复杂破碎矿体充填采矿方法研究进展与关键问题*

尹贤刚[1,2],杨宁[1,2],欧任泽[1,2],彭跃金[1,2],刘奇[1,2],唐鸣东[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)

摘要:随着矿体赋存条件复杂化和资源回收要求不断提高,复杂破碎矿体已成为金属非金属矿山安全、高效、低贫损开采的重要对象。充填采矿法通过控制采场暴露、重构围岩-矿柱-充填体承载关系并调节采充循环,为此类矿体回采提供了重要技术途径。在梳理国内外充填采矿研究与工程应用的基础上,从矿体基本条件和主导控制机制出发,将复杂破碎矿体充填采矿方法归纳为小暴露连续回采类、结构单元嗣后充填类和强控制联合支护充填类,并结合典型案例比较其适用条件、控制机理与工程效果。研究结果表明:小暴露连续回采类适用于薄矿体、窄矿体及边界复杂矿体的精细回采;结构单元嗣后充填类能够兼顾中厚至厚大矿体的生产能力与采场承载转换;强控制联合支护充填类可提高弱顶板、大跨度及局部破碎区的稳定控制能力。现阶段仍需重点解决工程地质条件与方法参数匹配、采充时序衔接、贫化损失过程控制、复合承载机制及技术经济性等问题。未来应加强地质分区、功能导向的充填体设计、采-支-充-运协同组织和监测反馈驱动的动态优化。

关键词:复杂破碎矿体;充填采矿;稳定性控制;采充协同;智能化开采

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0053-11

Research Progress and Key Issues of Backfill Mining Method for Complex Fractured Orebodies

Yin Xian'gang[1,2], *Yang Ning*[1,2], *Ou Renze*[1,2], *Peng Yuejin*[1,2], *Liu Qi*[1,2], *Tang Mingdong*[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)

Abstract: With the increasing complexity of orebody occurrence conditions and the continuous improvement of resource recovery requirements, complex fractured orebodies have become important targets for safe, efficient, and low-dilution-loss mining in metal and non-metal mines. The backfill mining method provides an important technical approach for the mining of such orebodies by controlling stope exposure, reconstructing the surrounding rock-pillar-backfill bearing relationship, and regulating the mining-backfill cycle. Based on a review of research and engineering applications of backfill mining at home and abroad, starting from the basic conditions and dominant control mechanisms of orebodies, the backfill mining methods for complex fractured orebodies were categorized into the small-exposure continuous mining category, structural unit delayed backfill category, and strong-control combined support backfill category. Furthermore, combined with typical cases, their applicable conditions, control mechanisms, and engineering effects were compared. The research results show that the small-exposure continuous mining category is suitable for the fine mining of thin and narrow orebodies, and orebodies with complex boundaries; the structural unit delayed backfill category can balance the production capacity and stope bearing conversion of medium-thick to massive orebodies; the strong-control combined support backfill category can improve the stability control capability for weak roofs, large spans, and local fractured zones. At the present stage, it is still necessary to focus on solving issues such as the matching of engineering geological conditions and method parameters, the sequential connection of mining and backfilling, the process control of dilution and loss, the composite bearing mechanism, and technical economy. In the future, geological zoning, function-oriented backfill design, collaborative organization of mining-support-backfill-transport, and dynamic optimization driven by monitoring feedback should be strengthened.

Key words: Complex fractured orebody, Backfill mining, Stability control, Mining-backfill collaboration, Intelligent mining

---

* **收稿日期**:2026-07-28
基金项目:国家重点研发计划项目(2025YFE0219800)
作者简介:尹贤刚(1971—),男,四川什邡人,博士,正高级工程师,主要从事采矿工程技术研究。E-mail:yxg@cimr.com.cn
通信作者: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:yangn0@minmetals.com

0 引言

随着浅部易采资源持续消耗,金属非金属矿山的开采对象逐渐向赋存条件复杂、构造发育和围岩破碎的矿体延伸[1]。这类矿体受节理裂隙、断层破碎带和软弱夹层影响,采场暴露后易发生顶板冒落、片帮及围岩失稳,相关现场监测与稳定性研究已从块体失稳、冒落演化及破碎带治理等方面揭示了其复杂性[2-6]。与稳固矿体相比,复杂破碎矿体开采的难点并非单纯表现为围岩强度不足,而在于稳定控制、贫化损失、回采效率和采充接替相互制约:采场结构参数过大会加大暴露风险,参数过小,若缩小回采单元或提高支护等级则会增大采准工程量与开采成本。因此,如何在有限暴露条件下兼顾安全、回采、效率和经济性,是此类矿体采矿方法选择的核心问题。

充填采矿法为上述问题提供了重要解决途径。国内外研究从尾砂、废石等固体废弃物资源化和采空区治理出发,逐步拓展到地压控制、资源回收和绿色开采。程海勇等[7]系统总结了金属矿山固废充填材料与工艺的发展趋势,Lottermoser[8]和Araujo等[9]从矿山固废循环利用角度讨论了尾矿资源化问题,Xue等[10]进一步综述了我国金属矿山充填开采的技术进展与应用前景。这些研究表明,充填技术的工程功能已由单纯处置采空区和矿山固体废物,逐渐转向服务于采场稳定、贫损控制和生产组织。

围绕充填材料与充填体结构作用,Belem等[11]建立了地下膏体充填设计与应用体系,Saw等[12]分析了颗粒组成、胶凝材料和拌合水等因素对充填体力学性能的影响,Potvin等[13]对矿山充填设计与工程应用进行了系统归纳。在此基础上,研究重点进一步延伸至充填体接顶质量、连续充填条件下的强度演化和充填体沉积过程[14-16]。与此同时,Han等[17]、Wang等[18]对人工顶板和表层作业平台等的研究表明,充填体开始由“填料”转变为可计算、可校核的承载结构。总体上,充填采矿的技术演进呈现出材料性能优化、结构功能强化和采充协同并行发展的特征。复杂破碎矿体充填采矿方法发展脉络与研究重心的演化进程如图1所示。

