

深井矿山巷道掘进掌子面岩爆卸压防治研究

Study on the prevention of drift advancement tunnel face rock burst
in deep-shaft mines by pressure release

李文, 刘育明, 张爱民, 张少杰(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:深井金属矿山开采面临着严重的地压灾害环境,极大地威胁着井下作业人员及设备的安全。巷道掘进破坏了深部原岩地应力场,面临地应力重分布高应力积聚带来的掌子面岩爆风险。本文以深部高地应力环境矿山巷道掘进掌子面岩爆灾害为背景开展掌子面岩爆卸压防治研究,提出了掌子面岩爆发生机理及超前预裂爆破卸压理念,分析了超前卸压爆破深度对卸压效果影响以及掌子面超前卸压爆破工艺方案,对于消除巷道掌子面前方岩爆灾害发生起到重要作用,为深井矿山巷道掘进工程借鉴应用。

关键词:深井矿山; 巷道掘进; 掌子面岩爆; 超前卸压爆破

中图分类号: TD323 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)06-0011-05

Abstract:The mining of deep-shaft metal mines is faced with severe ground pressure disaster, and greatly threatens the safety of underground operators and equipment. Drift advancement destroys the in-situ stress field of the deep protolith, and is under the risk of tunnel face rock burst caused by the redistribution of in-situ stress and the accumulation of high stress. This paper studies the tunnel face rock burst disaster prevention in the scenario of tunnel face rock burst during drift advancement in a deep-shaft and high ground stress mine. The mechanism of tunnel face rock burst and the idea of advance pre-splitting blasting for pressure relief blasting are put forward. The impact of advance pressure relief blasting depth on the pressure relief effect and the process scheme of tunnel face advance pressure relief blasting are analyzed, which is of vital importance to prevent rock burst disaster from happening hazards in front of the tunnel face, and offers reference to drift advancement in deep-shaft mines.

Key words:deep-shaft mine; drift advancement; tunnel face rock burst; advance pressure relief blasting

1 前言

随着人类社会对各种矿产资源需求的不断增加,向地球深部索取矿产资源已成为大趋势,推动地下矿山不断朝着地球深部发展。伴随矿山开采深度的增加,矿岩体所处的地质环境将更为复杂,开采技术条件将更为严苛,明显表现特征为高地应力、高地热、高岩溶水压(即深部“三高”特征)。目前世界上开采最深的金属矿山是南非的姆波尼格(Mponeng)金矿,其开采深度约4 350 m^[1],我国深井金属矿山开采深度主要在1 000~1 700 m水平。深井矿山深部工程作业面临着严重地压灾害威胁,突出表现形式为岩爆。岩爆是高地应力条件下的一种非常复杂的动力型地压灾害现象,伴随着爆裂声响及岩石碎

块剥离、崩出,具有很强的突发性和破坏性。通常干燥、完整、坚硬且处于高地应力环境的岩体如花岗岩、石英岩等在开挖扰动后易发生岩爆现象。尽管相关学者在岩爆诱发条件、孕灾机制及监测预警等方面开展了大量研究并不断剖析岩爆获取新认知^[2-6],岩爆灾害防治仍是深部岩体工程领域的世界性难题。

巷道掘进是地下矿山采矿活动的重要开拓采准工程,具有作业面环境差、安全风险高、施工周期长等特点,通常凿岩、爆破等工人需在巷道掌子面环境连续作业数小时。巷道掌子面和帮壁、拱顶是深井矿山岩爆发生高风险部位,直接威胁着作业人员人身安全和设备财产安全。前人研究表明巷道帮壁/拱顶岩爆通常可通过实施光面爆破、喷锚网支护^[7]等措施得到较好地防治,但针对巷道掌子面岩爆及其防治措施研究相对较少。董鹏^[8]等(2021)针对引汉济渭工程秦岭隧洞工程岩爆段采用掌子面周边布孔和中部布孔两种方式开展了超前应力释放爆破

[作者简介] 李文(1988-),男,博士,高级工程师,从事矿山岩石力学研究工作。

[引用格式] 李文,刘育明,张爱民,等.深井矿山巷道掘进掌子面岩爆卸压防治研究[J].中国矿山工程,2021,50(6):11-15.

