措施井井筒压覆资源开采扰动及其稳定性研究*

李鹏程[1,2]，罗斌玉[1,3]，苏辕[3]，郝俊艳[3]

（1.金属矿山开采安全与灾害防治全国重点实验室， 安徽 马鞍山市 243000；
2.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司， 安徽 马鞍山市 243000；
3.武汉科技大学 资源与环境工程学院， 湖北 武汉 430081）

摘要：井筒压覆资源开采须在井筒安全的前提下进行，以安徽某铁矿为背景，研究2号措施井井筒压覆资源开采对井筒扰动的影响。开展了矿山地质调查与岩体物理力学参数分析，采用经验类比方法确定了两种回采方案；运用多软件协同对两种回采方案进行数值模拟，分析压覆资源回采后井筒的稳定性，选出可行方案；最后采用薄板圆孔孔边应力集中原理，对水平应力扰动下井筒周边应力状态进行分析。研究结果表明：两步骤全采和隔一采一两种压覆资源回采方案均可行，从提高资源利用率的角度出发，首选一步骤开采矿房二步骤回采矿柱方案并及时充填；开采扰动引起的井筒周边应力处于2倍原岩地应力以下，井筒处于稳定状态。研究结果为井筒压覆资源的安全开采提供了技术支撑。

关键词：压覆资源；开采扰动；井筒稳定性；应力集中

中图分类号：TD861.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0042-11

Study on Mining Disturbance and Stability of Service Shaft Under Extraction of Overlain Resources

Li Pengcheng[1,2], *Luo Binyu*[1,3], *Su Yuan*[3], *Hao Junyan*[3]

(1.State Key Laboratory of Metal Mine Mining Safety and Disaster Prevention and Control, Maanshan, Anhui 243000, China;
2.Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China;
3.School of Resources and Environmental Engineering,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: The extraction of overlain resources shall be conducted on the premise of service shaft safety. Taking an iron mine in Anhui Province as the research background, the disturbance influence exerted by the extraction of overlain resources on No.2 service shaft was studied. Mine geological surveys and analyses on physical and mechanical parameters of rock mass were carried out. Two mining schemes were determined by means of the empirical analogy method. Numerical simulations of the two mining schemes were performed via multi-software collaboration. The stability of the service shaft after the extraction of overlain resources was analyzed, and the feasible scheme was selected. Finally, the stress state around the service shaft under horizontal stress disturbance was analyzed by adopting the stress concentration principle of circular holes in thin plates. The research results show that both the two-step mining and skip-one-mine-one schemes for overlain resources are feasible. From the perspective of improving resource utilization, the scheme of mining rooms in the first step and extracting pillars in the second step with timely filling is preferred. The stress around the service shaft induced by mining disturbance is lower than twice the in-situ stress, and the shaft remains in a stable state. The research results provide technical support for the safe extraction of overlain resources around service shafts.

Key words: Overlain resource, Mining disturbance, Shaft stability, Stress concentration

0 引言

受到矿业公司融资困难的影响，全球矿产资源勘查投资出现了小幅下降[1]。在勘探资源相对匮乏的背景下，合理开采压覆资源是可持续开采的重要途径。为保证地下工程的安全稳定，井筒周围需留

* **收稿日期**：2025-06-06
基金项目：深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003804)
作者简介：李鹏程(1993—)，男，湖北宜昌人，硕士，工程师，主要从事矿山安全方面的研究工作。E-mail:429019292@qq.com
通信作者：罗斌玉(1990—)，男，贵州水城人，博士，主要从事金属与非金属矿床理论与技术研究工作。E-mail:binyul@126.com

设保安矿柱[2]。当前,常采用移动角来界定保安矿柱,但在实际生产中,保安矿柱圈定范围偏保守,导致矿产资源损失[3]。此外,在井筒安全性分析中,地应力因素没有得到充分重视,开采引起的扰动应力对井壁的影响需要进一步考虑[4]。因此,开展井筒压覆资源的有效回采及井筒稳定性研究具有重要工程价值。

针对井筒压覆资源回采过程中的安全性问题,许多学者展开了大量研究。盛佳等[5]采用层次分析法和数值模拟方法,对井筒保安矿柱回采过程进行了安全评价,认为回采活动对井筒的影响较小,稳定性状况良好。曹文龙等[6]、郭琪等[7]研究表明采用充填法开采急倾斜中厚矿体,竖井工程必须布置在矿体 30 m 以外甚至更远,且埋深大于 500 m 时开采对地表影响较小。为准确评估保安矿柱开采及地震下竖井可靠性,Bauer 等[8]提出了基于大量样本的 3 种概率模型,对竖井可靠性进行评价,认为保安矿柱开采决策中运用 Frechet 分布具有较好的效果。为防止井筒在非对称开采下产生偏斜,Han 等[9]采用概率积分法和 Knothe 时间函数建立了能够描述井筒水平变形的动态预测模型,为厚土层、薄岩层中井筒的保安矿柱尺寸设计问题提供了理论依据。

在井筒保安矿柱圈定方面,张超等[10]、池秀文等[11]将安全开采深度作为重新圈定井筒保安矿柱的关键指标,结果表明,安全开采深度越小,建(构)筑物保护等级越低。考虑到围岩稳定性和抗变形能力的差异,刘海林等[3]提出了组合型井筒保安矿柱圈定方法,成功将近 400 万 t 压覆资源进行回采。Li 等[12]提出了一种基于地面监测的新型矿柱设计方法,采用反分析法获得变形特征和参数,设计了新的矿柱圈定方法,有效回采了 254 万 t 资源。刘溪鸽等[4]、张洪训等[13]采用数值模拟方法对水平构造应力进行分析,对保安矿柱进行三维椭圆形圈定,认为留设 100 m 保安矿柱最佳。对于地下深部开采,采用岩移角圈定竖井保安矿柱有一定的局限性,张飞等[14]、郝美钧等[15]以临界散体柱理论为依据对保安矿柱进行圈定,结合数值模拟结果,确定了保安矿柱半径尺寸。

掌握井筒周边围岩应力分布状态,是确保竖井安全性的重要途径。Amichai 等[16]提出概率性单自由度模型,推导了人工支护下竖井的位移和应力方程。Neverov 等[17]对竖井保安矿柱开采岩体的应力应变进行分析,认为在矿体厚度较小情况下(2～4 m),从保安矿柱中回采矿石,用悬顶崩落矿石进行充填,不会对被挖掘对象产生危害性变形,并建议在开采后期对地表进行持续的地质力学监测。赵海军等[18]基于三维数值计算分析了井壁应力应变,认为竖井选址应尽量处于矿体下盘。

