# 大直径深孔空场嗣后充填采矿法采场充填体合理强度研究*

杨宁[1,2],席世强[3],马志平[3],欧任泽[1,2],阚晓平[3],张庆嵩[1,2],赵恒兵[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.四川德鑫矿业资源有限公司, 四川 阿坝藏族羌族自治州 624199)

**摘要**:采场充填体的合理性设计对于保障矿山的安全高效开采至关重要。以某大直径深孔空场嗣后充填采矿法采场为工程背景,结合理论计算与数值模拟方法对采场充填体合理强度进行研究,探究了采场充填体内部的应力、位移及地表沉降变形规律。结果表明:充填体内部的最大主应力随着开采的进行逐渐增加,应力主要为压应力,在顶、底板处更加明显。充填体强度变化对最大和最小主应力峰值影响不大,但充填体强度的增加减小了应力辐射范围。充填体强度的增加减少了顶板下沉空间并限制了顶板变形,其对顶板的约束效果优于地表。受开挖扰动的影响,充填体内部的位移呈现阶梯状的变化规律。在采场充填体顶、底部10 m强度为2.5 MPa、中部强度为1.5 MPa的工况下,地表监测线的最大倾斜变形、曲率、最大$X$方向水平变形和最大$Y$方向水平变形分别为0.109、$0.181\times10^{-3}$、$-0.024$和0.059 mm/m,均满足安全规程允许的地表沉降对构筑物影响的要求。

**关键词**:充填采矿法;充填体合理强度;地表沉降变形;理论计算;数值模拟

**中图分类号**:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0083-10

**Study on Reasonable Strength of Stope Filling Body in Large-Diameter Deep Hole Open Stoping with Subsequent Filling Mining Method**

*YANG Ning*[1,2], *XI Shiqiang*[3], *MA Zhiping*[3], *OU Renze*[1,2], *KAN Xiaoping*[3], *ZHANG Qingsong*[1,2], *ZHAO Hengbing*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Sichuan Dexin Mining Resources Co., Ltd., Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan 624199, China)

**Abstract**: The rational design of stope filling body is very important to ensure the safe and efficient mining of mines. Based on the engineering background of a stope mined by large-diameter deep hole open stoping with subsequent filling mining method, the reasonable strength of filling body in stope was studied by combining theoretical calculation and numerical simulation. The stress, displacement and surface subsidence deformation law inside the filling body of the stope were explored. The results show that the maximum principal stress inside the filling body gradually increases with the progress of mining. The stress is mainly compressive stress, which is more obvious at the roof and floor. The strength change of the filling body has little effect on the maximum and minimum principal stress peaks, but the increase of the strength of the filling body reduces the stress radiation range. The increase of the strength of the filling body reduces the roof subsidence space and limits the roof deformation, and its constraint effect on the roof is better than that of the surface. Under the influence of excavation disturbance, the displacement inside the filling body presents a step-like change rule. Under the working condition that the strength of the filling body in stope is 2.5 MPa at the10 m of top and bottom and 1.5 MPa in the middle part, the maximum tilt deformation, curvature, maximum horizontal deformation in X-direction, and maximum horizontal deformation in Y-direction of the surface monitoring line are 0.109, $0.181\times10^{-3}$, $-0.024$, and 0.059 mm/m, respectively. All these values meet the requirements of the safety regulations for the impact of surface subsidence on structures.

**Key words**: Filling mining method, Reasonable strength of filling body, Surface subsidence deformation, Theoretical calculation, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2024-08-20
**基金项目**:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFC2904001)
**作者简介**:杨宁(1992—),男,宁夏中卫人,硕士,高级工程师,主要从事采矿工程技术研究。E-mail:34040682@qq.com
**通信作者**:席世强(1977—),男,山西沁源人,高级工程师,主要从事采矿技术研发及管理工作。E-mail:836860211@qq.com

## 0 引言

大直径深孔嗣后充填采矿法因其具有工程量少、生产能力大等优势而被广泛应用于矿山工程中,被视为一种高效的采矿方法[1]。在采用该方法进行回采时,常常会将矿体划分为矿房和矿柱两个步骤进行回采。在一步回采完成后,对采空区进行充填作业,充填体被用作人工矿柱,以减缓地压,为矿柱回采提供必要的支撑条件。一步回采充填体在此过程中承担着重要作用,因此对充填体有着较高的质量要求[2-3]。故确定合理的充填体强度不仅有助于降低充填成本,避免强度过剩而导致的资源浪费,更能减弱地下开采对地表环境的不良影响,对于保障矿山的安全高效生产至关重要。

不同矿山因矿岩类型、稳定性及赋存条件的不同,导致其在充填体进入采场后所需的承载要求各不相同。合理的充填体强度应以矿区实际条件为基础,保证充填体的自立性与稳定性,防止回采过程中充填体与岩体的破坏失稳[4]。目前学者们在充填体合理强度的计算方面开展了大量的研究工作。刘光生等[5]在考虑采充时序过程的基础上,对米切尔计算法进行修正,并结合数值模拟,验证并扩展了强度修正模型的准确性与适用性。贺桂成等[6]利用FLAC3D模拟分析了废石胶结充填体强度对围岩应力的影响,并且依据模拟结果选用的充填体参数有效控制了采场深部开采地压。黄德镛等[7]通过FAHP-CRITIC法优化了采场结构参数和充填体配比。此外,熊朝辉等[8]通过3种力学模型解析分层胶结充填体的强度需求,优化了高阶段嗣后分层胶结充填体的充填参数。王谦源等[9]结合大范围嗣后充填分析模型,提出带式充填结构以增强薄弱部位的稳定性,大幅降低了充填成本。林卫星等[10]通过高效仓储造浆放砂实现了结构流高浓度充填的浓度稳定,并循环使用高效能充填设备实现了矿山的采充平衡,结合新型胶凝材料在满足充填体强度的情况下,大幅度降低了充填成本,实现了特大型贫铁矿的高质量、低成本充填。这些研究为不同工程背景下合理充填体强度的确定提供了有效的解决方案,具有重要的理论和实践意义。

