

特殊地质条件下爆破作业的安全技术探讨

陈伟龙 李战营 靳茜琳

新疆天宝爆破工程有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要：特殊地质条件下爆破作业的安全风险，从安全评估与技术措施两方面构建管控体系。安全评估通过建立涵盖地质条件、爆破参数、环境影响的多层级指标体系，采用层次分析法与模糊综合评价构建量化模型，评估结果用于指导方案优化、监测预警及应急预案制定，形成闭环管理。安全技术措施聚焦爆破前精细化勘察（地质雷达、岩体质量分级）、参数动态优化（数值模拟与机器学习反馈）、振动飞石控制（微差起爆与多屏障防护）、水-气灾害防控（超前注浆与智能监测），实现特殊地质条件下爆破作业的安全可控。

关键词：特殊地质条件；爆破作业；安全技术

引言：随着矿产资源开发向深部及特殊地质区域延伸，爆破作业面临软土、岩溶、高水压、瓦斯等复杂条件挑战，传统技术易引发振动超限、飞石失控、透水突出等安全事故。特殊地质条件下，岩体结构不均、能量传递复杂、灾害诱因多样，对爆破安全管控提出更高要求。需构建针对性安全体系，通过精细化勘察识别地质风险，动态优化爆破参数，实施振动、飞石、水-气灾害协同控制，以应对复杂环境下的安全挑战，保障爆破作业安全高效实施。

1 特殊地质条件概述

特殊地质条件是指在自然地质演化或人类工程活动影响下，具有复杂地形地貌、特殊地层岩性、活跃地质构造或极端水文环境的地质体，其显著特征是易引发地质灾害或对工程施工安全构成显著威胁。这类地质条件通常表现为地形切割强烈、相对高差大，如青藏高原及周边区域地形高差可达1000~2000m，陡峭的坡体为崩塌、滑坡提供了启动条件；地层岩性复杂多样，从元古宇至新生界的沉积岩、岩浆岩、变质岩均有分布，尤其在西南山地广泛发育的碎屑岩、变质岩及松散堆积层，受构造运动和物理风化作用影响，岩石破碎程度高，为岩土体失稳提供了物质基础^[1]。地质构造方面，断裂发育、地震活动频繁是突出特点，如川西山地因处于板块交界带，断裂带长期活动导致岩体完整性差，地震引发的次生灾害风险极高。水文地质条件同样复杂，包括高水位、强渗透性含水层、冰川活动区的冰水作用等，黄河流域年均输沙量高达 $16.4 \times 10^8 \text{t}$ ，湍急水流加剧了岩土体侵蚀搬运，而煤矿区的富水地层和高水压则易诱发突水事故。

2 特殊地质条件下爆破作业的安全评估方法

2.1 安全评估指标体系的建立

2.1.1 地质条件适应性评估

特殊地质条件（如软土、顺层岩、岩溶等）对爆破作业的影响具有显著复杂性，需建立针对性评估指标。需通过详细地质勘察明确特殊地质分布范围、物理力学参数（如软土的含水率、黏聚力，顺层岩的层理倾角、节理发育程度）及不良地质体（如溶洞、软弱夹层）的空间位置。评估爆破设计参数与地质条件的匹配性，例如软土地段需控制单响药量以减少振动引发的土体液化，顺层边坡爆破需优化起爆顺序防止顺层滑动。同时，结合历史工程案例，分析类似地质条件下爆破事故的诱发因素，建立地质风险预警阈值，如当顺层倾角大于 30° 时，需增设边坡稳定性监测指标。

2.1.2 爆破参数动态优化评估

特殊地质条件下，爆破参数的静态设计难以满足安全需求，需构建动态优化评估机制。核心指标包括装药量、起爆网路、孔网参数及填塞质量的适应性调整。例如，在软土地层中，应采用小直径炮孔、间隔装药技术，降低炸药能量集中对土体结构的破坏；针对岩溶发育区，需通过超前地质雷达探测溶洞位置，调整炮孔布置以避免空腔，避免出现拒爆或飞石风险。此外，引入数值模拟技术（如有限元法），模拟不同地质参数下的爆破振动、冲击波传播规律，量化参数调整对安全距离的影响，确保爆破效应控制在允许范围内。

2.1.3 环境与应急协同评估

特殊地质条件下爆破作业的环境敏感性更高，需建立“环境影响-应急能力”双维度评估体系。环境评估指标涵盖周边建（构）筑物安全距离、地下管线分布、水体及生态保护要求，例如软土区爆破需重点监测振动对邻近建筑物基础的影响，制定振动速度（如 $\leq 2.5 \text{cm/s}$ ）及沉降控制标准。应急评估则需结合地质风险特性，制定专项应急预案，包括特殊地质引发的次生灾害（如

滑坡、涌水)处置流程、应急物资储备(如边坡加固材料、排水设备)及救援队伍配置。同时,通过现场踏勘与模拟演练,验证应急预案的可行性,确保在顺层滑坍、溶洞突水等突发情况下,能快速启动响应机制,降低事故损失。

