

刚果（金）卡莫阿铜矿矿柱尺寸数值模拟研究

张兆龙

紫金矿业集团股份有限公司卡莫阿铜业有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i12.2109

[摘要] 针对刚果(金)卡莫阿铜矿近年来深部开采面临的高应力环境下,矿柱稳定性对安全生产带来的重大挑战,本研究基于三维数值模拟方法,针对传统的进路充填采矿法中生产矿柱、联络巷矿柱及隔离矿柱系统开展应力-强度耦合分析。通过建立不同开采深度(200~600 m)、矿柱几何参数(宽度7~25 m)及回采顺序的数值模型,揭示了垂直应力场分布规律与矿柱破坏机制。研究表明:当开采深度超过350m时,生产矿柱需增至25m长度并配合短进路采场及时充填,方可使强度因子(SF)维持在1.3以上;隔离矿柱内正交布置的出矿仓可降低牛鼻构造应力集中系数达35%,但需随深度增加调整矿柱宽度(400m以深不小于18m)。研究成果为高应力层状矿床的矿柱优化设计提供了理论依据,已在卡莫阿铜矿深部开采方案中获得工程验证。

[关键词] 矿柱稳定性; 数值模拟; 进路充填法; 应力集中控制

中图分类号: S759.1+3 **文献标识码:** A

Numerical Simulation Study on Pillar Sizing at Kamao Copper Mine, Democratic Republic of Congo

Zhaolong Zhang

Zijin Mining Group Co., Ltd. Camao Copper Industry Co., LTD

[Abstract] To address the critical challenges of pillar stability under high-stress conditions encountered in recent deep mining panels at the Kamao Copper Mine, Democratic Republic of Congo, this study conducts a stress-strength coupling analysis on production pillars, cross-cut pillars, and barrier pillar systems in traditional drift-and-fill mining methods using three-dimensional numerical simulation. Numerical models incorporating different mining depths (200~600 m), pillar geometries (width: 7~25 m), and stoping sequences were established to investigate vertical stress distribution patterns and pillar failure mechanisms. The results demonstrate that: (1) when mining depth exceeds 350 m, production pillars must be extended to 25 m in length with timely backfilling of short access stopes to maintain a safety factor (SF) above 1.3; (2) muck bays arranged orthogonally within barrier pillars can reduce stress concentration factors at bullnose zones by up to 35%, though pillar width must be increased with depth (≥ 18 m beyond 400 m). The findings provide theoretical support for pillar optimization in high-stress stratified deposits and have been successfully implemented in daily operations of Kamao Copper Mine.

[Key words] pillar stability; numerical simulation; drift and fill mining; stress concentration control

刚果(金)卡莫阿铜矿作为全球第三大高品位铜矿床,其深部开采面临高应力环境下矿柱系统稳定性控制的重大技术挑战。随着开采深度增加(300~600m),传统进路充填法中矿柱的应力集中现象日益显著,导致近年来多次发生局部矿柱垮塌事件。现有研究多聚焦浅部矿柱设计,对深部高应力条件下矿柱的尺寸效应与协同支护机制缺乏系统认知^[1]。

本研究基于三维弹塑性数值模拟(FLAC3D),结合现场地应力实测数据,构建了考虑开采顺序的动态回采模型。通过分析不

同参数(7~25 m宽度)矿柱的最大应力场演化规律,揭示了深度效应与矿柱失稳的临界条件。创新性地提出了“应力隔离-协同支护”优化原则。研究成果为深部层状矿床的安全高效开采提供了新的理论框架与技术路径^[2]。

1 工程地质与采矿方法

1.1 地质特征

卡莫阿矿区地层舒缓,发育有宽缓背斜,背斜轴向波状起伏,走向北东25~30°,长大于20km,宽6~8km。Kakula矿体受

Kakula Dome和Kakula NE Dome穹窿控制,其南西-北东向矿化不发育;矿体北西段地层扬起,转为向斜构造。矿区断裂构造较发育,但多为解译断层。在矿体圈定过程中发现,主要断层走向北东,呈亚平行,WS1、WS2正断层在穿过矿体时,西盘下降,东盘相对上升,对矿体有较大破坏,在剖面上矿体呈现断崖式阶梯状,单个断距超100m,累计超200m。WS1东侧的WS3及其他次级断层对矿体影响不大。矿区无岩浆岩入侵或出露,围岩蚀变主要有碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化、钾长石化及赤铁矿化。