本文针对某矿采用的大直径深孔空场嗣后充填采矿法,在理论公式计算得到的初步设计强度的基础上,利用数值模拟软件进一步优化采场充填体合理强度,分析一步采场充填体内部承载规律,确定采场充填体稳定自立所需强度值,以期为矿山安全高效和低成本开采提供依据。

## 1 采场充填体强度验证模型的构建

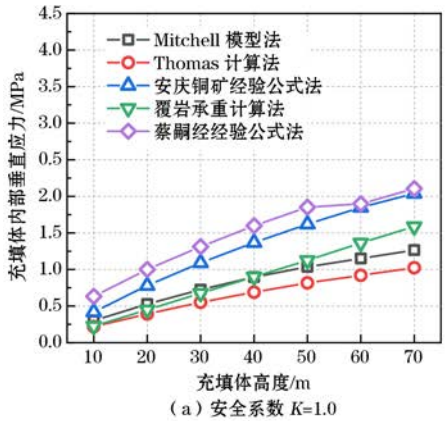
### 1.1 工程背景

某矿的工业矿体为锂辉石矿体,矿区内共圈定17条矿体,赋存标高为3 500～4 040 m。在矿区西侧存在一条埋藏较浅的X号矿体,矿体倾角为53°,矿体平均厚度为30 m,埋深为40～90 m,$Li_2O$平均品位为1.34%,开采方法采用大直径深孔嗣后充填采矿法。考虑充填成本以及浅埋矿体对地表建筑物安全的潜在影响,本研究旨在通过理论计算和数值模拟等方法,对采场充填体的合理强度进行深入分析,以此避免设计强度过高而造成资源浪费,确保矿区X号矿体的低成本、安全高效生产。

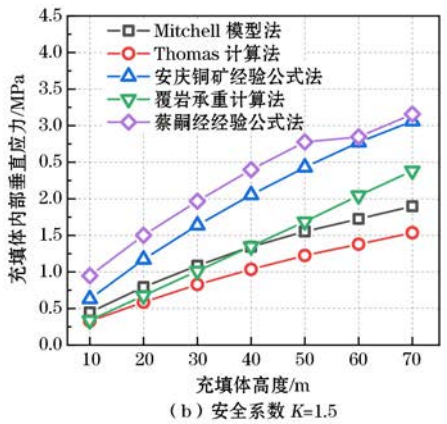
### 1.2 理论公式计算采场充填体强度

采场充填体强度的确定受到多个因素的影响,包括矿山的开采技术条件、采场结构参数、充填方式和充填体强度特性等[11]。其中,满足充填体自立性是最基本的要求。计算采场充填体强度会涉及不同的理论和方法,因此得到的充填体自立强度值可能会有所不同。为了获得合理的采场充填体强度值,本研究采用了托马斯(Thomas)模型法[12]、安庆铜矿经验公式法[13]、覆岩承重计算法[14]、蔡嗣经经验公式法[15]和米切尔(Mitchell)计算法等5种理论方法,通过计算分析得出的结果可以为优化充填体设计提供理论依据。

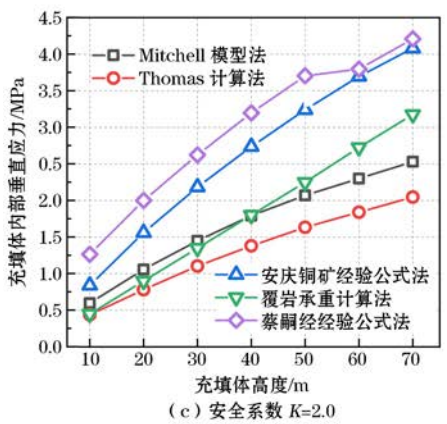
不同安全系数下各经验公式计算出的充填体强度如图1所示。由图1可知,蔡嗣经经验公式法与安庆铜矿经验公式法的计算结果比较接近,计算出的充填体强度适中,而Thomas模型法、Mitchell计算法和覆岩承重计算法计算结果均较小。根据国内外充填体强度设计的经验,Thomas模型法、Mitchell计算法的安全系数(通常要求为1.5～2.0)分别选取为1.88,1.8;覆岩承重计算法与安庆铜矿经验公式法的安全系数(通常要求为1.2～1.5)分别选取为1.4,1.45;蔡嗣经经验公式法为现场统计的结果,故可以取用略小的安全系数值1.1。综合得出充填体设计强度为1.5～2.5 MPa。但需要指出的是,上述计算结果只考虑了充填体的自立因素,并未涉及爆破扰动作用,以及地下环境及矿体开采对充填体强度的影响,故充填体强度值的确定还需要通过数值模拟手段加以验证。



(a) 安全系数 $K$=1.0



(b) 安全系数 $K$=1.5



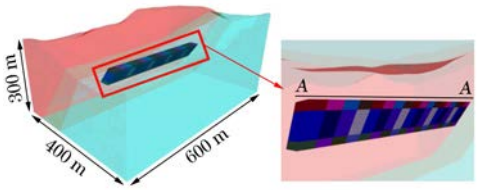
(c) 安全系数 $K$=2.0

**图 1 不同安全系数下各理论公式计算出的充填体强度**

**Fig.1 Strength of filling body calculated by each theoretical formula under different safety factors**

### 1.3 模型建立及参数确定

根据矿区现有地质资料,建立了 X 号矿体充填体强度计算力学模型,整体模型尺寸为 400 m×600 m×300 m。建模的重点区域需体现充填体内部应力分布规律及其稳定性,因此采场网格分布较密,单个采场阶段高为 50 m,长为 20 m,模型共计 336 830 个单元,235 850 个节点。为更好地分析充填体应力扰动关系及稳定状态,沿着矿脉走向和倾角选取 $A$—$A$ 典型剖面进行分析,剖面位置示意如图 2 所示。各岩层与充填体的物理力学参数见表 1。



