

## 基于强度参数的内排土场软基底局部换填率估算与应用

贾 兰, 高世松, 王佳琦, 李广贺, 姜聚宇, 王 东

**Estimation and application of local replacement rate for soft foundation in inner dump based on strength parameters: A case study of Baiyinhua No. 1 open-pit mine in Inner Mongolia**

JIA Lan, GAO Shisong, WANG Jiaqi, LI Guanghe, JIANG Juyu, and WANG Dong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209018>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 尾矿坝-排土场联合堆排稳定性与边坡参数优化研究

$\${suggestArticle.titleEn}$

朱远乐, 唐绍辉, 苏伟 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(1): 70-75

#### 天气因素对排土场生态边坡稳定性的影响

$\${suggestArticle.titleEn}$

郑开欢, 罗周全, 江宏 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(6): 97-102

#### 云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyuan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

#### 基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42

#### 基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

#### 滇中香炉山引水隧洞工程区地应力场特征及断裂影响模糊综合评价

Characteristics of in-situ stress field and fuzzy comprehensive evaluation of the influence of active faults on the water diversion engineering of Xianglushan Tunnel Area in central Yunnan

付平, 张新辉, 刘元坤, 尹健民, 徐春敏 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 123-132



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202209018

贾兰, 高世松, 王佳琦, 等. 基于强度参数的内排土场软基底局部换填率估算与应用——以内蒙古白音华一号露天矿为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 68-74.

JIA Lan, GAO Shisong, WANG Jiaqi, et al. Estimation and application of local replacement rate for soft foundation in inner dump based on strength parameters: A case study of Baiyinhua No. 1 open-pit mine in Inner Mongolia[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 68-74.

# 基于强度参数的内排土场软基底局部换填率 估算与应用

——以内蒙古白音华一号露天矿为例

贾 兰, 高世松, 王佳琦, 李广贺, 姜聚宇, 王 东  
(辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 为了更加经济有效地提高软基底内排土场边坡稳定性, 以白音华一号露天矿为工程背景, 通过直剪试验测定了排弃物-弱层接触面和排弃物-砂岩接触面抗剪力学指标, 提出了局部换填条件下排弃物与基底接触面的等效抗剪力学参数的确定方法; 基于刚体极限平衡理论, 计算不同换填率条件下的边坡稳定系数, 以安全储备系数为限定条件提出了基于强度参数的内排土场软基底局部换填率估算方法, 并采用数值模拟手段进行验证。研究结果表明: 确定白音华一号露天矿排弃物-砂岩接触面的黏聚力为 25.78 kPa, 内摩擦角为 17.58°; 排弃物-弱层接触面的黏聚力为 7.50 kPa, 内摩擦角为 9.72°; 局部换填情况下软基底内排土场边坡稳定性系数与换填率呈正相关一次函数关系; 计算求得满足安全储备系数要求的内排土场某阶段基底换填率为 20%; 局部换填处理后软基底内排土场边坡的滑坡模式仍为以圆弧为侧界面、基底弱层为底界面的组合滑动。

**关键词:** 内排土场; 边坡; 稳定性; 软基底; 接触面; 局部换填

**中图分类号:** P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)04-0068-07

## Estimation and application of local replacement rate for soft foundation in inner dump based on strength parameters: A case study of Baiyinhua No. 1 open-pit mine in Inner Mongolia

JIA Lan, GAO Shisong, WANG Jiaqi, LI Guanghe, JIANG Juyi, WANG Dong  
(College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** In order to effectively enhance the stability of the slope within the soft base of the inner dump, this study focuses on the Baiyinhua No. 1 open-pit mine as the engineering background. Through direct shear tests, the shear mechanical characteristics of the waste-weak layer interface and the waste-sandstone interface were determined. A methodology is proposed to determine the equivalent shear mechanical parameters of the waste-base interface under localized replacement conditions. In this study, the limit equilibrium theory of rigid body is applied to calculate the slope stability coefficients under different replacement ratios. Additionally, an estimation method for the local replacement ratio of the soft base in the waste dump, based

收稿日期: 2022-09-13; 修订日期: 2022-12-09

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874160); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-01); 教育部丝路 1+1 科研合作项目(P20210121076)

第一作者: 贾 兰(1982-), 女, 辽宁海城人, 博士, 副教授, 从事露天矿边坡工程的教学与研究工作。E-mail: jialan@Intu.edu.cn

on strength parameters and subject to a safety reserve coefficient constraint, was put forward and verified using numerical simulations. The results indicate that the cohesive force and internal friction angle at the waste-sandstone interface in the Baiyinhua No.1 open-pit mine were determined to be 25.78 kPa and 17.58°, respectively. These two parameters at the waste-weak layer interface were found to be 7.50 kPa and 9.72°, respectively. A positive linear relationship was observed between the stability coefficient of the inner dump slope in the soft base under localized replacement conditions and the replacement ratio. The calculated results reveal that a replacement ratio of 20% for a certain stage of the dump's base satisfies the safety reserve coefficient requirement. After local replacement treatment, the landslide mode of the dump slope in the soft foundation remains characterized by combined sliding, with the arc acting as the lateral boundary and the weak base layer serving as the bottom interface.

