

露天采矿科学目标的演变与未来发展趋势

高伟 崔飞 贺军刚

内蒙古伊东集团沙咀子煤炭有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 本文深入剖析露天采矿科学目标的演变历程,从工业化初期效率优先,历经安全与经济并重、环境保护驱动,发展到如今可持续发展综合目标阶段。明确当前资源高效利用、环境影响最小化等五大核心要素,预判资源开发精准高效、环境低碳、智能安全、产业协同等未来趋势。针对实践中技术应用成本高、政策执行不到位、产业协同障碍等问题,提出技术、政策、管理、国际合作四大实施路径,旨在推动露天采矿行业精准化、低碳化、智能化转型,为全球矿业可持续发展提供有力支撑。

关键词: 露天采矿; 科学目标演变; 可持续发展; 智能化; 绿色矿业

引言: 露天采矿作为全球矿产资源供给的关键方式,其科学目标随时代发展不断变迁。早期,为满足工业化对资源的迫切需求,露天采矿以效率为核心,却忽视了环境与安全。随着生态意识提升和“双碳”目标提出,行业面临资源需求增长与禀赋下降、开采规模与生态保护的矛盾。在此背景下,科学目标升级成为行业转型的关键。本文通过梳理历史阶段、明确核心要素、预判未来趋势并提出实施路径,为露天采矿行业发展提供理论依据,推动其走向高效、绿色、安全、可持续的未来。

1 露天采矿科学目标的历史演变

1.1 工业化初期(20世纪前): 效率优先阶段

20世纪前工业化初期,全球处于蒸汽机与铁路发展关键期,钢铁、煤炭等矿产需求激增,露天采矿科学目标以“最大化资源产出效率”为核心。技术层面以“人力+简易机械”为主,如采用人工挖掘、畜力运输,后期引入蒸汽驱动挖掘机,开采效率较纯人力提升5倍;开采模式呈现“粗放式”,仅凭经验划定开采边界,矿石回收率普遍低于60%,大量低品位矿石被废弃。此阶段未考虑环境与安全,采矿活动随意剥离植被,矿渣无序堆积引发水土流失,且无安全防护措施,坍塌事故频发。例如19世纪欧洲煤矿露天开采,矿工在无支护采场作业,事故死亡率超10%,虽为工业化提供资源支撑,却埋下资源浪费与环境破坏隐患。

1.2 工业化中期(20世纪中叶): 安全与经济并重阶段

20世纪中叶(1930s-1980s),汽车、化工产业崛起推动矿产需求增长,露天采矿技术逐步成熟,科学目标转向“安全与经济并重”。技术上,柴油驱动大型挖掘机(斗容5-20m³)、自卸卡车(载重30-100t)普及,开采规模从万吨级提升至百万吨级,毫秒延时爆破技术

减少边坡扰动;经济管控引入“剥采比”概念,优化采境界平衡成本与产出,矿山经济效益提升15%-20%。安全领域,各国出台法规如美国《联邦矿山安全与健康法》,要求设置边坡监测点、配备安全设备,露天矿事故死亡率降至2‰以下^[1]。例如澳大利亚纽曼露天铁矿,通过大型设备与定期监测,实现年产量500万吨且连续10年无重大事故,但仍未关注环境,复垦率不足10%,粉尘污染突出。

1.3 20世纪末至21世纪初: 环境保护驱动阶段

20世纪末至21世纪初(1990s-2010s),全球生态问题凸显,露天采矿科学目标进入“环境保护驱动”阶段。技术上,控制爆破(预裂爆破)减少植被破坏,洒水降尘技术将PM10浓度降至50μg/m³以下,生态修复技术推动复垦率从10%提升至30%-50%,德国等发达国家达70%以上。环境监测体系逐步建立,通过水质、大气监测点与遥感技术,确保污染物排放合规。政策上,我国《矿山生态环境保护与恢复治理技术规范》要求缴纳生态保证金,美国对环保矿山给予税收减免。例如神华准能黑岱沟露天矿,通过“采-排-复”一体化实现复垦率60%、粉尘减排40%,但仍存在“重末端治理”局限,未从设计融入环保理念。

