

文章编号: 1000-7598-(2008)01-0177-05

充填体下矿体开采安全顶板厚度数学预测模型

高 峰, 周科平, 胡建华, 邓红卫, 唐谷修

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 科学合理地确定安全顶板厚度是回采铜坑矿重叠区下 92 号矿体的基本依据。在分析影响 92 号矿体顶板稳定性因素的基础上, 通过建立有限元数值模型和反复多次模拟计算得出了不同影响因素组合下顶板的安全厚度值。根据计算结果绘制了影响因子与安全顶板厚度的相关关系曲线, 利用多元逐步回归分析方法建立了一能够综合反映多因素共同作用下的复杂充填体下矿体开采安全顶板厚度的数学预测模型。结合工程实际及数值模拟的验证结果表明了预测模型的有效性。

关 键 词: 安全顶板厚度; 数学预测模型; 92 号矿体; 数值模拟; 多元逐步回归分析

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

Mathematical forecasting model of safety thickness of roof for mining orebody under the complicated backfilling

GAO Feng, ZHOU Ke-ping, HU Jian-hua, DENG Hong-wei, TANG Gu-xiu

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A scientific and reasonable design of safety thickness of roof is the basis for stoping the orebody No.92 which under the overlap zones in Tongkeng Mine. Based on analyzing the stability factors influencing the roof of orebody No.92, the finite element model is set up; and the simulation is conducted repeatedly. Then value of safety thickness of the roof in conformity to various groups of affecting elements is worked out. According to the simulated results, the curves between every factor and safety thickness of roof are drawn. A mathematical forecasting model of safety thickness of roof under the complicated backfilling, which considers effect among most of the factors, is obtained by stepwise regression multianalysis. The results which combine engineering practice with numerical simulation validate the feasibility of the forecasting model.

Key words: safety thickness of roof; mathematical forecasting model; the orebody No.92; numerical simulation; stepwise regression multianalysis

1 引 言

顶板的稳定性对于矿山地下开采有着非常重要的意义。理论上讲, 顶板厚度越大, 则稳定性越好, 但在实际中并不完全如此, 这就涉及到如何在特定条件下确定矿体开采安全顶板厚度的问题。

对于矿体开采安全顶板厚度的确定, 传统方法有荷载传递线交汇法、厚跨比法、按梁板受力情况计算的方法、采空区顶板坍塌堵塞估算法、按破裂拱概念估算及松散系数理论法、经验类比法等, 国外学者如前苏联的 K. B. 鲁别涅依他和 B. И. 波哥留波夫等也提出了相关计算公式^[1]。传统方法由于存在着力学机制不能很好地反映实际, 考虑的因素

单一片面或者不能全面反映采空区应力、应变分布及破坏的状况而在应用上受到限制。而 K. B. 鲁别涅依他等人提出的计算公式是在露天条件下取得, 具有一定的特殊性。因此, 如何在全面考虑各种因素的综合作用下, 寻求一种简单实用的安全顶板厚度确定方法一直是工程界比较关注的问题。

随着计算力学与数值方法的不断发展以及计算机技术的突飞猛进, 数值模拟的可行性已成为当前岩石力学的重要特征, 并在顶板厚度的确定中得到了应用^[2, 3]。据此, 本文采用有限元数值模拟, 并结合多元逐步线性回归的方法, 建立了铜坑矿 92 号矿体重叠区复杂充填体下矿体开采安全顶板厚度的数学预测模型。

收稿日期: 2006-03-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50490274) 资助; 教育部博士点基金 (No. 20050533035) 资助。

作者简介: 高峰, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事矿山岩石力学和工程稳定性研究。E-mail: gf81412@126.com

2 工程概况

铜坑锡矿是大厂矿田的大型地下矿山, 经过 20 多年的开采, 上部细脉带和 91 号矿体消耗殆尽, 92 号矿体已成为开采的主矿体。由于 91 号矿体开采使得 92 号矿体的完整性受到了很大的破坏。它的直接顶板就是开采 91 号矿体的胶结或者非胶结的空区充填体, 部分地段甚至是未充填的空区。

