三维地质模型在E区边坡治理中的应用

王创业[1], 杨进军[1,2]

(1. 内蒙古科技大学矿业研究院, 内蒙古 包头 014010;
2. 包钢(集团)公司白云鄂博铁矿, 内蒙古 包头 014080)

摘 要: 文章结合E区工程地质条件和开采方案对E区边坡建立三维地质模型, 采用FLAC3D有限差分软件对从原始地表开挖至坑底1 230 m平台全过程进行数值模拟, 并从应力场、位移场、塑性区分布3个方面进行分析, 从而对持续开挖至坑底过程中整个E区边坡稳定性及稳定性发展情况进行预测, 为下部开挖边坡的预防和治理方案的设计提供更为合理的依据

关键词: 边坡; 三维地质模型; 稳定性; 应力; 位移

中图分类号: TD854+.6 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2018)01-0006-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.01.002

Application of Three-dimensional Geological Model in Slope Management of E Zone

WANG Chuang-ye[1], *YANG Jin-jun*[1,2]

(1. *Institute of Mining Research, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*;
2. *Baiyunebo Iron Mine of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014080, *Nei Monggol, China*)

Abstract: In the paper, based on the engineering geological conditions and mining scheme of E zone, the three-dimensional geological model is established for slope of E zone. Using FLAC3D finite difference software, numerical simulation is done for the whole process of excavation from the original surface to the 1 230 m platform of pit bottom. It is analyzed from three aspects of stress field, displacement field and plastic zone, so as to predict the stability and stability development situation for slope of E zone during the process of continuous excavation to the pit bottom, which provides a more reasonable basis of the precaution and the design of treatment scheme for the lower excavation slope.

Key words: slope; three-dimensional geological model; stability; stress; displacement

露天矿通常是分台阶多阶段开挖, 开挖深度较深, 台阶数量较多, 白云铁矿主采场E区边坡地质构造情况复杂, 断层破碎带出露数量多、分布广泛, 在开挖过程中随着下一层边坡的形成, 断层破碎带不断揭露, 边坡高度和形态也在不断变化, 各区域边坡的稳定性也处在持续的变化状态, 通过对E区建立三维地质模型对整个开挖过程中边坡稳定性进行模拟演化, 预测现开采阶段边坡在后续开挖过程中稳定性发展情况。

* **收稿日期**: 2017-09-05

作者简介: 王创业(1976-), 男, 内蒙古包头市人, 硕士, 副教授, 现从事采矿工程与岩石力学的教学及研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

1　三维地质模型建立

由于边坡实际工程地质条件极为复杂，模型建立过程中提出了较为合理的基本假设，并根据实际情况进行了适当的简化。根据地质模型设计资料和模拟开挖过程的需要现采用 CAD 进行三维地质模型几何绘制，然后导入 ANSYS 进行组块和网格划分，最终导入 FLAC3D 软件进行模拟计算，模拟在未加固条件下 E 区从原始地貌开挖至坑底 1 230 m 平台全过程，一方面对开挖至现阶段 1 514 m 平台过程进行重现，为现开采阶段 E 区边坡稳定性分析及治理提供依据，另一方面对未加固情况下从现阶段开挖至坑底 1 230 m 平台过程进行模拟，分析现开采阶段 1 514 m 平台以上边坡在后续开挖过程中稳定性发展情况，并预测后续开挖过程中 1 514 m 平台以下新增潜在破坏区域。

