

基于MIDAS GTS NX的采空区废石充填稳定性研究

李宗利¹, 吴功勇^{2*}, 聂兴信², 张鑫², 赵林海¹, 阮顺玲², 江松²

(1. 宝鸡西北有色二里河矿业有限公司; 2. 西安建筑科技大学资源工程学院)

摘要:地下矿采空区的恢复和治理对矿区及周边环境有重要影响。以某金属矿地下采空区为研究对象, 基于MIDAS GTS NX软件进行数值模拟, 对该区域分步开采及充填过程、采空区废石充填后上覆岩层的稳定性进行分析, 同时对该区域实施废石充填+胶结充填接顶后采空区安全稳定及地表河流的影响情况进行研究。研究结果表明, 对采空区实施废石充填+胶结充填接顶可有效减缓围岩应力, 保障地表河床的稳定性, 显著提升采空区结构稳定性, 使整体处于安全水平。

关键词:采空区; 充填采矿法; MIDAS GTS NX软件; 数值模拟; 废石充填; 稳定性

中图分类号: TU42 TD167

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)02-0023-07

doi: 10.11792/hj20250204

引言

随着社会的发展和资源需求量的增加, 浅部矿产资源日益枯竭, 为满足人类对矿产资源的需求, 资源开发逐渐向地球深部进行, 但地下开采过程中形成的采空区面临严峻的安全和环境问题, 如采空区的冒顶、片帮和大范围垮塌等^[1-3]。采空区引起地表的塌陷、沉降和拉裂^[4]等, 严重影响矿区的安全生产和周边人民群众的生活。而随着生态文明理念的发展, 发展绿色矿业、建设绿色矿山, 已经成为矿山生产中转变发展方式、建设资源节约型与环境友好型社会的必然要求和迫切需求, 对经济社会发展和生态环境保护具有十分重要的现实意义和深远的战略意义^[5-6]。

大量学者对矿山采空区的充填治理展开了系统研究, 将矿废综合利用和绿色环保紧密联系起来, 如废石充填^[7]、胶结充填^[7-8]等成为研究的热点。采空区废石充填治理最早由美国工程师C.W. 亨特在20世纪60年代提出, 针对目前矿山开采后井下形成分布范围广、稳定性情况不明的采空区治理有重要意义。一方面, 能有效降低采空区存在的安全隐患, 如解决深部地压、控制岩层移动及地表沉陷、维护采场稳定、节约土地资源、保护地下水资源等; 另一方面, 采用废石充填, 极大地降低了采空区治理成本, 将矿山固体废弃物(尾砂、废石)作为充填材料来有效利用, 使废弃物变废为宝有效利用, 对实现矿山的可持续发展、构筑绿色矿山具有重要的现实意义^[6]。

废石充填、胶结充填也在不断地研究与发展中得

到了极大丰富, 取得了许多可喜的成果。从充填材料的研究、充填成本的分析到充填方法、技术的改进, 再到充填体破坏机理的研究等不断深入。例如: 滕德强^[9]研究了高浓度煤矸石胶结充填材料骨料级配优化, 分析充填骨料对充填效果的影响; 黄明发^[10]分析矿山低成本胶结充填关键技术, 采用充填新工艺、新材料、新装备等将充填综合成本控制在较低的合理水平, 提高采空区治理的经济效应; 夏雨等^[11]对充填体的力学特性及破坏特征进行分析, 从而为更有效地预防地表沉陷, 维持采场稳定性提供依据等。

本次研究以某金属矿地下采空区为研究对象, 采用动态分析的思路, 从分步开挖到废石回填的各阶段过程展开数值模拟, 采用MIDAS GTS NX软件分析各阶段的位移变化、应力变化, 研究采空区废石充填及崩落上盘围岩充填后上覆岩层的稳定性, 同时分析该区域采空区实施废石充填+胶结充填接顶后对地表河流的影响情况, 从应力和变形角度分析废石充填这种绿色环保治理措施的效果。

1 工程概况

1.1 矿山地质与开采情况

矿区地形陡峻, 沟壑纵横, 水系发育, 地形坡度 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 在灰岩区往往形成悬崖峭壁, 陡壁高达50~100 m。目前, 1 400 m以上已全部回采结束, 存在一定量的采空区且采空区大部分已自然垮塌并充填, 部分人为采用废石充填, 对两翼薄矿体开采留下的采空区进行了封闭处理, 采空区目前基本稳定, 未发生大

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52374160)

