

# 金属矿山地下开采中深孔爆破工艺技术研究

张阳阳 宋来旭

洛阳坤宇矿业有限公司 河南洛阳 471000

**摘要:** 金属矿山地下开采中,深孔爆破工艺技术是关键环节,影响开采效率、矿石回收率与作业安全。本文聚焦该工艺,分析应用中存在的问题,深入探究爆破参数设计、装药工艺、起爆网络及爆破效果影响因素等关键技术。结合实际案例,提出基于地质条件的参数优化、装药工艺改进、起爆网络可靠性提升等优化措施,为提升技术水平提供参考,推动金属矿山开采行业可持续发展。

**关键词:** 金属矿山; 地下开采; 深孔爆破; 工艺技术; 爆破效果

## 引言

社会对金属矿产需求不断增长,推动金属矿山地下开采向更深更广发展。深孔爆破作为高效采矿手段,虽在作业效率与规模上优势突出,但受地下复杂地质条件制约,存在参数不合理、大块率高、振动影响围岩稳定等问题,降低开采效率且存在安全隐患。因此,深入研究并优化深孔爆破工艺,对提升技术水平、保障安全高效开采具有重大意义。

## 一、金属矿山地下开采中深孔爆破工艺现状

在金属矿山地下开采领域,深孔爆破工艺经过多年的发展,已形成了较为成熟的技术体系。目前,国内外众多金属矿山根据自身的地质条件和开采要求,采用了不同的深孔爆破方式,如扇形深孔爆破、平行深孔爆破等。扇形深孔爆破因其在地下采矿中对不规则矿体的适应性较强,在一些中小型金属矿山得到了较多应用。这种爆破方式通过将深孔布置成扇形,能够较好地覆盖矿体,减少爆破盲区。但在实际操作中,由于扇形深孔的角度和深度变化较大,给钻孔精度和装药均匀性带来了一定挑战。平行深孔爆破则具有钻孔精度高、装药均匀性好等优点,在大型金属矿山的规模化开采中应用广泛。该方式通过将深孔平行布置,能够实现较为稳定的爆破效果,有利于提高矿石回收率和降低大块率。不过,平行深孔爆破对矿体形态的要求相对较高,对于复杂形态的矿体,可能需要进行较多的调整和优化。尽管深孔爆破工艺在金属矿山地下开采中应用普遍,但在实际生产中仍存在一些问题。例如,部分矿山在爆破参数设计时,缺乏对具体地质条件的详细分析,导致参数选择不合理;

装药过程中,人工操作的随意性较大,影响了炸药能量的均匀释放;起爆网络的可靠性不足,可能出现早爆、迟爆等现象,影响爆破效果和作业安全<sup>[1]</sup>。

## 二、深孔爆破工艺关键技术

### (一) 爆破参数设计

爆破参数的合理设计是保证深孔爆破效果的基础,需要综合考虑矿体性质、岩石力学特性、开采规模等因素。(1) 孔径的选择应根据矿山的开采设备和岩石硬度来确定。一般来说,对于硬度较大的岩石,宜选择较大的孔径,以提高炸药的爆破能量;而对于较软的岩石,可选择较小的孔径,降低开采成本。同时,孔径还需与钻孔设备的能力相匹配,确保钻孔作业的顺利进行。(2) 孔深的设计需要结合矿体的厚度和开采阶段来确定。在阶段开采中,孔深应能够覆盖整个阶段高度,以实现一次性爆破落矿。对于厚度较大的矿体,可采用分段深孔爆破,将孔深控制在合理范围内,提高爆破的可控性。(3) 孔距和排距的确定与岩石的破碎特性密切相关。孔距过小,会导致炸药浪费和爆破振动过大;孔距过大,则可能出现大块率高的问题。通过现场试验和理论计算,根据岩石的抗压强度、抗拉强度等参数,确定合适的孔距和排距,以保证岩石能够得到充分破碎。(4) 装药系数是指炸药体积与炮孔体积的比值,其大小直接影响炸药能量的利用效率。在设计装药系数时,需要考虑岩石的可爆性和爆破要求。对于难爆岩石,应适当提高装药系数,增加炸药用量;对于易爆岩石,则可降低装药系数,避免过度破碎和能量浪费。

