DOI:10.11883/bzycj- 2026-0225

液氧水下炸礁关键技术与工程验证

丁宝山[1]，徐磊[1]，付代睿[1]，王雁冰[1,2*]，乐海涛[3]，赵临生[3]，刘润君[4]，杨新锋[4]，李春江[4]，张胜文[4]，许紫峰[1]，李乐尔[1]

（1.中国矿业大学（北京）力学与土木工程学院，北京，100083；
2.矿业大学（北京）江西研究院，江西赣州，341001；
3.广西国方建设工程有限责任公司，广西南宁，530006；
4.甘肃兰金民用爆炸高新技术有限责任公司，甘肃兰州，730020）

摘要：针对生态敏感区域水下碍航岩体清除过程中的动力扰动控制需求，以平陆运河近海段水下碍航岩体清除工程为背景，建立液氧水下破礁装备及施工技术体系，并结合 7 组现场监测资料分析水击波与陆域振动响应。该体系集成液氧致裂药包、水上钻孔施工平台、RTK 高精度定位、移动式液氧充装及循环施工工艺，形成了适应水下作业条件的连续施工组织模式。结果表明：钻孔工况水击波超压随传播距离增加呈幂函数衰减规律，峰值为 0.0145～0.0628 MPa，同次试验中较远测点的峰值均较低；近场三向最大峰值振速为 0.80～1.07 cm/s，远场为 0.12～0.20 cm/s，其中最大值 1.07 cm/s 对应主频 41.3 Hz，低于一般民用建筑物相应频段允许振速范围的下限。研究形成了施工体系集成与水体压力、陆域振动联合观测相结合的工程应用方法，展示了该技术较低的动力扰动特征，可为生态敏感区域水下碍航岩体清除及类似工程提供技术参考。

关键词：液氧瞬态膨胀；水下破礁；水击波；爆破振动；动力扰动；工程验证

Key Technologies and Engineering Validation of Liquid Oxygen Underwater Reef Blasting

DING Baoshan[1], XU Lei[1], FU Dairui[1], WANG Yanbing[1,2*], LE Haitao[3], ZHAO Linsheng[3], Liu Runjun[4], Yang Xinfeng[4], LI Chunjiang[4], ZHANG Shengwen[4], Xu Zifeng[1], Li Leer[1]

*(1.School of Mechanics and Civil Engineering,China University of Mining and Technology-Beijing,Beijing 100083,China
2.Jiangxi Research Institute, China University of Mining and Technology-Beijing, Ganzhou, Jiangxi, 341001, People's Republic of China;
3.Guangxi Guofang Construction Engineering Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530006, China;
4.Gansu Lanjin Civil Explosives High-Tech Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730020)*

Abstract: An integrated construction system for liquid oxygen underwater rock fracturing was investigated to address the need for dynamic disturbance control during the removal of underwater rock obstructions in ecologically sensitive areas. The engineering application was based on an offshore section of the Pinglu Canal, where underwater operations were affected by tidal variations, limited visibility, and construction windows. Liquid oxygen fracturing charges, a floating drilling platform, real-time kinematic (RTK) positioning, mobile filling equipment, and cyclic construction procedures were integrated to connect drilling, charge placement, initiation, inspection, and rock removal. Seven field tests were conducted, comprising four borehole rock-fracturing conditions and three free-release conditions in water. Water pressure and three-component land-based vibration were monitored to characterize responses in the two propagation media. Pressure sensors were arranged at two water monitoring points, while vibration instruments were deployed at two onshore monitoring points. Peak overpressures, peak

基金项目：国家自然科学基金（NO.52574184）；中央高校基本科研业务费专项资金（NO.2025JCCXLJ01）。

第一作者：丁宝山（2001-），男，汉族，河南周口人，学士。Email：2339858972@qq.com

通讯作者：王雁冰（1987-），男，汉族，山东潍坊人，副教授，博士生导师，主要从事工程爆破与岩石破碎方面的科研和教学工作。Email：ceowyb818@163.com。

录用稿件，非最终出版稿

particle velocities, dominant frequencies, and source-to-monitoring distances were compiled for comparison. The total mass of the filled fracturing assembly was distinguished from the liquid oxygen filling mass when interpreting the monitoring records. Power-law empirical regression was performed on the borehole pressure data after logarithmic transformation, and vibration attenuation was examined using the recorded vertical-component velocities. The maximum velocity among the three measured components was used to summarize the vibration levels. The results show that peak water shock wave overpressures under borehole conditions range from 0.0145 to 0.0628 MPa, and the more distant monitoring point in each test consistently records a lower peak. The pressure data exhibit a power-law attenuation trend with increasing propagation distance. The maximum three-component peak particle velocities range from 0.80 to 1.07 cm/s in the near field and from 0.12 to 0.20 cm/s in the far field. The highest measured velocity of 1.07 cm/s corresponds to a dominant frequency of 41.3 Hz and is below the lower bound of the allowable velocity range for general civil buildings in the corresponding frequency band. The integrated construction system and joint observations of water pressure and onshore vibration demonstrate low dynamic disturbance under the investigated engineering conditions. These findings provide an engineering reference for underwater obstruction removal and similar nearshore projects requiring coordination between construction operations and surrounding dynamic disturbance control.
Keywords: liquid oxygen transient expansion; underwater rock fracturing; underwater shock wave; blasting vibration; dynamic disturbance; engineering validation

引言

随着海洋经济的快速发展和内河航运网络的不断完善，港口建设、航道扩建及疏浚工程日益增多，水下炸礁作为清除水下基岩障碍物、保障航道通航尺度的重要技术手段，在水运工程中得到广泛应用[1-5]。水下爆破作业受潮流、水深、水压及水下地形等因素影响显著，施工环境复杂[6]。传统炸药爆破凭借能量密度高、破岩效率高等优势，长期占据水下炸礁工程的主导地位，但其产生的爆破振动、水击波、飞石风险及有毒有害气体排放等问题，也对周边涉水建筑物、通航船舶、水生生物和生态环境造成潜在威胁[7-10]。因此，探索安全、高效、环保的绿色水下破岩替代技术，已成为水运工程建设和爆破工程领域的重要研究方向。

近年来，国内外学者围绕水下钻孔爆破的破岩机理、参数优化及有害效应控制开展了大量研究[11]。赵根等[12]系统总结了水下爆破破岩机理与参数优化方面的研究进展；刘琳等[13]基于 Fluent-EDEM 流固耦合模型分析了自由面对水下爆破抛掷效果和爆堆形态的影响；王明明等[14]采用工业电子雷管逐孔起爆技术，验证了其在控制爆破振动、水击波和改善碎岩效果方面的作用；喻灿星等[15]通过优化梅花形布孔和微差起爆网络，降低了水下炸礁对周边环境的影响；岳凯国等[16]针对平陆运河复杂敏感环境，提出了基于爆破地震波和水击波安全允许距离验算的最大单段药量控制方法；张宇等[17]则从装药设计和网络起爆系统角度，分析了多级延时起爆在深水分层炸礁中的应用效果。总体来看，现有研究已形成了较为成熟的水下炸礁控制技术，为水下爆破施工提供了技术支撑，但其本质上仍以炸药爆破为核心，难以完全避免高瞬态冲击、强扰动和生态环境影响。在此背景下，二氧化碳致裂[18-20]、机械破碎[21]、高能燃烧剂[22]和液氧瞬态膨胀[23]等非炸药破岩技术逐渐受到关注。其中，液氧瞬态膨胀破岩技术具有本质安全性较高、反应产物清洁、振动可控和施工成本较低等特点并在部分陆上工程中已有应用报道[24]。吴健辉等[25,26]通过现场试验、图像识别块度分析与全域振动监测，验证了其在多裂隙硬岩中的应用效果；曾华恒等[27]建立了不耦合液氧膨胀破岩孔壁峰值压力计算模型，揭示了孔壁压力随不耦合系数的变化规律；雷振等[28]结合现场振动测试与室内试验，分析了液氧储能破岩的爆破特征和关键控制因素；王雁冰等[29,30]则从理论分析与可视化试验角度揭示了液氧瞬态膨胀破岩的能量释放模式和裂纹扩展机制，并进一步通过试验与数值模拟揭示了液氧相变致裂过程中裂纹起裂与扩展规律。上述研究表明，液氧瞬态膨胀破岩技术在陆上硬岩破碎中已积累一定应用经验，但针对水下复杂工况，尤其是生态敏感水域中的装备适应性、施工工艺、参数控制和环保效应研究仍相对不

