

不同药量下“高能燃烧剂”爆燃波的传播规律及强度特性研究

王雁冰¹, 丁宝山¹, 张祥良^{2,*}, 朱梓诚³, 李奕霖¹, 钟子剑¹

(1.中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京, 100083;

2. 煤岩动力灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 徐州, 221116;

3. 重庆创普达机械科技有限公司, 重庆, 408400)

摘要: 针对不同药量对高能燃烧剂爆燃效果的影响问题, 本文通过高速纹影系统和超压检测系统对高能燃烧剂爆燃产生的前驱压力波和燃烧气体在空气流场中的传播规律以及压力波的强度变化开展研究。以药量作为变量设计了3种相同尺寸的药包, 并设置了4个位置不同的压力传感器, 对压力波进行全面的测量。通过纹影照片分析前驱压力波和燃烧气体的波动变化, 对比分析3种药量下压力波的传播过程、速度变化、压力变化, 并将理论分析与实验结果相结合, 得到前驱压力波在空气流场中传播速度及压力的演化过程和压力分布规律, 以及非炸药型高能燃烧剂破岩的可行性理论。研究表明: 高能燃烧剂从点燃开始进入了一个较长的燃烧过程, 燃烧剂释放出大量高温、高压气体, 在药包内部不断积累升温、升压, 达到药包致裂压力极限后, 前驱压力波与燃烧气体以燃烧源为中心向外不规则球形传播, 随后两者逐渐分离。前驱压力波的传播速度较快, 相同时间内, 压力波传播距离更远。药量越大, 累压过程越短, 前驱压力波传播速度越快, 燃烧产生的高温高压气体越多, 使药包的破碎效果越好, 进而前驱压力波与燃烧气体的传播形态越规则。超压峰值压力、压力波正压时间和峰值冲量随着药量的增加, 均呈现出一种递增的趋势。非炸药型高能燃烧剂的爆燃效果、前驱压力波的传播形态、破岩能力等与药量成正比, 药量越大的高能燃烧剂威力越大。

关键词: 高能燃烧剂; 高速纹影拍照系统; 超压检测系统; 前驱压力波; 燃烧气体

Study on the propagation law and intensity characteristics of "high-energy combustion agent" deflagration wave under different dosage

WANG Yanbing¹, DING Baoshan¹, ZHANG Xiangliang^{2,*}, ZHU Zicheng³, LI Yilin¹, ZHONG Zijian¹

(1.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing, 100083, China; 2.Key Laboratory of Theory and Technology on Coal and Rock Dynamic Disaster Prevention and Control National Mine Safety Administration, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China. 3.Chongqing Chuangpuda Machinery Technology Co., LTD.,

基金资助: 煤岩动力灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室开放基金(No.12345678); 国家自然科学基金铁路基础研究联合基金项目(No. U2468219)。

作者简介: 张祥良(1993-), 男, 汉族, 徐州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事坚硬煤岩等离子体致裂增渗方面的科研和教学工作。Email: xl_zhang0719@cumt.edu.cn。

Abstract: The influence of different dosage on the deflagration effect of high-energy combustion agent, this paper studies the propagation law of the precursor pressure wave and the intensity change of the pressure wave through the high-speed shading system and the over pressure detection system. The high-energy combustion agent used in this experiment takes potassium perchlorate as the main oxidant, and its content is controlled within the range of 60% to 75%. amine oxalate is used as the reducing agent, and its content is set between 20% and 30% to balance the oxidation reaction process and promote the full release of energy. In addition, to further optimize the combustion characteristics, 0% to 10% salicylic acid was also introduced as an auxiliary reducing agent, which has a positive impact on the overall combustion effect by regulating the combustion rate or improving the properties of the combustion products. Three drug packets of the same size were designed with the dosage as a variable, and four pressure sensors with different positions were set up to make a comprehensive measurement of the pressure wave. One PVDF pressure sensor with sampling frequency of 0-30 MHz and range of GPa, two CY-YD-202 overvoltage sensor with sampling frequency of 200 KHz and 0-15 MPa, and one CY-YD-202 overvoltage sensor with sampling frequency > 100 KHz and 0-10 MPa are arranged at measuring points 1,2,3 and 4 respectively. Through shadow photo analysis of the precursor pressure wave and combustion gas fluctuation, comparative analysis of three kinds of dosage pressure wave propagation process, speed change, pressure change, and combining the theoretical analysis and experimental results, get the precursor pressure wave in air flow field and pressure velocity evolution and pressure distribution, and the feasibility of high-energy explosive combustion agent rock theory. The results show that the high-energy combustion agent enters a long combustion process from the ignition. The combustion agent releases a large amount of high temperature and high pressure gas, which accumulates the temperature and increases the pressure inside the package and reaches the pressure. After reaching the cracking pressure limit of the package, the precursor pressure wave and the combustion gas propagate outward irregularly at the center of the combustion source, and then the two gradually separate. The precursor pressure wave travels faster, and the pressure wave travels farther away in the same time. The larger the dosage, the shorter the tired pressure process, the faster the propagation speed of the precursor pressure wave, the more high temperature and high pressure gas produced by combustion, the better the crushing effect of the drug package, and the more regular the propagation form of the precursor pressure wave and combustion gas. Over pressure peak pressure, pressure wave positive pressure time and peak impulse all show an increasing trend with the increase of drug dosage. The deflagration effect of the non-explosive high-energy combustion agent, the propagation form of the precursor pressure wave, and the rock breaking ability are directly proportional to the dosage of the drug, and the greater the drug dosage, the greater the power of the high-energy combustion agent.

Keywords: High-energy Combourable Agent; High-speed Schlieren Photography System; Overpressure Detection System; Precursor Pressure Wave; Combustion Gas

随着爆破技术的发展，炸药爆破在矿山与房屋拆除中被广泛应用，其效率与成本效益显著，但存在强烈的振动影响、飞石伤人风险、排放有害气体的问题，且运输、储存严格管控^[1]，另外炸药生产、运输与储存过程中具有高危险性。所以，促使人们探索更环保、安全高效的替代方案。非炸药爆破技术应运而生，如等离子爆破^[2]、二氧化碳致裂^[3]、高能燃烧剂等，以低振动、环保、无飞石、高效能、零有害气体排放等优势^[4]，应用于市政、道路拓宽、山体改造、高危矿产开采等。

高能燃烧剂作为非炸药破岩技术之一^[5]，不仅规避了传统炸药爆破带来的噪音、振动及环境污染问题，还具有高效、安全、成本可控等多重优势，无需复杂的审批程序和严格的安全管理措施，大大简化了施工流程，提高了工作效率。其破岩机理主要依赖于燃烧剂在高温下产生的快速气体膨胀和高压效应。高能燃烧剂通常采用金属氧化物或粉末如氧化

铜、铝粉等制成^[6]。不同研究团队通过调整配方制备高能燃烧剂，如李文福等^[7]用氧化铜与铝粉；美国学者 Aly Y 等^[8,9]添加镁铝合金提升烟火剂性能；伊朗学者 Pourtedal H R 等^[10]探索镁与硝酸盐的配比；张兴高等^[11]则以 Fe_2O_3 为主制备高温燃烧剂；伊朗学者 Pouimortazavi S M 等^[12,13]研究微米级铝粉含量对热分解的影响。尽管这些金属高能燃烧剂爆破效果显著，但成本高且活泼金属粉末的使用会带来安全隐患。