1.4 21世纪以来: 可持续发展综合目标阶段

21世纪以来(2010s至今),在“双碳”目标与智能化技术推动下,科学目标升级为“可持续发展综合目标”,统筹资源、环境、安全、经济、社会五大维度。技术上,无人矿卡、智能钻机规模化应用,部分矿山实现“少人值守”,效率提升20%;新能源设备降低碳排放15%-25%,CCUS技术试点应用;资源综合利用使煤矸石利用率超50%,低品位矿石回收率达90%。政策上,我国“十四五”规划推进矿山绿色智能改造,欧盟《绿色新

政》提出2050年矿业碳中和。例如澳大利亚力拓汤姆普莱斯露天矿,实现资源回收率95%、碳排放降22%、复垦率80%,同时提供2000个就业岗位,完成从“单一维度”到“多元协同”的跨越。

2 当前露天采矿科学目标的核心要素

2.1 资源高效利用

资源高效利用是当前露天采矿科学目标的核心基础要素,对于应对资源稀缺与禀赋下降的严峻挑战意义重大。在勘探环节,三维地震勘探与无人机航测等先进技术大显身手。三维地震勘探凭借其高分辨率成像能力,能精准探测地下资源分布;无人机航测则以快速、灵活的优势,大面积获取地表信息。二者结合,可使资源探明率提升10%-15%,有效减少勘探盲区,为后续开采提供准确依据。开采环节,通过优化台阶高度、工作线长度等参数,采用“分层+选别开采”模式,实现对不同品位矿石的合理利用。低品位矿石经选矿处理后,利用率大幅提升,整体回收率从80%-85%跃升至90%以上^[2]。在综合利用方面,“主矿产+伴生矿产”协同开采成效显著。如铁矿开采中回收稀土,煤矸石转化为建材等。江西德兴铜矿伴生矿产利用率高达70%,实现了资源价值的最大化。同时,基于GIS与BIM构建的矿体三维模型,能实时更新储量数据,避免过度或不足开采,达成“资源-需求”的动态平衡,为资源的长期稳定供给提供坚实保障。

2.2 环境影响最小化

环境影响最小化契合绿色矿业发展要求,构建起“源头-过程-末端”的全流程管控体系。源头防控方面,将生态保护理念融入开采设计,通过优化开采境界,精准避开生态敏感区。采用低扰动开采工艺,如缓采、分条开采等,最大程度减少对植被的破坏,使植被破坏率控制在 $\leq 10\%$ 。过程管控中,大力推广新能源设备,电动矿卡、光伏供电系统的应用,可降低碳排放20%。密封运输方式与废水循环利用系统(利用率 $\geq 80\%$)相结合,有效控制粉尘与废水污染,确保PM10浓度 $\leq 35\mu\text{g}/\text{m}^3$,实现废水零外排。末端修复环节,运用微生物改良土壤技术,结合种植乡土植物,提高土壤肥力与植被成活率,使复垦率达到 $\geq 60\%$ 。德国鲁尔区通过科学修复,将废弃矿山打造成湿地公园,成为生态修复的典范。此外,环境风险预警系统结合InSAR与物联网技术,监测精度达0.5mm/年,预警准确率 $\geq 95\%$,能及时发现并处理环境隐患,避免环境事故发生,实现采矿与生态的和谐共生。

