

西藏南路越江隧道施工难点和对策

陈传灿¹, 陈立生², 彭少杰², 赵国强²

1. 同济大学汽车学院, 上海 200092

2. 上海第二市政工程有限公司, 上海 200065

摘要 基于上海市西藏南路越江隧道工程的地质条件、周边环境和工程特点, 对该隧道的施工难点和可能存在的风险进行分析, 发现主要存在地层复杂、覆土厚度变化大、穿越黄浦江和已运营隧道等难点。针对以上难点, 结合实际施工过程, 研究大型泥水平衡盾构开挖越江隧道和近距离穿越已运营隧道的相关技术, 并对其经验进行归纳和总结。结果表明, 通过实时控制切口压力、合理设置挖掘速度、严格保证注浆压力和注浆量, 可有效防止盾尾泄漏、保持开挖面水土平衡、控制已运营隧道沉降量。由盾构导向系统和信息管理系统组成的协同运行平台可实现信息的共享和集成, 促进盾构施工的自动化水平。中国已切实掌握大型泥水平衡盾构开挖越江隧道的施工技术, 可为类似工程提供借鉴。

关键词 泥水盾构; 越江隧道; 地质条件; 施工难点

中图分类号 U455.43

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0028-05

Difficulties and Countermeasures for Construction of the River-crossing Tunnel Along the South Tibet Road

CHEN Chuancan¹, CHEN Lisheng², PENG Shaojie², ZHAO Guoqiang²

1. College of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Shanghai No. 2 Municipal Engineering Co. Ltd., Shanghai 200065, China

Abstract Based on the geological condition, surrounding environment and engineering characteristics of the river-crossing tunnel along the South Tibet Road in Shanghai, this paper analyzes the construction difficulties and potential risks, which involve many factors: complicated geological conditions, variable soil thickness, crossing of the Huangpu River and metro M8, the curved excavations. The related technologies were studied, concerning the large slurry balance shield for excavating river-crossing tunnel and traversing operational tunnels under conditions of practical construction. The results indicate that it is possible to prevent leaking of slurry, keep slurry balance on the excavation face and

control the settlement of operational tunnels by controlling pressure and volume of slurry in real-time and keeping an appropriate speed of excavation. The coordinative platform is composed of the guidance system and the information management system for information to be integrated and shared, which improves automation and effective management level of shield construction. The technologies of designing and producing large slurry balance shield can also be used for similar constructions in future.

Keywords slurry shield; river-crossing tunnel; geological condition; construction difficulties

0 引言

为适应上海市经济的持续发展, 完善城市交通体系, 满足2010年上海世博会举办期间浦江两岸场馆联系的需要, 上海市政府决定修建西藏南路越江隧道。

西藏南路越江隧道主要位于规划世博会地块, 沿途经过中国船舶工业第708研究所、江南造船(集团)有限责任公司, 从三号码头下穿越黄浦江, 在上海浦东钢铁(集团)有限公司成品码头下穿越黄浦江岸堤和上海市轨道交通M8线, 经过周家渡船厂、上海浦东钢铁(集团)有限公司, 沿滨州路, 下穿规划的磁悬浮高架桥, 西线下穿浦东南路, 上穿上海市轨道交通M7线, 到达博文路-云莲路(图1)。该工程意义重大, 难度和风险高, 对施工技术和经验提出了极大挑战。

针对盾构施工中的问题, 国内外专家经过多年的研究取得了一些成果。例如, 戴小平等^[1]针对盾构穿越江河浅覆土层最小埋深问题, 提出了新的覆土厚度计算公式, 并通过算例

收稿日期: 2009-07-24

作者简介: 陈传灿, 教授, 研究方向为非开挖施工技术、机电液控制技术, 电子信箱: chence@tongji.edu.cn



图 1 西藏南路越江隧道地理位置

Fig. 1 Position of the river-crossing tunnel on the South Tibet Road in Shanghai

验证了其合理性。卓发成^[2]研究了浦东大道站至杨树浦路站区间隧道中的拔桩施工技术,为以后工程提供了经验。对隧道近距离穿越地下大型构筑物问题,有多名学者展开研究。

