

爆破冲击波对煤矿作业人员安全防护的研究

祁瑞祥 傅永和 郭卫东

新疆雪峰爆破工程有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]露天煤矿开采中的爆破作业是矿产资源开发的核心环节,但其产生的冲击波对作业人员安全构成显著威胁。文中通过分析爆破冲击波的物理特性与危害机理,结合露天煤矿作业环境特征,系统探讨了冲击波传播规律及其对人体健康的影响模式。研究聚焦于爆破参数优化、地质气象因素调控、工程防护技术创新及安全管理体系完善等维度,提出基于能量耗散原理的安全距离计算模型和复合防护策略。通过引入柔性材料消波结构与智能监测装备,构建了“工程防护-个体保护-动态预警”三位一体的安全防护体系,为露天煤矿爆破作业安全提供了理论支撑与技术路径。

[关键词]露天煤矿; 爆破冲击波; 安全防护; 振动控制; 健康风险

DOI: 10.33142/ect.v3i4.16102

中图分类号: TD7

文献标识码: A

Research on the Safety Protection of Coal Mine Operators by Blasting Shock Waves

QI Ruixiang, FU Yonghe, GUO Weidong

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

Abstract: Blasting operations in open-pit coal mining are the core link of mineral resource development, but the shock waves generated pose a significant threat to the safety of operators. By analyzing the physical characteristics and hazard mechanisms of blasting shock waves, combined with the characteristics of open-pit coal mine operating environments, this article systematically explores the propagation laws of shock waves and their impact patterns on human health. The research focuses on optimizing blasting parameters, regulating geological and meteorological factors, innovating engineering protection technologies, and improving safety management systems. A safety distance calculation model and composite protection strategy based on the principle of energy dissipation are proposed. By introducing flexible material wave absorbing structures and intelligent monitoring equipment, a three in one safety protection system of "engineering protection individual protection dynamic warning" has been constructed, providing theoretical support and technical path for the safety of open-pit coal mine blasting operations.

Keywords: open pit coal mine; blasting shock wave; safety protection; vibration control; health risks

露天煤矿开采作为我国能源供应的重要支柱,其爆破作业效率直接影响矿产开发的经济效益。随着开采深度增加和爆破当量提升,冲击波对作业人员的危害呈现叠加效应,传统防护手段已难以满足现代矿山安全生产需求。2021年山西某露天煤矿爆破事故调查显示,冲击波超压导致的听力损伤占事故伤害的63%,暴露出现有防护体系在能量衰减控制方面的技术短板。本研究立足冲击波传播动力学原理,结合人体生物力学响应特征,探索新型防护技术的工程应用路径,对实现矿山本质安全具有重要现实意义。

1 露天煤矿开采中爆破作业的重要性

露天煤矿开采中爆破作业是实现矿岩破碎与剥离的核心工艺,其技术合理性直接决定开采效率与资源利用率。作为露天矿山生产链的初始环节,爆破质量影响后续采装、运输系统的作业连续性,科学设计的爆破方案可形成适宜块度的爆堆,减少二次破碎作业量,从而降低设备损耗与能耗。从安全生产维度分析,精准控制的爆破作业能有效降低边坡失稳风险,避免因过度爆破引发的岩体松动或飞石危害。随着绿色矿山理念的推进,现代爆破技术更注重能量定向释放与粉尘控制,例如预裂爆破与缓冲爆破的联

合应用,可在减少环境扰动的同时提升矿物回收率。

2 爆破冲击波的物理特性与危害机理

2.1 爆破冲击波的动力学特征

爆破冲击波是炸药化学能转化为机械能的主要载体,其形成过程遵循爆轰波传播理论。在露天自由面条件下,冲击波能量呈现多向传播特性,地表反射波与直达波的干涉作用会形成复杂的压力分布场。地形地貌对冲击波传播路径具有显著调制效应,凸起地形可能产生能量聚焦,而凹陷区域则易形成涡旋耗散。空气冲击波与岩体振动的耦合作用会引发能量模态转换,这种耦合不仅加剧近场区域的破坏强度,还会延长中远场的作用时间。

