基于数值分析的露转地境界顶柱合理厚度值预测研究*

叶火炎
(湖北水利水电职业技术学院,湖北 武汉 430070)

摘　要:针对某铜铁矿露天矿转地下开采过程中面临的境界顶柱合理厚度值与地下开采稳定性间的复杂关系,采用FLAC^{3D}对同一跨度采空区进行10组不同厚度值下的模拟,并结合安全系数等传统的评价指标进行空区关键点的位移、应力、塑性区等情况统计,最终与4种传统顶板预测法对比分析。研究表明:顶板位移值与厚度值呈非线性负相关,与安全系数呈非线性正相关;当境界顶柱为21 m时,位移处于变化速率的"突变点",可作为合理厚度预测值;数值模拟法预测的21 m合理厚度值远比传统方法预测值误差小,相对误差仅为2.2%。模拟预测值具有较高参考价值,同时能保证较高的安全性和资源利用率。

关键词:境界顶柱;数值模拟;位移监测;应力监测;预测方法
中图分类号:TD851　**文献标识码**:B　**文章编号**:1001-0076(2017)04-0020-05
DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.04.005

Research on the Prediction of the Reasonable Thickness of the Boundary Pillar in Underground Mining Transferring from Open-pit Based on Numerical Analysis

YE Huoyan
(Hubei Water Resources Technical College, Wuhan 430070, China)

Abstract: Reasonable thickness of the boundary pillar is a key factor for the stability of underground mining transferring from open-pit. Using the simulation software FLAC^{3D}, ten goaf models with different thicknesses under the same span were established to analyze the displacements, stresses and plastic zones of key monitoring points combined with the traditional evaluation index such as safety factor. Finally, the results were compared with four traditional roof prediction methods. The research indicated that the displacement value of roof was negatively correlated with the thickness, and the safety factor was nonlinear. According to the mutation point of displacement curve, the reasonable thickness of the boundary pillar was 21 m. Relative error of numerical simulation method was only 2.2%, which was far less than those of the traditional methods. The predictive value of the model is of high reference value, and could guarantee the high security and resource utilization.

Key words: boundary pillar; numerical simulation; displacement monitoring; stress monitoring; prediction method

引言

随着开采深度的增加,国内许多露天矿山面临着开采资源耗竭、剥采比不合理、生产不连续等一系列问题,为保障矿山的长期规划和产能效益,许多矿山由露天开采转入地下开采[1]。露天开采转地下开采矿山面临的一个关键问题是露天坑下采空区的稳定性,针对露天开采转地下开采的复杂开采条件,

* 收稿日期:2017-03-15
作者简介:叶火炎(1960-),男,汉族,福建南安人,本科,副教授,主要研究方向:岩土工程。

万方数据

大多数矿山均预留一定厚度的境界顶柱。境界顶柱合理厚度值是国内外研究者关注的焦点,厚度过大会引起大量资源永久性损耗,厚度过小则不能保证安全,给矿山带来不可恢复的灾难[2]。确定境界顶柱厚度的传统方法有经验类比法、按破裂拱概念及松散系数理论估算法、K. B. 鲁佩涅依特理论估算法、厚跨比法等,但传统方法考虑因素单一、系统性差。近年来,随着数学方法的不断发展,出现了大批相关研究成果,其中,林杭等[3]借鉴强度折减法对采空区临界安全顶板进行预测;吴启红等[4]采用专家评定法和三相线性隶属函数对各种类型变量评价并建立采空区稳定性二维模糊评判模型;王新民等[5]利用层次分析和模糊数学法研究露天开采转地下矿山的最佳开采模式。以上分析明显优于传统厚度预测法,但在研究过程中没有直观反映出境界顶柱变化引起的应力、应变云图等信息,对相关关系的函数图像研究较少。

