

倾斜基底排土场抗滑煤柱稳定性计算方法^①

周游^{1,2}

(1.中煤科工生态环境科技有限公司,北京 100013; 2.天地科技股份有限公司,北京 100013)

摘要:针对露天矿倾斜基底排土安全防护问题,分析了倾斜基底排土方式、变形特征及滑动模式,建立了倾斜基底模型与抗滑煤柱模型,分析了抗滑煤柱稳定评价方法和排土台阶边坡稳定系数影响因素。结果表明,抗滑煤柱稳定性由煤柱内摩擦角 $\theta_{\text{岩}}$ 和排弃物料安息角 $\theta_{\text{排}}$ 之间关系决定;当 $\theta_{\text{岩}} \geq \theta_{\text{排}}$ 时,随煤柱长度增加,排土台阶边坡稳定系数增大;当 $\theta_{\text{岩}} < \theta_{\text{排}}$ 时,随煤柱长度增加,排土台阶边坡稳定系数呈增大、减小、再增大的变化特征。

关键词:露天矿; 倾斜基底; 排土场; 抗滑煤柱; 滑动机制; 边坡稳定性

中图分类号: TD854

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.007

文章编号: 0253-6099(2023)03-0030-03

Stability Calculation for Anti-slide Coal Pillar in Dump with Inclined Foundation

ZHOU You^{1,2}

(1. CCTEG Ecological Environment Technology Co Ltd, Beijing 100013, China; 2. Tiandi Science and Technology Co Ltd, Beijing 100013, China)

Abstract: In consideration of safety problem of landfilling into a dump with inclined foundation in an open-pit mine, an inclined foundation model and an anti-slide coal pillar model were established based on the analysis of landfilling methods in such inclined dump, deformation characteristics and sliding mode of inclined foundation, and then the method for evaluating stability of anti-slide coal pillar and influencing factors of the stability coefficient of dump slope were all discussed. The research results show that the stability of anti-slide coal pillar mainly depends on the relationship between the internal friction angle of coal pillar and the rest angle of waste material. When the internal friction angle is greater than or equal to the rest angle, the stability coefficient of dump slope increases with an increase in the length of anti-slide coal pillar; while when the internal friction angle is less than the rest angle, the stability coefficient of dump slope increases first, then falls down and finally increases again as anti-slide coal pillar becomes longer.

Key words: open-pit mine; inclined foundation; dump; anti-sliding coal pillar; sliding mechanism; slope stability

倾斜露天矿山若倾斜基底排土规划不合理,将形成大量外排作业,造成生产费用大幅增加^[1-2]。针对大型散体物料堆积排土,国内外学者采用相似模拟研究了排土场变形破坏机理,理论计算了排土场的堆体高度,测试了粒径对堆体的自然安息角的影响,数值模拟分析了排土场的破坏规律以及不同排土方式和参数条件下的边坡稳定性^[3-8]。合理规划露天矿倾斜基底排土,不仅能有效利用闲置土地,而且能降低排土运距、减少矿山运营成本。相关规范要求大于6°顺倾斜基底排土需要采取防滑措施。本文采用理论分析和稳定

性计算方法,分析顺倾斜硬岩基底排土场的变形破坏机理、坡脚抗滑煤柱的稳定计算方法以及排土台阶边坡稳定性影响因素。

1 倾斜基底排土场变形特征及抗滑煤柱作用机制

1.1 倾斜基底排土变形特征

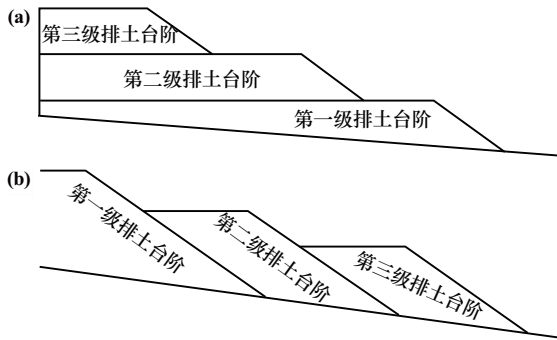
在倾斜基底进行排土作业时,一般有覆盖式和压坡式两种排土工艺(见图1)。露天矿排土场堆积方式不同,变形特征也会不同。当在顺倾斜基底排土时,倾

