

谈井下采矿技术及井下采矿的发展趋势

孔军峰

宁夏宝丰能源集团股份有限公司 宁夏 银川 750000

摘要：井下采矿技术正朝着智能化、绿色化、深部化方向加速演进。智能化方面，全电脑凿岩台车、5G无人驾驶运输系统等技术已实现精准作业与安全效率双提升；绿色化领域，膏体充填、无废开采等技术将资源利用率提升至新高度，减少地表破坏与固废排放；深部开采技术突破2000米级地压管理难题，南非TauTona金矿通过分级支护与微震监测系统，岩爆预警准确率达82%。这些趋势共同推动井下采矿向更高效、安全、可持续的方向发展。

关键词：井下采矿技术；井下采矿；发展趋势

引言：矿产资源作为社会发展的物质基石，其开采方式直接关乎资源可持续性与经济安全。全球约80%的工业原料、95%的能源及70%的农业资料依赖矿产供给，而我国作为全球最大的矿产消费国，正面临资源总量有限、分布不均与深部资源开发技术瓶颈的双重挑战。在此背景下，井下采矿技术正经历从机械化到智能化、从高耗能到绿色化的深刻变革。技术迭代与政策引导的双重驱动下，井下采矿行业正迈向安全高效、环境友好的新阶段。

1 井下采矿技术体系解析

1.1 传统采矿技术体系

1.1.1 柱式采煤技术

(1) 巷柱式：采用密集的小巷道网络推进回采作业，煤柱间距严格控制在10-20m，借助煤柱支撑顶板，保障井下作业安全。不过，受限于狭窄的巷道空间，爆破回采效率较低，单工班产量约35t，更适合断层多、煤层薄且不规则的中小型煤矿，或用于开采主采煤层剩余的边角煤资源。(2) 房柱式：对巷柱式技术进行优化，将工作面面积扩大至传统巷柱式的3倍，通过“房”（开采巷道）与“柱”（支撑煤柱）的交替排布，大幅提升单次开采量。但工作面扩大带来人力需求激增，支护、爆破、运输等环节需额外增加作业人员，导致人力成本较巷柱式上升40%，在劳动力成本较高的地区，需搭配简易自动化设备以平衡成本与效率。

1.1.2 长臂开采技术

(1) 该技术配套高强度胶带运输系统，相比传统刮板输送机，运输效率提升30%，可实现24小时不间断运输；同时，将盘区几何尺寸扩大至传统技术的1.8倍，减少盘区巷道的掘进量，降低辅助作业成本，单盘区资源回收率可提升5%-8%，进一步提高资源利用效率。(2) 山西潞安集团在高瓦斯厚煤层矿区应用长臂开采技术时，配

套液压支架强化顶板支护、部署瓦斯抽采系统控制有害气体，并加装智能监控设备实时监测工况。实际应用数据显示，矿区开采效率提高9.7%，回采工效提升至8.5t/工，同时因支护强度增强与风险预警机制完善，事故率下降23%，实现了生产效率与作业安全的双重提升。

1.2 新型采矿技术突破

1.2.1 智能化开采技术

(1) 全电脑三臂凿岩台车：替代传统人工手持凿岩机，通过电脑程序预设凿岩参数，三臂协同作业，凿岩定位精度达±50mm，凿岩效率提升2.8倍；同时台车配备封闭式防尘罩与负压抽尘系统，作业区域粉尘浓度降低65%，有效改善井下作业环境，减少尘肺病等职业病风险。(2) 5G+无人驾驶运输系统：依托5G网络低延迟（≤20ms）、高带宽特性，实现运输车辆自主路径规划、避障与调度。内蒙古白云鄂博铁稀土矿区应用该系统后，组建由20台无人驾驶矿车构成的运输车队，单日运输量突破1.2万吨，较人工驾驶运输效率提升25%，且避免人员在高风险运输巷道作业，安全事故发生率降至零。(3) 数字孪生技术：通过三维激光扫描、地质雷达等设备采集矿区地质数据，构建1:1三维数字模型，建模精度达0.1m，可实时映射井下煤层分布、顶板变形、设备运行状态。紫金矿业在福建紫金山金铜矿应用该技术后，通过模型模拟不同开采方案的资源回收率与风险系数，决策时间缩短40%，避免因盲目开采导致的资源浪费与安全隐患^[1]。

1.2.2 绿色开采技术

(1) 膏体充填技术：将采矿废石、粉煤灰等废弃物与胶凝材料混合制成膏体，通过管道输送至采空区进行充填，形成稳定支撑体。山东黄金三山岛金矿应用该技术后，采空区充填率达100%，地表沉降控制在5cm以内，避免地表建筑与农田破坏；同时减少废弃物堆放占

