

基于 PCBC 软件潘家田铁矿自然崩落法 拉底顺序研究分析

Research and Analysis on the Undercutting Sequence of Block Caving in Panjiatian
Iron Mine Based on PCBC Software

刘育明^{1,2}, 罗阳勇³, 汪浩浩^{1,2}, 王宏勋^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100083; 2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038;
3. 四川安宁铁钛股份有限公司, 四川 攀枝花市 617200)

摘要:本文在研究国内外部分矿山自然崩落法在倾斜矿体中的基础上, 基于 PCBC 软件并结合矿体可崩性、矿体形态、诱导应力、岩体构造特征以及开采安全等因素对潘家田铁矿自然崩落法拉底顺序进行了研究。研究表明, PCBC 软件在最佳放矿高度确定、可采矿量计算、拉底顺序确定和生产进度计划编制等方面具有应用价值, 为类似矿井自然崩落法拉底顺序的确定提供参考价值。

关键词:自然崩落法; 倾斜矿体; 拉底顺序

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0045-08

Abstract: Based on the study of block caving method in inclined ore bodies in some mines at home and abroad, this article uses PCBC software and combines factors such as ore body collapsibility, ore body morphology, induced stress, rock mass structure characteristics, and mining safety to study the undercutting sequence of block caving method in Panjiatian Iron Mine. The research results indicate that PCBC software has practical value in determining the optimal mining height, calculating the mineable amount, determining the undercutting sequence, and preparing production schedule plans, providing reference value for determining the undercutting sequence of block caving method in similar mines.

Key words: block caving method; inclined orebodies; undercutting sequence

1 前言

自然崩落法是一种大规模、低成本的采矿方法之一, 具有效率高、规模大、凿岩工程量小、成本低等优点^[1-2]。其实质是用凿岩爆破方法在矿体内某个水平采出一层矿石, 形成拉底空间, 拉底导致岩体应力重分布, 当地应力值超过岩体强度时, 岩体开始崩落^[3], 并将崩落的矿石从阶段水平放出, 随着拉底空间的扩大和崩落矿石不断放出, 上部矿体在诱导应力和重力作用下持续崩落并不断向上扩展, 直至覆盖岩层崩落, 并产生地表塌陷。自然崩落法的拉底顺序是该方法实施中的核心环节, 直接影响矿石崩落效率、底部结构稳定性及开采经济效益。拉底

顺序选择合理, 能尽快回收投资、确保持续崩落效果、拉底巷道和底部结构稳定, 以及提升生产能力, 对矿山开采具有重要的意义^[4]。

2 自然崩落法国内外应用案例分析

1) 加拿大 Bell 矿

加拿大 Bell 矿矿体倾角 45°, 矿体中等稳固, IRMR 值 45 ~ 65, 矿体下盘围岩稳固, 该矿采用自然崩落法进行开采, 倾斜“蛋托式”布置, 具体如图 1 所示, 生产规模 5 000 t/d^[5]。采用这种布置形式, 底部结构能更贴近矿体, 在降低损失贫化的同时, 可以有效减少采切工程量。

2) 加拿大 Cassiar 矿

加拿大 Cassiar 矿矿体倾角 45°, 岩石稳固性差, IRMR 值 15 ~ 25, 矿体埋深约 500 m, 该矿采用自然崩落法进行开采, 按照“截断的无底柱分段崩落法方式”布置, 具体如图 2 所示, 生产规模为 3 000 t/d。采用这种布置形式, 眉线支护可以从上分层打长锚

[作者简介] 刘育明(1964—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事金属矿山采矿设计咨询与技术研究工作。

[引用格式] 刘育明, 罗阳勇, 汪浩浩, 等. 基于 PCBC 软件潘家田铁矿自然崩落法拉底顺序研究分析[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(3): 45-52.

