

# 复杂工程地质条件下过江盾构 隧道风险管理与对策

戴亚军<sup>1\*</sup>, 王建辉<sup>2</sup>

(1.长沙市轨道交通集团有限公司,湖南长沙410000;2.中国水利水电第八工程局有限公司,湖南长沙410004)

**摘要:**为了研究复杂地质条件下水下盾构隧道的施工风险管理技术,依托长沙地铁4号线跨江段盾构工程,进行工程地质、水位条件、施工范围周边环境的勘察,对此施工区间地质风险进行了详细分析,主要包括盾构机在富水圆砾层、高水压强渗透强风化砾岩层以及岩溶地层中掘进的风险,结合PC法对复杂地质条件下水下盾构隧道地质风险进行分析评估,并提出了对应的风险管理措施,最大程度的降低了风险发生的可能性.为类似地质条件下的盾构隧道施工提供施工风险管理参考.

**关键词:**盾构隧道;复杂地质;PC法;风险评估;风险管理

**中图分类号:**U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2018)03-0045-07

## On Risk Management and Countermeasures of Cross-river Shield Tunnel under the Conditions of Complicated Engineering Geology

Dai Yajun<sup>1</sup>, Wang Jianhui<sup>2</sup>

(1. Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha 410000, China; 2. The Eighth Sinohydro Bureau Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to study the construction risk management techniques of underwater shield tunnels under the conditions of complicated engineering geology, this paper relies on the shield construction of the Changsha Metro Line 4 across the river to survey on the engineering geology, water level conditions, and the surrounding environment of the construction scope. The geological risk is analyzed in detail, mainly including the risk of excavation of shield machine in water-rich round gravel layer, high water pressure and strong weathered conglomerate, and karst formation. Combined with the PC method, the geological risk of underwater shield tunnels under complex geological conditions is analyzed and evaluated. It puts forward corresponding risk management measures to minimize the possibility of risk occurrence, which provides construction risk management references for shield tunnel construction with similar geological conditions.

**Keywords:** shield tunnel; complex geology; PC method; risk assessment; risk management

盾构隧道施工风险是指在孕险环境和致险因子的共同作用下,导致盾构施工过程中隧道本身、周围环境、人员以及施工机械安全出现损害的可能性.孕险环境是指施工过程中地质条件、周边环境、材料性质等施工条件的不确定性,致险因子是由于施工方案不当、施工机械选择不合理以及工作人员的操作失误等导致施工风险发生的导火线.

近几十年来,随着我国城市地下铁道的迅速发展,盾构隧道施工规模和施工难度不断增大,各种近接

既有结构隧道、复杂地质条件隧道、水下盾构隧道等的复杂情况越来越多,以至于盾构隧道一旦发生事故,将带来严重的经济损失和恶劣的社会反响.如何通过科学有效的手段进行施工风险评估和管理,降低事故的发生几率,保证施工安全,是施工风险管理技术亟需解决的问题.

风险管理是研究风险发生规律和风险控制方法的管理技术,通过对施工风险的详细剖析,以最经济、直接、有效的方法处理施工风险,保证施工的安全.在盾构法施工过程中,需要对当前施工状态进行施工风险管理,首先进行风险辨识和风险评估,从而采取合理的措施对风险进行控制,避免风险的发生,对盾构法隧道施工具有重要的意义.盾构法施工孕险环境复杂,致险因子较多,在复杂条件下盾构法隧道施工过程中如何能够有效的辨识、评估和控制施工风险是风险管理技术亟需解决的问题.国内外近年来对盾构隧道施工风险管理方面的研究越来越多,Einstein<sup>[1]</sup>首先从施工风险管理层面上提出了隧道工程应该遵循的原则;Reilly J<sup>[2]</sup>从风险管理技术层面上对盾构隧道工程开发进行定义,指出盾构法隧道施工过程中必须进行施工风险管理,并给出的一套详细的隧道施工风险管理方案;黄宏伟<sup>[3]</sup>制定了盾构隧道施工不同阶段进行不同的施工风险管理措施,对盾构施工风险进行动态评估;陈亮<sup>[4]</sup>、胡群芳<sup>[5]</sup>等通过对盾构隧道施工风险的大量数据统计,研发了软件风险数据库;付宁宁等<sup>[6]</sup>对矿山开采复杂地质环境问题进行深入分析,提出了主要地质风险和管理措施;陈自海<sup>[7]</sup>采用模糊层次分析法对盾构隧道施工进行全面的风险辨识和风险评估,方便准确的划分了盾构施工风险等级;朱二磊等<sup>[8]</sup>针对某隧道工程存在的支护风险,采用FLAC<sup>3D</sup>对不同支护结构和参数进行优化分析,得出最经济的支护风险管理方案.

