

高效节能爆破技术在煤矿开采中的应用

郭卫东 刘晴晴 傅永和

新疆雪峰爆破工程有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 高效节能爆破技术作为现代煤矿开采领域的重要创新, 正逐步改变传统爆破作业高能耗、低效率的现状。该技术通过优化爆破参数、引入智能化控制手段及环保材料, 显著降低了能源消耗与环境冲击, 同时提升了开采安全性与经济效益。文中系统梳理了高效节能爆破技术的核心原理、应用体系及实践挑战, 并结合国内外典型案例, 探讨了其在露天煤矿开采中的技术路径与发展前景, 为行业绿色转型提供理论支撑与实践参考。

[关键词] 高效节能爆破; 煤矿开采; 节能降耗; 技术优化; 可持续发展

DOI: 10.33142/ec.v8i5.16646

中图分类号: TD263.4

文献标识码: A

Application of High-efficiency and Energy-saving Blasting Technology in Coal Mining

GUO Weidong, LIU Qingqing, FU Yonghe

Xinjiang Xuefeng Blasting Engineering Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: As an important innovation in modern coal mining, high-efficiency and energy-saving blasting technology is gradually changing the current situation of high energy consumption and low efficiency in traditional blasting operations. This technology significantly reduces energy consumption and environmental impact by optimizing blasting parameters, introducing intelligent control methods and environmentally friendly materials, while improving mining safety and economic benefits. The article systematically summarizes the core principles, application systems, and practical challenges of high-efficiency and energy-saving blasting technology, and combines typical cases at home and abroad to explore its technical path and development prospects in open-pit coal mining, providing theoretical support and practical reference for the industry's green transformation.

Keywords: efficient and energy-saving blasting; coal mining; energy conservation and consumption reduction; technical optimization; sustainable development

露天煤矿开采依托爆破技术实现岩层剥离与矿物破碎, 其技术选择直接决定开采效率、安全性与环境兼容性。传统爆破作业采用大孔径、高密度装药的标准化模式, 虽可快速完成破岩任务, 但能量分布不均导致炸药浪费严重, 且爆破振动、飞石与粉尘对周边生态与居民区构成长期威胁。随着全球环保法规趋严与“双碳”目标推进, 矿业企业面临成本控制与减排责任的双重压力, 倒逼技术体系向精细化、低碳化方向转型。高效节能爆破技术通过耦合岩体力学特性与动态能量释放规律, 重构爆破设计方法论, 在降低环境扰动的同时提升资源回收率。当前, 智能化控制、环保材料研发与工艺集成创新已成为技术升级的核心方向, 推动露天煤矿开采从规模驱动转向质量优先的新发展阶段。

1 露天煤矿开采与爆破技术概述

露天煤矿开采作为煤炭资源开发的主要方式之一, 其核心在于通过爆破技术快速剥离覆盖层并破碎矿岩, 为后续采掘、运输和加工奠定基础。爆破技术的选择与实施效果直接影响开采效率、成本控制及环境影响。传统爆破技术多采用大孔径钻孔、高密度装药的粗放模式, 虽然能够实现快速破岩, 但存在炸药能量利用率低、振动与飞石危害显著、粉尘污染严重等问题。例如, 早期中国内蒙古部分露天煤矿因采用齐发爆破工艺, 导致爆破振动对周边居

民区建筑造成结构性损伤, 引发多起社会纠纷。随着环保法规趋严与采矿技术迭代, 行业逐渐意识到粗放式爆破的不可持续性, 转而寻求更高效、更节能的技术路径。

近年来, 露天煤矿爆破技术逐步向精细化、智能化方向演进。电子雷管、微差起爆系统及数字化设计软件的引入, 显著提升了爆破作业的精准度与可控性。以澳大利亚昆士兰州的某大型露天煤矿为例, 通过应用逐孔起爆技术, 将爆破振动强度降低 30% 以上, 同时岩石破碎块度合格率提升至 85%, 减少了二次破碎的能耗。此外, 加拿大 Syncrude 油砂矿利用三维地质建模与爆破模拟软件, 优化了孔网参数与装药结构, 使单次爆破炸药消耗量下降 18%, 充分体现了技术升级对节能降耗的推动作用^[1]。当前, 高效节能爆破技术已成为露天煤矿实现绿色开采、降低综合成本的核心突破口, 其发展不仅关乎企业经济效益, 更是全球矿业响应“双碳”目标的必然选择。