2.2 冲击波对人体系统的损伤机制

冲击波超压对人体组织的损伤呈现生物力学连锁效应,胸腔作为中空器官集中的区域,在压力突变时易发生肺泡壁破裂与毛细血管渗漏。低频振动通过骨骼传导至内脏器官,可能引发细胞膜结构的机械应力损伤,长期暴露会导致组织纤维化病变。前庭系统对低频振动尤为敏感,持续性的平衡感知紊乱可能诱发职业性运动失调症^[1]。值得注意的是,冲击波危害具有时间累积特性,短时高强暴

露与长期低剂量的复合作用会加速生理机能衰退,这对制定防护标准提出了多维度的考量要求。

3 露天煤矿爆破冲击波的关键影响因素

3.1 爆破参数与作业条件

爆破参数的精准调控是平衡开采效率与安全风险的核心技术。装药量与起爆方式的协同效应直接影响冲击波的初始能量分布,集中装药结构易形成高强度脉冲波,而分段装药通过延长能量释放周期可降低峰值压力。台阶高度与炮孔布置的几何关联性决定了应力波的传播方向,倾斜炮孔设计能够引导能量向预定自由面释放,减少向作业区域后方扩散的无效能量。延期时间的微秒级控制是避免多炮孔能量叠加的关键,智利 Code1co 公司的工程实践表明,通过优化起爆时序,可显著降低特定区域的振动强度。爆破作业中,装药结构的分布需与岩体力学特性匹配,例如在坚硬岩层中采用空气间隔装药技术,可有效降低冲击波的初始动能。

地质构造的非均质特性对能量传播路径具有天然调控作用。岩体裂隙网络的存在显著改变冲击波的衰减模式,美国肯塔基州露天煤矿的工程案例显示,裂隙发育区域的冲击波能量散射效应更为显著。地形起伏通过改变波阵面传播轨迹产生能量再分配,凸起地形可能形成局部压力增强区,而沟谷地貌则通过多次反射加速能量耗散。气象条件的动态变化为冲击波传播引入不确定性,例如逆温层的形成会延缓空气冲击波的垂直扩散,而湿度变化通过影响空气密度改变声波传播速度。

3.2 地质与气象环境的作用

岩体力学特性与地质结构的相互作用构成冲击波传播的天然屏障。节理面的空间展布特征对能量耗散具有选择性过滤效应,正交节理系统可显著削弱特定频段的振动能量。地形起伏对冲击波的调制作用不仅体现在传播路径改变,更通过地表曲率影响波阵面能量密度,斜坡地形使冲击波前缘压力梯度显著增加。气象要素的动态特性为冲击波控制带来挑战,例如突发的阵风可能使预测模型失效,而温度梯度的存在会改变冲击波的传播轨迹^[2]。岩体与空气介质的阻抗差异导致能量在界面处的反射与折射,这种跨介质传播特性使得冲击波危害具有空间异质性。

4 露天煤矿人员安全防护的工程技术措施

4.1 工程防护设计策略

爆破安全距离的确定需综合考虑多路径传播效应,基于波动理论改进的计算模型通过引入地形衰减因子,显著提升了预测精度。减震沟的消波机理源于其对表面波的截断作用,当沟槽深度与爆破主频波长形成特定比例时,可建立有效的波阻抗突变界面。屏障结构的设计遵循波导原理,通过多重反射结构将入射能量分解为多模态振动,例如阶梯式消波墙的几何构造可分散冲击波能量。柔性防护材料的研发聚焦于动态响应特性,非牛顿流体与复合织物的协同效应使其在承受冲击时发生可控形变,从而实现能量的梯度耗散。