① 收稿日期: 2022-11-27

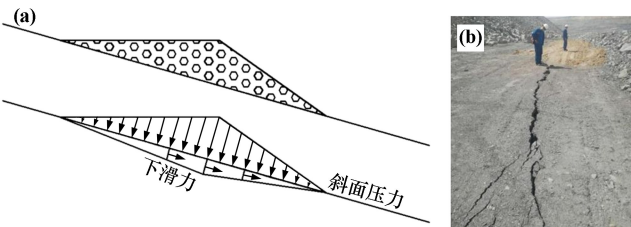
基金项目: 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项项目(2019-ZD004)

作者简介: 周游(1986—),男,重庆合川人,硕士,副研究员,主要研究方向为露天开采、资源开发与规划。

斜基底的存在改变了堆积体的受力状态,在排土区域斜面上应力状态和排弃物料下滑力为中部高两端低的状态,见图2(a)。两种不同排土方式造成第一级排土台阶高度不同,进而影响排土场变形特征。排弃堆积体在自重作用下变形,倾斜排土时在坡顶高应力区域沉降量增大,易在台阶区域出现的裂缝。图2(b)为国内某大型露天矿倾斜基底排土时台阶边缘形成的裂缝。同时,不合理的排土跟踪距离易造成排弃物料下滑力超过基底的嵌固咬合力,易出现沿物料与基底接触面滑坡,所以倾斜基底排土时上部与下部台阶之间应留设合理的跟踪距离,以避免各排弃台阶相互影响,在倾斜基底区域实现排土。



(a) 水平分层覆盖式排土; (b) 平行坡面压坡式排土
图1 倾斜基底上部排土方式



(a) 倾斜基底单段排土时基底受力特征; (b) 排土台阶边缘裂缝
图2 倾角基底上部排土场受力特征及典型排土现场

1.2 排土场坡脚抗滑煤柱作用机制

坡脚留抗滑煤柱,即排土场坡脚预留局部煤柱,效果类似于抗滑桩。抗滑煤柱通过煤柱的支挡作用增大排土场的抗滑力,提高排土场第一级台阶稳定性,避免因第一级台阶滑动影响倾斜基底排土安全。同时,利用抗滑煤柱平台宽度降低排土滚石对深部煤层产生影响,从而提高排土场稳定性和排土安全。

1.2.1 倾斜基底正常排土

倾斜基底正常排土形成散体物料堆,根据极限平衡原理,稳定系数 F_s 为:

$$F_s = \frac{\tan\theta_{排}}{\tan\alpha} \quad (1)$$

式中 $\theta_{排}$ 为排弃物料摩擦角(自然安息角); α 为基底地层倾角。

1.2.2 倾斜基底坡脚抗滑煤柱

根据极限平衡原理,抗滑平台作用时将倾斜基底上部排弃物料分为两部分,散体物料堆积体区域为 S_{OCDE} ,抗滑平台影响区域为 S_{OCBA} ,见图3。

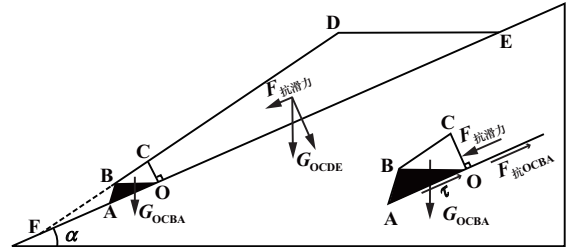


图3 抗滑煤柱受力分析

当排弃物料沿煤层底板滑动时,抗滑平台将阻挡上部散体物料沿煤层底板发生剪切滑动,因此,倾斜基底整体滑动时,抗滑力分为两部分:

$$F_{抗滑力} = G_{OCDE} \times \cos\alpha \times \tan\theta_{排} + (G_{OCB} + G_{OBA}) \times \cos\alpha \times \tan\theta_{岩} + c_{岩} \times L_{OA} \quad (2)$$

$$F_{滑动力} = G_{OCDE} \times \sin\alpha + G_{OCBA} \times \sin\alpha = (G_{OBDE} + G_{OBA}) \times \sin\alpha \quad (3)$$

