

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.004

高压空气炮冲击破岩试验与场地应用初探^{*}

庞烁钢^{1,2}, 胡少斌^{1,2}, 石崇^{1,3}, 周云飞^{1,2}, 奚灵智⁴, 张强⁴, 李晨⁴

(1. 河海大学 精细爆破全国重点实验室, 南京 210024;

2. 河海大学 土木与交通学院隧道与地下工程研究所, 南京 210098;

3. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 4. 中国电建华东勘测设计研究院, 杭州 311122)

摘要: 针对复杂敏感环境下岩体开挖的工程难题, 研究团队创新性地提出一种生物质能高压空气炮冲击破岩核心装备及施工关键技术, 并在试验场(混凝土破碎试验)与明挖隧道基坑工程(现场破岩试验)中开展系统性应用验证。该装备与技术通过模块化集成钻孔、封孔与高压脉冲破岩功能, 实现全流程自动化作业, 具备无炸药依赖、低振动噪声、无有毒气体排放等优势, 适用于城市基建、隧道工程、文物保护单位等高安全环保要求的场景。试验结果表明: 在特定临空面距离(0.8 m)与泄压压力(30 MPa)条件下, 水平孔爆破能量利用率达2.125~2.345 kg/m³(TNT当量), 形成连续贯穿裂纹; 竖直孔爆破受重力与应力分布影响呈非对称破裂, 但预设应力释放路径下单次可实现10 cm级岩体分离。本研究在非炸药爆破核心装备与施工关键技术方面有显著的技术创新, 验证了高压空气炮冲击破岩技术的可行性与装备的适用性, 该技术与装备的提出与应用对复杂敏感环境中的硬岩破除与矿山开采具有重要的指导意义, 对绿色智慧开挖技术的规模化推广具有重要的推动作用。

关键词: 高压气体爆破; 生物质能高压空气炮; 地下空间开发; 硬岩破除装备

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0031-11

Experimental Study on High-pressure Air Cannon Impact Rock Breaking and Preliminary Site Application

PANG Shuo-gang^{1,2}, HU Shao-bin^{1,2}, SHI Chong^{1,3},
ZHOU Yun-fei^{1,2}, XI Ling-zhi⁴, ZHANG Qiang⁴, LI Chen⁴

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Tunnel and Underground Engineering Institute, College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumchi 830052, China; 4. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: To address rock excavation challenges in environmentally sensitive areas, this research team developed an innovative high-pressure air cannon integrated drilling and blasting machine. The technology combines energy-

收稿日期 (Date of reception): 2025-10-30

网络首发日期 (Published online): 2025-12-22

作者简介: 庞烁钢 (1999-), 男, 山东博兴人, 博士, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作, (E-mail) psg0863@163.com。

通信作者: 胡少斌 (1990-), 男, 江西南昌人, 副教授, 主要从事非炸药爆破与岩石力学研究方面的工作, (E-mail) hsbcm@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金(4257021456)深部硬岩射弹冲击与机械截割协同破岩机理及多目标优化方法

About the author: PANG Shuo-gang (1999-), male, born in Boxing, Shandong Province, Ph. D., mainly engaged in experimental research on rock mechanics, (E-mail) psg0863@163.com.

Corresponding author: HU Shao-bin (1990-), male, native of Nanchang City, Jiangxi Province, Associate Professor mainly engaged in research on non-explosive blasting and rock mechanics, (E-mail) hsbcm@126.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (4257021456) Synergistic Rock-breaking Mechanism of Projectile Impact and Mechanical Cutting in Deep Hard Rock and Multi-objective Optimization Method

powered pneumatic impact principles with aerodynamic pulse technology, demonstrating effectiveness through comprehensive validation including concrete fragmentation trials at test sites and practical rock-breaking applications in open-cut tunnel foundation projects. Through modular integration of drilling, borehole sealing, and high-pressure pulse rock fragmentation capabilities, this equipment enables fully automated operation throughout the entire process. It offers significant advantages including explosive-free operation, minimal vibration and noise, and no toxic emissions, making it particularly suitable for applications with stringent safety and environmental requirements such as urban construction projects, tunnel engineering, and heritage conservation zones. Experimental results demonstrate that, with optimized parameters, including a 0.8 m free-surface distance and 30 MPa decompression pressure, horizontal borehole blasting achieved an energy efficiency of 2.125 ~ 2.345 kg/m (TNT equivalent) while generating interconnected fracture networks. In contrast, vertical borehole blasting produced asymmetric fracture patterns due to gravitational effects and stress redistribution, although single-cycle detonation successfully achieved decimeter-scale rock separation along predetermined stress-relief pathways. The study confirms the technical feasibility of high-pressure air-cannon rock fragmentation, while noting that its performance under complex geological conditions (including groundwater and fault zones) requires further research. Future directions include developing intelligent sensing systems for parameter optimization, investigating synergistic effects between impacts and energy-enhancing agents, and extending applications to subway shield tunneling and highway slope engineering, and ultimately advancing the widespread implementation of eco-friendly intelligent excavation technologies.

Key words: high-pressure gas blasting; supercritical fluid impact rock-breaking; underground space excavation; hard rock excavation equipment

随着城市化进程加速与基础设施建设密集化发展,工程活动对周边环境的影响已成为社会关注的焦点。国家“十三五”规划明确提出绿色发展理念,地方政府及行业主管部门持续强化环保监管,严格限制工程炸药使用,导致传统炸药爆破在复杂敏感环境(如邻近铁路、闹市区、文物保护区等)中的审批难度激增,常规爆破开挖方案面临严峻挑战^[1]。在此背景下,机械开挖、静态膨胀剂破岩、液压劈裂机破岩、CO₂ 爆破及干冰静态破岩等非爆破开挖技术逐渐成为工程实践的重要选择^[2-8]。

