

采矿科学与工程



移动扫码阅读

田 宇,张 波,刘博文,等.露天矿多软弱夹层边坡变形机理与形态优化研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):189-194.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.06.022

TIAN Yu,ZHANG Bo,LIU Bowen,*et al.* Study on deformation mechanism and shape optimization of multi-weak interlayer slope in open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 189-194. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.06.022

露天矿多软弱夹层边坡变形机理与形态优化研究

田 宇¹,张 波²,刘博文³,王振伟⁴,魏 真¹,闫 杰⁵

(1.中煤西安设计工程有限责任公司,陕西 西安 710054;2.华能伊敏煤电有限责任公司 伊敏露天矿,内蒙古 呼伦贝尔 021134;3.中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院,北京 100083;4.北方工业大学,北京 100041;5.煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院,北京 100013)

摘 要:针对露天矿多弱层顺倾到界边坡形态设计问题,结合现场实际情况,通过对地质构造、岩层岩性、软弱夹层赋存情况等工程地质特征进行分析,基于刚体极限平衡理论与数值模拟的手段,研究了含多弱层-断层构造复合顺倾边坡的变形破坏特征、滑坡模式以及不同弱层对边坡稳定性影响程度;采用分段优化方式对到界边坡最终形态进行优化,确保了端帮到界开采过程中煤炭采出的安全高效,为类似边坡工程的滑坡防治提供参考。研究表明:露天矿含多弱层-断层构造复合顺倾边坡中,上部岩体含多弱层且岩层风化严重,强度较低,随矿坑深度增加,下部断层带处岩体对上部岩体的约束作用减小,露天煤矿端帮多弱层顺倾边坡的潜在滑坡模式为下部牵引致使沿弱层发生顺层滑动,软弱泥岩是滑坡的主控层,泥岩弱层和断层破碎带的相对位置关系是滑坡的主控因素;当 F_5 断层以上区段坡角为 12° , F_5 断层以下区段坡角为 18° ,整体坡角为 14° 时,边坡能够处于稳定状态。

关键词:露天矿;顺倾边坡;边坡变形;边坡形态

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)06-0189-06

Study on deformation mechanism and shape optimization of multi-weak interlayer slope in open-pit mine

TIAN Yu¹,ZHANG Bo²,LIU Bowen³,WANG Zhenwei⁴,WEI Zhen¹,YAN Jie⁵

(1.China Coal Xi'an Design Engineering Co.,Ltd.,Xi'an 710054,China;2.Yimin Open-Pit Mine,Huaneng Yimin Coal and Electricity Co.,Ltd.,Hulunbuir 021134,China;3.School of Energy and Mining Engineering,China University of Mining and Technology-Beijing,Beijing 100083,China;4.North China University of Technology,Beijing 100041,China;5.Mine Safety Technology Branch,China Coal Research Institute,Beijing 100013,China)

Abstract: Aiming at the slope design problem of the open pit mine of dip final bedded slope with weak layer, through the analysis of engineering geological characteristics such as geological structure, lithology of rock strata and occurrence of weak interbeds, the deformation and failure characteristics, landslide mode and the influence of different weak beds on slope stability are studied by using rigid limit equilibrium theory and numerical simulation. The final shape of the boundary slope is optimized by using the sectional optimization method. It ensures the safety and efficiency of coal resources recovery and maximizes the recovery of coal resources in the process of end-to-end mining, and provides a reference for landslide prevention and control of similar slope projects. The results show that the upper rock mass of open pit slope with multi-weak beds and fault structure has many weak beds and serious weathering and low strength. With the increase of pit depth, the restraint effect of rock mass at the lower fault zone on the upper rock mass decreases. The potential landslide mode of multi-weak beds along inclined slope at the end of open pit coal mine is pulled downwards, which leads to bedding sliding along weak beds. Weak mudstone is the dominant layer of landslide, and the relative position relationship between weak mudstone beds and fault fracture zone is the dominant factor of landslide. When the slope angle of the section above Fault F_5 is 12° and that of the section below Fault F_5 is 18° , the slope angle of the section below Fault F_5 is 18° , The overall slope angle is 14° , and the slope can be in a stable state.

