

## 固化回填过程对露天边坡的稳定性影响\*

彭华锋<sup>1</sup>, 张钦礼<sup>2</sup>

(1. 铜陵化工集团新桥矿业有限公司, 安徽 铜陵市 244132;

2. 中南大学, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**新桥矿利用冬瓜山铜矿的尾砂对露天采坑进行固化回填,实现了区域矿山协同。利用SLIDE岩土体边坡稳定性分析软件,采用极限平衡法研究无渗流场/渗流场作用下不同固化回填高度对露天边坡稳定性的影响。研究表明:渗流场作用会导致上、下盘边坡的稳定性有所降低,但其弱化作用有限;固化回填总体上有利于提高露天边坡的稳定性,且随着回填高度的上升,露天边坡的安全系数逐渐提高;当固化回填高度超过20 m时,上、下盘边坡都能满足露天边坡稳定性要求。

**关键词:**全尾砂;固化回填;露天边坡;稳定性

### 0 引言

露天矿山开挖后会破坏和扰动原来较为稳定的岩体,而形成新的高陡边坡,由于原有的平衡状态被打破,岩体应力将发生重新分布,这样极易导致边坡变形失稳<sup>[1-2]</sup>。边坡失稳引起的滑坡、落石、塌陷、泥石流等,可能带来严重的破坏,甚至不可估量的灾难。边坡稳定性成为影响露天矿山安全生产的关键问题,也一直是岩土工程中的重要研究内容<sup>[3-4]</sup>。因此,边坡稳定性分析成为边坡设计、边坡稳定状态判别、边坡加固与治理的重要决策依据<sup>[5-6]</sup>。国内外学者针对边坡稳定性问题做了大量的研究,形成了边坡稳定性评价方法:工程地质类比法、定性分析法、极限平衡分析法和数值分析法<sup>[7-9]</sup>。杨天鸿等<sup>[10]</sup>为建立基于微震监测信息反演的边坡岩体内部损伤演化模型,提出了露天矿边坡岩体强度参数识别表征方法和动态稳定性评价方法,实现了露天矿边坡稳定性动态分析预测。张晓咏等<sup>[11]</sup>运用ABAQUS有限元程序结合强度折减技术进行渗流作用下边坡稳定分析,揭示了坡体内渗流浸润面和最危险滑动面的形状和位置。

露天采坑治理的最佳途径是采用无毒无害固体废物进行固化回填<sup>[12]</sup>。固化回填可以有效降低

露天边坡高度,同时可以起到压坡脚的作用,有利于露天边坡的维护<sup>[13]</sup>。但在固化回填过程中,滤水随着回填作业渗透富集于充填体表面,通过岩石或充填体的渗透作用,沿裂(孔)隙渗透至边坡岩体内,与地下水共同作用于周边岩体。在水的长期浸泡下,边坡岩体的强度可能会受到削弱,进而影响边坡的整体稳定性。本文在分析当前露天边坡稳定性的基础上,利用数值模拟分析无渗流场/渗流场作用下不同固化回填高度对露天边坡稳定性的影响,以确保露天边坡稳定性不会因固化回填受到削弱。

### 1 边坡稳定性分析数值模拟方案

新桥矿是一座东翼露天、西翼地下联合开采的大型铜硫矿山,东翼露天开采结束后,形成了巨大的露天采坑和高陡边坡,对下部资源回采产生一定安全威胁。由于新桥矿尾砂产出率较低,自产尾砂仅能维持井下充填平衡,没有多余的尾砂进行露天采坑的回填。在距新桥矿直线距离11 km处的冬瓜山铜矿,其尾矿库库容接近饱和。如能通过区域矿山协同,利用冬瓜山铜矿充填剩余尾砂对新桥矿露天采坑进行固化回填,是一项双赢的环保工程。既解决了冬瓜山铜矿尾砂处置难题,又消除了新桥矿露天采坑的安全隐患,节约了新桥矿露天采坑复垦费用,实现协同双赢。