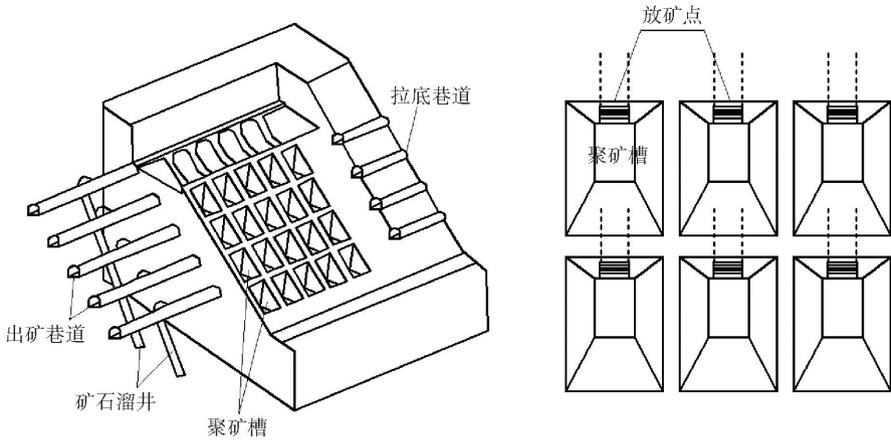


图1 倾斜“蛋托式”布置示意图

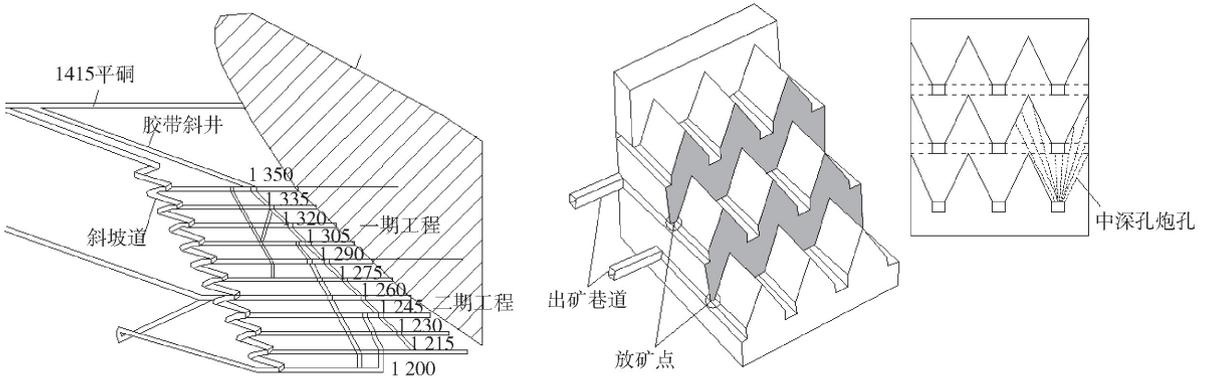


图2 截断的无底柱分段崩落法方式布置示意图

索,使底部结构更加稳定,支护效果更好。

3) 铜矿峪铜矿

铜矿峪铜矿是中国第一座自然崩落法矿山,目前生产规模为900万t/a^[6],该矿位于山西省垣曲县,矿体倾角约50°,矿岩稳固性中等,采用“主层+副层方式”布置,具体如图3所示,该布置形式配合喷锚网+长锚索支护,可以有效提高底部结构稳

定性。

3 潘家田铁矿拉底顺序分析

3.1 矿山概况

潘家田铁矿位于四川省攀枝花市,前期对2295~1510m标高段矿体进行露天开采,后期对1510m标高以下矿体进行地下开采。目前露天开采至1690m水平,预计2029年露天闭坑,转入地下

