



移动扫码阅读

李建华,陈 涛,杨木林.排矸方式对矸石山稳定性的研究[J].煤炭科学技术,2022,50(3):308-315.

LI Jianhua, CHEN Tao, YANG Mulin. Study on stability of gangue mountain in discharging method[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 308-315.

## 排矸方式对矸石山稳定性的研究

李建华<sup>1</sup>, 陈 涛<sup>2</sup>, 杨木林<sup>1</sup>

(1. 神华包头能源有限责任公司 李家壕煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017000; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:**为探究排矸方式对矸石山稳定性影响规律,提出有利于提高矸石山稳定性效果的矸石排弃方法。首先依据矸石来源进行分类,通过对矸石试样单轴压缩力学试验测试,分析其力学性质的特征及产生该特征的原因,进而针对李家壕矸石山建立模型,利用数值模拟软件 GeoStudio 中的 SIGMA/W 模块和 SLOPE/W 模块进行父子项分析,采用模拟软件的有限元计算方法分析矸石山内部的应力分布状态,根据应力重分布状态,结合极限平衡法对力学参数折减,得出采煤工作面矸石在不同排弃方式条件下对矸石山整体稳定性的影响规律,并对采煤工作面矸石在不同排矸方式与不同埋深两种耦合条件下,得出矸石山的稳定性变化规律,最终提出有利于矸石山稳定性的排矸方式。结果表明:矿井生产过程中根据矸石来源不同可分为采煤工作面矸石和掘进工作面矸石,这两类矸石的强度存在差异,采煤工作面矸石强度明显弱于掘进工作面矸石强度,试验表明掘进工作面矸石试样的平均单轴抗压强度是采煤工作面矸石试样的 1.6 倍;不同排矸方式下采煤工作面矸石排弃后坡顶线位置相同,且剖面上排矸面积相同条件下,平铺式、倾倒式排矸方式相比均一参数矸石山稳定性系数,分别降低了 16.4% 和 29.0%,平铺式排矸更有利于矸石山的稳定性;采煤工作面矸石采用平铺式排矸时,其埋深的变化对矸石山稳定性影响较小,深度为 0 时稳定性系数为 1.56,降低 7.9%,深度为 5 m 时稳定性系数为 1.53,降低 9.6%;而采用倾倒式排矸时,埋深的变化对矸石山稳定性影响较大,深度为 0 时稳定性系数为 1.09,降低 35.3%,深度为 5 m 时稳定性系数为 1.07,降低 36.5%,且危险滑动面常贯穿采煤工作面矸石层。

**关键词:**矸石山;应力分布;稳定性系数;排矸方式;数值模拟

**中图分类号:**TD824.7 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2022)03-0308-08

### Study on stability of gangue mountain in discharging method

LI Jianhua<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>, YANG Mulin<sup>1</sup>

(1. Lijiahao Mine, Shenhua Baotou Energy Corporation Ltd., Erdos 017000, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to explore the influence law of the discharging method on the stability of the meteorite mountain, a method of removing the meteorite that is beneficial to improve the stability of the meteorite mountain is proposed. This paper firstly classifies according to the source of meteorite. Through the experimental test of uniaxial compression mechanics of vermiculite samples, the characteristics of the mechanical properties and the reasons for the characteristics are analyzed. Then the model is established for Lijiahao coal gangue mountain, using the numerical simulation software GeoStudio. The SIGMA/W module and the SLOPE/W module are used for parent-child analysis. The finite element calculation method of the simulation software is used to analyze the stress distribution state inside the meteorite mountain. According to the stress redistribution state, the limit equilibrium method is used to reduce the mechanical parameters. The influence law of coal working face vermiculite on the overall stability of meteorite in different ways of abandonment, and the stability of meteorite in the coal mining face meteorite under different coupling modes and different buried depths Change the law, and finally propose a discharging method that is conducive to the stability of the meteorite. The results show that the mine production process can be divided into coal mining

收稿日期:2021-04-08;责任编辑:黄小雨

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2019-0960

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501103);国家自然科学基金面上资助项目(51774271,51674245)

作者简介:李建华(1966—),男,内蒙古四子王旗人,高级工程师。E-mail:778599767@qq.com

通讯作者:陈 涛(1997—),男,云南曲靖人,博士研究生。E-mail:2515150787@qq.com

face gangue and driving face gangue according to different sources. The strength of these two types of gangue is different. The strength of coal mining face gangue is obviously weaker than that of driving face gangue. It shows that the average uniaxial compressive strength of the gangue sample of the tunneling face is 1.6 times that of the gangue sample of the coal face; the position of the slope top line is the same after the gangue of the coal face is discharged under different drainage methods, and the gangue is discharged on the section under the same area conditions, compared with the uniform parameter gangue dump stability coefficient, the flat paving and dumping gangue discharge methods have reduced the stability coefficient by 16.4% and 29.0% respectively. The flat gangue discharge is more conducive to the stability of the gangue hill; When the surface gangue adopts the flat-layed gangue discharge, the change of its buried depth has little effect on the stability of the gangue hill. When the depth is 0, the stability coefficient is 1.56, which is reduced by 7.9%. When the depth is 5 m, the stability coefficient is 1.53, which is reduced by 9.6 %; When the dumping type gangue is used, the change of buried depth has a greater impact on the stability of the gangue hill. When the depth is 0 m, the stability coefficient is 1.09, which is reduced by 35.3%, and when the depth is 5 m, the stability coefficient is 1.07, which is reduced by 36.5%. And the dangerous sliding surface often runs through the gangue layer of coal mining face.