然而与国外相比,我国对盾构隧道施工风险管理还存在许多缺陷,大多停留在强调施工风险管理的重要性,对施工风险管理的技术的研究不够深入,实际盾构工程中的运用较少.对复杂地质条件下的盾构隧道施工风险管理技术的研究更是少之又少.本文依托长沙地铁4号线阜碧区间跨江盾构隧道,根据地质条件的复杂性,利用 $R=P \times C$ 定级法对施工地质风险进行风险辨识和评估,并提出对应的风险控制措施,保证盾构隧道的安全施工,为类似的工程提供施工风险管理参考.其中 $R$ 表示借鉴以往类似工程施工经验确定的施工风险; $P$ 表示施工风险发生的概率,分为5个等级; $C$ 表示施工风险发生后可能产生的后果,根据风险发生对施工、周边环境和社会舆论等造成影响的程度,定量给这些施工风险产生的后果划分为5个等级.

## 1 工程概况

长沙地铁4号线阜碧区间线路(图1)西起阜埠河站,东至碧沙湖站,区间右线长1 768.575 m,其中下穿湘江段江面平水期宽815.000 m,盾构穿越湘江的实际长度1 031.000 m,区间设置3座联络通道,隧道平面最小曲线半径为400 m,最大坡度为28‰,盾构自碧沙湖站西端头始发后,先后穿越湘江中路、湘江东大堤、湘江、南湖路隧道、湘江西大堤及南湖路隧道B、C匝道.用2台 $\Phi 6250$ 土压平衡盾构机进行长距离一次掘进施工,采用预制管片单层衬砌,管片环采用“3+2+1”模式,区间采用错缝拼装,管片分为标准环管片及左右转弯环,环间采用弯曲螺栓连接,管片外径6 m,内径5.4 m,宽1.5 m,厚0.3 m,C50混凝土.隧道穿越湘江地层主要为强风化砾岩、中风化砾岩,过江段隧道最大埋深26 m,最小覆土深度为7 m.

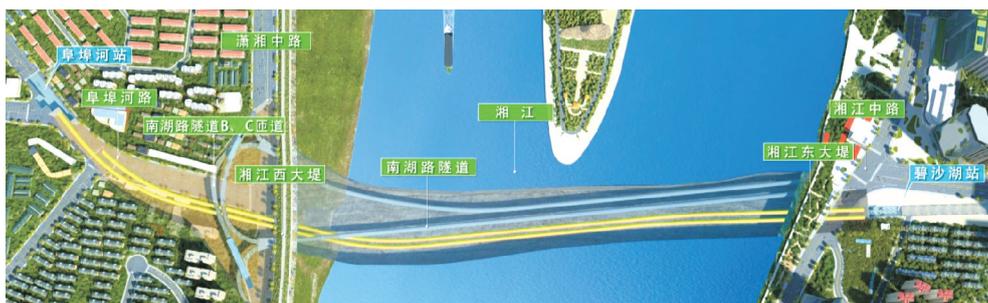


图1 阜碧区间盾构施工隧道平面

## 2 施工风险管理理论分析

### 2.1 施工风险评估

通过对比国际通用的风险评估方法,及对项目适应性的综合考虑,本文利用  $R = P \times C$  定级法.风险评估基本流程如图2所示.

