

杏山铁矿露天转地下覆盖层回填自然分级研究*

甘德清¹ 齐宝军² 卢宏建¹ 孙建珍² 陈超¹
(1. 河北联合大学交通学院;2. 首钢矿业公司)

摘要 露天转地下覆盖层的自然分级现象,对使用崩落法开采矿山的通风、温度、矿石损失贫化等指标都有较明显的影响,但对于覆盖层在回填时就形成合理自然分级,国内研究尚处于空白阶段。以首钢杏山铁矿为研究背景,采用理论分析、物理模拟试验、现场排土场试验等研究手段,对露天转地下覆盖层回填自然分级规律进行了深入系统的分析,研究结果得出杏山铁矿采用倒排排土场废石,人工回填形成合理结构和厚度的自然分级覆盖层是可行的。

关键词 露天转地下 覆盖岩层 回填 自然分级

Study On Natural Grading Of Covering Layer Backfilled Open Pit To Underground Of Xingshan Iron Mine

Gan Deqing¹ Qibaojun² Lu Hongjian¹ Sun Jianzhen² Chen Chao¹
(1. Jiaotong College, Hebei United University; 2. Shougang Mining Co.)

Abstract The cover of the open pit to underground natural phenomena on the use classification of the mine caving mining ventilation, temperature, dilution and other indicators of ore loss have a more significant impact, but when the coating in the filling to form a reasonable natural grading, domestic research is still in the blank stage. The background for the study of Shougang Xingshan iron mine, using theoretical analysis, physical simulation, field trials and other research tools, the coverage of the open pit to underground layer of backfill laws of the natural classification system for in-depth analysis of the results come Xingshan iron mine waste rock dump using artificial backfill to form a reasonable hierarchical structure and thickness of the natural cover is feasible.

Keywords Open pit to underground, Covered rock, Backfill, Natural classification

我国冶金矿山目前 85% 以上的矿石量来自于露天开采,而经过近 10 a 的发展,国内大部分露天矿山企业均已进入了中后期开采,即将或者已经面临着露天采场转入地下生产阶段的过渡时期。我国年生产能力在 300 万 t 以上的露天矿山企业有 16 座,其中有 10 座设计深度达到 200 m(封闭圈以下)以上。目前多数矿山企业有几十年的历史,有的矿山已经进入到中晚期。全国正在和即将进入露天转地下开采的矿山生产能力达到 2 000 万 t^[1-2]。

目前露天转地下的矿山大多采用崩落法开采,而采用崩落法开采的前提之一就是前期要形成覆盖岩层。目前覆盖层的形成方式有多种,针对首钢杏山铁矿露天转地下的过程中面临的排土场倒运和挂帮矿开采引起上盘边坡滑塌覆盖露天采场的现状,适合采用倒排排土场废石,人工回填形成露天转地下覆盖层。

国内已有部分矿山进入露天转地下开采,并取得了一定的经验。张国建^[3]通过室内试验研究证实,在放矿过程中自然分级现象是松散覆盖岩层客观存在的性质之一,对使用崩落法开采的矿山开采效果有较明显的影响。张志军^[4]在对松散岩体特性及流动力学理论分析的基础上,通过室内物理模拟试验,研究了放矿过程中松散覆盖岩层移动规律,揭示了覆岩流动过程中松散体的自然分级现象,为覆盖岩层的形成和级配的构成提供了理论依据。

覆盖层的合理自然分级对采场渗透系数、采场漏风系数、温度、矿石损失贫化等指标有明显的影响,但对于覆盖层在回填时就形成合理自然分级,国内研究尚处于空白阶段。为此以首钢杏山铁矿为研

* “十一五”国家科技支撑计划项目(编号:2006BAB02A17)。
甘德清(1962—),男,教授,063009 河北省唐山市新华西道 46 号。

究背景,采用理论分析、物理模拟试验研究手段,对杏山铁矿露天转地下覆盖层回填自然分级进行了深入系统的研究,使覆盖层在回填时就形成合理的自然分级,更好地控制矿山的通风、温度、矿石损失贫化等指标。

1 覆盖层回填料动力学原理与运动状态

覆盖层回填料的运动规律从物理学的角度分析,是从运动状态通过能量转换达到另一种运动状态的过程。因此可以借助能量转换原理并利用运动学原理对回填料整个运动过程进行全面分析^[5]。

