

# 小汪沟铁矿地表塌陷坑出露规律与动态绿化

赵云峰

(西钢灯塔矿业有限公司)

**摘要:**崩落采矿法在铁矿石地下开采中广泛应用,但开采引起的地表塌陷破坏植被,是造成碳汇损失的主要原因,如何安全地控制地表塌陷范围与动态绿化,是低碳开采中需要首先解决的共性难题。针对这一问题,统计分析地表塌陷坑的出露规律,根据塌陷坑间距计算公式,沿回采工作面的推进方向推算塌陷坑出露部位,即为卡车回填废石路线时须避免的危险部位;在塌陷坑周边选择两处方向垂直、边壁下部被散体较好覆盖的位置,作为废石回填地点,用卡车运送露天采场剥离的废石,沿两个相互垂直的方向安全回填塌陷坑。在塌陷坑回填到预定高度后,对非采动活跃区的充填体进行覆土动态绿化,同时对地表裂缝用碎石与黏土充填。采取这些措施后,小汪沟铁矿塌陷区绿化面积达87%,有效维持了矿区生态环境,大幅降低了碳汇损失。

**关键词:**地下开采;地表塌陷;塌陷坑回填;动态绿化;碳汇损失

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)07-0102-04

doi:10.11792/hj20240717

## 引言

崩落采矿法因开采工艺简单、安全高效等特点,在国内外铁矿石地下开采中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,在应用崩落采矿法开采过程中,地下采空区引发地表塌陷<sup>[3-5]</sup>,导致地表植被破坏,从而造成碳汇损失。矿山面对实现“双碳”目标的要求<sup>[6-8]</sup>,探究降低崩落采矿法碳排放方法势在必行。地表因塌陷岩移破坏造成的碳汇损失,是崩落采矿法碳排放核算中的重要组成部分<sup>[9]</sup>。为此,研究地表塌陷坑控制方法,开发塌陷区动态绿化技术,降低碳汇损失,是减小崩落采矿法碳排放量的重要措施之一。在金属矿山地下开采过程中,地表往往出露多个塌陷坑<sup>[10]</sup>。针对小汪沟铁矿地下开采引发地表出露的数十个塌陷坑,跟踪监测塌陷坑出露的整个过程,揭露塌陷坑出露规律,据此解决塌陷区地表安全路径的布置等问题;同时,利用矿内与矿外废石安全回填地表塌陷坑,在塌陷坑回填到设定高度后,对非采动活跃区的地表裂缝用碎石与黏土充填,并对充填体进行覆土动态绿化,以此恢复地表植被,有效维持了矿区生态环境,大幅降低了地表碳汇损失。

## 1 地表塌陷坑出露规律

小汪沟铁矿为鞍山式沉积变质磁铁矿床,矿体呈

似层状,倾角一般 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ,厚度 $20 \sim 90$  m,矿石平均品位 $28.94\%$ ,属于矿岩中等稳固—稳固的低品位缓倾斜中厚—厚矿体,采用分区崩落采矿法开采,沿矿体延伸方向划分为上、中、下3个分区,每个分区的采空区均可独立冒透地表,3个分区同时安全开采<sup>[11]</sup>。当分区采空区累积宽度达到上覆岩体大冒落跨度时,采空区便会冒透地表<sup>[12]</sup>。

在采空区冒透地表的瞬间,冒落区四周围岩发生侧向崩落与片落,崩落与片落的散体堆积在塌陷区内,坑壁围岩的强度与坑底散体的侧向支撑力共同维持塌陷坑的稳定性。当坑底散体下移时,边壁岩体因失去平衡将继续片落或滑移,边壁随之进一步外扩,直至达到新的平衡。由于塌陷坑边界外扩速度比地下回采工作面外扩速度慢,最终导致在新增采空区形成的新冒落拱再次发生大冒落,进而在地表形成新的塌陷坑。应用崩落采矿法的矿山在大面积开采时,通常会在地表先后形成多个塌陷坑。

