

## 基于 Mathews 稳定图法的充填体合理暴露面积确定

王志东

(福建马坑矿业股份有限公司,福建 龙岩 364000)

**摘要:**采用充填采矿法进行二步骤采场开采时,在两侧均为充填体,且充填体强度一定的条件下,采场结构的稳定性取决于采场侧帮暴露面积的大小。为确定不同充填体强度下的合理侧帮暴露面积,采用 Mathews 稳定图法研究二步骤开采时一步充填体合理侧帮暴露面积。通过将稳定数和形状因子绘制在稳定图上,以矿山稳定至破坏崩落过程的实例占比为回归方程的概率,分别对稳定数、形状因子、强度因子、节理方向调整参数、重力调整因子系数分析,并在  $Q$  系统分级的基础上,利用若干稳定图确定形状因子,从而估算充填体侧帮暴露面积值。针对马坑铁矿不同采场对应的不同一步充填体强度,通过 Mathews 稳定图法分析得出:1.75、2.35、2.70 MPa 等3个不同强度下二步骤采场开采时允许充填体侧向暴露面积分别为3 600、5 800、6 800  $m^2$ ,经马坑铁矿二步骤采场爆破回采,进一步验证基于 Mathews 稳定图法确定的一步充填体暴露面积的合理性。本文成果可为采用嗣后充填采矿法的矿山二步骤回采时充填体选择合理侧向暴露面积提供借鉴。

**关键词:**充填采矿法;二步骤采场开采;Mathews 稳定图法;侧帮暴露面积

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)01-0019-05

doi:10.13402/j.gcjs.2025.01.003

## Determination of reasonable exposure area of filling body based on Mathews stability diagram method

WANG Zhidong

(Fujian Makeng Mining Co., Ltd., Longyan 364000, Fujian, China)

**Abstract:** When the filling mining method is used for two-step stope mining, the stability of the stope structure depends on the exposure area of the side wall when both sides are filling bodies and the strength of the filling body is constant. In order to determine the reasonable side wall exposure area under different filling body strengths, the Mathews stability diagram method is used to study the exposure area for reasonable side wall with one-step filling body during two-step mining. By plotting the stability number and shape factor on the stability diagram, the probability of the regression equation is taken as the proportion of instances in the process from mine stability to destruction and collapse. The stability number, shape factor, strength factor, joint direction adjustment parameter, and gravity adjustment factor coefficient are analyzed respectively. Based on the  $Q$  system classification, several stability diagrams are used to determine the shape factor, thereby estimating the exposure area value of the side wall of the filling body. According to the strength of the different one-step filling body corresponding to different stopes of the Makeng iron ore, the Mathews stability diagram method is analyzed, and the allowable lateral exposure areas of the filling body are 3 600  $m^2$ , 5 800  $m^2$  and 6 800  $m^2$  respectively under the three different strengths of 1.75 MPa, 2.35 MPa and 2.70 MPa. The rationality of the exposure area of the one-step filling body determined based on the Mathews stability diagram method is further verified by the two-step stope blasting and mining of the Makeng iron ore. The results can provide referenc for the selection of reasonable lateral exposure area of the filling body

收稿日期:2024-03-23

作者简介:王志东(1987—),男,高级工程师,从事采矿设计及现场技术管理工作。

during the two-step mining of mines using the subsequent filling mining method.