不同技术的适用性与局限性差异显著,传统爆破法虽具有效率高、成本低的优势(反应热 3 ~ 6 MJ/kg,反应速度 $\leq 10^{-6}$ s),但存在振动强、飞石风险高、有毒气体排放及炸药运输存储安全隐患等缺陷^[9-12],在振动/噪音敏感区域或公共安全敏感场景中应用受限,且与绿色施工理念冲突^[11-13]。非炸药爆破虽规避了炸药风险,但其技术成熟度与设备普适性仍待提升——机械开挖(如液压破碎锤、悬臂式掘进机、鹰嘴钩)依赖设备性能,噪声干扰大、硬岩适应性差,仅适用于局部作业;液压劈裂机虽环保安全,却受限于岩石完整度与强度,破碎效率低、二次破碎成本高^[14-16];CO₂ 相变致裂技术因涉及危险化学品管理(液态 CO₂ 需特种设备储运),且激发材料存在安全风险,多地对其应用持审慎态度^[4-5,17-19];静态膨胀剂则因反应周期长(通常 > 10 h),难以满足高效施工需求^[6,20-22]。

因此,复杂敏感环境下岩体开挖亟需一种兼顾安全、高效、环保与智能化的新型破岩技术。生物质发热材料作为一种绿色低碳、可再生、且发热性能优异的天然复合材料,兼具环境友好、资源丰富、碳中性和可生物降解的特性,在绿色智慧开挖领域展现出独特潜力。研发基于生物质发热材料的绿色智慧开挖核心装备及施工关键技术,不仅是突破现有非炸药技术瓶颈的关键路径,更是响应国家“双碳”战略、推动工程建设向绿色化、智能化升级的重要实践方向。因此,本文创新性地提出一种生物质能高压空气炮冲击破岩核心装备及施工关键技术,通过混凝土场地测试及隧道基坑开挖硬岩破除工程对该技术装备展开应用测试,并对该装备水平孔与竖直孔爆破过程中的破岩效果、能量利用率及破岩机制展开应用研究。本文研究成果为复杂敏感环境下硬岩的高效安全破除提供了重要的技术支撑,为复杂敏感环境下硬岩破除施工开辟了绿色、智能、可控的新技术路径,具有广阔的应用前景。

1 高压空气炮冲击破岩原理及装备

气体爆破破岩技术是基于压缩气体膨胀能与冲击载荷驱动岩体裂隙扩展的破岩方法^[23]。传统气体爆破技术(如 CO₂ 爆破)多以一次性爆破筒作为高压气体存储与释放单元^[24-26],其封孔工艺常依赖黏土、水泥或沙袋等填充材料,导致施工过程存在多重局限:其一,高压气体运输与存储环节存在安全隐

患;其二,封孔质量受填充材料性能影响显著,易引发冲孔、飞管等工程风险;其三,工艺流程复杂且对操作人员技能要求高,难以实现标准化与机械化升级。针对以上问题,本文提出一种高压空气炮冲击破岩技术,该技术在作用机理上与传统气体爆破技术具有同源性,同时基于该技术研发了一种集成化、智能化的生物质能高压空气炮钻爆一体机。

高压空气炮钻爆一体机是面向复杂岩体破岩需求开发的模块化工程装备,其核心功能集成了钻孔、封孔与高压冲击破岩全流程作业,整机结构如图 1 所示。装备主体由传统钻机平台与高压空气爆破机两大功能模块构成:传统钻机平台具备全地形钻孔能力,可适配不同地质条件下的钻孔作业需求;高压空气爆破机作为核心执行单元,主要由注气系统、高压气体发生装置、放气控制系统及智能机械封孔装置组成。其中,注气系统通过高压空气增压泵实现气体注入与多级增压,最高输出压力可达 42 MPa;高压气体发生装置采用高强度耐压壳体设计(额定耐压 300 MPa),内部气体存储空间为 10 L,可根据目标岩体强度与破岩需求,通过添加聚能剂实现气体的二次增压强化^[27],该聚能剂为自主研发的生物质泡沫发热材料,通过电激发实现迅速燃烧放热,为气体发生装置内空气提供充足热量,从而实现迅速升压的目的;放气控制系统以液压球阀为执行元件,可精准控制高压气体发生筒内气体的瞬时释放,使高压气流经钻孔顶端泄压口定向作用于岩体表面^[28];如图 2 所示,智能封孔装置采用液压推动式封隔器,通过机械密封结构阻断高压气体在钻孔上部的逸散路径,确保膨胀能量集中作用于目标岩体,从而显著提升破岩效率与能量利用率。高压空气炮增压与放气原理如图 3 所示,冲击破岩过程类比于高压射流冲击的过程,可分为两个典型的阶段:水锤压力阶段与滞止压力阶段^[29],在高压空气炮冲击破岩过程中即为冲击载荷和准静态压力两部分,冲击荷载首先作用在冲击中心产生“水锤压力”,使岩体产生冲击坑与初始裂纹,一旦稳定的冲击射流形成后,射流中心的压力便会降低,形成稳定的伯努利滞止压力,流体的准静态压力在此时发生作用,促使裂纹扩展与裂隙发育,从而达到有效的破岩效果。

2 高压空气炮冲击破碎混凝土试验

2.1 试验方案

为系统探究高压空气炮冲击破岩装备在水平与垂直方向的爆破性能特征,本研究于徐州市徐工集团室外试验场开展了专项性能测试试验,试验针对

该装备台阶开挖爆破中的典型应用场景,设置水平孔爆破与竖直孔爆破两组工况。采用 C60 高强度混凝土作为试件材料,分别预制两种尺寸的混凝土试件:水平孔爆破试验目标试件为 $1.5\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的卧式结构,竖直孔爆破试验目标试件为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 的立式结构。两试件均严格遵循标准养护规范(28 d 标准养护期),养护完成后转运至试验场地实施爆破试验。考虑到大体积混凝土试件的吊装作业需求,预制过程中于试件侧面预先设置两个贯穿吊装孔(孔径 90 mm),以满足吊装设备的固定与起吊要求。试验场地的空间布局及试件布设方位示意详见图 4,两试件的具体物理力学参数(如密度、弹性模量、抗压强度等)汇总于表 1。



图 1 高压空气炮钻爆一体机

Fig. 1 High-pressure air cannon drilling and blasting integrated machine



图 2 机械封孔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mechanical borehole sealing