**Key words:** coal gangue mountain; stress distribution; coefficient of stability; discharging method; numerical simulation

## 0 引言

近几十年来随着我国经济的不断增长,国家对能源的需求也大幅增加,煤炭资源的开采产生了大量与煤层伴生的一种含碳量低的黑色岩石——煤矸石<sup>[1]</sup>。煤矸石由于发热量较低常被作为分选废物,其中小部分矸石用于充填开采或作为建筑材料被利用,大部分则堆积到矿井周围<sup>[2]</sup>,随着堆积量的不断增加,形成了矸石山。矸石山其受到风化、侵蚀可导致有害可溶物入渗土壤,污染环境<sup>[3]</sup>。与此同时,矸石散体粒径差异较大,从数毫米至几十厘米,级配良好,磨圆性较差<sup>[4-5]</sup>,其在自重作用下堆积形成矸石山,自然安息角 $38^{\circ}\sim 42^{\circ}$ 。因此矸石山整体为不连续介质,特殊的结构组成使其稳定性普遍较差。

李东升等<sup>[6-7]</sup>通过 Z-5000 原子分析仪对矸石物质成分及含量进行分析,对不同含水率和级配条件下矸石采用直剪试验探究其力学性质,得出了提高矸石山稳定性的可靠建议,并采用塑性极限上限分析法分析矸石山的稳定性,计算结果更为合理;GERKE 等<sup>[8]</sup>、PANTELI 等<sup>[9]</sup>通过对矸石的成分鉴定,进而对其理化性质进行了研究,探究了其对于矸石山稳定性及水分运移的影响规律;董倩等<sup>[10-11]</sup>对矸石散体的剪切强度非线性特征进行了研究,发现利用非线性强度预测矸石山破坏面更接近现场情况;刘松玉等<sup>[12]</sup>、胡炳南等<sup>[13]</sup>探究了矸石级配和压密性因素对矸石散体强度的影响规律;崔乃鑫等<sup>[14]</sup>、梁冰等<sup>[15]</sup>通过相似模拟试验再现矸石山形成过程中不同粒径矸石的自然分选规律,揭露了矸石山的内部结构,为稳定性的数值模拟研究提供了理论基础;在此基础上,还有大量学者研究了雨水的入渗规律,赵新涛等<sup>[16]</sup>分析了降雨前后矸石山含水率的变化,运用极限平衡法和数值模拟法,对矸石山坡进

行了降雨前后的稳定性对比;臧亚君等<sup>[17]</sup>考虑了基质吸力对矸石强度变形参数、屈服准则的影响。为提高矸石山的稳定性,巨能攀等<sup>[18]</sup>、臧亚君等<sup>[19]</sup>提出了矸石山支护结构及排水系统,能有效降低滑坡风险。作用下矸石山的稳定性情况,得出降雨和地震作用会不同程度的降低其稳定性,并提出了一些防治措施。周楠等<sup>[20]</sup>分析了目前我国煤矸石井下充填处理的应用现状,提出通过改变充填目的和工艺、优化充填关键装备、提高充填工作面自动化程度等,发展以处理矸石为目标的煤矸石高效自动化充填处理技术,为煤矸石的集中规模化处理提供了思路。

上述研究较为全面地分析了矸石的化学组分,矸石山内部和表面的级配状态,并且利用塑性极限法分析了矸石山的稳定性范围,以及考虑降雨、震动条件对矸石山稳定性的影响规律,但在稳定性分析过程中大都采用均一的力学参数,没有考虑不同来源矸石(力学性质的差异性较大)的排弃过程,从而导致矸石山内部存在强度差异区域。基于此,根据不同来源矸石块体的力学性质,考虑不同排矸方式下矸石山内部塑性变形区的范围及稳定性变化规律,提出有利于矸石山稳定性的排矸建议。

## 1 矸石分类及其力学试验

根据矸石来源将其分为 2 类,分别为掘进工作面矸石和采煤工作面矸石。掘进工作主要为井筒、井底车场、运输大巷和回风大巷的建设以及矿井的开拓延伸过程产生的矸石,由于这些场所服务时间长,空间断面较大,为了矿井安全生产及降低维护成本,多布置于岩层中。一般掘进工作面矸石产生于矿井开采全过程,基建期排出的矸石几乎全部为掘进矸石,生产时期随着工作面的接续及矿井的开拓

