

# 液氧瞬态膨胀定向泄能气体流场结构 及脉动特征研究

王雁冰<sup>1</sup>, 李雪<sup>1</sup>, 阙朝阳<sup>2</sup>, 付代睿<sup>1</sup>, 胡义重<sup>3</sup>, 毛惠刚<sup>3</sup>, 雷振<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩 364024;  
3. 中国葛洲坝集团第三工程有限公司, 陕西 西安 710077; 4. 贵州理工学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 为探究液氧瞬态膨胀定向泄能过程中气体流场的相变膨胀及流场结构特征, 采用高速纹影试验和超压测试系统相结合的方法, 开展不同切缝宽度下液氧瞬态相变膨胀试验, 并通过统计软件分析纹影图像亮度平均值(Mean)和脉动均方根(RMS)值的变化特征, 结合纹影图像推导图像灰度及流场密度梯度关系, 研究液氧相变膨胀不同阶段所对应的流场脉动规律, 同时基于采集计算的速度及超压等现场数据分析气体流场的动力学变化特征. 研究表明: 液氧相变膨胀过程分为液氧逸出与燃烧阶段、膨胀破坏阶段, 其中后一阶段液氧反应气流脉动程度比前者更剧烈, 沿药包切缝方向两阶段的气流密度均发生剧烈变化, 两阶段结束后流场密度逐渐衰减为环境密度; 窄切缝通道加速气体产物的释放速度, 增强了气体的局部压缩作用, 引导氧气和燃烧气体定向喷射, 促使能量集中于切缝方向, 随着切缝宽度增大, 气体逸出量增加, 药包释放能量的集中程度下降, 沿切缝方向对应的气流脉动速度逐渐降低; 相较于宽切缝液氧药包, 切缝宽度较小的液氧药包在瞬态相变膨胀过程中有效提高液氧相变产物的释放效率和控制能量分布, 其泄能集中程度决定了对岩石的定向致裂效果, 研究可为定向破岩技术提供新思路.

**关键词:** 切缝药包; 液氧相变; 气体流场结构; 纹影系统; 脉动特征

**中图分类号:** TD 824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0609-14

## Study on the flow field structure and pulsation characteristics of liquid oxygen transient expansion directional energy release gas

WANG Yanbing<sup>1</sup>, LI Xue<sup>1</sup>, QUE Chaoyang<sup>2</sup>, FU Dairui<sup>1</sup>, HU Yizhong<sup>3</sup>, MAO Huigang<sup>3</sup>, LEI Zhen<sup>4</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083;  
2. Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan, Fujian 364024; 3. China Gezhouba Group No. 3 Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077; 4. Guizhou Institute of Technology, Guiyang, Guizhou 550025)

**Abstract:** To investigate the phase change expansion and flow field structural characteristics of the gas flow field during the directional energy release process of liquid oxygen transient expansion, a combination of high-speed schlieren test and overpressure testing system was used to conduct liquid oxygen transient phase change expansion tests under different slit widths. Sta-

收稿日期: 2025-01-03 修回日期: 2025-03-27 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20250007

基金项目: 国家自然科学基金铁路基础研究联合基金项目(U2468219); 中央高校基本科研业务费专项项目(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, 工学博士, 从事工程爆破与岩石破碎方面的研究.

E-mail: ceowyb818@163.com Tel: 18811671740

引用格式: 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.

tistical software was used to analyze the variation characteristics of the brightness Mean and pulsation RMS values of the schlieren image, and the relationship between image grayscale and flow field density gradient was derived based on the schlieren image. The flow field pulsation laws corresponding to different stages of liquid oxygen phase change expansion were studied. At the same time, the dynamic change characteristics of the gas flow field were analyzed based on the collected and calculated velocity and overpressure field data. The research results indicate that the expansion process of liquid oxygen phase change can be divided into two stages: liquid oxygen escape and phase change stage, and detonation stage. In the latter stage, the pulsation of the liquid oxygen reaction gas flow is more severe than the former. The gas flow density in both stages changes dramatically along the direction of the cutting seam of the drug package. After the two stages are completed, the flow field density gradually decays to the environmental density; The narrow slit channel accelerates the release rate of gas products, enhances the local compression effect of gas, guides the directional injection of oxygen and combustion gas, and promotes energy concentration in the direction of the slit. As the slit width increases, the amount of gas escaping increases, and the concentration of energy released by the drug package decreases. The corresponding airflow pulsation velocity along the slit direction gradually decreases; Compared to wide slit liquid oxygen charges, liquid oxygen charges with smaller slit widths effectively improve the release efficiency and control energy distribution of liquid oxygen phase change products during transient phase change expansion. The concentration of energy release determines their directional fracturing effect on rocks, and research can provide new ideas for directional rock breaking technology.

**Key words:** slit charge; liquid oxygen phase change; gas flow field structure; schlieren system; pulsation characteristics

随着现代工程技术进步,定向控制破碎技术在采矿、隧道、水利及油气等领域的重要性愈加突出,其中切缝药包作为定向控制破碎技术最常见的实施方式,由于其制作简单且定向效果优异,已广泛应用于隧道开挖、矿山爆破等精确爆破工程中。

目前国内外学者针对定向控制破碎展开了大量研究.传统炸药定向控制爆破研究方面,文献[1-2]采用高速纹影试验系统探究了切缝药包爆炸波与爆生气体的传播机制,并分析了不同药量下切缝药包对岩体的损伤规律.文献[3]开展不同结构切缝管下炸药爆破试验,探究了切缝结构对炸药冲击波及炸药产物传播特性的影响规律.文献[4]采用有限元软件建立了切缝药包爆破模型,分析了切缝药包冲击波在岩体介质中的传播规律.文献[5]分析了不同切缝方向对层状节理岩石的定向致裂作用,研究发现切缝角度越小的岩体定向断裂效果越显著.非炸药定向控制破碎研究分为水压定向、静态膨胀剂定向、电脉冲定向和气体定向.水压定向致裂研究中,文献[6]基于理论分析和现场测试研究了深孔顶板预裂爆破和顶板定向

水压致裂原理,为深孔顶板定向致裂提供了理论依据.文献[7]基于动力学软件模拟探究了定向水压爆破破碎桥墩过程,并研究了水压定向爆破的破坏机理.文献[8-9]通过数值模拟研究了定向水力压裂的裂纹导向机理,并提出了改进岩石断裂能量模型以研究定向水力压裂对裂纹偏转的影响程度.静态膨胀剂定向致裂研究中,文献[10]基于自主研发的试验系统开展了非爆炸性膨胀剂定向致裂顶板试验,研究了膨胀剂破岩过程中的损伤-位移演化规律.文献[11]提出了一种线性多钻孔静态膨胀剂定向压裂方法,研究了定向压裂的扩展过程及作用机理.电脉冲定向破岩研究中,文献[12]基于电载荷爆炸试验研究了电载荷定向爆破压力波的传播规律及其压裂机理.文献[13]基于液电效应开展等离子体电脉冲定向破岩试验,并对比分析了切槽及切缝管定向致裂的破岩规律.气体定向破岩研究中,文献[14]通过建立 CO<sub>2</sub> 压裂模型分析了 CO<sub>2</sub> 定向压裂岩层中三维空间裂纹网络的动态扩展机理.文献[15]开展了超临界 CO<sub>2</sub> 反应流动相变致裂试验,探究了高温高压 CO<sub>2</sub> 反应流动相变致裂机理.然而在定向致裂研

究领域中,传统炸药爆破易出现盲炮危险性高且管控严格;水压爆破由于冲击水管难以固定,因此定向方向有限且易出现偏差;静态膨胀剂定向破岩时间长且其反应产物污染环境;电脉冲定向通常适用于小规模精细破碎;目前对于气体定向破岩的研究较少,且多集中于 $\text{CO}_2$ 定向破岩,然而相较于传统 $\text{CO}_2$ 定向破岩,液氧相变膨胀破岩能量转化率高、成本低、适用范围广泛、反应产物无污染且压力控制效果更精准<sup>[16]</sup>。同时,目前针对气体定向破岩的研究方法多直接聚焦于岩石裂纹的扩展机理、定向流场模拟<sup>[17-18]</sup>,缺乏关于气体流场脉动的动态研究分析,虽然目前针对液氧的工程实践取得了一定进展<sup>[19]</sup>,但液氧定向研究技术仍存在显著的研究空白。

基于此,本文首次提出将液氧瞬态膨胀技术与定向切缝管技术相结合,通过切缝宽度控制液氧膨胀过程产生的高压力达到定向裂解。基于高速纹影试验及超压测试分析系统开展不同切缝管宽度的液氧瞬态相变膨胀实验室试验,并通过数据处理软件分析高速摄像图片的灰度图片,分析液氧相变膨胀气体流场结构,建立图像灰度与流场密度梯度的关联,探究不同液氧药包切缝宽度下液氧相变膨胀过程及空气流场结构特征,并计算流场脉动特征收敛值,最后基于流场测点速度及超压数据分析气体脉动流场的动力学特性。

