某萤石矿空区合理充填体强度及矿柱回采稳定性研究*

朱晨迪[1,2],吴明炎[3],林卫星[1,2],符洲云[1,2]

(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.顺昌县埔上萤石有限公司, 福建 南平市 353205)

摘要:采空区治理对残矿回采至关重要,选择合理强度的充填体处理采空区,防止矿柱因应力集中而发生提前失稳,是保证后续矿柱安全、经济回采的关键前提。针对某萤石矿早期遗留采空区及残留矿柱问题,采用适用于中厚矿体的浅孔留矿嗣后充填采矿法回采矿柱,并通过理论经验公式初步确定充填体强度范围为1.06~2.08 MPa,再结合数值模拟确定最终充填体强度。结果表明:充填体强度为2.0 MPa时,可有效缓解充填体顶、底部应力集中现象,缩小两侧边墙卸压范围,使矿柱采场两侧边墙充填体位移变形不超过50 mm,同时可避免充填体矿柱间产生大面积塑性区贯通。现场采用2.0 MPa强度充填体治理采空区后,累计充填采空区体积337 339 m^3,采出残留顶、间柱矿石8.3万t,利润总额为3 688万元,在保障井下安全回采的同时实现了矿山经济效益的显著提升。

关键词:浅孔留矿嗣后充填采矿法;充填体强度;采空区治理;矿柱回采;数值模拟

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0080-09

Study on Reasonable Backfill Strength for Goafs and Stability of Pillar Mining in a Certain Fluorite Mine

Zhu Chendi[1,2], *Wu Mingyan*[3], *Lin Weixing*[1,2], *Fu Zhouyun*[1,2]

(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.Shunchang County Pushang Fluorite Co., Ltd., Nanping, Fujian 353205, China)

Abstract: The treatment of goafs is crucial for residual ore recovery. Selecting a backfill with reasonable strength to treat the goaf, so as to prevent the premature instability of pillars caused by stress concentration, is a key prerequisite for ensuring the safe and economic recovery of subsequent pillars. To address the problems of early left-over goafs and residual pillars in a certain fluorite mine, the short-hole shrinkage subsequent filling mining method suitable for medium-thick ore bodies was adopted to recover the pillars. Furthermore, the strength range of the backfill was preliminarily determined to be 1.06-2.08 MPa through theoretical empirical formulas, and then the final backfill strength was determined in combination with numerical simulation. The results show that when the backfill strength is 2.0 MPa, it can effectively alleviate the stress concentration phenomenon at the top and bottom of the backfill, reduce the pressure relief range of the side walls on both sides, ensure that the displacement and deformation of the backfill on the side walls of the pillar stope do not exceed 50 mm, and simultaneously avoid the large-area plastic zone penetration between the backfill and the pillar. After the goafs were treated with backfill with a strength of 2.0 MPa at the site, the cumulative volume of filled goafs is approximately 337 339 m^3. A total of 83 000 t of residual roof and sill pillar ores are recovered, and the total profit reaches 36.88 million yuan. While ensuring safe underground recovery, the economic benefits of the mine are significantly improved.

Key words: Short-hole shrinkage subsequent filling mining method, Backfill strength, Goaf treatment, Pillar recovery, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2025-10-27
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)
作者简介:朱晨迪(1992—),男,河南南阳人,硕士,工程师,主要从事采矿技术及工艺研究工作。E-mail:954138035@qq.com
通信作者:符洲云(1997—),男,苗族,湖南龙山人,硕士,工程师,主要从事矿山采矿技术等方面的研究工作。E-mail:fzy4001@163.com

0 引言

受技术与开采理念限制,矿山早期采用空场法回采矿石。该方法虽可简化流程、降低初期成本,但长期应用后,地下会遗留大量未处理采空区,残留矿柱也因长期承受上覆岩层荷载,在后期逐步出现裂隙发育、结构失稳等问题。这些隐患不仅威胁后续开采安全,易诱发顶板垮塌、地表沉陷,还会造成资源滞留浪费[1-2]。为化解上述风险,提升资源利用率,采空区充填治理成为研究关键。浅孔留矿嗣后充填采矿法适配复杂采空区,能同步回采矿柱并加固采空区,兼顾安全性与高效性,是此类矿山的优选方案[3]。

对于不同工况、不同围岩与矿体条件,需选择不同的充填体强度进行匹配。合理的充填体强度是保证井下空区治理后矿柱安全高效回采的必要条件,因此,需结合矿区实际条件,开展合理充填体强度研究。目前国内外学者针对井下回采后充填体强度已开展了诸多研究[4-7]。苗磊刚等[8]研究了不同配比下充填体强度演化特征,结合数值模拟手段分析了充填体力学承载机制随强度的变化规律,最终确定了某矿山最佳充填配比及强度。张强等[9]考虑爆破开采扰动等因素,通过有限元分析方法,对一步骤充填体进行爆破稳定性分析,据此给出张庄铁矿二期工程一步骤、二步骤充填体强度推荐值。王维等[10]综合充填体强度经验公式、弹塑性力学理论及数值模拟方法,分析了充填体强度对采场稳定性与地表岩移范围的影响,最终确定深部采场选用浅孔留矿嗣后充填采矿法,并确定充填体强度为 2.0 MPa。李广波等[11]通过力学推导分析,提出断层影响条件下充填体强度解析式,并辅以 FLAC3D 软件分析,得到最终的充填体强度最优模拟解。