2.3 安全生产升级

安全生产升级是露天采矿行业的底线要求,构建起

“预防-监测-应急”的全链条安全保障体系。预防环节,开展风险分级管控,对高陡边坡角进行严格控制,保持在 35° - 45° 之间,同时采用毫秒延时爆破技术,减少爆破振动对周边环境与设备的影响。监测环节,融合InSAR与激光扫描技术,实现对边坡变形的精准监测,精度达0.5mm/年;振动传感器实时监控爆破速度,确保其不超过1.5cm/s;UWB定位系统实现人员与设备的精准定位,精度 $\leq 30\text{cm}$,一旦超阈值立即自动预警。应急环节,构建智慧应急平台,整合视频监控与定位数据,确保应急响应时间 ≤ 15 分钟,并配备先进的无人机救援设备。同时,加强安全培训,实现培训覆盖率100%,利用VR实训技术提升员工操作技能,培育浓厚的安全文化氛围。通过这些措施,露天矿事故死亡率降至0.5‰以下,部分智能矿山更是连续10年无重大事故发生,为采矿作业筑牢安全防线^[3]。

2.4 经济性优化

经济性优化是保障露天采矿行业竞争力的关键,旨在平衡多目标与效益之间的关系。技术升级方面,智能化装备的广泛应用成效显著。智能化采矿设备可降低人工成本30%,智能调度系统能提升设备利用率20%,从而使开采成本降低15%-20%。资源综合利用成为拓展收益的重要途径,煤矸石加工成建材的收益占比达5%-10%,低品位矿石通过技术创新实现增产10%。精细化成本管理借助大数据技术,对采购、维护等环节进行优化。我国大型露天煤矿通过精细管理,吨煤成本控制在 ≤ 100 元,较中小型矿山低30%。市场应对方面,建立价格预警机制,结合期货市场动态调整开采规模。例如,2022年必和必拓根据市场价格变化,优先开采高品位矿段,使净利润提升8%。通过经济性优化,露天采矿企业在履行社会责任的同时,具备更强的抗市场波动能力,实现可持续发展。

2.5 社会责任履行

社会责任履行推动露天采矿行业实现“开发-共享-共赢”的良好局面,加强了矿山与社会的协同发展。社区协同方面,矿山企业优先雇佣本地居民,雇佣率达到 $\geq 50\%$,并为他们开展技能培训,提升就业能力。同时,投资建设道路、学校等基础设施,改善社区生活条件。如神华准能集团,解决了1万余人的生活需求,通过开展公益活动提升了社区满意度。社会贡献方面,露天矿山带动了运输、选矿等上下游产业的繁荣发展。内蒙古霍林河露天矿周边形成了百亿产值的产业园区,为地方经济增长注入强大动力。此外,矿山企业积极参与全球可持续发展,通过技术输出助力发展中国家实现矿业转型。

在信息公开方面,定期发布环境、安全报告,接受社会监督,树立“负责任矿山”的良好形象,为行业发展营造了和谐的社会环境。

3 露天采矿科学目标的未来发展趋势

3.1 资源开发:从“粗放开采”到“精准高效”

在未来,露天采矿的资源开发将实现从“粗放开采”向“精准高效”的华丽转身,达成全链条的深度优化。精准勘探环节,量子勘探与无人机高光谱成像技术大显身手,矿体定位精准度可达“厘米级”,探明率不低于95%。借助AI预测未探明矿体,大幅降低勘探成本。精准开采方面,基于数字孪生构建全要素模型,强化机器学习算法动态优化开采方案,针对不同品位的矿石自动调整参数,使矿石回收率不低于98%。精准利用上,研发“矿石-元素”定向提取技术,多金属矿伴生元素利用率不低于90%,低品位矿石原位浸出技术有效降低成本与环境扰动。面对深部露天矿(深度超1500m)的挑战,研发智能锚网支护、超深竖井运输技术,突破深部开发瓶颈,实现“浅部-深部”协同开发,为全球资源供给提供坚实保障。通过这些技术革新,露天采矿的资源开发将更加科学、高效,实现资源的最大化利用,减少资源浪费,提升行业整体的经济效益与环境效益。

3.2 环境与低碳:从“末端治理”到“源头低碳”

