

下向式膏体胶结充填采矿方法在某深部矿体的应用研究

李涛, 孙琰, 刘佳川, 彭杰

万宝矿产有限公司, 北京

收稿日期: 2026年1月23日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

针对某矿8号矿体深部回采过程中假底稳定性差、充填体接顶困难、暴露面扩大致使采场垮落风险上升等关键问题, 本文研究并实施了下向式分层进路膏体胶结充填采矿方法。基于深部透镜状厚大白云岩矿体的工程地质特征, 开展假底受力机理分析, 明确多支点梁式受力体系的演化规律; 在此基础上提出进路布置、假底板块制作、充填体质量控制及转层衔接等成套工程设计。以1342~1345 m分层为例, 通过凿岩爆破、出矿组织、假底制作与接顶充填的系统实践, 分层综合生产能力稳定在160~180 t/d, 假底变形得到有效控制, 实现了深部矿体的安全、高效连续回采。研究成果验证了下向式分层进路膏体胶结充填方法在深部复杂地压条件下的适用性, 并对类似厚大矿体的深部开采具有推广价值。

关键词

下向式采矿, 膏体胶结充填, 假底稳定性, 进路布置, 深部开采, 厚大矿体

Study on the Application of Downward Mining Method with Paste Backfill in a Deep Orebody

Tao Li, Yan Sun, Jiachuan Liu, Jie Peng

Wanbao Mining Limited, Beijing

Received: January 23, 2026; accepted: February 20, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

In response to the challenges encountered during the deep-level extraction of Orebody No. 8—characterized by poor stability of the false-roof, difficulties in filling material reaching the roof, and increased risk of goaf collapse due to expanding exposed surfaces—this study investigates and applies

a downward layered drift mining method with paste backfill. Based on the engineering geological characteristics of the thick lenticular dolomitic orebody, a comprehensive analysis of the mechanical behavior of artificial false roofs was conducted, revealing the evolution of multi-support beam-type load-bearing structures under progressive excavation. Accordingly, an engineering design system was developed, including optimized drift layout, integrated false-roof reinforcement structures, paste backfill quality control, and inter-level transition techniques. Field application in the 1342~1345 m sublevel through rock drilling and blasting, ore extraction organization, false-roof fabrication, and roof-contact filling demonstrates that the method controls false-roof stability, enables safe, efficient, and continuous mining of deep orebodies, and achieves a stable comprehensive production capacity per stratum of 160~180 t/d. The results confirm that the downward layered drift mining method with paste backfill is suitable for complex deep-level rock pressure conditions and provides a practical reference for deep mining of similar thick orebodies.

Keywords

Downward Mining, Paste Backfill, False-Roof Stability, Drift Layout, Deep Mining, Thick Orebody

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着地下金属矿山开采深度不断增加,围岩原位地应力、大变形、富水性等不利因素愈加突出,采场易发生超高垮落、矿房失稳、围岩破碎化增强等问题[1]-[3]。对于白云岩、灰岩等构造简单但富含岩溶裂隙的矿体,深部回采过程中充填体无法及时接顶、假底变形失稳、进路暴露面积大等因素进一步加剧地压风险,不仅影响安全生产,也限制了矿山的连续回采能力。膏体胶结充填以其高浓度、高强度、低泌水和可泵性的优点,在深部开采中得到广泛应用[4][5]。传统上向式充填难以满足复杂应力环境下的及时接顶需求,而下向式分层进路胶结充填具有充填高效、采充交替紧凑、假底稳定可控等优势,尤其适用于深部不稳固矿体或厚大矿体的系统回采[6]-[8]。

某矿8号矿体深部区域呈厚大透镜状,矿体平均厚度接近10m,上盘及下盘均存在一定岩溶裂隙发育现象,且深部伴生黄铁矿含量升高,采场超高垮空频发,安全压力大。为解决深部资源回采安全问题,提出采用“下向式分层进路膏体胶结充填采矿方法”,并开展全面设计、分析与现场实施验证。本研究系统阐述该方法的设计原则、受力分析、进路参数优化、充填质量控制、爆破控挤措施及转层衔接技术,并通过典型分层工程实例验证其适用性,为类似深部矿床的安全高效采矿提供参考。