综上所述,学者们在压覆资源回采过程中的安全性、保安矿柱的合理规划及井筒周边围岩应力分布状态等方面开展了大量研究,为压覆资源安全回采和井筒稳定性分析奠定了基础。然而,当前研究大多基于岩移角圈定保安矿柱,压覆资源多,且未考虑开采扰动应力对井筒的影响。据此,本文以安徽某铁矿 2 号措施井井筒为背景,在工程地质调查和岩体力学参数分析基础上,采用经验对比确定两种回采方案,并开展数值模拟,获取措施井井壁“东西南北”4 条测线应力应变状况,最后采用薄板圆孔孔边应力集中原理,对水平应力扰动下井筒周边应力状态进行分析,研究结果为压覆资源的安全开采提供了技术支撑。

1 地质特征

1.1 工程概况

安徽某铁矿位于华北地台南缘,地处豫-淮台褶带东段的淮南复向斜以南,六安断裂以北,坐落于合肥坳陷与潢川坳陷之间。该矿床属于沉积变质型铁矿床,控制长度为 3 600 m,宽度在 105～345 m 之间,埋深范围距离地表 105～669 m。矿区内共识别出 8 个矿体,其中以Ⅴ、Ⅵ号矿体为主要矿体,合计占全矿床资源储量的 85.19%。

其中 2 号措施井位于矿体下盘的开采移动范围内,井筒净直径为 4.5 m,井口标高为+42 m。该井筒前期设计为回风井,后期承担井下-290 m 中段以上的矿石提升任务。为方便井下施工人员通行与材料提运,矿山决定将 2 号措施井井筒延伸至-560 m 水平(井深 602 m),以支持辅助施工并提供安全通道。目前,2 号措施井井筒的运行状况正常。

在设计阶段中为 2 号措施井井筒预留了保安矿柱,生产中可根据具体条件,在保证作业安全、围岩稳定的条件下回采矿柱,如图 1 所示。为避免资源浪费[19],需要在回采过程中采用高配比充填材料对保安矿柱范围内采空区进行全胶结充填,进一步提高采空区的安全性能。据此,需对井筒周边矿体开采方案的可行性及开采后井筒的稳定性进行研究。