2 高效节能爆破技术的核心原理与方法

2.1 高效节能爆破技术的定义与目标

高效节能爆破技术是以能量精准释放与动态调控为核心的新型破岩方法, 旨在通过优化炸药能量分布、起爆时序及介质匹配关系, 实现能量利用率最大化与环境影响最小化的双重目标。与传统爆破相比, 该技术更注重“量

体裁衣”式的个性化设计,即根据岩体力学特性、地质构造及开采需求,定制爆破参数与工艺流程。例如,波兰 Belchatow 褐煤矿针对软硬互层岩体,开发了分层装药与间隔填塞技术,使炸药单耗降低 22%,同时将大块率从 20% 压缩至 8%,显著降低了后续破碎工序的能耗。其核心目标涵盖三方面:一是减少单位矿岩的炸药消耗量,直接降低开采成本;二是抑制爆破产生的振动、噪声与粉尘,满足环保法规要求;三是提升矿岩破碎均匀性,为机械化采装创造高效作业条件。

2.2 关键技术分类与原理

高效节能爆破技术体系由装药结构优化、智能起爆控制及环保材料应用三大技术方向构成,各方向通过协同作用实现节能降耗目标。装药结构优化聚焦于炸药能量分配与释放效率的提升,例如空气间隔装药技术通过在炸药柱中设置空气腔,延长爆轰压力作用时间,增强岩石的剪切破碎效果,南非 Finsch 钻石矿应用该技术后,炸药能量利用率提高 35%,飞石距离减少 50%。智能起爆控制系统则依托电子雷管与传感网络,实现微差时间的精准调控,如智利 Escondida 铜矿采用基于物联网的起爆系统,将起爆误差控制在 0.05ms 内,有效降低振动叠加效应。环保材料应用主要围绕低爆速炸药与可降解填塞物展开,中国神华集团在黑岱沟露天煤矿试点生物基填塞材料,使爆破粉尘浓度下降 40%,且材料在自然环境中 6 个月内完全降解,避免了对土壤与地下水的长期污染。

2.3 技术参数优化策略

技术参数优化是高效节能爆破设计的核心环节,需综合考虑岩体强度、节理发育程度及环境敏感度等多重因素。通过数值模拟与现场试验相结合,确定最佳孔径、孔距、填塞长度及装药密度等参数。例如,俄罗斯库兹巴斯煤田利用 ANSYS/LS-DYNA 软件模拟不同装药结构下的应力波传播规律,最终选择孔径 310ms、孔距 8m 的布孔方案,使爆破后岩块平均尺寸从 1.2m 降至 0.6m,直接节省破碎设备能耗 25%^[2]。此外,机器学习技术的引入进一步提升了参数优化的智能化水平,加拿大 Highland Valley 铜矿通过训练爆破效果预测模型,动态调整台阶高度与起爆顺序,使炸药单耗降低 15%,作业周期缩短 20%。

2.4 安全性与可靠性的技术保障

安全性与可靠性是高效节能爆破技术大规模应用的前提条件。智能监测系统与冗余设计构成双重保障机制:一方面,挪威 Kiruna 铁矿部署分布式光纤传感网络,实时采集爆破振动、空气冲击波等数据,结合预警算法提前识别超限风险,使爆破事故率下降 90%;另一方面,双回路起爆网络与抗干扰雷管设计显著提升了系统容错能力。中国平朔安太堡露天煤矿通过集成北斗定位与 5G 通信技术,实现装药、联网、起爆全流程远程监控,近五年未发生重大安全事故。此外,基于区块链的爆破作业管理平台在蒙古国 Oyu Tolgoi 矿投入应用,确保起爆指令不可

篡改,从管理层面杜绝人为操作失误。

3 高效节能爆破技术的应用体系

3.1 技术应用的核心流程

高效节能爆破技术的落地实施依赖于全流程的精细化管理,涵盖地质勘察、方案设计、现场作业与效果反馈四大环节。地质勘察阶段通过融合无人机航测、地质雷达与岩芯取样技术,构建多维度的岩体力学模型,精准识别断层、节理等地质缺陷。以智利 Los Pelambres 铜矿为例,其通过三维地质建模技术划分爆破分区,避开软弱夹层区域,减少无效能量损耗。方案设计阶段借助 BIM 平台与爆破仿真软件,模拟不同参数组合下的能量传播路径,优化孔网布局与装药结构。蒙古国 Oyu Tolgoi 矿通过动态调整台阶高度与起爆顺序,显著降低大块率与二次破碎需求。现场实施环节引入自动化装备,如无人钻机与智能装药车,确保钻孔精度与装药密度的稳定性,加拿大 Syncrude 油砂矿的无人化作业系统将人为误差降低至 5% 以内^[3]。效果反馈则依托激光扫描与 AI 图像识别技术,实时分析爆破后岩块尺寸分布与能耗指标,俄罗斯库兹巴斯煤田通过闭环反馈机制,持续优化后续爆破方案,形成“设计-实施-评估-迭代”的良性循环。