**Key words:** filling mining method; two-step stope mining; Mathews stability diagram method; side wall exposure area

马坑铁矿是生产规模 500 万吨/年的特大型磁铁矿床之一, 主要采用阶段矿房嗣后充填采矿法, 分两步骤回采, 一步为矿房、二步骤为矿柱。其中回采二步骤矿柱时, 采场两侧均有充填体, 而充填体自稳性和抗爆破冲击能力关系着二步骤开采时两侧充填体的垮塌程度。因此, 在不同充填体合理强度值下, 二步骤矿柱开采时, 选择合理的充填体暴露面积, 对于矿山安全稳定高效回采具有重要意义<sup>[1]</sup>。Mathews 稳定图法在采空区稳定性分析中被广泛使用, 如: 赵永等<sup>[2]</sup>利用 Mathews 稳定图法和 FLAC<sup>3D</sup> 两种方式对试验采空区进行数值模拟, 结果显示一致; 胡高建等<sup>[3]</sup>从工程岩体地质、三维数值模拟角度对围岩稳定性进行初步评价, 应用 Mathews 稳定图法分析复杂采空区群稳定性, 发现多角度分析结果相似; 刘嘉伟等<sup>[4]</sup>采用 Mathews 稳定图法对采场顶板、上盘及侧帮稳定性分析, 确定采场最大跨度和暴露面尺寸, 并通过水银洞金矿 II 采区矿体工业试验, 进一步验证了 Mathews 稳定图法进行采场稳定性分析的可靠性。综上所述, Mathews 稳定图法也可在嗣后充填采矿法中, 结合充填体稳定性分析确定二步骤开采时充填体合理暴露面积。本文通过 Mathews 稳定图法分析确定嗣后充填采矿法中的二步骤两侧充填体合理侧向暴露面积, 以期类似矿山相关问题研究提供一点参考。

## 1 Mathews 稳定图法分析

### 1.1 Mathews 稳定图法原理

在采矿设计过程中, 人们往往凭借个人经验确定采场暴露面积, 或者根据有关设计手册中不同稳固类型岩体的允许暴露面积值进行选取。1980 年, 通过对大量工程实例的研究, 找到了一种可用于确定采场暴露面积的新方法——Mathews 稳定图法。Mathews 稳定图法是一种基于实践的岩石分类系统, 该方法基于许多学者收集的类似矿山采矿现场数据, 在空场法采矿设计中被广泛使用。此后, POTVIN 等和 STEWART 等从不同采矿深度的矿山收集大量现场实际数据进一步验证该

方法的有效性, 并对其进行了修正<sup>[5]</sup>。TRUEMAN 等<sup>[6]</sup>根据新收集的类似矿山实例资料对 Mathews 稳定图进行扩展(图 1), 使其适用于空场法中的嗣后充填采矿方法。

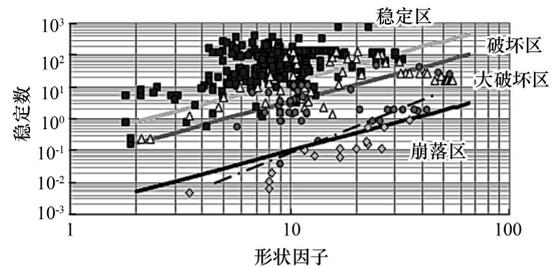


图 1 扩展的 Mathews 稳定图

### 1.2 分析过程

在扩展的 Mathews 稳定图上, 以稳定数  $N$  和形状因子  $S$  (m) 两个因子为基础绘制预测稳定区、潜在不稳定区和崩落区。稳定数反映采空区稳定能力, 形状因子反映采空区形态。稳定数计形状因子计算公式:

$$S = S_A \div L \quad (1)$$

式中:  $S_A$  为待分析采空面横截面积,  $m^2$ ;  $L$  为待分析寿壁的周长, m。

采场稳定数计算公式为

$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (2)$$

式中:  $N$  为采场稳定数;  $Q'$  为修正的  $Q$  系统分级值;  $A$  为强度因子, 为在评价的采空面边界上单轴抗压强度  $\sigma_c$  与诱生的压应力  $\sigma_1$  之比, 取值范围如表 1 所示;  $B$  为节理方向调整参数, 主要为关键不连续节理面方向与待分析面方位间的差值<sup>[7]</sup>, 确定方式如图 2 所示;  $C$  为重力调整因子, 与重力作用下的待分析采空面的破坏模式有关。

