

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.268

引用格式:黄滚,秦振扬,姚精明.某矿硐室水溶法开采芒硝矿溶区稳定性分析[J].重庆大学学报,2026,49(6):
24-38.



某矿硐室水溶法开采芒硝矿溶区稳定性分析

黄滚^{a,b,†},秦振扬^{a,b},姚精明^{a,b}

(重庆大学 a. 资源与安全学院; b. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对硐室水溶采矿法溶区稳定性问题,以彭山同乐钙芒硝矿开采为工程背景,采用室内溶浸实验与 FLAC3D 有限元数值模拟相结合的研究方法。通过溶浸实验系统研究溶区内溶浸物体积变化规律,建立三维数值模型分析溶区内应力场、位移场、塑性区分布特征及地表沉降规律。溶浸实验结果表明:溶浸开采之后,矿层中钙芒硝矿含量越高且矿石粒径越小,溶缩率越大。数值模拟结果表明:1)溶浸物溶缩率的大小对溶区稳定性有较大影响;2)溶浸后的钙芒硝矿体与未溶浸的芒硝矿柱最大垂直应力分别为 3.25 MPa 和 13 MPa;3)接顶情况下顶板最大下沉量为 7 mm,地表最大下沉量为 7.7 mm,未接顶情况下顶板最大下沉量为 37.7 mm,地表最大下沉量为 34.5 mm。结果表明溶浸物接顶情况下溶浸后的钙芒硝矿体仍能有效地支撑顶板,溶浸开采后溶区总体稳定;溶浸物不接顶情况下溶区整体稳定性存在隐患。研究结果对盐矿开采工程的长期稳定和安全运营均具有重要的理论价值和工程意义。

关键词:硐室水溶采矿法;钙芒硝矿;溶区稳定性;溶浸实验;数值模拟

中图分类号:U469.72+2

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)06-024-15

Analysis on the stability of dissolved area of glauberite mined by water-soluble method in a mine

HUANG Gun^{a,b,†}, QIN Zhenyang^{a,b}, YAO Jingming^{a,b}

(a. School of Resource and Safety Engineering; b. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: This study investigates the stability of dissolution zones formed during chamber solution mining at the Pengshan Tongle glauberite mine. An integrated approach combining laboratory leaching experiments and FLAC3D numerical simulations was adopted to systematically evaluate the volumetric changes of dissolved materials and their impact on structural stability. A 3D numerical model was developed to analyze stress distribution, displacement patterns, plastic zone evolution, and surface subsidence. Experimental results reveal that dissolution shrinkage increases with higher glauberite content and decreases with larger ore particle size.

收稿日期:2025-03-07 网络出版日期:2025-07-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674049)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51674049).

作者简介:†黄滚(1972—2026),男,教授,博士生导师,主要从事岩石力学与工程研究,已故。

通信作者:秦振扬(2000—),男,硕士研究生,(E-mail)156277807@qq.com。

Numerical analyses further demonstrate that the dissolution contraction ratio plays a critical role in controlling zone stability. After leaching, the vertical stress in the dissolved zone is reduced to approximately 3.25 MPa, compared with 13 MPa in intact pillars. In roof-connected scenarios, roof subsidence is limited to about 7 mm, with corresponding surface settlement of 7.7 mm. In contrast, non-connected conditions result in significantly larger deformations, with roof displacement reaching 37.7 mm and surface subsidence of 34.5 mm. These findings demonstrate that roof-connected leached material can provide effective structural support and maintain overall stability, whereas non-connected configurations pose a higher risk of instability. The study offers valuable insights for the safe and sustainable design of solution mining operations in evaporite deposits.

Keywords: chamber solution mining; glauberite; dissolution zone stability; leaching experiment; numerical simulation

芒硝矿作为天然硫酸盐类矿物,是制备重要化工原料硫酸钠(工业俗称元明粉)的主要矿物来源^[1]。该矿物按结晶水差异可分为含水芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)与无水芒硝(Na_2SO_4)两大类,另有部分以复盐形式存在如钙芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$)^[2]。中国作为全球最大的芒硝资源国,优质钙芒硝矿床集中分布于四川盆地西南缘的成都南部、眉山、彭山及雅安地区^[3-4]。该区域矿床具有层位稳定、构造简单、品位高等显著地质特征,具备良好开采条件。针对传统开采方式存在的资源利用率低、安全隐患突出等问题,有学者提出了原位溶浸开采技术方案^[5]。四川同庆南风集团在眉山市彭山县同乐矿段采用硐室水溶法开采,该方法具有工艺简单、成本低廉等显著优势^[6]。经过多年开采作业,该矿逐渐形成大规模已采溶区,地质和矿体条件变得复杂,进而引发了系列地质灾害与环境问题^[7]。研究表明,矿柱应力超过其长期强度阈值时将加速蠕变损伤进程,而溶浸残留物与顶板的接触状态直接影响采区稳定性^[8]。因此,构建基于岩体力学响应的稳定性评价体系,是实现钙芒硝矿床安全高效开采的关键科学问题。采场顶底柱、间柱及顶板的稳定状态,以及溶浸后残留物是否与顶板接触,构成开采溶区基本结构单元,是影响溶区稳定性的关键因素。为精准评估采溶区稳定性,提升风险管控与灾害防治效能,开展系统的采溶区稳定性研究具有重要工程意义,可为矿山安全生产提供科学依据。

水溶采矿技术的科学基础源于盐类矿物特有的溶解特性。梁卫国^[9]建立了水溶开采多场耦合数值模型,定量表征了卤水溶蚀作用下围岩强度参数的时变规律,发现支承能力衰减速率与溶腔扩展速度呈指数关系。徐素国^[10]通过控制溶液浓度梯度和温度场,系统揭示了钙芒硝溶解过程的非线性温度效应,建立了溶解速率与热力学参数的定量关系。杨晓琴等^[11]采用显微CT技术捕捉了溶浸过程中钙芒硝细观结构的动态演化,发现孔隙率增长与裂纹扩展存在显著的温度-时间协同效应。Yu等^[12]进一步阐明了溶液浓度对芒硝晶体溶解路径的调控机制,证实高浓度溶液会抑制溶解界面反应动力学。高洪波^[13]从细观尺度揭示了钙芒硝盐岩溶解过程中的相变特征,为构建多尺度溶解模型提供了关键实验依据。Meng等^[14]通过静水浸出试验再现了芒硝岩溶蚀过程的阶段性特征,发现溶腔形态演化受控于溶液渗透-溶解-运移的耦合作用机制。研究证实,水溶开采形成的溶腔失稳将引发应力重分布,当顶板安全厚度不足时可能诱发地表沉降等地质灾害,其灾变过程具有显著的非线性动力学特征。芒硝矿水溶法开采溶区稳定性的研究经历了较长的历程,主要采用基础理论分析、相似实验和有限元数值模拟这3种研究方法^[15],矿岩物理力学性质、溶区内溶浸物是否接顶、溶区矿柱与顶板的稳定状态是影响溶区稳定性的关键因素。Zhang等^[16]开展了钙芒硝矿石在单轴压缩声发射实验中,系统揭示了钙芒硝破坏过程的声发射特征演化规律。杨玉良等^[17]进行了温度-溶浸-应力多场耦合下的钙芒硝岩石蠕变试验,建立了多场耦合作用下的蠕变本构模型,阐明了温度场对蠕变行为的强化机制。郭旭炜^[18]基于概率积分理论优化了分段Knothe时间函数,得到一种预测精度更高、更具推广性的分段Knothe函数用于计算地表变形影响的动态规律。张桂民等^[19]构建了陷落柱模型和沉陷漏斗模型,基于该模型提出了预警关键时刻点以及严格控制顶板尺寸等预防措施。范育青^[20]采用ANSYS三维有限元分析软件分析了水溶开采的溶腔稳定性和地表移动和变形扩展规律。吴鹏^[21]通过建立FLAC3D数值模型,研究分析了采空

