

基于能量匹配的采场结构参数数值模拟研究

宋贤良^{1,2,3}

(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室; 2. 紫金矿业集团股份有限公司;
3. 紫金(长沙)工程技术有限公司)

摘要:充填采矿法安全、经济、高效生产的关键在于选取合理的充填体配比和采场结构参数。以某阶段空场嗣后充填采矿法开采矿山为工程背景,基于国内外充填体配比和采场结构参数优化方面的研究,通过损伤理论及充填体和岩体能量匹配分析计算,得出灰砂比1:4,1:6,料浆浓度为68%、70%的4种充填体符合充填要求,考虑成本因素,灰砂比1:6,料浆浓度68%为该矿山充填体的最优配比。在此基础上,采用Flac^{3D}软件对所选采场结构参数进行数值模拟,分析最大主应力、最小主应力、位移和塑性区等因素,得出符合要求的采场结构参数为长44 m、宽16 m,长44 m、宽18 m,长50 m、宽16 m,长50 m、宽18 m 4种方案,选择产能最大的方案,即采场长度为50 m、宽度为18 m为该矿山最优采场结构参数。研究成果将为矿山后续生产提供有效参考,帮助矿山安全、高效、经济地回收矿石资源。同时研究方法和成果对类似矿山也有较大的指导意义。

关键词:损伤理论;能量匹配;充填体配比;Flac^{3D};采场结构参数;数值模拟

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0044-07

doi:10.11792/hj20251007

引 言

如今,国家要求矿业开发应安全环保、经济高效,矿业开发时应保护当地环境,保障工作人员的安全,同时还应以高效率创造良好的效益。目前,地下开采三大采矿方法中,充填采矿法因其具有有效控制围岩移动、保护地表环境、处理大量固体废物等优点,被广泛应用于矿山开采中^[1]。但近些年使用充填采矿法的一些矿山频繁出现充填体破坏、采场和采空区垮塌的情况,这对采矿工作人员安全造成了严重的危害,同时还降低了矿山的生产效率,给矿业开发带来了巨大的负面影响。

充填采矿法应用成功主要取决于选取合理的充填体配比及采场结构参数。陈俊宇等^[2]认为,充填料需按一定的配比精确制备,才能达到预期的效果。充填体配比过高,则使用胶结剂过多,充填成本会显著升高;充填体配比过低,充填体强度不足,容易造成充填体破坏垮塌,影响采区稳定性;而充填体配比决定了其强度。李庶林等^[3]研究了充填体的破坏及其机理,认为胶结充填体为多相复合材料,且损伤特性明显。MEIER等^[4]认为,基于连续介质力学,尾砂胶结充填体可作为连续且非均质的损伤介质进行研究。余寿文等^[5]认为,采用有效应力代替实际应力,可通

过无损材料的本构关系来表示受损材料的变形。谢和平等^[6-7]揭露了岩石变形和破坏过程中的能量耗散规律,给出了基于可释放应变能的整体破坏准则。刘志祥等^[8-9]研究了充填体在不同配比情况下的损伤耗能规律,探索了矿床开采过程中岩体能量释放规律,还探讨了岩体与充填体的合理匹配。杜坤等^[10]根据岩体开挖下降释放能量与充填体支撑所积蓄应变能相近的原则来衡量岩体与充填体的匹配。张永兴等^[11-14]认为,合理的采场结构参数可以避免采矿过程中出现应力、能量集中和变形而产生的破坏。在合理的采场结构参数下进行采矿工作可以有效降低采矿作业风险,具有重大的社会效益。

为有效解决某矿山阶段空场嗣后充填采矿法带来的安全、经济和效率等方面的问题,需要对充填体配比和采场结构参数进行深入研究。通过理论分析计算,选取合理的充填体配比,并在此基础上通过数值模拟选取合理的采场结构参数。研究成果可以指导矿山后续采用充填采矿法生产,确保充填体和采场稳定,实现最大产能,为该矿山带来较大的经济效益和社会效益。同时提出了一种完整的理论分析结合数值模拟优化采场结构参数的方法,对类似矿山也有借鉴价值,具有较好的指导意义。

收稿日期:2025-05-10; 修回日期:2025-07-01

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC2911000)

