液氧瞬态膨胀破岩关键科学技术问题探讨

王雁冰[1],彭惠康[1],付代睿[1],丁宝山[1],刘玉晨[1],汪东宸[1],黄哲航[1],王　潇[2]
(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学,北京　100083;2. 北京中大爆破工程有限公司,北京　102200)

摘要: 液氧瞬态膨胀破岩技术作为一种新型破岩方法,在安全、振动控制及环保性能方面展现出显著潜力,然而其能量释放机制、安全边界及工艺可靠性等方面仍存在部分争议. 本文系统探讨了液氧瞬态膨胀过程的反应本质,明确了其"燃烧驱动+相变主导"的能量释放模式;提出了液氧相变-燃烧比的定量计算方法,揭示了液氧的汽化膨胀在能量释放中占主要部分;提出了液氧药包的静电感度测试方法,确定了试验工况的液氧药包的临界发火能量,并探明油脂污染将显著提升其静电敏感性,据此提出了等电位接地消除静电方法. 基于上述机理认知,研发了基于钨丝介导的瞬态高温点火技术,实现了激发源的本质安全;发明了契合液氧相变规律的分段减振起爆技术;提出了顶部抑能-底部释能的飞石控制方法与柔性梯度封堵技术,有效抑制飞石与减少冲孔现象;此外,探索了液氧-液氮混合膨胀以调控能量释放进程. 现场工程应用表明:液氧瞬态膨胀破岩技术在城市基坑与土石方开采等环境中成功实现了高效、低振动、无飞石的破岩作业,验证了其技术的可行性与工程适用性. 本研究为液氧瞬态膨胀破岩技术的理论完善、安全标准化与规模化工程应用奠定了理论与方法基础.

关键词: 液氧相变膨胀;相变-燃烧比;静电安全;工程破岩
中图分类号: TD 235　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)01-0028-15

Exploration of key scientific and technological issues in liquid oxygen transient expansion to break rock

WANG Yanbing[1], PENG Huikang[1], FU Dairui[1], DING Baoshan[1], LIU Yuchen[1], WANG Dongchen[1], HUANG Zhehang[1], WANG Xiao[2]
(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Zhongda Blasting Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: As a new rock breaking method, liquid oxygen transient expansion rock breaking technology shows significant potential in safety, vibration control and environmental protection performance. However, there are still some disputes on the energy release mechanism, safety boundary and process reliability. The reaction essence of the transient expansion process of liquid oxygen was systematically discussed, and the energy release mode of "combustion driven+phase transition dominated" was defined; A quantitative calculation method for the phase transition combustion ratio of liquid oxygen was proposed, which reveals that the vaporization expansion of liquid oxygen accounts for the main part of energy release; A test method for electrostatic sensitivity of liquid oxy-

收稿日期: 2025-10-05　　**修回日期:** 2025-11-12　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250417
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52574184);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2025JCCXLJ01)
通信作者: 王雁冰(1987—),男,山东省潍坊市人,副教授,博士生导师. E-mail: wangyanbing@cumtb.edu.cn
引用格式: 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 Yanbing, PENG Huikang, FU Dairui, et al. Exploration of key scientific and technological issues in liquid oxygen transient expansion to break rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 28-42.

gen charge was proposed, the critical ignition energy of liquid oxygen charge under test conditions was determined, and it was proved that oil pollution would significantly improve its electrostatic sensitivity. Based on this, a method of eliminating electrostatic by equipotential grounding was proposed. Based on the above mechanism cognition, a tungsten wire mediated transient high temperature ignition technology was developed to realize the intrinsic safety of the excitation source; The technology of subsection vibration reduction and detonation was invented according to the law of liquid oxygen phase change; The flying rock control method of top energy suppression and bottom energy release and the flexible gradient plugging technology are proposed to effectively suppress flying rocks and reduce punching phenomenon; In addition, the mixed expansion of liquid oxygen and liquid nitrogen was explored to control the process of energy release. The field engineering application shows that the liquid oxygen transient expansion rock breaking technology has successfully realized the high-efficiency, low vibration and no flying rock breaking operation in the environment of urban foundation pit and earth rock mining, and verified the feasibility and engineering applicability of the technology. This study lays a theoretical and methodological foundation for the theoretical improvement, safety standardization and large-scale engineering application of liquid oxygen transient expansion rock breaking technology.

Key words: liquid oxygen phase transition expansion; phase transition-combustion ratio; electrostatic safety; engineering rock breaking

炸药爆破因其高效率、高能量密度而被业界视为破碎中硬及以上岩体的首选方法[1-2]，然而，炸药爆炸会产生剧烈振动、飞石和强烈冲击波，容易造成周边建(构)筑物损害和人员伤亡，存在极大的安全风险[3-4]．

由于炸药固有的高风险性[5]，在生产、销售、运输、储存、使用和销毁等各个环节都必须取得相应的许可[6]．尽管这种安全管理模式极大提升了作业的安全性，但也显著增加了项目的成本．因此，研发一种危险等级显著降低的新型破岩技术[7]作为炸药爆破的有效补充，不仅具有重要的技术价值更兼具显著的社会效益．

为克服传统炸药爆破的诸多局限，多种替代性破岩技术已被开发并应用于特定场景．二氧化碳致裂技术[8-9]利用液态CO_2在加热条件下迅速相变产生高压气体实现破岩，其核心部件加热管为一次性耗材，不仅成本较高且涉及易制爆危险化学品，在生产与使用中仍存在安全隐患．机械破岩技术[10-11]利用破碎锤和液压钳对岩体进行破裂，但其破岩效率极低，难以满足矿山开采、隧道掘进等大规模岩体开挖要求．静态破碎剂[12-13]依靠水化反应产生的体积膨胀对岩体施加持续压力，在数小时至数十小时内对岩体实现缓慢裂解，反应周期过长，无法满足工程现实需要．

液氧瞬态膨胀破岩技术最早可追溯至二十世纪初[14]，当前该技术已发展为一种基于吸收剂燃烧和液氧相变膨胀的破岩方法[15]，如图 1 所示．核心技术原理为：在炮孔中预置内含吸收剂(如纤维素类可燃材料)的柔性储能管，随后注入低温液氧；通过电激发引燃吸收剂燃烧并释放热量，促使液氧迅速汽化，在密闭炮孔空间内产生剧烈的体积膨胀．这一瞬态膨胀过程产生的高压气体作用于孔壁，从而实现破岩[16]．然而，当前液氧瞬态膨胀破岩技术在实际推广中仍处于无准入门槛、无操作标准、无责任监管的制度“真空”状态[17]．因此，导致该技术在推广应用中存在一定困难．

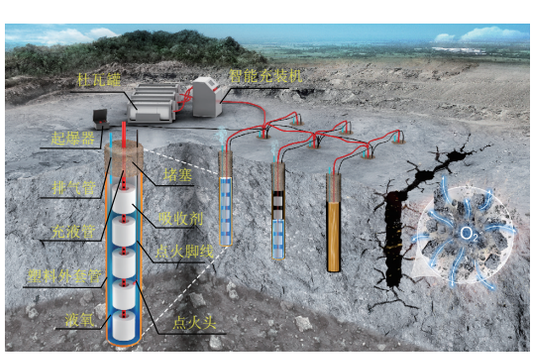


图 1　液氧瞬态膨胀破岩技术示意

Fig. 1　Schematic diagram of liquid oxygen transient expansion rock breaking technology

尽管液氧瞬态膨胀破岩技术展现出良好的应用潜力，但其在基础理论、反应机制及安全控制等层面仍存在诸多尚未厘清的科学问题与技术挑

战．首先，液氧瞬态膨胀过程是否属于爆轰？其次，液氧瞬态膨胀过程的相变-燃烧比如何？再是，液氧瞬态膨胀破岩工艺是否存在静电隐患？液氧在管道内高速流动时会因摩擦产生静电，而液氧环境具有极强的助燃性，一旦发生静电放电，易引燃系统中可燃物，导致燃烧或爆炸事故[18-19]．最后，液氧瞬态膨胀是否应用了其超临界状态？

综上所述，液氧瞬态膨胀破岩技术凭借其在安全性、环保性与振动控制方面的显著优势，正在成为传统炸药爆破在特定工程场景下的重要补充，展现出广阔的应用前景．然而，该技术在反应机制、能量分配及安全风险等方面仍存在关键科学问题．为此，本文旨在系统探讨上述关键科学问题，介绍研究取得的技术进展，评估其现场工程应用效能，并展望该技术的未来发展方向．

1 关键科学问题探讨

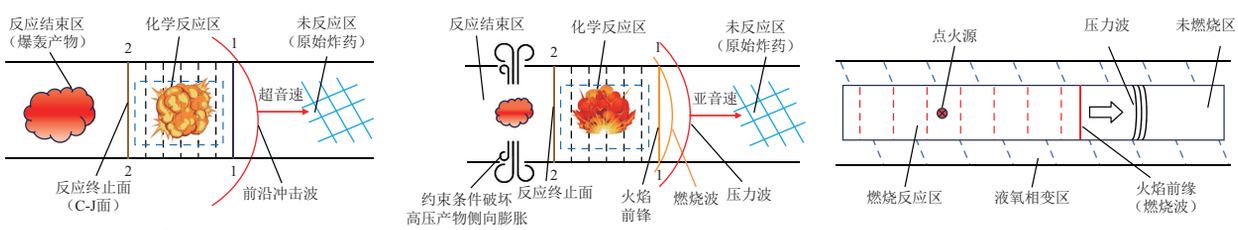
1.1 液氧瞬态膨胀的本质

1.1.1 液氧瞬态膨胀是否爆轰

爆轰是伴随着剧烈化学反应、在炸药中自行稳定、以超音速传播的强冲击波[20-21]，其前沿为一道强烈的压缩冲击波，使未反应的炸药材料瞬间被压缩、升温至其起爆点以上，引发迅速的化学反应；反应释放出的巨大能量又反过来支持并驱动冲击波持续向前传播，形成一个波速稳定、自持的循环过程[22]．爆轰的关键特征在于其是否存在一个自持的、超音速传播的冲击波-化学反应耦合结构．爆轰模型如图 2a 所示．