高速纹影系统^[14]具有独特的优势，能够把难以直接察觉的流体密度变化利用光学原理转换为可以直观看见的光强变化，而且借助高速相机能够捕捉并记录下流场中的密度变化情况。学者们在纹影法应用方面所做的诸多研究，为本次实验在方法上提供了有益的借鉴，在经验上给予了宝贵的积累。王雁冰等^[15-17]利用纹影超压系统对爆破爆轰波动效应分析得到了炸药内部的爆轰波动过程，对比分析了多种情况下冲击波的压力变化、冲击波的传播及能量传递效率。李斌等^[18]利用高速纹影测量方法对爆炸冲击波威力进行了分析，验证了爆炸冲击波高速纹影测量方法的有效性，实现了冲击波流场的可视化。陈元迪等^[19]通过采用纹影摄影术方法，初步揭示了预混合氢气燃料在定容燃烧室内燃烧时火焰初期紊流产生的机理，以及由开始的层流状火焰发展到湍流状火焰的过程。李华等^[20]利用纹影法的工作原理和刀口进给量与纹影图像的对应关系，分别讨论了刀口方向选择、焦点位置确定和刀口切入量设置。周昊等^[21]基于纹影技术测量了本生灯预混火焰温度场，并根据盖斯公式和气体状态方程进行求解，获得任意切面的温度场分布，将重建结果和谱线反转法测定的温度场进行比较，温度场分布符合实际情况。通过对纹影实验的应用，为纹影实验的原理和操作流程的发展、完善做出了贡献，拓展了纹影实验的应用领域。

本研究采用了一种新型非金属高能燃烧剂，是以一种非金属粉末作为氧化剂与多种还原剂组成的燃烧剂混合粉末。为了探究不同药量下非炸药型高能燃烧剂爆燃所形成的前驱压力波与燃烧气体的动态传播特性，本实验利用高速纹影系统能将不可见的流体密度变化转化为可直观观察的光强变化的原理，通过高速相机捕捉和记录流场中的密度变化。此外为了研究燃烧过程中产生的压力波在介质中传播的强度变化以及最终的分布规律，还使用了超压检测系统，实时、准确地捕捉并记录爆炸产生的前驱压力波超压数据。拓宽了非炸药破岩技术的研究视野，为非炸药破岩方法研究提供了理论数据支持和新的思路。

1 实验方案设计

1.1 药包设计与制备

本次实验采用的高能燃烧剂以高氯酸钾作为主要氧化剂，其含量控制在 60%至 75%的范围内，用草酸铵作为还原剂，其含量设定在 20%至 30%之间，以平衡氧化反应过程，促进能量的充分释放。此外，为了进一步优化燃烧特性，还引入了 0%至 10%的水杨酸作为辅助还原剂，通过调节燃烧速率或改善燃烧产物的性质，对整体燃烧效果产生积极影响。

装药管采用了直径为 20 mm、长度为 7 cm 的白色 PVC 管，这种材料不仅具有良好的耐腐蚀性和绝缘性，还能有效保护内部高能燃烧剂免受外界环境的影响，确保实验过程的安全。点火装置选用了电火柴头，具有快速、可靠的点火性能。为了研究不同药量对燃烧效果的影响，设计了 3 组实验，对照参数见表 1，实物图如图 1。

首先将 PVC 管裁剪成所需要的尺寸，使用 PVC 胶将端盖与药管一端粘合在一起，保证其密封性；在另一端盖中心位置打一个 2-3 mm 的小孔，将电火柴头插入端盖后用热熔胶固定；再将一定体积的橡皮泥或陶泥塞入药管内部并压实，用以控制药包装药的不同质量；然后将已称量过质量（分别为 7 g、10 g 和 13 g）的非金属高能燃烧剂混合粉末转移至药管中；最后使用 PVC 胶将带火柴头的端盖与药管另一端粘合在一起。



图 1 高能燃烧剂药包实物图

Figure 1 Physical diagram of the high-energy incendiary agent package

表 1 实验中设计的 3 个对照组

Table 1 Three control groups designed for the experiment

| Numbe r | Material of loading pipe | Size of loading pipe | Drug type | Charge quantity |
|------------|--------------------------|---|-----------------------|--------------------|
| 1# | PVC tube | 70 mm long, 20 mm outer diameter, 0.1 mm thick | High energy burner | 7 g |
| 2# | PVC tube | 70 mm long, 20 mm outer diameter, 0.1 mm thick | High energy burner | 10 g |
| 3# | PVC tube | 70 mm long, 20 mm outer diameter, 0.1 mm thick | High energy burner | 13 g |

1.2 实验系统

1.2.1 高速纹影拍照系统

高速纹影拍照系统由高速相机和纹影系统构成。其利用光在流场中折射率梯度与气流密度的正比关系，把不可见的流体密度变化转为光强变化来观测流场。典型的“Z 字型”光路含光源、反射镜、流场区、刀口与成像系统（高速摄像机）。光源光线经反射镜反射穿过流场，因气流密度变化而折射，再经反射镜反射和刀口调整后，由透镜投射到高速相机成像。

纹影系统光路中，线性光源光线经聚光镜在狭缝成像并整形，再经两相同透镜协同成像于后焦平面，利用刀口调控形成纹影图像。流场位于两透镜间，其密度或温度变化导致光程差异，经成像物镜放大后记录于高速相机底片。

实验系统中选用日本 nac Image Technology 公司生产的 Memrecam ACS-1 高速像机。实验时高速相机拍摄频率 ν 为 100000 Hz。



①-Light; ②-Speculum I; ③-Protective box (Flow field area); ④-Speculum II; ⑤-Light source receiving box;
⑥-High-speed camera

图 2 高速纹影实验系统实物图

Figure.2 Actual diagram of the high-speed schlieren experimental system

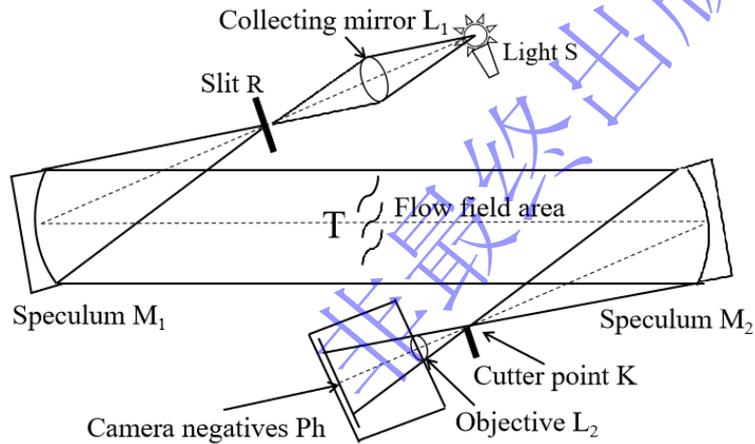


图 3 纹影系统光路原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical path of Schlieren system

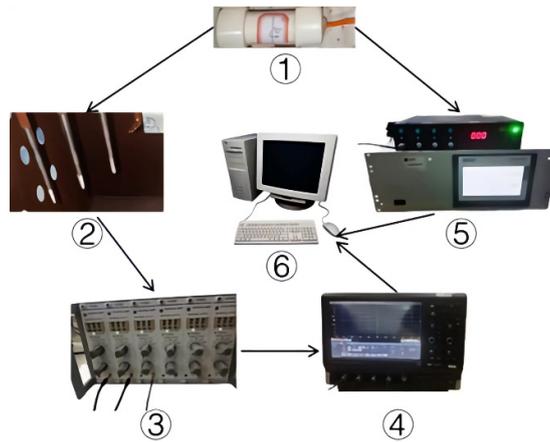
1.2.2 超压监测系统

超压监测系统集成了多种高精度传感器、信号调理器、数据采集模块以及先进的数据处理与分析软件，能够实时、准确地捕捉并记录爆燃产生的前驱压力波超压数据。本实验该系统由压力传感器、信号放大器、示波器组成。图 4 为实验现场超压测试仪器的实物图。

前驱压力波超压计算公式为^[22]：

$$P_m = \frac{V}{K \cdot S_q} \quad (1)$$

其中， V 为示波器显示的电压，mV； K 为电荷放大器的灵敏度， $\text{mV} \cdot \text{pC}^{-1}$ ，实验中设置 $K_1=2.5 \text{ mV} \cdot \text{pC}^{-1}$ 、 $K_2=K_3=K_4=25 \text{ mV} \cdot \text{pC}^{-1}$ ； S_q 为传感器的电荷灵敏度， $\text{pC} \cdot \text{MPa}^{-1}$ ，本实验 $S_{q1}=4394 \text{ pC} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 、 $S_{q2}=S_{q3}=283 \text{ pC} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 、 $S_{q4}=350 \text{ pC} \cdot \text{MPa}^{-1}$ 。