本文针对某萤石矿开采现状,拟采用理论经验计算方法,初步获取充填体强度值,结合数值模拟进一步优化分析适用于现场工业应用的最终充填体强度。研究结果以期为矿山残留矿柱安全经济回采提供理论指导。

1 工程背景

1.1 开采技术条件

某萤石矿山矿区内共有 4 个萤石矿体,Ⅰ号矿体为主矿体,走向北东 45°～60°,倾向南东,倾角 55°～85°,矿体总长度约 700 m,矿体厚度为 2.86～32.72 m,平均厚度为 11.19 m,工程平均品位为 35.59%。矿区内岩石以坚硬半坚硬块状岩类为主,局部夹软弱岩石,结构类型主要为块状、碎裂结构,少量为散体结构,矿体及其顶底板围岩稳固性好,矿床开采条件较好。

该矿山设计产能 20 万 t/a,原采用留矿法进行回采,先回采矿房,回采后依靠矿柱支撑管理地压,采场垂直矿体走向布置,采场长 25 m,宽为矿体厚度,中段高度 35～40 m,共形成+230～+5 m 等 8 个中段。经前期回采,目前矿山遗留大量矿柱,其尺寸参数为:间柱宽度 6～10 m,顶柱高度 6～12 m,底柱高度 6～11 m。

1.2 残矿回采方案

因前期回采遗留大量采空区,采空区长时间受地应力、开采扰动等诸多因素影响,部分采空区出现垮塌并贯通至露天坑底或地表,矿柱回采困难。基于采空区引发或诱发的地质灾害具有突发性和隐蔽性,以及萤石资源的宝贵性,为提高资源的回收率,响应国家生态文明理念,确保矿山安全、经济、高效开采,实现矿山可持续发展,开展充填采矿法充填体强度研究,对采空区治理后再回采剩余矿柱具有重要意义。

根据矿体赋存状态,结合矿山现有工程布置,并充分考虑矿山人员所掌握的采矿方法与施工技术,提出适用于中厚矿体的浅孔留矿嗣后充填采矿法回采矿柱(见图 1)[12]。

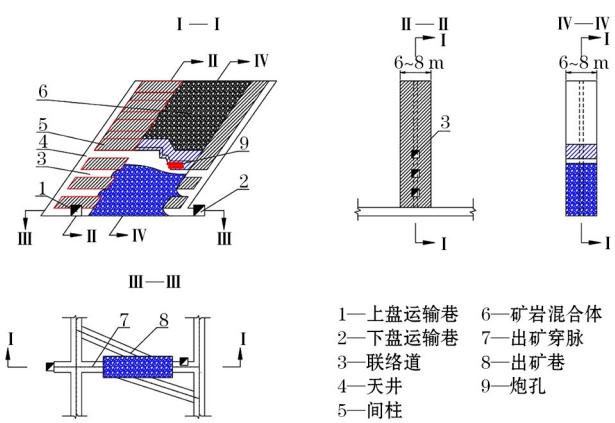


图 1 中厚矿体浅孔留矿嗣后充填采矿法示意

Fig.1 Schematic of short-hole shrinkage subsequent filling mining method for medium-thick ore bodies

该采矿方法实施需在两侧空区胶结充填养护结束后进行。采场垂直矿体走向布置,采场长度为矿体厚度,采场宽度为间柱宽度(6～10 m),采场高度为原阶段高度,分层高度为 4～6 m。以原有下盘沿脉运输巷为基础,垂直矿柱方向布置穿脉穿透上盘,

向两端开拓形成上盘沿脉运输巷道,并从上下盘巷道一侧向间柱中部掘进出矿穿脉。在矿柱上下盘围岩中垂直矿体走向方向布置上下盘采矿天井,并施工各分层的联络道。以穿脉为爆破面,沿走向方向向两端拉开,形成采场底部浅孔留矿的第一层回采自由面,从下自上依次逐层回采。其主要技术经济指标见表 1。

表 1 浅孔留矿嗣后充填采矿法主要技术经济指标

Table 1 Main technical and economic indexes of short-hole shrinkage subsequent filling mining method

采场生产能力/(t/d)	采切比/(m/kt)	凿岩机台班效率/(m/台班)	铲运机台班效率/(t/台班)	矿石损失率/%	矿石贫化率/%
80～100	4.5	40～50	100～120	10	8

2 充填体强度分析及数值模型构建

2.1 充填体强度理论分析

充填体强度设计需充分考虑充填体本身应力分布、井下开采爆破扰动及地下工程环境等多方面因素,其中充填体自身因素是合理设计充填体强度的最基本条件。针对围岩与充填体强度机理研究,国内外目前形成了多种充填体强度理论计算方法[13-14],不同的理论模型对应不同的理论值。本文以较为经典的 Mitchell 计算法、杨辛公式法、覆岩承重公式法、蔡嗣经经验公式法及安庆铜矿经验公式进行理论计算,初步获得充填体强度,为后续数值模拟分析及充填体强度优化提供依据。

不同安全系数下充填体理论强度随高度的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,Mitchell 计算法、杨辛公式法计算结果整体偏小,属于理论计算方法,蔡嗣经经验公式法由现场工业应用的统计规律推导得出,计算结果偏大。在得到计算结果后,常根据不同的安全系数确定最终的理论取值范围。根据国内外安全系数取值经验,Mitchell 计算法、杨辛公式法及安庆铜矿经验公式法的安全系数通常取 1.5～2.0,覆岩承重公式法、蔡嗣经经验公式法的安全系数通常取 1.2～1.5。综合上述经验公式及理论公式,辅以安全系数进行取值,得到该萤石矿充填体强度初步设计范围为 1.06～2.08 MPa,但该取值仅考虑了充填体自身的承受能力,并未考虑开采爆破扰动及外界环境等因素的影响。因此,合理的充填体设计强度还需通过数值模拟计算进一步确定,并开展现场试验验证。