然而，并非所有剧烈的能量释放过程都能直接形成稳定的爆轰．在许多情况下，尤其是当反应物为非理想炸药或混合不均匀时，爆轰会向爆燃转变[23]．爆燃是一种基于热传导和热辐射、以亚音速传播的燃烧过程[24]．其火焰前锋传播速度较慢，能量释放速率受限于传热和传质过程，产生的压力峰值也远低于爆轰[25-26]．如图 2b 所示，当发生爆轰的约束条件被破坏时，化学反应生成的高压产物会迅速往侧向膨胀，降低对前导冲击波的支持，导致化学反应区释放能量的速率小于冲击波消耗能量的速率，最终以较慢的爆燃形式继续传播．

液氧瞬态膨胀是始于吸收剂剧烈燃烧释放大量热量，这些热量通过热传递和热辐射使周围液氧急速汽化，致使液氧体积膨胀数百倍，在密闭或受限空间内产生极高压力，从而对外做功形成冲击波[27-28]，如图 2c 所示．



(a) 爆轰模型示意　(b) 爆轰转爆燃示意　(c) “燃烧-相变”耦合反应模型示意

图 2 反应模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of reaction model

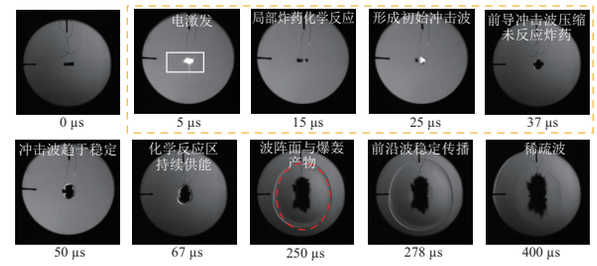
1.1.2 炸药爆炸和液氧瞬态膨胀的反应时间对比

基于纹影技术[29-30]瞬态捕捉炸药（DDNP）爆炸和液氧瞬态膨胀的冲击波传播、反应演化过程和气体流动，对比分析两者的反应时间特征．如图 3a 所示，电激发约 5 μs 后局部炸药发生化学反应，并迅速形成初始冲击波，前导冲击波对未反应炸药进行压缩，冲击波能量在 50 μs 内趋于稳定，同时化学反应区持续反应提供能量，供给冲击波进一步传播．在 250 μs 时波阵面和爆轰产物显著，前沿波稳定传播；在 400 μs 时，炸药反应结束、能量供给不足，爆轰波衰减为稀疏波．

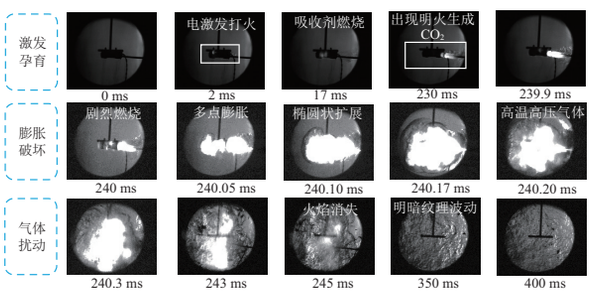
如图 3b 所示，液氧瞬态膨胀过程的纹影图像显示，其反应时间尺度显著长于炸药爆炸．全过程分为激发孕育—膨胀破坏—气体扰动 3 个阶段．激发孕育阶段（0～239.9 ms）：点火激发后，吸收剂剧烈燃烧释放能量、液氧吸热相变膨胀，储能管内不断积聚压力；膨胀破坏阶段（240～240.2 ms）：储能管内压力达到临界点，致裂储能管发生膨胀破坏；气体扰动阶段（240.3～400 ms）：吸收剂燃烧逐渐结束，高温高压气体产物膨胀扩散、持续时间长．

1.1.3 炸药爆炸和液氧瞬态膨胀的前沿波传播速度对比

炸药爆炸和液氧瞬态膨胀的前沿波阵面传播速度对比，如图 4 所示．



(a) 炸药传播过程



(b) 液氧瞬态膨胀过程

图 3　炸药与液氧反应时间对比

Fig. 3　Comparison of reaction time between explosives and liquid oxygen

炸药爆炸形成初始冲击波时速度已经达到峰值(1 945 m/s),随后在一定范围内波动并维持在相对较高的速度区间,表现出快速起爆、高速传播并趋于稳定的过程. 而液氧瞬态膨胀过程的波速曲线呈现先升高后降低的趋势,速度峰值为 1 480 m/s,增长相对平缓. 重复试验对比结果如表 1 所示,其整体波阵面传播速度明显低于炸药. 两者波阵面传播速度差异反映出,炸药爆炸通过剧烈的化学反应在极短时间内释放大量能量,驱动强冲击波传播;液氧瞬态膨胀则主要依赖相变及高压气体的膨胀做功,其能量释放速率和强度均低于化学爆炸,波阵面加速能力有限导致最大传播速度较低.

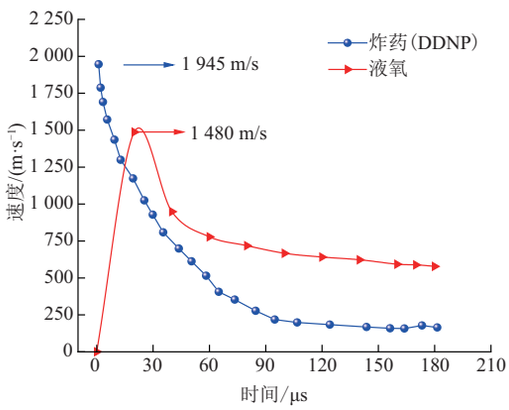


图 4　炸药爆炸与液氧瞬态膨胀的前沿波传播速度对比

Fig. 4　Comparison of frontal wave propagation velocity between explosive explosion and transient expansion of liquid oxygen

表 1　炸药爆炸与液氧瞬态膨胀对比

Table 1　Comparison of explosive explosion and transient expansion of liquid oxygen

编号	炸药			液氧		
	反应时间/μs	波阵面最大传播速度/(m·s^{-1})	超压峰值/kPa	反应时间/ms	波阵面最大传播速度/(m·s^{-1})	超压峰值/kPa
1#	30	1 945	154	45	1 480	80
2#	26	2 134	180	37	1 514	102
3#	30	1 986	167	62	1 130	68
4#	35	1 910	146	50	1 324	77
5#	32	1 935	147	48	1 360	86

1.1.4　炸药爆炸和液氧瞬态膨胀的超压对比

炸药爆炸和液氧瞬态膨胀的超压对比,如图 5 所示. 炸药起爆后 50 μs 内急剧上升,呈现出陡峭的压力增长阶段,在 25 μs 内达到压力峰值(154 kPa),最大压力上升速率[$(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$]为 36.5 kPa/μs,随后压力快速衰减,压力持续时间约 35 μs. 液氧瞬态膨胀的超压曲线上升速率相对平缓,最大压力上升速率为 26.3 kPa/μs;在 200 μs 时达到压力峰值(80 kPa),压力衰减过程更为缓慢,在压力波传播后期振荡衰减幅度更大、持续时间更长. 重复试验对比结果如表 1 所示,液氧瞬态膨胀产生的压力波强度较弱、上升速率较慢且作用时间更长.

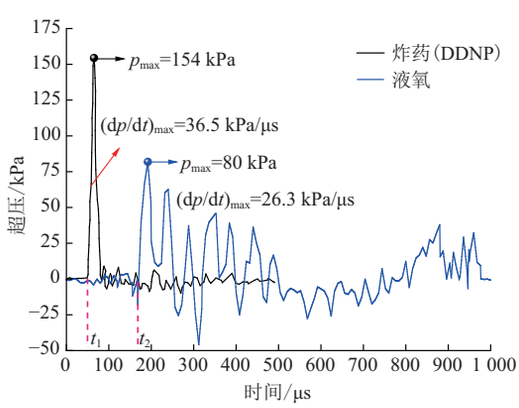
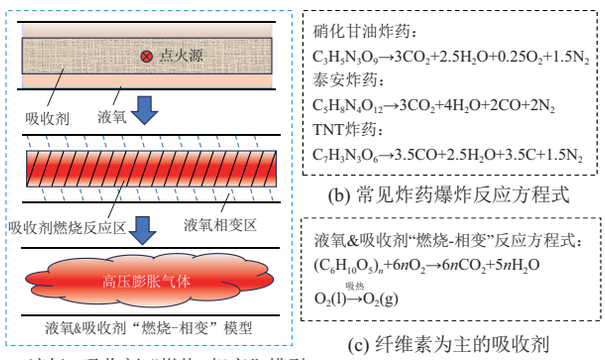


图 5　炸药爆炸与液氧瞬态膨胀的超压对比

Fig. 5　Comparison of overpressure between explosive explosion and transient expansion of liquid oxygen

1.1.5 液氧瞬态膨胀的本质

基于前文对液氧的反应模式探讨及纹影图像观测，构建了液氧瞬态膨胀的“燃烧-相变”耦合模型示意图，如图 6a 和 6c 所示.