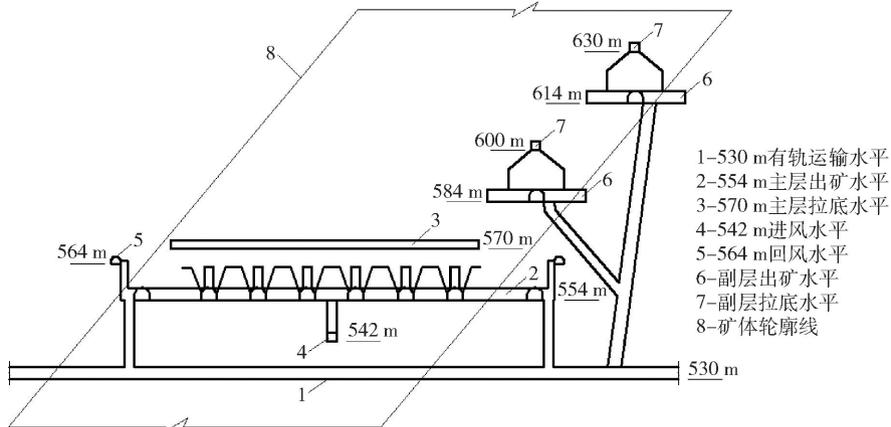


图3 铜矿峪铜矿“主层+副层方式”布置示意图

开采。

矿区含矿基性-超基性岩体,属岩浆结晶分异的产物,自上而下岩体基性程度增高,岩石的颜色由浅变深,矿石由贫变富。岩体可划分为辉长岩、辉石岩两个岩相带,岩体在成岩成矿过程中是一个连续的不可分割的有机整体,岩层与矿体(层)、夹石与矿石之间没有截然的界线,只是含铁量程度不同而已。

矿区共圈定了2条主要矿体,编号为①、②号矿体,①号矿体为次要矿体,②号矿体为主要矿体。①号矿体为层状、似层状矿体,产于辉长岩相带的下部,其形态产状与岩体一致,走向为东西向,倾向180°左右,倾角为40°左右。①号矿体东西长约1000 m,矿体平均厚度32.73 m,全为低品位铁矿石组

成的矿体。铁矿石平均品位:TFe-17.90%、TiO₂-7.89%、V₂O₅-0.15%。②号矿体为层状、似层状矿体,产于辉石岩相带,其形态产状与岩体一致,走向为东西向,倾向约180°左右,倾角为40°左右,②号矿体东西长约1400 m,矿体明显受含矿岩体的控制,也受底板围岩的控制,矿层随底板围岩波动而上下起伏。矿体平均真厚度42.76 m。矿体均由工业矿石组成,铁矿石平均品位为TFe-29.62%、TiO₂-12.29%、V₂O₅-0.27%。

3.2 可崩性评价

一般岩石可崩性评价可分为五级,分别采用RQD值、Q分类及RMR指标等岩体分类结果进行矿岩可崩性评价^[7],可崩性分级见表1。

表1 可崩性分级表

级别	RQD(0~100)	Q(0.01~100)	RMR(0~100)	可崩性类别	破碎特性
I	<25	<0.09	<25	极易崩	极破碎
II	25.01~50	0.1~0.99	25.01~50	易崩	不破碎
III	50.01~70	1.0~3.99	50.01~70	中等可崩	中等破碎
IV	70.01~90	4.0~39.99	70.01~90	难崩	大块较多
V	90.01~100	>40	90.01~100	极难崩	大块多

由于该铁矿富矿体和贫矿体节理裂隙发育程度存在差异,因此对富矿和贫矿可崩性分别进行分析

和评价,考虑RQD值、岩体Q值、RMR指标等可崩性参数统计见表2^[8-9]。

表2 可崩性参数特征值统计表

评价区域	平均节理间距/m	节理密度条/m	Q值	RQD值/%	RMR指标	可崩性分级
贫矿体	0.28	3.6~4.3	4.8	58	50	中等可崩
富矿体	0.26	3.8~5.2	3.3	52	47	可崩

从表2结果可知,该铁矿含矿岩体的整体可崩性为中等可崩。通过现场调查发现,对于富矿体而言,矿岩节理裂隙发育,可崩性良好,而贫矿体则节理裂隙发育较少,预测可崩性可能介于中等可崩至难崩之间。

3.3 拉底顺序影响因素

该铁矿矿体倾角约40°,矿岩中等稳固,可崩性为中等可崩,设计采用自然崩落法进行开采,按照“主层+副层方式”进行布置,具体如图4所示。根据矿体形态,本次设计分三个中段进行开采,通过采用PCBC软件计算,总放出矿量为2.05亿吨,平均放矿高度为110 m,具体如图5所示。

