

基于产能均衡的露天矿采剥工程时空演化规律研究

陈志勇

中国电建集团华中投资有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]绿色建材露天矿山普遍采用多分区同步开采的作业模式, 矿山采剥施工工程会随着开采推进不断动态调整, 虽然作业效率高, 但极易引发各类生产失衡问题, 直接干扰矿山的连续稳定生产, 影响生产效率与产能稳定性。以国内某大型建筑石料露天矿山作为实际工程研究对象, 将产能均衡稳定作为核心控制条件, 系统探究矿山采剥工程在时间和空间维度的动态演变规律, 建立一套适配该类矿山的采剥时序推演与优化方法。在实施产能均衡调控优化后, 矿山年度成品骨料的产出波动幅度从原本的 $\pm 21.4\%$ 缩减至 $\pm 6.3\%$, 有效改善了溜井进料负荷不均、部分时段过载、部分时段空载的乱象, 同时矿山全开采周期的剥采生产状态更加平稳, 为同类型绿色建材露天矿山的开采工序优化、年度及阶段性生产计划编制、绿色矿山标准化建设等工作, 提供切实可行的技术参考与支撑。

[关键词]绿色建材矿山; 产能均衡; 采剥工程; 时空演化; 分区开采; 开采程序

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20334

中图分类号: TD856

文献标识码: A

Research on the Spatiotemporal Evolution Law of Open-pit Mining and Stripping Engineering Based on Capacity Balance

CHEN Zhiyong

PowerChina Central China Investment Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Green building materials open-pit mines generally adopt a multi zone synchronous mining operation mode. The mining and stripping construction project will be dynamically adjusted as the mining progresses. Although the operation efficiency is high, it is prone to various production imbalances, directly interfering with the continuous and stable production of the mine, affecting production efficiency and capacity stability. Taking a large open-pit building stone mine in China as the actual engineering research object, with production capacity balance and stability as the core control condition, this study systematically explores the dynamic evolution law of mining and stripping engineering in time and space dimensions, and establishes a set of mining and stripping time sequence deduction and optimization methods suitable for this type of mine. After implementing capacity balance regulation and optimization, the fluctuation range of annual finished aggregate output in the mine has been reduced from $\pm 21.4\%$ to $\pm 6.3\%$, effectively improving the chaos of uneven feed load in the chute, overload in some periods, and empty load in some periods. At the same time, the stripping production status of the entire mining cycle of the mine is more stable, providing practical technical reference and support for the optimization of mining processes, annual and stage production planning, and standardization construction of green mines of the same type.

Keywords: green building materials mines; capacity balance; mining and stripping engineering; spatiotemporal evolution; zoning mining; mining procedure

引言

国内绿色建材产业快速发展, 大型建筑石料露天矿山已成为砂石骨料的核心供给来源。该类矿山资源储量大、开采范围广, 普遍实行多矿段同步开采模式, 同时配套平硐溜井集中破碎系统, 对采剥作业的均衡性与连续性提出极高要求^[1]。露天采剥工程具有突出的时空耦合特性, 若

开采时序安排不合理, 极易造成矿石产出错配、破碎系统过载或设备闲置、生产设备作业效率下降等问题, 致使矿山设计产能难以充分释放。产能均衡管控的本质是在多重约束条件下统筹各采剥单元开采次序, 平抑产量波动, 维持剥采比稳定^[2]。传统生产计划主要依靠工程经验编制, 难以充分挖掘空间、时间与工程量之间的耦合关系。现有

相关研究大多围绕金属露天矿展开,针对采用平硐溜井工艺的砂石骨料矿山,开展产能均衡及时空演化方面的研究仍较为薄弱。本文以实行东西矿段分区开采的实际砂石矿山为工程依托,剖析采剥作业的空间演化特征,厘清各开采工序间的内在逻辑关联,对比优化前后开采方案的各项技术指标,归纳总结采剥工程时空演化规律,可为同类矿山中长期开采规划的编制提供理论与工程参考。