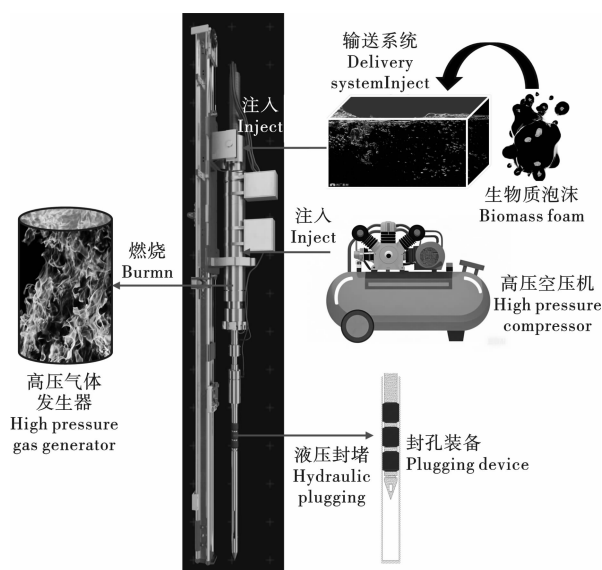


图 3 高压空气炮冲击破岩原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the rock-breaking principle of the high-pressure air cannon

表 1 被爆混凝土试件基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of concrete specimens subjected to explosion

密度 Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 Elastic modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio	抗拉强度 Tensile strength/MPa	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength/MPa	渗透率 Permeability coefficient/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔隙率 Porosity
2450	45	0.17	4.0	60	$1\text{e}-8$	0.15

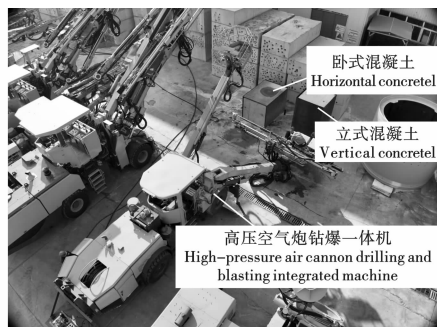


图 4 场地测试空间图

Fig. 4 Testing site spatial diagram

本次试验在卧式混凝土试件和立式混凝土试件上分别布置水平孔和竖直孔,详细布孔参数见表 2,布孔位置示意图如图 5 所示,高压气体释放压力定为 30 MPa。在爆破过程中,为了防止混凝土碎块飞

表 2 功能样机爆破破岩试验钻孔参数表

Table 2 Drilling parameters table for blasting rock breaking test of functional prototype

序号 No.	类型 Type	孔径 Hole diameter	孔深 Hole depth	角度 Angle	相对位置 Relative position	泄压压力 Relief pressure
1	水平孔 Horizontal hole	102mm	2m	6°	(0.5, 1)	30MPa
2	竖直孔 Vertical hole	102mm	2m	90°	(0.9, 0.75)	30MPa

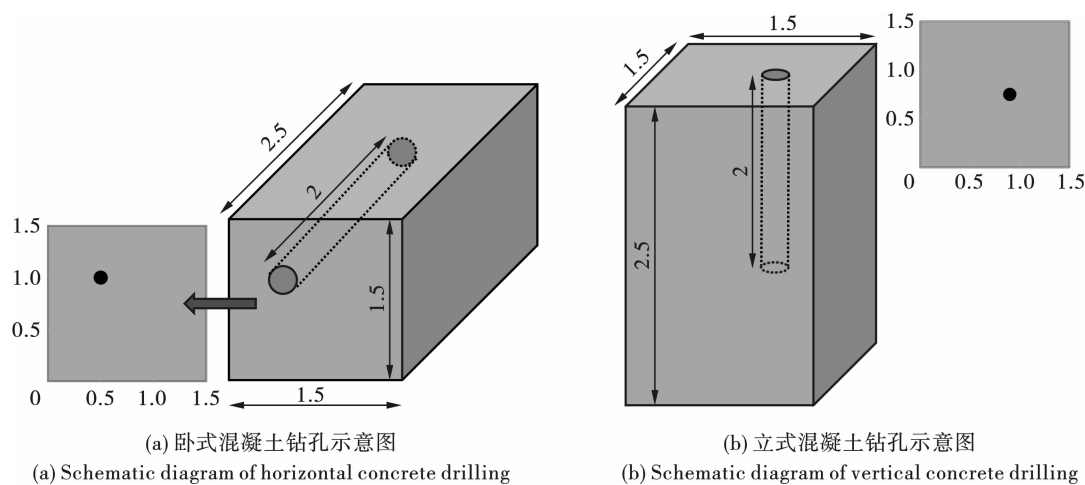


图 5 被爆混凝土试件布孔位置示意图(单位:m)

Fig. 5 Schematic diagram of hole layout positions of concrete specimens subjected to explosion(unit:m)

针对卧式混凝土试件的爆破破裂特征,高压空气冲击作用下试件呈现显著的张拉破裂形态,发育

溅,钢模板结构不做拆除。

2.2 试验结果

高压空气炮冲击试验后,卧式与立式混凝土试件在钢模板拆除前后的破裂形态特征如图 6、图 7 所示。受爆混凝土试件均发育有沿钻孔走向的两条主裂纹,且两条裂纹基本共面。在自由面与内部预制空孔的共同作用下,卧式混凝土试件受爆后,穿过钻孔区域的主裂纹近似沿 45° 方向扩展;立式混凝土试件受爆后,对应主裂纹的扩展角度约为 55° 。值得注意的是,若裂纹扩展路径附近存在应力集中区域,则会进一步贯通形成薄弱面。观测结果表明,钻孔走向上的裂纹全程贯通,未因钻孔施工作业终止而出现裂纹中断现象;两次试验中均未观测到冲孔破坏现象。

两条贯穿性主裂纹,节理面平整光滑且无明显错台。受爆破孔与临空面的空间位置关系影响,破裂块体

与原试件主体的断裂面倾角较大,结合卧式摆放条件下水平钻孔的位置特征(位于试件上侧角点),破裂后块体在气体向外冲击力与自身重力的耦合作用下,沿断裂面产生向下滑动趋势。值得注意的是,拆除防护板后,破裂块体与母体间无粘连现象,分离性优异,表明该工况下破岩效果良好。



图6 钢模板拆除前混凝土试件破裂样貌
Fig. 6 Cracked appearance of concrete specimens before removal of steel formwork



图7 钢模板拆除后混凝土试件破裂样貌
Fig. 7 Cracked appearance of concrete specimens before removal of steel formwork

