

基于FLAC^{3D}的浅埋破碎围岩 隧道支护方案分段优化分析

朱二磊¹, 朱永建^{1,2}, 王平², 陈鑫源¹, 闫帅奇¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 针对某隧道工程存在的过度支护问题, 结合现场调研的情况, 采用FLAC^{3D}软件对该隧道工程的支护结构和支护参数进行优化, 提出了根据围岩稳定性分段支护的方案. 通过对原支护方案和新支护方案的对比分析结果表明: 原支护方案虽能控制围岩变形, 但是支护成本过高. 经优化后的支护方案在有效控制隧道围岩的变形的前提下能够最大程度的节约支护成本, 获得了显著的经济效益.

关键词: 过度支护; 围岩岩性; 分段支护; 数值优化

中图分类号: U455.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2015)04-0021-06

Segment optimization of shallow tunnel with broken surrounding rock support based on FLAC^{3D}

ZHU Erlei¹, ZHU Yongjian^{1,2}, WANG Ping², CHEN Xinyuan¹, YAN Shuaiqi¹

(1. School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: According to the problems of excessive support of a tunnel project, this paper, combined with the case of the site investigation, optimization of supporting structure and supporting parameter about the tunnel project by FLAC^{3D} software, proposes the segment support plan based on the surrounding rock stability. By comparative analysis, the results of the original support plan and the new support plan show that the original supporting plan can control the deformation of surrounding rock, but the support cost is higher. The optimized plan can not only control the deformation of surrounding rock of tunnel but also save the support cost maximization, getting the significantly economic benefits.

Key words: over support; surrounding rock lithology; segment support; numerical optimization

相比地面工程而言, 地下空间工程的变形破坏较难预测, 其失稳机制具有隐蔽性、突发性和破坏性特点^[1]. 这对于地下工程岩体的支护设计带来了一定的困难, 往往会造成支护强度不够或者是过度支护问题. 为了保证地下空间工程长期、安全的使用, 对于工程岩体的支护设计一般都比较保守, 设计人员往往人为的增大支护参数, 导致隧道设计的安全系数普遍偏大, 造成极大的经济浪费^[2]. 近20多年来, 工程设计优化发展迅速, 使优化理论与电脑技术相结合, 运用到工程设计中, 这是一种新型的设计方法. 根据现有的经验, 优化设计与传统设计相比可使地下工程的造价费用降低5%~30%^[3,4]. 计算机的飞速发展和商业化数值模拟软件的流行使得大型地下工程的数值模拟成为了可能. 通过数值模拟可以快速、低成本的实现多种支护方案的优化分析, 是目前支护优化的重要手段.

收稿日期: 2015-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374106); 湖南省煤矿安全开采重点实验室开放基金资助项目(201404)

通信作者: 朱永建(1973-), 男, 安徽安庆人, 博士, 副教授, 研究方向: 矿山压力与岩层控制. E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 可用来模拟土层、岩石及其他材料的力学行为,这类材料在达到它们的屈服极限时可能经历塑性流变^[5,6]. 程序内部含有多个力学模型,可用于模拟高度非线性、不可逆等地质材料的变形^[7,8]. 此外,还具有强大的前处理和后处理功能,使得数值的输入和输出结果的可视化程度较高. 基于上述优点,本文拟采用 FLAC^{3D} 软件对某隧道支护结构和参数进行优化对比分析,为隧道支护提供一个安全高效、经济合理的支护方案.

1 工程概况

某段隧道(里程为 K2+388.16~K2+648.22)拟采用单洞形式开挖,原始地貌为缓斜坡及早地,地层岩性为沙溪庙组泥岩、砂岩地层,地层单斜,局部地段层面裂隙较发育,岩体较破碎-较完整,主要为极软岩-软岩,围岩级别为 V 级(勘探资料提供,与现场勘察情况有些出入). 为浅埋-深埋隧道,地下水为第四系孔隙水、基岩裂隙水,水文地质条件较简单,勘察期间地下水较小,根据计算平季预计正常涌水量 698 m³/d,但在雨季施工,水量将增大. 由于洞口覆盖层较厚,基岩较薄,原设计建议采用台阶分步法进行开挖,对洞顶周围围岩先进行超前注浆做预加固处理,之后采用超前管棚法进行施工,在洞室开挖后,应及时做好初次衬砌,并且跟进二次复合衬砌^[9].

