

三鑫金铜矿深部开采地压控制实践

姚逸飞¹,李敏智¹,李俊平²,田波¹

(1. 湖北三鑫金铜股份有限公司; 2. 西安建筑科技大学资源工程学院)

摘要:随着三鑫金铜矿开采不断向深部延伸,其工程地质条件和矿体赋存状况恶化,地应力增大,地压显现加剧。此次研究借助现场巷道等的地压显现调查资料、地应力实测资料和室内岩石物理力学参数,利用Flac^{3D}软件模拟分析,探索整体地压分布规律。并确定了上盘、下盘脉外沿脉巷道到矿体边界的合理安全距离。优化采场结构参数,开采过程中的围岩维护方式,以便控制采场开采过程中的冒顶、塌方,从而避免采场过度贫化及上、下盘围岩过度岩移。提出充填体不接顶的限额指标,避免采空区顶板及充填体整体移动而产生地面开裂或塌陷。通过研究分析对深部开采地压控制提出了多项结论性意见,为三鑫金铜矿深部矿体安全高效开采提供了技术支持和理论依据。

关键词:深部开采;地压控制;采场结构参数;地压调查;数值模拟;地压分布规律;控制方法

中图分类号:TD32

文章编号:1001-1277(2025)06-0023-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250605

引言

地下矿体开采后,原岩应力平衡状态遭到破坏,将产生次生应力场并引起岩体中的应力重新分布,同时伴随一系列矿压显现,如顶板下沉、开裂、冒落、矿柱垮落、采空区塌陷等^[1]。湖北三鑫金铜股份有限公司(下称“三鑫金铜矿”)地下开采深度不断增加,地应力随深度增加而增大。深部巷道与采场的维护原理与浅部有十分明显的区别,主要体现在岩石所处应力环境及由此导致的岩体力学性质差异^[2]。浅部开采条件下的采场结构参数不能完全适用于深部开采^[3],深部条件下会将一系列不良效果放大,给开采带来难题^[4]。岩石是一种复杂的结构体,具有非线性、非连续、非均质及复杂的边界条件和加卸载条件,这使得解析方法无法简单的求解岩石力学问题。目前常采用试验和数值模拟计算的方法^[5]。

为了确保地下采矿工程的安全,合理控制地压,国内外学者在地压控制方面做了大量研究工作,提出了很多地压控制的方法,可归纳为:矿体合理的回采顺序,合理确定开采断面、矿房、矿柱结果参数,合理支护与岩体加固措施,利用免压拱解除采场地压,采用充填或崩落围岩的方法处理采空区,建立合理的地压监测系统等^[6]。本文在前人研究的基础上,结合三鑫金铜矿的实际开采条件,通过实地调研、理论分析、数值模拟和现场试验等手段,探索地压显现规律及其

控制措施,以期为三鑫金铜矿及类似条件下的地下采矿工程提供实用的地压控制方法,推动矿山安全生产和可持续发展。

1 工程背景

三鑫金铜矿成立于1999年,其前身为1988年建矿的鸡冠咀金矿,建矿开采距今已30余年,目前最深部生产供矿中段在-670 m水平,最深部掘进中段在-720 m水平,副井开拓深度延伸至-1 065 m水平,并且在-720 m水平以下发现具有开采价值的矿体。因此,三鑫金铜矿未来的开采深度将超过-1 000 m。随着开采深度的增加,地应力随之增大,地压显现加剧。高应力诱发的围岩变形、岩爆与冲击地压等灾害,严重威胁深井作业人员与设备的安全。解决深井开采所带来的危害已刻不容缓,深部开采地压控制对于安全生产至关重要^[7-8]。

2 地压显现调查分析

经过现场调查,目前井下多处出现了不同程度的地压显现。

2.1 局部地压与膨胀压力相互作用

1)斜井-70~-100 m标高地段,在支承压力与红砂岩或红黏土遇水膨胀力共同作用下,斜井东帮墙、顶板及西帮墙顶角附近开裂、离层。

2)-130~-170 m中段,在支承压力及遇水粉化

收稿日期:2025-01-01;修回日期:2025-02-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2905003,2022YFC2905004)