对于立式混凝土试件,受自由面与内部预制空孔的协同作用,爆破冲击后主裂纹沿近似 60° 方向扩展,形成非对称破裂特征:过钻孔两侧裂纹开度存在显著差异,其中一侧裂纹宽度达10 cm以上,另一侧相对较窄;同一侧裂纹宽度分布均匀,且自上而下贯穿性良好,断口平齐无明显破碎。然而,受立式摆放方式的约束(竖直钻孔位于试件中线位置),破裂后仅靠气体冲击力推动断裂块体,加之钢模板的侧向约束与大体积破裂块体的惯性作用,试件未发生整体分离,一侧自上而下完全断开,另一侧仍保留部分粘连,呈现“半分离”状态。

综合试验结果,高压空气炮钻爆一体机展现出优异的工程适用性:设备运行流畅高效,钻孔速率与封孔质量均满足设计要求,破岩效果显著(试件发育连续贯穿裂纹,破裂面平整,分离性良好)。值得注意的是,试验中混凝土试件因材料不均匀性及预制空孔的存在,导致局部应力集中现象,促使裂纹优先沿薄弱面扩展,分支裂纹发育较少。若将该装备应用于应力条件更优的天然岩体(如完整硬岩),预

计可激发更多分支裂纹,进一步提升岩体分裂脱离效率,为复杂敏感环境下的高效破岩提供更可靠的技术支撑。

3 复杂敏感环境高压空气炮冲击破岩试验

3.1 工程概况

为验证高压空气炮冲击破岩技术在复杂敏感环境下硬岩破除的工程适用性,并评估其爆破扰动对周边环境的影响,本文选取浙江省义乌市诚信大道延伸工程隧道基坑开挖段作为试验场地开展破岩试验。

该工程采用明挖顺作法施工,当前已完成钻孔灌注桩、钢立柱及内支撑梁的主体结构施工,但支撑梁段残留的岩土体尚未开展爆破开挖清除作业,为试验提供了真实的工程应用场景。试验场地地处金衢盆地东段浙中盆地地貌一级阶地,局部为河漫滩地貌单元,场地内道路延伸工程以隧道形式下穿义乌植物园,属城市核心区敏感施工环境,对爆破环境影响的控制具有严格要求。待测试区域为支撑梁段待开挖的隧道基坑,主要岩性为中风化泥质粉砂岩,其天然抗压强度为11.21 MPa,岩芯完整性较好(岩体较完整),根据地质勘察报告与现场编录,该区岩体节理裂隙不发育,未见明显的软弱夹层或构造破碎带。岩体呈巨块状~整体状结构,结构面少且多为闭合型,整体性极佳。地质条件与高压空气炮冲击破岩技术的适用范围高度匹配,可有效检验该技术在硬岩破除中的工程效能。试验场地的整体工程布局及测试区域定位详见图8。



图8 诚信大道延伸工程总平面图
Fig. 8 Plane view of Chengxin avenue extension project

3.2 试验方案

为系统验证高压空气炮冲击破岩技术在复杂敏感环境中水平与竖直方向的破岩效能,本次试验采用分阶段对比方案,分别设计水平孔与竖直孔爆破两种工况,重点探究不同钻孔方向下技术的适应性特征。

(1) 水平孔爆破方案

水平孔爆破试验选址于K1+725临时道路旁的开挖面,该区域高度2.5~3 m,空间位置独立且具备天然临空面优势(以坡顶面为自由面),地层以

强风化泥质粉砂岩为主。该地层岩土工程特性显著:内部节理裂隙发育密集,水浸条件下易发生软化变形,工程力学参数(强度、承载力)呈显著劣化趋势,可作为典型软弱破碎岩体环境,用于检验技术对复杂地层的适应性。试验针对水平方向破岩需求,设计开展3次水平孔爆破试验,水平孔1~3依次起爆。钻孔角度严格控制为 3° ,以确保钻孔轴线与坡面呈水平状态;孔深设计为1.5 m,旨在保证三段封

孔橡胶圈与硬岩孔壁充分接触,实现有效封孔;破岩区以坡顶面为自由面,3个钻孔按梯度远离自由面依次布置(1#孔距临空面0.8 m,2#孔距临空面1.0 m,3#孔距临空面1.5 m),通过差异化距离参数设置,系统研究破岩效果随临空面距离的变化规律。具体布孔参数详见表3,现场布孔位置平面布置如图9所示。

表3 水平孔布孔与破岩参数表

Table 3 Horizontal borehole layout and rock-breaking parameters

序号 No.	类型 Type	孔径 Hole diameter	孔深 Hole depth	角度 Angle	与临空面垂直距离 Perpendicular distance to free surface	泄压压力 Relief pressure
1	水平孔 Horizontal hole	102 mm	1.5 m	3°	0.8 m	20 MPa
2				3°	1.0 m	38 MPa
3				3°	1.5 m	30 MPa



图9 水平孔破岩现场及布孔位置图

Fig. 9 Horizontal borehole rock breaking field and schematic diagram of hole layout positions

(2) 竖直孔爆破方案

竖直孔爆破试验选址于K0+580~K0+760支撑梁段待开挖隧道基坑,该区域地层以中风化泥质粉砂岩为主,基坑深度约5 m,宽度30 m,采用明挖顺作法施工(已完成钻孔灌注桩、钢立柱及内支撑梁主体结构)。试验区域上部强风化岩层已清除,下部中风化岩层出露,形成宽度约8 m的岩质边坡(与临近临时道路相邻),为竖直方向破岩提供了典型硬岩试验环境。试验将3个竖直孔布置于纵向支撑梁与隧道顶横梁组成的两个格间内(布孔位置示意图见图10),其中1#孔与2#孔间距0.9 m,3#孔独立布设于另一支撑梁间空格内,通过不同空间位置的对比设计,探究竖直方向爆破能量传播与破岩效果的差异性。具体布孔参数见表4,现场布孔立面位置如图11所示。此外在竖直孔爆破试验过程中开展振动与噪音检测,振动与噪音检测点S在图10

中标注,其中振动监测装备为KJ521振动监测系统,噪音采用AR824型噪音计采集。

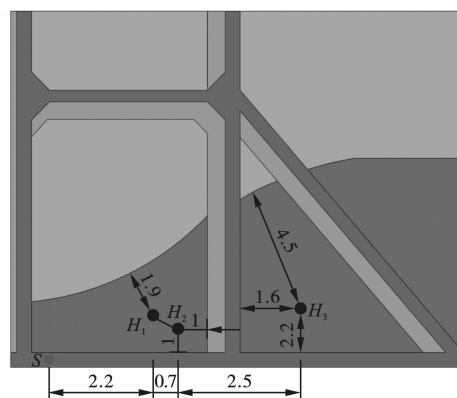


图10 支撑梁间的空格内钻孔位置示意图(单位:m)