令: $A = \frac{G_{OCB} + G_{OBA}}{G_{OBDE} + G_{OBA}}$

$$B = \frac{1}{G_{OBDE} + G_{OBA}}$$

则边坡稳定系数 F_s 为:

$$F_s = \frac{F_{抗滑力}}{F_{滑动力}} = \frac{\tan\theta_{排}}{\tan\alpha} + A \times \frac{\tan\theta_{岩} - \tan\theta_{排}}{\tan\alpha} + B \times \frac{c_{岩} \times L_{OA}}{\sin\alpha} \quad (4)$$

式中 $\theta_{岩}$ 为煤体内安息角。当 $\theta_{排} \leq \theta_{岩}$ 时,式(4)后两项均为提升排土场稳定系数分项,能有效提升排土场稳定性。当 $\theta_{排} > \theta_{岩}$ 时, $\tan\theta_{岩} - \tan\theta_{排} < 0$,则式(4)后两项之和成为抗滑煤柱稳定提升的关键因素。当 α 和 $\theta_{排}$ 为定值时,抗滑煤柱发挥作用,其稳定系数为 $\theta_{岩}$ 、 $c_{岩}$ 和 L_{OA} 的函数。

2 抗滑煤柱理论模型及稳定性分析

2.1 理论模型及计算参数

建立地层倾角 $\alpha = 10^\circ$ 的模型,排弃台阶高 $h = 30$ m,排弃物内摩擦角 $\theta_{排} = 34^\circ$,抗滑煤柱坡面角 $\gamma = 72^\circ$,煤柱岩体抗滑参数内聚力 $c_{岩} = 52.7$ kPa,摩擦角 $\theta_{岩} = 23.5^\circ$,基底以下地层不滑动,模型如图4所示。

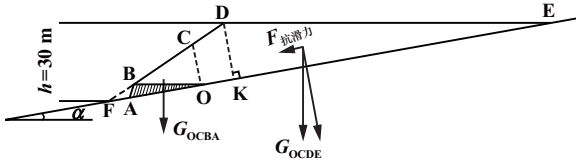


图4 抗滑煤柱模型

2.2 抗滑煤柱稳定性变化规律

当O点处于FK段时,抗滑平台上部主要承受 S_{OCDE} 段排弃物料的推力。当O点进入KE段时,上部排弃的下滑力推力主要由 S_{OCE} 提供。建立抗滑煤柱 L_{OA} 长度与排弃场的稳定性关系,抗滑煤柱 L_{OA} 长度在FKE上变化时,排土台阶区域和沿基底滑动的稳定系数见图5。图6为排弃物料局部台阶区域稳定性计算结果。

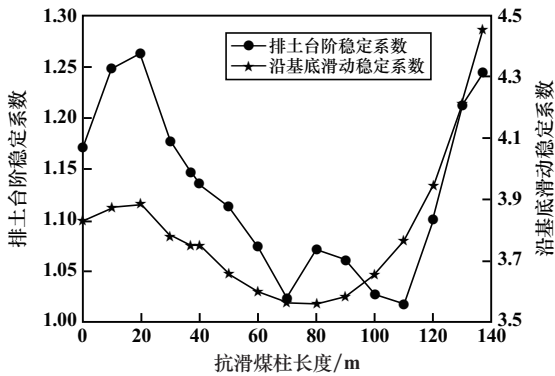
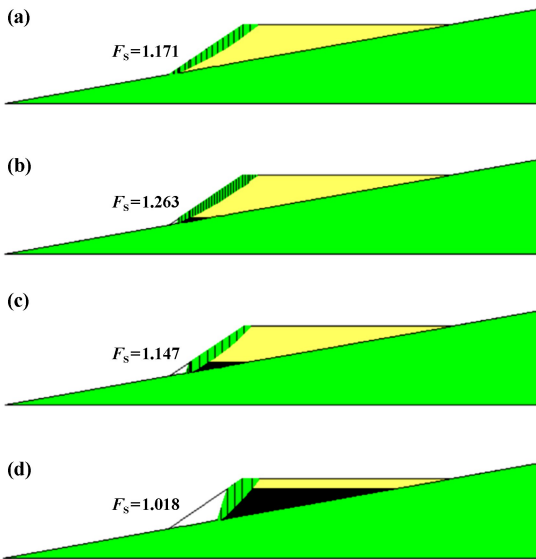