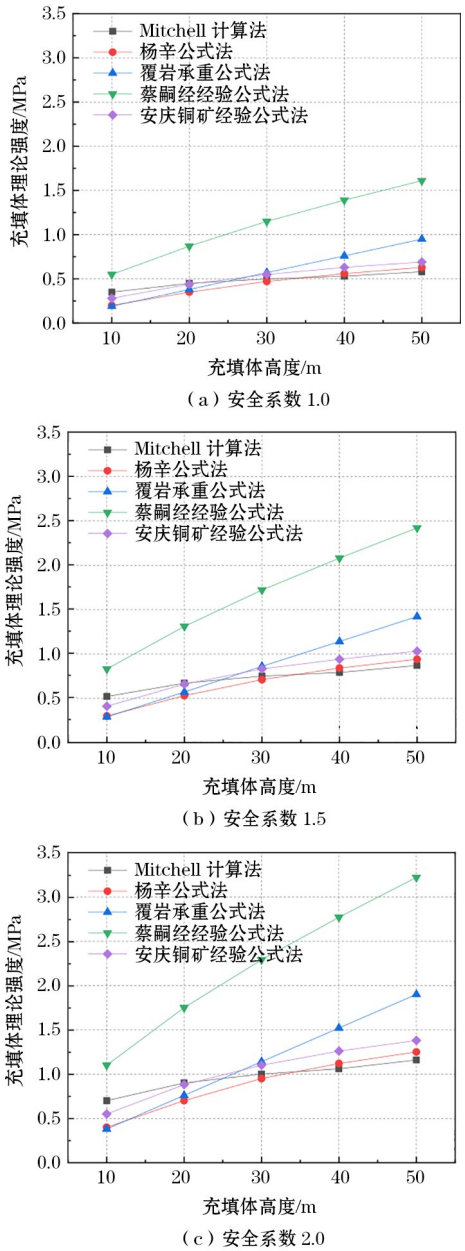


图 2 不同安全系数下充填体理论强度随高度的变化曲线

Fig.2 Variation curves of theoretical strength of backfill with height under different safety factors

2.2 数值模型建立及充填体强度方案确定

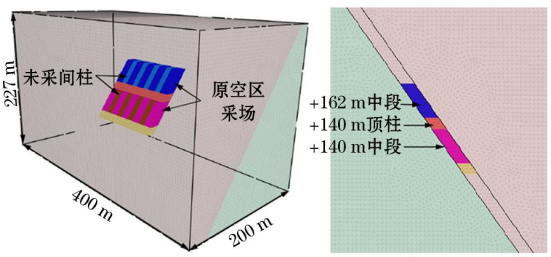
根据矿山当前开采计划,目前正准备回采+140 m 中段采场间柱,需要对+140 m 中段原遗留采空区分别充入不同强度的充填体,以此论证矿柱回采过程中充填体强度的合理性。以+140 m 中段及其上部+162 m 中段为研究对象,建立该萤石矿充填体强度分析计算模型,模型尺寸为 400 m×200 m×227 m(长×宽×高)。矿体模型上边界距离地表 53 m,对整体模型上边界赋予岩体容重参数后开展数值模拟,还原真实地应力状态。数值模拟参数见表 2。

表 2　数值模拟相关材料物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of materials for numerical simulation

材料类型	密度/(kg/m³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
上盘围岩	2 410	11.75	1.38	11.80	4.84	26.41	0.26
下盘围岩	2 460	15.53	2.61	11.05	5.56	24.85	0.28
萤石矿体	2 440	15.99	1.25	12.79	5.98	32.54	0.27
1.5 MPa 充填体	1 950	1.50	0.15	0.85	0.47	31.00	0.28
2.0 MPa 充填体	2 100	2.00	0.22	1.05	0.65	29.83	0.28
2.5 MPa 充填体	2 200	2.50	0.27	1.19	0.78	30.50	0.28

参照矿山＋140 m 中段目前开采现状，对＋140 m 中段及＋162 m 中段原采场采空区进行充填处理，＋140 m 中段上部留有顶柱，采空区内的充填体宽度为 15 m，间柱宽度为 10 m，中段高度为 32 m，＋140 m 中段顶柱高度为 10 m。数值模拟计算模型如图 3 所示。



