

毕机沟露天矿台阶坡面角取值范围及最终边坡角研究

李俊平, 李鹏伟, 张 浩

(西安建筑科技大学 材料与矿资学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 毕机沟露天矿南北剖面山坡与凹陷露天并存, 且山坡露天高达 270 m, 设计中台阶坡面角都取 $65^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 、最终边坡角都取 45° 可能不合理. 应用快速拉格朗日有限差分法 (FLAC-3D) 专门研究该剖面的台阶坡面角取值范围, 据此建立边坡台阶构成方案, 并确定最终边坡角及局部边坡的加固方案. 研究表明: 台阶坡面角及最终边坡角取值均与边坡类型、开采深度及岩性有关; 按岩质边坡上出现的拉应力值及其区域大小确定是否加陡或减缓边坡, 并确定边坡局部的加固方案, 经济合理、技术可行、简便实用. 该方法适用于岩质露天边坡设计中安全合理地确定台阶坡面角及最终边坡角.

关键词: 露天开采; 边坡稳定性; 台阶坡面角; 最终边坡角; FLAC-3D; 边坡加固

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0598-05

Research on bench angle range value & final slope angle in Bijigou open-pit

LI Junping, LI Pengwei, ZHANG Hao

(School of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: An open pit north-south cross-sectional has both hillside open pit and hollow open pit, and the hillside open pit is up to 270 m high. But the step slope angles by design are taking $65^{\circ} \sim 68^{\circ}$, the final slope angles are all 45° , which seems to unreasonable. Based on the design capacity, the step height is set by 15 m. Using the fast Lagrangian Finite Difference Method (FLAC-3D) specializes in the law of valuing the step slope angle. On this basis, the structural scheme of slope steps were built to study the final slope angle, the structure parameters of the steps and the local slope reinforcement scheme. And finally the step slope angle and the final slope angle are found to be related to slope type, mining depth and lithology. The tensile stress zone size appearing on the rock slope determines either to raise or slow down the step slope, and the local slope reinforcement scheme was proposed in terms of the tensile stress zone size. This method is economically reasonable, technically feasible, simple and practical, suitable for the determination of the step slope angle and the final slope angle when both technically safe and economically reasonable are asked.

Key words: open pit mining; slope stability; step slope angle; the final slope angle; FLAC-3D; slope reinforcement

露天边坡稳定性研究的实质就是确定经济合理的最终边坡角. 最终边坡角由台阶高度、台阶宽度及台阶坡面角组合而成, 其中产能确定了穿爆设备选型及台阶高度.

台阶坡面角的大小, 直接影响最终边坡角的大小及边坡稳定性. 应用关键词“台阶坡面角”及“边坡稳定性”检索了近 20 年发表的有关论文, 并未发现台阶坡面角取值范围的相关研究. 过去通常根据设计规范或主观经验定性地确定台阶坡面角, 常常发生尽管最终边坡角较缓, 但因台阶坡面角

取值过大而发生滑坡的现象^[1], 因此, 有必要研究台阶坡面角的取值范围.

目前确定最终边坡角的常用方法有经验类比法、极限平衡法、数值分析法等. 其中, 经验类比法^[2]仅通过对比分析相似条件下的边坡工程, 主观选取相应的边坡构成参数, 缺少对边坡的系统性分析, 误差较大, 设计中往往偏保守; 极限平衡法^[3]需要事先假定滑动面的位置和形状, 对岩质边坡的适用性不强; 数值分析法一般应用三维有限单元法 (ANSYS)、二维或三维弹塑性有限元法

(PHASE2)^[4-5]及有限差分法(FLAC)^[6-8]. 有限元和有限差分法考虑了边坡体的应力应变关系, 都可较真实的仿真露天开挖的全过程, 克服了各类极限平衡方法必须事先查清是否存在或假定存在滑动面的弱点, 但除 ABAQUS 外一般有限元程序不能直接计算安全系数. ANSYS 软件建模较为方便、快捷^[9], 但求解速度慢, 且不适用于求解大变形和位移不连续问题, 而有限差分法(FLAC-3D)考虑边界灵活, 弥补了有限元法的上述不足, 还可借助 ANSYS 建模及输出计算结果, 且可验算安全系数^[10].