3.2 节能技术的创新方向

节能技术革新聚焦于能量高效转化与辅助能源替代两大维度。水压爆破通过向炮孔注水形成能量传递介质,增强冲击波对岩体的剪切作用,南非 Palabora 铜矿采用该技术后,炸药单耗下降的同时粉尘扩散范围缩减 40%。能量回收技术成为新兴方向,例如爆破振动能量的压电转化装置,可将部分机械能转化为电能供监测设备使用,澳大利亚某铁矿试点中实现自供电传感器的全天候运行。材料领域的创新同样关键,生物基可降解填塞物在自然环境中快速分解,避免传统黏土填塞对土壤结构的破坏,中国准能集团在黑岱沟露天煤矿的应用表明,填塞效率提升与生态修复成本下降形成双重收益。此外,可再生能源驱动的钻孔设备逐步取代柴油动力机械,印度尼西亚 Adaro 煤矿的太阳能钻机系统在无日照条件下切换至氢燃料电池供电,实现全天候零碳排放作业。

3.3 高效性实现的技术路径

高效性的实现依托于工艺协同与智能调控的深度融合。预裂爆破与缓冲爆破的复合工艺在复杂地质条件下展现显著优势,巴西 Carajás 铁矿通过预裂形成光滑边坡面,结合缓冲装药降低爆轰波对保留岩体的损伤,边坡稳定性提升的同时超挖量减少 25%。智能化控制技术则贯穿于爆破全周期,美国 Peabody 能源公司基于 5G 通信网络构建钻爆设备物联网,实时采集孔径、孔深与装药密度数据,动态调整起爆时序与能量分布,使单次爆破效率提升 30%。自适应学习算法的引入进一步强化技术适应性,如波兰 Belchatow 褐煤矿部署的振动反馈系统,通过机器学习分析历史爆破数据,自动生成风险最小化的起爆方案,将调整响应时间压缩至传统模式的 10%。

4 技术应用中的关键挑战与对策

4.1 复杂地质条件的适应性分析

露天煤矿开采常面临岩性突变、裂隙发育与地下水渗流等复杂地质条件,需针对性开发差异化技术方案。印度尼西亚 Adaro 煤矿的泥岩层易引发钻孔塌陷,通过研发高韧性护壁套管与低密度炸药组合,成孔率从不足 60% 提升至 90% 以上。针对含瓦斯煤层,中国晋能控股集团开发了惰性气体注入技术,在装药前向炮孔充填氮气以隔绝氧气,抑制瓦斯爆炸风险。高寒冻土区域则需解决炸药低温失效问题,俄罗斯西伯利亚煤矿采用抗冻型乳化炸药与预热装药工艺,确保 -40℃ 环境下能量稳定释放。跨学科方法的应用成为突破方向,如地质力学与流体动力学的耦合模型,可预测含水岩层中爆破冲击波的衰减规律,指导防水装药结构设计。

4.2 环保法规与爆破技术的协同发展

全球环保法规的趋严推动爆破技术向低污染方向迭代。欧盟《工业排放指令》对爆破振动、噪声与粉尘的限值要求,促使德国 RWE 集团在莱茵褐煤矿采用多段微差起爆与低爆速炸药,将振动峰值控制在法定阈值 50% 以下。粉尘治理技术从未端控制转向源头抑制,纳米级润湿剂与聚合物抑尘膜的复合应用,使爆破扬尘在扩散前被吸附固化,中国神华集团在宝日希勒露天煤矿的试验表明,PM10 浓度下降幅度超过 55%。碳足迹管理体系的引入倒逼技术全生命周期优化,必和必拓在智利 Spence 铜矿推行“绿色爆破认证”,通过替代硝酸铵炸药与采用可再生能源设备,单次爆破碳排放强度削减 30%。