(b) 常见炸药爆炸反应方程式

(a) 液氧&吸收剂“燃烧-相变”模型

(c) 纤维素为主的吸收剂“燃烧-相变”反应方程式

图 6 液氧瞬态膨胀本质

Fig. 6 The nature of transient expansion of liquid oxygen

燃烧过程：始于吸收剂在液氧的强氧化作用下发生剧烈的燃烧反应，释放热量并生成大量 CO_2 气体；同时，液氧吸热发生剧烈相变，由液态氧 O_2(l)迅速汽化为气态氧 O_2(g). 燃烧反应区与液氧相变区在时空上紧密耦合，共同生成大量高压膨胀气体，从而驱动压力波和高压气体传播. 此过程是由化学燃烧放热与物理相变吸热共同作用的瞬态能量转换过程，其能量释放速率受热量传递的制约，因此在前沿波阵面的传播、超压特征上表现出相对温和且持续时间较长的膨胀特性.

通过对比图 6b 和 6c 中的反应方程式可知，炸药爆炸是分子内化学键快速断裂与重组的过程. 而液氧瞬态膨胀则依赖于 2 个阶段：吸收剂与氧的燃烧反应，反应方程式为 $(C_6H_{10}O_5)_n + 6nO_2 \rightarrow 6nCO_2 + 5nH_2O$；同时，反应热促使液氧汽化 O_2(l) $\rightarrow$ O_2(g). 因此，炸药爆炸是高速、自供能的化学能瞬间释放，而液氧瞬态膨胀是包含吸收剂燃烧和液氧相变的瞬态能量释放过程.

1.1.6 液氧与炸药破岩技术对比

如表 2 所示，液氧瞬态膨胀破岩技术与传统化学爆破技术在作用机理与工程特性上存在本质差异. 传统炸药以爆轰的做功方式形成以 GPa 级峰值压力和微秒级作用时长的强冲击波，而液氧技术则以物理相变主导耦合燃烧反应，通过液氧汽化膨胀与化学燃烧共同作用，产生压力场形成高冲量、低功率的能量输出特征. 在安全性方面，传统爆破伴生有毒气体(CO，NO_x)与爆破振动风险，且炸药本身具有高敏性，液氧技术则实现爆破产物的无害化并通过原料分离储存提升本质安全性. 传统爆破凭借成熟技术体系在大规模开采中保持效率优势，液氧技术展现出低振动的独特价值. 这两类技术形成互补关系，各自在特定工程场景中发挥最优效能.

表 2 液氧瞬态膨胀破岩技术与传统炸药爆破技术对比分析

Table 2 Comparative analysis of liquid oxygen transient expansion rock breaking technology and traditional explosive blasting technology

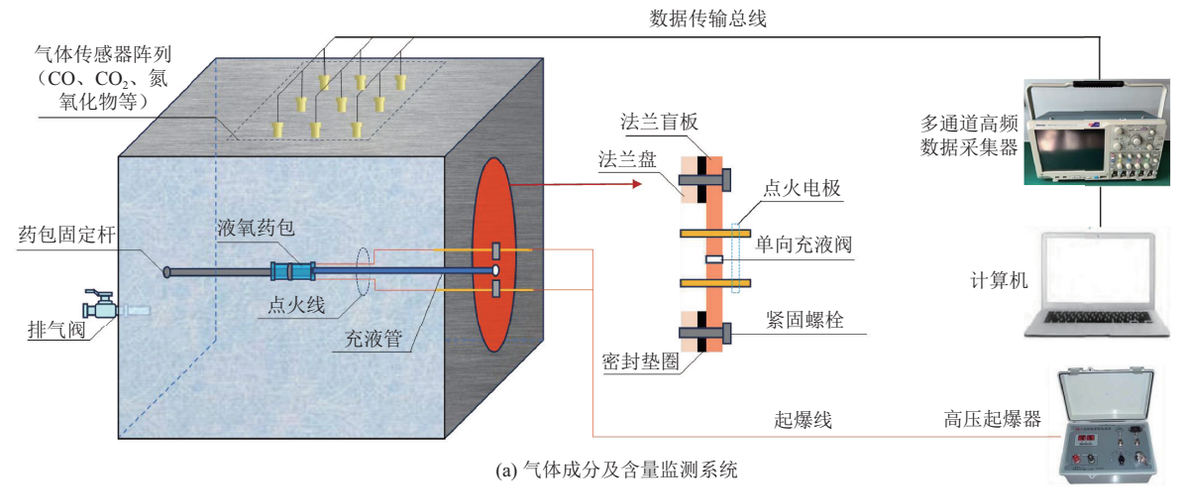
对比维度	传统炸药爆破技术	液氧瞬态膨胀破岩技术
能量释放本质	快速化学反应、爆轰	物理相变为主，耦合化学燃烧
压力	峰值压力高、作用时间短、高功率、强冲击	峰值压力较低、作用时间较长、低功率、高冲量
反应产物	产生有毒有害气体(CO、NO_x)	主要为 CO，H_2O，O_2
安全性	炸药为含能材料，对热、冲击、摩擦敏感	液氧与吸收剂常备状态下分离、无意外爆炸风险
适用性	破碎坚硬岩体能力较强	破碎坚硬岩体能力较弱
经济性与效率	技术成熟、爆破循环快、综合效率高	制备工序相对复杂、破岩效率相对较低

1.2 液氧瞬态膨胀的相变-燃烧比

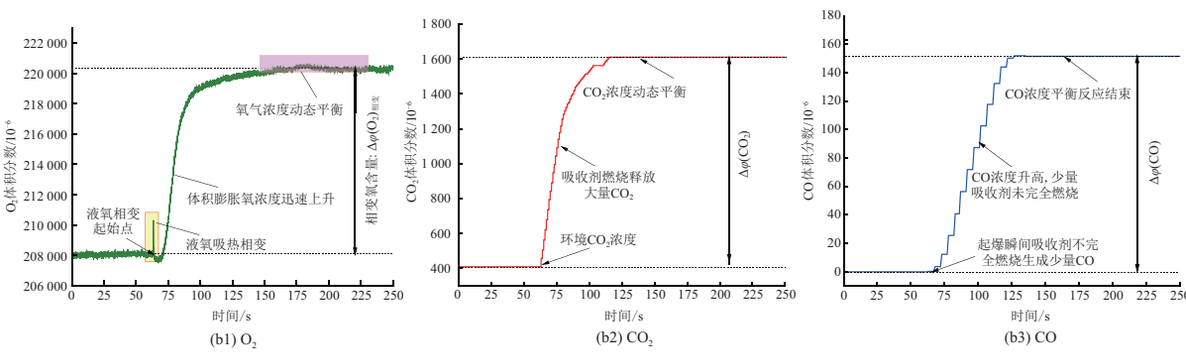
为了精确表征液氧瞬态膨胀过程中的相变与燃烧耦合作用，发明了耐冲击、气密性强、传感器模块化的复合气体甄别系统，如图 7a 所示. 该系统由密闭防爆箱(长×宽×高：45 cm×45 cm×45 cm)、气体传感器阵列及数据采集装置组成，气体传感器包含 O_2，CO_2 和 CO 气体探头，O_2 探头的采样速率≥100 次/s，量程 0～100% 测量精度为 ±2% FPS，分辨率为 0.025%；CO_2 探头的采样速率≥20 次/s，量程 0～50 000×10^{-6}(以体积分数计)，测量精度为 ±2% FPS，分辨率为 1×10^{-6}；CO 探头的采样速率≥20 次/s，量程 0～10 000×10^{-6}(以体积分数计)，测量精度为 ±2% FPS，分辨率为 0.1×10^{-6}.

以卷纸为吸收剂的液氧药包爆后气体组分及含量变化，如图 7b 所示. 起爆瞬间，液氧吸热相变体积增大，氧浓度(氧气体积分数)迅速小幅上升出现液氧相变起始点. 同时，吸收剂与部分液氧发生剧烈的燃烧反应，消耗部分氧气，导致氧浓度出现小幅下降趋势，并出现第一个浓度峰值. 然而，氧气消耗速率远小于液氧相变速率，液氧迅速相

变膨胀，氧浓度迅速增长，直至容器内氧浓度达到峰值并趋于稳定．与此同时，吸收剂燃烧生成大量CO_2和少量CO，由于在富氧环境中，吸收剂燃烧主要生成CO_2气体，直至吸收剂燃烧反应结束，CO_2浓度达到最大．而CO生成含量低，浓度呈现阶梯式增长，增长速率缓慢．

