

某石灰石矿隔离矿柱厚度的确定

邹平¹, 李爱兵^{1,2}, 刘正宇¹, 尹彦波¹

(1.长沙矿山研究院, 长沙 410012; 2.武汉理工大学, 武汉 430070)

摘要: 根据对某石灰石矿的现场工程地质调查、评价以及室内岩石力学实验等, 确立了该矿的岩体力学参数。采用三种理论方法以及数值模拟技术对该矿的隔离矿柱厚度、目前采空区及下步采场的稳定性进行了分析, 得出该石灰石矿采空区下开采的结构参数为矿房 15 m, 房间柱 12 m 时, 维持该矿上下分层稳定的隔离矿柱厚度应在 12 m 以上。

关键词: 石灰石矿; 隔离矿柱; 理论方法; 数值模拟

中图分类号: TD876⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4172(2011)02-000-00

Determination of thickness of insulating pillar in a limestone mine

ZOU Ping¹, LI Aibing^{1,2}, LIU Zhengyu¹, YIN Yanbo¹

(1.Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, Hunan, China; 2.Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: According to the engineering geology survey and evaluation of the area of a limestone mine and indoor rock mechanics tests, the rock mass mechanics parameters were obtained in this paper. The thickness of insulating pillar and the stability of the goaf at present are analyzed using three theory methods and numerical simulation. The result showed that when the chamber width was 15 m and the pillar was 12 m, the thickness of the insulating pillar should be more than 12 m.

Key words: limestone mine; insulating pillar; theory method; numerical simulation

引言

某石灰石矿位于湖南省境内, 建于 1985 年, 为湖南省第一家私营采石场。先为露天开采, 1996 年露天闭坑, 后转为井下开采, 采矿方法为浅孔留矿法, 采矿的生产能力为 500 t/d。目前该石灰石矿距离地表较浅的第一层石灰石矿已接近开采完毕。由于矿山多年的不规范开采, 形成了大量连通的采空区, 体积约 41 万 m³, 高度高达 30 多 m。

该矿现计划在采空区下开采下一个分层, 因而要关注到上下采空区间的合理间距问题, 即采空区顶板隔离矿柱的安全稳定性问题。如果隔离矿柱留得过薄, 易造成采场的突然塌陷, 危及人员和设备的安全; 如果隔离矿柱留得过厚, 则会造成矿产资源的损失。因此, 确定合理的隔离矿柱厚度具有很强的现实意义。

1 矿山基本概况

1.1 矿产地质特征

该石灰石矿床属上古生代泥盆系滨、浅海相碳酸盐沉积型矿床。

矿体赋存于泥盆系中统梓桥组灰岩中, 矿体为灰白色、浅灰色厚—巨厚层状灰岩, 以单斜层状产出, 矿体走向为 30°~65°, 倾向 200°~335°, 倾角 45°~60°, 平均 50°, 产状变化不大。

矿层连续性较好, 出露最高标高 65 m 左右, 矿区范围内矿体长近 200 m, 宽 200 m, 控制矿体的最大厚度大于 100 m。

矿区范围内除采坑外矿体基本未裸露, 广泛被第四系覆盖, 第四系厚 5.4~19.3 m, 平

均为 10 m。矿区未见断层。

1.2 水文地质特征

矿区水文地质条件为中等类型。矿区属剥蚀丘陵地形，周边海拔标高为 65.5~180.0 m，相对高差 114.5 m，地形坡角 15°~20°，侵蚀基准面标高约为 50.0 m。矿体圈定范围内，最低高程为采坑深处约 28 m 标高。采区及附近地表水系不发育，地表水系主要有若干水塘。

1.3 矿山开采现状

该石灰石矿 1996 年前为露天开采，目前在采区范围内形成一个约 100 多 m² 的露天采矿场，其坑口标高约+78 m，坑底标高约+28 m，露天采场边坡角约 85°。

1996 年后，该矿在露天采矿场边上进行地下开采，择取斜坡道开拓方式，采用无轨汽车运输方式运输矿石，+40 m 水平为回风中段，矿界东翼有一回风井贯通地表兼作全矿的安全出口，采矿方法为浅孔留矿法，开采极不规范。

目前井下留存了 11 个矿柱支撑采空区，矿柱形状极不规则，大小各不相同。采空区的高度在 22~39 m 之间，跨度在 12~22 m 之间，体积约 41 万 m³，顶板距离地表约 32~65 m，底板标高大致为+28 m。