Fig. 10 Schematic diagram of drilling positions in the gaps between supporting beams(unit:m)

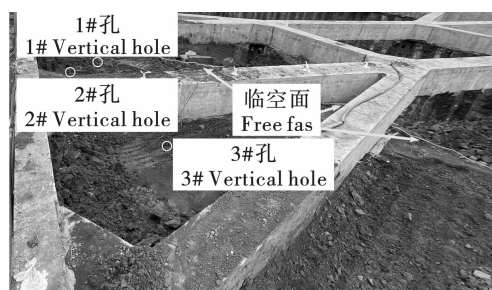


图11 支撑梁间垂直孔测试位置图

Fig. 11 Schematic diagram of test positions of vertical boreholes between supporting beams

通过上述两阶段试验,可系统获取高压空气炮冲击破岩技术在水平与竖直方向下的破岩模式、裂

纹扩展规律及能量作用特征,为其在复杂敏感环境 硬岩破除中的工程应用提供关键参数支撑。

表 4 砂岩试样渗透特性参数
Table 4 Parameters of seepage property for sandstone

序号 No.	类型 Type	与临空面水平距离 Horizontal distance to free surface/m	孔深 Hole depth/m	孔径 Hole diameter/mm	角度 Angle	泄压压力 Relief pressure
1	竖直孔 Vertical hole	1.9	2.6	110	90°	38 MPa
2		2.6	2.7			
3		4.5	1.8			

3.3 试验结果

(1)水平孔爆破破岩效果

水平孔破岩测试现场爆破过程如图 12 所示,1~3#水平孔均未出现冲孔现象,高压气体全部由冲击开裂的位置释放。



图 12 水平孔测试现场破岩过程
Fig. 12 Rock breaking process at
the horizontal borehole test site

1#水平孔内高压空气释放之后,在 1#水平孔上方产生了数条宽度在 1 cm 左右的裂纹,裂纹主要分布在 1#孔的上部和左右两侧 0.5 m 范围内,如图 13 左一中的部分裂纹为 1#孔爆破产生。2#水平孔内高压气体释放后,在孔左右两侧都有较多裂纹产生,相比于孔左,孔右侧产生的裂纹数目较少,但是宽度较宽,且部分岩土体被掀起;孔左侧岩土体也被轻微掀起,沿着垂直 2#孔横向产生了较大裂缝,最宽处裂缝宽度达到 5 cm,裂缝总长度 2.2 m,横向裂缝扩展路径上产生了 6 条以上竖向裂纹,竖向裂纹近似呈现平行状态。破岩产生的裂纹情况如图 13 左二所示。3#水平孔内高压空气释放之后,在上部临空面处岩体出现多条较细、分散的小裂纹,如图 13 右一所示,1#、2#孔爆破产生的裂纹在原有基础上产生了小范围延伸和扩展。

由于 1#水平孔位置距离临空面较近,且岩体完整性条件和强度都较低,虽然 1#孔爆破过程中泄压压力较低,但仍联通了原生结构面产生多处裂纹;2#水平孔内高压空气释放压力最高,为 38 MPa,位置在 1#孔左侧,因此靠近 1#孔一侧少有新裂纹产生,

而是使原有裂纹进一步扩展,远离 1#孔一侧则产生了若干新裂纹,并贯通了原生裂隙形成了长度 2.2 m 的长裂纹;由于 3#水平孔位置距离上部临空面太远,而与 2#孔距离较近,且经过 1#孔、2#孔泄压冲击破岩后已有大量裂纹出现,因此并未产生新的宽度较大的长裂纹,高压空气泄压后大部分从既有裂纹中释放,因此使原有裂纹发生了小范围延伸和扩展。

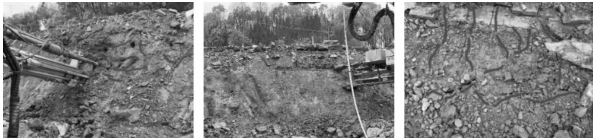


图 13 水平孔爆破裂纹效果图
Fig. 13 Effect diagram of cracks generated by
blasting in horizontal boreholes

(2)竖直孔爆破破岩结果

1~3#竖直孔爆破过程中没有冲孔现象发生,爆破后现场形貌如图 14~16 所示。1#竖直孔的临空面条件在支撑梁段 3 个钻孔中最好,高压空气在 1#竖直孔冲击后,在孔周靠近临空面方向产生两条长裂纹,长度分别为 2.2 m 和 1.7 m,此外孔后靠近边墙处出现一条长度 1.5 m 的横向裂纹,可能是围岩原生结构面在冲击或震动作用下开裂,宽度在 6~7 mm 之间;2#竖直孔临近 1#竖直孔,距离为 0.9 m,在 1#竖直孔完成围岩初爆后,2#竖直孔临空面以 1#爆破孔破碎后形成的断裂处作为实际临空面,2#竖直孔与临空面实际距离不足 0.9 m,高压空气在 2#竖直孔内释放后,进一步加强了围岩的破碎,并将 1#爆破孔后方横向裂缝附近的岩石抬升约 15 cm,没有新的裂缝产生;3#竖直孔与临空面距离较远,且附近围岩受支撑梁的压制,爆破后没有明显的裂纹出现,也未引起孔口局部岩土体的抬升。根据振动与噪音检测(振动与噪音检测点 S 在图 10 中标注)可知,在距离震源 2 m 外,高压空气炮爆破破岩产生的振动速度已然低于 8 cm/s,且噪音峰值低于 80 dB。

