

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.027

普通PVC管在露天矿山高陡边坡 预裂爆破中的应用研究

万朝海¹, 李越¹, 王清辉², 谢红星¹, 刘伟¹, 王世林¹, 李禹锡¹

(1. 广东爆破工程有限公司, 广州 517000; 2. 武汉理工大学, 武汉 430070)

摘要: 露天矿山高陡边坡施工中, 预裂爆破是控制边坡稳定与轮廓质量的核心技术, 传统预裂爆破施工工艺普遍采用“导爆索+竹片+32 mm 乳化炸药”构成轴向间隔径向不耦合装药结构, 存在孔距小、钻孔量大、药包制作繁琐、装药可靠性差等问题, 导致循环作业时间长、综合成本高、半孔率不稳定等情况。为改善上述工程问题, 提出了一种基于普通PVC管的新型高陡边坡预裂爆破装药方法, 该方法将直径40~50 mm的普通PVC管预先安装于炮孔(115 mm)内, 形成规整的不耦合空间, 装药时直接向管内装填32 mm 乳化炸药并利用1~2发电子雷管起爆。以英德某石英砂岩矿、阳西某片麻岩矿、揭阳某花岗岩建筑石材矿、开平某粉砂岩建材矿为依托开展工程试验, 结果表明: ①新技术将孔距扩大至2.0~2.2 m, 较传统方法钻孔消耗量减少33%~46%; ②取消了“导爆索+竹片+药卷”等施工环节后, 预裂爆破作业时间可降低47%; ③简化施工工艺和耗材后预裂爆破综合成本降低约42%; ④软岩半孔率65%~85%, 硬岩半孔率95%, 较传统工艺提高5%~13%, 且爆破效果(半孔率)稳定性更好。该方法在保障预裂爆破质量同时实现了效率与经济性的双重提升, 对类似露天矿山边坡施工具有指导意义。

关键词: 露天矿山; 高陡边坡; 预裂爆破; PVC管; 半孔率; 综合成本

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0263-11

Practical Implementation of Standard PVC Pipes in Presplit Blasting Techniques for High-steep Slope Excavations in Surface Mining

WAN Chao-hai¹, LI Yue¹, WANG Qing-hui², XIE Hong-xing¹, LIU Wei¹, WANG Shi-lin¹, LI Yu-xi¹

(1. Guangdong Blasting Engineering Co., Ltd., Guangzhou 517000, China;

2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Presplit blasting serves as a fundamental technique for maintaining slope stability and ensuring contour precision during high-steep slope construction in open-pit mines. Conventional presplitting methods typically employ an axially spaced and radially decoupled charge configuration using detonating cords, bamboo spacers, and 32 mm emulsion explosives. Nevertheless, this conventional approach presents operational challenges including restricted borehole spacing, excessive drilling requirements, labor-intensive charge preparation, and inconsistent charging reliability. These operational deficiencies result in prolonged construction cycles, elevated project costs, and inconsistent half-hole preservation rates. To address these technical challenges, an innovative presplit blasting technique using standard PVC piping is developed for steep slope applications. The method involves 40~50 mm diameter

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-28

网络首发日期 (Published online): 2026-01-15

作者简介: 万朝海 (1989-), 男, 四川广安人, 学士、高级工程师, 从事工程爆破研究, (E-mail) 466439168@qq.com。

通信作者: 李禹锡 (1987-), 男, 四川乐至人, 硕士、高级工程师, 从事工程爆破研究, (E-mail) 305614910@qq.com。

About the author: WAN Chao-hai (1989-), male, born in Guang'an city, Sichuan province, bachelor's degree, senior engineer, mainly engaged in engineering blasting, (E-mail) 466439168@qq.com.

Corresponding author: LI Yu-xi (1987-), male, born in Lezhi city, Sichuan province, master's degree, senior engineer, mainly engaged in engineering blasting, (E-mail) 305614910@qq.com.

PVC conduits with 115 mm blast holes to create precise decoupling spaces, followed by direct loading of 32 mm emulsion explosives into the pipes with 1 ~ 2 electronic detonators for initiation. Field validations were successfully conducted across multiple geological formations including quartz sandstone at Yingde, gneiss at Yangxi, granite dimension stone at Jieyang, and siltstone construction material deposits at Kaiping. The results demonstrate that: (1) The novel technique enables borehole spacing expansion to 2.0 ~ 2.2 m, achieving 33% ~ 46% reduction in drilling consumption compared to traditional method; (2) Eliminating of complex construction components (detonating cords, bamboo spacers, and explosive rolls) reduces presplit blasting operation time by 47%; (3) Streamlined construction processes and material requirements yield approximately 42% lower overall costs; (4) Half-hole factor reached 65% ~ 85% in soft rocks and 95% in hard rock formations, representing 5% ~ 13% improvement over traditional techniques with enhanced effect stability. This methodology guarantees presplit blasting quality while simultaneously improving efficiency and cost-effectiveness, providing valuable guidance for analogous open-pit slope engineering projects.

Key words: open-pit mine; high and steep slope; presplit blasting; PVC pipe; half-hole factor; comprehensive cost

露天矿山高陡边坡作为矿山工程的重要组成部分,其稳定性直接关系到开采安全与资源利用率。我国露天矿山普遍具有边坡高度大、岩性复杂、服务周期长等特点,长期服役过程中易受爆破扰动引发失稳灾害。随着国内露天矿山日益发展,高陡边坡预裂爆破对施工效率、成本控制与质量稳定性的要求更加严苛,传统预裂爆破技术已应用多年,在装药结构、施工工艺等方面的固有缺陷逐渐凸显,导致其难以适应现代化矿山的高效开采需求。因此,研发低成本、高效率、高质量的高陡边坡预裂爆破新技术,对推动露天矿山绿色安全开采具有重要现实意义。

