

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0631-04

西石门铁矿散体临界深度预测与 地表陷落范围控制

郑建明^{1,2}, 任凤玉², 唐烈先³

(1. 吉林化工学院信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022; 2. 东北大学资源与土木工程学院,
辽宁 沈阳 110819; 3. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要 传统的错动角圈定地表陷落范围的方法往往与生产现状不适应。为了研究地表塌陷坑临界散体柱高度与陷落范围的关系, 根据西石门铁矿地表塌陷坑内移动散体的侧向支撑力作用分析, 提出了当塌陷坑散体的厚度不小于临界散体柱高度时, 散体的主动压力与被动压力共同阻止边壁岩体的片落活动, 研究了影响临界散体柱高度的相关因素。结果表明: 使用井下废石对地表塌陷坑进行回填, 可有效降低临界深度和控制地表陷落范围。

关键词 临界深度; 陷落范围; 临界散体柱; 被动压力

中图分类号 TD 325

文献标志码 A

Critical depth prediction and surface subsidence range controlling based on Xishimen mine

ZHENG Jianming^{1,2}, REN Fengyu², TANG Liexian³

(1. College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin, Jilin 130022, China;
2. College of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
3. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract The traditional way of predicting subsidence range by stagger angle doesn't adapt to production. This paper is to have a study of the relation between the height of critical bulk solid column in subsidence pit and subsidence range. After an analysis of lateral anchorage force of mobile bulk in pit, the paper proposed that the active pressure and passive pressure of dispersion both prevented the scaling of side wall rock while the thickness of bulk solid in pit is not less than the height of critical bulk solid column and the related factors affecting the height of critical bulk solid column is researched. The results show that filling subsidence pit with waste can lower the critical depth and control surface subsidence range.

Key words critical depth; subsidence range; critical bulk solid column; passive pressure

在金属矿床地下开采中, 采空区引起围岩破坏, 地表出现塌陷坑, 且周边出现裂缝, 形成陷落区^[1]。预计陷落区的常用理论方法主要有棱柱体理

论与弧板体理论^[2-3]。棱柱体理论认为采空区上下盘岩体按棱柱体形式陷落, 可按固定错动角来预测地表陷落范围。该理论在浅部开采中预测结果较为准

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50934006); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N100701001)

作者简介: 郑建明(1976—), 男, 山东省日照市人, 博士, 讲师, 从事采矿方法、放矿理论及崩落矿岩移动规律与岩体冒落规律方面的研究。

E-mail: zheng_jianming@126.com

Tel: 024-83678401

确;但随着采深的增加,预测值比实际值逐步偏大。为弥补这一不足,文献[3]提出弧板体理论,认为在采深达到临界深度后,采空区上部岩体改为沿弧面滑落,使地表陷落范围不再随采深的增大而进一步增大;但该理论因没有给出计算方法而未得到实际应用。

文献[4-8]从不同侧面论述了采空区引起地表陷落及陷落区的变化过程,其中文献[8]给出的图 1 所示的塌陷坑状态,可用来进一步分析采空区引起的岩体陷落的机理。

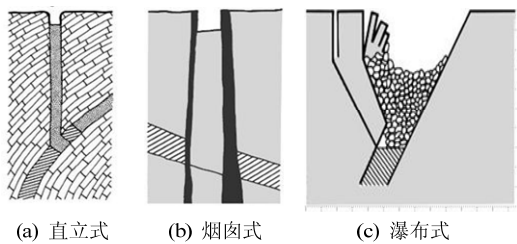


图 1 深部开采陷落类型及其影响示意图
Fig.1 Types and effects of mining-induced subsidence

1 西石门铁矿生产现状

西石门采矿方法主要采用无底柱分段崩落法。随着回采工作面下降,矿体变缓变薄,绝大部分矿段成为缓倾斜中厚矿体,而且受民采破坏程度加重,矿体稳定性差异大。在开采中都发生了一定范围的塌陷等破坏变形,整个采区目前塌陷坑平均深度约 40 m,上盘侧塌陷区边壁倾角平均 70°。矿体上盘存在西石门村,距离当前塌陷区边界约 280 m,为充分保证西石门村的安全,避免由深部开采造成的塌陷和岩移影响西石门村,矿山急需开展安全回采方案研究。