延伸也会产生大量的掘进矸石,这类矸石占矸石山矸石总排量的 60%~70%;采煤工作面矸石主要为煤层中的夹矸、少量顶底板垮落围岩及分选矸石,占矸石山矸石总排量的 15%~40%。采煤工作面矸石产生于矿井生产全过程。

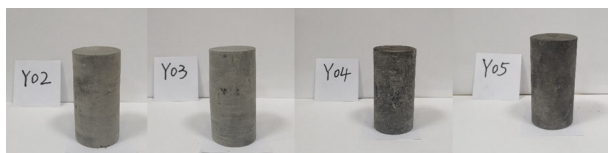
矸石单轴压缩试验选用采煤工作面矸石和掘进工作面矸石为原材料制备标准样(直径 50 mm,高度 100 mm 的国际标准圆柱试样),利用 WG-600 岩石单轴试验机进行试验,加载速率控制为 0.5 mm/min,试验机如图 1 所示。



图1 WG-600 岩石单轴试验机

Fig.1 WG-600 Rock uniaxial testing machine

试样 Y02、Y03 为采煤工作面矸石,试样 Y04、Y05 为掘进工作面矸石,试验过程中试样 Y02、Y03 破坏过程几乎无响声,破坏后试样出现贯穿裂纹,但整体较为完整;试样 Y04、Y05 试验加压期间伴随有岩石断裂响声,但试样仍能承受压力机的持续加压,试样破坏时发出巨响并出现炸裂现象,有破碎块体飞溅,破坏后试样破碎,试验后试样如图 2 所示。



(a) 试验前试样



(b) 试验后试样

图2 试样

Fig.2 Samples

通过试验结果绘制矸石单轴压缩应力应变曲线如图 3 所示,从图中可以看出试样 Y02 在应变为  $1.1 \times 10^{-2}$  时发生破坏,峰值应力为 14.3 MPa;试样 Y03 在应变为  $0.96 \times 10^{-2}$  时发生破坏,峰值应力为 18.3 MPa;试样 Y04 在应变为  $2.2 \times 10^{-2}$  时发生破坏,峰值应力为 29.0 MPa;试样 Y05 在应变为  $1.57 \times 10^{-2}$  时发生破坏,峰值应力为 29.1 MPa。

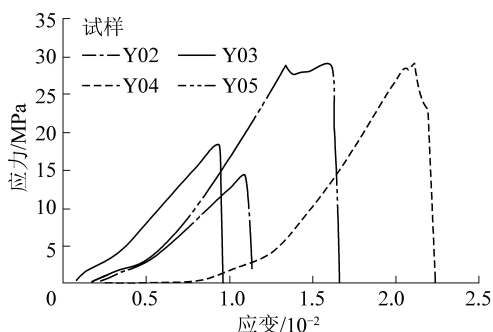


图3 单轴压缩实验应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of uniaxial compression experiment

$10^{-2}$  时发生破坏,峰值应力为 29.1 MPa。利用相同的加载速率可以得出采煤工作面矸石试样 Y02(2.2 min)、Y03(1.9 min) 试验过程较短;掘进工作面矸石试样 Y04(4.4 min)、Y05(3.1 min) 试验过程较长。掘进工作面矸石试样的平均单轴抗压强度是采煤工作面矸石试样的 1.6 倍。

## 2 矸石山稳定性计算

### 2.1 矸石强度差异分析

根据试验结果可以得出采煤工作面矸石强度明显小于掘进工作面矸石强度,产生这一现象的原因有 2 个:首先从不同来源矸石的岩性进行分析,煤炭是由植物在隔绝空气条件下经过高温高压及复杂的物理化学变化形成的,要满足隔绝空气这一特殊成煤条件,需要其周围存在致密的包裹层,一般认为是沼泽环境,这种特殊的环境使得煤层顶底板岩层、煤层中的薄层夹矸岩性一般为泥岩,而矿井中的大巷、车场及井下重要场所多设置于较为坚硬的岩层中,因此采煤工作面矸石多为泥岩,其强度小于掘进工作面矸石强度;另外从不同来源矸石的均质程度进行分析,采煤工作面矸石与煤层距离较近,矸石中存在少量煤炭成分,这种成分交错现象在沉积岩交界面处较为常见,且煤炭这种特殊的沉积岩孔隙裂隙发育,强度较弱,从而导致采煤工作面矸石不均质,夹杂有软弱的煤炭成分,取试样剖面如图 4 所示。掘进工作面矸石大多来源于单一岩层,成分均



图4 采煤工作面非均质矸石

Fig.4 Heterogeneous gangue in coal mining face



一,强度较高。

2.2 稳定性系数计算

矸石山的稳定性系数是衡量其稳定性的重要指标,一般认为矸石山为均值松散体,滑动破坏模式为

$$F_s = \frac{\sum \left\{ Cl \cos \alpha + [(W - Ul \cos \alpha) + (T_i - T_{i+1})] \frac{\tan \varphi}{\cos \alpha + \tan \varphi \sin \alpha / F_s} \right\}}{\sum W \sin \alpha} \tag{1}$$