图5 抗滑煤柱长度与单台阶排土稳定系数的关系



(a) $L_{OA} = 0$ m; (b) $L_{OA} = 20$ m; (c) $L_{OA} = 37.12$ m; (d) $L_{OA} = 110$ m

图6 不同长度抗滑煤柱台阶区域稳定性

通过对倾斜基底排土场基岩不滑动计算,在单台阶排土时,沿倾斜基底滑动时稳定系数大于排土台阶单台阶稳定系数。抗滑煤柱长度为20 m时,排土台阶边坡稳定系数与沿基底滑动稳定系数均出现提升,单台阶稳定系数提升了7.8%,沿基底滑动稳定系数提升了1.5%。抗滑煤柱长度大于20 m后,随煤柱长度增加,稳定系数先降低后增加;单台阶滑动在70 m和110 m处出现2个极小值,而沿基底滑动时最小值出现在80 m处。当 $\theta_{排} > \theta_{岩}$ 时,坡脚抗滑煤柱长度增加,排土台阶边坡稳定系数出现增大、减小、再增大的趋势。因此,需要综合验算确定适宜的抗滑煤柱长度。

3 结 论

1) 以倾斜基底安全排土为例,分析了倾斜基底排土时的变形特征,通过排土方式与排土滑动特征,分析了坡脚抗滑煤柱的作用机制。

2) 建立了基于煤柱长度 L_{OA} 、煤柱抗剪强度 $c_{岩}$ 、煤体内安息角 $\theta_{岩}$ 及基底倾角 α 的抗滑煤柱稳定评价方法。当 $\theta_{排} \leq \theta_{岩}$ 时,随抗滑煤柱长度增加,第一级排土台阶边坡稳定系数增大;当 $\theta_{排} > \theta_{岩}$ 时,随抗滑煤柱长度增加,排土台阶边坡稳定系数呈增大、减小、再增大的变化趋势。

参考文献:

[1] 王 东,李广贺,曹兰柱,等. 基于内排空间利用最大化的露天煤矿排土线布置方法[J]. 煤炭学报, 2020,45(9):3150-3156.
 [2] 龙虎荣. 露天矿山排土场灾害分析与防治措施[J]. 矿冶工程, 2010,30(1):21-24.
 [3] 曹 博,汪 帅,黄云龙,等. 倾斜煤层露天矿横采内排采区合理宽度研究[J]. 煤炭科学技术, 2021,49(8):38-44.
 [4] 贺 超,崔松军,王 亮,等. 基于PFC^{2D}的排土场边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):15-18.
 [5] 赵红泽,邵志奔,杜海瑞,等. 露天矿背斜区内排土场边坡基底处理方式优选研究[J]. 煤炭科学技术, 2021,49(2):77-84.
 [6] 宋仁忠,韩 兴,杨 日,等. 基于岩土重塑特性的排土场分层和稳定性评价方法[J]. 煤矿安全, 2020,51(12):283-287.
 [7] 翟文龙,周汉民,陈 斌. 某高台阶排土场基底承载力与极限堆高分析[J]. 有色金属, 2015,67(6):89-92.
 [8] 袁 远,郭夏飞. 安太堡露天矿排土场边坡稳定性分析[J]. 露天采矿技术, 2021,36(1):76-78.

引用本文: 周 游. 倾斜基底排土场抗滑煤柱稳定性计算方法[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):30-32.