

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.22

# 扎哈淖尔露天矿北帮边坡形态优化设计

白润才,王东旭,王 珍

(辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁 阜新 123000)

**摘要:**针对扎哈淖尔露天矿北帮上部受到松散土层的影响,致使北帮无法达到设计边坡角,造成边帮压煤炭无法安全回采的问题,基于极限平衡及强度折减理论,采用刚体极限平衡软件和 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件相结合的方法,通过不断调整边坡参数逐阶段的优化设计了 11 煤底板以上、11 煤底板至 43 煤底板两个阶段稳定边坡形态参数,探讨了边坡角度对边坡稳定性的影响规律,揭示了其滑坡机理。结果表明:北帮边坡滑坡模式为以 43 煤层底板弱层为底界面的切层-顺层滑动;最终确定北帮陡帮角度为 36°,11 煤底板以上边坡角度为 21°,边坡形态为双折线型;陡帮开采共计可多回采压煤 9.827 6 × 10<sup>6</sup> t,经济效益显著,同时为类似条件下端帮残煤回采提供了借鉴。

**关键词:**露天矿;陡帮开采;到界边坡;破坏模式;边坡稳定性

中图分类号:TD167;TD164

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2018)05-0142-05

## Optimum design on the slope shape in the Zhahanao'er open-pit mine

BAI Runcai, WANG Dongxu, WANG Zhen

(College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** In view of the influence of loose soil on the upper part, the slope angle of north slope can not reach the designed one, resulting in that the coal underlying the slope can not be safely recovered in Zhahanao'er open-pit mine, the ending slope above the floor of 11 coal and the floor of 11 coal to the floor of 43 coal are optimized segmentally, the influence of slope angle on the slope stability is discussed and the mechanism of slope deformation and failure is illustrated with rigid body limit equilibrium and numerical simulation with FLAC<sup>3D</sup> by constantly adjusting the slope parameter based on limit equilibrium and strength reduction theory. The results show that the slope landslide model of northern slope is cutting-bedding slip, which was based on the weak layer of the floor of 43 coal; The final slope angle of the northern is 36°, the final slope angle above the floor of 11 coal is 21°, and the slope shape is a double-fold line; the cumulative amount of 9 million and 827.6 thousand tons of coal were produced for the group coal underlying the northern slope with steep working slope and the economic benefits of the open-pit mine are remarkable. It provides reference for similar conditions of coal recycling.

**Keywords:** open-pit mine; steep slope; the ending slope; destruction mode; slope stability

人类遇到的边坡种类繁多,且每一种边坡都有其自身的特点,露天矿采场边坡的显著特点之一就是

地质条件无可选择的余地,不能因地质条件的不良而改变其位置<sup>[1-3]</sup>,因而其稳定性往往受一系列不良地

收稿日期:2017-12-26; 修订日期:2018-04-02

基金项目:辽宁省教育厅科学研究基金项目(L2011051)

第一作者:白润才(1961-),男,内蒙古察右中旗人,博士,教授,博士生导师,从事露天开采理论与技术教学与科研工作。E-mail:15841836133@163.com

质条件的影 响,如地下水、软弱夹层及软岩等。近年来,国内外众多学者对复杂地质条件下的边坡稳定性分析及边坡空间形态优化设计做了大量研究,如王东等<sup>[4]</sup>以元宝山露天矿东帮含断层顺倾软岩边坡为工程背景,研究分析了断层作用下的顺倾软岩边坡稳定性及破坏机理;曹兰柱等<sup>[5]</sup>分析了边坡开挖过程中元宝山露天矿南帮边坡坡体内应力及位移随时间的边坡规律及变形破坏机理,最终确定南帮陡帮开采边坡空间形态;曾胜等<sup>[6]</sup>通过相似模拟分析了红砂岩顺层边坡在降雨条件下结构面强度及边坡稳定性变化规律。尽管众多学者对各种复杂地质条件下的边坡稳定性分析及边坡形态优化设计进行了一系列研究,但对于逆倾层状软岩边坡陡帮开采到界边坡形态优化设计却少之又少<sup>[7]</sup>。

