露天采矿边坡控制性爆破施工技术研究

王应明
新疆天业（集团）有限公司精河县晶羿矿业有限公司，新疆 博尔塔拉蒙古自治州 833300

[摘要]本文聚焦金属非金属露天石灰石采矿工程，深入研究边坡控制性爆破施工技术。详细阐述该技术在石灰石矿开采中的原理、关键要点，针对现存问题提出优化策略与发展方向，旨在为石灰石矿边坡控制性爆破施工提供理论与实践指导，保障开采安全，提升施工效率与经济效益，减少对周边环境的影响。
[关键词]金属非金属露天采矿；石灰石矿；边坡；控制性爆破；施工技术
DOI：10.33142/ect.v3i5.16464　　中图分类号：TD235　　文献标识码：A

Research on Controlled Blasting Construction Technology for Open-pit Mining Slope

WANG Yingming
Jinghe County Jingyi Mining Co., Ltd. of Xinjiang Tianye (Group) Co., Ltd., Bortala Mongolian Autonomous Prefecture, Xinjiang, 833300, China

Abstract: This article focuses on metal and non-metal open-pit limestone mining engineering, and conducts in-depth research on slope controlled blasting construction technology. Elaborate on the principles and key points of this technology in limestone mining, propose optimization strategies and development directions for existing problems, aiming to provide theoretical and practical guidance for controlled blasting construction of limestone mine slopes, ensure mining safety, improve construction efficiency and economic benefits, and reduce the impact on the surrounding environment.
Keywords: metal and non-metal open-pit mining; limestone mine; slope; controlled blasting; construction technology

引言

金属非金属露天石灰石采矿在建筑、水泥等众多行业的原材料供应中占据重要地位。随着基础设施建设的持续推进，对石灰石的需求不断攀升，露天石灰石矿的开采规模与日俱增。在开采过程中，边坡稳定性是确保采矿作业安全、高效开展的关键因素。爆破作为石灰石矿开采中岩石破碎的主要手段，其施工质量直接影响边坡稳定。不合理的爆破会致使边坡岩体损伤，增加滑坡等地质灾害风险，不仅危及人员生命安全，还会造成资源浪费与环境破坏。因此，深入研究并应用露天石灰石矿边坡控制性爆破施工技术，对保障开采安全、提升经济效益具有重要意义。

1 露天采矿边坡控制性爆破施工技术原理

1.1 爆破作用原理

在石灰石矿开采作业中，爆破施工依赖炸药爆炸瞬间释放的巨大能量完成岩石破碎。炸药起爆后，爆轰反应在微秒级时间内完成，瞬间产生高达 3000℃以上的高温与数万兆帕的高压爆轰产物。这些高温高压产物以冲击波形式迅速向岩体传播，在岩石内部形成复杂应力场：当压应力超过岩石抗压强度时，岩体被粉碎；应力波传播至自由面反射形成拉伸波，若拉应力大于岩石抗拉强度，则导致岩石破裂。随后，爆轰气体膨胀产生的推力将破碎岩块抛掷。在边坡区域进行爆破作业时，需对爆破能量实施精准调控。技术人员需通过优化炮孔布置、控制装药量、设计起爆顺序等手段，确保爆破能量既能使岩石达到理想的破碎粒度，满足开采需求，又能最大程度降低对边坡岩体的扰动。若能量控制不当，可能导致边坡岩体结构损伤、裂隙扩展，威胁边坡稳定性，甚至引发滑坡等地质灾害。

1.2 控制性爆破的基本概念

控制性爆破作为现代矿山工程的核心技术，依托多学科交叉的科学设计体系，通过整合三维地质建模、岩石力学分析等数据，构建精准的爆破方案。在技术实施层面，运用数码电子雷管、高精度导爆管等先进器材，对炮孔间距、装药量、起爆延时等参数进行毫米级精度调控，确保爆破能量的定向释放与均匀分布。在石灰石矿边坡施工场景中，控制性爆破以“双重目标平衡”为核心准则：既要满足矿石破碎块度均匀、便于采装的作业需求，又需将爆破震动速度控制在 5cm/s 以内，飞石距离限制在警戒区域 300m 范围内，冲击波超压值控制在安全阈值。通过优化起爆网络、采用预裂爆破等技术手段，有效降低震动对边坡岩体的扰动，减少裂隙发育，最大限度维护边坡结构稳定，同时避免对周边建筑物、生态环境造成破坏，实现安全高效开采。