自然崩落法拉底顺序的确定需要综合考虑矿体

可崩性、矿体形态、诱导应力、岩体构造特征、矿体品位分布等因素。自然崩落法矿山初始与持续崩落过程有影响。

1) 矿体可崩性

矿岩的可崩性以及崩落规律对整个工艺应用的成败起着至关重要的作用^[10]。对于矿岩可崩性较差的矿体,需要采用一些特殊的拉底顺序。例如为了确保矿体能够持续崩落,最好的拉底顺序是朝着高应力方向推进,但采用这种方法就会在回采过程中出现应力集中现象,对底部结构巷道产生很大的破坏,超前拉底方式有助于底部结构中巷道的应力释放,如果在生产过程中采用前进式拉底和优化支护方式可以较好的解决这些问题^[11-12]。

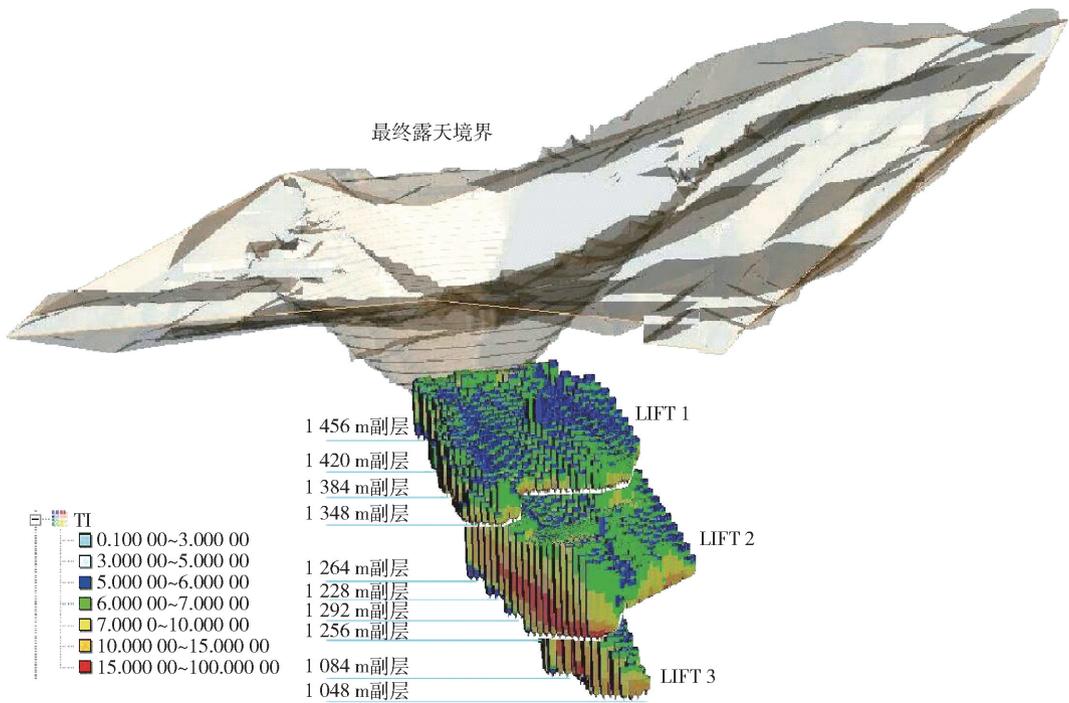


图4 自然崩落法布置示意图

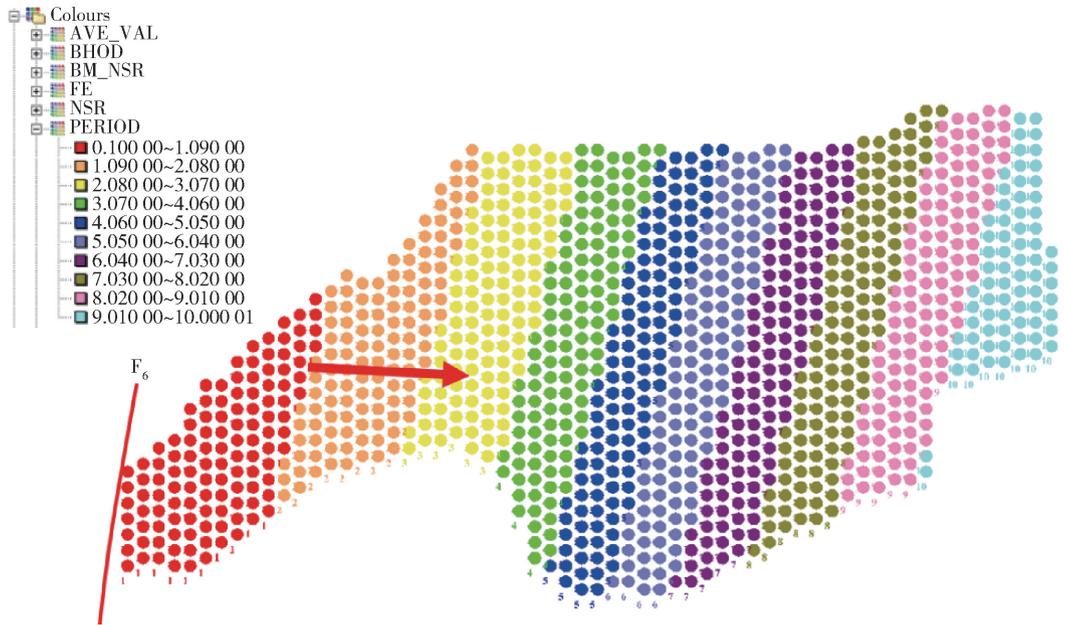


图5 拉底顺序 I 布置示意图

针对潘家田铁矿矿体的形态特征以及给定的岩体条件,对潘家田铁矿岩矿体采用 RQD 值、Q 分类、RMR 及 MRMR 指标方法进行了可崩性分析与评价。可知潘家田铁矿工业矿体可崩性为易崩至较易崩,低品位矿体可崩性为中等可崩至较难崩,上盘岩体(东部)可崩性为较难崩,上盘岩体(西部)为中等可崩至较难崩。

2) 矿体形态

矿体形态对于拉底顺序选择有很多限制条件,对于不同的拉底顺序应当进行对比分析。如果初始崩落点选择矿体较窄的区域,初始崩落就很困难;选择矿体较厚的区域,初始崩落就会比较容易。对于生产能力要求不高的情况下,拉底应选择从矿体较窄的地段开始,这样能让矿岩有足够的时间破裂,对

