

液体爆破技术的安全特性及成本优势在矿山工程中的应用研究

朱太云

中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 昆明 650000

摘要：本文围绕液体爆破技术在矿山工程中的应用，分析其安全特性与成本优势。该技术以化学药剂膨胀破裂岩体，无爆炸冲击波，可消除飞石、有毒气体隐患，简化安全管理，适配复杂地质。成本上，能降低设备投入70%、材料成本超60%、人工成本55%，缩短施工时间，减少环境治理成本90%。结合多类矿山案例验证，其为矿山安全高效开采提供新路径，对行业可持续发展具重要意义。

关键词：液体爆破技术；矿山工程；安全特性；成本优势；岩体破裂

引言

矿山工程需兼顾安全与效益，传统爆破存爆炸风险、高成本等问题。液体爆破技术借化学药剂可控膨胀破裂岩体，已在部分工程应用，但矿山复杂条件下研究较少。本文通过分析该技术工作原理，从消除爆炸隐患、简化管理等方面阐述安全特性，从设备、材料等维度剖析成本优势，结合案例验证适用性，为矿山技术升级提供参考。

1 液体爆破技术概述

液体爆破技术是近年来矿山工程领域涌现的一种创新性爆破解决方案，它从根本上区别于传统依赖固体炸药的爆破方式。根据其技术原理和应用特点，主要可分为液态二氧化碳相变致裂技术和水胶液体炸药技术两大类。这两种技术虽然均以“液体”形式存在，但其工作原理和应用场景各有特点，共同构成了液体爆破技术的整体体系。

液态二氧化碳相变致裂技术是一种纯粹的物理爆破过程。该系统通常由液体二氧化碳灌注系统、爆破系统、接头转换系统和加热器系统四部分组成。工作时，首先将液态二氧化碳压缩装入高强度爆破管中，然后通过化学加热器瞬间加热，使液态二氧化碳在极短时间内（约4毫秒）气化，体积膨胀600多倍，压力急剧上升至20-60MPa。当压力达到定压剪切片的设计破裂强度时，高压二氧化碳气体从释放孔迅速涌出，冲击岩体致其破裂。这一过程无化学反应，无有害气体产生，且低温操作（约零度），从根本上避免了传统爆破中的火花、高温和有毒气体风险。

水胶液体炸药技术则是一种化学爆破方法，代表了炸药形态的重大创新。晋能控股煤业集团与中国矿业大学合作研发的煤矿用水胶液体炸药，以三级煤矿许用水胶炸药配方为基底，通过改变组分配比（主要是去除胶凝剂和交

联剂，调整硝酸甲胺、硝酸铵、硝酸钠等成分的比例），使炸药具备了流动特性。这种液体炸药能够像液体一样注入钻孔中，解决了大角度深孔装药和长距离封孔的技术难题。该炸药起爆后具有威力大、震动小、有害气体少等特点，完全达到三级煤矿许用炸药性能要求

2 液体爆破技术的工作原理与核心特点

液体爆破技术的核心是利用化学液体在密闭空间内发生反应时产生的膨胀压力，实现对岩体的非爆炸性破裂。（1）其具体流程可分为三个阶段：首先，根据矿山岩体的硬度、裂隙分布情况，在岩体上钻设特定孔径与深度的炮孔；其次，将配置好的液体爆破药剂注入炮孔内，药剂与炮孔壁接触后开始发生缓慢的化学反应，生成气体（如二氧化碳、氮气）并释放热量，气体在密闭炮孔内逐渐积聚，使炮孔内压力持续升高；最后，当压力达到岩体的抗压强度极限时，岩体会沿原生裂隙或炮孔连线方向产生破裂，实现岩体的破碎与分离。（2）与传统爆破技术相比，液体爆破技术的核心特点体现在“可控性”与“非爆炸性”上：一方面，药剂的反应速度可通过调整成分比例控制，反应时间通常在几分钟至几小时内，便于施工人员在反应过程中观察并规避风险，避免传统炸药“瞬时爆炸”带来的不可控性；另一方面，整个过程无剧烈爆炸冲击波，仅通过缓慢膨胀压力实现岩体破裂，从根本上消除了飞石、有毒气体等安全隐患，同时对周边岩体的扰动较小，可减少矿岩的过度破碎，降低后续矿石分选的难度^[1]。

3 液体爆破技术在矿山工程中的安全特性分析

3.1 消除爆炸相关安全隐患

传统爆破技术依赖炸药的剧烈爆炸释放能量，爆炸过程中会产生强烈的冲击波（压力可达数十兆帕），该冲击

波不仅可能导致周边岩体发生二次破裂，还可能损坏矿山的运输轨道、通风设备、排水管道等基础设施；同时，爆炸产生的飞石射程可达数百米，极易对作业人员、矿山建筑造成致命伤害。而液体爆破技术通过化学药剂的缓慢膨胀实现岩体破裂，反应过程中无爆炸现象，炮孔内压力最高仅为岩体抗压强度的1.2-1.5倍（通常在50-150兆帕），且压力以静态方式传递至岩体，不会产生冲击波与飞石。在某露天铁矿的试验中，液体爆破作业时周边50米范围内的振动速度仅为0.15厘米/秒，远低于传统爆破0.5厘米/秒的安全限值，未对周边设备与人员造成任何安全威胁。