2 岩体稳定性分析

矿体上盘围岩为灰岩,下盘底板为砂卡岩和闪长岩,结构面节理不发育。岩体内软弱结构面的形状、力学性质及空间组合条件控制着矿山地压活动与岩体的冒落过程,结构面现场调查对岩体稳定性分级具有重要意义。围岩稳定性分级见表 1。

表 1 岩体稳定性分级
Table 1 Rock stability classification

代表岩石	稳定性级别	稳定性特点
中二采区下盘岩	IV~III	稳定性较差~中等稳定
中二采区矿石	V~IV	不稳定~稳定性较差
中二采区上盘岩	V	不稳定
南二采区二分区下盘闪长岩	III~I	中等稳定~稳定

表层散体柱的高度,主要与空区边壁岩体的稳定性、充填散体的容重以及下部散体的移动状态有关。边壁岩体的稳定性越好,散体密度越大,其下散体移动均匀性越好,表层散体柱的高度越低;反之亦然。考虑到西石门铁矿上盘围岩的不稳定性,如何控制地表陷落范围是实现安全回采的关键。

3 临界散体柱的支撑作用分析

由图 1 分析可知:采空区冒透地表后,围岩片落与否取决于围岩自身强度与采空区边壁是否存在侧向支撑力。在强度一定时,如果有侧向支撑力,围岩片落的程度将会受到限制;如果有足够大的侧向支撑力,便不会发生侧向片落。由此可见,塌落坑侧向扩展过程受岩体自身强度与塌陷坑内散体支撑作用的共同影响。

在由冒落形成的散体堆中,散体的密度随其高度的增加而增大。在西石门铁矿中区的采空区调查中发现,厚度约 50 m 的冒落散体堆积一年后,散体堆的底部被压实,在 3 m×3 m 的巷道断面内,由巷道掘进端头揭露出散体表面陡立而不片落;从巷道端部侧向挤压爆破时,因未能获得挤压空间而没有实现有效爆破。这一现象表明:当散体层达到一定厚度且沉实到一定程度后,不再为边壁岩体的碎胀提供空间,从而可有效阻止边壁岩体的破坏。

在深延矿体的开采中,塌陷坑内的散体不是固定不动的,而是随深部矿体的开采不断向下移动^[9](图 2)。为考察移动散体柱对塌陷坑边壁围岩的支撑作用,笔者统计分析了西石门井下矿中区上盘塌陷范围与采深关系。

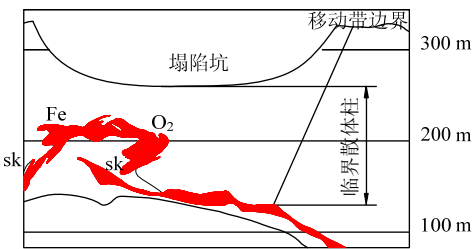


图 2 临界散体柱圈定示意图
Fig.2 Schematic of critical medium column delineation

将实测的塌陷坑边界绘制于地质剖面图上,同时将矿体回采部位填入图中,按采矿设计单位推荐的 70°错动角,从地表现裂缝或明显发生塌陷的边界向采空区作错动线,得出与采空区上盘边界的交点,该交点之上的散体堆称为临界散体柱,各剖面临界散体柱的高度见表 2。

表 2 中区陷落区主要参数
Table 2 Main parameters for subsidence range
of central district

剖面线	采深/m	上盘侧 倾角/(°)	临界散体柱 高度/m	临界散体柱占 充满散体空区高度 的百分数/%
3	259.96	39	113.24	51.5
4	270.13	38	152.97	52.4
5	29.85	27	161.60	53.9
6	292.44	24	149.15	46.0
7	266.61	38	146.75	56.5
8	294.13	27	177.48	58.1
9	295.60	28	149.75	45.9
10	294.42	27	140.98	42.6
11	270.57	29	135.90	44.7
12	268.79	22	156.15	57.9
13	271.51	33	134.66	46.9
14	260.76	30	137.91	47.9
15	250.75	46	139.05	52.5
16	306.39	30	145.47	55.9
17	254.67	20	149.43	57.6

由表 2 可见：临界散体柱高度占全部采空区高度的 42.6%~58.1%，即充满散体的全部采空区中；对地表塌陷范围影响极小的深部采空区的高度占整个高度的 41.9%~57.4%。进一步分析表明，表层散体柱的高度还与空区边壁倾角有关。将表 2 数据按空区边界倾角从小到大排列，重新排列后的对应关系见图 3。