（a）三维模型　　（b）中段示意

图 3　数值模拟计算模型

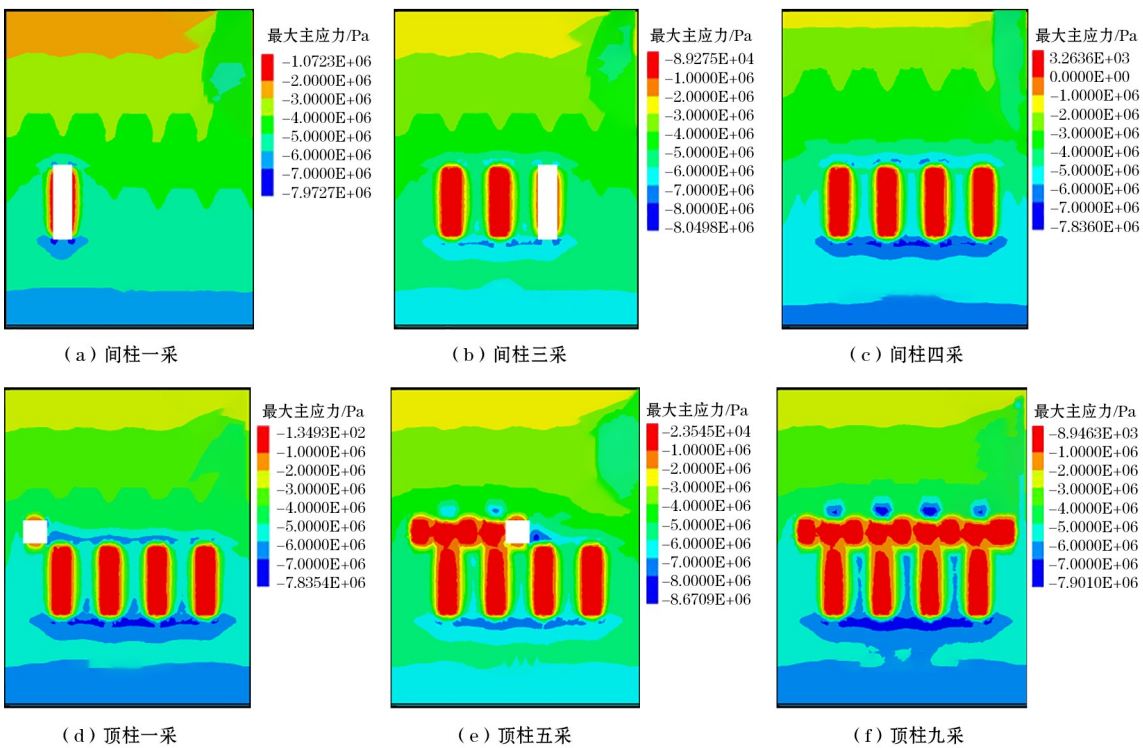
Fig.3　Calculation model for numerical simulation

建立模型后，根据前文得到的充填体理论计算值 1.06～2.08 MPa，考虑外部开采扰动等因素，设计＋140 m 中段原采空区充填体强度为 1.5 MPa、2.0 MPa、2.5 MPa，分别记为方案一至方案三，矿柱回采方式为逐个连续回采，待间柱采完后依次对顶柱进行采充，单个顶柱回采长度为 12.5 m，以此论证矿柱回采过程中充填体强度的合理性。

3　合理充填体强度模拟结果分析

3.1　不同方案下应力结果分析

图 4 和图 5 为方案一间柱采场及顶柱采场动态开挖过程中周边充填体应力变化云图。



（a）间柱一采　（b）间柱三采　（c）间柱四采

（d）顶柱一采　（e）顶柱五采　（f）顶柱九采

图 4　方案一回采过程中充填体最大主应力云图

Fig.4　Maximum principal stress cloud diagrams of backfill during mining in Scheme 1

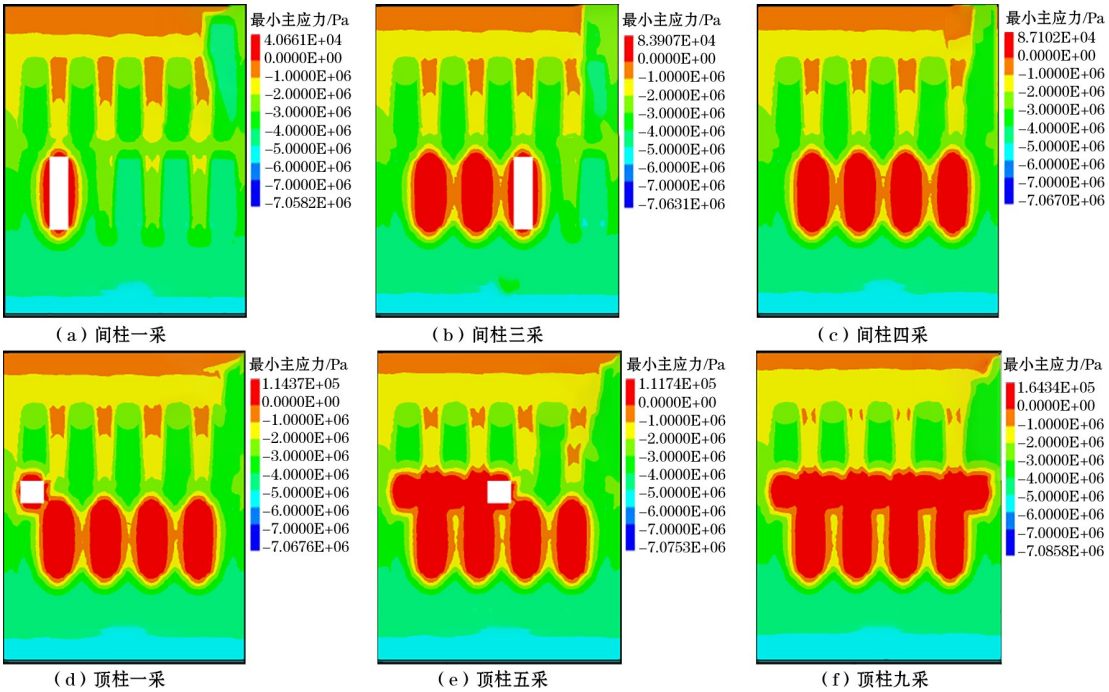
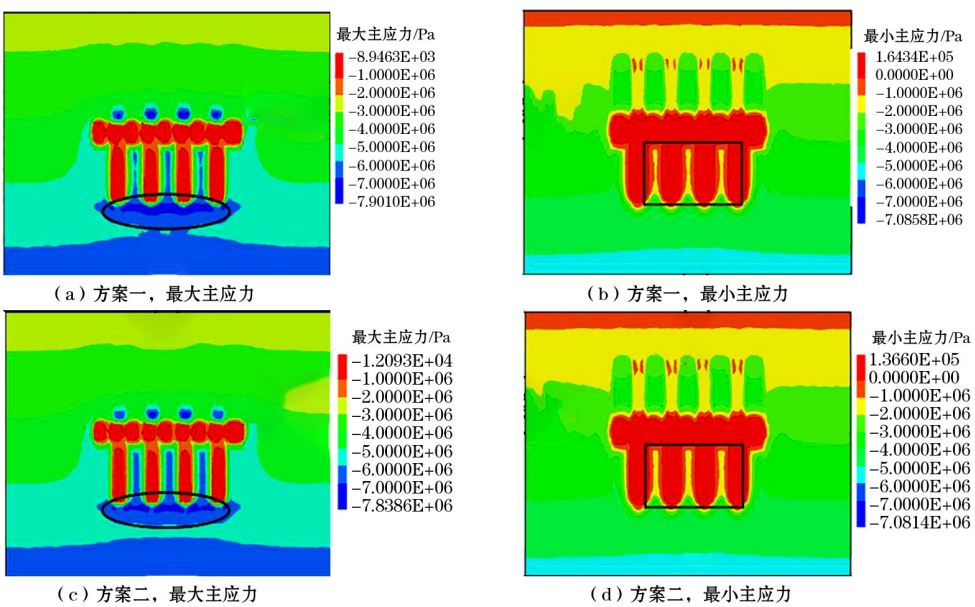


