露天采矿中深孔爆破技术的应用

胡广阳

易普力（新疆）矿山工程有限公司准东分公司　新疆　昌吉　831700

摘　要：深孔爆破作为露天采矿的核心破岩手段，其技术效能直接关系到矿山生产效率、成本控制与安全环保水平。本文系统梳理了深孔爆破的技术原理与适用条件，重点围绕孔网参数、装药结构、起爆网络等关键设计要素展开分析，探讨了精细化施工管理、爆破效果评价及质量控制策略。在此基础上，从边坡稳定性保护、振动危害控制及粉尘噪声防治等维度，论述了安全与环保协同管控路径。研究认为，深孔爆破技术正朝着智能化设计、精准化控制与绿色化施工方向演进，其综合应用水平的提升有赖于地质条件适配、动态参数优化与全流程闭环管理。

关键词：露天采矿；深孔爆破；孔网参数；起爆网络；爆破振动；边坡稳定

引言

露天采矿中，爆破作业是剥离覆盖层与回采矿石的首道工序，其质量直接决定后续采装、运输及破碎环节的效率和成本。深孔爆破因其一次崩落量大、破碎效果好、机械化程度高，已成为大中型露天矿山的主流爆破方式。然而，随着矿山开采深度增加、周边环境约束趋严以及产能规模扩大，深孔爆破面临的技术挑战日益复杂：既要保证矿岩充分破碎以满足铲装要求，又要控制爆破振动、飞石和粉尘对边坡及周边设施的影响，还需兼顾经济性与安全性。近年来，数码电子雷管、智能监测与反馈控制等新技术的引入，为深孔爆破的精准化调控提供了新手段，但实际工程中仍存在参数设计经验化、过程管控粗放、效果评价缺乏量化标准等问题。本文立足于技术应用的全链条视角，从原理、设计、施工、控制及环境响应等层面，对露天采矿中深孔爆破的关键技术问题进行系统论述，以期为矿山爆破实践提供理论参考与方法指导。

1 深孔爆破的技术原理与适用特征

1.1 破岩机理与能量分布

深孔爆破属于柱状装药条件下的耦合或不耦合爆炸加载过程。炸药在孔内起爆后，爆轰波以数千米每秒的速度传播，在极短时间内将化学能转化为高温高压气体和冲击波能量。冲击波首先在炮孔近区形成压碎圈，使岩石产生微裂隙和粉碎带；随后爆生气体准静态膨胀，驱动裂隙沿径向扩展和贯通，最终将岩体分割为若干块体并产生抛掷位移。这一过程涉及应力波传播、裂隙动力学及气体逸散等多物理场耦合，其破碎效果取决于炸药特性、装药结构、孔壁耦合状态及岩体结构面的综合影响[1]。值得注意的是，爆破能量并非全部用于有效破碎，相当一部分转化为振动波、空气冲击波、热能及噪声等耗散形式，因此提高能量利用效率是深孔爆破优化的核心目标之一。

1.2 适用条件与技术优势

深孔爆破通常指孔径大于 75mm、孔深超过 5m 的炮孔爆破作业，在大型露天矿中孔径常达 150～310mm，孔深可达 15～30m。其适用性主要受岩体可爆性、地质构造、含水状况及开采台阶高度等因素制约。相较于浅孔爆破，深孔爆破具有显著优势：其一，单孔装药量大，一次爆破规模可覆盖数万立方米矿岩，大幅提高采场生产效率；其二，钻孔、装药、填塞等工序便于机械化作业，劳动强度低且安全性好；其三，通过合理设计孔网参数和起爆顺序，可实现较好的块度分布和爆堆形态，减少二次破碎工作量。同时，深孔爆破对大块率、根底残留及爆破振动等控制要求更高，这决定了其技术应用必须建立在精细设计与动态调控基础之上。

2 爆破参数设计与优化方法

2.1 孔网参数的确定依据

孔网参数包括孔径、孔距、排距、超深及底盘抵抗线等，是决定爆破效果的首要因素。孔径主要依据矿山钻孔设备能力和台阶高度选定，孔径增大虽可减少钻孔总量，但会加大炸药不均匀分布风险，易产生大块。孔距与排距的比例关系影响岩体破碎的均匀性，通常孔距取排距的 1.0～1.5 倍，具体数值需结合岩体节理发育程度和炸药单耗进行调整。超深设计旨在克服底盘阻力，保证台阶底部平整，其取值一般为孔径的 8～15 倍，过大则造成能量浪费和底部过粉碎，过小则遗留根底。底

盘抵抗线是最敏感的参量，偏大时易产生后冲和根底，偏小时则增加钻孔成本和飞石风险。实践中，孔网参数常采用经验公式初选，再依据岩体波速、孔隙率及结构面产状进行修正，逐步形成与矿山地质条件相匹配的标准化参数库。