**Keywords:** inner dumps; side slope; stability; soft substrate; contact surface; local replacement

## 0 引言

露天矿内排土场软弱基底对边坡稳定非常不利,基底岩性亲水性强,遇水软化,抗剪强度降低,导致边坡自身抗滑抗剪能力下降,极易发生滑坡危害<sup>[1-2]</sup>。排土场管理不当会导致边坡出现稳定性问题<sup>[3-4]</sup>,如何处理内排土场的软弱基底直接关系到露天矿的安全生产和经济效益,是软基底露天矿生产中的关键技术问题。换填法即通过拉沟破坏弱层并回填大块透水硬岩,一方面,可以提高接触面抗剪力学性质;另一方面,换填后透水性好,遇水软化程度低,可起到地下水的疏导作用,有利于内排土场边坡的稳定性。

王家臣等<sup>[5-6]</sup>为揭示软弱基底排土场的变形破坏模式,通过对基底黏土进行三轴剪切和原位直剪力学测试,获得黏土的抗剪强度参数。陈冲等<sup>[7]</sup>运用底面摩擦模型试验,研究了基底在天然状态和饱水状态下的排土场边坡的变形破坏特征。赵红泽等<sup>[8]</sup>对基底麻面爆破处理、跟踪排弃台阶坡脚处拉抗滑沟处理以及背斜区倾角 12°位置留设抗滑煤柱等三种方案模型进行对比分析。Ni 等<sup>[9]</sup>通过现场试验和室内岩土试验分析真空动力固结法处理软基底时地下水位、孔隙水压力、土层沉降等指标的变化,提出了软基处理的一种新思路。闫澍旺等<sup>[10]</sup>,YEE 等<sup>[11]</sup>提出的在含水率较高的基底弱层中采用抛石挤淤也是应用比较广泛的地基加固方法,可以有效改善地基的坚固程度和承载力。徐奴文等<sup>[12]</sup>通过对边坡深部软弱结构进行置换加固处理,得到边坡安全系数相比于未处理前提高了 0.403,大大提高了边坡的稳定性。

综上,国内外学者们对内排土场基底处理进行了一定的理论研究和应用研究,但在露天矿生产实际中仍然存在盲目换填处理的问题,导致生产成本增加,那么如何进行科学换填才能够达到既经济又安全的目的,是露

天矿生产亟待解决的问题。本研究以白音华一号露天煤矿为研究背景,提出了基于强度参数优化的内排土场软基底局部换填率估算方法并进行应用,对类似工程地质条件的软基底露天矿的安全生产具有指导和借鉴意义。

## 1 工程背景

白音华一号露天矿的内排土场位于采场南帮,2018年9月份开始进行内排,随着剥采工程的继续,内排土场逐渐增高,未来存在潜在滑坡危险。边坡岩体由上而下构成主要有第四系砂土层、新近系古近系黏土层和白垩系煤、泥岩层。设计内排土场边坡角平均为 13.5°,台阶高度为 13.5 m、平台宽度为 40 m、台阶坡面角为 33°。内排土场基底存在连续分布的单一软弱层,基底顺倾,最大倾角为 8°~14°,不利于边坡稳定,工程地质剖面如图 1 所示。因此,有必要对白音华一号露天煤矿内排土场软弱基底进行处理,以提高内排土场边坡稳定性。

依据(GB50197—2015)《煤炭工业露天矿设计规范》中边坡安全系数的规定,考虑内排土场的重要性及赋存条件的探明程度,确定内排土场边坡安全储备系数为 1.3。由于内排土场基底赋存顺倾弱层,推测其潜在滑坡模式为以基底弱层为底界面圆弧为侧界面的组合滑动。通过试验分析获得的各层岩土体物理力学参数如表 1 所示。