未来露天采矿的环境目标将聚焦于“源头低碳”,全力构建绿色发展模式。在全生命周期低碳方面,开采环节采用“零碳装备”,实现100%清洁能源供电,使碳排放降低50%;加工环节运用无药剂选矿、低温浮选技术,减少能耗30%;废弃环节通过3D打印技术转化废弃物,利用率不低于90%,同时将采空区用于储能与碳封存。生态修复领域,突破“生物多样性+碳汇”技术,设置动物迁徙通道,使生物多样性恢复至开采前的80%,矿区年碳汇达到500吨/平方公里。环境风险控制上,构建“天地空”一体化监测网,预警准确率不低于99%,智能处置系统自动应对超标与变形情况,实现环境风险“零事故”。这种从源头减少碳排放、注重生态修复与风险防控的模式,将推动露天采矿行业向绿色、可持续方向转型,实现经济发展与环境保护的双赢^[4]。

3.3 智能与安全:从“人工主导”到“智能安全”

未来,露天采矿将全面迈入“智能安全”阶段,深刻变革作业模式。全流程智能化构建起“感知-决策-执行-优化”的闭环体系:感知环节,物联网传感器以每秒1次的频率采集数据,确保数据准确无误;决策环节,数字孪生与AI技术自主优化方案,实时调整参数;执行环节,无人装备的应用使一线人员减少80%;优化环节,大

数据分析持续改进作业流程,爆破效率提升15%、能耗降低10%。安全风险动态清零体系涵盖设计、监测、处置与改进各环节:设计阶段通过模拟优化参数;监测环节采用微震监测(精度0.1mm/年)与厘米级定位技术;处置环节自动切断电源、停机;改进环节利用AI分析隐患并优化措施,使事故死亡率降至0.1‰以下,实现“本质安全”。智能与安全的深度融合,将极大提升露天采矿的作业效率与安全性,保障人员的生命财产安全。

3.4 产业协同:从“单一开采”到“多元融合”

未来,露天采矿将突破“单一开采”的局限,实现“矿山+多元产业”的深度融合。“矿山+新能源”方面,充分利用采空区、排土场建设光伏电站(200MW电站年发电2.5亿千瓦时)、风电场,同时将采空区用于储能与矿坑水制氢,推动矿山向“低碳能源生产者”转变;“矿山+生态产业”领域,对复垦区进行开发,打造矿山公园(年接待10万人次),种植经济林与牧草(年增收500万元/平方公里),并通过“矿山+合作社”模式带动农户增收;“矿山+产业链”上,构建“采-选-冶-废”闭环,如在铁矿矿区建设选矿厂,降低运输成本30%,将矿渣转化为冶炼辅料;“矿山+社区”方面,共建基础设施与文化设施,形成命运共同体^[5]。通过产业协同,露天采矿将实现综合效益的显著提升,促进区域经济的多元化发展。

4 露天采矿科学目标实现的实施路径与保障措施

4.1 技术路径:加强关键技术研发与转化

技术路径致力于构建“基础-应用-转化”的全链条创新体系。在基础研究层面,聚焦深部边坡稳定性机理、低品位矿石高效提取原理等关键科学问题,设立国家级专项研究项目,推动地质学、材料学、量子计算等多学科深度融合,为技术突破提供坚实的理论支撑。应用研究阶段,集中力量研发精准勘探设备、低碳环保型采矿装备以及智能化矿山管理系统。建设国家工程研究中心,打造高水平的研发平台,确保无人矿卡避障准确率不低于99.5%,提升采矿作业的安全性与效率。成果转化环节,建立科学完善的“中试-示范-推广”体系。中试基地对智能爆破系统等新技术进行严格验证,确保其性能稳定可靠。选择黑岱沟、纽曼矿等作为示范矿山,通过实践应用实现资源利用率达95%、废弃物利用率达90%的优异成果。在推广阶段,通过举办技术交流会、搭建线上服务平台等方式,加速技术成果的产业化进程,使先进技术能够迅速转化为实际生产力,推动露天采矿行业的整体技术升级^[6]。