\* 收稿日期: 2023-04-01

作者简介: 彭华锋(1988—),男,湖北黄冈人,工程师,主要从事非煤地下矿山开采技术研究,E-mail: 352377731@qq.com。

新桥矿露天采坑形成最终开采境界后,封闭圈标高为+36 m,坑底标高为-156 m,下盘边坡垂高为482 m,上盘最终边坡角为 $42^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,下盘最终边坡角为 $39^{\circ}\sim 41^{\circ}$ ,容积为4360万 $\text{m}^3$ 。为保证新桥矿东翼露天转地下安全平稳过渡,在露天坑底标高-180~-156 m之间留设了24 m境界顶柱。根据露天采坑的回填方案,坑底10 m进行打底回填,其中坑底以上5 m充填体28 d单轴抗压强度不低于4.5 MPa,5~10 m充填体28 d单轴抗压强度不低于2.5 MPa;坑底以上10 m至露天采坑封闭圈进行普通回填,充填体28 d单轴抗压强度不低于0.5 MPa。

边坡稳定性分析是对研究范围内的边坡进行详细的现场踏勘和地质调查,并在研究以往矿区地质资料的基础上,通过建立正确、可靠的边坡数值模型,采用可靠的方法对边坡的安全稳定状态进行评价。

### 1.1 分析方法

针对新桥矿露天采坑具体情况,利用SLIDE岩土体边坡稳定性分析软件,采用属于极限平衡法的简化Bishop法、Janbu法和Morgenstem-Price(M-P)法进行露天边坡稳定性分析。

### 1.2 数值模型构建

#### 1.2.1 基本假定与边界约束

为便于建模和分析计算,需做出如下假设:

(1) 边坡岩体的变形和位移是微小的,按弹塑

性平面应变问题处理;

(2) 不考虑地应力的影响,计算中只考虑自重应力作用下边坡的应力与位移;

(3) 矿体和围岩为局部均质、各向同性的材料,塑性变形不改变材料各向同性;

(4) 考虑到岩石的脆性,分析中涉及到的所有物理量均与时间无关;

(5) 不考虑应变硬化(或软化);

(6) 考虑到有限元程序的局限性,不考虑岩层和矿体中的结构面、裂隙和软弱层的存在与影响。

#### 1.2.2 边界条件

渗流边界条件:边坡定义出水点远端标高为地下水位,取总水头边界,模型地面取不透水边界,地层边界取自由边界。

位移边界条件:模型两侧边界施加水平轴向约束,模型底部施加水平和竖直轴向约束。

渗流场主要考虑地下水位、回填滤水和降雨汇水;根据初始地下水位,模拟稳态流,以该结果作为后续非饱和渗流分析的基础;稳定性模拟过程中,在充填体表面赋加地表水(回填滤水)。

#### 1.2.3 力学参数

数值计算分析的准确性很大程度上取决于矿岩体基本力学参数是否准确。本次模拟采用的矿岩力学参数为结合钻孔取样试验和岩体质量评价结果计算所得,结果见表1。

表1 岩体和充填体的力学参数

岩性	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	黏结力 $c$ /MPa	摩擦角/ $^{\circ}$
中新世沉积层	2.92	0.15	6.36	0.31	2.40	28.3
砂岩砾岩	6.40	0.17	12.97	0.23	4.40	37.5
泥灰岩	2.83	0.18	8.88	0.33	1.48	30.1
上部安山岩	7.28	0.33	14.25	0.30	4.16	33.2
下部安山岩	7.64	0.32	12.99	0.37	5.13	31.9
下部未蚀化安山岩	11.24	0.52	17.78	0.29	6.17	33.5
充填体	5.00	0.30	6.00	0.18	4.20	38.9

#### 1.2.4 边坡数值模型

在上盘边坡和下盘边坡各选取一个稳定性相对较差的剖面进行分析。为简化理论模型,忽视台阶存在,按照上盘边坡角为 $43^{\circ}$ 和下盘边坡角为 $39^{\circ}$ ,运用SLIDE软件分别构建上盘边坡和下盘边坡的数值模型,利用有限元法进行网格划分,分别如图1和图2所示。本次露天边坡稳定性分析固结