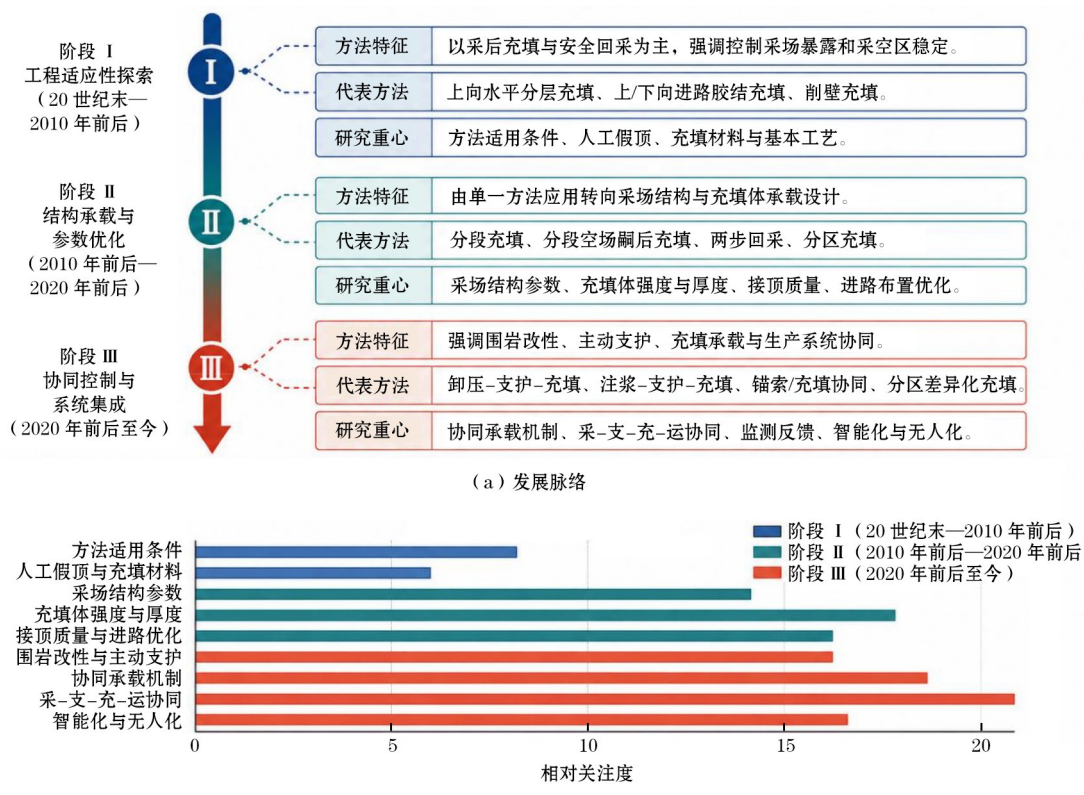


图1 复杂破碎矿体充填采矿方法发展脉络与研究重心

Fig.1 Development trajectory and research focus of backfill mining methods for complex fractured orebodies

尽管国内外在充填材料、采矿方法、结构设计及工程应用方面已取得较多成果，现有研究仍多针对特定矿山、单一方法或局部参数展开。复杂破碎矿体工程地质条件与采场参数之间缺少可验证的对应关系，围岩、矿柱、充填体及支护结构在不同开采阶段的承载作用尚未完全厘清，充填体早期强度、接顶状态和养护周期与回采节奏之间也缺乏统一的设计方法。基于此，本文从开采约束、主导控制模式及作用机制 3 个层面系统梳理复杂破碎矿体采用充填采矿法开采的研究进展，结合典型案例比较不同模式的适用条件与工程效果，并进一步归纳方法适配、复合承载、采充时序、贫化损失控制及动态管控等关键问题，以期为复杂破碎矿体充填采矿方法选择与参数优化提供参考。

1　复杂破碎矿体开采约束与充填采矿方法分类

复杂破碎矿体的采矿方法选择仍应以矿体倾角、厚度、连续性、边界形态、矿岩稳固性和构造条件等为基础，同时考虑生产规模、资源价值及充填系统能力。在这些基本条件约束下，不同矿体对暴露控制、采场承载和支护强化的需求存在明显差异，由此构成后续采矿方法分类与适配分析的基础。

1.1　复杂破碎矿体开采的主要矛盾及控制要求

复杂破碎矿体开采首先面临采场稳定与回采效率之间的矛盾。缩小跨度、控制暴露面积和暴露时间能够降低顶板冒落与片帮风险，但会增加采准工程并限制单采场生产能力。上向分层充填和进路充填对破碎围岩具有较好的适应性，相关研究主要围绕采场结构参数、分层或进路尺寸以及机械化组织进行优化[19-22]；当矿体边界变化较大时，回采单元的尺寸控制与及时充填尤为重要。

资源回收与贫化控制则更多受矿体厚度、边界形态和采幅控制影响。针对较薄或窄矿体，上向进路充填采矿、分层充填采矿等方法可通过缩小作业单元提高回采边界的可控性[23-28]；对于急倾斜极薄矿脉，削壁充填及相关方法强调矿岩分采和废石就地充填，以减少围岩混入和无效采幅[29-31]。这类采矿方法有利于降低矿石贫化，但受作业空间和机械化条件限制，生产能力通常不宜作为唯一评价指标。

当矿体厚度和采场规模增大后，矿山开采面临的问题由单纯控制暴露面积和暴露时间逐渐转向稳定与生产能力的平衡。有关中厚矿体及金属矿山采矿方法的研究表明，采场结构、矿柱留设和采后充填方式需要与矿体产状和生产规模相匹配[32-34]。此外，采空区自稳时间较短时，充填滞后会加大围岩失稳风险，而过度提高充填体强度、延长充填体养护时间或采用保守支护参数又会增加材料和等待成本。因此，采场结构、充填体功能、支护参数和采充周期必须在安全、回采、效率与成本之间统筹确定。复杂破碎矿体开采矛盾与充填采矿的响应关系见表 1。

表 1　复杂破碎矿体开采矛盾与充填采矿响应关系

Table 1　Mining contradictions of complex fractured orebodies and corresponding backfill-mining responses

开采矛盾	主要表现	充填采矿响应要求	典型方法或技术
稳定控制－回采效率	顶板冒落、边帮片帮、采准工程破坏，采场尺寸受限。	控制暴露尺寸，缩短暴露时间，提高即时支护与充填能力。	上向水平分层充填、上/下向进路胶结充填、分区回采。
资源回收－贫化控制	围岩混入、采幅难控、矿柱损失。	精细控制矿岩边界，实现矿岩分采或分区回采。	削壁充填、进路充填、分区差异化充填。
采充接替－生产连续	采空区暴露时间长，充填养护制约循环。	采、支、充、运协同组织，充填系统快速响应。	高浓度胶结充填、连续采充组织、分区充填。
安全保障－经济性	高强度充填和支护成本高，参数设计偏保守。	分级支护、分区充填、强度优化与协同承载设计。	下向进路充填、人工假顶优化、支护－注浆－充填协同。

由此可见，复杂破碎矿体中的充填采矿已不只是采空区处理手段，而是贯穿采场设计、回采实施和稳定控制全过程的组成环节，其基本要求可归纳为控制围岩暴露、强化围岩约束、缩短采充转换时间、提高各工序之间的协同性。

1.2　复杂破碎矿体充填采矿方法分类与适配依据

本文的分类并不替代传统采矿方法选型，而是在基本开采条件评价之后，依据主要工程矛盾和主导控制机制对充填采矿技术进行归纳。针对极不稳固矿体和下向回采条件，已有研究围绕下向分层、下向进路及其机械化组织开展了较系统的工程应用[35-39]；近期研究也进一步强调充填采矿在复杂条件下的方法适配与参数优化[40-41]。在此基础上，可将相关技术归纳为小暴露连续回采类、结构单元嗣