目前第一分层矿石已基本采完，正准备在采空区下进行下一分层的开采。

2 岩体力学参数的确定

为了进行隔离矿柱厚度的计算，首先需要确定用于计算的岩体力学参数。本次确定该石灰石矿的岩体力学参数所开展的工作为：1) 现场节理面产状、特征调查统计，优势产状分析及试验岩块的取样；2) 室内岩石力学参数试验，包括实验岩样的制备，抗拉强度、抗压强度、弹性模量、泊松比等多种岩石力学参数试验；3) 采用节理岩体的 CSIR 分级法、Q 系统分级法、GSI 分级法等多种方法对岩体进行了工程地质质量评价；4) 采用专业软件计算并考虑多种因素综合确定了该石灰石矿的岩体力学参数，其结果如表 1 所示。

表 1 岩土体力学参数值

Table 1 The mechanics parameters of rock masses and soil

序号	岩性	容重 /(g/cm ³)	内聚力 C/MPa	内摩擦角 φ /°	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	单轴抗拉强度 /MPa	单轴抗压强度 /MPa
1	灰岩	2.7	3.233	29.49	10 829.36	0.2	1.2	11.086
2	泥质砂岩	2.58	2.93	28	9000	0.25	0.8	9.448
3	第四系	1.8	0.2	27	200	0.3	0	1.0

3 用理论方法来确定隔离矿柱厚度

目前用于计算隔离矿柱厚度的理论方法主要有以下几种^[1-4]：1) 顶板厚跨比法；2) 普氏拱理论；3) 空场长宽比法；4) K.B.鲁别涅依他等人的公式；5) B.И.波哥留波夫的公式；6) 结构力学梁理论；7) 松散系数理论；8) 经验类比法。

本文采用顶板厚跨比法、普氏拱理论以及结构力学梁理论三种理论方法来确定该石灰石矿的隔离矿柱厚度。

3.1 顶板厚跨比法

该法常用于稳固围岩，在节理裂隙不太发育，无较大断层通过的情况下适用。根据近似的水平投影跨度 L 和顶部最薄处厚度 h ，求出厚跨比 h/L ，作为安全厚度评价依据。一般遵循 $h \geq L/2$ 即可，其中 h 为安全作业厚度， L 为空区跨度。

该石灰石矿的采空区跨度，据调查从 6 m 到 20 m 不等，分别对隔离矿柱厚度进行计算。

根据现场实测的作业场所下部的采空区跨度，即可方便求得顶板的安全作业厚度 h 。顶板厚跨比法的顶板安全厚度与跨度的关系图见图 1 (a)。

3.2 普氏拱理论

根据普氏地压理论，巷道或采区开采后，其顶板将形成抛物线型的三拱带。在坚硬岩石中，其顶部承受垂直压力，侧帮无受压，形成自然拱；在比较松软的地层中，其顶部及侧帮均有受压现象，形成压力拱；在松软性的地层中，采空区侧壁崩落后的滑动面与水平的交角等于松软岩石的内摩擦角，形成破碎拱。该方法未考虑到开采范围的影响。各种拱圈的高度计算式如下：

$$\text{自然拱拱高: } H_z = \frac{B}{f} \quad (1)$$

$$\text{压力拱拱高: } H_y = \frac{B + h \cdot \tan(45 - \phi/2)}{f} \quad (2)$$

$$\text{破碎拱拱高: } H_p = \frac{B + h \cdot \tan(90 - \phi)}{f} \quad (3)$$

式中： B 为空场宽（跨）度之半，m； f 为岩石的似硬度系数， $f = \tan \phi$ ； ϕ 为岩石的内摩擦角，度； h 为空场最大高度，m。

该石灰石矿顶板灰岩的似硬度系数 $f = \tan 62.22^\circ$ ，按自然拱的计算公式（1）计算该石灰石矿的拱高，在各种顶板跨度下形成的拱圈高度即安全厚度见图 1 (b) 所示。

3.3 结构力学梁理论

采空区顶板岩体可视为一个两端固定的平板梁结构，上部岩体自重及其附加荷载作为上覆岩层载荷，按照梁板受弯考虑，以岩层的抗弯抗拉强度作为控制指标，根据材料力学与结构力学的公式，推导出采空区顶板的安全厚度：

$$h = 0.25l_n \frac{\gamma l_n + \sqrt{(\gamma l_n)^2 + 8bq\sigma_t}}{\sigma_t b} \quad (4)$$

式中： σ_t 为岩体允许拉应力，MPa； γ 为顶板矿岩容重， $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ； l_n 为顶板跨度，m； b 为顶板单位计算宽度，取 1m； q 为采空区上部作业附加荷载，kPa。