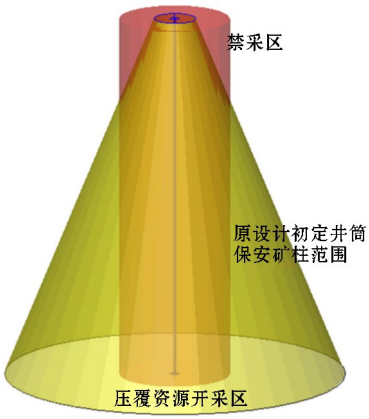


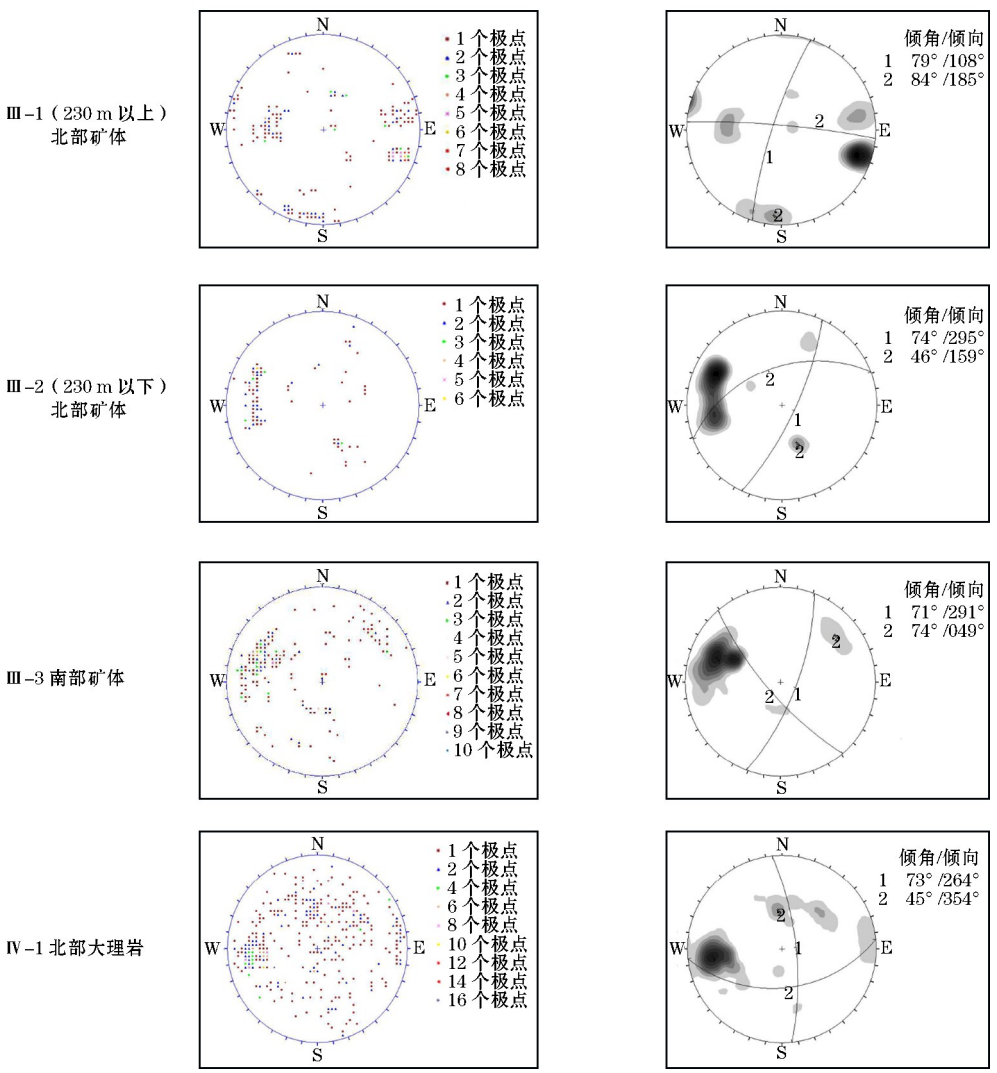
图 1 压覆资源开采区与禁采区的相对位置关系

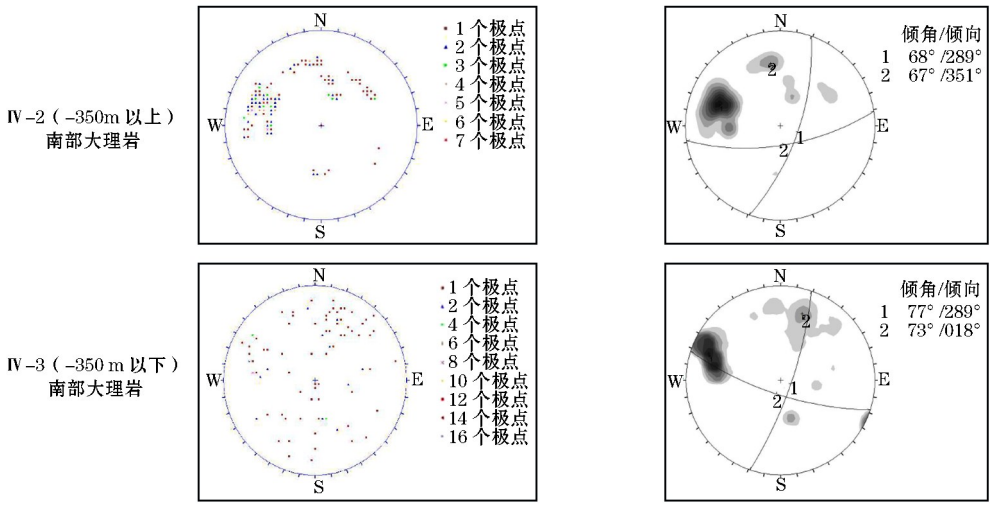
Fig.1 The relative position relationship between the overlain resource exploitation area and the no-mining area

1.2 工程地质调查

对工程地质环境进行评价分析是开展工程活动的基础。本次研究将目标区域划分为 5 个工程地质分区,包括:分区Ⅰ(第四系)、分区Ⅱ(古风化层)、分区Ⅲ(矿体)、分区Ⅳ(下盘大理岩)和分区Ⅴ(上盘片麻岩)。为了更好地进行分析计算,上覆的第四系和古风化地层各自被划分为一个工程地质分区,而新鲜基岩段则分为 3 个工程地质分区。

目前,矿山已揭示的矿岩主要以Ⅳ级和Ⅴ级结构面为主,这些结构面通常以断续的形式分布在矿岩体中,包括裂隙、节理、层面、片理、原生冷凝节理及发育的劈理。根据现场调查,在沿矿体走向(近南北走向)上,主要结构面的延展性较好。此外,在整体下盘大理岩组中,存在一组近似垂直于矿体走向的结构面,其节理间距较大,实际间距通常大于 0.6 m,延展性相对较好,通常可达 10 m 以上。而其他零散分布在矿岩体中的结构面延展性较差,大多在数米之内,局部区域达到 10 m。根据实地调查结果及地质勘察资料,绘制了裂隙极点分布图和优势节理密度图,如图 2 所示。





(a)节理裂隙极点分布图 (b)优势节理等密度图

图 2 各分区结构面情况

Fig.2 The structural surface conditions of each partition

1.3 岩体力学参数综合分析

获取矿山岩体的物理力学参数对确保矿山设计的安全性、优化开采方案及提高资源利用效率至关重要。为此,采集了该铁矿工程区具有代表性的围岩和岩石样本,并在实验室进行了各项试验。试验测定的岩体物理力学参数包括:岩石密度(采用量积法测定)、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度及抗拉强度等,具体结果见表 1。

表 1 试验测定的岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass determined by tests

岩性	密度 ρ_d/(g/cm³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
大理岩	2.84	83.11	3.53	6.31	44.70	48.25	0.19
南部矿体	3.49	107.34	6.05	11.25	45.60	58.29	0.18
−230 m 以下北部矿体	3.61	91.86	4.34	6.81	45.30	52.20	0.19
−230 m 以上北部矿体	2.92	35.73	4.37	6.92	44.10	15.93	0.23
片麻岩	2.84	49.33	2.18	6.45	42.80	24.15	0.21
古风化层	2.92	19.88	—	—	—	9.30	0.24

以工程岩体分级为基础,确定岩体物理力学参数是进行数值分析的基础和前提。首先获取 Hoek-Brown 参数,考虑到同一工程中不同学者提出的经验公式差别较大,将所有计算岩体弹性模量的经验公式计算值求平均,得到各分区岩体的弹性模量;采用同样的方式,对岩体单轴抗压强度各经验公式计算值取平均,以获取分区岩体单轴抗压强度 σ_{cm}。现有岩体抗拉强度估算方式较少,常采用 Hoek-Brown 准则估算,见式(1)。

$$\sigma_t=\frac{\sigma_{ci}(m_b+\sqrt{m_b^2+4s})}{2} \tag{1}$$

式中:σ_t 为抗拉强度;σ_{ci} 为岩石单轴抗压强度;m_b 为反映岩体特征的经验参数值;s 为材料常数。

最后根据广义 Hoek-Brown 准则所给出的估算岩体等效 Mohr-Coulomb 强度参数的计算公式(见式(2)和式(3))[20],计算获取岩体剪切强度参数(岩体黏聚力及内摩擦角)。

$$\varphi=\sin^{-1}\left[\frac{6\alpha m_b(s+m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha)+6\alpha m_b(s+m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}}\right] \tag{2}$$

$$c=\frac{\sigma_{ci}[(1+2\alpha)s+(1-\alpha)m_b\sigma_{3n}](s+m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1}}{(1+\alpha)(2+\alpha)\sqrt{1+(6\alpha m_b(s+m_b\sigma_{3n})^{\alpha-1})/((1+\alpha)(2+\alpha))}} \tag{3}$$

式中:α 为非线性指数;σ_{3n} 为归一化最小主应力。

根据上述原理,计算得到基岩各工程地质分区岩体物理力学参数,见表 2,并将该参数作为矿床数值模型的输入参数。

表 2 公式计算得出的岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass calculated by formula