小汪沟铁矿地表塌陷坑分布状态如图1所示。上位与中位采区从300 m分段至180 m分段,先后出露了13个塌陷坑;下位采区从60 m分段开采至0 m分段时,出露3个塌陷坑。出露的塌陷坑规则分布,除K13塌陷坑由开采独立小矿体形成外,其余塌陷坑均为开采主矿体的连续采空区形成的,且沿回采工作面的推进方向依次出露。塌陷坑间距主要取决于

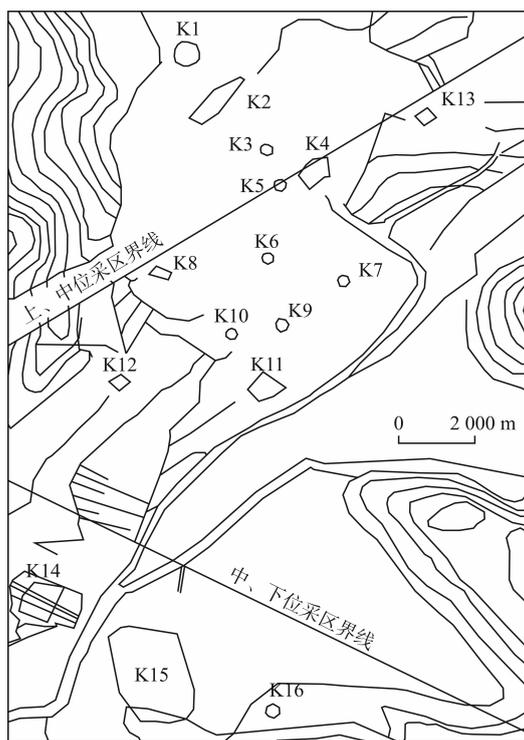


图1 小汪沟铁矿地表塌陷坑分布状态

Fig. 1 Distribution status of surface subsidence pits in Xiaowanggou Iron Mine

所在部位岩体的临界大冒落跨度,以塌陷坑中心位置岩体的临界大冒落跨度为自变量,主矿体连续开采的塌陷坑间距计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$D = 42.47 + \frac{74.36}{1 + \exp(9.3198 - 0.0687L_c)} + \Delta L \quad (1)$$

$$L_c = 2 \sqrt{\frac{2\sigma_c d}{\rho h_f} (H - h_f)} \quad (2)$$

式中: $D$ 为塌陷坑间距(m); $L_c$ 为采空区大冒落跨度(m); $\Delta L$ 为与采空区跨度的分段增量有关的补偿量, $\Delta L = 0 \sim 5$  m; $\sigma_c$ 为采空区顶板围岩的抗压强度(MPa); $d$ 为承压拱顶部围岩承受水平压力的等价厚度,与岩体结构有关,一般 $d = 1.0 \sim 2.0$  m; $H$ 为采空区底板埋深(m); $h_f$ 为地表弱化层厚度(m); $\rho$ 为采空区上覆岩体平均密度( $t/m^3$ )。

按式(1)计算出塌陷坑间距,沿地下回采工作面的推进方向,推测出下一个塌陷坑将出露的部位,该部位即为陷落的严防部位。在选择塌陷坑回填路径时,须严格避开这一部位,以保障回填废石卡车运输道路安全。

## 2 地表塌陷坑安全回填技术

在塌陷坑形成过程中,崩落或片落的散体对塌陷坑边壁的侧向支撑力随散体深度增大而增大,当散体深度达到一定值时,其侧向支撑力可完全限制围岩的

碎胀空间,由此控制塌陷坑边壁的进一步扩展,此时从表层到该位置起支撑作用的散体层,称为临界散体柱<sup>[14]</sup>。维持与增加临界散体柱的位置高度,保持与改善塌陷区边壁的支撑条件,是控制地表塌陷坑边界进一步外扩的重要途径。为尽可能地控制地表岩移范围,向塌陷坑回填废石是简单易行的有效方法,因此需保证足够的废石。小汪沟铁矿利用腰节子露天采场剥离的废石,以及地表磁滑轮甩弃的井下出坑废石回填塌陷坑,但废石量仍不足,于是同相邻的金昌铁矿合作,解决了回填废石的来源问题。