李国等^[3]通过建立盾构掘进三维有限元模型,采用数值模拟和室内相似模型进行了试验研究。彭少杰等^[4]采用 3D FEM 数值模拟现场试验研究大型泥水平衡盾构下穿运营地铁施工中参数的合理设置。姜弘等^[5]分析了叠交隧道近距离穿越对既有隧道和地表变形的影响,认为需将地表损失率控制在 1% 以内为宜。

本研究基于上海市西藏南路越江隧道工程的地质条件、周边环境和工程特点,对该隧道的施工难点和风险进行分析,并结合实际施工过程提出相应对策。

1 工程概况和地质条件

根据设计方案,西藏南路越江隧道工程由穿越黄浦江的盾构段、浦东和浦西工作井、矩形段、地面道路段、管理中心大楼、浦东和浦西的风塔及其他配套设施组成。工程建(构)筑物情况见表1。

表 1 建(构)筑物情况
Table 1 Buildings and structures

项目	里程号	施工方式	尺寸和基底埋深
盾构段	江中段:WK0+900~WK1+315 浦东段:WK1+315~WK1+853	双圆隧道盾构掘进	隧道外直径为 11.36 m,埋置标高为-26.5~-36.0 m 埋置深度为 19.5~40.4 m
浦东工作井	浦东:WK1+853~ WK1+871	明挖	平面尺寸为 22.0 m×37.9 m,底板埋深约为 23.7 m
浦东矩形段	主线:WK1+871~WK2+525 EN 匝道:ENK0+025~ENK0+300 NW 匝道:NWK0+125~ENK0+350	明挖	埋深为 0.5~17.0 m 埋深为 0.5~13.9 m 埋深为 0.5~12.8 m
风塔	—	桩基	高约 30 m,1 层基础埋深约 6.55 m

隧道主线全长约 2 640 m,断面布置为双向四车道标准,分为西线隧道和东线隧道。东线隧道长度约为 1 158.772 m,共 772 环,最小转弯半径 700 m,其中江中段 450 m。隧道管片外径 $\phi 11.36$ m,中心环宽 1.5 m,采用通用单面楔形钢筋混凝土管片错缝拼装成环^[6]。

为合理设计隧道施工路线和安全施工,2005年8月至

2006 年 1 月间对浦东段和江中段进行地质勘探, 获得了第一手地质资料。该隧道穿越的土层主要有: ②₀ 灰色黏质粉土、④ 灰色淤泥质黏土、⑤₁₋₁ 灰色黏土、⑤₁₋₂ 灰色粉质黏土、⑤_{1t} 灰色砂质粉土、⑤₂ 灰色砂质粉土、⑤₃ 灰色粉质黏土、⑥ 暗绿色粉质黏土、⑦₁₋₁ 草黄色砂质粉土、⑦₁₋₂ 灰黄色粉砂、⑦_{2t} 粉细砂(图 2)。