岩层	密度 ρ_d/(g/cm³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
大理岩	2.84	17.21	0.230	1.22	29.9	16.53	0.20
南部矿体	3.49	20.08	0.070	1.97	38.1	13.64	0.23
−230 m 以下北部矿体	3.61	28.28	0.270	2.45	43.8	27.31	0.19
−230 m 以上北部矿体	2.92	14.32	0.040	0.75	39.7	9.50	0.25
片麻岩	2.84	13.29	0.030	0.80	36.0	8.79	0.21
古风化层	2.92	6.32	0.006	0.03	17.2	1.03	0.32

2 措施井井筒压覆资源回采方案与数值模拟

2.1 井筒压覆资源开采方案与技术参数

通过工程类比可以确定,影响井筒稳定性的有利因素有:井筒断面尺寸较小、井筒位于矿体的下盘、井筒与矿体的间距较大;不利因素有:井筒长度较长、矿体最低开采深度大、井筒周边采场结构参数较大、采用的采矿方法导致单次暴露空间较大、围岩稳固性较弱及矿体开采厚度较大。基于以上因素,针对 2 号措施井井筒压覆资源设计了两种开采方案。

方案一:将井筒周边 90 m 以内设为禁采区。禁采区以外的井筒压覆资源以隔一采一的方式进行开采,且在井筒服役期间,所有采场开采完成后均进行胶结充填。按照此方案,2 号措施井井筒压覆资源预计可释放 250 万 t 的资源量。

方案二:将井筒周边 90 m 以内设为禁采区。禁采区以外的井筒压覆资源分两步骤全部开采,即先开采一步骤矿房,再开采二步骤矿柱,且在井筒服役期间采场均进行胶结充填。按照此方案,2 号措施井井筒压覆资源预计可释放 500 万 t 的资源量。

对于压覆矿体部分的开采,采用主流的 VCR 嗣后充填采矿法,采场结构参数如下:当矿体厚度在 15～80 m 之间时,矿房垂直矿体走向布置,矿房(柱)高度为 60 m,宽度为 15 m,长度等于矿体厚度;当矿体厚度超过 80 m 时,分上下盘进行回采;当矿体厚度小于 15 m 时,矿块沿矿体走向布置,高度为 60 m,宽度等于矿体厚度,矿房(柱)长度为 40～60 m。

此外,在井筒压覆范围内的采场均采用胶结充填,强度要求大于 2.5 MPa。

2.2 模型简化及三维模型建立

考虑到矿体沿走向长度较长,约为 4 km,为提高计算效率,本次研究将矿区以 3 线为界,划分为南、北两个部分。其中,北矿区包含了重点研究对象 2 号措施井,如图 3 所示。

同时,对模型进行简化,做出以下调整:综合考虑各地层的空间分布及其与矿体的位置关系,删除和简化部分夹层;在构建矿区北部模型时,主要关注 F1 断层。为更真实地模拟破碎带特征,将断层面适当加厚,厚度约为 3 m。

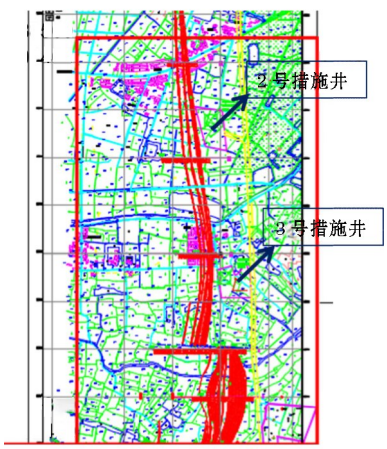


图 3 北矿区示意

Fig.3 Schematic of the north mining area

综合采用 3Dmine、Midas GTS、FLAC3D 等软件,联合建立铁矿的三维仿真地质模型。首先采用 3Dmine 软件处理各勘探线剖面上的岩层分界线以及各中段揭露矿体边界线。再采用有限元软件 Midas GTS 构建铁矿三维实体模型,并对矿体及岩层进行精细化网格划分。最后将 Midas GTS 中生成的物理网格模型信息导入 FLAC3D 中,进行模拟开采,分析井筒稳定性。三维矿床模型沿南北方向长 1.7 km,沿东西方向长 1.0 km,模型上表面取自地表,下表面标高为 −700 m。采用六面体单元网格对模型进行精细化网格划分,流行曲面则采用适配度强的四面体单元网格划分。最终形成混合网格,包含 1 597 607 个小单元体,511 603 个节点,如图 4 所示。