2.2 装药结构与药量计算

装药结构设计直接调控爆炸能量在孔内的时空分布。连续装药结构简单、施工便捷，适用于均质硬岩；分段装药（间隔装药）通过在孔内设置空气间隔或岩粉隔层，可降低峰值压力峰值并延长作用时间，有利于改善孔壁均匀受力、减少上部大块率。底部加强装药则针对难爆岩层或根底敏感区域，将更多药量集中于孔底以提高底盘破碎效果。药量计算以体积公式为基础，即单孔装药量 = 炸药单耗 × 孔距 × 排距 × 台阶高度 × 修正系数，其中炸药单耗是核心变量，受岩体坚固性系数、抗拉强度及裂隙率影响显著。实际工作中需根据爆区岩性变化进行分区差异化设计，避免“一刀切”式的统一装药，同时应结合爆破漏斗试验或小型试爆结果对单耗进行标定，以提升计算的可靠性。

2.3 起爆网络的选择与时序控制

起爆网络是决定爆破振动波形叠加效果和破碎方向性的关键环节。传统非电导爆管雷管网络成本低廉、抗干扰能力强，但延时精度有限，难以实现毫秒级精准控制；数码电子雷管则凭借高精度延时（误差小于 1ms）和灵活编程能力，逐步在大型露天矿山推广[2]。起爆方式上，逐孔起爆技术通过孔间微差延时分批释放能量，既降低了最大单响药量以削弱振动幅值，又利用相邻炮孔的应力波叠加增强破碎效果。微差间隔时间的选取需综合考虑岩体弹性波速和爆生气体逸散速度，一般硬岩取 15 ~ 25ms，软岩取 25 ~ 40ms。近年来，基于振动监测反馈的延时优化方法受到重视，即通过实测振动波形反演最佳微差时间，使各孔爆炸能量在岩体内形成有益干涉，从而在保证破碎质量的前提下最小化振动输出。

3 施工工艺与过程质量控制

3.1 钻孔施工精度与验收标准

钻孔偏差是影响爆破效果的重要隐蔽因素。实际施工中，钻机定位误差、钻杆偏斜及地层软硬不均导致的孔斜，可使孔底间距偏离设计值 10% ~ 20%，进而改变实际抵抗线和孔网密度，诱发大块、飞石或振动异常。为此，应建立钻孔过程的三维定位与倾角监测体系，采用 GPS 或全站仪逐孔复测孔位坐标，利用电子倾角仪检查钻孔垂直度。验收环节应制定明确的容许偏差标准，如孔位误差不大于孔径的 1/2，孔深误差不超过 ±0.5m，孔斜不超过 2°。对于超差炮孔，需通过调整装药量或补孔方式进行补救，并记录偏差数据用以修正后续设计。钻孔质量的数字化档案管理有助于追溯分析爆破效果与施工偏差之间的关联规律。

3.2 装药、填塞与联线作业规范

装药作业应严格控制炸药类型与密度，对于含水炮孔需采用抗水乳化炸药，并确保药柱连续下放至孔底，避免出现“架桥”或断药现象。间隔装药时，间隔材料的长度和位置须按设计精确执行，常用空气间隔或水间隔方式。填塞质量是约束爆生气体过早逸出的关键，填塞物宜采用干燥岩粉或专用填塞料，填塞长度一般取孔径的 20 ~ 30 倍或抵抗线的 0.7 ~ 1.0 倍，填塞不实将导致冲炮、飞石剧增和振动加剧[3]。联线作业需按照起爆网络图逐孔连接，并重点检查各连接点牢固性和防水绝缘措施，对于数码电子雷管还需完成在线注册和延时写入。建议实施“双人复核制”，即装药、填塞和联线各环节均由两组人员交叉检查并签字确认，以降低人为失误风险。

3.3 爆破效果评价与反馈机制

爆破效果评价不应局限于目测爆堆形态和块度分布，应建立多维度量化指标体系。块度分析可采用图像处理技术对爆堆照片进行粒度统计，获取平均块度、大块率及超标块占比；根底率和爆堆松散系数可通过铲装作业效率间接表征；振动监测数据用于校核实际振动衰减规律与设计预测值的一致性。评价结果应及时反馈至参数设计环节，形成“设计—施工—监测—修正”的闭环。例如，若大块率偏高，可分析是否因孔距过大或炸药单耗不足所致，进而针对性缩小孔距或调整装药结构；若振动超限，则可延长微差时间或减少单孔装药。这种闭环管理机制是持续提升爆破质量的核心手段，也是实现从经验依赖向数据驱动转型的关键路径。

4 安全与环保协同控制策略

4.1 边坡稳定性保护技术

露天矿最终边坡和临时台阶的稳定性受爆破振动和爆破裂隙的双重威胁。靠近边坡的爆区应采用预裂爆破或缓冲爆破技术：预裂爆破在主爆区之前沿边坡轮廓线布置密集小孔，先起爆形成预裂缝，从而切断应力波向边坡深部传播的路径；缓冲爆破则通过减小孔距、降低装药密度并延长微差时间，削弱后排炮孔对边坡的冲击。同时，临近边坡的爆破应严格控制单响药量和质点峰值振动速度，通常按边坡岩体类型设定安全阈值（如

