

谈井下采矿技术及井下采矿的发展趋势

李星驰

鄂尔多斯市泰普矿业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017205

摘要：矿产资源是支撑工业发展的关键基础，在经济体系中占据重要地位。本文聚焦井下采矿技术及其发展趋势。开篇概述井下采矿技术，进而详细剖析关键技术，如充填采矿技术，能有效解决采空区问题；崩落采矿技术，通过合理崩落围岩管理地压；空场采矿技术，依赖矿柱和围岩稳固性维护采空区。同时，预测未来井下采矿将朝着智能化、绿色环保、深井开采技术突破以及溶浸技术广泛应用的方向发展，为行业可持续发展提供参考。

关键词：井下采矿技术；井下采矿；发展趋势

引言：矿产资源作为工业发展的基石，在社会经济进程中地位举足轻重。而井下采矿作为获取深部矿产资源的关键手段，其技术水平直接关乎资源开采效率、安全保障及生态环境影响。当下，随着浅部矿产资源的逐渐减少，对井下采矿技术提出了更高要求。一方面，需提升开采效率以满足资源需求；另一方面，要兼顾安全与环保。因此，深入探究井下采矿技术，明确其发展趋势，对推动矿业可持续发展意义非凡，有助于在资源开发与环境保护间寻求平衡，保障经济社会的稳定发展。

1 井下采矿技术概述

井下采矿技术是从地下矿床的矿块中采出矿石的一整套复杂工艺，涵盖矿床开拓、矿块采准、切割以及回采这四个关键步骤。其核心目标是在确保安全的前提下，高效、经济地获取矿产资源。矿床开拓作为前期关键环节，依据矿床的赋存条件和矿体产状，选用适宜的开拓方式，构建起运输、行人、通风及排水等系统，为后续开采工作奠定基础。矿块采准则是按照预定计划掘进一系列巷道，为切割和回采创造条件。这些巷道犹如地下脉络，连接着各个工作区域，确保人员、设备及矿石能够顺畅通行与运输。切割工作旨在为回采开辟自由面和落矿空间，为矿石的顺利采落提供必要条件。回采是整个采矿过程的核心，包括落矿、出矿和地压管理三项重要作业。落矿即运用爆破等手段，将矿石从矿体上采落下来，出矿是把采下的矿石运输至阶段运输水平；地压管理则通过矿柱支撑、充填体填充或各类支架设置等方式，维护采空区的稳定性，防止围岩垮塌，保障作业安全。井下采矿方法丰富多样，常见的有空场采矿法、充填采矿法、崩落采矿法等。空场采矿法适用于矿石和围岩都稳固的矿体，采空区依靠矿柱和围岩自身的稳固性来维持。充填采矿法多用于围岩不稳固、矿石贵重或需保护地表的情况，通过充填材料维护采空区；崩落采

矿法是随着回采推进，有计划地崩落围岩填充采空区，适用于允许地表塌陷的矿床。

2 井下采矿的关键技术

2.1 充填采矿技术

2.1.1 干式充填

干式充填选用的充填料通常为碎石、废石或尾矿等。这些充填料经人工或机械运输至采场，再借助重力或人力倾倒等方式，填入采空区。该方法的显著优势在于工艺相对简单，对设备要求不高。在一些小型矿山，或是矿石价值较低、开采规模有限的矿段，干式充填应用广泛。例如在部分有色金属矿的边角矿体开采中，干式充填能有效利用废弃石料，既处理了矿山固体废弃物，又降低了充填成本。不过，干式充填也存在明显不足，充填效率较低，难以实现大规模快速充填，且充填体的密实度和强度有限，对采空区的支撑效果相对较弱，在大规模高强度开采场景下适用性欠佳。

2.1.2 水力充填

水力充填以水作为充填料的输送介质，将尾砂、砂石等充填料在搅拌站与水混合搅拌均匀后，通过管道利用水力自流或泵送的方式输送至采空区。在充填料到达采空区后，水会自然渗透或通过排水系统排出，充填料则沉淀堆积形成充填体。这种充填方式的优势在于输送效率高，能够远距离、大规模地输送充填料，可适应不同规模的矿山开采需求。在大型金属矿山，如铜矿、铁矿等，水力充填被广泛应用。但水力充填对充填料的粒度和级配要求较为严格，且充填过程中大量水的排放可能对矿山周边环境造成一定影响，如引发水土流失、水污染等问题。

2.1.3 膏体充填

膏体充填采用经过特殊加工处理的高浓度、低泌水的膏状充填料，其成分一般包括尾砂、水泥、粉煤灰及

添加剂等。膏体充填料在搅拌站制成后，通过泵送方式经管道输送至采空区。膏体充填的突出优点是充填体强度高、稳定性好，能够有效控制采空区围岩变形，特别适用于对采空区稳定性要求高的矿山，如深部开采矿山、地表需严格保护的矿山。同时，膏体充填能减少充填体的收缩变形，降低采空区二次处理的风险。然而，膏体充填工艺复杂，对设备和技术要求高，充填料制备成本也相对较高，这在一定程度上限制了其大规模推广应用。

