

露天地下联合开采下盲竖井稳定性影响分析

黄敏^{1,2,3}, 温晨^{1,2}, 魏军强^{1,2}, 饶帝军^{1,2}, 蔡思杰^{1,2}

(1. 紫金矿业集团股份有限公司; 2. 紫金(长沙)工程技术有限公司; 3. 江西理工大学资源与环境工程学院)

摘要:为研究露天地下联合开采对盲竖井的稳定性影响,以国内某金铜矿为工程背景,对矿山盲竖井现状进行调研,分析盲竖井可能出现的破坏形式及稳定性影响因素;根据实际地质条件,建立矿区精密化三维数值计算模型,按照露天地下联合开采规划对盲竖井稳定性影响进行模拟分析,从井筒位移、半径收敛等角度系统地研究了露天地下联合开采对盲竖井稳定性的影响;按照相关标准对盲竖井倾斜、曲率和井筒最大轴向变形进行计算与分析。研究表明:在露天地下联合开采下,盲竖井不会发生轴向变形、倾斜变形或曲率变形破坏,露天地下联合开采对盲竖井稳定性影响较小,不会影响盲竖井的正常使用,盲竖井可以维持稳定。研究成果可为矿山后续井筒提升、维护及安全生产提供技术支撑。

关键词:露天地下联合开采;盲竖井;稳定性;3DMine;Flac^{3D};三维数值模拟

中图分类号:TD79.3

文章编号:1001-1277(2025)10-0039-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251006

引言

竖井井筒是深部矿山安全生产所必须的通道,是矿山的“咽喉”^[1-4]。作为矿井生产的主要通道,井筒变形超过一定限差后,可能会诱发井壁破坏,影响矿山安全生产,井筒的稳定性是矿山安全生产的关键^[5-8]。马凤山等^[9-12]采用数值模拟的方法分析了临采空区、矿房等多种工况下竖井井筒的稳定性。然而,少有文献涉及露天地下联合开采对井筒稳定性影响的研究。本文以国内某金铜矿露天地下联合开采为背景,采用3DMine-Rhino-Griddle-Flac^{3D}软件耦合建立高仿真三维精细化矿区模型,探讨在露天地下联合开采条件下盲竖井的稳定性,为后续矿体安全开采提供指导。

1 工程概况

1.1 盲竖井工程地质条件

该金铜矿采用露天地下联合开采方式,露采剩余服务年限7 a,预计2032年完成露天开采。该矿山设计地采服务年限为15 a,预计2027年完成地下开采,剩余服务年限约为2.5 a,地采主要开采深部-100~100 m标高的铜矿体,采用阶段空场+嗣后充填采矿法回采矿体^[13],井下采用“胶带斜坡道+盲副井”联合开拓方式,盲竖井井口标高357 m,井底标高-171 m,最大提升高度507 m,矿区露天地下联合开采方式及盲竖井

相对位置关系如图1所示。盲竖井断面净直径为5 m,深度约为528 m。盲竖井井筒采用混凝土整体支护,支护厚度为350 mm,混凝土强度等级为C25。

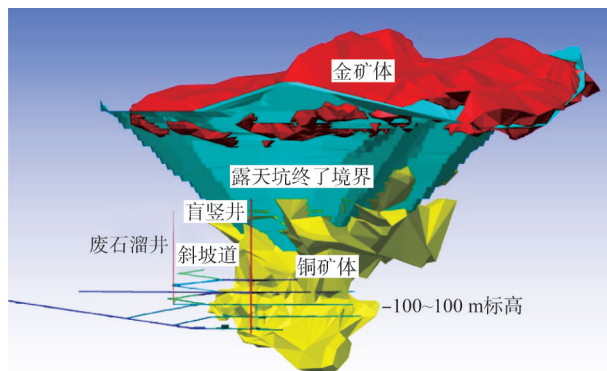


图1 露天地下联合开采方式及盲竖井相对位置关系

Fig. 1 Combined open-pit and underground mining method and relative position of the blind shaft

1.2 盲竖井稳定性现状分析

通过对矿区盲竖井的实地踏勘及对井壁情况的现场拍摄与记录(如图2所示),发现井壁局部存在淋水、蜂窝、麻面和露筋等现象,但这些问题范围较小且未连通,对盲竖井的整体稳定性未造成影响。此外,部分井壁曾通过混凝土砂浆或混凝土浇筑的方式进行整修,这些部位未再次出现破损,表明井壁围岩的变形量很小,未发生进一步的破坏。同时,井壁内侧未见大裂缝、大变形、剥落或片帮等情况,也未出现轴