表 1 强度因子与单轴抗压强度、诱生的压应力关系

强度因子	单轴抗压强度与诱生压应力关系
$A = 0.1$	$\sigma_c / \sigma_1 < 2$
$A = 0.1125 \times (\sigma_c / \sigma_1) - 0.125$	$2 < \sigma_c / \sigma_1 < 10$
$A = 1$	$\sigma_c / \sigma_1 > 10$

MAWDESLEY 采用 Mathews 方法对收集到的 483 组矿山实例资料进行统计分析, 预测矿山稳定

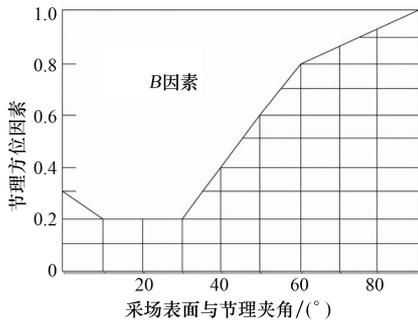
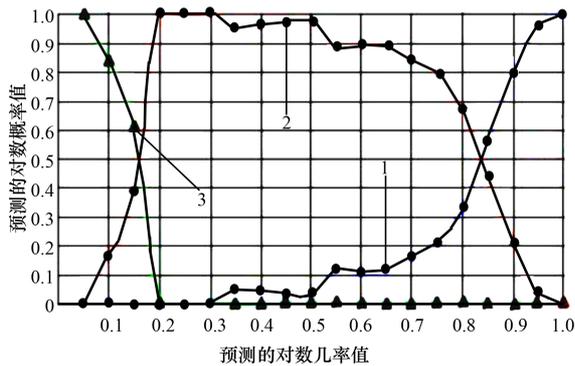


图 2 节理方向调整参数图解

性、破坏程度和崩落的概率。采用以稳定、破坏与大破坏、崩落的矿山实例所占的百分数为回归方程概率的对数回归方法，分别对  $S$ 、 $N$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  系数进行因子分析，结果如图 3 所示。由图 3 可知：以  $S$ 、 $N$  指标所建概率密度函数模型与实例概率的结果基本符合。



1—稳定；2—破坏与大破坏；3—连续崩落。

图 3 概率密度函数

因此，采用  $S$ 、 $N$  的模型进行概率预测，其表达式为

$$z = 2.9603 - 1.4427 \ln S + 0.7928 \ln N \quad (3)$$

$$p = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4)$$

式中： $z$  为预测的对数几率值； $p$  为预测的对数概率值； $S$  为水力半径， $m$ ； $N$  为稳定数。

对于嗣后充填法中二步骤开采，可以利用式 (3)、(4) 或图 2 得到其相应的稳定性、破坏程度、崩落的概率值。

## 2 充填体合理暴露面积估算

马坑铁矿采用尾砂胶结充填。由于尾砂中的杂质较多，所采用的胶凝剂不同，最终充填形成的充填体强度及力学性能亦有差别<sup>[8-9]</sup>。马坑铁矿经研究分析并通过工业试验验证，确定 3 种不同的矿房高度所推荐相应的充填体 28 d 龄期强度值分别为  $R_{28} \geq 1.75 \text{ MPa}$  (矿房高度为 36 m)； $R_{28} \geq 2.35 \text{ MPa}$  (矿房高度为 60 m)； $R_{28} \geq 2.70 \text{ MPa}$  (矿房高度为 72 m)。在二步骤间柱回采中，侧向暴露面积的大小对采场两侧充填体稳定性至关重要，故需通过 Mathews 稳定图法并结合充填体的  $Q$  值修正，确定不同充填体强度对应合理允许充填体侧帮暴露面积<sup>[10-11]</sup>。

### 2.1 $Q$ 值修正

$Q$  系统分类法是一种涉及岩体质量指标、节理发育、裂隙水及地应力影响的岩石质量评定方法。其表达式如下。

$$Q = \frac{X_{\text{RQD}}}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{X_{\text{SRF}}} \quad (5)$$