通常,回填料运动过程中能量转换及诱发因素如图 1 所示。

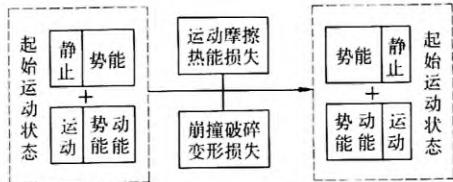


图 1 回填料运动能量转换分析

回填料按其初始运动状态是静止或运动可分为静态滚动和动态滚动。

1.1 静态滚动

为了便于研究,取一滚石代替回填料,滚石置于坡面上(露天坑内的回填到形成一定坡面后开始进行研究),如图 2 示。 $v=0$,若能滚动,必然以 A 为支点,故其滚动条件取决于对 A 点的力矩 J。

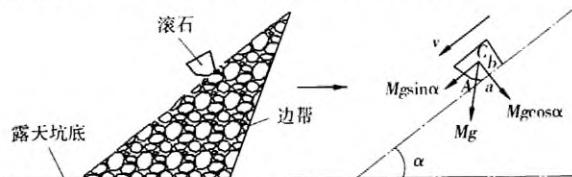


图 2 静态滚动

$$J = a \cdot M g \sin \alpha - b \cdot M g \cos \alpha. \quad (1)$$

$J=0$ 时,岩块处于极限平衡状态; $J<0$ 则岩块静止不动; $J>0$ 则岩块开始滚动,此时岩块的重心 C 位于支点 A 的外侧。

1.2 动态滚动

回填料在回填过程中,多以一定速率降落在坡面上,此时 $v>0$,则有

$$J = a \cdot M g \sin \alpha + a \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} - b M g \cos \alpha. \quad (2)$$

如 $J>0$,则岩块滚动。

1.3 滚动运动速度及滚动距离

利用能量守恒原理及滚石能量转换分析的结果有以下结论成立:

$$MgH - Mg \cdot h - E_{\text{损耗}} = \frac{1}{2} M v^2, \quad (3)$$

式中, M 为滚石的质量; g 为重力加速度; H 为滚前高程; h 为滚后高程; $E_{\text{损耗}} = E_{\text{损1}} + E_{\text{损2}}$; $E_{\text{损1}}$ 为热能损失; $E_{\text{损2}}$ 为变形损失。

结合回填料已形成的边坡角 α ,并将 $E_{\text{损耗}}$ 按比例折合成 Mgh ,可将上式简化为

$$MgH - Mgh \cdot \cot \alpha - Mgh \cdot \cot \alpha \cdot \gamma = \frac{1}{2} M v^2, \quad (4)$$

$$MgH - Mgh \cdot \cot \alpha (1 + \gamma) = \frac{1}{2} M v^2. \quad (5)$$

令 $K = 1 + \gamma$, 可得

$$MgH - Mgh \cdot \cot \alpha \cdot K = \frac{1}{2} M v^2, \quad (6)$$

其中, γ 为 $E_{\text{损耗}}$ 与 Mgh 之比; K 为阻力特性系数

此时,阻力特性系数 K 已包含在滚动过程中的变形及热耗损失。此系数 K 可由现场试验拟合测定。

由(6)式可求出滚动速度 v

$$v = \sqrt{gH(1 - \cot \alpha \cdot K)} = \mu \cdot \sqrt{2gH},$$

$$\mu = \sqrt{1 - \cot \alpha \cdot K}. \quad (7)$$

1.4 滚动终止条件

结合现场观测与理论分析,可见 K 值对回填料滚动起着决定性因素,边坡面平整度与硬度对 K 值影响很大:平直的坡面 K 值小,反之 K 值很大;坡面较软的 K 值较大,反之 K 值较小。除此之外,尚有几项因素影响回填料滚动:

(1)回填料自身形状不规则,即长短轴尺寸之比相差很大,如平板状、条状等,其难以达到 $J>0$,难以构成滚动所必备的条件。

(2)较小回填料滚动的路径中,遇到较大的回填料阻挡,难以逾越。

2 覆盖层回填自然分级的影响因素分析

在覆盖层回填过程中,回填散料在重力势能和运动冲量的作用下会产生自然分级,其自然分级的程度和各种粒组的分布情况受多种方面因素的制约。主要影响因素有:

(1)回填料的排弃、倾倒高度。排弃、倾倒高度决定了回填料沿回填体坡面滚落的势能(能量),对回填体坡面上粒度的自然分级效果和粗粒、中等粒度的分布高度将产生直接的影响,是影响覆盖层回填自然分级效果的主控性因素。

(2) 回填料的粒度构成情况。回填料的粒度成分,决定了回填料的初始动能和势能,决定了自然分级后沿回填坡面分布的粒组的粒度构成,以及粒度在坡面上的分布情况。

(3) 初始坡面的粗糙和坚硬程度。回填体的坡面和排土场坡面类似,可以分为土质坡面、块石坡面和混合坡面3种类型。土质坡面以砂、土为主,摩擦系数小,坡面较为松软,遇到冲击的时候变形较大;岩石边坡主要以块石为主,基本不含粉状物料,自然分级明显(上细下粗),摩擦系数较大,坡面遇到冲击变形较小。混合边坡则介于这两者之间,而回填体的边坡面应属于混合边坡。

3 回填料自然分级物理模拟试验研究

3.1 杏山铁矿覆盖层的结构与厚度

根据物理模拟与数值模拟实验分析^[5],考虑露天转地下覆盖层与露天底部矿体的空间位置、地下放矿过程中松动体和放出体的空间关系,以及对覆盖层防窜风、防渗流、防寒、防泥石流等安全要求,杏山铁矿露天转地下覆盖层分2层铺设,整体下移层 H_1 和流动层 H_2 如图3所示,其下方为第1分段的矿石层 H_3 。

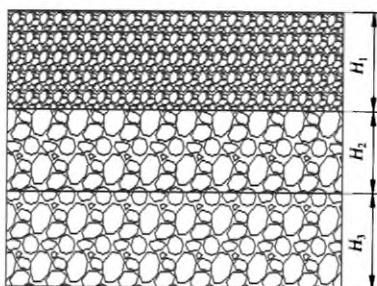


图3 覆盖层的结构

3.1.1 流动层

首先在露天坑内人工回填形成覆盖层的最下层,即流动层。

根据放矿椭球体理论,该层与露天底下矿石分层存在松动体与放出体的关系,为防止矿石放出过程中的过早贫化,防止渗透破坏带走细小颗粒形成泥石流,该层理想的粒度结构应接近采场矿石层粒度结构。但考虑杏山排土场废石实际粒度组成,该层粒度结构要求为:

(1) 该层回填物粒度不小于20 mm(筛掉细粒结构)。

(2) 回填物料中 ≤ 5 mm以上的粒度含量不小于40%。

(3) 该层厚度不小于20 m。

3.1.2 整体下移层

在流动层上继续人工回填形成覆盖层的上层,即为整体下移层。

该层的作用主要是防止窜风,迟滞露天雨水下渗,并下温度控制等,因此该层的物料粒级组成要满足孔隙度、密实度的要求。根据排土场废石的粒度构成情况,该层的主要粒度成分要求为:粒径小于5 mm的细颗粒与大于5 mm的粗颗粒在该层中的比例为3:7。

该层厚度不小于25 m。

覆盖层的整体厚度不小于45 m。

3.2 物理模拟试验研究

3.2.1 试验模型

本次物理模拟试验目标是通过物理试验来分析回填料自然分级的可行性与合理性。因此,所建立的模型能实现此目的即可,为此,本次试验模型选取原则是经济,简便。物理模型如图4所示,模型模拟比例1:50。



图4 试验模型

3.2.2 试验材料与配比

试验材料由不同粒度的石料混合组成,石料总数1 000个。粒度配比见表1。

表1 试验材料配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>20	134	13.40	13.40
16~20	28	2.80	16.20
10~16	260	26.00	42.20
5~10	330	33.00	75.20
2~5	232	23.20	98.40
<2	16	1.60	100.00

3.2.3 模拟方案

用铁锹模拟铲运机,在模型30、40、50 m标高进行试验材料回填模拟。

3.2.4 试验分析

(1) 自然分级厚度分析。回填料不同倒卸高度

模拟分级厚度如表 2 所示,回填料不同倒卸高度模拟最终分级结果如图 5 所示。

表 2 回填料自然分级厚度

回填料倒卸高度 模型高度/cm	粒度试验厚度/cm			粒度模拟厚度/m		
	细粒	中粒	粗粒	细粒	中粒	粗粒
60	30	15.5	26.0	18.5	7.75	13.00
80	40	22.0	37.0	21.0	11.00	18.50
100	50	41.5	27.0	31.5	20.75	13.50
						15.75