收稿日期:2025-05-23; 修回日期:2025-07-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51804079);福建省自然科学基金项目(2019J05039);国家重点研发计划项目(2022YFC2903900);紫金矿业集团股份有限公司2022年科技计划项目(5401KY2022100003)

作者简介:黄敏(1985—),男,高级工程师,博士研究生,从事采矿技术及岩石力学方面的研究工作;E-mail:397982842@qq.com

向变形、倾斜变形或曲率变形破坏,整体上盲竖井井壁处于稳定状态,表明其在现阶段具有良好的稳定性,然而,后续稳定性状况需结合矿区的开采规划进行动态评估。为此,通过数值模拟等方法,针对未来可能的开采活动对井壁稳定性产生的影响进行深入分析,以确保后续运行的安全与可靠性。

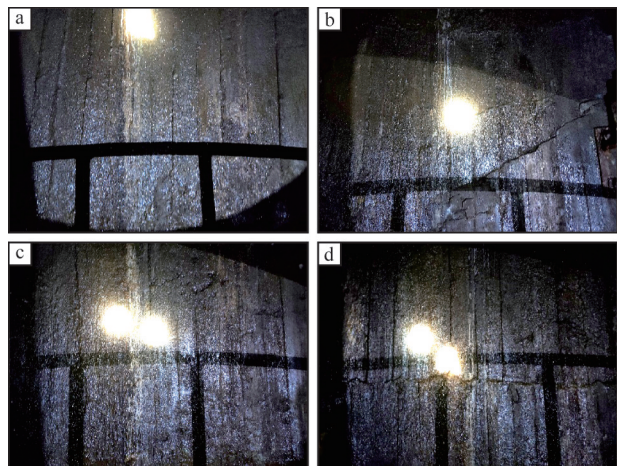


图2 盲竖井井壁现状

Fig. 2 Current status of the blind shaft wall

2 盲竖井稳定性破坏形式及稳定性影响因素

2.1 盲竖井常见的破坏形式

针对竖井井筒的变形破坏特征,总结井筒常见的几种破坏形式^[14]:

- 1)倾斜变形破坏。倾斜变形破坏分为纵向变形破坏和径向变形破坏2种形式。纵向变形由断层或软弱破碎带的滑动引起,导致井筒局部或整体错动破坏。径向变形由于围岩受到挤压或拉伸应力影响,出现“缩颈”或塌陷,进一步分为径向挤压和拉伸破坏。
- 2)轴向变形破坏。由于矿岩或地层的不均匀变形,井壁承受轴向拉伸或压缩。当变形超过临界值时,可能导致井筒发生轴向拉伸或压缩破坏,特别是在岩层性质差异显著的情况下更为明显。
- 3)曲率变形破坏。曲率变形可分为偏转变形和弯曲变形。由于井筒周边受力不均,井筒整体可能产生偏转或弯曲,当变形程度超过井筒承载能力时,井壁可能损坏。

2.2 盲竖井稳定性影响因素

盲竖井稳定性取决于周边围岩条件、地下水状况、应力环境、采动影响和井筒本身支护结构等因素^[15-16]。

- 1)围岩岩体质量。根据现场工程地质条件及井筒工程地质剖面图各岩组情况,综合采用RQD指标分类、RMR系统分级及Q系统对围岩岩体质量进行评价与分析,结果表明,整个井筒围岩为Ⅲ—Ⅴ类围岩。
- 2)地下水条件。当地下水通过断层、裂隙、破碎带或裂隙密集带流向盲竖井井筒内,地下水可能对混凝土衬砌有一定侵蚀性,也应引起足够重视。
- 3)井筒围岩应力环境。井筒稳定性受最大水平主应力及最小水平主应力影响,当二者相差较小时,有利于井筒稳定;当二者相差越大,越不利于井筒稳定,将导致井壁剪切破坏。地应力分布规律则需要通过现场地应力测试得出。
- 4)采动影响。矿井投产后,井筒将受到周边反复开采扰动影响,可能产生局部或整体破坏。
- 5)主井施工与支护形式。井筒施工工艺与支护类型是井筒施工后的固有属性,其对井筒本身的稳定性也将产生重要影响。

