

大数据驱动的坚硬煤岩深孔爆破弱化全流程管控

文 | 郭朋 桑广合 刘澜涛

坚硬煤岩高强度、低透气性给开采带来挑战，深孔爆破弱化是高效掘进的关键。传统作业依赖经验，地质认知不足、施工管控粗放、效果评价滞后，形成效率低、成本高、风险大的困局。大数据为爆破弱化全流程管控提供创新路径，通过数据分析实现地质透明化，智能算法优化参数，物联网监控施工，数据闭环改进，破解传统模式矛盾。

坚硬煤岩深孔爆破弱化的困境与管控需求

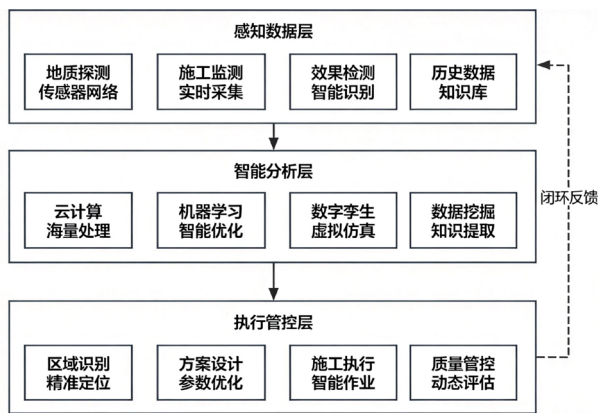
坚硬煤岩因为自身强度很大、渗透性又低的特点，一直以来都是煤矿掘进过程中的主要障碍。深孔爆破破解法虽然是解决这一问题的关键措施，但是传统方式存在一些不足，导致效果受到限制，因此迫切需要通过数字化手段来进行整体优化。

传统爆破弱化作业的效果波动与管控缺陷

爆破弱化效果出现波动性是多重因素叠加造成的。地质勘探技术不足，导致煤岩强度分布和节理发育情况难以准确掌握，工程师仅依靠少量钻孔数据来推测整体状况如同管中窥豹，缺乏系统认知。方案制订受主观经验影响特别显著，相同地质条件下不同工程师选取的参数相差悬殊，决策缺乏科学依据支撑。现场施工管控十分松散，钻孔深度和角度控制依靠人工经验，装药量凭操作者感觉确定。质量检查流于表面，无法深入挖掘潜在隐患。效果评估存在延迟性和主观性，通常爆破数日后才能初步判断，已错失调整窗口期，难以建立有效反馈闭环。各环节数据相互割裂，无法实现共享，设计和现场执行相脱节，施工监测与效果分析相分离。这种作业方式致使弱化效果不稳定、资源浪费大且安全风险高，阻碍掘进进度提升。

全流程智能管控的迫切需求与实现基础

煤炭工业高质量发展给爆破弱化作业定了更高标准，只靠经验没办法达到精准和安全的目标。需要构建包含地质探测、方案设计、施工执行及效果评价的全程管控机制，打破各个环节之间的壁垒，来确保数据共享、决策科学与操作精准。物联网、云计算、人工智能等技术给这方面提供了有力支撑(如图1所示)。通过传感器网络能实时采集大量数据，靠云端算力可支持复杂的运算与分析，利用机器学习能够从历史数据里总结出规律。数字孪生和虚拟仿真技术打破了物理空间的限制，能够在虚拟环境中反复试验，从而优化方案。矿山装备的智能化程度不断提高，自动化钻机与装药机器人逐步投入应用，为精准施工提供了硬件基础。技术条件已经成熟，而且产业需求十分迫切，让智能管控体系的建立有了实施的可行性。



来源：山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

图1 大数据驱动全流程智能管控体系架构

深孔爆破弱化全流程智能管控体系构建

智能管控体系把数据采集、分析决策和精准执行进行有机结合，构建出从地质认知一直到效果验证的完整流程，推动爆破弱化作业从经验探索朝着科学管理方向转变。

数据驱动的地质探测与弱化区域识别

智能勘探机器人配备探地雷达等多种装置，能在巷道掘进前方自主获取煤岩物理力学参数。三维地震波反射数据经过算法深入分析后，清晰展现煤层内部强度分布的异常部位，钻孔测井的点状信息通过空间插值转换为连续场，有效解决传统勘探数据不足的问题。机器学习模型基于历史地质资料总结高强度煤岩特征模式，探测数据匹配特征时自动标识为重点弱化区域。热力图和云图等可视化技术将抽象数据转化为直观图像，方便工程师判断哪些区段需加强爆破及哪些位置有断层风险。多模态数据融合技术综合物探、化探、钻探等信息，通过交叉验证提高识别精度，让地质认知从模糊推断变为精确定位。

深孔爆破弱化方案的智能设计与优化

元宇宙打造出真实矿井的数字化镜像模样，工程师进入里面能够模拟井下作业情况，以此来规避现实中存在的各种风险。地质数据被融入虚拟场景中，煤岩强度、节理发育等特性通过颜色直观展现。规划炮孔的时候系统会自动提出初始方案，包含孔深、间距及装药参数等内容；工程师通过

手势进行调整之后，虚拟爆破模块会即时反馈爆破效果。依托云端计算仿真精度可以达到厘米级别，能够预测裂缝走向及破碎具体程度。面对复杂地质状况，算法会评估数千组参数组合，平衡弱化深度、炸药用量及安全系数等要素。多方案对比功能能够清晰呈现不同设计优劣差异，助力决策者选出兼具科学性和经济性的方案。