1 国内外研究现状

1.1 预裂爆破原理和参数研究

预裂爆破的成缝效果依赖于应力波与爆生气体的共同作用,通过预裂孔优先起爆形成的定向裂缝,实现保留岩体(边坡)与主爆区的有效隔离。国内外学者围绕关键参数优化开展了大量研究:陈庆凯通过分析裂缝扩展与爆生气体运动规律^[1],明确不耦合系数对预裂效果的动态影响机制;吴晓峰运用炸药爆炸的应力波理论、岩石的脆断理论计算爆生裂缝的最终扩展长度^[2],对预裂爆破中爆炸作用过程和裂缝的扩展机理进行分析并讨论了预裂炮孔间距的设计方法;徐炎明借助 LS-DYNA 数值模拟^[3],提出最佳孔间距应为炮孔直径的 10 ~ 15 倍。

1.2 预裂爆破装药结构相关研究

谭云军提出空气间隔层的能量储存效应^[4],证实合理不耦合系数可延长裂纹有效长度;闫国斌对比空气与水介质不耦合效果^[5],发现空气介质更适用于中低强度岩体保护;刘文革研发带聚能罩的 PVC 管装药体系^[6],通过线性聚能效应提升裂缝贯通质量;厉美杰研究利用 PVC 管装入多孔粒状铵油炸药配合导爆索、竹片的装药结构解决成品乳化炸

药紧缺的问题^[7];田岗创新利用切缝的聚能效应改变炮孔内的能量分布实现对岩石的切割作用^[8],形成 PVC 塑料切缝管聚能爆破;刘坚通过实验得出粒状铵油炸药轴向连续装药在保护孔壁及裂纹扩展方面具有优势的结论^[9],并确定了适合莱比塘矿山岩性的 PVC 管直径为 40 mm,最优孔距为 1.8 m 等参数;揣新针对聚能管预裂爆破利用仿真软件建立双控模型^[10],结果表明预裂爆破中聚能管有效提升预裂缝扩展速度,并得出了孔距为 1.4 m 时相邻炮孔形成预裂缝贯通速度最快,并有较好的减振效果。

以上研究从预裂爆破成缝原理、爆破参数、装药结构等方面入手,为参数优化、装药结构创新提供了理论基础。刘文革、田岗关于聚能管预裂结构的研究需要增加额外的切缝聚能管等环节,厉美杰 PVC 管装入多孔粒状铵油炸药配合导爆索、竹片等研究施工繁琐,田岗的 40 mm PVC 管方案孔距仅 1.8 m,钻孔节省量不足 30% 且适用范围有限,以上研究虽然没有精准解决目前露天矿山高陡边坡涉及到的成本、施工效率等核心问题,但他们关于预裂爆破创新装药结构的探索为本研究提供了方向,所以本技术从降低预裂爆破的综合成本、缩短预裂爆破施工时间提高施工效率、稳定预裂爆破效果三方面出发旨在改善目前露天矿山高陡边坡预裂爆破存在的主要问题^[11,12]。

1.3 传统预裂爆破施工工艺局限性分析

目前国内主流传统预裂爆破仍采用“导爆索 + 竹片 + 药卷”装药结构,需在爆破作业时现场制作药包:将直径 32 mm 乳化炸药沿竹片和导爆索按一定间距绑扎,形成轴向间隔径向不耦合的装药结构,然后将制作好的药包由 2 ~ 4 人按一定方向插入孔内。该工艺在高陡边坡使用时存在四大主要缺陷:①孔距小,钻孔量大。以石灰石、花岗岩建材矿山为例,孔径 115 mm,台阶高度 15 m,孔深 16.5 m(按

70°计算孔长 17.5 m), 预裂孔孔距约 1.2 m, 如 100 m 边坡需 84 个预裂孔, 钻孔量 1.47×10^3 m, 即钻孔消耗量为 0.92 m/m^2 ; ②综合成本高。钻孔量大钻孔费用高, 加上导爆索、竹片、胶带等耗材, 劳动力需求大, 经核算综合成本约 45 元/ m^2 ; ③施工效率低。传统预裂爆破施工工艺的药包制作依赖人工绑扎, 加之炮孔数量多, 预裂爆破作业耗时长; ④爆破效果稳定性差。导爆索使用不当易引发拒爆、同时竹片刚度不足在炮孔内易弯曲偏移等情况导致装药结构不稳定, 孔与孔之间难以稳定贯穿成缝, 最终导致预裂爆破效果不稳定。针对这些问题, 提出基于普通 PVC 管的预裂爆破新工艺。

2 新工艺技术方案

2.1 技术原理与核心优势

化繁为简, 去掉传统预裂爆破繁琐的“导爆索+竹片+药卷”结构、增大孔距减小炮孔数量, 以普通 PVC 管为装药载体, 利用其刚度与密封特点, 构建“PVC 管+药卷”的新型不耦合结构, 核心优点: ①PVC 管直径(40~50 mm)与钻孔直径(115 mm)形成稳定径向不耦合系数(2.3~2.8), 确保爆炸能量均匀传递; ②PVC 管预先安装于炮孔内, 为药卷提供刚性导向通道, 避免药卷在孔内偏移、弯曲, 形成规整、均匀、线性的预裂药包; ③管体密封可阻隔地下水侵入, 保障炸药性能稳定。见图 1、图 2。

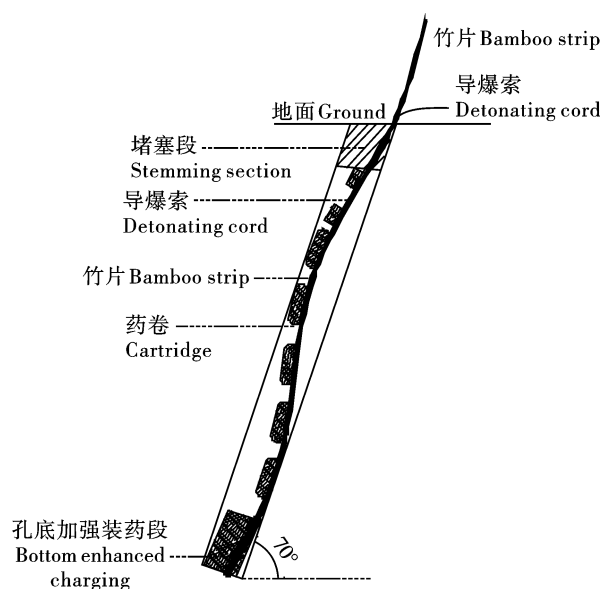


图1 传统预裂爆破装药结构图

Fig. 1 Charging structure for traditional blasting

与传统技术相比, 其优势体现在: 孔距可扩展至 2.2 m, 大大减少单位面积钻孔消耗量(单位 m/m^2 , 以下简称钻孔消耗量); 简化施工, 取消导爆索与竹