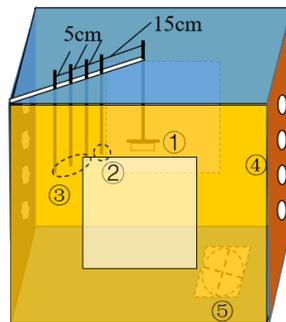
①-Cartridge bag; ②-Pressure pickup; ③-Signal amplifier; ④-Oscilloscope; ⑤-Burst starter and synchronization controller; ⑥-computer

图4 实验现场超压测试仪器实物

Fig.4 The actual overpressure test instrument at the experimental site

1.3 实验步骤

为了控制实验条件并优化观测效果，药包被悬挂于设计的一个铁质箱体内部，位于纹影观测光路的正中间区域。这一铁质箱体结构坚固，不仅能防止药包爆燃后的碎片和大量气体冲击损坏周围仪器设备，而且能够有效隔绝外界干扰，铁箱开设了许多泄压孔，模拟在自由场中的环境。为了获得更为全面的压力分布数据，选用了1个采样频率为0~30 MHz、量程达GPa的PVDF压力传感器，2个采样频率 ≥ 200 KHz、量程为0~15 MPa的CY-YD-202超压传感器，1个采样频率 > 100 KHz、量程为0~10 MPa的CY-YD-202超压传感器，分别布置在测点1、测点2、测点3、测点4。PVDF传感器具有优异的动态响应能力和长期稳定性。然后将PVDF压力传感器调整至距装药中心水平距离15 cm的位置，测点1至测点4分别位于药包中心向外15 cm、20 cm、25 cm和30 cm处。并在与装药中心相同水平高度的直线上，以确保测量数据的可比性和一致性。这个位置的选择基于前期模拟计算和实验经验的积累。实物布置如图5。这样的布局设计既保证了传感器之间的相对独立性，又能在空间上形成一定的覆盖密度，从而实现对接爆产生的压力场进行监测。将传感器与信号放大器相连接之后，进行压力传感器灵敏度测试；然后把高速纹影拍照系统的光路调节到能在电脑中看到一个圆形的灰色区域，并且将药包悬挂在中心位置；另有同步控制器和起爆器与高速相机相连，保证起爆与记录同步进行。



①-Cartridge bag; ②-The PVDF pressure sensor; ③-The CY-YD-202 over pressure sensor; ④-Pressure relief hole; ⑤-exhaust fan

图5 药包与压力传感器相对位置关系

Fig.5 The relative position relationship between the medicine package and the pressure sensor

2 纹影实验结果与分析

2.1 前驱压力波与燃烧气体的动态传播特性

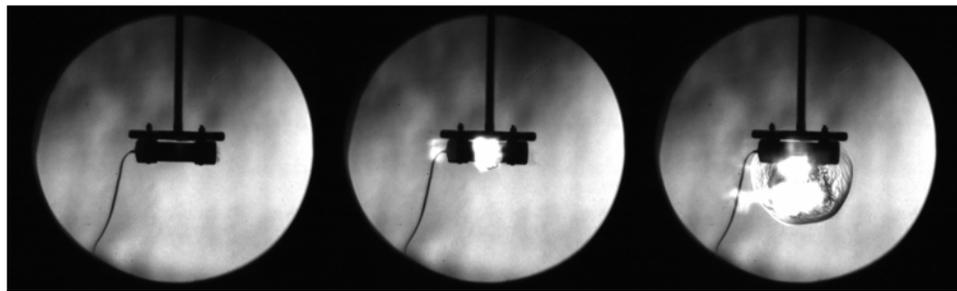
图 6 为高速纹影拍照系统记录到的高能燃烧剂爆燃产生的前驱压力波与燃烧气体传播过程中几个典型时刻的纹影图像。实验 1#、2#、3#分别代表药量 7 g、10 g、13 g。在图像起始阶段，高能燃烧剂被成功激发并点燃后，进入了一个相对较长的燃烧过程。此过程中，燃烧剂释放出大量的高温、高压气体。这些气体在药包内部不断积累，温度和压力持续攀升，直至达到外包装材质的致裂压力极限后，药包瞬间破裂，前驱压力波与燃烧气体几乎同时从破裂口涌出，初期两者混合在一起，共同沿着药包的径向方向向外传播。前驱压力波作为爆燃能量的先导，其传播速度远快于燃烧气体，随着传播距离的增加，两者之间的相互作用开始逐渐减弱。前驱压力波由于其高速、低压的特性，能够更快地穿透空气介质，而燃烧气体则因其高温、高压且含有大量固体颗粒和未完全燃烧的燃料，其传播速度相对较慢且更加复杂。

图 6 (a) 为实验 1#中前驱压力波与燃烧气体动态传播的全过程，在高能燃烧剂被点燃的瞬间，药包内部能量迅速累积并转化为爆燃的初始动力。经过较长时间的积累期后，在 77.67 ms 时，前驱压力波伴随着高温高压的燃烧气体，开始从药包中心向四周扩展；77.78 ms 时，图像中清晰地出现了前驱压力波与燃烧气体之间的分界面。它们各自独立而又相互作用的传播路径就此展开。77.84 ms 时，前驱压力波与燃烧气体完全分离，它们之间被一圈环形的亮色区域所清晰隔开，这一亮色区域很可能是由高温、高压环境下的气体电离或辐射效应造成的。随后，前驱压力波继续向前推进，在 77.95 ms 时，抵达相机屏幕的边缘区域。由于实验环境设计为自由空气场，没有遇到固体障碍物，因此前驱压力波在传播过程中未发生明显的反射现象，保持了其原有的传播方向与速度，展示了气体介质中压力波传播的直线性与高效性。相比之下，燃烧气体的传播则显得更为复杂且滞后。在 80.88 ms 时，燃烧气体才陆续到达相机屏幕的边缘，其传播速度不仅慢于前驱压力波，而且在空间分布上也呈现出非均匀性。燃烧气体并非简单地以球形向四周均匀扩散，而是受到外部包装开裂位置、内部气体压力分布不均等多种因素的影响，呈现出从开裂处向外飞散的复杂形态。

相比与实验 1#，图 6 (b) 实验 2#显示了不同药量下前驱压力波与燃烧气体传播特性的差异。在实验 2#中，从药包被点燃到前驱压力波与燃烧气体开始向周围扩展所用的时间仅为 30.56 ms，这一速度明显快于实验 1#，表明实验 2#中的高温高压气体积累过程更为迅速。这种积累过程的加快可归因于药量的增加。前驱压力波与燃烧气体的分离时间在 30.68 ms 发生，相较于实验 1#提前了 47.10 ms。这一提前分离的现象进一步证实了实验 2#中燃烧反应的剧烈程度更高，使前驱压力波能够更快地脱离燃烧气体区域，独立向前传播。从图像对比来看，实验 2#的前驱压力波传播范围显著大于实验 1#，反映了前驱压力波在实验 2#中具有更高的传播速度。从压力波初现到其传播至相机屏幕边界，实验 2#仅用时 260 μs ，这一速度的提升体现了爆燃能量的增强。此外，实验 2#中燃烧气体虽然同样滞后于前驱压力波到达相机屏幕边缘，但燃烧产生的高温、高压气体量明显增加。这是由于实验 2#中使用的药量增大，导致反应物增多，进而生成了更多的反应产物。这些产物在燃烧过程中释放出更多的能量，形成了更为强烈的高温高压环境，推动了燃烧气体的快速扩散。

