



崩落法转阶段空场嗣后充填法开采 安全隔离层厚度的确定

王志东, 金其忠, 李小辉

(福建马坑矿业股份有限公司, 福建 龙岩 364000)

摘要: 为推进绿色矿山建设, 解决崩落法转阶段空场嗣后充填法中安全开采的核心技术难题, 需科学确定隔离层安全厚度以保障采矿安全。文章基于破裂拱理论和弹性力学小变形薄板理论, 结合矿体物理力学参数与采场结构参数分别计算得出 12、14 m 理论安全厚度, 考虑一定冗余厚度, 综合确定 15 m 开采安全隔离层厚度; 并经过 6 a 生产实践持续验证。研究表明: 采用两种理论综合分析计算的双重验证方法能有效确定隔离层安全厚度, 保障矿山开采过程中采空区顶板稳定, 实现 500 万吨/a 产能的矿山嗣后充填工艺持续安全稳定衔接。该技术路径可为同类矿山崩落法转嗣后充填法提供可复用的方法论体系。

关键词: 隔离层矿柱; 安全开采; 崩落法转嗣后充填法

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)05-0001-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.05.054

Determination of the thickness of safety isolation layer by filling method after the stage of collapse method

WANG Zhidong, JIN Qizhong, LI Xiaohui

(Fujian Makeng Mining Co., Ltd., Longyan 364000, Fujian, China)

Abstract: In order to promote the construction of green mines and address core technical challenges in safe mining during the transition from the caving method to the open stope subsequent backfill method, it is imperative to scientifically determine the safety thickness of the isolation layer to ensure mining safety. Based on the fractured arch theory and the small deformation thin plate theory in elastic mechanics, this study calculates theoretical safety thicknesses of 12 m and 14 m through comprehensive analysis of orebody physical-mechanical parameters and stope structural parameters. Considering necessary redundancy, a comprehensive safety isolation layer thickness of 15 m has been determined and continuously validated over six years of production practice. Research demonstrates that the dual verification method integrating these two theoretical frameworks can effectively determine the isolation layer safety thickness, ensuring roof stability in mined-out areas while maintaining safe and stable implementation of subsequent backfill processes for a 5 million tons/year mining operation. This technical approach establishes a replicable methodological framework for similar mines transitioning from caving methods to subsequent backfill methods.

Key words: isolation layer ore column; safe mining; collapse method and subsequent filling method

马坑铁矿矿区开采范围被市政府规划为生态林保护区, 采用无底柱分段崩落法开采深部矿体将引起更大范围的地表错动甚至塌陷, 对地表生态环境造成破坏, 坑内涌水量也将大幅增加。而

且随着矿山生产规模的不断扩大(最终达到原矿 500 万吨/a), 选矿厂日益增多的尾砂对尾矿库的扩容建设也日趋紧迫。加上矿山进入深部开采后, 继续采用无底柱分段崩落法, 地表错动范围将不

收稿日期: 2024-11-22

作者简介: 王志东(1987—), 男, 高级工程师, 从事采矿设计及现场技术管理工作。

断扩大,严重影响地面构筑物安全。采用充填采矿法能有效解决上述问题,而且充填工艺的日渐成熟及广泛应用,已经成为建设绿色矿山、现代化矿山的发展趋势。经分析马坑铁矿矿床的开采技术条件以及结合开采现状,提出了崩落法转阶段空场嗣后充填法,该采矿方法变更的安全稳定性开采关键在于崩落法转阶段空场嗣后充填法隔离层矿柱厚度的确定。何环莎等^[1]通过荷载传递线交汇法等力学理论计算隔离层厚度,并采用有限差分计算软件 FLAC^{3D} 进行全过程模拟分析,进一步验证理论计算的准确性;郭进平等^[2]依据厚跨比法、K. B. 鲁别涅依特理论法、普氏拱理论法、荷载传递交汇线法、结构力学简化梁理论法等 5 种理论计算方法分别计算隔离层厚度计算结果为 8 ~ 18 m,并利用 FLAC^{3D} 进行模拟计算,判断隔离层厚度是否合理,模拟计算结果为 16 ~ 18 m。吕冠颖等^[3]采用了以考虑弹性小薄板理论为代表的多种理论分析方法,确定了崩落法转充填法水平隔离矿柱形态,并采用 Phase2 二维数值模拟对其合理性进行了验证。本研究团队综合考量马坑铁矿采空区结构参数及顶板、侧帮的物理力学性质,采用破裂拱理论和弹性力学小变形薄板理论深入分析计算,得出隔离层安全厚度的理论计算值,并综合考虑安全冗余,确定隔离层的安全厚度。这一数值的确定,不仅基于严谨的理论计算,还经过了长时间的实践验证,可确保其在实际生产中的可行性和安全性。