片, 综合成本大大降低; PVC 管可在钻孔后爆破作业前预先安装, 不占用爆破作业时间, 装药时直接向 PVC 管内装药卷和雷管, 施工简单, 爆破作业循环时间大大缩短; PVC 管+药卷的装药结构稳定可靠, 能大大提高预裂爆破效果稳定性。

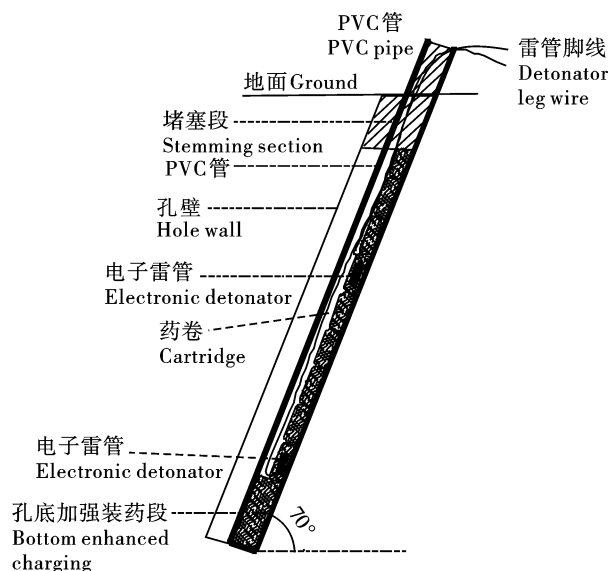


图2 PVC管预裂爆破装药结构

Fig. 2 Charging structure for blasting with PVC Pipes

2.2 关键材料与设备选型

2.2.1 核心材料

(1) PVC 管: 选用直径 40 mm 或 50 mm 的 PVC 给水管材, 壁厚 3.5 mm, 抗冲击强度 $\geq 10 \text{ kJ/m}^2$, 长度按孔深定制, 接头采用同材质承插式管件, 配合 PVC 专用胶水密封, 确保防水性。

(2) 炸药: 选用直径 32 mm、长度 300 mm、重量 300 g 的 2# 岩石乳化炸药, 密度 $0.95 \sim 1.15 \text{ g/cm}^3$, 爆速 $\geq 3200 \text{ m/s}$, 适配 PVC 管内径尺寸。

(3) 起爆器材: 采用数码电子雷管, 延期精度 $\pm 1 \text{ ms}$, 单孔配置 1~2 发。

2.2.2 施工设备

钻孔设备选用 KS669 型潜孔钻机, 钻孔直径 115 mm, 钻孔角度调节范围 $0^\circ \sim 90^\circ$, 确保边坡坡面角与设计一致; 辅助设备包括卷尺、美工刀、PVC 管切割器用于管体加工与安装。

2.3 施工工艺与操作要点

2.3.1 施工流程设计

采用“钻孔→PVC 管预安装→装药→起爆”的四步流程。具体做法为: 先按设计孔深、角度、孔距进行钻孔作业, 钻孔完成即可进行 PVC 管预安装, 注意管底部用专用堵头封堵、各连接处专用承插管件连接, 注意密封质量保证防水性能, 然后进行爆破

作业,采用电子雷管起爆网路,预裂爆破起爆时间较主爆破提前至少 100 ms。

2.3.2 操作要点

(1) PVC 管加工与安装:根据孔深切割、连接 PVC 管,管底部采用堵头、中间采用承插接头连接,均匀涂抹胶水后静置 5 min 固化防止操作中脱节掉落;安装时将管体缓慢压入炮孔,孔内有水时要将 PVC 管压到孔底,顶部伸出孔口 20 cm,并将孔口段 1 m 范围用砂石将管外壁和炮孔内壁之间堵塞密实,防止 PVC 管因水压和浮力上浮,管口用塑料袋临时防护防止雨水进入管内。

(2) 装药结构设计:孔底约 60 cm 段采用加强装药:将乳化炸药划破后均匀填入 PVC 管,在重力加速度下炸药在孔底段压缩至管内耦合,加强段线装药密度约 2.4 kg/m;中部及上部采用连续装药,

直接将整卷乳化炸药装入管体,线装药密度约 1 ~ 1.1 kg/m;炮孔顶部预留 1 ~ 1.5 m 堵塞段,采用细砂封堵。

(3) 起爆网路布置:每孔设置 1 ~ 2 发数码电子雷管,雷管脚线沿 PVC 管内壁引出,采用并联方式连接至主网,预裂孔起爆时间较主炮孔提前至少 100 ms。

2.4 PVC 管预裂爆破技术参数

以花岗岩建材矿山 15 m 高台阶为例,爆破参数如下:台阶高度 15 m,预裂孔孔深 16.5 m(含 1.5 m 超深),钻孔直径 115 mm,预裂孔孔距 2.0 ~ 2.2 m,坡面角 70°;PVC 管选用直径 50 mm,径向不耦合系数 3.59(孔底 2.3);底部加强段长度 0.6 m,线装药密度 2.4 kg/m,中上部 32 mm 乳化炸药连续装药,线装药密度 1.0 ~ 1.1 kg/m,综合线装药密度 1.1 kg/m。见表 1。

表 1 PVC 管预裂爆破技术参数表

Table 1 Technical parameter table of presplitting blasting with PVC pipes

孔距 Spacing/m	孔径 Blasthole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	倾角 Dip angle/°	线装药密度 Linear charge density/(kg · m ⁻¹)	单孔药量 Single-hole charge/kg	堵塞长度 Stemming length/m	径向不耦合系数 Radial decoupling coefficient
2.0 ~ 2.2	115	16.5	70	1.1	18	1.5	3.59