根据已出露的 E 区边坡断层的分布情况(如图 1所示) 和历年的勘探数据，设计完成了 E 区边坡三维地质模型几何及断层空间分布情况(如图 2 所示) ，模型尺寸为 700 mm × 700 mm × 580 mm，设计总体边坡角 60° ~ 65°，在垂直方向上总高度为 580 m，其中包含: 1 290 ~ 1 626 m 平台 13 个台阶，每个台阶高为 28 m，共 364 m; 1 230 ~ 1 260 m，1 260 ~ 1 290 m两个台阶，台阶高 30 m，共 60 m; 坑底标高 1 230 m 以下至模型底部边界岩土层高为 156 m; 自 1 626 ~ 1 230 m 每个平台交替设置 14 m 宽的清扫平台和 8 m 宽的安全平台，且 1 626 m 平台为 14 m 宽的清扫平台，1 402 m 以下平台为闭坑准备台阶宽度变大，坡度较缓。

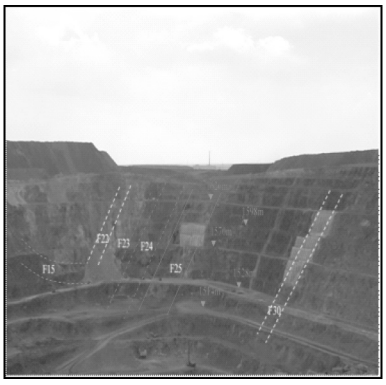


图 1　E 区断层分布图

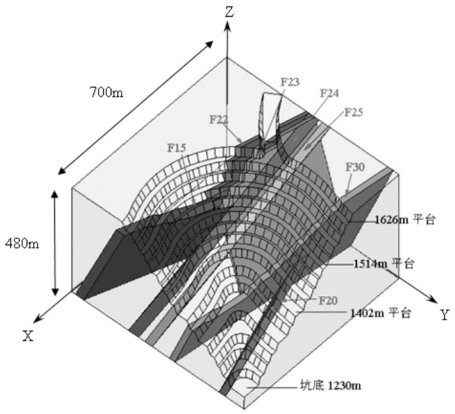


图 2　模型断层空间分布俯视图

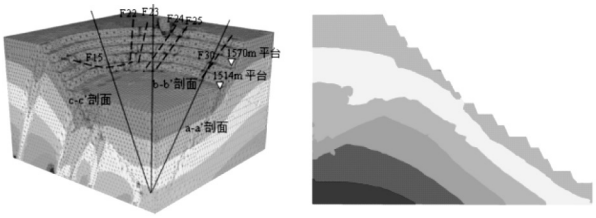
根据断层分布及产状资料对模型进行切割形成断层，断层空间分布俯视图(如图 2 所示) ，F24、F25 和 F30 在高度和宽度范围内贯穿整个模型，F15 破碎带在 E 区南帮出露位置靠近 D 区边坡尚未完成靠界，根据已揭露 F15 出露情况假设 F15 在 1 514 ~ 1 570 m 平台之间，F22 延伸至 1 542 m 平台后与 F15 交汇并尖灭，与 F24 相交后不再继续往深处延伸; F23 也在 1 542 m 平台位置与 F15 相交，其继续往深处延伸的可能性较大，但不再在 1 542 m 平台以下边坡出露。根据工程重要等级以及安全系数的要求，在此将 F23 假定为在整个模型高度范围内贯穿，并且穿过 F24 和 F25，F20 在 1 402 m 以下平台揭露，向内延伸至 F30。

2　边坡演化规律分析

2.1　应力分析

边坡开挖前，整个采场在长期固结状态下处于相对平衡、稳定的状态，在施工介入后的持续开采挖过程中，由于原有岩土体的剥离造成整个边坡初始应力的释放和岩土体内应力重分布; 开采形成各级台阶边坡上的岩土体由原始覆盖埋藏状态转变为指向采场一侧临空状态，边坡表面和坡体内部应力场会不断的变化; 不同区域边坡由于岩土体地质工程条件的不同，在应力调整过程中也会呈现出不同的特性，从而导致整个边坡应力分布情况出现差异[1]。从竖向应力场、最大压应力、最大拉应力 3 个方面分析整体边坡从原始地表开挖至坑底全过程中应力的释放和调整情况及规律采用 FLAC3D 软件进行模拟如图 3 所示。