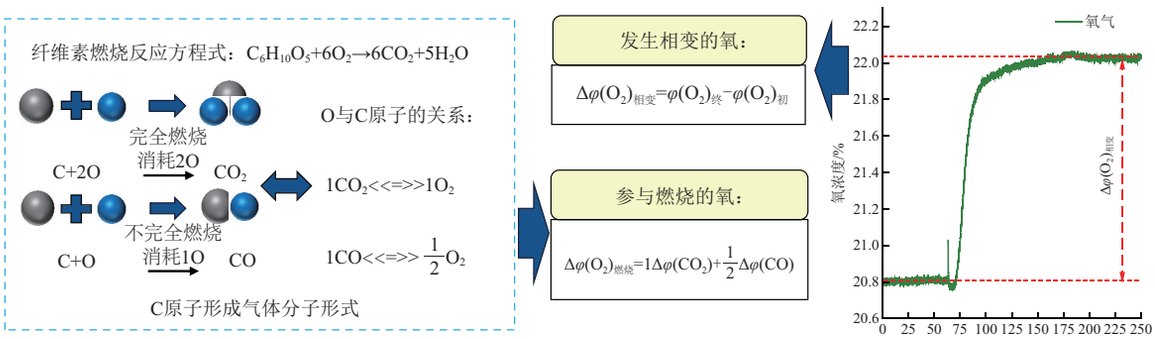


(a) 气体成分及含量监测系统



(b1) O_2　(b2) CO_2　(b3) CO

(b) 液氧瞬态膨胀后气体成分及浓度变化



(c) 液氧瞬态膨胀相变-燃烧比计算方法

图 7　液氧瞬态膨胀相变-燃烧比

Fig. 7　Liquid oxygen transient expansion phase transition-combustion ratio

为了揭示液氧瞬态膨胀中液氧的相变-燃烧比，提出了相变-燃烧比计算方法．假定液氧药包的吸收剂主要成分是纤维素，那么液氧发生相变和参与燃烧的比例关系如图 7c 所示．C 原子的氧化路径决定耗氧量，即完全燃烧（C＋2O→CO_2）时，每生成 1 分子CO_2需消耗 2 分子氧（即 1 分子O_2）；不完全燃烧（C＋O→CO）时，每生成 1 分子 CO 仅需消耗 1 分子氧（对应 1/2 分子O_2）．因此，监测并获得了CO_2和 CO 气体的浓度增量，即$\Delta\varphi$（CO_2）和$\Delta\varphi$（CO）；同时记录了氧气浓度从开始至结束的浓度变化，即$\Delta\varphi(O_2)$．该方法直接验证了吸收剂的燃烧反应路径，并表明在液氧瞬态膨胀过程中吸收剂同时存在完全与不完全燃烧现象．因此，基于化学反应机理和实测气体浓度增量可知，相变氧含量：由液氧吸热汽化为气态氧，通过监测并计算爆破过程前后O_2的浓度差，即$\Delta\varphi(O_2)_{相变}=\varphi(O_2)_{终}-\varphi(O_2)_{初}$；燃烧耗氧量：由$CO_2$和 CO 的浓度增量计算获得，即$\Delta\varphi(O_2)_{燃烧}=$

$\Delta\varphi(CO_2)+1/2\Delta\varphi(CO)$;最终,二者的比例关系可表达为 $\delta=\Delta\varphi(O_2)_{相变}:\Delta\varphi(O_2)_{燃烧}=[\varphi(O_2)_{终}-\varphi(O_2)_{初}]:[\Delta\varphi(CO_2)+1/2\Delta\varphi(CO)]$.

表3展示了不同质量卷纸作为吸收剂,液氧药包大小为∅20 mm × 50 mm,爆后监测到O_2,CO_2,CO气体浓度增量,通过该计算方法得到了不同质量吸收剂的液氧相变燃烧比.

表3 爆后气体成分及浓度增量

Table 3 Gas composition and concentration increment after explosion

卷纸质量/g	$\Delta\varphi(O_2)/10^{-6}$	$\Delta\varphi(CO_2)/10^{-6}$	$\Delta\varphi(CO)/10^{-6}$	相变-燃烧比
0.35	5 928	713	85.6	7.84
0.70	7 827	856	104.3	8.61
1.05	12 648	1 208	135.2	9.91
1.40	23 627	1 811	148.7	12.63

1.3 液氧瞬态膨胀的静电研究

1.3.1 静电产生原理

不同物质对电子的束缚能力存在差异,束缚能力的强弱称为逸出功;当不同物质接触、摩擦或撞击时,电子自发地从逸出功小的物质转移到逸出功大的物质上,并在两者的接触面形成双电层;当这2种物质快速分离时,发生转移的电子来不及全部返回原来物质,于是失去电子的物质整体带正电,得到电子的物质整体带负电[31-32],如图8所示.

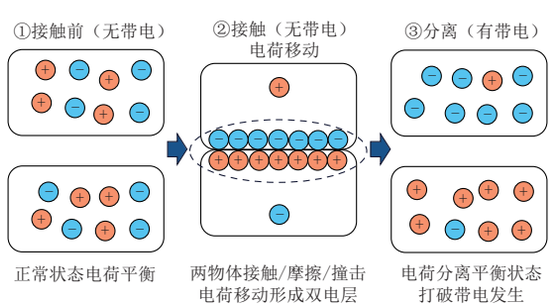


图8 静电产生原理

Fig. 8 Principle of electrostatic generation

在液氧瞬态膨胀破岩工艺中,静电的产生始于液氧与所接触固体表面(如管道、孔壁).当液氧流经固体管壁时,由于分子间的相互作用,在固-液界面处发生电荷的重新分布.界面会形成一个由紧密层和扩散层构成的双电层结构,紧密层中的离子或极性分子被紧密吸附在固体表面,形成一个固定的电荷层;而扩散层则包含着与固定层电荷相反、分布较为松散的离子或电荷,整体上使得界面区域呈电中性[33-34].然而,在充装过程中,液氧被加压并以较高流速流经管道系统,流体施加的剪切力破坏扩散层的平衡导致电荷分离,被挟带的电荷随液氧流动,而固体表面则产生等量的相反电荷.

1.3.2 静电感度测试

为了探明液氧药包的静电感度,依据GJB5891.27—2006《火工品药剂试验方法》和欧洲标准化学协会发布的《民用爆炸物抗静电放电测试标准》EN 13763-13:2004,设计了液氧药包静电感度测试系统,如图9a所示,由稳压直流电源、升压模组、储能电容、整流模块及放电电极组成.稳压直流电源通过保护电阻,对储能电容充电至预设电压,以模拟人体或设备的等效静电电容.充电完成后,通过高压开关控制电容器与放电电极瞬间连接,电极间隙接触待测液氧药包内的可燃吸收剂.试验通过升降法,由 $E=1/2CU^2$ 计算得出待测样品的发火能量,其中,E为发火能量,J;C为电容器实际电容,F;U为发火电压,V.

操作步骤及方法:首先制备不同可燃吸收剂的液氧药包,将待测药包放在防爆箱内或室外空旷处,并将放电电极间隙接触吸收剂,电极间隙为1~3 mm;接着,初始化稳压直流电源,设定输出电压和电流为储能电容充电,待电容电压稳定后,按既定工艺为液氧药包充液氧;最后,打开高压开关,执行一次电容放电,观察并记录发火情况,并利用升降法重复上述步骤,得到50%发火概率所对应的静电能量.

如图9b所示,研究了不同静电能量下液氧药包的静电感度,液氧药包的发火条件与静电能量、放电电压、放电电流强度密切相关.在低电流水平时,即使电压超过18 kV液氧药包也未发火;而放电电流增大时,液氧药包发火所需的电压减小.当静电能量大于4.8 J时,重复多次试验下液氧药包出现发火现象,即液氧药包的临界发火能量为4.8 J.

油脂着火点低,如果与液氧接触容易形成高敏感度混合体系.因此,研究了混有油脂工况下的液氧药包静电感度,结果如图9c所示.显然,吸收剂-液氧-油脂共存环境下,液氧药包的静电感度显著降低,当静电能量大于2.7 J时液氧药包有概率发火.随着油脂质量增加,液氧药包发火所需的静电能量降低.由于油脂质量增加,吸收剂更大面积地沾染油脂,在相同条件下,静电火花作用在吸收剂-油脂界面的概率增大,进而增大发火概率.

液氧充装时,液氧在管道内的高速流动、从注入口喷射、储能管的管壁碰撞摩擦,会产生并积累

静电荷．当积累的静电荷形成高电位静电放电时，放电火花能量在液氧的富氧环境中，容易引燃可燃介质，引发燃爆事故．因此，提出了等电位连接方法，确保液氧储罐、灌注管路、储能管、操作平台可靠接地系统，接地电阻建议小于 4 Ω．使用导线和接地端子，保证连接的可靠性，消除各部件间的电位差．此外，在充装液氧时使用减压阀设置并控制充装压力，以控制液氧灌注流速，从源头减少静电荷的产生．如图 9d 所示，液氧充装过程中液氧与储能管内壁的撞击、摩擦和分离发生了电荷转移，从而形成电势差．因此，在药包的内、外表面带上相反的静电荷，最大电压小于 0.2 kV．在相同条件下使用导线对液氧药包进行等电位接地后，使液氧充装过程中产生的静电荷泄放至大地，实现了液氧药包的静电电压为 0，消除了充装过程中的静电积累风险．

油脂与液氧接触时，会发生剧烈的氧化反应，在液氧的富氧环境中容易因微小的机械冲击或摩擦引发爆炸．为了防止油脂对液氧破岩系统的影响，需要确立液氧破岩系统的洁净度标准，与液氧接触的部件（储能管、阀门、密封圈）必须在装配前进行严格的脱脂清洗，并在作业区域设立严禁油脂的警示牌，在相关操作规程中，将“禁油”作为安全警戒反复强调和检查．