录用稿件，非最终出版稿

足[31,32]。

已有陆上破岩经验向水下迁移时，还需面对水压、密封、潮流、能见度及水上平台稳定性等条件差异；机械破碎的应用受到船机作业条件和岩体可达性的制约，气体致裂类技术的水下适用性也不能仅由陆上效果推定。本研究以平陆运河航道液氧水下炸礁工程为背景，针对生态敏感水域中水下碍航岩体清除需求，开展液氧瞬态膨胀破岩技术的工程应用研究。结合工程地质与水文条件，建立水下定位、钻孔平台、充装装备和循环作业相协同的施工技术体系，并通过水击波与三向振动监测分析施工动力响应。研究从装备工序集成与工程监测两个方面补充液氧破岩技术的水下应用经验，为类似水域的施工组织和动力扰动评价提供参考。

1 工程概况

平陆运河是西部陆海新通道骨干工程，起于西江干流西津库区南宁横州市平塘江口，经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江干流南下进入北部湾钦州港海域，全长约 134.2 km，按内河Ⅰ级航道标准建设，可通航 5000 t 级船舶。本研究标段位于运河入海口近海段，是运河由内河航道进入北部湾海域前的重要控制性区段，局部水下硬质岩体侵入设计航道断面，需进行破岩清除。

在该标段水下碍航岩体清除范围内，设计航道底标高为-7.81 m，需严格按照航道设计断面控制开挖精度，以满足安全通航要求。本次施工影响范围内岩体清除面积约为 3620 m^2，对应需处理的水下岩体工程量约 10000 m^3，整体作业规模中等偏大，且受限于水下能见度低与定位误差累积效应，对爆破/破岩精度控制提出较高要求。施工水域邻近红树林保护区、牡蛎种质资源保护区及传统生蚝养殖基地，对水体扰动、水击波、悬浮泥沙扩散和污染物排放较为敏感，因此不仅要求满足水下破岩施工效率和成槽质量，还需严格控制施工过程对周边生态环境的影响。

根据现场勘察及施工反馈，施工区作业水深约 5～7 m，河床局部基岩裸露或覆盖层较薄，需清除岩体以红砂岩为主，下伏岩体具有接近花岗岩的硬岩特征，岩石单轴抗压强度约为 70～90 MPa，整体强度较高，局部完整性较好，破碎难度较大。同时，工程区受潮汐影响明显，水位和流速具有周期性变化特征，潮流作用会对施工船机定位、钻孔稳定性、破岩装置安放精度及悬浮物扩散范围产生影响。综合考虑工程区生态敏感性、岩体强度、水深条件、施工安全及工期要求，本研究采用液氧瞬态膨胀破岩技术进行水下碍航岩体清除。



图 1 工程区位置及生态敏感目标分布

Fig.1 Location of the engineering area and distribution of ecologically sensitive targets

2 液氧水下破礁关键技术体系

水下液氧瞬态膨胀破礁技术是一种利用液氧爆燃后快速相变气化产生高压气体，实现岩体劈裂破碎的新型水下破岩技术。本工程针对近海施工受潮汐、施工窗口及水下作业条件制约的特点，从岩体耗能和介质传播条件分析较低动力响应的可能原因，并对水下应用环节进行集成归纳，形成了装备、定位与工序协同的施工组织方式，结合现场压力与振动数据讨论其动力响应。

2.1 液氧致裂参数设计

液氧致裂药包及孔网参数是现场施工体系的组成部分。本工程结合岩体条件、水下作业环境和施工组织要求配置药包与孔网，相关参数取自工程采用方案及施工经验。围绕药包结构、孔网布置及工序衔接介绍其工程应用，明确各环节在水下施工体系中的配合关系，为理解后续现场监测结果及类似工程的方案论证提供基础。

2.1.1 液氧致裂药包结构

液氧水下药包不仅需要承受静水压力作用，还需避免水体渗入导致液氧提前失效，因此药包结构必须兼顾低温适应性、密封可靠性及现场施工便利性。



图 2 液氧致裂药包实物

Fig.2 Physical specimen of the liquid oxygen-induced deflagration agent package

药包外壳采用高强度聚乙烯（Polyethylene，PE）管材加工制造，标准长度为 4 m，设置 105 mm、97 mm 及 90 mm 三种规格。本工程结合 115 mm 炮孔尺寸及药包下放间隙要求，最终选用外径 90 mm、壁厚 3.5 mm 的 PE 管作为药包外壳，在保证结构强度的同时，提高了药包下放效率，如图 2 所示。药包内部填充定制纸卷作为液氧吸收剂，每段长度约 20 cm。纸卷能够充分吸附液氧，提高液氧在药包内部的分布均匀性，有效减缓充装过程中液氧流动，提高液氧利用率，并保证爆燃过程能量释放更加均匀稳定。

药包充装端采用同轴双管充排结构，如图 3。内部设置直径 12 mm 聚氯乙烯（Polyvinyl Chloride，PVC）充液管，外部套设直径 18 mm PVC 保护管，形成“粗套细”组合结构。其中，细管作为液氧充装通道，粗管同时承担起爆线敷设及排气功能。液氧充装过程中，药包内部不断产生气化氧气，高压气体通过外层排气管及时排出，有效避免药包内部压力异常升高。为防止施工初期海水进入排气系统，在粗细管连接部位采用防水电工胶带进行临时密封。当液氧开始充装后，随着药包内部压力不断升高，密封胶带自动冲开，排气系统恢复正常工作，实现动态排气。

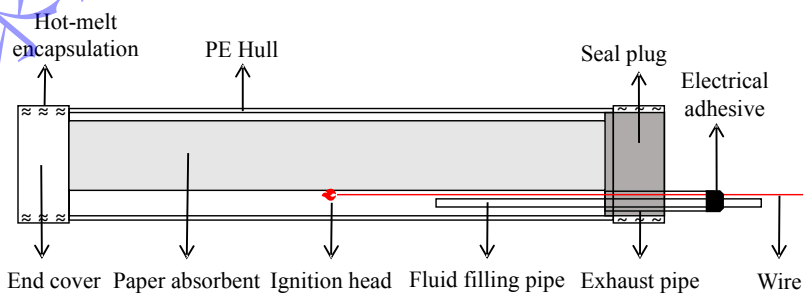


图 3 液氧致裂药包结构

Fig.3 Structure of the liquid oxygen-induced deflagration composition package

药包密封性能是整个液氧破岩系统可靠运行的关键。本工程采用“热熔封装+密封胶塞+环氧树脂

录用稿件，非最终出版稿

二次密封”三重密封工艺。首先利用热熔技术完成药包端部整体封装，再采用专用密封胶塞封堵接口，最后利用环氧树脂对充排气接口进行二次密封处理，从而形成完整可靠的防水密封体系，有效避免海水渗入导致液氧提前气化失效。所有药包均在工厂完成标准化预制加工，运输至施工现场后仅进行液氧现场充装，大幅提高了施工效率，同时降低了现场制作药包带来的质量风险。

2.1.2 孔网参数设计

孔网参数直接影响液氧爆燃膨胀气体在岩体中的传播范围及裂纹扩展形式，是决定岩石破碎效果的重要因素。

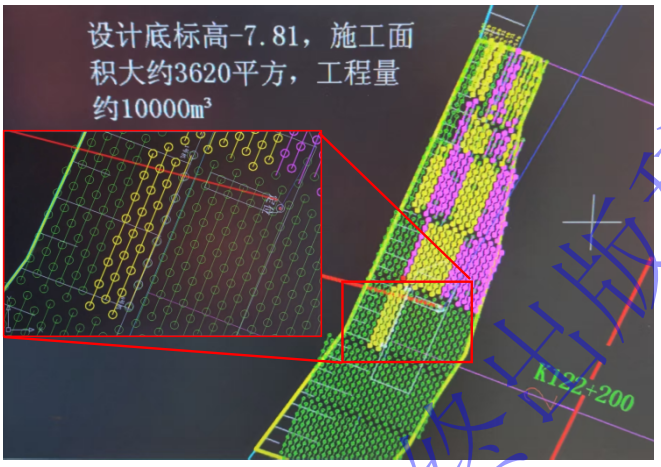


图 4 炮孔布置及孔网参数

Fig.4 Charge hole layout and hole network parameters

结合施工区域岩体强度、水深条件及设计航道底标高要求，现场采用潜孔钻机施工，炮孔直径 115 mm，设计孔深 5 m。炮孔按照一排 8 孔进行布置，孔距 3.0 m，排距 1.5 m。考虑液氧膨胀破岩主要依靠抵抗线方向形成拉伸破坏，因此采用非等边距孔网形式，提高相邻炮孔裂纹贯通能力，促进岩体整体剥离。