中国知网　https://www.cnki.net



（a）整体边坡应力云图 （b）剖面竖向应力云图

图3 开挖至1 230 m竖向应力分布图

在开挖全过程E区边坡应力场规律(如图3(b))的分析可知开挖过程中边坡上竖向应力、最大主应力(压应力)、最小主应力(拉应力)重分布特征图3(a)主要有以下几点:

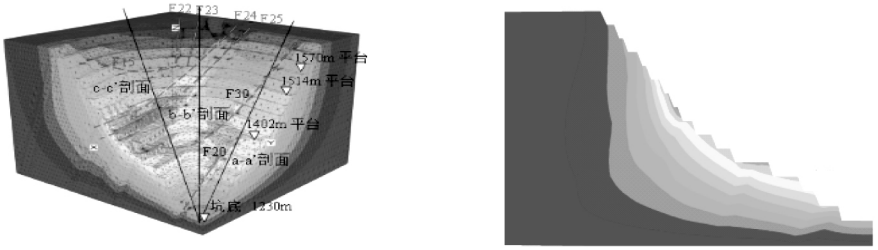
(1)由于开挖形成的边坡面及边坡体内部应力值基本上为负值,说明整个边坡竖直方向上主要以自重应力为主,开挖过程中由于边坡临空面的形成造成整个边坡应力调整和重分布,应力梯度等值线由最初的近水平方向转变为从第一步开挖形成的边坡坡顶到相应各开挖阶段形成边坡台阶的坡底呈现为平行整体边坡面方向,且自边坡表面向坡体内部逐渐增大;

(2)E2区无断层出露区域1 402～1 626 m平台各台阶边坡坡脚应力集中现象非常普遍,E1区1 514 m平台以上边坡坡脚应力集中为局部现象且在后续开挖过程中逐渐释放,破碎带岩土体应力释放程度大于完整岩体,所以没有出现压应力集中现象;

(3)各阶段开挖形成边坡台阶的坡顶位置出现了拉应力集中现象,此外E1区局部边坡受到下伏软弱断层F15、F24和F25破碎带的影响出现了较大范围的拉应力集中区域,这些区域在实际开挖过程中发生张拉破坏的可能性较大。

2.2 位移量分析

开挖过程中由于应力的释放以及边坡临空面状态的形成必定将造成各区域边坡产生一定量的位移,从整体位移和竖向位移、*X*方向和*Y*方向水平位移分析不同区域边坡在整个开挖过程中位移发展变化情况。如图4所示。



（a）边坡整体位移云图 （b）剖面整体位移云图

图4 开挖至1230m边坡整体位移云图

通过从原始地貌开挖至1 514 m平台→1 402 m平台→坑底1 230 m过程中E区整体边坡位移量的演变分析可知图4(a),在整个矿山开挖过程中边坡位移量以开挖造成的卸荷回弹为主,自坡顶往坡底整体位移量逐渐增加,自边坡面往坡体内部位移量逐渐减小,断层破碎出露部位边坡位移量较大,且随着开挖的进行,在1 514～1 402 m开挖过程中位移量持续增加,1 402 m平台开挖至坑底1 230 m过程中,无新的断层破碎带出露,由于边坡收缩且台阶宽度变大,坡脚变缓,所以整个边坡位移量变化情况较小。结合*X*和*Y*方向水平位移可见开挖至1 514 m平台时,各断层破碎带出露区域在1 542～1 514 m平台的指向临空面位移相对较大,且F24和F25破碎带在1 542～1 570 m平台指向临空面位移也较大。从现阶段1 514 m平台开挖至1 402 m平台过程中位移量增加最明显高的区域是F24和F25破碎带出露区域,并且增加趋势较快。1 402 m平台之后开挖至坑底过程中整体边坡位移量演变趋势不明显,各区域位移量增加不明显。