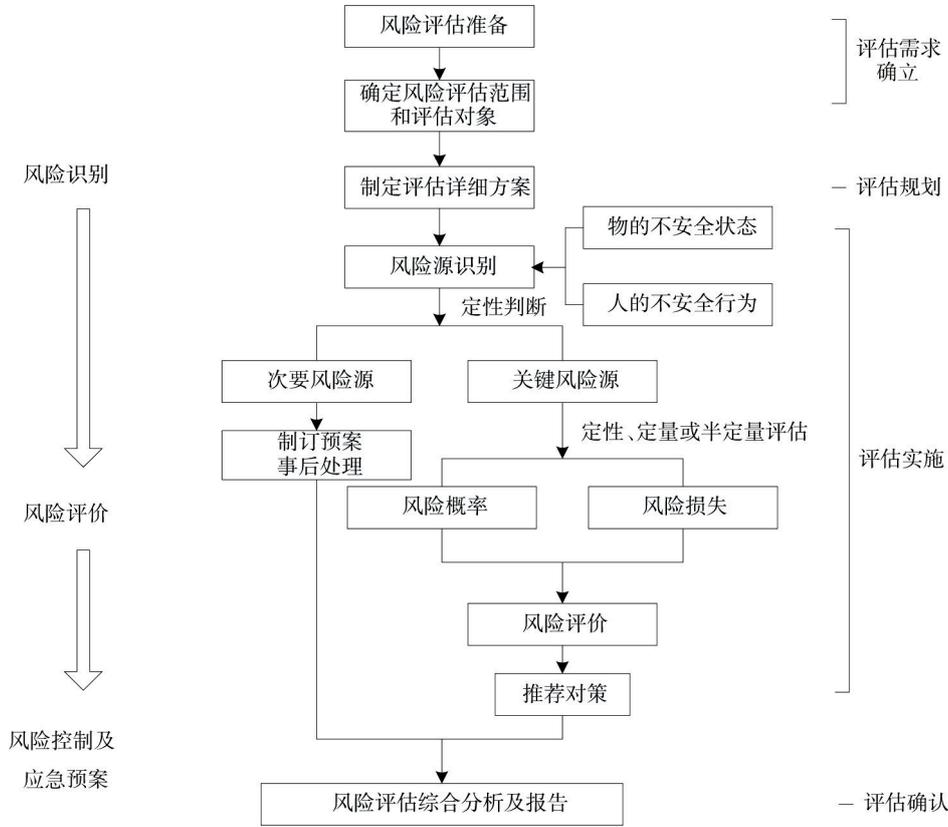


图2 风险评估基本流程

盾构隧道工程设计施工风险等级划分标准如表1所示.

表1 风险等级标准表

概率等级	后果等级	轻微的	较大的	严重的	很严重的	灾难性的
		1	2	3	4	5
很可能	5	III	III	IV	IV	IV
可能	4	II	III	III	IV	IV
偶然	3	II	II	III	III	IV
不可能	2	I	II	II	III	III
很不可能	1	I	I	II	II	III

### 2.2 施工风险管理措施

根据 PC 施工风险评定等级,采取表2对应的风险管理措施标准进行指导施工,制定具体的施工管理方案,保障盾构施工过程的安全.

表2 施工风险等级管理要求

风险等级	处理措施
I	风险水平可以接受,当前应对措施有效,不必采取额外技术、管理方面的预防措施
II	风险水平有条件接受,工程需进一步实施预防措施以提升安全性
III	风险水平有条件接受,必须实施削减风险的应对措施,并需要准备应急计划
IV	风险水平不可接受,必须采取有效应对措施将风险等级降低到 III 级及以下水平;如果应对措施的代价超出项目法人的承受能力,则更换方案或放弃项目执行

### 3 地铁 4 号线水下盾构隧道施工风险管理技术

长沙地铁 4 号线阜碧区间隧道地质条件复杂,根据该区间水文地质勘察资料及隧道设计情况,发现孕险环境主要包括高水压强渗透强风化砾岩、富水圆砾层及岩溶地层中的盾构隧道的施工,对施工风险进行评估,并提出相应有效的风险管理措施,保证盾构隧道的安全施工.

#### 3.1 富水圆砾层中盾构掘进风险管理技术

##### 3.1.1 风险源识别

阜碧区间隧道湘江西段有长约为 253 m 的上软下硬不良圆砾层,洞身主要为圆砾,此地段区间埋深 15 m,从上至下的地层依次为杂填土、粉质粘土、粉细砂、圆砾,其结构如图 3 所示.盾构掘进时,隧道掌子面可能会有较大量地下水涌出,可能会产生流砂、流土、突涌等地质灾害.

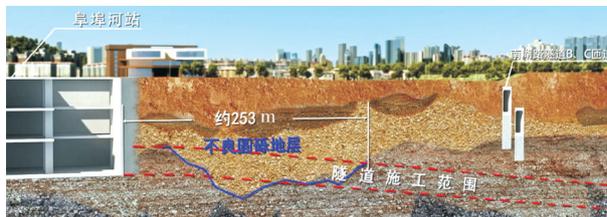


图 3 盾构穿越不良圆砾层

##### 3.1.2 风险评估

流砂、流土、突涌等地质灾害对隧道工程施工的主要风险为:在隧道工程中可能造成大量的砂土流动,使地表塌陷,导致地面塌陷(图 4)、房屋倾斜开裂(图 5)、地下管线沉降损坏(图 6)等工程事故.给施工带来很大的困难,且直接影响到周边建筑物及路面的安全.根据 PC 法风险定性分析,该风险等级为 III 级,必须采取有针对性地措施降低风险.