1 隔离层顶板稳定性分析

在崩落法转阶段空场嗣后充填法中,为了避免原崩落法对后期阶段空场嗣后充填法造成安全隐患,同时提高矿石回收率,降低矿石永久损失量,需在两个采矿方法中间预留合理的安全开采隔离层厚度,影响隔离层的厚度主要因素为隔离层形态(水平或拱形)、厚度、围岩完整程度及下部采场回采跨度^[4-6]。

针对隔离层厚度的计算确定方法有很多种,都是在现场施工经验和实验总结的基础上提出的经验公式,并进行计算确定,各方法的计算办法和效果评价如下。

(1) 荷载传递线交汇法。假设荷载由隔离层顶板上部中心按与法线 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 扩散角向下传递,下部采场回采范围处于传递线范围内,即认为采场两侧间柱直接承载隔离层自重及上部外荷,隔离层是安全的,此为计算的中心指导思想。

(2) 厚跨比法。假设隔离层围岩是完整稳固的,当隔离层厚度与采空区跨度(宽度)比值 > 0.5 时,隔离层是稳定的,此为计算厚度的理论基础。

(3) 剪切概念估算法。当隔离层围岩完整稳固,厚度及强度大于一定值,采场跨度较小,主要以剪力为控制条件时,采用此估算方法,其隔离层的安全厚度确定主要根据受剪力计算得到一个隔离层厚度值,再考虑一定安全系数。

(4) 梁板受力情况估算法。当隔离层及下部采空区两侧间柱围岩较完整稳固,厚度及强度大于一定值,采空区跨度较大,主要以弯矩为控制条件时,按梁板受力情况计算得到一个隔离层厚度值,再考虑一定安全系数即为隔离层顶板安全厚度。当采空区跨中的隔离层围岩不完整,但采空区两侧间柱围岩稳固时,按悬臂梁计算弯矩;当隔离层围岩较完整稳固,但下部采空区两侧间柱围岩不完整,可按简支梁计算弯矩;当隔离层与下部采空区两侧间柱围岩较完整稳固,可视为一个整体时,可按两端固定梁计算弯矩。

还有 K. B. 鲁别涅依特理论法、普氏拱理论法、结构力学简化梁理论法、考虑弹性小薄板理论估算法等多种计算方法。

(5) 工程经验类比法。在确定合理开采安全隔离层厚度时,常常会对类似矿山留设隔离层厚度状况及开采状况,确定设计矿山合理隔离层顶柱厚度。

(6) 数值模拟法。数值模拟法是将岩体假定为弹塑性材料,采用 FLAC^{3D} 等有限元分析软件根据不同空区及隔离层形态进行计算机模拟分析计算^[7]。

以上几种分析方法中,荷载传递线交汇法、厚跨比法、按剪切概念估算法未考虑到结构影响、岩体的特征等,具有一定的片面性;按梁板受力情况分析以及与数值模拟分析两种方法考虑条件较全面。由于马坑铁矿井下矿体产状复杂、矿体厚度变化较

大, 矿体数量多。所以在目前条件下采用数值模拟计算方法建模相当困难, 不能正确全面地反应井下的工程实际情况。因此, 对于马坑铁矿隔离层安全厚度的确定暂时采用理论计算与传统分析相结合的方法, 两种方法相互印证、相互补充。

2 隔离层顶板厚度计算

马坑铁矿矿体倾向 NW, 倾角一般为 $40^\circ \sim 70^\circ$, 矿体以磁铁矿为主。矿体顶板围岩以大理岩或大理岩化灰岩以及辉绿岩类为主, 厚大的大理岩为稳固性较好的岩体。矿体底板主要为碎屑岩类或砂卡岩以及辉绿岩类岩石, 围岩坚硬较稳固。矿体厚度为 10 多米至 100 多米不等, 平均取 50 m, 该处矿体埋深约为 520 m。矿体物理力学性质参数如表 1 所示。