地,生态修复成本降低70%,每年节约修复资金超2000万元。(2)无废开采技术:构建“采矿-选矿-固废利用”全链条循环体系,对尾矿、废石进行资源化加工。江西德兴铜矿采用该技术,将尾矿制成建筑骨料、微晶玻璃等产品,尾矿综合利用率达92%;通过废石回填采空区与露天矿坑,年减排废石180万吨,减少固废堆存占地120亩/年,实现“开采无废、资源循环”^[2]。(3)激光/等离子破岩:利用高能激光(功率达10kW)或等离子体(温度超10000℃)的热冲击效应破碎岩石,替代传统爆破作业。俄罗斯库尔斯克铁矿试验数据显示,该技术破岩能耗较传统爆破降低35%,且无爆破震动与飞石风险;但设备核心部件(如激光发生器、等离子体喷枪)制造难度大,单台设备成本超千万元,目前仅在实验室与小型试验矿区应用,尚未大规模推广。

1.3 深部开采关键技术

(1)地压管理:采用“分级支护+实时监测”模式,南非TauTona金矿(埋深超3900m)构建3级竖井提升系统,通过高强度钢支架与注浆加固技术增强井巷稳定性;同时部署微震监测网络,实时捕捉岩体破裂信号,岩爆预警准确率达82%,累计避免12次重大岩爆事故,保障深部作业人员安全。(2)高温控制:创新制冷技术降低井下温度,加拿大Sudbury镍矿区(埋深2500m,原始地温45℃)应用液氮制冷系统,通过井下液氮储存罐与分布式喷嘴,将液氮雾化后输送至作业面,实现快速降温,井下作业区域温度降低12℃,达到人体适宜作业温度(28℃以下),解决深部高温导致的设备故障与人员中暑问题。(3)通风优化:采用封闭式胶带运输系统整合通风与运输功能,系统采用高强度密封壳体,内部设置通风通道,通过风机强制通风;同时优化胶带输送机结构,爬坡能力达36°,适应深部复杂巷道坡度,运输速度超3m/s,在实现高效运输的同时,提升井下通风效率,作业区域瓦斯浓度控制在0.5%以下,满足安全标准。

2 井下采矿技术发展趋势

2.1 智能化发展路径

(1)人工智能应用:人工智能技术在生产调度领域成效显著。山东能源集团引入AI排产系统,通过分析历史生产数据、设备状态与地质条件,自动优化开采计划与设备调配方案,有效减少设备闲置与工序衔接延误,停机时间缩短18%,单日有效作业时长提升至22小时以上,大幅提高了资源开采的连续性。(2)机器人集群:单一机器人作业向多类型机器人协同集群发展。徐工集团研发的井下巡检机器人,集成红外传感、高清摄像与声波检测功能,可自主完成巷道支护、设备运行状态与

瓦斯浓度的全方位巡检,故障识别准确率达91%,相较于人工巡检,不仅覆盖范围扩大3倍,还避免了人员在高风险区域作业的安全隐患。(3)预测性维护:基于物联网的设备健康管理体系逐步普及。通过在采矿设备关键部件安装振动传感器,实时采集运行数据并传输至云端分析平台,提前识别潜在故障风险,实现从“事后维修”向“预测性维护”的转变。应用该技术后,设备突发故障发生率下降40%,维护成本降低27%,同时延长了设备使用寿命约15%。

2.2 绿色化转型方向

(1)清洁能源替代:矿区能源结构逐步向低碳化调整。神东矿区搭建“光伏+储能”供电系统,利用矿区闲置空地建设光伏电站,结合储能设备实现电能的稳定供应,目前该系统已满足矿区30%的用电需求,每年减少煤炭消耗约8万吨,降低二氧化碳排放18万吨,有效缓解了传统火电带来的环境压力。(2)水资源循环:矿井水资源化利用技术不断升级。中煤平朔矿区构建“井下治水-地面净化-循环复用”的水资源管理体系,通过高效净化设备处理矿井水,使其达到工业用水标准,用于设备冷却、煤层注水等环节,水循环利用率达95%,每年节约新鲜水资源120万m³,同时减少了矿井水外排对周边水体的污染。(3)生态修复技术:矿区生态恢复从被动治理向主动修复转变。包钢集团针对尾矿库生态问题,采用“土壤改良+先锋植被种植+生物多样性恢复”的综合治理方案,通过添加改良剂改善尾矿土壤结构,种植耐旱、耐贫瘠的植被品种,经过5年修复,尾矿库植被覆盖率从15%提升至68%,有效抑制了扬尘污染,恢复了区域生态功能^[3]。