坚硬岩体不超过 25cm/s，软岩不超过 10cm/s）。在爆破设计中，可利用数值模拟方法预测振动传播规律，据此调整起爆方向和微差方案，确保振动主频与边坡固有频率错开，避免共振诱发失稳。

4.2 爆破振动与飞石的控制措施

爆破振动危害不仅影响边坡，还可能对矿山工业设施及周边居民区造成干扰。控制振动的有效途径包括：降低最大单响药量（通过增加分段数实现）、优化微差间隔以分散能量、采用气体间隔器调节孔内压力波形、以及布置减振沟或减振孔等物理屏障。需注意的是，过度降低单响药量可能导致破碎质量下降，因此需在振动限值与爆破效果之间寻求平衡[4]。飞石控制则重在填塞质量和起爆方向的合理选择——保证足够填塞长度和密实度，避免炮孔口部过早泄压；同时根据地形和风向调整起爆顺序，使爆堆主要抛掷方向避开保护对象。对于重点保护区域，可增设防护网或沙袋挡墙作为被动防护措施。

4.3 粉尘与噪声的源头削减方法

爆破粉尘主要来源于孔口喷出物和爆堆扬起物，其扩散距离受风速、湿度和爆堆松散度影响。源头削减措施包括：采用水封爆破（在孔口填塞段设置水袋）湿润粉尘颗粒；在爆区预洒水增加岩体含水率；选用低爆温炸药减少气相产物的凝结成核；以及优化起爆顺序，避免多排同时起爆造成剧烈的气流冲击。噪声控制则与炸药种类、装药密度和起爆方式相关，工业炸药爆轰产生的空气冲击波噪声难以完全消除，但可通过合理设计起爆方向、避开居民区侧风向、设置临时隔声屏障等方式减轻传播影响。需要强调的是，环保措施应融入爆破方案设计的初始阶段，而非事后补救，这要求矿山建立涵盖振动、粉尘、噪声的全要素环境监测网络，依据监测数据动态调整爆破参数。

5 智能化发展趋势与技术集成

5.1 智能设计与三维模拟技术

随着矿山数字化进程加快，深孔爆破设计正从二维图纸走向三维可视化与智能优化。基于地质建模软件和爆破仿真平台，设计人员可导入岩体结构面数据、钻孔实测轨迹和地形模型，进行孔网自动布设、装药量优化和起爆时序模拟。仿真计算能够预评估爆堆轮廓、块度分布及振动影响范围，辅助筛选最优方案。人工智能算法（如遗传算法、粒子群优化）已被尝试用于孔网参数的多目标优化，以破碎质量、振动控制和经济成本为综合指标，求解帕累托最优解集。尽管目前智能设计仍受限于岩体本构模型的准确性，但其在参数敏感性分析和极端工况预警方面的价值已得到认可。

5.2 实时监测与自适应控制

实时监测技术为实现自适应爆破控制提供了可行性。在爆破过程中，通过布置加速度传感器、声波监测仪和高速摄像机，可捕获振动波场演化、裂隙扩展及爆堆运动过程。爆破后，利用无人机航拍和三维激光扫描快速获取爆堆表面模型，与设计爆堆形态对比以评估崩落效果。基于监测数据的自适应控制逻辑在于：当实时反馈显示某区域振动超预期或破碎不均时，后续炮孔可在微秒级时间窗口内调整起爆延时或切断部分起爆回路，从而降低危害。虽然该技术尚处于试验阶段，但随着边缘计算和无线同步触发技术的成熟，未来有望在大型露天矿山实现“感知—决策—执行”的闭环快速响应，大幅提升爆破作业的柔性和安全性。

6 结语

深孔爆破技术关乎露天矿经济效益、安全及环境表现。本文从破岩机理出发，论述参数设计、施工控制、安全环保及智能化发展：一是孔网参数、装药结构与起爆网络需根据岩体条件联动优化；二是依靠钻孔精度、填塞质量及效果反馈的闭环管理，结合数字化记录降低人为误差；三是将边坡保护、振动削减和粉尘防治作为设计内在约束进行源头统筹；四是智能化设计与实时监测提升适应性，但需基础数据支撑。未来，随绿色智能要求提升，该技术将向精准能量调控、系统环境响应及高效决策支持演进，岩石力学、爆炸力学等多学科交叉融合将成为核心驱动力。

参考文献

[1] 王旭光, 刘占魁. 露天矿深孔爆破孔网参数优化研究进展 [J]. 爆破,2022,39(3):1-8.

[2] 张振宇, 陈宝心, 杨军. 数码电子雷管在露天深孔爆破中的应用与分析 [J]. 工程爆破,2023,29(2):45-52.

[3] 李夕兵, 周健, 赵国彦. 爆破振动对露天矿边坡稳定性的影响评价方法 [J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(8):1567-1576.

[4] 刘殿中, 高文学, 黄平路. 露天深孔爆破飞石控制理论与技术综述 [J]. 中国矿业,2022,31(6):89-95.