在增加药量至 13 g 后高能燃烧剂的燃烧反应更加激烈，如图 6 (c) 中实验 3#的结果展示中，压力积累过程缩短至 13.41 ms，这一速度相比实验 1#快了 5.79 倍，比实验 2#快了 2.28 倍，充分说明了药量增加对燃烧速率和能量释放的显著影响。在实验 3#中，前驱压力波与燃烧气体的分离发生在 13.56 ms，这一时间点相较于前两组实验更为提前，但值得注意的是，两者在分离后仍然保持相对较近的距离，这表明在更强烈的燃烧条件下，前驱压力波与燃烧气体的相互作用可能更为复杂和持久。前驱压力波在 13.65 ms 时即已到达相机屏幕边界，其波阵面分布范围更广，进一步印证了高药量下高能燃烧剂爆燃能量的巨大

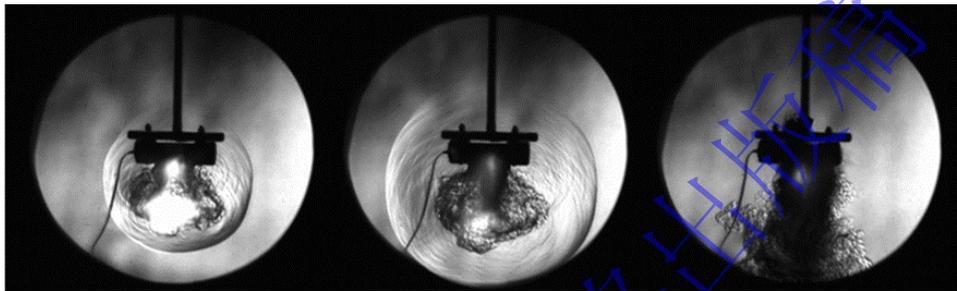
和释放速度的迅猛。而燃烧气体在随后的 14.39 ms 时扩散至屏幕边缘，虽然稍晚于前驱压力波，但其扩散范围因药量的增加而显著增大，PVC 管也因承受不住内部巨大的压力而破碎得更加均匀，这为燃烧气体的均匀扩散提供了条件。



0 ms

77.67 ms

77.78 ms

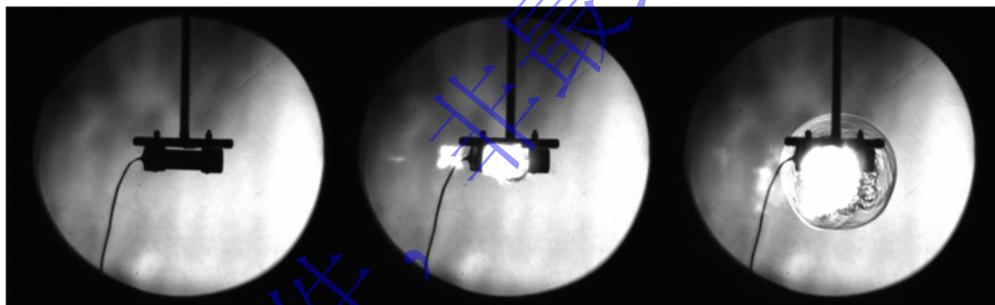


77.84 ms

77.95 ms

80.88 ms

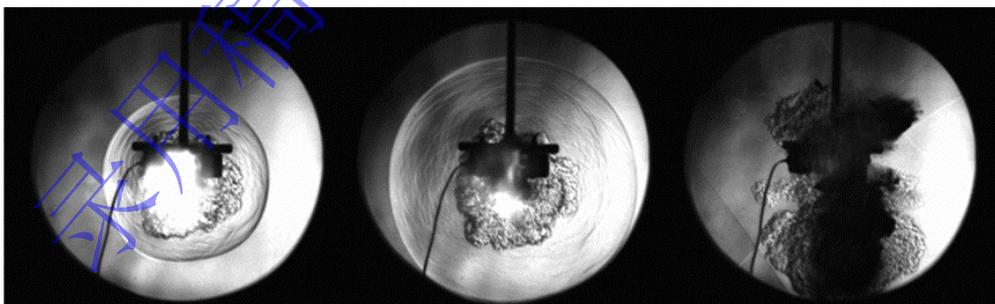
(a) 1#



0 ms

30.56 ms

30.68 ms



30.74 ms

30.82 ms

31.53 ms

(b) 2#

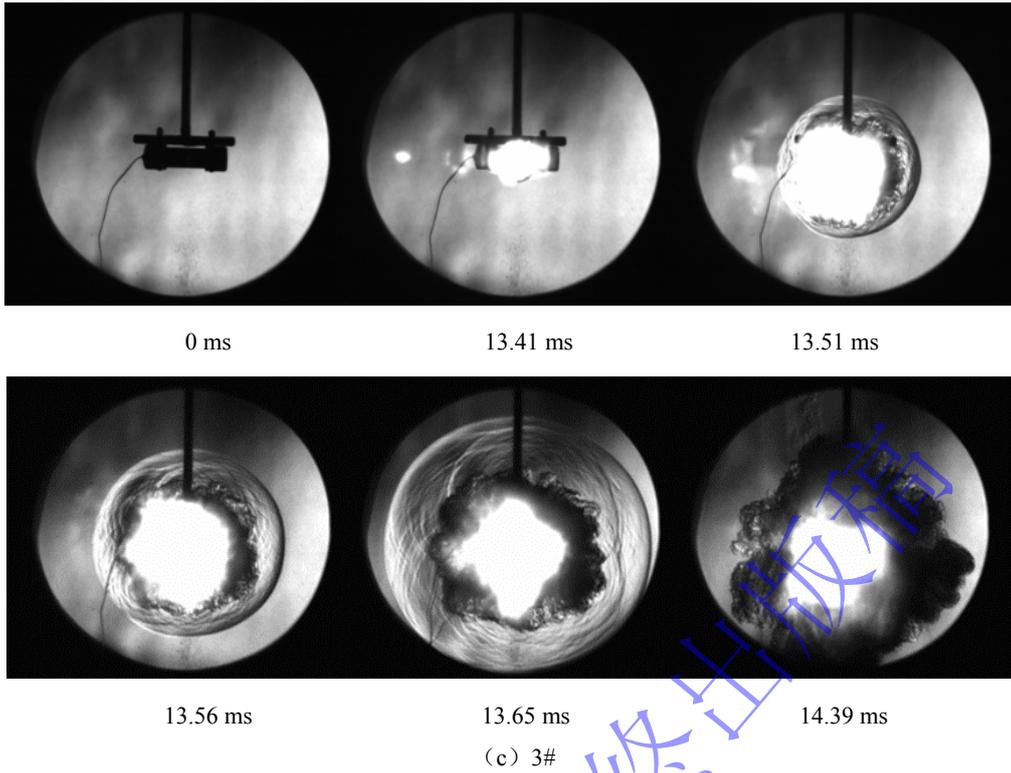
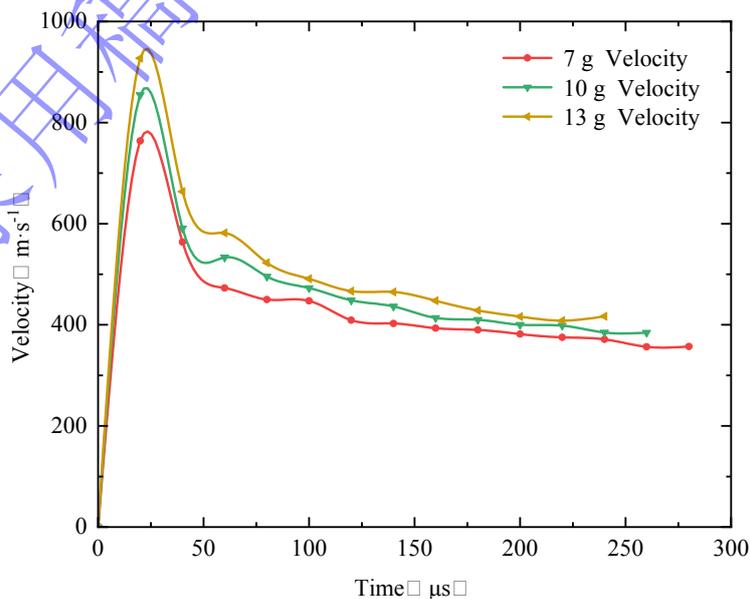