扎哈淖尔露天煤矿境界呈窄长型,可采煤层多、厚度相对较小、倾角相对大,且矿田内断层多、构造复杂,岩体力学强度低,地下水较为丰富,存在泥岩弱层,遇水软化,易引起滑坡;该矿北帮(工作帮)设计到界边坡角 $27^\circ$ ,生产中由于上部岩层松软,在开采靠帮过程中边坡变形较大,目前北帮 860 水平以上边坡无法达到设计边坡角度,上部边坡角约为 $15^\circ$ ,导致采场下部台阶无法按照设计角度进行靠帮,随着采场重心逐步西移,东侧北帮没有到界不能进行内排,边坡暴露长度逐步增大,北帮边坡稳定性问题对采场北帮推进产生的不利影响将会更加明显。基于此,本文以扎哈淖尔露天煤矿北帮边坡为工程背景,采用刚体极限平衡与数值模拟相结合的方法,优化了北帮陡帮开采到界边坡形态。

## 1 边坡工程地质特征及计算方法的选取

### 1.1 边坡工程地质特征

扎哈淖尔露天北帮地层自上而下依次为:第四系、新生界第三系、晚侏罗-早白垩世霍林河群含煤岩系和晚侏罗世兴安岭群火山岩系共同构成。影响本区水文特征的含水层有两个,分别为第四系上更新、全新统( $Q^{3+4}$ )含细砂砾含水层;下部含煤段(J3~k1h3)煤、裂隙含水~岩风化孔隙含水带。研究区地下补给水主要来源有三部分,一是大气降水的直接渗入和南部火山岩地下水的侧向渗入,二是第四系( $Q^{3+4}$ )砂砾石层地下水直接补给,三是与第三系砂砾石含水层互为补给。工程地质补勘发现 43 煤底板的夹矸中高岭石含量高达 43.5%~65.2%,考虑到 43 煤底部含水,可断定 43 煤层底板含有软弱夹层。图 1 为计算剖面平面

位置图,地质剖面采场现状见图 2 红色线段,岩土体物理力学指标见表 1。

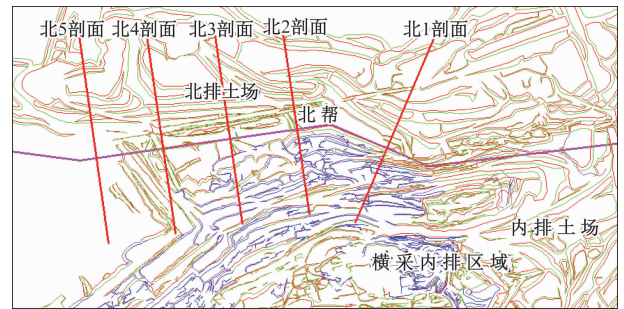


图 1 典型地质剖面平面位置图

Fig. 1 Plane graph of typical geologic sections

表 1 岩土体物理力学指标

Table 1 Soil and rock physical and mechanical indicators

岩性	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/ kPa	容重/ ( $t \cdot m^{-3}$ )	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\mu$
排弃物料	17.0	9.6	1.77	220	0.37
第四系粉土	17.9	37.0	1.79	310	0.33
红黏土	20.0	69.0	1.97	520	0.31
泥岩	22.8	50.0	2.02	290	0.35
粉砂岩	25.1	63.0	2.01	670	0.27
煤	24.5	59.6	1.27	580	0.29
弱层	20.3	10	11	10	0.38

### 1.2 边坡稳定性分析方法的选取

边坡稳定性分析经历百余年发展,主要形成了工程地质类比法、极限平衡分析法、数值模拟计算法以及现代数学分析法<sup>[8-11]</sup>。其中,工程地质类比法对岩土工作者经验性要求较高。极限平衡法是现阶段较为常用的计算方法,具有计算方法简单,计算结果准确等优势,但该方法未能充分考虑边坡岩土体内部应力-应变形态。针对于极限平衡分析法存在的不足,近年来随着计算机技术的高速发展,基于有限元、有限差分等技术手段开发形成的数值模拟软件大量应用于边坡稳定性分析中。该方法能够有效地解决岩土体应力-应变关系。现代数学分析法是通过数学手段求解岩土体动力学问题,但现阶段该方法尚未形成完整的理论体系<sup>[12-13]</sup>。