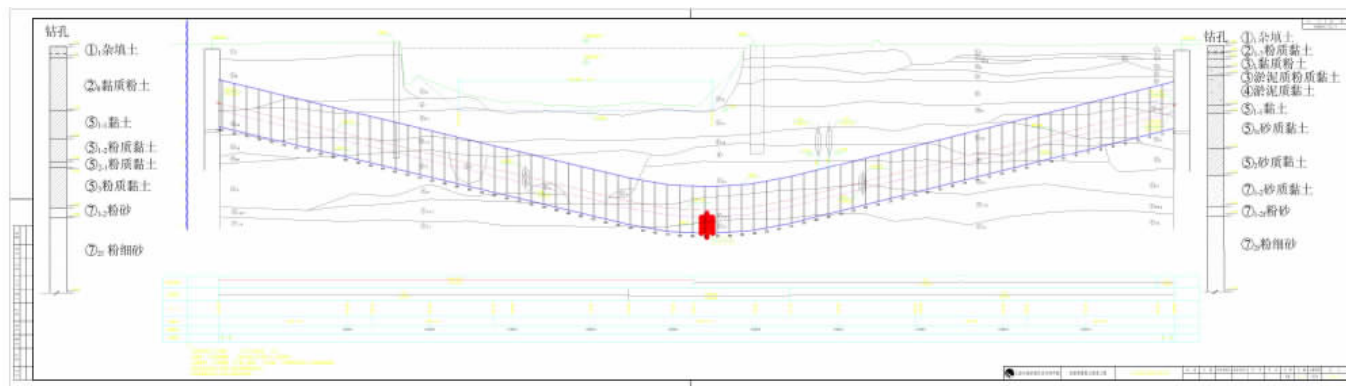


图2 西藏南路越江隧道地质剖面

Fig. 2 Geological section of the South Tibet Road river-crossing tunnel

2 工程难点和风险分析

西藏南路越江隧道在隧道结构、施工路线、地质条件、周围建筑物情况、施工技术等方面有其自身特点,造成施工存在风险,是需要重点解决的难题,具体表现在以下几个方面。

2.1 地层复杂和覆土厚度变化大

西藏南路越江隧道外径达 11.36 m, 与翔殷路越江隧道相同,是当时国内直径最大的越江公路隧道。地质资料表明,盾构在该隧道掘进过程中穿越的土层层数多,且由于土质本身的特点,给施工造成了很大困难。

1) ④、⑤₁层为高含水量、高压缩性、低强度土层,具有明显的塑变性,在一定的动力作用下易发生流变,破坏土体结构,使土体强度突降。⑥层强度非常高,推进阻力大,易导致堵管,并且盾构掘进过程也易发生大幅度旋转现象。

2) 由于砂土和粉土的渗透系数较大,盾构掘进启动时,正面土体的孔隙水消散很快,正面土体的抗剪强度及盾构侧面的摩擦阻力急剧上升,使盾构刀盘扭矩和总推力达到极限值,易使盾构设备受损和机头扭转。另外,粉土、砂土在水动力作用下,极易产生流砂、坍塌等现象,导致掘进面不稳定,对隧道盾构的施工产生不利影响;尤其是突发性的涌水和流砂会引起地面沉降,严重时会随着地层空洞的扩大而导致黄浦江水灌入隧道^[7]。

3) 盾构掘进过程中覆土厚度变化很大,尤其是多次出现浅覆土的情况。例如,在盾构出洞处顶部覆土最小厚度仅为 8.7 m;进洞处顶部覆土最小厚度甚至为 8.2 m,覆土深度不到 1D(D 为盾构直径)。另外,盾构在距离浦西接收井约 40 m 处需穿越江南造船厂坞修车间,此车间有地坑,也属于浅覆土推进。盾构在浅覆土状态下掘进时,易发生地面沉降大、隧道横鸭蛋等问题,甚至出现切口水压无法建立、工作面土体塌方等险情。

2.2 穿越黄浦江

隧道穿越黄浦江段,东起浦东防汛墙,西至浦西防汛墙,总长度 450 m,最小覆土厚度为 11.6 m。盾构进行黄浦江下隧道施工时面临以下风险和难题:

1) 江中段部分盾构完全在⑦₁层中掘进,⑦₁层为承压含水层,而越江段隧道的上覆土厚度较薄,这给泥水压力的选择带来一定难度。若压力过大会造成隧道冒顶,过小又不足以平衡水土压力,所以开挖面平衡条件不易建立。

2) 盾构在黄浦江浅覆土中推进时,由于上部压载及自重无法抵抗地下水引起的浮力,易导致盾构姿态上扬,压坡困难,轴线难以控制^[7]。

3) 黄浦江底地形复杂,极有可能遭遇未知的石头区。一般盾构机刀盘开口率较大,石块易进入泥水仓,增加搅拌机的工作负担,如果遇到比排泥口大的石块时,还经常造成堵塞。面对这种突发险情,如何处理才能保证施工顺利进行是需要解决的难题。

2.3 近距离穿越建筑物

西藏南路越江隧道近距离穿越地铁 M8 线,最近距离仅

为 2.68 m,相交点位于距黄浦江防汛墙 30 m 处的河滩土层,大盾构又处于-4.8%大坡度俯冲的不利姿态(图 3)。越江隧道截面积是地铁隧道的 3 倍多,是国内首例大盾构穿越小盾构的工程,尚没有成功经验可以借鉴,故该段隧道是本工程的重点和难点。施工过程中盾构切口水压、同步注浆压力及注浆量、施工推进参数等对 M8 线的隆沉、接缝渗漏水、结构内力变化、运营安全等的影响究竟如何需要认真研究,并需采取有效措施确保 M8 线区间隧道安然无恙^[8]。