区周围的应力、位移、塑性区分布情况,为矿山安全生产提供了科学依据。

笔者通过室内溶浸实验得到已采溶区内溶浸物的溶缩率范围,间接评估溶区内溶浸物的接顶状况,之后通过FLAC3D的耦合技术建立三维数值模型,考虑2种极端工况条件(基本不溶缩,溶浸物全部接顶;溶缩率达到22.5%,溶浸物全部不接顶),结合现场探测与理论分析,对溶区内采空区的应力场、位移场、塑性区以及地表沉降的分布规律进行研究,进而评估溶区稳定性,为矿山后续开采提供理论依据。

1 室内溶浸实验

1.1 溶浸实验原理及目的

同乐芒硝矿采用硐室水溶法开采,通过装药爆破后将矿体原地堆放,再封闭上下堵水口注水溶浸。矿石中的硫酸钠易溶于水,溶于水后矿堆体积会发生沉缩现象,而不溶性矿物(如硫酸钙、黏土)吸水后体积会产生膨胀现象。这种沉缩与膨胀现象会直接影响溶浸后溶区内溶浸物是否接顶,而溶浸物是否接顶直接关系矿房乃至整个矿山的稳定性。由于浸出前后矿房封闭,无法直接观察每个溶区的接顶情况。为了具体测定矿房内矿石溶缩和膨胀的情况,得到溶浸后溶浸物的溶缩率来间接评估溶区内溶浸物的接顶状态,通过开展室内溶浸实验模拟真实溶区内的溶浸物溶缩状态。由于现场可以通过装药爆破将矿石爆破成不同粒径的矿石,实验采用不同粒径的矿岩,得到不同大小的矿石粒径对溶缩率大小的影响,结果也将为后续数值模拟提供支持。

1.2 实验仪器及实验步骤

实验使用自行设计加工的小号和大号试验桶作为浸出容器如图1所示。小号实验容器分别为高 $H=100$ mm、内径 $\phi=50$ mm的四氟乙烯、尼龙和铁质容器。大号实验容器为高 $H=400$ mm、内径 $\phi=200$ mm的铁质容器。

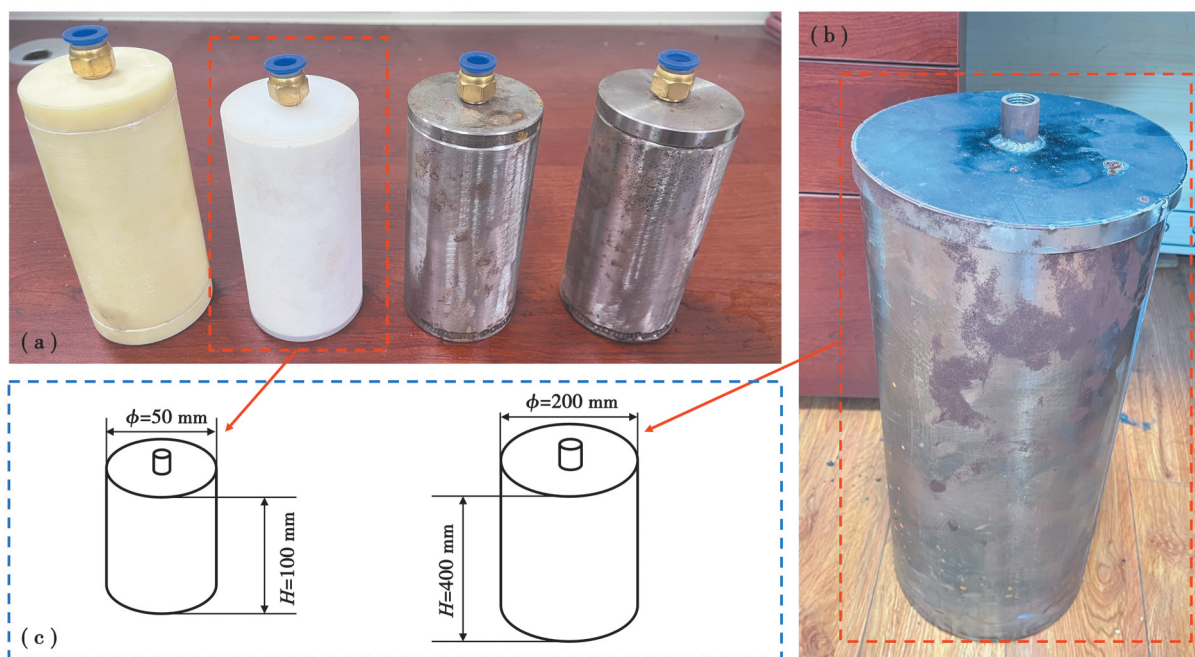


图1 溶浸实验容器图

Fig. 1 Experimental container for leaching experiment

具体实验步骤如下:

1) 填充碎石。碎石填充实验严格遵循矿山矿层地质分布和实际开采参数,首先根据矿山地质柱状图确定矿层与夹石层的比例关系,接着结合爆破分筛数据建立不同粒径的碎石填充模型,通过几何相似原理进行实验参数缩尺设计。同乐芒硝矿矿山地质分布柱状图(见图2)揭示了矿层-夹石层厚度分布特征,确定溶浸实验的矿石与夹石比例配比方案。

矿层	位置	柱状	层厚/m	岩性描述
三层矿	上覆层		1.7	紫红色薄层状泥质粉砂岩
	芒硝矿层		9.17	芒硝矿层9.17 m, 其中含1.08 m夹石带, 其余8.09 m为钙芒硝矿
	底板		1.72	底板1.72 m夹层矿, 底界有0.2 m硬石膏
二层矿	上覆层		2.59	砂岩夹石层, 紫红色薄层状泥质粉砂岩
	芒硝矿层		7.04	芒硝矿层7.04 m, 其中含1.34 m夹石带, 其余5.70 m为钙芒硝矿
	底板		7.25	紫红色粉砂岩, 富含团块状硬石膏
	钙芒硝矿		0.82	钙芒硝矿, 顶板0.4 m厚硬石膏
一层矿	上覆层		3.65	夹石, 富含硬石膏, 其他为紫红色粉砂岩
	芒硝矿层		12.68	芒硝矿层12.68 m, 其中含2 m夹石带, 其余10.68 m为钙芒硝矿
	底板		3	夹石层, 紫红色粉砂岩, 含有白云质成份

图 2 矿山矿层分布柱状图

Fig. 2 Histogram of mine seam distribution

考虑到溶浸率随着岩矿粒径变化的相关性特征,结合同乐矿山提供的爆破分筛数据(见图 3)进行不同粒径碎石填充。通过几何相似原理,建立现场溶区($H=56.5\text{ m}, \phi=28.25\text{ m}$)与实验装置($H=100\text{ mm}, \phi=50\text{ mm}$)比例缩尺模型。据此,将现场不同碎石粒径转换为实验室尺度,分别制备 1、2、3 mm 粒径的细粒级碎石试样用于小型溶浸容器($H=100\text{ mm}, \phi=50\text{ mm}$),同时配置 20~<30 mm、30~<50 mm、50~70 mm 三个粗粒级组进行大型溶浸容器($H=400\text{ mm}, \phi=200\text{ mm}$)的对比实验。

2)浸泡矿石并记录。芒硝在 32 °C 的温水溶浸下溶浸率最高,同乐芒硝矿使用 32 °C 的温水注入溶区内并进行浸泡。因此,填充完成后(见图 4(a)),用 32 °C 的温水浸泡,每隔 12 h 记录一次溶缩量,直至无明显变化为止,即达到溶缩稳定状态(见图 4(b))。