式中: $F_s$ 为边坡稳定性系数; $C$ 为黏聚力,kPa; $l$ 为条块底部长度,m; $\alpha$ 为条块底部倾角,(°); $W$ 为条块重力,kN; $U$ 为水压力,kPa; $T_i-T_{i+1}$ 为条块垂直界面上剪切力之差,简化 Bishop 法中取 0; $\varphi$ 为内摩擦角,(°)。

对于曲折滑面滑动模式常采用余推力法,通过假设  $F_s$  迭代计算每 1 条块对其上 1 条块和下 1 条块的作用力,最终由边界滑块受力条件收敛  $F_s$  值,计算公式为:

$$D_i = W_i \sin \alpha_i - \frac{Cl_i}{F_s} - \frac{\tan \varphi}{F_s} W_i \cos \alpha_i + D_{i-1} \psi_i \tag{2}$$

$$D_0 = D_n = 0 \tag{3}$$

式中: $D_i$ 、 $D_{i-1}$ 为第  $i$  和  $i-1$  滑块净剩滑力,kN; $\alpha_i$ 为第  $i$  个滑块底部倾角,(°); $l_i$ 为第  $i$  个滑块底部长度,m; $W_i$ 为第  $i$  个滑块重力,kN; $\psi_i$ 为传递系数; $D_0$ 、 $D_n$ 为第 0 和  $n$  滑块净剩滑力,即为边界滑块。

上述理论分析中的 2 种计算方法都是将滑体分割为若干小滑块,根据每个小滑块的受力情况并考虑其相互作用结果得出的整体稳定性系数,小滑块

圆弧滑动或曲折滑面滑动模式,圆弧滑动常采用 Bishop 法,考虑条块间水平作用力,通过强度折减降低条块滑面的黏聚力和内摩擦角参数实现求解,计算公式为

的黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  参数将影响到边坡的整体稳定性,由于采煤工作面矸石强度弱于掘进工作面矸石,所以当部分被分割的小滑体由采煤工作面矸石组成时,其  $C$ 、 $\varphi$  值减小,从而导致边坡整体稳定性降低。

3 矸石种类及排矸方式对矸石山稳定性模拟分析

3.1 力学计算参数选取与模型构建

李家壕矿井位于内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区东南,含煤地层为侏罗系,可采煤层 13 层。自建矿以来,李家壕煤矿首先将矸石排弃于工业广场南侧的沟谷中,随着矿山采掘工程推进,矸石累计排弃量逐渐增大,矸石山的高度也在不断增加,其稳定性成为矿井安全生产的重点考虑环节。

针对李家壕矸石山典型剖面建立二维模型,模型内结构由钻孔数据得出,其中采煤工作面矸石和其他矸石力学参数由现场原位和大型剪切试验得出,模型内结构分布及其物理力学参数见表 1,模型如图 5 所示。

表 1 岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock formation

岩层岩性	密度 $\gamma$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E/\text{kPa}$	黏聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	泊松比 $\mu$
覆盖黄土	2 287	5 590	8.57	31.57	0.25
其他矸石	2 179	5 620	36.25	27.83	0.15
采煤工作面矸石	1 762	3 980	26.83	19.62	0.17
基底	2 287	6 010	29.75	32.29	0.25

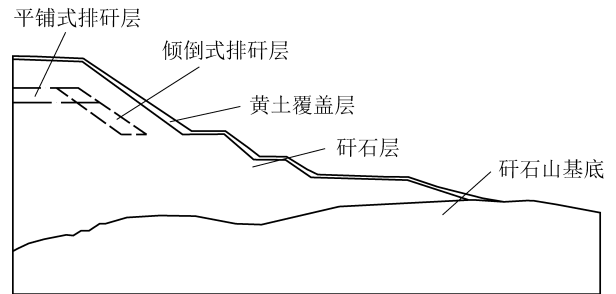


图 5 矸石山模型示意

Fig.5 Sketch of gangue mountain model

利用数值模拟软件 GeoStudio 中的 SIGMA/W

模块和 SLOPE/W 模块进行分析,先将 SIGMA/W 模块作为父项,采用有限元方法,全局单元格尺寸为 2 m,矸石排弃层单元格尺寸为 0.5 m,网格模式选用四边形和三角形网格,共形成 3 359 个网络节点和 3 295 个单元,分析矸石山应力分布状态,然后将 SLOPE/W 模块作为子项,根据主项的应力状态采用极限平衡法计算矸石山的稳定性。计算时模型底面约束竖向和法向位移,模型两侧约束法相位移。