Key words: open-pit mine; dip bedded slope; slope deformation; slope shape

收稿日期:2020-11-12;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51774184)

作者简介:田 宇(1994—),男,陕西榆林人,助理工程师,硕士。E-mail:cumtbtianyu@163.com

0 引 言

露天矿山开采过程中边坡失稳滑坡严重影响着现场采矿生产和工作人员的安全,由于边坡失稳滑坡造成重大人员伤亡、巨大经济损失和工程受阻的事件频繁发生,因此边坡稳定是保障矿山安全高效生产的基本条件^[1]。对于露天矿山软岩边坡而言,含多弱层控制的复合边坡,因其岩土体力学指标很差,特别是在构造及地下水作用下易发生软化、泥化,强度降低,通常成为边坡发生滑坡的主滑动面。边坡体内部总是存在有软弱结构面,这些结构面的分布及其组合特征决定了其工程地质性质和力学性状,在一定条件下将会成为控制边坡变形破坏的关键因素,容易诱发边坡滑坡失稳^[2-4];尽管国内外不少学者采用二维极限平衡法对露天采场边坡形态进行设计,但是大多无法考虑到不同埋深地层岩性条件和各弱层发育形态上的差异,使得矿山开采中还未降至坑底时就沿浅部弱层发生滑坡,对矿山安全高效的生产影响较大^[5-6],因此如何针对复合边坡露天矿采场边坡形态优化成为边坡工程领域亟待解决的难题之一^[7]。

综上所述,研究采用刚体极限平衡法与数值模拟相结合的手段,以伊敏露天煤矿端帮顺倾边坡为研究对象,研究多弱层顺倾边坡的潜在滑坡模式及稳定性变化规律,对最终边坡坡面形态进行优化设计,确保端帮到界边坡的安全及煤炭资源采出的最大化,为类似边坡工程的滑坡防治提供参考。

1 工程背景

矿区位于伊敏向斜轴部及东南翼,主体为一不

完整的走向北东、倾角 3°~8°的宽缓向斜,构造发育,该区内岩体以泥岩、半成岩状态砂砾岩和砂岩为主,大部分岩体属于软岩,泥质胶结,胶结程度较差,力学指标较低,一般均小于 5.88 MPa,岩石尤以泥岩最软,煤层硬度远大于岩石^[8-11]。该地层发育多层软弱夹层,岩层分布不规律,且由于断层构造因素,边坡体中的软弱夹层相对边坡顺层,且倾角很大,最大倾角可达 11°,极易发生沿软弱夹层的顺层滑动。

随着开采推进,矿山目前正处在由二采区向三采区有序过渡阶段,届时在三采区西北向形成的端帮位于断层构造发育带,发育的主要断层有 F₁、F₅ 两条正断层,断层走向基本和边坡走向一致,倾向相对边坡反倾。同时,该区地层、岩层岩性和软弱夹层赋存情况等工程地质特征也影响端帮边坡的稳定性,与端帮最终边坡角的确定有着直接关系。选取该端帮典型地质剖面,建立边坡工程地质模型如图 1 所示,该剖面地层软弱夹层参数见表 1。