式中： $X_{\text{RQD}}$  为岩石质量指标，以钻孔取芯的完整情况表示； $J_n$  为节理组数系数，与节理面组数及洞室复杂程度相关； $J_r$  为节理面粗糙度系数，与节理面的连续性、规则性、光滑情况、错动情况等相关； $J_a$  为节理面蚀变程度(变异)系数，与节理面的变质情况、充填物等相关； $J_w$  为裂隙水影响折减系数，与水压力和流量相关； $X_{\text{SRF}}$  为地应力影响折减系数。

按照  $Q$  系统分级法对充填体质量评定中的  $Q$  值进行修正，结果如表 2 所示，其中  $Q'$  为修正后的  $Q$  值； $X_{\text{RQD}}$  值采用类比方式确定。

### 2.2 参数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 值确定

(1)  $A$  值。在缺少试验条件下，可通过有限单元法数值模拟计算单轴抗压强度与诱生的压应力比值。通过有限单元法数值模拟计算出马坑

表 2 修正值计算结果

充填体强度/MPa	$X_{\text{RQD}}/\%$	$J_n$	$J_r$	$J_a$	$J_w$	$X_{\text{SRF}}$	$Q'$ 值
1.75	50	3	1.0	4	1.0	1.0	4.17
2.35	65	3	1.0	4	1.0	1.0	5.42
2.70	75	3	1.0	3	1.0	1.0	8.33

铁矿比值大于 10, 故强度因子  $A$  取 1.0。

(2)  $B$  值。尾砂胶结充填需要分层分次进行, 其充填体节理主要为水平, 与采场表面夹角  $90^\circ$ 。根据图 2,  $B$  取 1.0。

(3)  $C$  值。对于充填体, 重力调整因子  $C$  为 8.0。

### 2.3 稳定数 $N$ 计算

按照式(2)计算充填体稳定数  $N$ , 结果如表 3 所示。

表 3 稳定数  $N$  计算结果

充填体强度/MPa	$Q'$ 值	$A$	$B$	$C$	$N$	备注
1.75	4.17	1.0	1.0	8.0	33.36	侧帮
2.35	5.42	1.0	1.0	8.0	43.36	侧帮
2.70	8.33	1.0	1.0	8.0	66.64	侧帮