整个施工采用循环流水作业方式，每日可完成 9～10 个爆破循环。钻孔、装填、起爆、检查与清礁等环节依次衔接，并通过现场检查、测深及清礁反馈复核施工区域的处理情况，形成连续推进的水下破礁作业流程。该组织方式将水上平台作业与水下岩体处理相结合，便于在施工窗口内统筹工序安排和作业区转移。

2.2 水下施工核心装备

液氧水下破礁施工需要多种专用装备协同作业，包括钻孔施工平台、定位系统、导向套管及液氧充装平台等，共同构成完整的施工装备体系。

2.2.1 钻孔与定位平台



图 5 液氧水下破礁钻孔施工平台

Fig.5 Floating drilling platform for liquid oxygen underwater rock fracturing

录用稿件，非最终出版稿

本工程采用专用炸礁作业船作为水下钻孔施工平台，如图 5。平台集成钻孔、定位、套管跟进及施工管理等多项功能，共布置 8 台液压潜孔钻机，可同时完成 8 个炮孔钻凿，与现场孔网布置形式相匹配，大幅提高了施工效率。

由于施工区域受潮汐及水流影响明显，平台定位精度直接影响炮孔位置及破岩效果。现场采用六缆定位系统，包括前后主缆、左右边缆及两条沉链。沉链依靠自重固定于河床，在提供稳定锚固力的同时，不影响施工水域正常通航。

为了进一步提高施工精度，平台同步配备 RTK-DGPS 高精度定位系统，实时监测施工船平面坐标及潮位变化，操作人员可根据定位信息及时调整船位，实现炮孔位置的精准控制。

2.2.2 套管导向成孔技术

由于施工区域覆盖层较薄，钻孔过程中易受到潮流冲刷及孔壁坍塌影响，因此采用 150 mm 钢制套管跟进钻孔工艺。

钻孔过程中，套管同步跟随钻头下放至基岩面，在隔离外部水流的同时，为潜孔钻机提供稳定导向，提高了炮孔垂直度及孔底位置精度。

钻孔完成后，液氧药包沿套管缓慢下放至设计位置，并采用碎石进行孔口封堵，使药包保持稳定，随后拔出套管，减少液氧逸散，提高液氧利用效率。

2.2.3 液氧移动充装系统



图 6 水上液氧充装作业

Fig.6 Liquid oxygen filling operations on water

液氧充装系统主要由充装作业船、小型充装平台、液氧杜瓦罐、低温输液管路及起爆线路组成。

现场采用移动式充装平台紧邻钻孔平台布置，通过柔性低温输液管将液氧输送至孔内药包，同时起爆线路统一布设于平台上，形成充装、检测及起爆一体化作业模式。液氧储存采用杜瓦罐供液方式，单次液氧回充时间约 10～15 min，配置 4 个杜瓦罐即可满足连续 3 排炮孔充装要求，可与钻孔作业形成流水施工，提高施工连续性。

为了保证施工安全，现场按照液氧储存区、充装区及起爆控制区进行功能分区，各区域分别设置专人负责，并严格控制充装、联网及起爆时间，保证整个施工过程安全有序。

2.3 液氧水下破礁施工工艺

液氧瞬态膨胀破岩具有液氧现场充装、即充即爆的施工特点，各工序之间具有较强的时序关联性。为保证液氧利用效率及水下破岩效果，本工程建立了标准化循环施工工艺，如图 7。

（1）施工定位

施工开始前，根据设计孔网布置对炸礁作业船进行定位，并利用 RTK-DGPS 系统实时校核船舶

录用稿件，非最终出版稿

位置及炮孔坐标，确保钻机中心与设计孔位一致。定位完成后，对平台稳定状态进行检查，为后续钻孔施工创造稳定作业条件。

（2）钻孔成孔

定位完成后，利用潜孔钻机同步开展钻孔作业，在护壁套管保护下钻凿设计炮孔。钻孔过程中严格控制孔深、孔位及垂直度，钻至设计深度后进行清孔检查，确保孔内无明显沉渣和堵塞，为药包顺利下放提供条件。

（3）药包安装与孔口封堵

钻孔验收合格后，将预制液氧致裂药包缓慢下放至设计孔底位置。药包安装完成后，对炮孔上部采用碎石进行封堵，提高孔内约束作用，减少液氧充装过程中气体逸散，同时保证药包在孔内保持稳定。

（4）液氧充装与连线检查

药包安装完成后，将充液管接入供液系统，对各炮孔依次进行液氧充装。单次充装时间约为10～15 min，当排气口连续排出稳定白色低温氧雾时，表明药包内部吸收剂已充分吸附液氧，可停止充装。随后拆除充液管路，并完成起爆线路连接及导通检查，确认各炮孔处于待起爆状态。

（5）安全警戒与起爆作业

完成充装及线路检查后，立即组织施工人员及作业船舶撤离至安全区域，并设置警戒范围。确认现场满足起爆条件后，按照既定起爆顺序实施集中起爆。液氧爆燃后迅速释放大量高压气体，在炮孔内形成持续膨胀压力，使岩体沿自由面及节理裂隙扩展破坏，实现水下硬岩高效破碎。

（6）效果检测与循环施工

起爆结束后，对施工区域进行水下检查，结合测深及清礁情况评价破碎效果，并对槽底标高及残留岩体进行复核。对于局部未达到设计要求的区域实施补孔处理；满足要求后，施工平台按照设计排距移动至下一施工带，重复上述施工流程，实现连续、高效的循环清礁作业。

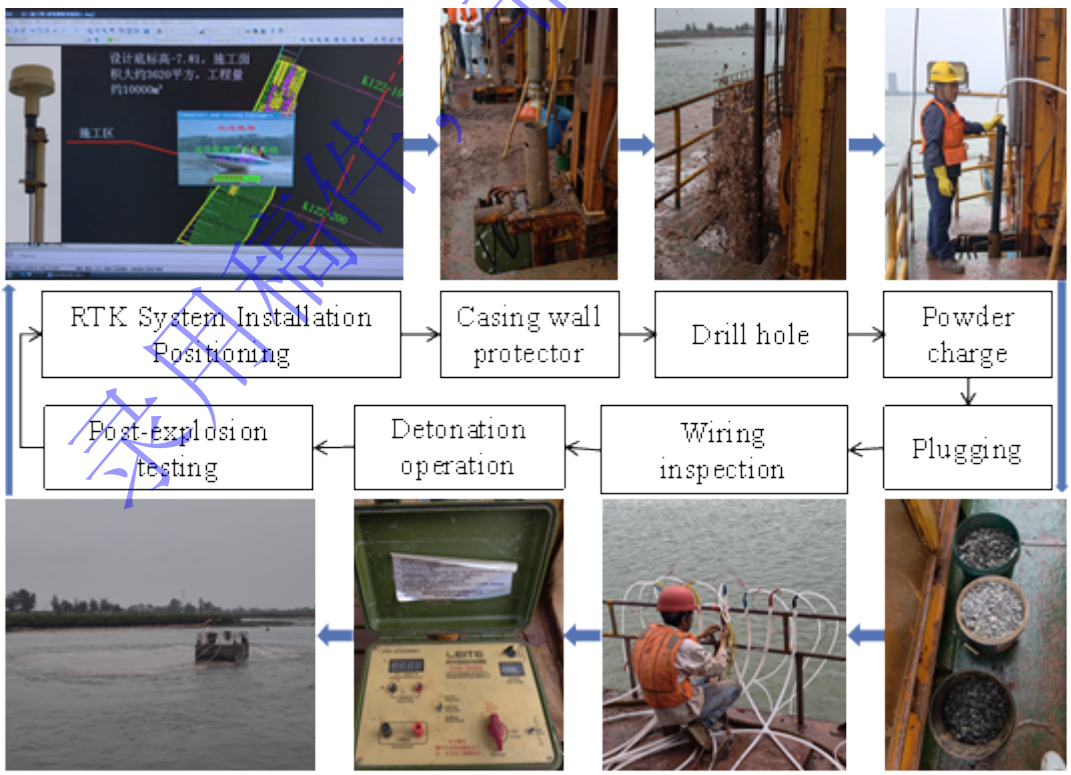


图 7 液氧水下破礁循环施工工艺

Fig.7 Cyclic construction procedure for liquid oxygen underwater rock fracturing

录用稿件，非最终出版稿

3 工程应用验证与环境效应分析

为评价液氧瞬态膨胀破岩技术的工程应用表现，结合现场施工对水击波和陆域振动开展监测分析。针对水下破岩的水体压力与岸上振动两类动力响应，构建由监测设备、测点布置及实际施工工况组成的工程验证方案，为分析施工动力扰动及类似工程应用提供现场依据。