图 4 地面塌陷



图 5 房屋倾斜开裂



图 6 地下管线损坏

##### 3.1.3 风险管理

富水圆砾层中盾构掘进的风险管理措施:

- 1) 在盾构穿越此地段时,对具备地表加固的区段进行地表注浆加固.
- 2) 在盾构掘进时,采用向刀盘注入膨润土或高分子聚合物,来改良渣土,防止出土时螺旋机喷涌.
- 3) 如果在施工过程中发生螺旋机喷涌,则在螺旋机预留的保压泵渣接口处接入保压泵渣系统,利用保压泵渣系统进行出渣,控制螺旋机喷涌.
- 4) 快速掘进通过,及时进行二次补注浆.
- 5) 盾构掘进完成后及时安排专业队伍对该段地面进行雷达地质扫描,实时了解圆砾层段地层情况,以便发现异常及时采取措施.
- 6) 必要时采取地面跟踪注浆.

#### 3.2 高水压强渗透强风化砾岩中盾构掘进风险管理技术

##### 3.2.1 风险源识别

长沙地铁 4 号线穿越湘江段的地层的地质剖面图如图 7 所示,主要为强风化砾岩(天然抗压强度 1.04~2.94 MPa)、局部存在中风化砾岩(天然抗压强度 3.17~12.57 MPa),一般粒径为 1~2 cm,最大为 5 cm,节理裂隙很发育,渗透性高,渗透系数

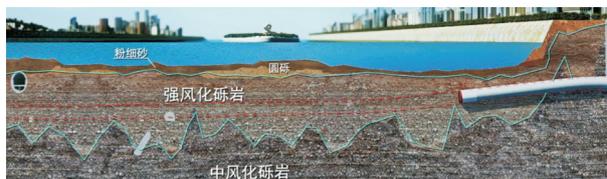


图 7 跨江段盾构隧道地质剖面

$K=0.15 \text{ m/d}$ ,空隙率  $n=0.158$ ,为极软岩、极破碎,岩体基本质量等级为V级,隧道下穿段湘江正常蓄水位为29.7 m,盾构施工水压较高.

### 3.2.2 风险评估

穿越湘江段地层为高水压强渗透的强风化砾岩主要风险如表3所示.

表3 高水压强渗透强风化砾岩中盾构施工风险评估

风险等级	高水压强渗透强风化砾岩地质施工风险	概率等级	后果等级
III	盾构隧道穿越湘江段长距离掘进容易造成刀具的磨损,且在刀盘开口及刀盘中心处易形成泥饼的不利因素,一旦刀具磨损过大或刀盘形成泥饼将导致盾构机无法继续掘进	4	3
IV	高水压情况下,盾尾易发生漏水漏浆,导致盾构发生突涌事故;还可能引发衬砌管片发生上浮,危害衬砌管片的纵向稳定性	4	5
IV	地质勘查孔封孔不到位的情况,会给盾构掘进通过该区域带来很大的安全隐患,可能导致上部江水与盾构土仓连通,造成隧道涌水、钻孔喷涌、江底冒浆等严重后果	3	5

### 3.2.3 风险管理

为保证穿越湘江段盾构隧道安全施工,可采用以下措施降低高水压强渗透强风化砾岩中盾构掘进风险.

1)在盾构机穿越湘江、建(构)筑物、特殊地段前进仓对刀具进行检查与更换;根据地层和地表实际情况,本隧道区间制定4次主动开仓检查及刀具更换点(图8),如需被动开仓,位置根据实际情况而定.