## 1 试验设计

### 1.1 高速纹影试验系统

采用光学方法对燃烧相变作用过程进行高速可视化是研究空气流场变化规律的良好方法。由于对透明介质中的气体动力学敏感,纹影法能够可视化爆燃气体的产生和传播过程。采用高速纹影法和超压试验研究了液氧药包引燃后冲击波传播机理,同一水平面上沿药包轴向方向拍摄记录高速纹影图像,分析冲击波的传播速度,并测量药包周围空气中的超压。

高速纹影试验系统如图1所示,纹影试验系统采用分体式结构,整体纹影试验装置由光源系统、透镜系统、反应系统和成像系统组成,按照光路顺序依次为光源、透镜、刀口、反射镜1、反射镜2、刀口、透镜及高速相机,药包成像区位于2个反射镜之间,可通过调节高速相机的焦距确定成像区位置<sup>[20]</sup>。纹影试验对象为不同切缝宽度的柱形液氧药包,药包轴向与光路方向水平平行,便于直观观测气体波动的作用过程,整体光路呈“Z”字形结

构,纹影系统反射镜的直径为200 mm,高速相机采用ACS-1 M40E型超高速数字摄像机。在液氧药包气体前沿形成过程中,采用高速纹影摄像技术捕捉液氧相变膨胀过程中的气体流场结构特性。为获得液氧药包引燃瞬间气流冲击的动态过程,本试验高速相机的帧率设为100 000 Hz,前后每张纹影图片的间隔曝光时间为10  $\mu\text{s}$ 。利用气体流场折射光路的原理,由纹影图像显示药包周围空气流场结构特征变化,并结合高速摄像技术记录液氧相变膨胀作用过程中气体流场结构的动态演化过程。

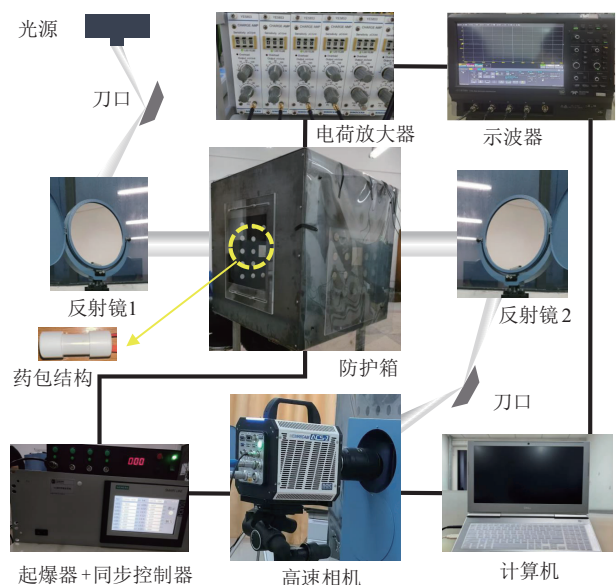


图1 高速纹影系统

Fig. 1 High-speed schlieren system

### 1.2 冲击波超压测试系统

冲击波超压测试系统如图2所示,冲击波超压测试系统由自由场压力传感器、电荷放大器和示波器等组成,可以精确测量药包结构周围的超压数据,试验中布设2个自由场压力传感器,为了便于说明,将沿药包水平轴向作为 $x$ 方向,药包水平径向作为 $y$ 方向,垂直方向作为 $z$ 方向,试验防护箱内部现场布置如图2所示。试验现场在距离液氧药包中心切缝方向 $a_1 = 300$  mm和非切缝方向 $a_2 = 300$  mm处分别布置传感器采集超压数据,沿切缝方向即 $y$ 方向的压力传感器1与药包中心处于同一水平面上,非切缝方向即 $z$ 方向的压力传感器2与药包中心处于同一铅垂面上,且垂直于药包正下方。冲击波超压 $P_m$ 计算公式<sup>[21]</sup>为

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

式中: $V$ 为示波器显示的峰值电压,mV; $K$ 为电

荷放大器灵敏度,  $\text{mV}/\text{pC}$ , 试验中设计  $K_1, K_2$  均为  $100 \text{ mV}/\text{pC}$ ;  $S_q$  为传感器电荷灵敏度,  $\text{pC}/\text{MPa}$ , 试验中设计  $S_{q1}, S_{q2}$  均为  $287 \text{ pC}/\text{MPa}$ .

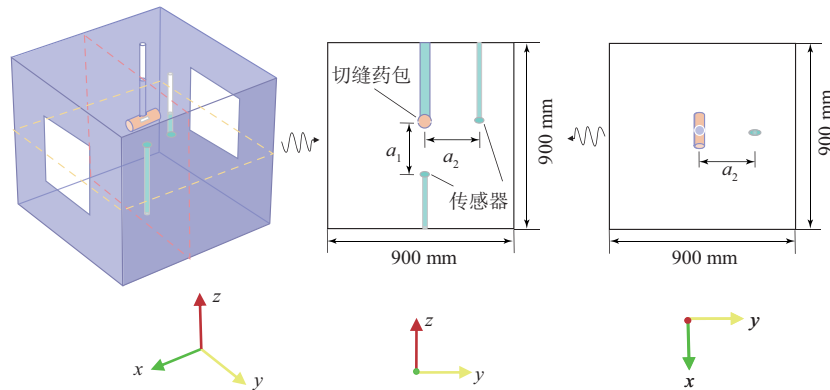


图 2 冲击波超压测试系统

Fig. 2 Shock wave overpressure test system

### 1.3 试验方案

试验结构如图 3 所示, 切缝药包液氧相变膨胀试验中液氧定向泄能药包从内向外分为 3 层结构, 最内层采用 PE 筒膜灌装液氧, 内充液管通过充液管和电引火线与外界充液杜瓦罐、点火激发器相连接, 中间层 PVC 封装管主要作用是防止液氧渗出和保温处理, PVC 封装管两端采用配套 PVC 管材进行固定封堵, 并在封装管外侧套置最外层的切缝定向钢套管, 从而探究不同切缝宽度作用下液氧相变膨胀的定向空气流场作用. 药包材料参数见表 1. 其中 PVC 封装管直径为 20 mm, 长度为 70 mm; 外钢套管直径为 22 mm, 长度为 70 mm, 在钢套管两侧中心双向平行位置预制切缝, 切缝长度为 30 mm, 设置不同的液氧药包切缝宽度分别为 1, 2 和 3 mm, 将 3 种切缝钢套管对应的试验分别编号为 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup>, 并对每组试验进行多次

重复试验, 以减少试验误差带来的影响. 试验前组装 3 层药包结构、点火头及充液管, 并将其固定在钢防护箱中, 调整纹影系统及同步设备, 同时通过液氧杜瓦罐向药包内进行充液, 充液完成后剪掉充液管线, 控制同步控制器进行启动电点火激发器并拍摄液氧燃烧相变气体流场的变化过程.

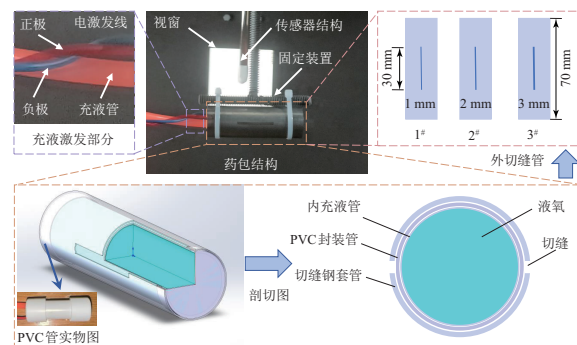


图 3 药包示意

Fig. 3 Schematic of medicine package

表 1 药包材料参数

Table 1 Material parameters of the medicine package

试验组别	内充液管	PVC 封装管		切缝钢套管		切缝长度/ mm	切缝宽度/ mm
		直径/mm	长度/mm	直径/mm	长度/mm		
1 <sup>#</sup>	PE 筒膜	20	70	22	70	30	1
2 <sup>#</sup>	PE 筒膜	20	70	22	70	30	2
3 <sup>#</sup>	PE 筒膜	20	70	22	70	30	3

## 2 气体流场结构计算

### 2.1 气体动力学方程

为研究液氧药包内部液氧相变膨胀过程, 借助流体动力学方程分析流体运动, 药包内部液氧呈液态, 当液氧开始相变膨胀时由液态转变为气态, 气体体积急剧膨胀, 此时药包内部液氧呈液态和气态两相状态, 药包周围气体产生较大密度梯

度, 根据流体的连续性方程描述液氧相变膨胀的流体运动过程, 其中流体流入一区域的流体密度发生变化但其质量仍然守恒, 连续性方程<sup>[22]</sup>如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (2)$$

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_v \rho_v, \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为流体运动时间,  $\text{s}$ ;  $\mathbf{V}$  为流场速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\nabla$  为流体梯度算子;  $\alpha_1$  为