研究,对围岩内部应力释放效果进行了分析。吴世勇^[9]等(2018)针对锦屏二级引水隧洞开展了掌子面垂直超前孔爆破卸压研究,研究表明在掌子面前方可产生一定延伸范围的松弛区,有效释放掌子面处的集中应力。李俊平^[10]等(2018)将 ANSYS/LS-DYNA 程序和 FLAC^{3D}程序相结合,动态模拟了硬岩巷道端面的钻孔爆破卸压过程,分析了不同卸压方案的钻孔爆破卸压效果,得到了合理的钻孔布置方式及钻孔深度、装药长度。

为了有效地降低深井矿山巷道掘进过程中掌子面岩爆发生机率及其危害,本文在分析总结前人研究成果基础上提出了“掌子面超前预裂爆破卸压”理念,并开展了巷道掌子面超前卸压效果仿真与卸压爆破工艺设计,定量分析了卸压前后巷道围岩应力分布特征,可为后期深井矿山巷道工程安全高效实施提供技术支撑。

2 巷道掌子面岩爆发生机理分析

巷道工程施工后,岩体原始应力平衡状态被破坏,应力重分布后形成围岩局部应力集中,当应力积聚到一定程度并得到突然释放,即为岩爆发生提供了能量基础。实践和研究发现,岩爆的发生主要与巷道开挖后围岩切向应力大小有关。

采用 FLAC^{3D}软件建立了一个尺寸分别为 100 m × 100 m × 40 m 的深部巷道开挖模拟三维模型。巷道位于模型中央,巷道轴向沿模型 Y 轴方向。首先对模型施加围岩物理力学特性参数及初始应力边界条件,得到巷道未开挖前的初始应力状态,巷道区域最小主应力约为 44.65 MPa,最大剪应力约为 10 MPa。然后模拟巷道开挖 10 m 后的围岩扰动应力重分布特征(图 1),从图 1 中应力分布结果可知在巷道拱顶、底板及掌子面前方均有应力集中区域。图 2 所示为巷道掌子面前方不同位置的最大剪应力分布规律,位于掌子面前方 1.5 m 处存在最大剪应力峰值,最大剪应力值约为 21.1 MPa。通过以上分析可知,巷道开挖后在掌子面前方 1.5 m 处存在剪应力集中效应,当超过岩石体的抗剪强度就会发生剪切破坏进而诱发掌子面岩爆。