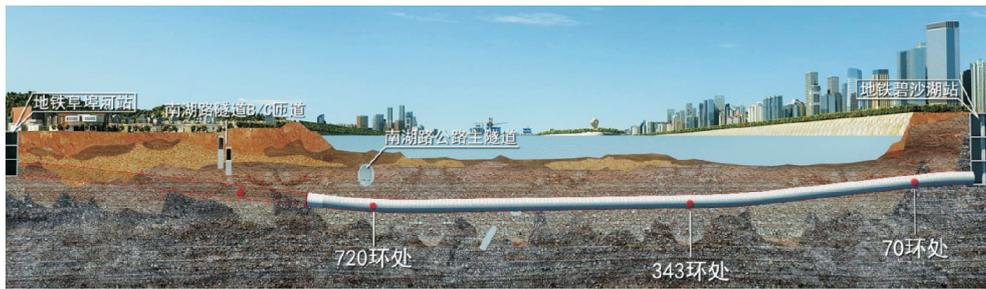


图8 盾构开仓检查及刀盘更换处

2)结合施工监测,定期、定量的向盾尾注入油脂,并在盾尾设置多道盾尾刷,并在盾壳和盾尾刷上防锈剂,并在铰接处设置紧急充气密封.

3)使用快硬早强型注浆浆液,控制同步注浆压力的大小,防止注浆压力过大击穿盾尾刷;并通过控住不同注浆孔的注浆量防止隧道下部注浆压力过大引起衬砌管片的上浮,本工程采用4孔同步注浆,实验表明<sup>[9]</sup>,在上面两个注浆孔注浆量为60%~80%,下面2个注浆孔注浆量为40%~20%时,注浆压力在衬砌管片上的分布为均匀分布.

4)此地层水压较高,通过加长螺旋输送机或采用二次螺旋输送机以防止喷涌风险的发生.

5)对地质勘查孔进行严密封孔.封孔过程中在钻孔中灌入速凝型水泥浆的同时缓慢提起钻杆,直到注浆完成,灌注速凝水泥初凝后,通过钻杆将预制桩塞打入钻孔中,直到速凝型水泥浆液终凝,封孔完成.防止江水通过水下勘探孔注入隧道洞室,造成工程事故的发生.

6)在此施工地段,实行同步信息化施工,加强施工监测频率,严格控制盾构机的纠偏量、土压力仓进出土量和掘进速度.

## 3.3 盾构穿越包含岩溶地层的风险管理技术

### 3.3.1 风险源识别

长沙地铁4号线阜碧区间跨江段盾构掘进范围内有2处岩溶(图9),其中1处岩溶侵入隧道施工范围3 m,为半填充岩溶;另一处位于隧道结构底板以下12.8 m,为无填充岩溶,岩溶最大尺寸为32 m×10.3 m×4.5 m.



图 9 盾构掘进范围内岩溶的位置

3.3.2 风险评估

盾构机在岩溶地区掘进时主要风险如表 4 所示.

表 4 岩溶地区施工风险评估

风险等级	岩溶地区施工风险	概率等级	后果等级
IV	在盾构掘进进入岩溶段,盾构施工时容易发生仓内突水及螺旋机喷涌,甚至造成盾构机低头或陷落,继而造成隧道进水等重大风险(如图 10,图 11 所示)	4	5
III	盾构在开挖过程中突然遇到土质不均匀、表面凹凸不平的岩溶,会因为产生偏压、瞬时荷载增大等造成盾构刀盘的破坏	4	3
II	地下水压很大,而且岩溶地层段易造成开挖面失水,引起盾构开挖和同步注浆注浆困难等	3	2
IV	穿越岩溶段地层的隧道结构的易发生失稳	3	5



图 10 盾构掘进到岩溶的位置



图 11 盾构机低头工程事故

3.3.3 风险管理

盾构穿越岩溶地层风险控制措施:

1)岩溶段施工前应采用地面与洞内地质预报相结合方式探清岩溶的分布、大小、填充物情况.进入岩溶段施工前,在盾构机上配置相当数量的地质钻孔,利用盾构的超前钻探孔进行超前钻探.

2)对于盾构隧道周围 3 m 范围内的岩溶要密实充填并注浆加固,注浆浆液要综合考虑浆液的性质和环保的要求,对本工程选用环保型改性膏浆形成帷幕进行分隔,然后对岩溶腔体采用填注豆粒石+吹沙工艺进行回填及灌浆固结处理(图 12).同时对补勘孔、注浆孔封堵严格要求,确保封孔密实,以避免高达 20 m 的水压与隧道联通造成重大灾害.并检查加固区强度,保证岩溶段地层隧道的稳定性.



