

基于地质建模与实时数据的智能爆破设计与效果评价方法

杨来成

易普力(新疆)矿山工程有限公司 新疆 昌吉 831700

摘要: 本文系统阐述了地质建模技术在爆破设计中的基础支撑作用,分析了实时数据采集手段(包括随钻监测、爆区振动反馈及块度在线识别)为爆破过程提供的动态信息维度,在此基础上提出了“地质模型—设计优化—过程监测—效果评价—模型修正”的闭环智能爆破技术框架。重点探讨了基于地质属性空间分布的分区装药设计原理、随钻参数与岩体可爆性的关联机制、以及融合多源实时数据的效果评价指标体系。研究认为,智能爆破的核心价值不在于单一环节的自动化,而在于建立地质信息、设计参数与爆破效果之间的定量映射关系,实现爆破作业从“静态方案”向“动态优化”的模式跃升。

关键词: 智能爆破; 地质建模; 实时数据; 爆破设计; 效果评价; 可爆性

引言

爆破破碎是矿山及工程领域的关键手段,其效果直接影响后续工序效率与成本,被视为“成本控制的一个杠杆”。然而,传统爆破设计长期依赖经验公式与离散地质信息,难以反映矿岩三维空间分布。近年来,三维地质建模使地质信息从二维定性描述转向三维定量表达,为精细化设计奠定基础;同时,随钻监测、智能传感器、无人机及机器视觉等实时感知技术的成熟,赋予了爆破全过程数据获取能力。数据源的丰富推动了智能爆破的发展:通过融合地质模型与实时数据,实现爆破方案的个性化设计与效果的定量化评价,从而突破传统局限,提升爆破效能。

1 地质建模在爆破设计中的基础支撑

1.1 爆区地质模型的内容与构建方法

爆破设计所需的地质信息远不止矿岩名称和普氏系数,而是需要了解矿岩物理力学属性在爆区范围内的三维空间分布。一个完整的爆区地质模型应包含地形表面、矿岩界线与地层界面、主要断层与裂隙密集带、软弱夹层及含水区域的空间位置,以及各类地质单元对应的密度、抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比和波阻抗等力学参数。地质模型的构建基于钻探、槽探、物探等多源数据的融合解释。在矿山生产阶段,爆破孔钻进过程中产生的岩屑地质编录和随钻参数本身就是高频次、高密度的地质信息补充,可对原始地质模型进行局部修正和加密。随着建模软件平台的发展,块体模型已能支持以厘米级至分米级为单元的属性赋值,可满足爆

破设计的精度要求。一个关键的认识是:地质模型不是一次建成就可反复使用,而应根据新获取的钻孔数据和爆破揭露信息持续更新。

1.2 矿岩可爆性分级与属性场映射

可爆性是连接地质属性与爆破设计参数的桥梁。矿岩可爆性并非岩石单一力学指标所能完全表征,而是抗破碎能力、裂隙发育程度和能量传递效率的综合反映。合理的可爆性分级模型应综合考虑岩石单轴抗压强度、岩体完整性系数(或RQD值)以及结构面发育特征等因素^[1]。更为先进的方法是通过爆破试验反推特定矿岩条件下的能量消耗系数,建立可爆性指数与炸药单耗之间的定量经验关系。在建立了可爆性分级标准之后,将其映射到地质模型的每个块体单元上,即可得到爆区的三维可爆性属性场。这一属性场使得爆破设计不再以一个“平均可爆性”代表整个爆区,而是可以识别出同一爆区中的“软区”和“硬区”,为装药量、孔网参数的分区差异化设计提供直接依据。

1.3 地质结构面对爆破能量传播的控制作用

地质模型对爆破设计更重要的价值在于揭示和控制地质结构面对爆破能量传播的影响。断层、节理和层理等不连续面是爆破应力波传播的天然屏障和能量衰减通道——应力波在穿越结构面时发生反射、折射和透射,能量损耗显著。若不考虑这些结构面的存在和产状,爆破设计中的抵抗线计算和起爆延时设计均会与实际存在较大偏差。通过将主要结构面以三维曲面形式纳入地质模型,设计人员可以明确受结构面影响的“阴影区”范

围,在这些区域适当增加装药密度或调整起爆顺序以补偿能量衰减。

2 实时数据采集与爆破过程感知

2.1 钻进过程中的随钻参数监测

爆破孔钻进过程本身就是一种连续的地质勘探行为。现代智能钻机能够实时记录钻进参数,包括钻压、回转扭矩、冲击频率、推进速度和钻孔速度等。这些参数与岩石的硬度、磨蚀性及裂隙发育程度之间有良好的响应关系——钻进速度降低和回转扭矩升高通常指示岩石强度增大,而推进速度的突变则可能表征钻头进入裂隙或软弱界面。随钻参数的价值至少体现在两个层面:其一,可作为地质模型的实时验证和加密数据来源,修正模型中该钻孔位置的属性赋值;其二,可实时反馈炮孔所在位置的岩体可钻性与可爆性,为装药量的在线调整提供依据。理论上,若钻进过程中识别出某孔段实际岩性与设计假定存在显著偏差,则可在装药阶段对该孔的装药高度和炸药类型做出相应修正。