### 2.4 形状因子 $S$ 确定

参照图 1, 根据稳定数确定各类充填体的形状因子, 结果如表 4 所示。

表 4 各类充填体的形状因子参数

充填体强度/MPa	形状因子/ $m$	备注
1.75	14.8	侧帮
2.35	19.4	侧帮
2.70	27.9	侧帮

### 2.5 充填体暴露面积估算

根据形状因子的数值, 按照采场长度为 90 m、矿房宽度为 15 m 计算不同强度充填体的侧帮暴露面积, 结果如表 5 所示。

表 5 Mathews 稳定图法估算的充填体侧帮暴露面积

充填体强度/MPa	暴露面积/ $m^2$	备注
1.75	3 958	侧帮
2.35	6 126	侧帮
2.70	7 280	侧帮

参照国内外类似工程, 并考虑安全系数, 确定马坑铁矿不同强度的充填体相对应的侧帮暴露面积值, 推荐值如表 6 所示。

表 6 充填体侧帮暴露面积推荐值

充填体强度/MPa	暴露面积/ $m^2$	备注
1.75	3 600	侧帮
2.35	5 800	侧帮
2.70	6 800	侧帮

## 3 工业试验

### 3.1 工程概况

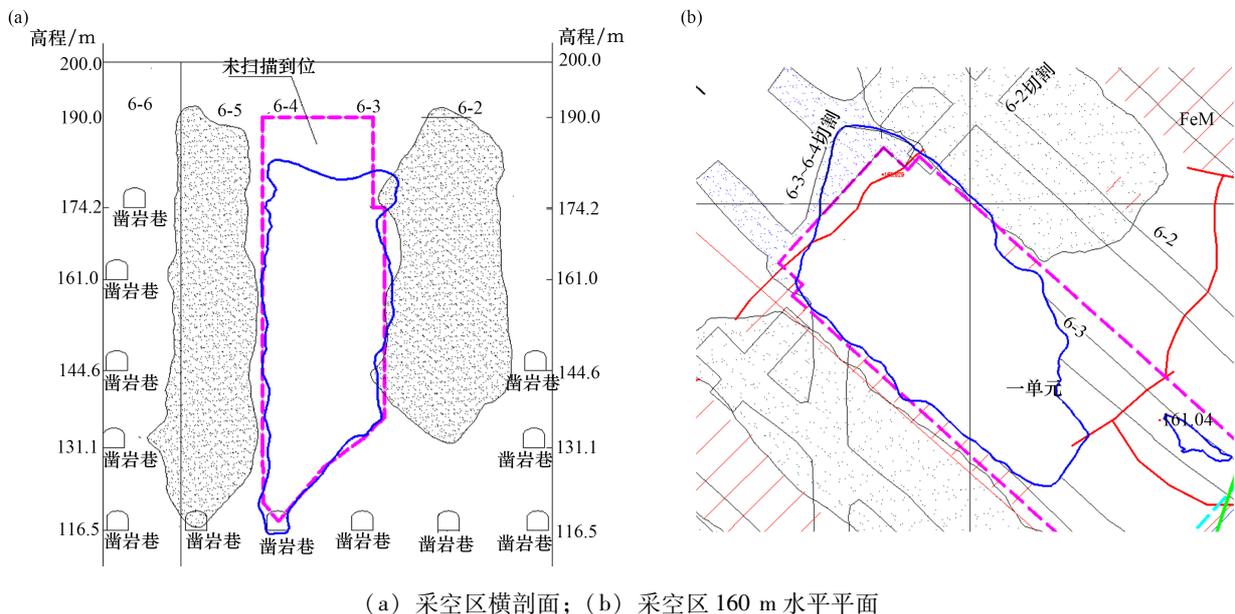
马坑铁矿回采的二步骤采场主要集中在 100 m 阶段以上, 采用分段凿岩阶段矿房嗣后充填法。以中区 100 m 阶段以上二步骤间柱 6-3-4P 采场为工业试验地点, 以上述研究成果为基础进行工业试验<sup>[12]</sup>。试验采场采用隔一采一的回采形式, 分段高度为 15 m, 共布设 5 个分段, 分别为 115 m 分段、130 m 分段、145 m 分段、160 m 分段、175 m 分段。工业试验地点 6-3-4P 采场设计回采标高为 116.5 ~ 190.0 m, 回采高度为 73.5 m。对采场两侧原一步骤 6-2R 及 6-5R 采空区中充填体取芯做单轴抗压强度试验。试验平均强度分别为 2.73、2.81 MPa, 侧向暴露面积为 3 647  $m^2$ 。

### 3.2 凿岩爆破方案

二步骤间柱 6-3-4P 采场采用钻头直径为 76 mm 的采矿台车进行凿岩, 实际炮孔直径可达 80 mm, 最小抵抗线按经验公式取 25 倍炮孔直径 (即 2 m)。凿岩方案采用小排距大孔底距的中深孔布孔方式, 中深孔排间距与最小抵抗线一致, 取 2 m, 孔邻近系数选择 1.4 以内, 即布置中深孔孔底距不大于 2.8 m。为避免爆破对充填体稳定性的影响, 中深孔爆破边界需与充填体保持一定距离, 以作为充填体护壁。护壁的留设原则为当中深孔爆破时, 充填体护壁刚好被碎裂而自行垮落。按此原则, 充填体护壁厚度为 1 ~ 2 m, 不大于中深孔爆破最小抵抗线。考虑到钻孔偏斜率等问题, 最终确定护壁厚度为最小抵抗线的 75%, 即护壁厚度约为 1.5 m。爆破采用乳化粒状铵油炸药, 且为进一步降低爆破对充填体的破坏, 采用逐孔逐段起爆, 控制爆破最大单响不大于 250 kg<sup>[13]</sup>。