作者简介:宋贤良(1991—),男,工程师,硕士,从事采矿工程、矿山岩石力学方面的工作;E-mail:421780891@qq.com

1 工程背景

该矿山矿体形态为块状,工业储量为 2 165 万 t,平均倾角 49°,平均厚度 65 m,倾角和厚度变化较小,埋深 300 ~ 550 m。矿体稳定性较好,矿体中裂隙较不发育,局部存在小破碎带,顶底板围岩稳固,矿体和围岩分界较为明显。矿床存在若干小断层,工程地质较好,涌水量较小,水文地质属简单类型。该矿山采用阶段空场嗣后充填采矿法开采,矿房垂直矿体走向布置,一步骤开采矿房,回采结束后进行胶结充填,二步骤开采矿房(矿柱)。矿块高 60 m,中段生产自下而上开采。目前该矿山已开采完部分一步骤矿房,暂时未开采二步骤矿房,一步骤开采留下的采空区大部分已进行尾砂胶结充填。针对矿山实际情况,为降低充填成本,同时确保充填体和采场稳定性,为矿山安全高效开采提供技术保障,采用理论分析和数值模拟相结合的方式为矿山优选出合理的充填体配比和采场结构参数。

2 充填体和岩体能量匹配

尾砂胶结充填体为多相复合材料,可看成连续且非均质的损伤介质,因此可采用损伤力学对尾砂胶结充填体破坏进行研究。

研究采用 1:4, 1:6 和 1:8 3 种灰砂比,每种灰砂比分别采用了 68 %、70 % 2 种料浆浓度共 6 种常用的尾砂胶结充填体进行力学试验,充填体力学参数见表 1。

表 1 充填体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of backfills						
组数	灰砂比	料浆浓度/%	抗压强度/MPa	峰值应变	泊松比	弹性模量/MPa
1	1:4	68	2.26	0.008 214	0.26	342
2	1:4	70	2.65	0.007 963	0.30	418
3	1:6	68	1.53	0.009 011	0.25	208
4	1:6	70	1.68	0.008 893	0.24	233
5	1:8	68	1.23	0.009 280	0.22	161
6	1:8	70	1.33	0.009 153	0.29	177

2.1 损伤理论

根据 Lemiatre 应变等价原理,在一维情况下,有效应力($\tilde{\sigma}$)为:

$$\tilde{\sigma} = \sigma / (1 - D) \tag{1}$$

式中: σ 为应力(MPa); D 为损伤值。

$D=0$ 时,认为材料处于无损状态; $D=1$ 时,认为材料处于完全损伤状态。视材料各向同性,在一维情况下,可得:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \tag{2}$$

式中: E 为弹性模量(MPa); ε 为应变。

式(1)中,如果采用有效弹性模量 $\tilde{E}$ 表示材料的损伤,则有效弹性模量 $\tilde{E}$ 与无损材料弹性模量 E 的关系为:

$$\tilde{E} = E(1 - D) \tag{3}$$

在峰值应力以前,充填体内慢慢萌生裂纹并扩展,假定此时损伤值 D 为:

$$D = A\varepsilon^\beta \tag{4}$$

式中: A 和 β 为常数。

根据式(2)和式(4),充填体在应力峰值前的损伤本构方程为:

$$\sigma = E\varepsilon - EA\varepsilon^{\beta+1} \tag{5}$$

根据充填体应力-应变试验曲线,由边界条件得:

$$\sigma \Big|_{\varepsilon = \varepsilon_p} = \sigma_p \tag{6}$$

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \Big|_{\varepsilon = \varepsilon_p} = 0 \tag{7}$$

根据式(6)和式(7),可以得出关于 A 和 β 的 2 个方程组:

$$\sigma = E\sigma_p - EA\varepsilon_p^{\beta+1} \tag{8}$$

$$0 = E - EA(\beta + 1)\varepsilon_p^\beta \tag{9}$$

根据上述两式可得:

$$\beta = \sigma_p / (E\varepsilon_p - \sigma_p) A = 1 / (\varepsilon_p^\beta + \beta\varepsilon_p^\beta)^{[15-18]} \tag{10}$$

将不同灰砂比和料浆浓度的充填体单轴压缩试验下的峰值应力、峰值应变和弹性模量代入 A 和 β 的表达式中,即可得到充填体损伤参数,具体结果见表 2。

表 2 不同灰砂比充填体损伤参数计算结果

Table 2 Calculated damage parameters of backfills with different cement-sand ratios				
灰砂比	料浆浓度/%	损伤参数		
		β	A	σ_p
1:4	68	4.115	7.460×10 ⁷	0.195 493
1:4	70	3.906	3.219×10 ⁷	0.203 858
1:6	68	4.444	2.255×10 ⁸	0.183 721
1:6	70	4.285	1.162×10 ⁸	0.189 181
1:8	68	4.658	5.182×10 ⁸	0.176 740
1:8	70	4.585	3.974×10 ⁸	0.179 059