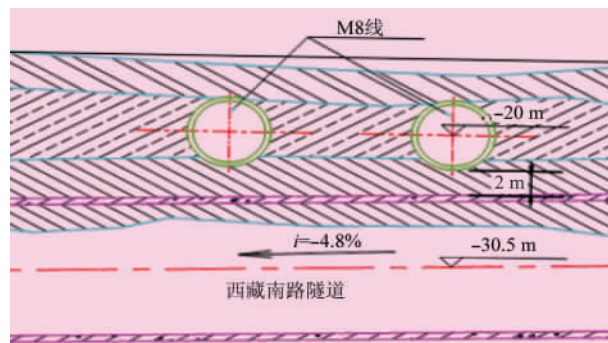


图 3 西藏南路越江隧道与地铁 M8 线位置

Fig. 3 Position of river-crossing tunnel and metro M8 on the South Tibet Road

2.4 穿越桩基区

泥水盾构在浦东和浦西两次穿越防汛墙,在轴线上的里程分别为 WK1+350(EK1+330)和 WK0+895(EK0+900)。在浦东防汛墙位置,上钢三厂成品码头存在型号为 45×45×2600 (mm)和 55 mm×55 mm×2500 mm 的预制方桩基,隧道与桩尖净距仅为 3.4 m。另外,在江南造船厂三号码头也存在 35 根尺寸为 500 mm×500 mm×(31000~33000)mm 的码头桩基,它们在竖直方向上侵入隧道约 9 m(图 4)。为确保盾构顺利通过,必须将这些桩基全部拔除,并回填黏土和砂。由于该地段有建筑物,地下还可能存在着未知的混凝土块、石块或干板等物质,这些潜在的障碍物比已探知的障碍物更加危险,在具体施工时要特别注意。以上这些都给工程的准备和具体开展带来了极大困难及安全隐患。



图 4 码头桩基

Fig. 4 Sketch of pile foundation of wharf

3 施工对策

3.1 穿越黄浦江技术

为保证盾构安全穿越黄浦江,在浦东防汛墙以东 30 环的掘进过程中进行浅渣沉降监测,并及时调整各类施工参数,以保证盾构顺利穿越黄浦江。

盾构在 357 环左右刚进入黄浦江时,排泥泵经常发生堵塞。针对这种情况,在 1 号车架后面的排泥管上安装垃圾箱,一方面保护排泥泵,另一方面在堵塞的时候便于疏通,安装后效果明显。

在江底施工时切口水压的设定尤其重要。在 371 环位置, 由于前一环接泵管时切口水压无法保证, 所处土层比较薄弱, 部分土体坍塌进泥水仓, 导致下部排泥口堵塞。在使用逆洗推进 500 mm 后, 再转掘削, 即通畅。此后, 每次接泵管前, 都要求必须将 3 寸补液管接好, 切口水压可以补偿时, 方可拆泵管。在推进过程中, 要求将切口水压波动值控制在 $-0.02 \sim 0.02 \text{ MPa}$ 之间, 保证正面稳定; 同时合理设定推进速度保证推进速度稳定, 开始推进和结束推进时, 速度逐渐提高或减小; 严格控制出土量, 原则上按理论出土量出土; 控制同步注浆压力, 并在注浆管路中安装安全阀, 以免注浆压力过高而顶破覆土。

在穿越黄浦江施工过程中防止盾尾漏浆至关重要。为防止盾尾严重漏浆,在下三块管片拼装时垫放止水海绵,封堵管片与盾构间的间隙;管片拼装尽量居中,以防盾构与管片之间建筑空隙过大;盾尾油脂做到定期、定量、定位压注。当盾尾出现少量漏浆时,应及时补油脂,并适当调低切口水压,防止情况恶化。同时,为防止盾尾漏浆后泥水积蓄,现场堵漏抢险物资应充足,确保有足够的备用聚氨酯和抢险设备^[9]。通过以上施工措施,在穿越黄浦江的整个过程中未出现大的盾尾漏浆情况。