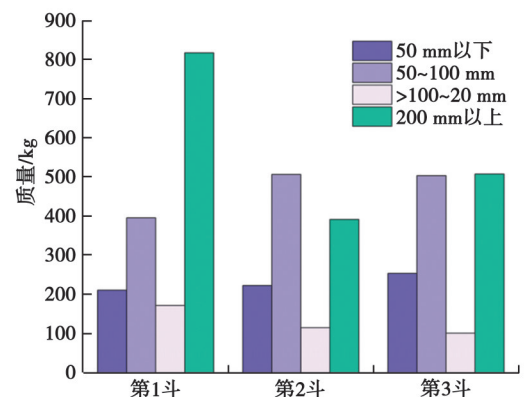


图 3 分筛矿石粒径分布情况统计

Fig. 3 Statistics on the distribution of the lumpiness of the sieved ore



图4 溶浸后溶缩稳定状态

Fig. 4 Steady state of solution shrinkage after solution leaching

3) 统计数据。如图5(a)所示,一层矿、二层矿、三层矿的1 mm 碎石溶缩率分别为21.6%、18.6%和27.4%;2 mm 碎石溶缩率分别为8.3%、6.9%和10.4%(见图5(b));3 mm 碎石溶解率分别为6.7%、4.5%和9.5%(见图5(c));20~<30 mm 碎石溶缩率分别为1.6%、1.4%和2.4%(见图5(d));30~<50 mm 碎石溶缩率分别为0.9%、1.1%和1.3%(见图5(e));50~70 mm 碎石溶缩率分别为0.3%、0.3%和0.4%(见图5(f))。

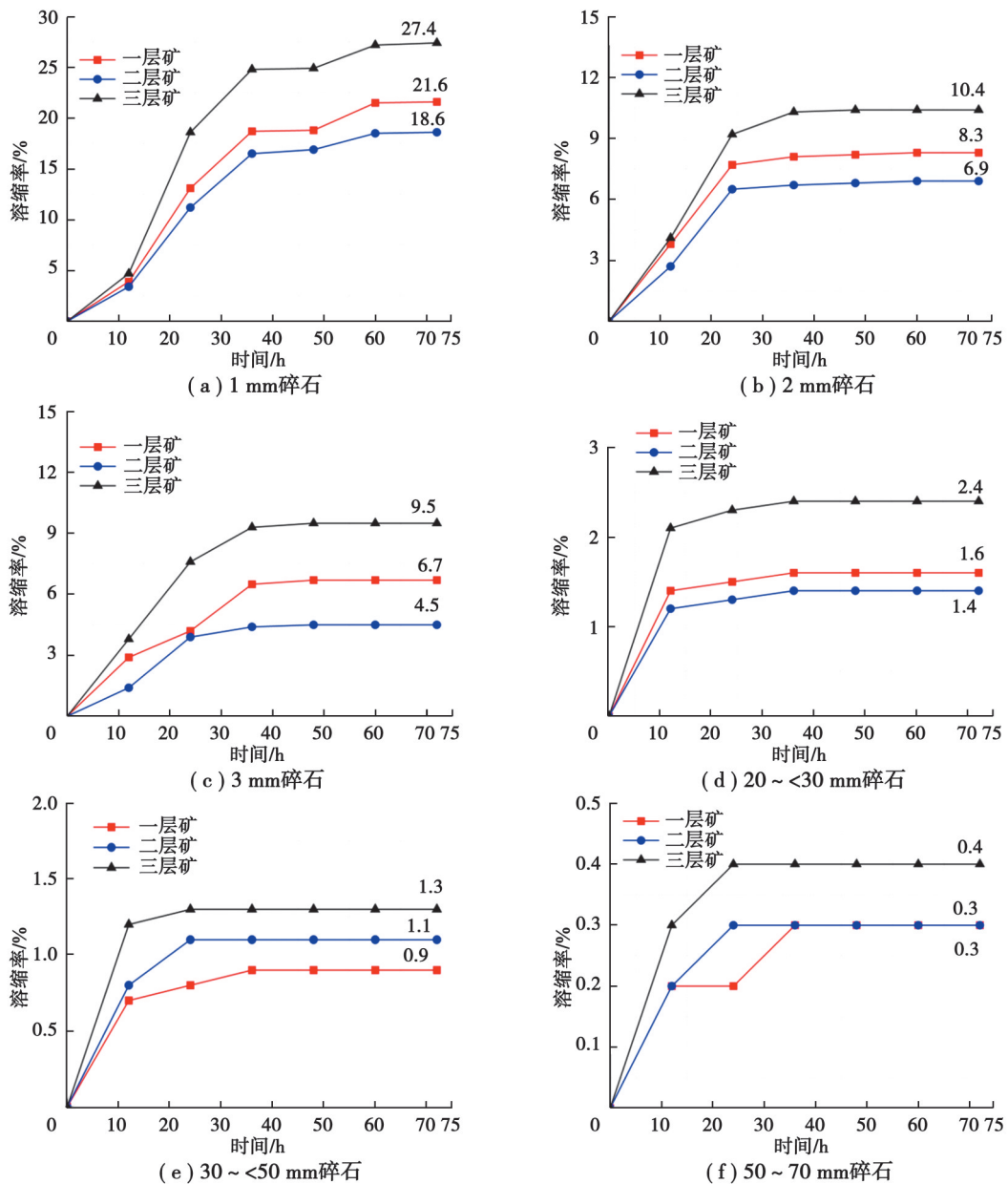


图5 不同粒径矿石溶缩率与浸泡时间变化关系

Fig. 5 Relationship between dissolution rate and soaking time of ores with different sizes

1.3 实验结果分析

根据图5和图6可知,溶浸过程一般在60 h之后达到溶浸稳定状态,溶缩率不再有明显变化;三层矿溶缩率最大,一层矿次之,二层矿最小,这可能与各矿层的芒硝矿层厚度有关,三层矿含64%芒硝矿,一层矿含55%芒硝矿,而二层矿仅含34%芒硝矿。这是因为芒硝矿主要成分为硫酸钠,硫酸钠易溶于水,硫酸钠含量升高将会导致溶浸物溶缩量上升。因此,矿层中芒硝矿含量越高,溶缩率越大;1 mm粒径的溶缩率最大,达到22.5%;随着矿石粒径增大,溶缩率逐渐减小,当矿石粒径达到50~70 mm时,基本无溶缩现象(见图6)。根据同乐矿山提供的爆破后矿石分筛数据可知(见图3),50~70 mm粒径以上的矿石占矿石体积比为84%,50~70 mm粒径以下矿石仅占16%,因此可推断,同乐矿山实际矿房内溶浸物溶缩率较小,大部分溶浸物可接顶。

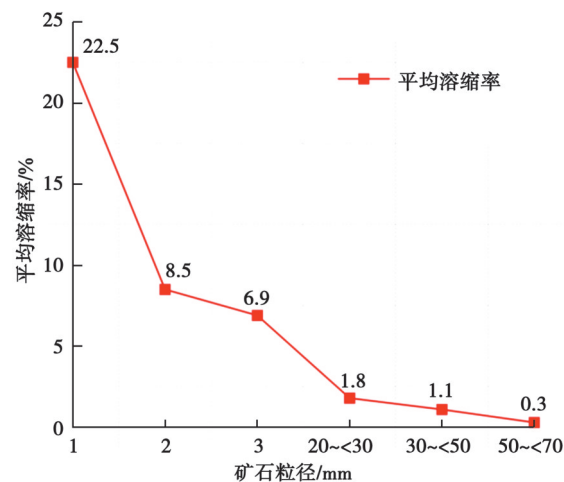


图6 平均溶缩率与矿石粒径变化关系

Fig. 6 Relationship between average shrinkage and blockiness

2 溶区稳定性数值模拟

2.1 模拟参数获取

2.1.1 试样制备

通过现场钻孔取样获取同乐钙芒硝矿区各岩层岩芯样品(见图7),取样深度为66~125 m之间,岩石为紫红色粉砂岩或钙芒硝矿石等,从现场钻孔取得原岩,根据ISRM标准加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 标准圆柱试样和 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 标准圆盘试样,分别用于测试岩石的单轴抗压强度,三轴抗压强度和抗拉强度^[22],部分岩石加工试样如图8所示。