3 巷道掌子面岩爆卸压防治研究

3.1 掌子面超前预裂爆破卸压机理分析

为了防治巷道掌子面岩爆发生,提出在掌子面

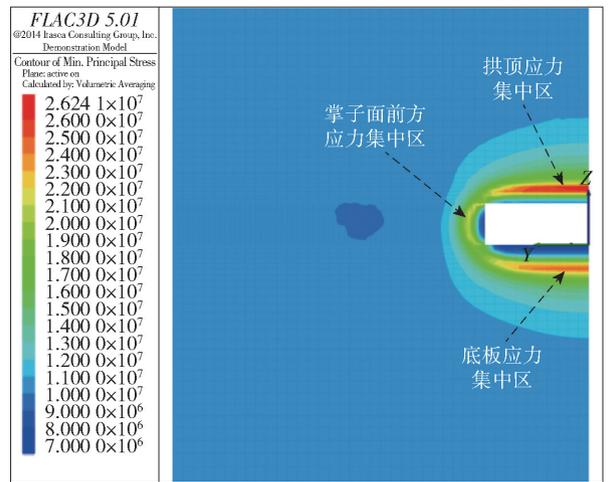


图 1 巷道开挖后围岩最大剪应力分布云图

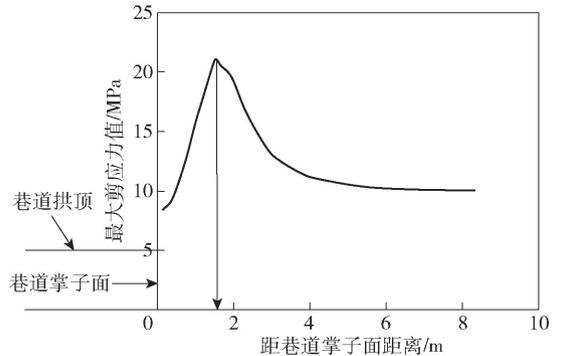


图 2 巷道掌子面前方最大剪应力分布曲线

掘进循环作业中向掌子面前方施工超前钻孔并与掘进爆破同工序起爆,在下一掘进循环掌子面前方形成一定厚度的碎裂区,起到阻隔高地应力集中效应的作用,实现掌子面岩爆防治目的。图 3 所示为深部巷道工程超前预裂爆破卸压机理示意图,可以看出,实施超前预裂爆破后在掌子面前方形成了碎裂区,同时掌子面前方应力峰值向深部转移,降低了临近掌子面区域的应力集中效应。