在 91 和 92 号矿体的重叠区下回采, 由于矿体上部直接或间接地与 91 号矿体回采后的充填体相连, 充填体力学性质较差, 自承能力较弱, 暴露面积一般较小。因此, 为了保证回采时的作业安全, 减少矿石的损失贫化, 必须在矿体顶板上预留一定厚度的矿层 (或夹石)。采场顶板岩层的安全厚度是回采重叠区下 92 号矿体的基本依据, 科学合理地确定顶板岩层安全厚度已经成为 92 号矿体安全回采的关键。

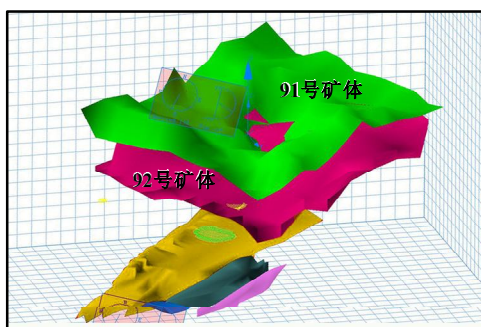


图1 铜坑矿主矿体三维视图

Fig.1 3D drawing of main orebody in Tongkeng Mine

3 有限元数值模拟

3.1 安全顶板厚度影响因素的确定

一般来说, 顶板岩层破坏型式有两种, 一种是在上部荷载作用下, 顶板岩层产生过大变形导致基础破坏; 另一种是由于顶板岩层出现拉应力, 当顶板岩层中的拉应力超出了岩体的抗拉强度时, 顶板岩层出现拉破坏区。随着拉破坏区的不断扩大, 最终引起顶板冒落。根据 92 号矿体的工程实际, 确定影响重叠区下顶板岩层安全厚度的因素除岩体力学物理性质外, 主要有: (1) 回采矿段矿体的厚度; (2) 作用在顶板上的 91 号矿体采场充填体厚度; (3) 采矿推进距离; (4) 矿柱的宽度等。

3.2 数值计算模型与计算参数

本次模拟采用三维有限元分析方法, 研究范围为 92 号矿体 I 盘区 203~204 线之间的矿体。根据铜坑矿地质报告, 原岩应力值 $\sigma_1 = 25.4 \text{ MPa}$ (方位角 333° , 水平); $\sigma_2 = 17.1 \text{ MPa}$ (方位角 63° , 水

平); $\sigma_3 = 7.3 \text{ MPa}$ (方位角 325° , 垂直)。

矿体模型的空间尺寸为 $500 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 280 \text{ m}$, 模型及网格划分如图 2 所示。模型底部端 Z-X 面采用 Y 向约束, 上部为自由面并承受覆岩及充填体的均布荷载。两端的 Z-Y 面 X 向约束, X-Y 面 Z 向约束。

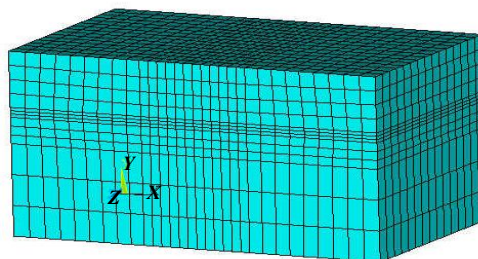


图2 三维有限元数值模型及网格的划分

Fig.2 3D finite element numerical model and mesh

本次岩体力学参数的选取是根据铜坑矿试验采场矿岩的室内试验结果, 并依据 Hoek-Brown 准则^[4]进行处理而得。参数见表 1。

表1 岩体物理力学参数表
Table 1 Physico-mechanical parameters of rocks

岩性	弹性模量 / 10^4 MPa	泊松比	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	凝聚力 / MPa	内摩擦角 / $(^\circ)$	抗拉强度 / MPa
宽条带灰岩	5.05	0.24	27.1	13.86	44.0	2.39
矿体	3.79	0.25	26.8	10.81	46.0	2.40
充填体	0.5	0.24	21.5	0.20	25.0	

