

煤矿开采中的采煤技术和采煤工艺分析

杨盼盼

陕西富源煤业有限责任公司 陕西延安 716000

摘要: 煤矿产业是我国能源体系的基石,其开采技术与工艺的现代化进程对保障国家能源安全、提升生产效率及确保安全生产具有决定性意义。本文系统剖析了现代煤矿开采的典型特征,深入阐述了开采现场面临的共性技术难题,重点探讨了核心采煤技术与工艺的实施要点,进而提出了工艺优化与质量管理的针对性措施,并对行业未来发展趋势进行了前瞻性展望,以期为推动我国煤矿产业的高质量与可持续发展提供理论借鉴。

关键词: 煤矿开采;采煤技术;采煤工艺;煤矿采煤

引言

煤矿产业是我国能源体系的基石,其开采技术与工艺的现代化进程对保障国家能源安全、提升生产效率及确保安全生产具有决定性意义。本文系统剖析了现代煤矿开采的典型特征,深入阐述了开采现场面临的共性技术难题,重点探讨了核心采煤技术与工艺的实施要点,进而提出了工艺优化与质量管理的针对性措施,并对行业未来发展趋势进行了前瞻性展望,以期为推动我国煤矿产业的高质量与可持续发展提供理论借鉴。

一、现代煤矿开采的特征分析

(一) 开采深度显著增加

随着浅部煤炭资源的日益枯竭,开采活动不断向深部延伸。我国部分主力矿区的开采深度已突破千米,甚至达1500米。深部开采引发了一系列严峻挑战:首先,地应力呈指数级增长,导致巷道围岩控制极其困难,支护成本与难度激增;其次,瓦斯赋存条件恶化,瓦斯压力和含量显著升高,煤与瓦斯突出等动力灾害风险加剧;最后,深部地温梯度导致高温热害问题突出,严重制约人员作业健康与设备运行可靠性。

(二) 开采规模集约化与大型化

为满足巨大的能源需求,煤矿开采呈现出显著的集约化与大型化趋势。通过资源整合与技术升级,建成了诸多千万吨级以上的高产高效矿井。例如,神东补连塔等煤矿采用“一井一面”高度集约化生产模式,单个综采工作面年产量可达千万吨级。大规模开采对装备的可

靠性、自动化水平以及生产组织的科学化管理提出了极致要求,同时也对矿区生态环境造成了更大压力,使得绿色开采与生态修复成为不可或缺的环节。

(三) 开采技术体系多元化与专业化

现代煤矿开采技术已形成多元化和专业化并举的体系。井工开采中,综合机械化采煤(综采)因其高产、高效、安全已成为绝对主力。针对薄煤层、急倾斜煤层等特殊赋存条件,专业化技术如刨煤机采煤、螺旋钻采煤等得到了针对性应用。露天开采技术依托大型化、智能化装备持续提升效率。尤为重要的是,以物联网、大数据、人工智能为代表的智能化开采技术迅猛发展,无人工作面、智能矿山建设正从概念走向现实,彻底重塑着传统开采模式。

二、煤矿开采下采煤技术和工艺要点分析

(一) 充填开采工艺

充填开采工艺是一种环境友好型的绿色开采技术,其核心是通过向煤矿采空区填入矸石、粉煤灰、膏体等专用材料,以主动控制上覆岩层移动,从而最大限度地减少地表沉陷和生态环境破坏。该技术不仅能够有效保护地表建筑物、水资源和农田植被,还可实现煤矿固废的资源化利用,是协调资源开采与环境保护的重要技术途径。从工艺实施时序与方式来看,充填开采主要分为以下三类:第一,随采充填。是指在采煤工作推进的同时,利用充填系统将充填材料及时送入采空区。该方法可实现采煤与充填平行作业,有效控制顶板早期下沉,对地表保护效果最好,但工艺复杂,对设备协同要求较高。第二,采后充填。是指在某一区域采煤全部结束之后,再对采空区进行系统性充填。该方法施工相对独立,操作简便,但由于顶板已在某种程度上发生变形,其对

作者简介: 杨盼盼(1989-),男,汉族,河南开封人,本科,助理工程师,从事煤矿技术工作。

地表沉陷的控制效果略逊于随采充填。第三,综合充填。是结合随采充填与采后充填优势的混合模式,根据不同地质条件和开采阶段灵活选择充填时机与材料。该方式兼顾效率与成本,能够实现对多种固体废弃物(如煤矸石、粉煤灰等)的规模化消纳与采空区的有效治理。