## 2 基于换填率强度参数确定与边坡稳定性分析

### 2.1 软基底局部换填参数优化流程

软基底局部换填方法首先进行局部拉沟清除基底弱层,再换填透水硬岩,能够有效提高基底抗剪力学指标,提高内排土场边坡稳定性,并且能够降低基底处理费用,提高经济效益。基底局部换填处理示意图如图 2 所示。

那么如何确定合理的处理范围及拉沟布置参数是

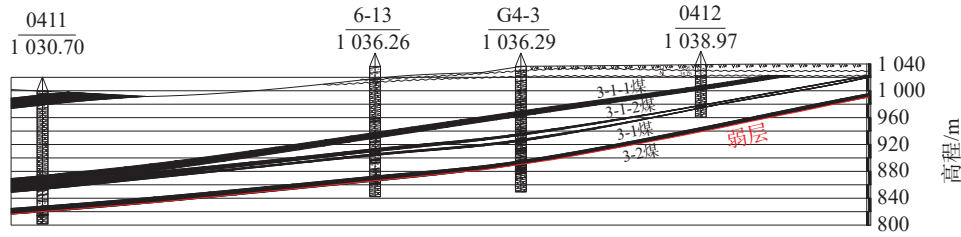


图 1 白音华一号露天矿南帮典型地质剖面图

Fig. 1 Typical cross-sectional geological profile of the southern slope of Baiyinhua No. 1 open-pit mine

表 1 岩土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil strata

岩体名称	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )
排弃物	17.49	25.38	17.80
第四系砂土	23.98	0.00	17.50
新近系古近系黏土	24.00	85.00	19.30
煤	26.32	58.00	11.90
砂岩	17.76	50	20.4
泥岩	21.85	26.00	20.10

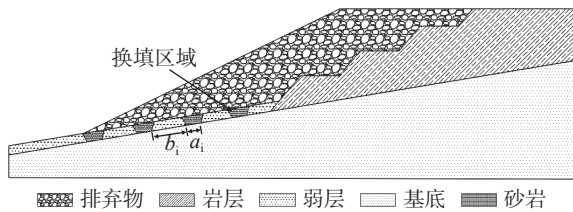


图 2 基底换填处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of base replacement treatment

局部换填方法的关键问题。本论文研究提出了内排土场软基底局部换填技术参数优化方法。令基底拉沟处理面积与基底压覆面积之比为基底换填率  $K$ ，如断面示意图 2 中，沟设计为倒梯形， $K$  的表达式为：

$$K = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{\sum_{i=1}^m (a_i + b_i)} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中： $K$ ——基底换填率/%；

$a_i$ ——沟底宽度/m,  $i=1, 2, \dots, m$ ；

$b_i$ ——沟底之间的距离/m,  $i=1, 2, \dots, m$ 。

再通过试验确定各岩层及排弃物-基底接触面物理力学指标，分别计算换填率  $K=0$ 、 $K=10\%$ 、 $\dots$ 、 $K=100\%$  时的边坡稳定系数  $F_{St=0}$ 、 $F_{St=10\%}$ 、 $\dots$ 、 $F_{St=100\%}$ ；最后，根据计算结果拟合得到  $F_s$  与  $K$  的关系函数，求得当  $F_s = F_{st}$  (安全储备系数) 时对应的换填率  $K$ ，即为求解的满足边坡安全要求的最低换填率。局部换填率的具体优化流程如图 3 所示。

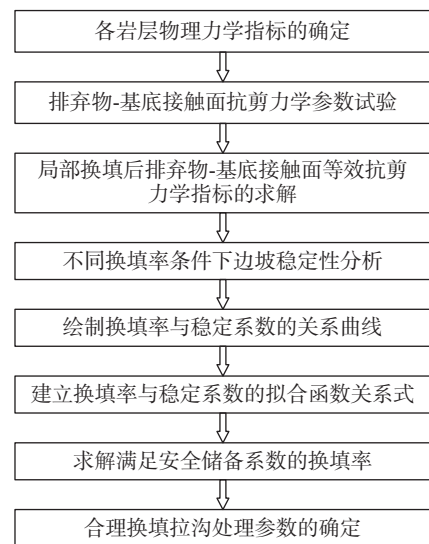


图 3 内排土场软基底局部换填参数优化流程图

Fig. 3 Flowchart of optimization process for local replacement parameters of soft base in the waste dump