2. 工程概况

某矿8号矿体赋存于下石炭统摆佐组上部粗晶白云岩中,矿体走向 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、倾角 $61^{\circ}\sim 63^{\circ}$,呈透镜状展布,平均厚度接近10m,产状稳定,顶底板界限清楚。围岩以中粗晶白云岩及灰岩为主,岩性均质性较好,整体强度高,但局部存在岩溶裂隙与细碎带,岩体质量中等。矿体所属区域处于分水岭斜坡地带,地形有利于降水排泄;顶底板含水层具有弱至中等富水性,裂隙渗流对采场稳定性影响有限,深部涌水量不大。总体来看,矿床工程地质条件以中等稳定性为主,但深部受应力增大、岩溶裂隙增多、伴生黄铁矿富集等因素的共同影响,呈现围岩脆性破裂风险增高、采场垮落空间扩大、充填体接顶难度上升等典型深部开采特征,显著加剧回采安全压力。

在上述条件下,传统上向法或非胶结充填方式难以满足深部安全回采要求。结合矿体几何形态、围

岩力学特性、深部应力环境以及矿山现有运输、凿岩、充填等装备能力,选择采用机械化盘区下向进路膏体充填法最为合理。该方法通过分层切割形成密集进路网络,使假底承载点数量增加、受力分散,从而增强假底整体稳定性;同时,膏体充填浓度高、强度增长快,可在深部复杂地压条件下实现及时接顶,减少暴露面积和悬跨长度;采充交替紧密,回采节奏均衡,有利于控制大跨度暴露引起的地压显现;并且与现有凿岩设备、铲运机及膏体充填系统匹配度高,便于在连续盘区内实现工艺标准化和设备利用率最大化。实践表明,该方法能够有效降低深部采场垮落风险,提升充填体稳定性及回采效率,是某矿深部厚大白云岩矿体条件下的最佳采矿工艺方案。

3. 假底受力分析

在下向式分层进路膏体充填采矿方法中,假底是承担采场空间临时承载的重要结构,其力学行为直接决定回采过程中采场稳定性与安全性[9] [10]。假底的受力状态取决于三项相互耦合因素:一是充填体自重及膏体凝固体结构性能;二是下分层逐条进路回采后暴露空间不断扩大引起的受力路径变化;三是上下盘挂桩及钢筋骨架系统对假底的约束与传力能力。由于下向式回采过程中假底处于持续受载与变形调整状态,其力学本质可视为一个由钢筋与膏体共同构成的复合板在多次局部卸载、重复受力过程中逐渐演化的非均质受弯体系。

基于基本力学特征,假底在未暴露时主要承受膏体自重,并通过挂桩与围岩形成简支结构,内力分布均匀且变形较小;当膏体填满空区后,假底整体可等效为一条具有多支点的水平梁,其主要受力形式为弯矩与剪力。梁体中部在荷载作用下弯矩最大,两端通过挂桩传递剪力反力,构成典型的简支梁受力模式(图 1)。

随着下分层进路逐条回采,假底局部暴露并形成悬臂段或多跨连续梁段,使原本均匀的受力结构发生显著变化。暴露区内假底的中部发生下挠,两帮承担更大的剪应力,悬跨段越长弯矩增长越快,整体刚度下降,易形成受弯破坏薄弱面(图 2)。

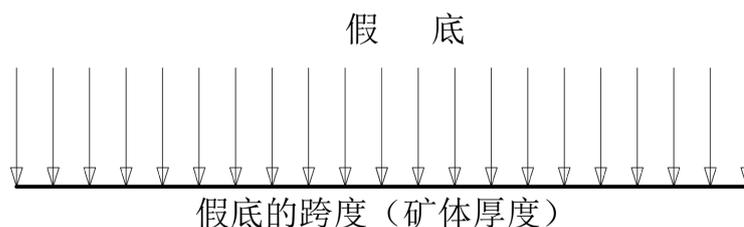


Figure 1. Stress distribution diagram of the false roof before mining
图 1. 未回采前假底受力图