回填高度取值分别为:0、10 m(打底)、80 m、140 m。

### 1.3 安全系数

边坡安全系数是衡量边坡稳定性的最终定量指标,此次研究的边坡允许安全系数以《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016-2014)的规定为依据,确定新桥矿露天边坡的允许安全系数为1.25。

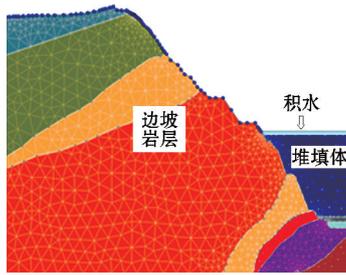


图1 上盘边坡网格划分

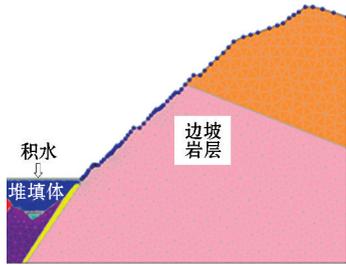


图2 下盘边坡网格划分

## 2 边坡稳定性分析

### 2.1 无渗流场作用下露天边坡稳定性分析

无渗流场作用不同固结回填高度下露天边坡安全系数计算结果见表2,图3和图4展示了部分无渗流场作用下露天边坡稳定性分析结果。由计算结果可以看出,Janbu法计算所得到的边坡安全系数最小,而Bishop法的计算结果较大,这是由于Janbu法对坡体的破坏面形状没有限定,运算过程更加接近边坡破坏的工程实际情况。

在不同边坡稳定性计算方法所得的结果中,上盘边坡的最小安全系数为1.351,均大于允许安全系数限值,说明固化回填过程可以保证上盘边坡的稳定性。当回填高度为0和10 m时,下盘边坡的最小安全系数为1.221和1.239,小于允许安全系

表2 不同固结回填高度下露天边坡安全系数

边坡	回填高度/m	允许安全系数	传统圆弧法			优化非圆弧法		
			Bishop	Janbu	M-F	Bishop	Janbu	M-F
上盘	0	1.25	1.556	1.457	1.551	1.426	1.351	1.424
	10	1.25	1.611	1.501	1.606	1.465	1.390	1.467
	80	1.25	2.052	1.881	2.057	1.973	1.832	2.042
	140	1.25	2.315	2.203	2.321	2.227	2.124	2.263
下盘	0	1.25	1.315	1.259	1.301	1.262	1.221	1.256
	10	1.25	1.323	1.263	1.309	1.274	1.239	1.267
	80	1.25	1.421	1.362	1.411	1.364	1.313	1.364
	140	1.25	1.594	1.524	1.585	1.510	1.460	1.532

数限值。另外,下盘边坡的安全系数始终小于上盘边坡的安全系数,说明露天采坑下盘边坡的稳定性更差。

边坡安全系数与回填高度呈正比例关系,即随着回填高度的上升,边坡安全系数逐渐提高。回填高度为0、10 m、80 m、140 m时,上盘边坡对应的最小安全系数分别为1.351、1.390、1.832和2.124;下盘边坡对应的最小安全系数分别为1.221、1.239、1.313和1.460。当回填高度超过10 m后,即使不稳固的下盘边坡稳定性也满足要求。

### 2.2 渗流场作用下露天边坡稳定性分析

考虑渗流场作用后,不同固化回填高度下露天边坡安全系数计算结果见表3,图5和图6展示了部分渗流场作用下露天边坡稳定性分析结果。在不同边坡稳定性计算方法所得的结果中,考虑渗流

场作用,上盘边坡在未开展回填作业前(回填高度为0)的最小安全系数仅为1.216,低于允许安全系数限值。由于露天采坑上盘外围实施了防渗帷幕注浆工程,下盘边坡无地下水水位线影响,仅考虑固化回填后露天采坑积水渗流的影响。回填高度为10 m时,下盘边坡最小安全系数为1.221,仍然略小于临界值。也就是回填高度小于10 m时,在渗流场作用下,露天边坡的最小安全系数均低于允许安全系数限值,无法保证露天边坡的稳定性。

