

崩落法引起的地表塌陷机制分析*

付 华^{1,2}, 陈从新^{1,2}, 夏开宗^{1,2}

(1.中国科学院大学, 北京 100039; 2.中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要:以程潮铁矿西区为背景,分析崩落法开采引起的地表塌陷过程和特征,并结合现场监测数据,阐明顶板冒落导致地表塌陷的 3 个阶段,分析研究崩落法开采量与地表塌陷的定量关系。结果表明,程潮铁矿西区地表塌陷可分为初始冒落、渐进冒落和剪切冒落 3 个阶段,并且以渐进冒落为主。崩落法开采引起的岩体崩落能否到达地表导致塌陷,与开采深厚比和碎胀系数有关,当覆岩厚度与开采矿体的累计厚度之比小于临界值时,岩体移动会发展至地表,引起地表塌陷。

关键词:崩落采矿法;地表塌陷;开采深厚比;碎胀系数

中图分类号:TD325+.2 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2017)08-0117-05

地下矿山开采会引起地表不同程度的塌陷和变形,不仅有连续的变形,还有不连续的变形;不仅有地表塌陷变形,还有岩体滑移变形^[1-2]。

目前,地下开采主要有空场采矿法、崩落采矿法和充填采矿法 3 类采矿方法。不同的采矿方法,其采场地压的显现特征、活动规律和控制方法均不相同,导致的地表塌陷过程和机理均有差异^[3-8]。

因此,本文针对崩落法开采的特点,详细描述了崩落法开采引起地表塌陷的过程,并结合程潮铁矿西区地表塌陷实际情况,定量分析了地下开采与地表塌陷的关系,为分析崩落法开采引起的地表安全问题提供依据。

1 程潮铁矿开采及地表塌陷概况

程潮铁矿位于湖北省鄂州市,是武汉钢铁集团公司重要的矿石生产基地,矿区东自细王冲第 26 勘探线,西至塔桥庙第 59 勘探线,东西长约 3000 m,南北宽约 1500 m,面积约为 4.5 km²,系一个综合性矿床。以 15 勘探线为界,程潮铁矿划分为东区和西区,本文主要讨论程潮西区。

1.1 地质条件及开采情况

程潮铁矿西区下盘岩体主要为花岗岩,岩性较

好,上盘岩体主要是角岩和闪长岩,另外还存在大理岩和角岩组成的变质岩带,矿体本身主要是由交代大理岩变化的矽卡岩而成矿。程潮铁矿西区地质平面图见图 1,典型地质剖面见图 2。

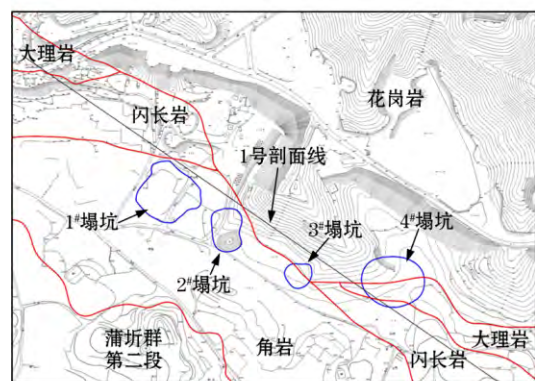


图 1 程潮铁矿西区地质平面

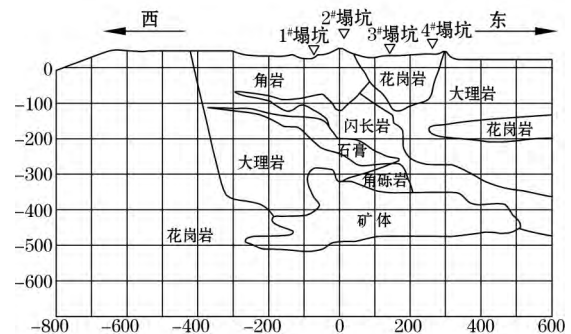


图 2 1 号地质剖面

程潮铁矿西区采用分段崩落法开采,于 2002 年开始由南向北推进,具体开采情况见表 1。

1.2 塌陷过程及塌坑情况简介

程潮铁矿西区 -290 ~ -342.5 m 水平主要集中在西部,范围较小;越往深部开采矿体范围越大,并逐步向东扩展。从 2006 年开始,西区地表开始陆续出现 4 个相对独立的塌陷坑,塌陷时间和大小均有差异,这 4 个塌陷坑的形成、发展过程如下:

* 收稿日期:2017-01-01

作者简介:付 华(1989-),男,四川简阳人,博士研究生,主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等研究,Email:510125890@qq.com。

表 1 程潮铁矿西区开采过程

开采水平/m	起采时间	结束时间	开采矿体
-290.0	2002.07	2004.07	Ⅲ号矿体
-307.5	2002.11	2004.07	Ⅲ号矿体
-325.0	2003.05	2004.12	Ⅲ号矿体
-342.5	2004.07	2006.12	Ⅲ号矿体
-358.0	2005.10	2008.09	Ⅲ号矿体
-375.5	2007.07	2012.06	Ⅲ号矿体
-395.0	2009.05	2015.12	Ⅲ号矿体
-410.5	2012.03		Ⅲ号矿体

2006年4月,程潮铁矿西区地表首次出现塌陷,在37线~39线之间,形成了面积约为4140 m²的1#塌坑。此时,西区的开采从-290 m水平延伸至-342.5 m水平,累计开采厚度达到69.5 m。虽然-342.5 m水平的开采面积达到了38000 m²,但由于起采水平的开采范围较小,约7000 m²,并集中在矿体西部,仅使得较小范围的岩体崩落到达地表。因此,1#塌坑在2006年出现以来,其面积虽有所增大,但并未形成大范围的地表塌落区,加上此处地表充填了大量尾砂,致使现地表并无明显塌坑。

2015年3月和4月,西区地表相继出现2处塌陷,分别为2#、4#塌坑,与第一次塌陷相隔有9年时间。地表出现塌陷时,这两处塌坑对应的地下矿体开采从-325 m水平延伸至-410.5 m水平,累计开采厚度达到85.5 m。与1#塌坑相比,这两个塌坑对应的地下起采深度更深,即起采时顶板覆岩更厚,致使地表出现塌陷时采出的矿体厚度越大。2#塌坑现场见图3。



图 3 2#塌坑现场

2016年2月,在2#和4#塌坑之间再次出现塌陷,形成直径约35 m的3#塌坑,如图4所示,塌坑的平面位置如图1所示。该塌坑对应的地下矿体的开采从-342.5 m水平延伸至-430 m水平,累计开采厚度达到87.5 m。与前3个塌坑相比,3#塌坑对应的地下开采具有更深的起采深度和更大的采出厚度。目前,除1#塌坑因大量尾砂填埋看不出明显

塌陷外,其余3个塌坑的范围和深度均在持续增大,并有逐步合并成一个塌坑的趋势。



图 4 3#塌坑现场

从矿体分布来看,越往深部范围越大,并逐步由西向东扩展。随着开采在水平面上和深部方向的推进,覆岩的平面崩落范围逐渐增大并由深部向地表扩展,最终使得地表形成一个大塌陷坑。

为了详细了解崩落法开采对覆岩的影响,从地表向采区打钻孔,并在孔内安装电缆线且用低标号水泥砂浆固结在孔内,若电线被拉断,则表明对应深度处的岩体发生了崩落。

监测结果见图5。从监测成果来看^[9-10],顶板岩体的崩落是间断发生的,有较明显的跳跃性和间歇性。岩体的崩落是由深部向地表逐渐发展的,并在这种崩落发展至一定阶段后,地表产生突然塌陷^[11]。

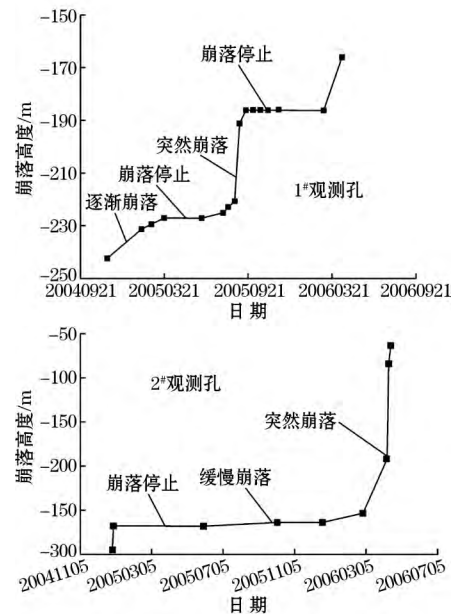


图 5 深部岩体崩落监测成果^[9]