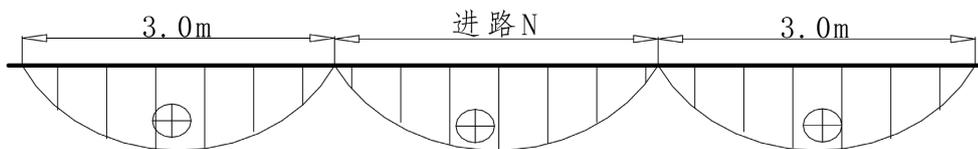


Figure 2. Stress distribution diagram of the false roof during drift mining
图 2. 进路回采过程中的假底受力图

当暴露范围扩大至多个相邻进路时,假底呈现出“逐级失去支撑点”的受力演化特征。原位于支点附近的钢筋与挂桩需承担更大反力,局部剪应力快速上升,而中部区域的“弯矩峰值区”逐渐向暴露方向扩展,形成应力集中(图 3)。若进路布置密度较大、间距较小,支点数量增多,假底呈现多跨梁工作状态,可有效分散集中荷载,使弯矩与剪力均值降低;反之,若进路宽度增加或暴露面过大,假底跨距增大,梁中段弯矩迅速接近极限,假底极易发生明显挠曲甚至破坏(图 4)。

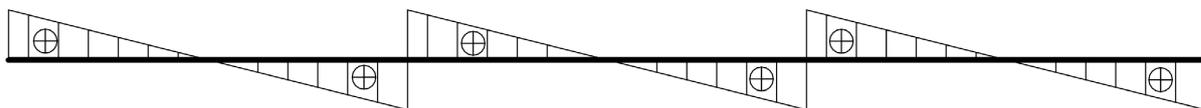


Figure 3. Shear stress distribution diagram of the false roof during drift mining
图 3. 进路回采过程中的假底受剪应力图

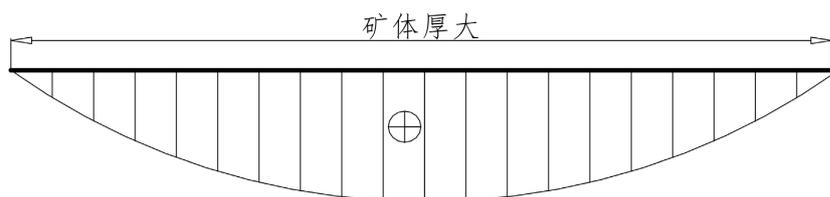


Figure 4. Stress distribution diagram of the false roof with full exposure of the void
图 4. 空区全部暴露时的假底受力图

因此,假底的力学性能呈明显的空间演化特征:在未开采阶段表现为整体受压与轻微受弯;在部分进路暴露阶段表现为连续梁失跨后的局部受弯集中;在大范围暴露阶段则趋向于单跨梁受力,结构安全性最低。假底的承载能力不仅取决于钢筋挂桩系统的刚度与连接质量,还受充填体与围岩界面黏结、钢筋焊接整体性、充填体抗压强度等多因素共同影响。

综合分析可知,提高假底安全性的关键在于:通过合理控制进路宽度与密度,使假底尽可能保持多支点受力状态;通过提升钢筋连接与挂桩可靠性,提高梁体整体抗弯刚度;通过强化接顶工艺与充填体强度,使充填体尽早参与承载。上述理论分析构成了后续工程设计中进路布置、假底制作及充填体质量控制等参数确定的主要依据。

4. 工程设计

4.1. 进路参数与布置设计

依据假底受力分析,为实现假底多点支撑与应力分散,进路设计需兼顾受力安全性与设备通过空间。结合现有设备最大外廓尺寸和立柱支护能力,进路断面确定为 $3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 。该断面既满足设备通行,又能有效控制暴露面积,减弱假底弯曲变形。

在布置方式上,厚大矿体中采用上下分层垂直矿体走向布置,可避免长直线暴露带导致的连续弯曲破坏。图 5 为假底形成阶段进路空间关系示意,其中,1 分层为已膏体充填的假底结构,3 分层为未充填的回采进路,2、4 分层为未回采分层(未形成进路);薄矿脉区域则沿矿体走向布置并上下错开 1.5 m ,以控制暴露长度,实现局部稳定(图 6)。进路长度控制在 24 m 以内,尖灭区域暴露面积控制不超过 150 m^2 。