图 12 灌浆回填岩溶

3) 盾构机喷涌风险管理措施:(1) 盾构机选用较大强度的主轴承密封,在铰接处设置紧急充气密封,在螺旋输送机出口设置双闸门,盾尾设置多道盾尾刷,同时增加保压泵渣系统,已保证盾构机的正常掘进;(2) 增加盾构超前注浆系统,在盾尾预留超前注浆孔,盾构掘进至风险地段时,超前注浆加固改善盾构前方土体;(3) 向盾构刀盘前方注入膨润土,使刀盘前形成一层密实的泥膜,阻止水涌入土仓;并向土仓中加入膨润土或泡沫剂,改善土仓内开挖土体的和易性,使螺旋输送机出现土塞效应,避免仓内出水和螺旋机喷涌;(4) 若发现有喷涌现象,立即关闭螺旋输送机的后闸门,盾构配合保压泵渣系统继续掘进,保障土压平衡,适当放慢掘进速度,通过刀盘的转动,并向土仓中注入化学改良剂使土仓内的土体搅拌均匀,然后将螺旋输送机的后闸门慢慢打开,控制土仓进出土量,始终保持土仓压力平衡。

4) 岩溶地段盾构推进过程中严格控制盾构姿态,如发现盾构机低头,利用调整千斤顶编组纠偏,并加强同步注浆,利用同步注浆与二次注浆相结合的方法,采用双液速凝浆液,合理控制注浆压力和注浆量,使隧道衬砌保持稳定。

5) 根据地质情况合理对刀盘和刀具选型、施工参数控制以确保岩溶地段开挖面的稳定,并加强施工监测,及时反馈信息,保证施工安全。

随着长沙地铁4号线阜碧区间盾构隧道的顺利施工完成,说明了本文施工风险管理方法在处理复杂地质风险的有效性,以经济、有效的方法防止了不良地质造成工程事故的发生,最大程度的减小了盾构施工对既有结构的影响,保证了盾构施工的安全,取得了较好的社会反响.为以后类似地质条件盾构隧道施工提供借鉴。

## 4 结论

1) 盾构机在富水圆砾层、高水压强渗透强风化砾岩以及岩溶地层中存在流砂、流土、上浮、突涌和喷涌等掘进风险。

2) 盾构机在富水圆砾层中掘进时应对此区段地层进行注浆加固,并在盾构刀盘注入膨润土或高分子聚合物,来改良渣土,防止出土时螺旋机喷涌;高水压强渗透强风化砾岩中盾构掘进应使用快硬早强型注浆浆液,并在盾尾设置多道盾尾刷,定期定量的向盾尾注入油脂,地下水位较高时宜采用二次螺旋输送机。

3) 长沙地铁4号线盾构隧道穿越岩溶段施工中,应该做到盾构机超前钻探、灌浆回填岩溶、严格控制盾构机姿态、双液速凝浆液同步注浆、加强监控量测等一套完整的岩溶地层盾构隧道施工方案。

## 参考文献:

- [1] Einstein H H, Vick S G. Geological Model for Tunnel Cost Model[J]. Proc Rapid Excavation and Tunneling Conf, 1974(2): 1701-1720.
- [2] Reilly J. Management process for complex underground and tunneling projects[J]. Tunnelling Underground Space Technology, 2000, 15: 31-34.
- [3] 黄宏伟.隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J].地下空间与工程学报, 2006(1): 13-20.
- [4] 陈亮,黄宏伟,胡群芳.盾构隧道施工风险管理数据库系统开发[J].地下空间与工程学报, 2005(6): 964-967.
- [5] 胡群芳,刘爽,黄宏伟.盾构隧道施工风险数据库系统设计与开发研究[J].地下空间与工程学报, 2012, 8(s2): 1656-1659.
- [6] 付宁宁,杨静东,赵冬冬.石灰石矿山终采边坡地质环境问题治理及效果分析[J].矿业工程研究, 2017, 32(1): 50-54.
- [7] 陈自海,陈建军,杨建辉.基于模糊层次分析法的盾构隧道施工风险分析[J].地下空间与工程学报, 2013, 9(6): 1427-1432.
- [8] 朱二磊,朱永建,王平,等.基于FLAC<sup>3D</sup>的浅埋破碎围岩隧道支护方案分段优化分析[J].矿业工程研究, 2015, 30(4): 21-26.
- [9] 张莎莎,戴志仁,白云.盾构隧道同步注浆浆液压力分布规律模型试验研究[J].中国铁道科学, 2015, 36(5): 43-53.