见图 17、图 18。

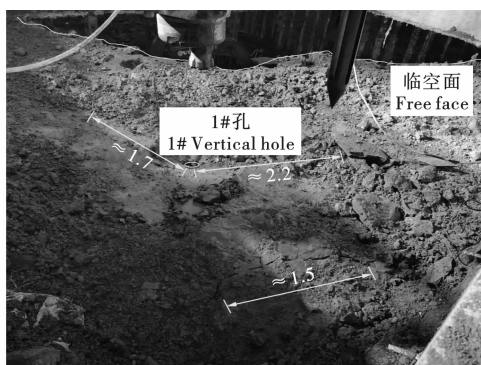


图 14 1#竖直孔爆破效果
Fig. 14 No. 1 vertical borehole blasting effect

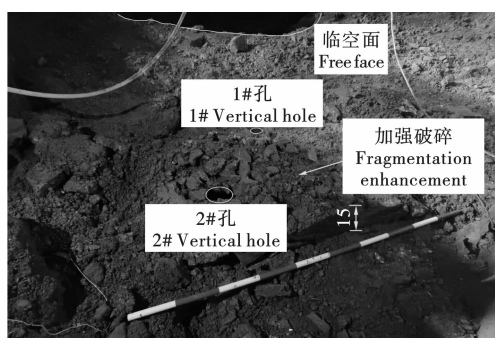


图 15 2#竖直孔爆破效果
Fig. 15 No. 2 vertical borehole blasting effect



图 16 3#竖直孔爆破效果
Fig. 16 No. 3 vertical borehole blasting effect

4 分析与讨论

4.1 高压空气炮冲击破岩理论爆破能量与 TNT 当量计算

高压空气炮钻爆一体机设计耐压 300 MPa, 容

积 10 L, 参考二氧化碳相变致裂过程中的能量计算公式^[28], 对高压空气冲击破岩过程中的能量进行计算, 计算公式如下

$$E_g = \frac{PV}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中: E_g 为气体的爆破能量, kJ; P 为容器内气体的绝对压力, MPa; P_0 为标准大气压取 0. 1013 MPa; V 为容器的容积, m^3 ; K 为空气的绝热指数, 即空气的定压比热与定容比热之比, 在此取值为 1. 4。按照高压空气炮钻爆一体机的设计耐压值进行能量计算, 代入数据得, 高压空气炮钻爆一体机的最高爆破能量为 7499. 28 kJ。

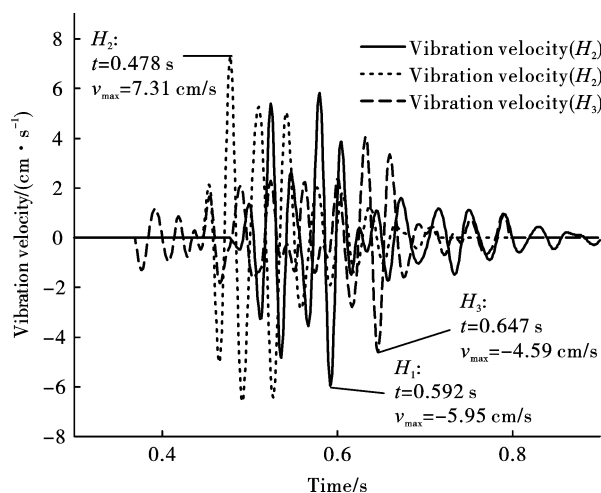


图 17 S 点振动波形图
Fig. 17 Vibration waveform diagram of point S



图 18 S 点噪音测量
Fig. 18 Noise measurement at point S

高压空气炮钻爆一体机的近似 TNT 当量 W_{TNT} (单位为 kg) 可以利用下式计算

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E_g}{Q_{\text{TNT}}} \quad (2)$$

式中: Q_{TNT} 为 1 kg TNT 爆炸能, 取 4250 kJ/kg, 经计算, 高压空气炮钻爆一体机的最高爆破能量 TNT 当量为 3. 061 kg。

根据式(1)~(2)计算可得, 1~3#水平孔, 理论

爆破能量分别为:499.28 kJ、949.28 kJ、749.28 kJ,其TNT当量分别为:203.788 g、387.461 g、305.829 g;3个竖直孔的理论爆破能量均为949.28 kJ,TNT当量为387.461 g。

4.2 高压空气炮冲击破岩效果与能量利用率分析

能量利用率可通过“单位TNT当量破碎的岩石体积”或“裂纹扩展效率”衡量。对于1#水平孔(低能量204 g TNT):岩体完整性低、临空面近,裂纹总长约3.2 m,裂纹宽度在1.8~2.2 cm之间,假定平均宽度2 cm,破碎体积约 $3.2 \times 0.02 \times 1.5 = 0.096 \text{ m}^3$ (岩体自钻孔孔底向外开裂,故裂纹深度按孔深1.5 m计),单位体积能耗约 $0.204 \text{ kg}/0.096 \text{ m}^3 = 2.125 \text{ kg}/\text{m}^3$;2#水平孔(高能量387 g TNT):主裂纹长2.2 m、平均宽度5 cm(实际宽度为4.7~5.3 cm之间),自钻孔孔底向外开裂,因此深度为1.5 m,体积约 $2.2 \times 0.05 \times 1.5 = 0.165 \text{ m}^3$,单位体积能耗约 $0.387/0.165 \approx 2.345 \text{ kg}/\text{m}^3$ (略高于1#孔,但因压力更高,裂纹宽度更大,实际破碎效率仍较高)。对于1#竖直孔(高能量387 g TNT):裂纹总长5.4 m,平均宽度6.5 mm(实际宽度为6~7 mm),深度为孔深约2.6 m,体积约 $5.4 \times 0.0065 \times 2.6 = 0.0913 \text{ m}^3$,单位体积能耗约 $0.387/0.0913 \approx 4.239 \text{ kg}/\text{m}^3$,显著高于水平孔。由此可见,水平孔的能量利用率更高,尤其在低能量条件下(1#水平孔),能更高效地利用泄压气体膨胀破碎岩石;竖直孔因泄压方向限制,需更多能量克服岩体强度,单位体积能耗更高。

4.3 高压空气炮冲击破岩机制

爆破裂纹扩展过程同时受能量传递路径、岩体原生裂隙及相邻炮孔爆破产生的初始裂纹共同控制。其中,原生裂隙为天然弱面,而初始裂纹则指相邻孔爆破形成的人工破裂带。试验结果表明,水平孔与竖直孔的裂纹扩展模式呈现显著差异,其本质由自由面方向、岩体约束条件及局部介质的不连续性共同决定。在水平孔爆破中,裂纹扩展始终呈现出对自由面的强依赖性,同时受到相邻孔初始破裂区的深刻影响。1#水平孔距临空面最近,高压气体泄压时能量直接指向自由面,导致孔周出现密集、细碎的微裂纹网,呈现典型的自由面效应。2#孔的泄压压力最高,其右侧完整岩体上形成宽约5 cm、长2.2 m的主裂纹带,而左侧裂纹则主要沿1#孔爆破后形成的初始裂纹区扩展。该现象说明,初始裂纹极大改变了局部应力场,使应力强度因子在天然弱面与人工裂纹上优先达到扩展条件,从而使能量更多用于贯通既有裂纹而非生成新裂纹。3#孔位于远自由面方向且紧邻2#孔,其泄压能量需穿越多层完