2.2 崩落采矿技术

2.2.1 无底柱分段崩落法

分段崩落法在分段下部不设底部结构，凿岩、崩矿和出矿作业均在回采巷道内完成，极大简化了采场结构，利于无轨自行设备作业。常用分段高度12-15m，通过斜坡道等与各分段联络巷道相连。分段联络巷道多位于矿体下盘，每隔约20m掘进一条回采进路，上下分段进路呈菱形布置。在进路端部开切割槽，利用中深孔或深孔挤压爆破，后退回采，崩落矿石在覆岩下，由进路端部铲运机等设备运至放矿溜井。此方法适用于矿石具有一定稳固性、围岩能自然或强制崩落、急倾斜中厚以上矿体等情况，虽生产能力大、安全性好，但矿石贫化率高，通风条件欠佳。

2.2.2 有底柱分段崩落法

有底柱分段崩落法需在分段底部构建出矿巷道，包括漏斗、斗颈等结构。利用中深孔或深孔在分段凿岩巷道落矿，矿石从底部出矿巷道运出。依据矿体倾角，出矿巷道位于矿体或下盘岩石中。按崩落方向，分为水平层落矿和垂直层落矿两类。水平层落矿时，拉底巷道易掘进、炮孔装药方便，但凿岩硐室易失稳；垂直层落矿则相反。该方法适用于矿体形状规则、急倾斜、中厚以上，矿石中等稳固到稳固，围岩能自然崩落且地表允许陷落的情况。不过，其底部结构复杂，限制了大型无轨设备使用。

2.2.3 阶段崩落法

阶段崩落法以整个阶段为回采单元，一次崩落阶段内的全部或部分矿体。根据落矿方式，分为阶段强制崩落法和阶段自然崩落法。阶段强制崩落法借助深孔或药室爆破强制崩落矿石，要求矿体厚大、矿石稳固、围岩能自然崩落且地表允许塌陷；阶段自然崩落法则依靠矿体自身的应力作用使其自然崩落，适用于矿体节理裂隙发育、整体性差、矿石松软破碎的情况。此方法生产效率高，可大规模开采，但对矿体条件要求苛刻，前期准备工作复杂。

2.3 空场采矿技术

2.3.1 全面采矿法

全面采矿法适用于开采矿石和围岩均稳固、倾角较小（一般小于 30° ）的水平或缓倾斜矿体，厚度通常在3-5m以下。在开采时，沿矿体走向划分矿块，矿块内不划分矿房与矿柱，而是连续回采。回采过程中，根据矿体厚度，若矿体较薄则一次采全厚；若矿体稍厚，可分层回采。采场一般沿矿体走向布置，长度可达几十米到上百米，宽度则依据矿体厚度和开采设备确定。为维护采场顶板稳定，通常会不规则地留设矿柱，矿柱尺寸和间距根据实际地质条件灵活调整。该方法采准切割工作量小，工艺简单，通风条件好，能有效利用小型设备进行开采，适用于小型矿山或矿体赋存条件简单的区域。但由于矿柱不规则且难以回采，矿石损失率相对较高。

2.3.2 房柱采矿法

房柱采矿法主要应用于矿石和围岩稳固、倾角小于 $30^\circ-40^\circ$ 的矿体，厚度适用范围广，从2m到数十米均能适用。此方法将阶段或盘区划分为矿房与矿柱，矿房和矿柱交替布置，矿柱一般不回收。矿房长轴可沿矿体走向、倾向或伪倾斜方向布置，长度多为40-60m，宽度8-20m，矿柱呈圆形（直径3-7m）或方形（ $3\times 3\text{m}^2-4\times 4\text{m}^2$ ），间距5-8m。对于薄矿层，常采用浅眼崩矿和电耙运搬；厚矿体则可选用深孔崩矿方案，当矿体近乎水平且厚度较大时，可采用凿岩台车、铲运机等大型机械化设备。采准切割工作包括掘进放矿溜井、电耙硐室、上山巷道、联络平巷及切割平巷等。回采时，可沿走向从一侧向另一侧推进，或从中央向两侧推进，多个矿房可同时作业。落矿方式依矿体厚度而定，浅眼落矿适用于薄矿体，中深孔或深孔落矿用于厚矿体。出矿可采用电耙、装运机、自卸汽车等设备。该方法结构和回采工艺简单，生产能力高，通风良好，但矿柱所占比重较大，矿石损失较多。