2 数值模拟及结果分析

根据工程实际条件,应用 FLAC^{3D} 软件对该段隧道进行数值计算,并优化其支护方案. 根据现场调查,该段隧道围岩岩性包含 V 和 IV 这 2 类,且上覆岩层结构变化明显,综合考虑两者对隧道变形带来的影响,决定将该段巷道分为 3 段,即:K2+388.16~K2+455 段,标高为 +413.57 m,岩性为 V 类;K2+455~K2+520 段,标高为 +395.30 m,岩性为 IV 类;K2+520~K2+648.22 段,标高为 +375.21 m,岩性为 V 类. 因此,根据所提供的工程地质剖面图,所建的三维模型的尺寸为: X × Y × Z = 260 m × 80 m × (地表高程 - 350 m),见图 1 所示. 各段数值计算参数如表 1 所示.

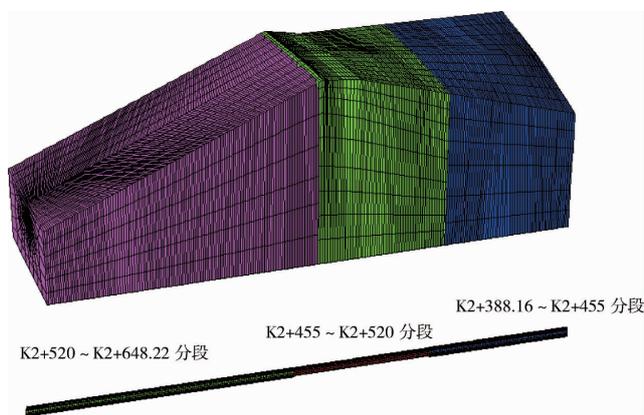


图 1 隧道三维数值模型

表 1 数值计算参数

围岩性质 (自下至上)	重力密度 /(t/m ³)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /GPa	泊松比
K2+388.16~K2+455 段	24.9	4.3	0.31	1.10	31.0	0.16	0.39
K2+455~K2+520 段	22.6	5.6	0.34	1.30	32.0	1.20	0.30
K2+520~K2+648.22 段	24.6	3.1	0.38	1.80	33.5	1.18	0.34

模型包含 113 358 个单元和 119 549 个节点. 边界条件为下边界,位移为零;在左、右、前、后边界,施加水平构造应力;上边界,自由边界. 在分析中,为了提高安全系数,侧压系数取值为 1. 计算将采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则. 根据地质报告和勘察报告,地层基本上为 J2s,围岩计算可采用表 1 中所确定的力学与变形参数,但在初始应力场模拟时,可采用较高的矿岩体参数或采用弹性模块进行计算,避免因岩体参数过低在模拟初始应力场中产生塑性区域^[10].

2.1 支护计算参数选取

根据资料显示:K2+388.16~K2+455 段隧道和 K2+520~K2+648.22 段隧道由于围岩类型均为 V 类,其原支护方案同为 B 型支护形式:一次支护,采用 C20 喷射混凝土初衬,厚度为 250 mm,双向钢筋网, I18 型钢拱架;二次支护:C25 钢筋混凝土衬砌,厚度为 300 mm,砂浆锚杆呈梅花状布置;K2+455~K2+520 段隧道由于围岩类型属于 IV 类,其原支护采用 C 型支护形式:一次支护,采用 C20 喷射混凝土初衬,厚度为 150 mm,双向钢筋网, I18 型钢拱架;二次支护, C25 钢筋混凝土衬砌,厚度为 300 mm,砂浆锚杆呈

梅花状布置;

从原方案来看初次支护和二次支护均采用了较厚的喷射混凝土衬砌,根据理论分析可知混凝土初衬具有封闭围岩、防止围岩风化弱化的作用,而二次支护一般是为了实现隧道围岩变形的永久稳定^[11],在原方案中已采用了砂浆锚杆,能够提供较大的支护力.二次衬砌的作用及其支护效果还尚不清楚,因此,初步拟定将原方案和去掉二次衬砌的原方案进行数值模拟对比,根据模拟结果优化支护方案.两种支护方案对应的实体计算参数和锚杆计算参数分别见表2和表3所示.