表 1 矿体物理力学性质参数

矿、岩石名称	F 值(普氏系数)	抗剪强度/MPa	抗压强度/MPa	密度/($t \cdot m^{-3}$)
铁矿体	8~10	5.5	19.97	3.8

2.1 按破裂拱概念估算隔离层顶板厚度

在隔离层顶板围岩完整性较差, 具有一定风化时, 适宜用破裂拱理论(普氏拱理论)分析^[8-9]。当采空区顶板自然拱发生失衡而坍塌, 形成破裂拱时, 其破裂拱高度 H :

$$H = [0.5b + h_0 \tan(45^\circ - \varnothing/2)]/f \quad (1)$$

式中: b, h_0 分别为采空区宽度与高度; \varnothing 与 F 分别为岩石内摩擦角及强度系数。根据马坑铁矿矿体赋存条件, b 取 50 m, h_0 取 75 m, \varnothing 取 35.5° , f 取 8。

计算得出的破裂拱高度 H 为 7.95 m, 从安全、保守的角度考虑, 采用破裂拱概念估算出隔离层顶板厚度应考虑隔离层顶板自身承载及上部回填废石荷载作用, 其安全系数取 1.5, 计算得隔离层顶板厚度大于 12 m, 此为采用理论公式的估算值。

2.2 基于弹性力学小变形薄板理论方法的隔离层顶板安全厚度分析

马坑铁矿阶段空场嗣后充填法主要以“隔三采一”的形式间隔矿柱式开采, 采场为矩形, 在采场开采形成空区的过程中, 悬空隔离层顶板由采场两侧间柱支撑, 采场顶板及两侧间柱共同形成具有边界约束的三维板状结构, 其稳定性可视

板结构的强度进行分析计算^[10-11]。如图 1 所示, L_x, L_y 分别为采场与隔离层顶柱相接处的宽度及长度(m), h 为隔离层顶柱厚度(m)。隔离层顶柱上部作用载荷集度为 q 。

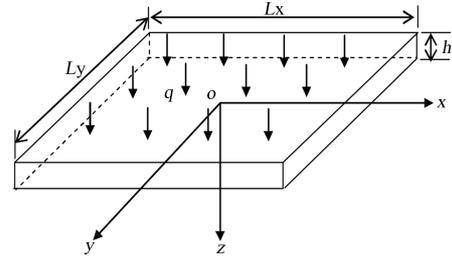


图 1 板坐标与载荷分布

在隔离层顶板处于稳定状态时, 采场两侧间柱及两端岩体作为一个整体固定支撑上部顶板。根据弹性力学小变形薄板理论, 采用 Ritz 法求解。通过顶板的抗弯刚度、弹性变形模量和泊松比推导出的板中面挠曲函数, 结合弹性理论推导出的板内应力与挠度的关系关系函数, 最终求得板中的最大主应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{12L_x^2 L_y^2 (L_y^2 + \nu L_x^2) q}{\pi^2 [3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2] h^2} \\ \sigma_2 &= \frac{12L_x^2 L_y^2 (L_x^2 + \nu L_y^2) q}{\pi^2 [3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2] h^2} \\ \sigma_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_1 为板在 x 方向上的正应力, MPa; σ_2 为板在 y 方向上的正应力, MPa; σ_3 为板在 z 方向上的正应力, MPa; L_x, L_y 分别为研究区域的宽度和长度, m; h 为顶板岩层厚度, m; ν 为顶板岩层的泊松比; q 为隔离层顶柱上部作用载荷集度, kg/m^2 ; 其中 $q = \gamma H$; γ 为隔离层顶板容重, kg/m^3 ; H 为作用于顶板的覆岩厚度, m。

当顶板的危险点产生剪切屈服时, 根据 H. Tresca 屈服准则结合式(2)推导得顶板岩层中的最大剪应力公式为

$$\tau_{\max} = \frac{6L_x^2 L_y^2 (L_y^2 - L_x^2) (1 - \nu) q}{\pi^2 [3(L_x^4 + L_y^4) + 2L_x^2 L_y^2] h^2} \quad (3)$$

式中: τ_{\max} 为隔离层顶板最大剪应力, MPa。

其中, $q = \gamma H$, 当板中的最大主应力或最大剪应力超过顶板岩体的抗拉强度或抗剪强度时, 顶板将发生断裂坍塌, 顶板坍塌过程如图 2 所示。采场顶板断裂判据:

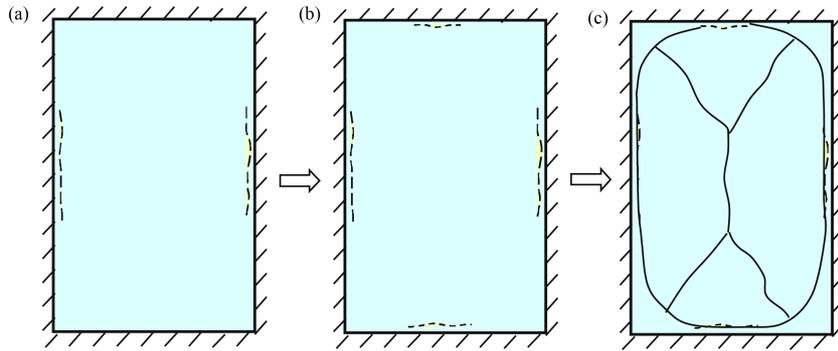


图 2 顶板断裂破坏过程示意图

$$\max \{ \sigma_x, \sigma_y \} > [\sigma] \quad (4)$$

$$\tau_{\max} > [\tau] \quad (5)$$

式中： $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ 分别为岩体的抗拉强度和抗剪强度，MPa。

根据其他矿山相似材料模拟试验结果，顶板破坏过程表现：初始阶段先在板的长边如图 2(a) 所示裂缝，随后在短边形成如图 2(b) 所示裂缝，最终四周形成如图 2(c) 所示裂缝后，发生“X”型破坏与坍塌。为合理留设崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层厚度，避免发生如图 2 所示的采场坍塌事件，马坑铁矿按以上理论计算确定隔离层顶板安全厚度。

(1) 以最大主应力为判据，计算隔离层顶板安全厚度。马坑铁矿隔离层顶板围岩的最大主应力（抗压强度）为 19.97 MPa，采场与隔离层顶柱相接处的宽度及长度分别为 15 m、50 m，上部覆岩均布载荷 $q = 1.7 \text{ t/m}^3 \times 20 \text{ m} = 34 \text{ t/m}^2$ ，将数值带入式(2)计算得 $h = 13.076 \text{ m}$ ，即在最大主应力（极限抗压强度）模式下，采用弹性力学小变形薄板理论方法计算的 200 m 水平崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层厚度可以取 13.076 m。

(2) 最大剪应力判据计算隔离层顶板安全厚度。马坑铁矿隔离层顶板围岩的顶板岩层中的最大剪应力为 5.5 MPa，岩层泊松比为 0.17，其他数值与最大主应力判据计算隔离层顶板安全厚度中计算数值一致，将相应数值带入式(3)计算得出 $h = 14.01 \text{ m}$ 。即在最大剪应力的模式下，采用弹性力学小变形薄板理论方法计算的 200 m 水平崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层厚度可以取 14 m。

(3) 基于弹性力学小变形薄板理论方法的隔离层顶板安全厚度选取。根据式(4)、(5)选取板

中的最大主应力或最大剪应力计算分析所隔离层顶柱厚度大数，取 14 m，再考虑一定的冗余厚度，最终确定基于弹性力学小变形薄板理论方法的隔离层顶板安全厚度为 15 m。

3 工业试验

根据上述按破裂拱概念估算及基于弹性力学小变形薄板理论方法的隔离层顶板安全厚度分析，马坑铁矿最终选取的崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层厚度为 15 m。马坑铁矿崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层设计位于 200 m 水平，200 m 水平以上采用无底柱分段崩落法，最低回采水平位 214 m 水平（+215.21 m 标高），无底柱分段崩落法 200 m 阶段运输巷底板标高为 +205.27 m，200 m 水平以上采空区留有松散废石做缓冲层，后期已采用废石回填治理采空区。100~200 m 水平之间采用分段凿岩阶段空场嗣后充填法，共设置 5 个分段，每个分段高度 15 m，最低回采分段为 115 m 分段，最高回采分段为 175 m 分段，回采标高为 +116.95 m ~ +190.22 m（图 3），采场长度为 50 m，阶段矿房嗣后充填法中一、二步骤采场宽度均为 15 m（二步骤为间柱），采场内从上至下开采^[12]。

马坑铁矿于 2019 年实现崩落法转阶段空场嗣后充填法，结束 +200 m 水平以上崩落法采场，全面进入 +200 m 水平以下阶段空场嗣后充填法开采，在按以上计算方式预留崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层厚度，结合 +200 m 水平以下充填法开采过程中的“强采、强出、强充”生产管理措施，降低采场回采周期，缩短采空区暴露时间，保证了矿山生产安全，如图 4 所示，