图 6 高速相机拍摄的前驱压力波与燃烧气体传播过程图

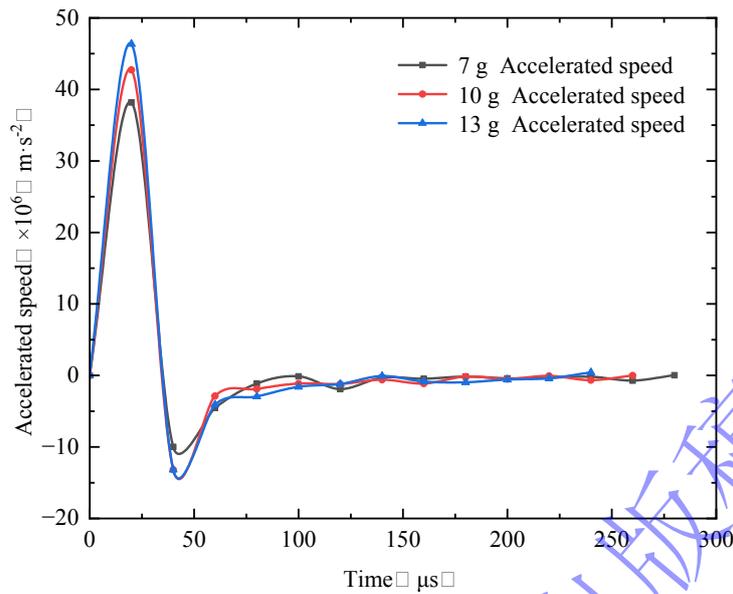
Fig.6 Diagram of the propagation process of the precursor pressure wave and the combustion gas taken by a high-speed camera

通过对 3 组不同药量下高能燃烧剂爆燃过程的综合分析，得出关于前驱压力波与燃烧气体动态传播特性的结论：燃烧反应激烈程度与药量正相关，随着药量的增加，燃烧反应变得更加激烈，高温、高压气体在药包内的积累速度加快。药量增加导致气体积累过程缩短，燃烧气体量增多，传播时分布的范围更广，传播速度也相应提高。药量大的前驱压力波与燃烧气体的分离时间提前，两者之间的相互作用更加复杂，表现在分离后仍保持较近的距离或更长时间的相互影响。

2.2 燃烧压力波阵面传播速度、位移、加速度分析



(a) 不同药量下前驱压力波速度时间曲线



(b) 不同药量下前驱压力波加速度曲线

图 7 高速纹影实验结果数据曲线图

Fig.7 Data curve of high-speed schlieren experimental results

表 2 不同药量下前驱压力波速度峰值

Table 2 Prodromal pressure wave velocity under different dosages

| Charge quantity | Peak transmission speed ($m \cdot s^{-1}$) | The time taken to propagate 10 cm (μs) | Acceleration peak ($m \cdot s^{-2}$) |
|-----------------|---|--|--|
| 7 g | 763.64 | 280 | 51.28 |
| 10 g | 854.55 | 260 | 62.82 |
| 13 g | 927.27 | 240 | 74.36 |

图 7 (a) 为不同药量下前驱压力波速度时间曲线，表 2 为不同药量下前驱压力波传播速度峰值及传播 10 cm 所用时间。可以看出，在药包被高能燃烧剂爆燃产生的前驱压力波冲破的瞬间燃烧气体倾泻而出，在累压阶段积累的压力瞬间释放，因此此时的瞬时速度达到整个相变过程中的最大值。7 g 药量下的最大瞬时速度为 $763.64 m \cdot s^{-1}$ ；10 g 药量的速度峰值达到 $854.55 m \cdot s^{-1}$ ，比 7 g 的增长了 11.90%；当药量增加到 13 g 时，瞬时速度的发展达到了 $927.27 m \cdot s^{-1}$ ，比 7 g 的增长了 21.43%，比 10 g 药量的速度峰值增加了 $72.72 m \cdot s^{-1}$ 。随着药量的增加，前驱压力波的传播速度峰值显著增大，这表明更大的药量能够产生更高的初始能量释放，从而推动前驱压力波以更快的速度传播。不同药量下的前驱压力波速度均随时间增加而减小，且它们沿相同的下降趋势变化。这可能是由于压力波在传播过程中受到介质阻力、能量耗散等因素的影响，导致速度逐渐降低。然而，药量的增加能使得在相同时间点上，前驱压力波的速度保持较高水平。

从位移的角度看，3 组实验中前驱压力波传播相同的距离（取 10 cm），7 g 药量下用了 280 μs ；10 g 药量的药包所用时间为 260 μs ，比前一组实验快了 20 μs ；当药包长度增加到 13 g 时，仅消耗了 240 μs ，比 7 g 药包快了 14.29%，比 10 g 的所用时间减少了 40 μs 。所需时间随着药量的增加而减少。这进一步证明了药量的增加能够显著提升前驱压力波的传播效率，使其在更短的时间内覆盖更远的距离。

图 7 (b) 为不同药量下前驱压力波加速度曲线。3 组实验瞬时加速度的峰值分别为

38.18 m·s⁻²、42.73 m·s⁻²、46.36 m·s⁻²，随着液氧量的增加加速的峰值呈现出递增的趋势。可以看到加速度在 20 μs 后变为负值，加速度的负值表明前驱压力波在传播过程中处于减速状态，这与图 7 (a) 中速度越来越小的现象相吻合。

药量的增加对前驱压力波的传播特性具有显著影响。它不仅提高了前驱压力波的传播速度峰值，还缩短了传播相同距离所需的时间。同时，加速度曲线的变化也反映了前驱压力波在传播过程中的减速趋势。

3 前驱压力波超压测试结果

3.1 不同药量下同一测点超压曲线分析

对不同药量下测点 1 的超压曲线进行分析，如图 8。图中曲线分别为 7 g、10 g、13 g 药量高能燃烧剂的压力测试曲线，记为实验 1#、2#、3#，超压峰值分别为 1.051 MPa、1.241 MPa、1.341 MPa。实验 1# 的超压从开始爆燃到达峰值用时 28.09 ms，实验 2# 的超压达到峰值用时 16.76 ms，而实验 3# 的超压达到峰值仅用时 6.55 ms。3 条超压曲线的整体趋势都是先增大后减小，然后缓慢爬升经过一段时间后又缓慢下降，最后逐渐与环境大气压力保持平衡。都存在负压区，原因是在前驱压力波传播过程中，随着高压区向前推进，后方会形成一个瞬态的低气压区域，即所谓的“负压区”，存在时间很短。3 条压力曲线下下降段分别用时 3.12 ms、3.75 ms、4.18 ms，实验 1#、2# 超压衰减速度相比实验 3# 的要快，表现在图中即为下降段曲线更陡。从图 8 中可以看到不同药量的药包超压曲线都存在二次波动，因为燃烧反应产生的前驱压力波和燃烧气体，二者传播速度有差距，导致到达传感器的时间不同，当前驱压力波到达时产生第一次波动并迅速下降，随着大量的高温高压燃烧气体的到来压力立即回升，但不会达到前驱压力波的峰值强度。由图 8 和表 3 可以看出。实验 1# 的正压峰值相比实验 2# 降低了 15.31%，相比实验 3# 降低了 21.63%。实验 1# 的最大负压相比实验 2# 减小了 0.003 MPa，相比实验 3# 减小了 0.009 MPa。实验 2# 的正压峰值相比实验 3# 降低了 0.1 MPa，最大负压相比实验 3# 减小了 0.006 MPa。