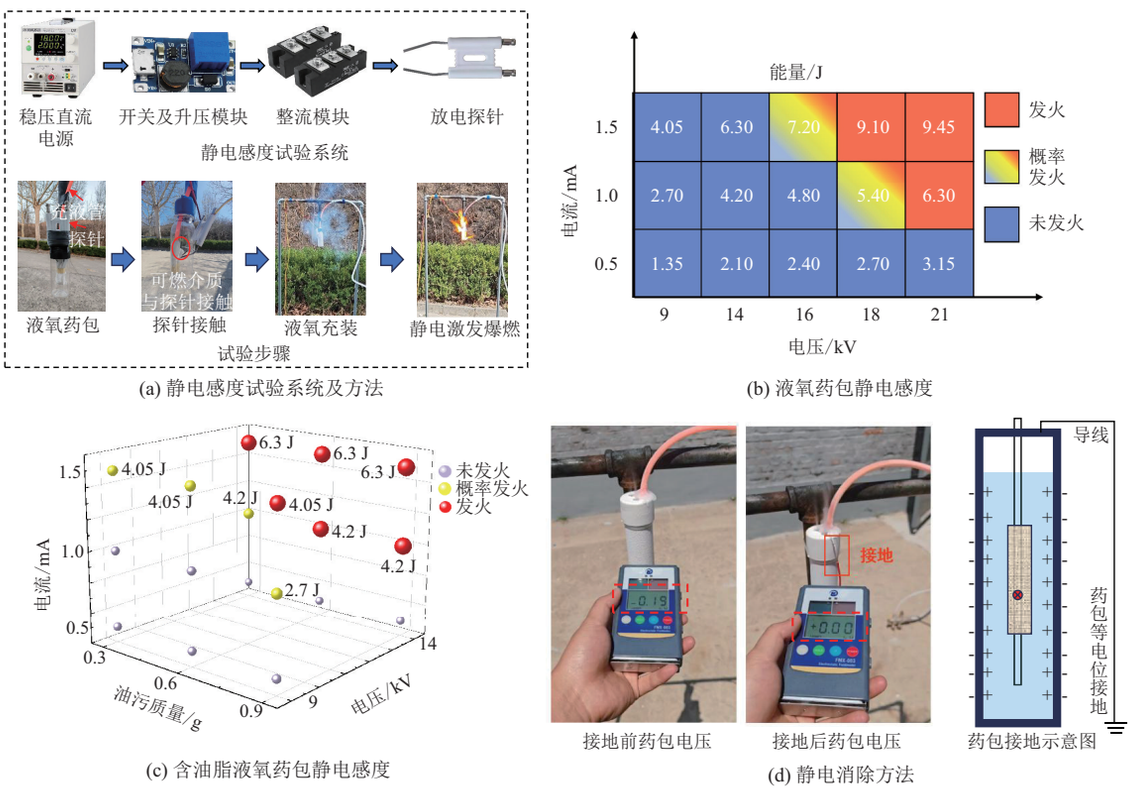


图 9　液氧药包静电感度试验

Fig. 9　Electrostatic sensitivity test of liquid oxygen cartridge

1.4　液氧瞬态膨胀技术的超临界问题

当一种流体的温度和压力同时超过其自身的临界温度和临界压力时，它会进入一种既非常规气体也非常规液体的单一流体相，称为超临界状态[35]，如图 10a 所示．在此状态下，流体不再具有明确的液相或气相区分，而是呈现出介于液体和气体之间的独特性质．超临界流体兼具液体的高密度和气体的高扩散性、低黏度特性[36]（图 10 b）．液氧的临界温度约为 −118.59 ℃，临界压力约为 5.04 MPa，当液氧处于高于此临界点的温度和压力条件下时会进入超临界状态[37]．而二氧化碳的临界温度为 31.1 ℃，临界压力为 7.38 MPa，相对更接近常温常压条件，因此更容易实现超临界状态，从而利用超临界流体的性质应用更广泛的领域[38-39]．在实际破岩过程中液氧的温度极低，药包内的压力接近环境压力，此时液氧处于亚临界液态．受到吸收剂燃烧放热，液氧在受限的炮孔内快速汽化导致体积急剧膨胀，从而引起压力迅速升高．如果吸热和压力积累速率足够快，液氧尚未完全升至临界温度之前，其压力就已超过临界压力，此时温度和压力同时高于临界点，液氧处于超临界状态，其超临界状态也会对破岩产生一定增益，

这是一个快速、瞬态的中间过程，而非稳定状态，并非是破岩所需的必要条件．然而，在实际工程破岩中较为难以实现液氧的超临界状态．由于现有的储能管未能满足超临界液氧的耐压、密封性，难以实现液氧的稳定超临界状态，而液氧的低温、低沸点使其极易汽化，因此储能管需要预留排气孔，保持储能管内部气压低于储液罐的压力，以使液氧能够顺利进入储能管．而这也从根本上导致了药包在起爆前液氧无法达到超临界状态．相比之下，液氧的超临界状态需在低温高压下实现，其温度和压力变化剧烈，在液氧瞬态膨胀破岩过程中，氧气存在被动进入超临界状态的可能性，但其临界温度和临界压力极难实现与维持．

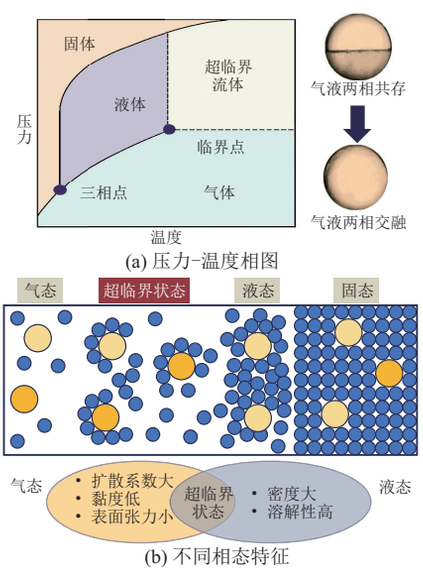


图 10 物质不同相态特征

Fig. 10 Characteristics of different phases of matter

2 核心技术突破

2.1 瞬态高温点火新技术

现有的液氧瞬态膨胀破岩技术中普遍采用电子点火头作为激发药头，其核心装药通常包含对摩擦、静电敏感的易爆药粉[40]，在生产、储运及高频次、规模化应用时面临安全风险．因此，发展一种非含能药剂、本质安全且可靠性高的新型点火技术显得尤为迫切．

针对上述挑战，本文摒弃了传统的化学药剂点火思路，开创性地采用高纯度微细钨丝作为瞬态热激发源．其激发原理在于，当足够强度的脉冲电流流经钨丝时，基于钨丝自身高熔点、高电阻率特性，在极短时间内将电能高度集中于有限体积内，从而驱动钨丝的温度急剧攀升至瞬态高温状态[41]．制备药包时，首先选用直径为 0.2～0.5 mm 的高纯度钨丝，盘绕制成间距适宜的螺旋状，提高局部热容和与吸收剂的接触面积；接着选用定量适中、疏松的卷纸或其他可燃吸收剂，将其紧密包裹住螺旋状的钨丝；最后用导线连接钨丝的两端，导线从储能管的密封端盖的专用孔洞穿出，并在管内侧使用环氧树脂胶或专用低温密封胶对引线穿孔处进行严格密封，确保气密性，最终制成新型钨丝液氧药包．将药包内钨丝引出的 2 根角线分别与起爆线串联，再将起爆线连接至起爆器，连接完成后需检查电路是否通路，确保起爆的成功率．

如图 11a 所示，使用新型钨丝取代电子点火头，构建了适用于液氧瞬态膨胀的“钨丝&卷纸”复合药头结构．此设计中，钨丝产生的瞬时高温确保与卷纸周边接触，在液氧环境中，卷纸被高温钨丝引燃，成功实现了从电能到热能与化学能的高效、可控转换，从源头上实现了点火器件的本质安全．为确保大规模的新型点火单元能够被同步、可靠地激发，并行研制了与之匹配的超高功率分段起爆器．该装置的核心在于其具备多通道独立储能与精确放电控制功能，为串/并联的钨丝负载提供极高电流上升率的强脉冲．如图 11b 所示，在验证试验中，将 6 个钨丝液氧药包串联后接入该起爆系统，结果表明，所有药包均实现了同步激发，充分验证了此项瞬态高温点火技术方案在液氧瞬态膨胀破岩中的可行性与卓越性．