3.2 不同排矸方式模拟分析

传统进行矸石山稳定性分析时矸石的力学参数



采用均一数值,因此其内部应力状态分布具有相似性,没有特殊的应力升高或降低区,首先采用均一参数进行数值模拟,稳定性系数为 1.699。

矸石的排弃方式有沿坡面自然倾倒式和矸石平铺式 2 种,前者矸石山以圆锥体体积不断扩大方式发展,后者以层状结构不断堆高方式发展。由于不同来源矸石力学性质差异,导致不同排矸方式会造成矸石山内部应力分布不同,从而影响其稳定性。为了使排矸方式作为单一影响因素,模拟中需保证 2 种不同排矸方式下采煤工作面矸石排弃后坡顶线位置相同,且剖面上排矸面积相同。在矸石山顶部以下 10 m 位置设置采煤工作面矸石排弃层进行应力与稳定性分析,模拟结果如图 6 所示。

图 6c 中,采煤工作面矸石采用平铺式排弃方式使矸石山内部应力分布发生微小变化,与图 6a 相比,平铺式排弃层上部应力稍有降低,这是由于采煤工作面矸石强度较小,易压缩变形,使其上部矸石覆盖层应力释放。图 6d 中稳定性系数为 1.42,降低了 16.4%,原因是黏聚力、内摩擦角在折减过程中,平

铺矸石层率先达到承载极限,继续折减时平铺矸石层周围矸石需要额外承担超过平铺矸石层极限部分的承载力,从而导致整体承载能力下降。如图 6e 中所示,采煤工作面矸石采用倾倒排弃方式使矸石山内部应力分布发生较大变化,主要表现为倾倒式矸石层顶部的应力降低以及底部坡面方向的应力升高,顶部的应力降低同样是因为倾倒式矸石层的变形让压,底部应力升高则是由于底部埋深较大,应力较高,倾倒式矸石层变形过程中周围矸石由于变形协调作用导致应力升高。这种条件下,应力升高区和倾倒式矸石层在强度折减过程中成为危险区,会率先达到其承载极限,从滑面贯穿这两个危险区域可以得到验证。倾倒式排矸条件下矸石山稳定性降低,图 6f 中稳定性系数为 1.207,降低了 29.0%。