另外,由于矿体西端的首采分段水平比东端高,放顶时间也远早于东端,因此首先形成小型的冒落

拱,并在地表形成了1#塌陷坑。随着东端矿体的开采,顶板的冒落范围逐渐向东转移,地表的变形也逐步向东扩展,并出现新的塌陷坑,如3#、4#塌陷坑。

2 地表塌陷模式分析

地下矿体在开采之前,矿体及围岩处于复杂的自重应力和构造应力场中,地应力对岩体做的功一部分转换为岩体内的耗散能,使岩体强度逐步降低;另一部分转换为逐步增加的可释放变形应变能,即弹性能。当岩体内的弹性能达到岩体破坏所需要的表面能时,该单元将发生破坏,弹性能以弹性表面能的形式释放出来,具体表现为岩体破坏和顶板冒落^[12]。而矿体的采出,使原本三向受压的岩体变为双向受压,甚至出现拉应力,随着岩体受拉程度的提高,能量的释放变得越来越容易,整体破坏的临界应力也越来越小,从而促使岩体的冒落与破坏。所以,顶板的冒落是一个能量释放的过程,深度越大、暴露的面积越大,越容易发生冒落。

当地下开采的尺寸超过保持顶板稳定的极限跨度时,顶板开始出现冒落^[13],原本完整的岩体在拉应力作用下破坏成碎块,岩体的碎胀性使其体积增

大,并充填原有的采出空间,如图6(a)所示。崩落的碎石在采空区起到了暂时支撑的作用,此时围岩也处于暂时平衡的状态,如图6(b)所示。随着开采尺寸在平面上的扩展,开采的尺寸再一次超过顶板极限跨度时,冒落又出现。如此往复,当一个水平开采结束后,冒落的碎石会填补采出空间,若没有继续向深部开采,覆岩的冒落和地表的变形也会逐渐停止,从而实现地压控制,如图6(c)和(d)所示。

若在碎石覆盖层下继续开采深部的矿体,碎石覆盖层在重力作用下会向下流动并充填采空区,使得碎石层顶部出现空区,原本被碎石支撑的覆岩重新暴露。随着二次暴露面积增大,覆岩再次发生碎裂、垮落,覆岩的崩落逐步向地表扩展。因此,开采空间在平面和深度上的扩展,使得岩体的冒落范围在水平和垂直方向上增大,同时表现出明显的间断性和跳跃性。

当崩落逐渐接近地表时,覆岩易沿采区边缘发生整体剪切破坏,造成地表的突然塌陷,如图6(e)所示。对于此部分岩体,可以采用极限平衡法估算其发展的最终破坏条件^[14],并以此判断其整体稳定性。

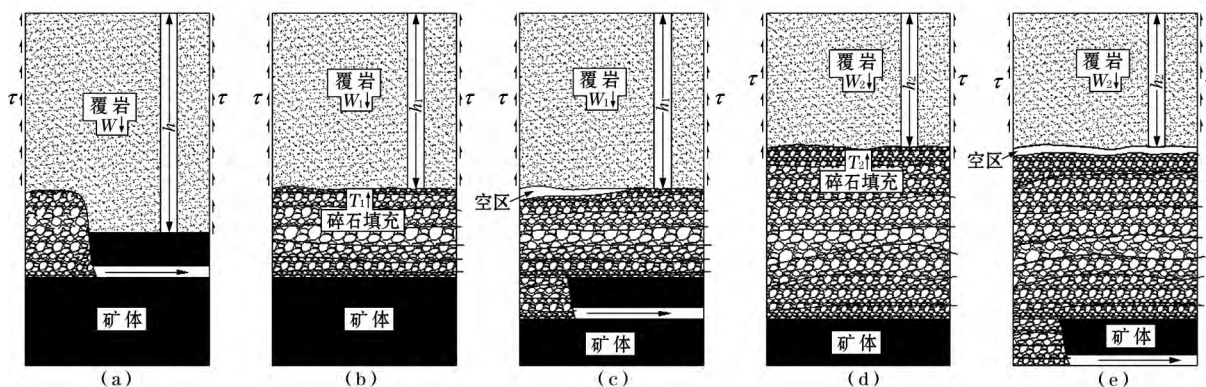


图6 岩体崩落过程

结合程潮铁矿西区地下岩体冒落和地下塌陷过程监测,崩落法开采的矿山地表塌陷过程可描述为以下3个阶段^[15]:

(1) 初始冒落阶段:地下首个水平的矿体被采出后,原始应力场得到部分解除,顶板由三向受压变为双向受压,甚至出现拉应力,岩体中的能量释放引起岩体的破坏、崩落,崩落的碎石产生碎胀并充填采空区,使采区处于暂时平衡状态;此时,地表的变形量很小甚至不出现变形。