液氧体积分数; $\rho_l$ 为液氧密度,kg/m<sup>3</sup>; $\alpha_v$ 为气态氧体积分数; $\rho_v$ 为气态氧密度,kg/m<sup>3</sup>。

同时,由于液氧在充入药包后存在部分气体逸出,且膨胀过程中流体的流速急剧增加,借助流体动量方程表示液氧相变膨胀过程中气体动量的变化规律,采用纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes Equation)表示液氧流动的力学行为,如式(4)所示:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F}, \quad (4)$$

式中: $\nabla^2$ 为速度场拉普拉斯算子; $\nu$ 为液氧的动力黏度,m<sup>2</sup>/s; $p$ 为流体压力,Pa; $\mathbf{F}$ 为体积力,N/m<sup>3</sup>。

液氧相变膨胀过程中,周围气体温度迅速上升,致使药包周围气体发生热膨胀,通过能量方程表示液氧相变过程中气体温度变化与燃烧释放热量的关系,能量方程如下:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + Q, \quad (5)$$

式中: $c_p$ 为比热容,J/(kg·K); $T$ 为气体温度,K; $\kappa$ 为热导率,W/(m·K); $Q$ 为液氧燃烧释放的热量,J。

## 2.2 气体密度场计算

纹影系统通过透镜将由于密度或温度变化所引起的空气流场不均匀过程通过流场光线偏转进行可视化,纹影灰度图像可以通过光线偏转角 $\theta$ 在成像过程的亮度变化来反映流场中光线折射率沿空间一阶导数的变化,但由于纹影灰度图像对气体流动细节特征描述较少且常用以定性分析,为了实现对气体扰动区域结构特征的定量研究,采用MATLAB对纹影图像进行统计处理,分析纹影图像的灰度平均图以及均方根值(RMS),由纹影图像的灰度值及密度值研究液氧相变膨胀过程中气体前沿界面的波动特征。

光线偏转角 $\theta$ 很小,偏转角与光线在刀口处的偏移位移量 $e$ <sup>[23]</sup>可表示为

$$\theta = \tan \theta = \frac{e}{f}, \quad (6)$$

式中: $\theta$ 为光线偏转角,(°); $e$ 为光线在刀口处的偏移量,mm; $f$ 为纹影系统的焦距,mm。

基于Huygens原理,光线在折射率变化的流场中传播时会发生偏转,可得光线折射率 $n$ 与光线偏转角 $\theta$ 之间的关系<sup>[24]</sup>,如下所示:

$$\theta = \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dx, \quad (7)$$

式中: $n$ 为光线折射率; $\frac{\partial n}{\partial y}$ 为光线折射率在 $y$ 方向的变化率; $dx$ 为折射率积分在 $x$ 方向上的微小增量。

利用盖斯定律(Gladstone-Dale, G-D)建立光线折射率 $n$ 与流体密度 $\rho$ 之间的关系,从而建立密度场方程<sup>[25]</sup>:

$$n = k\rho + 1, \quad (8)$$

式中: $k$ 为G-D经验常数,标准大气中可见光 $k$ 取值为0.23 cm<sup>3</sup>/g。

从而可以得到纹影灰度图像中每个像素点的密度值 $\rho(x, y)$ ,由式(9)可得密度梯度:

$$\nabla \rho(x, y) = \left[ \frac{\partial \rho(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial \rho(x, y)}{\partial y} \right]. \quad (9)$$

基于以上公式,采用MATLAB对液氧相变流场密度场模型进行统计计算,将图像灰度值转换为流场密度。

## 3 试验结果分析

### 3.1 液氧相变膨胀气体动力学规律

#### 3.1.1 液氧反应过程纹影图像统计分析

对高速纹影系统采集的不同药包切缝宽度空气流场图像进行纹影灰度图像处理,分别提取液氧相变过程中连续纹影图像进行统计分析,计算得灰度平均、RMS值及其收敛性处理结果。如图4a,4b和4c所示,由于纹影光源背景的亮度较高且集中于边缘位置,因此处理后流场亮度平均值(Mean)的最大值分布在圆形视野边缘处,总体亮度峰值沿着切缝方向横向分布,非切缝方向的亮度较低,药包作用前后整体流场亮度均沿着切缝处向外递增分布,这是由于切缝钢管切缝处的材料强度最低,液氧相变膨胀产生气体波阵优先从切缝处向外传播,致使图像纹影亮度Mean沿着切缝处向外扩展分布,且对比图4a,4b,4c可知,随着药包切缝宽度增大,液氧纹影亮度最大值距药包中心的距离越远,液氧爆燃光亮区域的分布范围越广泛。

纹影图像灰度平均RMS通常用来衡量连续图像中灰度值的波动强度,当RMS值较高时表示图像对比度较强,即折射的空气流场中存在大量强烈的局部振动。由图5a,5b,5c可知,液氧药包的RMS峰值区域呈沿切缝方向分布,且随着切缝宽度增大,液氧药包相变膨胀过程中气流溢出孔隙增大,致使流场中气体脉冲区域面积增大,同时非切缝方向的RMS值远远小于切缝方向,说明在液

氧反应过程中相变反应路径为沿切缝方向,且随着切缝宽度增大,反应区域的面积越大,相变膨胀的反应越剧烈。

图 6 为不同切缝药包液氧相变膨胀过程流场纹影亮度平均值及脉动 RMS 值的收敛曲线,其中图 6a,6b,6c 的亮度 Mean 的收敛值均小于 1,表明纹影图像在亮度处理过程中图像对比度已调整到最优状态. 由图 6a 可知,液氧药包切缝宽度为 1

mm,药包在  $1\ 100\ \mu\text{s}$  左右时 RMS 的收敛值开始大于 1,此时气体波动信号的有效值较高,系统的反应波动性较强,表示此时液氧相变膨胀引起周围流场剧烈波动,药包周围空气流场处于非稳定状态. 随着药包切缝宽度增加,RMS 值开始大于 1 的时间有所延后,说明当药包切缝宽度增加时,药包作用引起波动的时间延长。

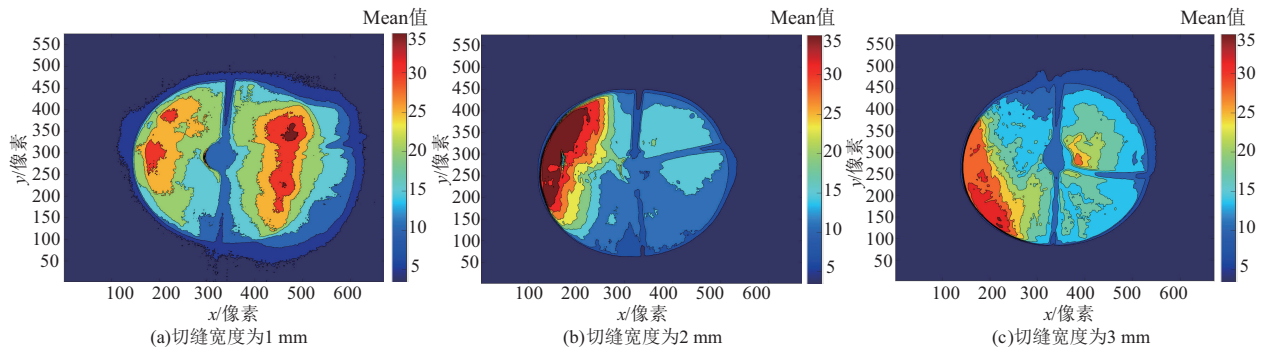


图 4 液氧相变膨胀过程流场亮度 Mean 值

Fig. 4 Mean value of flow field brightness during liquid oxygen phase change expansion process

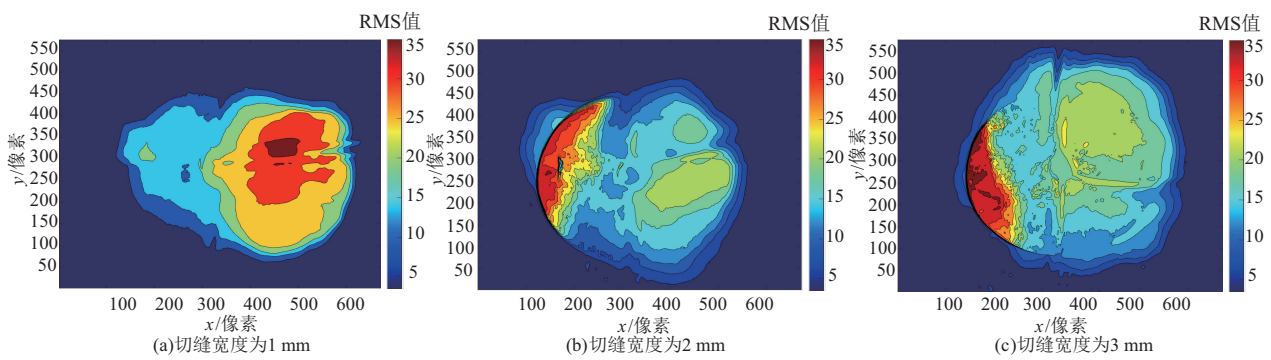


图 5 液氧相变膨胀过程流场脉动 RMS 值

Fig. 5 RMS value of flow field pulsation during liquid oxygen phase change expansion process