考虑渗流场作用后,露天边坡安全系数随回填高度的增加逐渐提高。当回填高度为0、10 m、20 m、80 m和140 m时,上盘边坡的最小安全系数分别为1.216、1.257、1.289、1.666和2.050,下盘边坡的最小安全系数分别为1.213、1.221、1.262、1.292和1.448。因此,即使考虑渗流作用,当回填

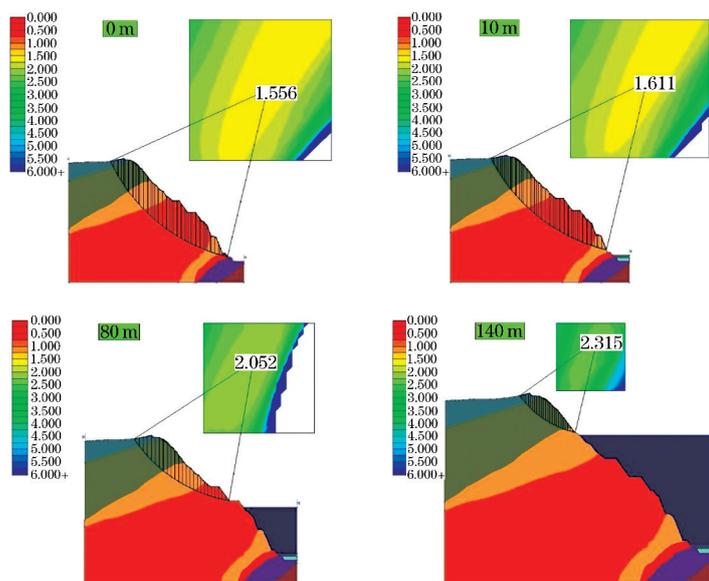


图3 上盘边坡安全系数(圆弧, Bishop法)

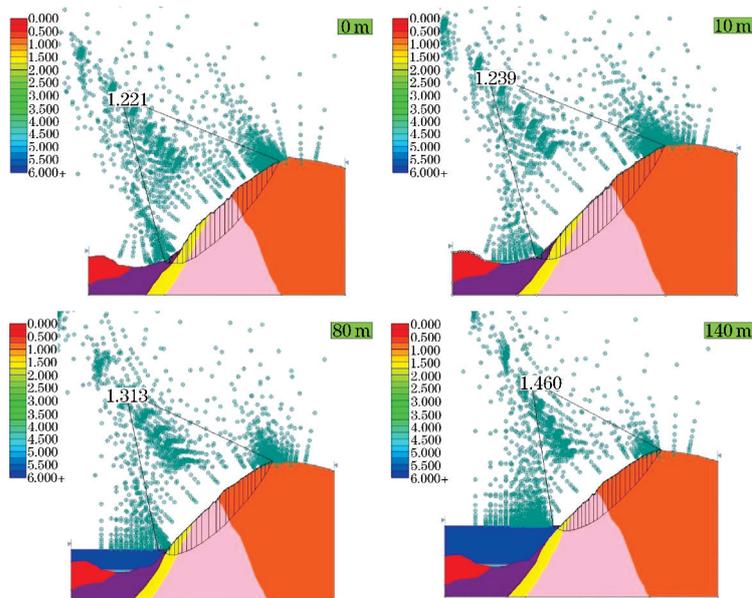


图4 下盘边坡安全系数(非圆弧, Janbu法)

高度达到 20 m 时,上盘边坡和下盘边坡都能满足稳定性要求。在实际回填作业过程中,通过有效控制堆填滤水量,合理布置排水工程,及时抽排堆填体表面水,可以进一步减轻回填体滤水的影响。

### 2.3 有/无渗流场作用下露天边坡稳定性对比分析

对比分析有/无渗流场作用下露天边坡稳定性计算结果可以发现:

(1) 渗流场(主要为充填体表面积水)作用对下盘边坡稳定性影响较小,安全系数仅降低 0.01~0.02。回填高度为 10 m 时,无渗流场条件下,下盘

边坡对应的最小安全系数为 1.239;渗流场条件下,下盘边坡对应的最小安全系数降至 1.221,均小于允许安全系数限值,安全储备不足。当固化回填高度超过 20 m 时,露天边坡的最小安全系数均超过 1.25,可以满足露天边坡稳定性要求。