2.2 充填体和岩体能量匹配分析

由于岩体的弹性模量比充填体大,岩体采用弹性模型($\sigma = E_0\varepsilon$, E_0 为岩体的弹性模量)。对最危险的情形,即一维时的情形^[19]进行研究。

设岩体开挖前受到的最大压应力为 σ_0 ,开挖后若不进行充填,单位岩体释放的能量 U_r 可以表示为:

$$U_r = \int_{\varepsilon_0}^0 \sigma d\varepsilon_x = \int_{\varepsilon_0}^0 E_0 \varepsilon d\varepsilon_x = -\frac{1}{2} E_0 \varepsilon_0^2 = -\frac{\sigma_0^2}{2E_0} \tag{11}$$

设单元体应力由0逐渐增加到 σ_x ,产生的变形为 ε_x ,单元体的弹性变形比能(单位体积的变形能)可用式(12)计算:

$$U = \int_0^{\varepsilon_x} \sigma_x d\varepsilon_x \tag{12}$$

将式(12)与式(5)结合可得充填体在达到峰值应力时受压变形吸收的能量 U_p (即变形比能)为:

$$U_p = \int_0^{\varepsilon_p} (E\varepsilon - EA\varepsilon^{\beta+1}) d\varepsilon_x = \frac{E\varepsilon_p^2}{2} - \frac{EA}{\beta+2} \varepsilon_p^{\beta+2} \tag{13}$$

岩体下沉释放能量接近于充填体受压峰值变形能,设充填体受压变形比能 U_p 与岩体释放比能 U_r 之

比为匹配系数 K ,根据式(11)和式(13)可得:

$$K = \frac{U_p}{U_r} = \frac{EE_0(\beta+2)\varepsilon_p^2 - 2EE_0A\varepsilon_p^{\beta+2}}{(\beta+2)\sigma_0^2} \tag{14}$$

式(14)表明:当 $K>1$ 时,充填体不会发生能量失稳;当 $K<1$ 时,充填体会产生能量失稳,与岩体不匹配^[19-21]。

根据该矿山资料,矿石弹性模量为9.26 GPa,得到开采前顶板的最大原岩应力为10.71 MPa。根据表1和表2中不同灰砂比充填体损伤参数及式(11)和式(14),可得充填体与岩体的匹配系数,结果见表3。

表3 不同灰砂比、料浆浓度充填体与岩体比能分析

Table 3 Specific energy analysis of rock mass and backfills with different cement-sand ratios and slurry concentrations

岩体		岩体释放比能	充填体灰砂比	料浆浓度/%	充填体比能	匹配系数 K	是否匹配
E_0/GPa	σ/MPa						
9.26	10.709 8	0.006 193	1:4	68	0.011	1.74	是
			1:4	70	0.012	2.00	是
			1:6	68	0.008	1.29	是
			1:6	70	0.009	1.40	是
			1:8	68	0.005	0.79	否
			1:8	70	0.006	0.92	否

由表3可知:该矿山灰砂比为1:4和1:6的充填体均能保证采场稳定性。为节省成本,采用最小充填灰砂比1:6,料浆浓度68%的充填体对采空区进行充填,即灰砂比为1:6,料浆浓度为68%为最优灰砂比和料浆浓度。

3 数值模拟

3.1 岩体物理力学参数选取

矿岩、充填体力学参数源于《某矿地下采矿工程

初步设计》及《某矿大水下安全采矿技术研究阶段总结报告》,具体见表4。

3.2 数值模拟方案选取

根据-230 m中段的实际情况,取一个盘区作为研究对象。一步骤回采和二步骤回采矿房尺寸相同,矿房高60 m。矿体长度分别取44 m、50 m和56 m,矿房宽度分别取16 m、18 m、20 m和22 m。选取的12种开采方案见表5。

表4 矿岩和充填体力学参数

Table 4 Mechanical parameters of ore rock and backfills

序号	岩性	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/($^\circ$)	弹性模量/GPa	泊松比
1	第四系	2.20			1.80		3.20	0.32
2	角砾岩	2.51	62.50	2.32	11.53	33	5.80	0.28
3	砂卡岩	3.20	58.91	2.30	7.71	38	8.98	0.36
4	闪长岩	2.80	91.00	6.53	10.00	54	10.10	0.27
5	矿石	3.96	227.00	3.50	4.00	65	9.26	0.23
6	充填体	1.80	1.53	0.22	0.38	30	0.21	0.25