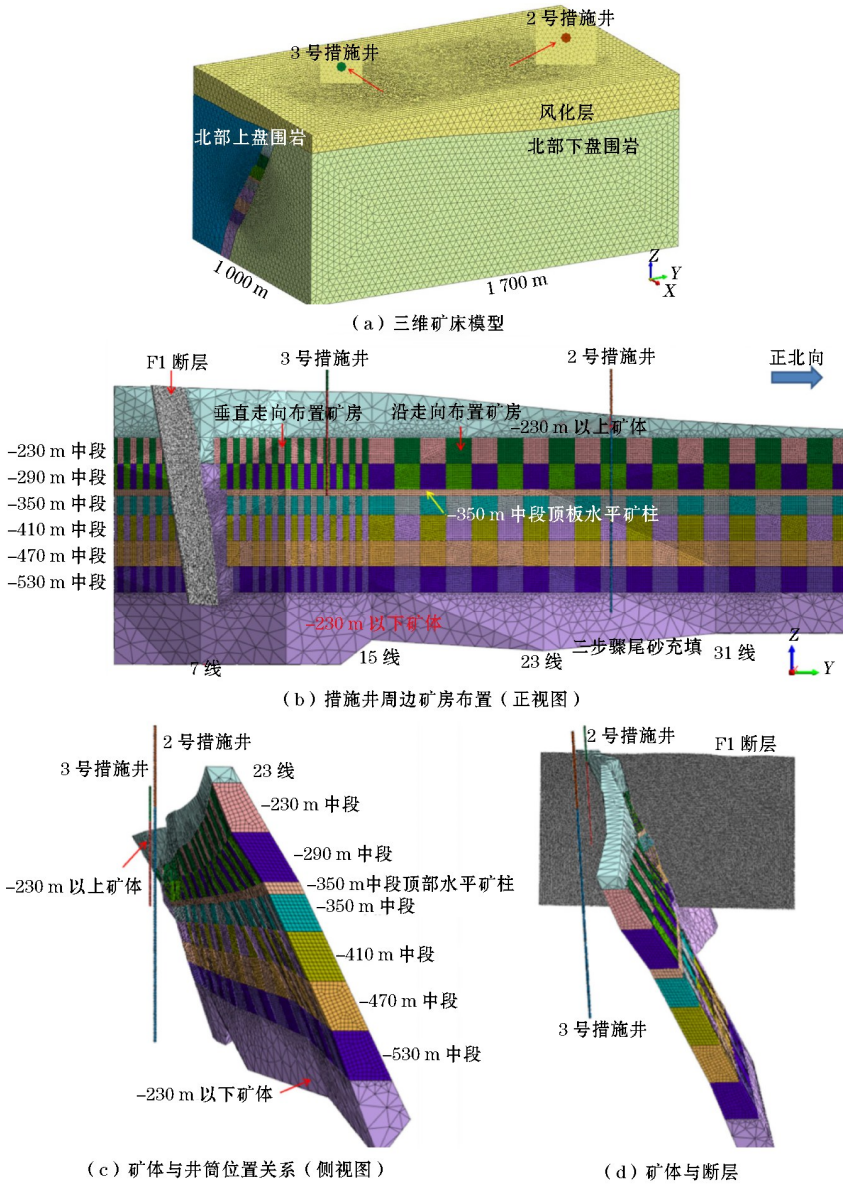


图 4　北矿区三维地质网格模型

Fig.4　3D geological grid models of the north mining area

2.3　模型输入参数及边界条件设置

模型采用表 2 中的岩体物理力学参数,此外,部分区域包含断层破碎带,同时采场进行了充填,因此需要确定充填体的相关参数。断层破碎带的参数参考类似矿山数据进行取值,胶结充填体力学参数根据该矿山的相关研究报告获取[21],见表 3。

表 3　模型输入参数

Table 3　Model input parameters

岩性	容重/(kN/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
断裂破碎带	19.8	1.92	0.68	0.8	29	0.22
胶结充填体	18.9	1.50	0.20	0.7	25	0.50

数值模拟过程中,岩体材料采用 Mohr-Coulomb 强度准则,模型前后两侧边界处设定为 X 方向水平应力约束,左右两侧设定为 Y 方向水平应力约束,模型顶部为地表自由面,不再额外施加位移约束。在整体分析模型中,断层结构采用实体单元模拟,单元材料为满足 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性材料,且假定矿体开挖之后附近岩体荷载的释放及岩体的受力变形等是在同一时间发生的。

3　数值模拟结果及方案优选

根据开采方案,结合采场布置模型,模拟中按以下顺序对开采过程进行细化。

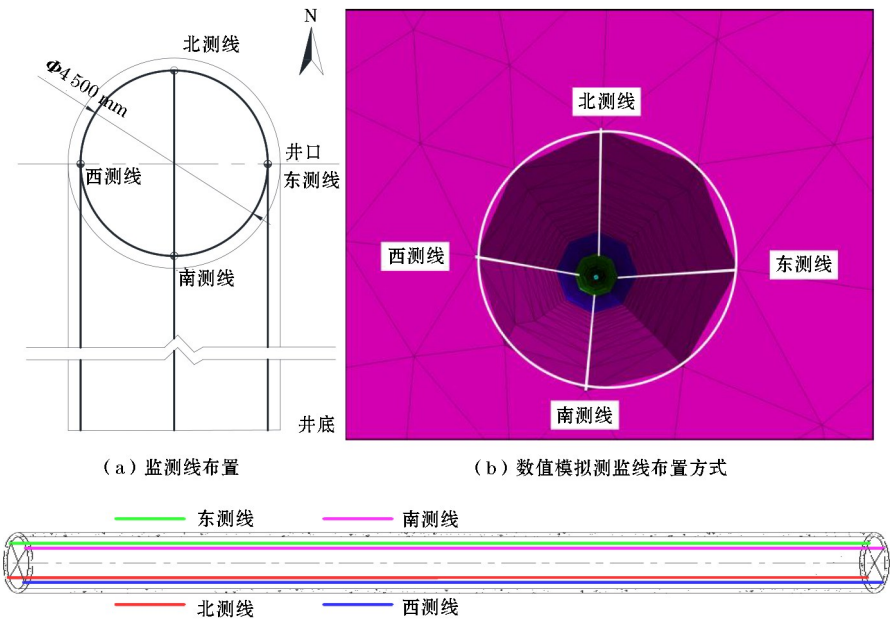
方案一:−290 m、−530 m 中段一步骤矿房开采与充填→−230 m、−470 m 中段一步骤矿房开采与充填→−410 m 中段一步骤矿房开采与充填→−350 m 中段一步骤矿房开采与充填,共分为 8 步。

方案二:−290 m、−530 m 中段一步骤矿房开采与充填→−290 m、−530 m 中段二步骤矿柱开采与充填→−230 m、−470 m 中段一步骤矿房开采与充填→−230 m、−470 m 中段二步骤矿柱开采与充填→−410 m 中段一步骤矿房开采与充填→−410 m 中段二步骤矿柱开采与充填→−350 m 中段一步骤矿房开采与充填→−350 m 中段二步骤矿柱开采与充填,共分为 16 步。

在 FLAC3D 中通过给模型赋予“Null”本构关系,实现矿体开挖的模拟,按照两种方案的开采顺序,重复赋予“Null”和模型解平衡,实现开采过程扰动模拟。

3.1 井壁应力分布规律

为探索两种开采方案下井筒的应力和变形规律,在井筒四周布置东、西、南、北共计 4 条测线,如图 5 所示,模拟过程中记录井筒 4 条测线变形及应力变化规律。



(a) 监测线布置 (b) 数值模拟测监线布置方式

(c) 井筒上下测线布置

图 5 井筒测线布置位置

Fig.5 The location of the shaft survey lines

模拟开采结束后,提取 4 条测线上的应力值。对各个测线在不同开采过程中的最大主应力进行统计,具体结果见表 4 和表 5。

随着地下开采中段的增加,矿体逐步被充填体置换,井筒围岩的最大主应力值也逐步增大。在−290 m 和−530 m 中段实施方案一开采之后,应力值的大小以及应力分布规律变化不大,波动约在 0.1 MPa 以内。部分测线整体呈现出应力降低的现象,降幅约为 0.5 MPa。值得注意的是,在−290 m 和−530 m 中段采用方案二开采时,压应力值达到最大,而在−350 m 中段采用方案二开采后,压应力值则降至最小。