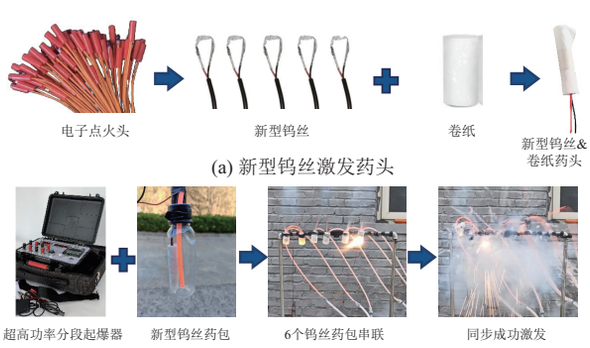
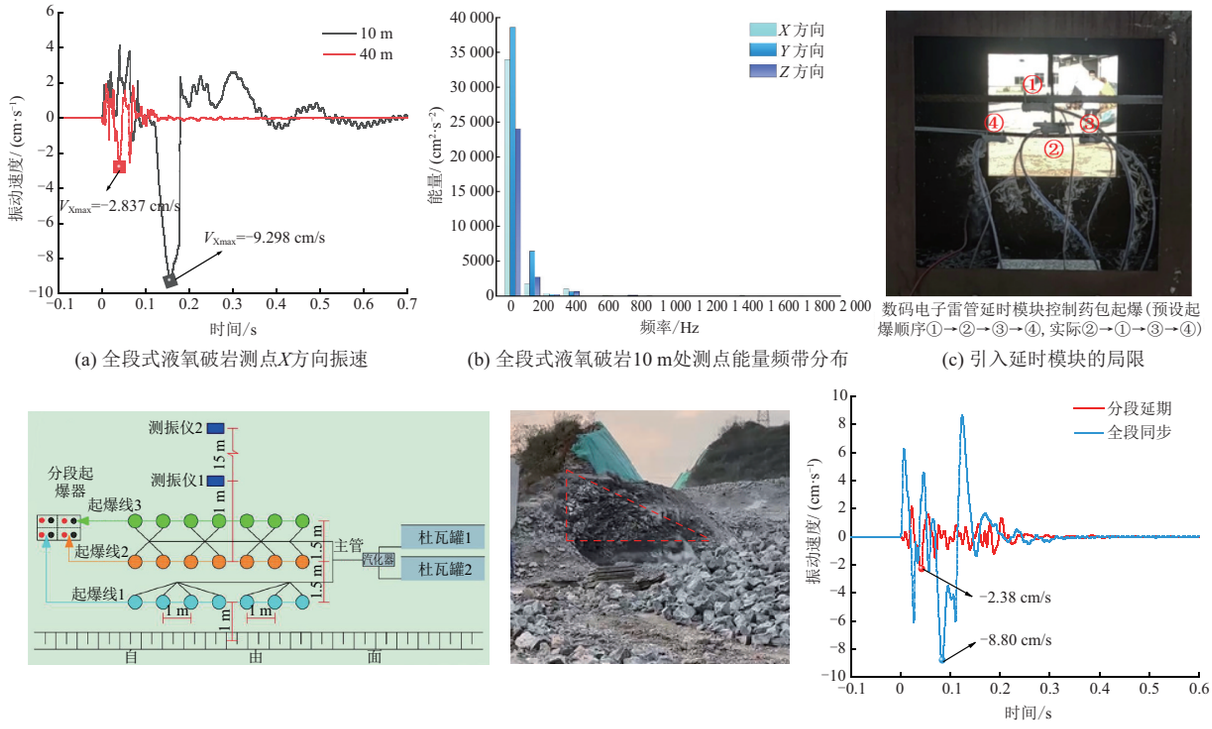


图 11 瞬态高温点火技术

Fig. 11 Transient high-temperature ignition technology

2.2 分段减振技术

在传统液氧破岩作业中，全段式同步激发方式虽操作简便，但常诱发较强的爆破振动效应．在现场 10 m 和 40 m 处测得的振速结果表明，该方式在近场区域产生的峰值振速较高，远场区域峰值振速较低（图 12a），且在能量频带分布上呈现明显的低频能量集中现象（图 12b）．这种低频振动传播距离较远、衰减慢，成为了制约该技术在城镇周边或敏感区域应用的瓶颈之一．



(a) 全段式液氧破岩测点X方向振速　(b) 全段式液氧破岩10 m处测点能量频带分布　(c) 引入延时模块的局限

数码电子雷管延时模块控制药包起爆(预设起爆顺序①→②→③→④, 实际②→①→③→④)

(d) 分段起爆减振技术示意图　(e) 分段起爆现场破岩　(f) 分段与全段起爆振速对比

图 12　分段减振技术

Fig. 12　Segmented vibration reduction technology

为降低爆破振动，初期尝试引入数码电子雷管的延时起爆模块，试图通过错开各药包的起爆时刻实现振动的相互削弱．然而，在常规炸药爆破中的延时设置主要基于炸药爆轰，未能充分考虑液氧在激发后经历吸热—汽化—相变膨胀这一特定的能量释放时序．如图 12c 所示，预设的起爆时序为①→②→③→④，然而实际起爆顺序为②→①→③→④．试验结果表明，延时模块的动作时序与液氧实际的相变膨胀节奏之间存在失配，导致各药包之间无法精确延时．

为了解决上述难题，基于对液氧相变膨胀与能量释放模式的深入研究，创新性地提出了与契合液氧瞬态膨胀破岩的分段减振技术．采用段内同步-段间延期的起爆模式，依据液氧在孔内完成相变并达到最大膨胀压力的特征时间进行分段．如图 12d 所示，通过精确控制各分段的起爆时间，确保当前分段的岩体在液氧膨胀压力处于峰值阶段，再适时起爆下一分段，使爆炸应力波与持续的高压气体膨胀作用在时空上耦合叠加，共同作用于岩体．现场应用参数见表 4，破岩效果如图 12e 所示，爆破岩体沿临空面呈下三角形有序抛推，结果表明，液氧药包按照预设时序分段起爆，有效调控了振动输出．此外，对比了分段与全段起爆的质点振速，如图 12f 所示．在 15 m 处的振速结果显示，分段式起爆方式产生的振速显著低于全段式起爆产生的振速，证实了该技术在振动控制方面的卓越效能．

表 4　分段起爆孔网参数

Table 4　Parameters of the segmented detonation hole network

参数	取值
炮孔尺寸/m	∅0.09×6
间排距/m	1.0×1.5
药包尺寸/m	∅0.08×3.6
堵塞长度/m	2.4
最小抵抗线/m	1
单孔充氧量/L	23.8
总充氧量/L	499
充氧时间/min	20
分段数	3
段间延时/ms	30

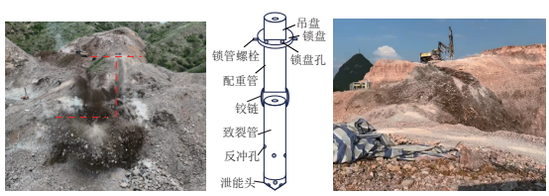
2.3　飞石控制技术

液氧破岩在激发过程中，其核心是吸收剂剧烈燃烧产生高温高压气体和液氧在极短时间内汽化形成大量高压氧气．该过程瞬时产气速率极高，导致炮孔内压力急剧攀升．当孔内压力超过岩体抗拉强度与上覆约束力时，高压气体会携带已破碎的岩块向外快速抛射，从而形成飞石(图 13a)．

因此，提出了一种“顶部抑能＋底部释能”的复合型飞石控制技术，并据此设计了专用储能管

结构，如图 13b 所示．通过顶部抑能结构，在孔口部位构建一个具有较高阻抗的缓冲区域，有效抑制高压气体过早向上逸散，从而杜绝出现孔口高抛射飞石产生；同时，利用底部释能设计，引导主要爆炸能量和高压气体优先向下及径向方向作用，促进岩体内部裂隙网络的扩展与贯通，从而为高压气体提供可控的泄压通道．该技术显著降低了孔口方向的能量集中，从源头上削弱了飞石产生的驱动条件．

图 13a、13c 分别为优化前、后的液氧破岩效果图，表 5 展示了优化前、后的现场破岩参数保持一致．结果表明，在采用相同破岩参数的条件下，应用飞石控制技术的爆破作业区域周边未见明显飞石抛散，爆破能量被有效地约束并作用于目标岩体内部．与未采取控制措施的工况相比，飞石最大抛射距离与散布密度均显著下降．



(a) 优化前液氧破岩效果　(b) “顶部抑能+底部释能”储能单元　(c) 优化后液氧破岩效果

图 13　飞石控制技术

Fig. 13　Fly-rock control technology

表 5　飞石控制技术应用的孔网参数

Table 5　Hole pattern parameters for the application of fly-rock control technology

参数	取值
间排距/m	1.0×1.5
药包尺寸/m	∅0.08×3.6
堵塞长度/m	2.4
最小抵抗线/m	1.5
孔深/m	6
孔径/m	0.09
排数	2
每排炮孔数/个	11

2.4　防冲孔封堵技术

在液氧破岩封堵作业中，通常采用单一刚性材料（水泥、砂浆、碎石）进行炮孔封堵，从而面临密封保压与压力释放之间的固有矛盾．过于密实的封堵体虽能有效保持高能气体压力，却易在压力骤升时被整体冲出孔外（图 14a）；而过于松散的封堵则会导致过早泄压，影响爆破效果．

为解决上述问题，研究了一种基于“柔性缓冲-梯度耗能”机制的防冲孔封堵技术．采用弹性垫层与多级梯度缓释封堵材料相结合的组合结构，具体实施方式为：在装药段上方设置高性能弹性垫层，能够在爆破初始阶段通过自身形变吸收部分冲击动能，从而抑制压力峰值；其上覆按特定粒径与强度梯度配置的封堵材料，沿孔深方向形成从疏到密、由柔至刚的过渡带，通过材料间的逐级压缩实现能量的渐进式耗散，从而将瞬间向上的冲击性荷载转化为相对平缓向上的压力．图 14b 展示了采用柔性梯度封堵技术前、后的破岩效果，结果表明在同一工程条件下，采用该技术能够显著减少液氧破岩的冲孔现象．