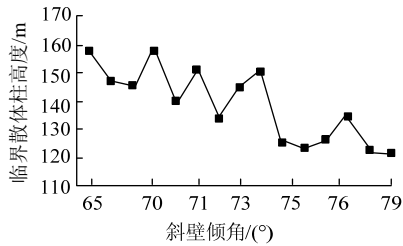


图 3 斜壁倾角与临界散体柱高度对应关系
Fig.3 Correspondence relation between the sidewall dip
and the height of critical bulk solid column

从表 2 可看出：围岩稳定性一定，缓慢下移的散体柱达到临界散体柱高度时，便会对侧壁形成足够大的支撑力，使塌陷坑侧壁围岩不再发生侧向片落，同时由片落引起的地表陷落便会相应终止。

4 临界散体柱的作用机理分析

由表 2、图 3 可见，随着边壁倾角的增大，临界散体柱高度有减小的趋势，线性回归得出

$$h=347.88-2.8657\theta \tag{1}$$

相关系数 $R=-0.8355$ 。根据回归方程可见：西石门铁矿中区上盘斜壁倾角每增大 1° ，临界散体柱高度减小 2.86 m。

散体柱对斜壁的法向压力，可根据下式估算：

$$\tau = \sigma(\sin \theta \cot \theta_0 - \cos \theta), \quad \theta_0 \leq \theta \leq 90^\circ \tag{2}$$

式中： τ 为作用于斜壁法线上的散体压应力， t/m^2 ； σ 为散体垂直压应力， $\sigma=\gamma H$ ； γ 为散体容重， t/m^3 ； h 为散体厚度， m ； θ_0 为堆积散体的最大坡面角， $(^\circ)$ ，综合考虑塌陷坑散体的密度与移动条件，取 $\theta_0=50^\circ$ ； θ 为斜壁倾角， $(^\circ)$ 。

$$\text{令} \quad \lambda = \sin \theta \cot \theta_0 - \cos \theta \tag{3}$$

称 λ 为散体对斜壁的压力系数。

根据式(3)，法向压力系数计算结果如图 4 所示。

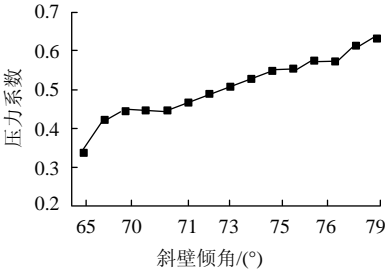


图 4 压力系数随斜壁倾角变化关系
Fig.4 Variation of pressure coefficient along
with sidewall angle

斜壁压力系数随倾角增大而单调增大，与临界散体柱高度在趋势上随倾角增大而减小相符。

从分析来看，西石门中区斜壁倾角从 65° 增大到 78° ，斜壁压力系数增大 85%，而散体柱高度减小 23%。这一现象表明，阻止边壁岩体片落的散体压力，不仅仅是散体的主动压力。

根据散体力学的研究结果，在极限平衡状态下，散体的应力状态可表示为^[10]：

$$\sigma_z = \gamma z \tag{4}$$

$$\sigma_x = \gamma z \frac{1 \pm \sin \varphi}{1 \mp \sin \varphi} \tag{5}$$

式中： γ 为散体容重， t/m^3 ； z 为散体柱高度， m ； φ 为散体内摩擦角， $(^\circ)$ 。

其中， $\frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi}=4.2$ 为被动压力系数， $\frac{1-\sin \varphi}{1+\sin \varphi}=0.2379$ 为主动压力系数，西石门铁矿塌陷坑内散体无黏性，内摩擦角取 38° ，经计算被动压力的最大值约为主动压力的 17.65 倍。西石门铁矿岩石松散系数为 1.5，即岩体密度比松散体最小密度最多大

1.5 倍, 而 $4.2/1.5=2.8$, 由此可见散体最大被动压力远大于同厚度实体岩石重力场的最大主应力。

根据以上分析, 临界散体柱的主动压力与被动压力共同阻止边壁岩体的片落。临界散体柱的被动压力使散体柱形成稳定的支撑结构, 能较好地适应侧压力的变化, 随深部开采造成的塌陷坑散体移动, 临界散体柱高度变化不敏感。

5 陷落角及地表塌陷控制

临界散体柱与其上陷落坑的高度之和称为临界深度, 由几何关系可推得陷落角计算式:

$$\beta = \arctan \left(\frac{H}{h_0 (\cot \beta_0 + \cot \alpha) - H \cot \alpha} \right) \quad (6)$$