3 工程试验及效果评价

为系统验证 PVC 管高陡边坡预裂爆破新技术的有效性与技术优势,以珠三角地区典型露天矿为试验载体,选取阳西县建筑用片麻岩矿、揭阳广物花岗岩建材石料矿、英德下太镇石英砂岩矿及开平市建筑用粉砂岩矿四个具有代表性在建项目开展工程试验,针对新旧技术从核心参数、工程成本、施工效率及预裂爆破效果等方面综合评价。

3.1 英德下太镇石英砂岩矿工程对比试验情况及效果评价

英德下太镇石英砂岩矿项目 K1 + 300 ~ 600 m 段道路边坡,此边坡岩体为强风化石英砂岩,平均饱和单轴抗压强度 23.4 MPa。该边坡原始地形复杂

陡峭,高 105 m,长 200 m,原始坡面角 40° ~ 61°,岩体节理裂隙发育,断裂破碎带多,且多为顺层边坡,勘察单位将该区域判定为工程地质欠稳定区,安全风险大,故该段道路施工前需要削坡减载,自上而下逐层开挖形成 10 级台阶,台阶高度 8 ~ 12 m,坡面角 45° ~ 60°。边坡施工工期紧、任务重:总工程量 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$,需预裂爆破的坡面总长 1500 m,总面积 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ 需要在 45 d 内完成。前期采用传统预裂爆破施工工艺暴露出人工需求大、施工速度慢、预裂爆破效果不稳定等问题,达不到工程需求,经过不断地尝试、改进,最终形成了 PVC 管预裂爆破施工工艺,新旧施工工艺参数和效果对比如表 2。见图 3、图 4。

表 2 英德石英砂岩项目技术参数

Table 2 Technical parameters of the Yingde Quartz Sand Mine project

对照组 Control group	孔距 Spacing/m	孔径 Blasthole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	倾角 Dip angle/°	线装药密度 Linear charge density/(kg · m ⁻¹)	单孔药量 Single-hole charge/kg	堵塞长度 Stemming length/m	径向不耦合系数 Radial decoupling coefficient
传统工艺 Trad tech	1.2	115	8.5 ~ 12.5	45 ~ 60	0.5	4.5 ~ 6.5	1.0	3.59
新技术 New tech	2.0	115	8.5 ~ 12.5	45 ~ 60	1.1	9.2 ~ 13.5	1.0	3.59



图 3 英德下太石英砂矿传统预裂爆破效果
Fig. 3 Traditional presplitting blasting effect in Yingde



图 4 英德下太石英砂矿新技术预裂爆破效果
Fig. 4 New technology blasting effect in Yingde

项目前期采用“导爆索+竹片+32 mm 乳化炸药”的传统预裂爆破工艺进行了 3 次爆破:每次需要作业人员 8~9 人,长度 100 m 的边坡(台阶高度 8 m)预裂钻孔量 997 m,加之石英砂岩矿物晶体硬度高,钻孔效率低,预裂爆破施工速度慢不能满足工程需求,后采用 40 mm PVC 管,孔距从 1.6 m 逐步调整至 2.0 m,100 m 长的边坡预裂钻孔量减少至 601 m,较传统工艺钻孔量减少了 39.7%,作业人员减少至 4~6 人,人工降低 33.3%,成本方面,经统计计算由传统工艺的 41.6 元/m² 降低至 27.9 元/m²。施工效率方面,单孔装药节省时间 48%,综合作业时间节省 40%。

3.2 开平市建筑用粉砂岩矿工程试验情况及效果评价

开平市建筑用粉砂岩矿项目采场终了边坡主要为变质钙质泥质粉砂岩,饱和单轴抗压强度 33.5~113.0 MPa、平均值 58.6 MPa,整体岩体强度较低,节理裂隙较发育,边坡坡面较破碎,矿体及围岩整体稳定性一般。边帮各台阶高度 12 m,台阶坡面角 65°。目前主要采用 PVC 管预裂爆破施工,为获取对照试验数据特采用 3 次传统预裂爆破工艺进行预裂爆破,新旧施工工艺参数和效果对比如表 3。见图 5、图 6。

表 3 开平粉砂岩矿项目技术参数表
Table 3 Technical parameters of the Kaiping Siltstone Mine project

对照组 Control group	孔距 Spacing/m	孔径 Blasthole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	倾角 Dip angle/°	线装药密度 Linear charge density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	单孔药量 Single-hole charge/kg	堵塞长度 Stemming length/m	径向不耦合系数 Radial decoupling coefficient
传统工艺 Trad tech	1.2	115	13.5	65	0.5	6.75	1.5	3.59
新技术 New tech	1.8	115	13.5	65	1.1	14.8	1.5	3.59



图 5 开平粉砂岩矿传统预裂爆破效果
Fig. 5 Traditional presplitting blasting effect in Kaiping

项目经过多次试验,得出最佳效果参数为孔距 1.8 m,采用 50 mm PVC 管装药,半孔率稳定在

75%~85%,通过与三次传统工艺对比实验数据得出:较传统工艺钻孔量减少 33.3%,人工减少 35%,成本节省 26.4%,作业时间节省 40.5%,由于岩体破碎,半孔率和平整度方面提升较小约 13.3%。

3.3 阳西县建筑用片麻岩矿工程试验情况及效果评价

阳西县建筑用片麻岩矿项目采场终了边坡主要为微-未风化片麻岩以及少量花岗岩,饱和单轴抗压强度 83.70~128.00 MPa、平均值 102.1 MPa,整体岩体强度高,地质构造简单,节理裂隙不发育,矿体及围岩稳定性好。终了边坡各岩石台阶高度 15 m,台阶坡面角 70°,终了边帮总高度 198 m,覆盖层达 98 m,边坡要求高。目前主要采用 PVC 管预裂爆破

施工,为获取对照试验数据特采用 3 次传统预裂爆破工艺进行预裂爆破,新旧施工工艺参数和效果对比如表 4。见图 7、图 8。



图 6 开平粉砂岩砂矿新技术预裂爆破效果
Fig. 6 New technology blasting effect in Kaiping

经过多次试验,得出最佳效果参数为孔距 2.2 m,采用 50 mm PVC 管装药,通过与三次传统工艺对比实验数据得出:较传统工艺钻孔量减少 46.1%,人工减少 35%,成本节省 42%,作业时间节省 42.9%,爆破效果方面,半孔率稳定在 95%左右,稳定性较好,初步判断新工艺在硬岩、完整岩体中应用优势较大。