图7 岩石钻孔取样图

Fig. 7 Rock drilling sampling

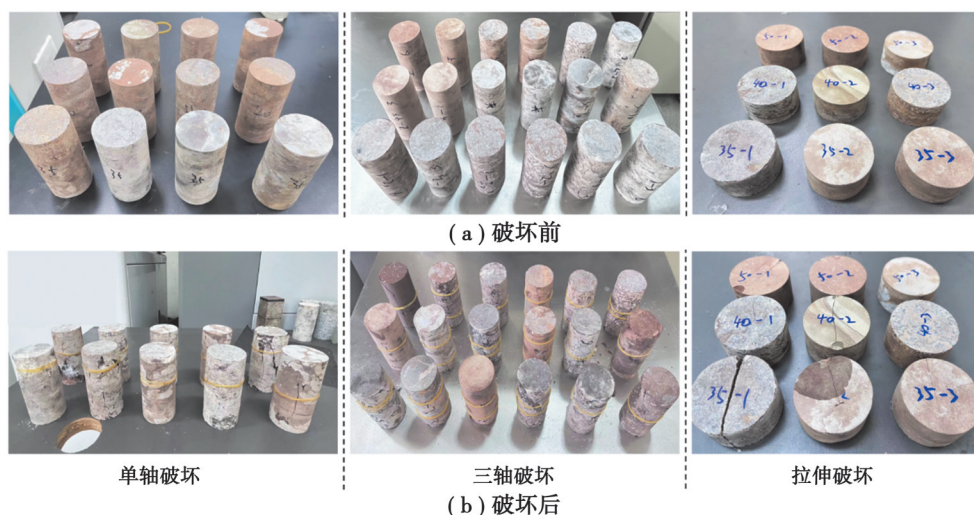


图8 部分岩石试样

Fig. 8 Part of rock samples

2.1.2 试验设备及试验方法

矿岩单轴、三轴与巴西劈裂实验均在重庆大学资源与安全学院煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室进行。实验设备采用美国MTS公司生产的MTS815型岩石材料实验机和岛津实验机(见图9),每个数据都为3次试验后取平均值得到。三轴压缩试验围压设定为3、6、9 MPa。试验中应力施加采用应力荷载方式控制,轴压的加卸载速率均为0.05 MPa/s。



图9 MTS815三轴试验机与岛津试验机

Fig. 9 MTS815 triaxial testing machine and Shimadzu testing machine

2.1.3 试验结果

与实际的岩体力学性能相比,通过岩石力学实验所获得的岩石力学参数偏大,不能完全代表天然状态下的岩体力学特性。采用基于Hoek-Brown破坏准则的强度折减法对岩石力学参数进行折减。通过对含有结构面岩体破坏特性的分析,Hoek-Brown提出了节理岩体通用的Hoek-Brown破坏准则,如式(1)所示。

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1)$$

式中: σ_1' 和 σ_3' 分别代表破坏时的最大和最小有效应力; σ_{ci} 代表原岩试样单轴抗压强度; m_b 代表对岩体Hoek-Brown常数 m 之值; a 和 s 为常数,取决于岩体性质。

为模拟大尺寸的现场岩体实验,由式(1)生成一系列三轴实验值,经统计分析 with 曲线拟合,导出的等效Mohr包络线方程为

$$\tau = A \sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n' - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^B, \quad (2)$$

式中: A 和 B 为材料常数; σ_n' 为法向有效应力; σ_{tm} 为岩体的抗拉强度,可由式(3)确定。

$$\sigma_{tm} = \frac{1}{2} \sigma_{ci} + \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \sigma_{ci}. \quad (3)$$

对岩块(石),式(1)可简化为

$$\sigma'_i = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_i - \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}, \quad (4)$$

即岩石破坏时的主应力关系由单轴抗压强度 σ_{ci} 和完整岩石材料常数 m_i 确定。

又式(4)可改写为

$$y = m\sigma_{ci}x + \sigma_{ci}. \quad (5)$$

根据岩石三轴实验的结果,岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 、完整岩石材料常数 m_i 和相关系数 r^2 值可由式(6)~(8)确定。

$$\sigma_{ci} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i / n}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n} \right] \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (6)$$

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i / n}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n} \right), \quad (7)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i / n}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 / n \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 / n \right]}, \quad (8)$$

式中: $x_i = \sigma'_i$; $y_i = (\sigma'_i - \sigma'_3)^2$; n 为试样的个数。

因此,岩体特性参数可由式(9)~(11)确定。

$$m_b/m_i = \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right), \quad (9)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right), \quad (10)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right), \quad (11)$$

式中: D 为取决于爆破与应力释放等开挖扰动程度的弱化因子,其值为 0~1,从无扰动时 $D=0$ 到扰动最大时 $D=1$ 。

从式(1)知,设 $\sigma'_3=0$,可得岩体单轴压缩强度为

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot s^a. \quad (12)$$

Hoek-Brown(2002)修正后,使用式(13)(14)估算岩体变形模量。

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}, \quad (\sigma_c \geq 100 \text{ MPa}), \quad (13)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}, \quad (\sigma_c \geq 100 \text{ MPa}). \quad (14)$$

根据非线性准则得到的公式,可以通过(17)和(18)确定岩体的黏聚力 C_m 和内摩擦角 ϕ_m 。

在式(1)中令 $\sigma'_i=0$,即可求得岩石单轴抗压强度 σ_{cm} 。令 $\sigma'_3=0$,即可求得岩石的单轴抗拉强度。则有

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \sqrt{s}, \quad (15)$$

$$\sigma_{tm} = \frac{1}{2} \sigma \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right). \quad (16)$$

再由式(15)(16)求得

$$C_m = \frac{\sqrt{\sigma_{cm} \cdot \sigma_{tm}}}{2}, \quad (17)$$

$$\phi_m = \arctg \frac{\sigma_{cm} - \sigma_{tm}}{2\sqrt{\sigma_{cm} \cdot \sigma_{tm}}}. \quad (18)$$

根据上述公式进行岩体力学参数折减,折减后各矿层顶板及岩体的岩石力学参数如表1所示。

表1 计算采用的岩体力学参数表

Table 1 Rock mechanics parameters used in calculation

编号(层)	单轴抗压 强度/MPa	泊松 比	弹性模量/ GPa	抗拉强 度/MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (kg·m ⁻³)
矿层底板	23.13	0.29	7.48	2.62	2.04	27.70	2 600
一层矿	15.9	0.27	6.07	1.68	1.57	25.75	2 590
一、三层矿层间夹层岩石	32.19	0.22	8.39	3.43	3.41	32.99	2 850
三层矿	24.49	0.23	6.46	2.08	3.43	30.26	2 710
矿层顶板	41.75	0.22	9.69	2.98	3.98	37.44	2 830
溶浸后残留物	3.92	0.35	1.18	0.00	0.26	49.1	1 680

2.2 计算模型建立

同乐钙芒硝矿区地势总体为西高东低,海拔最低为矿区东部为440.8 m,最高在矿区西南部为521.4 m,相对高差约80 m,属川西平原南部浅丘地貌类型。矿体走向长4 009 m,倾向长1 110 m,矿区平均倾角为4°,矿体平均厚度为11.8 m,平均埋深为-130 m,属于近水平薄矿体,矿体水平面积大,厚度小。