(a) 矿山三维模型 (b) 矿体加密区域

**图 2 充填体强度计算力学模型**

**Fig.2 Mechanical model of filling body strength calculation**

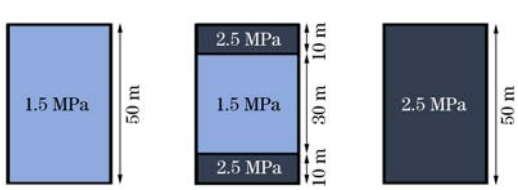
**表 1 各材料的物理力学参数**

**Table 1 Physical and mechanical parameters of each material**

| 材料 | 容重/(kN/m³) | 抗拉强度/MPa | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 抗剪强度参数 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) |
| 黑云石英片岩 | 27.0 | 0.83 | 3.15 | 1.98 | 2.27 | 29.95 |
| 花岗斑岩 | 26.0 | 1.31 | 4.23 | 3.04 | 3.46 | 36.18 |
| 钠长石化花岗岩 | 26.1 | 0.97 | 3.79 | 2.61 | 3.32 | 33.86 |
| 锂辉石矿体 | 27.2 | 1.40 | 3.77 | 2.26 | 3.24 | 32.25 |
| 1.5 MPa 充填体 | 19.0 | 0.18 | 0.32 | 0.14 | 0.20 | 28.00 |
| 2.5 MPa 充填体 | 20.5 | 0.25 | 0.40 | 0.19 | 0.35 | 32.00 |

### 1.4 采场充填体合理强度数值模拟方案

为了确定大直径深孔空场嗣后充填采矿法的合理充填体强度值,本研究综合运用了理论计算和数值模拟的方法,通过理论计算初步确定了充填体强度值的适宜范围为 1.5～2.5 MPa。数值模拟详细分析了充填体内部的应力分布、塑性区域以及矿柱与采场顶板的稳定性情况,旨在进一步优化充填体的设计强度。根据理论计算结果,本研究设计并模拟了 3 种不同工况:工况一中,充填体完全采用 1.5 MPa 强度;工况二中,顶、底部 10 m 采用了 2.5 MPa 的高强度充填材料,其余部分维持 1.5 MPa;工况三中,充填体整体采用 2.5 MPa 强度。模拟工况如图 3 所示。



(a) 工况一 (b) 工况二 (c) 工况三

**图 3 模拟工况**

**Fig.3 Simulation conditions**

根据矿区采场规划,矿块按照所处的约束情况,分为两步采场,回采顺序如图 4 所示。为了确保凿岩、回采和充填作业之间互不干扰,并避免在充填体内进行掘进或凿岩,采场采用间隔布置的方法。回采过程中,按照“隔三采一”的原则进行作业,首先开采第一步采场(矿房采场),接着进行充填,然后继续回采剩余的第一步采场(矿房采场),接着充填采空区,再按照回采顺序开采第二步采场(矿柱采场),随后充填第二步采场并继续回采剩余的第二步采场(矿柱采场),待第二步采场回采完成后,再进行充填作业。

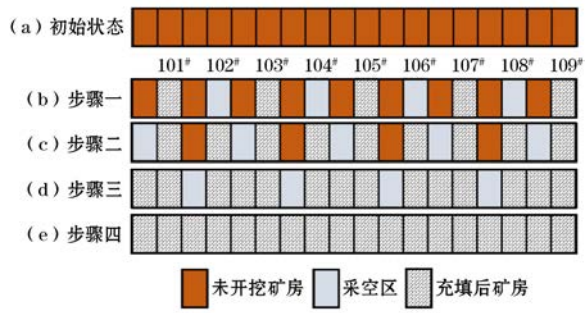



**图 4　回采顺序**

**Fig.4　Mining sequence**

在回采过程中,一、二步骤采场充填体的受力状态是不相同的。一步骤采场充填体作为矿柱回采过程中的围岩,对矿柱回采的安全稳定和经济效益具有重要影响,因此其稳定性是研究的关键。二步骤采场充填体主要用于填充采空区,并充当工作平台或顶板。为了研究充填体应力分布规律及其稳定性情况,需要选择一个最危险状态、具有代表性的充填体。步骤一时 105# 矿房充填体两侧为矿柱;步骤二时 105# 矿房充填体一侧为矿柱、充填体,另一侧为采空区、充填体;步骤三时 105# 矿房充填体一侧为充填体,另一侧为采空区、充填体。由于在不同模拟步骤中 105# 矿房采场的约束情况不同,因此在 105# 矿房充填体中设 6 个监测点(1 号监测点高度为 1 m,监测点间距为 10 m),分析其应力分布规律及稳定性情况,监测点布置位置如图 5 所示。