表2 原支护的实体计算参数

支护类型	围岩性质	厚度	容重	抗压强度	抗拉强度	粘聚力	内摩擦角	弹模	泊松比
	自下而上	/mm	/(t/m ³)	/MPa	/MPa	/MPa	/(°)	/GPa	
B型	一次支护	250	26.0	14.6	1.01	1.11	31	30	0.21
	二次支护	300	26.5	18.6	1.21	1.30	32	32	0.20
C型	一次支护	150	26.0	14.6	1.01	1.11	31	30	0.21
	二次支护	300	26.5	18.6	1.21	1.30	32	32	0.20

表3 原支护的锚杆计算参数

支护类型	支护结构	长度/m	间排距/m	直径/mm	锚固长度/m	锚固力/kN
B型	锚杆	3.0	1.0	20	1.0	20
C型	锚杆	≥3.0	1.0	20	1.0	20

2.2 原支护方案计算结果

考虑到隧道位于斜坡内,水平地应力较小,因此,主要分析隧道垂直方向位移.一般情况下,拱顶是整个隧道断面变形最敏感的部位,对拱顶的下沉位移进行监测是较为合理的.将原支护方案参数输入到已建立的数值模型中,经过一定的迭代计算后得到各段隧道应力、塑性区和拱顶下沉位移结果,由于篇幅限制这里只列出代表性强的拱顶位移曲线如图2到图4所示.(说明:图2中隧道长度0对应于K2+388.16;20对应于K2+408.16;40对应于K2+428.16;60对应于K2+448.16.图3中隧道长度0对应于K2+455;20对应于K2+475;40对应于K2+495;60对应于K2+515.图4中隧道长度0对应于K2+520;20对应于K2+540;40对应于K2+560;60对应于K2+580;80对应于K2+600;100对应于K2+620;120对应于K2+640,后文拱顶位移曲线图中均按此对应.)

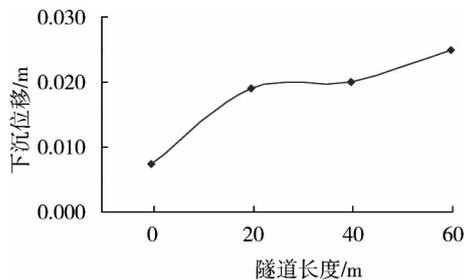


图2 K2+388.16 ~ K2+455 隧道拱顶位移曲线

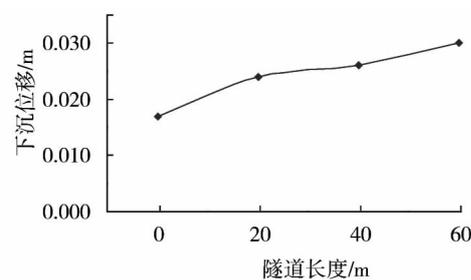


图3 K2+455 ~ K2+520 隧道拱顶位移曲线

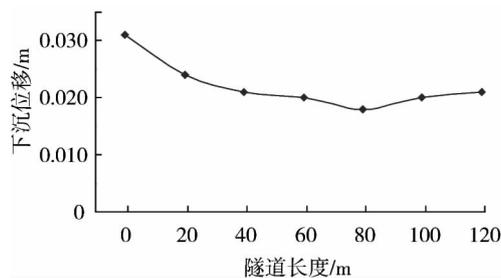


图4 K2+520 ~ K2+648.22 隧道拱顶位移曲线

通过对K2+388.16 ~ K2+648.22段隧道的应力模拟可知该段隧道整体处于中低应水平中,但岩体

稳定性较低.从整个数值计算来看,采用设计的支护型式,由于支护强度较高,没有出现明显的应力集中现象,完全可维护围岩的稳定.从位移规律来看,在 K2+388.16~K2+455 段,虽然位移量不大,但在浅部软弱岩体中开挖时,应注意由于开挖的影响首先会使开挖周围发生较大的下沉,使周边高程较高的岩体滑动趋势增大,容易发生滑坡的危险.从隧道围岩的最终位移曲线来看,进行二次支护后,一般都达到了稳定,隧道的拱顶位移和侧墙位移都较小,这里内外两层支护结构起到了主要作用.此外,在浅部软弱岩体中开挖时,隧道围岩出现了一定的塑性区,主要分布在拱角、边墙及底脚处.