在采用废石回填塌陷坑时,回填时间对塌陷范围控制影响巨大。地表初始塌陷坑形成时,受下部矿体开采与塌陷区散体的双重影响,临界散体柱下降速度较快。例如:小汪沟铁矿下位采区的初始塌陷坑坑口长110 m、宽55 m、深35 m,体积约9.07万 $m^3$ ,由于各种原因推迟11天才开始回填废石,导致塌陷范围增大了27.5%。因此,为控制塌陷范围不再进一步扩大,需要及时充填塌陷坑,一般在冒落后1~2天,边壁围岩相对稳定时进行回填作业。回填强度越大越好,只有当回填速度不小于临界散体柱下降速度时,才能有效保持塌陷坑边壁的稳定。小汪沟铁矿从第12天开始回填塌陷坑,其中,金昌铁矿每班5台卡车运送岩石,小汪沟铁矿3台卡车,共8台卡车同时运岩回填,充填量达1.3万 $m^3/d$ ,使得塌陷区边界从开始回填之日起未再发生明显外扩。

塌陷坑边缘充填地点,则需要选择在坑底有良好的散体堆积,且堆积散体在下放矿下移时不会发生突然的大幅度下降而造成边壁失稳的位置,以避免在塌陷坑边缘卸放废石时遭受边壁片落或滑落危害。此外,还具备两个方向的充填条件,且这两个方向首选为相互垂直(见图2),使充填散体流动坡面互为支撑,以保障散体流动坡面的稳定性。



图2 塌陷坑充填路径

Fig. 2 Filling path of subsidence pit

为保障塌陷区边界不外扩,小汪沟铁矿回填废石高度要求不小于被保护区的地表高度。采取回填措施后,小汪沟铁矿地表塌陷区面积远小于地下采空区面积。冒落之前的采空区顶部边界与塌陷坑边界的连线

与水平面之间的夹角称之为陷落角。由剖面图测得, 实际陷落角  $67^{\circ} \sim 79^{\circ}$ , 平均值为  $76^{\circ}$  (见图 3)。

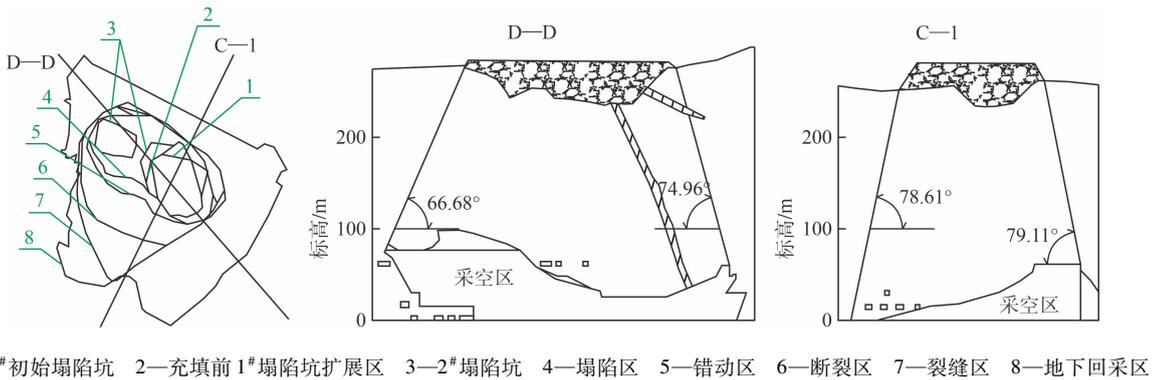


图 3 回填废石后的陷落角

Fig. 3 Collapse angle after backfilling with waste rock

小汪沟铁矿最大采深约 390 m, 按陷落角  $76^{\circ}$  估算, 塌陷面积不足地下回采面积的 12%, 且采深越大, 塌陷面积占比越小。深部倾斜矿体地表回填塌陷坑技术, 对控制地表岩移范围有效。

