保安矿柱新圈定可采范围内采场充填体合理强度研究*

王维[1],王亚军[2,3],王玉丁[2,3],李双斌[1],孟俊波[2,3],李向东[2,3],林卫星[2,3],龚永超[2,3]

(1.西藏华泰龙矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850200;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:针对某金矿保安矿柱新圈定可采区域的充填体强度优化问题,系统开展了充填体强度参数的确定与验证工作。鉴于传统单一方法存在的局限性,创新性地采用经验公式计算、弹塑性力学理论解析和FLAC3D数值模拟等多种分析方法,重点探讨不同强度充填体对采场稳定性和岩层移动的调控机制,最终构建兼顾安全性与经济性的最优充填方案。结果表明:通过经验公式和理论计算可知,合理的充填体强度最大值在0.72~1.99 MPa范围内;充填体强度的提升能有效控制井筒的水平变形量及采场周边岩层的位移;上部上向进路充填采矿法采场和深部浅孔留矿嗣后充填采矿法采场的充填体强度均设置为2.0 MPa时,既可以有效控制矿区岩层移动,确保采场稳定,又能兼顾经济成本,实现安全与经济的平衡。

关键词:充填体强度;采场稳定性;岩层移动控制;保安矿柱;数值模拟

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0086-10

Study on Reasonable Strength of Stope Filling Body in Newly Delineated Recoverable Range of Security Pillar

WANG Wei[1], *WANG Yajun*[2,3], *WANG Yuding*[2,3], *LI Shuangbin*[1],
MENG Junbo[2,3], *LI Xiangdong*[2,3], *LIN Weixing*[2,3], *GONG Yongchao*[2,3]

(1.Xizang Huatailong Mining Development Co., Ltd., Lhasa, Xizang 850200, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Aiming at the strength optimization problem of filling body in the newly delineated recoverable area of the security pillar of a gold mine, the determination and verification of the strength parameters of the filling body were systematically carried out. In view of the limitations of the traditional single method, a variety of analytical methods such as empirical formula calculation, elastic-plastic mechanics theory analysis and FLAC3D numerical simulation were innovatively used to focus on the regulation mechanism of different strength filling bodies on stope stability and rock strata movement. Finally, the optimal filling scheme considering both safety and economy was constructed. The results show that the reasonable maximum strength of filling body is in the range of 0.72-1.99 MPa through empirical formula and theoretical calculation. The improvement of the strength of the filling body can effectively control the horizontal deformation of the wellbore and the displacement of the rock strata around the stope. When the filling body strength of the upper upward drift filling mining method and the deep shallow-hole shrinkage subsequent filling mining method is set as 2.0 MPa, it can not only effectively control the rock strata movement in the mining area and ensure the stability of the stope, but also take into account the economic cost and achieve the balance between safety and economy.

Key words: Filling body strength, Stope stability, Rock strata movement control, Security pillar, Numerical simulation

0 引言

随着工业化时代的迅猛进步以及环保理念“绿水青山就是金山银山”的广泛倡导,矿山行业为响应政策号召,正致力于在保障安全的前提下优化保安矿柱圈定范围,充分回采矿石资源[1-2]。在回采保安矿柱释放矿量的过程中,普遍采用充填采矿法[3]。该方法尤其适用于以下3种典型条件:一是需要严

* **收稿日期**:2025-02-07
基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)
作者简介:王维(1985—),男,山西介休人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山生产技术研究与管理工作。E-mail:303243709@qq.com
通信作者:王亚军(1991—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:648324460@qq.com

格控制围岩移动和地表沉降的矿区;二是矿体形态复杂多变;三是高品位矿床或贵重金属矿床[4-6]。在采用充填采矿法的开采区域,充填体的力学性能直接影响采场的整体稳定性。目前,矿业领域重点关注两个核心问题:一是如何科学确定充填体的强度参数;二是如何在保证开采安全的前提下有效控制采矿成本[7-9]。充填体强度是保证采场安全稳定的关键因素之一,合理的充填体强度不仅能确保矿山生产的安全,也能有效减少采矿成本,提高经济效益[10-11]。

目前,众多学者针对充填体合理强度进行了大量研究[12-13]。马志平等[14]采用 FLAC3D 模拟不同充填体强度对采场稳定性的影响规律,结果表明,充填体强度主要影响二步骤采场,充填体强度的提高有利于二步骤采场的稳定性。刘小春等[15]对保安矿柱采场的充填体强度进行了理论计算,并通过数值模拟手段确定了合理的充填体强度,结果表明,采场充填体的强度需求主要取决于采场长度和充填体高度,针对长度为 20~60 m、高度为 40 m 的保安矿柱采场,充填体强度需达到 3.5 MPa 以上。林景尚等[16]采用数值模拟、经验公式法以及解析法对一步骤采场充填体强度进行计算,结果表明,一步骤采场充填体强度从下至上划分为 3 个梯度,即 2.0 MPa、1.8 MPa、1.5 MPa,二步骤采场维持原有的1.0 MPa 强度,可以有效预防采场垮落。

为确定某金矿保安矿柱新圈定可采范围内采场的合理充填体强度,采用多种充填体强度公式计算法和充填体受力理论分析方法,计算得到合理的充填体强度范围,并通过数值模拟手段,对不同充填体强度方案下的岩层位移情况进行分析,最终筛选出安全高效的充填体强度方案。

1 工程背景

某金矿 13 号矿体位于矿区东南区域,其走向长度达 2 500 m,垂向延伸 1 030 m,开采作业深度已接近 1 000 m 水平。该矿体形态特征表现为:厚度介于 0.43~8.36 m 之间,平均厚度为 2.48 m,厚度变化系数为 73.40%,整体厚度较为稳定;矿体呈大脉状至似层状构造,走向近东西向展布,倾向为 140°~204°,平均倾角为 183°,倾角为 45°~85°,平均倾角为 55°。为尽可能多地开发矿产资源,采用上向进路充填采矿法对 13 号矿体新圈定保安矿柱近井筒区域的部分矿量进行回采,而远离井筒区域的矿体采用浅孔留矿嗣后充填采矿法回采。保安矿柱圈定范围如图 1 所示。