2.2 安全评估模型的构建

为系统化特殊地质条件下爆破作业的风险,需构建多维度、动态化的安全评估模型。(1)明确评估指标体系,涵盖地质条件(如断层密度、岩溶率、地应力值)、爆破参数(单段药量、孔网参数)、环境因素(保护对象距离、地下水状态)及监测数据(振动峰值、飞石距离),确保指标全面反映风险源。(2)采用层次分析法(AHP)确定指标权重,通过专家评分与数学计算,区分地质复杂性、爆破能量控制等关键因素的优先级,避免主观偏差。(3)引入模糊综合评价法,将定性指标(如岩体完整性)与定量数据(如振动速度)结合,通过隶属度函数量化风险等级,解决地质不确定性导致的评估模糊性。(4)集成数值模拟结果,利用LS-DYNA等软件模拟不同地质条件下的爆破效应,修正模型参数以提高预测精度。(5)建立动态反馈机制,根据实时监测数据(如微震信号、孔隙水压力)更新模型,实现风险评估的动态闭环管理,为爆破方案调整提供科学依据。

2.3 安全评估结果的应用

安全评估结果是特殊地质条件下爆破作业安全管控的核心依据,其应用贯穿施工全流程。直接指导爆破方案动态优化,针对评估识别的高风险环节(如软土区振动超限、岩溶区拒爆风险、顺层岩边坡失稳隐患),精准调整单响药量、起爆网路及孔网参数,例如在节理发育岩体中采用逐孔起爆技术降低振动叠加效应,或对溶洞区炮孔实施填充预处理。支撑安全监测体系构建,依据评估确定的敏感保护对象(如地下管线、古建筑)及振动安全阈值(通常 $\leq 2.5\text{cm/s}$),布设测振仪、应力传感器等设备,建立“实时监测-数据反馈-参数修正”的动态调控机制^[2]。同时,评估结果为应急预案制定提供技术支撑,明确特殊地质引发的次生灾害(如滑坡、涌水)处置流程,配置针对性救援物资(如边坡加固用速凝混凝土、排水泵)。评估报告作为项目合规性证明,提交公安机关审批及监理单位备案,确保作业符合《爆破安全规程》要求。通过施工后评估结果与实际监测数据的对比分析,还可反哺评估模型迭代,优化地质参数权重系数,提升类似工程的风险预判能力,形成安全管理闭环。

3 特殊地质条件下爆破作业的安全技术措施

3.1 爆破前地质勘察与风险评估

3.1.1 精细化勘察技术

特殊地质条件下的爆破作业需采用多维度精细化勘察技术,以精准识别潜在风险。通过地质雷达、地震波CT等物探手段,探测地下溶洞、软弱夹层、断层破碎带的空间分布特征,分辨率达0.5m级;结合钻孔取芯与声波测试,获取岩体完整性系数(K_v)、单轴抗压强度等物理力学参数,数据误差控制在5%以内。同时,利用无人机航测与三维激光扫描构建地形地貌模型,标注边坡坡率、地表裂缝等宏观地质现象。对富水地层,需通过抽水试验测定渗透系数,预测爆破引发涌水的可能性。勘察数据需形成可视化地质剖面,为后续爆破参数设计提供高精度基础资料。

3.1.2 岩体质量分级

基于精细化勘察数据,采用多指标综合法进行岩体质量分级。以RMR(岩石质量评分)或Q系统为基础框架,补充特殊地质修正系数:软土地层增加含水率与灵敏度指标,顺层岩体引入层理倾角与黏聚力参数,岩溶区则考虑溶洞发育密度与充填物性质。通过层次分析法确定各指标权重,将岩体划分为I-V级,其中I级(优质岩体)可采用常规爆破参数,V级(极软/破碎岩体)需实施控制爆破。分级结果需与历史工程案例比对验证,确保分级标准与爆破风险的匹配性,为差异化安全技术措施制定提供依据。

3.1.3 风险量化模型

构建融合地质参数与爆破效应的风险量化模型,采用“概率-后果”矩阵法评估风险等级。输入层包含岩体质量等级、地质构造复杂度、地下水埋深等12项关键指标;通过模糊综合评价将定性指标(如节理发育程度)转化为定量数值(0-10分),结合蒙特卡洛模拟计算风险发生概率。针对特殊地质场景设置专项模块:软土地层重点计算振动液化概率,顺层边坡模拟滑动推力与安全系数,岩溶区评估溶洞塌落冲击能量。模型输出风险等级(低/中/高/极高)及对应控制阈值,如高风险区单响药量需 $\leq 50\text{kg}$,并自动生成风险管控清单,指导爆破方案优化与应急预案制定。

3.2 爆破参数动态优化设计

针对特殊地质条件的复杂性,需建立“勘察数据-数值模拟-现场试验”三位一体的爆破参数动态优化机制。基于精细化勘察结果,采用有限元/离散元数值模拟软件(如ANSYS、PFC3D),模拟不同地质条件下炸药能量传播规律,优化孔网参数(孔距、排距)、装药量及