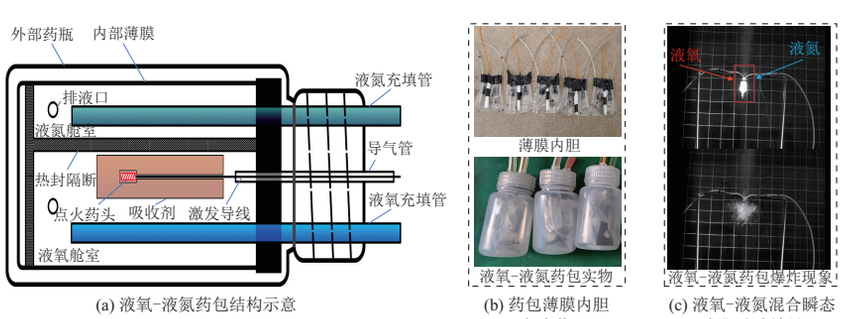
(a) 传统封堵现场冲孔　(b) 柔性梯封堵技术解决冲孔

图 14　防冲孔封堵技术

Fig. 14　Anti-punching plugging technology

2.5　液氧-液氮混合瞬态膨胀技术

为实现更可控的爆破能量释放过程，设计了液氧-液氮混合使用的药包系统，如图 15a 所示，采用独特的嵌套式密封容器设计，外层为承压试验瓶，内部使用热封隔断结构的薄膜作为隔离层，形成液氧与液氮的独立容腔．通过调控隔断位置使液氧与液氮在药包中占据不同比例．



(a) 液氧-液氮药包结构示意　(b) 药包薄膜内胆与实物　(c) 液氧-液氮混合瞬态膨胀试验效果

图 15　液氧-液氮混合瞬态膨胀技术

Fig. 15　Liquid oxygen liquid nitrogen mixed transient expansion technology

图 15b 展示了制备完成的薄膜内胆与药包实物，充液时分别用 2 根充液管独立充装氧-氮腔室，液氧-液氮充液管与导气管构成闭合回路完成药包内部的气压平衡.

图 15c 展示了液氧-液氮混合瞬态膨胀试验现象，激发后吸收剂剧烈燃烧，产生的明亮火焰收束于药包内部，液氧-液氮混合物迅速汽化并向外喷射；当液氧比例降低时，火焰亮度、压力峰值及喷射范围均下降，燃烧阶段的持续时间延长，热积累与气化过程减缓，达到临界破裂压力所需的时间增加. 结果表明，液氧和液氮这 2 种低温介质在激发瞬间迅速混合并发生剧烈的相变转换，产生了显著的气相膨胀效应，为调控液氧爆破能量和减小吸收剂燃烧的火焰面积提供创新方法.

3　现场应用与展望

3.1　基坑开挖

重庆市万州区上海医院用房工程项目中基坑开挖作业区紧邻医院建筑群与居民住宅区，对破岩过程的安全性与环境影响具有极高要求. 如图 16a 所示，基坑开挖区的台阶高度为 6 m，设计采用孔网参数 2.5 m×2.0 m 的布孔方案，每排 9 个炮孔，分为 2 排共 18 孔，具体参数如表 6 所示. 实际应用效果（图 16b）表明，液氧瞬态破岩技术完成了预定范围内岩体的高效破碎，爆后岩块均匀，坡面形态规整. 在整个爆破过程中，监测区域未观测到可见飞石，且质点振速低，满足了邻近敏感区域施工的特殊要求.



(a) 基坑开挖区　　(b) 实际应用效果

图 16　现场照片

Fig. 16　On-site photos

表 6　基坑开挖液氧破岩参数

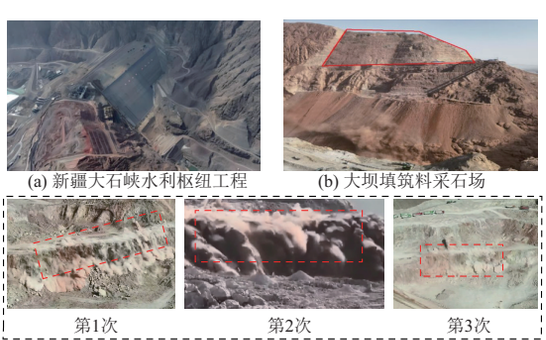
Table 6　Rock breaking parameters of liquid oxygen in foundation pit excavation

参数	取值	参数	取值
台阶高度/m	6	排数	2
抵抗线/m	2.5	每排孔数/个	9
孔间距/m	2.5	孔间延时/ms	15
孔深/m	6	充氧量/L	499
排距/m	2	充氧时间/min	30

3.2　土石方开挖

新疆大石峡水利枢纽工程位于新疆维吾尔族自治区阿克苏市温宿县与乌什县境内，混凝土面板砂砾石坝最大坝高为 247.0 m，如图 17a 所示. 建设大坝需要大量填筑石料，采石场位于大坝左岸，如图 17b 所示. 石料场海拔约 1 710 m，以微晶灰岩和灰质砂岩为主，岩体完整性好、强度较高，平均干抗压强度 84 MPa，平均湿抗压强度 61 MPa.

现场采用液氧瞬态膨胀破岩工艺进行了 3 次系统性土石方开挖作业，具体施工参数与成效对比见表 7. 其破岩过程与效果展示如图 17c 所示，在第 1 次破岩中，采用 13 m 台阶高度与齐发破岩模式，单次破岩方量达 9 655 m^3，破岩振动小、粉化率低，验证了该技术在大方量开采中的可行性. 第 2 次破岩作业无飞石、安全距离小，实际破岩方量为 6 079 m^3，超出预期破岩目标 96%. 第 3 次破岩作业中，保持台阶高度 13 m，使用三段延时起爆方法，土石方逐排起爆、定向抛推，实际破岩方量为 6 526 m^3，块度均匀性显著改善，满足开采石料对大坝筑料的块度要求.



(a) 新疆大石峡水利枢纽工程　　(b) 大坝填筑料采石场

(c) 土石方3次开挖效果

图 17　土石方开挖

Fig. 17　Earth rock excavation

表 7　土石方开挖液氧破岩参数

Table 7　Rock breaking parameters of earth rock excavation with liquid oxygen

参数设置	第 1 次破岩	第 2 次破岩	第 3 次破岩
台阶高度/m	13	10	13
孔径/mm	110	110	110
孔深/m	15	12	15
孔距/m	3	3	3
排数	2	2	2
排距/m	1.5,3.0	1.5,2.8	1.5,2.8
孔数/个	51	40	55
封堵长度/m	3	3	3
充氧量/t	9.46	4.46	10.32
破岩方量/ m^3	9 655	6 079	6 526
破岩分段	齐发破岩	齐发破岩	分 3 段延时

3.3 展望

针对液氧瞬态膨胀破岩技术应用现状提出以下发展构想：

1)建立标准规范．目前以液氧破岩为代表的气体爆破技术尚需完善技术标准和操作规程、做好新产品与新技术的试验管控，监管部门需严格市场准入、落实主体监管责任．

2)吸收剂优选．需要优选对液氧吸附性能好、爆破效果佳、经济成本低、易制作运输的吸收剂，为液氧瞬态膨胀破岩技术提供关键材料基础．

3)移动式制氧装备．需设计制作移动式制氧装备，颠覆传统场地限制和复杂部署流程，实现按需制氧、持续供应，从根本上解决运氧成本与供应不稳定难题．

4)自动化生产线．需研建液氧药包全流程、自动化生产线，彻底变革传统手工模式，缩短药包制作、封装全流程周期，以推动液氧瞬态膨胀破岩技术的规模化应用．

4 结 论

1)液氧瞬态膨胀是由燃烧驱动＋相变主导的包含吸收剂燃烧与液氧相变的瞬态能量释放过程．相比于炸药，液氧相变膨胀全过程在毫秒级内完成，前沿波阵面传播速度峰值更低，超压峰值更小、作用时间更长、压力震荡衰减．

2)提出了液氧相变-燃烧比计算方法，即$\delta=\Delta\varphi(O_2)_{相变}:\Delta\varphi(O_2)_{燃烧}=[\varphi(O_2)_{终}-\varphi(O_2)_{初}]:[\Delta\varphi(CO_2)+1/2\Delta\varphi(CO)]$，通过实例验证了液氧瞬态膨胀过程中以吸收剂燃烧提供热量，液氧相变膨胀占主要的做功比例．

3)设计了液氧药包静电感度测试系统，通过试验确定了该工况下液氧药包的临界发火能量为4.8 J；当吸收剂沾染油脂时会形成自携氧、预混的非传统爆炸体系，增加燃爆风险，此时临界发火能量降低为2.7 J．

4)提出了瞬态高温点火新技术、分段减振技术、飞石控制技术、防冲孔封堵技术和液氧-液氮混合瞬态膨胀技术，解决了现有液氧瞬态膨胀破岩工程中的技术难题．

参考文献：

[1] XU P, YANG R S, ZUO J J, et al. Research progress of the fundamental theory and technology of rock blasting[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022,29:705-716.

[2] HE B, ARMAGHANI D J, LAI S H, et al. A deep dive into tunnel blasting studies between 2000 and 2023: A systematic review[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024,147:105727.

[3] NETHERTON M D, STEWART M G. The effects of explosive blast load variability on safety hazard and damage risks for monolithic window glazing[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36:1346-1354.

[4] CHATTERJEE S, DEB U, DATTA S, et al. Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation[J]. Chemosphere, 2017,184:438-451.

[5] DUBOVIK A V, AKININ N I, ANNIKOV V Eet al. Explosive risk criterion for energetic materials[J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2009,43:218-223.