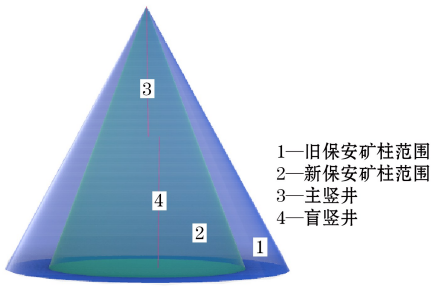


图 1 保安矿柱圈定范围

Fig.1 Delineation range of security pillar

2 充填体强度公式法及理论计算

某金矿 13 号脉井下采场数量众多,胶结充填体的强度直接关系到矿山井筒和采场的安全及开采的经济效益,因此,应尽可能地选用多种计算方法,从不同方面对充填体的合理强度进行研究,以获得胶结充填体的合理强度参数。

2.1 Thomas 计算法

当充填体长度达到或超过其高度的 50%时,可采用 Thomas 计算法确定充填体内部的垂直应力分布情况,具体计算公式[18]如下。

$$\sigma_v=\frac{\gamma\cdot H}{1+h/w} \tag{1}$$

式中:σ_v 为充填体内部垂直应力,MPa;γ 为充填体的容重,取 17.5 kN/m^3;H 为充填体高度,m;h 为充填体暴露高度,m;w 为充填体暴露长度,取 50 m。

2.2 Terzaghi 计算法

太沙基二维模型的安全性高于三维模型[18],二维模型的具体计算公式如下。

$$\begin{cases}\sigma_v=\dfrac{N}{M}(1-e^{-Mh})\\ M=\dfrac{2}{w}k\tan\varphi\\ N=\gamma-\dfrac{2c}{w}\end{cases} \tag{2}$$

式中:M 和 N 均为待定系数;c 为充填体黏聚力,取 0.2 MPa;φ 为充填体内摩擦角,取 32.5°;k 为充填体侧压系数,$k=1-\sin\varphi$。

2.3 Mitchell 计算法

基于 Mitchell 提出的理论方法[18],充填体与顶底板围岩接触面产生的摩擦阻力可有效分担其自重应力。该方法运用极限平衡原理,建立了充填体垂直应力的计算模型,具体计算公式如下。

$$\sigma_v=\frac{\gamma h}{\left(\tan\beta+\dfrac{h}{w}\right)}K \tag{3}$$

式中:β 为滑移角,取 37°;K 为安全系数,$K=1.0$,

1.5,2.0。

2.4 覆岩承重计算法

基于覆岩承重理论[19],可推导出充填体内部垂直应力的计算公式,如公式(4)所示。

$$\sigma_v = k_w \gamma h \tag{4}$$

式中,k_w为上覆岩层重力系数,取 0.9。

2.5 蔡嗣经经验公式法

基于蔡嗣经提出的经验公式[4],可建立充填体垂直应力的计算模型,其数学表达式如式(5)所示。该方法通过总结大量工程实践经验,提出了适用于充填体应力分析的经验计算公式。

$$\sigma_v = \sqrt[3]{\frac{h^2}{a}} \tag{5}$$

式中,a 为经验系数,取 600。

2.6 安庆铜矿经验公式法

1997 年,由长沙矿山研究院牵头,联合多家研究院所共同开展了一项深部金属矿山开采技术创新研究[13]。该项目以安庆铜矿为试验基地,针对 120 m 深部高阶段大孔径深孔阶梯式开采工艺及其配套充填体稳定控制技术进行系统研究。通过多维度研究方法,包括现场原位监测、数值模拟分析与室内物理模拟试验,系统揭示了深部矿柱回采过程中充填体的力学响应机制。研究结果表明,充填体在深部开采环境下的承载强度参数与其三维空间形态存在显著相关性。基于工业试验获取的充填体应力数据,结合有限元数值模拟与室内缩尺模型试验,建立了充填体垂向应力计算模型,其核心影响因素可量化为充填体暴露高度、横向跨度及纵向延伸长度 3 个参数。该研究成果最终形成了具有工程应用价值的应力预测经验公式(见式(6)),为深部矿山安全高效开采提供了理论依据和技术支撑。

$$\sigma_v = \frac{\gamma h}{3\left(1+\frac{h}{w}+\frac{b}{w}\right)}\tan\left(\frac{\pi}{2}-\frac{\varphi}{4}\right) \tag{6}$$

式中,b 为充填体暴露宽度,取 14 m。

2.7 理论计算

上向进路充填采矿法底柱受力模型如图 2 所示,底柱高度为 h',上部充填体高度为 H',采场长度为 L。不考虑上覆岩层的重力作用时,底柱受上部充填体的荷载 q 和采场底板对底柱的支持力 q_0。

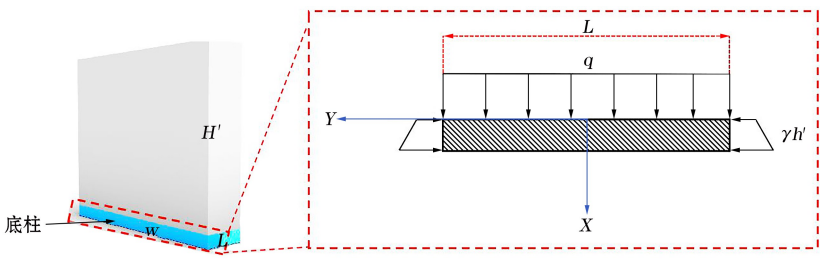


图 2 底柱受力模型

Fig.2 Stress model of the bottom pillar

假设底柱的变形相对于其自身尺寸为微小量,且底柱为连续均质的弹性体,根据弹性力学求解充填体的应力场。

底柱左右两侧受水平侧向压力作用,整体沿 X 方向呈线性分布。因此,底柱水平应力 σ_y 为关于 x 的一次函数,即:

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - f_y = x f(y) \tag{7}$$

则应力函数的计算公式如下:

$$S(x,y) = \frac{1}{6}x^3 f(y) + x f_1(y) + f_2(y) \tag{8}$$

式中:$f(y)$、$f_1(y)$、$f_2(y)$ 均为关于 y 的待定函数;f_y 为底柱在 Y 方向上受到的力;x 为充填体沿 X 方向的距离,m;y 为充填体沿 Y 方向的距离,m。

将式(8)代入相容方程 $\frac{\partial^4 S}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 S}{\partial x^2 \partial y^2}+\frac{\partial^4 S}{\partial y^4}=0$,整理可得式(9)。

$$\begin{cases} f(y) = Ay^3 + By^2 + Cy + D \\ f_1(y) = -\frac{A}{10}y^5 - \frac{B}{6}y^4 + Gy^3 + Hy^2 + Iy \\ f_2(y) = Ey^3 + Fy^2 \end{cases} \tag{9}$$

式中,A、B、C、D、E、F、G、H、I 均为待定系数。

因此,底柱的应力分量为:

$$\begin{cases} \sigma_x = x(-Ay^3 - 2By^2 + 6Cy + 2H) + x^3\left(Ay + \frac{B}{3}\right) + (6Ey + 2F) - \gamma x \\ \sigma_y = x(Ay^3 + By^2 + Cy + D) \\ \tau_{xy} = \frac{A}{2}y^4 + \frac{2}{3}By^3 - 3Gy^2 - 2Hy - \frac{1}{2}x^2(3Ay^2 + 2By + C) \end{cases} \tag{10}$$

垂直应力σ_x、水平应力σ_y和剪应力τ_{xy}的边界条件如下:

$$\begin{cases}\sigma_x\mid_{x=0}=-q,\int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}}\sigma_x\mathrm{d}y=-L(q+\gamma x)\\ \sigma_y\mid_{y=\pm\frac{w}{2}}=\lambda hx,\int_0^x\sigma_y\mathrm{d}x\mid_{y=\pm\frac{w}{2}}=\int_0^x(\lambda\gamma x)\mathrm{d}x\\ \tau_{xy}\mid_{y=\frac{w}{2}}=0\end{cases}\tag{11}$$

式中,λ为底柱上部荷载,MPa。

将上述应力边界条件代入式(10),可得到底柱模型的应力场为:

$$\begin{cases}\sigma_x=\dfrac{2\lambda\gamma}{L^3}x^3H+(\dfrac{3\lambda\gamma}{5L}-\dfrac{2\gamma}{L})xH-(\lambda\gamma x)-q\\ \sigma_y=x(\dfrac{2}{L^3}\lambda\gamma h^3-\dfrac{3}{L}h-\dfrac{1}{2})\\ \tau_{xy}=\lambda\gamma(\dfrac{1}{L}y^4-\dfrac{3}{10L}y^2)+(\lambda\gamma x)\dfrac{3}{L}y^2-\dfrac{\lambda\gamma x^2y}{L^3}\end{cases}\tag{12}$$

根据上文推导的底柱应力场,对不同充填体高度下的底柱受力进行计算,计算结果见表1。

表1 底柱受力计算结果

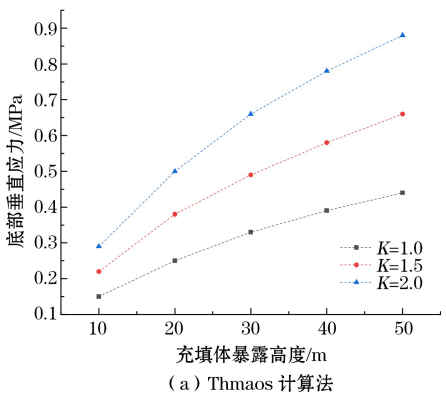
Table 1 Stress calculation results of bottom pillar

充填体高度 H/m	上部充填体高度 H'/m	底柱高度 h'/m	采场长度 L/m	容重 γ/(kN/m³)	上部充填体荷载 q/MPa	水平应力 σ_x/MPa	轴向应力 σ_y/MPa	剪应力 τ_{xy}/MPa
10	7	3	50	17.5	0.122 5	0.14	0.22	0.19
20	17	3	50	17.5	0.297 5	0.26	0.42	0.36
30	27	3	50	17.5	0.472 5	0.37	0.61	0.55
40	37	3	50	17.5	0.647 5	0.45	0.79	0.72
50	47	3	50	17.5	0.822 5	0.53	0.97	0.88

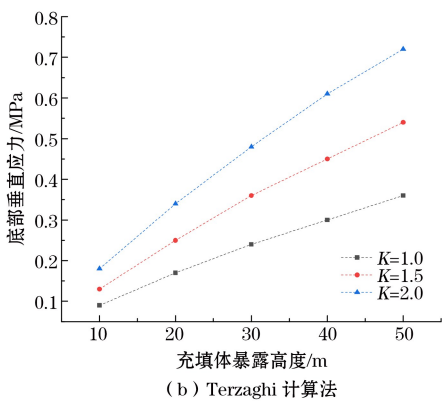
由表1可知,底柱轴向应力最大,因此仅对轴向应力进行分析。相关研究表明,在不考虑充填体覆岩作用时,需选取1~2倍的安全系数[17]。