(2) 相对于下盘边坡,渗流场(地下水+充填体表面积水)对上盘边坡稳定性影响较大,安全系数降低 0.06~0.16。未开展固化回填前,无渗流场条件下,上盘边坡的最小安全系数为 1.351;而渗流场作用下,上盘边坡的最小安全系数降至 1.216,小于

表 3 渗流场作用下不同固化回填高度下露天边坡安全系数

边坡	回填高度/m	临界安全系数	传统圆弧法			优化非圆弧法		
			Bishop	Janbu	M-F	Bishop	Janbu	M-F
上盘	0	1.25	1.384	1.277	1.373	1.294	1.216	1.328
	10	1.25	1.454	1.319	1.449	1.329	1.257	1.417
	20	1.25	1.526	1.381	1.528	1.346	1.289	1.456
	30	1.25	1.607	1.449	1.610	1.453	1.355	1.633
	80	1.25	1.960	1.753	1.960	1.796	1.666	1.913
	140	1.25	2.262	2.164	2.265	2.177	2.050	2.219
下盘	0	1.25	1.310	1.258	1.299	1.258	1.213	1.252
	10	1.25	1.315	1.254	1.304	1.262	1.221	1.256
	20	1.25	1.342	1.338	1.340	1.270	1.262	1.276
	30	1.25	1.350	1.353	1.350	1.311	1.275	1.322
	80	1.25	1.416	1.358	1.403	1.324	1.292	1.344
	140	1.25	1.584	1.512	1.578	1.496	1.448	1.517

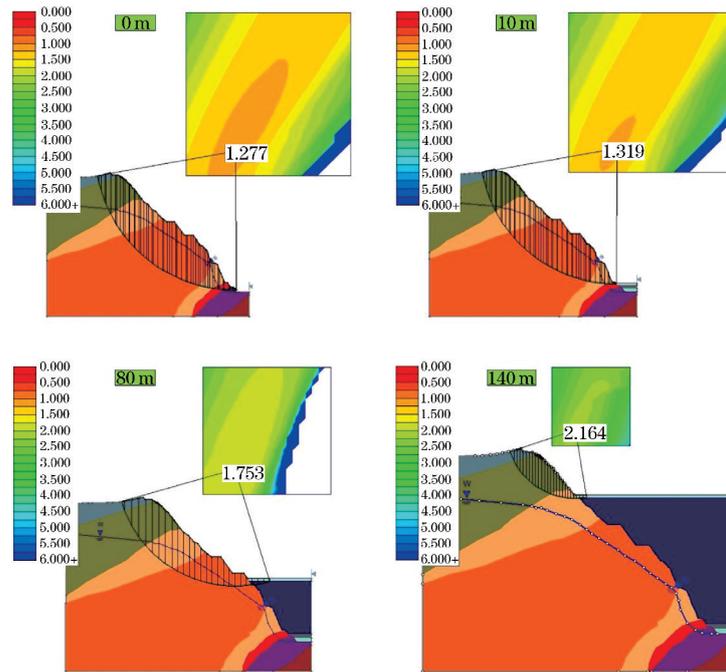


图 5 渗流场作用下上盘边坡安全系数(圆弧,Janbu 法)

安全允许系数限值,当固化回填高度达到 10 m 后,最小安全系数提高至 1.259,可以满足露天边坡稳定性要求。

(3) 渗流场作用导致上、下盘边坡稳定性有所降低,但对露天边坡的弱化作用有限,并不会对露天边坡整体稳定造成根本性影响,当固化回填高度超过 20 m 后,上、下盘边坡都能满足稳定性要求。

(4) 露天采坑固化回填总体上有利于提高露天

边坡的稳定性,可以减轻甚至消除大型露天坑边坡长期暴露的地质灾害安全隐患。

露天采坑开展回填作业前期(固化回填高度达到 20 m 前),为了确保露天边坡的稳固性,建议采用相应的加固措施;当固化回填高度超过 20 m 后,即使考虑渗流场作用,露天边坡也较不回填时更为稳定,可以消除露天采坑未处置时局部边坡存在的安全隐患。