2.3 去掉二次衬砌后的计算结果

去掉原支护方案中的二次衬砌后对该段隧道重新进行了计算,得到 3 段隧道的拱顶位移曲线如图 5~图 7 所示.

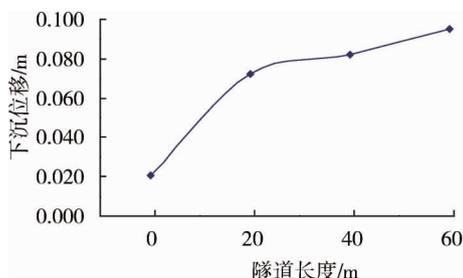


图 5 K2+388.16~K2+455 隧道拱顶位移曲线

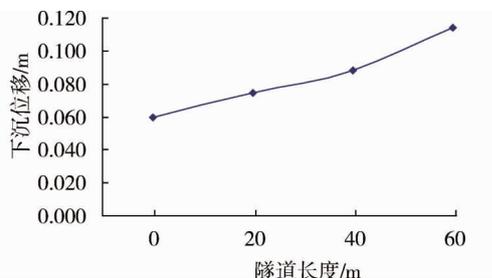


图 6 K2+455~K2+520 隧道拱顶位移曲线

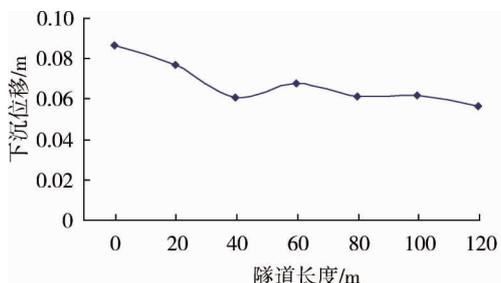


图 7 K2+520~K2+648.22 隧道拱顶位移曲线

各段隧道开挖并进行支护后的隧道口应力由于支护强度降低,支护结构出现了明显的应力集中现象,特别是 K2+388.16~K2+455 段和 K2+520~K2+648.22 段隧道.从各个方向的应力来看,在隧道顶拱(包括两侧拱角)、低拱(包括两侧拱脚)都出现了较高的应力,而边墙的应力较小,因此,隧道的顶拱和拱底是受力的主要部位.从拱顶监测位移来看,没有进行二次衬砌后的变形量一般较原来增加到 3~4 倍.尤其对于 K2+388.16~K2+455 段和 K2+520~K2+648.22 段隧道,其拱角和拱脚处出现较多的拉伸破坏单元.

3 优化方案的数值计算及结果分析

3.1 优化支护方案

根据以上 2 种计算分析结果,并参考现场调研情况,综合考虑各方面影响因素进行优化后提出以下支护方案:

1) K2+388.16~K2+455 段和 K2+520~K2+648.22 段:在 B 型支护型式的基础上,对二次衬砌和锚杆的支护参数进行调整后如下支护方案:一次支护:C20 喷射混凝土厚 250 mm,双向钢筋网,II8 型钢拱架.砂浆锚杆呈梅花状布置,帮部间排距为 1.2 m×1.2 m,拱顶间排距为 1.0 m×1.2 m.二次支护:C25 钢筋混凝土衬砌厚 150 mm.

2) K2+455~K2+520 段支护在 C 型支护型式基础上,对二次衬砌和锚杆的支护参数进行调整后,支护方案变为:一次支护:C20 喷射混凝土厚 150 mm,双向钢筋网.砂浆锚杆呈梅花状布置,其间排距为 1.2 m×1.2 m,拱顶间排距为 1.0 m×1.2 m.二次支护:C25 钢筋混凝土衬砌厚 150 mm.

3.2 支护结构模型及计算参数

在原数值模型基础上,改变支护参数后进行三维数值计算,围岩计算参数仍采用表 1 中所确定的力学参数.优化后的支护形式模型见图 8 所示,支护参数见表 4 和表 5 所示.