### 3.3 试验结果

在 6-3-4P 试验采场回采结束后, 采用三维扫描仪扫描、Dimine 三维软件建模, 并采用 Dimine 三维软件将二步骤采场回采模型与两侧一步骤充填体模型进行布尔运算, 计算充填体垮塌量。充填体最大垮塌宽度为 1.4 m, 充填体总体垮塌体积占采场回采体积 1.17%, 二步骤回采结束后, 采场两侧一步骤充填体帮壁整体稳定。



(a) 采空区横剖面; (b) 采空区 160 m 水平平面

图 4 二步骤开采两侧充填体形态

### 3.4 充填体稳定性保障措施

在实际生产过程中,为保障不同强度的充填体相对应的侧帮暴露面积值,还需通过关键保障措施确保二步骤两帮充填体的稳定性<sup>[14]</sup>。

(1) 充填强度的稳定。在马坑铁矿阶段矿房嗣后充填法中,采用全尾砂膏体大流量自流充填。马坑铁矿全尾砂 < 20 μm 粒级质量分数为 32.11%, 平均粒径为 69.363 μm, 若作为胶结充填料,其级配不稳定,且含有过多影响尾砂酸碱有害成分,将影响充填体强度。因此必须保障全级配的稳定,同时定期检测尾砂浓度及酸碱度。当制备输送的充填料浆浓度低或浓度不稳定,在充入采场空区进行脱水时,充填过程会出现充填料浆离析严重、充填体凝固慢且整体性差、溢流水污染井下巷道、充填成本高等问题。所以必须尽量提高充填料浆浓度并保持其稳定,使充填料浆充入采场空区后不脱水、不离析。

(2) 采场爆破的影响。爆破危害主要体现在爆破冲击波及爆破振动波对充填体的损伤。需通过预留足够充填体护壁、降低最大单响炸药量及一次爆破量、不耦合间隔装药等爆破控制技术来保障二步骤两帮充填体稳定性: 1) 充填体护壁: 根据马坑铁矿二步骤采场上向扇形中深孔爆破经验,护壁预留厚度为 1~2 m, 一般按 1.5 m 留设, 主要与线装药密度及炮孔直径相关; 2) 炸药量: 通

过逐孔逐段起爆的方式将最大单响炸药量控制在 250 kg 内, 并采用留矿挤压爆破技术增大爆破破碎效果, 将一次爆破装药量控制在 3 t 内。具体最大单响炸药量及一次爆破量需通过爆破对充填体损伤试验确定。

## 4 结 语

Mathews 稳定图法是基于大量矿山实例建立起来的分析研究方法, 并结合  $Q$  系统分级法进一步修正。根据该方法研究确定的充填体合理暴露面积, 经工业试验验证, 在推荐的充填体强度及对应的充填体合理暴露面积下, 进行二步骤间柱回采以及两侧原一步骤充保证充填体整体稳定。但此次工业试验还有问题需要改进解决。

(1) 充填体具有较强的抗压能力, 但抗剪能力较差, 对于一步骤垮塌造成的充填体“大肚子”问题, 在二步骤回采时将会垮落至充填体接近直立形态。为减少二步骤回采时充填体混入率, 需加强一步骤采场凿岩爆破管理, 降低一步骤采场垮塌量。

(2) 在二步骤间柱 6-3-4P 采场回采试验中, 160 m 水平以下充填体垮塌较少, 高于 160 m 水平以上(即充填体高度为 43.5 m)开始出现不同程度的垮塌; 二步骤间柱回采时, 两侧充填体稳

(下转第 56 页)

## 5 结 论

(1) 采用“抗放兼施”的设计原则,控制混凝土裂缝问题。地下室外墙水平分布钢筋宜置于竖向钢筋外侧。

(2) 优选混凝土原材料,用粉煤灰、矿渣替代部分水泥,配制出可降低水化热且满足抗裂要求的混凝土。

(3) 计算出采用跳仓法施工基础底板一次浇筑结构最大长度为 45.18 m,现场实际长度为 52.2 m。通过现场温度实测及采取养护措施,验算出混凝土满足防裂要求。