作者简介:姚逸飞(1988—),男,工程师,从事矿山生产技术与安全管理工作;E-mail:958062832@qq.com

的矽卡岩等膨胀力共同作用下,巷道顶板开裂、离层或坍塌,巷帮在支承压力作用下脱层。

3)-270~-370 m中段,在支承压力作用下呈现顶板、顶角开裂,由于埋深相对较小,开裂、离层裂缝宽度不足1 cm,脱层冒落范围也小。

4)-470 m中段14勘探线采场底柱中布置的沿脉巷道,在下中段采场充填不接顶时,支承压力与遇水粉化的矽卡岩等膨胀力共同作用,引起底板悬空的帮墙、顶板开裂(缝宽约10 cm),局部顶板离层、垮塌,局部帮墙倾倒。

总之,局部地压显现的共同特点是:开采扰动引起巷道顶角、帮墙开裂、离层、脱层。开采扰动引起的拉应力长期作用于巷道,导致无预应力的锚网或钢筋混凝土支护体发生开裂、离层或脱层、冒落。

2.2 整体地压与膨胀压力相互作用

1)在三鑫金铜矿-420 m及其以上中段不常见无缝锚杆或带弯钩的螺纹钢树脂锚杆支护的巷道发生整体垮塌,但-470 m及其以下中段常见这些无预应力支护的锚网发生超10 cm宽的整体离层,甚至局部

巷道的冒落高度达4~8 m。

2)-570 m中段10-2采场顶部不稳固,采空区长期暴露,在切槽附近垮落7 m,距离上分层-510 m中段巷道底板3 m左右。

3)-620 m中段10-1采场上盘,在出矿后期开始出现持续垮落现象,局部垮塌最高处与上分层-559 m中段底板巷道贯通。

这充分说明,随着开采深度增加,地压越来越大,开采扰动引起巷道及围岩所受的拉应力区也越来越大。这个较大的拉应力区在无预应力锚网支护体长期作用下,会发生离层、锚网支护体整体脱层、垮落坍塌。

3 岩石物理力学性质

对三鑫金铜矿6种具有代表性的典型矿岩和3种不同灰砂比的充填体进行了块体密度试验、单轴抗压强度试验、单轴压缩变形试验、抗拉强度试验和三轴压缩强度试验,获得各种砂岩及充填体的密度、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、抗拉强度、内聚力和内摩擦角等物理力学指标^[9]。试验测试结果见表1。

表1 岩石及充填体物理力学参数测试结果

Table 1 Physical mechanical parameters test results of rocks and filling bodies

材料名称	块体密度/ (g·cm ⁻³)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗剪强度参数	
						内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
含矿矽卡岩	3.19	129.38	49.054	0.23	4.36	15.03	48.65
含硫岩	3.75	39.18	17.937	0.27	2.89	8.27	43.44
含矿大理岩	2.67	93.59	41.007	0.24	6.01	17.88	50.50
普通大理岩	2.70	78.91	38.168	0.25	4.20	14.78	42.13
石英正长闪长玢岩	2.58	118.91	43.131	0.21	8.00	22.25	49.76
矽卡岩	3.07	135.17	55.641	0.19	6.69	19.09	51.16
1:5高强度充填体	1.99	10.26	1.951	0.21	0.85	2.76	32.34
1:6中强度充填体	2.01	7.54	1.383	0.20	0.62	1.68	33.96
1:8低强度充填体	2.02	3.56	0.489	0.18	0.40	1.09	35.86

注:除抗剪强度参数是按一组试件试验的莫尔圆公切线取值外,其他数值均为各试件试验的算术平均值。

4 地压控制研究及措施

本次研究采用岩土工程中应用较广泛的Flac^{3D}软件进行数值模拟计算。

三鑫金铜矿井下生产主要采用分段中深孔凿岩阶段落矿嗣后充填采矿法开采底部结构以上的矿石,上向水平分层充填采矿法开采底部结构。本次研究核心技术路线为:结合三鑫金铜矿开采实际,建立地下采矿模型,每中段沿走向展布5个采场,其中,1,3,5为一步骤采场,2,4为二步骤采场。每个采场都垂直走向布置,一步骤采场宽13 m,二步骤采场宽12 m,采场长度为矿体实际厚度。按顺序将-720 m中段底柱以上的矿体逐步采空并及时嗣后充填,通过分析采场中间剖面的应力、位移变化,探索深部开采的地压变化规律及地压控制方法,以期服务和指导三鑫