注: 宽条带灰岩为顶板岩性。

4 计算结果分析

在计算某一影响因子对安全顶板厚度的影响时, 其他因子保持不变, 并对模型通过逐渐调整顶板岩层的厚度不断进行模拟计算, 直至顶板中出现较大拉应力, 可认为达到临界厚度。这时, 对于顶板岩层的临界厚度以顶板岩层中出现的拉应力乘以安全系数 (1.1) 后与岩体的抗拉强度对比, 以两个值接近时的厚度取值作为顶板岩层的安全厚度。

为了获得顶板的安全厚度, 本次模拟共设计了 40 种不同影响因素组合情况下的模拟方案。模拟方案及计算结果见表 2 所示。根据表中的计算结果将各影响因子与安全顶板厚度之间的关系建立如图 3 所示的关系曲线。

(1) 矿体厚度与顶板安全厚度的关系

由图 3(a)知, 矿体厚度 M 与顶板安全厚度 T 之间呈一非线性增函数的变化关系, 即顶板安全厚度 T 随着矿体厚度 M 的增加而增加, 但趋势减缓。

(2) 岩石弹模与顶板安全厚度的关系

由图 3(b)可以看出, 岩石的弹性模量 E 与顶板安全厚度 T 之间呈一非线性减函数的关系, 即 T 随 E 增大而非线性减小。

(3) 泊松比与顶板安全厚度的关系

由图 3(c)可以看出, 岩石的泊松比与顶板安全厚度 T 之间呈较为明显的一次减函数的关系, u 越大, 则 T 越小。

(4) 采矿推进距离与顶板安全厚度的关系

由图 3(d)可知, 采矿推进距离 L 与顶板安全厚度 T 之间存在着非线性的增函数关系, T 随 L 的增大而迅速增大。

(5) 矿柱宽度与顶板安全厚度的关系

由图 3(e)可知, 矿柱宽度 K 与顶板安全厚度 T 之间存在着非线性的减函数关系, T 随 K 的增大而迅速减小。

(6) 充填体厚度与顶板安全厚度的关系

由图 3(f)可知, 充填体厚度 t 与顶板安全厚度 T 之间也同样存在非线性的增函数关系。

(7) 凝聚力和内摩擦角与顶板安全厚度的关系

由图 3(g)、图 3(h)容易看出, 凝聚力 c 与顶板安全厚度 T 之间的二次函数关系较为明显, 而岩石的内摩擦角 φ 对顶板的安全厚度 T 的影响非常小, 因此在本预测模型中不予考虑。