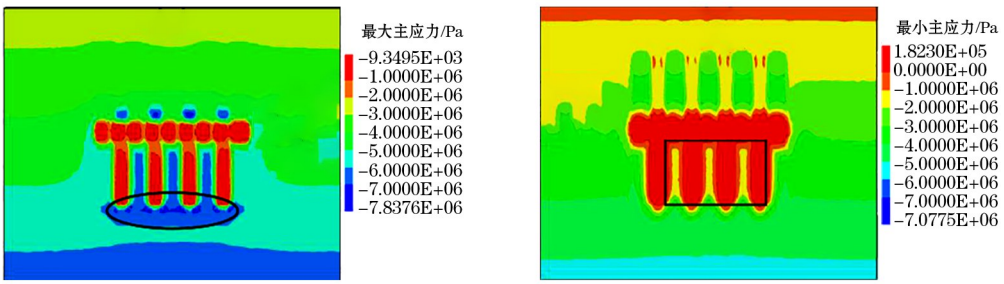
图 5 方案一回采过程中充填体最小主应力云图

Fig.5 Minimum principal stress cloud diagrams of backfill during mining in Scheme 1

整个开采过程中,充填体整体基本呈现受压状态,间柱一采完成后,采场底部充填体与围岩交界位置出现显著的应力集中现象,采场右侧原治理采空区充填体位置出现一定程度卸压,随着间柱采场采充过程的不断进行,原采场采空区内的充填体逐步替代未回采的矿柱,起到维持间柱采场回采稳定性的作用。顶柱采场回采过程中,当上部为+162 m中段的充填体时,顶部卸压明显;而当上部为未采间柱时,顶部最大主应力分布较为均匀,顶柱回采后,顶部应力状态整体呈波浪状起伏。

不同方案下应力状态对比分析如图 6 所示。由图 6 可知,在对原采场空区及现回采空区进行充填作业时,充填体强度对应力极限值并无太大影响,最大主应力峰值在 7.84～7.90 MPa 内波动,但对于同一采场周边区域,应力影响范围存在显著差异,随着充填体强度逐步提高,采场上部与底部的应力集中现象得到明显改善,应力集中范围缩小,充填体边墙两侧的受拉范围也同步减小,进一步说明高强度的充填体能够有效承担井下围岩压力,保障间柱及顶柱回采过程的安全稳定。





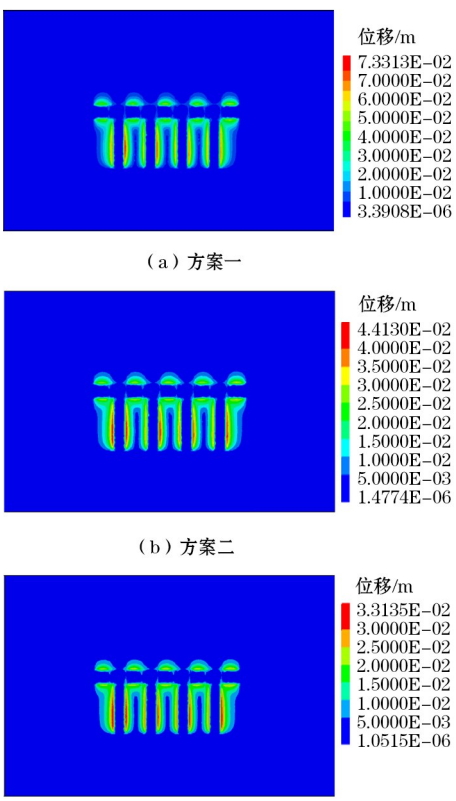
（e）方案三，最大主应力　　（f）方案三，最小主应力

图 6　不同方案下应力状态对比

Fig.6　Comparison of stress state under different schemes

3.2　不同方案下位移结果分析

图 7 为不同方案回采完成后的位移云图。由图 7 可知，随着充填体强度提高，间柱采场回采完成后，充填体边墙两侧位移逐渐减小，同时充填体对顶柱采场回采后的顶板沉降也起到了一定的约束作用。说明提升充填体强度能够有效限制间柱采场回采后充填体与矿柱发生变形。