图 7 阳西片麻岩矿传统预裂爆破效果
Fig. 7 Traditional presplitting blasting effect in Yangxi



图 8 阳西片麻岩矿新技术预裂爆破效果
Fig. 8 New technology blasting effect in Yangxi

表 4 阳西片麻岩矿项目技术参数表

Table 4 Technical parameter of the Yangxi Gneiss Mine project

对照组 Control group	孔距 Spacing/m	孔径 Blasthole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	倾角 Dip angle/°	线装药密度 Linear charge density/(/kg · m ⁻¹)	单孔药量 Single-hole charge/kg	堵塞长度 Stemming length/m	径向不耦合系数 Radial decoupling coefficient
传统工艺 Trad tech	1.2	115	16.5	70	0.6	10	1.5	3.59
新技术 New tech	2.2	115	16.5	70	1.1	18	1.5	3.59

3.4 揭阳花岗岩建材石料矿工程试验情况及效果评价

揭阳花岗岩建材石料矿项目采场终了边坡主要为微-未风化花岗岩,地质构造简单,矿石结构以块状结构为主,饱和单轴抗压强度 96 ~ 244.0 MPa、平均值 157.1 MPa,岩石强度高,地质构造简单,节理

裂隙不发育,矿体及围岩稳定性好,岩性简单。边帮各台阶高度 15 m,台阶坡面角 70°。目前主要采用 PVC 管预裂爆破施工,为获取对照试验数据特采用 3 次传统预裂爆破工艺进行预裂爆破,新旧施工工艺参数和效果对比如表 5。见图 9、图 10。

表 5 揭阳花岗岩矿项目技术参数表

Table 5 Technical parameter of the Jieyang Granite Mine project

对照组 Control group	孔距 Spacing/m	孔径 Blasthole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	倾角 Dip angle/°	线装药密度 Linear charge density/(/kg · m ⁻¹)	单孔药量 Single-hole charge/kg	堵塞长度 Stemming length/m	径向不耦合系数 Radial decoupling coefficient
传统工艺 Trad tech	1.2	115	16.5	70	0.6	10	1.5	3.59
新技术 New tech	2.1	115	16.5	70	1.1	18	1.5	3.59



图9 揭阳花岗岩矿传统预裂爆破效果

Fig. 9 Traditional presplitting blasting effect in Jieyang



图10 揭阳花岗岩矿新技术预裂爆破效果

Fig. 10 New technology blasting effect in Jieyang

经过多次试验,得出最佳效果参数为孔距2.1 m,采用50 mm PVC管装药。通过三次传统工艺对比实验数据得出:较传统工艺钻孔量减少43.9%,人工减少35%,成本节省39.5%,作业时间节省47%,爆破效果方面,传统工艺效果不稳定,半孔率波动较大,而新技术的半孔率稳定在95%左右。

4 试验结果对比与分析

通过珠三角地区四个不同岩性的典型露天矿山开展工程试验,从钻孔消耗量(m/m^2)、综合成本($\text{元}/\text{m}^2$)、施工效率($\text{s}/\text{人}/\text{m}^2$)、爆破效果(半孔率)四方面,分别取四个项目采用5次新技术的数据和3次传统工艺的数据,先从这四方面分别进行组内对比,再从岩性方面进行组间对比,分析新技术对于不同岩性高陡边坡的可行性和适用性。

4.1 钻孔消耗量对比分析

预裂爆破单位面积钻孔消耗量(单位 m/m^2 ,以下简称钻孔消耗量)是衡量预裂爆破对钻孔消耗大小的指标。4个项目分别采集3次传统工艺预裂爆破和5次新技术预裂爆破的钻孔数量并计算钻孔消耗量,分别求得组内平均值后,再将新技术和传统工艺进行对比。见图11~图14,表6。

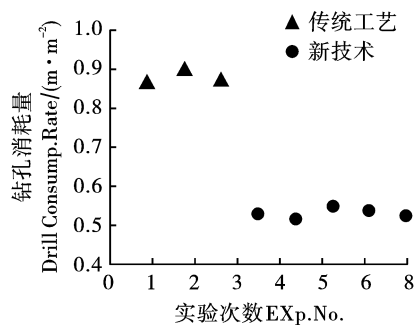


图11 英德石英砂矿钻孔消耗量对比

Fig. 11 Comparison of drilling consumption in Yingde

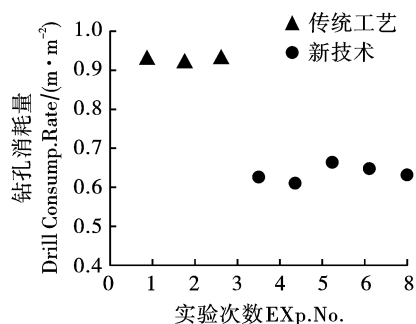


图12 开平粉砂岩矿钻孔消耗量对比

Fig. 12 Comparison of drilling consumption in Kaiping

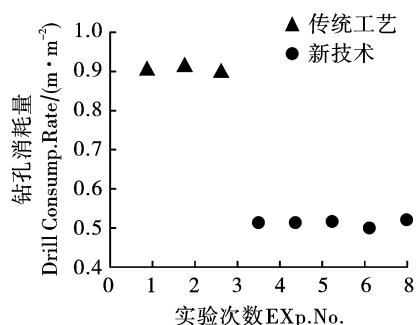


图13 阳西片麻岩矿钻孔消耗量对比

Fig. 13 Comparison of drilling consumption in Yangxi

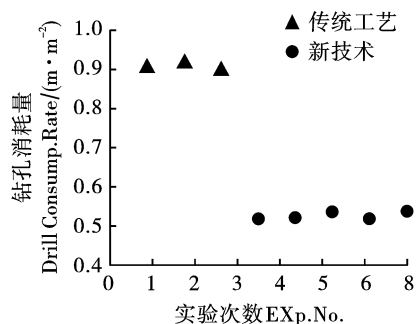


图14 揭阳花岗岩矿钻孔消耗量对比

Fig. 14 Comparison of drilling consumption in Jieyang

经过组内数据对比分析,英德石英砂矿项目采用新技术较传统工艺的钻孔消耗量节省40.2%,开平粉砂岩矿项目采用新技术较传统工艺的钻孔消耗

量节省 33.3%, 阳西片麻岩矿项目采用新技术较传统工艺的钻孔消耗量节省 46.1%, 揭阳花岗岩矿项

目采用新技术较传统工艺的钻孔消耗量节省 43.9%。

表 6 钻孔消耗量对比汇总表(单位: m/m^2)