3.1 工程验证方案

3.1.1 监测设备

（1）水击波监测系统

水击波采用 Blast-PRO 型冲击测试采集仪配合 PCB-W138 型水下压力传感器进行同步监测，见图 8。Blast-PRO 采集仪采用全并行同步采集方式，采样频率最高可达 4 MHz，有效测量频率大于 500 kHz，能够满足水击波瞬态压力信号的高速采集需求。

PCB-W138 型水下压力传感器量程为 6895～344750 kPa，谐振频率不低于 1 MHz，上升时间小于 1.5 μs，压力分辨率为 0.14 kPa，可准确捕获液氧爆燃产生的高频瞬态水击波压力变化，为冲击波传播规律分析提供可靠数据支撑。

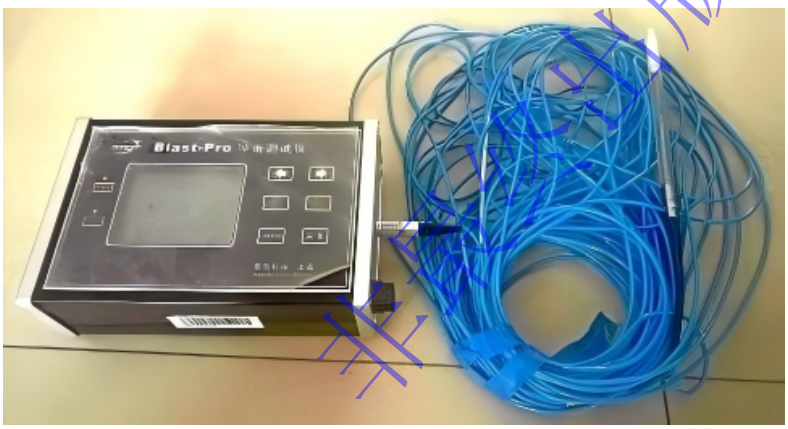


图 8 水击波监测设备及传感器

Fig.8 Water pressure monitoring equipment and sensors

（2）振动监测系统

振动采用 Blast-UM 型爆破振动监测仪进行测试。该设备可配置 TG-320 三向加速度传感器及 TT-3A 三向速度传感器，实现振动加速度与振动速度同步监测。监测仪内置高分辨率彩色 LCD 显示屏，可独立完成数据采集、存储及现场显示，适用于复杂野外施工环境，见图 9。



图 9 Blast-UM 型爆破振动监测仪

Fig.9 Blast-UM blasting vibration monitoring instrument

录用稿件，非最终出版稿

试验过程中，记录仪采用三通道同步采集方式，采样频率设定为 10000 Hz。TG-320 三轴加速度传感器量程为±2 g/±6 g，工作频带为 1～1500 Hz，灵敏度分别为 600 mV/g 和 200 mV/g，信号分辨率优于 0.002 g，能够满足水下液氧破岩低幅值、高频振动信号的测试要求。

3.1.2 测点布置

结合施工区域地形、水深条件及周边环境保护目标，本次工程验证共布设 4 个监测测点，测点布置如图 10 所示。

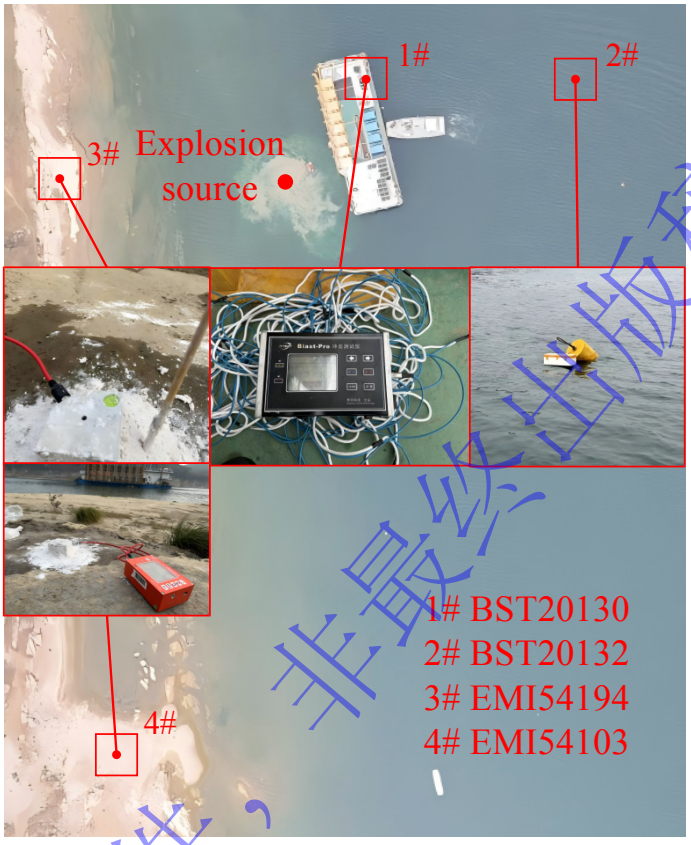


图 10 测点布置现场

Fig.10 Field arrangement of monitoring points

其中，1#、2#测点为水击波监测点，分别布设于施工船一侧船舷附近及航道锚浮标附近，传感器入水深度均为 2 m，用于监测液氧爆燃产生的水中压力波传播特性。

3#、4#测点为陆域振动监测点，分别布设于施工区左岸上游及下游位置，与起爆区域的直线距离约 169 m，主要用于监测爆燃振动对岸坡及周边敏感区域的影响。

通过水击波与陆域振动同步监测，获取相应测点在水体及地层中的动力响应记录，为工程动力扰动分析提供数据支撑。

3.1.3 工况设置

为分析水下不同液氧装药规模及不同工况下液氧瞬态膨胀破岩的动力响应特征，共开展 7 组现场试验。其中，第 1～4 组为实际水下钻孔破岩试验，第 5～7 组为液氧药包水中空放试验，用于研究水中无岩体约束条件下的压力波响应。本次监测依托实际工程实施，通过不同施工条件和传播距离下的测点记录，分析钻孔破岩与水中空放的响应特征，以及压力和振动随距离的变化规律。

除第 4 组试验采用塑料致裂管外，其余试验均采用玻璃钢致裂管，致裂管长度均为 2.0 m。结合现场实施条件，本研究将第 4 组作为不同管材条件下的多孔工程工况纳入分析，重点评价该组整体施工条件对应的动力响应，以补充单孔及少孔工况的工程观测。各组资料共同构成不同现场条件下的动力响应监测序列，主要工况参数见表 1。

录用稿件，非最终出版稿

表 1 现场试验参数

Table 1 Field Test Parameters

试验编号	工况类型	孔数/致裂器	孔深（m）	填塞（m）	孔距×排距（m）	液氧充装量（kg）	备注
1	钻孔破岩	1 孔	3.5	1.5	-	20	玻璃钢
2	钻孔破岩	1 孔	3.5	1.5	-	15	玻璃钢
3	钻孔破岩	2 孔	3.5	1.5	-	30	玻璃钢
4	钻孔破岩	10 孔	3.5	1.5	3.0×1.2	150	塑料管
5	空放试验	1 支	-	-	-	15	水深 10 m
6	空放试验	1 支	-	-	-	20	水深 8 m
7	空放试验	1 支	-	-	-	15	水深 8 m

3.2 水击波传播特性分析

3.2.1 监测结果分析

从表 2 试验结果来看，前 4 次试验监测得到的水击波超压峰值均较低，整体变化范围为 0.0145～0.0628 MPa。其中，试验 1 在 38.1 m 处测得峰值为 0.0538 MPa，而距离增加至 80.5 m 后峰值下降至 0.0229 MPa，峰值降低约 57%；试验 2 分别在 46.3 m 和 79.8 m 处测得 0.0371 MPa 和 0.0145 MPa；试验 3 峰值略有提高，在 48.0 m 处达到 0.0628 MPa，为钻孔试验中的最大值，而 78.4 m 处衰减至 0.0256 MPa；试验 4 采用 10 孔齐爆，致裂管总质量达到 194 kg，但 44.7 m 和 74.9 m 处监测峰值仅分别为 0.059 MPa 和 0.049 MPa，在该组条件下仍保持较低水平。