### (二) 装药工艺

装药工艺的优劣直接影响炸药能量的分布和释放效

果，合理的装药工艺能够提高爆破效率和安全性。

(1) 在装药方式上，目前常用的有连续装药和间隔装药两种。连续装药适用于岩石较为均匀、需要充分破碎的情况，能够使炸药能量在炮孔内均匀分布，实现整体爆破。间隔装药则通过在炮孔内设置空气间隔或惰性材料间隔，改变炸药能量的传递方式，减少对围岩的破坏，适用于需要保护围岩稳定性的场合。(2) 装药设备的选择对装药质量和效率至关重要。随着技术的发展，自动化装药设备逐渐应用于金属矿山地下开采中，如装药车等。自动化装药设备能够实现装药过程的精准控制，保证装药密度的均匀性，提高装药效率，同时减少人工操作带来的安全风险。对于一些条件较为复杂的炮孔，也可采用人工装药，但需严格按照操作规程进行，确保装药质量。(3) 装药过程中，还需注意炸药的选择。根据岩石的性质和爆破要求，选择合适类型的炸药，如乳化炸药、铵油炸药等。同时，要保证炸药的质量和性能稳定，避免使用过期或变质的炸药。

### (三) 起爆网络

起爆网络是保证深孔爆破有序进行的关键，其可靠性直接关系到爆破效果和作业安全。(1) 常用的起爆方式包括电起爆、非电起爆等。电起爆具有起爆速度快、控制精度高的优点，但在潮湿环境下容易出现漏电现象，影响起爆可靠性。非电起爆如导爆管起爆，具有抗静电、抗杂散电流能力强等特点，在金属矿山地下开采中应用较为广泛。导爆管起爆网络可通过簇联、串联等方式连接，形成可靠的起爆系统。(2) 起爆顺序的设计应根据矿体的形态和开采要求来确定。合理的起爆顺序能够控制爆破应力的分布，提高岩石的破碎效果，减少爆破振动对周围环境的影响。例如，采用逐排起爆或分段起爆的方式，能够使岩石逐步破碎，降低大块率。(3) 在起爆网络的布置中，需确保每个炮孔的起爆元件连接可靠，避免出现断路、短路等故障。同时，要对起爆网络进行严格的检查和测试，确保其能够按照设计要求准确起爆<sup>[2]</sup>。

### (四) 爆破效果影响因素

除了爆破参数、装药工艺和起爆网络外，还有许多其他因素会影响深孔爆破效果。(1) 地质条件是影响爆破效果的重要因素之一。岩石的完整性、节理裂隙发育程度、断层分布等都会对爆破产生较大影响。在节理裂隙发育的岩石中，爆破能量容易沿着裂隙传递，导致岩石破碎不均匀；而断层的存在可能会改变爆破应力的分布，影响爆破效果。(2) 爆破振动也是需要关注的因素。

过大的爆破振动可能会导致围岩失稳、地表沉降等问题，影响矿山的安全生产和周边环境。通过合理设计爆破参数、优化起爆顺序等措施，可有效降低爆破振动的强度。(3) 施工人员的操作水平也会对爆破效果产生影响。施工人员在钻孔、装药、连接起爆网络等环节的操作规范性，直接关系到爆破工艺的 implementation 质量。因此，加强对施工人员的培训，提高其操作技能和安全意识，是保证爆破效果的重要措施。

## 三、深孔爆破工艺优化措施

### (一) 基于地质条件的参数优化

依据地质条件动态调整爆破参数，是提升爆破效果的核心环节。开采前，地质勘察团队需携带岩芯钻机、压力试验机等设备下井作业，通过钻探获取不同深度的岩芯样本，用压力机测试岩石抗压强度，剪切仪测定抗剪性能，再用地质锤敲击岩芯观察节理裂隙的发育程度，用钢卷尺丈量裂隙的间距、长度及填充情况。遇到断层构造时，需用测绳确定断层面走向、倾向和倾角，记录破碎带的宽度及充填物性质。将这些原始数据整理后，导入三维地质建模软件，划分出完整岩体区、节理密集区、断层影响区等不同地质单元。随后借助爆破数值模拟软件，对不同孔径、孔深、孔距组合下的爆破效果进行模拟计算。比如在节理裂隙发育区域，原设计2.2米的孔距经模拟显示能量分布不均，需缩减至1.8米，排距同步从1.8米调整为1.5米，同时将装药系数提高6%，确保炸药能量能有效克服裂隙造成的能量损耗。对于断层附近的矿体，模拟结果表明需采用分段延期起爆方式，从远离断层处向断层方向逐段起爆，第一段与第二段起爆间隔1.5秒，使岩石有足够时间完成破碎与位移，避免爆破应力集中导致断层活化。开采过程中，钻工需每日在掌子面标记岩石性质变化，技术人员每周汇总分析，若发现某区域岩石硬度较勘察结果提高20%，应及时将钻孔直径从105毫米增至115毫米，保证爆破能量满足需求<sup>[3]</sup>。

