

露天金属铅锌矿高陡边坡预裂爆破技术应用与研究

曹 博

中铁十九局矿业投资有限公司 新疆和田 848000

摘 要: 为确保露天金属铅锌矿开采过程中高陡边坡的稳定性与安全性, 本文针对某典型露天铅锌矿的地质条件, 系统研究了预裂爆破技术的应用。论文首先分析了国内外预裂爆破技术的研究现状, 随后详细阐述了基于该矿岩体特性的预裂爆破参数设计、施工工艺及质量控制方法。通过现场试验, 对比分析了预裂爆破实施前后边坡的成型效果、爆破振动效应以及对保留岩体的损伤情况。结果表明, 采用优化的预裂爆破参数(孔径140mm, 孔距1.2m, 线装药密度350-400g/m), 可使边坡半孔率达到92%以上, 有效将主爆区传来的爆破振动速度降低约50%, 显著提高了边坡面的平整度和整体稳定性。本研究为类似矿山的高质量边坡控制提供了可靠的技术依据和实践参考。

关键词: 露天采矿; 铅锌矿; 预裂爆破; 边坡稳定; 爆破振动; 半孔

引言

露天矿山开采中, 最终边帮的稳定性直接关系到矿山的生产安全与经济效益。预裂爆破作为一种有效的轮廓控制爆破技术, 其原理是在主生产爆破之前, 沿着设计开挖轮廓线钻凿一排较密集的炮孔, 通过孔内不耦合装药结构同时起爆, 形成一条贯穿的裂缝面。该裂缝面能够有效阻隔后续主爆区爆破应力波的传播, 减轻对保留岩体的扰动, 从而获得光滑、平整、稳定的最终边坡^[1]。

预裂爆破技术起源于20世纪50年代, 由美国星多局(U.S. Bureau of Reclamation)在隧道工程中首次提出并应用。随后, 欧美等发达国家在大型水利枢纽、交通隧道及露天矿山的建设中对其进行了广泛的理论与实践研究。Lundborg^[2]等人从岩石力学和爆炸力学角度, 深入探讨了爆炸应力波和爆生气体在预裂缝形成过程中的联合作用机制。Persson^[3]等系统研究了不耦合系数、装药结构、孔间距等关键参数对预裂效果的影响规律, 建立了经典的预裂爆破参数计算模型。近年来, 随着数值模拟技术的发展, 国外学者如Donze^[4]等利用离散元(DEM)、有限元(FEM)等方法, 对预裂缝的形成与扩展过程进行了精细化模拟, 为参数优化提供了强有力的理论工具。

我国自20世纪70年代开始引入预裂爆破技术, 并在三峡工程、大型露天煤矿等领域取得了显著成就。在金属矿山领域, 针对复杂地质条件下的预裂爆破技术研究日益深入。马建军^[5]等人系统总结了影响预裂爆破效果的主要因素, 并提出了基于岩体波阻抗的线装药密度

计算公式。宋俊生^[6]等结合德兴铜矿的工程实践, 研究了节理裂隙发育岩体中的预裂爆破成缝机理与控制技术。近年来, 国内研究更加注重精细化与智能化。例如, 李启月^[7]等通过现场振动监测与信号分析, 定量评价了预裂缝的降振效果。同时, 将预裂爆破与光面爆破、缓冲爆破等技术进行联合应用, 形成了系统的边坡控制爆破技术体系^[8]。

综上所述, 尽管预裂爆破技术已相对成熟, 但在具体矿山应用中, 仍需根据其独特的岩体力学特性、地质构造和生产工艺进行参数优化与工艺创新。本研究旨在结合某露天铅锌矿的工程实际, 开展针对性的预裂爆破技术应用研究, 以解决其高陡边坡稳定性控制难题, 并为类似条件矿山提供借鉴。

1. 方法与技术

1.1 工程地质概况与问题分析

研究矿区位于我国重要的多金属成矿带, 为典型的热液交代型矽卡岩铅锌矿床。当前露天采场已形成多个台阶, 开采深度达300米, 设计最终边坡角为45°。边坡的长期稳定性是关乎矿山安全生产与经济效益的核心问题。

1.1.1 岩体结构与力学特性

通过地质编录、钻孔取芯及室内岩石力学试验, 对边坡岩体进行了系统分析, 边坡主要由矽卡岩和花岗闪长岩构成。矽卡岩质地坚硬但性能, 常被后期热液蚀变影响, 局部强度不均; 花岗闪长岩结构致密, 整体强度高。

岩体内发育两组主要节理：J1：倾向 125° \angle 65° ，间距0.8–1.5m；J2：倾向 35° \angle 55° ，间距1.0–2.0m。节理面多平直光滑，部分充填泥膜，对岩体整体强度和爆破效果有显著控制作用。此外，局部存在断层破碎带，宽度约0.5–2m，需在爆破设计中特别考虑。