作者简介: 李宗利(1970—), 男, 高级工程师, 从事金属矿山的开采、安全生产、安全管理等工作; E-mail: miaotf@chinagoldintl.com

*通信作者: 吴功勇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿山岩土工程、矿山安全等; E-mail: 3173018929@qq.com

面积冒落等地压灾害事故。工程设计对矿山1 200 m中段、1 240 m中段、1 280 m中段、1 320 m中段及1 360 m中段的采空区利用井下掘进产生的废石进行部分充填。矿区内地表水系较发育,有一条季节性溪流,水量不大,且矿床地形有利于自然排水,径流和排泄条件良好,但河床位于采空区上方。该矿山使用的采矿方法有分段空场采矿法、浅孔留矿采矿法和预控顶爆力运搬房柱采矿法。

1.2 地质岩体力学参数及充填处理工艺

采空区地层岩性比较简单,是一套碳酸盐岩及碎

屑岩建造,将实验室岩样试验数据作为岩体力学参数,在考虑岩体结构效应^[12]的同时,根据现场实际地质调查情况并结合现有工程实践,采用相关经验公式对岩体力学参数进行适当折减修正^[13-14],以提高岩体力学参数的可靠性和真实性。结合矿床的地质特征及工程特点,综合分析归类处理后考虑4种力学介质,其岩体物理力学参数见表1。

为简化后继分析,根据矿山矿体分布特点、开采现状及充填概况,本次研究选取具有典型代表性的矿山145勘探线—149勘探线作为重点研究对象进行分

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩体名称	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	变形模量/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
上盘千枚岩	35.78	0.89	12 400	11	32.40	0.21
铅锌矿体	54.11	7.47	14 867	8.67	42.10	0.19
下盘含碳灰岩	48.46	5.71	14 933	7.00	38.56	0.20
废石充填体	4.05	0.20	255	0.32	6.10	0.24

析,相关恢复治理工艺如下:

1)采空区处理方案:该矿山145勘探线—149勘探线原设计为保安矿柱,矿体距离地表约180 m,回采后采空区上盘围岩发生小面积滑塌,井下采空区对地表影响轻微。但是,为了避免随着时间推移,形成导水裂隙导通河流,方案要求对现有采空区进行以废石充填为主、以胶结充填接顶为辅的充填治理,避免上覆岩体的破碎及移动而形成导水裂隙。同时,利用胶结接顶后在一定程度上可作为隔水层,保障深部回采矿体安全性。

2)废石充填:采用废石充填的采空区,从中段沿脉运输巷道穿脉口掘进废石斜溜井,将掘进废石运输至采空区上中段充填采空区,每个采空区设置2个废石斜溜井。

3)胶结充填接顶:胶结充填接顶采用井下移动式充填设备进行充填。选择JBP11-10/37型搅泵喷一体机作为井下移动胶结充填制备设备进行胶结充填,袋装水泥和骨料由地表运入井下。搅泵喷一体机集砂石上料、混合搅拌、泵送输送、砂浆喷射等功能于一体。

2 工程模型建立

2.1 数值模拟试验模型

数值模拟的可靠性在一定程度上取决于所构建的计算模型,运用三维有限元软件MIDAS GTS NX软件进行模拟分析,数值分析模型范围为某铅锌矿在145勘探线—149勘探线的采空区。以MIDAS GTS NX软件进行数值模拟试验,建立三维数值模拟计算模型

(见图1-a))。由于145勘探线正好位于河床下部,为采空区距离河床较近的地方,该模型以145勘探线剖面为基础,分析对离地表较近的矿体开采时的应力、位移变化情况,初始模型中矿体分布见图1-b)。

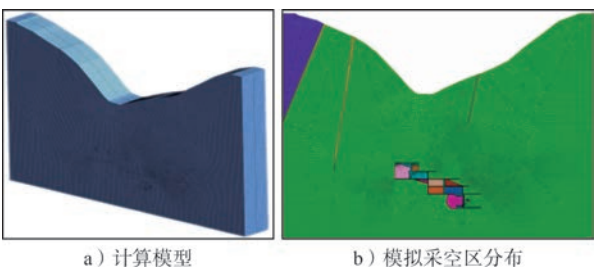


图1 数值模拟计算模型

Fig. 1 Numerical simulation calculation model

2.2 基本理论介绍

本次数值模拟计算采用莫尔-库仑破坏准则^[15-17],其计算屈服准则方程和最大拉应力屈服准则函数为:

$$\left. \begin{aligned} f_s &= \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \\ f_t &= \sigma_3 - \sigma_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_1 为最大主应力(MPa); σ_3 为最小主应力(MPa); φ 为内摩擦角(°); C 为岩体内聚力(MPa); σ_t 为抗拉强度(MPa)。