2.8 充填体强度综合分析

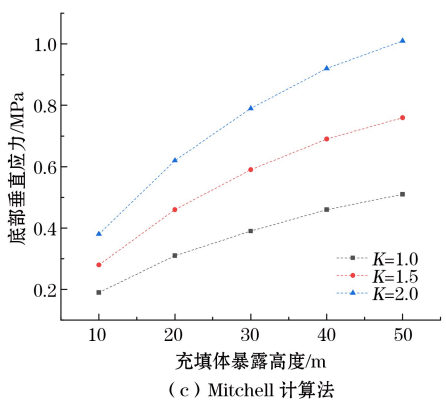
根据Thomas计算法、Terzaghi计算法、Mitchell计算法、覆岩承重计算法、蔡嗣经经验公式法和安庆铜矿经验公式法等,得出不同安全系数下充填体底部垂直应力与充填体暴露高度的关系曲线,如图3所示。由图3可知,当充填体高度在10~50 m范围内变化时,充填体底部垂直应力与充填体暴露高度呈现显著的非线性关系。当安全系数K取2.0时,不同方法计算出的矿房充填体强度见表2。



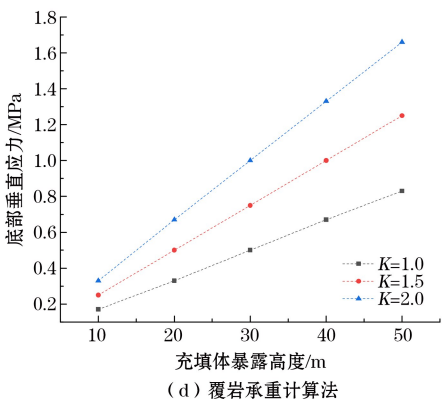
(a) Thmaos计算法



(b) Terzaghi计算法



(c) Mitchell计算法



(d) 覆岩承重计算法

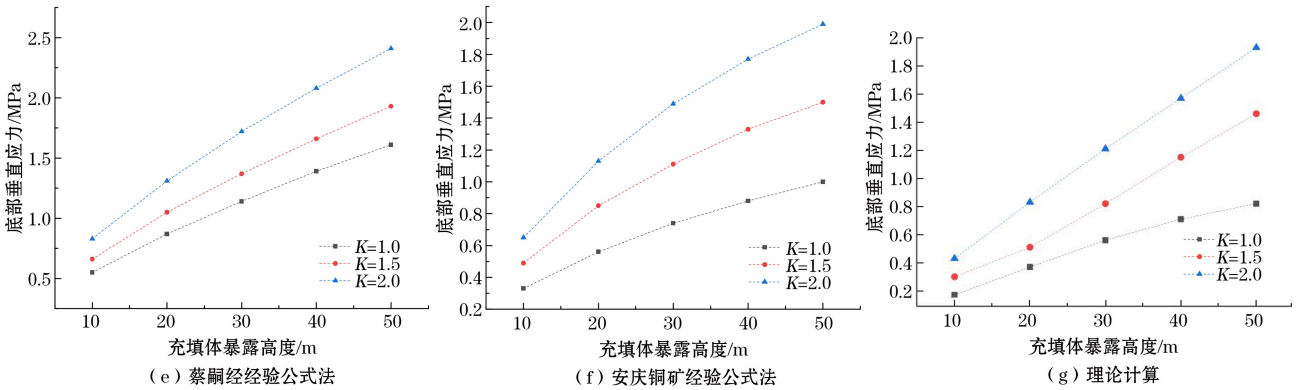


图 3 充填体底部垂直应力与充填体暴露高度的关系曲线

Fig.3 Relationship curves between vertical stress at bottom and exposed height of filling body

表 2 不同方法计算出的矿房充填体强度

Table 2 Strength of filling body in the mining room calculated by different methods

充填体暴露高度 h/m	充填体强度/MPa						
	Thomas 计算法(K=2.0)	Terzaghi 计算法(K=2.0)	Mitchell 计算法(K=2.0)	覆岩承重计算法(K=2.0)	蔡嗣经经验公式法(K=1.2)	安庆铜矿经验公式法(K=2.0)	理论计算(K=2.0)
10	0.29	0.18	0.38	0.33	0.66	0.65	0.44
20	0.50	0.34	0.62	0.67	1.05	1.13	0.84
30	0.66	0.48	0.79	1.00	1.37	1.49	1.22
40	0.78	0.61	0.92	1.33	1.66	1.77	1.58
50	0.88	0.72	1.01	1.66	1.93	1.99	1.94

由图 3 和表 2 可知,采场充填体所需的合理强度主要与充填体暴露高度密切相关。在相同的采场宽度下,随着充填体暴露高度的增加,所需强度也会逐渐增大,且采场底部所需强度最大。充填体暴露高度为 50 m 时,充填体强度最大,最大值为 0.72～1.99 MPa。

3 充填体强度数值模拟分析

3.1 数值模拟方案

为研究充填体强度对井筒保安矿柱释放矿量和采场稳定性的影响,以 13 号脉井为研究对象,对新圈定可采范围进行开采和充填,分别研究不同充填体强度条件下的岩层移动情况,并据此分析得出合理的保安矿柱采场充填体强度参数范围和要求。根据矿山实际情况和充填体强度理论计算结果,结合工程经验,并基于控制变量原则,设计了 4 组充填体强度方案,见表 3。充填体强度数值模型如图 4 所示。