（a）方案一

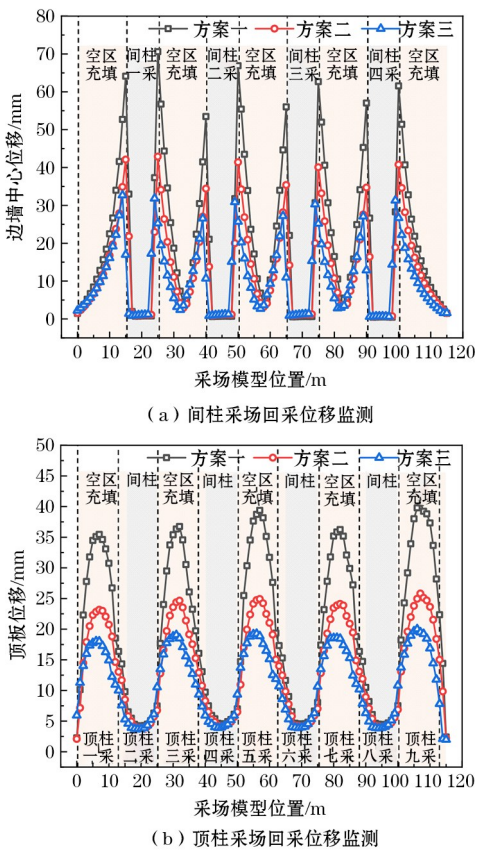
（b）方案二

（c）方案三

图 7　不同方案回采完成后的位移云图

Fig.7　Displacement cloud diagrams after mining completion for different schemes

在模型中心设置剖面，于间柱边墙中部及顶柱上部从左向右依次设置监测点，监测位移数据，得到不同位置充填体位移监测曲线，如图 8 所示。



（a）间柱采场回采位移监测

（b）顶柱采场回采位移监测

图 8　不同位置充填体位移监测曲线

Fig.8　Displacement monitoring curves of backfill at different positions

方案一回采后，边墙中心平均位移值约为 61.54 mm，位移峰值为 70.59 mm，发生在间柱一采回采后右侧充填体位置。顶柱回采时顶板最大位移值出现在＋162 m 中段充填体位置处，分别为顶柱的一采、三采、五采、七采及九采位置，顶板平均位移值约为 37.69 mm，位移峰值为 40.60 mm，发生在最后的顶柱九采位置；方案二回采后，边墙平均位移值约为 38.96 mm，位移峰值为 42.88 mm，相较于方案一平

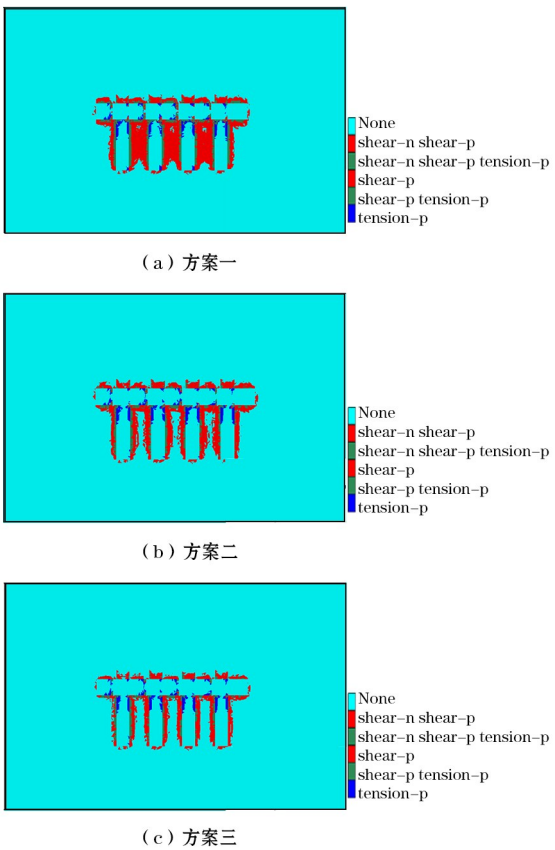
均位移降幅达 36.69%,顶柱回采时顶板平均位移值约为 24.51 mm,位移峰值为 25.82 mm,相较于方案一平均位移降幅达 34.97%;方案三回采后边墙平均位移值约为 29.75 mm,位移峰值为 32.69 mm,相较于方案一平均位移降幅达 51.66%,顶柱回采时顶板平均位移值约为 18.99 mm,位移峰值为 20.01 mm,相较于方案一平均位移降幅达 49.62%。