1.2 岩体力学参数及地应力场特征

矿体赋存位置远离黄铁矿化粉砂岩(KPS),岩石以坚硬岩石为主,赋矿层厚度大,矿体硐室、巷道均在KPS岩层底部中施工,平均岩石质量指标均大于60%,裂隙由发育,均呈闭合状,岩石质量中等。但构造较发育、对矿床开采影响较大,可能会产生工程地质问题。矿床工程地质条件简单~中等。矿区地震和断层不活跃,区内及其周边地形平缓,浅切水系发育。自然环境条件下滑坡、崩塌、泥石流等不良地质现象的可能性较小。矿床未发现地热、放射性异常现象,地质环境质量良好。

构成矿柱的混积岩,上述参数通过该岩性类型的测试数据平均值与岩芯鉴定结果确定,其特征如下:

平均单轴抗压强度(UCS)=100MPa

岩石质量指标(RQD)=76MPa

岩体评分(RMR)=63MPa

混积岩设计岩体强度(DRMS)=38MPa

1.3 进路充填采矿法应用现状

矿山采用三步骤进路充填采矿法,每一步骤进路开采完成后,立即施工挡墙进行充填作业,并经过28d的硬化期后方可进行下一步骤进路的开采。进路长度180m,巷道宽7m,开采高度6~8m。虽然采场内进路充填采矿法可以实现100%的采出率,但是为支撑各开拓及采准工程巷道所留的矿柱使得采场内高品位矿体需留待矿山开采后期进行矿柱回采,或者作为永久矿柱^[3]。不同类型的矿柱如下图1所示,矿柱的留设对资源的有效利用和生产安全性具有重要意义。

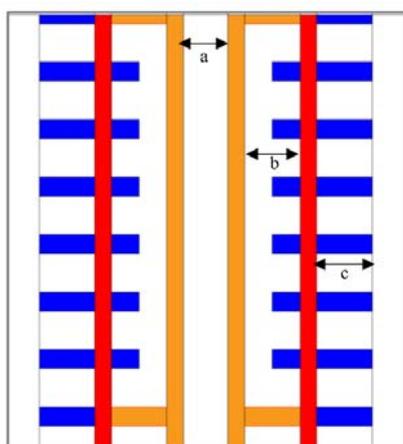


图1 矿柱类型划分

(a: 联络巷矿柱 b: 隔离矿柱 c: 生产矿柱)

2 数值模拟方法与模型构建

2.1 模型参数设定

模型参数设定的目标是针对矿山所采用的采矿方法、采区布置确定矿柱几何尺寸,其中矿柱岩体强度作为矿柱尺寸设计的主要依据。岩体强度的计算主要综合Bieniawski岩体评分以及单轴抗压强度^[4]。

2.2 模拟工况设计

模型中主要开采条件基于以下假设:

(1)矿柱位置外围生产区域的采高为7.6m。(2)紧邻矿柱位置的巷道充填开采断面尺寸为7m宽×7m高。(3)充填体强度为700Kpa。(4)深度区间:200m、300m、400m、500m及600m。(5)生产采场长度延伸至200m。(6)围岩条件中等。(7)隔离矿柱内设置出矿仓(断面尺寸7m宽×7m高)。

3 矿柱稳定性模拟结果

本研究针对不同深度和矿柱尺寸建立了多种模型进行计算,旨在取得以下成果:一、识别高应力集中区域;二、研究设计的短出矿仓对隔离矿柱整体稳定性的影响;三、确定生产矿柱所需长度。最终不同深度的三类矿柱的数值模拟结果如表1,体现不同矿柱宽度(W)所承受的最大垂直主应力(σ)及强度系数(SF)。

表1 不同深度三类矿柱数值模拟结果

深度范围	联络巷矿柱	隔离矿柱	生产矿柱
	W = 16 m	W = 20 m	W = 20 m
200 - 280 m	$\sigma = 20 - 27 \text{ Mpa}$ SF > 2	$\sigma = 25 - 33 \text{ Mpa}$ SF > 1.8	$\sigma = 40 - 55 \text{ Mpa}$ SF > 1.2
	W = 16 m	W = 20 m	W = 20 m
280 - 350 m	$\sigma = 30 - 35 \text{ Mpa}$ SF > 2	$\sigma = 30 - 38 \text{ Mpa}$ SF > 1.5	$\sigma = 55 - 67 \text{ Mpa}$ SF > 1.0
	W = 20 m	W = 25 m	W = 25 m
350 - 450 m	$\sigma = 25 - 35 \text{ Mpa}$ SF > 2	$\sigma = 30 - 40 \text{ Mpa}$ SF > 1.8	$\sigma = 50 - 65 \text{ Mpa}$ SF > 1.1
	W = 123 m	W = 30 m	W = 25 m
450 - 550 m	$\sigma = 33 - 39 \text{ Mpa}$ SF > 2.0	$\sigma = 34 - 42 \text{ Mpa}$ SF > 2.0	$\sigma = 65 - 80 \text{ Mpa}$ SF > 1.0