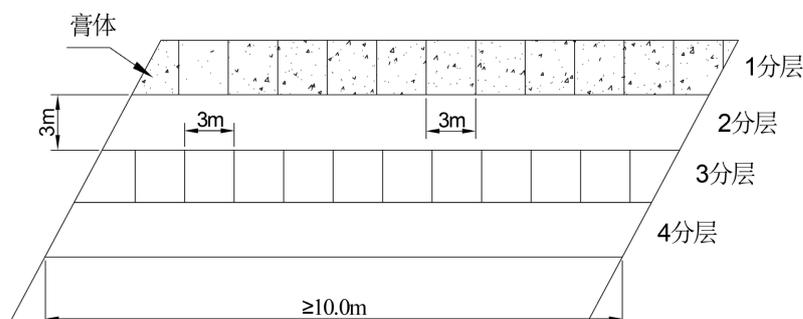


Figure 5. Drift layout of a thick orebody (staggered arrangement perpendicular to orebody strike)
图 5. 厚大矿体进路布置方式(垂直矿体走向交错布置)

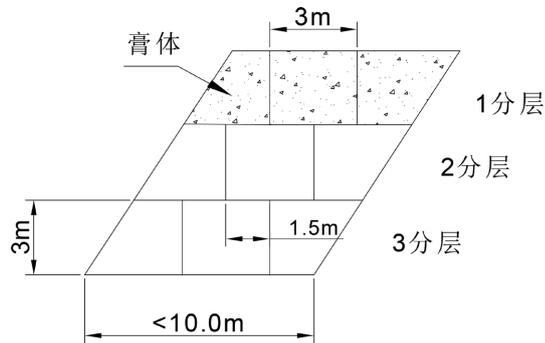


Figure 6. Drift layout of thin ore veins (arrangement along orebody strike)
图 6. 薄矿脉进路布置方式(沿矿体走向布置)

回采顺序遵循“从上盘到下盘、从端部到中部”的原则，三条以上进路采取两步骤回采，保证假底在膏体支护条件下进行作业。

4.2. 充填体质量及接顶控制

为明确灰砂比与膏体浓度对充填体强度发展的影响，选取灰砂比 1:3、1:4 和 1:5 三种工况，膏体浓度分别控制为 75%、80%和 85%。在标准养护条件下，对各组试块 7 d、14 d 及 28 d 单轴抗压强度进行测试与对比分析。其中，不同灰砂比条件下膏体充填体强度见表 1、表 2。

Table 1. Strength development curve of paste backfill under different binder-to-sand ratios (concentration = 80%)
表 1. 不同灰砂比条件下膏体充填体强度发展曲线(浓度 80%)

灰砂比	7 d (MPa)	14 d (MPa)	28 d (MPa)
1:3	2.3	3.45	4.65
1:4	1.95	3.05	4.2
1:5	1.55	2.5	3.8

Table 2. Strength development curve of paste backfill under different slurry concentrations (binder-to-sand ratio = 1:4)
表 2. 不同膏体浓度条件下充填体强度发展曲线(灰砂比 1:4)

浓度	7 d (MPa)	14 d (MPa)	28 d (MPa)
75%	1.65	2.7	3.9
80%	1.95	3.05	4.2
85%	2.1	3.25	4.45

经试验确定最佳配比为灰砂比 1:4，膏体浓度控制在 79%~81%之间。膏体配料与输送严格由充填车间按技术要求执行，确保浓度与配比稳定。

接顶质量通过封闭式隔墙技术保障(图 7)。隔墙采用双层木板与塑料布封堵，中间砂填加端部浇筑混凝土以增强整体性，顶部设置排气孔监测接顶情况。隔墙两端布设圆木与挂桩连接的抗侧压支撑，确保在充填压力作用下形态稳定。所有空区要求一次性连续充填，不得分段或重复充填，以防止产生冷接面。