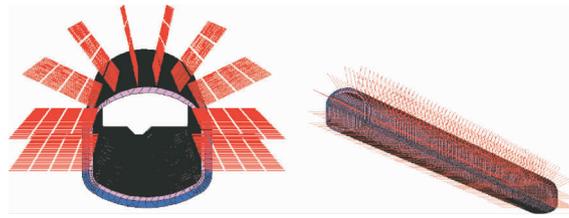


图8 K2+388.16~K2+455段(B型支护型式)

表4 新方案的实体计算参数

支护类型	围岩性质	厚度	容重	抗压强度	抗拉强度	粘聚力	内摩擦角	弹模	泊松比
	自下而上	/mm	/(t/m ³)	/MPa	/MPa	/MPa	/(°)	/GPa	
B型	一次支护	250	26.0	14.6	1.01	1.11	31	30	0.21
	二次支护	150	26.5	18.6	1.21	1.30	32	32	0.20
C型	一次支护	150	26.0	14.6	1.01	1.11	31	30	0.21
	二次支护	150	26.5	18.6	1.21	1.30	32	32	0.20

表5 新方案的锚杆计算参数

支护类型	长度/m	间排距/(m×m)	直径/mm	锚固长度/m	锚固力/kN
帮锚杆	3.0	1.2×1.2	20	1.0	20
顶锚杆	3.0	1.0×1.2	20	1.0	20

3.3 优化方案支护方案结果及其分析

根据优化后的新方案及其参数进行数值计算,得到新方案的应力分布,塑性区分布以及位移变化曲线等结果,如图9~图12所示。

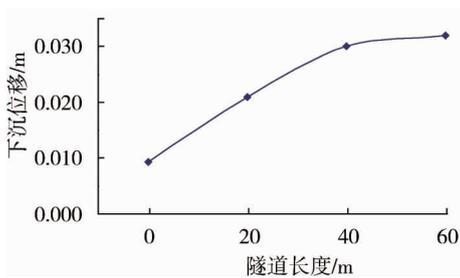


图9 K2+388.16~K2+455隧道拱顶位移曲线

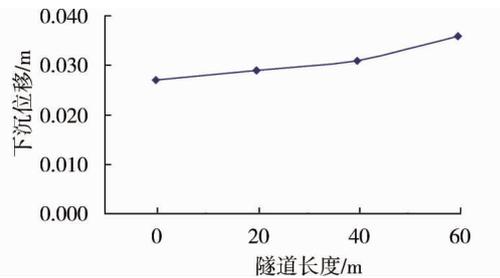


图10 K2+455~K2+520隧道拱顶位移曲线

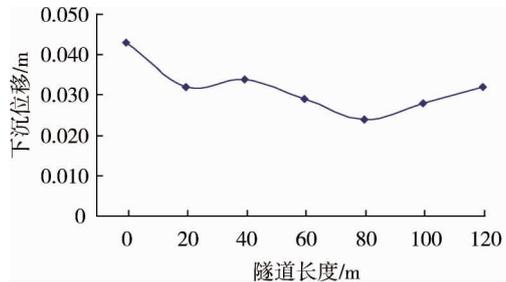


图11 K2+520~K2+648.22隧道拱顶位移曲线

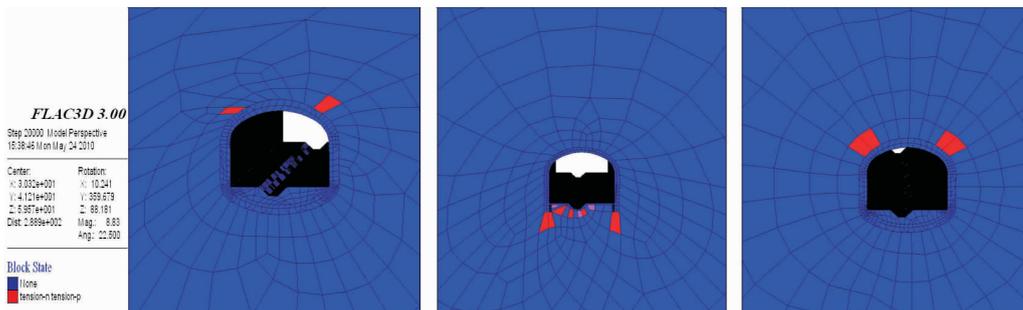


图12 K2+388.16~K2+648.22这三个分段隧道洞口塑性区

根据新方案的计算结果可以看出,在新方案支护之后拱顶的应力值基本保持恒定,也就是说隧道周边没有产生破坏引起应力的不平衡,从塑性区的分布也可以看出隧道围岩基本稳定.另外,位移下沉量均趋于平稳,在允许变形范围内,能够实现巷道围岩的长期稳定.为了对支护方案进行优化设计,现针对原支护方案、无二次衬砌支护方案及调整后的支护方案进行对比分析,该隧道的整体位移对比曲线见图 13.