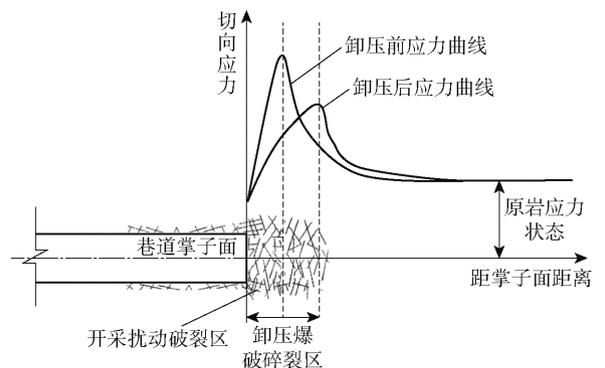


图 3 深部巷道掌子面超前爆破卸压机理

3.2 掌子面超前卸压爆破效果分析

模拟不同卸压爆破深度对卸压效果的影响,此次模拟过程中卸压爆破过程进行了简化,假定卸压

爆破后在装药段所在深度形成一碎裂区,在模拟过程中以空区表示。图 4 所示为巷道掌子面前方卸压爆破深度对应力扰动影响,从图中可以看出,随着卸

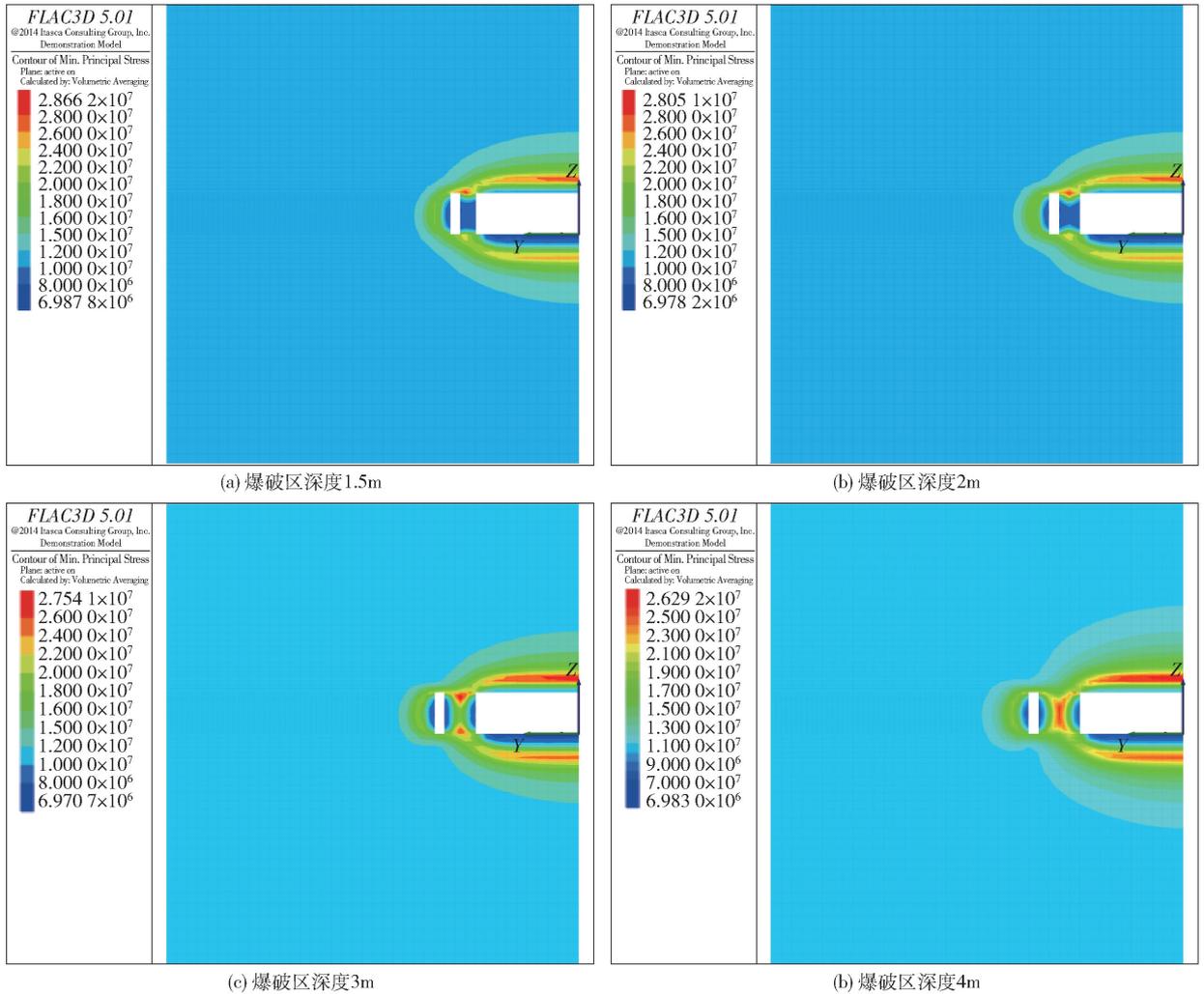


图 4 巷道掌子面前方卸压爆破深度对应力扰动影响

压爆破深度距离掌子面距离的增大,在掌子面前方的应力集中区先消散然后重新聚积。当卸压爆破深度大于 2 m 时,巷道掌子面前方的应力集中区重新出现,说明该情形下实施的卸压爆破不能够消除掌子面前方高地应力集中的问题,掌子面仍然存在岩爆风险。图 5 所示是不同掌子面超前卸压爆破深度对卸压效果的影响,从中可以看出,当卸压爆破深度为 4 m 时掌子面前方最大剪应力集中效应加剧,相比未卸压爆破前增加了约 20%;当卸压爆破深度小于 3 m 时掌子面前方最大剪应力集中效应消散,相比未卸压爆破前分别降低了 10.9% (卸压爆破深度 3 m)、53.6% (卸压爆破深度 2 m) 和 61.9% (卸压爆破深度 1 m)。

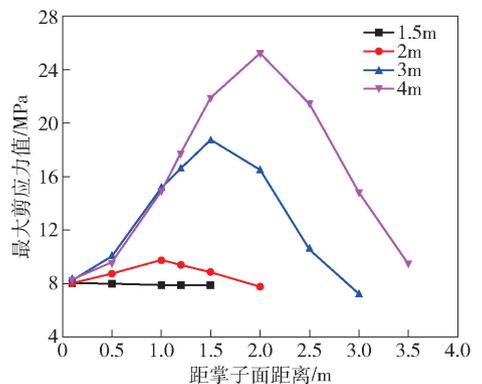


图 5 掌子面超前卸压爆破深度对卸压效果影响

3.3 掌子面超前卸压爆破工艺方案

1) 掌子面超前卸压爆破钻孔布置

以某深井矿山深部巷道工程为例开展掌子面超

前卸压爆破钻孔布置方案设计。图6所示为不同形式的超前预裂爆破钻孔布置示意图。图中巷道断面型式为直墙三心拱,巷道宽度3.9 m,高度4.15 m,直墙高度2.8 m。巷道掌子面炮孔主要有掏槽孔、辅助孔、周边孔和卸压孔,其中掏槽孔和周边孔的布置形式保持不变,根据卸压孔的布置形式设计了4