### 3.3 不同排矸方式下不同埋深稳定性分析

上述分析得出不同排矸方式下矸石山的稳定性存在差异,在此基础上考虑到实际生产中存在不同埋深的采煤工作面矸石层,不同埋深时应力分布也

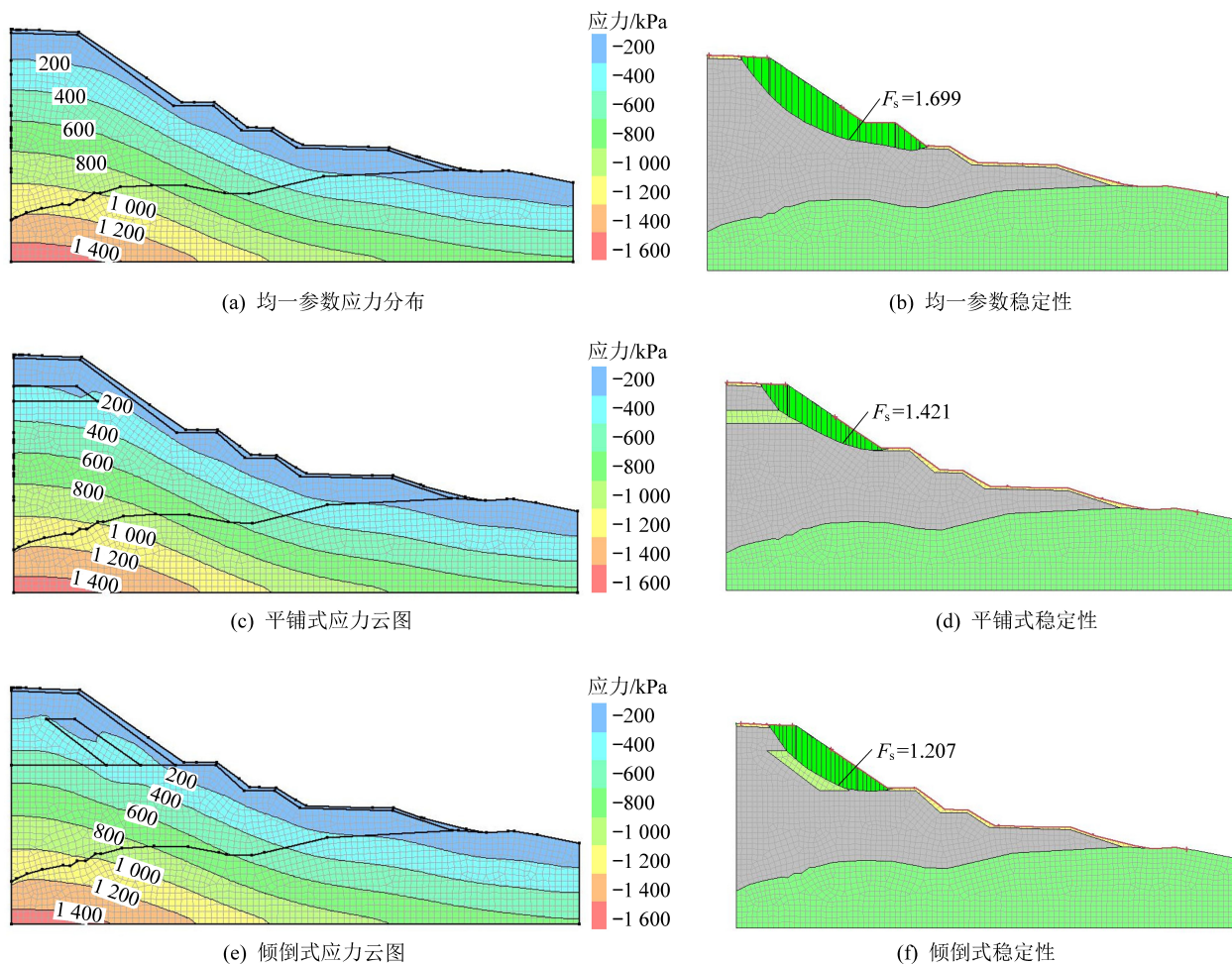


图 6 不同排矸方式下应力云图和稳定性分析

Fig.6 Stress cloud diagram and stability analysis under different gangue discharge methods

将不同,矸石山的稳定性会随之而变。因此,为了探究不同排矸方式下不同埋深稳定性变化规律,分别建立距离矸石山顶部埋深0、5 m的采煤工作面矸石层,进行应力分布和稳定性分析,如图7、图8所示。

根据数值模拟结果得出随着采煤工作面矸石层从10 m位置向上移动,其对矸石山的应力状态分布影响作用逐渐减小,因为位置越靠近矸石山表面,采煤工作面矸石层受上覆矸石压力越小,变形越小。