3 整体稳定性分析

上文根据开挖模拟数值计算结果对E区现状边坡稳定性进行分析,确定了现状边坡可能发生破坏模式,主要为圆弧滑动和折线滑动,结合现场调查情况对滑体区域通过极限平衡法计算剖面稳定系数。

中国知网 https://www.cnki.net

3.1　极限平衡分析方法

极限平衡法的计算理论基础是 mohr – coulomb 抗剪强度理，它是将滑坡体划分为若干条块如图 5 所示，对于各个体块之上及土块之间的抗滑力和下滑力建立平衡方程式，通过求解平衡获得安全系数[2]。稳定系数计算公式如下：

$$K_f = \frac{\sum \left(\left(W_i(\cos\alpha_i - A\sin\alpha_i) - N_{w_i} - R_{D_i} \right) \tan\varphi + C_i L_i \right)}{\sum \left(W_i(\sin\alpha_i + A\cos\alpha_i) + T_{D_i} \right)} \tag{1}$$

其中：孔隙水压力 $N_{w_i} = \gamma_w h_{iw} L_i \cos\alpha_i$，即近似等于浸润面以下岩土体的面积 $h_{iw} L_i \cos\alpha_i$ 乘以水的容重 γ_w；

式中：W_i—— 第 i 条块的重量；

C_i—— 第 i 条块内聚力；

φ_i—— 第 i 条块内摩擦角；

L_i—— 第 i 条块滑面长度；

α_i—— 第 i 条块滑面倾角；

β_i—— 第 i 条块地下水流向；

A—— 地震加速度；

h_{iw}—— 第 i 条面的深度；

T_{D_i}—— 地下水作用在第 i 条块滑面上的水平方向的力；

R_{D_i}—— 地下水作用在第 i 条块滑面上的竖直向下的力。

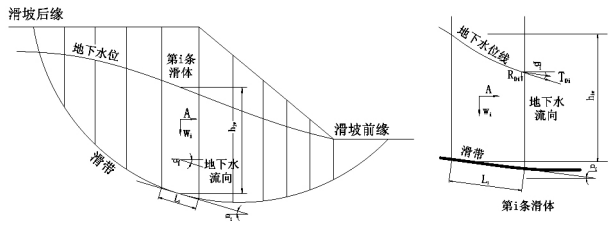


图 5　圆弧形破坏安全系数计算模型示意图

3.2　相关参数的选择

3.2.1　岩体力学参数

矿区前期勘察工作中对边坡岩体及不连续面作了大量的岩石物理力学试验。本次所采用的岩体物理力学强度参数均参考该报告，部分参数结合现场调查情况和地区经验进行取值。具体设计参数如表 1 所示。

表 1　极限平衡计算参数取值表

岩性	饱和重度 /(kN · m^{-3})	内聚力 /(kPa)	内摩擦角 /(°)
板岩	28.6	290	37
风化后板岩	28.6	180	32
断层破碎带	27.2	80	26
岩脉	22.0	0	10
滑体岩块	22.0	35	26
注浆后岩块	26.5	100	30

为验证上述参数的准确性，采用 FLAC3D 软件对主矿 E 区滑体进行反演分析，如图 6 所示，安全系数为 0.977，边坡不稳定有滑塌可能，计算结果滑动面与现场实际滑动面很接近，证明表 1 参数取值基本满足要求。

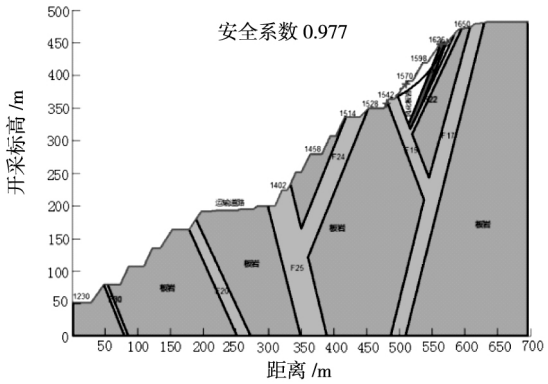


图 9　主矿 E 区滑体稳定性分析

3.2.2　计算工况以及安全系数限值的选取

根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014) 3.0.9 条，本次治理区域整体边坡工程安全等级为Ⅰ级，台阶边坡安全等级为Ⅱ级[3]。