整岩体及2#孔的破碎区,传播路径长、波阻抗差异大,试验中仅观察到有限的局部裂纹延伸。由此可见,在“远自由面+预破碎区”耦合条件下,由于应力波衰减及破碎区的能量吸收作用,水平孔裂纹扩展效率显著降低。竖直孔爆破的裂纹发展则体现出与重力方向一致的主导趋势,破岩机制主要受自由面方向、孔间应力叠加及岩体三向约束条件控制。1#竖直孔的泄压应力沿竖向自由面方向释放,与岩体自重方向叠加,试验中出现两条近似贯通的竖向主裂纹,符合裂纹沿能量释放阻力最小路径扩展的断裂力学原理。孔后局部横向裂纹则表现为原生结构面的重新激活。2#竖直孔紧邻1#孔,其周围已存在由1#孔产生的初始破裂带,试验中未观察到明显新增裂纹,而是出现约15 cm的整体抬升现象。这说明在低刚度破碎区内,泄压能量主要转化为岩块位移能,而裂纹扩展能明显降低,因此新的主裂纹难以形成。3#竖直孔距离自由面更远并受结构支撑约束,其泄压应力需跨越较长传播路径,且孔周处于较强三向约束状态,应力幅值难以达到岩体动抗拉强度,导致破坏范围最小,仅出现少量微裂纹。

水平孔和竖直孔的破岩机制存在差异,主要体现在自重作用方式不同:水平孔裂纹向上扩展时需要克服上覆岩体自重,自重主要体现在额外抬升功和裂纹扩展阻力上;而竖直孔沿自重方向布置,自重直接改变孔周初始应力场,使起裂条件和裂纹扩展呈现明显的重力方向偏置。该差异可通过能量分解(抬升功在总爆破能中的占比)以及应力强度因子增量 $\Delta K_I \approx Y\rho gH\sqrt{\pi a}$ 等指标进行定量表征,从而给出自重对两类孔破岩效应的可测量差别。

需要指出的是,本研究的主要目的并非提供普适的定量设计参数,而是定性地揭示不同泄压方向对能量利用率的影响趋势,并初步验证高压空气炮冲击破岩技术的可行性及其相对优势,为后续更系统的研究提供依据和方向。

5 结论

本研究针对复杂敏感环境下岩体开挖的工程难题,创新性地提出并研发了基于生物质能高压空气炮冲击破岩原理的高压空气炮钻爆一体机,通过高压空气炮冲击破岩技术实现了绿色、高效、智能的破岩作业。试验研究表明,该技术可替代传统炸药爆破,在硬岩与软岩中均展现出优异的破岩效率与环境适应性,为城市基建、隧道工程及文物保护等敏感场景提供了安全可靠的施工方案,具有重要工程应用价值与推广潜力。该技术通过压缩空气膨胀能驱

动岩体裂纹扩展,在水平孔与竖直孔爆破中均展现出优异性能,水平孔爆破能量利用率达 2.125 ~ 2.345 kg/m³ (TNT 当量换算),可形成连续贯穿裂纹;竖直孔爆破受重力与应力分布影响呈现非对称破裂,但单次爆破仍可实现 10 cm 级岩体分离。相比炸药爆破^[26,29],高压空气炮冲击破岩技术在爆破当量和能量利用率方面虽然不及传统爆破,但该技术消除了有毒气体排放与炸药运输风险,且根据试验数据显示,在爆破破岩过程中产生的振动与噪音显著低于传统爆破,契合国家“双碳”战略与城市敏感区域的环保要求。在义乌市明挖隧道基坑硬岩开挖试验中,高压空气炮钻爆一体机成功应对中风化泥质粉砂岩的破除需求,在该类岩体条件下,水平孔爆破在临空面距离 0.8 m 时裂纹扩展最长,能量利用率最优,竖直孔爆破通过预断裂带“位移强化效应”实现岩块抬升,减少二次破碎成本,验证了技术在实际工程中的可操作性和可靠性。

鉴于本研究主要基于单一工况下的试验数据,未来工作将构建可控实验台架,系统引入不同压强、不同聚能结构及孔网布置的对照组,进一步验证裂纹扩展机制,并建立更具普适性的空气炮破岩力学模型。同时,可结合传感器与自动化控制,实现爆破参数动态优化,并探索高压空气与聚能剂协同增效机制,拓展其在地铁盾构区间、公路边坡治理等工程中的应用潜力,为绿色智慧开挖技术的规模化推广提供支持。

参考文献 (References)