表 3 充填体强度设计方案

Table 3 Design schemes for filling body strength

方案	充填体强度/MPa	
	上向进路充填采矿法	浅孔留矿嗣后充填采矿法
1	1.5	1.5
2	2.0	2.0
3	2.0	2.5
4	2.0	3.0

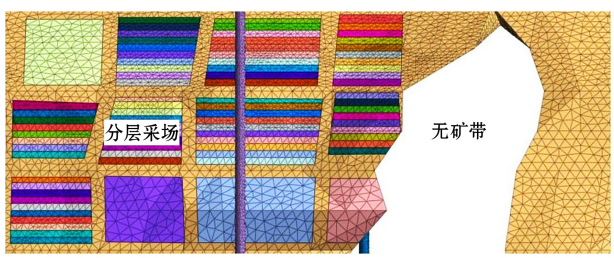


图 4 充填体强度数值模型

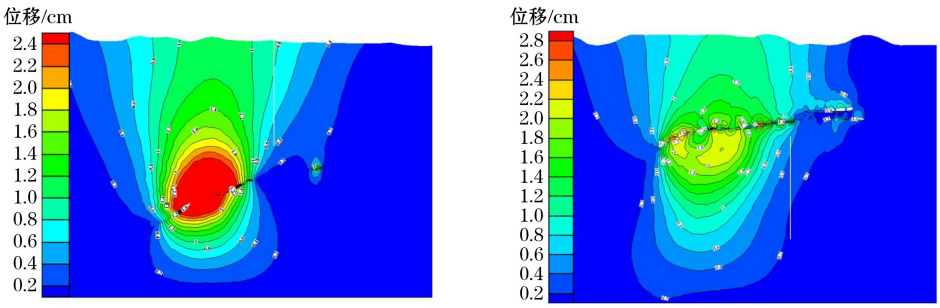
Fig.4 Numerical model of filling body strength

为了精确评估井筒的稳定性状态,应全面监测主竖井的变形状况。主竖井位于 13 号矿脉上盘,延伸至 658～1 118 m 的各个中段。矿体开采过程中,上覆岩层会发生移动,这一变化可能直接影响主竖井的结构安全。为确保详尽的数据收集与分析,在每个中段的中部设置一个位移监测点,以系统监测主竖井的变形状况。综上所述,计划布置 11 个监测点(ZSJ01 至 ZSJ11),以实现全面监控。

3.2 模拟计算结果分析

3.2.1 井筒周边岩层位移分析

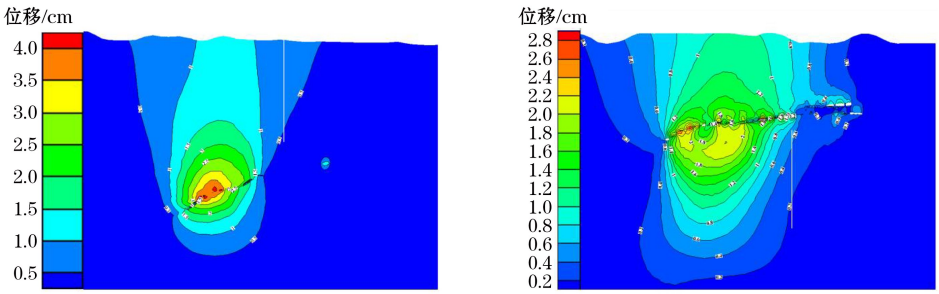
4 种充填体强度方案的井筒位移场分布云图如图 5 至图 8 所示。此外,通过对主竖井各中段井壁监测点的数据进行处理,得出了不同保安矿柱圈定方案下采场回采时主竖井的位移曲线,如图 9 所示。



(a) 主竖井　　(b) 盲竖井

图 5　方案 1 的井筒位移场分布云图

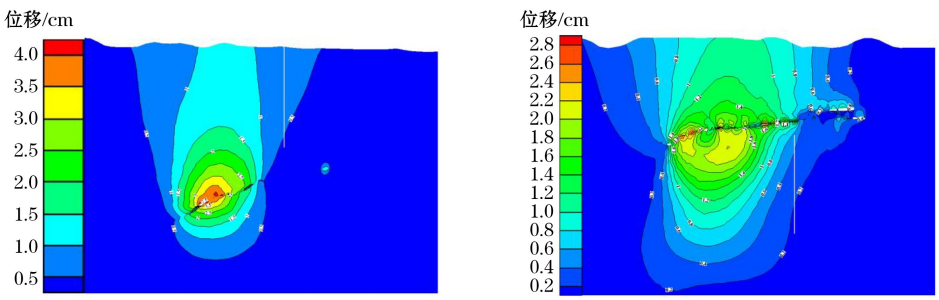
Fig.5　Distribution cloud diagrams of wellbore displacement field of scheme 1



(a) 主竖井　　(b) 盲竖井

图 6　方案 2 的井筒位移场分布云图

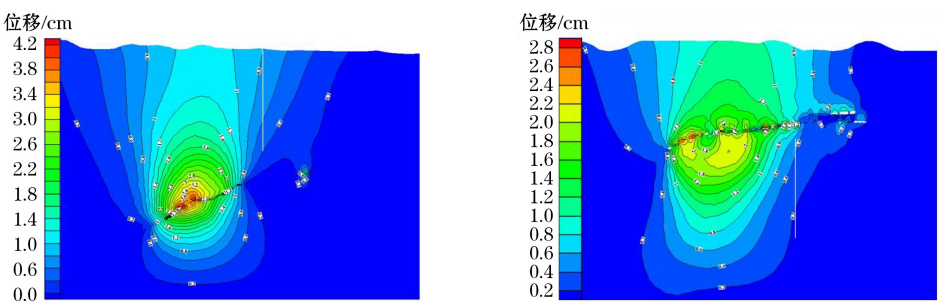
Fig.6　Distribution cloud diagrams of wellbore displacement field of scheme 2