于矿石块度控制较好。但是采用这种方式需要比较大的拉底面积,对于长期生产中,矿块能实现稳定的崩落速率^[13-14]。

潘家田矿床为岩浆晚期分异层状矿床。矿体走向近东西向,向南倾斜,倾角约40°。矿区主要有2条矿体,编号为①、②号矿体,①号矿体为次要矿体,②号矿体为主要矿体。①号矿体位于②号矿体的上部。岩层与矿体、夹石与矿石之间没有截然的界线,只是含铁量程度不同。①号矿体为层状、似层状矿体,产于辉长岩相带的下部,其形态产状与岩体一致;走向为东西向,东西长约1 000 m,倾向180°左右,倾角为40°左右,沿倾向控制斜深80~1 140 m;矿体平均厚度32.73 m,全部为低品位铁矿石。②号矿体产状与①号矿体一致,在F1断层西盘矿体整体较F1断层东盘矿体较厚;矿体东西长约1 400 m,沿倾向控制斜深220~1 200 m;矿体平均真厚度42.76 m;整个矿体均为工业矿体。

3) 诱导应力

在自然崩落法回采过程中,应对不同拉底顺序带来的诱导应力的变化引起重视,这对于井巷的稳定性以及崩落块度的控制具有重要的意义。不同拉底方式及拉底过程中应力变化规律是自然崩落法在矿山成功应用的关键^[15]。例如推进方向与主应力方向垂直,会引起前方支撑带的应力集中,并随着拉底推进逐渐增加,这会增加拉底巷道和出矿水平巷道破坏的可能性。但是如果合理利用诱导应力,对于克服岩石强度、实施诱导崩落、控制崩落矿石块度是有利的。