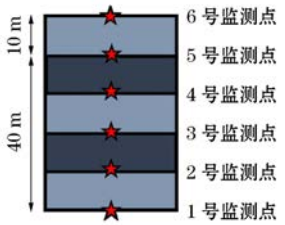


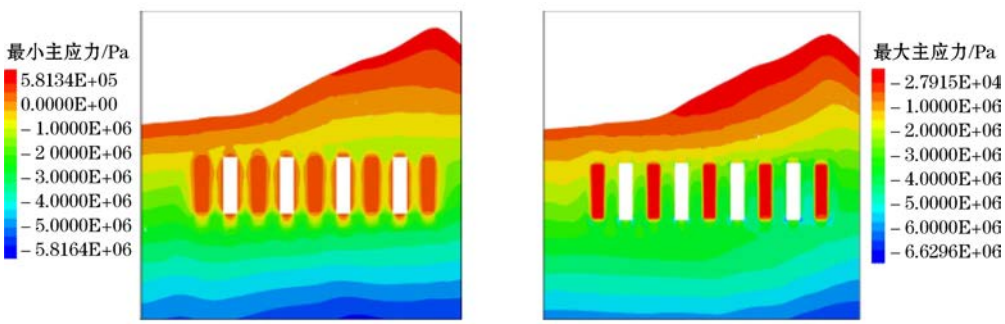

**图 5　监测点布置位置**

**Fig.5　Layout position of monitoring points**

## 2　采场充填体合理强度数值模拟结果

### 2.1　不同工况下应力场分析

工况一动态开挖过程中 $A—A$ 剖面的应力变化如图 6 所示。无论开挖到哪一步骤,充填体应力分布都呈现出较为明显的规律,即最大主应力主要由压应力主导,且充填体底部和顶部的受力最为显著。在步骤一中,应力集中现象在充填体底部与围岩交界处显现,相对于未充填的采场,充填体由于其应力转移的作用,有效缓解了底部的应力集中[16]。步骤二回采时,随着两个采场之间矿柱的回采,充填体一侧邻近围岩,另一侧则为采空区。在这种情况下,充填体临空面的应力大致维持在 0.5 MPa,由于采空区的卸压作用,充填体未出现明显的应力集中现象,大部分压应力仍由矿柱承担[17]。在步骤三中,充填体顶部所承受的拉应力增大,顶部发生拉伸破坏的风险提高。在步骤四中,充填体的压应力峰值相近,这是因为步骤四中未出现新的开挖扰动区域,充填体需要转移的应力并未增加。




(a) 步骤一

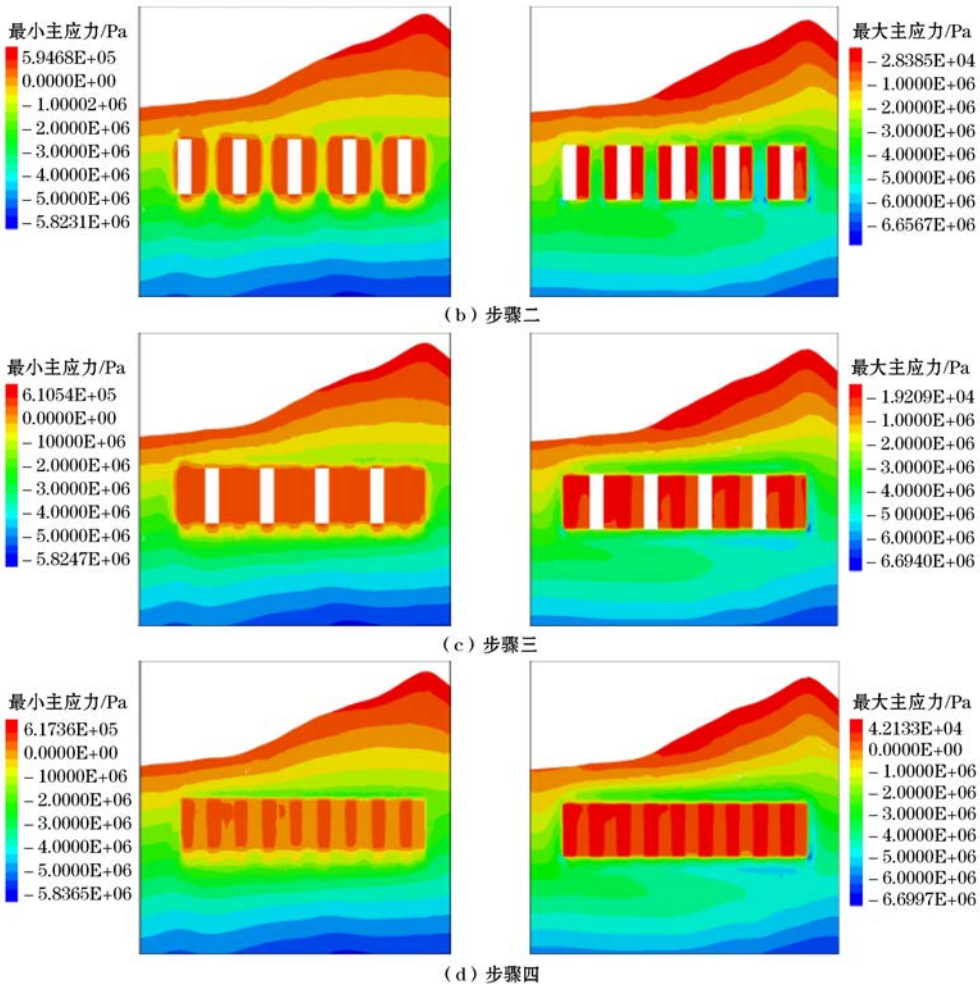



**图 6　工况一动态开挖过程中 *A*—*A* 剖面应力变化**

**Fig.6　Stress changes of *A*—*A* section during dynamic excavation under working condition 1**

105# 矿房充填体在不同高度处的应力分布情况如图 7 所示。由图 7 可知,充填体内部仅存在压应力,且压应力的最大值出现在充填体的顶、底板处。随着开挖作业的进行,充填体内部的最大主应力逐渐增加。这是由于随着开挖的进行,承载上部应力的矿柱逐渐减少,充填体开始承担起来自矿柱的应力,因此充填体内部的应力逐渐增大[18]。在步骤三和步骤四中,应力变化并不显著,这是因为步骤四仅涉及对 105# 采场充填体邻近采空区的充填操作,并未引入新的开挖扰动,因此充填体内部的应力变化较小。