施工执行与弱化效果的实时监测管控

智能钻机能够按照预定好的轨迹自动进行钻进，惯导技术可以把偏移控制在厘米级别范围，钻进参数会随着岩层的硬度进行自适应调整。装药机器人能够依据炮孔编号匹配对应的炸药类型及用量，电子秤会实时进行称重来保障投放的精度，雷管芯片会记录起爆网络的连接情况。爆破完成之后，无人机搭载着激光雷达快速扫描作业面，点云数据经过处理重构出三维破碎形态，声波检测能够深入煤岩的内部，波速变化率可以反映裂隙的发育程度，以此评估弱化深度是否达到标准。图像识别技术可以统计块度的分布情况，进而判断破碎的均匀性，所有的监测数据都会上传至管控平台，与设计预期进行对比分析，偏差超限时系统会自动报警并提供优化建议。施工全程进行留痕管理，以确保操作可以追溯，形成设计—执行—监测—反馈的闭环管理体系。

数据闭环驱动的弱化效果持续优化

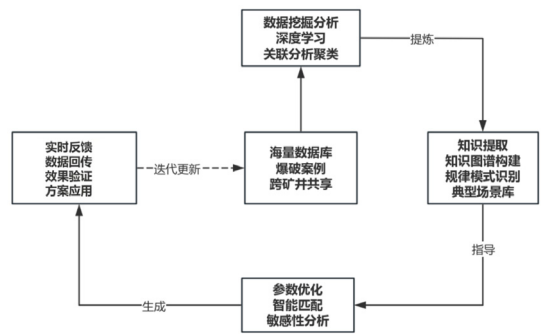
数据可不只是过程的简单记录，它更是推动整体优化的关键要素；要借助质量追溯、知识提取、智能升级这套体系，以此确保每次爆破都能转化成后续工作的可用经验，进而推动管控能力实现逐步提升。

全流程数据溯源与弱化质量动态管控

区块链技术会给每次爆破作业创建无法篡改的数字档案，档案内容涵盖地质勘探资料、设计版本等，从施工记录一直到检测报告，经过加密处理之后形成完整的证据链。智能合约提前设定好质量标准，施工数据上传的时候会自动核验钻孔深度与装药精度，要是发现存在异常情况就马上暂停流程并且启动整改指令。管控平台把实时数据和历史基准进行比对，当深度、裂隙密度等指标超出正常范围的时候就会发出预警。质量追溯功能能够支持工程师回溯任意时间点的作业细节，以此判断效果欠佳的原因是地质判断错误、参数设定失误，还是施工偏差过大。这种透明管理彻底杜绝了人为干预的可能情况，确保各个环节在数据监督之下规范运作。

大数据挖掘驱动的弱化参数优化迭代

云端积累起来的丰富爆破案例给智能算法提供了训练基础，深度学习模型从这些案例中挖掘出潜在的规律。关联性研究表明，特定地质特征和参数配置组合能取得显著成效，聚类算法把相似工况整合起来形成典型场景库，知识图谱建



来源：山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

图2 大数据挖掘驱动的弱化参数优化迭代机制

立起煤岩属性、爆破参数及弱化效果之间的关联网络，面对新工况时系统能够迅速匹配历史最优的方案。增量学习机制让模型随着数据积累不断地进行优化，当前的失败案例会成为后续改进的重要依据。跨矿井数据共享打破了信息壁垒，某地特殊地质条件及其解决方案被录入知识库，其他矿井遇到类似情况时可直接借鉴，避免重复探索。参数敏感性分析识别出关键影响因素并指导优化方向，推动行业整体朝着智慧化方向发展，参数优化迭代闭环机制如图2所示。

深孔爆破弱化全流程管控的智慧化提升

虚拟现实技术和物理作业进行了深度融合，数字孪生矿井超越传统设计范畴发展成贯穿全流程的智能系统，预测维护依靠数据挖掘来预判设备隐患，有效避免作业过程中出现中断的情况。自适应控制依据实时反馈动态优化爆破参数，碰到异常硬岩层能快速调整装药方案。边缘计算使井下终端具备本地处理能力，减少对网络传输依赖，实现毫秒级响应。人机协同模式让工程师摆脱重复性劳动，专注战略决策，机器人集群通过智能调度实现高效配合。跨学科知识融入管理架构，岩石力学、爆破工程与数据科学交叉融合形成更精确的弱化理论模型，助力硬质煤岩开采朝着智能化和绿色化方向持续优化。

结束语

大数据引领的坚硬煤岩深孔爆破弱化全流程管控体系，实现从经验判断到数据支撑、从粗放式管理到精细化控制的模式革新。地质探测方面做到数据化、方案设计方面达到智能化、施工执行方面实现自动化、效果评价方面做到实时化的全程闭环管理，显著增强了爆破弱化效能。通过数据溯源保证品质可管理，依靠知识挖掘带动技术创新发展，借助参数迭代助力持续改进提升，为煤炭工业智能化升级树立了新的标杆。

作者简介：郭朋 桑广合 刘澜涛 山东裕隆矿业集团有限公司唐阳煤矿

责任编辑：杨佳宇 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com