1.3 边坡稳定性与爆破的关系

石灰石矿边坡稳定性受多种因素制约，爆破施工是其中关键影响因素。不当的爆破参数与施工方式，会使边坡岩体产生新裂隙，破坏原有结构，削弱岩体强度。例如，过大的爆破震动会改变边坡岩体应力分布，提升失稳风险；爆破飞石冲击坡面，可能导致局部损坏。而合理的控制性爆破技术能够优化能量传递，减少对边坡的负面影响，维持边坡稳定。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

2 露天石灰石矿边坡控制性爆破关键技术

2.1 爆破方案设计

（1）爆破参数确定。石灰石矿的炸药单耗确定需综合考虑矿石硬度、密度、层理发育情况等。相较于其他矿种，石灰石硬度适中，但层理结构明显，炸药单耗一般在 0.2～0.25kg/m^3。炮孔直径通常根据开采设备和生产效率选择，常见为 100～120mm；炮孔深度依据台阶高度而定，一般在 6～12m。炮孔间距和排距影响能量分布与破碎效果，合理的间距和排距能使矿石破碎均匀，降低大块率与爆破震动。

（2）炮孔布置方式。常见的方形、矩形和三角形炮孔布置方式各有优势。方形布置适用于矿石性质均匀、爆破要求较低的区域；矩形布置利于控制爆破方向、减少震动；三角形布置可使能量分布更均匀，提高破碎效果。在石灰石矿边坡爆破中，需依据边坡形态、矿石特性及爆破目标，选择合适的布置方式，并结合预裂爆破、光面爆破技术保护边坡。

2.2 预裂爆破与光面爆破技术

2.2.1 预裂爆破技术

在石灰石矿边坡爆破作业中，预裂爆破是保护边坡稳定的重要技术手段。其原理是在主爆区爆破前，沿着设计轮廓线钻设一排密集炮孔，通过精确控制起爆顺序，使这些炮孔率先起爆，在岩体中形成一道连续的贯穿裂缝。这道裂缝如同天然屏障，能够有效缓冲和反射主爆区产生的震动波，从而减少震动对保留岩体的破坏。

预裂爆破的技术核心在于对炮孔布置和装药结构的精准把控。一方面，需合理确定炮孔间距，一般控制在孔径的 8～12 倍，以确保裂缝顺利贯通；另一方面，采用不耦合装药方式，在药卷与孔壁间预留空气间隙，以此降低炸药爆炸时对孔壁的冲击压力，减少岩体损伤。通过这些措施，预裂爆破能够有效阻隔主爆区震动波，最大程度维护边坡岩体的完整性，保障矿山开采安全。

2.2.2 光面爆破技术

在石灰石矿边坡开挖施工中，光面爆破作为精细化爆破技术，在主爆区完成破碎后，对预留的岩体进行精准爆破，从而塑造平整的开挖面。这项技术与预裂爆破同属控制爆破范畴，二者均旨在减少爆破对保留岩体的损伤，但在施工时序和装药设计上存在显著差异。光面爆破实施时，采用“少药密布”的策略，炮孔装药量较常规爆破大幅降低，单孔药量仅为普通爆破的 40%～60%。通过科学编排微差爆破顺序，利用相邻炮孔产生的应力波相互叠加作用，使岩体沿设计轮廓线均匀开裂。这种精确的爆破控制，能够有效抑制岩石的不规则破碎，将边坡超挖、欠挖误差控制在极小范围，不仅提升了边坡外观的平整度，更减少了对岩体内部结构的扰动，显著增强边坡整体稳定性，为后续矿山开采作业筑牢安全基础。

2.3 微差爆破技术

微差爆破将群药包以毫秒级间隔分组起爆，可降低爆破震动、提高破碎效果。在石灰石矿边坡爆破中，合理的微差时间间隔与起爆顺序，能使先爆药包应力波未衰减时，后爆药包应力波叠加，增强破碎程度，同时干扰地震波，降低峰值强度，减小对边坡和周边环境的震动影响，提升采矿效率。