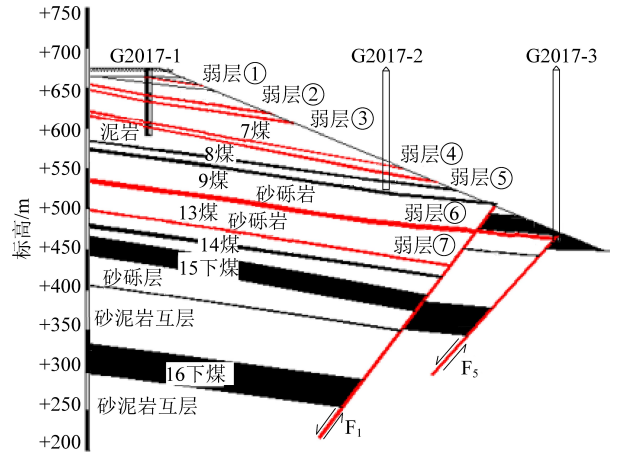


图 1 边坡工程地质简化模型
Fig.1 Slope engineering geology simplified model

表 1 软弱夹层参数统计

Table 1 Weak interlayer parameters statistic

弱层编号	岩性	软弱层位置	厚度/m	倾角/(°)
①	炭质泥岩	5 煤底板	1.2	9
②	煤层夹炭质泥岩	6 煤	2.0	8~9
③	煤层	7 煤	0.8	8~9
④	炭质泥岩	7 煤下 25~34 m 处	0.3~0.7	10~11
⑤	炭质泥岩	7 煤下 32~46 m 处	1.0~2.0	10~11
⑥	煤层、炭质泥岩	9 煤下约 34 m 处	4.5	7
⑦	煤层	13 煤	2.0	8

2 顺倾边坡变形破坏分析

2.1 模型建立及参数选取

三采区端帮随着剥采工程计划呈现动态变化,

选取三采区端帮最初规划的原设计边坡作为研究对象,利用 CAD-ANSYS-FLAC^{3D} 程序以三采区端帮最初规划的原设计边坡剥采平面图建立边坡计算模型^[12-15],边坡坡面倾向长度为 1 464 m,原设计边坡

角 22° , 计算模型如图 2 所示。

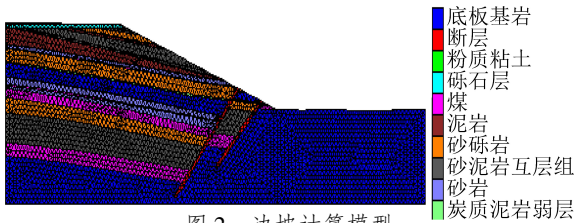


图2 边坡计算模型

Fig.2 Slope finite element model

表2 岩土体物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of rock and soil

岩性	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	弹性模量/GPa	泊松比
第四系	1.67	20.8	21.8	—	—
炭质泥岩	1.79	12.3	14.9	0.10	0.22
砂泥岩互层	1.98	114.3	24.6	1.20	0.36
煤	1.23	223.7	26.5	0.50	0.30
泥岩	1.93	248.0	27.1	2.00	0.29
砂岩	2.04	437.0	33.9	2.80	0.28
断层带	1.71	9.9	10.2	0.05	0.20

2.2 模拟结果分析

计算模型最大不平衡力如图 3 所示, 计算模型在只考虑重力作用的情况下进行的初始地应力弹性求解阶段和本构模型为 Mohr-Coulomb 模型的弹塑性二次求解阶段, 最大不平衡力曲线都收敛, 趋近于 0, 这表明此时计算模型处于极限平衡状态。

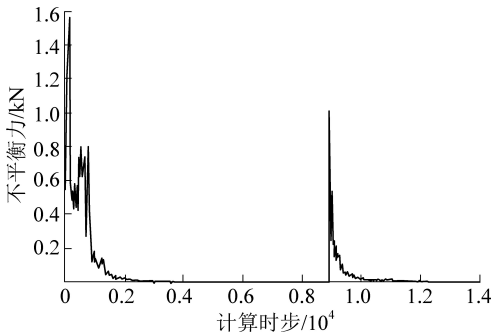


图3 最大不平衡力曲线

Fig.3 System imbalance force evolution curve

位移场图中的位移矢量图中边坡上、中部位移矢量与岩层倾向近似平行, 方向指向坡面, 坡底下部靠近坡脚位置临空面处位移矢量表现为“剪出”, 整体表现为顺层滑动趋势(图 4a)。

由图 4b、图 4c 可知, 边坡总位移变化趋势与水平位移基本一致, 坡体在自身重力与内部地应力影响下, 边坡体逐渐自上而下发生沉降, 内部低强度处发生剪切破坏, 整体边坡变形以水平位移为主, 边坡中部段近乎与岩层平行顺层滑动, 边坡前缘沿坡面处沿 F_1 和 F_5 断层邻空面处剪出, 并伴随有挤压、拉裂现象, 最大水平位移出现在坡底 F_1 和 F_5 断层邻空面处, 位移为 0.996 m, 由此可知, F_1 和 F_5 断层带虽