金铜矿深部开采^[10-13]。

4.1 合理巷道位置确定

在位移边界条件下,将模型中-720 m中段底柱以上的矿体逐步采空。同时,逐步骤测试本中段采空后其紧邻的上中段上盘、本中段下盘脉外沿脉巷道周边的最大拉应力、或无拉应力时的最小压应力,得到随到矿体边界距离变化的巷道周边最小主应力变化曲线(见图1、图2),从而分别确定上盘、下盘脉外沿脉巷道到矿体边界的合适距离。

由图1、图2可知:上盘脉外沿脉巷道的最小主应力拐点约在24 m,下盘脉外沿脉巷道的最小主应力拐点约在27 m。因此,上、下盘脉外沿脉巷道到矿体边界的安全经济合理位置分别约为24 m、27 m。

4.2 采场结构参数优化

根据矿山在-420 m、-470 m、-520 m中段的开采实

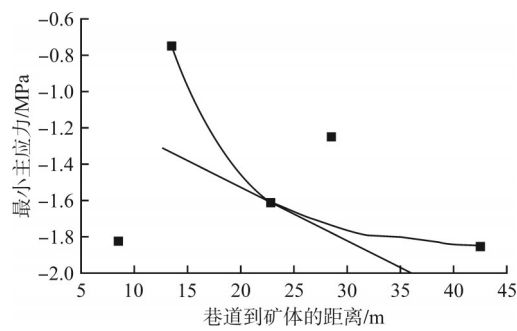


图 1 随到矿体边界距离变化的上盘脉外沿脉巷道周边最小主应力变化曲线

Fig. 1 Variation curve of the minimum principal stress around the hanging wall along-the-vein drift outside the vein with distance from orebody boundary

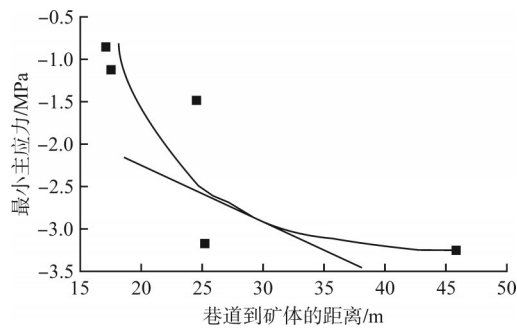


图 2 随到矿体边界距离变化的下盘脉外沿脉巷道周边最小主应力变化曲线

Fig. 2 Variation curve of the minimum principal stress around the footwall along-the-vein drift outside the vein with distance from orebody boundary

际,沿矿体走向布置两步骤采场及后续调整为垂直矿体走向布置两步骤采场,并对其进行数值仿真模拟^[14-17]。

4. 2. 1 沿矿体走向布置采场

沿矿体走向布置采场,会造成采场上、下盘围岩及副井井壁局部拉应力集中。-520 m中段以上开采已引起最大拉应力超过上、下盘围岩抗拉强度的32.9 % (最大达到74.0 %),超过副井围岩抗拉强度的15.2 % (最大达到34.3 %);如果-520 m中段以下的深部继续类似开采,矿体厚度不明显变薄的情况下拉应力将继续增大。高拉应力疲劳作用下,必然引起采场上、下盘围岩及副井井壁发生离层、片帮。尽管充填后拉应力急剧降低(降低27 % ~ 50 %),而且随充填体埋深增大,拉应力几乎呈指数规律下降,但在反复开采、悬空等扰动期间,局部较大的拉应力也长期存在。

沿矿体走向布置采场,会造成未充满的悬空底柱离层、垮塌。宽度偏大的不接顶充填采场上部的上中段悬空底柱普遍贯穿受拉,而且拉应力偏大,一般达到矿体抗拉强度的36.4 % ~ 56.3 %。高拉应力长期疲劳作用下,必然引起底柱及巷道发生离层、垮塌。

4. 2. 2 垂直矿体走向布置采场

垂直矿体走向布置两步骤采场回采,无论充满还

是不接顶高度2 m以内,地表有约40 mm的下沉量,对表层碎石或覆土不明显,但是会引起井口下300 m内的副井井壁基岩及混凝土发生变形、应力集中开裂;充填不接顶达2 m及以上,底柱仍然会发生拉伸疲劳破坏。建议在副井井口下0 ~ -250 m沿井壁在近矿体侧每间隔约50 m高程补充布置应变计、应力计各2 ~ 3个,重点监测井口下0 ~ -250 m段的井筒变形。