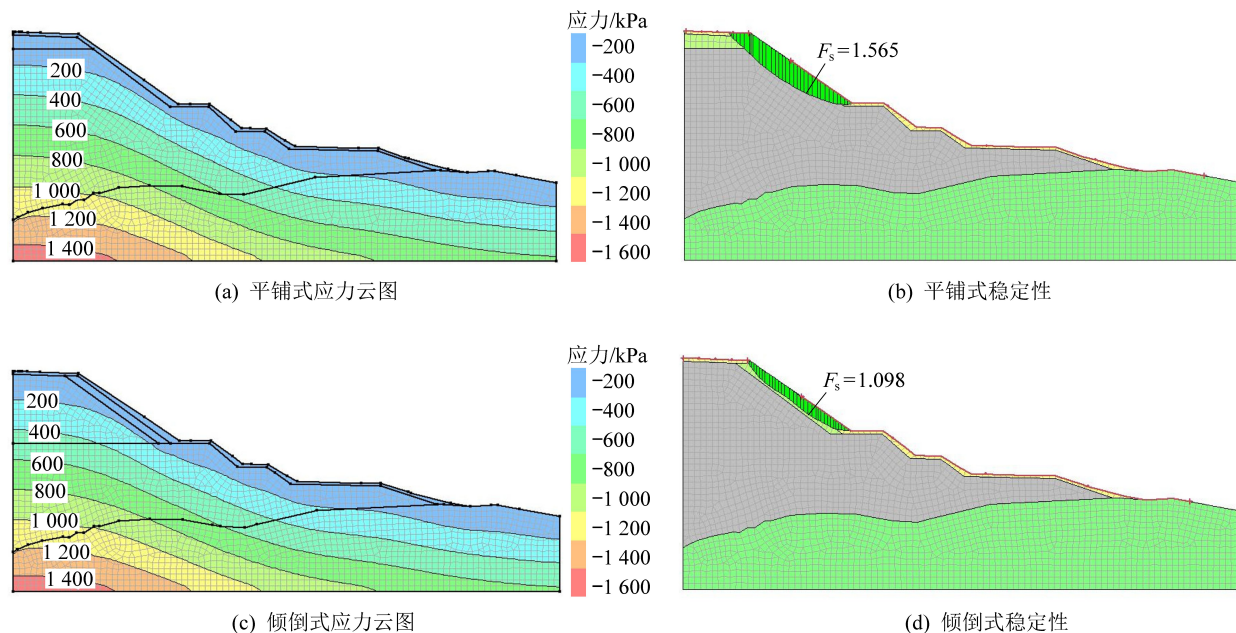


图7 深度为0不同排矸方式分析

Fig.7 Analysis of different gangue discharge methods at a depth of 0

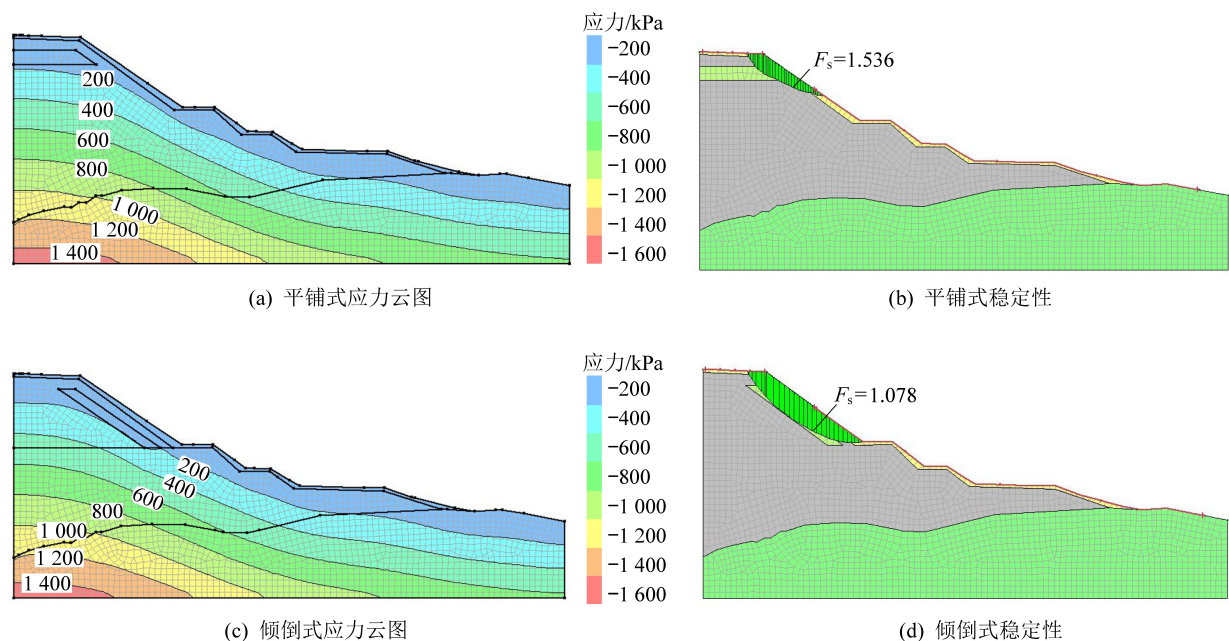


图8 深度为5 m不同排矸方式

Fig.8 Analysis of different gangue discharge methods at depth of 5 m

平铺式矸石排弃方式在埋深变化过程中,深度为0时稳定性系数为1.56,降低7.9%,深度为5 m时稳定性系数为1.53,降低9.6%,这一现象是由于利用强度折减法计算时,采煤工作面矸石层所占比例较少且有限,所以在应力分布不发生大的变化条件下埋深对矸石山稳定性影响较小。倾倒式矸石排弃方

式在埋深变化过程中,深度为0时稳定性系数为1.09,降低35.3%,深度为5 m时稳定性系数为1.07,降低36.5%,由于采煤工作面矸石层越来越靠近矸石山边坡表面,同样利用强度折减法计算时,采煤工作面矸石层所占比例不断增大,所以在滑动面就会越靠近采煤工作面矸石层,这一结论从图7d、图8d



得到验证。

## 4 结 论

1) 根据矿井生产过程中矸石来源不同可分为采煤工作面矸石和掘进工作面矸石,这2类矸石的强度存在差异,采煤工作面矸石强度明显弱于掘进工作面矸石强度,试验表明掘进工作面矸石试样的平均单轴抗压强度是采煤工作面矸石试样的1.6倍。

2) 不同排矸方式下采煤工作面矸石排弃后坡顶线位置相同,且剖面上排矸面积相同条件下,平铺式排矸方式对矸石山的应力分布影响相对较小,而倾倒式排矸方式不但使倾斜排弃的矸石周围区域应力升高,而且倾倒式矸石层在强度折减过程中成为危险区,会率先达到其承载极限。平铺式、倾倒式排矸方式相比均一参数矸石山稳定性系数,分别降低了16.4%和29.0%,平铺式排矸更有利于矸石山的稳定性。

3) 采煤工作面矸石采用平铺式排矸时,其埋深的变化对矸石山稳定性影响较小,深度为0 m时稳定性系数为1.56,降低7.9%,深度为5 m时稳定性系数为1.53,降低9.6%;而采用倾倒式排矸时,埋深的变化对矸石山稳定性影响较大,深度为0 m时稳定性系数为1.09,降低35.3%,深度为5 m时稳定性系数为1.07,降低36.5%,且危险滑动面常贯穿采煤工作面矸石层。

## 参考文献(References):

[1] 董倩. 重庆地区矸石山堆积形态及稳定性分析研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.  
DONG Qian. Accumulation form and stability analysis of waste dump in Chongqing area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

[2] 高荣久,胡振琪. 煤矿区固体废弃物—煤矸石的最佳利用途径[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2002,21(6):824-826.  
GAO Rongjiu, HU Zhenqi. Best use way of the coal gobs, solid wastes in mining area [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2002, 21(6): 824-826.