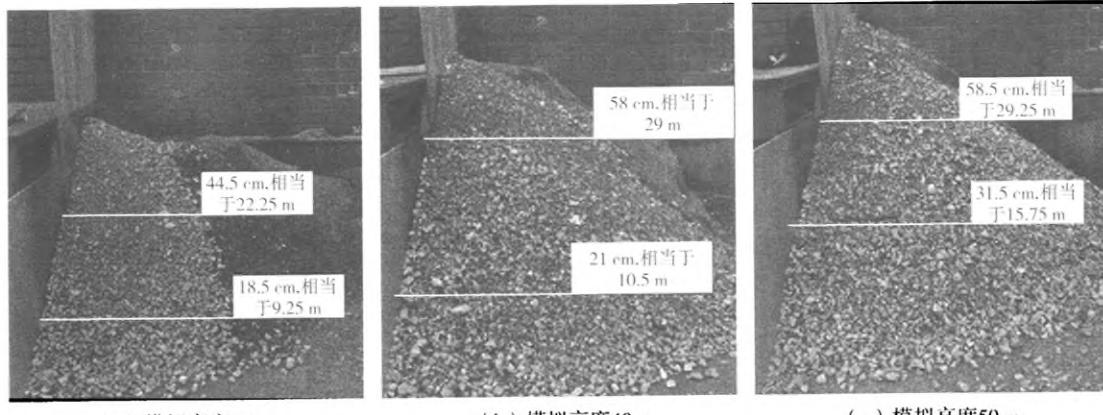


图 5 回填料不同高度倒卸模拟最终分级

(2) 自然分级粒度分析。本次物理模拟试验回填料倒卸高度 50 m 的模拟是在 30 m、40 m 基础上进行的,因此自然分级粒度分析只对 50 m 高度的模拟进行了分析。回填料自然分级的细粒、中粒、粗粒 3 部分的配比如表 3~表 5 所示。

表 3 回填料分级后细粒配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>20	26	2.60	2.60
16~20	22	2.20	4.80
10~16	268	26.80	31.60
5~10	386	38.60	70.20
2~5	292	29.20	99.40
<2	6	0.60	100.00

表 4 回填料分级后中粒配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>20	110	11.00	11.00
16~20	26	2.60	13.60
10~16	402	40.20	53.80
5~10	356	35.60	89.40
2~5	104	10.40	99.80
<2	2	0.20	100.00

根据回填料自然分级的细粒、中粒、粗粒 3 部分的配比表可以看出:

在模拟试验过程中,初期回填料流动性差,自然分级并不明显。达到一定规模后,分级现象都很明显。由回填料不同倒卸高度模拟分级厚度表和回填料不同倒卸高度模拟最终分级结果图可以看出自然分级分为细粒、中粒、粗粒 3 部分。随着回填料倒卸高度的增加,细粒和粗粒回填层厚度呈增长趋势,中粒回填层厚度呈先增长后下降趋势。

表 5 回填料分级后粗粒配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>20	456	45.60	45.60
16~20	96	9.60	55.20
10~16	428	42.80	98.00
5~10	2	2.00	100.00
2~5	0	0.00	100.00
<2	0	0.00	100.00
>20	456	45.60	45.60

细粒部分粒径小于 5 mm 的比例为 29.8%, 5~16 mm 为 65.4%, 大于 16 mm 为 4.8%。

中粒部分粒径小于 5 mm 的比例为 10.6%, 5~16 mm 为 75.8%, 大于 16 mm 为 13.6%。

粗粒部分粒径小于 5 mm 的比例为 0, 5~16 mm 为 44.8%, 大于 16 mm 为 55.2%。

3.3 现场排土场自然分级试验分析

人工回填形成覆盖层的过程与排土场排倒废石原理是相同的,为此采用现场 20 m 高的排土场进行了自然分级的现场试验分析,现场试验模型如图 6 所示。

(1) 自然分级厚度分析。现场排土场自然分级的细粒、中粒、粗粒 3 部分效果明显,经过现场测量自然分级后的排土场坡脚和分级点高程换算后得出细粒分级厚度 7.5 m, 中粒 6.7 m, 粗粒 5.8 m。