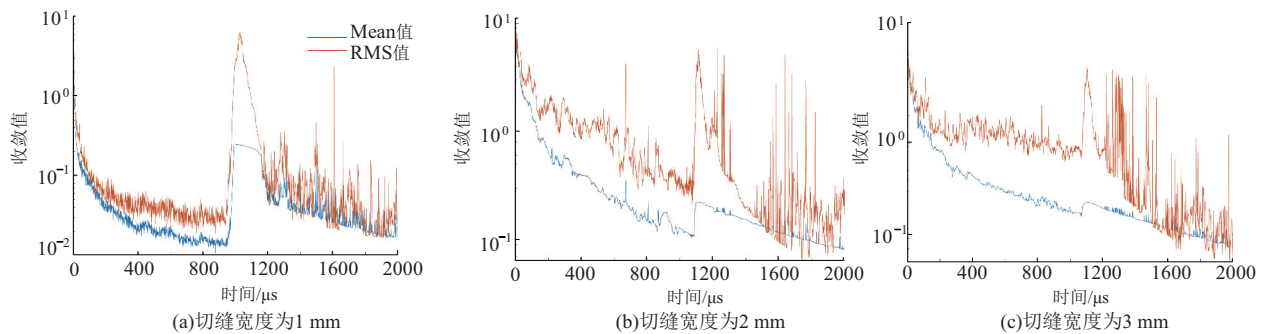


图 6 液氧相变膨胀过程流场特征值收敛性

Fig. 6 Convergence of characteristic values of flow field during liquid oxygen phase change expansion process

### 3.1.2 液氧逸出与燃烧阶段气体流场演变规律

图 7 为切缝宽度为 1 mm 的液氧药包开始逸出与初始燃烧阶段流场纹影及密度梯度图. 由图可知,  $0\ \mu\text{s}$  时,电激发线开始点火,药包中心位置可以观察到微弱亮光,对应密度梯度如图 7b1 所

示,初始流场中气体流场密度分布相对均匀,随着药包内液氧开始发生反应; $730\ \mu\text{s}$  时,液氧药包反应进入逸出阶段,部分液氧由于温度升高转变为气态氧气并开始逸出,对应的流场密度梯度也开始变化,流场内静压力逐渐升高; $940\ \mu\text{s}$  时,液氧

药包反应进入燃烧阶段,此时燃烧反应发展至药包两端且燃烧亮光区域沿着右切缝及充液管位置向外发展,由于液氧燃烧流场内压力升高,尤其沿着药包切缝区域,致使该区域产生高密度区,对应图 7b3 中密度梯度峰值集中分布于右侧切缝周围,由于液氧燃烧产生的气流由高密度向低密度

区域发展,致使切缝方向的密度梯度明显高于非切缝方向;随着液氧药包燃烧反应继续发展,1 080  $\mu\text{s}$  时,燃烧光亮区仍沿着切缝方向发展至视野边缘,对应密度梯度图中高密度区分布于药包端部及药包切缝方向周围,此时液氧药包燃烧产生的气流呈圆筒状结构向两侧发展.

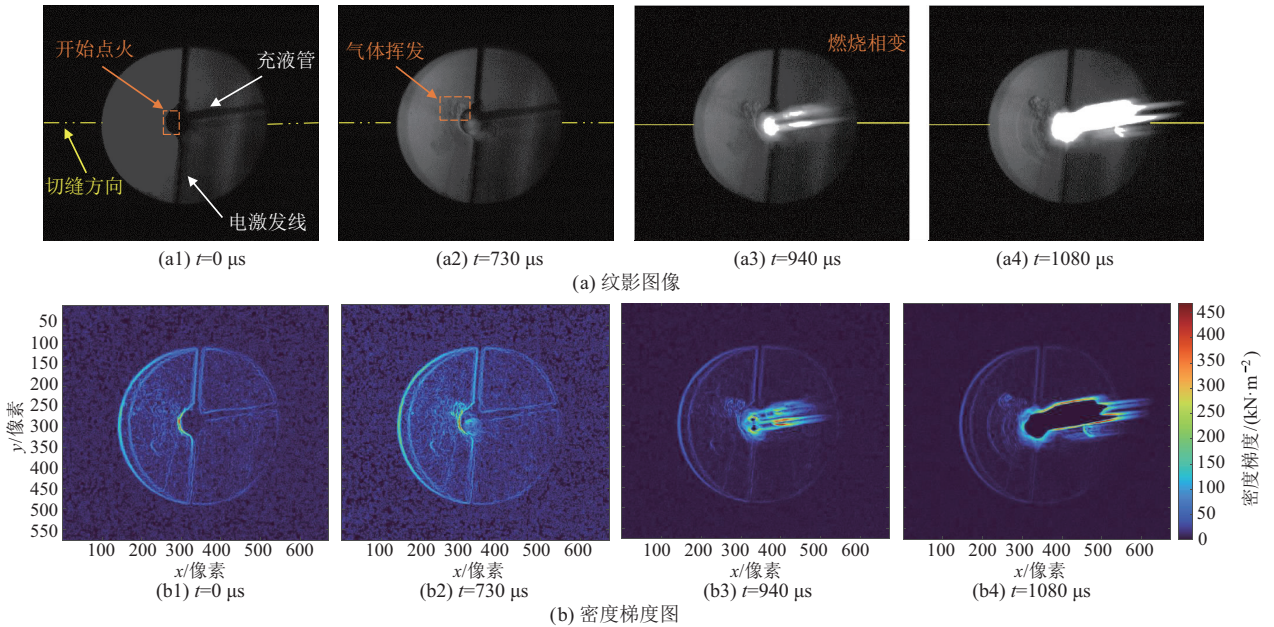


图 7 切缝 1 mm 药包液氧逸出与燃烧阶段纹影及密度梯度图

Fig. 7 Shadow and density gradient diagram of liquid oxygen escape and combustion stage of 1 mm slit medicine pack

图 8 为切缝 2 mm 药包液氧逸出与燃烧阶段 纹影及密度梯度图.

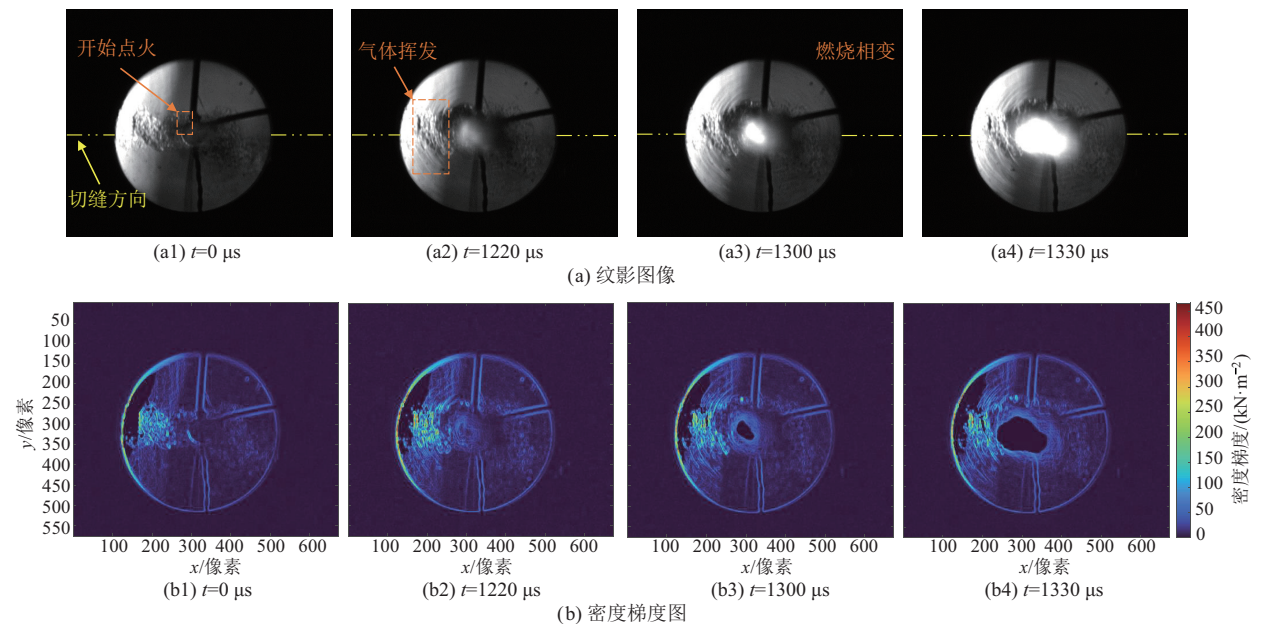


图 8 切缝 2 mm 药包液氧逸出与燃烧阶段纹影及密度梯度图

Fig. 8 Shadow and density gradient map of liquid oxygen escape and combustion stage of 2 mm slit medicine pack