经Flac^{3D}软件数值模拟分析,建议三鑫金铜矿井下采场参数按如下标准进行优化:

1)厚度大于15 m的矿体调整为垂直矿体走向布置采场、两步骤回采。在今后的生产布局中,要尽可能垂直矿体走向布置采场,且将一步骤、二步骤采场宽度分别调整为13 m、12 m较合理。

2)厚度不超过15 m的矿体,建议沿走向布置采场,但为了预防开采影响副井的稳定性,建议采用上向分层充填采矿法回采。按照东塘子铅锌矿等的研究及经验,分层高度建议不超过6 m。

4. 3 充填不接顶限值确定

实际开采中,由于各种施工原因及客观条件限制,嗣后不可能全部充满采空区。建立矿体厚约30 m的小模型,上部开采16 m高的矿体,下部开采17 m高的矿体,在2次开采之间留8 m高的底柱^[18-19]。顶部施加600 m 矽岩自重荷载,四周及底部位移约束,类似上述垂直矿体走向两步骤回采并及时嗣后充填,仿真上中段开采并充填后,下中段开采后充填不接顶高度分别为0,0.25,0.5,0.75,1.0,1.5,2.0,3.0 m时,底柱最大拉应力分布,结果见表2。

表 2 不同不接顶高度时底柱最大拉应力分布

Table 2 Distribution of maximum tensile stress in the sill pillar at different non-contact roof heights

不接顶 高度/m	一步骤开采后充填		二步骤开采后充填	
	最大拉应力/ MPa	拉应力区占比/ %	最大拉应力/ MPa	拉应力区占比/ %
0	0.912	81.2	0.694	74.1
0.25	0.899	80.72	0.875	78.70
0.5	0.893	72.5	0.984	71.7
0.75	0.895	74.6	0.988	79.2
1.0	0.893	76.7	0.993	75.4
1.5	0.898	74.51	1.021	82.35
2.0	0.899	83.39	1.014	82.79
3.0	0.897	83.91	1.003	83.12

随着上部矿体一步骤采空,采场四周的支承压力通过四周帮墙传递给深部,引起底柱向上弯;覆岩荷载深达600 m,较大的地压引起上部矿体一步骤开采后底柱上弯,导致受拉深度从上表面向下延伸较大,几乎贯穿了8 m厚的底柱,即使上部采后充满,上弯仍然很明显。

随着上部矿体二步骤采空,底板揭露长度从13 m增大到37 m,在上部充填荷载的作用下,下部矿体采空而不接顶高度逐步增大,底板上弯逐步回落,并逐步过渡到向下弯,以致引起底板的受拉区逐步向其下表面扩展、集中。

由表2可知:从充满到不接顶高度为0.5 m,一步骤开采后充填不接顶高度的变化引起的底柱最大拉应力及拉应力区占比均逐步减小;而从悬空0.5 m到3.0 m,二者又在逐步增大。因此,充填不接顶的最佳许可高度为0.5 m。

二步骤开采后充填不接顶高度的变化引起的底柱最大拉应力及拉应力区占比变化的拐点也出现在不接顶高度为0.5 m处。因此,充填不接顶的最佳许可高度为0.5 m。

4.4 围岩支护方式优化

4.4.1 支护现状

三鑫金铜矿井下目前使用支护方式包括:锚杆、钢筋防护网、喷浆、钢拱架、浇筑混凝土等多种。但只针对巷道和浅采采场进行了支护,未对中深孔采场进行支护。

4.4.2 采场受力分析

从Flac^{3D}软件模拟矿体开采模型中发现,随着矿体开采,悬空的上、下盘顶板围岩都有一定倾斜长度、

一定水平厚度的区域受拉,且下盘围岩受拉区比上盘拉应力略小,但是上盘围岩拉应力一般约为1 MPa,约为矽卡岩抗拉强度的41.5%,在拉应力长期疲劳作用下会发生围岩垮塌。随着充填,拉应力区逐步减小。因此,有必要开展预应力加固上盘围岩,避免其冒落而引起矿石贫化,也避免其冒落、垮塌而引起上、下盘巷道等过度岩移^[20]。