根据采场容许位移判据[15],方案一回采后,边墙位移超过 50.00 mm,该方案下的充填体强度能够基本保证间柱回采后边墙的稳定性,但仍存在潜在风险;顶柱回采后位移峰值未超过 50.00 mm,能够保证回采后周边围岩及充填体稳定可靠。采用方案二及方案三时,间柱回采后边墙位移缩减至 20.00~50.00 mm 区间内,能够有效保障边墙的稳固性。

3.3 不同方案下塑性破坏结果分析

图 9 为不同充填体强度方案下回采完成后的塑性区云图。由图 9 可知,各方案下塑性区破坏分布规律基本一致,在对原采场采空区充填后,间柱回采过程中,充填体因起到承载作用,其内部以受压剪切破坏为主,并随着充填体强度不同,剪切破坏向充填体内部的扩展深度存在差异。采场回采完成后,邻近空区的充填体发生卸荷受拉,出现拉伸-剪切混合破坏,充填体上表面出现小范围拉伸破坏。顶柱回采过程中,因采场尺寸较小,充填体左右两侧塑性破坏现象不明显,顶板位置发育明显的剪切及拉-剪混合破坏,当上部+162 m 中段为充填体而非间柱时,该破坏特征更为显著,呈现“U”形塑性破坏区。

此外,随着充填体强度提高,采用 1.5 MPa 较低强度充填体时,间柱之间塑性区连接贯通;采用方案二(2.0 MPa)时,贯通位置开始出现分离;采用方案三(2.5 MPa)时,间柱之间的塑性破坏范围进一步减小,顶柱回采时的塑性区分布规律类似。对不同方案间柱回采各步骤塑性区最大深度进行统计可知,方案一间柱一采时,塑性区最大深度为 6.03 m,间柱二采、三采及四采时,因充填体强度不足,充填矿柱内部塑性区直接贯通,扩展深度为间柱宽度,为 15.0 m;方案二间柱一采时,塑性区最大深度为 4.72 m,间柱二采、间柱三采时,最大深度为 6.67 m,间柱四采时,最大深度为 7.41 m,出现在四步间柱回采空区充填后左侧;方案三间柱一采时,塑性区最大深度为 4.06 m,间柱二采时,最大深度为 4.23 m,间柱三采时,最大深度为 4.41 m,间柱四采时,最大深度为 1.74 m。



(a) 方案一

(b) 方案二

(c) 方案三

图 9 不同方案回采完成后的塑性区云图

Fig.9 Plastic zone cloud diagrams after mining completion for different schemes

3.4 综合分析

从应力分布结果可知,采用不同强度充填体处理原留矿法遗留的采空区后,在回采后续矿柱时,该充填体能起到控制中段水平地压稳定性的作用;从位移结果可以判断,采用方案二及方案三设计强度的充填体时,在间柱回采过程中,充填体能够保证间柱及顶柱采场周边不发生较大位移;从塑性区结果可以判断,对于方案一,间柱回采后出现了大规模的充填体内部塑性区贯通,对于方案二和方案三,在间柱回采过程中,充填体虽产生了一定的拉-剪破坏,但仅出现在充填体矿柱表面,并未在整个充填体矿柱产生大面积塑性区贯通。综合分析认为,方案二与方案三的充填体强度设计能够保障充填矿柱及采场的整体稳定性,满足采充作业的安全要求。进一步对比方案二与方案三可知,方案三回采后边墙位移峰值较方案二减小了 1.02 cm,塑性区最大深度峰值上减小 3.0 m,整体降幅较小,结合矿山充填经济成本,采用 2.0 MPa 强度充填体不仅可以满足矿

山安全回采需求,而且可以保障回采的经济性。

4 现场应用

矿山原采用浅孔留矿法开采,导致井下残留多处采空区,部分采空区产生局部垮塌,甚至贯通至地表露天区域,造成残留矿柱回采困难。同时,矿山存在废石及尾矿处理压力,结合矿岩稳定性条件,采用适用于中厚矿体开采的浅孔留矿嗣后充填采矿法,并通过研究合理的充填体强度,以解决矿山实际生产问题。

现场调查结果表明,该矿山+95~+162 m 中段共计 40 个采空区,其中+95 m 中段有 6 个采空区,总体积为 46 480 m^3,+140 m 中段有 20 个采空区,总体积为 114 389 m^3,+162 m 有 14 个采空区,总体积为 206 850 m^3,除部分垮塌采场外其余采空区全部按 2.0 MPa 设计强度完成充填处理,累计充填体积为 337 339 m^3。截至目前,充填处理后累计采出残留顶、间柱矿石 8.3 万 t,结合矿山采充作业、提升运输等生产成本,空区充填治理后回采矿柱产生的经济效益见表 3。

表 3 浅孔留矿嗣后充填采矿法回采技术经济指标

Table 3 Technical and economic indexes stoping by short-hole shrinkage subsequent filling mining method

地质矿量/万 t	地质品位/%	损失率/%	贫化率/%	采出矿量/万 t	出矿品位/%	萤石精矿成本/(元/t)	萤石精矿价值/(元/t)	利润总额/万元
8.5	23.4	10	8	8.3	21.5	245	3 450	3 688

5 结论

(1) 针对矿山目前遗留大面积采空区及矿柱回采问题,基于矿岩稳定性及现有井下工程,选择充填采矿法预先治理遗留采空区,并提出适用于中厚矿柱回采的浅孔留矿嗣后充填采矿法。根据矿山实际工况,通过国内外较为经典的 Mitchell 计算法、杨辛公式法、覆岩承重公式法、蔡嗣经经验公式法及安庆铜矿经验公式法进行理论计算,结合相应的安全系数取值,获得该萤石矿充填体强度初步设计范围为 1.06~2.08 MPa。考虑开采影响及井下环境等因素,选择 1.5 MPa、2.0 MPa 及 2.5 MPa 作为数值模拟试验方案。