3 盲竖井稳定性数值模拟分析

在数值计算前,需充分考虑矿山的开采现状和规划,制定合理的模拟方案,明确模拟的各种逻辑关系,确保数值模拟贴近生产实际。本次模拟计算主要分析露天地下联合开采扰动下盲竖井的应力应变状态及盲竖井的稳定性状况。由于露天与地下开采时间较长,露采无需按台阶一步步开挖,地采也无须按细小的开挖步骤进行模拟计算。因此,按矿山生产规划适当简化计算时步,以年为时步分析露天地下联合开采对盲竖井的影响,其中重点分析开采现状(露天地下联合开采)、2025年末(露天地下联合开采)、2027年末(露天地下联合开采,2027年末地采结束)、2032年末(露采结束)下的盲竖井稳定性状况,简化后的模拟开挖步骤如表1所示。露天和地下开采具体规划如图3和图4所示。

表1 矿区露天地下联合开采模拟开挖步骤

Table 1 Simulated excavation steps of combined open-pit and underground mining in the mining area			
模拟工况/时步	露天开采规划	地采开采规划	地采充填规划
工况一/开采现状	露天开采现状	地采现状	充填现状
工况二/2025年末	400 ~ 364 m 平台	50 ~ 100 m 中段 2 [#] 、11 [#] 等矿房; 0 ~ 50 m 中段 2 [#] 、11 [#] 等矿房; 0 ~ -50 m 中段 E7 [#] 等矿房; -50 ~ -100 m 中段 6 [#] 、4 [#] 等矿房	50 ~ 100 m 中段 25 [#] 、23 [#] 等矿房; 0 ~ 50 m 中段 23 [#] 、17 [#] 等矿房; -50 ~ -100 m 中段 6 [#] 、E2 [#] 等矿房
工况三/2027年末	364 ~ 148 m 平台	地采剩余全部未采矿房	地采剩余全部未充填矿房
工况四/2032年末	露天终了境界		

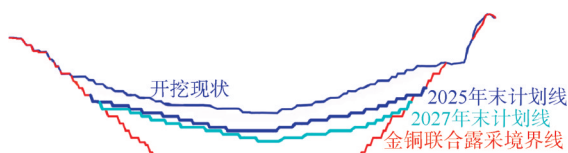
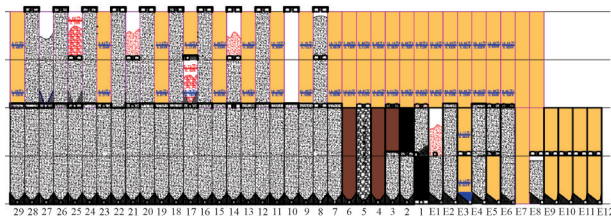
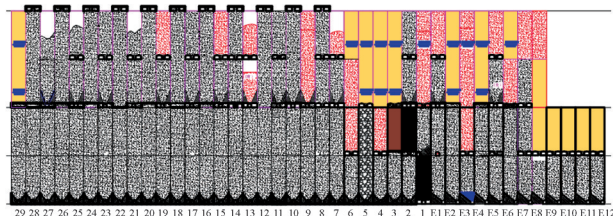


图3 露采生产规划

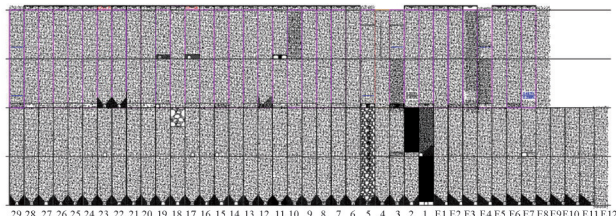
Fig. 3 Open-pit production plan



a) 矿体开采与充填现状



b) 2025年末计划开采与充填范围



c) 2027年末计划开采与充填范围

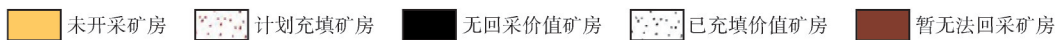


图4 地采开采与充填规划

Fig. 4 Underground mining and filling plan

段规划对地采矿体模型进行矿房划分,结果如图6所示;最后对盲竖井进行开挖衬砌,并按照开采规划进行露采和地采开挖充填,分析露天地下联合开采对盲竖井的稳定性影响。模型中所用到的物理力学参数来自室内试验,并基于 Hoek-Brown 准则进行修正与折减计算,最终得到的各岩体物理力学参数如表2所示。