潘家田铁矿现场水压致裂地应力测量各测点数据正常,其压力记录曲线标准,破裂压力峰值确切,各个循环重复测量的规律性很强,压裂参数具有良好的一致性,测量曲线可信,结果可靠。DH02钻孔最大水平主应力值为7.52~17.86 MPa,最小水平主应力值为4.54~12.98 MPa:

按照水压致裂应力测量理论,铅直主应力可以按其上覆岩层的重力进行估算。DH02钻孔各测点的水平主应力最大值(SH)和最小值(Sh)线性回归方程为

$$SH = 5.97 + 0.023D \quad (1)$$

$$Sh = 3.35 + 0.018D \quad (2)$$

$$Sv = 0.00 + 0.031D \quad (3)$$

式中, SH 为水平最大主应力; Sh 为水平最小主应力; Sv 为铅直主应力。

4) 岩体构造特征

随着拉底前锋线的推进,会对矿体内原有的构造特征产生影响。如果矿体内存在较大的断裂构造,在选择拉底顺序时应引起足够重视。从控制放矿角度,如果选择矿岩比较破碎的地段,初始产量虽然达到要求,但是在放矿过程中因为块度过小,会导致形成“烟囱”式放出体,后期生产将会产生较大的矿石损失和贫化。但是从底部结构的稳定性考虑,初始拉底位置应选择在矿岩相对破碎的地段,倘若从岩石稳定地段向破碎地段推进,这样易引起底部结构承受较大的应力,最终不利于底部结构的稳定。

5) 品位分布

矿体的品位分布和合理的拉底顺序是保证矿体经济效益的主要因素,因此很多采用自然崩落法矿山首采区选择在矿石品位高的地段,然后逐渐向外发展。但是在确定拉底顺序时不能仅仅考虑品位的因素,而忽视了后期持续生产。

3.4 拉底顺序分析

综合考虑以上因素,结合该矿的生产现状及开采技术条件,本次确定采用两种拉底顺序对第一中段(Lift 1)进行分析计算。

1) 拉底顺序 I

初始崩落区选择在1 348 m主层西侧,自西向东,从下盘向上盘推进,具体如图5所示。采用这种回采方式,生产组织简单,能更好的与露天生产衔接,保证产量平稳过渡。但采用这种方式,首采区矿体较窄,宽度仅为100 m左右,较难形成初始崩落;且首采区矿量较小,不利于矿山达产。

2) 拉底顺序 II

初始崩落区选择在1 456 m副层东侧,自东向西推进,具体如图6所示。采用这种回采方式,首采区矿体较宽,宽度为200 m左右,容易形成初始崩落,且距离地表较近,形成崩落后,很快就能通达地表。但采用这种拉底方式,基建工程量较拉底顺序 I 更大,且向F6断层方向推进,不利于底部结构的稳定。两种拉底顺序的优缺点对比分析见表3。

本次采用PCBC软件,对不同的拉底顺序进行了排产,各拉底顺序逐年Ti出矿品位如图7所示。

根据图7可以看出,采用拉底顺序 II 前两年出矿品位较拉底顺序 I 要低,但第3~5年出矿品位要更高,后期出矿品位基本差不多。因此,从经济效果来看,两种拉底顺序相差不大。