## 2.2 局部换填后排弃物-基底接触面等效抗剪力学指标的确定

不同软基底换填率对应的接触面抗剪力学指标的确定是边坡稳定性计算的前提，因此，首先需要确定换填后排弃物-基底接触面的抗剪力学指标。软弱基底局部换填后，基底接触面属于非连续的新生结构面，在边坡稳定性计算中，换填后的新生结构面抗剪力学特性须用等效抗剪力学指标来进行表征。假设沿整个剪切面上的应力分布是均匀的，且新生结构面抗剪强度与换填率  $K$  呈线性关系，即新生结构面的抗剪强度可以表示为：

$$\tau = KC_j + (1 - K)C + \sigma[K \tan \varphi_j + (1 - K) \tan \varphi] \quad (2)$$

基于摩尔-库伦强度准则，得出结构面的等效黏聚力  $C_i$  和等效内摩擦系数  $\tan \varphi_i$  为：

$$\left. \begin{aligned} C_i &= KC_j + (1 - K)C \\ \tan \varphi_i &= K \tan \varphi_j + (1 - K) \tan \varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $C_i$ ——接触面等效黏聚力/kPa；

$\varphi_i$ ——接触面等效内摩擦角/(°)；



- $C_j$ ——排弃物与砂岩接触面黏聚力/kPa;  
 $C$ ——弱层黏聚力/kPa;  
 $\varphi_j$ ——排弃物与砂岩接触面内摩擦角/(°);  
 $\varphi$ ——弱层内摩擦角/(°)。

由上式可知,基底处理前排弃物与弱层接触,基底全换填后排弃物直接与换填的砂岩接触,两种接触面的抗剪力学参数通过接触面直剪试验可以测得。根据不同的换填率,把排弃物-弱层接触面指标和排弃物-砂岩接触面的指标代入式(3)进行计算,从而得到不同基底换填率的接触面等效抗剪力学指标。

### 2.3 基底换填情况下边坡稳定性分析方法

基于刚体极限平衡理论,推导得出基底换填情况下边坡稳定性分析方法。任取滑面上第*i*个条块作为研究对象, $i=0, 1, \dots, n$ ,则第*i*个条块底面倾角为 $\alpha_i$ ,第*i*-1个条块的底面倾角为 $\alpha_{i-1}$ ,第*i*-1个条块的剩余推力为 $E_{i-1}$ ,滑体内条块受力分析如图4所示。

平行第*i*个条块底面方向建立切向力平衡方程:

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - S_i \quad (4)$$

垂直第*i*个条块底面方向建立法向力平衡方程:

$$N_i = W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (5)$$

根据摩尔-库伦强度准则第*i*个条块底面有:

$$S_i = \frac{C_i l_i + N_i \tan \varphi_i}{F} \quad (6)$$

通过对上述公式进行整理,可求出滑面上部滑体的

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{[KC_j + (1-K)C]l_i + [W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)][K \tan \varphi_j - (1-K) \tan \varphi]}{F} \quad (8)$$

通过调整折减系数*F*,使最下条块剩余推力为0,则可以求出该滑面位置下的内排土场边坡稳定系数。根据此计算原理,通过自编程序计算得到的 $F_{\min}$ 则为最危险滑面对应的稳定系数,即为某换填率情况下的边坡稳定系数。

## 3 白音华一号露天矿软基底局部换填率估算

### 3.1 排弃物-基底接触面抗剪力学参数测试

#### (1) 试验方案

排弃物与基底的接触面属于新生结构面,本论文研究提出一种测试排弃物-基底接触面抗剪力学参数的试验方案。通过钻探取得岩样,对各岩样进行含水率和颗粒级配等试验,确定岩样物理力学参数,试验所得岩样含水率与颗粒级配结果如表2、表3所示;再根据含水率和颗粒级配试验结果对岩样进行重塑,将岩样制作成 $\phi 618 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱形试件<sup>[13-14]</sup>。将重塑的一

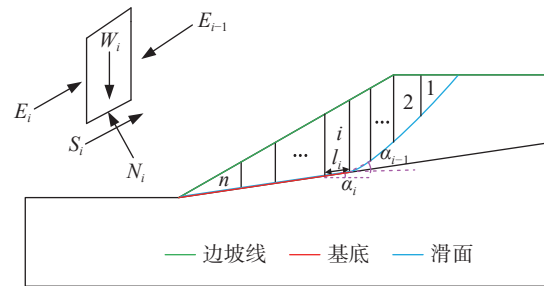


图4 滑体内条块受力分析

Fig. 4 Force analysis diagram of internal blocks in the sliding surface

剩余推力 $E_i$ :

$$E_i = W_i \sin \alpha_i + E_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{C_i l_i + [W_i \cos \alpha_i + E_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)] \tan \varphi_i}{F} \quad (7)$$