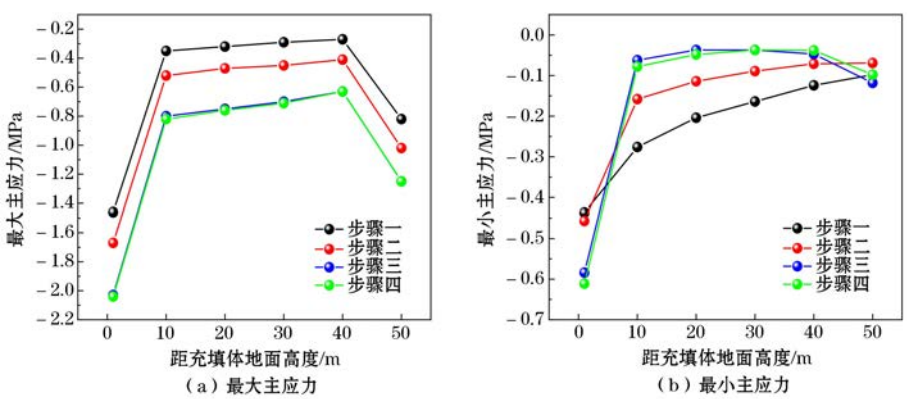



**图 7　105# 矿房充填体在不同高度处的应力分布情况**

**Fig.7　Stress distribution at different heights of 105# mine room filling body**

不同工况下的应力对比如图 8 所示。由图 8 可知,充填采空区的充填体强度变化虽然对最大主应力和最小主应力峰值影响不大,但对应力范围有显著影响。随着充填体强度的增加,相同数值区域内的最大主应力和最小主应力范围均减小。这进一步证明了充填体强度的增加使其能够承担更多的应力,有效地转移了覆岩的压力,从而提高了充填体的承载能力和充填后采场的稳定性。

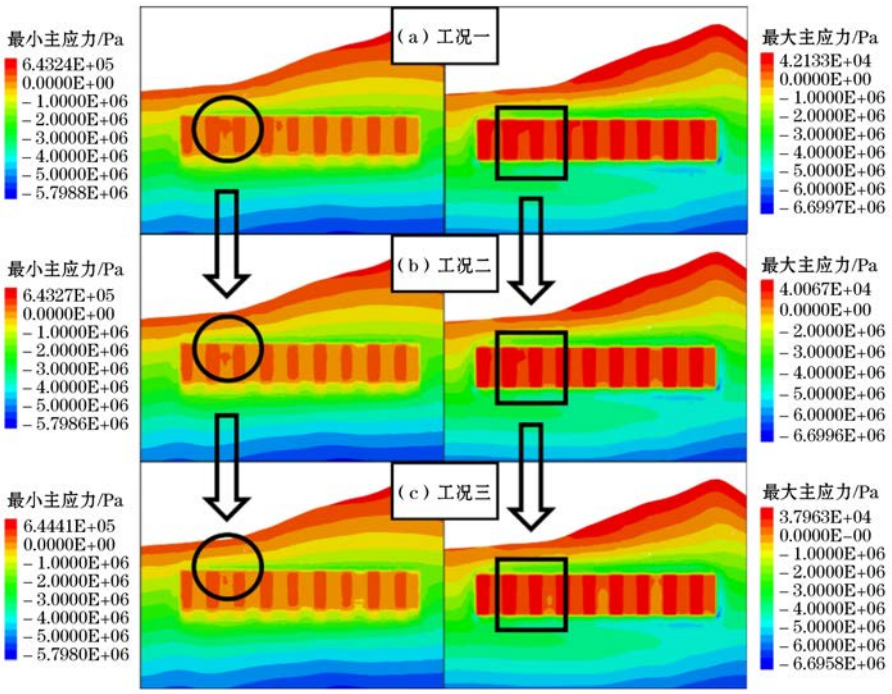
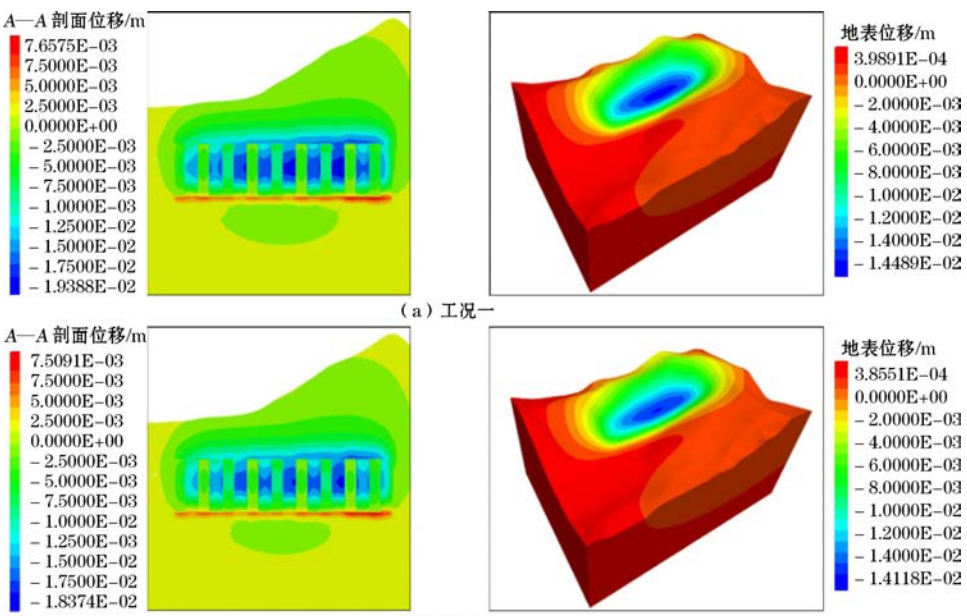



**图 8 不同工况下的应力对比**

**Fig.8 Stress comparison under different working conditions**

## 2.2 不同工况下位移场分析

不同工况下的位移对比如图 9 所示。从图 9 中可以看出,随着充填体强度的增加,充填体对采场顶板下沉的抑制作用得到增强。从工况一到工况三,$A—A$ 切面处顶板下沉量的峰值由 19.38 mm 减少至 16.79 mm,减小了 13.36%;地表沉降峰值由 14.48 mm 减少到 13.74 mm,减小了 5.11%。由此可见,充填体强度的增加减少了采场顶板下沉的空间,进一步限制了顶板的变形,而且充填体强度的增加对顶板的约束效果高于地表。