起爆顺序。例如,对软弱夹层发育岩体,采用小抵抗线($W = 2.5\text{--}3\text{m}$)、大孔距($a = 3.5\text{--}4\text{m}$)的宽孔距小抵抗线布置,降低夹制作用;岩溶区通过调整装药结构(如连续装药改为间隔装药),控制爆炸能量分布,避免空腔聚能引发飞石。结合现场试验数据(如爆破块度、振动速度),利用机器学习算法(如BP神经网络)构建参数反馈模型,实时修正单响药量(软土区控制在 30kg 以内,硬岩区可提升至 80kg)、填塞长度(不小于最小抵抗线1.2倍)及起爆时差(微差间隔 $50\text{--}100\text{ms}$),确保参数与地质条件动态适配,实现安全与效率的平衡。

3.3 爆破振动与飞石综合控制

为有效降低特殊地质条件下爆破作业的振动危害与飞石风险,需采取多技术协同的综合控制措施。(1) 振动速度精准管控:采用微差起爆技术控制最大单段装药量,结合萨道夫斯基公式($R = (K/V)^{(1/\alpha)} Q^{(1/3)}$)计算安全距离,软土、岩溶区振动速度严格控制在 $1.5\text{--}2.5\text{cm/s}$ 内,通过测振仪实时监测并动态调整段间间隔时差($50\text{--}100\text{ms}$),避免振动波叠加放大。(2) 飞石防护多屏障设置:爆破区域采用“砂土袋+钢丝网+竹排”三层覆盖,孔口堆压 0.5m 厚砂土袋,周边 100m 范围设警戒岗,孤石爆破增设帆布棚包裹,根据《爆破安全规程》确保飞石安全距离不小于 300m ,特殊地段加密防护层密度。(3) 装药结构差异化设计:顺层岩采用不耦合间隔装药(耦合系数 $1.2\text{--}1.5$),软弱夹层地段用低爆速乳化炸药(爆速 $\leq 3200\text{m/s}$),炮孔堵塞长度不小于最小抵抗线,使用黄泥分层捣实,防止冲孔飞石与能量泄漏。(4) 地质缺陷预处理:对溶洞、裂隙区采用注浆填充或导洞排放,断层破碎带提前打入锚杆加固,爆破前 5m 范围打探眼探明地质构造,避免装药位置正对软弱面,降低不均匀抵抗线引发的飞石风险。(5) 动态监测与应急联动:布置振动、位移传感器组成监测网,数据实时传输至控制中心,超阈值自动预警并启动备用方案(如暂停爆破、调整参数),配备应急沙袋、防护网等物资,确保异常情况快速处置。

3.4 地下水与气体灾害防控

针对特殊地质条件下的复合型水-气风险,需实施“分级预警-靶向治理-智能联动”防控策略。超前通过水文地质钻探测定含水层水压($\geq 0.5\text{MPa}$ 时启动高压防护)、渗透系数,结合气体色谱分析确定可燃气体组分(如 CH_4 、 CO)及爆炸极限,绘制“水-气风险热力图”标注高风险区块。爆破作业前,对富水构造带采用“管棚+深孔注浆”形成立体止水帷幕,注浆材料选用速凝型水泥-水玻璃双液浆(初凝时间 $< 30\text{s}$);气体聚集区布设螺旋式抽采钻孔(孔径 110mm ,间距 5m),配套变频式抽气机实现负压引流(抽采负压 $\geq 13\text{kPa}$)。创新采用“水-气双参数”实时监测系统,在爆破区域布置光纤光栅渗压计(精度 $\pm 0.1\%\text{FS}$)与红外气体传感器(响应时间 $< 10\text{s}$),数据接入智能管控平台,当水位骤升 $> 0.3\text{m/h}$ 或气体浓度达爆炸下限 20% 时,自动触发断爆、排风联动指令^[3]。爆破后30分钟内持续监测气体浓度与涌水量,确认无异常方可解除警戒,形成“探测-治理-监测-应急”全链条防控闭环。

结语

未来爆破安全技术需深度融合数字孪生与物联网技术,构建虚实交互的智能管控体系。通过物联网传感器实时采集地质参数、爆破振动、气体浓度等数据,驱动数字孪生模型动态映射物理场景,实现风险的超前预判与参数的智能优化。例如,利用三维地质建模与实时监测数据耦合分析,可精准模拟特殊地质条件下的能量传播规律,自动生成最优爆破方案。

参考文献

- [1]王质彬,郭卫东,傅永和.复杂地质条件下的精确爆破控制技术研究[J].工程建设(维泽科技),2025,8(4):101-103.
- [2]李金鑫.高瓦斯隧道施工超前地质预报及爆破技术的应用[J].科学技术创新,2024(5):158-161.
- [3]汪建.复杂环境条件下溢洪道开挖控制爆破施工技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(3):161-165.