基于MIDAS GTS NX软件进行数值模拟的基本原理是强度折减法,即通过不断地改变折减系数进行试算,直到边坡体达到极限状态发生剪切破坏,得到的折减系数即为安全系数^[18]。有限元强度折减法采用基于强度储备的安全系数来计算,利用

MIDAS GTS NX 软件求解安全系数时,强度折减法的基本原理计算公式为^[19-20]:

$$\left. \begin{aligned} C_F &= \frac{C}{F_s} \\ \tan \varphi_F &= \frac{\tan \varphi}{F_s} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: C_F 为折减后的内聚力(MPa); φ_F 为折减后的摩擦角(°); F_s 为折减系数。

2.3 计算模型基本假定及边界条件

1)基本假定。为便于模型的建立和计算的科学准确性,结合工程实际进行合理假设^[21]:①假设矿岩体为理想弹塑性体,在屈服点以后,随着塑性流动,材料强度和体积无改变;②假设矿体和围岩为局部均质、各向同性的材料,塑性流动不改变材料的各向同性;③假设矿岩稳固性在空间分布上具有较大的随机性,对于矿体断层构造裂隙带等地质现象的影响在岩体力学参数折减时已做考虑,故在模拟过程中不再另行考虑^[17,22]。

2)边界条件与初始应力。为达到计算机模拟目的,必须对模型施加合理的约束条件使已建立的物理模型转化成相应的地质力学模型。本次研究模型边界约束采用位移约束边界条件:模型底部约束为所有节点 x,y,z 3个方向位移限制;左右边界约束为 x 方向

和 y 方向位移限制, z 取自由边界。综合考虑本次数值模拟的特点和目的,因为缺乏实际原位测试资料的初始地应力,在数值模拟计算时初始地应力场仅按岩体自重应力场考虑,即垂直应力按岩体自重计算,水平应力按泊松效应计算^[23-25]。

3 数值模型计算结果

3.1 分步模拟开挖和废石充填过程

地下矿山在开采过程中,因矿(岩)体被开挖后形成采空区,破坏了原岩应力的原有平衡状态,使岩体中的应力重新分布,产生了次生应力场^[26]。而研究岩体在开挖过程的应力、应变规律,对矿山开采过程中采掘空间围岩控制、地表沉陷控制及岩层运动与矿山压力所伴生灾害的控制有重要作用^[27]。随采场的不断推进,岩层运动状态不断变化,围岩中的应力状态不断调整,因而开挖过程的研究必须是动态研究过程^[26]。本次研究初始模型主要模拟该矿区145勘探线—149勘探线现存采空区围岩应力、位移区分布情况,之后主要模拟该采空区自上而下的废石充填,并分析采空区废石充填后围岩应力、位移分布情况。开挖和回填分布模拟过程见表2。

表2 开挖和回填分布模拟过程

Table 2 Simulation process of excavation and backfilling distribution

阶段	第1步	第2步	第3步	第4步	第5步	第6步	第7步
模型	模型初始应力平衡	1阶段矿体开采	2阶段矿体开采	3阶段矿体开采	1阶段采空区回填	2阶段采空区回填	3阶段采空区回填

3.2 数值模拟计算结果

3.2.1 分步模拟采空区开挖及充填应力变化

第1步:该步骤模拟在初始应力作用下采场回采前整个模型初始地应力分布情况,使模型处于应力平衡状态。第2步至第4步:分别模拟开挖过程各阶段矿体,分析采空区围岩应力变化情况(见图2)。第5步:该步骤为开挖采空区应力、位移分布现状。第6步至第7步:分别模拟对开挖后的采空区逐步进行废石充填,进而分析采空区回填后围岩应力的变化情况。采空区充填后最大主应力、最小主应力分布见图3。

3.2.2 分步模拟采空区开挖及充填位移变化

第2步至第4步:分别模拟开挖各个阶段矿体,进一步分析间柱及围岩位移变化情况,结果见图4-a);第5步至第7步:分别模拟废石充填各阶段的采空区,进而分析间柱、围岩位移变化情况及充填后的采空区对地表河床的影响。采空区充填后整体位移分布见图4-b)。