为掌握溶区实际现场的基本情况,对X323-10溶区进行探测来掌握采空区形态和技术参数,并进行相关取样工作,主要调查的有X330-10等4个溶区,如图10所示。

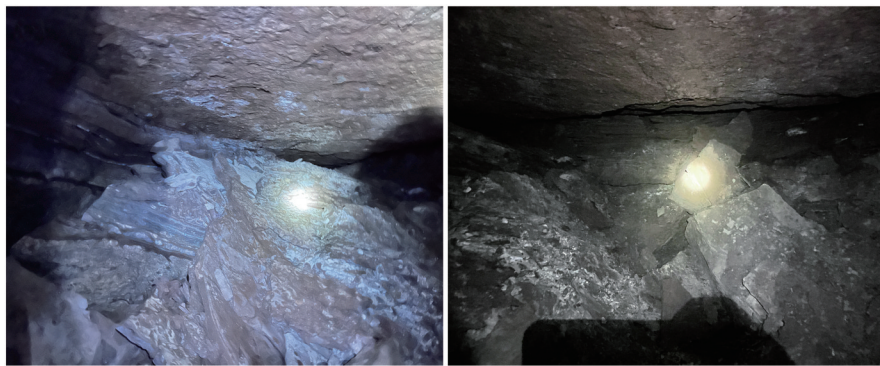


图10 溶区溶浸物接顶情况

Fig. 10 Roof connection of leached matter in dissolved area

据统计,X330-10溶区上口溶渣铲运后,形成总高约7.5 m的空间,下部为溶渣,上部为采空区,采空区最高高度1.2 m,采空区宽度6.2 m,沿倾向方向8.5 m后为接顶区域。X330-10溶区净宽98 m,净长97 m,溶区高度为10.98 m,溶区体积为104 375.9 m³,采空区体积为331.6 m³,占总体积的0.3%,除此采空区外,溶区上方其余区域均接顶,接顶处见顶板块状岩石。根据现场揭露计算可知X330-10溶区充实率较高。

根据矿山实际情况,选定上层矿1-9、1-8、2-8、2-7采场,下层矿X330-10、X330-11、X330-12、X330-13采场进行数值模拟分析。通过Global Mapper与ArcMap软件,获取采场地表地形,并通过Rhino建模软件,沿矿体倾向为x轴,走向为y轴,建立采场1:1还原的模型。总体模型尺寸为1 370 m×1 230 m×280 m,采场尺寸为100 m×80 m×10 m。最终模型划分为307 639网格,184 137节点。图11为数值模拟整体模型图,图12为数值模拟模型剖面图。

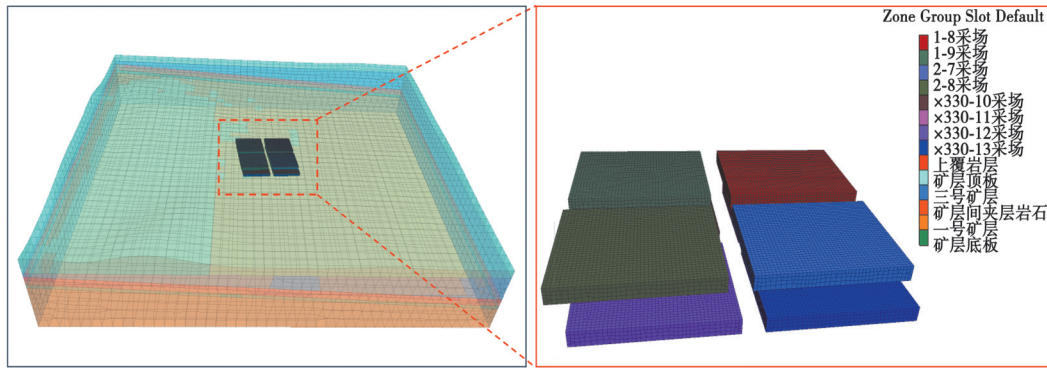


图 11 数值模拟整体模型图

Fig. 11 Overall model of numerical simulation

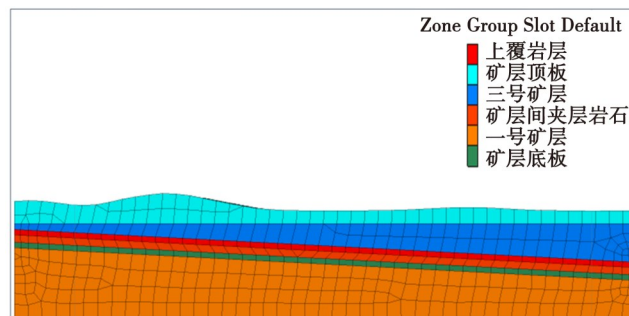


图 12 数值模拟模型剖面图

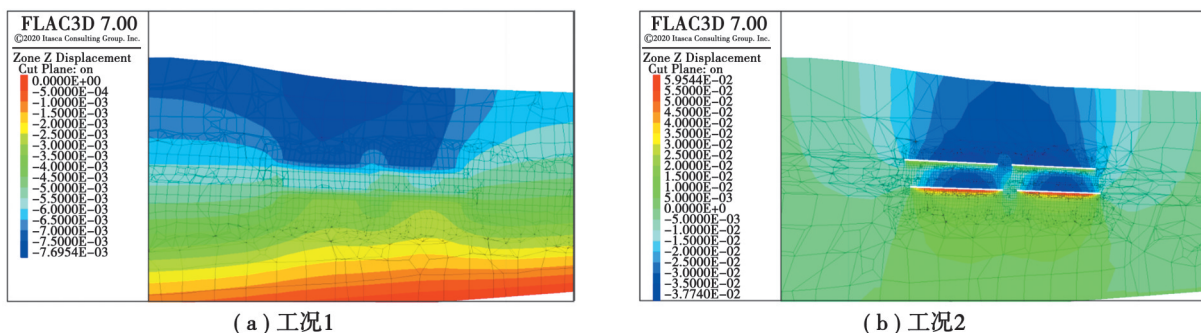
Fig. 12 Numerical simulation model section

2.3 数值模拟分析

由溶浸实验可知,爆破溶浸后残留溶浸物粒径在 50~70 mm 以上时体积缩减情况不明显,矿石粒径为 1 mm 时平均溶缩率最大,达到 22.5%。结合现场数据考虑实际现场爆破后矿石粒径一般在 50~70 mm 以上,充分溶浸情况下,最大溶缩率不超过 5%,且大部分溶浸物可接顶。因此,溶区的数值模拟考虑 2 种工况来评估溶区稳定性。工况 1 为溶浸物体积不缩减,溶区内溶浸物全部可接触顶板;工况 2 考虑最差极端情况,为溶区内溶浸物整体体积缩减 22.5%,溶浸物全部不接顶。进行初始应力平衡之后,通过赋值岩体参数模拟工况 1,通过开挖 22.5% 溶浸后残留物赋值岩体参数模拟工况 2^[20]。

2.3.1 位移场分析

由 z-z 方向上位移剖面图(见图 13)可知,在采场进行硐室水溶法溶浸开采之后 z-z 方向上的位移出现明显变化,并且集中在采场上方,向采场两边呈位移减小趋势。说明硐室水溶法溶浸开采会导致采场出现位移,从而影响到采场上方区域的位移,造成地表轻微沉降,且距离采场越远,位移值越小。由图 13(a)(b)对比



(a) 工况 1

(b) 工况 2

图 13 z-z 方向位移剖面图

Fig. 13 Displacement profile in z-z direction

可以看出,工况 1 最大位移出现在采场上方地表,为 7.7 mm,采场顶板最大下沉量为 7 mm;工况 2 最大位移出现在采场上方地表,为 34.5 mm,采场顶板最大下沉量为 37.7 mm,远远大于工况 1,而且体积减小部分产生的采空区下部出现了上升位移。说明如果硐室水溶法溶浸开采导致采场体积减小,会使采场的位移大大增大,并且出现采区底板隆起,底鼓位移为 59.54 mm。

在硐室溶浸开采之后, $z-z$ 方向上的位移出现明显变化,并且对采场上方的地表沉降影响最明显,且距离采场越远,影响越小。工况 2 的沉降位移影响范围与影响程度都远远大于工况 1。