本文借助 ANSYS 建模, 应用 FLAC-3D 计算各方案的边坡应力分布, 根据岩质边坡上出现的拉应力值及其区域大小, 对比增陡 1°最终边坡角节省的剥离费及其局部加固所耗费的加固费及施

工方便性, 确定台阶坡面角的取值范围及最终边坡角, 并提出局部边坡的加固方案.

1 矿区地质概况及计算建模

矿体 1 km 之内的直接围岩为辉长岩, 1 km 之外的间接围岩为花岗岩. 花岗岩脉极其破碎, 并垂直矿体走向侵入到直接围岩中. 为了避免或减小花岗岩脉裸露, 平行矿体走向布置边坡. 矿区结构面基本分布在露天境界内, 随露天开挖将会被挖掘. 不受结构面影响的露天边坡, 降雨对其影响微弱. 矿区地震活动较弱. 露天境界内, 南北剖面山坡露天(顶帮)高 270 m, 凹陷露天最大采深达 150 m.

沿露天境界在该剖面的顶、底帮及矿体中不同位置、不同深度现场取样试验, 并多因素正交数值模拟反演确定岩体的力学参数^[11](见表 1).

表 1 岩体物理、力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩体名称	密度/ g · cm ⁻³	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角 /°	泊松比
铁矿	3.11	43.38	2.03	23.14	2.15	30.13	0.245
花岗岩脉	2.58	12.10	0.88	7.76	0.86	28.36	0.260
下盘辉长岩	2.95	43.35	1.43	16.66	1.26	27.84	0.250
上盘辉长岩	2.80	42.94	2.46	13.50	1.59	28.15	0.255
地表松土层	2.54	1.10	—	6.00	0.50	15.00	0.150

注: 地表松土层查相关手册取值

以露天边坡的南北剖面为对象, 在重力应力场下建立平面应变模型, 并拉伸成假三维模型(见图 1). 建模时不计结构面、地震及降雨等影响. 台阶高度取 15 m. 地表松土层的台阶坡面角统一取 45°. 山顶及开采临空面均取自由边界, 其它的边界均取位移约束. 研究台阶坡面角的取值范围时, 每间隔 2 个安全平台布置 1 个清扫平台, 安全平台的宽度取 7 m, 清扫平台的宽度取 14 m, 分别研究台阶坡面角为 59°~69°时所构建边坡的拉应力大小及其分布, 从而确定各部位台阶坡面角的取值范围.

计算中都采纳摩尔-库伦屈服准则. 图中压应力为“-”, 拉应力为“+”, 单位为 Pa.

研究最终边坡角时, 依据不同部位研究确定的台阶坡面角的取值范围取台阶坡面角值, 在设

计规范内变化安全和清扫平台的宽度, 类似图 1 构建各最终边坡角的台阶构成方案.

2 台阶坡面角取值范围研究

按表 1 的岩体物理力学参数, 分别模拟 59°~69°范围内逐度增加台阶坡面角时边坡的应力分布状态. 仿真结果见表 2, 部分应力云图见图 2.