防护体系的构建需形成空间联动机制,例如将减震沟与防护林带结合,通过植被的阻尼作用增强能量衰减效果。

4.2 个体防护装备的创新方向

抗冲击耳塞的声学性能优化需平衡隔声量与语音可懂度,微孔共振结构的应用可在保持降噪能力的同时确保安全指令的清晰传递。防护服的设计突破传统刚性防护理念,仿生学原理的引入催生了具有自适应特性的智能防护装备,例如仿墨鱼表皮结构的可变刚度材料可根据冲击强度动态调节防护性能。智能穿戴设备的集成化发展推动防护系统进入感知-响应时代,多传感器融合技术可实现冲击波参数的实时解析与风险预警。生物力学防护原则强调人体脆弱器官的靶向保护,仿生椎间盘结构的缓冲装置通过模仿生物组织的力学特性,显著降低冲击载荷对脊柱的损伤风险。防护装备的模块化设计趋势允许根据不同作业环境快速调整防护等级,这种可定制化方案提升了防护系统的适用性与经济性。

防护技术的演进路径呈现多学科交叉特征,材料科学、生物力学与信息技术的融合催生了新一代防护体系。例如自修复材料的应用可延长防护装备的使用寿命,而数字孪生技术的引入使得防护系统具备预测性维护能力^[3]。防护效能的提升不仅依赖技术创新,更需建立与作业流程深度集成的管理体系,通过标准化操作程序降低人为失误风险。未来发展方向将聚焦于构建“主动防御-智能响应-动态优化”的全链条防护机制,实现从单一装备防护向系统化安全控制的跨越。

5 作业流程与安全管理体系的优化

5.1 爆破作业标准化流程设计

露天煤矿爆破作业的标准化流程需以风险预控为核心,构建覆盖全作业周期的技术规范体系。预爆破阶段的精细化设计依托地质建模技术,通过三维激光扫描构建岩体数字孪生模型,精准识别软弱夹层与节理发育区,为装药参数优化提供可视化依据。澳大利亚矿业委员会推行的 BlastLog 系统,通过标准化表单强制记录关键作业参数,确保每个环节的可追溯性。起爆阶段实施“双人双岗”确认制度,在加拿大 Syncrude 油砂矿的实践中,该制度要求起爆操作员与安全员同步核对起爆网络阻抗值,有效隔离人为失误风险。后评估环节引入智能分析技术,南非 AngloGold Ashanti 公司开发的无人机巡检系统,通过多光谱成像自动识别爆堆块度分布,为流程优化提供反馈闭环。标准化的核心在于建立作业基准线与偏差修正机制,例如针对特殊地质构造制定差异化的装药密度标准,确保规程既具备普适性又保留弹性空间。

5.2 安全管理的系统性提升

5.2.1 基于风险分级的动态预警体系

风险分级管理需构建多维度评估模型,整合地质构造特征、设备运行状态与气象环境变量,形成动态风险图谱。美国 BHP 集团建立的“红-橙-黄”三级预警机制,通过振

动监测网络实时解析冲击波传播特征,当特定区域风险值突破阈值时,自动触发作业中断指令。智能预警终端与人员定位系统的深度融合,智利 Antofagasta 矿区部署的声光报警背心,结合北斗定位芯片与冲击波传播算法,可提前计算人员撤离最优路径。风险模型的持续优化依赖机器学习技术,中国神华集团开发的智能分析平台,通过历史事故数据训练神经网络,识别出 28 类潜在风险耦合模式。预警效能的提升需突破单向信息传递局限,建立双向反馈通道,例如德国莱茵集团应用的智能安全帽,允许作业人员实时上传现场异常信息,形成人机协同的预警生态。

5.2.2 人员培训与应急演练的常态化机制

培训体系的重构需突破传统理论灌输模式,加拿大 Teck 资源公司开发的 VR 爆破模拟系统,构建包含岩体崩塌、设备故障等 12 类高危场景的虚拟训练场,受训者通过触觉反馈装置体验冲击波超压的生理效应。岗位能力认证实施动态化管理,澳大利亚昆士兰州推行的爆破工程师星级评定制度,将实操考核与风险处置能力挂钩,五星级工程师可授权处理复杂地质条件下的特殊爆破设计。应急演练强调“无预案化”实战导向,智利 Codelco 公司设计的突袭式演练模式,随机组合天气突变、通讯中断等复合变量,检验团队的快速应变能力。培训效果评估引入神经科学原理,南非 Implats 铂矿通过脑电波监测仪捕捉受训者的注意力波动曲线,优化课程内容编排。常态化机制的建设需形成制度保障,例如日本住友金属矿山实施的“每月一练、每季一考”制度,确保技能保鲜与知识更新。