种方案。其中,方案一和方案三中卸压孔数量为6个,方案二和方案四中卸压孔数量为5个。炮孔直径均为50 mm,卸压孔长度为5 m,其他孔深均为3 m。掏槽孔、辅助孔和卸压孔均为水平直孔,周边孔根据在巷道所处部位分别向拱顶、直墙外侧及底板底部方向呈5°倾角。上述炮孔布置型式可供生产

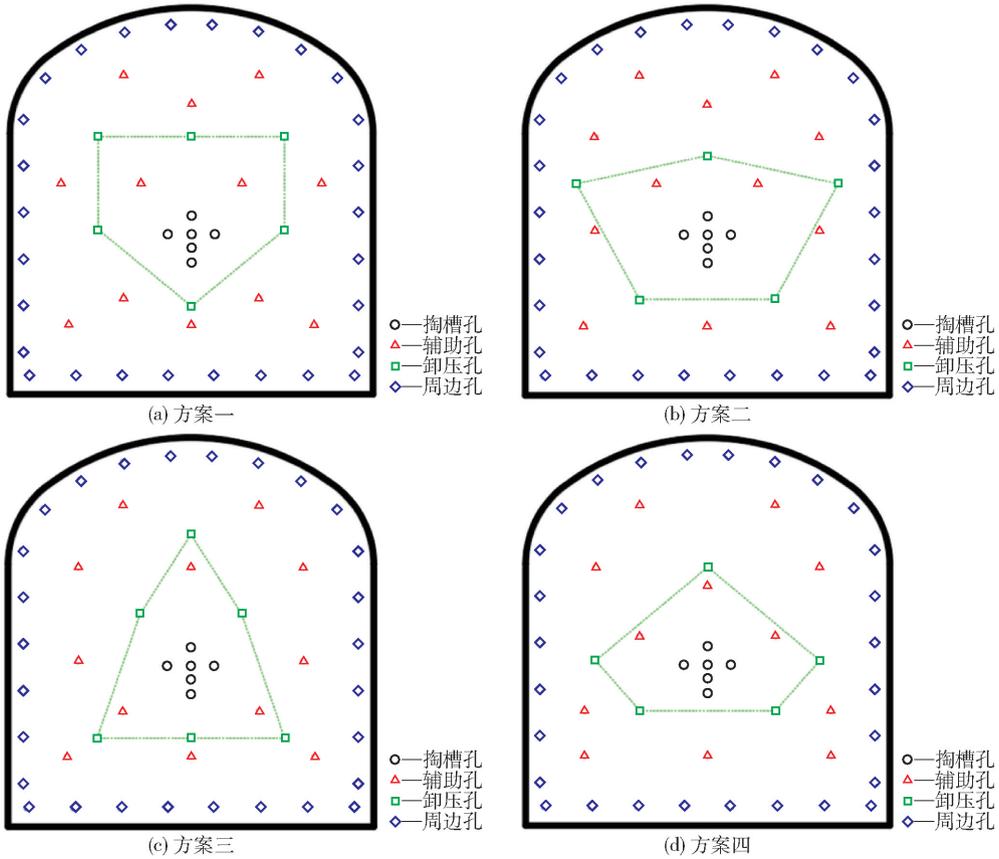


图6 巷道掘进爆破炮孔布置图

实践借鉴使用。

2) 装药及起爆

待掌子面钻孔施工完成后,开始装药、连线及起爆工作。根据矿山现场实际条件选用炸药材料,通常为卷状乳化炸药。卸压孔采用密实孔底装药,装药长度为2 m,堵塞长度为3 m;掏槽孔、辅助孔采用密实孔底装药,装药长度为2 m,堵塞长度为1 m;周边孔采用分段间隔装药,总装药长度控制在1.5 m,堵塞长度为1 m。炮孔孔口采用黏土、砂子、水按比例调配的炮泥堵塞。各钻孔装药结构如图7所示。