4 数值模拟结果分析

4.1 开挖过程应力和位移变化

1)应力分析。由图2可知:矿体从上而下开挖后,最大主应力的最大值分别约为11.61 MPa、11.17 MPa、13.11 MPa,最小值分别约为-8.01 MPa、-17.47 MPa、-16.91 MPa。最小主应力的最大值分别约为8.73 MPa、9.68 MPa、11.73 MPa,最小值分别约为-19.18 MPa、-24.27 MPa、-31.08 MPa。数据分析统计结果见图5。由图5可知:随着矿体开采深度的增加,应力逐步增大,且多集中分布在采场顶、底板及间柱处。

2)位移分析。由图4-a)数值模拟结果可知:当矿体自上而下逐步回采时,采空区的位移变形量主要体现在顶板处,并从顶板延伸至地表,最大变形量依次约为82 mm、170 mm、182 mm;位移量逐步增大且主要体现在间柱处,延伸至地表的位移量依次约为22 mm、76 mm、85 mm。数据分析统计结果见图5。由图5可知:开挖进行时位移量逐步增大,即随着深部

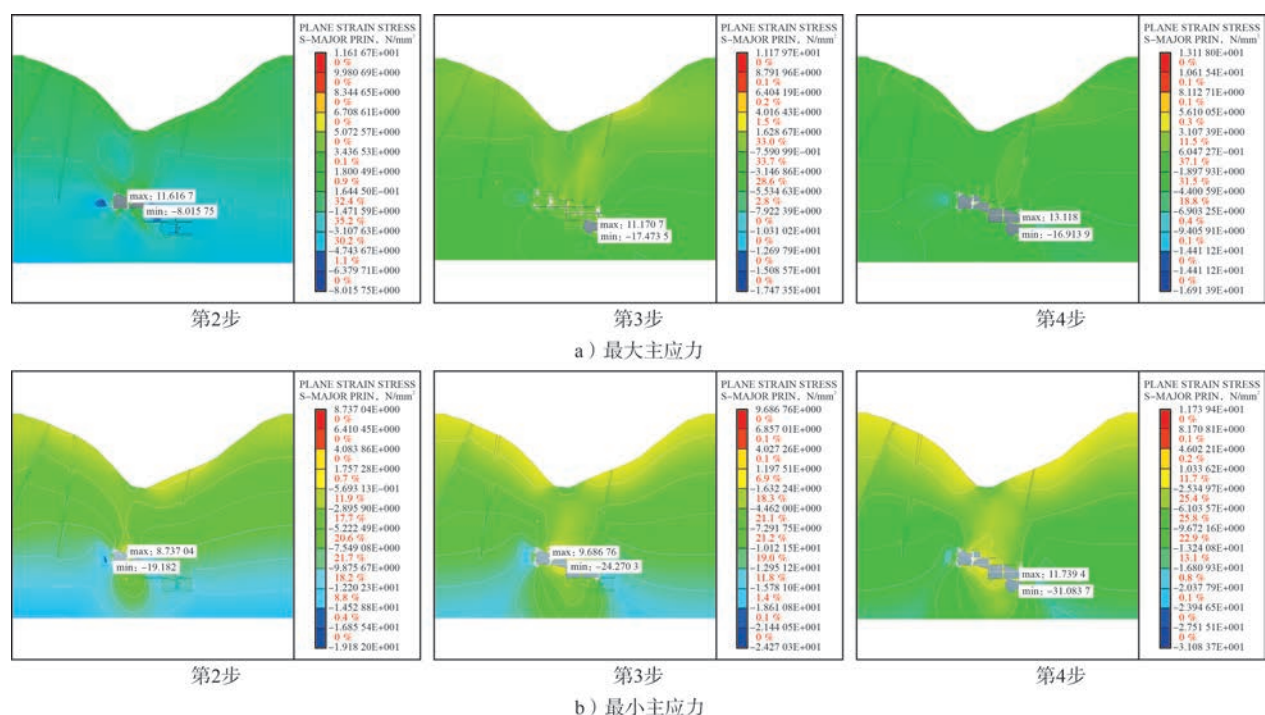


图2 第2步至第4步开采阶段采空区主要应力云图

Fig. 2 Principal stress cloud diagrams of the goaf from Step 2 to Step 4 of mining stages