1 工程概况

1.1 矿山基本条件

某大型矿山为建筑石料用灰岩大型露天矿山,矿区内灰岩矿体厚度较大,矿山设计年产石料产能可达 3000 万吨。整个矿区分为东、西两个矿段,两个矿段配套共用一套溜井-平硐-破碎加工生产系统,整体采用公路搭配平硐溜井的联合开拓方式进行开采作业。日常生产中,矿区内部依靠汽车完成土石方转运工作,开采出的矿石通过溜井、平硐配套皮带输送机输送至加工车间进行加工处理,矿山产生的剥离渣土、废石等剥离物,全部堆排至矿区内部的排土场。该矿山矿体整体连续性极佳,能够稳定生产高品质建筑石料骨料。东、西两大矿段的矿体赋存地质条件差别比较明显,开采特性各不相同:西矿段在开采前期需要剥离的覆盖层、废石量大,纯矿石产出量少;东矿段刚好相反,开采前期出矿效率高、出矿能力强,但随着开采深度推进,到开采后期剥离作业量会持续增加,剥离压力上升。上述一系列问题,直接造成矿山整体产量波动幅度大、整体剥采比起伏不稳定,破碎、输送、排土等各配套生产系统无法实现稳定匹配运行,影响了矿山常态化稳产、高效生产^[3]。

1.2 产能均衡主要约束条件

露天矿采剥工程在时间与空间上的推进过程,受到多方面工程实际条件的限制。第一是地质资源条件的限制,各个矿段台阶的矿石与岩石储量是确定的,风化夹层、断层破碎带这类不良地质,直接制约开采工作面的推进方向;第二是现场空间作业条件的限制,开采时要保证台阶具备最小工作平盘宽度,严格遵循从上到下的台阶开采顺序,同时要把控好新开采水平的准备进度;第三是开拓系统带来的限制,溜井布置位置无法改动,溜井、皮带运输以及破碎设备都有最大处理量,不能超负荷运行^[4];第四是设备产能的限制,矿山可用的采掘、运输设备数量是固定的,整体能够完成的采剥工程量存在上限;第五是排土环节的约束,内排土场的存储空间以及排土时序,和剥离岩石的产出速度相互匹配。

2 采剥工程时空演化内涵与评价指标

2.1 采剥工程时空演化内涵

露天矿采剥工程时空演化,指的是矿山整个开采周期内,随着开采时间不断推进,露天采场的工作帮轮廓形态、开采占地范围、各层台阶揭露情况以及排土作业工程,持续发生动态变化的全过程。采用分区开采模式的砂石矿山,其采剥工程时空演化主要包含四项核心作业过程:采场工作帮的水平向前推进、开采台阶的垂直向下延伸、各个开采矿段的产能衔接接续、排土场与排土工程的同步配套拓展。而以产能均衡稳定为核心导向的时空演化调控是通过科学规划、合理排布以上四类工程的施工时序,各个矿段的出矿作业和剥离作业错峰开展,有效平抑矿山整体产量波动。

2.2 产能均衡评价指标

为定量评价采剥工程演化效果,选取多项指标开展分析。年度矿石产量、年度剥离量分别表征对应年度矿石开采与土岩剥离总规模;生产剥采比为年度剥离量与矿石产量之比,反映剥离与出矿的匹配关系;产量波动率为年度实际产量与设计产能差值绝对值占设计产能的百分比,数值越低产能均衡性越好;溜井负荷不均衡系数,用于表征各溜井进料规模的差异水平^[5]。

3 产能均衡条件下采剥时序推演与方案构建

3.1 采剥时序推演总体思路

依托矿山三维地质块体模型,划分东、西矿段各台阶块体单元并录入矿石量、剥离量属性。以年度为步长,以产能均衡为目标,结合开采约束调配单元开采时序。依次导入地质、工艺、设备及开拓条件数据,演算原始开采方案,识别产量与剥离洪峰时段;在台阶、工作平盘约束下错峰调控两矿段开采强度,实现产能接力,输出优化后采剥量。表 1、表 2 统计 6 个年度核心指标,基于块体精细化推演,贴合现场实际,可量化对比两套方案时空演化差异。

表 1 矿山原始开采方案主要年度采剥工程量

开采年度	东矿段矿石量/万 t	西矿段矿石量/万 t	总矿石量/万 t	年度剥离量/万 t	生产剥采比
第 1 年	1920	480	2400	864	0.360
第 2 年	2040	660	2700	972	0.360
第 3 年	1710	1290	3000	1110	0.370
第 4 年	1350	1650	3000	1230	0.410
第 5 年	930	2070	3000	1140	0.380
第 6 年	600	2100	2700	783	0.290