Table 6 Summary of drilling consumption comparison(unit: m/m^2)

项目组 Project team	英德石英砂矿 Yingde quartz sand mine	开平粉砂岩矿 Kaiping siltstone mine	阳西片麻岩矿 Yangxi gneiss mine	揭阳花岗岩矿 Jieyang granite mine
传统工艺 Trad tech	0.87	0.93	0.91	0.91
新技术 New tech	0.52	0.62	0.49	0.51
节省 Save/%	40.2	33.3	46.1	43.9

4.2 施工效率对比分析

预裂爆破的施工效率(施工速度)在实际工程中十分重要,尤其是在工期紧工程量大的项目中,是决定能否完成工程任务的关键因素。因预裂爆破往往是和主爆破同一爆区同一起爆网路同时施工爆破作业,而并非单独作业,故本研究针对组内统一变量:6个爆破作业人员,边坡长度 100 m,统计作业时间从预裂爆破第一个孔装药开始,到装药堵塞网路连接结束,再计算得到预裂爆破单人、单位边坡面积所需的时间($\text{s}/\text{人}/\text{m}^2$)作为衡量施工效率的指标,最后再分别进行组内对比分析。见图 15~18、表 7。

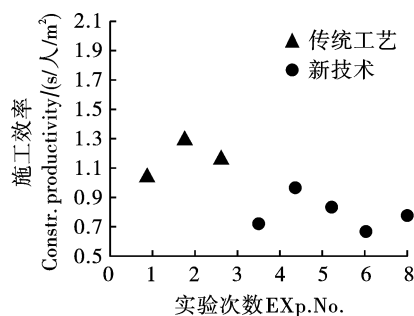


图 15 英德石英砂矿施工效率对比

Fig. 15 Comparison of construction efficiency in Yingde

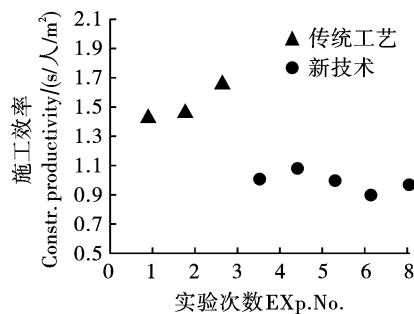


图 16 开平粉砂岩矿施工效率对比

Fig. 16 Comparison of construction efficiency in Kaiping

经过组内数据对比分析,英德石英砂矿项目采

用新技术较传统工艺的施工效率节省 40.0%, 开平粉砂岩矿项目采用新技术较传统工艺的施工效率节省 40.5%, 阳西片麻岩矿项目采用新技术较传统工艺的

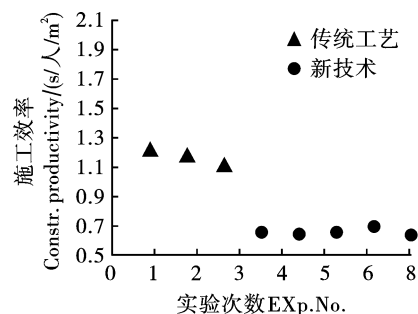


图 17 阳西片麻岩矿施工效率对比

Fig. 17 Comparison of construction efficiency in Yangxi

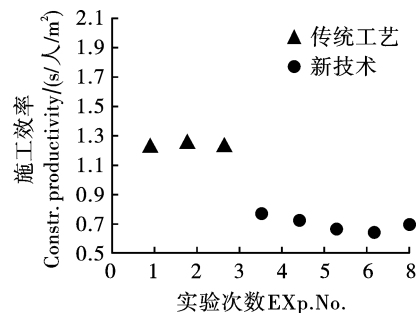


图 18 揭阳花岗岩矿施工效率对比

Fig. 18 Comparison of construction efficiency in Jieyang

4.3 综合成本对比分析

预裂爆破综合成本主要包括钻孔费用、材料费用、和人工费用。其中传统预裂爆破材料主要包含炸药、雷管、导爆索、竹片以及胶带等零星耗材,而新技术预裂爆破材料主要包含炸药、雷管、PVC 管。统一单价:115 mm 钻孔 40 元/m, 2#岩石乳化炸药 15.5 元/kg, 电子雷管 40 元/发, 导爆索 9.5 元/m, 直径 50 mm 的 PVC 管 1.2 元/m, 人工

500 元/工日,统计数据分别计算综合成本(元/m²) 后再进行组内对比。见图 19 ~ 图 22、表 8。

表 7 施工效率对比汇总表(单位:s/人/m²)
Table 7 Summary of construction efficiency comparison(unit:s/person/m²)

项目组 Project team	英德石英砂矿 Yingde quartz sand mine	开平粉砂岩矿 Kaiping siltstone mine	阳西片麻岩矿 Yangxi gneiss mine	揭阳花岗岩矿 Jieyang granite mine
传统工艺 Trad tech	1.08	1.362	1.05	1.2
新技术 New tech	0.648	0.816	0.6	0.636
节省 Save/%	40.0	40.5	42.9	47.0