表2 各种影响因子组合及其计算结果一览表

Table 2 Combination of affecting factors and their computed results

影响因子	序号	矿体厚度 M/m	岩石弹模 $E/10^4\text{MPa}$	泊松比 u	推进距离 L/m	矿柱宽度 K/m	充填体厚度 t/m	凝聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	安全顶板厚度 T/m
矿体 厚度 M	1	20	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	8.4
	2	25	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	9.2
	3	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	4	35	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	11.6
	5	40	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	12.4
岩石 弹模 E	6	30	3.0	0.24	16	18	20	13.86	42	13.5
	7	30	4.0	0.24	16	18	20	13.86	42	12.6
	8	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	9	30	6.0	0.24	16	18	20	13.86	42	10.2
	10	30	7.0	0.24	16	18	20	13.86	42	9.4
岩石 泊松比 u	11	30	5.05	0.22	16	18	20	13.86	42	12.2
	12	30	5.05	0.23	16	18	20	13.86	42	11.4
	13	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	14	30	5.05	0.25	16	18	20	13.86	42	9.6
	15	30	5.05	0.26	16	18	20	13.86	42	8.7
采矿 推进 距离 L	16	30	5.05	0.24	10	18	20	13.86	42	8.2
	17	30	5.05	0.24	12	18	20	13.86	42	8.8
	18	30	5.05	0.24	14	18	20	13.86	42	9.4
	19	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	20	30	5.05	0.24	18	18	20	13.86	42	13.6
矿柱 宽度 K	21	30	5.05	0.24	16	12	20	13.86	42	14.2
	22	30	5.05	0.24	16	14	20	13.86	42	13.8
	23	30	5.05	0.24	16	16	20	13.86	42	12.4
	24	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	25	30	5.05	0.24	16	20	20	13.86	42	10.0
充填体 厚度 t	26	30	5.05	0.24	16	18	15	13.86	42	10.2
	27	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	28	30	5.05	0.24	16	18	25	13.86	42	11.6
	29	30	5.05	0.24	16	18	30	13.86	42	11.8
	30	30	5.05	0.24	16	18	35	13.86	42	12.4
凝聚力 c	31	30	5.05	0.24	16	18	20	10	42	13.4
	32	30	5.05	0.24	16	18	20	11	42	13.2
	33	30	5.05	0.24	16	18	20	12	42	12.5
	34	30	5.05	0.24	16	18	20	13	42	11.7
	35	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
内摩 擦角 φ	36	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	40	10.8
	37	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	41	10.8
	38	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	42	10.8
	39	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	43	10.8
	40	30	5.05	0.24	16	18	20	13.86	44	10.8

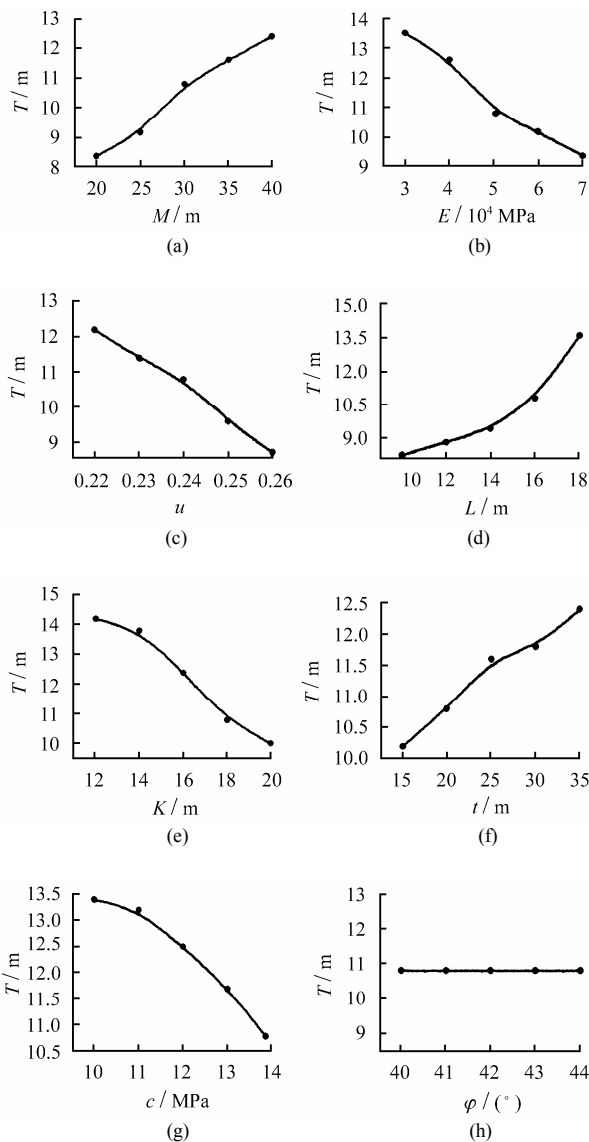


图3 各影响因子与安全顶板厚度的关系曲线
Fig.3 Relationship curves between affecting factors and safety thickness of roof