4.4.3 支护优化建议

若采纳预应力锚杆或锚索护顶,可以大范围抵消或降低顶板围岩的拉应力,从而使上盘围岩的应力达不到疲劳极限。从流变及疲劳强度等概念看,降低上盘顶板的拉应力较缩短上盘围岩的暴露时间更有利于其稳定^[21-22]。

在靠近上盘顶板矿岩分界线处施工切割横巷,揭露上盘围岩,并安装钢绞线预应力锚索支护上盘顶板,可以克服上盘围岩变形的临界应力。不仅每个50 m长的采区至少可以节省上盘施工4~6条50 m长的脉外联络巷道,而且还可以避免对上盘围岩的损伤。设计7排不小于7.0 m长的钢绞线预应力锚索,每排安装6根,每根施加900 kN锚固力、250 kN预应力加固采场的上盘顶板(见图3),可以有效取代垂直走向布置采场时中间拉槽、上下盘后退回采,避免或大幅度减小上盘围岩岩移。

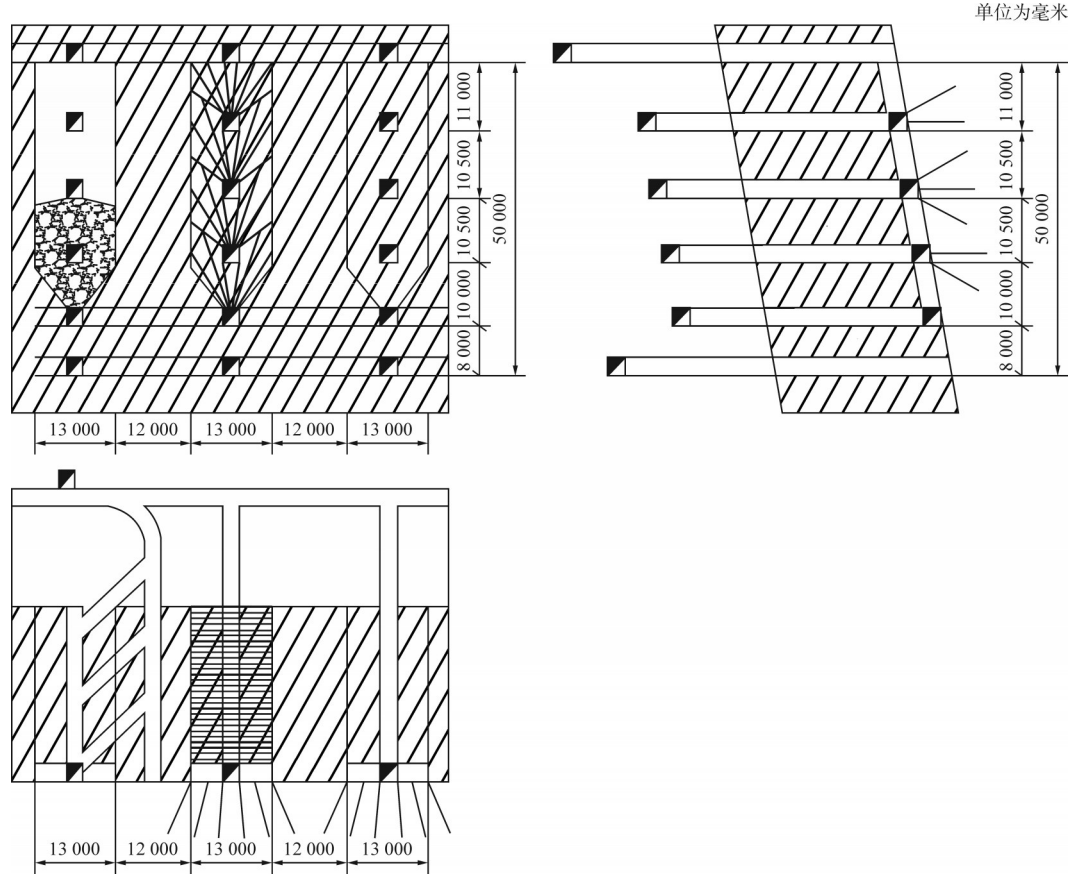


图3 靠近上盘边界切割、拉槽并锚网支护上盘顶板三视图

Fig. 3 Three-view diagram of cutting, slotting, and bolt-mesh supporting for the hanging wall roof near the hanging wall boundary