5.2.3 安全责任制度与监督体系的完善路径

责任划分需建立“技术-管理-操作”三维责任矩阵,美国 MSHA 法规明确规定爆破技术负责人对参数设计承担终身法律责任,作业班组长对现场执行负直接管理责任。监督体系构建强调多层次覆盖,俄罗斯 Norilsk 镍业实施的“三查三改”制度,要求班组每日自查隐患、部门每周交叉检查、专家每月专项督查,形成闭环整改链条。举报激励机制设计注重保护性与实效性,中国应急管理部推行的安全生产举报云平台,采用区块链技术实现匿名提交与溯源防篡,重大隐患查实后给予举报人奖励积分。绩效考核需平衡激励与约束,必和必拓集团将安全指标与管理人员 30% 的绩效薪酬挂钩,同时设立“百日安全里程碑”集体奖励基金。

监督效能的提升依赖技术创新,德国 BASF 集团开发的智能安全巡检系统,通过 AR 眼镜自动识别未系安全绳、防护装备缺失等违规行为,并实时推送纠正指令。责任追溯机制需构建全流程证据链,英美资源集团建立的爆破作业区块链存证平台,完整记录从设计参数审核到起爆指令发送的全过程操作痕迹,确保事后追溯的客观性与准确性。

安全文化的培育需渗透至作业习惯层面,日本住友金属矿山推行的“安全时刻”制度,要求作业前进行 30 秒风险冥想,通过心理暗示强化风险意识^[4]。制度完善的关键在于动态适应性,例如智利国家铜业公司每半年组织规程合规性审查,根据新技术应用与事故教训及时修订管理条款。

安全管理体系的优化本质是构建“人-机-环”协同共治机制。通过标准化的流程设计固化最佳实践,依托动态预警实现风险前移控制,借助常态化培训提升全员安全素养,最终形成责任明晰、监督有力、文化浸润的立体防护网络。未来发展方向将聚焦于数字孪生技术在流程模拟中的应用,以及人工智能辅助决策系统的深度集成,推动安全管理从经验驱动向智慧决策转型升级。

6 结语

露天煤矿爆破冲击波安全防护研究是保障矿山安全生产的核心课题,其技术体系的完善需突破传统单点防护思维,构建多学科交叉的立体防护网络。本研究通过解析冲击波的传播动力学机制与人体损伤生物力学响应,揭示了地质构造与气象要素的复合调控作用,为防护技术研发提供了理论支撑。当前防护体系仍存在技术瓶颈,澳大利亚昆士兰大学的研究指出,复杂地形条件下冲击波传播模型的预测精度亟待提升,而加拿大 Syncrude 油砂矿的实践验证,智能预警系统与人员培训体系的深度整合是突破现有防护效能的关键路径。未来的技术发展将聚焦于自适应防护材料的工程化应用,以及基于数字孪生的爆破过程实时仿真技术,前者如德国 Fraunhofer 研究所研发的可变阻尼材料,后者如中国矿大开发的智能爆破云平台,均展现出革新传统防护模式的潜力。研究同时揭示,安全管理效能的提升本质上是技术革新与制度优化的协同过程。随着 5G 通信与边缘计算技术的普及,建立矿山安全物联网平台,实现冲击波危害的实时感知与智能决策,将成为露天煤矿本质安全建设的重要方向。

【参考文献】

- [1] 周伟光. 煤矿采掘工作面的爆破安全技术分析[J]. 科技风, 2018(14): 221.
- [2] 吴明磊. 煤矿采掘爆破安全问题分析[J]. 科技风, 2019(9): 94-101.
- [3] 王鑫. 煤矿爆破安全技术的应用及措施探究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(22): 121-122.
- [4] 梁运照. 煤矿爆破安全技术管理对策[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(4): 90-91.

作者简介: 祁瑞祥(1998.9—), 毕业院校: 国家开放大学, 所学专业: 机械制造与自动化, 当前就单位: 新疆雪峰爆破工程有限公司, 职称级别: 助理工程师。