表 2 水下液氧试验水击波监测成果统计表

Table 2 Statistical Summary of Water-Hammer Wave Monitoring Results from Underwater Liquid Oxygen Tests

试验编号	致裂管总质量（kg）	测点编号	仪器编号	爆源距离（m）	超压峰值（MPa）
1	24.4	1#	BST20130	38.1	0.0538
		2#	BST20132	80.5	0.0229
2	19.4	1#	BST20130	46.3	0.0371
		2#	BST20132	79.8	0.0145
3	38.8	1#	BST20130	48.0	0.0628
		2#	BST20132	78.4	0.0256
4	194	1#	BST20130	44.7	0.059
		2#	BST20132	74.9	0.049
5	19.4	1#	BST20130	135.9	0.025
		2#	BST20132	106.1	0.065
6	24.4	1#	BST20130	170.7	0.1289
		2#	BST20132	150.3	0.1692
7	19.4	1#	BST20130	121.3	0.1976
		2#	BST20132	87.8	0.3367

上述结果表明，在液氧钻孔破岩工况下，水击波峰值并不与充氧总量呈线性增长关系。这是由于

录用稿件，非最终出版稿

液氧爆燃产生的能量主要受炮孔约束，并优先转化为岩体破碎和裂纹扩展所需的膨胀做功，仅有少部分能量以压力波形式向水体辐射，因此即使多孔同时起爆，总药量显著增加，水击波超压仍保持较低水平。这一现象充分体现了液氧瞬态膨胀破岩“以气体膨胀做功为主、冲击波辐射较弱”的作用特点。

另一方面，各次试验均表现出明显的距离衰减规律。同一工况下，距离较远测点的超压峰值均明显低于近测点。说明液氧爆燃产生的水中压力波在传播过程中衰减较快，压力能量随传播距离迅速耗散，远场影响范围有限。相比之下，水中空放试验的监测结果呈现出不同规律，试验 5～7 监测得到的超压峰值范围为 0.025～0.3367 MPa，明显高于钻孔破岩工况。其中，试验 7 在 87.8 m 处测得最大峰值 0.3367 MPa，是全部试验中的最高值；试验 6 在 150.3 m 处仍达到 0.1692 MPa，而试验 5 峰值仅为 0.065 MPa。总体来看，空放试验超压水平约为钻孔破岩工况的 3～6 倍。

造成这一差异的主要原因在于两种工况能量释放方式存在本质区别。空放条件下，液氧爆燃产生的高压气体直接作用于周围水体，绝大部分能量以水击波形式向外传播，因此形成较高的冲击波超压；而钻孔破岩过程中，高压气体首先受到岩体约束，大量能量消耗于岩石裂纹萌生、扩展及块体抛掷过程，仅有少部分能量释放进入水体，因此外辐射冲击波显著减弱。此外，空放试验中不同试次峰值存在一定波动，说明水深、悬挂深度、自由边界及气泡脉动等因素也会对压力波传播产生一定影响。

综合全部试验结果可以看出，液氧瞬态膨胀破岩施工产生的水击波较低，如图 11。第 4 组致裂管总质量为 194 kg，44.7 m 和 74.9 m 处测得超压峰值分别为 0.059 MPa 和 0.049 MPa。结合其他钻孔工况的观测，多孔作业中的压力响应与单孔、少孔工况的实测结果共同展示了液氧水下破岩的水体动力扰动特征，为类似工程的施工方案论证与压力监测布置提供了现场依据。

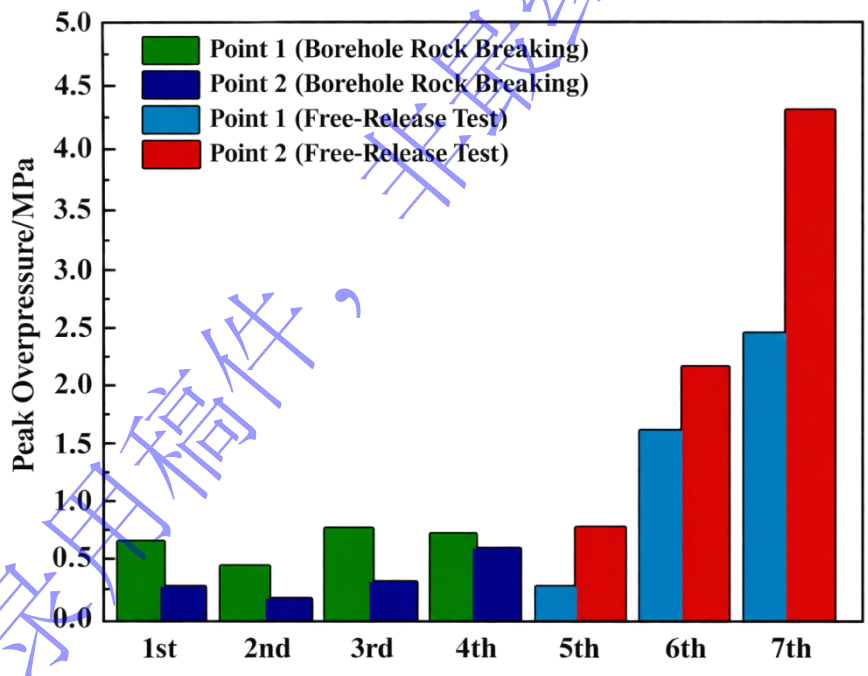


图 11 各工况超压峰值柱状图

Fig.11 Peak overpressures under different test conditions

3.2.2 超压回归分析

为进一步分析液氧水下破岩过程中水击波超压的传播特征，利用现场监测数据进行幂函数经验回归。对超压及缩放变量作对数变换后进行线性拟合，得到原变量下的经验关系为：

$$P_{\mathrm{LO}} = 0.697\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{1.048} \tag{1}$$

式中，P_{LO} 为水击波超压峰值，MPa；Q 为充装后致裂组件总质量，kg，包括液氧、内部填充物

录用稿件，非最终出版稿

及管体，区别于表 1 的液氧充装质量；R 为爆源至测点距离，m；ρ 为 Q 的立方根与 R 之比构成的有量纲缩放变量；A 和 α 分别为经验系数与衰减指数。表 3 所列决定系数对应对数坐标下的拟合结果。水中液氧空放试验由于数据量较少，拟合效果较差，仅对水下钻孔液氧破岩进行回归分析。

表 3 水下钻孔液氧破岩水击波超压衰减回归分析计算表

Table 3 Regression Analysis Calculation Table for the Decay of Overpressure in Water Hammer Waves Induced by Liquid Oxygen in Underwater Drilling Fluids

P_{LO}（MPa）	$ln(P)$	R（m）	Q（kg）	$ln(\rho)$	k=ln(A)	A	α	R^2
0.0538	-2.922	38.1	24.4	-2.575				
0.0229	-3.777	80.5	24.4	-3.323				
0.0371	-3.294	46.3	19.4	-2.847				
0.0145	-4.234	79.8	19.4	-3.391	-0.361	0.697	1.048	0.809
0.0628	-2.768	48.0	38.8	-2.652				
0.0256	-3.665	78.4	38.8	-3.142				
0.059	-2.830	44.7	194	-2.044				
0.049	-3.016	74.9	194	-2.560				

由本组经验关系可见，水击波超压随传播距离增加而减小，当测点距离相同时，增加致裂管总质量会导致超压峰值增大，但增长幅度受距离衰减作用限制，因此远场超压不会随着充氧量增加而同步增大。这表明液氧水下破岩产生的水击波具有明显的快速衰减特性，爆源能量主要集中于近场区域，对远距离水域的影响相对有限，为分析工程现场的水体压力响应提供了定量参考。