2.4 爆破器材的选择与应用

2.4.1 炸药选择

在石灰石矿开采的爆破作业体系中，炸药的合理选用直接关系到开采效率与作业安全。铵油炸药与乳化炸药是最常采用的两类工业炸药，二者性能特点鲜明，应用场景各有侧重。铵油炸药以硝酸铵和柴油为主要成分，凭借原料易得、制作工艺简单的优势，成为露天开采场景下的经济型选择，但由于其显著的亲水性，在潮湿环境或地下水丰富的矿段使用时，易出现吸湿结块现象，导致爆炸性能下降。

相较之下，乳化炸药通过特殊乳化工艺将氧化剂水溶液均匀分散在油相介质中，形成稳定的乳胶状体系，具备优异的抗水性能，即使长时间浸泡仍能保持良好的爆炸威力，同时其钝感特性降低了意外引爆风险，适用于水下爆破、雨季施工等复杂工况。在控制爆破震动方面，优先选用爆速低于 3000m/s、爆热相对较低的低威力炸药，通过减缓爆炸能量释放速率，减少震动波强度。此外，炸药选型还需综合考量矿山的水文地质条件、运输距离、储存设施等实际因素，在确保爆破效果的前提下，实现安全性与经济性的平衡。

2.4.2 起爆器材

起爆器材主要有雷管和导爆管。非电雷管抗静电、抗杂散电流，在露天石灰石矿爆破中应用广泛；导爆管起爆系统操作简便、安全可靠，可实现精确微差爆破。选择时需确保器材质量可靠，与炸药良好匹配，保障爆破顺利进行与效果达成。

3 露天石灰石矿边坡控制性爆破施工技术存在的问题及优化策略

3.1 存在的问题

3.1.1 地质条件复杂

石灰石矿复杂的地质条件为爆破作业带来显著挑战。矿区内岩石层理发育程度不一，部分区域存在厚度 0.2～1 米的软弱夹层，且分布呈现随机性。这些软弱夹层如同天然的应力集中区，一方面导致爆破应力波在传播过程中发生折射、散射，削弱爆破能量的有效传递；另一方面，夹层的低强度特性使得爆破时岩石破碎形态难以预测，极易出现大块率升高、根底残留等问题。由于不同区域岩石力学参数（如抗压强度在 30～120MPa 波动）与结构特征差异显著，统一的爆破参数难以适配全矿区。若采用相同的炮孔间距、装药量等参数，易导致部分区域过度破碎形成超挖，而另一些区域则因能量不足产生欠挖，不仅降低开采效率，还会破坏边坡岩体的完整性，形成局部失稳隐患，严重威胁矿山安全生产与边坡长期稳定性。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

3.1.2 爆破有害效应控制不稳定

在石灰石矿开采中，即便采用控制性爆破技术对有害效应进行精准控制，实际作业仍面临诸多挑战。炸药生产环节中，原材料品质差异、生产工艺波动，易导致炸药爆速、爆压等关键性能指标出现±10%左右的浮动，使爆破能量释放难以精准预估。起爆网络施工时，雷管延时误差、导爆管连接松动等问题，可能致使起爆顺序错乱，造成震动峰值叠加，实测震动速度超出设计值 20%～30%。此外，复杂地质条件下，岩石波阻抗变化会引发应力波传播异常，导致飞石运动轨迹失控，部分飞石抛射距离超出警戒范围。这些因素相互交织，致使爆破震动、飞石、冲击波等有害效应控制效果不稳定，给矿山安全生产埋下隐患。

3.1.3 技术应用水平差异

在石灰石矿开采实践中，部分施工队伍由于专业技术储备不足，对控制性爆破技术的理论认知与实践应用存在显著偏差。在技术实施过程中，常出现炮孔间距计算错误、装药量配比失衡等问题，导致爆破能量分布不均，岩石破碎效果差强人意。此外，起爆网络的布设缺乏系统性规划，雷管延时设置不当，不仅无法实现预期的减震效果，反而加剧震动危害。更有甚者，在边坡爆破作业时，未严格遵循预裂爆破、光面爆破等专项技术的操作规范，致使边坡岩体过度破碎，节理裂隙发育加剧，极大削弱了边坡的整体稳定性。这些不规范操作不仅浪费资源、降低开采效率，更使工程面临滑坡、坍塌等重大安全风险，严重威胁矿山安全生产与周边环境安全。