在工程地质勘查及试验时发现, 矿区岩体整体边坡含软弱层较多, 岩性整体较软, 强度指标较低, 可塑性强, 根据边坡的岩土体特征, 模型中岩土体材料均采用 Mohr-Coulomb 模型来进行描述, 边坡模拟计算选择的岩土体的本构模型为弹塑性, 其中边坡模型网格共划分为 18 957 个节点, 88 955 个单元; 研究所采用的各岩层岩石力学参数依据表 2 选取。

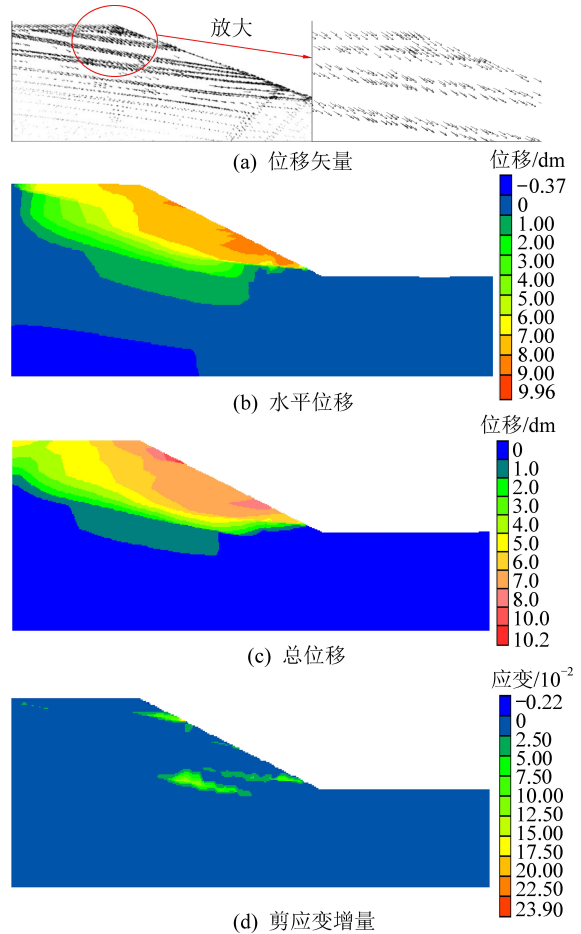


图4 边坡位移场

Fig.4 Displacement field diagram of slope without water

然相对边坡逆倾, 但 2 个断层相对距离只有 60 m 左右, 2 个断层间的岩石经过巨大的构造应力, 岩石破坏严重, 力学强度降低, 尤其处于边坡抗滑段, 对边坡的稳定不利破坏, 随时间不断积累, 坡脚断层带处

形成剪切破坏带,其与弱层贯通后,边坡潜在破坏面形成,位移变形将加速;结合图 4d 剪应变增量云图可知,土岩边坡破坏主要由剪切应变引起,风化薄煤层及煤层煤顶板处泥岩夹层处剪切应变增量明显,边坡内部在自身重力作用下发生剪切破坏,边坡整体沿软弱层滑动,主要沿边坡内部弱层④与弱层⑤区域出现滑动,在边坡中下部区域弱层⑥处也出现明显的位移变形,其与坡底剪切破坏层贯通,形成最危险潜在破坏面,破坏体自坡脚剪出,这表明边坡的潜在破坏以受弱层控制的顺层剪切破坏为主。

边坡应力场中的主应力等值线平滑,呈层状均匀分布,主应力等值线基本上顺着坡面方向并一直延伸至坡脚,并且由上至下应力值逐渐递增(图 5a、图 5b)。由图 5a、图 5b 和图 5c 可以看出,边坡坡顶处有拉应力产生,在岩土分界面附近区域以及断层带附近区域发生突变现象,使得其附近区域的最大主应力变化大而且迅速,会产生一定的应力集中效应,边坡整体受软弱夹层及断层带作用明显,不利于边坡稳定。主应力分布特征表明,边坡整体主要受垂直方向的压应力作用,表现为受压屈服状态。由图 5d 中剪切塑性屈服区域的分布可以看出,沿④、⑤号软弱层和断层构造带处均出现塑性变形区域,软弱层与坡脚断层带有逐渐贯通趋势。