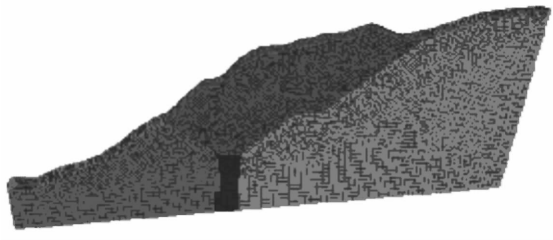


图 1 数值计算模型

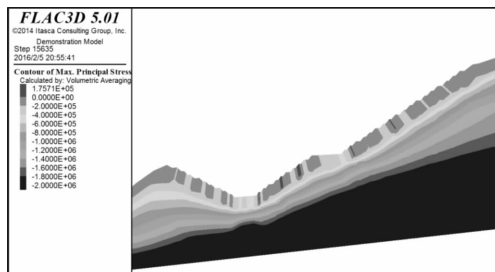
Fig. 1 Numeric calculation model

表 2 南北剖面不同台阶坡面角的应力分布统计

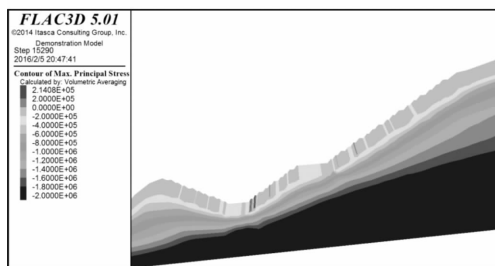
Tab. 2 The stress distribution statistics of different step slope angles

台阶坡面角/°	垂深 150 m 的凹陷露天边坡受拉台阶数及 坡面拉应力大小/MPa		垂深 270 m 的山坡露天边坡受拉 台阶数及坡面拉应力大小/MPa
	顶帮	底帮	
69	6 台阶 0~0.5	8 台阶 0~0.514	几乎全部台阶 0~0.5
68	5 台阶 0~0.487	6 台阶 0~0.487	15 台阶 0~0.4
67	5 台阶 0~0.482	5 台阶 0~0.482	10 台阶 0~0.482
66	3 台阶 0~0.455	5 台阶 0~0.455	11 台阶 0~0.455
65	4 台阶 0~0.4	5 台阶 0~0.478	10 台阶 0~0.4
64	3 台阶 0~0.262	5 台阶 0~0.262	8 台阶 0~0.262
63	2 台阶 0~0.261	5 台阶 0~0.261	5 台阶 0~0.261
62	1 台阶 0~0.2	5 台阶 0~0.259	5 台阶 0~0.2
61	无	3 台阶 0~0.214	2 台阶 0~0.2
60	无	3 台阶 0~0.175	2 台阶 0~0.175
59	无	无	3 台阶 0~0.1

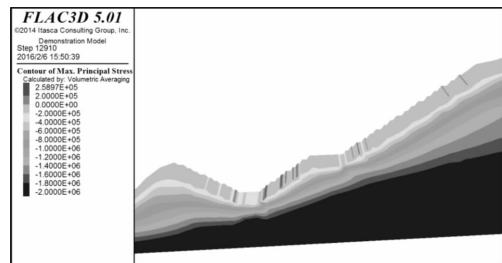
计算表明：从总体来看，随着台阶坡面角的增陡，边坡的稳定性逐渐降低，受拉台阶的数目及拉应力值都逐渐增大；凹陷露天顶帮台阶坡面角超过 64°时，拉应力最大值明显增大；凹陷露天底帮台阶坡面角超过 68°时受拉台阶数目明显增多，但在台阶坡面角超过 64°时拉应力最大值明显增大；山坡露天在台阶坡面角超过 63°时，受拉台阶数目明显增多。因此，在该剖面附近凹陷露天顶、底帮台阶坡面角一般取 60°~64°，山坡露天台阶坡面角一般取 60°~63°。



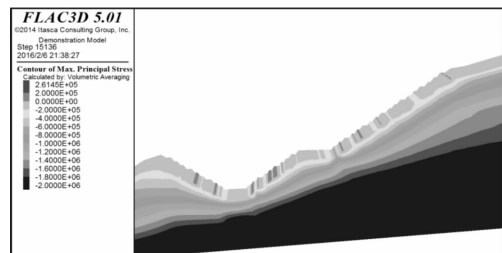
(a) 台阶坡面角60°



(b) 台阶坡面角61°



(c) 台阶坡面角62°



(d) 台阶坡面角63°

图 2 南北剖面不同台阶坡面角的应力分布

Fig. 2 The stress distribution of different step slope angles in north-south section