后充填类和强控制联合支护充填类。

小暴露连续回采类以限制采场暴露面积和暴露时间为主要特征,包括上向水平分层充填、上/下向进路胶结充填和削壁充填等,其适用对象主要为较薄、边界变化大、矿石价值较高或贫化控制要求严格的矿体。该类方法通过小单元回采和及时充填维持采场局部稳定,但采充循环较频繁,生产组织和充填系统响应能力对效率影响较大。

结构单元嗣后充填类以采场结构划分和采后承载转换为主要特征,包括分段充填、分段空场嗣后充填以及分区差异化充填等。该类方法通过矿房、矿柱与充填体的空间组合,在控制采空区稳定的同时保留较大的回采空间,更适合中厚至厚大矿体,但对采场跨度、矿柱尺寸、充填体强度和后续暴露条件要求较高。

强控制联合支护充填类主要针对弱顶板、断层破碎带、大跨度或局部高应力区,其重点并非构建全新的独立采矿法,而是在既有充填采矿方法的基础上叠加注浆、锚杆-锚索、人工顶板等主动控制措施,使支护作用与充填体承载形成互补。此类技术的围岩控制能力较强,但也会相应增加施工工序和工程成本。

因此,实际采矿方法选择宜遵循"基本条件评价-主要矛盾识别-主导控制机制确定-方法组合与参数设计"的顺序。复杂破碎矿体充填采矿方法分类与适配逻辑如图 2 所示,用于说明不同控制思路之间的对应关系。

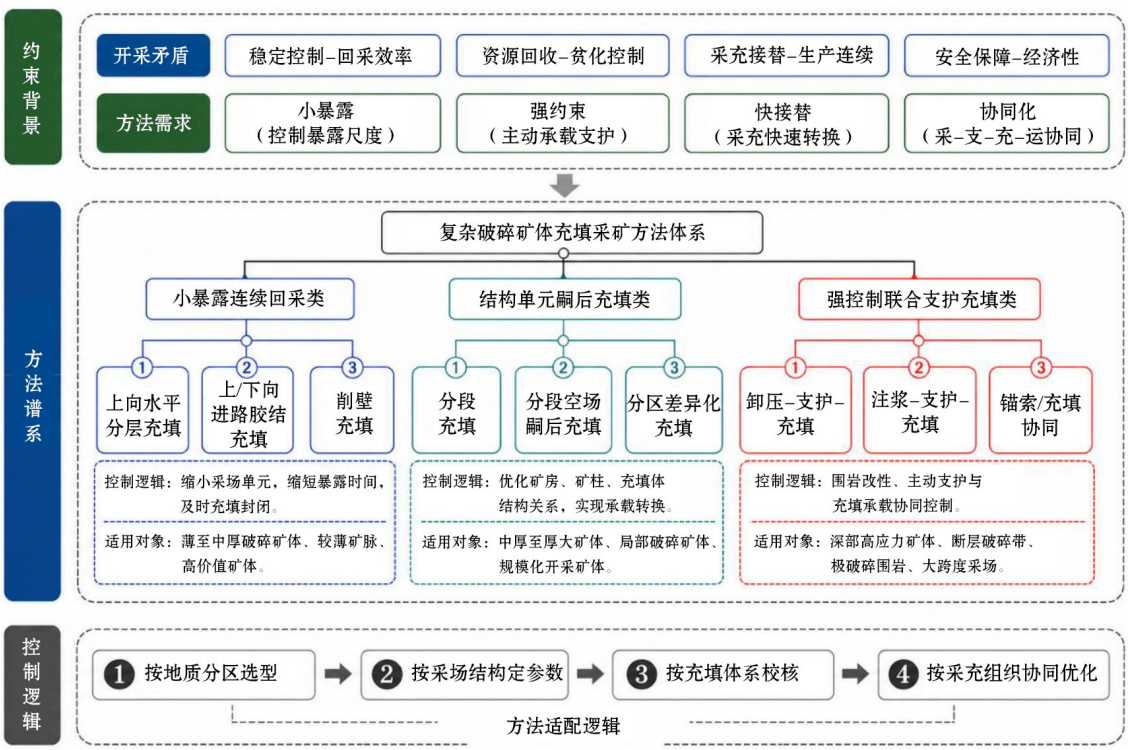


图 2 复杂破碎矿体充填采矿方法分类与适配逻辑

Fig.2 Classification and adaptation logic of backfill mining methods for complex fractured orebodies

2 复杂破碎矿体充填采矿方法分类与技术演进

基于方法谱系选取典型金属非金属矿山实际案例,比较不同控制机制在破碎薄矿体、中厚至厚大矿体以及弱顶板、大跨度采场中的工程条件、方法调整及其应用效果。

2.1 小暴露连续回采类方法

对于边界变化大、围岩破碎的薄至窄矿体,缩小回采单元并及时充填,是控制贫化和局部失稳的主要思路。

遂昌金矿矿体边界变化较大、局部围岩破碎且采场稳定性较差,由留矿法改用上向水平分层充填采矿法,是小暴露连续回采技术的典型案例。留矿法依赖暂留矿石形成作业平台,在矿体边界变化大、局部围岩破碎且采场稳定性较差的条件下,易出现围岩混入、贫化加剧及机械化受限等问题。采用上

向水平分层充填采矿法后，回采过程由大范围连续暴露调整为分层循环推进，采空区及时充填，充填体随之转化为回采作业平台。工程实践表明，变更采矿方法后采场生产能力由 30 t/d 提高至 110 t/d，贫化率由 40%降至 10%，综合回采率由 95%提高至 98%[42]。这表明，分层充填不仅是一项安全替代措施，还可通过采场结构重构、作业平台再造和机械化作业组织，实现贫损控制、资源回收与生产效率的协同提升。

垂庄金矿采用下向水平分层充填采矿法，为极不稳固窄矿体回采提供了较具代表性的工程实践。浅埋急倾斜窄矿体受采场空间狭小、矿岩稳固性差及采幅难以控制等因素影响，采用常规分段或上向水平分层充填采矿法回采时，易出现顶板失稳和围岩混入的问题。下向水平分层充填采矿法取消常规分段，利用上覆充填体形成保护层，使回采空间始终处于人工结构约束之下。工业试验表明，采用该方法后，采场贫化率由 14%降至 4%，回采率由 75%提高至 92%[43]。这说明，下向水平分层充填采矿法可通过人工顶板保护和小尺寸循环回采控制围岩扰动，改善采场边界的稳定性，适用于极不稳固窄矿体的安全低贫化回采。

大店沟金矿采用水平分层充填采矿法开采的实践表明，该方法对一般破碎矿体同样具有较好的适用性。破碎矿体条件下，若采场尺寸过大，易诱发顶板和边帮失稳；若大量留设矿柱，则会加剧资源损失。水平分层充填采矿法通过分层推进、及时充填和采充接替，将回采扰动限制在较小范围内。工程资料显示，该矿损失率控制在 5%以下，贫化率控制在 8%以下[42]。虽然相关研究成果以控制开采指标为主，但仍说明水平分层充填采矿法对破碎矿体的损失贫化具有较好的控制效果。小暴露连续回采类典型案例关键指标统计如图 3 所示。