(a) 主竖井　　(b) 盲竖井

图 7　方案 3 的井筒位移场分布云图

Fig.7　Distribution cloud diagrams of wellbore displacement field of scheme 3



(a) 主竖井　　(b) 盲竖井

图 8　方案 4 的井筒位移场分布云图

Fig.8　Distribution cloud diagrams of wellbore displacement field of scheme 4

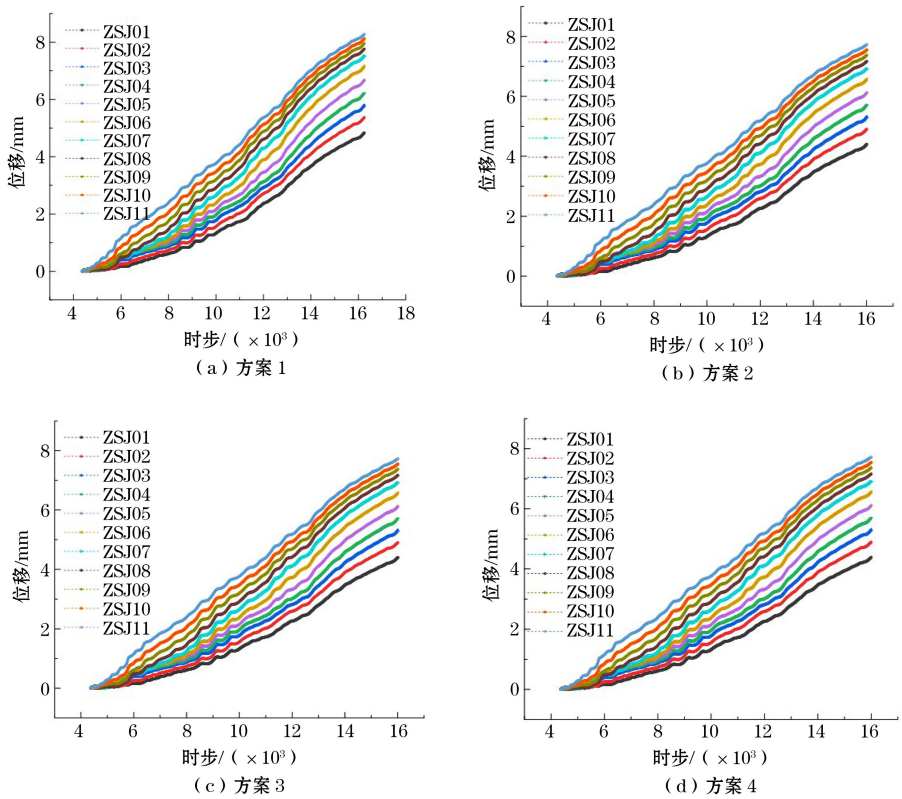


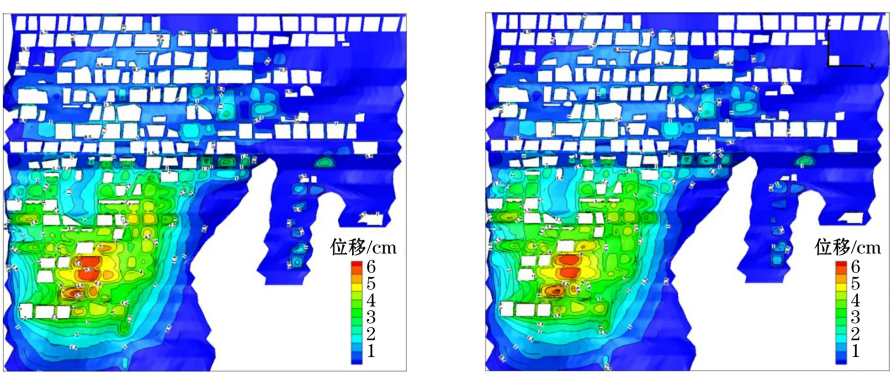
图 9 不同充填体强度方案下主竖井的位移曲线

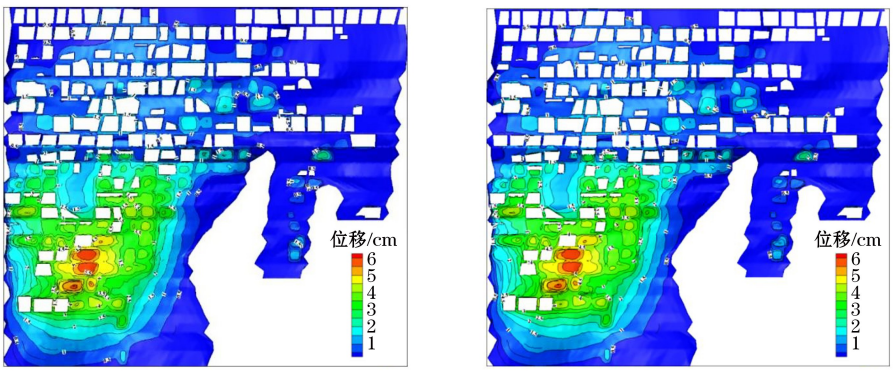
Fig.9 Displacement curves of the main shaft under different filling body strength schemes

由图 5 至图 9 可知，在完成井筒保安矿柱新圈定可采范围的采场回采作业后，开采活动引发的扰动及充填体强度的差异导致主竖井周边矿岩呈现出不同程度的变形与移动。通过对 4 组不同充填体强度方案所建立的模型进行考察可知，井筒的水平变形量均被有效控制在 2.0 mm/m 内，未超过“三下”采矿设计规范中所设定的最大允许水平变形量，表明这 4 组充填体强度方案均能满足井筒稳定性的要求。进一步分析井筒的水平变形数据，可以观察到，上向进路充填采矿法中充填体强度对上盘主竖井的移动变形具有显著影响，而浅孔留矿嗣后充填采矿法中充填体的强度则主要对下盘盲竖井的移动变形产生重要影响。两者均展现出了一个共同的规律，即充填体的强度越大，其对岩层移动的控制效果越好。随着充填体强度的逐渐提升，主竖井的位移变形逐渐减小。在 4 种不同充填方案中，主竖井的最大位移变形量为 0.008 5 m。同时，在相同的充填方案下，随着井筒埋深的增加，井筒的位移变形量也会逐渐增大。