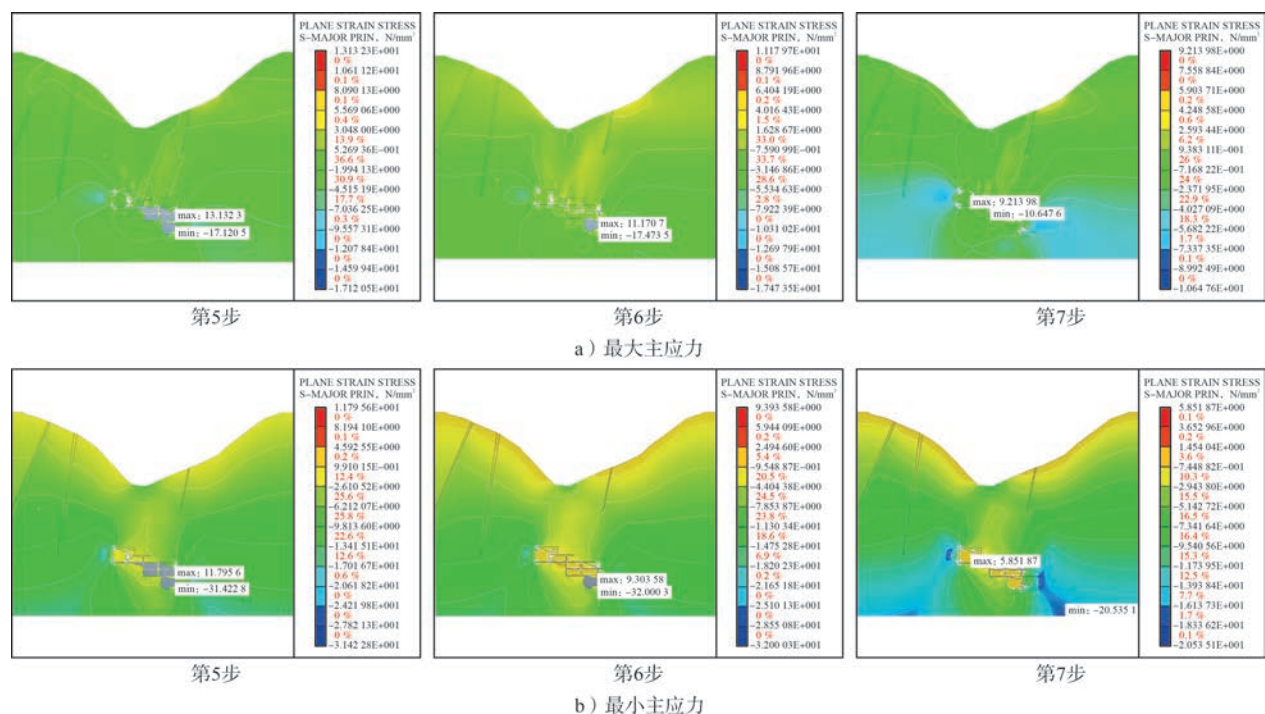


图3 充填阶段的主要应力分布图

Fig. 3 Principal stress distribution during the filling stage

矿体的开采,对地表的影响也依次增大。

4.2 废石充填过程应力和位移变化

1)应力分析。由图3数值模拟结果可知:当采空区从上而下充填后,围岩最大主应力的最大值分别约为13.13 MPa、11.17 MPa、9.21 MPa,最小值分别约为-17.12 MPa、-17.47 MPa、-10.64 MPa。最小主应力的最大值分别约为11.79 MPa、9.30 MPa、5.85 MPa,最