按梁理论，计算的隔离矿柱厚度的大小如图 1 (c) 所示。

对上述三种计算方法得到的结果经求和归一法数据处理后，得到的不同跨度下隔离矿柱安全厚度 H_{an} 项式数值逼近，如图 1 (d) 所示，其隔离矿柱安全厚度与跨度 L 的关系为：

$$H_{an} = 7.1295 \times 10^{-6} \times L^3 + 0.0034584 \times L^2 + 0.34583 \times L + 0.0081537 \quad (5)$$

需说明的是：当用式（5）计算安全厚度时，未考虑到无序开采时已进行了的多次爆破后的开采扰动范围，若考虑到爆破的扰动范围，为安全起见，则在上式计算的安全厚度基础上应再加上至少 2~4 m。

对该石灰石矿隔离矿柱厚度按式（5）进行计算，有无考虑爆破扰动范围的两种计算结果如表 2 所示。由表 2 可知：为确保安全开采，考虑爆破扰动范围后，若采空区跨度控制在 12~18 m 之间时，则隔离矿柱厚度应不小于 12 m。

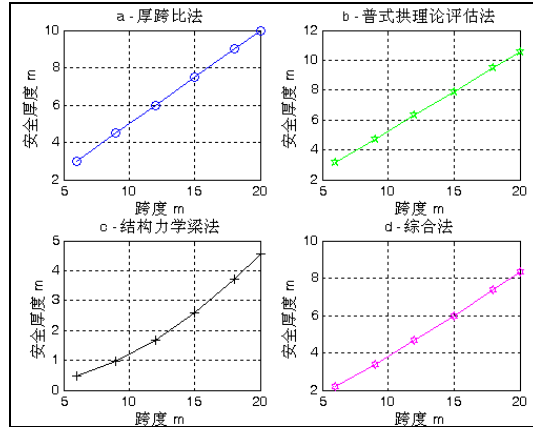


图 1 各计算方法下空区跨度与隔离矿柱安全厚度间的关系

Fig.1 The relationship between goaf span and insulating pillar thickness under different calculation methods

表 2 某石灰石矿隔离矿柱厚度表

Table 2 The thickness of insulating pillar in the limestone mine

空区跨度/m	理论计算/m	考虑爆破扰动/m
6	2.209	6.209
9	3.406	7.406
12	4.669	8.669
15	5.998	9.998
18	7.395	11.395
20	8.365	12.365

4 用数值模拟技术来确定隔离矿柱厚度

随着计算机技术的飞速发展,数值模拟技术的应用也越来越广泛。数值模拟技术在隔离矿柱厚度的确定中也表现出很大的优势^[5-6],可以考虑多种影响因素,结果可靠。本文采用有限元方法来确定该石灰石矿的隔离矿柱厚度,选取有代表性的剖面建立平面有限元模型,进行平面应变分析。

4.1 建立模型

本次建立的模型中隔离矿柱上面的空区尺寸按实际调查的结果布置;隔离矿柱下面的采场按照设计推荐的矿房宽度为15 m,房间柱宽度为12 m布置,共模拟6个采场。为方便起见,将隔离矿柱上面的空区按照模型中从左至右的顺序依次表示为上1~上4,隔离矿柱上面的空区为下1~下6。

为了得到合适的隔离矿柱厚度,分别建立6 m、8 m、10 m、12 m厚度的隔离矿柱的M1、M2、M3、M4四个有限元模型。分三个步骤模拟:1) 计算在自重应力场作用下的初始原岩应力场;2) 形成原有的第一分层的四个空区;3) 开采设计的下一分层的6个矿房。

M1~M4模型的计算范围为横向上0~382 m,纵向上-100 m至地表。模型的边界条件为:在横向上边界面上所有节点在X方向固定,即滑动铰支座;纵向上底部边界平面上所有节点在X、Y方向上固定,即固定铰支座;地表为自由面。模型采用四边形网格,四个模型所划分单元均分别为5068、5076、5097、4261,网格节点数分别为4962、4973、4993、4326。

模型中采用摩尔-库伦屈服准则,规定主应力以拉为正、压为负。

4.2 第一、二步骤结果分析

M1~M4模型第一、二步骤的结果相同。

第一步骤模拟初始原岩应力场,在开采区域矿岩内的最大主应力(P_1)和最小主应力(P_2)等值线表示岩体内的应力大小随深度的增加而增大,呈水平状,且由于受岩性分布的影响,主应力的大小与方向在从一种岩性过渡到另一种岩性时均发生一定的变化。