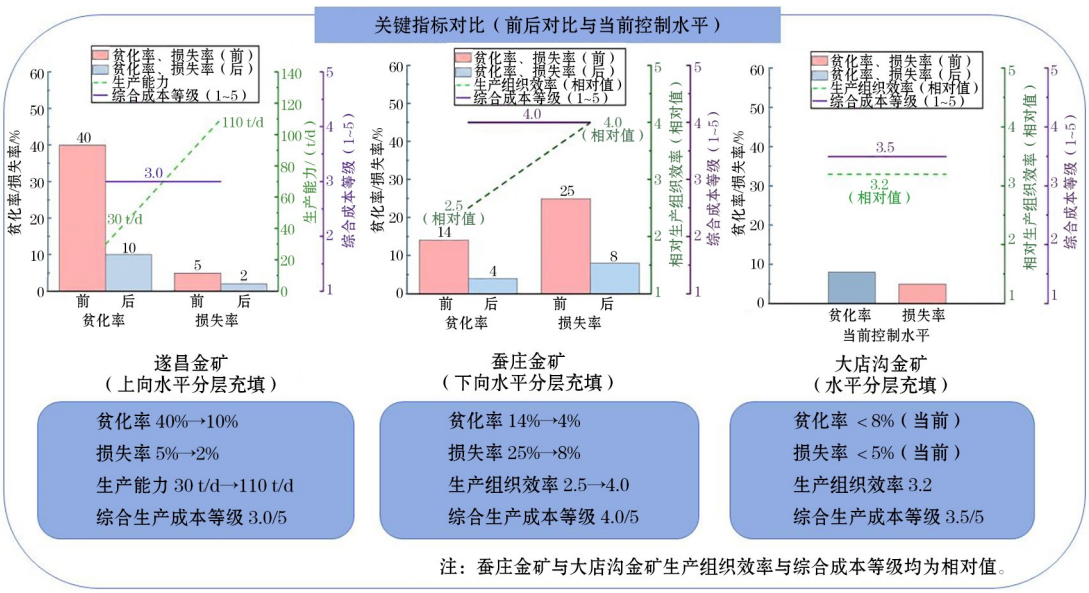


图 3　小暴露连续回采类典型案例关键指标统计

Fig.3　Key indicator statistics of typical cases for small-exposure continuous mining category methods

由图 3 可知，小暴露连续回采的优势主要体现在边界控制和贫损指标改善，其工程效果来源于回采单元缩小、暴露时间缩短以及充填作业平台的及时形成。相应的制约也较明确，即采充循环增多后，单采场产能更依赖充填系统响应和现场组织效率。

2.2　结构单元嗣后充填类方法

当矿体厚度和采场尺寸增大时，单纯缩小暴露单元难以兼顾生产能力，矿房、矿柱与充填体之间的结构关系成为围岩稳定控制的重点。

铜山铜矿前山 84 号矿体由分段崩落法转为分段空场嗣后充填采矿法，是结构单元嗣后充填类方法治理高损失、高贫化问题的典型案例。原崩落法条件下，上部泥土及蚀变风化岩易进入采场，导致矿石损失率达 40%～50%、贫化率达 30%～50%；同时，高温高硫矿体还伴随通风困难、采场自燃和地压控制等问题。改用分段空场嗣后充填采矿法后，矿

柱采用胶结充填,胶结充填体强度控制在 3.5～4.0 MPa,矿房采用分级尾砂充填。工程结果表明,该矿损失率和贫化率均降至 5%～13%[44]。这说明,嗣后充填可通过重建矿房-矿柱边界及采空区承载体系,有效控制围岩混入和矿石损失。

罗河铁矿采用分段空场嗣后充填采矿法,该类方法在较大采场条件下具有较大的优势。该矿采场尺寸为 72 m×18 m×85 m,综合回采率为 85%,贫化率为 7.38%[45]。较大的采场空间有利于机械化作业和集中出矿,但同时增大了顶板暴露面积、矿柱受力及采空区稳定控制难度。矿房回采结束后实施嗣后充填,可为后续矿柱回采及相邻采场布置提供必要的支撑和稳定边界。由此可见,分段空场嗣后充填并非单纯的采空区处理措施,而是大尺寸采场条件下维持结构稳定和生产连续的重要手段。

Turmalina 金矿膏体充填案例反映了国外矿山将充填体深度嵌入采矿循环的趋势。该矿在高品位厚矿段中采用循环膏体充填,并结合一步骤和二步骤回采顺序,目标是将作业贫化率控制在 15%以内,将高品位厚矿段回采率提高至约 95%;其 28 d 胶结充填体强度超过 0.5 MPa[46]。该案例的关键并不在于膏体材料本身,而在于充填体作为二步骤回采的边界结构发挥作用。一次回采后的充填体既提供采场侧向约束,又为后续采场暴露提供结构支撑,从而减少矿柱留设、控制贫化并提高高品位矿段回采率。

结构单元嗣后充填的共同特征是充填体由采后填料转变为采场结构的一部分。铜山铜矿侧重解决高损失、高贫化问题,罗河铁矿体现大尺寸采场下的生产组织,Turmalina 金矿则将膏体充填嵌入分步骤回采。三者的工程目标不同,但均依赖矿房、矿柱和充填体之间的合理承载转换。

2.3 强控制联合支护充填类方法

在弱顶板、大跨度或机械化作业条件下,充填体自身强度并不能完全代表采场稳定性,人工顶板、主动支护和作业平台等关键结构需要分别进行设计与校核。

金川镍矿下向进路胶结充填人工顶板的研究,体现了人工顶板设计由经验取值向监测校核的转变。下向进路回采要求人员和设备在胶结充填体形成的人工顶板下方作业,人工顶板稳定性直接关系采场安全。该矿原进路跨度为 5.0 m、高度为 4.0 m,充填料浆质量浓度为 77%～79%,灰砂比为 1∶4,28 d 单轴抗压强度约为 5.0 MPa,抗拉强度约为 0.59 MPa。基于现场传感器监测和厚板理论分析,研究得到人工顶板所需强度分别为 0.325 MPa 和 0.304 MPa;当进路跨度由 5.0 m 扩大至 6.0 m 后,顶板最大累计下沉量为 11.69 mm,两帮最大收敛值为 8.34 mm,单循环生产能力提高约 20%[9]。这表明,人工顶板设计应区分材料设计强度与结构受力需求,并结合现场监测和理论校核,实现安全性与经济性的协调统一。