3.2 优化策略

3.2.1 深化地质勘察与动态监测

在石灰石矿爆破工程中，强化爆破前的地质勘察与施工中的动态监测是保障边坡安全的关键举措。爆破前，需综合运用钻探、物探等多种技术手段，开展精细化地质勘察工作。通过取芯分析掌握矿层的层理走向、倾角及软弱夹层的分布范围，利用地质雷达探测岩体内部裂隙发育情况，为爆破方案设计提供详实的基础数据。施工过程中，构建由位移传感器、裂缝计、震动监测仪组成的实时监测系统，对边坡位移、变形及爆破震动等关键指标进行 24 小时不间断监测。一旦监测数据出现异常波动，如边坡位移速率超过 5mm/天或震动峰值超出安全阈值，技术人员立即依据监测结果，动态调整炮孔间距、装药量、起爆顺序等爆破参数，及时化解安全风险，确保边坡始终处于稳定状态。

3.2.2 创新爆破技术与器材

在石灰石矿开采领域，技术革新是提升爆破安全与效率的核心驱动力。持续聚焦先进爆破技术与器材研发，通过融合智能控制与新材料技术，为行业发展注入新动能。高精度电子雷管凭借毫秒级延时精度控制，可将起爆误差缩小至±0.1 毫秒，实现精准微差爆破，有效降低震动叠加效应，使爆破震动强度降低 30%以上。新型环保炸药采用水胶基质与钝感材料，在保持爆破威力的同时，爆速降低 20%～30%，显著减少震动危害；其低毒、无残留特性，可使粉尘污染降低 40%，有效改善作业环境。这些技术与器材的创新应用，不仅大幅提升爆破破碎效果，更强化了对飞石、冲击波等有害效应的精准控制能力，为石灰石矿绿色安全开采提供坚实技术支撑。

3.2.3 强化施工队伍培训与管理

加强施工队伍技术培训，提高人员专业素质与操作技能，使其熟练掌握石灰石矿边坡控制性爆破技术要点。完善施工管理制度，加强过程监督检查，确保施工规范、安全、高效。

4 露天石灰石矿边坡控制性爆破施工技术的发展趋势

4.1 智能化与信息化升级

随着科技发展，露天石灰石矿边坡控制性爆破施工将向智能化、信息化迈进。利用计算机仿真模拟爆破过程，优化方案设计；借助智能监测设备实时采集分析数据，实现远程监控与智能调控，提升爆破施工的精准性与安全性。

4.2 绿色环保技术创新

在环保政策推动下，绿色环保爆破技术成为发展重点。研发低污染、低噪音爆破器材，优化爆破工艺减少粉尘、震动污染；加强爆破废弃物处理与资源回收利用，实现绿色开采，推动行业可持续发展。

4.3 多学科融合创新

该技术涉及岩石力学、爆破工程、地质工程、信息技术等多学科。未来将加强学科交叉融合，深入研究石灰石矿爆破破碎机理、边坡稳定变化规律，以创新理论推动技术进步，提升露天石灰石矿开采水平。

5 结论

金属非金属露天石灰石采矿工程中，边坡控制性爆破施工技术对保障开采安全、提高生产效率至关重要。通过合理设计爆破方案，运用预裂爆破、光面爆破、微差爆破等关键技术，选择适配的爆破器材，并结合工程实际优化改进，可有效控制爆破有害效应，维护边坡稳定，提升经济效益。针对当前技术应用中存在的问题，需通过加强地质勘察监测、创新技术器材、强化队伍培训管理等措施解决。随着科技进步，该技术将朝着智能化、绿色化、多学科融合方向发展，为露天石灰石矿开采提供更强有力的技术支撑。

[参考文献]

[1]徐海平.露天采矿边坡控制性爆破施工技术分析[J].中国金属通报,2024(3):31-33.
[2]马军.露天采矿作业中边坡控制性爆破施工技术分析[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2024(3):45-47.
[3]王胆,吴晨,吕泊宁,等.先锋露天矿北帮边坡稳定性控制方案优化[J].露天采矿技术,2025,40(1):88-91.

作者简介：王应明（1987.6—），性别：男，学历：本科，毕业院校：新疆工程学院，所学专业：采矿工程，目前职称：采选矿工程、二级建造师矿业工程。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.