第二步模拟原有空区的形成过程，模拟结果为：空区周围围岩处产生了应力的重分布，在顶底板上产生了应力松弛，出现了拉应力，最大值为 0.55 MPa（位置为上 1 的顶板处），没有达到灰岩的抗拉强度极限值（1.2 MPa），故不会引起大面积的顶板破坏；角点处存在应力集中区，集中程度约为 2~3 倍；位移变化趋势为整体位移向采空区移动，顶板向下沉降，最大值为 1.93 mm，底板向上少量的底鼓，最大值为 4.58 mm，值均不大；基本上没有出现塑性区。

上述结果表明：目前采空区的稳定性较好，不会有大面积的、灾害性的地压问题发生。

4.2 第三步骤结果分析

第三步骤模拟下一分层矿房的开挖，看各尺寸下的隔离矿柱是否满足下一分层开采的稳定性要求，从而确定最小的隔离矿柱厚度。M1~M4 模型第三步骤的最大、最小主应力，最大下沉位移计算结果如表 3 所示。

表 3 M1~M4 模型第三步骤计算结果
Table 3 The calculation results of step3 about model M1~M4

模型	最大主应力 /MPa	最小主应力 /MPa	最大沉降量 /mm
M1	0.592	-6.486	4.380
M2	0.593	-6.339	4.310
M3	0.591	-6.111	4.282
M4	0.591	-6.890	4.530

1) 应力

从表 3 可以看出，M1~M4 模型的应力值相差不大，产生的拉应力值均没有达到灰岩的抗拉强度极限值。限于篇幅，仅给出 M1 模型的最大、最小主应力图（如图 2 所示）。

M1、M2 模型的最大主应力均发生在上 1 的底板处，M3 模型的最大主应力发生在上 3 的底板处，M4 模型的最大主应力均发生在下 1 的顶板处。

M1、M2、M3 模型的最小主应力均发生在下 1 的右上角，M4 模型的最小主应力发生在下 1 的左下角。另外，M1~M4 模型上 1 左下角的应力集中区与下 1 个矿房的右上角的应力集中区、上 3 左下角的应力集中区与下 4 的右上角的应力集中区已连通或者基本连通，其中 M1、M2 模型连通的应力集中区的应力集中系数较大。

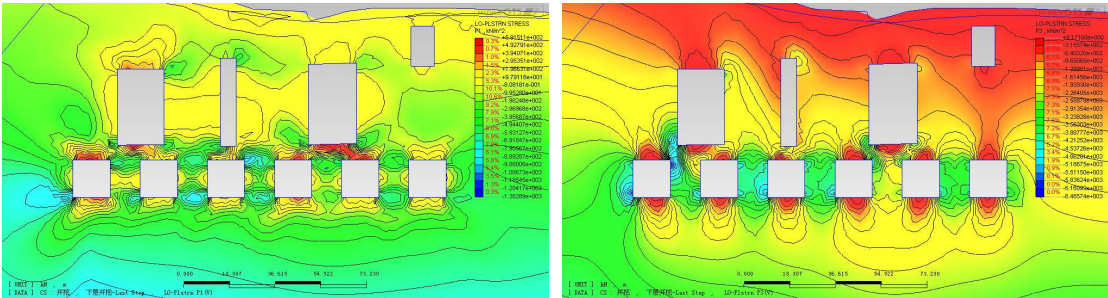


图 2 M1 模型最大、最小主应力图

Fig.2 The maximum and minimum primary stress distribution of model M1

2) 位移

从表 3 可以看出，M1~M4 模型的最大下沉位移值相差也不大。M1~M3 模型的最大下沉位移均发生在上 1 的顶板处，M4 模型的最大下沉位移发生在下 1 的顶板处。

3) 塑性区

下一分层的矿房开采后，M1~M4 模型均不同程度的出现了塑性区，如图 3~6 所示。M1~M3 模型出现塑性区的矿房或空区主要为上 1、上 3、下 1、下 4、下 5；M4 模型则为上 1、上 3、下 1、下 2、下 4。M1~M2 模型中的上 1 与下 1、上 3 与下 4 的塑性区已贯通；

M3 模型中的上 1 与下 1 的塑性区已贯通；M4 模型的塑性区则没有贯通，说明其基本能维持采场的整体稳定，只会出现局部破坏。

从应力和塑性区的分析可以看出：M1~M3 模型稳定性差，即 6 m、8 m、10 m 的隔离矿柱厚度不能保证采场的长期稳定；M4 模型基本稳定，即 12 m 的隔离矿柱厚度基本能满足采场稳定性的要求。另外，该石灰石矿的巷道即是采场，采场即是巷道，长期有工作人员出入，为设备和人员的安全，留 12 m 以上的隔离层厚度是必要的。