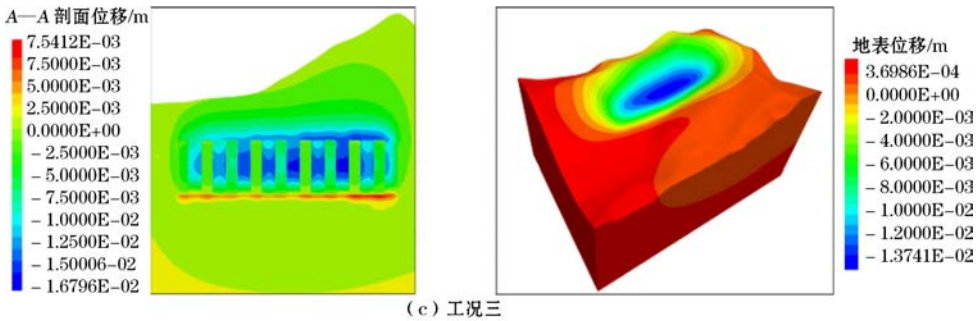



**图 9　不同工况下的位移对比**

**Fig.9　Displacement comparison under different working conditions**

不同工况下的充填体内部监测点竖向位移变化情况如图 10 所示。由图 10 可知,在不同工况下,充填体内部的位移变化均呈现出相似的规律。1 号监测点位于采场底板与充填体交界处,受应力影响较大,因此出现了底鼓现象。2～6 号监测点远离底板,受底板应力影响较小,因此出现下沉现象。工况一、二、三中 5 号和 6 号监测点的位移变化曲线趋势相似,沉降峰值分别为 15.00 mm、14.60 mm、14.17 mm,表明充填体顶部承受更大的应力,充填体顶部是需要重点关注的区域。此外,位移呈现阶梯状的变化规律,这是因为相邻矿房的开挖和充填作业对位移存在影响[19]。因此,为确保采场充填体的稳定性,需要重点关注采场开挖过程的扰动。

## 2.3　不同工况下塑性区分析

不同工况下的塑性区分布云图如图 11 所示。由图 11 可知,塑性破坏主要集中在充填体四周和顶部,随着充填体强度的增加,塑性区的体积逐渐减小。在工况一中,顶部存在较大的破坏区域,但当充填体顶部 10 m 的强度从 1.5 MPa 提升到工况二的 2.5 MPa 时,顶部的塑性区域显著减少。当充填体强度进一步提升至工况三的全部 2.5 MPa 时,仅出现少量塑性区域。