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.6038.
- [1] XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2019.6038. (in Chinese)
- [2] 谢兴华, 张小康. 非爆破破岩法研究综述[J]. 煤矿爆破, 2017(6): 19-23.
- [2] XIE Xing-hua, ZHANG Xiao-kang. Review of the study of non-explosive rock breaking[J]. Coal Mine Blasting, 2017(6): 19-23. (in Chinese)
- [3] XU Ji-zhao, ZHAI Cheng, QIN Lei, et al. Evaluation research of the fracturing capacity of non-explosive expansion material applied to coal-seam roof rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 94: 103-111.
- [4] 谢晓锋, 李夕兵, 李启月, 等. 液态 CO₂ 相变破岩桩井开挖技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 2031-2038.
- [4] XIE Xiao-feng, LI Xi-bing, LI Qi-yue, et al. Liquid CO₂ phase-transforming rock fracturing technology in pile-well excavation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(8): 2031-2038. (in Chinese)
- [5] 梅比, 高星, 方莹, 等. 二氧化碳膨胀爆破新型致裂管与安全技术研究[J]. 爆破, 2021, 38(2): 153-159.
- [5] MEI Bi, GAO Xing, FANG Ying, et al. Study on a new type of fracturing tube and safety technology of carbon dioxide expansion blasting[J]. Blasting, 2021, 38(2): 153-159. (in Chinese)
- [6] 李琳, 王海亮, 周宜, 等. 城市地铁风井金属膨胀剂开挖和爆破开挖技术对比[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 167-173.
- [6] LI Lin, WANG Hai-liang, ZHOU Yi, et al. Comparison and contrast between metal expansive agent blasting and explosive blasting: case study on excavation of a ventilation shaft in urban area[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 167-173. (in Chinese)
- [7] 程刚. 成孔液压胀裂破岩机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [7] CHENG Gang. Research on rock breaking mechanism of hydraulic fracturing breaking rock[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [8] 何方. 液压劈裂技术在隧道静态破碎开挖中的应用[J]. 矿产与地质, 2021, 35(6): 1198-1204. DOI: 10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2021.06.024.
- [8] HE Fang. Application of hydraulic splitting technology in static fracturing excavation of tunnels[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(6): 1198-1204. DOI: 10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2021.06.024. (in Chinese)
- [9] 周云涛, 石胜伟, 张勇, 等. 静态控制爆破破岩断裂贯通机制研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 120-125, 150.
- [9] ZHOU Yun-tao, SHI Sheng-wei, ZHANG Yong, et al. Fracture and cut-through mechanism by static controlling blasting for rock breaking[J]. Blasting, 2017, 34(3): 120-125, 150. (in Chinese)
- [10] 刘爱文, 俞言祥, 付长华, 等. 50 t 科学爆破振动的衰减特征及地形效应[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 21-26.
- [10] LIU Wen-ai, YU Yan-xiang, FU Chang-hua, et al. Attenuation characteristics and topographic effect of a scientific explosion with 50t explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 21-26. (in Chinese)
- [11] JAFAR A, EZZEDDIN B, HADI N. Green biocompatible

- approach to reduce the toxic gases and dust caused by the blasting in surface mining[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3):191.
- [12] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(5):1-65. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.05.001.
- [12] Editorial Department of China Journal of Highway and Transportation. Review on China's tunnel engineering research:2015[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(5):1-65. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2015.05.001. (in Chinese)
- [13] 谭忠盛,杨小林,王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003(2):281-285.
- [13] TAN Zhong-sheng, YANG Xiao-lin, WANG Meng-shu. Effect of blast in double line tunnel on existing tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003(2):281-285. (in Chinese)
- [14] WANG Shao-feng, LI Xi-bing, YAO Jin-rui, et al. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 122:104063.
- [15] JIANG Hong-xiang, ZHANG Xiao-di, ZHAO Hui-he, et al. The mechanism and performance of rock breakage by undercutting disc cutter with advanced slotting[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13:10474. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37576-1>.
- [16] LING Jing-xiu, SUN Chao, WANG Qian-ting, et al. Analysis of rock breaking load characteristics and efficiency optimization of roller cutters under multi-factor coupling[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2024, 28:4055-4066. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1864-z>.
- [17] 颜正勇,胡少斌,卞怡,等. 干冰粉气动压裂混凝土质量比实验研究[J]. *工程爆破*, 2019, 25(5):14-18.
- [17] YAN Zheng-yong, HU Shao-bin, BIAN Yi, et al. Experimental study on the mass ratio of dry ice powder pneumatic fracturing concrete[J]. *Engineering Blasting* 2019, 25(5):14-18. (in Chinese)
- [18] 骆峻伟,胡少斌,黄俊,等. 超临界 CO₂ 热冲击破除技术在硬岩开挖中的应用[J]. *现代交通技术*, 2023, 20(2):31-36.
- [18] LUO Jun-wei, HU Shao-bin, HUANG Jun, et al. Application of supercritical CO₂ thermal shock removal technology in hard rock excavation[J]. *Modern Transportation Technology*, 2023, 20(2):31-36. (in Chinese)
- [19] 王小飞,胡少斌,王恩元,等. 干冰粉气动破岩振动时频能量分析[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(6):172-179. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2023.06.021.
- [19] WANG Xiao-fei, HU Shao-bin, WANG En-yuan, et al. Time-frequency energy analysis on the vibration induced by dry ice powder pneumatic rock breaking[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(6):172-179. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2023.06.021. (in Chinese)
- [20] LIU Xiao-bo, LIU Ji-ping, LI Shu-kui, et al. Research progress and comments on cracking agent[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 392(3):032040.
- [21] 郭荣. 静态膨胀剂的应用[J]. *化工矿山技术*, 1987(2):24-25.
- [21] GUO Rong. Application of static expansive agent[J]. *Chemical Industry & Mining Technology*, 1987(2):24-25. (in Chinese)
- [22] HASSOCK, FU K. Static demolition by calcium oxide[J]. *Journal of the Japan Explosive society*, 2001, 6(5):225-232.
- [23] 徐颖,程玉生,王家来. 国外高压气体爆破[J]. *煤炭科学技术*, 1997(5):53-54. DOI:10.13199/j.cst.1997.05.53.xuy.019.
- [23] XU Ying, CHENG Yu-sheng, WANG Jia-lai. Foreign high-pressure gas blasting[J]. *Coal Science and Technology*, 1997(5):53-54. DOI:10.13199/j.cst.1997.05.53.xuy.019. (in Chinese)
- [24] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. *爆破*, 1994(3):72-74.
- [24] GUO Zhi-xing. Liquid carbon dioxide blasting cartridge and on-site test blasting[J]. *Blasting*, 1994(3):72-74. (in Chinese)
- [25] 陶明,赵华涛,李夕兵,等. 液态 CO₂ 相变致裂破岩与炸药破岩综合对比分析[J]. *爆破*, 2018, 35(2):41-49.
- [25] TAO Ming, ZHAO Hua-tao, LI Xi-bing, et al. Comprehensive comparative analysis of liquid CO₂ phase change fracturing and explosive rock fracturing[J]. *Blasting*, 2018, 35(2):41-49. (in Chinese)
- [26] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(2):80-83. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.02.018.
- [26] HUO Zhong-gang. New technology of carbon dioxide fracturer applied to deep borehole pre-cracking blasting for seam permeability improvement[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2):80-83. DOI:10.13199/j.cnki.cst.2015.02.018. (in Chinese)
- [27] HU Shao-bin, PANG Shuo-gang, YAN Zheng-yong. A new dynamic fracturing method: deflagration fracturing technology with carbon dioxide[J]. *International Journal of Fracture*, 2019, 220(1):99-111.