根据表 4 和表 5,在两种井筒压覆资源开采方案下,2 号措施井井筒的最大主应力差距并不明显,均在 15.58 MPa 以内,小于北部下盘大理岩岩体抗压强度 17.21 MPa,由此说明,在圈定的 2 号措施井直径 90 m 圆柱形禁采区条件下,按照两步骤全采和隔一采一的压覆资源开采方案均是可行的。从提高资源利用率的角度考虑,优选方案二。在开采过程中采空区应及时进行充填,以确保充填体接顶。

表 4 方案一 2 号措施井最大主应力

Table 4 Maximum principal stress of No.2 service shaft in scheme 1

测线	最大主应力/MPa			
	−290 m、−530 m 中段-1	−230 m、−470 m 中段-1	−410 m 中段-1	−350 m 中段-1
东测线	15.57	15.54	15.39	15.11
南测线	15.12	15.08	14.80	14.36
西测线	15.48	15.44	15.03	14.35
北测线	14.44	14.40	14.16	15.16

表 5 方案二 2 号措施井最大主应力

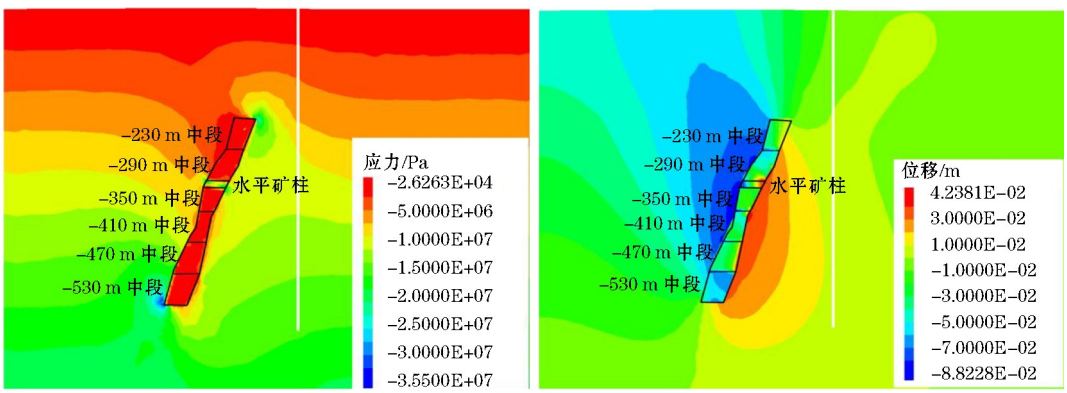
Table 5 Maximum principal stress of No.2 service shaft in scheme 2

测线	最大主应力/MPa			
	−290 m、−530 m 中段-1	−230 m、−470 m 中段-1	−410 m 中段-1	−350 m 中段-1
东测线	15.58	15.46	15.22	14.93
南测线	15.16	14.93	14.50	14.10
西测线	15.56	15.23	14.57	13.97
北测线	13.74	14.28	13.88	13.48

3.2 方案二井筒周边应力及位移场

为更全面地反映 2 号措施井井筒周边应力分布特征,选取与 2 号措施井井筒相距最近的平面作为分析对象。通过 2 号措施井井筒几何中心点沿东西向绘制了垂直剖面,获得方案二开采工况下的井筒最大主应力分布云图,如图 6(a)所示。由图 6(a)可知,−350 m 水平以下的井筒段围岩距离采场较远,受采场应力重分布的影响较小,因此该段井筒围岩的最大主应力分布与其对应深度的原应力场相差不大,最大主应力值在 12.5～20 MPa 之间,且该段的受力形式为受压状态。相较之下,−350 m 水平以上的井筒段围岩则受到采场增压区的影响,该部分最大主应力值略高于对应深度的原应力值,增压幅度在 1.0 MPa 以内,此时该段井筒围岩的最大主应力值保持在 11 MPa 以内。

图 6(b)展示了 2 号措施井周边位移场分布云图。当地下所有中段的矿体被开采后,采场的上盘围岩形成了一个沉降漏斗,且该沉降漏斗的中心随埋深的减小而向西偏移,偏移角约为 30°。2 号措施井位于沉降漏斗的东侧,因此受其影响相对较小。在采场围岩中,最大沉降量出现在−350 m 中段的上盘,达到了 8.8 cm,而采场内充填体的沉降量通常保持在 5 cm 以内。此外,采场下盘围岩同样存在一个底鼓范围。在−230 m 水平以下,井筒段围岩处于该底鼓范围内,越靠近井底,受其影响愈加显著。井筒周边采场的最大底鼓量约为 4.24 cm,位于−410 m 中段的下盘。



(a) 最大主应力云图 (b) 竖向位移云图

图 6 方案二 2 号措施井井筒切片云图

Fig.6 Slice contours of No.2 service shaft in scheme 2

4 基于薄板圆孔孔边应力集中的井筒稳定性分析

根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》,各种构筑物、重要设备及其基础的移动与变形观测,应当包括井筒的水平位移和垂直变形、井壁应力和变形[22]。从井壁应力角度进一步分析措施井的安全性。

实际上,在地下竖井工程中,孔边的应力往往大于无孔状态下的应力,且明显高于距离孔口稍远处的应力,即竖井的存在会引起应力集中。此外,2 号措施井的半径为 4.5 m,相较于周围地质体而言属于“小孔”。因此,可以将其简化为圆孔的应力集中问题。对 2 号措施井进行水平切片分析,其受力关系如图 7 所示。同时,邻近矿体的开采扰动会导致应力水平的上升,在圆孔应力集中模型中体现为水平应力的提升。

为进一步评估开采扰动下 2 号措施井井筒的稳定性,选取上述讨论中优选的方案二,即优先开采一步骤矿房,再开采二步骤矿柱,开采后形成的采空区均应及时胶结充填,提取该方案下最后一步开采获取的井筒测线应力,考虑到井筒位于矿层正东侧,选取距离井筒最近采场的测线进行分析,即西测线。计算在无扰动(原岩地应力)、2 倍原岩地应力扰动、4 倍原