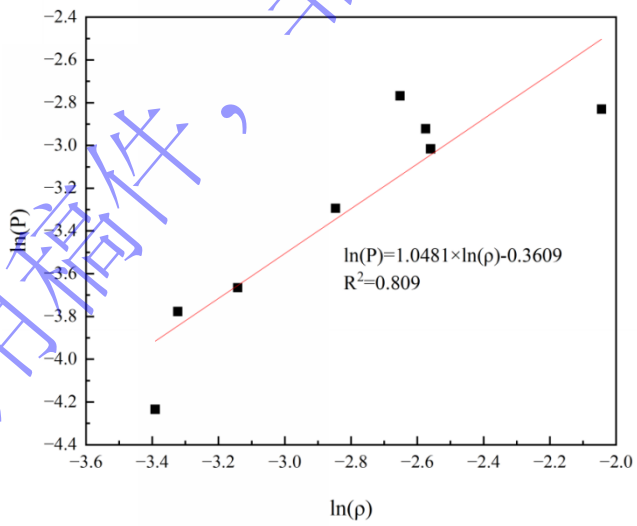


图 12 水下钻孔液氧破岩水击波超压衰减回归分析拟合图

Fig.12 Regression of water shock wave overpressure attenuation under borehole conditions

图 13 为第 2 测点的超压与致裂管总质量的关系，随着致裂管总质量增加，水击波超压峰值总体呈增加趋势，但增长速率逐渐减缓，并表现出明显的对数增长特征。造成这一现象的主要原因在于，群孔液氧起爆过程中各炮孔难以实现严格意义上的同步起爆，不同炮孔之间存在微小起爆时差，使各炮孔释放的能量不能完全叠加，导致整体水击波峰值受到一定程度削弱。因此，在大规模群孔施工条件下，虽然液氧总充装量显著增加，但远场水击波超压并不会呈线性增长，而是表现出较好的增长抑

录用稿件，非最终出版稿

制特性。这一特点对于生态敏感水域的大规模水下破岩施工具有重要意义，有利于降低施工过程中水击波对周边水体环境及水生生物的扰动。

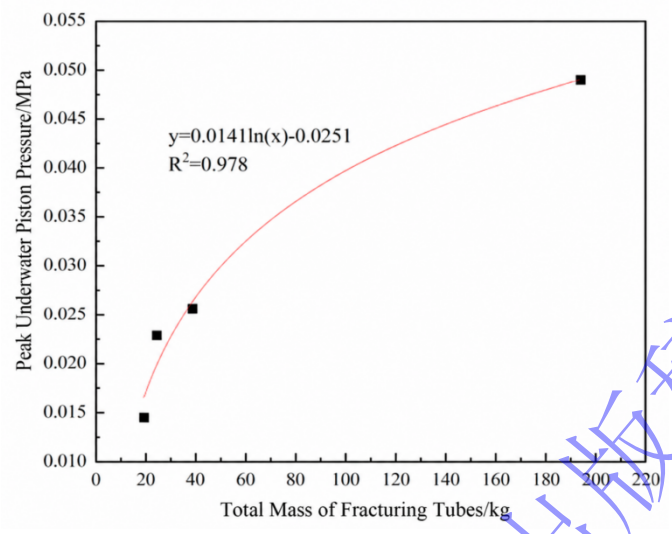


图 13 致裂管总质量与水击波超压峰值关系

Fig.13 Relationship between fracturing assembly mass and peak water shock wave overpressure

表 4 液氧破岩与乳化炸药水击波超压对比

Table 4 Comparison of Overpressure in Liquid Oxygen Rock Disintegration and Emulsified Explosive Water Jetting

工况	距离 R（m）	实测超压峰值 P_y（MPa）	修正超压峰值 P_x（MPa）	乳化炸药质量 Q（kg）	Cole经验公式计算值P_{ee}（MPa）	液氧破岩水击波峰值与乳化炸药之比
钻孔	38.1	0.0538	0.3766	14.6	2.3925	0.157
	80.5	0.0229	0.1603	14.6	1.0274	0.156
	46.3	0.0371	0.2597	11.6	1.7602	0.148
	79.8	0.0145	0.1015	11.6	0.9515	0.107
	48	0.0628	0.4396	23.3	2.1977	0.200
	78.4	0.0256	0.1792	23.3	1.2624	0.142
	44.7	0.059	0.413	116.4	4.3657	0.095
	74.9	0.049	0.343	116.4	2.4363	0.141
空放	135.9	0.025	/	11.6	0.5214	0.048
	106.1	0.065	/	11.6	0.6896	0.094
	170.7	0.1289	/	14.6	0.4394	0.293
	150.3	0.1692	/	14.6	0.5074	0.333
	121.3	0.1976	/	11.6	0.5928	0.333
	87.8	0.3367	/	11.6	0.8541	0.394

为评价液氧水下破岩的压力响应特点，将试验结果与经典 Cole 水下爆炸经验关系进行参照比较，见表 4。Cole 关系用于自由水域条件的理论估算，钻孔工况采用表列修正压力，并按原计算所用的乳化炸药质量及 TNT 当量口径进行比较。结果表明，钻孔工况修正压力与理论参照压力的比值为 9.5%～20.0%，平均约 14%；空放工况为 4.8%～39.4%，平均约 25%。上述参照比较与钻孔工况的实

录用稿件，非最终出版稿

测超压结果相互补充，反映了本研究所列工况下较低的水体压力响应。

综合监测结果与上述参照比较，液氧水下破岩在所研究条件下表现出较低的水击波超压，随着施工规模扩大，群孔起爆并不会导致水击波超压成比例增加。本研究将观测对象扩展至水体压力和岸上振动，结合工程施工条件分析能量在岩体与水体中的作用特征，补充了液氧破岩在水下应用场景中的动力响应资料。水体与陆域两类观测相结合，有助于从不同传播介质理解施工扰动，为类似工程的方案论证和监测布置提供实测依据。

3.3 振动响应特征分析

为评价液氧水下破岩施工对周边建筑物及岸坡稳定性的影响，对现场监测获得的地震波振动数据进行了统计分析，如表 5。采用三向振动速度峰值作为爆破振动评价指标，并以各方向最大振速作为监测结果进行分析。

表 5 液氧水下地震波振动监测成果统计表

Table 5 Statistical Summary of Liquid Oxygen Underwater Seismic Wave Vibration Monitoring Results

工况	致裂管总质量（kg）	测点编号	爆心距（m）	X方向		Y方向		Z方向	
				峰值速度（cm/s）	主频（Hz）	峰值速度（cm/s）	主频（Hz）	峰值速度（cm/s）	主频（Hz）
1	24.4	3#	64.3	0.36	77.7	0.56	28.7	1.07	41.3
		4#	167.0	0.07	21.7	0.13	31.3	0.12	30.8
2	19.4	3#	63.9	0.34	77.7	0.63	68.2	0.94	40
		4#	169.6	0.07	33	0.12	31.7	0.07	30
3	38.8	3#	63.9	0.24	77.7	0.58	25.2	0.97	36.5
		4#	175.1	0.11	30.8	0.2	26.9	0.11	26.9
4	194	3#	65.7	0.5	77.7	0.65	35.2	0.8	33.9
		4#	169.5	0.14	31.7	0.17	31.7	0.14	28.7
5	19.4	3#	177.2	0.1	33	0.13	27.8	0.17	23
		4#	155.9	0.17	20.4	0.16	33	0.22	25.6
6	24.4	3#	201.3	0.11	29.1	0.1	22.1	0.16	22.1
		4#	136.3	0.19	19.5	0.22	22.1	0.26	29.1
7	19.4	3#	165.4	0.14	33.9	0.21	36.5	0.28	26.5
		4#	162.6	0.17	19.5	0.13	30.8	0.24	26.5

按表 5 三向最大分量统计，钻孔工况近场峰值振速为 0.80～1.07 cm/s，远场为 0.12～0.20 cm/s；空放工况为 0.16～0.28 cm/s。依据《爆破安全规程》GB 6722—2014 及表 2[33]，以一般民用建筑物作参照，10 Hz＜f≤50 Hz 频段的允许振速为 2.0～2.5 cm/s。表 5 最大值 1.07 cm/s 对应主频 41.3 Hz，低于该参照范围下限，体现了本工程监测条件下较低的陆域振动响应。

不同工况的岸上振动记录可从岩体破裂耗能及介质传播条件加以理解。钻孔条件下，气体作用于岩体并参与裂纹萌生、扩展及岩块分离，部分能量消耗于破裂过程，可能减弱向周围介质辐射的波动响应；水中空放则具有不同的水-岩耦合与传播路径。这说明岩体在液氧致裂过程中不仅是作用对象，同时也对爆燃能量具有明显的吸收和耗散作用，从而有效降低了传播至远场的地震波振动。