为直观准确的反映露天转地下矿山安全境界顶柱厚度的合理值,本文结合铜绿山矿露天转地下开采实际情况,利用数值模拟软件进行不同境界顶柱厚度下的安全性分析,通过监测关键点位移、塑性区特征、应力变形等,预测合理厚度,该方法对模拟真实采场稳定性特征有较大的优势,对应的仿真研究结论对实践也有重要的指导意义[6-9]。

1　工程概况与数值模拟

1.1　工程概况

铜绿山露天矿为大冶有色金属公司重要的矿山之一,矿山的地质复杂程度属中等类型,矿体围岩岩性较复杂。随着矿山的不断开采,2007 年矿山由露天开始转入地面和井下联合开采阶段,随着井下工程开工,大量的采准设计需要持续进行,为加快工程进度提高生产效率,需进行境界顶柱合理值的选取。矿体主要赋存于 -305 ~ 185 m,平均厚度为 80 m,倾角范围为 40° ~ 60°,南北走向,矿体沿走向布置的长度为 800 m,上下盘底围岩主要分布包括大理岩、斜长石岩、矽卡岩等在内的复杂类型,矿体采用盘区机械化上向中深孔法回采,采场最大跨度为 25 m。图 1 所示为矿体分布模型。

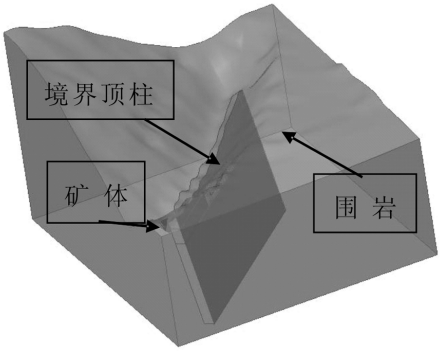


图 1　矿体分布模型图

1.2　数值模拟

为模拟过程方便,结合矿山赋存条件和工程地质调查报告等基础资料,获取相关岩体物理力学参数,如表 1 所示。

根据表 1 提供的试验参数,采用 MIDAS/GTS 软件建立模型,分别进行材料赋值,同时进行网格划分(图 2),该模型共有网格 74 300 个,节点 63 025 个。利用汇编程序将建立的 MIDAS/GTS 模型导入 LAC^{3D} 进行后处理,通过 Fix 命令对模型底部约束固定,即 X、Y、Z 方向全部约束,露天坑、地面等其他区域为自由边界。

表 1　岩体物理力学参数

岩层名称	抗拉强度 T/MPa	内聚力 C/MPa	剪胀角 ψ/°	内摩擦角 φ/°	体积模量 K/Pa	切变模量 G/GPa	密度 ρ /(kg·m^{-3})
矿体	0.778	0.824	15	44.12	11.240	8.764	3 600
围岩	0.586	0.754	17	38.54	9.250	6.883	2 700
充填体	0.023	0.012	12	53.12	0. 138	0.0103	1 800

1.3　数值方案及数据监测

在稳定性分析过程中,安全系数是衡量安全度的一个可靠指标,由于岩石抗压强度远大于其抗拉强度,故可定义其拉应力安全系数来评价安全度,其表达式如下:

$$K = \frac{\sigma}{\sigma_{许}} \tag{1}$$

万方数据

式中：K—拉应力安全系数；

σ—岩体最大拉应力，单位 Mpa；

$\sigma_{许}$—抗拉强度，单位 Mpa。

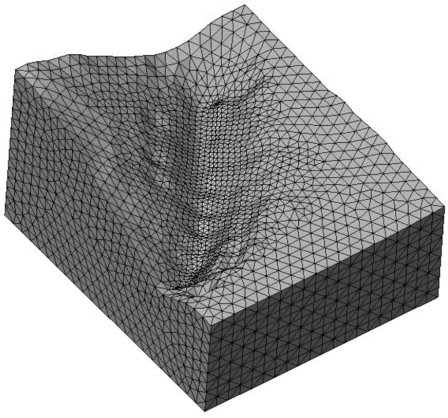


图 2　矿体区域实体网格图

安全系数在井下工程中一般保持 1.5 ~2 之间，当 K = 1 时，表示境界矿柱处于临界状态，此时安全状态只是理论层面上，在实际工程中，为保证研究数据的可参考性，取 K =1.5 作为相对安全值。为系统的研究境界顶柱变化对露天坑下采空区稳定性的影响，对露天坑下境界顶柱取值 3 ~30 m 进行初步模拟分析，并记录相应的应力、应变、塑性区及安全系数等指标，再次基础上进行安全厚度的计算预测。模拟过程中通过最大不平衡率判定系统平衡状态，并利用多步骤的模拟分析采空区稳定性状态，并采用 history write 命令对数据进行记录、提取和筛选。

2　模拟计算及数据分析

2.1　位移分析

境界顶柱设计厚度为 3 ~30 m，以 3 m 为台阶一次增加，通过监测并记录每个状态下采空区的监测点位移，同时应用 LAC^{3D} 自带 fish 语言进行安全系数的统计，统计结果见表 2。如表 2 所示，在 10 组试验中，采空区跨度值为 25 m 不变时，位移最小对应的境界顶柱厚度是 H =30 m，位移值为 1.04 mm，该采场参数下的安全系数较高，达到 1.95，能保证回采过程中的绝对安全。位移最大对应的参数数组是 H =3 m，位移值为 4 414 mm，该参数下的安全系数小，采空区发生破坏，安全系数仅为 0.64。顶板厚度 $H \leqslant 21$ m 时，位移减小速率较大，说明顶柱高度 H 对稳定性的影响较大；当 21 m $\leqslant H \leqslant$ 30 m 时，位移减小速率小，说明顶柱高度 H 对采场空区稳定性的影响减小，故 H = 21 m 左右为位移减小突变值，而此时安全系数为 1.66，满足大于 1.5，另外，顶板中心竖向位移值与境界顶柱厚度存在非线性负相关关系，与安全系数成正函数关系。

万方数据

表 2　不同境界顶柱高度下监测值情况及顶板稳定性情况

境界顶柱厚度 H/m	空区顶板检测值/mm			安全系数 F_S	是否破坏
	顶板中心位移	拉应力大小/MPa	塑性区面积/m^2		
3	4414	1.532	352.52	0.64	是
6	4234	1.459	416.54	0.73	是
9	4353	1.234	341.43	0.76	是
12	2342	1.321	328.54	0.98	是
15	3021	0.982	252.85	1.01	是
18	9.41	0.573	180.64	1.35	否
21*	4.51	0.494	105.46	1.66	否
24	2.34	0.431	62.76	1.79	否
27	1.91	0.409	53.87	1.83	否
30	1.04	0.401	47.45	1.95	否

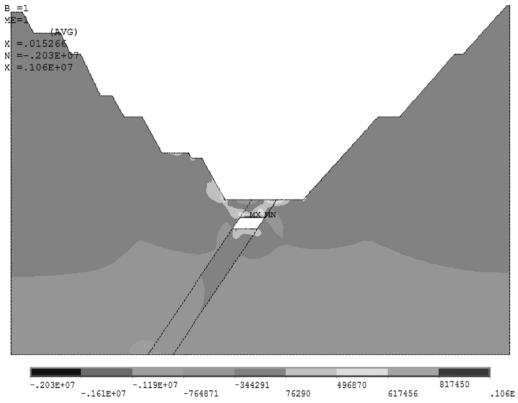
“*”：该点数据变化速率较大，即“突变点”。

综合考虑以上统计参数，在采空区跨度为 25 m 时，18 ~30 m 的境界顶柱都不会导致采场的破坏，且在 H = 21 m 左右出现位移、拉应力、塑性区面积的突变，即在该位置境界顶柱高度对空区的稳定性的影响最大。结合矿山实际经济效益，可认为在 21 m 的境界顶柱高度可以满足空区跨度为 25 m 以下采场的相对稳定性。