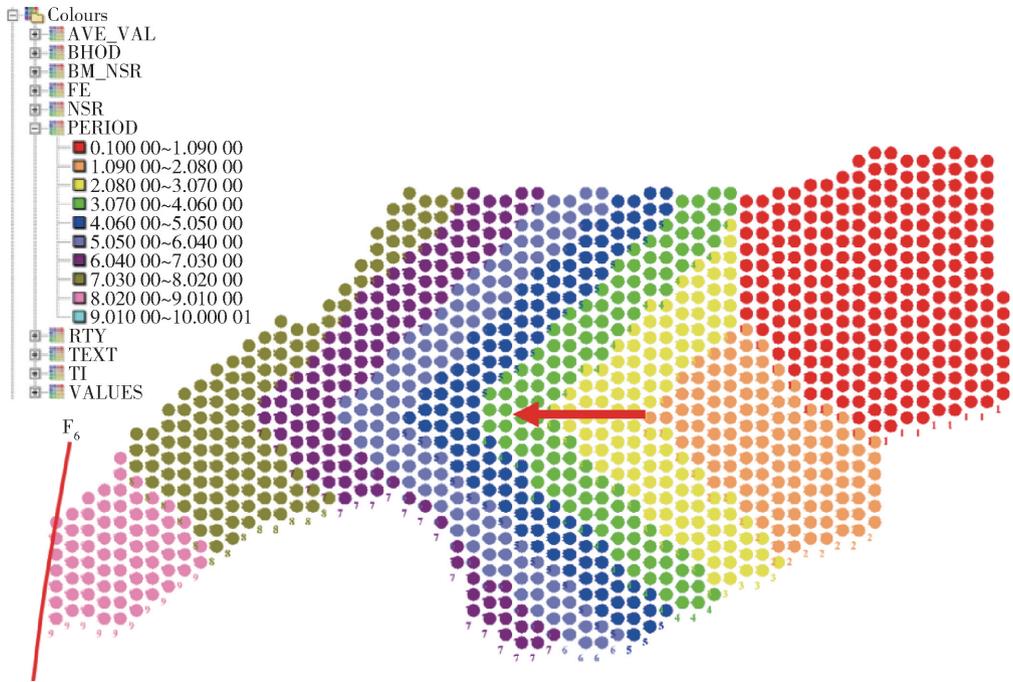


图 6 拉底顺序 II 布置示意图

表 3 拉底顺序优缺点对比分析表

方案序号	方案名称	优点	缺点
方案 I	自西向东拉底	生产组织简单, 基建工程量少, 能更好的与露天生产衔接, 保证产量平稳过渡	首采区矿体较窄, 宽度仅为 100 m 左右, 较难形成初始崩落, 且首采区矿量较小, 不利于矿山达产。距离地表较远, 较难崩通地表
方案 II	自东向西拉底	首采区矿体较宽, 宽度为 200 m 左右, 容易形成初始崩落, 且距离地表较近, 形成崩落后, 很快就能通达地表	基建工程量更大, 且向 F6 断层(大概率比较破碎)方向推进, 不利于底部结构稳定

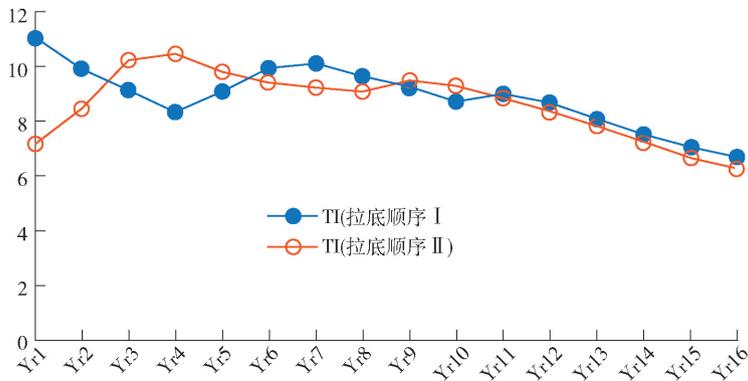


图 7 不同拉底顺序逐年出矿品位

综合以上分析, 第一中段推荐采用拉底顺序 II, 即从东往西推进, 这样更容易形成初始崩落, 前期生产能力容易实现, 且很快就能通达地表, 保证矿山安全开采。

通过对计划采出矿量、定义的拉底顺序、放矿速度、每年新建放矿点数量以及放矿控制方式等参数进行设置, 利用 PCBC 软件编制生产进度计划, 得出逐年出矿量和出矿品位, 具体如图 8 所示。