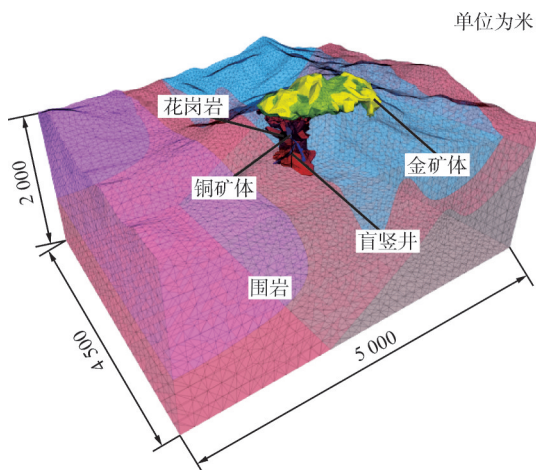


图5 Flac^{3D}整体数值计算模型

Fig. 5 Overall numerical calculation model using Flac^{3D}

基于模拟方案,在原始地形模型基础上,开挖三维数值模型,数值模拟中移除了开采规划各工况下包

采用 3DMine-Rhino-Griddle-Flac^{3D} 软件耦合构建该金铜矿实体模型,数值计算模型依据未开采的原始地表及岩层分布构建。首先,建立未开采下矿区的整体模型,如图5所示,模型整体尺寸为 5 000 m×4 500 m×2 000 m,包含中细粒花岗岩、风化花岗岩、英安玢岩和矿岩4个地层,以及露天开挖步、地采开挖步、地采充填步;然后,根据矿区地采-100~100 m 中



图6 地下-100~100 m中段矿房划分模型

Fig. 6 Ore chamber division model of the -100 to 100 m underground levels

含的露天开采区域和地下开采区域的岩层模型,并按规划进行相应充填。根据模拟结果,以盲竖井井筒中心原始坐标(0,0)为参考依据,提取盲竖井三维变形云图,结果如图7所示。对开采后盲竖井表面4个监测点坐标进行平均拟合,得到盲竖井井筒半径偏差如图8、图9所示。

盲竖井在露天地下联合开采条件下表现出良好的稳定性,其井壁整体仅向露天坑方向发生轻微偏移,变形幅度较小。具体表现为:100 m 标高以上区域受露天矿开采影响较显著,水平方向出现轻微倾斜,

表2 矿(围)岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of ore (surrounding) rocks

岩性	容重/(kN·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
矿岩	27.58	0.96	9.8	2.15	36.26	0.24
中细粒花岗岩	25.53	0.76	10.5	3.37	40.53	0.19
风化花岗岩	24.08	0.25	1.38	0.36	19.55	0.18
英安玢岩	23.30	0.51	3.58	1.15	30.12	0.11

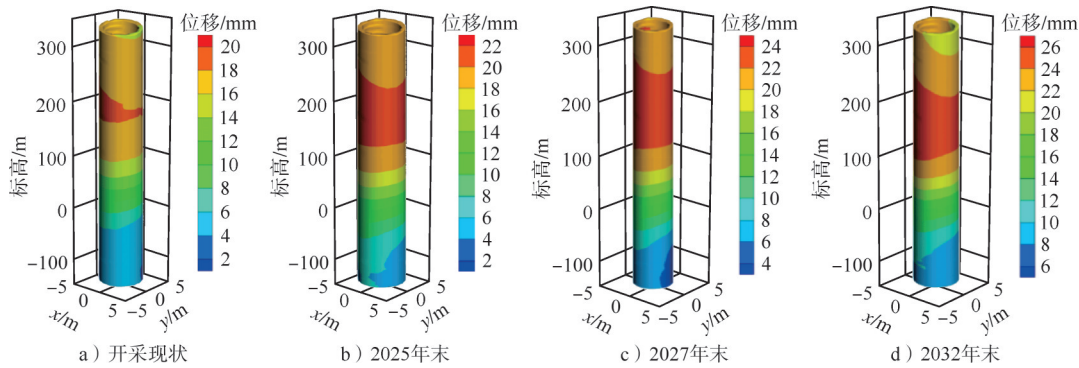


图7 各开采工况下井筒三维变形云图

Fig. 7 3D deformation contour maps of the shaft under different mining conditions