2.2 爆破过程中的动态信号采集

爆破瞬间释放的巨大能量在岩体中产生应力波,并向空气和围岩辐射各种物理信号。通过在爆区周围布设无线智能振动传感器,可记录爆破振动速度、加速度、主频及持续时间等波形特征。这些振动信号一方面用于判断爆破振动对周边建构筑物的影响是否在容许范围之内,另一方面也携带了关于爆破能量利用效率的信息——若在某一方向的振动能量异常偏高,可能指示爆破设计在该方向的抵抗线偏小或存在应力集中通道^[2]。此外,爆破过程中的空气冲击波超压、噪声及扬尘扩散轨迹等也是可采集的实时数据维度,它们为爆破安全评价和环境效应评估提供了直接依据。

2.3 爆后效果信息的快速获取

爆破效果的评价需要获取爆后状态的定量信息。爆堆形态和抛掷距离是反映爆破破碎与抛掷做功的重要宏观指标。通过无人机倾斜摄影或激光扫描,可在爆破后较短时间内获取爆堆的高精度三维点云模型,精确计算爆堆体积、堆积高度、形态参数和抛掷距离。块度分布是衡量爆破破碎质量的最直接指标,传统的筛分法效率低、代表性差,而基于机器视觉的爆堆图像自动分析技术可在铲装现场快速获取块度分布曲线,识别大块率和粉矿率等关键参数。这些爆后数据既是本次爆破效果评价的依据,也是指导下一次爆破设计优化的重要反馈信号。

3 基于模型与数据融合的智能爆破设计方法

3.1 分区差异化装药设计原理

传统爆破设计在爆区内采用统一的孔网参数和单位炸药消耗量,实质上是假定矿岩属性在爆区内均匀分布。而地质模型揭示的事实恰恰相反——爆区内的矿岩强度、裂隙密度和可爆性存在显著的空间变异。智能爆破设计的第一项变革即是打破“均匀设计”假设,转向“分区设计”思路。具体而言,在三维地质模型的可爆性属性场上,根据预设的阈值将爆区划分为若干个属性相对均一的子区域,对每个子区域分别确定合理的最小抵抗线、孔排距和炸药单耗参数,并通过数值模拟或经验模型验证分区交界处的过度效应是否平滑。分区差异化设计能够显著降低硬区的大块率和软区的粉矿率,使整个爆区的破碎能量分布更加均匀合理。

3.2 基于地质属性的装药结构优化

对于同一炮孔,沿孔深方向穿过的地质层位可能存在显著差异——上层是软岩、中层是硬岩、底部是破碎带。传统的全孔统一装药方式下,软岩段的装药密度可能偏大造成过破碎和粉矿增加,而硬岩段的装药密度可能不足造成根底残留。利用地质模型提供的地质剖面信息,可以对每个炮孔沿孔深方向进行分层装药设计,根据不同层位的可爆性指数分配不同的装药线密度^[3]。对于极硬层段可适当加大药量或采用高威力炸药,对松散层段则减装或不装药。更为精细的做法是根据裂隙带位置在装药段设置空气间隔,使爆生气体能量在裂隙发育区域的释放更为平缓,减少对围岩的过度损伤。

3.3 起爆网络与延时方案的智能设计

起爆延时是影响爆破破碎质量和振动效应的敏感参数。延时太短,相邻炮孔爆炸应力波的叠加位置偏离设计预期,可能产生较大的大块率或根底;延时太长,则前后排炮孔之间的“接力破碎”效应减弱,爆堆松散性不足。地质模型中的岩体波速场和结构面分布可用于计算爆破应力波在不同方向和不同介质中的传播时间,从而指导微差延时的精细化设计——使前排炮孔产生的应力波在后排炮孔起爆时恰好传播至合理位置,实现最佳的应力波叠加效果。当前先进的设计方法已将三维地质模型内嵌于爆破设计软件中,支持基于地质属性场的起爆顺序模拟和延时参数优化。

3.4 随钻数据驱动的装药前动态修正

地质模型虽然提供了爆区属性的空间估计,但这种估计必然存在不确定性——模型网格内的属性赋值是基于有限钻孔数据的空间插值结果,真实值与估计值之间可能存在偏差。而炮孔钻进过程中获取的随钻参数提

