本上与隧道横断面中线呈对称的拱形发育, 形成压力拱形态, 软煤岩层的存在使等值线在软岩中向内收缩, 硬岩中向外扩张。软岩中低应力区范围变小, 硬岩中低应力区范围变大。隧道底部的等值线也形成类似的以仰拱为底线的梯形形态。由图 4、5 可得, 掘进过程中围岩变形过程主要取决于开挖面推移过程, 下半断面开挖使围岩变形量值及速率发生跳变, 拱顶 IV 级围

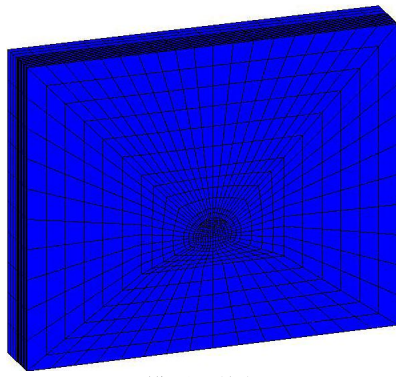


图 2 模型网格剖分图

Fig.2 Finite element mesh of the model

表 1 初始地应力参数

Table 1 Initial in-situ stress at tunnel axial level

垂直地应力 / MPa	水平地应力/ MPa	
	平行隧道轴线	垂直隧道轴线
7.81	9.83	5.90

表 2 有限元输入材料参数

Table 2 Parameters for FEM input

项目	弹性模量 / GPa	泊松比	重度 / (kN/m ³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	抗拉强度 / kPa
IV级围岩	15.0	0.25	25	1 560	45	500
煤岩体	0.9	0.28	12	670	40	300

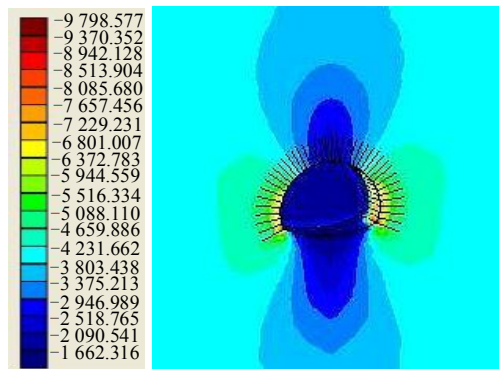


图 3 最大主应力分布图 (单位: kPa)

Fig.3 The contour distribution of maximum principal stresses (unit: kPa)

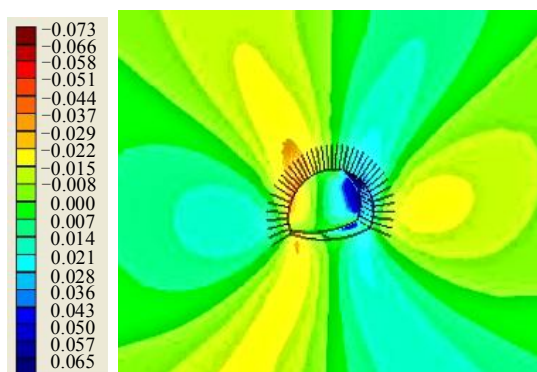


图 4 x 方向位移分布图 (单位: m)

Fig.4 Distribution of displacements in x-direction (unit: m)

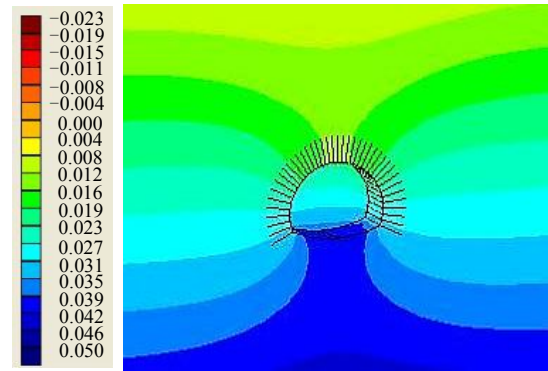


图 5 y 方向位移分布图 (单位: m)

Fig.5 Distribution of y-direction displacements (unit: m)

岩整体下滑趋势更为明显。

与此同时, 还对研究断面的围岩支护系统应力和变形进行了监测, 分别见图 6 及图 7。

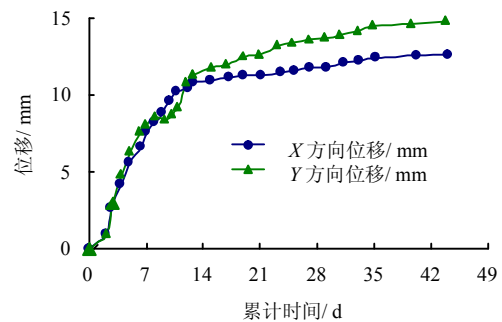


图 6 x 及 y 方向位移随时间变化曲线

Fig.6 Curves of x-direction and y-direction displacements

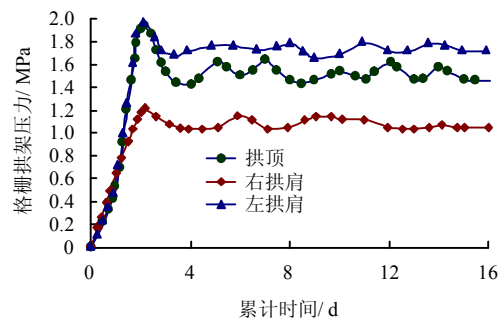


图 7 格栅拱架压力随时间变化曲线

Fig.7 Curves of arch pressure vs. time

在图 6 中, 监测断面水平收敛在 15 d 后逐渐趋缓, 由于下台阶的开挖影响拱顶下沉在 12 d 时收敛速率急剧增大, 大跨度扁担隧道施工时围岩位移的时变响应总体趋势可以用 S 型函数来拟合; 图 7 显示, 格栅拱架压力量级基本稳定在 1~2 MPa, 可见锁口加固拱架达到了预期目的。值得注意的是, 左右拱肩部位压力值相差接近 1 MPa, 说明隧道偏压效应较为明显, 不过由于格栅拱架结构强度较大,