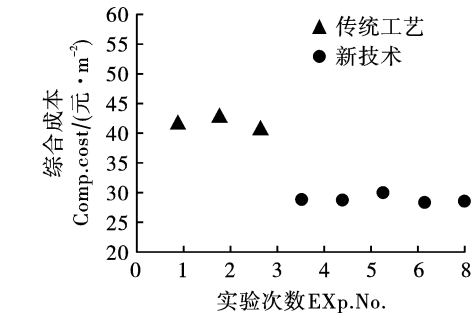


图 19 英德石英砂矿综合成本对比
Fig. 19 Comparison of comprehensive cost in Yingde

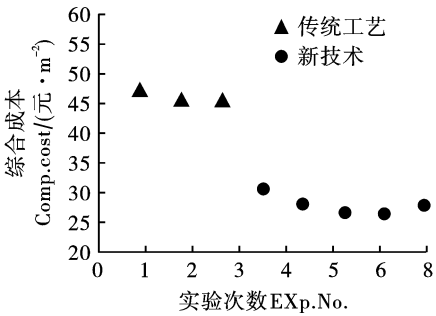


图 21 阳西片麻岩矿综合成本对比
Fig. 21 Comparison of comprehensive cost in Yangxi

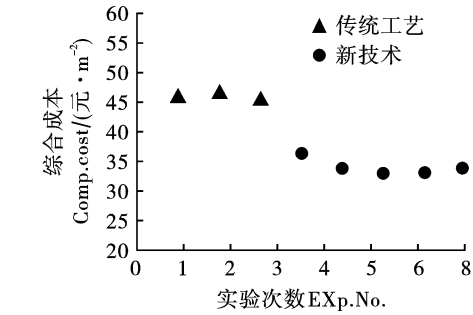


图 20 开平粉砂岩矿综合成本对比
Fig. 20 Comparison of comprehensive cost in Kaiping

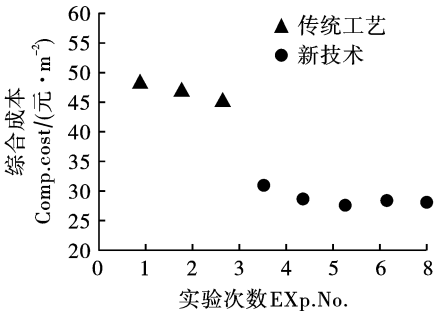


图 22 揭阳花岗岩矿综合成本对比
Fig. 22 Comparison of comprehensive cost in Jieyang

表 8 综合成本对比汇总表(单位:元/m²)
Table 8 Summary of comprehensive cost comparison(unit:CNY/m²)

项目组 Project team	英德石英砂矿 Yingde quartz sand mine	开平粉砂岩矿 Kaiping siltstone mine	阳西片麻岩矿 Yangxi gneiss mine	揭阳花岗岩矿 Jieyang granite mine
传统工艺 Trad tech	41.6	45.1	45.2	45.1
新技术 New tech	27.9	33.2	26.2	27.3
节省 Save/%	32.9	26.4	42.0	39.5

经过组内数据对比分析,英德石英砂矿项目新技术较传统工艺的综合成本节省 32.9%,开平粉砂岩矿项目新技术较传统工艺的综合成本节省 26.4%,阳西片麻岩矿项目新技术较传统工艺的综合成本节省 42%,揭阳花岗岩矿项目新技术较传统工艺的综合成本节省 39.5%。

4.4 爆破效果对比分析

预裂爆破的目的是减小主爆破对边坡的影响,保证保留边坡的完整、稳定,并形成规整的边坡面,衡量预裂爆破效果的主要指标是半孔率,分别统计每次实验爆破后的半孔率,并进行组内比较。见图 23 ~ 图 26、表 9。

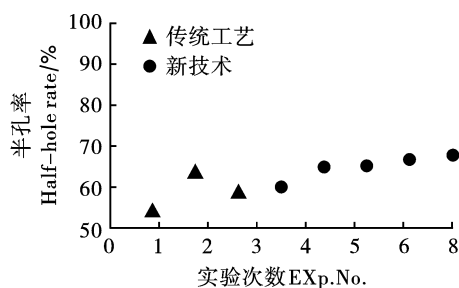


图 23 英德石英砂矿爆破效果对比

Fig. 23 Comparison of blasting effect in Yingde

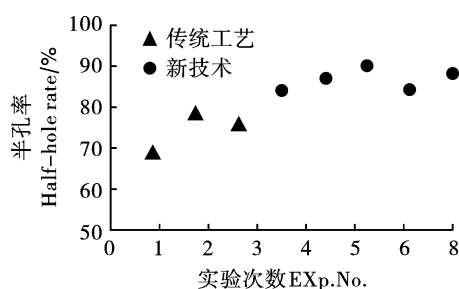


图 24 开平粉砂岩矿爆破效果对比

Fig. 24 Comparison of blasting effect in Kaiping

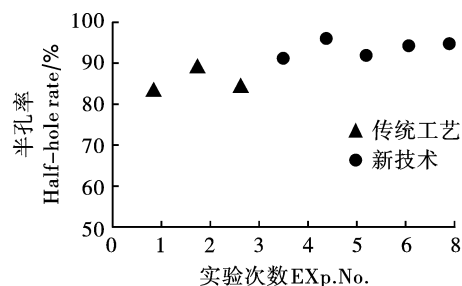


图 25 阳西片麻岩矿爆破效果对比

Fig. 25 Comparison of blasting effect in Yangxi

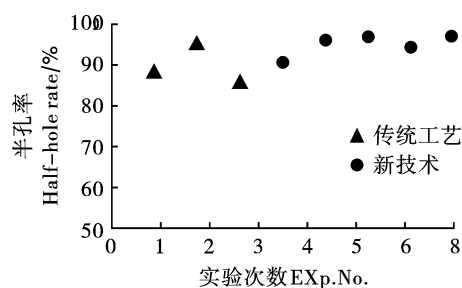


图 26 揭阳花岗岩矿爆破效果对比

Fig. 26 Comparison of blasting effect in Jieyang

表 9 爆破效果对比汇总表(单位:半孔率/%)

Table 9 Summary of blasting effect comparison(unit:Half-hole Rate/%)

项目组 Project team	英德石英砂矿 Yingde quartz sand mine	开平粉砂岩矿 Kaiping siltstone mine	阳西片麻岩矿 Yangxi gneiss mine	揭阳花岗岩矿 Jieyang granite mine
传统工艺 Trad tech	58	75	88	90
新技术 New tech	65	85	95	95
节省 Save/%	12	13.3	7.9	5.6