[6] 程 呈．炸药及火工品的储存与安全管理分析[J]．化工管理，2022(6):84-86.
CHENG Cheng. The storage and safety management analysis of explosives and firearms[J]. Chemical Engineering Management, 2022(6):84-86.

[7] 王雁冰，张芳平，李守业，等．三向围压与液氧爆破荷载耦合作用下红砂岩损伤破裂特征研究[J]．隧道与地下工程灾害防治，2025,7(3):58-71.
WANG Yanbing, ZHANG Fangping, LI Shouye, et al. Research on the damage and fracture characteristics of red sandstone under the coupling effect of triaxial confining pressure and liquid oxygen blasting load[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025,7(3):58-71.

[8] HOU L, ZHANG S, ELSWORTH D, et al. Review of fundamental studies of CO_2 fracturing: Fracture propagation, propping and permeating[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 205:108823.

[9] 王卓颖，南 华，王 帅．岩体节理特征对液态CO_2爆破效果的影响规律[J]．中国矿业大学学报，2025,54(5):1096-1111.
WANG Zhuoying, NAN Hua, WANG Shuai. The influence of rock joint characteristics on the effectiveness of liquid CO_2 blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025,54(5):1096-1111.

[10] 张 弛，邓龙传，庄欠伟，等．基于试验和数值模拟的滚刀旋转破岩受力和效率研究[J]．岩土力学，2025,46(9):2995-3006.
ZHANG Chi, DENG Longchuan, ZHUANG Qianwei, et al. Experimental and numerical investigations on rotary rock-breaking force and efficiency of disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025,46(9):

2995-3006.

[11] LI J G, LI D, WANG S W, et al. Theoretical and numerical analysis of the rock breaking process by impact hammer[J]. Powder Technology, 2024, 448: 120254.

[12] YUAN R, LIAN Z, ZHANG Q, et al. Rock fracturing characteristics and roadway expansion application of static crushing agent under multi-row drilling condition[J]. Applied Sciences, 2024, 14(19): 9032.

[13] 陈炎波，蒋志明，张庆彬，等.减水剂对静态破碎剂工作性能的影响[J].工程爆破，2025，31(1)：109-120.
CHEN Yanbo, JIANG Zhiming, ZHANG Qingbin, et al. Effect of water-reducers on work ability of soundless cracking agent[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(1): 109-120.

[14] 秦　军.论液氧炸药[J].东北大学学报(自然科学版)，1955(2)：53-62.
QIN Jun. Liquid oxygen explosives[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 1955(2): 53-62.

[15] CHENG W X, YANG R S, ZUO J J, et al. Explosive wave field characteristics of liquid oxygen explosive and nickel hydrazine nitrate[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(8): 087222.

[16] 王雁冰，李　雪，阙朝阳，等.液氧瞬态膨胀定向泄能气体流场结构及脉动特征研究[J].中国矿业大学学报，2025，54(3)：609-622.
WANG Yanbing, LI Xue, QUE Chaoyang, et al. Study on the flow field structure and pulsation characteristics of liquid oxygen transient expansion directional energy release gas[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 609-622.

[17] 王森森.我国气体爆破技术安全问题与管控措施研究[J].工程爆破，2025，31(2)：47-53.
WANG Sensen. Research on safety issues and control measures of gas blasting technology in China[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(2): 47-53.

[18] CHOU H C, YEH C T, SHU C M. Fire accident investigation of an explosion caused by static electricity in a propylene plant[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 97: 116-121.

[19] 于学馥，潘新之，黄源倜.关于大狐山矿采用液氧炸药的静电问题[J].工程科学学报，1956(2)：1-6.
YU Xuefu, PAN Xinzhi, HUANG Yuanti. Electrostatic problem of liquid oxygen explosive used in Dahushan mine[J]. Chinese Journal of Engineering, 1956(2): 1-6.

[20] BDZIL J B, STEWART D S. The dynamics of detonation in explosive systems[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2007, 39: 263-292.

[21] 段卓平，白志玲，黄风雷.非均质固体炸药冲击起爆与爆轰研究进展[J].火炸药学报，2020，43(3)：237-253.
DUAN Zhuoping, BAI Zhiling, HUANG Fenglei. Advances in shock initiation and detonation of heterogeneous solid explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(3): 237-253.

[22] FUJIWARA T, HISHIDA M, KINDRACKI J, et al. Stabilization of detonation for any incoming mach numbers[J]. Combust Explos Shock Waves, 2009, 45: 603-605.

[23] SHORT M, QUIRK J J. High explosive detonation-confiner interactions[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2018, 50: 215-242.

[24] PROUD W G, WILLIAMSON D M, FIELD J E, et al. Diagnostic techniques in deflagration and detonation studies [J]. Chemistry Central Journal, 2015, 9: 52.

[25] CICCARELLI G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34: 499-550.

[26] 杨昆永，李　岩，李　勃，等.着火位置对氢气爆燃行为影响的数值模拟[J].船舶工程，2025，47(增1)：398-405.
YANG Kunyong, LI Yan, LI Bo, et al. Numerical simulation on influence of ignition position on hydrogen deflagration behavior [J]. Ship Engineering, 2025, 47(Sup 1): 398-405.

[27] UTKIN A V, MOCHALOVA V M. Nonclassical detonation regimes of pressed and liquid explosives (Review)[J]. Combust Explos Shock Waves, 2015, 51: 63-71.

[28] 王雁冰，赵小艳，马　丹，等.液氧瞬态相变爆破流场温度及压力变化规律研究[J].采矿与安全工程学报，2025，42(4)：949-959.
WANG Yanbing, ZHAO Xiaoyan, MA Dan, et al. Research on the temperature and pressure variations in the transient phase change blast flow field of liquid oxygen[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(4): 949-959.

[29] 王雁冰，孔维文，汪东宸，等.径向水耦合爆破爆轰波动效应分析[J].煤炭学报，2024，49(增2)：782-799.
WANG Yanbing, KONG Weiwen, WANG Dongchen, et al. Analysis of detonation wave effect in radial water coupling blasting[J]. Journal of China

Coal Society, 2024,49(Sup 2):782-799.

[30] 王雁冰,丁宝山,付代睿,等.液氧相变膨胀气体的传播规律及压力分布特性研究[J/OL].煤炭科学技术,1-12[2025-10-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250703.1643.003.
WANG Yanbing, DING Baoshan, FU Dairui, et al. Study on propagation law and pressure distribution characteristics of liquid oxygen phase change expansion gas[J/OL]. Coal Science and Technology, 1-12[2025-10-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250703.1643.003.

[31] HOLDSTOCK P. A review of electrostatic standards [J]. Journal of Electrostatics, 2022, 115: 103652.

[32] WIECHUŁA B M. The incendivity hazards of electrostatic discharges from charged, non-conductive solid materials[J]. Fire Safety Journal, 2013, 60: 46-55.

[33] MCCARTY L S, WHITESIDES G M. Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2008, 47: 2188-2207.

[34] AKRAM S, CASTELLON J, AGNEL S. Progress in gas/solid interface charging phenomena[J]. Coatings, 2020, 10(12): 1184.

[35] 姚晓宇,沈 俊,李 健,等.流体气液临界参数测量方法研究进展[J].化工学报,2023,74(5):1847-1861.
YAO Xiaoyu, SHEN Jun, LI Jian, et al. Research progress in measurement methods in vapor-liquid critical properties of mixtures [J]. CIESC Journal, 2023,74(5):1847-1861.

[36] 王永涛,毛建拥,胡柏剡,等.超临界反应及超临界流体参与的反应研究与应用进展[J].化工学报,2024,75(11):3973-3986.
WANG Yongtao, MAO Jianyong, HU Baishan, et al. Progress in supercritical reactions and supercritical fluid participated reactions and their applications [J]. CIESC Journal, 2024,75(11):3973-3986.

[37] 何 博,聂万胜.高压环境下液氧/氢的气-液平衡及其物理属性研究[J].热科学与技术,2014,13(2):176-181.
HE Bo, NIE Wansheng. Research on vapour-liquid equilibrium and physical properties of liquid oxygen/hydrogen mixture at high pressure [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2014,13(2):176-181.

[38] 张景云,赵奕斌,吕晓莹,等.超临界CO_2应用研究概述[J].上海塑料,2024,52(5):22-30.
ZHANG Jingyun, ZHAO Yibin, LYU Xiaoying, et al. Overview of supercritical carbon dioxide application research[J]. Shanghai Plastics, 2024,52(5):22-30.

[39] 秦佐己,金轶斌,胡俊杰,等.超临界二氧化碳增强型地热系统研究综述[J].安全与环境工程,2025,32(4):1-11.
QIN Zuoji, JIN Yibin, HU Junjie, et al. Review of supercritical CO_2 enhanced geothermal systems: Research progress and future directions [J]. Safety and Environmental Engineering, 2025,32(4):1-11.

[40] 韩体飞,姜 鑫,朱延钰,等.有限空间内桥丝式电点火元件的发火特性[J].高压物理学报,2025,39(2):76-83.
HAN Tifei, JIANG Xin, ZHU Yanyu, et al. Ignition characteristic of bridgewire electric ignition element in limited space [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025,39(2):76-83.

[41] LITTLETON J, SECCO R, YONG W J, et al. Electrical resistivity and thermal conductivity of W and Re up to 5 GPa and 2300 K[J]. Journal of Applied Physics, 2019,125:135901.

(责任编辑 沈 菊 仝 腾)