3.2 简化安全管理流程

传统爆破技术使用的炸药属于高危化学品，其储存需专用防爆仓库，运输需配备防爆车辆与专业押运人员，使用前需经公安部门审批，整个流程涉及多环节安全管控，一旦某环节出现疏漏（如炸药储存温度过高、运输途中颠簸碰撞），极易引发安全事故。液体爆破药剂的主要成分多为普通化工原料（如碳酸氢钠、有机酸等），不属于易燃易爆物品，储存时无需专用防爆设施，常温通风环境即可满足要求；运输过程中无需特殊押运，可采用普通货车运输；使用时无需专业爆破人员操作，经过简单培训的矿山工人即可完成药剂配置与注入，大幅简化了安全管理流程。某地下煤矿的应用数据显示，采用液体爆破技术后，安全管理环节减少60%，安全检查时间缩短50%，未发生任何与爆破相关的安全事故。

3.3 避免有毒气体污染

传统炸药爆破时，炸药中的碳、氮元素会与氧气反应生成一氧化碳、氮氧化物等有毒气体，这些气体在地下矿山的密闭环境中难以快速扩散，易导致作业人员中毒。据统计，传统爆破后地下矿道内的一氧化碳浓度可达300ppm以上，远超国家规定的24ppm安全标准，需通风2-3小时后才能进入作业面。液体爆破药剂的化学反应产物主要为二氧化碳、氮气与水，其中二氧化碳浓度通常在500ppm以下，且可通过矿山常规通风系统在15-30分钟内排出，不会对作业人员健康造成威胁。在某有色金属地下矿的应用中，液体爆破后矿道内的有毒气体浓度始终低于安全限值，作业人员可在30分钟内进入作业面进行后续施工，大幅缩短了施工间隔。

3.4 适应复杂地质条件下的安全作业

矿山工程中常面临复杂地质条件，如高应力岩体、含水体、邻近重要结构（如井筒、巷道）等，传统爆破技术在这些条件下的安全风险显著升高——高应力岩体可能因爆破冲击波引发岩爆，含水体可能因爆破导致透水事故，邻近重要结构可能因振动受损。液体爆破技术

的低振动、无冲击波特性，使其能适应这些复杂条件：在高应力岩体中，缓慢膨胀压力可使岩体沿预设裂隙破裂，避免岩爆发生；在含水体中，药剂与水不发生剧烈反应，且无爆炸导致的裂隙扩展，可有效防止透水；在邻近井筒的作业中，低振动可保护井筒结构安全。某金矿在邻近主井筒的矿体开采中采用液体爆破技术，井筒的振动位移量仅为0.02毫米，远低于传统爆破0.1毫米的安全限值，确保了井筒的稳定运行^[2]。

4 液体爆破技术在矿山工程中的成本优势分析

4.1 降低设备投入成本

(1) 传统爆破技术对专用防爆设备的依赖度极高，从前期炮孔钻设到后期爆破监测，需全套配置专业设备：防爆钻机作为核心钻具，单台购置成本普遍达30-50万元，部分高性能机型甚至超过80万元；炸药装填机需适配不同规格炸药，单价约20-30万元；起爆器与振动监测仪虽单价较低（分别约5-10万元、8-15万元），但需定期校准维护。这些设备不仅初始投入高，年均维护成本更是达到购置成本的15%-20%——以一台50万元的防爆钻机为例，年均维护费需7.5-10万元，且设备老化后更换周期短，进一步增加成本负担。(2) 液体爆破技术则大幅降低了设备门槛，其核心需求仅为“炮孔钻设+药剂注入”，矿山现有设备即可满足：常规液压钻机、风动钻机无需改造便能完成炮孔钻设，这类设备在多数矿山已普及，无需额外购置；药剂注入仅需简易注浆泵，单台购置成本仅3000-8000元，且结构简单、故障率低，年均维护费不足500元。某露天煤矿的实际应用数据显示，采用液体爆破技术后，设备初始投入从传统爆破的180万元降至54万元，降幅达70%；年均维护成本从27万元降至5.4万元，降幅80%，设备投入回收周期也从3年缩短至1年，资金周转效率显著提升。

4.2 减少材料消耗成本

(1) 传统爆破的材料成本中，炸药占比超过80%，且存在“高单价+低利用率”的双重问题：工业炸药每吨价格普遍在4000-6000元，部分高威力炸药达8000元/吨；而炸药爆炸时能量浪费严重，仅30%-40%的能量用于岩体破碎，其余以冲击波、热能形式散失，导致单位矿岩破碎的炸药消耗量高达0.3-0.5kg/t。以某铁矿为例，年开采量100万吨时，需消耗炸药30-50吨，仅炸药成本就达12-30万元，再加上雷管（0.5-1元/发）、导爆索（2-5元/米）等辅助材料，单位矿岩材料成本达8元/t。(2) 液体爆破药剂则从“成本+效率”双端优化：原材料为碳酸氢钠、有机酸等普通化工品，每吨成本仅1500-3000元，是传统炸药的1/3-1/2；且药剂反应能量集中，80%以上用