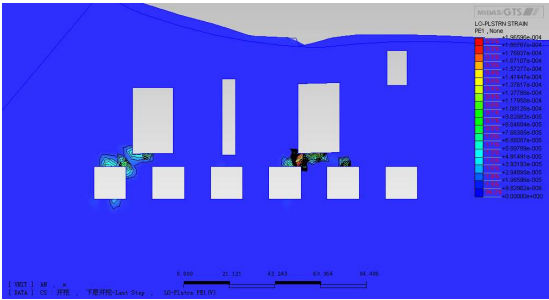


图 3 M1 模型的塑性区分布云图

Fig.3 The plastic zone distribution of model M1

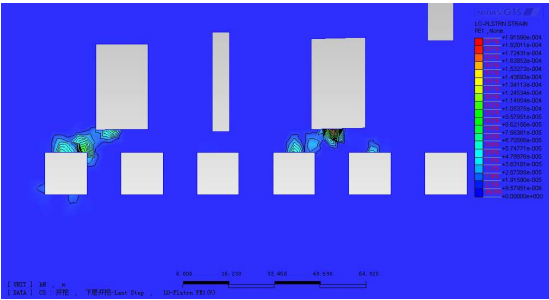


图 4 M2 模型的塑性区分布云图

Fig.4 The plastic zone distribution of model M12

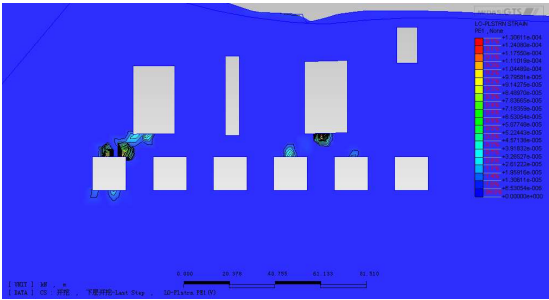


图 5 M3 模型的塑性区分布云图

Fig.5 The plastic zone distribution of model M3

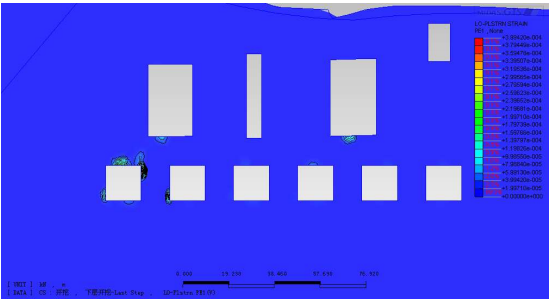


图 6 M4 模型的塑性区分布云图

Fig.6 The plastic zone distribution of model M4

5 结论

本文采用顶板厚跨比法、普氏拱理论以及结构力学梁理论三种理论方法以及数值模拟技术对某石灰石矿的隔离矿柱厚度、目前采空区及下步采场的稳定性进行了分析，得出了如下结论：

- 1) 目前采空区的稳定性较好，不会有大面积的、灾害性的地压问题发生；
- 2) 该石灰石矿采空区下开采的结构参数为矿房 15 m，房间柱 12 m 时，上下分层之间留取 12 m 以上的隔离矿柱是十分必要的；
- 3) 理论方法所考虑的条件较为理想化，所得出的隔离矿柱厚度稍微偏小；数值模拟技术能考虑较为复杂的条件，结果直观，所得出的隔离矿柱厚度基本符合实际；
- 4) 随着计算技术的不断发展，数值模拟技术表现出来的优势将会越来越明显，其在采矿工程中的应用也越来越广泛，越来越成熟。

参考文献

[1] 汪勇. 采空区上方安全顶柱厚度的确定方法[J]. 矿业快报, 2002, 1(1):17-18.
[2] 李地元, 李夕兵, 赵国彦. 露天开采下地下采空区顶板安全厚度的确定[J]. 露天采矿技术, 2005(5):17-20.
[3] 徐长佑. 露天转地下开采[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1990.

[4] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[5] 岩小明, 李夕兵, 郭雷,等. 露天地下开采隔离层稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 8(8):1682-1686.

[6] 朱和玲, 周科平, 肖雄,等. 基于开采环境再造顶板最小安全厚度研究[J]. 矿冶工程, 2008, 2(1):13-17.

作者简介: 邹平 (1983-), 男, 硕士, 主要从事岩石力学方面的研究工作。