压力波的正压作用时间是衡量爆炸破坏程度的关键性指标之一。峰值冲量是在正压作用时间范围内压力-时间曲线的积分值，是评估爆燃冲击效应的另一重要维度。结合图 8 超压曲线分别对前驱压力波超压正压作用时间与峰值冲量进行计算与分析，能够更深入地了解爆燃过程中能量的释放与传递特征。

利用式 (2) [23] 计算得到对应的峰值冲量：

$$I = \int_{t_0}^t \Delta p(t) dt \quad (2)$$

式中： I 为压力波的冲量； t 为正压作用时间； $\Delta p(t)$ 为冲击波压力随时间变化的函数。

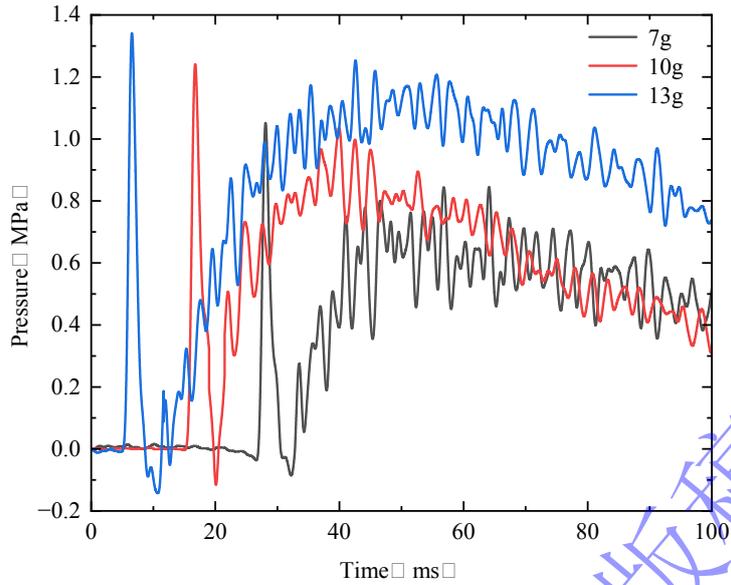


图 8 不同药量下测点 1 超压曲线

Fig.8 Overpressure curve at measurement point 1 under different dosages

表 3 不同药量下测点 1 前驱压力波超压测试结果

Table 3 The test results of the predromal pressure wave overpressure at the measurement point 1 under different dosages

| Charge quantity | The curve begins to rise time/ms | Time to reach the peak of the positive pressure/ms | Positive peak pressure/MPa | Time to reach the peak of the negative pressure/ms | Negative peak pressure/MPa | Positive pressure time/ms | Peak impulse/MPa·ms |
|-----------------|----------------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 7 g | 26.59 | 29.09 | 1.051 | 32.21 | 0.015 | 3.91 | 1.65 |
| 10 g | 15.22 | 16.76 | 1.241 | 20.51 | 0.018 | 4.26 | 1.99 |
| 13 g | 5.25 | 6.55 | 1.341 | 10.73 | 0.024 | 4.44 | 2.34 |

由图 8 和表 3 可以看出，实验 1#的正压时间相比实验 2#低了 8.22%，相比实验 3#低了 11.94%；实验 2#的正压时间相比实验 3#减少了 0.18 ms。实验 1#的峰值冲量相比实验 2#低了 17.09%，相比实验 3#低了 29.49%；实验 3#的峰值冲量相比实验 2#增加了 0.35 MPa·ms。随着高能燃烧剂药量的增加压力波正压时间和峰值冲量均呈现递增的形式，进一步验证了高能燃烧剂随着药量的增加其燃烧反应产生的能量越大，破岩能力越强。

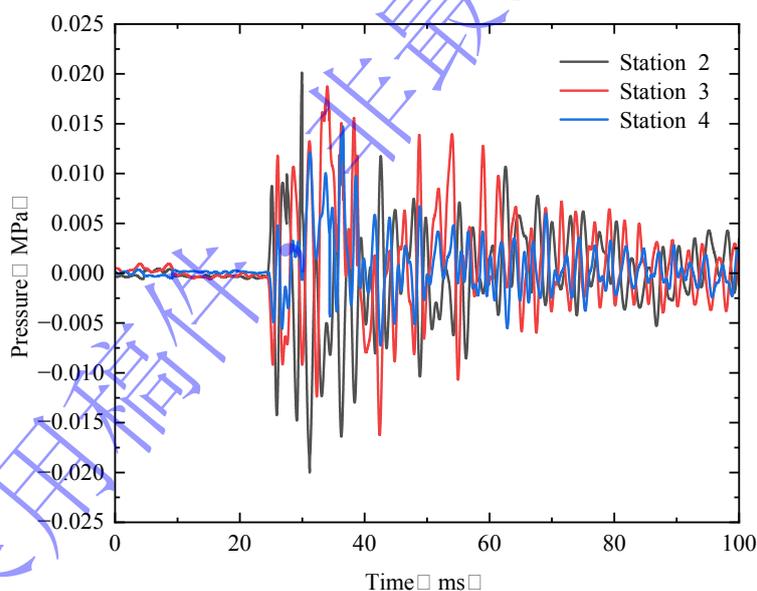
3.2 同一药量下不同测点超压曲线分析

药量 7g、10g、13g 不同测点的超压曲线图分别为图 9 (a)、(b)、(c)。图中均有一段水平段，是因为高能燃烧剂发生燃烧反应首先会经过一段较长的压力积累时间，当达到药包材质的致裂压力极限后，药包破裂前驱压力波和大量燃烧气体才开始向外传播扩散。3 个测点的压力值均随时间呈现先上升后下降并且上下震荡的趋势，在不同时间点分别达到峰值，超压峰值结果见表 4。3 组实验的测点 2 的压力值在初始阶段相对较高，并随着时间的推移持续增加，峰值相比于测点 3 分别高了 0.002 MPa、0.01 MPa、0.013 MPa，比测点 4 大了 0.005 MPa、0.012 MPa、0.026 MPa。测点 3 的压力值增长趋势与测点 2 相比较为平缓，峰值也相对较低。而测点 4 的压力值则始终保持在较低水平，增长趋势最为平

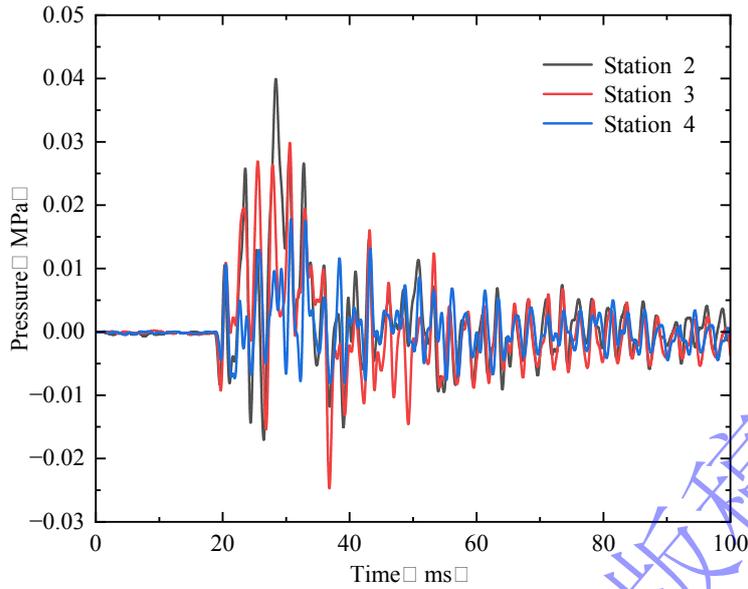
缓。测点距离药包越近，其压力值增长越快，峰值越高，在达到峰值后，各测点的压力值均逐渐降低。