红透山矿深部大跨度采场研究表明,深孔锚索支护与充填边界协同是控制顶板失稳的重要手段。深部大跨度采场受高应力和结构面切割影响,顶板局部楔形体失稳风险突出。相关研究采用 RMR 分级、Q 系统、GSI、Mathews 稳定图法、UNWEDGE 数值模拟和 FLAC3D 数值模拟等方法开展稳定性评价,并提出 9 m 长锚索、2.0 m×2.0 m 网度支护方案,支护后楔形体安全系数提高至 1.6[47]。该案例说明,在采场暴露阶段,深孔锚索提供主动约束;在充填后期,充填体提供侧向支撑和采空区稳定作用,二者共同构成大跨度采场复合承载体系。

大红山铜矿表层充填体承载设计,反映了上向分层充填中作业平台功能由经验化向结构化设计转变。表层充填体不仅用于采空区处理,还需承受无轨设备荷载并维持后续回采平台稳定。针对 Atlas ST7 铲运机满载运行条件,相关研究建立了表层充填体强度与厚度模型,确定设计抗压强度为 1.32 MPa、厚度为 0.5 m[10]。该成果表明,在机械化上向分层回采中,充填体已由经验性作业平台转变为可计算、可校核的承载结构。

3 个案例分别针对人工顶板、顶板关键块体和设备作业平台进行控制。它们的评价指标并不相同,也说明强控制联合支护充填的重点不是简单增加支护或提高充填体强度,而是先识别影响稳定的关键结构,再根据其受力功能选择相应的加固、监测和参数校核方法。

由于各案例的矿体条件、统计周期和指标并不统一,将各案例的工程条件、技术响应和应用效果汇总,见表 2。

表 2　复杂破碎矿体充填采矿典型案例及应用效果对比

Table 2　Typical cases and application effects comparison of backfill mining for complex fractured orebodies

方法类型	典型矿山	工程约束	技术响应	关键指标	进展意义
小暴露连续回采类	遂昌金矿	留矿法贫化率高、开采效率低、机械化程度受限。	上向水平分层充填与机械化出矿	贫化率由 40%降至 10%；综合回采率由 95%提高至 98%；生产能力由 30 t/d 提高至 110 t/d。	小暴露分层回采可同步改善矿石贫化、回采率和生产能力。
	蚕庄金矿	浅埋急倾斜窄矿体，矿岩稳定性差。	下向水平分层充填与上覆充填体保护	贫化率由 14%降至 4%；回采率由 75%提高至 92%。	下向水平分层充填适合极不稳固矿体低贫损回采。
	大店沟金矿	破碎矿体安全性和贫损控制困难。	水平分层充填	损失率<5%；贫化率<8%。	分层充填可作为破碎矿体采矿方法的转型路径。
结构单元嗣后充填类	铜山铜矿	原崩落法损失贫化高，通风、自燃和地压问题突出。	分段空场嗣后充填、矿柱胶结充填	损失率由 40%～50%降至 5%～13%；贫化率由 30%～50%降至 5%～13%；胶结充填体强度为 3.5～4.0 MPa。	嗣后充填由采空区治理转向承载结构重构。
	罗河铁矿	较大采场尺寸下需兼顾开采效率与采空区稳定。	分段空场嗣后充填	采场尺寸 72 m×18 m×85 m；综合回采率 85%；贫化率 7.38%。	充填体参与后期承载，支撑规模化开采。
	Turmalina 金矿	高品位厚矿段需控制贫化并减少矿柱留设。	膏体充填参与一二步骤回采循环	目标贫化率≤15%；回采率约 95%；28 d 强度>0.5 MPa。	膏体充填进入采矿循环和采场边界设计。
强控制联合支护充填类	金川镍矿	下向进路人工顶板稳定与开采效率受限。	现场监测、厚板理论和进路跨度优化	28 d 抗压强度约 5.0 MPa；跨度由 5.0 m 扩大至 6.0 m；顶板下沉量 11.69 mm；两帮收敛值 8.34 mm；产能提高 20%。	人工顶板由经验强度设计转向实测校核和参数优化。
	红透山矿	深部大跨度采场顶板楔形体失稳风险。	深孔锚索支护与稳定性评价	9 m 锚索；2.0 m×2.0 m 网度；支护后楔形体安全系数为 1.6。	深孔锚索与充填边界共同控制大跨度采场稳定。
	大红山铜矿	表层充填体需承受无轨设备荷载。	表层充填体强度与厚度模型	抗压强度 1.32 MPa；厚度 0.5 m。	表层充填体由经验平台转向结构化承载设计。

3　复杂破碎矿体充填采矿关键问题与发展趋势

前述案例表明，复杂破碎矿体充填采矿的工程效果与矿体几何条件、围岩稳定性、采场尺寸及充填体功能密切相关。遂昌金矿、蚕庄金矿和大店沟金矿通过缩小回采单元并及时充填改善了贫化损失，但频繁采充循环对充填系统响应和生产组织提出更高要求；铜山铜矿、罗河铁矿和 Turmalina 金矿利用矿房-矿柱-充填体的阶段性转换支撑较大尺寸回采，其效果依赖采场结构、充填体接顶质量和充填体强度；金川镍矿、红透山矿和大红山铜矿则说明，人工顶板、主动支护和作业平台需要按具体承载功能进行校核。由此可见，现有方法虽能解决特定工程问题，但在方法适配、承载转换、采充时序和技术经济性方面，仍缺少可普遍移植的量化设计框架。为归纳案例反映的共性问题及其控制方向，构建图 4 所示矩阵。



图 4　复杂破碎矿体充填采矿关键问题-控制方向矩阵

Fig.4　Matrix of key issues and control directions for backfill mining in complex fractured orebodies

方法适配的首要问题是地质条件与设计参数之间缺少稳定的映射关系。现有金属矿山采矿技术研究普遍强调方法选择与矿体产状、岩体条件和生产要求相协调,并逐步向精细化、绿色化和协同化发展[47-50]。对于复杂破碎矿体,应在传统矿体厚度、倾角和稳固性评价的基础上,进一步考虑构造破碎程度、局部应力环境、可采性及资源价值,形成“工程地质分区-主要矛盾-方法组合-结构参数”的对应关系。这样既可避免全矿统一采用高等级支护和高强度充填造成投入过大,也能降低局部复杂区段控制不足的风险。

承载关系则是连接三类方法的共同问题。结构单元嗣后充填类案例表明,围岩、矿柱和充填体的主导作用会随矿房回采、充填养护和后续采场暴露发生转换;大红山铜矿人工顶板与作业平台案例进一步说明,不同功能的充填体对强度、厚度和变形要求并不相同[14-18,43-45]。因此,后续研究应从单一抗压强度控制转向功能导向的结构设计,重点关注接顶状态、界面黏结、早期强度增长和长期变形对荷载传递的影响,并明确支护结构在暴露阶段与充填体在后续阶段的作用边界。