为进一步揭示液氧水下破岩地震波的传播规律，根据现场监测数据 Z 方向峰值振速进行了振速衰减线性回归分析，并与国内典型乳化炸药水下钻孔爆破监测结果进行了对比，详见表 6。液氧钻孔

录用稿件，非最终出版稿

破岩、水中液氧空放及乳化炸药钻孔爆破的振速衰减关系分别可表示为：

$$V_{水下}=97.03\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{1.69} \tag{3}$$

$$V_{水中}=32.85\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{1.24} \tag{4}$$

$$V_{乳化}=26.63\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{1.16} \tag{5}$$

式中，V 为本组回归采用的 Z 方向峰值振动速度，cm/s；液氧工况 Q 为充装后致裂组件总质量，乳化炸药工况 Q 为单段最大装药质量，单位均为 kg； 为原记录所列爆心距，m。各工况分别依据相应质量定义进行回归，用于描述其振速随传播距离和施工规模变化的特征。

表 6 国内典型水下乳化炸药爆破振动监测数据

Table 6 Typical domestic underwater emulsion explosive blasting vibration monitoring data

单段最大药量（kg）	爆心距（m）	X方向		Y方向		Z方向	
		峰值速度（cm/s）	主频（Hz）	峰值速度（cm/s）	主频（Hz）	峰值速度（cm/s）	主频（Hz）
48	210	0.43	18.69	0.28	6.35	0.29	7.94
48	240	0.20	8.47	0.16	8.26	0.16	6.19
58	250	0.16	10.99	0.17	10.05	0.11	8.55
58	260	0.22	76.92	0.16	58.82	0.18	83.33
12	130	0.20	18.69	0.18	22.99	0.24	21.28
38	110	0.27	23.26	0.21	20.41	0.66	50.00
82	500	0.09	8.16	0.05	6.58	0.10	9.39
82	260	0.13	11.05	0.14	30.77	0.23	11.43
8	225	0.08	15.87	0.04	20.62	0.13	31.75
8	225	0.08	12.35	0.21	14.08	0.19	17.09
8	213	0.10	16.53	0.06	17.54	0.10	27.03

其中拟合数据中比例药量均小于 0.05，适用于对远区振速衰减规律的刻画。对比上式可知，振速衰减速度水下钻孔液氧破岩最快，其次水中液氧空放，最后乳化炸药钻孔爆破。并以装药量 10 kg 为例，代入式（3）~（5）得到爆源引起的地震波峰值振速随爆源距离的变化趋势如图 14 所示。

三种工况的峰值振速均随传播距离增加而减小，其中液氧钻孔工况的拟合衰减指数较大，表现出振动随距离较快降低的特征。这一现象可能与钻孔条件下气体对岩体的持续作用及破裂耗能有关：部分能量用于裂纹扩展和岩块分离，同时受到水—岩界面耦合传播的影响，使向周围介质辐射的波动发生变化。近、远场监测结果与拟合曲线相互印证，反映了液氧水下破岩振动响应的空间衰减特征。

上述分析表明，液氧水下破岩的工程应用应结合岩体条件、传播距离及周边保护目标，综合考察水体与陆域中的动力响应。对于近海浅水硬岩整治、港池疏浚及水下碍航岩体清除等工程，水击波与岸上振动联合监测能够从不同传播介质反映施工扰动，为兼顾水上作业条件和周边环境保护要求的施

录用稿件，非最终出版稿

工方案论证提供依据。

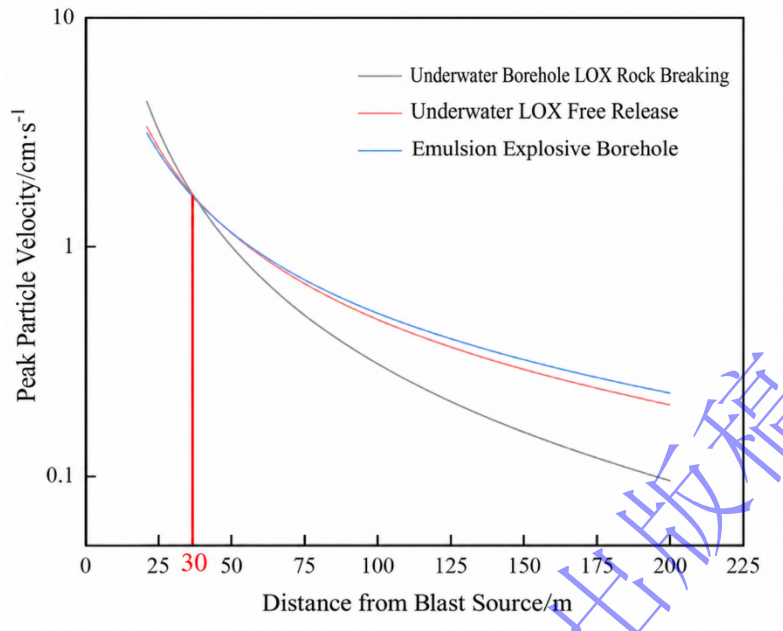


图 14 不同工况地震波峰值振速衰减曲线

Fig.14 Peak vibration velocity attenuation curves under different conditions

4 结论与展望

本文以平陆运河近海段水下碍航岩体清除工程为背景，形成了液氧水下破礁装备及施工技术体系，并结合 7 组现场试验分析水击波与陆域振动响应，主要结论如下：

（1）针对近海水下作业中定位、钻孔、充装与工序衔接的协同需求，将液氧致裂药包、水上钻孔施工平台、RTK 高精度定位及移动式液氧充装装备纳入统一施工流程，形成钻孔、装填、起爆、检查与清礁相衔接的技术体系。现场每日完成 9～10 次作业循环，实现了液氧破岩装备与水下施工组织的衔接，为该技术由陆上应用向水下工程拓展提供了成套施工经验。

（2）依托 7 组现场试验，将水击波与陆域三向振动纳入同一工程分析框架，从水体压力传播和岸上振动响应两个方面表征液氧水下破岩的动力扰动。相较于主要关注岩体致裂过程的研究，本研究进一步将施工体系与周边介质响应联系起来，形成了工程应用与水陆动力监测相结合的研究方法，补充了液氧破岩在水下条件下的现场实测依据。

（3）钻孔破岩工况水击波超压峰值为 0.0145～0.0628 MPa，同次试验中较远测点的峰值均较低。结合致裂组件总质量与传播距离，建立了描述本次钻孔工况超压变化的幂函数经验关系，归纳了现场水击波的距离衰减规律。按表 4 计算口径，钻孔工况修正压力与 Cole 理论参照压力的比值为 9.5%～20.0%，平均约 14%，与现场监测结果共同反映了本研究工况下较低的水体压力响应。

（4）钻孔工况近场三向最大峰值振速为 0.80～1.07 cm/s，远场为 0.12～0.20 cm/s；最大值 1.07 cm/s 对应主频 41.3 Hz，低于一般民用建筑物相应频段允许振速范围的下限。所比较资料中，液氧钻孔工况的振速拟合衰减指数较大，体现了较低振动响应与较快距离衰减的特点，为类似水下工程的周边振动控制提供了实测依据。

后续可进一步拓展不同岩性、水深及水域边界条件下的工程应用，完善施工条件与动力响应之间的联系，并结合水质、悬浮物及水生生物响应等指标，深化液氧水下破岩技术在生态敏感水域中的综合应用研究。

录用稿件，非最终出版稿

参考文献

[1] 王显张,陶好好,蒋贤亮,等. 基于数字孪生的大型航道工程爆破超欠挖控制研究[J/OL].水利水运工程学报,1-11.
WANG X Z, TAO H H, JIANG X L, et al. Control of blasting overbreak and underbreak in large-scale waterway projects based on digital twins[J/OL]. Hydro-Science and Engineering, 1-11.

[2] 柴鑫,杨超. 长江上游航道整治工程水下炸礁清渣施工技术措施探讨[J].中国水运,2025,(19)77-79.
CHAI X, YANG C. Technical measures for underwater reef blasting and debris removal in waterway regulation projects on the upper Yangtze River[J]. China Water Transport, 2025(19): 77-79.

[3] 张海民,李天丙. 水下爆破技术在内河码头的应用[J].珠江水运,2024,(6)136-138.
ZHANG H M, LI T B. Application of underwater blasting technology in inland river terminals[J]. Pearl River Water Transport, 2024(6): 136-138.