2.3 边坡稳定性计算

基于极限平衡理论的 Morgenstern-price 法来计算分析受软弱层控制边坡的稳定性,用稳定系数 F_s 表示该边坡的稳定性^[16-17],分析各弱层对边坡的影响程度,从而对后续边坡坡面形态优化提供参考依据。

2.3.1 边坡稳定系数选取

边坡稳定性计算安全储备系数的选取,主要依据研究区边坡类型及对边坡工程地质条件的认知程度。根据矿山实际情况,按照矿区边坡采剥计划可知,三采区端帮边坡属于非工作帮,随着采矿推进,内排压脚随之跟进,服务年限小于 10 a,属于临时边坡,依据《煤炭工业露天矿设计规范》规定,选取边坡稳定系数为 1.2。

表 3 边坡稳定系数结果

Table 3 Results of slope stability coefficient calculation

岩层位置	弱层①	弱层②	弱层③	弱层④	弱层⑤	弱层⑥	弱层⑦
稳定系数 F_s	1.524	0.978	0.939	0.781	0.74	0.809	1.023

3 边坡坡面形态优化

3.1 优化设计思路

对于端帮到界边坡坡角优化的前提是在确保原

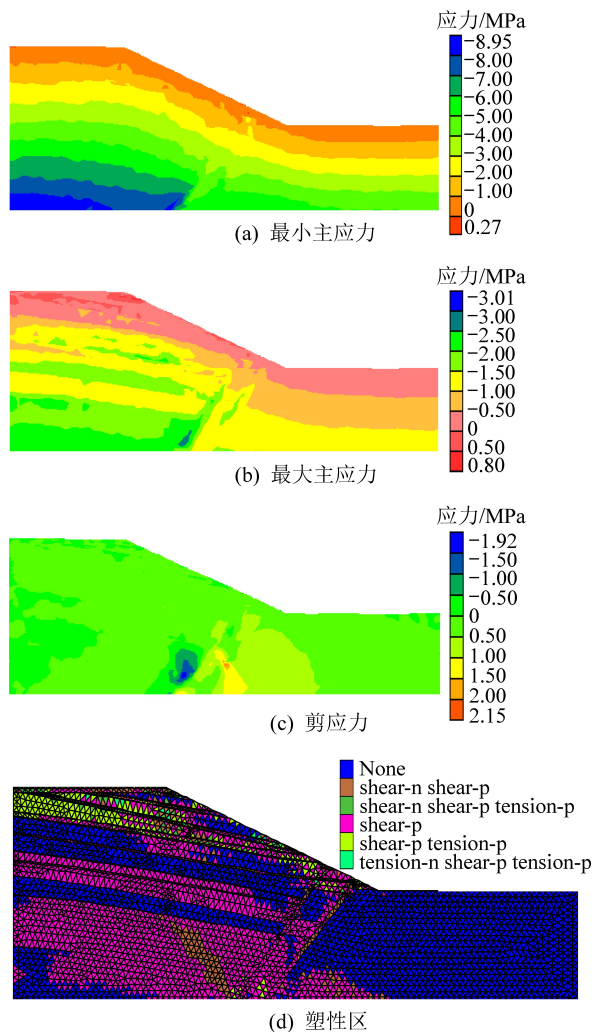


图 5 边坡应力场

Fig.5 Stress field of slope without water

2.3.2 计算结果分析

由表 3 边坡稳定系数(F_s)结果可知,原设计到界边坡稳定性计算结果很不理想,受弱层控制的边坡稳定系数较低,不能满足安全要求。其中,除了弱层①控制的边坡稳定系数为 1.524 以外,其他弱层控制的边坡稳定系数均远小于 1.2,弱层④、⑤控制的边坡稳定系数最低,分别为 0.781 和 0.740,分析其原因是该两层岩性为炭质泥岩,弱层分别位于 7 号煤层下 25~34、32~46 m,岩层倾角较大,为 10°~11°,边坡极易出现沿弱层④、⑤出现顺倾式整体转移失稳,这与边坡变形破坏分析结果相符合。