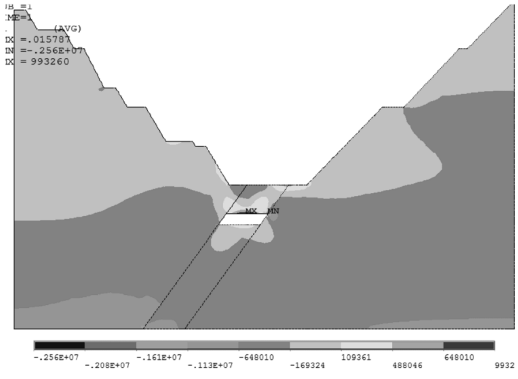
2.2　应力分析

图 3 为选取不同境界顶柱条件下采空区周边最大拉应力云图分布，其中图 3(a) ~3(c)分别代表厚度为 12 m、21 m、30 m 的拉应力图，从顶板所受的最大拉应力大小分析，整体趋势上，随着境界顶柱下部采空区的开挖，原岩应力得到释放，并出现重新分布，主要拉应力产生于采空区顶板中心位置，该拉应力过大可能会导致采场中部受过大拉应力垮塌。另外，采空区边帮与顶板之间的连接处也易发生应力集中，主要是矿体在空区上方应力释放并重新分布后，在连接处发生“尖点”效应，故产生应力集中。

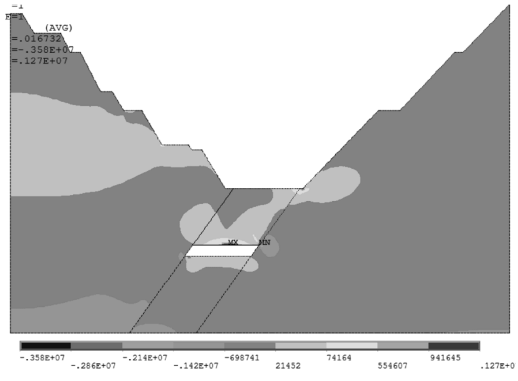
由图 3 可知，当跨度值不变时，境界顶柱周边对应的最大拉应力及拉应力区的范围随着顶柱厚度的增大而减小，而同时安全系数随着境界顶柱厚度的



(a) H=12m时拉应力云图



(b) H=21m时拉应力云图



(c) H=30m时拉应力云图

图 3　不同境界顶柱高度 H 下的拉应力云图

变大而增加,其中,如图 3(a)所示,当 H =21 m 时对应的最大拉应力为 0.494 MPa,远小于极限抗拉强度,因此能保证采空区的安全,而图 3(b)中,H = 12 m 时最大拉应力值为 1.321 MPa,存在较大的安全隐患,图 3(c)为 H =30 m,拉应力值为 0.401 MPa,也能保证绝对安全,但会造成较大的矿体损失。由于篇幅限制,其他厚度对应的模拟拉应力图不列举,综合上述拉应力数值分析,H =21 m 不仅能减少矿体损失,同时对采空区顶板稳定性能最大化得以保证。

万方数据

2.3　拟合分析

为进一步验证合理境界顶柱厚度值,结合文献 1 提供的强度折减法拟定多组临界安全顶柱和空区跨度数据,建立模拟过程中境界顶柱与厚度之间的相关关系,如图 4 所示,构造拟合参考函数为 $h = 0.002\,8D^2 + 0.864\,8D - 0.943\,3$,拟合程度 $R^2 = 0.990\,3$,具有较大的参考意义,代入文中采空区跨度 25 m,得到强度折减法下的合理厚度值为 20.33 m,故模拟结果具有较大的参考意义。