3.2.2 采场周边岩层位移分析

4 种充填方案下采场周边岩层位移分布云图如图 10 所示。





(c) 方案3　　(d) 方案4

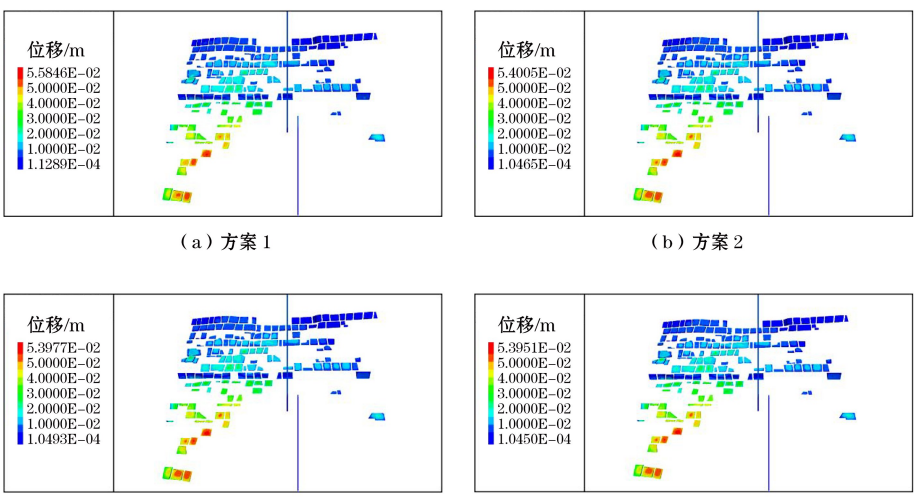
图 10　不同充填体强度方案下采场周边岩层位移分布云图

Fig.10　Displacement distribution cloud diagrams of surrounding rock strata under different filling body strength schemes

由图 10 可知,采用方案 1 进行充填时,上向进路充填采矿法开采区域的总位移量超过了 3.5 cm,邻近未充填或废石充填采区的最大位移量更是达到了 5.5 cm。在浅孔留矿嗣后充填采矿法开采区域,整体位移量超过了 4.0 cm,同时受到邻近废石充填采区的影响,位于 368 m 中段采区的最大位移量同样达到了 5.5 cm。采用方案 2 进行充填时,上向进路充填采矿法开采区域的总体位移量在 2.5 cm 以上,邻近未充填或废石充填采区的位移量大多为 4.5～5.0 cm,少数接近 5.2 cm。对于浅孔留矿嗣后充填采矿法开采区域,整体位移量超过了 3.0 cm,受邻近废石充填采区影响,位于 368 m 中段采区的位移量大多为 4.5～5.0 cm,少数接近 5.3 cm。采用方案 3 和方案 4 进行充填时,由于上向进路充填法开采区域的充填体强度保持一致,因此岩层移动情况较为接近。而在深部浅孔留矿嗣后充填采矿法开采区域,随着充填体强度的提升,岩层移动得到了进一步的缓解,但整体效果并不显著。

3.2.3　未充填采空区周边岩层位移分析

4 种方案下未充填采空区周边岩层位移分布云图如图 11 所示。



(a) 方案1　　(b) 方案2

(c) 方案3　　(d) 方案4

图 11　不同充填体强度方案下未充填采空区周边岩层位移分布云图

Fig.11　Displacement distribution cloud diagrams of surrounding rock strata under different filling body strength schemes

由图 11 可知,采用方案 1 进行新圈定可采范围的采空区充填时,深部大部分采空区的位移量超过 5 cm。根据极限容许位移量的评估标准,这部分采空区的岩层移动量偏大,存在失稳风险,这表明充填体强度为 1.5 MPa 时无法有效控制采场周边矿岩的移动。采用方案 2 进行新圈定可采范围的采空区充填时,深部大部分采空区的位移量均小于 5 cm。然而,在 418 m 中段的个别大型采空区,上下盘岩

层的移动程度仍然偏大。因此,在新圈定可采范围矿体回采前,需优先完成该采空区的治理工作。采用方案 3 和方案 4 进行新圈定可采范围的采空区充填时,所有采场的岩层移动程度得到了进一步缓解。然而,充填效果并非特别显著,需要进一步研究和优化。综合以上分析,抗压强度为 1.5 MPa 的充填体在控制矿区岩层移动方面的能力有限,且增大了未充填采空区的失稳风险。相对而言,抗压强度为 2.0 MPa 及以上的充填体对矿区岩层移动的控制效果较好,大部分未充填采空区周边矿岩的位移量能够控制在允许的极限范围内。鉴于安全性与充填经济性综合考虑,推荐 13 号脉井新圈定可采范围的充填体强度方案选用方案 2。具体来说,建议将上部上向进路充填采矿法采场和深部浅孔留矿嗣后充填采矿法采场的充填体强度均设置为 2.0 MPa,以确保安全与经济的平衡。

4 结论

为确定某金矿新圈定保安矿柱范围内充填体的合理强度,本文综合运用了多种理论计算和数值模拟分析方法,并结合工程实践经验,从多个角度对充填体的合理强度进行了深入研究。得出了以下主要结论。

(1) 采场胶结充填体所需强度与充填体暴露高度密切相关,且一般采场底部所需强度最大。当充填体暴露高度达到 50 m 时,各理论方法计算出的充填体强度最大值为 0.72～1.99 MPa,为充填体强度的设计提供了重要参考。

(2) 通过 4 种不同充填体强度方案的模拟分析,发现充填体强度的提升能有效控制井筒的水平变形量及采场周边岩层的位移。特别是在上向进路充填采矿法和浅孔留矿嗣后充填采矿法中,充填体强度对上盘主竖井和下盘盲竖井的移动变形有显著影响,且充填体强度越大,控制效果越明显。

(3) 对比 4 种充填方案下的岩层位移分布云图发现,不同充填方案对采场稳定性的提升效果有所不同。在方案 1 和方案 2 中,部分区域的位移量较大,存在失稳风险;而方案 3 和方案 4 虽然在一定程度上缓解了岩层移动,但整体效果并不显著。这表明充填方案的选择需根据采场具体情况确定。

(4) 综合考虑安全性与充填经济性,推荐采用方案 2 作为 13 号脉井新圈定可采范围的充填体强度方案。即建议上部上向进路充填采矿法采场和深部浅孔留矿嗣后充填采矿法采场的充填体强度均为 2.0 MPa。这一方案既能有效控制矿区岩层移动,确保采场稳定,又能兼顾经济成本,实现安全与经济的平衡。

参考文献(References):

[1] 杨智博,金长宇,丁成功,等.保安矿柱充填回采过程中竖井稳定性力学试验研究[J/OL].金属矿山:1-11[2025-01-15].http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20241104.1107.004.html.
YANG Zhibo, JIN Changyu, DING Chenggong, et al. Mechanical test study of shaft stability during filling and mining of safety pillar[J/OL]. Metal Mine:1-11[2025-01-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20241104.1107.004.html.