表5 采场结构参数方案

Table 5 Schemes of stope structural parameters

结构参数	方案名称											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
采场长度/m	44	44	44	44	50	50	50	50	56	56	56	56
采场宽度/m	16	18	20	22	16	18	20	22	16	18	20	22

3.3 数值模拟结果及分析

限于篇幅,仅展示方案50 m×18 m(即矿房长度50 m、矿房宽度18 m)的模拟结果,分析不同开采时期的应力分布规律、位移变化规律及塑性区分布,最后再分析所有方案的计算结果。

3.3.1 采场最小主应力分析

方案 50 m×18 m 从回采矿房和回采矿柱结束后，沿采场长轴中央的计算结果最小主应力云图见图 1、图 2。

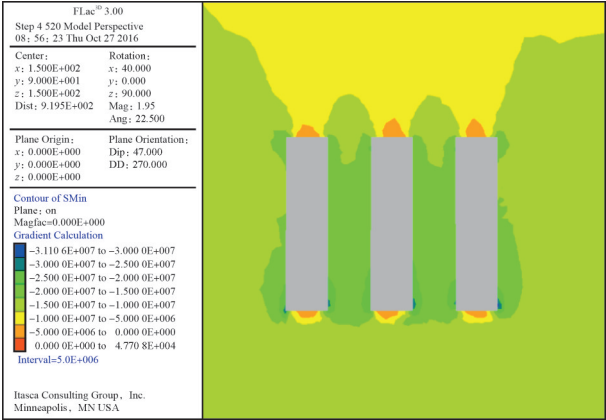


图 1 回采矿房最小主应力云图

Fig. 1 Contour diagram of minimum principal stress in the stopping ore chamber

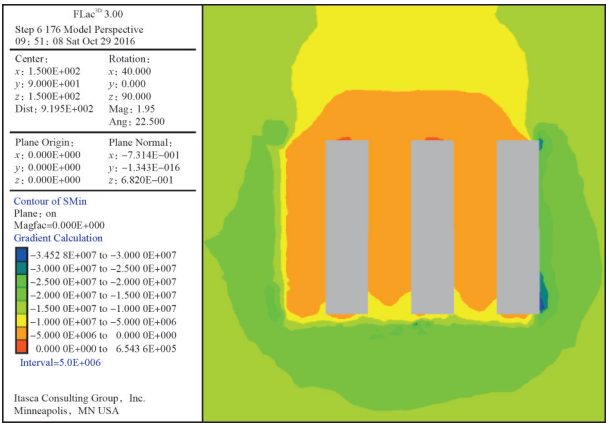


图 2 回采矿柱最小主应力云图

Fig. 2 Contour diagram of minimum principal stress in the stopping ore pillar

由图 1 可知：采场内的矿石采出后，矿房两侧的矿柱及围岩出现了压应力集中现象，采场边角的压应力较大，但范围较小，所以对采空区的整体稳定性影响较小，矿房两侧的围岩同样也出现了应力集中现象。3 个矿房回采后，在周边矿柱上形成的最大压应力（最小主应力）约为 31.06 MPa，远不及矿体的抗压强度。但在开采时应注意采空区底边角的围岩破碎情况。

由图 2 可知：回采矿柱后，压应力集中现象主要分布在 6 号矿房顶底角与围岩接触处和 4 号充填采场的底板少许区域处，且最大压应力稍大于第一步开采出现的最大压应力。但由于充填体的支撑效果不如矿柱，故回采矿柱后，最大压应力增加至 34.53 MPa，但仍小于矿体的抗压强度。