与 7 g、10 g 两组实验不同的是，药量 13 g 这组实验测点 2、测点 3 的超压曲线后半段有一个逐渐上升又逐渐下降的现象。这是因为 13 g 的药量产生的燃烧气体更多，能量更大，在前驱压力波通过测点一段时间后，燃烧气体也达到了测点位置致使压力回升，待继续传播一段时间后能量降低，压力又逐渐趋于正常。表 4 中可以得到，随着药量的增加，同一测点的超压峰值呈现出上升趋势。这一现象验证了爆燃产生的能量与药量的正相关关系，即药量越大，燃烧反应越激烈，释放的能量越多，从而产生的超压峰值也越高。测点 1 由于采用了高灵敏度的 PVDF 传感器，其超压峰值显著高于其他采用自由场传感器的测点。随着测点距离药包越来越远，超压峰值均呈现出一致的下降趋势。验证了爆燃压力波在传播过程中能量逐渐耗散的原理，前驱压力波在传播过程中会受到介质的阻尼作用，导致能量逐渐损失，进而导致各测点压力值随时间逐渐降低。

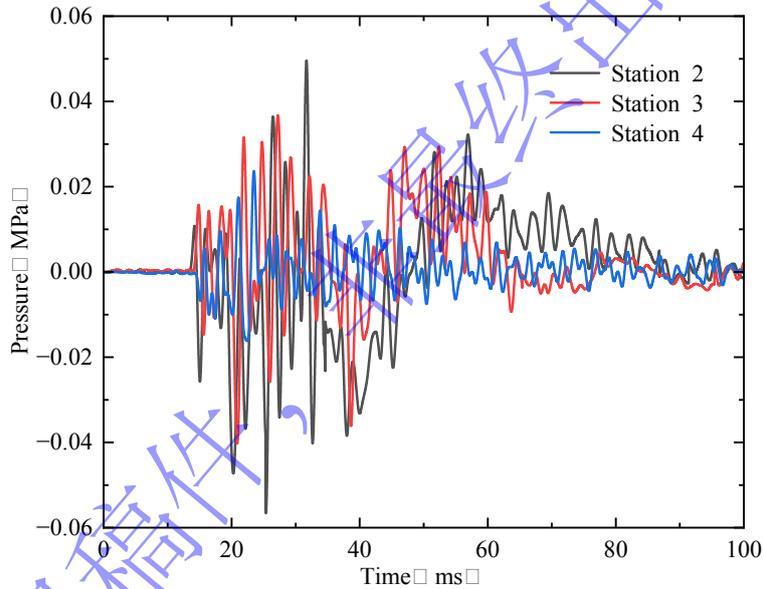
当爆燃所引发的初步压力波动抵达高能燃烧剂与空气的分界面时，在空气中即刻生成了一股压力波。紧接着，这股压力波会对药包内部的空气进行压缩，从而使其产生膨胀。与此同时，受到压缩的空气也会以一种反馈机制，对燃烧过程中产生的气体进行压缩，导致燃烧气体的压力值持续提升。在惯性作用下，燃烧气体经历了过度的压缩，其压力水平又超越了空气的原始压力。于是重新开始膨胀和压缩，燃烧气体的压力再次超越界限，引发新的膨胀，随后又因为周围空气及内部压力的动态平衡而重新受到压缩。这一过程不断重复，形成了图中所示的膨胀与压缩交替进行的上下震荡现象，展现了一种复杂的动态平衡与能量转换过程。



(a) 7 g 药量下不同测点超压曲线



(b) 10 g 药量下不同测点超压曲线



(c) 13 g 药量下不同测点超压曲线

图 9 超压数据曲线图

Fig.9 Overpressure data graph

表 4 不同药量下各测点前驱压力波超压峰值

Table 4 The peak value of the predromal pressure wave overpressure at each measurement point under different dosages

| Charge quantity | Measure point 1/MPa | Measure point 2/MPa | Measure point 3/MPa | Measure point 4/MPa |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 7 g | 1.051 | 0.020 | 0.018 | 0.015 |
| 10 g | 1.241 | 0.040 | 0.030 | 0.018 |
| 13 g | 1.341 | 0.050 | 0.037 | 0.024 |

3.3 相邻压力传感器之间的压力波平均速度

通过对各测点超压曲线数据的整理与分析，记录了前驱压力波到达每一个测点的时间，据此计算出了相邻压力传感器之间压力波的平均传播速度。从而进一步分析 3 组实验前驱压力波的传播特性。7 g 药量下前驱压力波相邻测点的平均速度分别为 6.21 m·s⁻¹、172.41 m·s⁻¹、500.00 m·s⁻¹、208.33 m·s⁻¹；10 g 的平均速度分别为 9.86 m·s⁻¹、14.33 m·s⁻¹、238.10 m·s⁻¹、312.50 m·s⁻¹；13 g 的平均速度分别为 28.57 m·s⁻¹、7.81 m·s⁻¹、38.76 m·s⁻¹、131.58 m·s⁻¹；可以观察到在整体趋势上，实验 1#燃烧产生的前驱压力波到达各个测点的时间明显晚于实验 2#、3#。3 组实验到达测点 1 时的平均速度随着药量的增加而增大；对于实验 1#，相邻两个测点之间的压力波平均速度为先上升后下降的变化趋势。速度下降的这一现象，结合图 7 (b) 的加速度数据，可以归因于在此阶段出现了负的加速度，导致了速度的减小。反观实验 2#和实验 3#，相邻两测点间的平均速度则均呈现出逐步增大的态势。然而，在这两者之中又存在着细微差别，对于实验 2#，其前驱压力波的加速度已经达到了曲线的峰值并开始进入下降阶段，因此，尽管速度仍在增加，但增速已逐渐放缓。而对于实验 3#，其加速度正处于持续上升的状态，尚未触及加速度曲线的峰值点，这意味着随着时间的推移，加速度还将继续增大，从而推动速度以更快的速度增加。

表 5 不同药量下前驱压力波到达各测点时间

Table 5 The time for the prodromal pressure wave to reach each measurement point under different dosages

| Charge quantity | Station 1 (ms) | Average speed (m·s ⁻¹) | Station 2 (ms) | Average speed (m·s ⁻¹) | Station 3 (ms) | Average speed (m·s ⁻¹) | Station 4 (ms) | Average speed (m·s ⁻¹) |
|-----------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|
| 7 g | 24.15 | 6.21 | 24.44 | 172.41 | 24.54 | 500.00 | 24.78 | 208.33 |
| 10 g | 15.22 | 9.86 | 18.71 | 14.33 | 18.92 | 238.10 | 19.08 | 312.50 |
| 13 g | 5.25 | 28.57 | 12.65 | 7.81 | 13.94 | 38.76 | 14.32 | 131.58 |

4 结论

本文通过高速纹影拍照系统和空气压力波超压检测系统，对不同药量下非炸药型高能燃烧剂爆燃实验进行实验研究，并通过实验数据与破岩原理分析进行结合，得到以下结论：

(1) 高能燃烧剂引燃后进入燃烧过程，释放高温高压气体，使药包内升温升压，达到致裂压力极限时破裂。药量增加时，累压时间大幅缩短，当药量由 7 g 增加到 10 g 再到 13g 时，累压时间分别缩短了 60.65%、56.12%。前驱压力波与燃烧气体先伴随扩展，随后逐渐分离。不同药量下高能燃烧剂的前驱压力波与燃烧气体传播形态基本相同且向外不规则球形传播。药量增大，累压加快，前驱压力波速度峰值提升约 21.43%，高温高压气体增多，药包破碎效果变好，传播形态更规则。

(2) 在对不同药量下高能燃烧剂的探究中，超压曲线展现出相似的波动形态。药包内空气处于复杂的膨胀和压缩脉动状态，使压力产生一定程度的振荡变化。由于空气膨胀压缩程度不同，压力波动幅值也不同。当燃烧气体压力与环境压力趋近平衡时，空气的膨胀压缩脉动过程会逐渐减弱直至消失，此时压力趋于稳定不变，燃烧气体在惯性作用下向四周扩散。对于大药量的高能燃烧剂，前驱压力波与燃烧气体具有不同的传播速度，两者分别作用于传感器会造成其超压曲线呈现出二次波动的现象。