3.2 近距离穿越已建隧道技术

西藏南路越江隧道东线与轨道交通 M8 线在距离黄浦江岸约 80 m 处斜交,相交处与 M8 线垂直方向的最小净间距为 2 m。2008 年 1 月 21 日,盾构从 256 环进入影响区;于 2008 年 1 月 31 日在 311 环位置完全离开影响区。盾构穿越过程中,通过采取主要措施和辅助措施 2 种方式保证施工安全(表 2),主要包括严格控制切口水压、推进速度和注浆量;保证推进顺畅和注浆量;盾尾脱出 M8 线正下方后,及时进行双液浆补偿以控制沉降。通过以上措施,使得 M8 线最终沉降控制在 10 mm 以内。

表 2 盾构穿越 M8 线影响区采取的措施
Table 2 Measures for shield passing through metro M8

类别	措施系统	具体措施	目的
主要措施 (盾构穿越 M8 线区段采用的措施)	监测	在 M8 线内布设长度为 70 m 的电子水平尺自动监测系统,进行沉降观测;辅助进行水平位移观测 设置土体深层沉降、土体水平位、孔隙水压力等监测点,加密设置地面监测点	根据监测数据的实时反馈,精确确定切口水压与注浆量
	注浆	在西藏南路隧道特殊区段采用含 3 个注浆孔的管片,并多次补浆,根据监测数据进行少量多次精确注浆。	
辅助措施 (对 M8 线隧道影响区段采取的措施)	防水	在 M8 线隧道影响区段内进行全断面柔性防水嵌缝	防接缝渗漏
	结构加固	在 M8 线隧道影响区段内进行内支撑加固	防圆环变形
	注浆	在 M8 线隧道影响区段内布置多套注浆系统,对在西藏南路隧道内注浆起不到作用的区域进行少量多次注浆	防止差异沉降与事故应急

3.3 逆洗掘进技术

盾构自 616 环开始穿越三号码头, 至 632 环盾尾完全穿出。但是在推至 614 环时, 遇到了复杂地层, 大量来历不明的混凝土块、石块和钢板进入土仓。推进时钢板卡住了吸口的搅拌机, 使正循环无法正常进行, 只能采取逆洗推进。逆洗所面临的最大的难题就是地表沉降量的控制。穿越时严格控制切口压力稳定在 0.234~0.242 MPa 之间, 同步注浆量为每环 8.5~9 m³, 并根据江底监测的数据实时进行调整, 最终安全顺利地通过了拔桩区。随后又逆洗穿越了防汛墙, 并在盾尾脱出后补偿双液浆以减小沉降。

需注意的是,在逆洗推进时,送泥从泥水仓底部冲击切削面,造成切削面下部土体损失,从而引起隧道上浮,导致管片

偏差过大^[10]。针对这种状况,应及时调整切口水压,合理排版管片,并在进洞前将盾构和管片姿态调整到正常范围,确保盾构顺利进洞。

3.4 盾构导向与信息协同运行平台

盾构导向系统按照三点法原理,在盾构上确定 3 个观测点进行实时的自动扫描观测,通过切口与盾尾的偏差控制盾构姿态。图 5 为盾构导向系统运行流程。

为实现信息的共享和集成,将盾构导向系统和信息管理系统联合起来,形成协同运行平台。盾构导向系统把盾构的实时姿态偏差传递给信息管理系统,由信息管理系统记录保存,显示给地面控制室的技术人员,并完善盾构掘进过程中的历史数据。信息管理系统把管片环号、坡度、轴向转角等掘