3 最终边坡角确定及局部加固方案研究

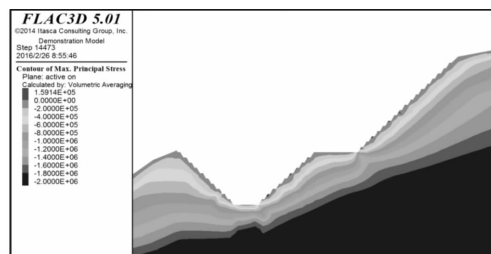
按台阶坡面角的取值范围，变化安全、清扫平台宽度，分别构建山坡、凹陷露天顶、底帮的各最终边坡角方案，应用 FLAC-3D 分别模拟各部位各方案的边坡应力分布，比较受拉台阶的数目、受拉区大小及其变化规律，对比增陡 1°最终边坡

角节省的剥离费及其局部加固所耗费的加固费及施工方便性,初步确定各部位经济合理的最终边坡角,再验算安全系数 1.25 时的边坡稳定性^[12],从而最终确定各部位的经济合理、安全可靠的最终边坡角,并计算其局部加固方案。

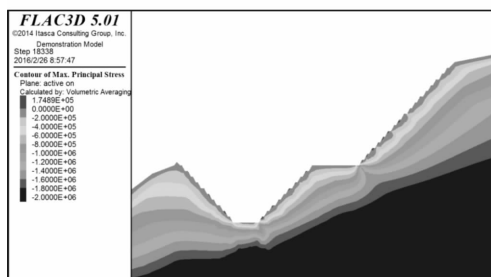
3.1 最终边坡角确定

依据确定出的各部位台阶坡面角的取值范围,山坡露天台阶坡面角取 62° ,凹陷露天顶、底帮台阶坡面角分别取 60° 、 62° ,间隔 2 个安全平台布置 1 个清扫平台。初步构建露天矿各部位的各种最终边坡角方案,计算边坡应力分布,计算结果见图 3。

计算表明(见图 3):随着山坡露天安全平台、清扫平台宽度的减小,山坡露天的受拉台阶数目逐步增多。当清扫平台为 8 m,安全平台由 7 m 减



(e) 安全平台 5 m 清扫平台 8 m



(f) 安全平台 5 m 清扫平台 6 m

图 3 各部位最终边坡角初选方案及边坡应力分布

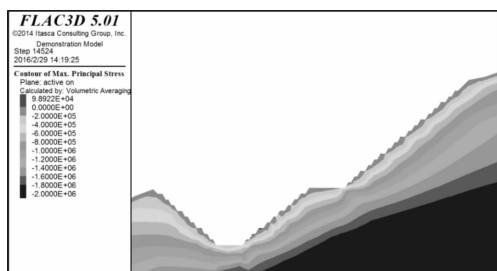
Fig. 3 The stress distribution of each final slope angle scheme of the hillside open pit

至 6 m 时,即最终边坡角从 $45^\circ 16'$ (见图 3(c))增陡到 $46^\circ 33'$ (见图 3(d))时,受拉台阶由 4 个增至 7 个,且最终边坡角不大于 $45^\circ 16'$ 时,边坡受拉台阶数目及拉应力值均较小。考虑剥离费用的节省及加固等安全管理费用的增加,并简化后期边坡维护工作,初步确定山坡露天的最终边坡角为 $45^\circ 16'$ 。

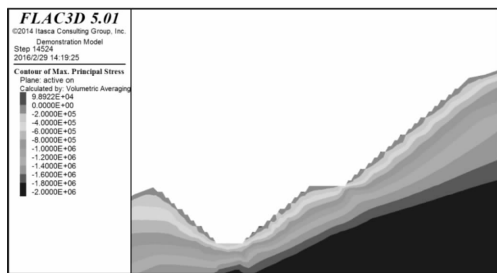
当凹陷露天顶帮最终边坡角从 $45^\circ 39'$ (见图 3(d))增陡到 $46^\circ 51'$ (见图 3(e))时,凹陷露天顶帮受拉台阶明显增多,且超过了凹陷露天顶帮总台数的一半,增陡边坡节省的剥离费用可能超过边坡维护增加的加固费用,因此,初步确定凹陷露天顶帮的最终边坡角为 $45^\circ 39'$ 。类似地确定凹陷露天底帮的最终边坡角为 $46^\circ 8'$ 。