2.3 深部开采技术挑战

(1)地温控制:深部矿井高温问题愈发突出,千米深井井下温度可达50℃,远超人体耐受极限,传统制冷技术难以满足降温需求,亟需开发高效、节能的新型制冷技术,如井下原位制冷、低温流体循环降温等,以保障作业人员安全与设备稳定运行。(2)岩爆防治:深部岩体应力集中导致岩爆风险显著增加,现有微震监测系统通过捕捉岩体破裂产生的震动信号实现预警,目前预警时间已缩短至15分钟,为人员撤离与应急处置争取了宝贵时间,但如何进一步提高预警精度与提前量,仍是亟待解决的关键问题。(3)提升技术:深部资源运输对提升系统提出更高要求,传统钢丝绳提升机速度慢、能耗高,难以满足大规模深部开采需求。磁悬浮升降机概念设计应运而生,其提升速度可达12m/s,较传统设备提升效率提升2倍以上,且具有噪音低、维护成本低的优

势,但目前仍处于技术研发阶段,需突破高温、高压环境下的磁悬浮控制与安全保障技术瓶颈^[4]。

3 井下采矿技术发展障碍与对策

3.1 技术瓶颈分析

(1) 核心设备依赖进口:在高端采矿装备领域,国内自主研发能力不足,超高压泵、兆瓦级激光器等关键设备的国产化率不足30%。这类设备广泛应用于高效破岩、深部支护等场景,进口设备不仅采购成本高,还面临维修周期长、配件供应不稳定等问题,严重影响采矿作业的连续性。(2) 标准体系缺失:行业标准不统一成为技术推广的重要障碍。一方面,绿色矿山评价体系缺乏统一指标,不同地区、企业的评价标准差异大,导致部分矿山“伪绿色”现象出现,难以真正实现生态保护与开采的协同;另一方面,智能装备互联协议未统一,不同厂家的智能化设备无法高效兼容,形成“信息孤岛”,无法发挥智能化技术的整体协同效应。(3) 人才短缺:采矿行业面临专业人才供给不足的困境,采矿工程本科毕业生年均不足8000人,远不能满足行业发展需求。同时,由于井下作业环境相对艰苦,部分毕业生选择转向其他行业,导致一线技术人员与研发人才双重短缺,制约了新技术的研发、推广与落地应用。

3.2 创新发展策略

(1) 产学研协同:推动矿山企业、高校与科研院所深度合作,建立矿山技术研究院,聚焦超高压泵、兆瓦级激光器等“卡脖子”技术开展联合攻关。通过整合企业的生产实践经验、高校的人才资源与科研院所的技术优势,加速核心设备的国产化进程,降低对进口设备的依赖,同时提升技术成果的转化效率。(2) 政策引导:建议政府加大政策扶持力度,优化行业发展环境。在财

政补贴方面,将深部开采补贴比例提高至35%,减轻矿山企业在深部开采技术研发与设备投入的成本压力,鼓励企业积极探索深部资源开发;同时,加快制定统一的绿色矿山评价体系与智能装备互联协议,规范行业发展标准,为技术推广提供制度保障。(3) 国际合作:积极开展国际技术交流与合作,重点引进加拿大、澳大利亚等矿业发达国家的先进充填技术。这些国家在绿色开采领域积累了成熟经验,其充填技术在控制地表沉陷、提高资源利用率方面效果显著。通过引进、消化、吸收再创新,可快速提升国内绿色开采技术水平,推动采矿行业向生态友好型转型。

结束语

井下采矿技术正站在智能化、绿色化与深部化的历史交汇点上。随着数字技术、清洁能源与新型材料的深度融合,未来采矿将实现“人-机-环”的深度协同,资源回收率与作业安全性显著提升,环境影响持续降低。然而,技术突破仍需跨学科协同创新,政策标准也需紧跟技术步伐。唯有在技术创新、产业升级与生态保护间寻求动态平衡,才能推动井下采矿迈向高效、低碳、可持续的新范式,为全球资源安全与绿色发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]李传伍.煤矿井下采矿技术存在问题及优化措施[J].内蒙古煤炭经济,2022,(11):130-131.
- [2]梁旭.井下采矿技术及井下采矿的发展趋势探究[J].能源与节能,2021,(12):149-150.
- [3]刘永飞.煤矿井下采矿技术及设备研究[J].内蒙古煤炭经济,2021,(06):68-69.
- [4]李旭.煤矿井下采矿技术存在问题及优化措施探讨[J].内蒙古煤炭经济,2021,(08):80-81.