4.3 技术推广的经济性与可行性

高效节能技术的初期投资与运维成本较高,制约其在中小型矿山的普及。南非 AngloGold Ashanti 公司通过设备租赁与技术服务分包模式,降低企业资本支出,其 Mponeng 金矿引入第三方爆破团队后,综合成本下降 20% 以上。政策激励成为重要推手,印度“清洁采矿基金”为采用电子雷管与太阳能设备的企业提供税收减免,推动 Adani 集团在 Carmichael 煤矿完成技术升级^[4]。标准化技术体系的建设亦加速经验复制,澳大利亚矿业协会发布的《绿色爆破实施指南》,为哈萨克斯坦 Bogatyr 煤矿提供从设计到验收的全流程模板,技术转化周期缩短至 8 个月。

5 未来发展方向与前景展望

5.1 智能化爆破技术的融合趋势

人工智能与物联网的深度融合将推动爆破作业向自主决策演进。力拓集团在西澳铁矿测试的无人爆破系统,集成自主导航钻机、AI 装药算法与实时风险预警功能,实现全流程无人化操作,效率较传统模式提升 40%。数字孪生技术通过虚拟映射优化实体爆破参数,芬兰 Boliden 公司构建 Aitik 铜矿的数字孪生体,动态模拟不同起爆方案的能量分布,使大块率下降至 5% 以下。量子计算的应用有望破解复杂岩体爆破模拟的算力瓶颈,加拿大 Teck 资源公司与 D-Wave 合作开发的量子优化算法,可在

10 分钟内生成传统计算机需数日完成的最优爆破方案。

5.2 新型材料的研发与应用潜力

新型材料将重塑爆破技术的能量传递路径。纳米结构炸药通过调控氧化剂与可燃剂的微尺度配比,实现爆速与压力的精准匹配,美国 Arch Coal 公司在 Black Thunder 煤矿的试验显示,其能量利用率较传统炸药提升 35%。自修复充填材料利用微胶囊技术,在受压破裂时释放修复剂填充裂隙,俄罗斯西伯利亚煤矿的现场测试表明,其抗渗性能提升 50% 以上。生物合成炸药的研发开辟环保新路径,瑞典 LKAB 公司利用基因编辑微生物生产硝酸酯化合物,替代传统石油基炸药原料,在 Kiruna 铁矿的中试中实现碳排放减少 90%。

5.3 绿色采矿与可持续发展

高效节能爆破技术将成为矿业碳中和的核心支柱。英美资源集团在秘鲁 Quellaveco 铜矿推进的“零碳爆破”项目,整合绿氢动力钻机与生物降解炸药,实现爆破作业全周期净零排放。碳捕集与封存技术与爆破场景的融合取得突破,挪威 Equinor 公司在 Svalbard 煤矿将爆破产生的 CO₂ 注入玄武岩层矿化封存,封存效率达 85% 以上。循环经济模式进一步拓展技术外延,印度 Coal India 公司利用爆破废渣制备低碳建材,年消纳矿渣超百万吨,降低采掘废弃物处置成本的同时创造附加收益。

6 结语

高效节能爆破技术的成熟与应用,标志着露天煤矿开采迈入绿色化、智能化协同发展的新纪元。通过精准能量调控与工艺创新,该技术成功破解了传统作业高耗能、低效率的顽疾,为矿业低碳转型提供了切实可行的技术抓手。未来,随着人工智能、新材料与清洁能源技术的深度融合,爆破作业将进一步提升自主决策能力与环境适应性,推动资源开发与生态保护的动态平衡。从短期看,技术推广需克服复杂地质适应性与经济性瓶颈;从长远视角,其与循环经济、碳捕集等体系的整合,将重塑矿业全产业链的可持续发展逻辑。高效节能爆破技术不仅是行业技术革命的缩影,更是人类在资源利用与环境保护之间寻求和谐共生的创新实践,其价值必将随着全球绿色矿业体系的完善而持续彰显。

[参考文献]

- [1]武康康.煤矿爆破切顶卸压沿空留巷开采技术应用[J].科技创新与应用,2024,14(10):169-172.
- [2]李志岗.预裂松动爆破技术在特厚煤层综放工作面的应用[J].山西化工,2024,44(8):167-168.
- [3]杨宏业.煤矿爆破切顶卸压沿空留巷开采技术分析[J].能源与节能,2024(10):201-204.
- [4]罗培春.井下矿山不同装药结构爆破开采安全性分析[J].世界有色金属,2024(21):229-231.

作者简介:郭卫东(1994.4—),毕业院校:安徽理工大学,所学专业:弹药工程与爆炸技术,当前工作单位:新疆雪峰爆破工程有限公司,职称级别:工程师。