2.3.3 留矿采矿法

留矿采矿法适用于开采矿石稳固、围岩中等稳固以上，且倾角为急倾斜（一般大于 60° ）的薄至中厚矿体。在回采过程中，将矿块划分为矿房和矿柱，先采矿房。矿房自下而上分层回采，每采完一层，暂留部分矿石在采场内作为继续上采的工作平台和对采场围岩的支撑。采场底部设有漏斗，用于出矿。回采时，采用浅孔凿岩爆破，崩落的矿石一部分经漏斗放出，一部分留在采场内。当矿房全部回采完毕后，再将留矿全部放出。留矿采矿法采准切割工作量小，工艺简单，生产效率较高，成本较低。然而，该方法要求矿体形状规则，矿石和围

岩稳固性好,且采场通风条件受留矿影响较大,工人在留矿堆上作业,安全性相对较低,同时,后期大量矿石集中放出,对出矿设备要求较高。

3 井下采矿的发展趋势

3.1 智能化发展趋势

智能化已成为井下采矿不可逆转的潮流。在智能矿井支持政策以及地方建设目标的推动下,煤矿开采正从机械化、自动化迈向智能化阶段。传感器与物联网技术的广泛应用,使得设备运行状况、矿体变化等数据能实时收集并传输至中央控制系统。以无人驾驶采矿车辆为例,其依据预设路线自动运输矿石,智能凿岩台车可根据矿体特性自动调整钻孔参数,极大减少人工干预,提升开采效率。通过远程监控系统,工作人员能在地面安全区域操控井下设备,有效规避危险,降低事故发生率。并且,借助大数据分析,可精准规划开采方案,优化资源配置,减少资源浪费,推动井下采矿向高效、安全、精准的方向发展。

3.2 绿色环保发展趋势

随着环保理念深入人心,井下采矿的绿色转型迫在眉睫。一方面,矿山企业积极采用充填采矿法,利用尾矿、废石等作为充填料,既能减少固体废弃物排放,又能有效控制采空区,防止地表塌陷,保护矿山周边生态环境。另一方面,对生产工艺进行全面优化,选用高效节能设备,改进通风、排水等系统,降低能源消耗。加大对废水、废气、废渣的处理力度,采用先进的废水处理技术实现达标排放或循环利用;利用新型环保材料处理废渣,将其转化为建筑材料等,实现资源的循环利用。此外,在矿山开采过程中同步开展生态修复工作,践行“边开采、边治理、边修复”的理念,实现资源开发与生态保护的良性循环。

3.3 深井开采技术发展趋势

随着浅部矿产资源逐渐枯竭,深井开采成为保障资源供应的必然选择。但深井开采面临诸多难题,如高地温、高压力以及复杂的岩石力学性质。为此,科研人员正深入研究深井岩体的变形、破坏规律,以此优化采场结构设计,确保开采安全。在降温技术方面,研发新型

制冷设备与高效通风系统,调节井下温度,改善作业环境。针对深井矿石提升需求,研制高强度、高可靠性的提升装置。例如,原位流态化开采技术中的采选充一体化模式,在井下完成矿石破碎、选矿,精矿浆通过管道输送至地表,尾矿制备成膏体充填采空区,减少了运输环节与环境污染,为深井开采提供了新的思路与方向。

3.4 溶浸技术的广泛应用

溶浸技术作为一种绿色高效的采矿方法,正迎来更广泛的应用。该技术利用化学溶剂,在细菌辅助下,将矿石中的有用金属转化为水溶性化合物,实现与脉石的分离。其设备与工艺简单,投资少、成本低,特别适用于开采贫矿、回收废旧矿井残留矿石以及处理含矿废石,能显著提高资源利用率。井下就地浸出的方式,减少了对环境的污染与土地占用,极大改善了劳动条件。在全球范围内,溶浸技术在铀矿开采等领域已取得显著成效,如美国怀俄明州的原位溶浸采铀矿山。随着技术的不断完善与创新,未来溶浸技术将在更多矿种、更复杂地质条件下得到应用,成为井下采矿的重要技术支撑。

结束语

井下采矿技术作为矿业发展的核心支撑,在当下矿产资源开发中举足轻重。从充填、崩落到空场采矿等技术的应用,各有优劣,为满足不同矿体开采需求提供了多样选择。展望未来,智能化将赋予采矿精准高效,绿色环保理念促使行业可持续发展,深井开采突破资源深度限制,溶浸技术拓展资源利用边界。这些趋势不仅革新采矿作业模式,更关乎矿业与生态、社会发展的协同共进,对保障全球资源稳定供应、推动矿业长远进步意义非凡。

参考文献

- [1]马彦.浅谈井下采矿技术及井下采矿的发展形势[J].中国设备工程,2020,(23):215-216.
- [2]付科让.浅谈井下采矿技术及井下采矿发展形势[J].低碳世界,2020,(11):63-64.
- [3]吴雪飞.井下采矿技术及井下采矿的发展趋势探究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2020,(10):181-182.