设计坡顶位置不变的情况下,采用分段优化的方式,对边坡角进行优化,主要分为 3 个步骤:①首先根据调整的边坡角度保证中上部弱层控制的边坡稳定系数满足 1.2 的安全储备要求;②由上条中对整体边

坡角度调整优化后,边坡底部弱层控制的边坡稳定系数就会有所富裕,为采出更多煤炭资源,再次通过优化边坡下区段坡角,使底部弱层控制的边坡在满足安全储备要求的前提下更加接近经济边坡;③形成上缓下陡的一致,对边坡底部较陡前缘区段边坡进行验算,保证安全^[18-20]。

3.2 优化结果分析

3.2.1 边坡整体坡角优化

首先,对边坡整体坡角进行调整,调整边坡角度依次为 $11^{\circ}\sim 15^{\circ}$,计算边坡调整至各角度下的稳定系数,边坡整体坡角与稳定系数关系曲线如图6所示。根据边坡坡角调整后计算结果,整体边坡角与最小稳定系数近似呈线性关系。当边坡坡角调至 12° 时,边坡稳定系数均大于1.2。其中,中上部③、⑤号弱层控制的边坡稳定系数最小,底部弱层⑥、⑦控制的边坡稳定系数分别为1.513和1.838。

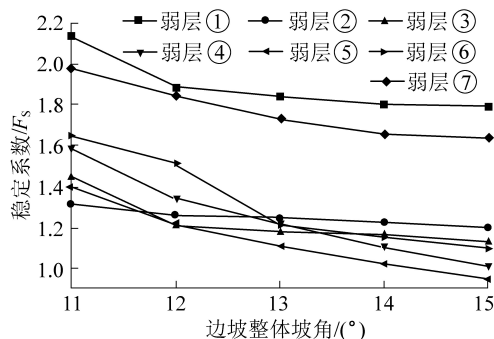


图6 整体坡角与 F_s 关系曲线

Fig.6 Curves of overall slope angle and F_s

3.2.2 边坡下区段提角优化

为减少压煤量,采出更多煤炭资源,在保证安全的前提下,进行边坡下部坡角优化,优化以 F_5 断层为界,在保证 F_5 断层以上区段坡角不变的情况下,调整 F_5 断层以下区段边坡坡角,分别计算了边坡下部区段坡角为 $13^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的边坡稳定系数,来提高整体边坡角的方式进行参数优化。

下区段坡角与稳定系数关系曲线如图7所示,可知边坡下部区段稳定系数随着坡角的增大而逐渐减小,边坡下部区段坡角由 13° 提高至 25° 时,号弱层⑥、⑦控制的边坡稳定系数分别由1.513、1.838减小至1.274、1.792,稳定系数下降幅度较小,对整体边坡的稳定性影响变化不大,能够满足稳定系数不小于1.2的安全储备要求;但是将 F_5 断层以下区段前缘局部边坡坡角由 13° 提高至 25° 时,稳定系数从1.521减小至0.992,降低了34.78%,对边坡稳定性影响变化较大。这是由于在边坡坡角不断提高的同时也伴随着的形成,岩体自重作用下的坡面 F_1 和 F_5

断层带处于边坡下部抗滑段,岩石发生剪切破坏,力学强度降低,断层带对边坡的支挡作用明显减弱,不利于边坡稳定。

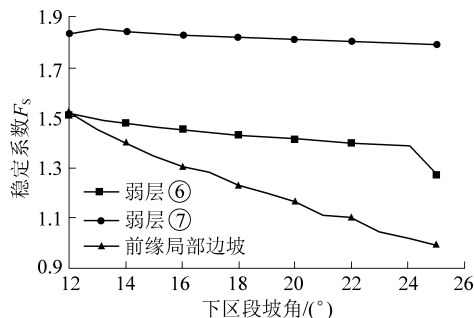


图7 下区段坡角与 F_s 关系曲线

Fig.7 Curves of slope angle and F_s in lower section

当 F_5 断层以下区段坡角调整为 18° 时,弱层⑥、⑦控制的整体边坡稳定系数分别为1.433和1.819,均能够满足安全要求;前缘局部边坡稳定系数为1.227,大于1.2安全储备系数,能够满足非工作帮边坡安全设计要求,属于稳定边坡;