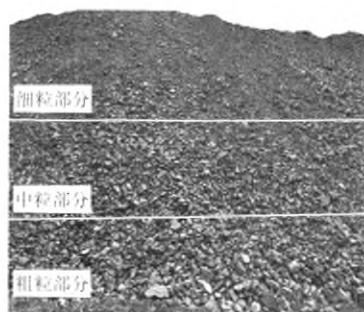


图6 现场排土场自然分级

(2) 自然分级粒度分析。对自然分级不同粒度的废石选取有代表性的3个点进行取样,根据情况每个取样点取样1000 kg。对取样废石进行筛分,依次过100、60、40、20、10、5 mm的筛子,分别对筛分后粒径的废石进行称量;100 mm以上的废石用直尺测量,然后称重。筛分结果见表6~表8。

表6 回填料分级后细粒配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>100	22	2.20	2.20
60~100	20	2.00	4.20
40~60	48	4.80	9.00
20~40	101	10.10	19.10
10~20	206	20.60	39.70
5~10	342	34.20	73.90
<5	261	26.10	100.00

表7 回填料分级后中粒配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>100	108	10.80	10.80
60~100	126	12.60	23.40
40~60	272	27.20	50.60
20~40	197	19.70	70.30
10~20	138	13.80	84.10
5~10	88	8.80	92.90
<5	71	7.10	100.00

表8 回填料分级后粗粒配比

粒度直径/mm	筛余/个	筛余百分率/%	累计筛余百分率/%
>100	260	26.00	26.00
60~100	281	28.10	54.10
40~60	162	16.20	70.30
20~40	101	10.10	80.40
10~20	82	8.20	88.60
5~10	61	6.10	94.70
<5	53	5.30	100.00

根据排土场自然分级的细粒、中粒、粗粒3部分的配比表可以看出:细粒部分粒径小于5 mm的比例为26.1%,中粒部分和粗粒部分粒径大于100 mm为36.8%。

通过物理模拟试验和现场排土场自然分级试验可以看出回填料的物理模拟自然分级厚度和粒度效果和结构合理,因此杏山铁矿采用倒排排土场废石,人工回填形成自然分级的覆盖层是可行的,结合试验、杏山铁矿露天坑现状、覆盖成结构和厚度的要求,确定回填覆盖层台阶高度为50 m。

4 结 论

(1) 通过覆盖层回填料动力学原理与运动状态理论分析得出主要影响分级效果的因素有回填料排弃、倾倒高度、回填料的粒度构成、初始坡面的粗糙和坚硬程度。

(2) 自然分级过程中,初期回填料流动性差,自然分级并不明显。达到一定规模后,分级现象都很明显,分为3部分,细粒、中粒、粗粒。随着回填料倒卸高度的增加,细粒和粗粒回填层厚度呈增长趋势,中粒回填层厚度呈先增长后下降趋势。

(3) 通过物理模拟试验和现场排土场自然分级试验可以看出,采用回填方式形成覆盖层时,可以采用高台阶1次回填形成覆盖层,只要高度控制得当,则可通过散体岩石的自然分级较为准确地控制覆盖层不同高度的粒度结构,同时高台阶1次回填形成的覆盖层粒度结构呈渐变的特点,更便于覆盖层功能的发挥。高台阶1次回填形成覆盖层的方法工艺简单可靠,施工周期短,经济效益好。

参 考 文 献

- [1] 杨福军,高海川.露天转井下矿山过渡期技术问题的研究与实践[J].金属矿山,2006(2):18-21.
- [2] 卢宏建,高永涛,吴顺川.石人沟铁矿露天转地下开采生产规模优化[J].北京科技大学学报,2008,30(9):67-71.
- [3] 张国建,徐国权.崩落法松散覆盖岩层自然分级对矿石损失贫化的影响[J].金属矿山,2010(5):21-25.
- [4] 张志军,明世祥,宋洪勇.崩落法采场松散覆盖岩层移动规律研究[J].采矿技术,2008,8(2):11-13.
- [5] 陈柏林,赵 兵,张四维.矿山排土场滚石运动规律及其灾害防治的研究[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(S):127-135.

(收稿日期 2011-09-11)

欢 迎 投 稿

欢 迎 订 阅