(二) 综合机械化采煤技术

综合机械化采煤技术是我国现代煤矿开采的核心技术,凭借其高效、安全、连续的生产优势,已成为大中型矿井的主流开采方式。该技术以液压支架、大功率采煤机和刮板输送机为三大核心装备,构建了破煤、装煤、运煤、支护及采空区处理一体化协同作业系统。在实际应用中,采煤机需根据煤层硬度、厚度及地质条件合理选型,坚硬煤层应选用大功率机型并配备高强度截齿,而厚度变化大的煤层则需选用调高能力强、牵引稳定的采煤机。刮板输送机须具备足够的运输能力和可靠性,其运能应略高于采煤机最大出煤能力,关键部件需采用高强度材料并经严格检测,同时要保证安装平直度和链条张紧度,防止卡链、断链事故。液压支架的选型与支护密度需依据顶板稳定性科学设计,不稳定顶板应选用高工作阻力支架并增加支护密度,稳定顶板可适当降低支护强度以提高效率。采空区一般采用全部垮落法处理,通过液压支架的及时推移与有序放顶控制顶板垮落过程,并需实时监测垮落情况,防止冲击地压事故发生。

(三) 露天开采工艺

露天开采作为煤矿开采的重要方式,主要适用于埋藏浅、赋存条件好的煤层,具有规模大、效率高、成本低的优势。其工艺系统包括穿孔、爆破、采装、运输和排土五个核心环节。穿孔作业多采用高性能牙轮钻机,需根据岩体特性优化孔距、排距等参数,以提高爆破效果并降低炸药消耗。爆破环节要科学设计装药结构和起爆时序,在保证岩石破碎度的同时严格控制振动与飞石危害。采装环节采用大型电铲或液压挖掘机,作业中需注重满斗率和设备协同效率,减少设备等待时间。运输系统由重型矿卡和带式输送机组成,需通过科学规划路径缩短运距、减少转弯爬坡,提高运输效率。排土作业要兼顾效率与生态要求,合理选择排土场位置,采用分层堆放、压实平整等工艺,为后续土地复垦创造条件,最终实现开采与生态恢复的协调发展。

(四) 特殊煤层开采工艺

特殊煤层如薄煤层、急倾斜煤层等,由于其赋存条件特殊,开采难度较大,需要采用差异化的开采工艺。这些工艺是在常规开采工艺的基础上,结合特殊煤层的

特点发展而来的,能够有效提高特殊煤层的开采效率和安全性。薄煤层开采通常选用刨煤机成套设备,薄煤层由于厚度较薄,作业空间狭小,常规的采煤设备难以适应。刨煤机具有设备低机身、高可靠性和自动化控制等特点,能够在薄煤层中灵活作业。在开采过程中,要精确控制刨煤机的刨削深度和速度,以保证采煤质量和效率。同时,要加强对工作面的支护,由于薄煤层顶板的承载能力相对较弱,支护强度要足够,以防止顶板垮落。急倾斜煤层多采用伪倾斜柔性掩护支架采煤法,急倾斜煤层倾角大,开采过程中容易出现滚矸、瓦斯积聚等问题,安全性要求高。伪倾斜柔性掩护支架采煤法通过设置柔性掩护支架,将工作面与采空区隔开,为作业人员提供安全的作业空间。该方法的核心在于增强支架系统的抗滑与抗扭性能,以适应急倾斜煤层的开采条件。同时,须加强瓦斯治理与采空区管理,要建立完善的瓦斯抽采系统,及时抽采瓦斯,防止瓦斯积聚;对于采空区,要及时进行处理,避免出现顶板垮落和有害气体涌出等问题。

(五) 其他先进采煤工艺与技术

除了上述常见的采煤技术和工艺外,还有一些先进的采煤工艺与技术,如水力采煤技术、地下气化技术、煤与瓦斯协同开采技术等,这些技术在特定的条件下具有独特的优势,为煤矿开采提供了更多的选择。水力采煤技术利用高压水射流破煤,适用于倾角大、瓦斯含量高的煤层。高压水射流具有强大的冲击力,能够有效地破碎煤层,同时水还能够起到降尘和灭火的作用,有利于改善作业环境。水力采煤技术具有设备简单、投资少、效率高等特点,但也存在水资源消耗大、对煤层的适应性有限等问题。煤炭地下气化技术通过控制燃烧将煤转化为可燃气,实现原位开采与清洁利用。该技术不需要将煤炭开采出来,而是在地下直接将煤转化为煤气,通过管道输送到地面使用。煤炭地下气化技术具有开采成本低、对环境的影响小等优点,尤其适用于开采深部、难采的煤炭资源。但该技术也面临着煤气成分不稳定、控制难度大等挑战。煤与瓦斯协同开采技术则通过在采前、采中抽采瓦斯,既保障安全又提升资源综合利用水平。瓦斯是一种易燃易爆的气体,在煤矿开采过程中如果不及及时抽采,容易引发安全事故。煤与瓦斯协同开采技术在开采煤炭的同时,通过抽采系统将瓦斯抽采出来,作为清洁能源加以利用。该技术不仅提高了煤矿的安全生产水平,还实现了资源的综合利用,具有显著的经济效益和社会效益。