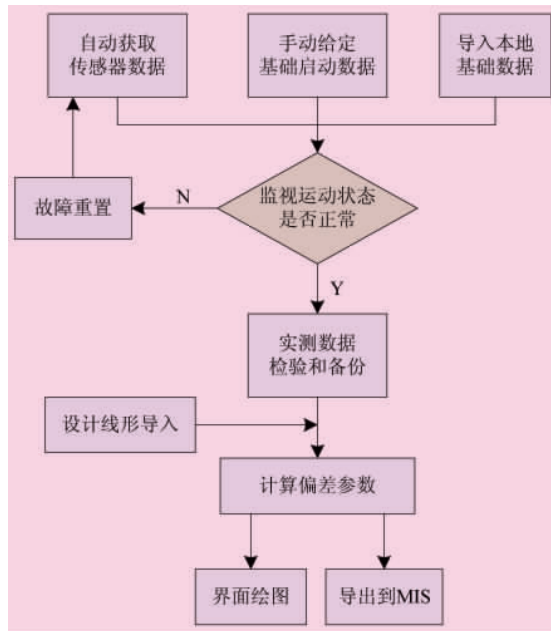


图5 盾构导向系统流程

Fig. 5 Flow chart of shield guidance system

进参数提交给导向系统,并进一步显示在驾驶室的触摸屏上(图6)。

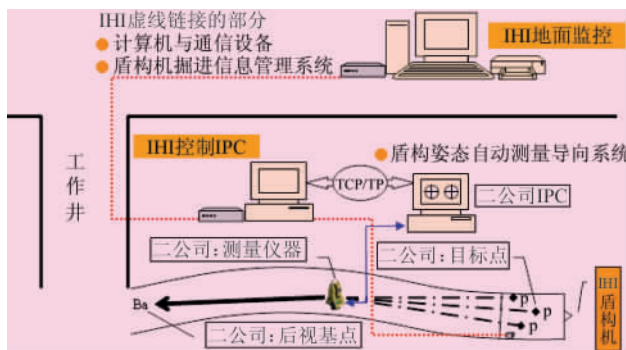


图6 盾构导向与信息管理系统协同运行平台原理

Fig. 6 Coordinative platform of guidance and information management on shield

由盾构导向系统和信息管理系统组成的协同运行平台实现了二者之间的数据通信、共享、一体化操作和集成报表,为实现盾构准确掘进、自动化施工和有效管理提供了一种重要的技术手段。

4 结论

在分析上海西藏南路越江隧道工程施工难点和风险的基础上,结合实际施工过程,对大型泥水平衡盾构开挖越江隧道的相关技术进行了总结和归纳。

1) 针对大型泥水平衡盾构穿越黄浦江时的泥水平衡和

盾尾漏浆问题,通过实时监测控制切口压力、合理设置挖掘速度、严格保证注浆压力和注浆量,可有效防止盾尾泄漏,保持开挖面水土平衡,实现安全高质的施工。

2) 针对大型泥水平衡盾构首次近距离穿越运营隧道的问题,采取本研究措施可保证施工的顺利推进,减小相互影响,有效地控制运营隧道的沉降。

3) 将盾构导向系统和信息管理系统组成协同运行平台实现信息的共享和集成,可提高盾构施工的自动化水平,减小在盾构测控技术领域与国外的差距。

参考文献 (References)

- [1] 戴小平, 郭涛, 秦建设. 盾构机穿越江河浅覆土层最小埋深的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 782-786.
Dai Xiaoping, Guo Tao, Qin Jianshe. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(5): 782-786.
- [2] 卓发成. 无损拔桩施工技术的应用[J]. 施工技术, 2003, 32(8): 46-47.
Zhuo Facheng. *Construction Technology*, 2003, 32(8): 46-47.
- [3] 李围, 何川. 盾构隧道近接下穿地下大型结构施工影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1277-1282.
Li Wei, He Chuan. *China Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(10): 1277-1282.
- [4] 彭少杰, 杨光辉, 黄醒春. 大型泥水盾构进距离穿越运营地铁关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2008(10): 28-33.
Peng Shaojie, Yang Guanghui, Huang Xingchun. *Urban Roads Bridges and Flood Control*, 2008(10): 28-33.
- [5] 姜弘, 李庭平, 潘国庆. 西藏南路越江隧道工程叠交隧道影响分析[J]. 中国市政工程, 2007(3): 62-63.
Jiang Hong, Li Tingping, Pan Guoqing. *China Municipal Engineering*, 2007(3): 62-63.
- [6] 李围, 何川. 超大断面越江盾构隧道结构与力学分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 76-80.
Li Wei, He Chuan. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 20(3): 76-80.
- [7] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1513-1521.
Sun Jun. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1513-1521.
- [8] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 619-623.
Song Kezhi, Yuan Dajun, Wang Mengshu. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 619-623.
- [9] 顾国明. 大型越江盾构工程施工风险控制[J]. 建筑机械化, 2008, 29(9): 44-46.
Gu Guoming. *Construction Mechanization*, 2008, 29(9): 44-46.
- [10] 陈俊生, 莫海鸿, 梁仲元. 盾构隧道施工阶段管片局部开裂原因初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 906-910.
Chen Junsheng, Mo Haihong, Liang Zhongyuan. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 906-910.

(责任编辑 陈广仁)