综合考虑上述各类方法的优缺点及其适用条件,针对于扎哈淖尔露天矿北帮工程现状,本文拟采用极限平衡分析法与数值模拟计算法,对扎哈淖尔露天矿北帮压煤回采过程中边坡稳定性进行深入研究,在保证边坡稳定性的前提下最大限度地回收底板煤。

## 2 北帮到界边坡形态优化设计

扎哈淖尔露天矿北帮采用纵采方式进行降深,边

坡的暴露时间小于10年,按照GB 50197—2005《煤炭工业露天矿设计规范》要求,安全储备系数宜为1.0~1.2,考虑到北帮北侧为排土场,同时北帮地表布设连续系统,最终确定北帮安全储备系数为1.2。

该矿北帮设计到界边坡采用组合台阶形式,工作平盘宽度为40 m,保安平盘宽度为10 m,台阶高度为12 m,台阶坡面角为70°,原设计到界边坡角为27°。生产中由于上部岩层松软,在开采靠帮过程中边坡变形较大,目前北帮11煤以上边坡无法达到设计边坡角度,上部边坡角约为15°,导致采场下部台阶无法按照设计角度进行靠帮,大量原煤无法采出。为了能够安全经济地回采北帮下部压煤,以提高露天矿经济效益,需重新设计能够满足安全要求的最优边坡形态。考虑会发生的潜在滑坡模式为圆弧滑动和以43煤层底板弱层为底界面的切层-顺层滑动,笔者拟采用逐阶段的优化方法,分别对各剖面11煤底板以上、11煤底板至43煤底板两个阶段稳定边坡形态参数进行了优化设计。结果如图2及表2所示。

表2 各剖面边坡形态优化结果图

Table 2 The optimized slope of each profile

地层	局部角度/(°)	滑面形态	稳定系数 $F_s$			
			1剖面	2剖面	3剖面	4剖面
地表至11煤底板	20	圆弧	1.235	1.224	1.204	1.219
	21	圆弧	1.221	1.209	1.192	1.205
	22	圆弧	1.206	1.196	1.178	1.192
	23	圆弧	1.191	1.182	1.166	1.179
11煤底板至43煤底板	24	圆弧	1.177	1.167	1.152	1.164
	34	圆弧-弱层	1.255	1.248	1.239	1.228
		圆弧	1.367	1.362	1.335	1.322
	35	圆弧-弱层	1.242	1.235	1.227	1.216
		圆弧	1.353	1.349	1.321	1.306
	36	圆弧-弱层	1.228	1.22	1.211	1.20
		圆弧	1.337	1.334	1.305	1.291
	37	圆弧-弱层	1.213	1.204	1.197	1.187
		圆弧	1.322	1.318	1.289	1.277
	38	圆弧-弱层	1.198	1.189	1.181	1.169

由计算结果可知,边坡稳定性随边坡角度的增加逐渐降低,1剖面、2剖面、3剖面、4剖面11底板以上边坡潜在滑坡模式为剪切圆弧滑动,稳定帮坡角分别为22°、21°、21°、21°;43煤底板以上边坡潜在滑坡模式为剪切圆弧-弱层相结合的组合滑动,11煤底板至43煤底板间稳定帮坡角分别为37°、36°、