3.2.3 最终坡面形态确定

综上所述计算结果表明,可以确定当 F_5 断层以上区段坡角为 12° , F_5 断层以下区段坡角为 18° ,整体坡角为 14° ,能够满足边坡安全设计规范要求,边坡坡角参数优化达到最优状态,如图8所示。

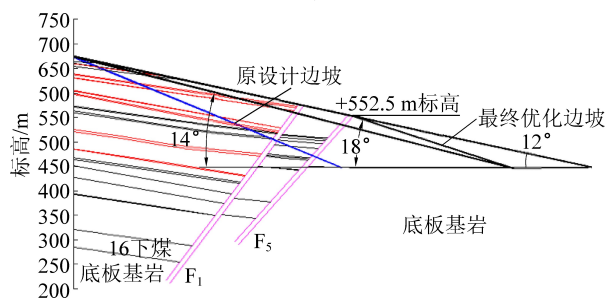


图8 最终边坡优化模型示意

Fig.8 Schematic of slope optimization model

4 结 论

1)露天煤矿端帮多弱层顺倾边坡的潜在滑坡模式为下部牵引致使沿弱层发生顺层滑动,软弱泥岩是滑坡的主控层,泥岩弱层和断层破碎带的相对位置关系是滑坡的主控因素。

2)在露天矿含多弱层-断层构造复合顺倾边坡中,上部岩体含多弱层且岩层风化严重,强度较低,随矿坑深度增加,下部断层带处岩体对上部岩体的约束作用减小,相比较直线型边坡而言,综合考虑生产安全与经济效益,露天矿边坡设计成凸边坡更为合理。

3)边坡参数优化结果表明,边坡角与最小稳定

系数近似呈线性关系, F_5 断层以上区段坡角为 12° , F_5 断层以下区段(下部阻滑段)坡角为 18° , 整体坡角不超 14° , 满足边坡设计规范要求, 边坡能够处于稳定状态。

参考文献(References):