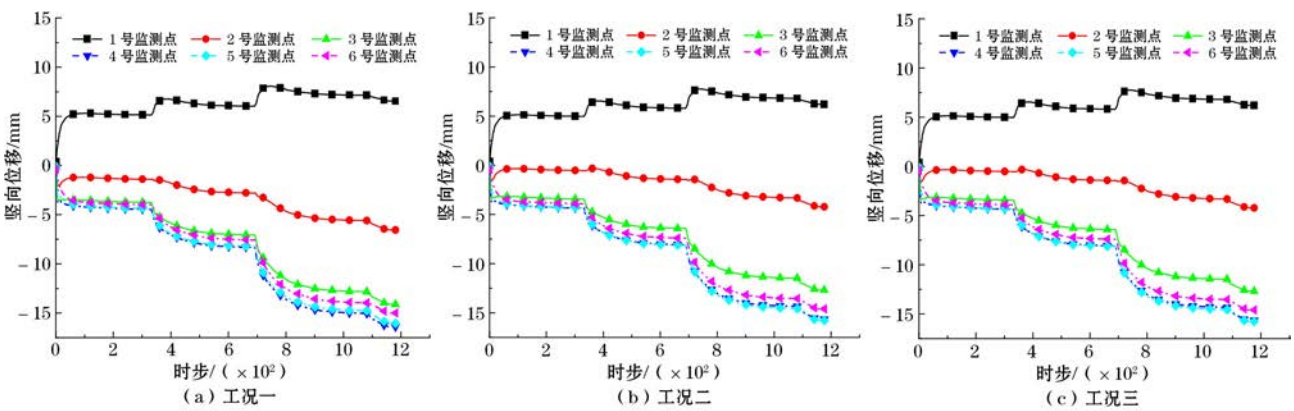



**图 10　不同工况下的充填体内部监测点竖向位移变化情况**

**Fig.10　Changes of vertical displacement of monitoring points in filling body under different working conditions**

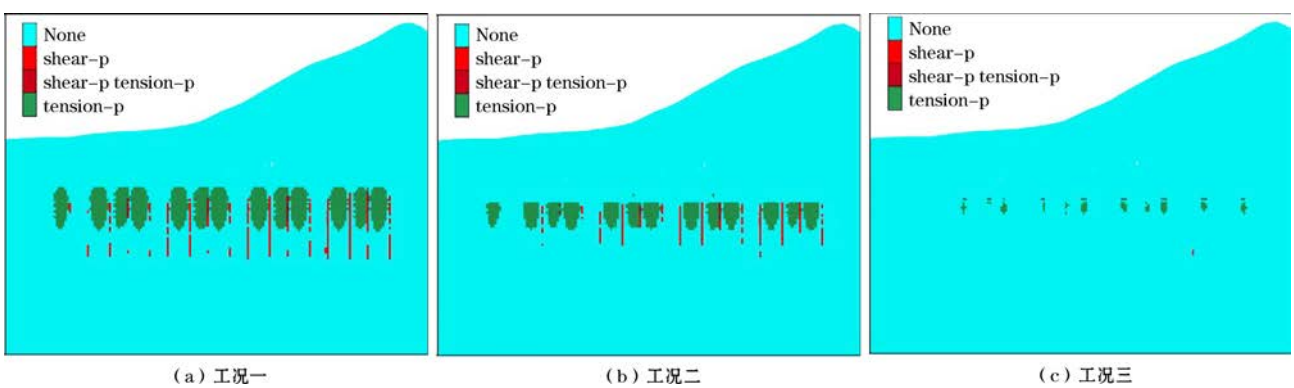



**图 11　不同工况下的塑性区分布云图**

**Fig.11　Plastic zone distribution cloud diagrams under different working conditions**

综合应力和位移的分析结果可知,当充填体强度全部采用理论计算值的最小值 1.5 MPa 时,采场充填体的稳定性稍显不足,顶部和底部的应力较大,顶部充填体存在较高的破坏风险。然而,当充填体全部采用理论计算值的最大值 2.5 MPa 时,采场充填体的稳定性非常好,充填体失稳和破坏的风险很低。考虑到充填成本,即使仅将采场顶部和底部的 10 m 改为 2.5 MPa 的充填体,也足以确保采场充填体的稳定性,使充填体的强度设计更为合理。

## 3　地表沉降变形研究

地下开采引起的上覆岩层及地表移动变形会直接影响地表建筑物的安全,较大的变形将会引起建筑物的破损。为了确保工况二条件下地表建筑物的安全,在矿体上方设置地表沉降监测线(见图 12),并计算其倾斜、水平和曲率变形值以判断其安全性。

通过对采场充填过程的模拟分析,根据地表监测线的位移情况计算出相应的最大倾斜、曲率以及水平变形,如图 13 所示。经计算,在采场充填体顶、底部 10 m 强度为 2.5 MPa、中部强度为 1.5 MPa 的工况下,地表监测线的最大倾斜变形 $i=0.109$ mm/m,最大曲率 $k=0.181\times10^{-3}$ mm/m,最大 $X$ 方向水平变形 $\varepsilon=-0.024$ mm/m,最大 $Y$ 方向水平变形 $\varepsilon=0.059$ mm/m,均满足安全规程允许的地表沉降对构筑物影响的要求[20]。

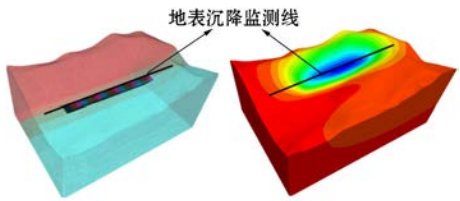



**图 12　地表监测线位置**

**Fig.12　Position of surface monitoring lines**

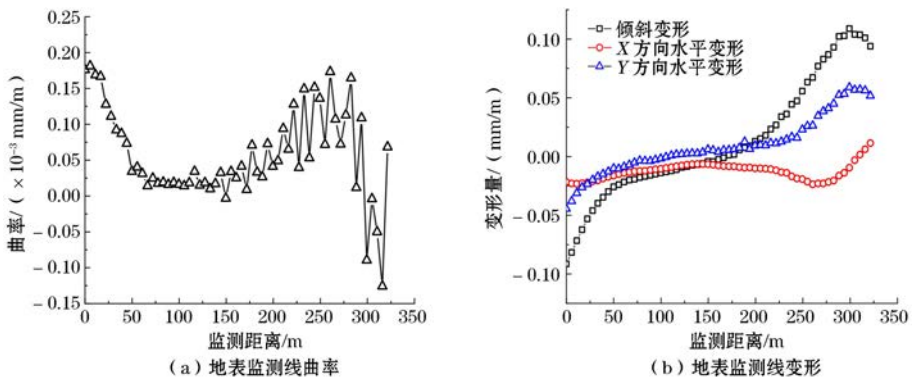



**图 13　地表监测线变形情况**

**Fig.13　Deformation of surface monitoring lines**

## 4　结论

结合理论计算与 FLAC3D 数值模拟,针对某锂辉石矿浅埋 X 号矿体进行了不同工况条件下的大直径深孔空场嗣后充填采矿法采场充填体合理强度研究,探究了采场充填体内部的应力、位移及地表沉降变形规律,得出以下主要结论。

(1) 结合矿山实际条件,采用了 Thomas 模型法、安庆铜矿经验公式法、覆岩承重计算法、蔡嗣经经验公式法和 Mitchell 计算法等 5 种理论公式,得出充填体设计强度为 1.5～2.5 MPa。

(2) 随着开挖过程的进行,充填体内部的最大主应力逐渐增加,并以压应力为主,压应力的最大值出现在充填体的顶、底板处。在充填采空区时,充填体强度变化虽然对最大主应力和最小主应力峰值的影响不大,但充填体强度的增加减小了应力辐射范围。

(3) 随着充填体强度的增加,一方面,充填体对采场顶板下沉的抑制作用得到增强;另一方面,充填体强度的增加,减少了采场顶板下沉的空间,进一步限制了顶板的变形,且充填体强度对顶板的约束效果优于地表。另外,受开挖扰动的影响,充填体内部的位移呈现阶梯状的变化规律。

(4) 在采场充填体顶、底部 10 m 强度为 2.5 MPa、中部强度为 1.5 MPa 的工况下,地表监测线的最大倾斜变形 $i=0.109$ mm/m,最大曲率 $k=0.181\times10^{-3}$ mm/m,最大 $X$ 方向水平变形 $\varepsilon=-0.024$ mm/m,最大 $Y$ 方向水平变形 $\varepsilon=0.059$ mm/m,均满足安全规程允许的地表沉降对构筑物影响的要求。

**参考文献(References):**


[1] 杨蕾,邱景平,邢军,等.充填体与岩体强度合理匹配下的采场结构参数优化[J].金属矿山,2016(3):10-14.
YANG Lei, QIU Jingping, XING Jun, et al. Optimization of stope structure parameters based on strength match between backfill and rock mass[J]. Metal Mine,2016(3):10-14.

[2] 李再易,尹丽冰,孙远江,等.某矿充填体合理强度研究[J].采矿技术,2024,24(1):174-179.
LI Zaiyi, YIN Libing, SUN Yuanjiang, et al. Study on reasonable strength of filling body in a mine[J]. Mining Technology,2024,24(1):174-179.