4.2 政策路径:完善政策支持与标准体系

政策路径通过“激励-标准-监管”的协同作用,为露天采矿科学目标的实现提供有力引导。激励政策方面,设立专项基金,对采用电动矿卡的企业给予30%的补贴,对生态修复项目按每亩1000元的标准进行补贴。实施税收优惠政策,对达到优质标准的矿山减免税收,对高污染矿山征收高额税费。同时,提供低息贷款和发行绿色债券,支持企业进行技术改造和绿色发展。标准体系覆盖资源开发、环境保护、智能化建设、安全生产等多个领域,与国际标准化组织(ISO)和国际矿业与金属理事会(ICMM)的标准对接,并将标准执行情况纳入矿山审批环节。对未达标的矿山,责令限期整改,确保行业规范发展。监管机制构建“政府-社会-企业”三位一体的体系,政府加强动态监测与考核,社会设立举报奖励制度并公开相关信息,企业建立自律管理体系,形成良性互动的发展环境,保障政策的有效实施。

4.3 管理路径:优化企业管理与人才培养

管理路径着重提升组织效能与人才支撑能力。管理模式升级方面,在战略层面,将露天采矿科学目标分解为部门年度计划,确保目标层层落实;生产层面,运用数字孪生技术实现可视化管理,优化生产流程,降低矿石贫化率5%;风险层面,建立全面的风险管控体系,定期开展应急演练;创新层面,设立创新基金,鼓励员工进行技术革新和管理创新。人才培养打造“三型”队伍,复合型人才通过双学位教育、跨部门轮岗等方式培养,使其具备多领域知识和技能;创新型人才依托博士后工作站和国际合作项目培养,提升其创新能力和国际视野;技能型人才建立培训中心,开展订单式培养,满足企业实际需求。激励机制方面,提供高薪吸引优秀人才,设立专项奖励,对在技术创新、管理优化等方面做出突出贡献的员工给予重奖,激发员工的积极性和创造力。同时,培育“创新、绿色、安全、责任”的企业文化,通过开展主题活动、发布倡议书等方式,深化员工对企业价值观的认知,夯实管理基础。

4.4 国际合作路径:深化国际交流与合作

国际合作路径旨在整合全球资源,推动露天采矿行业的国际化发展。技术交流方面,举办国际露天采矿论坛,邀请全球专家学者和企业代表参与,分享最新技术成果和发展趋势。积极参与国际矿业与金属理事会(ICMM)和国际标准化组织(ISO)的相关活动,加强与国际同行的沟通与合作。组织考察团前往力拓、鲁尔区等国际知名矿山进行实地考察,学习先进经验和技能。邀请国外专家来华指导,为企业提供技术咨询和解决方案。技术引进针对我国露天采矿行业的薄弱环节,

如深部监测技术、碳捕集技术等,有针对性地引进国外先进技术,并进行改良和创新,使其适应我国矿石特点和生产环境,提升生产效率10%以上。建立技术评估机制,避免盲目引进。联合研发组建国际研发团队,与澳大利亚科廷大学等高校合作研发智能支护技术,与西门子等企业合作开发数字孪生矿山系统,申请国际基金支持,共享研发成果。经验共享方面,分享黑岱沟、宝日希勒等国内成功矿山案例,支持联合国可持续发展倡议,联合培养硕士人才,互派专业人员进行交流学习,贡献中国方案,加速露天采矿科学目标的实现。

5 露天采矿科学目标实践中的挑战与应对策略

5.1 技术应用中的挑战与突破

露天采矿科学目标实现过程中,技术应用面临诸多挑战。精准勘探技术虽能提高探明率,但量子勘探等先进技术成本高昂,设备依赖进口,限制了广泛应用。智能装备的稳定性与可靠性也有待提升,无人矿卡在复杂地形下易出现故障,影响作业效率。为突破这些挑战,需加强自主研发,降低技术成本。一方面,加大对量子勘探等核心技术的研发投入,推动国产化进程,提高设备性价比;另一方面,建立智能装备的故障预警与维护体系,利用大数据分析预测设备故障,提前进行维护,保障设备稳定运行^[7]。同时,鼓励企业与科研机构合作,开展联合攻关,加速技术成果转化,提升露天采矿的技术水平。