岩地应力扰动下的应力分布进行对比,评估该模拟方案下井筒的应力情况,从应力角度判断井筒的稳定性。

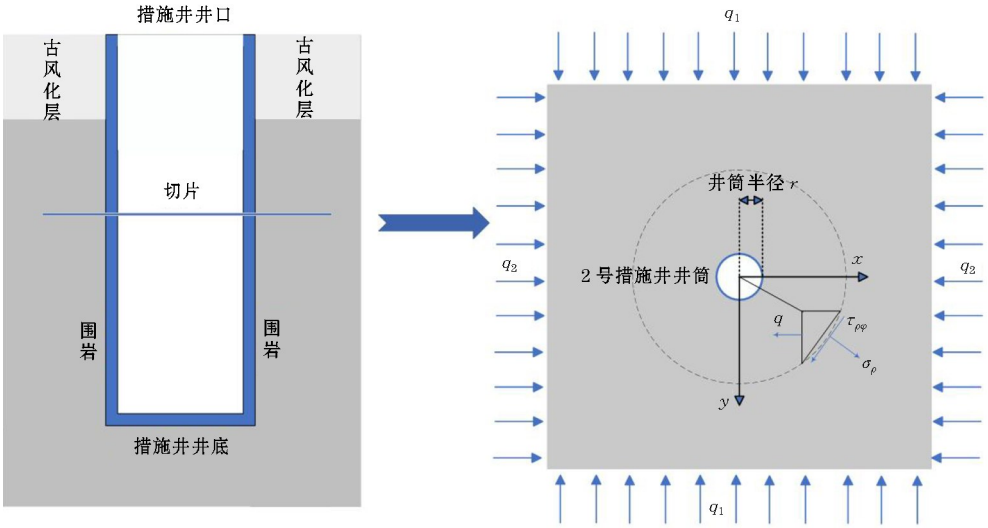


图 7 圆孔应力集中简化模型

Fig.7 Simplified model of the circular hole stress concentration

在无开采扰动时,孔边所受应力集中主要由地应力提供,上覆岩层压力 q_v 可由式(4)求得,考虑到井筒上部分为古风化层,下部分为北部下盘围压组合形成,将式(4)修正为式(5)。古风化层厚度取平均值 60 m。

$$q_v=\gamma H \tag{4}$$

$$\begin{cases} q_v=\gamma_1 H & H\leqslant 60 \\ q_v=60\gamma_1+\gamma_2(H-60) & H>60 \end{cases} \tag{5}$$

式中:γ 为上覆岩层容重;γ_1 为古风化层容重;γ_2 为北部下盘岩体容重;H 为上覆岩层厚度。

故而换算得出水平应力 q_h:

$$q_h=\lambda q_v \tag{6}$$

式中,λ 为侧压力系数。

为求得井边应力分量,基于弹性力学圆环受外压力时的解析解,运用半逆解法进行求解,即基尔斯解答,见式(7)。在式(7)的基础上,沿着孔边,可以得到环向正应力。

$$\left.\begin{aligned} \sigma_\rho&=\frac{q_1+q_2}{2}\left(1-\frac{r^2}{\rho}\right)+\frac{q_1-q_2}{2}\left(1-\frac{r^2}{\rho}\right)\left(1-3\frac{r^2}{\rho^2}\right)\cos 2\varphi \\ \sigma_\varphi&=\frac{q_1+q_2}{2}\left(1+\frac{r^2}{\rho}\right)-\frac{q_1-q_2}{2}\left(1+3\frac{r^4}{\rho^4}\right)\left(1+3\frac{r^4}{\rho^4}\right)\cos 2\varphi \\ \tau_{\rho\varphi}&=\tau_{\varphi\rho}=-\frac{q_1-q_2}{2}\left(1-\frac{r^2}{\rho^2}\right)\left(1+3\frac{r^2}{\rho^2}\right)\sin 2\varphi \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中:σ_ρ 为径向应力;σ_φ 为环向正应力;$\tau_{\rho\varphi}$ 为剪应力;ρ 为计算点到圆孔中心的径向距离;φ 为方位角;q_1 为 y 方向的水平应力;q_2 为 x 方向的水平应力;r 为半径。

根据上述解析解,分别计算在无扰动(原岩地应力)情况下、2 倍原岩地应力扰动下及 4 倍原岩地应力扰动下竖井西测线处的应力状态。

将无扰动、2 倍原岩地应力及 4 倍原岩地应力扰动下的应力分布规律与数值模拟结果进行对比,如图 8 所示。由图 8 可知,开采压覆资源之后,措施井最终应力情况处于无扰动与 2 倍原岩地应力扰动情况之间,即开采扰动最终引起的井筒应力变化仍然处于 2 倍扰动之下。根据 Toraño 等[23]的数值研究,巷道周围采动应力集中约为地应力的 2.3 倍,而井筒与工作面的距离较远(94.14 m),引起的应力变化只会更小,对井筒扰动较小,表明井筒处于稳定状态。

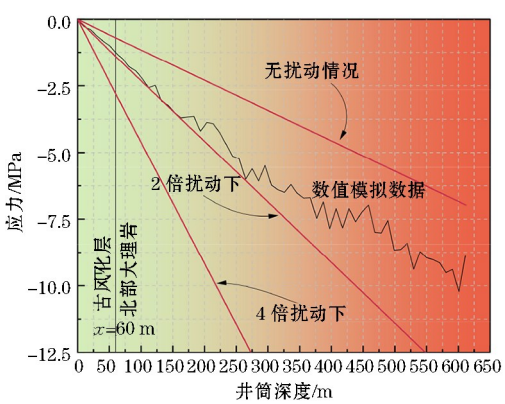


图 8 井筒周边应力变化规律

Fig.8 Change law of stress around the shaft

5 结论

(1) 为了提高井筒压覆资源利用率,设定井筒90 m以内为禁采区,对禁采区之外压覆资源进行回采和再利用,通过工程地质调查和岩体力学参数的分析,设计了隔一采一与两步骤全部开采并进行胶结充填两种开采方案。

(2) 模拟结果表明,隔一采一与两步骤全采的压覆资源开采方案均是可行的。在开采2号措施井井筒压覆资源时,建议优先开采一步骤矿房,随后再进行二步骤矿柱的开采,并及时进行胶结充填,以确保充填接顶。

(3) 基于薄板圆孔孔边应力集中原理,建立了井筒周边应力分布表达式,分析了井筒在无扰动、2倍原岩地应力扰动和4倍原岩地应力扰动情况下的应力变化规律,并与数值模拟结果进行对比,结果表明,开采扰动应力处于2倍原岩地应力以下,井筒处于稳定状态。

参考文献(References):

[1] 闫卫东,胡容波,林博磊,等.2024年全球矿业展望[J].中国矿业,2024,33(1):20-29.
Yan Weidong, Hu Rongbo, Lin Bolei, et al. Global mining outlook in 2024[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 20-29.