3.3.2 采场最大主应力分析

方案 50 m×18 m 从回采矿房和矿柱结束后，沿采

场长轴中央的计算结果最大主应力云图见图 3、图 4。

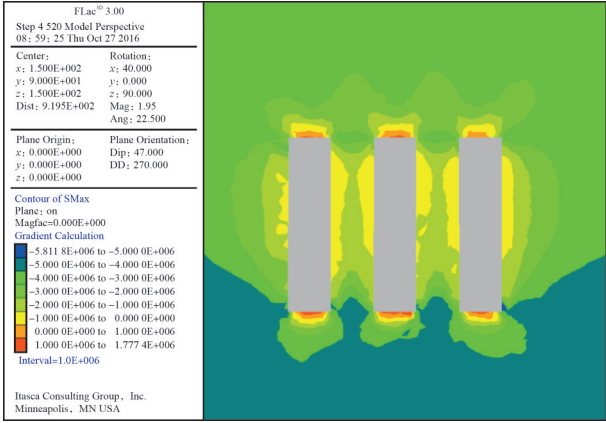


图 3 一步骤回采最大主应力云图

Fig. 3 Contour diagram of maximum principal stress in one-step stopping

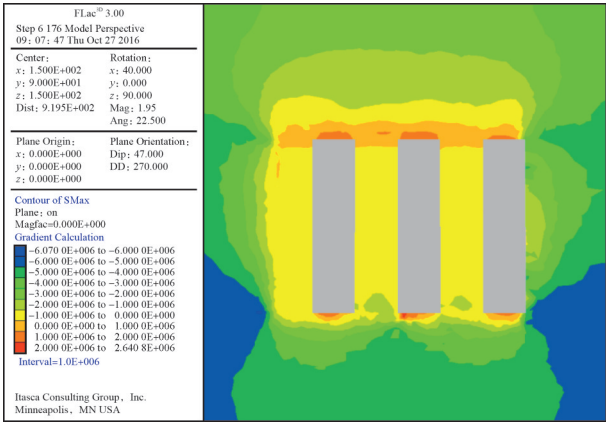


图 4 二步骤回采最大主应力云图

Fig. 4 Contour diagram of maximum principal stress in two-step stopping

由图 3 可知：随着回采的进行，采空区的顶、底板出现了较大的拉应力区，但拉应力仅为 1.78 MPa，未超过岩体的抗拉强度，不会影响矿柱的稳定性。

由图 4 可知：矿柱回采时，拉应力主要分布于采空区和矿房的顶底板，拉应力达到 2.64 MPa，主要是矿柱回采后顶板应力得到了释放。

3.3.3 位移分析

方案 50 m×18 m 从回采矿房和回采矿柱结束后，沿采场长轴中央的计算结果垂直位移云图见图 5、图 6。

由图 5、图 6 可知：矿房回采后，顶板下沉 27.22 mm。矿柱回采后，顶板下沉 84.95 mm，底板变形 27.22 mm，最大变形发生在胶结充填体与采空区交接处，随后向周边区域扩展，变形量随之变小。

3.3.4 塑性区分析

结合拉伸、剪切两类破坏形式，可能出现 5 种破坏情况^[22]，分别为：None、Shear-n、Shear-p、Tension-n 和 Tension-p，其中，None 表示未破坏，Shear-n 表示当

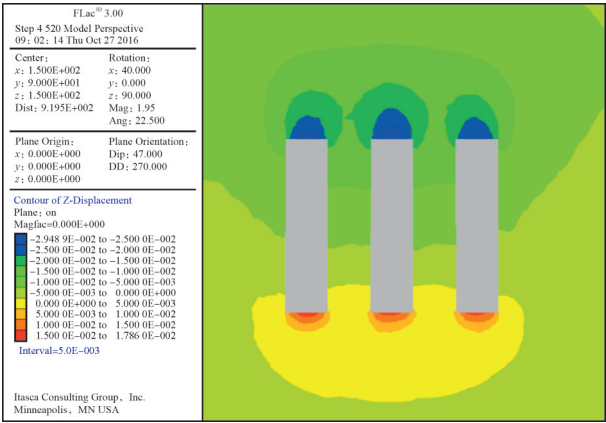


图5 一步骤回采z方向位移云图

Fig. 5 Contour diagram of z-direction displacement in one-step stoping

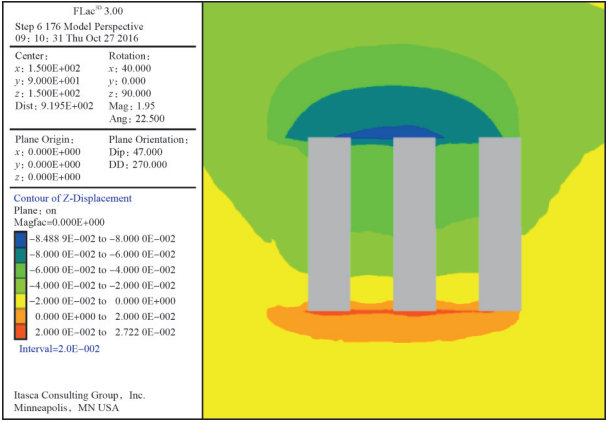


图6 二步骤回采z方向位移云图

Fig. 6 Contour diagram of z-direction displacement in two-step stoping

前计算步生成的压剪屈服区, Shear-p表示历史计算步生成的压剪屈服区, Tension-n表示当前计算步生成的拉破坏屈服区, Tension-p表示历史计算步生成的拉破坏屈服区。方案50 m×18 m从回采矿房和矿柱结束后的塑性区云图见图7、图8。