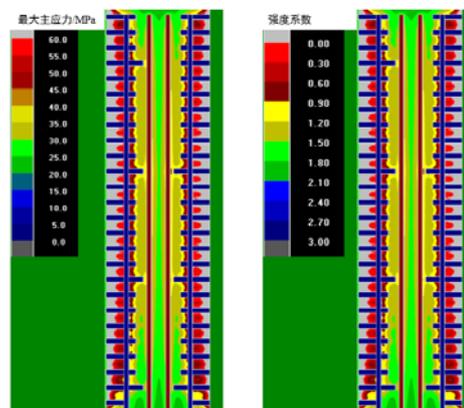


图2 450m数值模拟

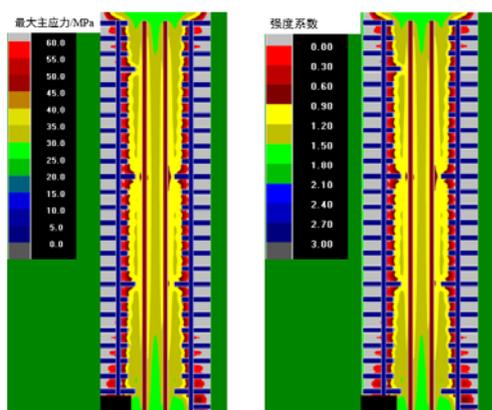


图3 550m数值模拟

工作面回采过程中,受采动影响的巷道围岩将产生显著的应力重分布现象。如图2、图3所示,巷道掘进期间,周边矿柱反映出明显的应力集中特征,这一现象主要源于采动引起的围岩应力场动态调整过程,其影响范围及程度与开采深度、及围岩力学性质等因素密切相关。受到周边数值模拟的结果可以通过不同色块区分最大主应力与强度系数,以进一步优化应力集中区域的矿柱设计与支护参数^[5]。

4 结论

(1)生产矿柱在较大深度下将处于临界稳定状态,并承受高应力集中,仅靠增加矿柱长度(沿走向)对矿柱稳定性的改善作用有限。深度大于350m时,需采用25m长的生产矿柱。(2)在生产矿柱之间的进路采场在完成一步骤至三步骤的一个回采周期后必须及时充填,以减少矿柱的应力集中,提高生产矿柱的稳定

性。若预测到岩体剥落或变形,需制定相应的支护标准以保障长期稳定。(3)对于全部开采深度区间(200~600m),生产矿柱必须按与进路联络巷呈90°正交方向进行布置,隔离矿柱最低设计宽度为25m。(4)联络巷矿柱宽度须根据开采深度进行动态调整,以满足安全系数的要求^[6],具体尺寸参数详见表1的工程建议值。(5)隔离矿柱对维持双联络巷道系统与生产矿柱的整体稳定性具有关键作用,隔离矿柱内设置的短出矿仓会削弱局部承载能力,必须依据深度增加调整矿柱宽度^[5]。(6)最终采矿设计方案需提交岩石力学工程部进行交叉验证审核后方可实施。

【参考文献】

- [1]程鑫.隔离矿柱采场矿壁安全系数计算及影响因素分析[D].中南大学,2023.
- [2]张欢.深井矿山盘区隔离矿柱回采稳定性研究[D].中南大学,2023.
- [3]董航宇.多矿柱载荷传递与失稳破坏特征研究[D].东北大学,2021.
- [4]范文涛,纪永刚,于文杰,等.矿柱尺寸设计及稳定性的数值模拟分析[J].现代矿业,2021,37(05):77-80.
- [5]沈玉众.矿柱回采崩矿方式数值模拟优化及炮孔三维可视化设计[D].中南大学,2011.
- [6]张保.深井开采矿柱稳定性分析与可视化验证[D].中南大学,2009.

作者简介:

张兆龙(1988--),男,汉族,山东临沂人,硕士,工程师,研究方向:采矿设计优化、数字化矿山。