(3) 当药量由 7 g 增加到 13 g 时，超压峰值增长比例为 27.59%，超压峰值越大说明能量更快速、更全面地作用于周围介质，传递效率更高；正压作用时间显著延长，增加了约 0.14 倍，正压作用时间越长说明能量对周边产生持续的作用力，释放过程越持久；峰值

冲量增加了约 0.42 倍，峰值冲量越大说明燃烧气体的压力累积效果越显著。从超压测试的整体结果来看，超压峰值、正压时间和峰值冲量随着药量的逐步增加，均呈现出明显的递增趋势，这一趋势深刻揭示了液氧量在破岩过程中的关键作用。

参考文献

- [1] Zhang Y ,Deng J ,Deng H , et al.Peridynamics simulation of rock fracturing under liquid carbon dioxide blasting[J].International Journal of Damage Mechanics,2019,28(7):1038-1052
- [2] 李雪,王传兵,王雁冰,等.多炮孔岩体等离子体爆破定向致裂机理研究[J].工程科学学报,2025,47(02):259-270. (LI Xue, WANG Chuanbing, WANG Yanbing, et al. Study on the mechanism of multi-gun hole rock mass [J]. Journal of Engineering Science, 2025,47 (02): 259-270.)
- [3] 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(07):883-893. (ZHOU Shengtao, LUO Xuedong, JIANG Nan, et al. Progress and prospect of phase change cracking technology of carbon dioxide [J]. Journal of Engineering Science, 2021,43 (07): 883-893.)
- [4] 美琼,谢兴华,张良杰,等.可控破碎剂和和谐爆破技术研究及应用[J].中国科技成果,2019,20(17):38-40. (MEI qiong, XIE Xinghua, ZHANG Liangjie, et al. Research and application of harmonious blasting technology of controllable crushing agent [J]. Scientific and technological Achievements in China, 2019,20 (17): 38-40.)
- [5] 袁芳,景晓春,刘兴华.岩石非爆破开挖施工方案的选择与实践[J].陕西水利,2014,(05):109-110. (YUAN Fang, JING Xiaochun, LIU Xinghua. Selection and practice of construction scheme for non-blasting excavation [J]. Shaanxi Water Conservancy, 2014, (05): 109-110.)
- [6] 谢兴华,张小康,王林杰,等.一种高能燃烧破岩药柱的应用[J].工程爆破,2017,23(05):76-80. (XIE Xinghua, ZHANG Xiaokang, WANG Linjie, et al. Application of a high-energy combustion burst column [J]. Engineering Blasting, 2017,23 (05): 76-80.)
- [7] 李文福.高陡边坡危岩清除用高能燃烧剂配方设计[J].公路,2020,65(03):265-268. (LI Wenfu. Formula design of high-energy combustion agent for dangerous rock removal of high and steep slope [J]. Highway, 2020,65 (03): 265-268.)
- [8] Aly Y ,Schoenitz M ,Dreizin L E .Ignition and combustion of mechanically alloyed Al - Mg powders with customized particle sizes[J].Combustion and Flame,2013,160(4):835-842.
- [9] Aly Y ,Dreizin L E .Ignition and combustion of Al • Mg alloy powders prepared by different techniques[J].Combustion and Flame,2015,162(4):1440-1447.
- [10] Pouretedal R H ,Mousavi L S .Study of the ratio of fuel to oxidant on the kinetic of ignition reaction of Mg/Ba(NO₃)₂ and Mg/Sr(NO₃)₂ pyrotechnics by non-isothermal TG/DSC technique[J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2018,132(2):1307-1315.
- [11] 张兴高,师宏心,刘庚冉,等.高能燃烧剂配方研究[J].火工品,2012,(06):34-36. (ZHANG Xinggao, SHI Hongxin, LIU Genran, et al. Study on high-energy burner formulation [J]. Ordnance Products, 2012, (06): 34-36.)
- [12] Pourmortazavi S ,Fathollahi M ,Hajimirsadeghi S , et al.Thermal behavior of aluminum powder and potassium perchlorate mixtures by DTA and TG[J].Thermochimica Acta,2005,443(1):129-131.
- [13] Pourmortazavi S ,Hajimirsadeghi S ,Kohsari I , et al.Thermal decomposition of pyrotechnic mixtures containing either aluminum or magnesium powder as fuel[J].Fuel,2007,87(2):244-251.
- [14] 程兵,汪海波,程扬帆,等.不同管材侧向环形切缝装药爆炸能量传递特性[J].含能材料,2024,32(09):921-929. (CHENG Bing,

- WANG Haibo, CHENG Yangfan, and so on. Exexplosive energy transfer characteristics of different pipe lateral annular slit charges [J]. Energy-bearing materials, 2024,32 (09): 921-929.)
- [15] 王雁冰,孔维文,汪东宸,等. 径向水耦合爆破爆轰波效应分析[J/OL].煤炭学报,1-20[2025-01-05]. (WANG Yanbing, KONG Weiwen, WANG Dongchen, et al. Analysis of the wave effect of radial water coupled blasting [J / OL]. Journal of Coal Science, 1-20 [2025-01-05].)
- [16] 王雁冰,孔维文,左进京,等. 爆炸冲击波和爆生气体的动态作用演化机制的实验与数值分析[J].煤炭学报,2024,49(S1):248-260 (WANG Yanbing, KONG Weiwen, ZUO Jinjing, et on. Experimental and numerical analysis of the dynamic action evolution mechanism of blast shock wave and burst gas [J]. Journal of Coal, 2024,49 (S1): 248-260)
- [17] 王雁冰,孔维文,汪东宸,等. 轴向水不耦合装药结构爆破空气流场应力演化分析[J/OL].工程科学与技术,1-18[2025-01-05]. (WANG Yanbing, KONG Weiwen, WANG Dongchen, et al. Analysis of stress evolution of blasting air flow field in axial water uncoupled charge structure [J / OL]. Engineering Science and Technology, 1-18 [2025-01-05].)
- [18] 李斌,王雨,周志强,等. 爆炸冲击波威力高速纹影测量方法[J].光学与光电技术,2018,16(02):43-49. (LI Bin, WANG Yu, ZHOU Zhiqiang, et al. Method for high-speed pattern shadow measurement of blast shock wave power [J]. Optical and Optoelectronic Technology, 2018,16 (02): 43-49.)
- [19] 陈元迪,池田大志,三轮惠. 用光学纹影摄影术观察分析定容燃烧室内氢燃料的燃烧过程[J].内燃机学报,2001,(05):429-432. (CHEN Yuandi, Ikeda Dazhi, Sanhui. The combustion process of hydrogen fuel in the stationary volume combustion chamber was observed and analyzed by optical pattern photography [J]. Journal of Internal combustion Engine, 2001, (05): 429-432.)
- [20] 李华,杨臧健,吴敏,等. 纹影系统中物平面的选择与刀口的设置[J].实验流体力学,2011,25(03):91-96. (LI Hua, YANG Zangjian, WU Min, et al. The selection of the object plane and the setting of the knife edge in the shading system [J]. Experimental Fluid mechanics, 2011,25 (03): 91-96.)
- [21] 周昊,吕小亮,李清毅,等. 应用背景纹影技术的温度场测量[J].中国电机工程学报,2011,31(05):63-67. (ZHOU Hao, LV Xiaoliang, LI Qingyi, et al. Temperature field measurement using the background shading technique [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2011,31 (05): 63-67.)
- [22] 左进京.立井深孔分段掏槽与周边定向断裂损伤控制试验研究[D].中国矿业大学(北京),2020. (ZUO JinJing. Study on damage control of vertical hole and peripheral directional fracture [D]. China University of Mining and Technology (Beijing), 2020.)
- [23] 宁建国,王成,马天宝. 爆炸与冲击动力学[M].北京: 国防工业出版社,2010. (NING Jianguo, WANG Cheng, MA Tianbao. Explosion and impact dynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)