4.3. 转层衔接设计

结合矿体厚度与分段标高关系，各分层尽可能采用爬坡退采，以减少出矿道掘进工作量并缩短衔接

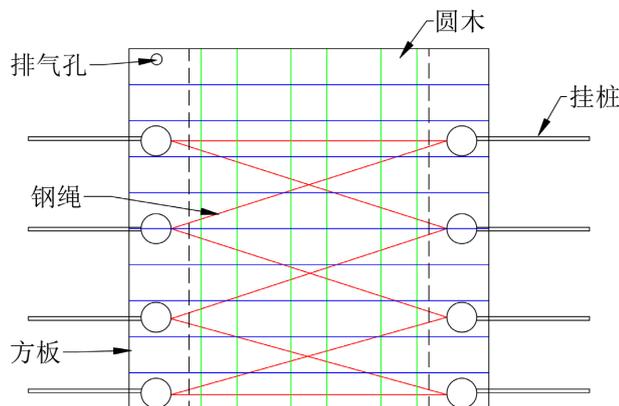


Figure 7. Schematic diagram of the sealed bulkhead structure
图 7. 封闭式隔墙示意图

周期。上下分层出矿道必须相互错开不少于 3 m，以避免新出矿道处于上分层充填体受力影响区。充填体龄期必须超过 28 天且抗压强度大于 4 MPa 后方可进行下一分层开采，以确保假底及充填体具备足够承载能力。

5. 工程应用

5.1. 典型分层(1342~1345 m)回采实践

以某矿 8 号矿体 1331 m 中段下部 1342~1345 m 分层为例，对下向式分层进路膏体充填方法开展系统应用。1331 m 中段标高 60 m、分段标高 12 m，分层标高 3.0 m，矿体走向长度约 199 m，按厚大矿体特征划分为 2 个盘区。回采进路全部采用 3.0 m × 3.0 m 矩形断面，出矿道采用三心拱断面，转弯半径 8 m，以适应 2 m³ 电动铲运机作业。

凿岩采用 YT-24 与 7655 型浅孔凿岩机，炮孔直径 35~40 mm、孔深 1.8 m，孔布置为楔形掏槽方式：空孔 1 个、掏槽孔 5 个、辅助孔 8 个、周边孔 18 个，共计 32 个炮孔，总长度 57.6 m。凿岩结束后实施高威力乳化炸药爆破，采用电磁雷管一次起爆与毫秒微差导爆管分段起爆方式，装药系数总体控制在 0.85，周边眼顶眼装药系数控制在 0.75。单次爆破可获得 13.77 m³ (折合 54.8 t) 矿石，爆孔利用率约 0.85，炸药单耗为 0.273 kg/t。

爆破完成后立即进行强制通风，通风时间不少于 30 min，若炮烟未达到安全浓度，则适当延长。工人进入工作面后，对爆堆、顶板及哑炮情况进行全面检查，并洒水降尘，对充填体未完全接顶的部位采用立柱或垛木进行临时支护，立柱材料直径不小于 20 cm，间距约 1.0 m，以确保采场工作空间安全稳定。

出矿采用进口 2.0 m³ 电动铲运机，单程运距 45~75 m，装矿时间约 2 min，卸矿 1 min，往返行程 2 min，每循环约需 5 min，小时出矿能力可达 72 t。该设备匹配本分层的尺度条件，能有效提升出矿效率并满足回采节奏需求。

根据本分层实际组织方式，一条进路从凿岩、爆破、出矿、假底制作、充填到养护的完整周期约为 17 d，其中回采作业约 6 d，假底制作与充填准备 3 d，充填过程 1 d，充填体养护不少于 7 d。两盘区分别布置 18 条与 10 条进路，总矿量 23,634 t，分层开采总周期约 98 d。综合机械效率、充填作业时间及生产组织条件等因素，本分层最终稳定实现 160~180 t/d 的生产能力，达到预期的安全、高效回采目标。

5.2. 下分层(第二分层)设计实施

在上分层稳定完成回采并达到充填体强度要求后，下分层按计划进入施工阶段。由于两个盘区的回

采节奏不同, 1 盘区回采周期较短, 因此在转层衔接时优先施工 1 盘区出矿联道, 以保证采充连续性并减少衔接等待时间。

下分层进路布置继续遵循厚大矿体与薄矿脉分区设计的原则。厚大矿体区域的主进路与上分层呈垂直交错布置, 以减少沿走向贯通后形成的大跨度暴露带, 提高假底整体支撑密度; 薄矿脉或端部矿体厚度不足 7 m 的区域, 则沿矿体走向布置进路, 并与上分层进路错开 1.5 m, 以避免叠置布置造成的薄弱带形成。所有主进路与出矿道均要求与上分层保持不少于 3 m 的竖向错距, 确保新进路避开上分层充填体的主要受力区。