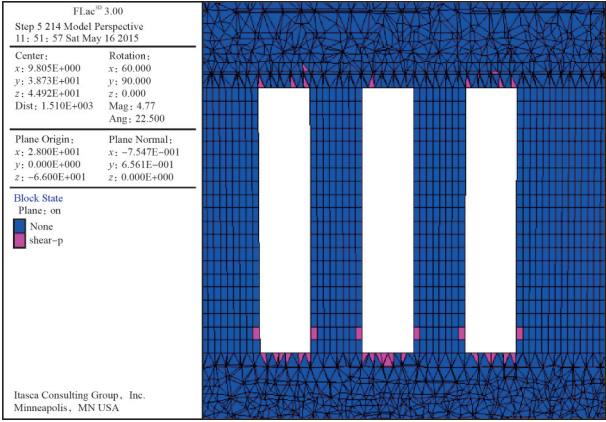


图7 一步骤回采后塑性区云图

Fig. 7 Contour diagram of plastic zone after one-step stoping

由图7和图8可知:矿房回采结束后,采空区的顶

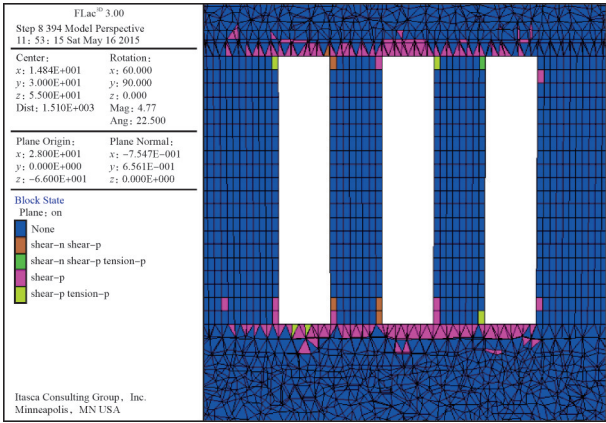


图8 二步骤回采后塑性区云图

Fig. 8 Contour diagram of plastic zone after two-step stoping

底板和采空区与矿柱接触处出现了塑性区,主要是应力集中造成较大的剪切应力引起的,底板塑性区较顶板大。随着矿柱回采的进行,塑性区分布范围进一步增大。胶结充填体也出现了塑性区,以剪切破坏为主,局部出现拉伸破坏。采空区顶底板受应力集中产生较大剪切应力的影响,进入塑性状态。

4 采场结构参数优选

一步骤回采计算结果见表6。由表6可知:一步骤回采后,12种方案采场最大压应力和拉应力均未超过岩体抗压、抗拉强度;顶板最大沉降量为23.22~36.58 mm,沉降较小。顶底板岩体的抗拉强度为3.25 MPa。一步骤回采后,方案11、方案12的矽卡岩最大拉应力均超过该岩体的抗拉强度,在崩落和出矿过程中容易造成矿体混入废石,导致矿石贫化率增大,增加矿石采出成本,并且对布置在下盘围岩巷道的稳定性产生隐患,影响采场作业安全。

12种模拟方案二步骤回采计算结果见表7。由表7可知:对于该采矿方法,随着二步骤回采结束,胶结充填体矿柱内产生了拉应力,且随着采场长度和采场宽度的增加而随之增大。方案7、方案8、方案11、方案12的充填体内拉应力最大值超过了充填体(灰砂比为1:6,料浆浓度为68%)抗拉强度(0.22 MPa),可以淘汰。

在初步优选的方案1、方案2、方案3、方案4、方案5、方案6、方案9、方案10中,方案9、方案10回采矿柱结束后顶底板的最大拉应力均超过该岩体的极限抗拉强度(3.25 MPa),容易造成贫化、片帮,故可排除这2种模拟方案。

从塑性区分布情况来看,方案3、方案4、方案7、方案8二步骤回采后产生的剪切破坏区面积较大,塑性区体积分别达到51 724 m³、47 829 m³、33 375 m³、