1.1.2 原爆破工艺存在的问题

在引入预裂爆破技术前，该矿区采用与生产爆破参数相同的常规边坡爆破工艺，主要问题表现为：

边坡面凹凸不平，超挖、欠挖现象严重，平均超挖量超过50cm；设计坡面线难以保持，影响了边坡角的准确性；爆破后边坡面后方3–5米范围内岩体松动，可见大量放射性裂隙和张开节理，岩体完整性系数显著降低；统计显示，边坡面残留的半孔率平均不足60%，许多区域甚至无半孔痕迹，表明爆炸能量对轮廓面岩体造成了过度破坏；破碎松动的边坡表面极易发生落石、滑塌等地质灾害，增加了下部台阶作业人员和设备的安全风险，同时也制约了边坡雷达等监测设备的有效布设与预警精度。

1.2 预裂爆破机理与参数设计理论

预裂爆破的成功关键在于在主体爆破之前形成一个连续的、能够有效隔振的裂缝面。其核心机理是相邻炮孔间导向裂缝的贯穿形成。当预裂孔同时起爆后，其作用过程可分为两个阶段：

首先是应力波叠加阶段，爆炸应力波从各孔壁向四周辐射，并在两孔连线的中心位置首先相遇、叠加，产生拉应力集中。当此拉应力超过岩体的动态抗拉强度时，岩体便被拉裂，形成初始微裂纹；之后为爆生气体准静压作用阶段，紧随其后的高压爆生气体如同“劈刀”一般，挤入并撑开这些初始微裂纹，使其迅速扩展、贯通，最终形成一条平整的预裂缝。

1.2.1 关键参数计算与确定

结合理论公式、经验类比和现场试验，确定了本次预裂爆破的核心参数：

钻孔直径（D）由现场主力钻机CLQ-80A型潜孔钻机决定，钻头直径为140mm。

钻孔间距是影响成缝效果最敏感的参数之一。间距过大，裂缝无法贯通；间距过小，则不经济，且可能造成岩体过度破碎。采用经验公式：

$$a=k \cdot D$$

其中，k为系数，对于中硬以上岩石，k取8~12。本工程岩体较坚硬，取k=8.5，则 $a=8.5 \times 140\text{mm} \approx 1.2\text{m}$ 。通过初步试验，该间距在砂卡岩和花岗闪长岩中均能形

成良好贯通裂缝。

不耦合系数 $K=D/d$ ，其中d为药卷直径。采用不耦合装药是预裂爆破的核心技术，其目的是降低作用在孔壁上的初始爆轰压力。通过计算岩体的动抗压强度并参考《爆破手册》，选取 $K=2.3$ 。选用标准 $\Phi 60\text{mm}$ 的药卷，则 $D/d=140/60 \approx 2.33$ ，符合设计要求。

线装药密度是单位孔长的装药量，是控制爆破能量的直接参数。采用国内广泛应用的长江科学院公式进行初步计算：

$$\Delta \text{线}=0.188[\sigma_c]^{0.5} \times a^{0.5}$$

取岩石平均抗压强度 $\sigma_c=100\text{MPa}$ ，孔距 $a=1.2\text{m}$ ，则 $\Delta \text{线}=0.188 \times 100 \times 1.2 \approx 0.188 \times 10 \times 1.095 \approx 2.06\text{kg/m}$

此结果为计算值，实际应用中该值明显偏大。这是因为经验公式有其适用范围，且预裂爆破更依赖于岩石的声阻抗（密度 \times 波速）和实际工程类比。最终通过现场试验将线装药密度确定为：底部加强段650 g/m，正常装药段380 g/m，上部减弱段250 g/m。

1.3 预裂爆破施工工艺与质量控制

1.3.1 钻孔精度控制

采用全站仪精确放出每个预裂孔的孔位，并用木桩明确标识。孔位偏差应小于5cm。使用钻机自带的角度仪和罗盘，并结合地质罗盘进行复核，确保钻孔倾角与设计边坡角一致（ 45° ）。孔深严格按设计台阶高度（15m）加上超深（0.5m，以克服底部夹制作用）控制，即15.5m。要求孔斜误差小于 1° 。钻孔完成后，及时用编织袋或PVC管套保护孔口，防止岩渣堵塞或雨水灌入。

1.3.2 装药结构与堵塞工艺

装药结构采用分段不耦合连续装药结构。具体为：底部加强段孔底向上1.5m范围内，由于夹制作用大，采用 $\Phi 60\text{mm}$ 药卷连续装药，装药密度约650g/m；正常装药段从加强段顶部至孔口以下2.0m，采用将 $\Phi 32\text{mm}$ 小药卷间隔捆绑在导爆索和竹片组成的“药串”上，药卷间距为20–25cm，形成不耦合装药，平均线装药密度为380g/m。上部减弱段孔口以下2.0m至1.0m，进一步减小装药量至250g/m，以防止孔口区域产生过量爆破和飞石；堵塞段孔口1.0m范围采用钻孔岩屑与细砂的混合物进行密实堵塞，堵塞长度不小于1.0m。