综上对各影响因子与顶板安全厚度之间的关系分析以及关系曲线的线性相关性, 将所有的影响因子与顶板安全厚度之间的关系通过回归分析所得的相关分析结果列如表3所示。

表3 各影响因子与安全顶板厚度的相关分析结果
Table 3 Results of correlation analysis between affecting factors and safety thickness of roof

关系	最佳关系式	相关系数 r
$M-T$	$T = 0.208M + 4.241$	0.983
$E-T$	$T = -1.985E^2 + 0.092E + 18.743$	0.984
$u-T$	$T = -88u + 31.66$	0.989
$L-T$	$T = -1.96L^2 + 0.093L + 18.657$	0.990
$K-T$	$T = 0.001K^2 - 0.018K + 16.931$	0.976
$t-T$	$T = 0.194t^2 - 0.002t + 7.674$	0.983
$c-T$	$T = 2.465c^2 - 0.132c + 1.984$	0.998

5 安全顶板厚度预测模型

以上分析了各单项影响因素与安全顶板厚度之间的关系。虽然 $M-T$ 之间采用线性关系描述并非最佳, 但综合比较表明, 采用线性关系已具有较大相关系数。而 $E-T$, $L-T$, $K-T$, $t-T$ 及 $c-T$ 曲线采用 2 次曲线表示已达到较高的精度, 而且简单易用。

基于以上分析结果, 预测模型的建立如下。

(1) 设 T 与 M , L , K , t 的关系如下^[5]:

$$T = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 L^2 + \beta_4 L + \beta_4 K^2 + \beta_5 K + \beta_6 t^2 + \beta_7 t \quad (1)$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$ 均为待定常系数。这时将 M, L^2, L, K^2, K, t 作为自变量, T 作为因变量, 采用多元回归方法求解待定常系数得如下回归公式:

$$\left. \begin{aligned} T &= 22.764 + 0.208M + 0.105L^2 - 2.325L - \\ &\quad 0.001K^2 - 0.583K - 0.001t^2 + 0.18t \\ r &= 0.984 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2) 将岩石弹性模量 E 考虑进去并回归得

$$\left. \begin{aligned} T &= 31.06 + 0.208M + 0.103L^2 - 2.274L - \\ &\quad 0.003K^2 - 0.526K - 0.002t^2 + 0.192t + \\ &\quad 0.156E^2 - 2.623 \\ r &= 0.985 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3) 将岩石泊松比 u 考虑进去并回归得

$$\left. \begin{aligned} T &= 54.996 + 0.208M + 0.107L^2 - 2.39L - \\ &\quad 0.001K^2 - 0.657K - 0.001t^2 + 0.166t + \\ &\quad 0.179E^2 - 2.855E - 88.00u \\ r &= 0.984 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4) 最后将凝聚力 c 考虑进去, 回归得最终的安全顶板厚度预测模型如下公式:

$$\left. \begin{aligned} T &= 46.073 + 0.208M + 0.107L^2 - 2.239L - \\ &\quad 0.001K^2 - 0.656K - 0.001t^2 + 0.166t + \\ &\quad 0.179E^2 - 2.854E - 88.00\mu - 0.133c^2 + 2.486c \\ r &= 0.986 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

6 顶板安全厚度预测模型的验证

对于式(5)的安全顶板厚度预测模型拟采用铜坑矿 92 号矿体重叠区下实际采场参数数据来验证其有效性。选取 92 号矿体 I 盘区 T112 采场, 该采场长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = 80 m $\times$ 50 m $\times$ 40 m, 垂直标高为 420~450 m。其他数据见表 4。