由图 8 可知,不同于切缝宽度 1 mm 液氧药包,切缝宽度为 2 mm 的液氧药包在电激发器开始点火时,液氧药包周围即出现了逸出气体现象,对

应于密度梯度图 8b3 可以清晰观察到气体沿着切缝方向呈团状分布在药包周围,随着药包内部发生燃烧反应,1 220  $\mu\text{s}$  时由于液体和气体相互作用

用,药包周围产生大量的气体,1 300  $\mu\text{s}$  时,药包内部发生较为剧烈的燃烧反应,致使气体反应速率加快,由于燃烧放热流场中沿切缝方向压力快速增加,气流沿该方向密度骤增,使其在密度梯度图中出现对应高密度区,即 1 330  $\mu\text{s}$  时,由图 8a3 可知,药包中的燃烧光亮由药包中心处发展至药包两端,并在药包周围产生不规则气团。

图 9 为切缝 3 mm 药包液氧逸出与燃烧阶段纹影及密度梯度图。由图 9 可知,随着切缝宽度增大为 3 mm,药包在开始点火时周围便产生大量氧

气,且沿着切缝方向逐渐向药包上部波动,致使药包周围气体密度发生变化。随着反应继续发展,药包周围气体逸出的面积不断增大,由于此时流场密度波动较小,气流密度近似接近环境密度值,从而使流场密度维持在一个较稳定水平,1 490  $\mu\text{s}$  时,燃烧反应延伸至药包两端,且其燃烧光亮面积近似于药包横截面积,随着燃烧反应继续发展,1 540  $\mu\text{s}$  时,燃烧反应产生的亮纹区沿切缝方向不断横向发展,对应流场密度梯度图中药包周围出现部分高密度区。

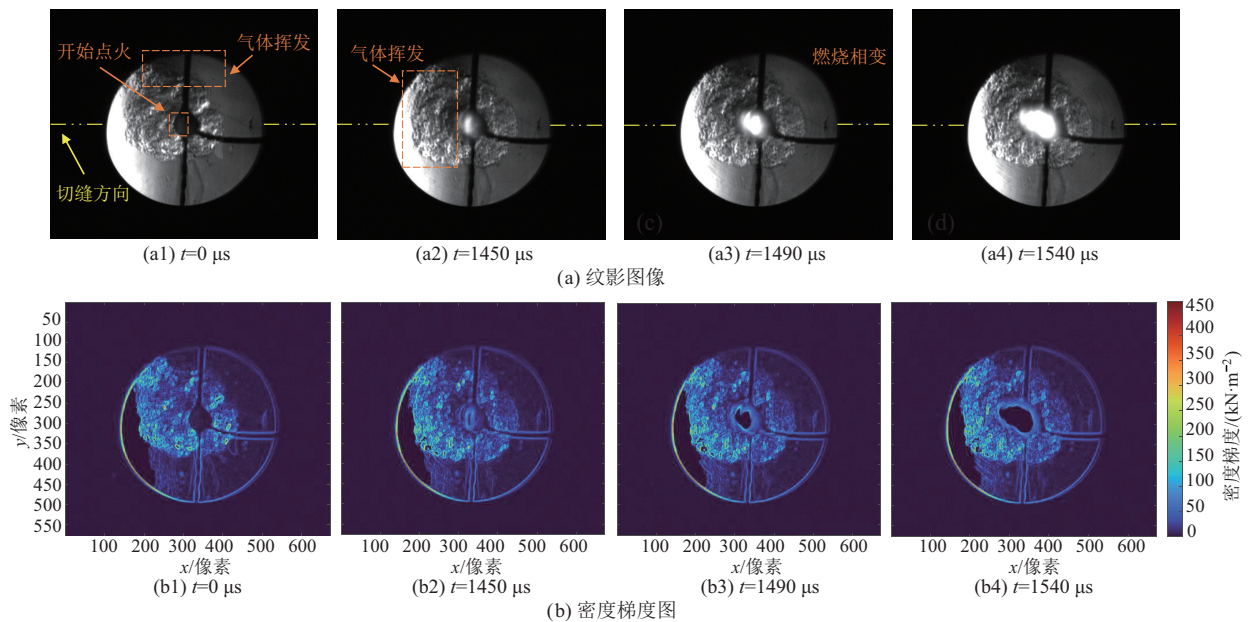


图 9 切缝 3 mm 药包液氧逸出与燃烧阶段纹影及密度梯度图

Fig. 9 Shadow and density gradient map of liquid oxygen escape and combustion stage of 3 mm slit medicine package

对比图 7、图 8、图 9 可知,不同切缝宽度下药包在逸出和燃烧阶段气体脉动及燃烧释放气流均集中于切缝方向,并优先从切缝方向向药包两侧呈团状发散。由于药包切缝宽度增加,药包内气体逸出量多,反应物浓度下降,致使其燃烧传播速率降低,因此开始点火后至液氧药包内开始发生较为剧烈燃烧过程所经历的时间间隔延长。同时,对比图 7b4、图 8b4、图 9b4 可知,当药包切缝宽度较小时,由于泄能面积小,燃烧反应释放能量明显集中于切缝方向,且燃烧亮纹呈圆筒状向外发展,随着切缝宽度增大,燃烧放热能量集中度降低,对应的火焰脉动呈团状分散,集中程度大幅下降。

### 3.1.3 液氧膨胀破坏阶段空气流场变化特征

图 10~图 12 分别为切缝 1,2,3 mm 药包膨胀破坏阶段纹影及密度梯度图。由图可知,在液氧膨胀过程中,液态氧气迅速相变为气体,使其药包周围温度和压力在短时间内剧烈变化,从而产生高密度梯度差,促使气体加速膨胀,温度骤升引发

爆燃反应,从而影响气体的流场变化特征。在液氧爆燃过程中,特别是在爆炸起始阶段,液氧转化为气体导致气体密度从局部高密度区域向低密度区域迅速扩展,同时压力梯度也促使气流进一步传播。由图 10a1 可知,1 160  $\mu\text{s}$  时,切缝宽度为 1 mm 的药包进入爆燃阶段,燃烧产生的火焰亮纹区沿切缝方向优先向充液管一侧发展,火焰周围产生剧烈气体脉动,对应图 10b1,由于燃烧反应释放大量热量,在火焰团周围产生高密度区,药包左侧由于密度梯度较低,产生局部气体膨胀区。1 240  $\mu\text{s}$  时,中心火焰团沿着切缝方向呈半圆形向视野边缘发展,对应图 10b2,药包周围产生局部不规则的高密度梯度区域。1 310  $\mu\text{s}$  时,随着燃烧反应发展,火焰急剧加速且发展至圆形视野边缘,并在其周围产生不规则气体,对应图 10b3,药包快速燃烧引起高密度梯度区域的轮廓不断向四周扩展,表明燃烧反应促使燃烧气团由高密度区向低密度区发展。2 200  $\mu\text{s}$  时,药包燃烧反应逐渐结束,进入后续

余火阶段,燃烧区域内的高温和生产气体仍继续存在流场内,直至所有反应物消耗殆尽,对应

图 10b4,在局部火焰区域边缘产生高密度区,气体膨胀作用效果逐渐减弱。

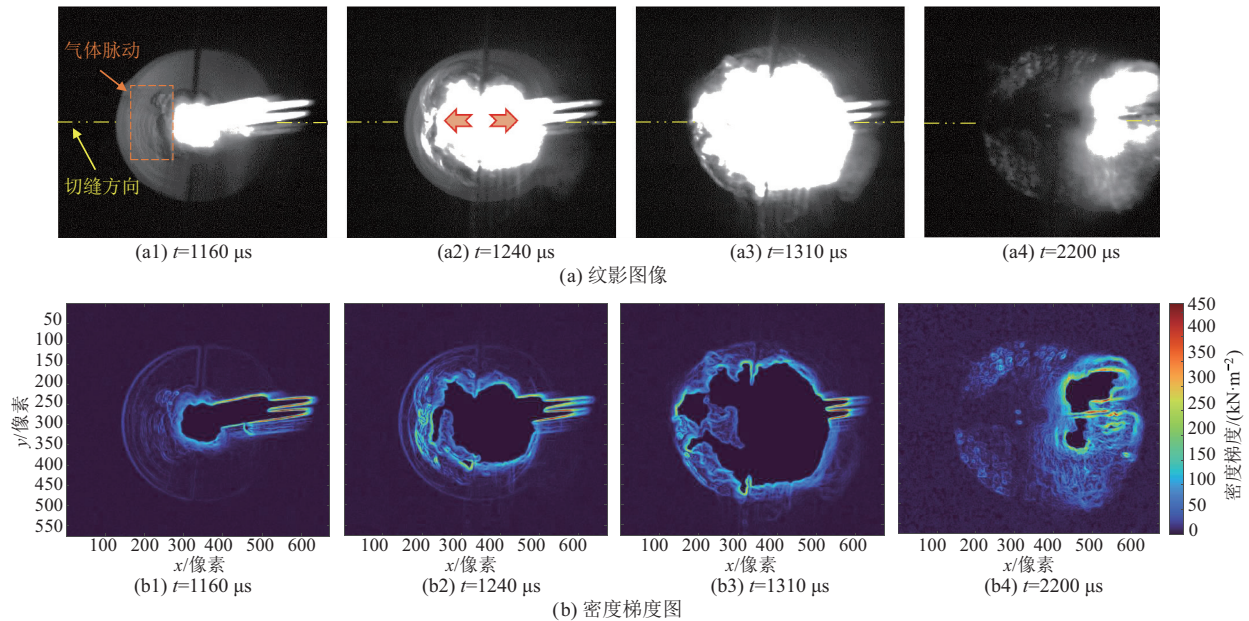


图 10 切缝 1 mm 药包膨胀破坏阶段纹影及密度梯度图

Fig. 10 Shadow and density gradient map of 1 mm slit drug pack expansion and failure stage