采充时序与贫化损失控制需放在同一生产循环中考虑。小暴露连续回采类案例说明,及时充填有助于限制围岩混入,但频繁循环会增加等待和组织成本;结构单元嗣后充填虽然有利于提高生产能力,却要求充填体在后续矿柱或相邻采场回采前达到相应承载状态[41-45]。因此,允许暴露时间、回采跨度、支护时机、封堵接顶、充填能力、早期强度和养护周期应协同确定,贫损评价也应由最终贫化率、损失率进一步延伸至矿岩边界偏差、超欠挖、矿柱回采和充填封闭时效等过程指标。

在此基础上,采-支-充-运协同的实质是使生产能力与采场稳定状态相匹配。回采计划不能脱离充填站能力、管路输送、封堵接顶、支护施工和出矿运输单独制定;局部破碎带、弱顶板与相对完整区域也不宜采用完全相同的支护和充填等级。通过分区支护、差异化充填和功能分级,可在满足稳定控制要求的同时减少不必要的胶凝材料和支护投入。

随着采场监测和矿山数字化技术的发展,上述分区、承载和时序设计具备由静态参数向动态修正转变的条件。现有研究已开始利用数字孪生框架关联地下矿山的地质、设备和生产信息[51]。针对复杂破碎矿体,可进一步将顶板位移、两帮收敛、锚索受力、充填体应力与强度增长、料浆输送及采场环境等数据与地质模型和生产计划关联,用于识别稳定状态、预测充填体承载能力并调整采充顺序。图5为相应的采-支-充-运协同控制框架。

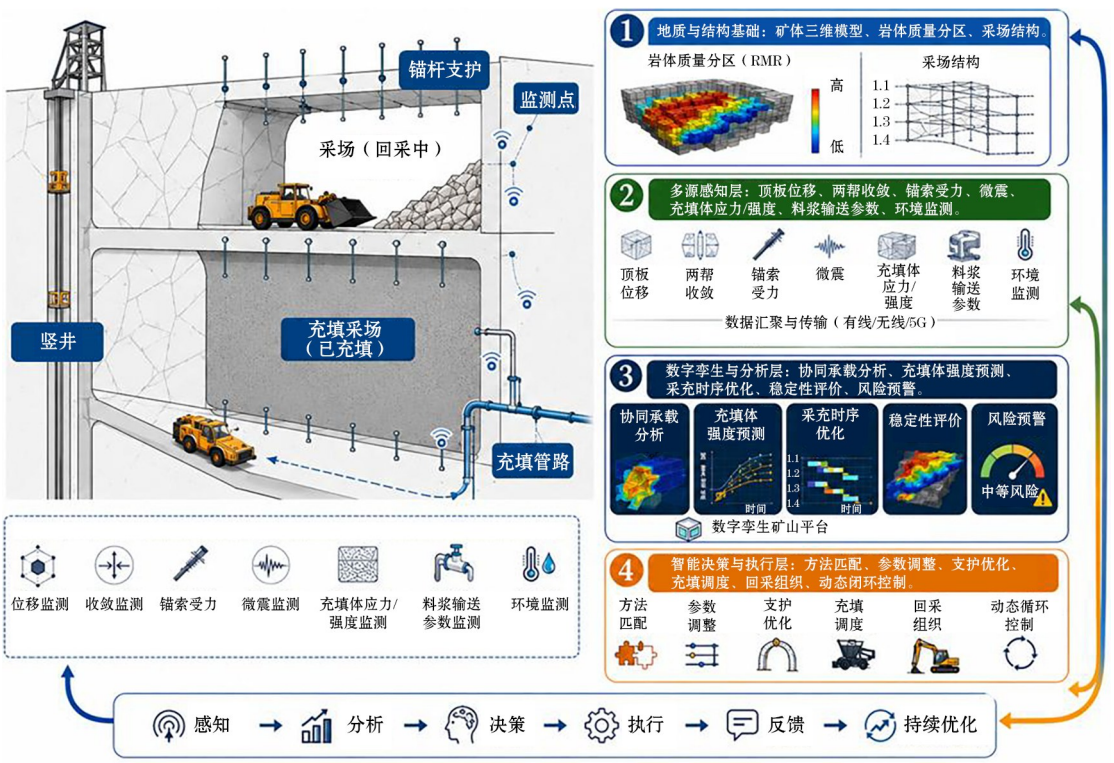


图5 复杂破碎矿体的智能化采-支-充-运协同控制框架

Fig.5 Intelligent collaborative control framework for mining-support-backfill-transportation in complex fractured orebodies

由图5可知，该框架由地质与结构基础、多源感知层、数字孪生与分析层和智能决策与执行层4个层次组成，其核心是通过“感知-分析-决策-执行-反馈”形成闭环，而不是单纯建立静态三维模型。监测结果应能够反向修正岩体分区、支护参数、充填强度和回采顺序，使设计参数随采场状态逐步更新[51]。

总体而言，复杂破碎矿体充填采矿的发展重点可归结为3个层次：以工程地质分区提高方法适配性，以功能化和阶段性承载分析完善结构设计，以采充时序和监测反馈实现生产过程协同。三者相互衔接，最终目标是在稳定可控的前提下兼顾资源回收、生产效率和技术经济性。

4 结论

本文围绕复杂破碎矿体的开采约束、充填采矿方法分类、典型工程应用及关键问题进行了系统梳理，得到的主要结论如下。

(1) 复杂破碎矿体充填采矿的核心是依据矿体和围岩条件控制采场暴露，并利用充填体、矿柱及支护结构共同维持采场稳定。充填体的作用已由采空区处理扩展为作业平台、人工顶板、侧向边界和承载结构。

(2) 采矿方法选择仍应以矿体产状、几何特征、矿岩稳固性和生产条件为基础。在此基础上，按主导控制机制归纳为小暴露连续回采、结构单元嗣后充填和强控制联合支护充填三类，分别侧重暴露控制、承载转换和关键结构强化。

(3) 典型案例表明，小暴露连续回采有利于薄、窄及边界复杂矿体的贫损控制；结构单元嗣后充填能够兼顾中厚至厚大矿体的生产规模与采空区稳定；人工顶板、深孔锚索和表层充填体等措施可提高弱顶板、大跨度及机械化作业条件下的稳定控制能力。

(4) 现阶段的主要不足集中在工程地质条件与方法参数匹配、不同回采阶段的复合承载关系、采充时序衔接以及技术经济评价等方面。未来研究应以工程地质分区为基础，开展功能导向的充填体结构设计，并将允许暴露时间、早期强度、支护时机和生产循环协同考虑；结合多源监测和数字模型动态修正支护、充填与回采参数，推动复杂破碎矿体充填采矿由经验适配向定量设计和全过程协同发展。

参考文献(References)：

[1] Ghorbani Y, Nwaila G T, Zhang S E, et al. Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions[J]. Resources Policy, 2023, 80: 103222.

[2] 朱万成，代风，任敏，等.动态扰动下顶板块体失稳冒落研究综述[J].工程科学学报，2023，45(9)：1425-1440.
Zhu Wancheng, Dai Feng, Ren Min, et al. Review of unstable falling of roof rock blocks under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1425-1440.