### 3 地表岩移区动态绿化技术

在地下采动岩移中, 根据地表破坏程度, 将采动岩移区分为塌陷区、错动区、断裂区、裂缝区与裂纹区等 5 区。其中, 塌陷区是采动岩移的主体, 对地表破坏程度最大, 其他 4 区岩体虽被不同程度的裂隙切割, 但每区内的岩体基本仍保持整体性。5 区内的岩体均呈动态变化, 其破坏形式存在逐级包含关系, 如裂缝区包含裂纹, 断裂区包含裂缝区与裂纹区, 错动区包含断裂区、裂缝区与裂纹区等。在地下采矿影响范围内, 5 区范围从低级 (裂纹区) 向高级 (塌陷区) 依次转化。针对采动岩移区各区特点, 分别采取如下动态绿化技术:

1) 塌陷区绿化。在塌陷坑回填到预定高度, 下坡方向废石充填体高出地表后, 对非采动活跃区充填废石堆体的上表面与坡面覆土后撒草籽, 春夏季节生长出绿草, 实现了动态绿化。

2) 错动区治理。错动区不改变地表岩层次序, 且往往不会破坏植被, 只是错动线破坏了土壤的保水能力。对此, 采用碎石与黏土及时充填错动线, 恢复地表土层的水土保持能力, 保护地表植被不受破坏。

3) 断裂区治理。断裂区内的被断裂体, 一般均与母体保持固体连接关系。因此, 被断裂线切割的岩体仍保持整体性, 且断裂区内的地表岩层次序不发生变化, 一般地貌也不发生明显变化。采用黏土充填或混合断裂线, 即可恢复地表土层的水土保持能力。

4) 裂缝区治理。在裂缝区内, 岩体的节理裂隙可能局部得到扩张, 但岩体整体性不被破坏, 地表岩层次序不发生变化, 一般土地的平整度也不发生变化。因此, 裂缝区裂缝对地表植被的破坏较小。由于

裂缝的可闭合特性, 在不受采动影响或采动影响逐渐减弱的部位, 通过降雨裂缝可自然闭合; 在受采动影响明显部位, 则可采用人工覆土或泥缝的方法, 维系地表土层的基本用途。

5) 裂纹区治理。裂纹区基本上不破坏地表土地的用途, 但会对地表建筑物的强度造成或多或少的破坏。地表裂纹的治理, 主要依靠降雨与刮风等充填泥土自然混合。

小汪沟铁矿应用动态绿化技术后, 塌陷区绿化面积占比达 87%, 错动区、断裂区、裂缝区与裂纹区的植被基本没被破坏, 有效维持了矿区生态环境 (见图 4)。



图 4 小汪沟铁矿动态绿化效果

Fig. 4 Dynamic greening effect in Xiaowanggou Iron Mine

## 4 结论

1) 应用崩落采矿法大面积开采铁矿石时, 沿地下回采工作面推进方向在地表规律出露多个塌陷坑。根据塌陷坑间距计算公式推算出下一塌陷坑出露的位置, 选择回填路径时必须避开该位置, 并从先出露塌陷坑一侧向后出露塌陷坑一侧回填, 可保障运输线路安全。