式中: $E_i$ ——第*i*条块的剩余推力/kN;

$W_i$ ——第*i*条块的重量/kN;

$S_i$ ——第*i*个条块底面的切向力/kN;

$\alpha_i$ ——第*i*条块的滑面倾角/(°);

$N_i$ ——第*i*个条块底面的法向力/kN;

$C_i$ ——第*i*条块的滑面黏聚力/kPa;

$\varphi_i$ ——第*i*条块的滑面摩擦角/(°);

$l_i$ ——第*i*条块的底面长度/m;

$F$ ——折减系数。

将结构面等效黏聚力 $C_i$ 和等效内摩擦系数 $\tan \varphi_i$ 代入式(7)得到不同基底换填率的剩余推力 $E_i$ 为:

个排弃物试件和一个基底岩样试件组合为一组试件,每种组合在进行不同正应力试验时各需制备5组试件。按照国家标准(GB/T 23561.11—2009煤和岩石物理力学性质测定方法)进行直剪试验操作,按照此方法得到的试验结果与工程场地原位值具有较好的一致性。

#### (2) 试验仪器与试验结果

直剪试验仪器采用NT.IJD-1型应变控制式直剪仪。

岩样天然含水率指标测定采用国家标准GB/T 23561.6—2009煤和岩石物理力学性质测定方法,采用烘干法测定岩石的含水率,结果如表4所示。

表2 岩样天然含水率测定成果

Table 2 Measurement results of natural moisture content of rock samples

岩石名称	烘干前质量/g	烘干后质量/g	含水率/%
排弃物	40.32	38.69	4.20
泥岩	33.74	30.73	9.79
弱层	28.31	23.16	22.24

表 3 烘干岩样各粒径级配比  
Table 3 Particle Size Distribution of dried rock samples

岩性	各粒径占总质量百分比/%					
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.075 ~ 0.25 mm	<0.075mm
排弃物	4.711	14.317	33.268	13.842	22.515	11.347
碳质泥岩	11.037	27.413	26.346	11.927	16.318	6.959
泥岩	21.344	14.625	26.383	10.968	18.182	8.498

表 4 不同换填率条件下接触面等效抗剪力学指标  
Table 4 Equivalent shear mechanical parameters of contact surface under different replacement rates

基底换填率/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	7.500	9.720
10	9.328	10.528
20	11.156	11.332
30	12.984	12.131
40	14.812	12.926
50	16.640	13.716
60	18.468	14.500
70	20.296	15.279
80	22.124	16.052
90	23.952	16.819
100	25.780	17.580

岩样重塑试验指标测定采用国家土工试验方法标准 GB/T 50123—2019, 将岩样经过击碎、烘干、研磨后经过筛分器对粒径进行筛分, 通过称重、记录比较后, 得到岩样各粒径级配比如表 4 所使用的。

岩样剪切强度测定采用国家标准 GB/T 23561.11—2009 煤和岩石物理力学性质测定方法, 采用直剪试验法进行试验。根据试验得到的数据, 绘制施加的不同正应力值与试验得到的剪应力平均值的关系曲线如图 5—6 所示, 分别为排弃物-砂岩接触面和排弃物-弱层接触面抗剪强度曲线。根据拟合曲线方程可以求得排弃物-砂岩接触面的黏聚力为 25.78 kPa, 内摩擦角为 17.58°; 排弃物-弱层接触面的黏聚力为 7.50 kPa, 内摩擦角为 9.72°。

### 3.2 局部换填后排弃物-基底接触面等效抗剪力学参数确定

排弃物-弱层、排弃物-砂岩接触面的抗剪力学指标通过上述接触面直剪试验已确定, 不同换填率情况下的接触面等效抗剪力学指标通过计算式(3)进行求解, 结果如表 4 所示。

### 3.3 软基底局部换填率的求解

依次计算白音华一号露天矿某发展阶段典型计算剖面基底换填率为 0、10%、20%、…、100% 时边坡稳定系数, 边坡稳定性计算结果如图 7 所示, 随着换填率的增大, 边坡稳定性呈直线型增大, 绘制基底换填率与