[3] 张晓君.采空区顶板大面积冒落规律性研究[J].矿山压力与顶板管理，2005(2)：35-37.
Zhang Xiaojun. Study on the regularity of large-area roof caving in goafs[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2005(2): 35-37.

[4] 刘建坡，魏登铖，师宏旭，等.深部金属矿采场顶板滑移冒落微震时空演化规律[J].金属矿山，2021(11)：13-18.
Liu Jianpo, Wei Dengcheng, Shi Hongxu, et al. Spatiotemporal evolution of microseismicity during roof sliding and caving in deep metal-mine stopes[J]. Metal Mine, 2021(11): 13-18.

[5] 卢央泽，苏建军，李晓芸.深部破碎带矿体顶板冒落防治技术[J].采矿与安全工程学报，2009，26(1)：60-64+69.
Lu Yangze, Su Jianjun, Li Xiaoyun. Prevention and control technology for roof caving of orebodies in deep fractured zones[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 60-64+69.

[6] 袁锦锋，董亚宁，郑威，等.基于微震监测的采场顶板冒落反演分析[J].现代矿业，2022，38(7)：224-228.
Yuan Jinfeng, Dong Yaning, Jia Wei, et al. Inversion analysis of stope roof caving based on microseismic monitoring[J]. Modern Mining, 2022, 38(7): 224-228.

[7] 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.
Cheng Haiyong, Wu Aixiang, Wu Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 11-25.

[8] Lottermoser B G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes[J]. Elements, 2011, 7(6): 405-410.

[9] Araujo F S M, Taborda-Llano I, Nunes E B, et al. Recycling and reuse of mine tailings: a review of advancements and their implications[J]. Geosciences, 2022, 12(9): 319.

[10] Xue Gaili, Yilmaz Erol, Wang Yongding. Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(8): 1455-1473.

[11] Belem T, Benzaazoua M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2): 147-174.

[12] Saw H, Villaescusa E. Research on the mechanical properties of minefill: influences of material particle size, chemical and mineral composition, binder and mixing water[C]//Ilgner H J, ed. Minefill 2011: Proceedings of the 10th International Symposium on Mining with Backfill. Johannesburg: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011: 143-152.

[13] Potvin Y, Thomas E, Fourie A, et al. Handbook on mine fill[M]. Perth: Australian Centre for Geomechanics,2005.

[14] Chen F, Liu J, Zhang X, et al. Review on the art of roof contacting in cemented waste backfill technology in a metal mine[J]. Minerals,2022,12(6):721.

[15] Grabinsky M W, Thompson B D, Veenstra R L. Cemented paste backfill strength profiles for continuous pouring and liquefaction resistance[C]//Wilson G W, Beier N A, Sego D C, et al., eds. Paste 2023: Proceedings of the 25th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics,2023: 257-270.

[16] Helinski M, Fahey M, Fourie A. Numerical modeling of cemented mine backfill deposition [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007,133(10):1308-1319.

[17] Han B, Ji K, Wang J D, et al. Determination of the required strength of artificial roof for the underhand cut-and-fill mine using field measurements and theoretical analysis [J]. Sustainability,2023,15(1):189.

[18] Wang J, Yang T Y, Qiao D P, et al. Strength model of surface backfill in upward slicing and filling method and its application[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2024,41(2):997-1011.

[19] 李晓斌.上向进路式尾砂胶结充填采矿法采场结构参数研究[J].世界有色金属,2024(1):76-78.
Li Xiaobin. Study on stope structural parameters for the upward drift tailings cemented backfill mining method[J]. World Nonferrous Metals,2024(1):76-78.

[20] 许爱辉.上向水平进路充填法的分析与研究[J].世界有色金属,2022(24):190-192.
Xu Aihui. Analysis and study of the upward horizontal drift-and-fill mining method[J]. World Nonferrous Metals,2022(24):190-192.

[21] 劳元学,邓高岭,郑伯坤,等.上向分层全尾砂胶结充填采矿法在冷水箐铜镍矿的应用研究[J].采矿技术,2022,22(6):161-162+165.
Lao Yuanxue, Deng Gaoling, Zheng Bokun, et al. Application of the upward slicing full-tailings cemented backfill mining method in Lengshuiqing Copper-Nickel Mine [J]. Mining Technology,2022,22(6):161-162+165.

[22] 张社稷.上向水平分层进路式全尾砂胶结充填采矿法在锦丰金矿的应用[J].黄金,2020,41(12):53-56.
Zhang Sheji. Application of the upward horizontal slicing drift full-tailings cemented backfill mining method in Jinfeng Gold Mine[J]. Gold,2020,41(12):53-56.

[23] 王朝阳.浅谈垂直分条上向水平分层胶结充填采矿法在某铜钼矿山的应用[J].世界有色金属,2019(11):36+39.
Wang Chaoyang. Application of the vertical-strip upward horizontal slicing cemented backfill mining method in a copper-molybdenum mine[J]. World Nonferrous Metals, 2019(11):36+39.

[24] 余文远.上向水平进路充填采矿法在吉尔吉斯左岸金矿的应用[J].世界有色金属,2019(4):55-57.
She Wenyuan. Application of the upward horizontal drift-and-fill mining method in the Left Bank Gold Mine of Kyrgyzstan[J]. World Nonferrous Metals,2019(4):55-57.

[25] 王永智.上向进路式尾砂胶结充填采矿法采场结构参数优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2005.
Wang Yongzhi. Optimization of stope structural parameters for the upward drift tailings cemented backfill mining method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2005.

[26] 刘明.内蒙查干银矿3号矿体上向进路尾砂胶结充填采矿方法试验研究[D].长沙:中南大学,2002.
Liu Ming. Experimental study on the upward drift tailings cemented backfill mining method for No. 3 orebody in Chagan Silver Mine, Inner Mongolia[D]. Changsha: Central South University,2002.

[27] 刘多文,王立君,常青法,等.人工底柱上向水平分层进路式胶结充填采矿法试验[J].矿业快报,2001(4):5-7.
Liu Duowen, Wang Lijun, Chang Qingfa, et al. Experimental study of the upward horizontal slicing drift cemented backfill mining method with an artificial sill pillar [J]. Express Information of Mining Industry,2001(4):5-7.

[28] 郭析兴,李向东.上向进路胶结充填法的工艺改进[J].矿业研究与开发,2000(6):3-5.
Guo Xixing, Li Xiangdong. Process improvement of the upward drift cemented backfill mining method[J]. Mining Research and Development,2000(6):3-5.

[29] 唐学义,严鹏,汪志国,等.混凝土垫层削壁充填法在急倾斜极薄矿脉中的应用[J].现代矿业,2017,33(10):52-54+63.
Tang Xueyi, Yan Peng, Wang Zhiguo, et al. Application of the resuing-and-filling method with a concrete cushion in steeply inclined extremely thin veins[J]. Modern Mining, 2017,33(10):52-54+63.