2) 小汪沟铁矿的生产实践表明, 利用矿山废石向塌陷区回填废石, 陷落角控制在  $76^{\circ}$ , 大幅缩小了地表塌陷与错动等岩移破坏范围。

3) 地下开采引起的地表塌陷是造成碳汇损失的主要因素,提出的非采动活跃区塌陷区内5区的动态绿化技术,可有效降低地表碳汇损失,维持矿区生态环境。

#### [参考文献]

- [1] 丁航行,任凤玉. 大结构参数无底柱分段崩落法的发展及设备需求[J]. 中国矿业,2012,21(10):109-111,116.
- [2] 任凤玉,丁航行,任思潼,等. 倾斜矿体分区崩落采矿法高效开采技术及应用[J]. 黄金,2020,41(9):66-71.
- [3] 王运敏,陆玉根,孙国权. 崩落法深部开采岩移及地表塌陷规律分析研究[J]. 金属矿山,2015(6):6-9.
- [4] 徐曲,王玉平,曹华兵,等. 缓倾斜厚大矿体崩落法开采对临近构筑物的影响[J]. 安全与环境工程,2021,28(4):35-40.
- [5] VILLEGAS T T, NORDLUND E E, DAHNER-LINDQVIST C C. Hangingwall surface subsidence at the Kiirunavaara Mine, Sweden[J]. Engineering Geology,2011,121(1/2):18-27.
- [6] 中国钢铁工业协会. 降低铁矿石对外依存度,中国积极推进资

- 源保障“基石计划”[J]. 现代矿业,2022,38(4):248.
- [7] 王鑫. 中国争取2060年前实现碳中和[J]. 生态经济,2020(12):9-12.
- [8] 张松波. 我国金属矿山碳排放现状及降碳路径探讨[J]. 冶金经济与管理,2022(4):8-11.
- [9] 李海英,任凤玉,丁航行. 双碳背景下铁矿崩落法低碳高效开采理论模型构建[J]. 化工矿物与加工,2023,52(5):18-23.
- [10] 宋钊刚,胡静云. 崩落法开采地表塌陷坑沉降变形监测研究[J]. 采矿技术,2021,21(1):84-88.
- [11] 李海英,任思潼,丁航行,等. 崩落法分区交界矿体连续开采技术[J]. 金属矿山,2019(9):41-44.
- [12] 李海英,任凤玉,赵云峰,等. 金属矿空区冒落诱发地表塌陷范围的计算模型探讨[J]. 矿冶工程,2020,40(5):5-8.
- [13] 刘娜. 小汪沟铁矿分区崩落法开采岩移控制技术研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.
- [14] 李海英,任凤玉,陈晓云,等. 深部开采陷落范围的预测与控制方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(11):1624-1627.

## Surface subsidence pit exposure patterns and dynamic greening in Xiaowanggou Iron Mine

Zhao Yunfeng

(West Steel Group Mining Co., Ltd. the Lighthouse)

**Abstract:** The caving mining method is widely used in underground iron ore mining, but the resulting surface subsidence damages vegetation, leading to significant carbon sink losses. Safely controlling the extent of surface subsidence and implementing dynamic greening are common challenges that need to be addressed for low-carbon mining. To tackle this issue, the exposure patterns of surface subsidence pits are statistically analyzed. Using the calculation formula for the distance between subsidence pits, the exposure locations of the pits along the advancing direction of the mining working face are predicted, identifying dangerous areas to avoid during truck backfill of waste rock. Two perpendicular directions around the subsidence pits are selected, where the lower edges are well-covered by loose materials, as backfill sites for waste rock. Trucks transport waste rock from the open-pit stripping operation and safely backfill the subsidence pits in these two perpendicular directions. After the subsidence pits are backfilled to the predetermined height, dynamic greening with soil covering is performed in non-active mining areas, while surface cracks are filled with gravel and clay. After implementing these measures, the greening area of the subsidence zone in Xiaowanggou Iron Mine reached 87%, effectively maintaining the ecological environment of the mining area and significantly reducing carbon sink losses.

**Keywords:** underground mining; surface subsidence; subsidence pit backfill; dynamic greening; carbon sink loss