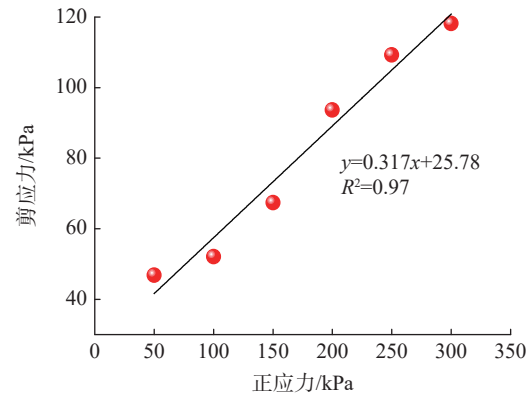


图 5 排弃物-砂岩接触面抗剪强度拟合曲线

Fig. 5 Shear strength fitting curve of waste-sandstone interface

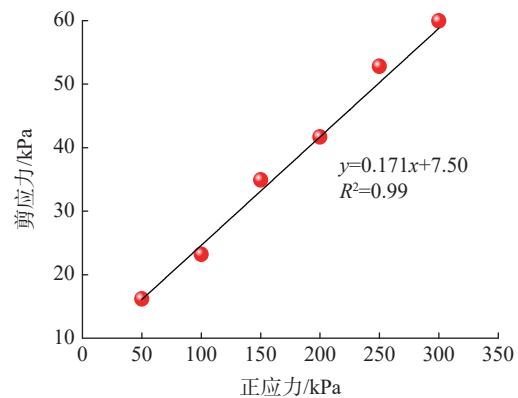


图 6 排弃物-弱层接触面抗剪强度拟合曲线

Fig. 6 Shear strength fitting curve of waste-weak layer interface

稳定系数之间的关系曲线如图 8 所示, 得到拟合关系函数为  $F_s = 1.20 + 0.00524K$ , 当边坡稳定性系数等于安全储备系数 1.3 时, 对应的换填率  $K$  为 19.1%, 取整约为 20%。

由图 7 可以明显看出, 随着换填率的增大, 边坡最危险滑面向到界边坡方向扩展, 但滑坡模式仍为以圆弧为侧界面、基底弱层为底界面的组合滑动, 当换填率为 0~30% 时, 最危险滑面在排土场内部, 当达到 40% 后, 最危险滑面向到界边坡内部扩展, 分析原因主要是由于内排土场基底被处理后, 随着换填率的增大, 内排土场基底层抗剪强度逐渐增大, 而到界边坡煤底板下的弱层并未处理, 抗剪强度相对较小, 因此, 从边坡变形破坏过程的应力分布变化角度分析, 最危险滑面向着到界边坡内部扩展。