表4 采场及顶板实际参数值

Table 4 The real parameters of stope and roof

采场参数	M/m	L/m	K/m	t/m	T/m
取值	25	16	18	30	15

注：岩体力学参数见表1。

将表4中的数据代入式(5)求得 $T = 12.718\text{ m}$ ，可以看出，该值与实际值相差为 1.282 m ，相对误差为 15.2% 。将 12.718 m 作为安全顶板厚度，根据表2和表4中的参数代入已建立的数值模型中进行分析。

图4为采场一剖面垂直位移变形示意图。从图中看出，采场顶板垂直位移范围在 $30\sim 50\text{ mm}$ ，最大位移位置在顶板中心及两采场相邻的端角处。图5为对应的第3主应力 σ_3 分布图。最大主应力出现在采场顶板端角处，最大值为 27.3 MPa ，小于顶板岩体的抗压强度（ $\sigma_c = 73.38\text{ MPa}$ ）。在顶板及矿柱中心出现了 1.5 MPa 左右的拉应力，但小于矿体的抗拉强度 2.4 MPa 。应力分析结果表明，顶板是安全的。

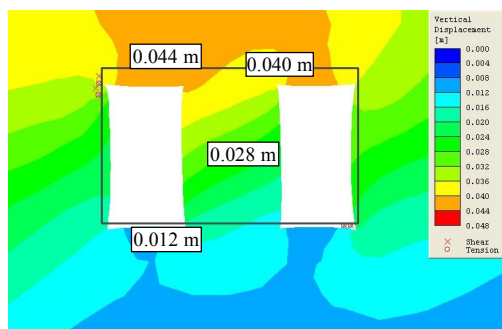


图4 采场垂直位移变形图（比例系数=100）
Fig.4 Vertical displacements and anamorphic map of stope (scale factor=100)

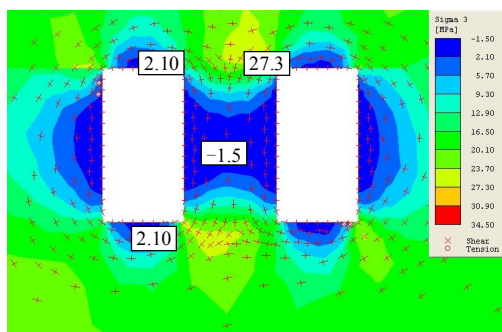


图5 第三主应力 σ_3 分布图（单位：MPa）
Fig.5 The third principal stress σ_3 distribution (unit: MPa)

数值模拟的结果说明了预测模型计算所得的顶板厚度满足要求，初步验证了预测模型的可靠性。但在工程实际中为了安全起见，顶板厚度的取值一般要比理论值或预测结果偏大一些。

7 结 语

本文通过数值模拟及多元逐步回归分析所得的充填体下矿体开采安全顶板厚度的数学预测模型，为重叠区下92号矿体的开采或类似工程提供了一简单实用的工程判断和计算方法，具有一定的参考价值。结合铜坑矿实际情况，92号矿体开采安全顶板厚度应在 $12\sim 15\text{ m}$ 之间。

由于采矿工程的复杂多变性使得考虑的影响因素存在局限性，数值模拟结果数据的样本量及准确性直接影响到回归分析中相关性的判别，这些都是影响预测模型精度的主要原因。

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): 17—18.
- [2] 黄润秋, 陈尚桥, 黄家渝, 等. 重庆市浅埋地下洞室安全厚度研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(2): 120—127.
HUANG Run-qiu, CHEN Shang-qiao, HUANG Jia-yu, et al. A study on the safety thickness of roof of shallow underground excavation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1998, 6(2): 120—127.
- [3] 李廷春, 李术才, 邱祥波, 等. 三维快速拉格朗日法在安全顶板厚度研究中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 935—939.
LI Ting-chun, LI Shu-cai, QIU Xiang-bo, et al. Application of fast lagrangian analysis of continua to researching on safe rock covers of Xiamen subsea tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 935—936.
- [4] Hoek E, Brown E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1980, 106(9): 1 013—1 035.
- [5] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与SPSS应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 204—209.