在下分层回采组织中, 严格依据上分层充填体取样与抗压强度试验结果控制施工节奏, 确保每条进路进入施工前充填体龄期满足 28 d 以上且强度超过 4 MPa。回采顺序继续遵循“从端到中部、从上盘到下盘”的空间推进方式, 以保证假底形成速度与回采暴露范围相匹配。持续保持多点支撑、短暴露长度、多进路交错布置的空间结构, 有助于控制假底受弯变形、减少应力集中, 并实现安全稳定的连续回采。

总体来看, 下分层设计在继承上分层布置原则的基础上, 进一步优化了进路错距、空间节奏与充填衔接方式, 使采充系统得以连续、高效运转, 为深部厚大矿体后续分层的安全开采提供了可靠的工程示范。

6. 结论

1) 通过对深部透镜状厚大白云岩矿体的工程地质分析表明, 传统上向式充填难以有效应对下分层暴露扩大带来的假底弯曲、剪切集中与垮落风险。下向式分层进路膏体充填具备短暴露、快接顶、多支点受力的显著优势, 是适应此类深部矿体的合理采矿方式。

2) 假底受力机理研究表明, 假底在回采过程中由多支点简支梁逐步演变为局部悬臂或单跨受力结构, 其安全性主要取决于进路密度、钢筋骨架整体性及充填体强度。控制进路宽度 3.0 m、上下分层交错布置、钢筋双面焊接及可靠挂桩锚固, 可有效提高假底抗弯和抗剪能力。

3) 工程设计形成了适用于深部厚大矿体的成套参数体系, 包括 3.0 m × 3.0 m 进路断面、倒楔式挂桩 - 筋网整体假底、浓度 79%~81% 的膏体充填配比、封闭式隔墙接顶工艺, 以及分层爬坡退采与 ≥3 m 的竖向错距设计, 为下向式回采提供了系统工程保障。

4) 1342~1345 m 分层工程应用表明, 该方法在凿岩爆破、充填、支护和出矿等环节均表现稳定, 单条进路全周期约 17 d, 分层生产能力达 160~180 t/d, 满足深部矿体连续、安全、高效开采要求。假底变形可控, 采场未出现超高垮落, 验证了方法的可靠性。

5) 该研究构建了集受力机理、工程设计与现场应用为一体的下向式分层进路膏体胶结充填技术体系, 对类似深部厚大矿体的安全开采具有重要的参考价值, 具备良好的工程推广前景。

参考文献

- [1] 吴爱祥, 王勇, 张敏哲, 等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山, 2021(1): 1-3.
- [2] 程海勇, 吴爱祥, 吴顺川, 等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 11-25.
- [3] 郭利杰, 刘光生, 马青海, 等. 金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4182-4200.
- [4] 石教华, 毕成, 吴爱祥, 等. 自动化数字矿山膏体充填系统升级改造及应用[J]. 黄金, 2024, 45(8): 33-39+45.
- [5] 吴爱祥, 王珍岐, 常英杰, 等. 膏体管输技术研究现状与展望[J]. 绿色矿山, 2025, 3(3): 1-15.
- [6] 孙承超, 罗磊, 梁燕兵. 下向水平分层进路胶结充填采矿法在毛坪铅锌矿的应用[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 382-385.
- [7] 关少禹, 刘奇, 张为星. 某金矿下向进路充填采矿法试验研究[J]. 采矿技术, 2025, 25(3): 48-52.
- [8] 肖云亮, 韩斌. 金川龙首矿下向进路充填采矿的进路稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(8): 36-40.
- [9] 李涛, 吴爱祥, 韩斌, 等. 2 种锚杆耦合支护的喷混凝土力学模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11):

3846-3851.

- [10] 刘建东. 高构造应力缓倾斜厚大矿体厚硬顶板与充填体相互作用机理及沉降控制[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.