(4) 夏季底板混凝土中部温升最高,下部次之,上部温升最小。新浇筑混凝土约 2 d 达到温度峰值,随后缓慢降低。前期应做好洒水降温、覆膜保湿措施,夜间气温较低宜适当覆盖,减小混凝土里表温差。

### 参考文献:

[1] 江昔平,王社良,段述信,等. 超大体积混凝土温度裂

(上接第 23 页)

定性 with 充填体高度也有一定关系,需进一步研究充填体不同强度与回采高度的关系,提高二步骤回采安全保障性。

### 参考文献:

- [1] 王志东. 充填体稳定条件下的爆破控制技术研究试验与应用[J]. 福建冶金,2023,52(2):17-20.
- [2] 赵永,杨天鸿,王薪荣,等. 基于 Mathews 稳定图法的采空区稳定性评价[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(1):74-78.
- [3] 胡高建,杨天鸿,胡忠强,等. 基于 Mathews 稳定图等方法的多角度采空区群稳定性分析评价[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(2):348-354.
- [4] 刘嘉伟,黄明清,谭伟. 基于拓展的 Mathews 稳定图法的采场结构参数优化[J]. 有色金属工程,2023,13(1):106-113.
- [5] 肖军. Mathews 稳定图法在确定矿山采场暴露面积中的应用[J]. 新疆有色金属,2013,36(2):19-20.
- [6] TRUEMAN R, MIKULA P, MAWDESLEY C, et al.

缝产生机理分析与抗裂控制新对策[J]. 混凝土,2007(12):98-102.

- [2] 李浩然,尹志刚. 跳仓法在超长结构筏板基础中的应用[J]. 工程建设,2022,54(6):60-65.
- [3] 张喜平,刘仲洋,王山,等. 跳仓法施工中超长大体积混凝土配合比优化设计研究[J]. 建筑结构,2021,51(增刊2):1017-1019.
- [4] 石创业,余杰,元庆. 超长结构施工的温度与应力监测技术研究[J]. 工程建设,2023,55(7):48-52.
- [5] 王铁梦. 工程结构裂缝控制:“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [6] 周筭,李国胜,王雪生,等. 超长大体积混凝土跳仓法工程设计中的关键问题[J]. 建筑结构,2019,49(18):120-125;130.
- [7] 超长大体积混凝土结构跳仓法技术规程:T/CECS 640—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [8] 超长混凝土结构无缝施工标准:JGJ/T 492—2023[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2023.

Experience in Australia with the Mathews method for open stope design[J]. CIM Bulletin,2000,93(2):162-167.

- [7] 姚鸿基. 基于 Mathews 稳定图法的巷道安全跨度计算与应用[J]. 煤炭科技,2020,41(4):129-131.
- [8] 文兴,赵亮,黄敏. 阿舍勒铜矿二步骤采场回采充填体稳定性分析[J]. 矿冶,2021,30(4):1-6;19.
- [9] 王南南. 结合多种方法研究张庄铁矿高阶段采场合理暴露面积[J]. 中国金属通报,2019(9):201-202.
- [10] 刘泽洲,王杰. 某矿采场结构参数设计及顶板稳定性判别[J]. 湖南有色金属,2017,33(1):4-7.
- [11] 尹士兵,张鸣鲁. 基于 Mathews 稳定图法的采场暴露面积确定[J]. 现代矿业,2015,31(6):8-10;14.
- [12] 房智恒. 阶段空场嗣后充填胶结充填体力学强度模型研究[J]. 工程建设,2019,51(12):39-47.
- [13] 陈敬刚,李爱兵. 某采空区的稳定性分析论证研究[J]. 采矿技术,2009,9(3):37-39;46.
- [14] R. 特鲁曼,C. 莫德利,N. 哈里斯,等. 应用 Mathews 方法进行空场采场设计的经验[J]. 国外金属矿山,2002(1):24-30;66.