设计安全系数荷载组合Ⅰ为自重 + 暴雨；荷载组合Ⅱ为自重 + 暴雨 + 爆破震动力；荷载组合Ⅲ为自重 + 暴雨 + 地震力。

其中暴雨荷载主要在岩土体力学参数改变中体现，不考虑地下水位的存在和变化，计算结果大于限值则视为稳定。

3.2.3　计算结果

由表 2 可知，当主矿 E 区开采至在 1 660 ~ 1 402 m表区间边坡存在欠稳定情况，需要采取措施进行提前预防，并在边坡形成后要加强维护，以保证边坡的稳定性。

中国知网　https://www.cnki.net

表2 安全系数计算结果

序号	高度范围/m	安全等级	荷载组合	计算结果	规范要求[3]	稳定情况
1	1 230～1 402	Ⅰ级	Ⅰ	1.387	1.25～1.20	稳定
			Ⅲ	1.264	1.20～1.15	稳定
2	1 402～1 660	Ⅰ级	Ⅰ	1.122	1.25～1.20	欠稳定
			Ⅲ	1.037	1.20～1.15	欠稳定

4 结论

(1) 开挖过程中边坡应力调整和重分布的特征为: 整个边坡竖直方向上主要以自重应力为主,由于边坡临空面的形成应力梯度等值线从1 626 m平台边坡坡顶到相应各开挖阶段形成边坡台阶的坡底呈现为平行整体边坡面方向,且自边坡表面向坡体内部逐渐增大。

(2) 在整个开挖过程中上部边坡都会受到后续开挖的影响,对于1 514 m平台以上边坡而言,开挖至1 402 m阶段影响较大,而从1 402 m开挖至坑底阶段由于坑底无新的破碎带揭露,边坡坡度放缓且边坡台阶宽度较大,因此对整个上部边坡的影响都是较小的。

(3) 开挖至坑底边坡发生较为大型破坏可能性较大的潜在破坏区域为F24和F25破碎带在1 514 m以上边坡及断层之间切割的楔形体块共同组成的大型不稳定区域; F15破碎带出露边坡和其与F22和F23破碎带交汇处边坡; F24和F25在E1区与E区交界处的1 458～1 514 m平台边坡及其E2区1 402～1 458 m平台边坡; F15破碎带及F24和F25破碎带在1 402 m平台呈水平出露区域以上的较为完整岩体存在发生张拉破坏的可能。

(4) 通过极限平衡计算边坡的稳定情况在1 402 m平台以上,由于F24、F25等大断层影响,边坡处于不稳定状态,应提前采取预防措施。

参 考 文 献

[1] 丛威青,潘懋,吕才玉,等. 三维地质建模及可视化系统在安庆铜矿勘查中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),2009,(04):20－24.

[2] 郑文棠,徐卫亚,张治亮,等. 复杂楔形体组合下的岩质高边坡稳定分析[J]. 长江科学院院报,2008,(05):18－20.

[3] GB 51016—2014,非煤露天矿边坡工程技术规范[S].

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.01.003

启 事

本刊已加入“万方数据库”、“中国知网”、“维普数据库”等。凡向本刊投递的稿件一经采用,即视为作者同意将作品的网络传播权及电子版使用权授予本刊,本刊一次性给付的稿酬已包含上述授权的费用。若不同意上述内容者,请在投递的稿件上予以特别声明,以便本刊酌情处理。

《包钢科技》编辑部

中国知网 https://www.cnki.net