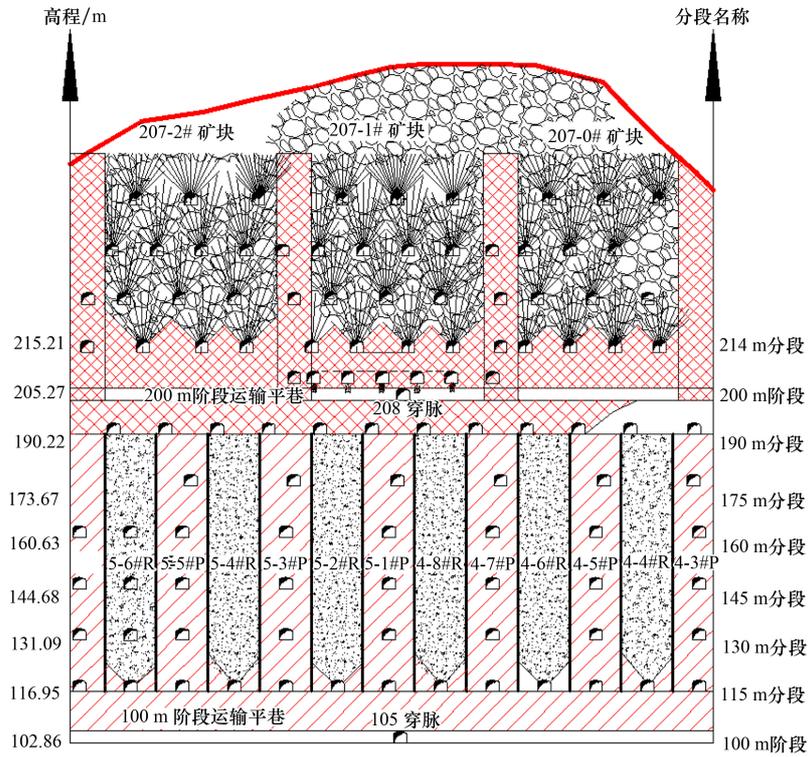


图 3 崩落法转阶段空场嗣后充填法投影示意

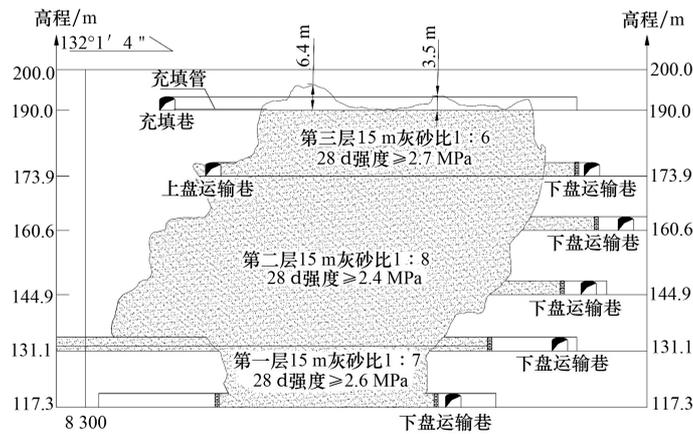


图 4 马坑铁矿 5-2R 采空区三维扫描剖面

马坑铁矿 100 ~ 200 m 水平之间的 5-2R 采场, 按以上方式预留隔离层厚度, 并按马坑铁矿“强采、强出、强充”组织生产管理, 在完成采空区尾砂胶结充填接顶后, 采空区只有具备出现跨冒 6 米多, 但此时已实现了采空区充填治理, 保证了空区安全。

4 结论

(1) 马坑铁矿经过多年生产实践, 进一步验证了按文中计算方式确定崩落法转阶段空场嗣后充填法开采安全隔离层厚度是合理的, 可为类似

矿山项目提供借鉴。

(2) 该计算方式均与采场尺寸相关, 在开采特别厚大的矿体部分时, 如采场的长度和宽度超过上述计算取值的情况, 则要求隔离层顶板厚度应适当增加。

(3) 根据破裂拱概念估算及基于弹性力学小变形薄板理论方法虽然均有考虑围岩完整性及围岩抗压、抗剪强度, 但由于井下矿体赋存条件的复杂性及岩石质量不均质性, 矿体中偶有出现构造带, 同时地下水对岩体具有一定的侵蚀作用,

(下转第 13 页)