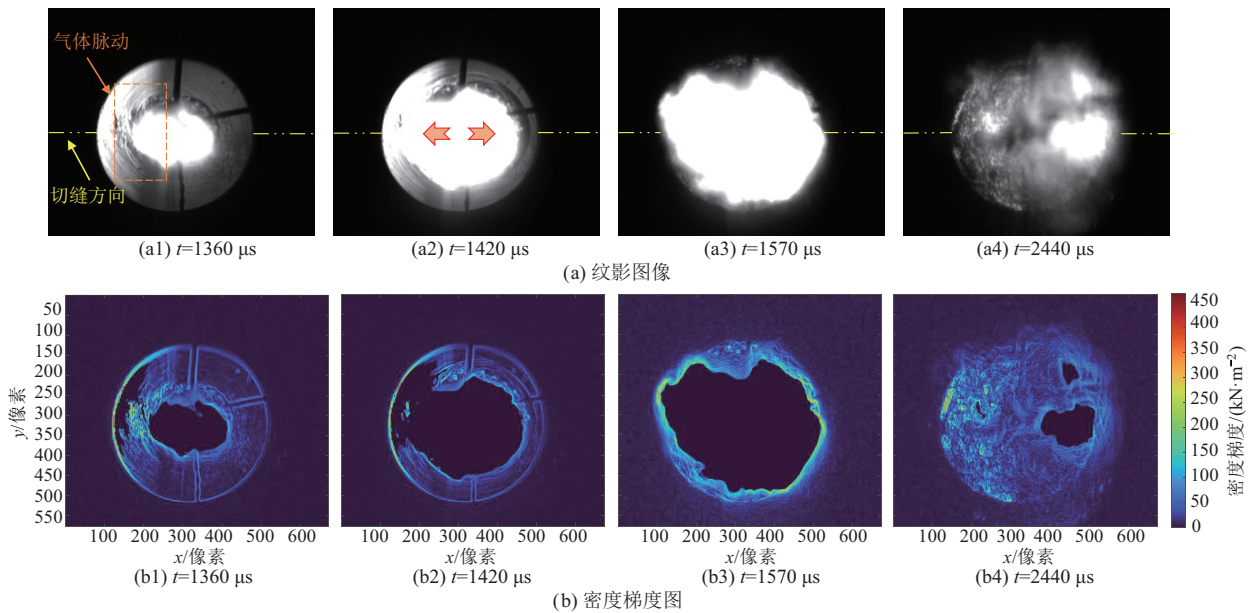


图 11 切缝 2 mm 药包膨胀破坏阶段纹影及密度梯度图

Fig. 11 Shadow and density gradient map of 2 mm slit drug pack expansion and failure stage

由图 11 可知,不同于切缝宽度 1 mm 药包爆燃阶段流场结构特征,切缝 2 mm 药包在 1 360 μs 时产生剧烈的爆燃反应,且由于切缝宽度增加,激发前沿切缝两侧方向逸出的气体量增加,使得爆燃后由于沿切缝方向富氧浓度高,燃烧火焰沿着切缝由药包中心径向向外发展,其气楔定向作用效果更明显,随着爆燃反应的进一步发展,燃烧释放热量和中心火焰团区域面积不断增加;1 570 μs 时,燃烧火焰区面积发展至视野边缘区域,对应密

度梯度图中高密度区域出现在视野边缘位置;2 440 μs 时,燃烧反应逐渐结束,视野显示紊乱气流场,边缘出现部分光亮区域,流场密度梯度值逐渐趋于空气密度梯度值。

由图 12 可知,切缝 3 mm 药包在 1 600 μs 时开始发生剧烈爆燃反应,此时药包两侧均产生燃烧光亮区,并且在中心火焰区周围产生大量的气体脉动,随着爆燃反应进行,火焰沿着切缝方向逐渐发展,对应密度梯度图中沿火焰周围形成高密

度区,1 770  $\mu\text{s}$  时,燃烧火焰区发展至圆形视野边缘,此时高密度梯度值也出现在视野边缘,当爆燃反应逐渐减弱,液氧药包燃烧逐渐结束,流场中产

生紊乱气流,且边缘仍出现部分光亮区,流场中的密度梯度值逐渐恢复原始流场密度。

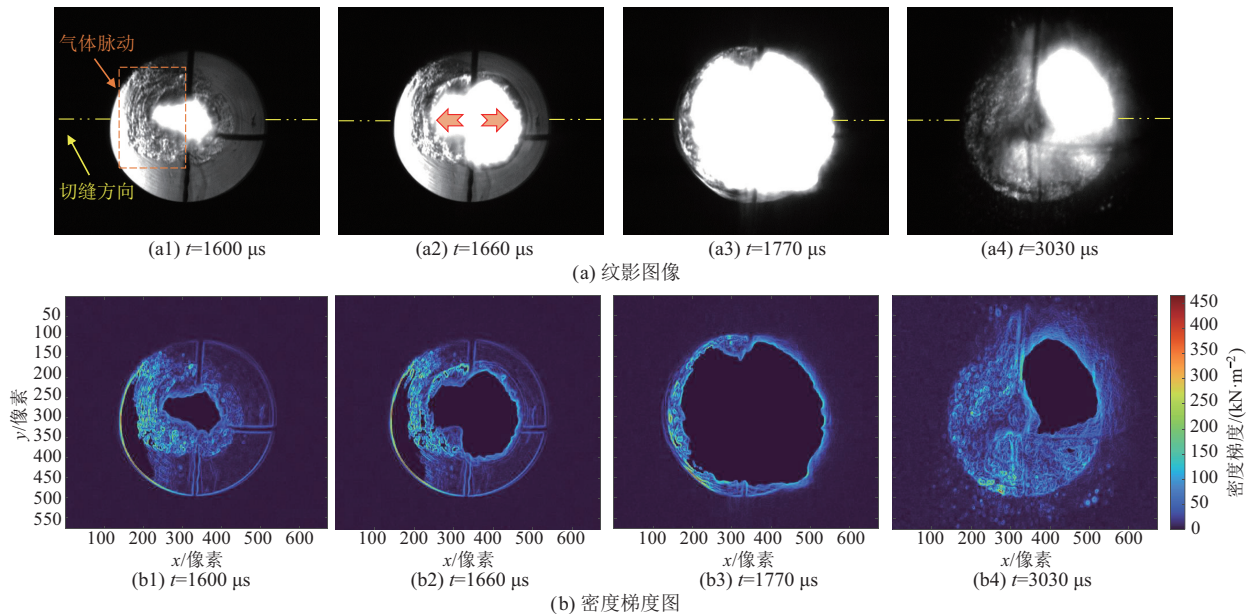


图 12 切缝 3 mm 药包膨胀破坏阶段纹影及密度梯度图

Fig. 12 Shadow and density gradient map of 3 mm slit drug pack expansion and failure stage

对比图 10、图 11、图 12 可知,随着切缝药包宽度增加,液氧药包开始进入剧烈爆燃的时间不断延后,流场中高密度区更接近于视窗边缘区域.切缝宽度较小时,气体燃烧火焰在初始阶段沿着切缝单向传播速度较快,随着切缝宽度增加,其燃烧产生的气体脉动不断向切缝侧向区域发展。

### 3.2 不同药包切缝宽度液氧气体流场动力学分析

#### 3.2.1 不同药包切缝宽度下气体脉动速度

图 13 展示了不同切缝宽度液氧爆燃过程的气体脉动速度.由图 13a 和 13b 可知,气体波阵面脉动变化可分为 3 个阶段:液氧药包反应准备阶段,即  $0\sim 900 \mu\text{s}$ ,药包内产生部分气体,切缝和非切缝方向的气体脉动位移均较小; $900\sim 1\ 200 \mu\text{s}$ ,液氧药包进入相变阶段,部分液氧相变产生气体,气体脉动位移较大; $1\ 200\sim 1\ 400 \mu\text{s}$ ,液氧药包进入剧烈爆燃阶段,此时药包内燃烧释放大气体,气体脉动速度不断提高.由图 13a 和 13c 可知,随着切缝宽度增大,沿切缝方向气体脉动速度下降,切缝宽度为 1,2,3 mm 的液氧药包其峰值速度分别为  $0.007\ 6, 0.007\ 2, 0.006\ 5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ,后者比前两者分别降低了  $5.26\%$  和  $9.72\%$ ,这是由于当切缝宽度较小时,泄能面积相对较小,限制了产物的释放速度,导致能量沿切缝方向释放更集中,当切缝宽度增加,液氧相变产生的气体更容易在横向