供了每个孔位处岩体属性的实测信息，精度高于模型插值。因此，一个合理的工作流程是：将所有炮孔的随钻参数按时间序列整理分析，识别出与模型预测偏差较大的异常钻孔，对这些钻孔的装药方案在装药前进行逐一复核和修正。这意味着每一次爆破的实际执行方案都是“地质模型预测”与“随钻实测数据”的加权综合，兼具前期的系统性预判和临时的精准化调整。

4 融合多源数据的爆破效果智能评价

4.1 爆破效果的多维度评价指标体系

爆破效果评价不应局限于单一的“大块率”或“粉矿率”指标，而应建立多维度的综合指标体系。从破碎质量维度，包括块度分布特征值（如平均块度、最大块度、P80）、过大块率和粉矿率；从爆破经济性维度，包括炸药单耗、钻孔延米爆破量和铲装效率提升率；从边界控制维度，包括保留岩体的爆破损伤范围和最终边坡的平整度偏差；从环境效应维度，包括爆破振动速度峰值、空气冲击波超压和扬尘扩散距离。不同矿山和不同工况下，各维度指标的权重应有所不同——例如露天矿更关注爆堆松散性和铲装效率，地下矿更关注振动控制和顶板损伤。

4.2 基于多源数据的评价信息融合

上述评价指标的获取依赖于不同技术手段。块度分布来自爆堆图像分析，爆堆形态来自无人机三维扫描，振动效应来自传感器网络，炸药消耗和铲装效率来自生产管理系统，边界损伤则来自保留岩体声波测试数据。这些数据来源不同、格式不同、时间尺度不同，需要在一个统一的数据平台上进行整合和关联。评价信息融合的核心是将上述指标统一到以爆区为单元的空间框架中——每个爆区对应一套完整的“设计参数—过程监测—效果指标”数据集^[4]。数据对齐之后，才能进行有意义的统计分析，识别哪些设计参数对哪些效果指标具有显著影响。

4.3 爆破效果与设计参数的定量关联分析

智能评价的最高层次不是“这次爆破好不好”的判断，而是“为什么好或不好”以及“下次怎样更好”的原因分析。通过对大量爆区数据集的统计回归或机器学习建模，可以建立爆破效果指标关于地质属性变量和设计参数变量的定量响应关系。例如，分析不同可爆性分区内的块度分布与炸药单耗的关系，确定各分区的最优

单耗区间；分析振动峰值速度与最大单段药量和距保护目标距离之间的幂函数关系，验证和修正场地特定的振动衰减系数。这些定量关系模型既是设计优化的直接依据，也是积累矿山特定爆破经验知识的数据化载体。

4.4 评价结果对地质模型的反馈修正

爆破后揭露的爆区形态（实际采掘边界、矿岩界面的出露位置）和保留岩体的损伤情况，是对地质模型准确性的一次“检验”。若实际揭露的矿岩界面位置与模型预测存在偏差，说明建模所用数据在该区域的精度不足，需要根据实测界面修正模型。同时，块度分布和振动响应的实际结果可反过来验证可爆性分级的合理性——若某分区块度持续偏大，则说明该分区被低估了可爆性难度，需调整其可爆性等级。由此，整个智能爆破体系构成了一个完整的闭环，每一次爆破既是一次生产作业，也是一次“地质验证实验”和“设计参数实验”。

5 结语

智能爆破是将工程从经验技艺转向数据科学的过程。本文构建了“地质模型—设计优化—过程监测—效果评价—模型修正”闭环框架，通过地质建模与实时数据融合，实现从均一化到分区差异化设计的升级，并以多维度评价驱动持续优化。智能爆破的关键难点在于数据链贯通，需统一标准记录、传输和存储各环节数据。矿山企业不应盲目采购昂贵装备，而应从建立数据采集规范、质量管控及跨专业协同流程入手，夯实制度与管理基础。未来，随着数字孪生、实时模拟及边缘计算发展，有望实现“设计即验证、爆破即采集、分析即优化”的实时闭环。无论技术如何演进，深化地质认知并尊重矿岩破碎机理，始终是爆破优化的根本出发点。

参考文献

- [1] 宋振骐, 郝军, 文孝廉. 矿山智能爆破技术研究现状与发展趋势 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3161-3174.
- [2] 李夕兵, 官凤强, 周健. 基于岩石力学参数的爆破块度预测模型研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 1-16.
- [3] 刘殿中, 杨仕春, 王立峰. 三维地质建模在矿山爆破设计中的应用研究 [J]. 金属矿山, 2022, 51(6): 43-50.
- [4] 高文学, 杨军, 夏开文. 随钻参数与岩体力学参数相关性研究综述 [J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 801-814.