4.5 优化应用效果

1)将对上、下盘主要开拓巷道扰动的地压控制研究成果应用到-720 m、-770 m开拓中段,保证了巷道的施工安全,降低了巷道的二次返修率。

2)依据研究成果调整矿块回采设计参数,优化单体采场布置方式,采空区末期上、下盘围岩垮落现象得到有效控制,降低了采矿生产过程中的安全风险。

3)依据充填不接顶参数的研究成果,及时调查并补充井下悬空较大的采空区,减少悬空高度大于0.5 m的井下采空区存量,降低已充填采场的未接顶悬空高度,全面改善了三鑫金铜矿井下地压显现状况,并确保地面免受岩移而产生开裂和塌陷。

4)目前已在620 m、670 m中段共3个采场试用上盘锚索预应力支护新工艺,降低上盘围岩应力。单个采场可节省上盘穿脉及脉外沿脉巷约65 m,节约支护成本和掘进成本约15万元。

5 结 论

1)采用Flac^{3D}软件逐步骤数值模拟测试-720 m中段采空后其紧邻的上中段上盘、本中段下盘脉外沿脉巷道周边的最大拉应力或无拉应力时的最小压应力,得到随到矿体边界距离变化的巷道周边最小主应力变化曲线,从而确定上盘、下盘脉外沿脉巷道到矿体边界的安全经济合理位置分别约为24 m、27 m。

2)通过模拟采场上、下盘围岩及副井井壁局部拉应力等数值的变化规律,确定采场沿走向布置或垂直走向布置的标准,并给出了垂直矿体走向布置的一步骤、二步骤采场宽度分别调整为13 m、12 m的安全合理数值。

3)根据相关矿山的经验及小模型数值模拟结果,充填不接顶的高度不超过0.5 m。

4)优化围岩支护方式,在靠近上盘顶板矿岩分界线处施工切割横巷,揭露上盘围岩,并安装钢绞线应力锚索支护上盘顶板,克服上盘围岩变形的临界应力,避免对上盘围岩的损伤。

【参 考 文 献】

- [1] 李俊平.缓倾斜采空场处理新方法 & 采场地压控制研究[D].北京:北京理工大学,2003.
- [2] 李夕兵,周健,黄麟淇,等.中国黄金矿山开采技术回顾与展望[J].黄金,2020,41(9):41-50.
- [3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 803-2 813.
- [4] 甘仕伟.复杂地质条件下巷道稳定性分析与地压控制研究[D].武汉:武汉科技大学,2014.
- [5] 许富贵.深部巷道围岩温度流变耦合及开采致堤坝变形的数值模拟[D].北京:北京工业大学,2007.
- [6] 杨涛波.充填体下水平矿柱回采优化及地压控制研究[D].赣州:江西理工大学,2012.
- [7] 赵兴东.黄金矿山深井开采研究进展与发展趋势[J].黄金,2024,45(8):1-18.
- [8] 王辉,段文权,刘敬智,等.深井开采地压基础理论与防控研究进展[J].黄金,2024,45(8):19-27.
- [9] 长沙矿山研究院有限责任公司,湖北三鑫金铜股份有限公司.湖北三鑫金铜股份有限公司矿区典型矿岩体及充填体物理力学特性试验研究报告[R].长沙:长沙矿山研究院有限责任公司,2012.
- [10] 张建明,陈顺满.基于数值模拟的某铜矿深部采场结构参数优化研究[J].化工矿物与加工,2016,45(12):47-51.
- [11] 张绍周,苏之品,陈玉明.基于Flac^{3D}的某矿山开采方案优选及应用[J].黄金,2023,44(12):14-17,22.
- [12] 田全虎,和学衡,许卫军,等.深部巷道支护方案数值模拟优选及应用[J].黄金,2023,44(2):8-13.
- [13] 王磊,闫刚,付佳杰,等.基于Flac^{3D}的某金矿回采方案优化数值模拟研究[J].黄金,2024,45(6):11-15.
- [14] 李学锋,谢长江.深部高应力区采场结构参数优化研究[J].矿冶工程,2004,24(6):11-13,17.
- [15] 陈俊智,庙延钢,任春芳,等.金川龙首矿深部开采的采场结构参数优化研究[J].中国矿业,2006,24(7):41-45.
- [16] 周亚博.基于Flac^{3D}数值模拟的深部采场结构参数优化及应用[J].黄金,2022,43(5):51-55.
- [17] 郭玉豹,张苏闯,杨凯.深部开采地压活动特征分析及采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(6):43-47.
- [18] 刘绍君,胡宪铭.南非金矿深部开采中的地压管理技术[J].中国矿山工程,2013,42(6):41-45,52.
- [19] 刘小春,张小瑞,刘博.三鑫金铜矿保安矿柱回收合理充填体强度研究[J].黄金,2024,45(4):13-17.
- [20] 冷建民,吴大伟,王楠,等.三山岛金矿深部巷道围岩破坏机理及支护参数优化[J].金属矿山,2019(6):45-50.
- [21] 杨战标,李建建,赵万里.“三高一”高强锚注支护工艺优化与应用研究[J].能源与环保,2020,42(2):156-160,167.
- [22] 远义飞,蒋广朋,冷晓亮,等.深部区域岩体巷道支护结构参数设计研究[J].中国矿业,2023,32(增刊1):318-322.