经过组内数据对比分析,新技术在软硬岩项目中半孔率都有一定提升,但由于新技术的装药结构更稳定,半孔率波动更小,稳定在 95% 左右,爆破效果稳定性更好。

组间对比:英德石英砂矿和开平粉砂岩矿均为软岩、破碎不完整岩体,阳西片麻岩矿和揭阳花岗岩矿为硬岩、完整岩体,经过以上实验进行组间数据对比分析,新技术在硬岩中应用时在钻孔消耗量、综合成本、施工效率方面提升更大,在爆破效果(半孔率)方面更稳定。

5 结论

采用“PVC 管 + 药卷”的创新装药结构的普通 PVC 管预裂爆破技术较采用“导爆索 + 竹片 + 32 mm 乳化炸药”的传统预裂爆破工艺,在钻孔消耗量、综合成本、施工效率等方面有较大提升,在爆

破效果(半孔率)方面具有更好的稳定性:

(1)采用更大的线装药密度和更规整更稳定的装药结构,将孔距扩大至 2.0 ~ 2.2 m,较传统预裂爆破工艺,钻孔消耗量减小 33% ~ 46%。

(2)预先安装 PVC 管,不占用爆破作业时间,“PVC 管 + 药卷”的创新装药结构省去了传统预裂爆破繁琐的施工环节,爆破作业时间减少 40% ~ 47%,施工效率大大提高。

(3)扩大孔距,减少钻孔量,节省了钻孔费用;施工工艺简单、施工环节少,减少爆破作业劳动力,节省了人工费用;取消导爆索、竹片等耗材,节省了材料费用。较传统预裂爆破综合成本降低 26.4% ~ 42%。

(4)采用“PVC 管 + 药卷”创新装药结构,避免传统预裂爆破“药串”在孔内弯曲、偏移、滑动、不均匀、脱落等情况,形成直线、规整、稳定的不耦合装药

结构,爆破效果(半孔率)更稳定。

(5)应用在坚硬、完整岩体时,钻孔、成本、效率等方面比软岩提升更大。

参考文献(References)

- [1] 陈庆凯,朱万成. 预裂爆破成缝机理及预裂孔间距的设计方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(7):1024-1027.
- [1] CHEN Qing-kai,ZHU Wan-cheng. Mechanism of crack formation in presplitting blasting and design method of presplitting hole spacing[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2011,32(7):1024-1027. (in Chinese)
- [2] 吴晓峰,宋照尚,李廷春. 预裂爆破中爆生裂缝扩展的机理探讨及预裂炮孔间距的设计方法[J]. 中国港湾建设,2007(1):49-50,63.
- [2] WU Xiao-feng,SONG Zhao-sang,LI Ting-chun. Discussion on propagation mechanism of blast-induced cracks in presplitting blasting and design method of presplitting hole spacing[J]. China Harbour Engineering,2007(1):49-50,63. (in Chinese)
- [3] 徐炎明,凌天龙,郝雪峰. 基于LS-DYNA的预裂爆破最佳孔间距数值模拟研究[J]. 金属矿山,2021(10):54-60.
- [3] XU Yan-ming,LING Tian-long,HAO Xue-feng. Numerical simulation study on optimal hole spacing of presplitting blasting based on LS-DYNA[J]. Metal Mine,2021(10):54-60. (in Chinese)
- [4] 谭云军. 预裂爆破空气间隔层能量利用机制研究[J]. 工程爆破,2021,27(3):45-51.
- [4] TAN Yun-jun. Study on energy utilization mechanism of air deck in presplitting blasting[J]. Engineering Blasting,2021,27(3):45-51. (in Chinese)
- [5] 闫国斌. 不同介质不耦合装药预裂爆破数值模拟[J]. 爆破,2019,36(4):32-37.
- [5] YAN Guo-bin. Numerical simulation of presplitting blasting with decoupled charging in different media[J]. Blasting,2019,36(4):32-37. (in Chinese)
- [6] 刘文革. 聚能PVC管在预裂爆破中的应用机理[J]. 矿冶工程,2018,38(6):18-22.
- [6] LIU Wen-ge. Application mechanism of energy-gathering PVC pipe in presplitting blasting[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2018,38(6):18-22. (in Chinese)
- [7] 厉美杰,杜 军,李泽华,等. PVC管装入多孔粒铵油炸药在露天矿预裂爆破中的应用[J]. 采矿技术,2021,21(6):144-146.
- [7] LI Mei-jie,DU Jun,LI Ze-hua,et al. Application of porous granular ammonium nitrate fuel oil explosive loaded in PVC pipe in presplitting blasting of open-pit mine[J]. Mining Technology-transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy,2021,21(6):144-146. (in Chinese)
- [8] 田 岗,代晓东,张宪堂,等. PVC塑料切缝管在聚能爆破中的应用[J]. 工程爆破,2012,18(3):37-40.
- [8] TIAN Gang,DAI Xiao-dong,ZHANG Xian-tang,et al. Application of PVC plastic slotted pipe in energy-gathering blasting[J]. Engineering Blasting,2012,18(3):37-40. (in Chinese)
- [9] 刘 坚,王银涛,武飞岐,等. 粒状铵油炸药轴向连续装药预裂爆破数值模拟及应用研究[J]. 爆破,2021,38(1):109-115.
- [9] LIU Jian,WANG Yin-tao,WU Fei-qi,et al. Numerical simulation and application research on presplitting blasting with axial continuous charging of granular ammonium nitrate fuel oil explosive[J]. Blasting,2021,38(1):109-115. (in Chinese)
- [10] 揣 新,陈能革,朱 磊,等. 聚能管预裂爆破技术研究与应用[J]. 现代矿业,2023,39(11):74-77,97.
- [10] CHUAI Xin,CHEN Neng-ge,ZHU Lei,et al. Research and application of energy-gathering pipe presplitting blasting technology[J]. Modern Mining,2023,39(11):74-77,97. (in Chinese)
- [11] 马 军. 逐孔预裂爆破裂纹扩展规律及损伤特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2024.
- [11] MA Jun. Study on crack propagation law and damage characteristics of hole-by-hole presplitting blasting[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2024. (in Chinese)
- [12] 黄庆明. 聚能爆破技术在水电站建基面水平预裂爆破中的应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
- [12] HUANG Qing-ming. Application research of energy-gathering blasting technology in horizontal presplitting blasting of hydropower station foundation surface[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2010. (in Chinese)