(2) 间断冒落阶段:随着地下开采空间在平面和深度上的扩展,岩体出现间断性、跳跃性崩落,崩

落范围逐渐扩大,并从深部向地表处发展;地表变形逐渐增大,但属于连续性很强的渐进式变形,没有产生突然式变形,即使是裂缝,其出现、张开、扩大和延伸等现象也是一个连续变化的过程。

(3) 剪切冒落阶段:当岩体崩落接近地表时,覆岩中的剪切应力决定其稳定性,当周边剪切应力超过岩体抗剪强度时,覆岩发生整体陷落,造成地表的突然塌陷,地表的变形由连续转变为不连续。

3 地下采矿量与地表塌陷的关系

由于程潮铁矿西区4个塌坑处对应的覆岩厚

度、矿体开采厚度不同,导致岩体崩落破坏传递至地表的时间也不同,所以地表出现塌陷的时间有差异。然而,在对比4个塌坑处对应的地下矿体采出深厚比和岩体碎胀系数后,可以发现一些有益的信息。具体来说,1#塌坑处起采时的覆岩厚度为321 m,当开采总厚度达到69.5 m时,地表出现了塌陷,此时采深与采厚之比为5.62,碎胀系数为1.22;而2#塌坑处起采时的覆岩厚度为379 m,当开采总厚度达到85.5 m时,地表才出现塌陷,此时采深与采厚之比为5.43,碎胀系数为1.23。其余塌坑的数据如表2所示,对比也可以发现具有相似的深厚比和碎胀系数。岩体崩落空间如图7所示。

根据夏开宗^[16]、白义如^[17]等学者的研究,当矿体开采深度与回采累计垂直高度的比值小于一个临界值时,这种崩落变形才会发展至地表。也就是说,只有当采出的矿体足够多、形成足够大的下部空间时,岩体的冒落才会使地表发生塌陷。综上所述,崩落法开采引起的岩体变形是否能到达地表、引起地表塌陷,与采出矿体厚度和覆岩厚度有关。对于程潮铁矿西区,当覆岩厚度与开采矿体的累计厚度之比小于5.4~5.6时,岩体移动会发展至地表、引起地表塌陷;而当这个比值大于5.4~5.6时,这种崩落不会发展至地表。

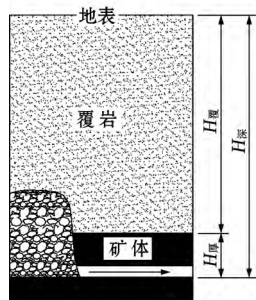


图7 岩体崩落空间

表2 程潮铁矿西区塌坑情况

塌坑序号	塌陷时间	采深 $H_{深}/m$	采厚 $H_{厚}/m$	覆岩厚度 $H_{覆}/m$	深厚比 $H_{深}/H_{厚}$	碎胀系数 $H_{深}/H_{覆}$
1#	2006.4	390.5	69.5	321	5.62	1.22
2#	2015.3	464.5	85.5	379	5.43	1.23
3#	2016.2	483	87.5	395.5	5.52	1.22
4#	2015.4	463.5	85.5	378	5.42	1.23

然而,这种按照采深与采厚关系来分析地表是否出现塌陷的方法是建立在覆岩完全崩落的假设下的,即覆岩几乎是完全冒落至地表的,并未出现剪切冒落(即突然塌陷)或者出现剪切冒落的厚度很小。

现场的监测及调查发现,在目前出现的4个塌坑中,2#、3#和4#塌坑都是从小到大逐渐扩展形成,并非突发的整体性塌陷,因此可采用上述方法来分析地下矿体采出量和地表塌陷时间的关系,并且可以得到相似的深厚比。对于1#塌坑,在形成时出现过较明显的突然塌陷,而采用上述方法分析时可同样得出与其他3个塌坑相似的深厚比和碎胀系数,由此可判断1#塌坑出现突然塌陷的岩体厚度较小,仅在地表处表现为突然陷落,覆岩变形的传递依旧以渐进崩落为主。

综上所述,程潮西区出现的塌陷,同时存在渐进崩落和突然塌陷的情况,但以渐进崩落为主,突然塌陷仅在渐进崩落发展将至地表处时出现。

4 结论

对程潮铁矿西区崩落法开采引起的地表塌陷进行分析,可以得到以下结论:

(1) 由于起采水平、开采厚度不同,塌坑的出现时间、范围都有较大差异。

(2) 在开采初期,地下开采的尺寸超过保持顶板稳定的极限跨度时,顶板开始出现冒落,崩落的碎石充填开采空间,覆岩的陷落也会因为碎石充填开采空间而终止;随着继续向深部开采,岩体的崩落也会继续进行;而在这种崩落逐渐接近地表时,上覆岩体整体稳定性明显降低,易发生突然塌陷。

(3) 程潮铁矿西区地表塌陷可分为初始冒落、渐进冒落和剪切冒落3个阶段,并且以渐进冒落为主。

(4) 崩落法开采引起的岩体塌陷能否到达地表,与开采深厚比和碎胀系数有关。对于程潮铁矿西区,当覆岩厚度与开采矿体的累计厚度之比小于5.4~5.6时,岩体移动会发展至地表、引起地表塌陷;而当这个比值大于5.4~5.6时,这种崩落不会发展至地表。

参考文献:

- [1] 付华,陈从新,夏开宗,等.金属矿地下开采引起岩体变形规律浅析[J].岩石力学与工程学报,2015(34):1859-1868.
- [2] LI L C, TANG C A, ZHAO X D, et al. Block caving-induced strata movement and associated surface subsidence: a numerical study based on a demonstration model [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73: 1165-1182.
- [3] 陈汝秀.采空区上覆垂悬体垂直位移实时监测与预警[J].矿业研究与开发,2016,36(10):90-93.

- [4] 鞠金峰,许家林,王庆雄.大采高采场关键层“悬臂梁”结构运动型式及对矿压的影响[J].煤炭学报,2011(36):2115-2120.
- [5] 梁运培,孙东玲.岩层移动的组合岩梁理论及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):654-657.
- [6] 许家林,钱鸣高,朱卫兵.覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2005(24):787-791.
- [7] 李 晓,路世豹,廖秋林,等.充填法开采引起的地裂缝分布特征与现场监测分析[J].岩石力学与工程学报,2006(25):1361-1369.
- [8] 桑逢云.充填法开采底板应力及破坏规律研究[D].青岛:山东科技大学,2005.
- [9] 夏开宗,陈从新,付 华,等.程潮铁矿西区不同采矿水平下的岩体变形规律分析[J].岩石力学与工程学报,2016(35):792-805.
- [10] 宋卫东,杜建华,尹小鹏,等.金属矿山崩落法开采顶板围岩崩落机理与塌陷规律[J].煤炭学报,2010(35):1078-1083.
- [11] 黄平路.构造应力型矿山地下开采引起岩层移动规律研究[D].武汉:中科院武汉岩土力学研究所,2008.
- [12] 谢和平,鞠 杨,黎立云.基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报,2005(24):3003-3010.
- [13] 张海波,宋卫东,付建新.大跨度空区顶板失稳临界参数及稳定性分析[J].采矿与安全工程学报,2014(31):66-71.
- [14] 李清望,任凤玉,候建光,等.西石门铁矿南区采空区的冒落规律分析[J].中国矿业,2001,10(3):42-44.
- [15] BRADY B H G, BROWN E T D. Rock mechanics for underground mining[M]. London: George Allen Unwin, 1985: 458-480.
- [16] 夏开宗,陈从新,付 华,等.金属矿山崩落采矿法引起的岩层移动规律分析[J].岩土力学,2016(37):1434-1440.
- [17] 白义如,谷志孟,白世伟.程潮铁矿东区地下采矿引起地表沉降和岩层移动初探[J].岩石力学与工程学报,2002(21):340-342.

Mechanism Analysis on Surface Subsidence Caused by Caving Method

FU Hua^{1,2}, CHEN Congxin^{1,2}, XIA Kaizong^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Taking the west area of Chengchao Iron Mine as an object, the surface subsidence process and characteristics caused by caving mining were analyzed. Based on the field monitoring data, the three stages of surface subsidence resulted in roof caving were represented, and the quantitative relationship between the mining volume of caving method and the surface subsidence was analyzed. The results showed that, the surface subsidence over the west area of Chengchao Iron Mine could be divided into three stages, including initial caving, gradual caving and shear caving, which process was dominated by the gradual caving. The rock mass caving caused by caving mining whether to reach the earth surface and lead to collapse was related to the ratios of mining deep and thickness and the bulking coefficients. When the ratio between the thickness of the overlying rock and the accumulated thickness of the mined ore was less than a critical value, the movement of rock mass would expand to the earth surface and give rise to the surface subsidence.

Key words: Caving method, Ground subsidence, Ratio of mining deep and thickness, Bulking coefficient