虽在支护结构施作时未充分考虑偏压,但仍未造成不良后果。

5 结 论

通过对煤系地层大跨度隧道围岩及支护结构稳定性的分析,得到以下结论:

(1) 大跨度隧道各处等效应力集中对扁平率变化敏感程度不同,拱脚最为敏感,拱顶基本不随扁平率的改变而变化。

(2) 隧道穿过软弱煤层段时拱顶位移随开挖面不断推进而显著增加,且隧道围岩塑形圈不断向拱顶围岩内部发展。

(3) 煤系地层大跨度隧道围岩变形的相对大小仍然主要取决于上下半断面开挖面推移过程,大跨度平坦隧道施工时围岩位移的时变响应总体趋势可以用 S 型函数来拟合。

(4) 在厚、巨厚层状硬岩所夹的软弱煤系地层和采空回填区中掘进隧道,只要硬岩整体性好,采取适当的支护措施是可以保证隧道的安全和稳定的。

(5) 隧道附近煤系地层对围岩的应力重分布影响较大,特别当煤层软弱带与隧道顺层相交时,隧道荷载结构偏压效应凸显,偏压荷载随煤层倾角变陡而增大,易造成支护结构失稳破坏,在设计及施工中应特别加以重视。

参 考 文 献

- [1] WITTKER W. Design and construction of a shallow tunnel with large span in an urban area[J]. **International Journal of Mining and Geological Engineering**, 1988, (6): 127—146.
- [2] WANG S H, LIU J X, TANG C A, et al. Stability analysis of a large-span and deep tunnel[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(3): 1—6.
- [3] 陈耕野, 刘斌, 万明富, 等. 韩家岭大跨度公路隧道应力监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5509—5515.
CHEN Geng-ye, LIU Bin, WAN Ming-fu, et al. Analysis of stress monitoring of a large-span highway tunnel in Hanjialing mountain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.2): 5509—5515.
- [4] BROX D, HAGEDORN H. Extreme deformation and damage during the construction of large tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1999, 14(1): 23—28.
- [5] EINAR BROCH, ARNE M MYRVANG, GISLE STJERN. support of large rock caverns in norway[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1996, 11(1): 11—19.
- [6] 梁巍, 黄明利. 大跨度隧道 CRD 法穿越含水软弱层沉降变形控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3738—3742.
LIANG Wei, HUANG Ming-li. Subsidence and deformation control of large-span tunnel in water-bearing unfavorable geological conditions with CRD method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.2): 3738—3742.
- [7] 周丁恒, 曲海峰, 蔡永昌, 等. 特大断面大跨度隧道围岩变形的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1773—1782.
ZHOU Ding-heng, QU Hai-feng, CAI Yong-chang, et al. In-situ test on surrounding rock deformation in super-large section and large-span tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1773—1782.
- [8] PIETRO LUNARDI. Method for building large span tunnels by means of a cellular arch: U S, 4929123[P]. 1990-05-29.
- [9] 丁文其, 王晓彤, 李志刚, 等. 龙山浅埋大跨度连拱隧道施工方案优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4042—4047.
DING Wen-qi, WANG Xiao-xing, LI Zhi-gang, et al. Optimal analysis of construction schemes for shallow large span Longshan twin tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4042—4047.
- [10] 蒋树屏, 刘洪洲, 鲜学福. 大跨度平坦隧道动态施工的相似模拟与数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 567—572.
JIANG Shu-ping, LIU Hong-zhou, XIAN Xue-fu. Physical simulation and numerical analysis dynamic construction behavior of large-span flat tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 567—572.
- [11] 张孝伟. 隧道跨度对围岩支护需求的影响分析[硕士学位论文 D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [12] 张孝伟. 深埋隧道围岩压力与跨度的关系研究[J]. 西部探矿工程, 2009, (7): 163—165.

- ZHANG Xiao-wei. Study on the relationship between support pressure of deep-buried tunnel and span[J]. **West China Exploration Engineering**, 2009, (7): 163—165.
- [13] 黄朱林. 扁平率对大跨隧道围岩及支护稳定性影响分析[J]. 西部探矿工程, 2008, (11): 196—198.
- HUANG Zhu-lin. Stability analysis of surrounding rock and support in the tunnel with large span under the effect of flat ratio[J]. **West China Exploration Engineering**, 2008, (11): 196—198.
- [14] 黄生文, 司铁汉, 陈文胜, 等. 断层对大跨度隧道围岩应力影响的有限元法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3788—3793.
- HUANG Sheng-wen, SI Tie-han, CHEN Wen-sheng, et al. Finite element analyses of influence of fault on large-span tunnel surrounding rock stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3788—3793
- [15] YE Bin, ZHU He-hua, XIA Cai-chu, et al. Comparison of different excavation sequences of large-span unsymmetrical arcade tunnel[J]. **Tunnelling and underground Space Technology**, 2004, (19): 415.
- [16] 张顶立, 王梦恕, 高军, 等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 290—296.
- ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, GAO Jun, et al. Construction technique of large-span tunnel under condition of complicated surrounding rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(2): 290—296.
- [17] 潘洪科, 杨林德, 黄慷. 公路隧道偏压效应与衬砌裂缝的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3311—3315.
- PAN Hong-ke, YANG Lin-de, HUANG Kang. Research on unsymmetrical load effect and lining cracks of a highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3311—3315.