表 6 一步骤回采计算结果
Table 6 Calculation results of one-step stoping

方案	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	最大沉降量/mm	当前破坏体积×10 ³ m ³	围岩最大拉应力/MPa
1	27.99	1.30	23.22	0.043	1.69
2	29.62	1.33	24.36	0.028	1.65
3	32.33	1.79	26.87	0.058	2.76
4	33.45	2.22	28.82	2.647	2.77
5	30.08	1.60	25.28	0.036	1.58
6	31.06	1.78	27.22	0	1.72
7	33.23	2.05	31.76	0.006	1.74
8	35.68	2.49	35.04	0.019	2.82
9	34.27	2.74	26.01	1.847	2.57
10	36.73	2.81	27.97	0.028	2.60
11	39.55	3.29	31.90	3.029	3.58
12	41.16	3.53	36.58	0.837	3.28

表 7 二步骤回采计算结果
Table 7 Calculation results of two-step stoping

方案	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa	最大沉降量/mm	破坏体积×10 ³ m ³	充填体最大拉应力/MPa	矽卡岩最大拉应力/MPa
1	28.25	2.53	27.17	2.139	0.06	5.55
2	29.75	2.54	28.67	2.074	0.09	2.00
3	30.97	2.57	29.60	51.73	0.15	1.29
4	31.52	2.60	31.44	47.83	0.15	2.79
5	32.34	2.53	35.94	1.421	0.10	2.34
6	34.49	2.64	84.95	2.396	0.13	2.64
7	35.84	2.72	88.41	33.38	0.22	3.62
8	37.77	2.87	95.47	20.84	0.24	4.04
9	36.31	2.96	88.49	7.93	0.13	4.38
10	38.33	3.14	93.43	61.75	0.18	4.29
11	41.65	3.59	102.93	77.74	0.27	3.40
12	44.57	3.99	113.58	109.28	0.34	4.98

20 836 m³,且分布、影响范围广,有明显的塑性区贯通,对采场作业、采空区稳定性非常不利,并且胶结充填体矿柱也产生较大面积的塑性区,容易导致充填体在回采矿柱期间垮落。因此,综合采场稳定性等因素分析,可行采场结构参数方案为方案1、方案2、方案5、方案6,选择产能最大的方案,即方案6为最佳方案,采场长度为50 m、宽度为18 m。

5 结 论

通过损伤理论和充填体岩体能量匹配分析计算出适合该矿山的充填体配比,再利用Flac^{3D}软件数值模拟选取的采场结构参数,分析比较其模拟结果,主要得出以下结论:

1)通过损伤理论及充填体和岩体能量匹配分析

计算灰砂比为1:4、1:6和1:8,料浆浓度为68%、70%的6种常用的胶结充填体,得出灰砂比1:4,1:6,料浆浓度68%、70%的4种充填体能保证该矿山一步骤、二步骤回采时采场稳定,选择成本最低的方案,即灰砂比1:6,料浆浓度68%为充填体的最优方案。

2)各方案应力分布的规律基本一致,最大压应力分布于采空区边角处,最大拉应力分布于采场顶底板处;当矿房长度不变时,最大、最小拉应力随着矿房宽度增大而增大,且应力集中区面积相应增加;当宽度一定时,采场长度越大,最大拉压应力也越大。回采矿柱时,胶结充填体矿柱内也存在着一定的拉应力区。一步骤回采后顶板的最大沉降量为23.22~36.58 mm,该沉降量岩体仍可保持稳定性;二步骤回采后,顶板最大沉降量为27.17~113.58 mm,岩体存在潜在稳定

性问题,在实际生产中应注意适时进行支护。

3)通过分析比较各方案的模拟结果,得出该矿山的最优采场结构参数为阶段高度 60 m、采场长度 50 m、宽度 18 m。

4)提出了一种先通过充填体岩体能量匹配分析计算出适合矿山的充填体配比,以此为基础再利用 Flac^{3D} 软件数值模拟分析得出最优采场结构参数的研究思路,对类似矿山具有很强的借鉴意义和参考价值。

[参 考 文 献]