(2) 采空区进行充填处理后,充填体在矿柱回采过程中主要承受压应力,随着充填体强度提升,采场上部与底部的应力集中现象得到明显改善,充填体边墙两侧受拉范围进一步缩减。提高充填体强度能够显著控制矿柱采场边墙与顶柱采场顶板的位移变形,大幅改善矿柱采场边墙中部塑性区域破坏状态,减少充填体产生拉伸与剪切破坏,以保障回采过程的安全性。

(3) 对比各方案数值模拟结果可知,当采用方案二(2.0 MPa)充填时,采场边墙及顶板位移可控制在合理范围内,位移峰值分别为 42.88 mm、25.82 mm;充填体之间未出现大范围塑性区贯通,充填体可实现有效承压。结合回采经济性因素,选择 2.0 MPa 作为最终充填体强度。

(4) 现场工程应用结果表明,该矿山共计 40 个采空区,累计充填体积为 337 339 m^3,采出残留顶、间柱矿石 8.3 万 t,为矿山带来约 3 688 万元的经济效益。

参考文献(References):

[1] 刘芳,陶悦,张紫峰,等.某金属矿山采空区塌陷地质灾害危险性评估与治理研究[J].中国矿业,2025,34(增刊 1):59-63.
Liu Fang, Tao Yue, Zhang Zifeng, et al. Research on geological hazard risk assessment and management caused by goaf collapse in a certain metal mine[J]. China Mining Magazine,2025,34(Suppl.1):59-63.

[2] 陈兰兰,肖海平.金属矿山采空区稳定性研究现状分析[J].中国钨业,2017,32(3):17-21.
Chen Lanlan, Xiao Haiping. Research status of metal mine goaf stability[J]. China Tungsten Industry, 2017, 32(3): 17-21.

[3] 鄂玉强.分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿工艺优化研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):6-9.
E Yuqiang. Research on mining technology optimization for sublevel drilling and stage open-stope method with backfill [J]. Mining Research and Development,2022,42(3):6-9.

[4] 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.

[5] 刘涛禹,张百胜,郭俊庆,等.切顶条件下沿空留巷组合充填体合理参数研究[J].矿业研究与开发,2024,44(6):34-41.
Liu Taoyu, Zhang Baisheng, Guo Junqing, et al. Reasonable parameters of combined filling body in gob-side entry retaining under roof cutting condition[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):34-41.

[6] 陈宁青.大空区充填体结构稳定分析与强度设计[J].金属矿山,2023(4):33-36.
Chen Ningqing. Structural stability analysis and strength design of filling body in large goaf[J]. Metal Mine,2023(4):33-36.

[7] 温震江,肖柏林,韦寒波,等.基于能量匹配关系确定胶结充填体固化时间及合理强度[J].岩石力学与工程学报,2021,40(增刊1):2701-2707.
Wen Zhenjiang, Xiao Bolin, Wei Hanbo, et al. Determination of solidification time and reasonable strength of cemented backfill based on energy matching relationship [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(Suppl.1):2701-2707.

[8] 苗磊刚,牛园园,潘泱波.某矿尾砂胶结充填体强度演化特征及力学效应研究[J].金属矿山,2023(3):52-58.
Miao Leigang, Niu Yuanyuan, Pan Yangbo. Study on strength evolution characteristics and mechanical effects of cemented tailings backfill in a mine[J]. Metal Mine, 2023 (3):52-58.

[9] 张强,于浩泽,东龙宾.考虑爆破影响的充填体强度研究[J].矿业工程,2025,23(5):6-9+29.
Zhang Qiang, Yu Haoze, Dong Longbin. Study on backfill strength considering blasting impact [J]. Mining Engineering,2025,23(5):6-9+29.

[10] 王维,王亚军,王玉丁,等.保安矿柱新圈定可采范围内采场充填体合理强度研究[J].矿业研究与开发,2025,45(8):86-95.
Wang Wei, Wang Yajun, Wang Yuding, et al. Study on reasonable strength of stope filling body in newly delineated recoverable range of security pillar[J]. Mining Research and Development,2025,45(8):86-95.

[11] 李广波,盛宇航,吴再海,等.基于断层影响下的充填体强度需求优化研究[J].有色金属科学与工程,2023,14(5):684-691.
Li Guangbo, Sheng Yuhang, Wu Zaihai, et al. Research on strength requirement optimization of infill bodies under the influence of faults [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(5):684-691.

[12] 许恒朋,刘允秋.无底柱浅孔留矿嗣后充填采矿法在早子沟金矿的应用[J].现代矿业,2016,32(5):36-37.
Xu Hengpeng, Liu Yunqiu. Application of non-pillar shallow hole shrinkage subsequent filling mining method in Zaozigou Gold Mine[J]. Modern Mining,2016,32(5):36-37.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 程斌,杨宁,吴会明,等.充填体包覆条件下残留矿柱回采方案及结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(7):27-35.
Cheng Bin, Yang Ning, Wu Huiming, et al. Study on mining scheme and optimization of structural parameters of residual pillar under the condition of filling body enveloping [J]. Mining Research and Development,2025,45(7):27-35.