表2 产能均衡优化后方案主要年度采剥工程量

开采年度	东矿段矿石量/万 t	西矿段矿石量/万 t	总矿石量/万 t	年度剥离量/万 t	生产剥采比
第1年	1560	1140	2700	702	0.260
第2年	1680	1320	3000	780	0.260
第3年	1530	1470	3000	870	0.290
第4年	1320	1680	3000	930	0.310
第5年	1080	1920	3000	870	0.290
第6年	720	1980	2700	702	0.260

对比分析表1、表2数据可知,原始开采方案存在显著的产能失衡问题,开采前期东矿段独担主要出矿任务、西矿段出矿量极低,开采中期剥离量持续攀升并在第4年达到峰值1230万t,生产剥采比冲高至0.41,产量与剥离量波动剧烈。而优化方案通过东西矿段错峰开采、动态调配产能,彻底解决了这一问题,各年度东西矿段出矿量分配更为均衡,剥离工程量逐年平稳波动,无明显剥离洪峰,生产剥采比区间大幅收窄,仅开采首尾年度因产能适配需求总产量小幅回落,整体生产稳定性提升,充分验证

了产能均衡调控对多分区露天矿采剥生产的优化作用。

3.2 采剥工程空间演化形态说明

剖面选取东西矿段主开采方向进行绘制,选取开采第2年、第4年、第6年三个关键时间节点展示采场剖面形态;图内标注工作帮位置、台阶延伸水平、剥离扩帮范围,直观体现工程变化规律:开采前期东矿段工作帮适度收缩,西矿段开采范围逐步打开;开采中期东西矿段同步维持高强度生产状态;开采后期东矿段开采范围逐步收缩,西矿段转变为主要出矿单元,实现矿段之间产能平稳接力。图件同时反映垂直方向台阶向下延伸、水平方向工作帮向前推进的复合演化特征。通过不同时序的剖面形态对比,可清晰观察到优化后采场无局部过度剥离、台阶推进不均的问题,空间工程形态演变连续、平缓,完全适配产能均衡的生产需求,见图1。

原始方案产量起伏明显,前期产出偏低、中期产量冲高,剥离量随开采时序持续攀升且峰值突出;优化方案产量曲线整体趋于平缓,全年大部分时段稳定维持3000万t设计产能,剥离洪峰得到有效平抑,工程量波动幅度大幅降低,直观体现产能均衡调控实际效果,见图2。