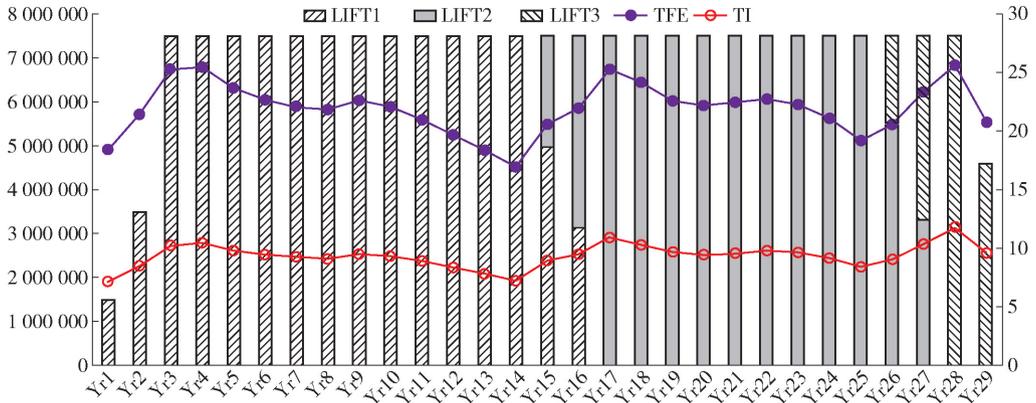


图8 自然崩落法生产计划(吨/年)

4 结论

(1)分析了国内外部分矿山自然崩落法在倾斜矿体中的应用情况,并对不同的布置形式进行简要总结。

(2)采用PCBC软件分析了不同拉底顺序条件下的逐年出矿品位,并结合矿体可崩性、矿体形态、诱导应力、岩体构造特征以及开采安全等因素综合确定了最终的拉底顺序。

(3)利用PCBC软件编制了自然崩落法生产进度计划,得出逐年采出矿量和出矿品位。

【参考文献】

- [1] 于润沧,刘育明,等.采矿工程师手册(下)[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [2] 杨怀志,谭卓英,夏志远,等.基于FLAC3D的主层开采对副层底部结构稳定性的影响研究[J].矿冶工程,2022,42(4):6-10.
- [3] 黄明清,张厚缘,郭晓强,等.硬岩矿体自然崩落过程成拱特征及其边界弱化[J].金属矿山,2024(5):84-91.
- [4] 李争荣,冯兴隆,刘华武,等.某铜矿自然崩落法拉底顺序的优化研究[J].矿业研究与开发,2019,39(1):5-9.
- [5] Jakubec J, Laubscher D H. Incline cave mining-a viable alternative to horizontal layout [C] // Proceedings of the Sixth International Conference and Exhibition on Mass Mining (MassMin 2012). Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2012: 385-391.
- [6] 兰启城.自然崩落采矿法创新技术设计及应用[J].黄金,2018,39(7):49-53.
- [7] 范文录,刘育明,陈晓云,等.眼前山铁矿矿岩分区可崩性评价研究[J].中国矿山工程,2020,49(1):27-29.
- [8] 张琦,朱合华,黄贤斌,等.基于Mamdani模糊推理的山岭隧道围岩RMR14分级[J].岩土工程学报,2017,39(11):2116-2124.
- [9] 李文东.基于RMR14分类系统的矿岩可崩性评价研究[J].采矿技术,2022,22(6):192-196.
- [10] 王宇晨,王堃,王建华,等.铜山矿矿岩可崩性评价及崩落演化规律研究[J].有色金属工程,2023,13(6):115-123.
- [11] 梁江波,刘华武,冯兴隆.自然崩落法超前拉底数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2017,37(2):93-96.
- [12] 李争荣,侯克鹏,冯兴隆,等.复杂构造条件下自然崩落底柱巷道变形控制[J].中国矿业,2021,30(1):182-187.
- [13] 陈小伟,刘育明,葛启发,等.PC-BC软件在自然崩落法中的应用[J].中国矿山工程,2015,44(5):18-20,46.
- [14] 曹建立,谭宝会,刘洋,等.多空区层状矿体诱导冒落机理及拉底方案优选[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(1):119-124.
- [15] 程文文.基于PFC2D软件的太平矿业公司自然崩落采矿法拉底方式优选[J].黄金,2022,43(3):40-43.