[3] 常允新,朱学顺,宋长斌,等. 煤矸石的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报,2001,12(2):39-43.  
CHANG Yunxin, ZHU Xueshun, SONG Changbin, et al. Hazard of gangue and its control [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(2): 39-43.

[4] 臧亚君,刘东燕,蒋克锋. 重庆山区矸石山降雨入渗特性及其稳定性研究[J]. 土木工程学报,2009,42(7):85-89.  
ZHAI Yajun, LIU Dongyan, JIANG Kefeng. Characteristics of rainfall infiltration and stability of gangue hills in Chongqing moun-

tainous area [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 85-89.

[5] 臧亚君. 山区矸石山降雨入渗特性及其稳定性研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.  
ZANG Yajun. A thesis submitted to Chongqing university in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of engineering [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

[6] 李东升,刘东升,贺文俊,等. 风化煤矸石抗剪强度粒径影响试验研究[J]. 工程地质学报,2016,24(3):376-383.  
LI Dongsheng, LIU Dongsheng, HE Wenjun, et al. Experimental study on the effect of particle size strength of weathering gangue [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(3): 376-383.

[7] 李东升,刘东燕,蒲清平. 矸石散体塑性滑移的稳定性评价分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(11):1334-1338.  
LI Dongsheng, LIU Dongyan, PU Qingping. Plastic slip stability analysis of gangue granular media [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1334-1338.

[8] GERKE H H, HANGEN E, SCHAAF W, et al. Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with Pinus unigrams [J]. Geoderma, 2001, 102(3): 255-274.

[9] PANTELIS G, RITCHIE A I M, STEPANYANTS Y A. A conceptual model for the description of oxidation and transport processes in sulphidic waste rock dumps [J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26(7): 751-770.

[10] 董倩,刘东燕. 矸石山稳定性非线性极限分析上限法[J]. 煤炭学报,2007,32(2):131-135.  
DONG Qian, LIU Dongyan. Nonlinear plasticity limit analysis upper bound method of gangue hill stability [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 131-135.

[11] 董倩,朱正伟,刘东燕. 矸石山稳定性非线性破坏准则数值模拟分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(2):212-217.  
DONG Qian, ZHU Zhengwei, LIU Dongyan. Stability of various height waste dumps based on nonlinear strength criterion [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(2): 212-217.

[12] 刘松玉,邱钰,童立元,等. 煤矸石的强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):199-205.  
LIU Songyu, QIU Yi, TONG Liyuan, et al. Experimental study on strength properties of coal wastes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 199-205.

[13] 胡炳南,郭爱国. 矸石充填材料压缩仿真实验研究[J]. 煤炭学报,2009,34(8):1076-1080.  
HU Bingnan, GUO Aiguo. Tesing study on coal waste back filling material compression [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1076-1080.

[14] 崔乃鑫,赵芳芳,梁冰,等. 矸石山内部粒径分布规律的实验研究[J]. 山东大学学报(工学版),2012,42(2):52-57.  
CUI Naixin, ZHAO Fangfang, LIANG Bing, et al. Experiment on internal particle size distribution law of a waste dump [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(2): 52-57.

[15] 梁冰,姜利国. 矸石山剖面颗粒分布规律的实验研究[J]. 实验力学,2010,25(6):704-711.  
LIANG Bing, JIANG Ligu. Experimental studies for the particle



- size distribution of mine spoil pile cross section [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(6): 704-711.
- [16] 赵新涛, 杜学胜. 矸石山边坡在降雨入渗作用下的稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(11): 207-210.
- ZHAO Xintao, DU Xuesheng. Stability analysis of waste dump slope under rainfall infiltration [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(11): 207-210.
- [17] 臧亚君, 刘东燕, 彭文轩, 等. 降雨入渗对重庆地区矸石山稳定性的影响[J]. 工程勘察, 2009, 37(3): 42-46.
- ZHAI Yajun, LIU Dongyan, PENG Wenxuan, *et al.* Influence of rainfall infiltration to gangue hill stability in Chongqing [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(3): 42-46.
- [18] 巨能攀, 何兴江. 煤矸石堆积体稳定性及灾害防治对策研究[J]. 地质与勘探, 2010, 46(1): 142-146.
- JU Nengpan, HE Xingjiang. Study on coal gangue stability and disaster prevention measures [J]. Geology and Prospecting, 2010, 46(1): 142-146.
- [19] 臧亚君, 刘东燕, 蒋克锋, 等. 重庆矿区矸石山滑坡成因分析[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4): 87-92.
- ZHAI Yajun, LIU Dongyan, JIANG Kefeng, *et al.* Cause analysis on coal gangue landslide in the Donglin coal mine, Chongqing [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(4): 87-92.
- [20] 周楠, 姚依南, 宋卫剑, 等. 煤矿矸石处理技术现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 140-150.
- ZHOU Nan, YAO Yinan, SONG Weijian, *et al.* Present situation and prospect of coal gangue treatment technology [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 140-150.