小值分别约为-31.42 MPa、-32.00 MPa、-20.53 MPa。

数据分析统计结果见图5。由图5可知:随着采空区逐步进行废石充填后,应力逐步减少,充填体对采空区的稳定性起到一定的改善作用。

2)位移分析。根据图4-b)数值模拟结果:当逐步用废石充填采空区后,采空区的位移变形量主要体现在顶板处,并从顶板延伸至地表,最大变形量依

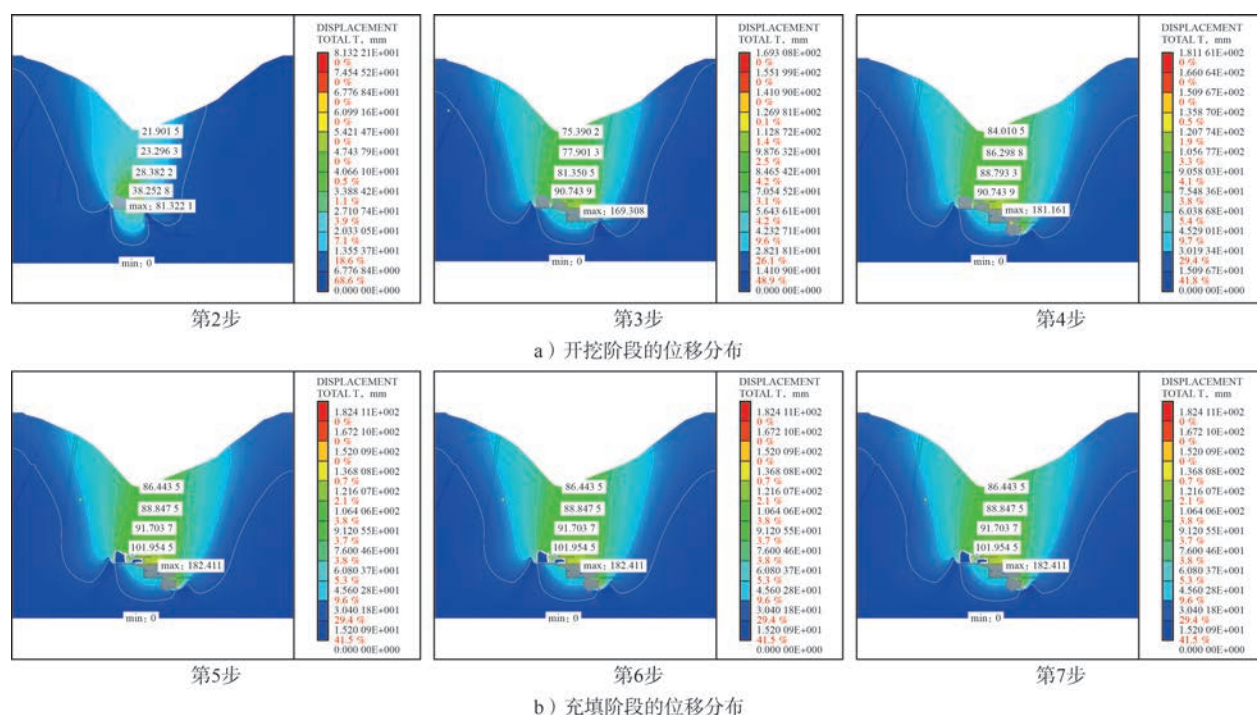


图4 采空区各阶段总体位移分布

Fig. 4 Overall displacement distribution at various goaf stages

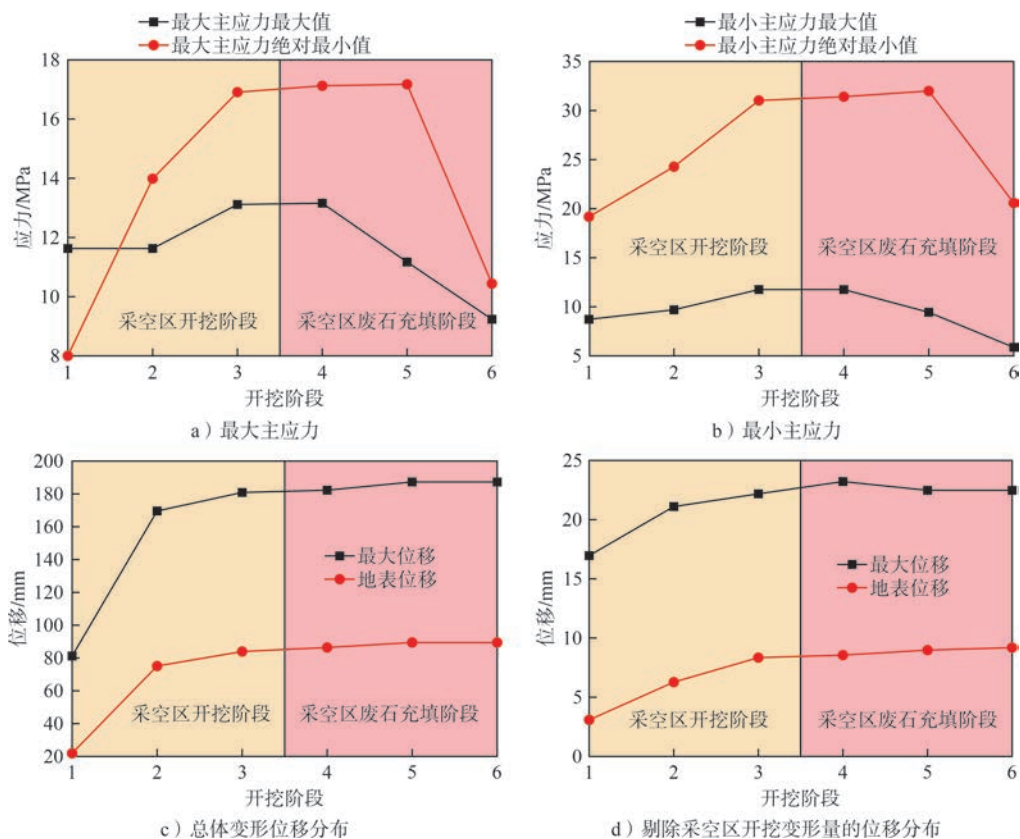


图5 主应力分布云图与位移分布云图

Fig. 5 Cloud diagrams of principal stress and displacement distribution

次约为 183 mm、188 mm、189 mm, 延伸至地表的位移量依次为 86 mm、89 mm、90 mm。数据分析统计结果见图 5。由图 5 可知: 随着对采空区进行废石充填, 虽然位移量有所增大, 但矿体开挖引起的位移量具有不

可逆性, 所以随着废石充填采空区后引起的地表变形量增加梯度大幅度减缓, 并且趋于稳定状态, 故可利用废石充填对采空区整体稳定性具有较好的改善作用。

4.3 模拟结果综合分析

数值模型分别模拟 145 勘探线—149 勘探线地下矿体开挖及采空区回填后应力、位移变化情况,并对最大主应力、最小主应力及位移进行了统计分析,结果见图 5。由该统计分析图 3~5 的数值模拟结果综合分析如下:

1) 总体分析。最大主应力和最小主应力在开挖过程中随深度的增加,最大值和最小值均急剧增大,在回填过程中主应力在回填完毕时有大幅减小趋势,但与未开挖前还是有所增加;最大位移和地表位移均随开挖和充填的进行不断增加,但进入充填阶段位移增加量的梯度显著下降,表明充填对矿区位移变形的效果较明显;当矿体开挖并对采空区回填后,最大主应力、最小主应力(绝对值)均出现减小,采空区位移及地表位移趋于稳定状态。