[4] 龙桂惠. 港口与航道疏浚工程中水下炸礁浅点控制技术的应用[J].珠江水运,2023,(19)50-52.
LONG G H. Application of shallow-point control technology for underwater reef blasting in port and waterway dredging projects[J]. Pearl River Water Transport, 2023(19): 50-52.

[5] 王忠康,杨仕教,王富林,等. 港口航道水下炸礁工程实践[J].爆破,2016,33(2)123-127.
WANG Z K, YANG S J, WANG F L, et al. Engineering practice of underwater reef blasting in port waterways[J]. Blasting, 2016, 33(2): 123-127.

[6] KAUSHIK A P, HIMANSHU V K, ROY M P, et al. Comprehensive review on principles and practices of underwater drilling and blasting, its environmental impacts, and mitigation techniques[J]. Sādhanā, 2024, 49(1): 21.

[7] 初建鹏,周方毅,詹发民,等. 水下爆炸测试技术研究综述[J].工程爆破,2025,31(4)55-65.
CHU J P, ZHOU F Y, ZHAN F M, et al. A review of underwater explosion testing techniques[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(4): 55-65.

[8] NOWAK P R, SZLACHTA A, GAJEWSKI T, et al. Small-scale underwater explosion in shallow-water tank[J]. Ocean Engineering, 2023, 288: 115894.

[9] HUANG C, LIU M, WANG B, et al. Underwater explosion of slender explosives: directional effects of shock waves and structure responses[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 130:266-280.

[10] LIU Z, NIE J X, KAN R Z, et al. Shockwave characteristics of ammonium perchlorate-modified aluminized exp losives in underwater explosion[J]. Acta Mechanica Sinica, 2026, 42(8):325536.

[11] WU L, LIANG Z, CHEN M. Experiments and simulation of block motion in underwater bench blasting[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 4703.

[12] 赵根,黎卫超. 水下爆破技术发展[J].爆破,2020,37(1)1-12.
ZHAO G, LI W C. Development of underwater blasting technology[J]. Blasting, 2020, 37(1): 1-12.

[13] 刘琳,吴亮,张澳,等. 水下炸礁中自由面数目对破碎与爆堆形态的影响[J].工程爆破,2025,31(5)34-42.
LIU L, WU L, ZHANG A, et al. Effects of the number of free surfaces on fragmentation and muckpile morphology in underwater reef blasting[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(5): 34-42.

[14] 王明明,郭华杰,罗伟,等. 航道疏浚水下炸礁控制技术[J].工程爆破,2024,30(6)178-184.
WANG M M, GUO H J, LUO W, et al. Control technology for underwater reef blasting in waterway dredging[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(6): 178-184.

[15] 喻灿星,覃国杰,曾丽. 内河航道水下炸礁钻孔爆破技术研究[J].工程爆破,2021,27(4)58-63.
YU C X, QIN G J, ZENG L. Research on technology of underwater reef drilling blasting in an inland waterway[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(4): 58-63. DOI: 10.19931/j.EB.20200273.

[16] 岳凯国,鹿重阳,李晓龙,等. 平陆运河内河航道水下炸礁施工安全技术研究[J].珠江水运,2025,(11)130-132.
YUE K G, LU C Y, LI X L, et al. Construction safety technology for underwater reef blasting in the inland waterway of

录用稿件，非最终出版稿

the Pinglu Canal[J]. Pearl River Water Transport, 2025(11): 130-132.

[17] 张宇. 深水港建设中水下分层炸礁施工工艺的关键技术与应用研究[J].珠江水运,2025,(21)131-133.
ZHANG Y. Key techniques and applications of underwater layered reef blasting in deep-water port construction[J]. Pearl River Water Transport, 2025(21): 131-133.

[18] 周盛涛,罗学东,蒋楠,等.二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J].工程科学学报,2021,43(7)883-893.
ZHOU S T, LUO X D, JIANG N, et al. Research progress and prospects of carbon dioxide phase-transition fracturing technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883-893.

[19] 袁永,陈忠顺,梁小康,等.二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展[J].煤炭科学技术,2024,52(2)63-78.
YUAN Y, CHEN Z S, LIANG X K, et al. Research progress on the mechanisms and applications of carbon dioxide phase-transition blasting and fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 63-78.

[20] 李钊,倪冠华,付正麟,等.液态 CO_2 相变致裂煤体破坏行为及渗透特性[J].煤炭学报,2025,50(11)4940-4954.
LI Z, NI G H, FU Z L, et al. Behavior of coal failure and permeability characteristics caused by liquid CO2 phase change fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(11): 4940-4954.

[21] 阿比尔的,谭松,刘明维,等. 锤形变化影响下重锤破礁的规律研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(9)102-109.
ABIERDI, TAN S, LIU M W, et al. Effects of hammer shape on rock breaking by a heavy hammer[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2025, 44(9): 102-109.

[22] 丁宝山,王雁冰,张祥良,等.不同药量下“高能燃烧剂”爆燃波的传播规律及强度特性[J].工程科学学报,2025,47(10)2136-2146.
DING B S, WANG Y B, ZHANG X L, et al. Propagation laws and intensity characteristics of deflagration waves generated by high-energy combustion agents with different charge masses[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(10): 2136-2146.

[23] 王雁冰,汪东宸,吴健辉,等. 露天矿山液氧相变致裂岩体孔网参数优化研究[J/OL].煤炭学报,1-15.
WANG Y B, WANG D C, WU J H, et al. Optimization of borehole pattern parameters for liquid oxygen phase-transition rock fracturing in open-pit mines[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-15.

[24] 张太林,于世杰,杨志彬,等. 液氧致裂爆破技术在露天矿山的应用[J].现代矿业,2024,40(7)249-251+256.
ZHANG T L, YU S J, YANG Z B, et al. Application of liquid oxygen blasting technology in open-pit mines[J]. Modern Mining, 2024, 40(7): 249-251+256.

[25] 吴健辉,毛庆福,丁宝山,等. 液氧相变爆破技术在“半岛状岩体”中的工程应用研究[J].金属矿山,2025,(10)140-148.
WU J H, MAO Q F, DING B S, et al. Engineering application of liquid oxygen phase-transition blasting in peninsular rock masses[J]. Metal Mine, 2025(10): 140-148.

[26] 吴健辉,张芳平,王雁冰,等. 适用于露天石灰岩矿山多裂隙的液氧瞬态相变破岩技术[J].金属矿山,2026,(3)142-150.
WU J H, ZHANG F P, WANG Y B, et al. Liquid oxygen transient phase-transition rock-fracturing technology for highly fractured rock masses in open-pit limestone mines[J]. Metal Mine, 2026(3): 142-150.

[27] 曾华恒,解叶龙,胡艳,等. 不耦合液氧膨胀破岩法孔壁压力计算方法研究[J].爆破,2025,42(2)146-157.
ZENG H H, XIE Y L, HU Y, et al. Calculation of borehole wall pressure in decoupled liquid oxygen expansion rock fracturing[J]. Blasting, 2025, 42(2): 146-157.

[28] 雷振,王雁冰,付代睿,等. 基于液氧储能的岩石破碎技术研究[J].爆破,2025,42(1)151-158.
LEI Z, WANG Y B, FU D R, et al. Rock-fragmentation technology based on liquid oxygen energy storage[J]. Blasting, 2025, 42(1): 151-158.

[29] 王雁冰,付代睿,彭惠康,等. 液氧瞬态膨胀破岩致裂机理与应用研究进展[J].煤炭学报,2026,51(2)1169-1185.
WANG Y B, FU D R, PENG H K, et al. Research progress on mechanism and application of liquid oxygen transient expansion rock-breaking and fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2026, 51(2): 1169-1185.

录用稿件，非最终出版稿

[30] 王雁冰,彭惠康,付代睿,等.液氧瞬态膨胀破岩关键科学技术问题探讨[J].中国矿业大学学报,2026,55(1)28-42.
WANG Y B, PENG H K, FU D R, et al. Discussion of key scientific and technical issues in liquid oxygen transient expansion rock fracturing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 28-42.

[31] TAO M, CHEN Z Q, XU Y Q, et al. Mechanisms of liquid oxygen phase-transition rock fracturing and crack propagation: insights from experiments and numerical simulations[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2026, 342: 112268.

[32] CHENG W X, YANG R S, ZUO J J, et al. Experimental study on explosion damage characteristics of liquid oxygen bomb and nickel hydrazine nitrate[J]. Engineering Failure Analysis, 2026, 194: 110960.

[33] GB 6722—2014, 爆破安全规程[S].

录用稿件，非最终出版稿