掌子面超前爆破卸压孔与巷道循环掘进爆破孔(掏槽孔、辅助孔、周边孔)作为一个工序同步起爆,按照卸压孔、掏槽孔、辅助孔、周边孔的顺序采取孔间毫秒微差方式起爆,可根据现场工程条件合理有

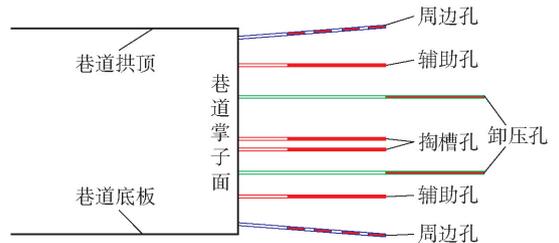


图7 掌子面超前卸压爆破钻孔装药结构示意图
效连接起爆网络。

4 结论

通过对深井矿山巷道掌子面岩爆发生机理分析,提出了掌子面超前预裂爆破卸压理念并开展了卸压爆破效果分析与工艺设计,得出以下结论:

(1) 深部巷道工程掌子面前方围岩体内部剪应

力积聚并高于岩体抗剪强度时导致剪切破坏是掌子面岩爆发生的重要诱因。

(2)通过掌子面超前卸压爆破可以有效地降低掌子面前方剪应力水平,实现积聚高应力转移与消散,起到降低岩爆风险作用。

(3)通过分析卸压爆破深度对掌子面前方应力重分布影响表明,掌子面超前卸压爆破深度应不大于2 m,指导掌子面超前卸压爆破工艺方案设计。

[参考文献]

- [1] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.
- [2] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制:时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561-569.
- [3] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649-673.
- [4] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制:即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报,

2012, 21(3): 433-444.

- [5] Zhou Jian, Li Xibing, Hani S. Mitri. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 632-659.
- [6] 张传庆, 俞绍, 陈珺, 等. 地下工程围岩潜在岩爆问题评估方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(s1): 341-349.
- [7] 李春林. 岩爆条件和岩爆支护[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 674-682.
- [8] 董鹏, 刘福生. 深埋隧洞超前应力释放爆破方式优化研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 117-121.
- [9] 吴世勇, 周济芳, 杜成波. 基于爆破卸压地应力快速释放的强岩爆防治方法与效果评价研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 22-29.
- [10] 李俊平, 叶浩然, 侯先芹. 高应力下硬岩巷道掘进端面钻孔爆破卸压动态模拟[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 962-967.

(上接第10页)

(2)-960 m中段开采后,应力集中发生了较为明显的转移演化,在矿柱2的西侧端部形成了由下至上的应力壳。

(3)在不留设矿柱3工况下,对于矿柱2来讲,-1 020 m中段的矿柱承载作用降低的情况下,-960 m中段的矿柱仍能发挥承载作用。

4)通过对不留设矿柱3和留设矿柱3两种工况开采效应的对比可知,不留设矿柱3工况下矿柱的应力集中程度相对较高,应力变化幅度也相对较大,而留设矿柱3工况下,矿柱中的应力集中程度相对较低,开采扰动压力的分布相对更为均衡。

[参考文献]

- [1] 于润沧. 现代矿山工程设计理念诠释——献给中国有色工程设计研究总院建院65周年[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(4): 1-3.
- [2] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展

战略[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417-426.

- [3] 刘育明. 超大规模深井开采若干技术解决方案探讨[J]. 中国矿山工程, 2016, 45(6): 64-69.
- [4] 陈顺满, 吴爱祥, 王贻明, 等. 深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 2050-2057.
- [5] 宋卫东, 曹帅, 付建新, 等. 矿柱稳定性影响因素敏感性分析及其应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 271-277.
- [6] 赵国彦, 周礼, 李金跃, 等. 房柱法矿柱合理尺寸设计及矿块结构参数优选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 3943-3948.
- [7] 李占金, 郝家旺, 孙文诚, 等. 深部大规模开采岩体稳定性数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2018(2): 56-60.
- [8] 王文军, 李家树, 徐帅, 等. 深部开采过程中隔离矿柱承载机理及厚度优化[J]. 金属矿山, 2020(8): 38-43.