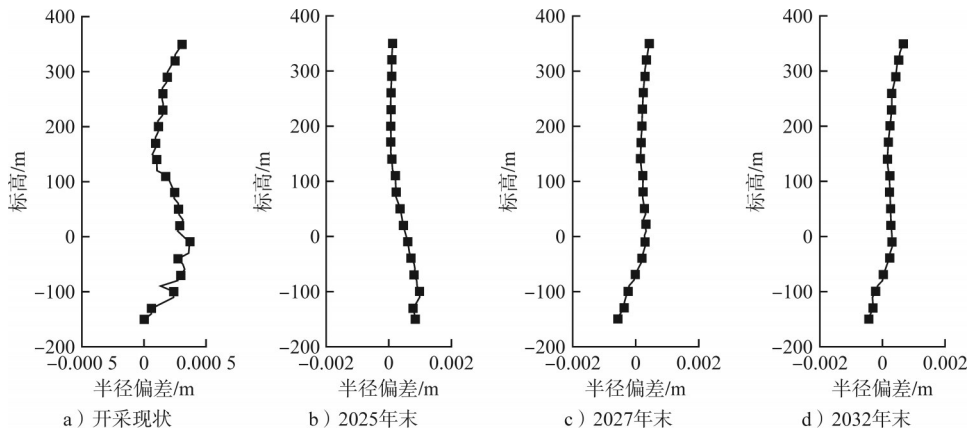


图8 各开采工况下井筒半径偏差

Fig. 8 Shaft radius deviations under different mining conditions

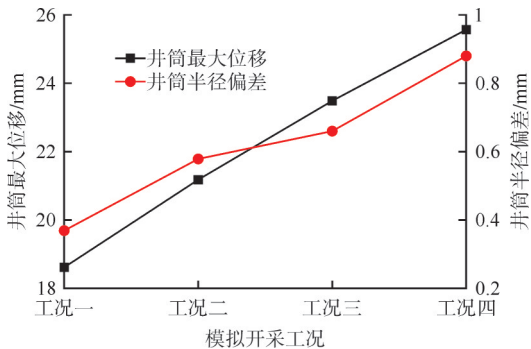


图9 盲竖井井筒最大位移及半径偏差变化曲线

Fig. 9 Curves of maximum displacement and radius deviation of the blind shaft

最大位移为25.6 mm,出现在150 m标高处;而井筒下部由于距离地下开采矿体较远,未受到明显影响。综合来看,井筒的整体位移小于30 mm,半径偏差最大为0.88 mm,均属于毫米级变形。

通过模拟得到矿山在不同开采工况下,露天地下联合开采过程中盲竖井井筒的变形指标,如表3所示。根据GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》,井筒变形控制指标要求轴向变形小于2.0 mm/m,曲率小于 $0.2\times 10^{-3}/\text{m}$,倾斜变形小于3 mm/m。模拟结果表明,盲竖井在联合开采过程中,其轴向变形、曲率和倾斜变形均远低于国家标准限值。因此,盲竖井不会因变形导致轴向、倾斜或曲率破坏,其井壁在当前开采条件下能够长期保持稳定。

4 结 论

通过现场调研、理论分析和数值模拟,对盲竖井的稳定性现状及其在露天地下联合开采条件下的稳定性进行了系统研究,主要结论如下:

1)现场调研与稳定性现状。现场踏勘结果显示,盲竖井井壁内未发现明显裂缝、显著变形、剥落或片

表3 矿区露天地下联合开采下盲竖井井筒变形指标

Table 3 Deformation indicators of the blind shaft under combined open-pit and underground mining

模拟工况/时步	倾斜变形/ (mm·m ⁻¹)	曲率/ (×10 ⁻³ m ⁻¹)	轴向变形/ (mm·m ⁻¹)
工况一/开采现状	0.053 1	0.024 1	0.038 8
工况二/2025 年末	0.060 6	0.027 5	0.038 7
工况三/2027 年末	0.067 1	0.030 5	0.046 8
工况四/2032 年末	0.073 2	0.033 3	0.049 3

帮等现象,也未发生轴向变形、倾斜变形或曲率变形破坏。这表明,在当前开采条件下,盲竖井整体稳定性良好。此外,井内设施保持完好,盲竖井持续正常运行,进一步证明了其当前稳定状态。