3.2 边坡安全系数验算

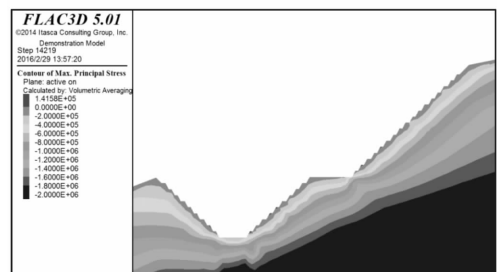
按照上述研究所得的山坡露天、凹陷露天顶、底帮的最终边坡构成参数,构建露天境界方案 I,计算安全系数为 1.25 时的边坡应力分布,见图 4(a),发现其凹陷露天顶帮受拉区偏多,且上部台阶存在连片受拉,拉应力高达 0.82 MPa。因此,将凹陷露天顶帮的最终边坡角从 $45^\circ 39'$ (见图 3(d))减缓至 $44^\circ 37'$ (见图 3(c)),即仅凹陷露天顶帮安全平台增宽至 7 m,其它台阶构成参数不变,如此构成南北剖面的露天境界方案 II,计算表明安全系数为 1.25 时边坡受力状态良好(见图 4(b))。因此,南北剖面经济合理的山坡露天、凹陷露天顶帮、底帮最终边坡角分别为 $45^\circ 16'$ 、 $44^\circ 37'$ 、 $46^\circ 8'$ 。



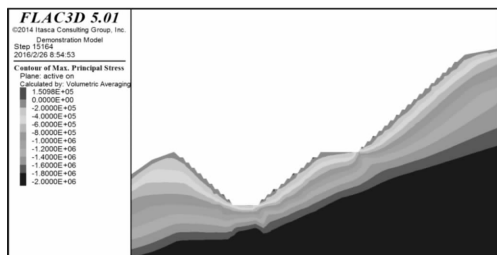
(a) 安全平台 7 m 清扫平台 12 m



(b) 安全平台 7 m 清扫平台 10 m



(c) 安全平台 7 m 清扫平台 8 m



(d) 安全平台 6 m 清扫平台 8 m

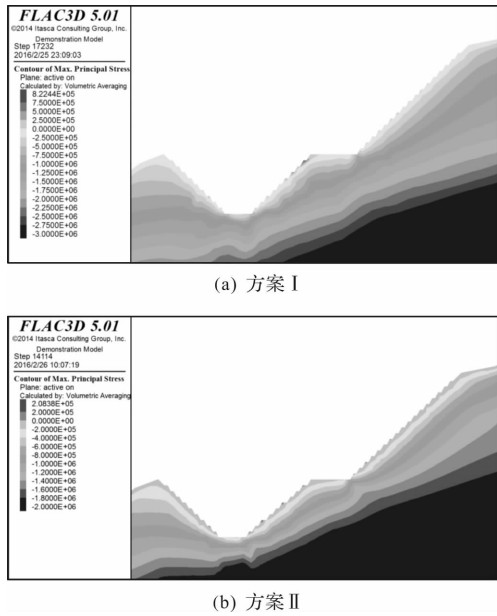


图 4 安全系数为 1.25 时两境界构成方案的边坡应力分布
Fig. 4 The stress distribution of the two final slope angle schemes at the safety factor 1.25

3.3 边坡局部加固的方案研究

锚杆(索)支护是目前边坡维护最为常用的技

术手段,其作用机理主要有悬吊或防滑作用、挤压加固作用、组合梁作用及预先加固作用等^[13].根据台阶拉应力区的厚度,在最终确定的露天境界方案Ⅱ中,除凹陷露天顶帮 4 个台阶、底帮 2 个台阶、山坡露天 1 个台阶需要锚索加固外,其它台阶局部锚杆支护即可.其中,根据拉应力区的厚度取 9 m 长的锚索,锚杆长度一般取约 2.5 m.锚索加固网度一般按 3 m×3 m,锚杆加固网度一般取 1 m×1 m~1.5 m×1.5 m.文献^[10]指出,锚固力取受拉区岩体自重的 115%比较经济合理.根据台阶受拉区大小,分别计算出每根锚索所需的锚固力后,通过 FLAC-3D 内嵌的 FISH 语言编写 cable 单元加固命令^[14],进行支护模拟.锚索的参数见表 3,锚固力不小于 6.68×10^4 N.加固位置见图 5(a),从仿真结果可见(图 5(b)~(d)):加固后受拉区的拉应力大小及分布范围较加固前有所减小,底帮有 1 个台阶的拉应力区消失,最大拉应力值降低约 5%.尽管拉应力值降低较小,但锚固措施可增强边坡体的整体强度,阻止受拉区进一步扩展.