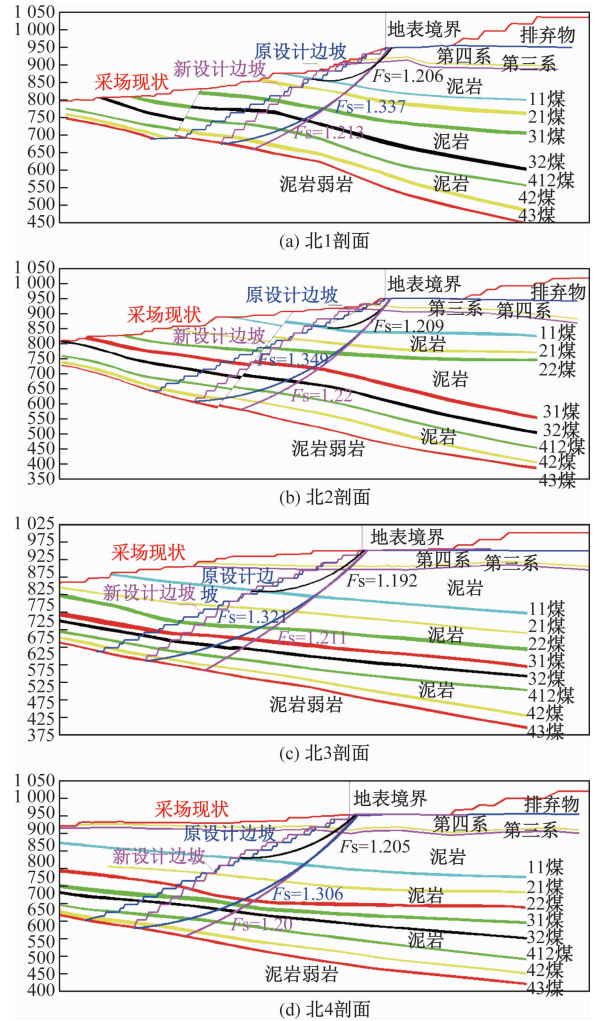


图2 各剖面边坡形态优化结果图

Fig. 2 The optimized slope of each profile

36°、36°,整体稳定帮坡角分别为29°、30°、28°、28°,边坡高度分别为276 m、348 m、343.5 m、353 m。考虑到还有爆破震动等多种因素会对边坡稳定性产生影响,为了保证北帮稳定性,推荐陡帮角度为36°,11底板以上边坡角为21°,边坡形态为双折线型凸边坡,这样既可以保证北帮边坡具有足够的稳定性又能够尽可能的回收资源。按照上述所确定的最终边坡形态,采用平面算量方法,较原设计整体边坡角27°共计可多回采压煤  $9.8276 \times 10^6$  t,剥离  $2.76424 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。

### 3 数值模拟

在边坡稳定性分析领域应用最早的数值模拟方法就是有限单元法,并且也是截止到今使用较为广泛的一种的数值方法。这种方法解决了极限平衡法中刚体假设的弊端,通过应力、应变规律分析其边坡的破坏变

形过程,可以确定其最危险滑裂的位置范围等等。因此,笔者采用大型岩土工程分析软件 FLAC<sup>3D</sup>对扎哈淖尔露天矿北帮陡帮开采边坡进行数值模拟研究,分析它的滑坡机理和变形破坏特征。模型边界条件为:模型顶部和边坡面为自由边界、两侧及底部边界固定不动、采用重力加载。应用 ANSYS 软件建立边坡计算模型并提取节点数据和单元数据,通过 ANSYS - TO - FLAC<sup>3D</sup>软件将提取的节点数据和单元数据导入到 FLAC<sup>3D</sup>中进行迭代计算求解。

基于强度折减理论,对岩土体物理力学参数(黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ )进行循环折减,计算终了时各剖面折减系数分别为 1.256、1.267、1.251、1.243,边坡处于失稳或破坏状态,因此确定 1、2、3、4 剖面边坡稳定系数分别为 1.256、1.267、1.251、1.243。图 3、图 4 分别为边坡临界失稳状态下各剖面水平与竖直应力云图。从图中可知边坡岩土体在自重应力与泊松效应的作用下,水平应力与竖直应力均随埋深的增加逐渐增大且顺着坡面方向呈层状一直延伸到坡脚处。在边坡表层附近出现有拉应力,由边坡岩土体自身性质可知其受压但不受拉,因此在边坡表面附近岩土体易发生拉张破裂,说明边坡岩土体变形破坏方式为张拉-剪切复合型破坏。