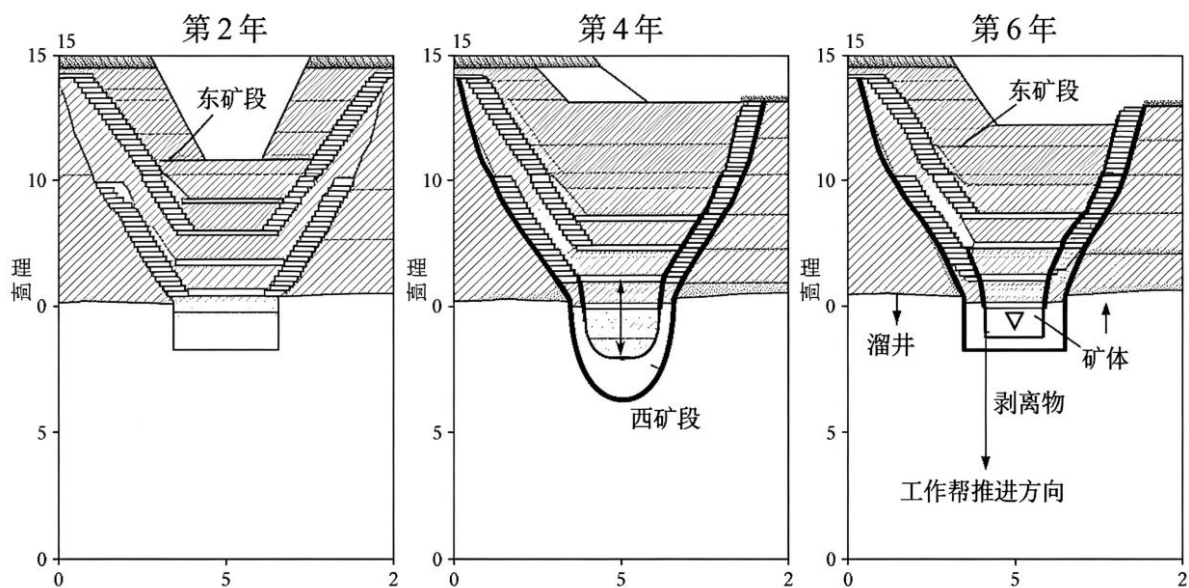


图1 分区露天矿采剥工程时空演化剖面示意图

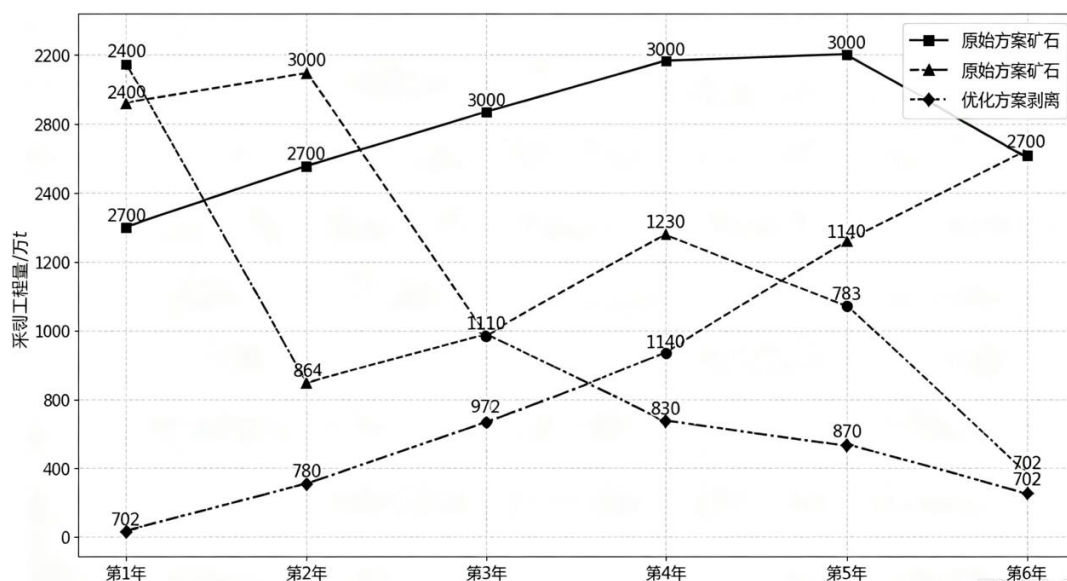


图2 不同方案年度矿石产量-剥离量对比曲线

4 采剥工程时空演化规律分析

4.1 原始方案时空演化特征

原始开采方案严格执行从上至下的开采顺序，充分借助东矿段矿体天然裸露的有利条件组织生产。从开采时间和工程推进情况来看：开采前期，东矿段作业面全部展开，矿体大面积露出来，可以正常出矿；而西矿段上部需要做大量扩帮剥离工作，采掘设备大多投入到剥离作业当中，矿石开采量上不去。到开采中期，西矿段扩帮剥离全部完成，矿体完全揭露出来，东、西两个矿段同时发挥生产能力，矿山矿石产量和剥离工程量一起达到峰值。进入开采后期，东矿段资源基本采完，出矿能力大幅下降，即便西矿段还能稳定产出矿石，但整个矿山的总产量会走低，开采方案的产量最大波动幅度达到21.4%，最大生产剥采比为0.41，溜井各个进料点进料量差距大，东西两个矿段工程推进节奏对不上。方案虽然用好矿体天然出露的先天条件，但没有对两个矿段的产能做好时间上、空间上的协调调配，造成破碎、运输系统频繁承受忽高忽低的负荷，不利于矿山长时间持续平稳生产。