2.3.2 应力场分析

由 $z-z$ 方向上应力俯视图(见图 14)可知,采场之间的矿柱出现应力集中,而采场的应力并未出现集中。说明硐室水溶法溶浸开采之后,采场矿体的力学性质变差,导致应力重新分布,聚集于采场之间的矿柱上。由图 14(a)(b)对比可知,工况 1 矿柱最大应力为 4.47 MPa,溶浸残留物对顶板有明显支撑作用,其应力较为平均,为 3.25 MPa;工况 2 矿柱最大应力为 13 MPa,溶浸残留物应力仅为 0.07 MPa。工况 2 矿柱的应力集中现象大大高于工况 1,硐室水溶法溶浸开采,其采场体积减小,出现采空区,从而导致应力重新分布,工况 2 矿柱所需要承受的应力更大。

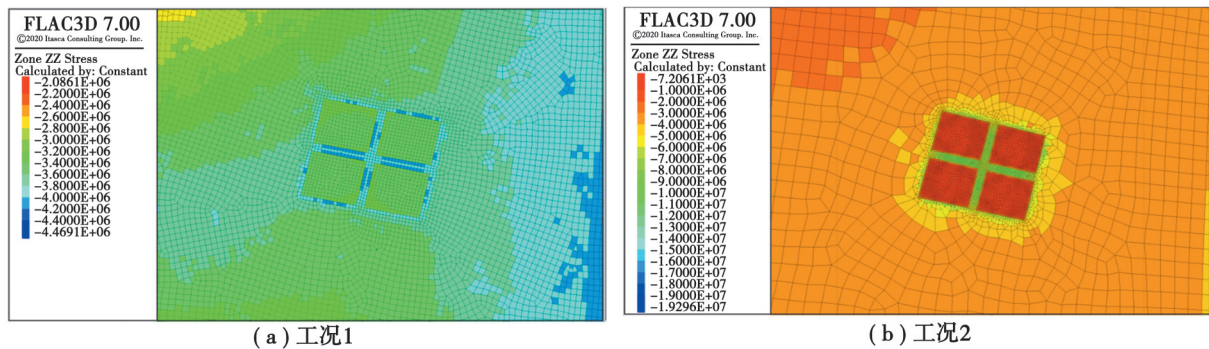


图 14 $z-z$ 方向应力俯视图
Fig. 14 Top view of $z-z$ direction stress

由顶板 $z-z$ 方向应力俯视图(见图 15)可知,采场上方并未出现应力集中,但是矿柱上方却出现了应力集中。工况 1 顶板应力为 3 MPa,矿柱上方顶板应力为 4 MPa;工况 2 顶板出现拉应力,为 0.17 MPa,矿柱上方顶板最大应力为 12 MPa。工况 2 顶板应力比工况 1 的更大,并且出现拉应力,这是因为工况 2 溶浸残留物体积缩减,采场出现了采空区,导致顶部发生了类似弹性回弹的膨胀形变,从而在溶区顶部形成了拉应力区域。

在硐室水溶法溶浸开采之后,由于采场溶浸采矿之后的溶浸残留物的物理力学性质发生改变,采场 $z-z$ 方向上的应力重新分布,矿柱出现应力集中。工况 2 矿柱的应力集中现象比工况 1 矿柱的应力集中现象更为明显,并且由于工况 2 中出现了采空区,导致工况 2 应力重新分布之后采场出现拉应力。

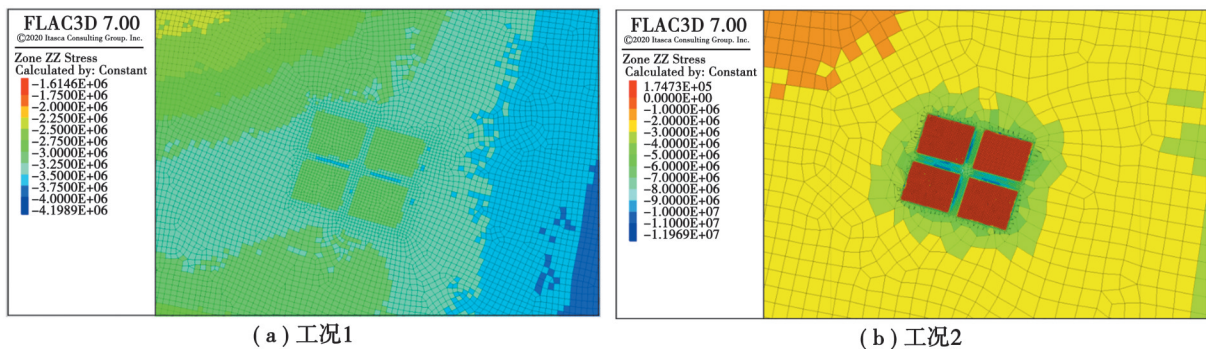


图 15 顶板 $z-z$ 方向应力俯视图
Fig. 15 Top view of $z-z$ direction stress of roof

2.3.3 塑性区分析

由塑性区分布俯视图(见图 16)可知,工况 1 由于采区体积未缩小并未出现塑性区;工况 2 出现塑性区,集中在整个采场,并且大部分为拉伸破坏,只有边缘处出现少部分剪切破坏,且采场与采场之间的矿柱出现少部分剪切破坏。说明在溶浸采矿之后,对于工况 1 并不会出现塑性破坏,岩石的性质较为稳定;工况 2 由于出现了采空区,且采场矿石经水溶法溶浸开采之后,岩石力学性质变差,尤其是抗拉强度急剧下降,大面积出现拉伸破坏,并且应力集中于矿柱,导致矿柱部分出现剪切破坏。

分析可知,在硐室水溶法溶浸开采之后,工况 1 并未出现塑性破坏,是因为工况 1 采场并未出现采空区,在溶浸残留物的物理力学性质发生改变之后,溶浸残留物虽然会受上覆围岩的挤压,但是由于矿柱的支撑和溶浸残留物分摊的上覆围岩应力,所以工况 1 采场情况较为稳定,未出现塑性破坏。而工况 2 由于溶浸残留物体积缩小,出现了采空区,且溶浸残留物的物理力学性质发生变化,其岩石力学强度大大减小,所以在应力重新分布之后,其采场出现大面积拉伸破坏,而矿柱也因为应力过于集中,出现部分剪切破坏^[23]。

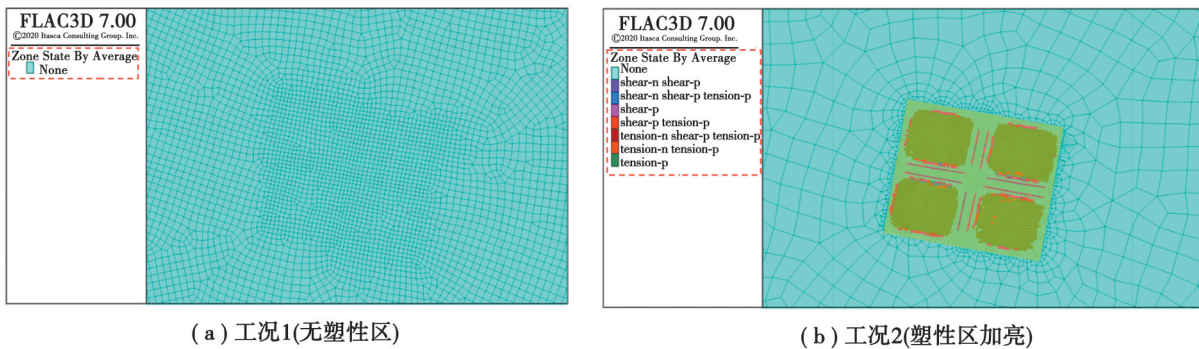


图 16 塑性区分布图

Fig. 16 Plastic zone distribution

2.3.4 地表沉降监测分析

模拟时在采场对应地表处设立 1 个监测点,用于监测地表沉降。由地表 Z-Z 方向沉降监测图(见图 17)可以看出,工况 1 的地表下沉值为 7.7 mm,工况 2 的地表下沉值为 34.5mm。工况 2 地表下沉量远远大于工况 1,说明硐室水溶法溶浸开采在未导致采区溶浸物体积缩小的情况下并不会使地表出现较大位移,但是如果硐室水溶法溶浸开采导致采区溶浸物体积缩小,溶浸物未接顶的情况下,就会使地表出现较大位移^[24]。