5.2 政策执行中的问题与改进

政策执行在露天采矿科学目标达成过程中起着关键作用,但目前存在诸多问题。激励政策落实方面,部分企业未能及时获得应有的补贴和税收优惠,这使得企业进行技术改造和绿色发展的积极性受挫。标准体系执行上,一些矿山存在达标不彻底、虚假达标等不良现象,严重影响了行业规范发展。监管机制也存在漏洞,多部门监管时协调不畅,信息共享不及时,导致监管效率低下。针对这些问题,需采取有效改进措施。加强政策执行的监督与评估,建立完善的政策执行反馈机制,根据实际情况及时调整和完善政策。强化标准体系的刚性约束,将标准执行情况与企业信用紧密挂钩,对违规企业予以严厉处罚。完善监管机制,搭建统一的监管平台,加强部门间的沟通与协作,实现信息实时共享,提高监管效率,确保政策能够得到有效执行,为露天采矿行业的健康发展提供有力保障。

5.3 产业协同中的障碍与协调

露天采矿产业协同发展进程中,面临着诸多障碍。在“矿山+多元产业”融合过程中,产业间利益分配不均

衡的问题较为突出。例如,新能源产业与矿山产业在光伏电站收益分配上存在较大分歧,这极大地影响了双方合作的积极性,阻碍了产业融合的深入推进。此外,产业协同的技术标准不统一也是一大难题,生态产业与矿山产业在复垦区开发标准上存在差异,导致项目推进过程中困难重重。为协调解决这些问题,需建立公平合理的利益分配机制,充分考虑各产业的投入和贡献,进行科学合理的收益分配,保障各方利益。统一产业协同的技术标准,制定涵盖多产业的标准规范,并加强标准的宣传和培训,确保各产业严格按照统一标准开展合作。同时,加强产业间的沟通与交流,建立产业协同联盟,搭建合作交流平台,共同探讨并解决合作中遇到的问题,推动露天采矿产业协同发展迈向新台阶。

结束语

露天采矿科学目标的演变反映了行业对资源、环境、安全、经济和社会等多维度需求的不断适应与平衡。从单一效率导向到多维度协同的可持续发展目标,露天采矿行业正经历着深刻的变革。未来,通过加强关键技术研发与转化、完善政策支持与标准体系、优化企

业管理与人才培养以及深化国际交流与技术引进等实施路径,露天采矿行业有望实现精准化、低碳化、智能化转型。这不仅将为全球矿业绿色可持续发展提供实践支撑,也将为人类社会的长远发展贡献重要力量。

参考文献

- [1]姚文军.露天采矿技术及其采矿设备的发展思考[J].当代化工研究,2021(18):18-19.
- [2]段鹏.露天采矿技术及其采矿设备的发展思考[J].企业技术开发,2023(36):120-123.
- [3]孙贵林.探究露天采矿技术及采矿设备的发展形势[J].中国新技术新产品,2024(08):45-47.
- [4]宗玉良.露天采矿设备的发展趋势及对采矿技术的推进作用[J].河北企业,2020(08):22-24.
- [5]王凤彬,牛宝其,姜峰.煤炭采矿工程巷道掘进和支护技术的应用简析[J].内蒙古煤炭经济,2020(12):142-143.
- [6]渠旭东.露天采矿爆破振动过程中边坡稳定性极限分析[J].内蒙古煤炭经济,2024(1):25-27.
- [7]孙成亮.露天采矿工程中的采矿技术与施工安全[J].中国金属通报,2025(12):31-33.