[30] 何良军,赵文奇,高忠.泗人沟铅锌矿削壁充填采矿法优化研究[J].矿业研究与开发,2016,36(6):78-81.
He Liangjun, Zhao Wenqi, Gao Zhong. Optimization of the resuing-and-filling mining method in Sirengou Lead-Zinc Mine[J]. Mining Research and Development,2016,36(6): 78-81.

[31] 包华民.极薄矿脉采矿方法综述[C]//中国核学会铀矿地质分会,中国核学会铀矿冶分会.全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集(下).海口:[出版者不详],2012:506-509.
Bao Huamin. Review of mining methods for extremely thin veins [C]//Uranium Geology Branch, Chinese Nuclear Society; Uranium Mining and Metallurgy Branch, Chinese Nuclear Society. Proceedings of the National Symposium on the Construction of Large Uranium Mining Bases (Vol. 2). Haikou:[s.n.],2012:506-509.

[32] 尹升华,吴爱祥.缓倾斜中厚矿体采矿方法现状及发展趋势[J].金属矿山,2007(12):10-13.
Yin Shenghua, Wu Aixiang. Status quo of mining methods for gently inclined medium-thick orebodies and their development trend[J]. Metal Mine,2007(12):10-13.

[33] 刘玉.黄金矿山采矿方法发展趋势的探讨[J].中国金属通报，2019(3)：24-25.
Liu Yu. Discussion on the development trend of mining methods in gold mines[J]. China Metal Bulletin，2019(3)：24-25.

[34] 高静.我国金属矿山采矿技术进展及趋势综述[J].中国金属通报，2020(7)：9-10.
Gao Jing. Review of the progress and development trends of metal-mining technology in China[J]. China Metal Bulletin，2020(7)：9-10.

[35] 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(增刊 1)：382-385+397.
Sun Chengchao，Luo Lei，Liang Yanbing. Application of downward horizontal layered drift cementing and filling mining method in Maoping lead zinc mine[J]. China Mining Magazine，2023，32(Suppl.1)：382-385+397.

[36] 张金来，王建栋，韩斌，等.金川三矿区下向进路胶结充填采矿法采场结构参数优化[J].矿业研究与开发，2022，42(11)：1-7.
Zhang Jinlai，Wang Jiandong，Han Bin，et al. Optimization of stope structural parameters for the underhand drift cemented backfill mining method in No. 3 mining area of Jinchuan[J]. Mining Research and Development，2022，42(11)：1-7.

[37] 李施庆，李洪浦，刁子航，等.金青顶矿区急倾斜破碎矿体下向进路充填采矿法的优化与应用[J].黄金，2021，42(11)：44-48.
Li Shiqing，Li Hongpu，Diao Zihang，et al. Optimization and application of downward approach filling mining method for steeply inclined broken orebody in Jinqingding mining district[J]. Gold，2021，42(11)：44-48.

[38] 万仕明，潘泽，王立，等.机械化盘区下向分层进路胶结充填采矿法在阿舍勒铜矿的应用[J].新疆有色金属，2019，42(6)：104-108.
Wan Shiming，Pan Ze，Wang Li，et al. Application of the mechanized panel underhand slicing drift cemented backfill mining method in Ashele Copper Mine[J]. Xinjiang Nonferrous Metals，2019，42(6)：104-108.

[39] 李振振.盘区下向分层进路胶结充填采矿法在阿希金矿的应用研究[J].新疆有色金属，2017，40(4)：62-64+67.
Li Zhenzhen. Application of the panel underhand slicing drift cemented backfill mining method in Axi Gold Mine[J]. Xinjiang Nonferrous Metals，2017，40(4)：62-64+67.

[40] 赵巍.充填采矿技术在金属矿山采矿工程中的应用研究[J].世界有色金属，2026(2)：123-125.
Zhao Wei. Application of backfill mining technology in metal-mine engineering[J]. World Nonferrous Metals，2026(2)：123-125.

[41] Li S，Yu L F，Dan Z Y，et al. The recent progress China has made in mining method transformation，Part I：shrinkage method transformed into backfilling method[J]. Applied Sciences，2024，14(21)：10033.

[42] Feng F，Li D Y，Li X B，et al. Novel underhand cut-and-fill stoping method and mechanical analysis of overlying backfill[J]. International Journal of Geomechanics，2017，17(7)：04017004.

[43] 郭金峰.分段空场嗣后充填采矿方法的试验研究[J].江西有色金属，2000(3)：8-10.
Guo Jinfeng. Experimental study on sublevel open stoping with subsequent backfill[J]. Jiangxi Nonferrous Metals，2000(3)：8-10.

[44] Li Shuai，Xiang Zhenzhong，Dan Zhenyu，et al. The recent progress China has made in mining method transformation：Part Ⅱ sublevel caving method transformed into backfilling method[J]. Applied Sciences，2024，14(21)：9732.

[45] Santana J，Andrade E，Milagres L，Balbys V. Use of paste fill on cycle at Turmalina Mine[C]//Quelopana H，ed. Paste 2020：23rd International Conference on Paste，Thickened and Filtered Tailings. Santiago：Gecamin Publications，2020.

[46] 李怀宾，代碧波，赵一凡，等.红透山铜矿深部大跨度采场顶板稳定性分析[J].安全与环境学报，2022，22(5)：2468-2473.
Li Huaibin，Dai Bibo，Zhao Yifan，et al. Stability analysis of the roof of a deep large-span stope in Hongtoushan Copper Mine[J]. Journal of Safety and Environment，2022，22(5)：2468-2473.

[47] 赵元元，黄世顶.金属矿山采矿技术的创新与发展趋势[J].中国金属通报，2025(1)：1-3.
Zhao Yuanyuan，Huang Shiding. Innovation and development trends of metal-mine mining technology[J]. China Metal Bulletin，2025(1)：1-3.

[48] 郜晓龙，常超.我国金属矿山采矿技术现状与发展趋势[J].中国金属通报，2022(9)：19-21.
Gao Xiaolong，Chang Chao. Current status and development trends of metal-mine mining technology in China[J]. China Metal Bulletin，2022(9)：19-21.

[49] 杨建立.现代化采矿工艺技术在采矿工程中的应用综述[J].山西冶金，2020，43(3)：92-93.
Yang Jianli. Review of the application of modern mining technology in mining engineering[J]. Shanxi Metallurgy，2020，43(3)：92-93.

[50] 张海云，高天宇，张忠传，等.锡铁山铅锌矿上覆充填体下顶底柱资源高效回采方案研究[J].矿业研究与开发，2025，45(12)：14-23.
Zhanghaiyun，Gao Tianyu，Zhang Zhongchuan，et al. Research on the efficient recovery scheme of the top and bottom pillar resources under the overlying backfill of Xitieshan Lead-Zinc Mine[J]. Mining Research and Development，2025，45(12)：14-23.

[51] Cacciuttolo C，Atencio E，Komarizadehasl S，et al. Development of an advanced multi-layer digital twin conceptual framework for underground mining[J]. Sensors，2025，25(21)：6650.