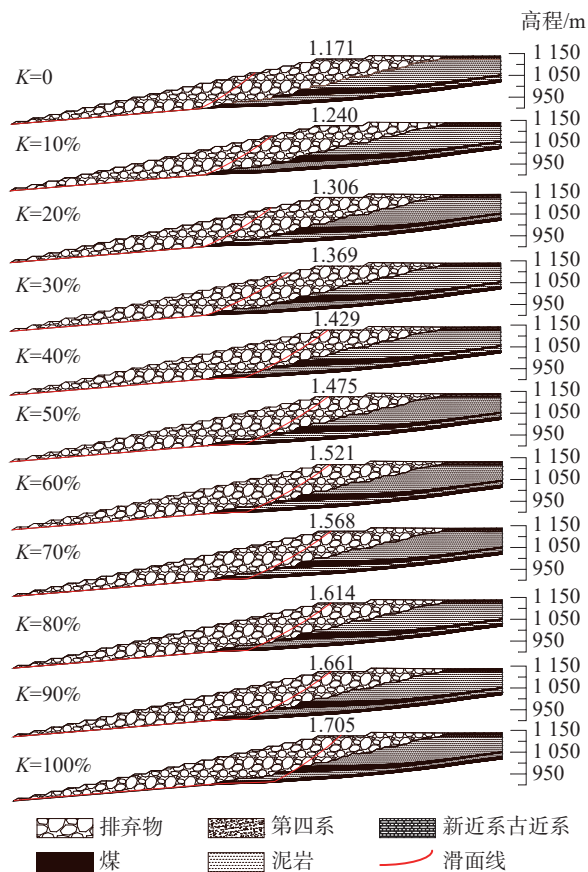


图 7 边坡稳定系数计算结果

Fig. 7 Calculation results of slope stability coefficients

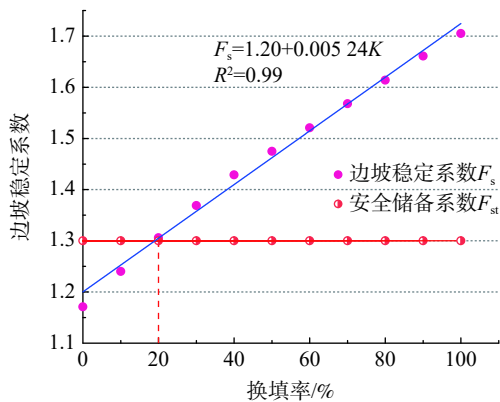


图 8 换填率与稳定系数的关系曲线

Fig. 8 Relationship between replacement rate and stability coefficient

### 3.4 边坡稳定性数值模拟分析

为了研究软弱基底换填后对内排土场边坡滑移模式和滑移机理的影响,对基底未换填、换填率为 20% 和换填率为 100% 的边坡进行数值模拟分析。模型由端帮和内排土场及基底组成,模型的端帮坡面与内排土场坡面为自由面,模型的四周和底面部分分别采用水平和竖直位移进行约束,得到位移云图模拟结果如图 9—11 所示。

由位移云图可以看出由于基底弱层的控制作用,易

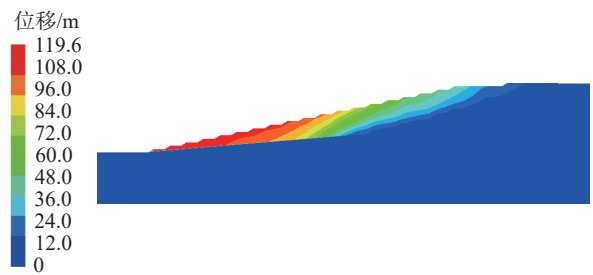


图 9 K=0 时二维位移云图

Fig. 9 Two-dimensional displacement contour map at K=0

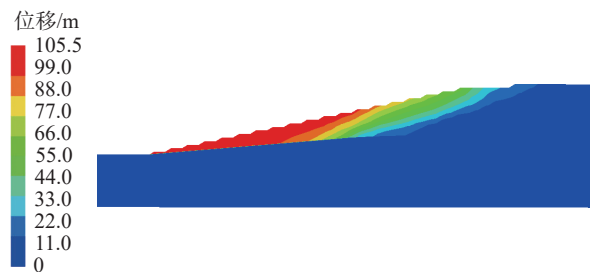


图 10 K=20% 时二维位移云图

Fig. 10 Two-dimensional displacement contour map at K=20%

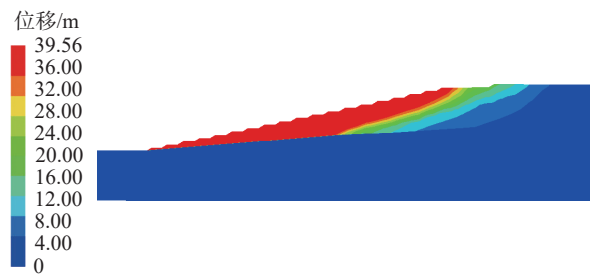


图 11 K=100% 时二维位移云图

Fig. 11 Two-dimensional displacement contour map at K=100%

形成坡体内部近似圆弧的剪切破坏带并在自身重力作用下沿基底弱层面剪出,滑坡模式为以圆弧为侧界面、基底弱层为底界面的组合滑动。基底弱层换填后,排弃物与基底接触面的抗剪强度增大,而到界边坡煤底板下的弱层并未处理,抗剪强度相对较小,从边坡变形破坏过程的应力分布变化角度分析,最危险滑面会向着到界边坡内部扩展,但换填后上部最大形变量明显降低,边坡稳定性明显提高。当换填率为 0% 时边坡稳定系数为 1.180,换填率为 20% 时,稳定系数为 1.318,换填率为 100% 时,稳定系数为 1.710。将数值模拟结果与二维刚体极限平衡计算结果对比分析,边坡的滑体形态及边坡稳定性计算结果基本一致,两种方法相互验证,充分证明了边坡稳定性分析的合理性。

### 3.5 经济效益分析

白音华一号露天矿内排土场该发展阶段的基底压覆面积约 17.6 万 m<sup>2</sup>,分别计算软基底整体换填和局部



换填方案所需处理费用。若该阶段基底全部换填,按弱层的赋存厚度平均为 3 m 计算,则换填量约为 52.8 万  $\text{m}^3$ ,按照处理单价 10 元/ $\text{m}^3$ (生产实际提供数据),基底整体换填方案共需处理费用约 528 万元。若采用局部换填技术,通过上述优化过程,确定换填率为 20%,考虑设备参数限定条件及弱层清除后的存放问题,类比其它露天矿工程实际及施工作业条件,选取沟底宽度为 3m,沟底间距为 12 m,计算处理量约为  $10.56 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,则局部换填方案共需处理费用约 105.6 万元,相比整体换填方案节省了 422.4 万元,经济效益显著。