2) 采空区上方地表变形及河床影响。在分步动态开采过程中,各阶段位移最大的位置皆位于顶板中部,方向指向采空区。随开挖采空区的增加,上部位移逐渐增大且增加梯度较大;在分步充填过程中,最大位移值和地表位移值均有所增大,但增加梯度大幅减缓,说明采取废石充填+胶结充填对地表位移变形的抑制明显;剔除采空区开挖变形量的位移分布折线变化梯度更有力地说明了充填能有效降低采空区引起的地表位移对地面河流的影响。

3) 采空区围岩的应力变化。分步开采过程中,采空区应力随着开采的进行大部分区域出现拉应力,小部分区域出现压应力集中并持续增大;在分步充填过程中,随着对采空区逐步进行废石充填后,应力有小幅增加后大幅减少,围岩应力集中程度明显缓解,且充填后产生冲击地压和塌陷的危险将得到很大程度消除,充填体对采空区受力状况和稳定性起到改善作用。

5 结 论

根据数值模拟结果,对采空区开采和充填过程的应力变化情况、位移变化情况及特殊控制点相关应力应变的统计分析可得出如下结论:

1) 随着矿体开采深度的增加,应力在逐步增大并多集中分布在采场顶、底板及间柱处。当逐步回采矿体时,采空区的位移变形量主要体现在顶板处,并从顶板延伸至地表,位移量逐步增大,即随着深部矿体的开采,对地表的影响也依次增大。

2) 当采空区自上而下回填后,随着对采空区逐步

进行废石充填,应力逐步减少,充填体对采空区的稳定性起到一定的作用。采空区的位移变形量主要体现在顶板处,并从顶板延伸至地表。随着对采空区进行废石充填,虽然位移量有较小的增大,但增加梯度减缓,并且趋于稳定状态。

3) 数值模拟结果表明:对采空区实施废石充填+胶结充填接顶可有效减缓围岩应力,对保障该矿区地表河床的稳定性效果良好,同时实现矿山固废变废为宝的转变,有力推进了绿色矿山的建设。