表 3 模拟中使用的锚杆(索)参数

Tab. 3 The cable parameters used in the simulation

锚筋直径/mm	弹性模量/Pa	水泥浆刚度/Pa	水泥浆粘结力/N	抗拉强度/N
30	1.8×10^{11}	2×10^7	1×10^6	3×10^5

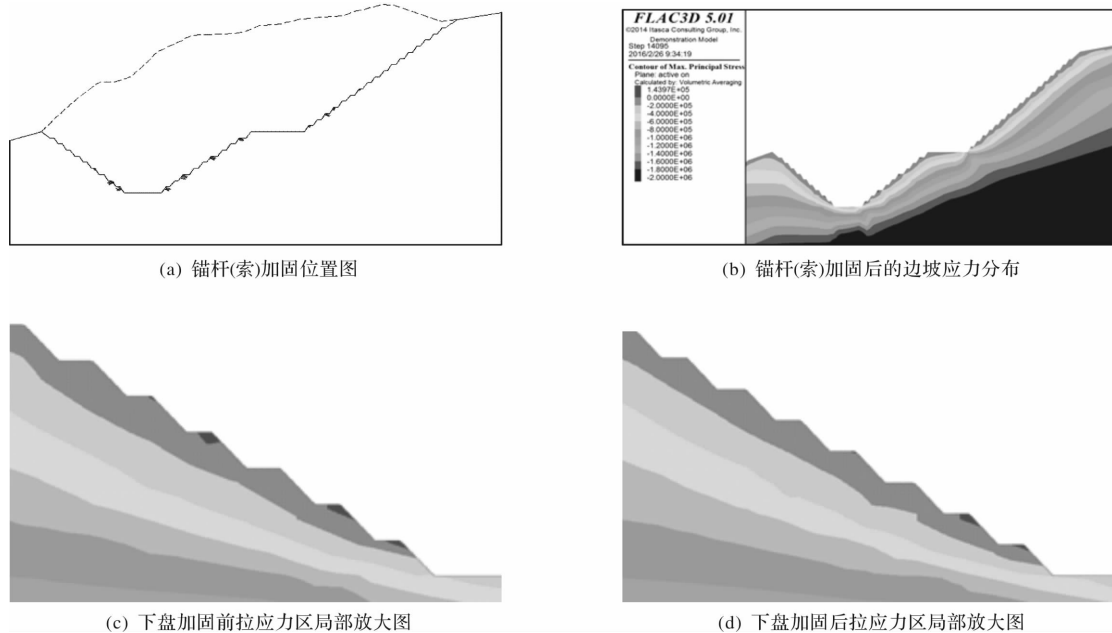


图 5 边坡加固及其应力分布
Fig. 5 Slope reinforcement and its stress distribution

4 结论

随着台阶坡面角的增大和平台宽度的减小,

最终边坡角逐步增大.最终边坡角过陡会使露天边坡处于受拉状态的台阶坡面过多,在长期重力及爆破震动作用下受拉区易发生拉伸疲劳破坏,从

而增加了边坡维护费用;反之,会增大剥离量。应用FLAC-3D研究确定了各部位台阶坡面角的取值范围及最终边坡角,得出如下主要结论:

(1)该露天矿南北剖面附近凹陷露天台阶坡面角宜取 $60^{\circ}\sim 64^{\circ}$,山坡露天台阶坡面角宜取 $60^{\circ}\sim 63^{\circ}$;

(2)该露天矿南北剖面附件经济合理的山坡露天、凹陷露天顶帮、底帮最终边坡角分别取 $45^{\circ}16'$ 、 $44^{\circ}37'$ 、 $46^{\circ}8'$;