每个预裂孔内敷设一条导爆索，孔外采用双导爆索网络将全部预裂孔连接起来，确保所有预裂孔同时起爆，这是形成平整裂缝面的关键。预裂爆破必须先于主爆区起爆，其时差应不小于100ms，以确保预裂缝完全形成

后再承受主爆区的爆炸荷载。

2. 结果与分析

2.1 边坡成型质量效果评价

为客观评价预裂爆破效果，在三个试验台阶（+185m，+170m，+155m）共计约300米长的预裂爆破区域，采用地质罗盘、卷尺、激光测距仪等工具，对边坡成型质量进行了系统测量与统计。

2.1.1 半孔率统计分析

半孔率是评价轮廓控制爆破效果最直观、最重要的指标。统计方法为：每隔10米选取一个观测断面，测量该断面可见半孔的总长度，除以该断面预裂孔深度理论总长，得出该断面的半孔率，最后取所有断面的平均值。

可以看出，预裂爆破的应用带来了质的飞跃。92%的平均半孔率表明爆炸能量得到了精确控制，绝大部分能量用于形成贯穿裂缝而非破坏孔壁。

2.1.2 坡面平整度与超欠挖分析

激光扫描断面显示，采用预裂爆破后，坡面起伏大幅减小，平整度从 $\pm 35\text{cm/m}$ 提升至 $\pm 12\text{cm/m}$ 。对比了同一区域在采用不同爆破方法后的坡面轮廓与设计线的吻合情况。预裂爆破形成的坡面线平滑地围绕设计线小幅波动，而常规爆破则完全偏离，且波动剧烈。

2.2 爆破振动效应监测与分析

为定量评估预裂缝的隔震屏障效果，采用中科测控TC-4850型爆破振动监测仪，在预裂线后方15m、30m和50m处布置测点。在同一爆区，分别在有预裂面和（通过模拟）无预裂面两种条件下，监测主爆区爆破产生的质点峰值振动速度（PPV）。

分析数据可以得出以下结论：显著的降振效果：在相同爆心距下，有预裂面保护时，测点的振动速度显著降低。在15m处，振动速度从4.52cm/s降至2.18cm/s，降幅达51.8%。即使在50m处，降振率也达到41.6%。这充分证明了预裂缝对爆破应力波（特别是体波中的纵波和横波）具有极强的反射和衰减作用。距离对降振率的影响：降振率随着与预裂线距离的增加而略有下降。这是因为应力波在岩体中传播路径增加，会发生绕射和散射，部分能量会绕过预裂缝屏障，导致其屏蔽效果随距离增大而减弱。但这并不影响其在保护关键边坡区域（靠近预裂面的岩体）中的核心作用。有预裂面时，振动信号

的主频普遍提高。这表明预裂缝过滤掉了大量的低频成分（能量主要集中区），而允许更高频率的振动通过。高频振动对结构的危害通常小于低频振动，这对于保护边坡上的构筑物（如雷达基站）也是有利的。

3. 结论

本研究针对某露天铅锌矿高陡边坡的稳定性控制需求，成功应用并优化了预裂爆破技术，得出以下主要结论：

针对该矿 $f=8\sim 12$ 的砂卡岩和花岗闪长岩，采用孔径140mm、孔距1.2m、线装药密度350~400g/m的预裂爆破参数组合是合理且有效的，能够形成高质量的预裂缝。

（1）优化后的预裂爆破技术使边坡半孔率由原来的58%提升至92%以上，坡面平整度大幅改善，为边坡的长期稳定和防护作业提供了良好的基础条件。

（2）爆破振动监测数据表明，预裂面能够使后方岩体的爆破振动速度降低约50%，有效保护了保留岩体的完整性，减少了爆破累积损伤。

（3）该技术的应用不仅提升了边坡安全系数，减少了后期边坡维护成本，而且通过形成规整的边坡，减少了超欠挖，提高了矿石回收率，具有显著的技术经济效益和安全性。

综上所述，本研究验证了精细化设计的预裂爆破技术在金属矿山高陡边坡控制中的卓越效果，其成功经验对类似地质条件的露天矿山具有重要的推广价值。未来的研究可进一步结合智能钻孔与装药设备，实现预裂爆破全过程的精准化与自动化控制。

参考文献

- [1] 戴俊. 爆破工程. 机械工业出版社, 2015.
- [2] 马建军, 黄宝, 杨仁华. 预裂爆破参数设计的理论与方法研究. 金属矿山, 2005, (8): 28-31.
- [3] 宋俊生. 复杂岩体露天矿高陡边坡预裂爆破技术. 中国矿业, 2010, 19(11): 95-98.
- [4] 李启月, 王卫华, 赵康. 预裂缝对爆破振动衰减影响的试验研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2269-2275.
- [5] 于亚伦. 工程爆破理论与技术. 冶金工业出版社, 2004.