在硐室水溶法溶浸开采之后,工况 2 的地表沉降值大大高于工况 1 的地表沉降值,这是因为工况 2 溶浸残留物出现了体积变化,导致其采场承受应力能力下降,又因为采空区的存在,需要承受的应力更大,从而出现更大的位移,采场位移变化传递到地表,所以工况 2 的地表沉降值远远大于工况 1 的地表沉降值。

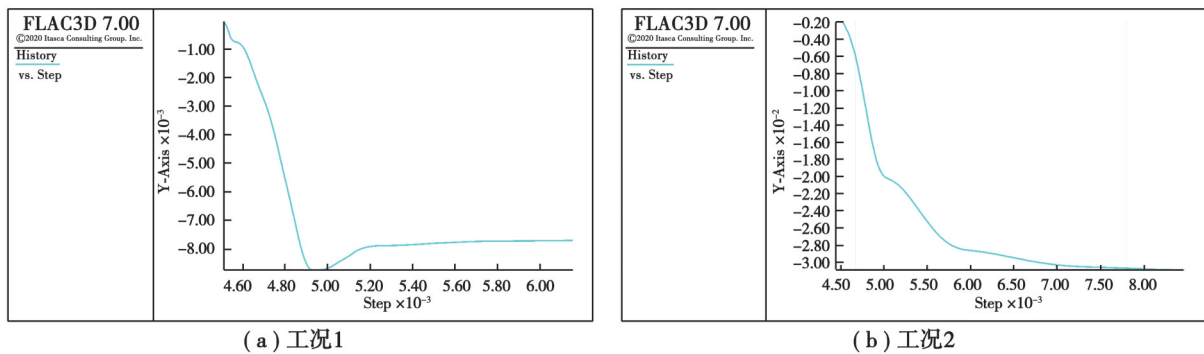


图 17 地表 z-z 方向沉降监测图

Fig. 17 Monitoring of surface subsidence in z-z direction

以上模拟结果表明,硐室水溶法采矿因为溶区内溶浸残留物会自然填充采空区,其本身是一个较为稳定的采矿方法,虽然这种采矿方法可能会使地表出现部分沉降,但是沉降值较小。通过工况1、2的对比可知(见图18),接顶情况下^[25],矿山溶区最危险区域稳定性状况较好,地下开采在地表产生的位移不足以对地表建筑产生破坏;未接顶情况下会大大增加采场的位移、应力变化,并出现塑性区破坏,且地下开采在地表产生的位移可能对地表建筑产生破坏。

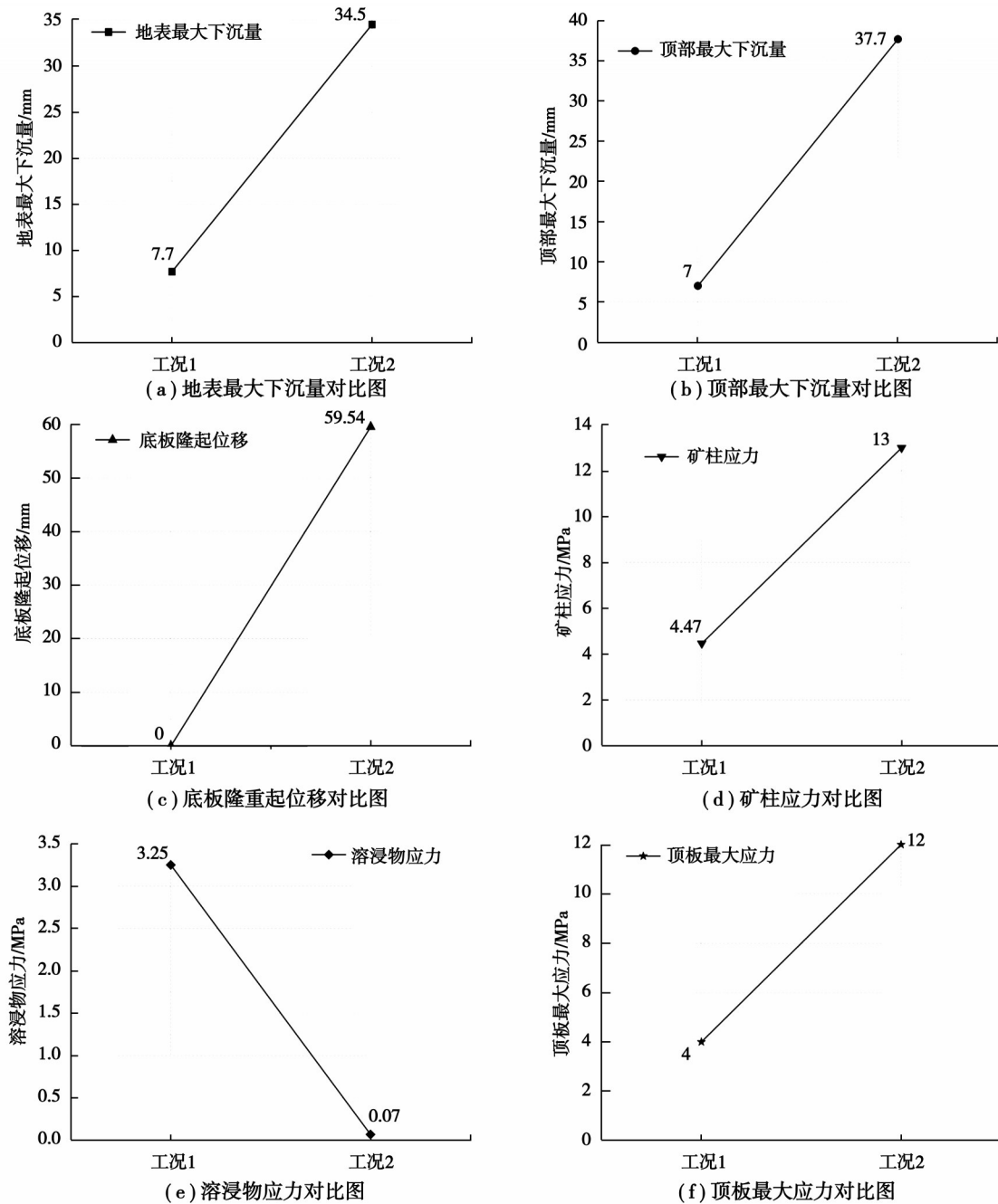


图18 工况1与工况2对比图

Fig. 18 Comparison of working conditions 1 and 2

3 结论

1)通过进行室内溶浸实验,模拟真实溶区内溶浸物的溶浸过程,得出了不同矿石粒径下的溶浸物溶缩率范围,并发现矿层中芒硝矿含量越高、矿石粒径越小,溶浸物溶缩率越大。

2)FLAC3D数值模拟分析结果显示,在溶浸物接顶的情况下,溶区整体稳定性较好,顶板应力与位移值较小,地表沉降值较小,溶区内溶浸物对顶板有明显支撑作用,其应力较为平均,溶浸物应力为3.25 MPa;溶浸物不接顶情况下,溶区内溶浸物体积缩小,对顶板无支撑作用,采场出现采空区,溶区稳定性较差,矿柱的应力集中现象较为明显,顶板位移值与地表沉降值都大于稳定性均值,地表存在塌陷风险。