- [1] 孙铭骏,杨纪光,杨帆,等.三山岛金矿尾砂高浓度充填强度特性试验研究[J].黄金,2024,45(12):56-57.
- [2] 陈俊宇,吴建俊,周兴晖,等.铅锌矿尾砂及花岗岩岩粉作为充填骨料的适应性试验研究[J].黄金,2025,46(2):94-95.
- [3] 李庶林,桑玉发.尾砂胶结充填体的破坏机理及其损伤本构方程[J].黄金,1997,18(11):24-29.
- [4] MEIER R W, GERSTEL K H, KO H Y. Effects of multiaxial compressive loading on the residual tensile strength of plain concrete [R]. Albuquerque: University of New Mexico, 1981.
- [5] 余寿文,冯西桥.损伤力学[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [6] 谢和平,鞠杨,黎立云,等.岩体变形破坏过程的能量机制[J].岩石力学与工程学报,2008,27(9):1 710-1 729.
- [7] 谢和平,彭瑞东,鞠杨,等.岩石破坏的能量分析初探[J].岩石力学与工程学报,2005,24(15):2 603-2 608.
- [8] 刘志祥,李夕兵,赵国彦,等.充填体与岩体三维能量耗损规律及合理匹配[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):1 442-1 443.
- [9] 刘志祥,李夕兵,戴塔根,等.尾砂胶结充填体损伤模型及与岩体的匹配分析[J].岩土力学,2006,27(9):344-348.
- [10] 杜坤,李地元,金解放.充填体与岩体能量和强度匹配的分析及应用[J].中国安全科学学报,2011,21(12):82-87.
- [11] 张永兴.岩石力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [12] 郑永学.矿山岩体力学[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [13] 钱鸣高.采场矿山压力与控制[M].北京:煤炭工业出版社,1983.
- [14] 钱鸣高.20年来采场围岩控制理论与实践的回顾[J].中国矿业大学学报,2000,29(1):1-4.
- [15] ZHANG F W, LIU W X, SHEN L F, et al. Damage constitutive model for cemented paste backfill after mixing waste rock [C] // IEEE. Proceedim of world automation congress, 2012. Puerto Vallarta: IEEE, 2012: 1-4.
- [16] 刘志祥,刘青灵,党文刚.尾砂胶结充填体损伤软-硬化本构模型[J].山东科技大学学报(自然科学版),2012,31(2):36-41.
- [17] 张发文.矿渣胶凝材料胶结矿山尾砂充填性能及机理研究[D].武汉:武汉大学,2009.
- [18] 刘志祥.深部开采高阶段尾砂充填体力学与非线性优化设计[D].长沙:中南大学,2005.
- [19] 周士霖.深部开采充填体稳定性及与岩体智能匹配研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [20] LIU Z X, LAN, XIAO S Y, et al. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 3: 954-959.
- [21] 刘玉龙,丁德馨,李广悦,等.胶结充填体固化与开挖矿体垂直应力匹配特征[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):526-530.
- [22] 余海华,宋卫东,唐亚男,等.阶段空场嗣后充填法采场结构参数及充填配比优化[J].矿业研究与开发,2012,32(6):10-14.

Numerical simulation study on stope structure parameters based on energy matching

Song Xianliang^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores;
2. Zijin Mining Group Co., Ltd.; 3. Zijin (Changsha) Engineering Technology Co., Ltd.)

Abstract: The key to safe, economical, and efficient production by the cut and fill stoping lies in selecting appropriate backfill proportions mass ratios and stope structure parameters. With a mine using the delayed filling method during open stoping as the engineering background, Chinese and international research on backfill proportions and stope structure parameter optimization was investigated, and 4 types of fill mass with cement-sand ratios of 1:4 and 1:6 and slurry concentrations of 68 % and 70 % were determined to meet the filling requirements through damage theory and energy matching analysis between the backfill and rock mass. In view of costs, a cement-sand ratio of 1:6 and a slurry concentration of 68 % were identified as the optimal ratio. On this basis, Flac^{3D} software was used to numerically simulate the selected stope structure parameters. Factors such as maximum principal stress, minimum principal stress, displacement, and plastic zone were analyzed. Four suitable stope structure parameter schemes were obtained: 44 m (length) and 16 m (width); 44 m (length) and 18 m (width); 50 m (length) and 16 m (width); 50 m (length) and 18 m (width). The scheme with the highest production capacity, i.e., a stope length of 50 m and a width of 18 m, was selected as the optimal stope structure parameter for the mine. The research results will provide an effective reference for subsequent mine production, helping the mine safely, efficiently, and economically recover ore resources. Meanwhile, the research methodology and findings hold significant guiding value for similar mines.

Keywords: damage theory; energy matching; backfill proportions; Flac^{3D}; stope structure parameter; numerical simulation