三、煤矿开采中的采煤技术和采煤工艺常见问题

在煤矿开采过程中，采煤技术与工艺的实践常面临多方面问题。地质条件的复杂性首当其冲，煤层厚度变化、断层构造及顶底板不稳定等因素严重影响技术适配性与开采连续性。瓦斯涌出异常、冲击地压及水文地质隐患威胁安全生产，尤其在高瓦斯矿井及深部开采中尤为突出。设备运行方面，采煤机、液压支架与输送系统的可靠性不足易导致生产中斷，设备老化、维修滞后及零部件匹配不佳会降低综采效率。工艺选择与参数设置是否科学也直接影响资源回收率与开采效益，如放煤工艺控制不当易造成煤炭损失或矸石混入。同时，环境保护要求日益提高，采动引起的地表沉陷、地下水破坏及固废排放问题亟需通过绿色开采工艺进行缓解。此外，人员操作规范性、技术水平及管理体的有效性也是影响采煤工艺实施效果的关键因素。如何系统应对上述问题，实现安全、高效、环保的开采，是当前煤矿技术发展的核心挑战。

四、煤矿开采中的采煤技术和采煤工艺优化措施

(一) 智能化发展趋势

智能化是煤矿开采技术演进的核心方向，其核心在于构建基于工业互联网和数字孪生技术的智能矿山系统。该系统依托多源信息感知网络，实时采集设备工况、地质动态及环境参数，并借助大数据平台进行融合分析。人工智能技术在故障预测、地质异常识别与生产自主决策等方面发挥关键作用，逐步实现工作面无人化智能巡航与设备群协同控制。智能钻爆、自适应截割与液压支架智能跟机等技术将进一步普及，全面提升开采系统的自主性和可靠性，实现安全、高效和少人化的开采模式。

(二) 绿色开采趋势

绿色开采是煤矿可持续发展的必然路径，强调资源开发与生态保护的协同。保水开采技术通过优化采动参数与支护方式，最大限度减少对含水层结构的扰动；充填开采技术利用矸石、粉煤灰等矿业固废对采空区进行回填，既有效控制地表沉陷，又实现废物的资源化利用。煤与瓦斯共采技术将抽采瓦斯作为清洁能源加以利用，显著降低温室气体排放。生态修复方面，强调开采全周期的地貌重塑与植被重建，推动矿区土地功能与生态系统的稳步恢复。

(三) 高效开采趋势

高效开采始终是煤矿技术发展的根本目标，其实现依赖于技术装备升级与系统工艺优化。重点研制大功率、高可靠性的智能采掘装备，如具备地质自适应能力的采

煤机和智能快速掘进系统，以提升复杂地质条件下的开采效率。工艺方面着重缩短采煤循环时间，优化放煤工艺与综采面接替流程，进一步提高资源回收率。同时，通过精益生产管理与智能化调度系统，实现生产组织、设备配置与能源消耗的精细化管理，全面提升煤矿的整体开发效益与集约化水平。

(四) 安全开采趋势

从安全角度看，煤矿开采工艺未来将向“主动防控+智能避险”方向深度演进。一方面，地质透明化技术将实现突破性应用，通过三维地震勘探与随掘随探技术融合，构建动态更新的地质模型，提前100米预警断层、陷落柱等隐蔽灾害，使突水、瓦斯突出等风险识别准确率提升至95%以上。另一方面，智能装备将形成“无人化作业闭环”，采煤机、液压支架等设备搭载多光谱传感器，可实时监测瓦斯浓度、顶板压力等参数。同时，应急救援技术将实现升级，开发可快速部署的临时支护系统与定向钻孔救生通道，使井下事故应急响应时间缩短50%，从技术层面构建“预测-防控-救援”全链条安全保障体系，最大限度降低人为操作风险与环境不确定性带来的安全隐患。

结语

综上所述，现代煤矿开采正步入智能化与绿色化融合发展的新阶段。通过通过掌握先进的开采工艺，加强质量管理等措施，能够有效提高煤矿开采的效率和质量。面对开采条件日趋复杂的挑战，必须重视工艺优化与质量管理在提升开采效率、保障安全和控制成本中的核心作用。只有持续推动技术迭代与管理创新，才能真正实现煤矿产业的高质量发展，为国家能源安全提供坚实保障。煤矿产业应紧跟技术发展趋势，不断创新和改进，以实现可持续发展，为国家能源安全和经济发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 尹利鑫. 井下采煤技术及采煤工艺的选择[J]. 能源与节能, 2022(08): 92-94.
- [2] 冯建. 井下采煤技术及采煤工艺的选择探讨[J]. 中国设备工程, 2023(11): 96-98.
- [3] 郭永红. 煤矿开采中井下采煤技术及采煤工艺选择[J]. 矿业装备, 2023(03): 80-82.
- [4] 郭亚利. 煤矿采煤技术的发展与采煤自动化技术探讨[J]. 西部探矿工程, 2024, 36(7): 125-127.

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 $f=8\sim 12$ 的矽卡岩和花岗闪长岩，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.