[2] GB 16423—2020 金属非金属矿山安全规程[S].

[3] 刘海林,李鹏程,王雨波,等.硬岩矿床组合型井筒保安矿柱圈定与压覆资源回采技术[J].金属矿山,2023(7):168-175.
Liu Hailin, Li Pengcheng, Wang Yubo. Delineation of safety pillars and overlying resource recovery technique in combined type shafts of hard rock deposits[J]. Metal Mine, 2023(7): 168-175.

[4] 刘溪鸽,刘洪磊,朱万成,等.基于水平构造应力比圈定新城金矿竖井保安矿柱初探[J].金属矿山,2020(1):122-129.
Liu Xige, Liu Honglei, Zhu Wancheng, et al. Preliminary study on the determination of shaft pillar based on the ratio of horizontal tectonic stress[J]. Metal Mine, 2020(1): 122-129.

[5] 盛佳,万文,江飞飞,等.基于AHP-3DEC的井筒保安矿柱稳定性综合评价[J].矿业研究与开发,2021,41(5):28-33.
Sheng Jia, Wan Wen, Jiang Feifei, et al. Comprehensive evaluation on stability of shaft safety pillar based on AHP-3DEC [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 28-33.

[6] 曹文龙,王雪彦,曹茗棋.地下开采对地表建构筑物及井筒的安全影响分析[J].矿业研究与开发,2019,39(4):17-22.
Cao Wenlong, Wang Xueyan, Cao Mingqi. Analysis of the impact of underground mining on the safety of surface structures and wellbore [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(4): 17-22.

[7] 郭琪,马驰,陈阳."三下"开采井筒保安矿柱优化及地表变形模拟分析[J].矿业研究与开发,2020,40(6):113-117.
Guo Qi, Ma Chi, Chen Yang. Optimization on shaft safety pillar and numerical simulation on surface deformation in "Three Under" mining [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6): 113-117.

[8] Bauer J, Pula W, Wyjadlowski M. Effect of partial mining of shaft protection pillar in terms of reliability index[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2015, 9(4): 242-249.

[9] Han Jihuan, Zou Jiuqun, Hu Chenchen, et al. Study on size design of shaft protection rock/coal pillars in thick soil and thin strata[J]. Energies, 2019, 12: 2553.

[10] 张超,宋卫东,付建新,等.充填法开采井筒保安矿柱圈定及回采优化模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):136-145.
Zhang Chao, Song Weidong, Fu Jianxin, et al. Shaft safety pillar delineation and optimization simulation of filling mining method [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 136-145.

[11] 池秀文,吕占胜,张文举,等.充填开采安全深度与保安矿柱圈定研究[J].中国矿业,2018,27(12):134-139+156.
Chi Xiuwen, Lyu Zhansheng, Zhang Wenju, et al. Study on the safety depth of cut and fill mining and the demarcation of security mine[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(12): 134-139+156.

[12] Li Peixian, Zhu Xiaoya, Ding Xingcheng, et al. An experimental study of industrial site and shaft pillar mining at Jinggezhuang coal mine[J]. Applied Sciences, 2023, 13: 2340.

[13] 张洪训,刘溪鸽,关凯,等.新城金矿竖井保安矿柱的三维圈定与模拟回采[J].金属矿山,2017(3):19-24.
Zhang Hongxun, Liu Xige, Guan Kai, et al. 3D delineation of the shaft safety pillar of Xincheng Gold Mine and its numerical excavation[J]. Metal Mine, 2017(3): 19-24.

[14] 张飞,王昊,郝勇浙.鑫达金矿竖井保安矿柱圈定及稳定性分析[J].采矿技术,2021,21(5):52-56+60.
Zhang Fei, Wang Hao, Hao Yongzhe. Stabilization and safety pillar design for Xinda gold mine shaft[J]. Mining Technology, 2021, 21(5): 52-56+60.

[15] 郝美钧,刘畅,王维,等.近距离井筒保安矿柱优化研究[J].矿业研究与开发,2019,39(8):12-15.
Hao Meijun, Liu Chang, Wang Wei, et al. Optimization study on safety pillar of short-distance shafts[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(8): 12-15.

[16] Amichai M, Davide E, Doug S. Development of a spring analogue approach for the study of pillars and shafts[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(2): 267-274.

[17] Neverov S A, Shaposhnik Y N, Nikolsky A M. Stress-strain analysis of rock mass during mining of protective pillar of vertical shaft [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 523: 012004.

[18] 赵海军,马凤山,徐嘉谟,等.金属矿充填开采岩体移动对竖井围岩的变形破坏[J].岩土工程学报,2012,34(2):340-348.
Zhao Haijun, Ma Fengshan, Xu Jiamo, et al. Shaft deformation and failure due to rock mass movement induced by underground backfill mining of a metal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(2):340-348.

[19] 辛志强.垂线法在矿井村庄保护煤柱留设的引用与实践[J].煤炭与化工,2022,45(2):27-30.
Xin Zhiqiang. Application and practice of vertical method in coal pillar reservation of mine village protection[J]. Coal and Chemical Industry,2022,45(2):27-30.

[20] Hoek E, Brown E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2019,11(3):445-463.

[21] 孙希乐,陈贤树.尾砂基充填胶结充填剂试验及应用[J].现代矿业,2016,32(10):186-188.
Sun Xile, Chen Xianshu. Tailings-based cemented backfill agent testing and references[J]. Modern Mining, 2016, 32 (10):186-188.

[22] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,国家铁路局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Supervision Bureau, National Energy Administration, National Railway Administration. Specification for coal pillar setting and pressure coal mining under buildings, water bodies, railways and main roadways [M]. Beijing: Coal Industry Press,2017.

[23] Toraño J, Diez R R, Rivas C J M, et al. FEM modeling of roadways driven in a fractured rock mass under a longwall influence[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(6): 411-431.