- [1] 王建国, 王振伟, 王来贵, 等. 受控于软弱结构面的矿山软岩边坡稳定性[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(5): 686-688.
WANG Jianguo, WANG Zhenwei, WANG Laigui, et al. Stability of mine soft rock slope controlled by weak structural plane[J]. Journal of Liaoning Technical University of Technology, 2006, 25(5): 686-688.
- [2] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 4-8.
- [3] 许宝田, 钱七虎, 阎长虹, 等. 多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3959-3964.
XU Baotian, QIAN Qihu, YAN Changhong, et al. Stability and reinforcement analysis of multi-layer weak interlayer slope rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3959-3964.
- [4] 丁立明, 才庆祥, 刘 雷, 等. 软弱夹层对露天矿边坡稳定性的影响[J]. 金属矿山, 2012(4): 40-42, 58.
DING Liming, CAI Qingxiang, LIU Lei, et al. Effect of weak interlayer on the stability of open pit slope[J]. Metal Mine, 2012(4): 40-42, 58.
- [5] 才庆祥, 周 伟, 舒继森, 等. 大型近水平露天煤矿端帮边坡时效性分析及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 740-744.
CAI Qingxiang, ZHOU Wei, SHU Jisen, et al. Analysis and application of time-dependent slope of large-scale near-level open pit mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 740-744.
- [6] 卢坤林, 朱大勇. 坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 35-42.
LU Kunlin, ZHU Dayong. Theoretical and experimental study on the influence of slope morphology on slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 35-42.
- [7] 曹兰柱, 赵立春, 王 东, 等. 含多弱层复合边坡滑坡治理三维数值分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 102-107.
CAO Lanzhu, ZHAO Lichun, WANG Dong, et al. Three-dimensional numerical analysis of landslide treatment with multiple weak layers[J]. China Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 102-107.
- [8] 郝 哲, 王来贵. 伊敏露天矿边坡稳定性模拟研究[J]. 露天采矿技术, 2015(5): 1-4.
HAO Zhe, WANG Laigui. Study on the stability of the slope stability of Yimin Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2015(5): 1-4.
- [9] 谢承平. 软岩边坡主要影响因素及稳定性分析研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [10] 朱玉生, 曹守虎. 伊敏一露天矿内排土对端帮稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1026-1032.
ZHU Yusheng, CAO Shouhu. Effect of earth moving on the stability of the end-up in Yimin No.1 open-pit mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1026-1032.
- [11] 林宏志. 伊敏露天矿内排土场排土参数优化研究[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(12): 10-14.
LIN Hongzhi. Study on optimization of dumping parameters of dumping site in Yimin Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(12): 10-14.
- [12] 曹兰柱, 孙成亮, 王 东, 等. FLAC^{3D} 的露天矿边坡变形破坏数值模拟分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(7): 679-682.
CAO Lanzhu, SUN Chengliang, WANG Dong, et al. Numerical simulation analysis of deformation and failure of open pit slope in FLAC^{3D} [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2016, 35(7): 679-682.
- [13] 任志丹, 吕力行. 极限平衡法与 FLAC^{3D} 在露天矿边坡稳定性分析中的应用[J]. 河南科学, 2014(7): 1300-1302.
REN Zhidan, LYU Lixing. Application of limit equilibrium method and FLAC^{3D} in stability analysis of open-pit slope[J]. Henan Science, 2014(7): 1300-1302.
- [14] 吴 平, 付宏渊. 基于 FLAC^{3D} 的斜坡治理稳定性数值分析[J]. 公路与汽运, 2012(2): 133-135.
WU Ping, FU Hongyuan. Numerical analysis of stability of slope treatment based on FLAC^{3D} [J]. Highway and Motor Transport, 2012(2): 133-135.
- [15] 赵义来, 胡荣国. 复杂地质体离散化三维网格模型建模方法探讨: 以面向 FLAC^{3D} 软件的建模为例[J]. 南方国土资源, 2017(6): 23-26.
ZHAO Yilai, HU Rongguo. Discussion on modeling method of discrete 3D mesh model of complex geological body: taking modeling of FLAC^{3D} software as an example[J]. Southern Land and Resources, 2017(6): 23-26.
- [16] 刘加冬, 路洪斌, 王雨波. 基于极限平衡法和 FLAC^{3D} 软件的高陡边坡稳定性分析[J]. 井冈山大学学报: 自然科学版, 2018, 39(4): 71-75.
LIU Jiadong, LU Hongbin, WANG Yubo. Stability analysis of high and steep slope based on limit equilibrium method and FLAC^{3D} Software[J]. Journal of Jinggangshan University: Natural Science, 2018, 39(4): 71-75.
- [17] 孙文杰. 基于 Morgenstern-price 极限平衡法的尾矿坝边坡稳定性分析[J]. 有色金属: 矿山部分, 2018, 70(1): 101-102.
SUN Wenjie. Analysis of stability of tailings dam slope based on Morgenstern-price limit equilibrium method[J]. Nonferrous Metals: Mine, 2018, 70(1): 101-102.
- [18] 皇甫, 李克民, 马 力, 等. 基于靠帮开采的局部陡帮开采方式研究[J]. 金属矿山, 2016(8): 58-59.
HUANG Fu, Li Kemin, Ma Li, et al. Research on local steep mining method based on mining[J]. Metal Mine, 2016(8): 58-59.
- [19] 郑 杰. 平庄西露天矿西帮凸边坡破坏模式及稳定性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [20] 宋子岭, 王向磊, 杨 添, 等. 端帮压帮的陡边坡开采技术分析[J]. 金属矿山, 2017(3): 40-44.
SONG Ziling, WANG Xianglei, YANG Tian, et al. Analysis on mining technology of steep slope under the burying slope of the end slope[J]. Metal Mine, 2017(3): 40-44.