4.2 产能均衡优化后时空演化特征

通过开采时序优化，采剥工程构建形成“错峰扩帮、梯度延深、分区动态调配”作业模式。错峰扩帮将西矿段前期集中的扩帮剥离工程量实施时序后移，同步管控东矿段初期出矿能力，错开东西矿段剥离作业高峰，有效缓解采掘设备及排土系统的运行压力。梯度延深对两矿段台阶下延推进速率实施差异化管控，适度放缓西矿段新开采水平准备工程，规避两区大规模基建同步开展对正常采矿作业造成干扰。分

区产能动态接力实现生产前期以东矿段为主要出矿单元，中期维持两矿段均衡产出，后期由西矿段承接产能衰减缺口，保障生产工况平稳过渡。经优化后，矿山产量波动率控制在 $\leq 6.3\%$ ，生产剥采比稳定维持于0.26~0.31区间，溜井进料工况趋于均衡；采场工作帮边坡形态过渡平缓，年度产量曲线波动幅度收窄，剥离洪峰得到有效消解。

4.3 时空演化内在机理分析

在产能均衡的约束条件下，露天矿采剥作业在空间和时间上的变化，本质就是矿山总资源量确定以后，对各个采剥区块的开采先后顺序做重新排布。各个台阶单元的矿石、岩石储量是固定不变的，调整开采时序，本质就是把开挖工程量在不同生产时间段重新分配。采用分区开采模式的矿山，划分出东西两个矿段，两个矿段都会受到剥离工程的制约，生产过程都会先后进入剥离高峰期和出矿高峰期。原有开采方案里，两个矿段的剥离高峰赶在了同一时期，直接造成各项生产指标起伏波动很大。优化调整的关键就在于管控两个矿段的开采推进节奏，把剥离作业的峰值时间相互错开，让两处的出矿高峰能够互相衔接、互为补充。当其中一个矿段生产能力开始下降时，另一个矿段刚好可以补上产能，以此维持矿山整体产出保持平稳。

5 工程实施保障对策

结合采剥作业的时空变化特点，让产能均衡开采方案真正落地，矿山生产管理方面要配套做好多项保障工作。第一，编制分阶段的中长期开采规划，不能一味盯着年度产量指标，每年的生产计划都要同步核对东西矿段工作线推进情况、台阶下挖进度以及工作平盘状态，确保时间上

的生产安排和现场空间工程实际情况相互匹配。第二,灵活调整采掘设备配置,西矿段开展扩帮剥离作业时增加挖掘机投入,东矿段产出能力下降后,再把设备逐步调往西侧,适配不同矿段开采强度的变化。第三,做好破碎系统的调度管理,根据矿石产出占比改变物料运输流向,均衡各个溜井的进料量,防止出现堵井、设备过载等问题。第四,实行计划滚动更新模式,面对地质条件变化、设备故障等各类突发情况,每2~3年对采剥时序进行调整修正,持续维持采剥时空关系的平衡。

6 结论

以某大型露天矿山作为实际工程案例,构建一套受产能均衡条件约束的采剥时序推演方法,优化之后,矿山产量波动幅度从 $\pm 21.4\%$ 下降至 $\pm 6.3\%$,实际生产剥采比维持在0.26~0.31区间,剥离作业的高峰期压力得到有效化解,东西两个矿段之间顺利实现产能平稳交接过渡。现场应用过程中,要同步核对产量目标与采场边坡形态,调配

采掘运输设备,更新开采计划,保证方案可落地,也能为同类型绿色建材露天矿山的开采优化提供参考。

[参考文献]

- [1]刘杰,王海霞,王瑜.基于三维条件的露天矿的采剥方案优化研究[J].中国金属通报,2023(12):22-24.
- [2]韩流,秦梓赫,舒继森,等.基于多目标优化的露天矿进度计划编制方法研究[J].煤炭科学技术,2022,50(7):146-155.
- [3]李浩然.不规则境界露天矿剥采排工程控制方法及应用研究[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2022.
- [4]刘华萍.H 露天煤矿投入产出效益评价及提升策略研究[D].北京:中国矿业大学,2020.
- [5]柯丽华.基于最低寿命周期成本的露天矿开采量动态规划模型[D].武汉:武汉科技大学,2020.

作者简介:陈志勇(1993—),男,工程师,工学学士,现就职于中国电建集团华中投资有限公司,分公司安全总监,长期从事水利水电、矿山工程安全管理工作。