空间中扩散,能量不再完全集中于切缝方向传播,导致气体波阵面的脉动速度随着切缝宽度的增大逐渐减小.由图 13b 和 13d 可知,随着切缝宽度增大,非切缝方向上气体脉动位移和脉动速度也有一定程度的增大,切缝宽度为 1,2,3 mm 的液氧药包对应的峰值速度分别为  $0.004\ 8, 0.004\ 9, 0.005\ 1 \text{ cm}/\mu\text{s}$ ,后者比前两者分别增加了  $2.08\%$  和  $4.08\%$ .这是由于切缝宽度较小时,液氧相变膨胀产生的气体冲击大部分沿切缝传播,而非切缝方向的气流传播较弱,沿非切缝方向释放的能量较少,因此气流传播速度较慢,随着切缝宽度增大,液氧相变膨胀释放的能量对非切缝方向的影响区域增大,导致非切缝方向的气流脉动速度有所提高。

由此可知,切缝宽度较小时,液氧相变膨胀释放的能量集中于切缝方向,随着切缝宽度的增大,液氧相变释放的能量可在更大区域范围内传播,部分能量向非切缝方向扩散,导致沿切缝方向切缝宽度较小的气流脉动速度较大,而非切缝方向切缝宽度较大的气流传播速度较快。

#### 3.2.2 不同药包切缝宽度下气体流场超压分析

图 14 为不同切缝宽度液氧相变膨胀过程流场超压曲线.由图 14a 可知,液氧相变膨胀过程中切缝方向传感器采集到的超压在 10 ms 左右达到峰值,随着相变反应速率的降低,超压值呈波动衰减

的趋势. 切缝宽度为 1 mm 的液氧药包在 11 ms 时达到超压峰值, 此时液氧药包中爆燃变化剧烈, 当反应速率降低时能量释放量逐渐减小, 对应的流场压力也波动下降. 相较于切缝宽度为 1 mm 的液氧药包, 切缝宽度为 2, 3 mm 的药包分别在 12, 13 ms 时达到超压峰值, 说明随着切缝宽度增大, 切缝方向液氧药包到达峰值的时间延长, 这是由于切缝宽度较小的药包切缝气道狭窄, 随着液氧相变膨胀, 内部压力快速上升, 气流在药包内被快速压缩, 致使气流冲击速度不断增加. 当切缝宽度增大, 液氧药包反应产物的流通性良好, 将致使流场中气体压力的上升速度较慢, 超压曲线整体较为平缓. 同时, 切缝宽度为 1, 2, 3 mm 的液氧药包对应的峰值超压数据分别为 0.56, 0.40, 0.21 MPa, 随着切缝宽度增大, 后者相较于前两者的峰值超

压分别降低了 28.57% 和 47.5%. 由图 14b 可知, 液氧药包非切缝方向上的超压变化在 40 ms 左右时达到峰值, 随后超压曲线急剧下降, 这是由于液氧药包在相变过程中气流冲击优先由切缝处向外脉动, 此时药包非切缝方向的超压数据没有明显波动变化, 当气楔作用由切缝方向向外形成冲击气团, 部分气体脉动至非切缝方向, 致使非切缝方向的超压不断增大达到峰值. 且随着切缝宽度的增大, 非切缝方向上切缝宽度为 1, 2, 3 mm 的液氧药包分别在 40, 42, 43 ms 时达到超压峰值, 对应的超压峰值分别为 0.011, 0.017, 0.025 MPa, 即随着切缝宽度增大, 药包在非切缝方向上达到超压峰值的时间也不断增加, 对应超压峰值不断降低, 且后者相较于前两者分别增加了 54.55% 和 47.06%, 变化幅度逐渐增加.

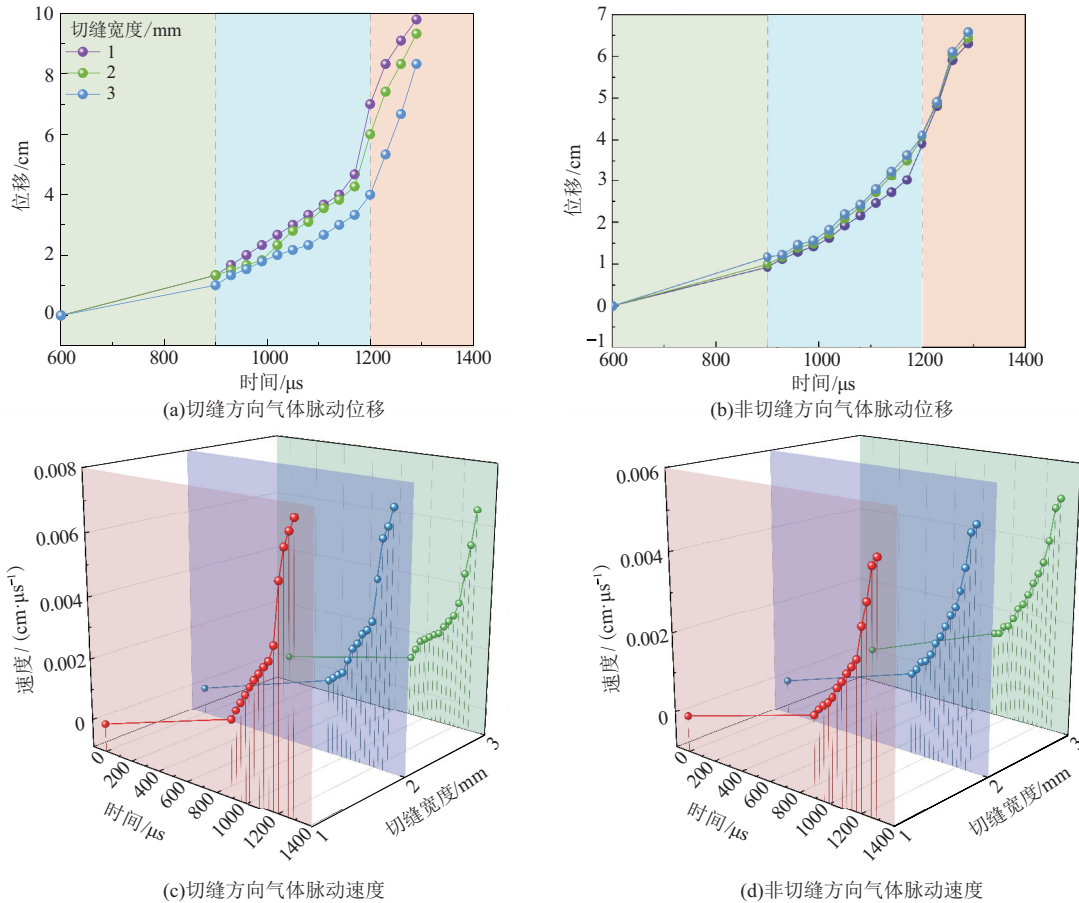


图 13 不同切缝宽度液氧爆燃过程气体脉动速度

Fig. 13 Gas pulsation velocity during liquid oxygen detonation process with different slit widths

由此说明, 不同切缝宽度的液氧药包在相变膨胀过程中, 在切缝和非切缝方向的压力瞬变规律相同, 均随着药包切缝宽度的增加, 达到超压峰值的时间不断延长, 对应的超压逐渐下降, 这是由于切缝宽度较小时, 药包内部压力响应速度增加较快, 气体压缩反应迅速, 导致窄切缝药包快速达

到峰值, 且由于切缝宽度增加, 液氧相变前气体逸出量增加, 致使其定向泄能减少, 对应超压峰值响应降低. 同时, 切缝方向药包在 10 ms 左右达到峰值, 非切缝方向在 40 ms 左右达到峰值, 液氧药包相变膨胀过程中, 优先沿切缝方向集中向外泄能, 随着反应速率不断增加, 部分气流脉动至非切缝