合作开发模式、业主自营模式分别比外包模式高0.1%、0.18%，因此外包模式经济上占优。

3 结 论

(1) 外包模式可缓解业主方的投资和管理压力,体现专业化分工协作,能够更好地实现资源优化配置。矿山企业可以将更多的资源和精力集中在自身的核心业务和战略发展上,有助于提升企业的核心竞争力和市场应变能力。依靠承包商专业的技术力量、齐整的装备水平、成熟的矿山开采和管理经验,对安全、成本、质量、进度均可受控,可有效提高资源利用与稳定供矿,减少矿山生产与周边矛盾。经综合分析确定,合同外包模式最为适合西藏矿业南部铬铁矿的生产采矿运营。

(2) 建议矿山利用合同制采矿的契机,不断总结开采经验。运用合同管理手段,明确承、发包方的职责范围;强化矿石回采率、贫化率,矿石块度,可采厚度,井巷施工质量,出矿品位等质量指标控制;建立健全矿山安全管理机构,确保安全高效开采;按采、掘分离确定合同价格,利用精细化管理严格控制采、掘、运、充等工序成本,实现企业降本增效的目标。

(上接第5页)

在个别存有构造带采场中,不可死板地套用以上计算方式预留隔离层厚度,应根据计算公式降低采场尺寸或适当隔离层厚度冗余数。

参考文献:

- [1] 何环莎,王旭,刘畅,等. 崩落法转充填法开采安全隔离层厚度研究[J]. 中国矿业,2024,33(8):176-183.
- [2] 郭进平,卢皎旭,张文革,等. 四方金矿崩落法转嗣后充填关键隔离层厚度研究[J]. 金属矿山,2023(6):51-60.
- [3] 吕冠颖,何环莎,覃敏,等. 崩落法转充填法采场隔离矿柱合理厚度研究[J]. 中国矿业,2022,31(9):95-101.
- [4] 刘明成. 崩落采矿转型安全隔离层厚度的确定[J]. 黄金,2021,42(11):49-52.
- [5] 赵增山,张舟,金爱兵,等. 张家洼铁矿崩落转充填采矿工艺及结构参数研究[J]. 金属矿山,2021(8):1-9.

参考文献:

- [1] 李学明. 大红山铁矿采矿新模式管理初析[J]. 采矿技术,2008,8(4):146-147.
- [2] 黄成林. 蒙库铁矿采矿外包及管理的实践[J]. 矿业快报,2006(6):585-587.
- [3] 王满仓,蒋蔚,施士虎,等. 采矿生产经营模式探讨[J]. 矿冶,2015,24(增刊1):243-245;251.
- [4] 张明. 建立矿山外包运营管理模式浅谈[J]. 新疆钢铁,2010(3):58-61.
- [5] 王飞. 矿山承包办矿模式的探讨[J]. 中国矿业,2013,22(7):26-28.
- [6] 陈庆刚. 合同采矿理论与技术研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [7] 胥善林. 基于总承包模式的工程项目管理研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [8] MUNKHBAT G. 中蒙矿产资源合作开发研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [9] 张振龙,刘锋,闫永平. 基于模糊层次分析法的露天矿山外包模式优选[J]. 现代矿业,2016(567):34-37;86.
- [10] 任星. 露天矿山开采总承包模式与应用的安全问题[D]. 绵阳:西南科技大学,2016.
- [11] 冯兴隆,刘关锋,刘华武,等. 普朗铜矿采矿盈利模式分析[J]. 中国矿业,2015,24(增刊1):185-189.
- [6] 强浩. 基于绿色理念的四方金矿崩落转充填开采及隔离层技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
- [7] 房智恒. 阶段空场嗣后充填胶结充填体力学强度模型研究[J]. 工程建设,2019,51(12):39-47.
- [8] 李伟. 金山店铁矿崩落法转充填法采场隔离矿柱稳定性研究[D]. 贵阳:贵州大学,2016.
- [9] 张访问. 马坑铁矿隔离层矿柱安全厚度的分析和研究[J]. 矿业研究与开发,2016,36(5):83-85.
- [10] 曾令义,潘冬. 崩落法转充填法隔离层安全厚度的确定[J]. 矿冶工程,2015,35(4):17-20.
- [11] 寇向宇,徐飞,褚洪涛,等. 杨家湾崩落转充填法隔离层安全厚度研究[J]. 矿业研究与开发,2013,33(5):59-62;98.
- [12] 王志东. 大直径深孔阶段矿房嗣后充填法在马坑铁矿的应用[J]. 采矿技术,2021,21(6):1-4.