### (二) 装药工艺改进

装药工艺的改进需从设备升级、技术创新和操作规范三个维度同步推进。自动化装药设备的推广应用能显著提升装药质量，这类设备配备激光测距传感器和智能控制系统，可自动测量炮孔的深度和直径，结合预设的装药密度参数计算所需炸药量，再通过机械臂将炸药均匀送入孔内，操作台上的实时曲线能直观显示装药密度变化，使装药误差控制在2%以内。乳化炸药现场混装技术在中小型矿山优势明显，将硝酸铵溶液、柴油、乳化

剂等原料通过专用管路输送至井下混装站，按比例现场混合成炸药后直接装入炮孔，省去了传统炸药的运输和储存环节，降低了安全风险，且能根据岩石硬度灵活调整配方，如在硬岩区域增加硝酸铵比例以提高爆速。对于机器无法进入的狭小空间，人工装药仍不可或缺，需制定严格的操作规程：装药前必须用高压风管清理孔内岩粉，用测绳检查孔深是否符合设计要求，发现堵孔立即用麻花钻疏通。施工人员需配备便携式装药密度检测仪，每完成3个炮孔的装药就随机抽取1个进行检测，若密度偏差超过5%，需立即停机检查原因并重新装药，确保炸药能量能均匀释放。

### （三）起爆网络可靠性提升

起爆网络的可靠性直接关系到爆破效果和作业安全，需从器材选型、网络设计和检测流程三方面严格把控。器材选用上，导爆管需具备高强度特性，用50N拉力测试不破裂，且表面需有防水涂层以适应井下潮湿环境；雷管的延期时间误差需控制在3毫秒以内，使用专用检测仪器逐发校验，不合格产品坚决剔除。在井筒周边、主要巷道等重要区域，起爆网络应采用冗余设计，主网络采用导爆管起爆系统，备用网络采用电雷管起爆系统，两套网络线路分开敷设，接头间距保持在30厘米以上，确保一套网络失效时另一套能正常工作。爆破前的检测环节至关重要，技术人员需用万用表检测电起爆网络的电阻值，偏差超过10%时需重新连接；对导爆管网络，需逐段检查接头缠绕是否牢固、导爆管有无折损，并用传爆测试笔验证传爆性能。部分先进矿山已引入无线监测技术，在网络关键节点安装纽扣式传感器，实时将网络状态数据传输至地面控制台，一旦发现信号异常可立即安排人员排查，从根本上杜绝早爆、迟爆等问题。

### （四）爆破效果监测与反馈

建爆破效果监测反馈体系，能让工艺不断完善。监测指标要全面，块度用图像识别，拍爆堆后软件处理，100mm以上大块率超15%为不合格；振动监测在巷道支护和地表设传感器，峰值速度不超2.5cm/s。设备定期校准，高速摄像机每季度校帧率，振动仪每月用标准源标定。数据出来后，团队开会对比实际与预期，找原因。

大块率高就缩孔距或增装药，某矿因孔距大0.5m致大块率20%，后缩到2.8m；振动大就改起爆顺序或减单段药量。建闭环台账，记参数、结果和调整措施，半年左右形成适配本矿的最优参数<sup>[4]</sup>。

### （五）施工人员培训与管理

施工人员的技能和责任意识影响爆破效果。培训兼顾理论与实操，理论用案例教学，讲本矿及周边事故，配视频和现场还原，还讲爆破原理、炸药特性和器材机制。实操在模拟场，设不同地质的炮孔，学员练钻孔、装药和网络连接，独立完成10次合格操作才能考。考核严格，理论80分合格，实操由3名技术员评分，平均分85分上岗。现场推岗位责任制，各环节责任到人，完成后签字。安全员每2小时巡查，查钻孔角度、装药和网络，违规就记，月底与绩效挂钩。设备谁用谁保养，每天清洁润滑，每周检修，保设备稳定。

### 结语

金属矿地下开采深孔爆破工艺技术对行业发展至关重要。通过研究，明确了工艺现状、关键技术及影响因素，并提出了针对性的优化措施，涵盖参数设计、装药、起爆网络、效果监测及人员管理等方面。这些措施有助于提升爆破效果、保障作业安全、提高开采效率。未来，应持续探索创新，结合新技术、新方法，不断完善深孔爆破工艺，推动金属矿山开采行业向更高水平迈进。

### 参考文献

- [1] 黎强. 中深孔爆破一次成井技术在金属矿中的应用研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2025(1): 001-004.
- [2] 吴松平. 金属矿地下开采中深孔爆破工艺技术优化[J]. 世界有色金属, 2020, 45(15): 49-50+53.
- [3] 常利峰. 金属矿地下开采中深孔爆破工艺技术探讨[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(4): 91-94.
- [4] 张则禄. 金属矿地下开采中深孔爆破工艺技术优化[J]. 中国金属通报, 2021(16): 39-40.