[3] 邱景平,郭镇邦,陈聪,等.上向进路充填采矿法充填体强度设计[J].中国矿业,2018,27(11):104-108.
QIU Jingping, GUO Zhenbang, CHEN Cong, et al. Filling body strength design of the upward drift stoping and filling method[J]. China Mining Magazine,2018,27(11):104-108.

[4] 侯永强.某矿山深部开采充填体强度及充填方案优选研究[D].南昌:江西理工大学,2018.
HOU Yongqiang. Study on the strength and filling scheme of deep fill mining in a mine[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology,2018.

[5] 刘光生,杨小聪,郭利杰.基于采充时序的空场嗣后充填体强度要求优化研究[J].有色金属工程,2019,9(10):85-94.
LIU Guangsheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie. Optimization research on backfill strength requirement of open stoping with subsequent backfill mining based on excavating and filling sequences[J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(10):85-94.

[6] 贺桂成,刘永,丁德馨,等.废石胶结充填体强度特性及其应用研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(1):74-79.
HE Guicheng, LIU Yong, DING Dexin, et al. Strength characteristic of cemented waste rock backfills and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013,30(1):74-79.

[7] 黄德镛,贾子月,吕世玮,等.基于正交设计试验方案的云南某铜矿采场结构参数优化研究[J].有色金属工程,2023,13(4):111-119.
HUANG Deyong, JIA Ziyue, LYU Shiwei, et al. Study on optimization of stope structure parameters of a copper mine in Yunnan based on orthogonal design test scheme[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(4):111-119.

[8] 熊朝辉,谭玉叶,楚立申,等.高阶段嗣后分层胶结充填体强度及结构优化研究[J].金属矿山,2022(3):35-42.
XIONG Chaohui. TAN Yuye, CHU Lishen, et al. Study on strength and structure optimization of high-stage subsequent layered cemented backfill[J]. Metal Mine,2022(3):35-42.

[9] 王谦源,袁庆盟,林敏,等.空场嗣后充填体稳定性分析与带式充填结构设计[J].矿业研究与开发,2024,44(6):26-33.
WANG Qianyuan, YUAN Qingmeng, LIN Min, et al. Stability analysis on subsequent filling body in open field and design of belt filling structure[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):26-33.

[10] 林卫星,石磊,江科,等.特大型贫铁矿高质量低成本充填技术研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):42-48.
LIN Weixing, SHI Lei, JIANG Ke, et al. Research on high-quality and low-cost filling process for large lean iron ore mines[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):42-48.

[11] 王社光,杨志强,王立杰,等.阶段嗣后充填采场充填体合理强度设计[J].现代矿业,2023,39(8):79-81+85.
WANG Duguang, YANG Zhiqiang, WANG Lijie, et al. Reasonable strength design of filling body in stage subsequent filling stope[J]. Modern Mining,2023,39(8):79-81+85.

[12] 黄庆享,李亮.充填材料及其强度研究[J].煤矿开采,2011,16(3):38-42.
HUANG Qingxiang, LI Liang. Research on stowing material and its strength[J]. Coal Mining Technology,2011,16(3):38-42.

[13] 张云韦,张际敏,林春霞,等.喀拉通克铜镍矿下向空场嗣后充填采场充填体配比研究[J].中国矿业,2021,30(增刊1):284-288.
ZHANG Yunwei, ZHANG Jimin, LIN Chunxia, et al. Study on the ratio of filling body in the subsequent filling stope of downward open stope in Karatunk copper-nickel mine[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(Suppl. 1):284-288.

[14] 邹南荣,尚振华,秦忠虎.深部铜矿高阶段充填体强度设计及稳定性计算[J].采矿技术,2017,17(6):30-33+39.
ZOU Nanrong, SHANG Zhenhua, QIN Zhonghu. Strength design and stability calculation of high-stage filling body in deep copper mine[J]. Mining Technology,2017,17(6):30-33+39.

[15] 占飞,付玉华,杨世兴.某铜矿胶结充填体的强度值设计[J].有色金属科学与工程,2018,9(2):75-80.
ZHAN Fei, FU Yuhua, YANG Shixing. Design of strength value of cemented filling body in a copper mine[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(2):75-80.

[16] 闫保旭,朱万成,侯晨,等.金属矿山充填体与围岩体相互作用研究综述[J].金属矿山,2020(1):7-25.
YAN Baoxu, ZHU Wancheng, HOU Chen, et al. Interaction between backfill and rock during metal mining:a review[J]. Metal Mine,2020(1):7-25.

[17] 高玉兵,杨军,张星宇,等.深井高应力巷道定向拉张爆破切顶卸压围岩控制技术研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(10):2045-2056.

GAO Yubing, YANG Jun, ZHANG Xingyu, et al. Study on surrounding rock control of roadways in deep coal mines based on roof cutting and pressure release technology by directional tensile blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(10):2045-2056.

[18] 李季阳,谭卓英,陈首学,等.基于协同理念的地下采场稳定性分析及结构参数优化[J].金属矿山,2015(7):16-20.
LI Jiyang, TAN Zhuoying, CHEN Shouxue, et al. Stability analysis for underground stopes and optimization of structural parameters based on the concept of synergy[J]. Metal Mine,2015(7):16-20.

[19] 许传金.某矿山充填体内部应力分布规律及强度设计研究[D].南昌:江西理工大学,2021.
XU Chuanjin. Study on stress distribution and strength design of filling body in a mine[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology,2021.

[20] 孟凡明,匡鑫,王祯,等.马郡城铁矿"三下"开采隔离层厚度及回采顺序研究[J].金属矿山,2022(8):20-26.
MENG Fanming, KUANG Xin, WANG Zhen, et al. Study on the thickness of isolation layer and mining sequence in three-underground mining of Majuncheng Iron Mine[J]. Metal Mine,2022(8):20-26.