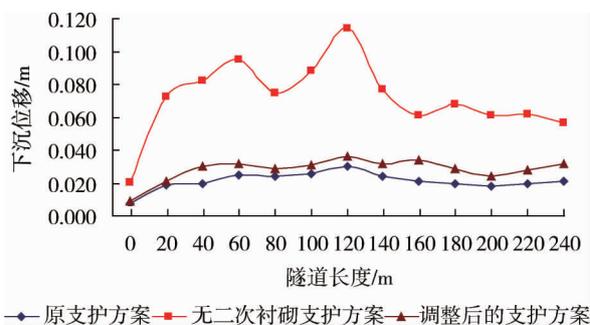


图 13 K2+388.12~K2+648.22 这 3 段隧道拱顶位移曲线

如图 13 所示,原支护方案和调整后的支护方案的拱顶下沉量基本上相同,变化不是太大;而无二次衬砌支护方案的围岩下沉量相对较大.另外,从以上各塑性区分析结果可知,原支护方案和调整后的支护方案的塑性区域都比较少.

3.4 支护成本对比分析

锚杆支护成本对比:B 型支护方式,原间排距 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,调整为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$;每个断面减少锚杆 2 根,沿巷道走向上支护断面减少 30 个. K2+388.16~K2+455 分段和 K2+520~K2+648.22 分段隧道内共计节省锚杆 690 根,锚杆支护成本节省约 30%;C 型支护方式,原间排距 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$,调整为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$;每个断面减少锚杆 6 根,沿巷道走向上支护断面减少 56 个. K2+388.16~K2+455 分段隧道内共计节省锚杆 1 008 根,锚杆支护成本节省高达 75%.综合考虑 2 种不同形式的支护隧道总长,得到新支护方案的锚杆支护成本节省 46.1%.

衬砌支护成本对比:B 型和 C 型支护方式的二次衬砌均由原来的厚度由原来的 300 mm 调整为 150 mm,故 K2+388.16~K2+455 分段和 K2+520~K2+648.22 分段隧道的衬砌体支护成本减少约 50%.

4 结论

- 1) 该隧道的原有支护方案存在着过度支护的现象.
- 2) 新方案能够长期、有效地控制隧道围岩的变形.与原支护方案相比,最敏感的拱顶部位下沉量基本相同,但优化后的支护方案在其他支护成本不变的前提下,锚杆支护成本降低 46.1%,衬砌支护成本减少 50%.
- 3) FLAC^{3D} 软件能够实现岩土工程支护问题的多方案、低成本支护对比分析,是一种快速、有效的分析手段.

参考文献:

- [1] 吴刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 174-181.
- [2] 伍文国. 隧道支护优化及变形破坏概率分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [3] 何川, 林刚, 汪会帮. 公路双连拱隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] 赵辉熊. 偏压连拱隧道设计施工技术与结构优化[D]. 上海: 同济大学结构工程, 2007.
- [5] 孟厦. FLAC^{3D} 前处理程序开发及其工程应用研究[D]. 安徽: 安徽理工大学采矿工程, 2009.
- [6] 贾明. 大水矿山隔水关键层再造及其安全可靠研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [7] 崔廷锋, 贾正彪, 陈永会, 等. 柳泉煤矿动压巷道支护方案改进数值模拟分析[J]. 能源技术与管理, 2010(1): 64-66.
- [8] 王新香. 锚杆支护影响因素分析[J]. 山西煤炭, 2010(8): 63-65.
- [9] 宋飞虎. 重庆市轨道交通六号线江五区间隧道下穿桥台过程力学行为研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [10] 余伟健, 高谦. 大面积充填采矿时的流固耦合数值分析及优化[J]. 矿业工程研究, 2009, 24(4): 11-17.
- [11] 史彦文. 隧道二次衬砌结构设计方案[J]. 公路隧道, 2010(2): 20-23.