【参 考 文 献】

- [1] 赵新,刘明,史峰.采空区覆盖层对顶板大规模冒落冲击灾害的防治研究[J].黄金,2023,44(8):21-25.
- [2] 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.
- [3] 李俊平,张幼振,王海泉.采空区处理与卸压开采回顾与展望[J].有色金属(矿山部分),2022,74(2):6-10.
- [4] 刘焕春,于建新,焦华喆,等.复杂采空区充填开采对地面建筑的影响研究[J].金属矿山,2020(4):39-45.
- [5] 王亮,王勇,那庆.建设“一体系五平衡”模式,推进绿色高质量矿山建设[J].有色金属(矿山部分),2023,75(3):1-4.
- [6] 柳晓娟,侯华丽,孙映祥,等.关于中国绿色矿业内涵与实现路径的思考[J].矿业研究与开发,2021,41(10):180-186.
- [7] 周佳琦,任玉东.黄金矿山急倾斜薄矿脉开采工艺及发展趋势[J].黄金,2022,43(9):35-38.
- [8] 易雪枫,刘春康,王宇.金属矿尾废胶结充填体破裂演化过程原位 CT 扫描试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3 365-3 373.
- [9] 滕德强.高浓度煤矸石胶结充填材料骨料级配优化研究[J].建井技术,2023,44(1):64-72.
- [10] 黄明发.大型矿山低成本胶结充填关键技术研究与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(1):20-25.
- [11] 夏雨,卢爱红.连续级配高强胶结充填体力学特性及破坏特征分析[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(1):55-66.
- [12] 洪陈杰,黄曼,夏才初,等.岩体结构面各向异性变异系数的尺寸效应研究[J].岩土力学,2020,41(6):2 098-2 109.
- [13] 杨有喜,孙丽军.某民采矿山空区调查及治理方案研究[J].现代矿业,2013,29(4):31-33,40.
- [14] 陈超.大红山铜矿铜铁合采盘区矿柱稳定性的数值分析研究[D].昆明:昆明理工大学,2011.
- [15] 周靖人,魏炯,王青元,等.基于修正莫尔-库仑准则的围岩瞬态卸荷塑性变形分析[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(2):275-279.
- [16] 朱合轩,付厚利,秦哲,等.层次分析法在边坡削坡方案设计中的应用[J].煤炭技术,2017,36(2):211-213.
- [17] 聂兴信,吴功勇,张鑫,等.露天矿高陡复杂边坡软弱岩层组“坐落-滑移式”破坏模式研究[J].工业安全与环保,2024,50(5):40-44.
- [18] 周罕,曹平,张科.基于响应面法和强度折减法的边坡可靠性计算研究[J].中国安全科学学报,2012,22(5):79-84.
- [19] JEON B, JEONG H, CHOI S, et al. Assessment of Subsidence

- hazard in abandoned mine area using strength reduction method [J]. Springer Science and Business Media LLC, 2022, 26(10): 4338–4358.
- [20] ACHARYA M, TIMALSINA A, PANUDELU. Shear strength reduction analysis of slope by numerical modelling based on finite element method [J]. American Journal of Science, Engineering and Technology, 2023, 8(3): 125–132.
- [21] 梁源贵, 周宗红, 侯廷凯, 等. 某金矿露天转地下开采境界顶柱合理厚度研究[J]. 黄金, 2024, 45(5): 19–24.
- [22] 黄德镛, 高聪, 贾子月, 等. 多中段空区稳定性分析及间柱回采顺序优选[J]. 有色金属工程, 2023, 13(6): 105–114.
- [23] 王金安, 李飞. 复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 189–205.
- [24] 张雄天, 朱文志. 长距离管道输送砂浆治理矿山废弃露天坑及塌陷区综合技术研究[J]. 金属矿山, 2022(2): 68–74.
- [25] 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.
- [26] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 322–333.
- [27] 吴功勇, 聂兴信, 张鑫, 等. 基于主客观综合赋权-正向云模型的露天矿含软弱岩层组高陡复杂边坡稳定性分级评定[J]. 有色金属工程, 2024, 14(9): 150–162.

Stability study of waste rock filling in goaf based on MIDAS GTS NX

Li Zongli¹, Wu Gongyong², Nie Xingxin², Zhang Xin², Zhao Linhai¹, Ruan Shunling², Jiang Song²

(1. Baoji Northwest Nonferrous Erlihe Mining Co., Ltd.;

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

Abstract: The restoration and management of underground mine goafs significantly impact mining areas and their surrounding environments. Using an underground goaf in a metal mine as the study object, this research employs the MIDAS GTS NX software for numerical simulations. The analysis focuses on the stability of the stepwise mining and filling process, as well as the overlying strata after waste rock filling. Additionally, the study examines the safety and stability of the goaf and the impact on surface rivers after applying waste rock filling + cemented filling to the roof. The results show that the waste rock filling + cemented filling to the roof effectively alleviates surrounding rock stress, ensures the stability of the riverbed, and significantly enhances the structural stability of the goaf, maintaining overall safety levels.

Keywords: goaf; filling mining method; MIDAS GTS NX software; numerical simulation; waste rock filling; stability