式中: β 为陷落角, ($^{\circ}$); h_0 为临界深度, m; α 为矿体倾角, ($^{\circ}$); β_0 为错动角, ($^{\circ}$); H 为开采深度, m。

取 $\beta_0=70^{\circ}$, 统计各剖面相应参数得出陷落角, 见表 3。由式(6)还可看出: 当 H 与 α 一定时, β 随 h_0 减小而单调增大。由于临界散体柱的高度变化幅度很小, 减小临界深度的方法是降低地表塌陷坑高度。为此, 应积极充填地表塌陷坑, 特别是用废石充填塌陷坑, 不仅可有效降低临界深度, 由此减小地表陷落范围, 消除空区对地下开采的威胁^[5], 而且可减少废石污染, 有利于矿区环境保护。

表 3 中区陷落角计算结果

Table 3 Subsidence angle calculation result of central district

剖面线	采深 H/m	上盘侧倾角 $\alpha/(^{\circ})$	临界深度 h_0/m	陷落角 $\beta/(^{\circ})$
3	260.58	72	175.64	82
4	287.33	70	206.67	81
5	300.75	74	241.06	77
6	314.94	73	253.31	77
7	325.48	70	225.39	82
8	272.27	65	242.58	75
9	267.38	78	215.87	76
10	284.88	79	202.38	79
11	279.63	75	198.06	80
12	261.56	71	217.71	76
13	264.19	75	197.69	78
14	265.07	76	189.31	79
15	256.97	76	203.16	77
16	251.36	70	206.29	77
17	255.89	69	213.97	76

6 结 论

1) 深部开采时引起的地表塌陷范围, 除了受边壁岩体的稳定性影响外, 主要受到塌陷坑散体柱的

制约。

2) 当塌陷坑散体的高度不小于临界散体柱高度时, 散体的主动压力与被动压力共同组织边壁岩体的片落活动, 从而控制地表陷落范围。

3) 临界散体柱高度与围岩稳定性、采空区边壁倾角、散体内摩擦角及岩体松散系数有关。当采空区边壁倾角大于散体堆积体的最大坡面角时, 临界散体柱的高度随采空区边壁倾角的增大而减小。

4) 使用无底柱分度崩落法进行深部开采时, 使用废石充填地表塌陷坑, 可降低散体临界深度, 并有效控制地表塌陷范围。

参考文献:

[1] 解世俊. 金属矿床地下开采[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 42-46.

[2] 杨重工. 浅谈岩移理论及其应用[J]. 有色金属: 矿山部分, 1983(6): 36-40.

YANG Zhonggong. Discussion on the theory of rock movement and the application[J]. Nonferrous Metals: Mining, 1983(6): 36-40.

[3] 黄文钊. 岩层移动研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 1981(4): 21-23.

HUANG Wenxi. Research on rock movement[J]. Nonferrous Metals: Mining, 1981(4): 21-23.

[4] LI W X, WANG S S, LIU L, et al. Measurement analyses of rock mass movement and deformation due to underground mining of deep fractured orebody in Guanzhuang iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 681-688.

[5] CUI X M, MIAO X X, WANG J A, et al. Improved prediction of differential subsidence caused by underground mining[J]. Rock Mechanical Mine Science, 2000, 37(4): 615-627.

[6] TAO G Q, REN F Y, HUANG Z Y. Measures of controlling underground mined-out areas[C]// Proceedings of the 2004 International Symposium on Safety Science and Technology. Beijing, 2004: 679-683.

[7] 全桂光. 矿山采空区地表塌陷范围预测探讨[J]. 有色矿冶, 2008, 24(5): 11-12.

QUAN Guiguang. Mine mined-out area of surface subsidence area forecast[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2008, 24(5): 11-12.

[8] BARRY H G, Brown E T. Rock mechanics for underground mining[M]. Netherlands: Springer, 2006: 484-517.

[9] 王述红, 宁新亭, 任凤玉. 崩落采矿法覆盖层合理保有厚度的探讨[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 1998, 19(5): 21-23.

WANG Shuhong, NING Xinting, REN Fengyu. Optimum thickness of covering layer in sublevel caving stoping[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 1998, 19(5): 21-23.

[10] HARR M E. Mechanics of particulate media[M]. New York: The McGraw-Hill Incorporation, 1977: 268-274.