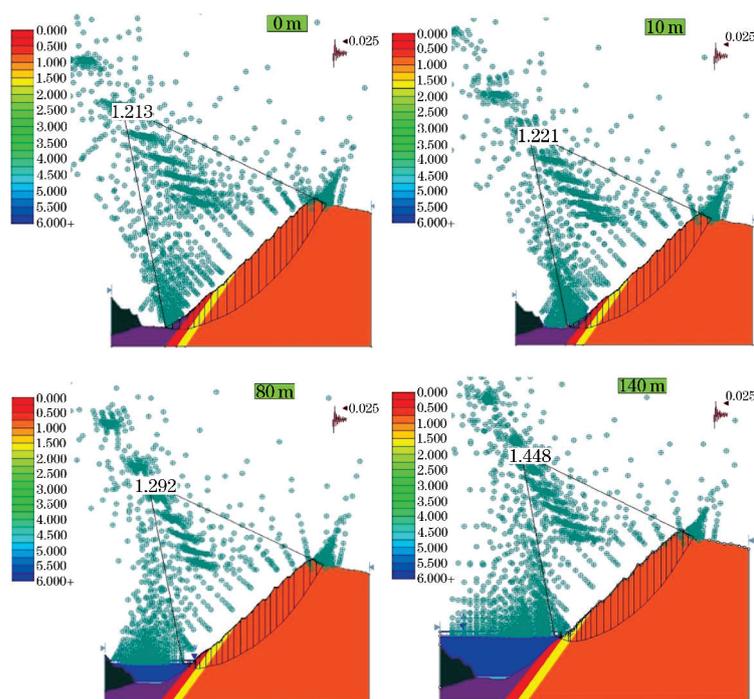


图6 渗流场作用下下盘边坡安全系数(非圆弧,Janbu法)

### 3 结论

本文依靠数值模拟手段,对有/无渗流场作用下露天边坡的稳定性进行深入分析,为固化回填对露天边坡稳定性的影响做出了科学评价。

(1) 渗流场作用会导致上、下盘边坡的稳定性有所降低,但对露天边坡的弱化作用有限,并不会对露天边坡整体稳定造成根本性影响。

(2) 露天采坑固化回填总体上有利于提高露天边坡的稳定性,且随着回填高度的上升,露天边坡安全系数逐渐提高。

(3) 当固化回填高度超过 20 m 时,上、下盘边坡都能满足露天边坡稳定性的要求。

#### 参考文献:

- [1] 孙玉科,杨志法,丁恩保,等.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.
- [2] 巩丽.地下开采扰动区域露天边坡稳定性分析与失稳模式研究[D].北京:北京科技大学,2014.
- [3] 宋卫东,杜建华,谢正平,等.大冶铁矿深凹露天开采最终边坡稳定性分析[J].北京科技大学学报,2005(4):385-389.
- [4] 姚爱军,薛廷河.复杂边坡稳定性评价方法与工程实践[M].北京:科学出版社,2008.
- [5] 刘向峰,郭子钰,王来贵,等.降雨矿震叠加作用下抚顺西露天矿边坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(4):40-46.
- [6] 黄堃.基于FLAC3D的双利矿业露天矿边坡稳定性分析研究[D].包头:内蒙古科技大学,2014.
- [7] 彭岩岩,汪虎,解毅,等.南芬露天铁矿边坡稳定性有限元分析[J].矿冶工程,2015,35(1):10-13.
- [8] 蓝宇.基于数值模拟的露天矿排土场高陡边坡稳定性分析与治理[J].矿业研究与开发,2023,43(3):77-82.
- [9] 赵恰,黄炳仁,王军,等.利用slide软件分析地下水对露天边坡稳定性的影响[J].采矿技术,2018,18(5):18-19+22.
- [10] 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+1472.
- [11] 张晓咏,戴自航.应用ABAQUS程序进行渗流作用下边坡稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2927-2934.
- [12] 苏卫宏.露天坑固化回填对地下水环境影响分析[J].现代矿业,2021,37(6):201-204+210.
- [13] 李诗雨,杨强胜,藕明江,等.姑山矿露天坑全尾砂胶结回填加固配比试验研究[J].现代矿业,2022,38(4):231-233.