(3)锚索、锚杆加固可降低拉应力值,减小甚至消除局部拉应力区,改善边坡受力状态。锚索加固网度一般按 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$,锚杆加固网度一般取 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\sim 1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 。其中,锚索长度取 9 m ,锚杆长度取约 2.5 m 。

参考文献 References

- [1] 连民杰. 矿山灾害治理与应急处置技术[M]. 北京:气象出版社, 2012.
LIAN Minjie. Mine disaster management and emergency disposal technology [M]. Beijing: Meteorological Press, 2012.
- [2] 孙玉科. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1999.
SUN Yuke. China open-pit mine slope stability study [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999.
- [3] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525-529.
CHEN Zuyu, MEI Hongliang, WANG Xiaogang. The limit equilibrium method for three-dimensional analysis of slope stability [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 525-529.
- [4] 李俊平, 范才兵, 李占科, 等. 露天矿最终边坡角的数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2011(5): 175-179.
LI Junping, FAN Caibing, LI Zhanke, et al. Numerical simulation model for determining the final sloping angle of the open-cast molybdenum mine [J]. Journal of Safety and Environment, 2011(5): 175-179.
- [5] 范才兵, 李占科, 王学明. 露天矿最终边坡角的简易数值模拟方法[J]. 金属矿山, 2012(7): 59-63.
FAN Caibing, LI Zhanke, WANG Xueming. Numerical simulation on the final sloping angle of the open-cast mine [J]. Metal Mine, 2012(7): 59-63.
- [6] 梁元贵, 刘关锋. 易门铜厂铜矿露天开采最终边坡角分析[J]. 采矿技术, 2010(1): 31-32.
LIANG Yuangui, LIU Guanfeng. The Yimen copper mine copper open-pit mining final slope angle analysis [J]. Mining Technology, 2010(1): 31-32.
- [7] 任强, 刘伟韬. 覆岩采动裂隙带发育规律的数值模拟分析[J]. 安全与环境学报, 2006(S1): 75-78.
REN Qiang, LIU Weitao. Numerical simulation analysis of overburden crack belt developing disciplinary [J]. Journal of Safety and Environment, 2006(S1): 75-78.
- [8] 冯锦艳, 王金安, 蔡美峰. 露天高陡边坡角优化设计及稳定性分析[J]. 中国矿业, 2005(4): 45-48.
FENG Jinyan, WANG Jin'an, CAI Meifeng. Optimization design and stability of high steep open pit slope angle [J]. China Mining Magazine, 2005(4): 45-48.
- [9] 孙书伟, 林杭, 任连伟. FLAC3D在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011: 119-120.
SUN Shuwei, LIN Hang, REN Lianwei. Application of FLAC3D in geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 119-120.
- [10] 李俊平, 程贤根, 李鹏伟, 等. 露天矿最终边坡角的快速拉格朗日有限差分法研究[J]. 安全与环境学报, 2015(2): 77-82.
LI Junping, CHENG Xianguan, LI Pengwei, et al. Research on the final sloping angle of open-pit mine by fast Lagrange finite difference method [J]. Journal of Safety and Environment, 2015(2): 77-82.
- [11] 李俊平, 张浩, 李鹏伟. 毕机沟露天矿岩体力学参数折减系数的数值模拟确定[J]. 安全与环境学报, 2016(5): 140-145.
LI Junping, ZHANG Hao, LI Pengwei. On the determination approach to the numerical simulation for the rock mass parameters' reduction factor application in Bijigou open-pit mine [J]. Journal of Safety and Environment, 2016(05): 140-145.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 非煤露天矿边坡工程技术规范: GB51016-2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for non-coal open-pit mine slope engineering: GB51016-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [13] 李俊平, 连民杰. 矿山岩石力学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
LI Junping, LIAN Minjie. Mine rock mechanics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [14] 彭文斌. FLAC3D实用教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2007: 304-315.
PENG Wenbin. FLAC3D practical tutorial [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 304-315.

(编辑 桂智刚)