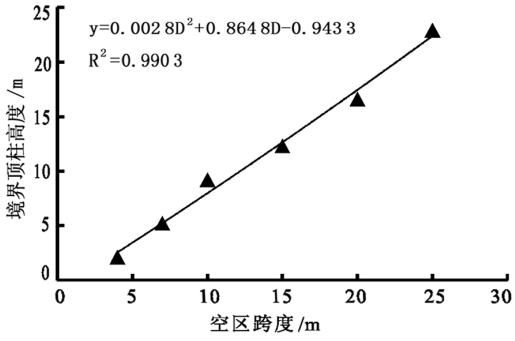


图 4　境界顶柱高度与空区跨度关系

3　模拟验证

数值模拟软件分析对项目的研究具有形象、直观等特点,为了进一步验证模拟过程中预测值的正确性,结合传统的顶板厚度估计法进行一一计算,其中,传统估算法主要包括:厚跨比法、荷载传递交汇线法、结构力学法等[10]。

计算过程中选用的安全系数均控制相同,取值 K =1.5,参数代入均与数值模拟一致,保证了研究过程的变量统一性。通过对比研究得到较为全面的值,见表 3。

表 3　不同预测方法对应的境界顶柱合理厚度值及相对误差统计

方法	厚跨比法	荷载传递交汇线法	结构力学法	数值模拟法	平均值	推荐值法
厚度/m	15	21.7	24.5	21	20.55	20.55
相对误差/%	27.05	5.62	19.25	220		

由表 3 可知在相同采空区厚度的情况下,不用预测方法计算得到的厚度值差异较大,其中厚跨比法与其他差异尤为明显,相对误差为 27%,结构力

学法得到的厚度值较平均值大,误差约为 19.20%,其中误差值最小的为数值模拟法,误差仅为 2.20%,具有较大的参考意义。

4 结 论

(1) 由监测的竖向位移值及安全系数可知,位移值与境界顶柱厚度值呈非线性负相关,与安全系数呈非线性正相关,境界顶柱厚度为 21 m 时对应的竖向位移处于变化速率的“突变点”,此时既能保证稳定性,同时能减少矿石的损失。

(2)拉应力监测结果显示,采空区的拉应力主要分布于采空区顶板中心和顶板与两帮的连接位置。两个区域均可能发生应力集中现象并导致采空区的失稳,故需进行针对防护。

(3)将模拟得到的合理境界顶柱厚度与传统的顶板厚度估计法进行对比分析显示,数值模拟法与平均计算值的误差值最小,仅为 2.2%。研究结果表明本文采用的基于数值模拟的露转地境界顶柱合理厚度研究具有较高的参考价值,研究得到的参数能保证较高的安全性和资源利用率。

参考文献:

[1] 何忠明,曹平.考虑应变软化的地下采场开挖变形稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(4):641-646.
[2] 薛涛.基于突变理论的露天矿复杂采空区稳定性研究[D].长沙:中南大学,2012.
[3] 林杭,曹平,李江腾,等.采空区临界安全顶板预测的厚度折减法[J].煤炭学报,2009,34(1):53-57.
[4] 吴启红,彭振斌,陈科平,等.矿山采空区稳定性二级模糊综合评判[J].中南大学学报(自然科学版),2010(2):661-667.
[5] 王新民,赵建文,张钦礼,等.露天转地下最佳开采模式[J].中南大学学报(自然科学版),2012(4):1434-1439.
[6] 张亚宾.露天采空区排尾对地下开采影响的研究[D].唐山:河北理工学院,2003.
[7] 邹友峰,柴华彬.我国条带煤柱稳定性研究现状及存在问题[J].采矿与安全工程学报,2006,23(2):141-146.
[8] 张耀平,曹平,袁海平,等.复杂采空区稳定性数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2010(2):233-238.
[9] 汪茂华,余仁兵.露天坑底境界矿柱厚度及采场尺寸的数值模拟[J].采矿技术,2009,9(5):14-16.

引用格式:叶火炎.基于数值分析的露转地境界顶柱合理厚度值预测研究[J].矿产保护与利用,2017(4):20-24.
YE H Y. Research on the prediction of the peasonable thickness of the boundary pillar in underground mining transferring from open-pit based on numerical analysis[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(4): 20-24.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。

《矿产保护与利用》编辑部

万方数据