3)室内溶浸实验与溶区稳定性数值模拟结果综合分析表明,溶区溶浸物是否接顶是影响溶区稳定性的关键因素,应增大溶区内爆破落矿后矿石的粒径来减小溶区内溶浸物的溶缩率,通过增大溶浸物接顶率来提升整个溶区的稳定性。

参考文献

- [1] 焦森,李晓亚,李代荣,等.中国化工矿产成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议:《中国矿产地质志·化工矿产卷》研编[J].地球学报,2025,46(1):69-87.
- Jiao S, Li X Y, Li D R, et al. Metallogenic regularity, centennial exploration results of chemical minerals in China, and suggestions for a new round of prospecting: research and compilation of "geology of mineral resources of China · chemical minerals volume"[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2025, 46(1): 69-87. (in Chinese)
- [2] 李代荣.中国芒硝矿特征与成因简介[J].矿产勘查,2020,11(3):511-516.
- Li D R. Introduction to characteristics and genesis of mirabilite deposits in China[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(3): 511-516. (in Chinese)
- [3] 刘玉红,周勇.四川名山县南庙沟钙芒硝矿地质特征及成因[J].四川地质学报,2015,35(3):372-376.
- Liu Y H, Zhou Y. Geological features and genesis of the Nanmiaogou glauberite deposit in Mingshan, Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2015, 35(3): 372-376. (in Chinese)
- [4] 朱旭,乔喜旦,郭强,等.四川彭山邓庙芒硝矿矿床地质特征及成矿模式[J].四川地质学报,2015,35(1):38-42.
- Zhu X, Qiao X D, Guo Q, et al. Geological features and genetic model for the Dengmiao mirabilite deposit in Pengshan, Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2015, 35(1): 38-42. (in Chinese)
- [5] 张秀峰,谭秀民,张利珍.钙芒硝矿的水浸工艺研究[J].矿产保护与利用,2017,37(4):69-72.
- Zhang X F, Tan X M, Zhang L Z. Research on water leaching process of glauberite ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017, 37(4): 69-72. (in Chinese)
- [6] 戎宽伟,徐素国.钙芒硝矿溶浸开采技术进展与展望[J].矿业研究与开发,2014,34(3):1-3,81.
- Rong K W, Xu S G. Progress and prospects for solution mining of glauberite[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(3): 1-3, 81. (in Chinese)
- [7] 刘民生,张丰述,钟东,等.四川钙芒硝矿地质环境保护与治理恢复建议[J].四川地质学报,2015,35(1):95-98.
- Liu M S, Zhang F S, Zhong D, et al. A suggestion on geological environmental protection and control in glauberite mines in Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 2015, 35(1): 95-98. (in Chinese)
- [8] 李力宏.水溶开采诱发盐矿地面沉降机理分析及防治措施[J].科技资讯,2024,22(2):178-181.
- Li L H. Mechanism analysis and prevention measures of the ground settlement of salt mines induced by water-solution mining [J]. Science & Technology Information, 2024, 22(2): 178-181. (in Chinese)
- [9] 梁卫国.盐类矿床水压致裂水溶开采的多场耦合理论及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(6):1090.
- Liang W G. Study on multi-field coupling theory and its application of hydraulic fracturing and solution mining for saltdeposits [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1090. (in Chinese)
- [10] 徐素国,梁卫国,郜保平,等.钙芒硝盐岩蠕变特性的研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3516-3520.
- Xu S G, Liang W G, Xi B P, et al. Study on creep property of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3516-3520. (in Chinese)
- [11] 杨晓琴,梁卫国,张传达,等.不同温度下钙芒硝矿溶解细观结构显微CT试验研究[J].煤炭学报,2012,37(12):2031-2037.
- Yang X Q, Liang W G, Zhang C D, et al. Experimental study on meso-structure of glauberite soaked in water under different temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2031-2037. (in Chinese)
- [12] Yu Y M, Liang W G, Liu J S. Influence of solution concentration and temperature on the dissolution process and the internal structure of glauberite[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25(11): 1246-1255.

- [13] 高红波, 徐素国, 韩传磊, 等. 钙芒硝盐岩溶解机理细观研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 722-725.
Gao H B, Xu S G, Han C L, et al. Study of meso-dissolution mechanism of glauberite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 722-725. (in Chinese)
- [14] Meng M H, Cui S H, Pei X J, et al. Effects of hydrostatic dissolution and seepage on the transport and mechanical properties of glauberite[J]. Sustainability, 2022, 14(24): 16739.
- [15] 张鹏, 卢青峰, 张文广, 等. 岩盐溶腔顶板稳定性分析及其控制[J]. 中国井矿盐, 2011, 42(2): 11-14.
Zhang P, Lu Q F, Zhang W G, et al. Stability analysis and control of rock salt cavern roof[J]. China Well and Rock Salt, 2011, 42(2): 11-14. (in Chinese)
- [16] Zhang C D, Liang W G, Li Z G, et al. Observations of acoustic emission of three salt rocks under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 19-26.
- [17] 杨玉良, 梁卫国, 杨晓琴, 等. 钙芒硝盐岩多场耦合作用下蠕变的温度效应研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1070-1080.
Yang Y L, Liang W G, Yang X Q, et al. Temperature effect on creep of glauberite salt rock under multi-field coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1070-1080. (in Chinese)
- [18] 郭旭炜, 杨晓琴, 柴双武. 分段Knothe函数优化及其动态求参[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2091-2097, 2109.
Guo X W, Yang X Q, Chai S W. Optimization of the segmented Knothe function and its dynamic parameter calculation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2091-2097, 2109. (in Chinese)
- [19] 张桂民, 刘保轩, 王康东, 等. 水溶开采盐矿大面积突然沉降模型与致灾机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(6): 1198-1209.
Zhang G M, Liu Y X, Wang K D, et al. Model and disaster-causing mechanism of large-scale sudden subsidence of salt mine under water-solution mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(6): 1198-1209. (in Chinese)
- [20] 范育青, 李学锋. 水溶开采沉陷三维有限元模拟研究[J]. 化工矿物与加工, 2008, 37(9): 22-24, 29.
Fan Y Q, Li X F. Study of 3D finite-element modeling on the law of solution mining subsidence[J]. Industrial Minerals & Processing, 2008, 37(9): 22-24, 29. (in Chinese)
- [21] 吴鹏, 冯盼学. 基于FLAC^{3D}的隐患空区识别研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(5): 25-30.
Wu P, Feng P X. Identification of mined-out area with hidden danger based on FLAC^{3D}[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2017, 69(5): 25-30. (in Chinese)
- [22] Liang W G, Yang X Q, Gao H B, et al. Experimental study of mechanical properties of gypsum soaked in brine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53: 142-150.
- [23] 梁卫国, 赵阳升, 李志萍, 等. 群井致裂控制水溶盐矿开采分析及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(5): 609-612.
Liang W G, Zhao Y S, Li Z P, et al. Analysis and numerical simulation of multi-well hydraulic fracturing and controlling solution mining for rock salt deposit[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2004, 23(5): 609-612. (in Chinese)
- [24] 杨长来, 孔君凤, 刘伟. 盐矿水溶开采地表塌陷发生机理及防治措施[J]. 土工基础, 2014, 28(3): 128-131.
Yang C L, Kong J F, Liu W. Ground subsidence mechanism and mitigation methods a salt solution mining[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(3): 128-131. (in Chinese)
- [25] 巩瑞杰, 叶会师, 张杰, 等. 充填接顶率对空场嗣后充填法开采围岩变形规律的影响[J]. 金属矿山, 2026(3): 55-62.
Gong R J, Ye H S, Zhang J, et al. Effect of backfill quality on deformation low of surrounding rock in open stoping with subsequent backfill mining[J]. Metal Mine, 2026(3): 55-62. (in Chinese)

(编辑 郑洁)