(下转第41页)

Synergistic preg-robbing behavior of chloride ions and organic carbonaceous matter in a carbonaceous gold ore

Guo Jinyi^{1,2}, Lin Haibin^{1,2}, Li Youhui^{1,2}, Qiu Yaoxing^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Resources*;

2. *Xiamen Zijin Mining and Metallurgy Technology Co., Ltd.*)

Abstract: This study investigates the synergistic preg-robbing behavior of chloride ions and organic carbonaceous matter during the pressure oxidation process of a refractory carbonaceous gold ore from a mining area in Guizhou Province. The effects of chloride ion mass concentration, organic carbon content, reaction temperature, and reaction time on the synergistic preg-robbing effect were examined. Results indicate that preg-robbing is influenced by the presence of organic carbon, chloride ions, as well as the pressure oxidation temperature and time. When gold concentrate and raw ore were blended at a mass ratio of 1:1, with an organic carbon mass fraction of 4.5 %, a reaction temperature of 210 °C, a reaction time of 55 min, and an activated carbon dosage of 30 g/L, the pressure oxidation followed by carbon-in-leach cyanidation yielded a gold leaching rate exceeding 93.9 %. The preg-robbing effect was effectively mitigated by reducing chloride ion content using silver nitrate as an inhibitor, improving the pressure oxidation performance for the carbonaceous gold ore.

Keywords: carbonaceous gold ore; chloride ion; preg-robbing behavior; organic carbon; pressure oxidation; cyanidation

.....
(上接第 27 页)

Ground pressure control practice in deep mining in the Sanxin Gold–Copper Mine

Yao Yifei¹, Li Minzhi¹, Li Junping², Tian Bo¹

(1. *Hubei Sanxin Gold Copper Limited Company*;

2. *School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology*)

Abstract: As mining in the Sanxin Gold–Copper Mine extends to deeper levels, the engineering geological conditions and orebody occurrence have worsened, with increasing in-situ stress and intensified ground pressure manifestations. This study utilized field investigation data on ground pressure phenomena, in-situ stress measurements, and laboratory-derived physical and mechanical rock parameters. Using Flac^{3D} software for numerical simulation, the overall distribution pattern of ground pressure was analyzed. The study determined the reasonable safety distance from the orebody boundary to along-the-vein drifts in the hanging wall and footwall. It also optimized stope structural parameters and surrounding rock support methods during extraction to control issues such as roof caving and collapses, thereby preventing excessive ore dilution and rock mass displacement in both walls. A threshold for non-contact between the backfill and roof was proposed to avoid overall movement of the stope roof or backfill, which could result in surface cracking or subsidence. The research provides several conclusive recommendations for ground pressure control in deep mining, offering technical support and theoretical basis for the safe and efficient extraction of deep orebodies in the Sanxin Gold–Copper Mine.

Keywords: deep mining; ground pressure control; stope structural parameter; ground pressure investigation; numerical simulation; ground pressure distribution regularity; control method