方向致使非切缝方向的气体压力瞬间增加达到

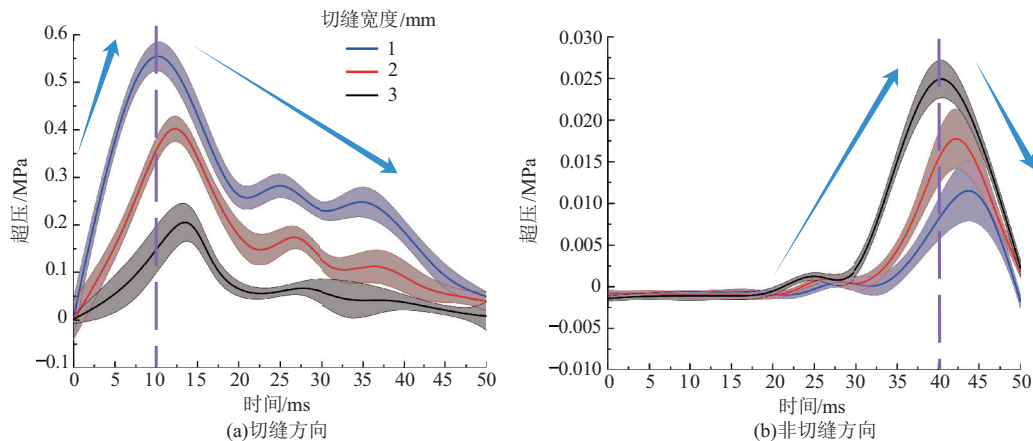


图 14 不同切缝宽度液氧相变膨胀过程流场超压曲线

Fig. 14 Flow field overpressure curve of liquid oxygen phase transition expansion process with different slit widths

#### 4 结 论

1)通过对纹影图像的统计计算可知,液氧药包的切缝宽度对其相变膨胀中流场结构的稳定性具有明显调控效果,随着药包切缝宽度增大,液氧纹影亮度最大值和脉动 RMS 最大值距药包中心的距离越远,表明液氧相变能量释放范围随着泄能面积的增大而扩散;而流场脉动亮度的平均值和 RMS 值的收敛性均随着切缝宽度的增加呈劣化趋势,表明宽切缝的液氧药包能量释放的时空分布离散化,致使空气流场扰动加剧,液氧相变定向泄能效果降低。

2)切缝宽度显著调控液氧药包流场的空间结构,不同切缝宽度下液氧药包反应流场的空间结构出现显著差异,当切缝宽度为 1 mm 时,较窄泄能通道限制反应前气体逸出量,致使相变膨胀过程中沿切缝方向的气流密度梯度急剧变化;而切缝宽度增大时流场密度变化速率减缓,揭示了切缝宽度对液氧相变反应速率具有显著影响。

3)随着切缝宽度增大,液氧相变膨胀产生的气流冲击沿切缝方向的传播速度逐渐降低,其本质是由于切缝宽度增大了泄能通道面积,致使能量释放的集中程度降低,沿切缝方向的能量梯度逐渐被弱化,使得液氧相变气体定向冲击效率降低,相比之下,较窄切缝由于受泄能通道的能量约束,形成高冲击效果的轴向气体流场,充分提升了液氧相变膨胀的能量利用率。

4)液氧相变膨胀定向泄能受切缝宽度对气体流动及能量集中的动态耦合作用,窄切缝受泄能通道的空间约束作用使得气体相变膨胀过程中,能量高度集中,并沿切缝形成定向冲击流释放,1

峰值。

mm 切缝液氧超压峰值高达 0.56 MPa,超压曲线剧烈波动,气流冲击定向程度高,而宽切缝药包由于泄能通道加宽降低了气体压缩量,相变释放能量沿横向扩散,超压曲线趋于平缓,流场结构更为稳定,但对应定向效果劣化。

#### 参考文献:

- [1] 杨仁树,左进京,李永亮,等.不同切缝管材质下切缝药包爆炸冲击波传播特性研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(2):229-235.  
YANG Renshu,ZUO Jinjing,LI Yongliang,et al. Experimental study of slotted cartridge explosion shock wave propagation characteristic with different cutting seam pipe material[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2019,48(2):229-235.
- [2] 刘 朕,杨仁树,左进京,等.新型双聚能药包裂纹扩展规律及周边控制爆破试验研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(6):1171-1184.  
LIU Zhen,YANG Renshu,ZUO Jinjing,et al. Experimental study on the crack propagation rule of a new type of dual-charge and its surrounding controlled blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(6):1171-1184.
- [3] LI Y,HUANG C Y,LIU L J,et al. Experimental and numerical investigation on the explosive characteristics of slotted cartridges under different slotted structures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2021,54(12):6173-6189.
- [4] 王雁冰,李书萱,耿延杰,等.切缝药包爆破定向断裂机理及围岩损伤特性分析[J].工程科学学报,2023,45(4):521-532.  
WANG Yanbing,LI Shuxuan,GENG Yanjie,et al. Directional fracture mechanism and surrounding rock

- damage characteristics of slotted cartridge blasting [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(4): 521-532.
- [5] CAI Y Z, XU Z H, LIU Y F, et al. Weakly confined slotted cartridge blasting in jointed rock mass [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 134:104695.
- [6] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破与定向水压致裂防冲适用性对比分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4):706-719.
- ZHAO Shankun. A comparative analysis of deep hole roof pre-blasting and directional hydraulic fracture for rockburst control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4):706-719.
- [7] 张勤彬, 程贵海, 徐中慧, 等. 贾木那大桥水压定向爆破及其数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 136-143.
- ZHANG Qinbin, CHENG Guihai, XU Zhonghui, et al. Directional water pressure blasting of Jamuna bridge and its numerical simulation[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6):136-143.
- [8] WANG S, LI D Y, HANI M, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture deflection influenced by slotted directional boreholes using XFEM with a modified rock fracture energy model[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193:107375.
- [9] WANG Q B, ZHANG X, GONG B, et al. Study and application of rock breaking mechanism of concentrated water hydraulic smooth blasting in broken sand-stone geological conditions[J]. Shock and Vibration, 2022 (2022):4999800.
- [10] 张 权, 何满潮, 郭 山, 等. 煤基固废非爆炸性膨胀剂高效定向破岩机制及初步应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(4):898-911.
- ZHANG Quan, HE Manchao, GUO Shan, et al. Study on the mechanism and preliminary application of efficient directional rock breaking using a coal-based solid waste non-explosive expansive agent. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(4):898-911.
- [11] ZHAO X L, HUANG B X, CHENG Q Y, et al. Experimental investigation on basic law of rock directional fracturing with static expansive agent controlled by dense linear multi boreholes[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(8): 2499-2513.
- [12] WANG Q, HU Y J, ZHANG M, et al. Directional fracturing of granite cylinder via nitromethane-based energetic materials driven by electrical wire explosion[J]. Aip Advances, 2023, 13(8):085315.
- [13] 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(2):259-270.
- LI Xue, WANG Chuanbing, WANG Yanbing, et al. Research on the directional fracturing mechanism of multiborehole rock mass plasma blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2):259-270.
- [14] WANG K, CHANG C G. Simulation study on rock crack expansion in CO<sub>2</sub> directional fracturing[J]. Processes, 2024, 12(9):1813.
- [15] 胡少斌, 蔡余康, 王恩元, 等. 高温高压 CO<sub>2</sub> 反应流动相变致裂机理[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6):1203-1215.
- HU Shaobin, CAI Yukang, WANG Enyuan, et al. Mechanism of phase change cracking in hightemperature and high pressure CO<sub>2</sub> reaction flow[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6):1203-1215.
- [16] 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.
- ZHANG Tailin, YU Shijie, YANG Zhibin, et al. Application of liquid oxygen cracking blasting technology in an open-pit mine[J]. Modern Mining, 2024, 40(7):249-251.
- [17] 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 Yong, CHEN Zhongshun, LIANG Xiaokang, et al. Mechanism and application of carbon dioxide phase change blasting fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2):63-78.
- [18] 李木坤, 王 刚, 程卫民, 等. 超临界二氧化碳射流破岩的热流固耦合机理[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6):1258-1268.
- LI Mukun, WANG Gang, CHENG Weimin, et al. Heat-fluid-solid coupling mechanism of supercritical carbon dioxide jet in rock-breaking[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1258-1268.
- [19] 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 Zhen, WANG Yanbing, FU Dairui, et al. Research on rock fracturing technology based on liquid oxygen energy storage[J]. Blasting, 2025, 42(1): 151-158.
- [20] BOSELLI M, COLOMBO V, GHEDINI E, et al.

- Schlieren high-speed imaging of a nanosecond pulsed atmospheric pressure non-equilibrium plasma jet[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2014, 34 (4):853-869.
- [21] 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.
- [22] HUBNER B, WALHORN E, DINKLER D. A monolithic approach to fluid-structure interaction using space-time finite elements[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193(23/26):2087-2104.
- [23] 陈长江,刘 勇,魏建平,等. 不同膨胀比下气体射流流场结构及脉动频率[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12):3883-3890.
- CHEN Changjiang, LIU Yong, WEI Jianping, et al. Flow field structure and pulsation frequency of air jet under different pressure ratios[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12):3883-3890.
- [24] MEHRA R. Application of refractive index mixing rules in binary systems of hexadecane and heptadecane with N-alkanols at different temperatures[J]. *Journal of Chemical Sciences*, 2003, 115 (2): 147-154.
- [25] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- RAO Ruizhong. *Modern atmospheric optics*[M]. Beijing: Science Press, 2012.

(责任编辑 沈 菊 全 腾)