[2] 江文武,廖俊钰,钟海,等.多因素影响复杂空区群下残留矿柱回采模拟研究[J].金属矿山,2024(6):71-78.
JIANG Wenwu, LIAO Junyu, ZHONG Hai, et al. Simulation study on the recovery of residual ore pillars under a complex mining cavity cluster influenced by multiple factors[J]. Metal Mine,2024(6):71-78.

[3] 廖俊钰.某矿山保安矿柱回采方案与地压活动规律研究[D].赣州:江西理工大学,2024.
LIAO Junyu. Study on the recovery program ofsecurity pillar and the pattern of ground pressure activity in a mine[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2024.

[4] 徐浩.尖山地下矿保安矿柱协同开采技术研究[D].长沙:中南大学,2023.
XU Hao. Collaborative mining technology research on security pillars in Jianshan underground mine[D]. Changsha: Central South University,2023.

[5] 董秋平,徐浩,周科平,等.攀枝花铁矿尖山地采保安矿柱回采结构参数优化[J].采矿技术,2022,22(5):9-14.
DONG Qiuping, XU Hao, ZHOU Keping, et al. Optimization of mining structure parameters of Jianshan mining security pillar in Panzhihua Iron Mine[J]. Mining Technology,2022,22(5):9-14.

[6] 吴振雨,王靖,刘培正,等.山东某铁矿保安矿柱开采对地表构筑物的影响分析[J].现代矿业,2022,38(2):207-211.
WU Zhenyu, WANG Jing, LIU Peizheng, et al. Analysis on the influence of security pillar mining on surface structures of an iron mine in Shandong Province[J]. Modern Mining,2022,38(2):207-211.

[7] 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.

[8] 黄小红,贺巍,曹伟.锡矿山南矿保安矿柱锌厂区域近地表安全回采研究与应用[J].中国矿山工程,2021,50(1):9-11.
HUANG Xiaohong, HE Wei, CAO Wei. Research and application of near surface safe mining in zinc plant area of security pillar in Xikuangshan south mine[J]. China Mine Engineering,2021,50(1):9-11.

[9] 王刘宝.大冶铁矿龙洞保安矿柱充填开采方案及隔离间柱合理尺寸研究[D].武汉:武汉科技大学,2020.
WANG Liubao. Study on filling mining scheme of Longdongsecurity pillar and reasonable size of isolation pillar in Daye Iron Mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Science Technology,2020.

[10] 付琛.基于能量法的充填体下保安矿柱回采研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
FU Chen. Research of extraction of security pillar under filling body based on energy theory[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2020.

[11] 郭虎强,周勇,牛聪聪,等.某磷矿断层保安矿柱参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(6):152-158.
GUO Huqiang, ZHOU Yong, NIU Congcong, et al. Study on parameter optimization of fault safety pillar in a phosphate mine[J]. Mining Technology, 2024, 24(6): 152-158.

[12] 朱必勇,杨伟,王新民.大规模充填体下保安矿柱规划及矿体回采顺序研究[J].金属矿山,2015(7):21-24.
ZHU Biyong, YANG Wei, WANG Xinmin. The permanent pillar arrangement and the stoping sequence under large-scale backfill body[J]. Metal Mine,2015(7):21-24.

[13] 王铮朗.中深部金属矿保安矿柱爆破回采的动力响应特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.
WANG Zhenglang. Study on dynamic response of safety pillars blasting mining in medium-deep metal mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2014.

[14] 马志平,刘福春,刘恩彦.基于跨度比和充填体强度的采场稳定性分析[J].采矿技术,2022,22(5):37-41.
MA Zhiping, LIU Fuchun, LIU Enyan. Stope stability analysis based on span ratio and backfill strength[J]. Mining Technology,2022,22(5):37-41.

[15] 刘小春,张小瑞,刘博.三鑫金铜矿保安矿柱回采合理充填体强度研究[J].黄金,2024,45(4):13-17.
LIU Xiaochun, ZHANG Xiaorui, LIU Bo. Research on the reasonable filling body strength for the recovery of security ore pillars in Sanxin Gold Copper Mine[J]. Gold,2024,45(4):13-17.

[16] 林景尚,王玉丁,丁林敏,等.龙桥铁矿盘区采场充填体强度优化研究[J].采矿技术,2024,24(4):36-40.
LIN Jingshang, WANG Yuding, DING Linmin, et al. Optimization of backfill strength in panel stope of Longqiao Iron Mine[J]. Mining Technology,2024,24(4):36-40.

[17] 魏晓明.高阶段全尾砂胶结充填体强度特性及充填体配比设计研究[D].北京:北京科技大学,2018.
WEI Xiaoming. Study on strength characteristics and ratio design of high stage whole tailing cemented backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.

[18] 王海昶,闵忠鹏,张雷,等.下行式小分段采场充填体强度需求计算与设计[J].黄金,2022,43(12):48-52.
WANG Haichang, MIN Zhongpeng, ZHANG Lei, et al. Strength requirement calculation and design of the backfill body for downward small sublevel stope[J]. Gold,2022,43(12):48-52.

[19] 于永纯,罗正良,孙长坤,等.窄长采场胶结充填体强度要求及结构设计[J].有色金属(矿山部分),2021,73(2):21-26.
YU Yongchun, LUO Zhengliang, SUN Changkun, et al. Strength requirement and structure design of cemented backfill in narrow-long stope[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2021,73(2):21-26.