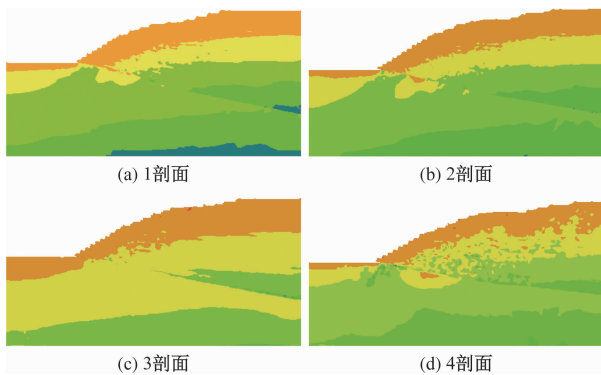


图 3 水平应力云图

Fig. 3 The horizontal stress nephogram

图 5 和图 6 分别为各剖面边坡临界失稳时的总位移图、剪切应变增量云图。由图 5 可以看出,边坡滑坡模式主要受 43 煤底板弱层的影响,易发生以煤层底板弱层为底界面的切层-顺层滑动,边坡失稳时滑面的形状及位置,其滑坡模式及滑面位置与刚体极限平衡计算结果基本吻合。由图 6 可以看出剪切应变增量显著的区域集中在煤层底板弱层,而边坡岩土体塑性屈服是边坡失稳的直接原因,因此剪切破坏对岩土体的破坏类型起到决定性的作用。

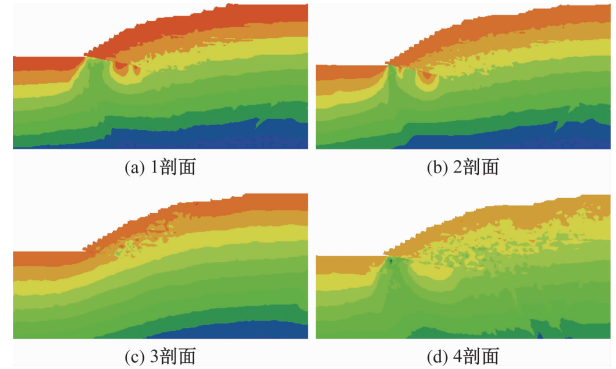


图 4 竖直应力云图

Fig. 4 The vertical stress nephogram

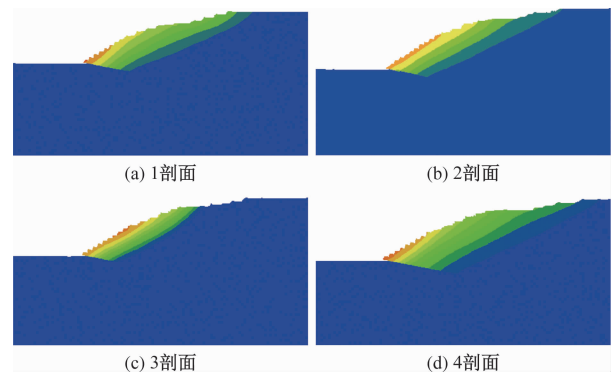


图 5 最大位移云图

Fig. 5 The maximal displacement vector diagram

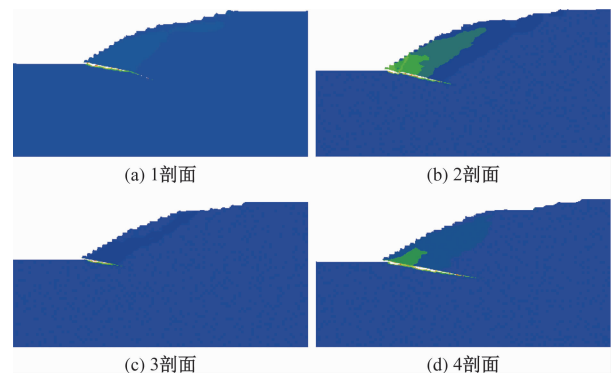


图 6 剪切应变增量分布图

Fig. 6 Shear strain increment distribution

## 4 结论

(1) 扎哈淖尔露天矿北帮 11 底板以上边坡潜在滑坡模式为剪切圆弧滑动,整体边坡潜在滑坡模式为剪切圆弧-弱层相结合的组合滑动。

(2) 由计算结果可知,边坡稳定性随边坡角度的增加逐渐降低,1 剖面、2 剖面、3 剖面、4 剖面 11 底板以上边坡稳定帮坡角分别为 22°、21°、21°、21°; 11 煤

底板至43煤底板间稳定帮坡角分别为 $37^\circ$ 、 $36^\circ$ 、 $36^\circ$ 、 $36^\circ$ ,整体稳定帮坡角分别为 $29^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $28^\circ$ 、 $28^\circ$ 。