2)数值模拟分析与开采影响。运用3DMine-Rhino-Griddle 软件耦合构建了复杂的露天地下联合开采三维计算模型,并结合Flac^{3D}有限差分法进行数值计算,系统研究了不同开采工况对盲竖井稳定性的影响。结果表明,露天地下联合开采过程中,盲竖井井筒位移会轻微增加,但其最大轴向变形、倾斜变形和曲率变形均远低于国家相关标准。盲竖井未出现任何破坏现象,能够长期保持安全稳定状态。

综上研究表明,露天地下联合开采对盲竖井的稳定性影响极小,盲竖井能够在当前及未来的开采条件下满足长期安全使用的需求。这一研究成果可为矿山后续井筒提升、维护及安全生产提供重要技术支持。

[参 考 文 献]

[1] 路耀华,崔增祁.中国煤矿建井技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,1995.

[2] 王胜开,朱志根,余一松,等.深部高应力竖井井壁稳定性分析及支护优化[J].矿业研究与开发,2022,42(4):38-44.

[3] 丁子晨.深部开采对下盘竖井稳定性影响的研究[J].采矿技术,2023,23(1):90-93.

[4] 王昊.鑫达金矿盲竖井保安矿柱圈定及其稳定性分析[D].包头:内蒙古科技大学,2021.

[5] 周正谦,三也.在保安矿柱区采矿时竖井稳定性的评价[J].采矿技术,1992(19):17-18.

[6] 丁子晨.深部开采对浅部采空区及竖井稳定性影响的研究[D].包头:内蒙古科技大学,2022.

[7] 谷中元,李彩虹,郭利杰,等.地下深部开采对竖井稳定性影响的数值分析[J].有色金属(矿山部分),2021,73(5):14-19.

[8] 冷希乔,严金秀,韩瑀萱.地应力对深大竖井稳定性影响研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(5):1 451-1 458,1 483.

[9] 马凤山,赵海军,郭捷,等.山东望儿山矿区浅部复采对井筒稳定性影响的数值模拟[J].黄金科学技术,2012,20(4):49-53.

[10] 魏秀泉.采空区群对1#竖井稳定性影响数值分析及实时监测[J].矿冶工程,2017,37(6):26-29.

[11] 黄武胜,余伟健.多水平井巷施工对竖井稳定性影响的数值分析[J].金属矿山,2012(5):35-40.

[12] 钟应伟.深厚第四系流砂层竖井井筒稳定性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2013.

[13] 樊军伟.高地应力地下洞室岩爆与充填效果研究[D].长沙:中南大学,2011.

[14] 李学持.某矿地下开采对井筒的稳定性影响分析[J].现代矿业,2022,38(4):181-185.

[15] 王利,高谦,肖卫国.金川Ⅲ矿区主井工程变形分析与稳定性评价[J].矿冶工程,2007,27(4):1-5.

[16] 周亮.基于位移反分析的混合井稳定性评价[J].有色矿冶,2012,28(5):14-17.

Impact on blind shaft stability under combined open-pit and underground mining

Huang Min^{1,2,3}, Wen Chen^{1,2}, Wei Junqiang^{1,2}, Rao Dijun^{1,2}, Cai Sijie^{1,2}

(1. Zijin Mining Group Co., Ltd.; 2. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd.;

3. College of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology)

Abstract: To study the impact of combined open-pit and underground mining on the stability of blind shafts, a gold-copper mine in China was taken as the engineering background. The current status of the mine's blind shafts was investigated, and potential failure modes of the blind shaft and factors influencing its stability were analyzed. A refined 3D numerical calculation model of the mining area was established based on actual geological conditions. Simulations were conducted according to the combined open-pit and underground mining plan, so as to analyze the impact on the stability of the blind shaft. The influence of combined open-pit and underground mining on the stability of the blind shaft was systematically studied in terms of shaft displacement and radius convergence. The inclination, curvature, and maximum axial deformation of the blind shaft were calculated and analyzed according to relevant standards. The results indicate that under combined open-pit and underground mining, the blind shaft does not experience axial deformation, inclination deformation, or curvature deformation damage. The combined open-pit and underground mining has minimal impact on the stability of the blind shaft and does not affect its normal operation. The blind shaft can maintain stability, and the research results can provide technical support for subsequent hoisting, maintenance, and safe production in the mine.

Keywords: combined open-pit and underground mining; blind shaft; stability; 3DMine; Flac^{3D}; 3D numerical simulation