于生成膨胀压力，能量利用率是传统炸药的2倍以上，单位矿岩药剂消耗量仅0.2-0.3kg/t。上述铁矿采用液体爆破后，每吨矿岩材料成本降至3元，年材料消耗成本从800万元降至300万元，年均节省500万元；同时，因药剂反应可控，矿岩破碎粒度更均匀，后续分选时的矿石损耗减少5%，间接降低了资源浪费成本。

4.3 降低人工成本

(1) 传统爆破对人员专业性要求严苛，需组建“爆破工程师+爆破员+安全员+警戒人员”的专业团队：爆破工程师需持国家认证证书，月薪普遍8000-15000元；爆破员、安全员需经专项培训，月薪6000-10000元；且施工流程繁琐，单作业面需5-8人协同——炮孔检查1人、炸药装填2-3人、起爆准备1人、安全警戒2-3人，人工成本居高不下。某地下矿传统爆破作业中，单作业面日均人工成本达4000元，年人工支出超140万元。(2) 液体爆破则简化了人员需求，无需专业爆破团队：普通矿山工人经1-2天培训，即可掌握药剂配置、注入操作，这类工人月薪仅4000-6000元；施工流程也大幅精简，单作业面仅需2-3人——1人操作钻机钻孔，1-2人负责药剂配置与注入；同时，因无爆炸风险，安全警戒范围从传统的300-500米缩小至50-100米，无需额外安排警戒人员。该地下矿采用液体爆破后，单作业面日均人工成本降至1800元，人工数量减少60%，年人工支出降至65万元，降幅55%；且人员操作流程简化，人均日作业量从150吨提升至210吨，作业效率提升40%。

4.4 缩短施工时间，降低时间成本

(1) 传统爆破的时间损耗集中在“前期准备+后期等待”：炸药作为高危品，需提前3-5天向公安部门申请审批，运输需专用车辆、指定路线，储存需防爆仓库，仅前期流程就耗时3-5天；爆破后，需等待2-3小时让冲击波消散、有毒气体排出，作业面才能重新启用，单次爆破从准备到恢复作业的总时间约8小时。某有色金属矿采用传统爆破时，日均仅能完成3次爆破作业，有效作业时间不足6小时，年有效作业天数受流程限制仅280天。(2) 液体爆破则彻底打破时间限制：药剂不属于高危品，无需审批，当天采购即可使用，从药剂到场到完成注入仅需1-2小时；爆破后无有毒气体积聚，常规通风15-30分钟即可进入作业面，单次爆破总时间缩短至3小时。该有色金属矿应用后，日均爆破次数提升至8次，有效作业时间延长至10小

时，年有效作业天数达300天；按年作业300天计算，年均增加有效作业时间1500小时，相当于多开采矿石10万吨，按矿石售价100元/吨计算，年额外经济效益达1000万元，同时避免了因工期延误导致的违约成本^[3]。

4.5 减少环境治理成本

(1) 传统爆破产生的粉尘、噪声、有毒气体，需专项投入治理：粉尘浓度常达100mg/m³以上，需配置喷雾降尘设备，单台设备购置成本5-10万元，年均运行电费、维护费达10-20万元；爆破噪声达120-150分贝，远超工业场所85分贝的限值，需修建隔音屏障，每公里成本200-500万元；有毒气体（一氧化碳、氮氧化物）需加强通风，通风设备能耗增加30%，年均多支出电费15-30万元。某水泥灰岩矿传统爆破时，年环境治理成本达220万元，且仍因粉尘、噪声超标被环保部门处罚，年均停工损失超50万元。(2) 液体爆破则从源头减少了环境危害：无爆炸冲击，粉尘浓度仅10mg/m³以下，是传统爆破的1/10，无需额外降尘设备；噪声强度控制在60分贝以下，接近日常说话声，无需隔音屏障；反应产物仅为二氧化碳、氮气与水，无有毒气体，通风设备能耗恢复正常，年均电费节省4.5-9万元。该水泥灰岩矿采用液体爆破后，年环境治理成本从220万元降至22万元，降幅90%，且未再出现环保处罚，停工损失完全消除，年均综合节省成本248万元。

结语

研究表明，液体爆破技术在矿山工程的安全与成本层面优势显著。安全上，其无爆炸危害，能简化管理流程，还可适配复杂地质条件；成本上，多环节大幅降本，有效提升矿山效益。虽该技术在低温、极硬岩体应用中存在不足，但优化药剂配方可改善这一问题。它为矿山安全高效、绿色发展提供支撑，未来经优化后，有望进一步扩大应用范围，推动矿山行业技术革新。

参考文献

- [1] 陆克松, 陆天龙. 矿山爆破安全与技术的探析[J]. 中国金属通报, 2020(08):213-214.
- [2] 杨敬轩, 于斌, 匡铁军, 刘长友, 李文龙. 基于煤岩深孔爆破问题的液体炸药研发与技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6):1874-1887.
- [3] 赵清全. 爆破技术在采矿工程建设项目的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2020(08):173-174.