(3)考虑到还有爆破震动等多种因素会对边坡稳定性产生影响,为了保证北帮稳定性,推荐陡帮角度为 $36^\circ$ ,11底板以上边坡角为 $28^\circ$ ;新设计边坡形态较原设计整体边坡角 $27^\circ$ 共计可多回采压煤 $9.8276 \times 10^6$  t,剥离 $2.76424 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。

(4)扎哈淖尔北帮边坡变形破坏主要受软弱结构面的性质及产状所控制,其滑坡机理为:边坡岩体内的弱层在岩体自重应力的作用下产生塑性屈服,当边坡体内部产生的剪切破坏面与弱层贯通,岩土体发生剪切破坏沿弱层挤出。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩土力学,2011,32(5):1437-1451.  
YANG Tianhong, ZHANG Fengchun, YU Qinglei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1437-1451.
- [ 2 ] 王玉平,曾志强,潘树林.边坡稳定性分析方法综述[J].西华大学学报(自然科学版),2012,31(2):101-105.  
WANG Yuping, ZENG Zhiqiang, PAN Shulin. Summarization of slope stability analysis method[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2012, 31(2):101-105.
- [ 3 ] 王东,曹兰柱,朴春德,等.露井联采逆倾边坡破坏模式及稳定性评价方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(3):33-38.  
WANG Dong, CAO Lanzhu, PIAO Chunde, et al. Failure mode and stability evolution method of counter-tilt slope under combined surface and underground mining [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3):33-38.
- [ 4 ] 王东,王珍,曹兰柱,等.断层位置对露天矿顺倾层状边坡稳定性的影响研究[J].中国安全科学学报,2014,24(12):83-89.  
WANG Dong, WANG Zhen, CAO Lanzhu, et al. Influence of fault's position on stability of dip bedded slope in surface mines [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(12):83-89.
- [ 5 ] 曹兰柱,霍丽红.顺层岩质边坡加陡开采的稳定性研究[J].世界科技研究与发展,2011,33(5):864-866.  
CAO Lanzhu, HUO Lihong. Researches on stability of rock bedded slopes under steep slope mining world[J]. Sci-Tech R & D, 2011, 33(5):864-866.
- [ 6 ] 曾胜,李振存,韦慧,等.降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(6):1536-1540.  
ZENG Sheng, LI Zhencun, WEI Hui. Stability analysis of red sandstone bedding slope under rainfall infiltration and dry-wet cycling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6):1536-1540.
- [ 7 ] 王珍.断层对顺倾层状边坡滑移模式与稳定性的影响研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2015.  
WANG Zhen. Fault effect on sliding mode and stability of dip bedded slope [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [ 8 ] 曹兰柱,郑杰,王东,等.斜交断层作用下露天矿逆倾边坡破坏模式及稳定性[J].科技导报,2013,31(S2):61-65.  
CAO Lanzhu, ZHENG Jie, WANG Dong, et al. Failure mode and the stability of counter-tilt slope of open pit under bias chasm [J]. Science & Technology Review, 2013, Science technology review, 31(S2):61-65.
- [ 9 ] 曹兰柱,祁利民,王东,等.露天矿含断层复合边坡稳定性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(8):804-809.  
CAO Lanzhu, QI Limin, WANG Dong, et al. Stability research of combination slope with fault in open-pit mine [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016, 35(8):804-809.
- [ 10 ] 曹兰柱,王珍,王东,等.软弱基底排土场堆载过程中稳定性数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2017,37(5):776-781.  
CAO Lanzhu, WANG Zhen, WANG Dong, et al. Numerical simulation of stability in loading dump with weak basement [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5):776-781.
- [ 11 ] 张永兴.边坡工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:4-8.  
ZHANG Yongxing. Slope engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008:4-8.
- [ 12 ] 郑颖人.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.  
ZHENG Yingren. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19):3381-3388.
- [ 13 ] 刘波,韩彦辉.FLAC<sup>3D</sup>原理实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2006.  
LIU Bo, HAN Yanhui. FLAC<sup>3D</sup> principle instance and application guide [M]. Beijing: China communication Press, 2006.