#### 4 结论

(1)通过试验确定了排弃物与内排土场基底接触面抗剪力学指标,并提出了局部换填后排弃物-基底接触面的等效抗剪力学参数求解方法。

(2)根据不同换填率下边坡稳定性计算结果,建立局部换填率与稳定系数拟合函数关系,进而求解满足安全储备系数的基底换填率;以白音华一号露天矿为例,对内排土场某发展阶段软基底局部换填率进行估算,结果约为 20%;相比整体换填方案,该阶段节约处理费用约 422.4 万元,经济效益显著。

(3)通过内排土场边坡稳定性数值模拟分析,得到基底换填处理前后滑坡模式均为以圆弧为侧界面、基底弱层为底界面的组合滑动。但随着基底换填率的增大,最大位移量明显减小,边坡稳定性逐渐提高,且与二维边坡稳定性分析结果相符,证明边坡稳定性分析的合理性和准确性。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 李广贺. 内排土场支挡煤柱力学效应及其应用研究 [ D ]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021. [ LI Guanghe. Study on mechanical effect and application of supporting coal pillar in internal dump [ D ]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 张萌, 刘宏磊, 乔文光, 等. 排土场稳定性影响因素显著性研究 [ J ]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 69-75. [ ZHANG Meng, LIU Honglei, QIAO Wenguang, et al. Significant research on influencing factors of dump stability [ J ]. China Safety Science Journal, 2021, 31(2): 69-75. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] POULSEN B, KHANAL M, RAO A M, et al. Mine overburden dump failure: A case study [ J ]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(2): 297-309.
- [ 4 ] KAINTHOLA A, VERMA D, GUPTA S S, et al. A coal mine dump stability analysis: A case study [ J ]. *Geomaterials*, 2011, 1(1): 1-13.
- [ 5 ] 王家臣, 陈冲. 软弱基底排土场边坡稳定性三维反演分析 [ J ]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 474-479. [ WANG Jiachen, CHEN Chong. Three dimensional back analysis for stability of slope dumped on weak basement [ J ]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 474-479. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 王家臣, 李阳春, 徐文彬, 等. 软-陡基底排土场边坡破坏模式与机理 [ J ]. 矿业科学学报, 2021, 6(2): 139-147. [ WANG Jiachen, LI Yangchun, XU Wenbin, et al. Failure mode and mechanism of mine waste dump with a soft and steep layer base [ J ]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 139-147. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 陈冲, 张军. 倾斜基底排土场边坡变形破坏底面摩擦模型实验研究 [ J ]. 金属矿山, 2016(10): 150-154. [ CHEN Chong, ZHANG Jun. Experiment on deformation and failure features of waste-dump slope based on inclined and weak layer by the floor friction model [ J ]. Metal Mine, 2016(10): 150-154. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 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. [ ZHAO Hongze, SHAO Zhiben, DU Hairui, et al. Study on optimization of treatment methods for inclined basement of inner dump slope in anticline area of open-pit mine [ J ]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 77-84. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] NI Fulai, WEN Xin, ZHANG Xiaobin, et al. Experimental study on vacuum dynamic consolidation treatment of soft soil foundation [ J ]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 269: 012009.
- [ 10 ] 闫澍旺, 陈静, 孙立强, 等. 抛石挤淤深度的计算方法和模型试验 [ J ]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 43-48. [ YAN Shuwang, CHEN Jing, SUN Liqiang, et al. Calculation method and model test on penetration depth of squeezing soft clay (with stone) method [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 1): 43-48. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] YEE Y W, YOHANNES M M. Interactive geotechnical design in Karst and ex-mining ground in Malaysia [ J ]. *Geotechnical Research*, 2018, 5(3): 182-196.
- [ 12 ] 徐奴文, 唐春安, 唐世斌, 等. 考虑弱层置换的岩石边坡稳定性分析 [ J ]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 495-500. [ XU Nuwen, TANG Chun'an, TANG Shibin, et al. Stability analysis of rock slope considering weak-layers replacement [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup 1): 495-500. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 等. 不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性 [ J ]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(6): 74-80. [ ZHAO Danqi, FU Yukai, HOU Xiaokun, et al. Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths [ J ]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 74-80. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 周旭宽. 非饱和土与结构接触面的力学特性研究 [ D ]. 北京: 北京交通大学, 2021. [ ZHOU Xukuan. Study on mechanical properties of interface between unsaturated soil and structure [ D ]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese with English abstract) ]