



# 约束炸药内部裂缝燃烧演化实验研究

尚海林, 杨洁, 李涛, 傅华, 胡海波

中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999

## 引言

对流燃烧是武器装药发生意外非冲击点火后转变为高烈度反应甚至爆轰的关键过程。压装高能炸药中的对流燃烧是一个多阶段、多物理的复杂过程, 它强烈依赖于点火源的类型、高能炸药的自身性质、几何特性以及约束条件等因素。鉴于炸药中实际裂缝的形状和尺寸各异, 通常采用预置裂缝的方式研究炸药典型尺寸裂缝中的燃烧特性。

## 实验设计

实验装置如图1所示。两块长条薄片PBX炸药 (HMX质量分数95%) 通过厚壁钢壳约束形成长度200 mm, 宽度分别为50  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ 、200  $\mu\text{m}$ 的狭缝。通过点火腔内的点火头和黑火药对炸药点火, 采用高速相机记录燃烧演化过程, 用压力传感器 (1个位于点火腔, 另外5个位于裂缝不同位置, 见图2) 测量燃烧过程中的压力历程。

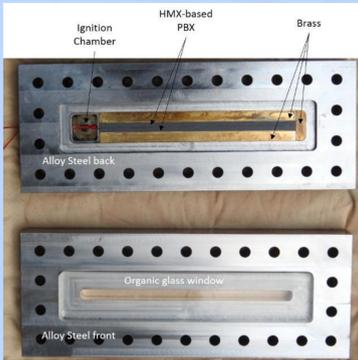


图1 裂缝燃烧实验装置图。

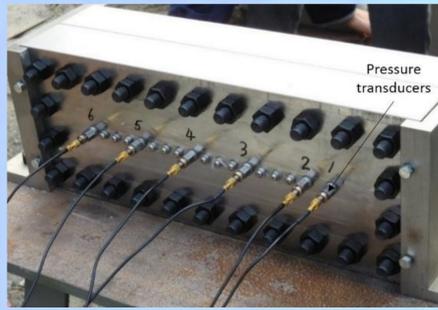


图2 裂缝燃烧实验测试图。

## 典型实验结果

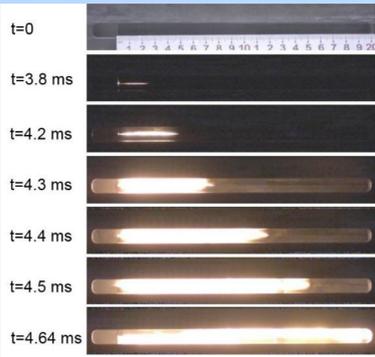


图3 50  $\mu\text{m}$ 宽裂缝燃烧过程照片

通过高速摄影获取火焰尖端的位置, 做出位置—时间曲线, 并对曲线开展分段线性拟合, 给出火焰在靠近点火端的传播速度约为3.27 m/s, 而在后段的速度约为348.3 m/s。通过压力曲线阶段II中压力上升时刻获取燃烧波阵面达到时刻, 进行线性拟合, 得到其传播速度约为423 m/s。

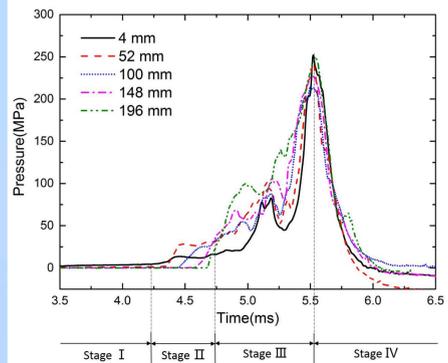


图4 50  $\mu\text{m}$ 宽裂缝燃烧压力曲线。

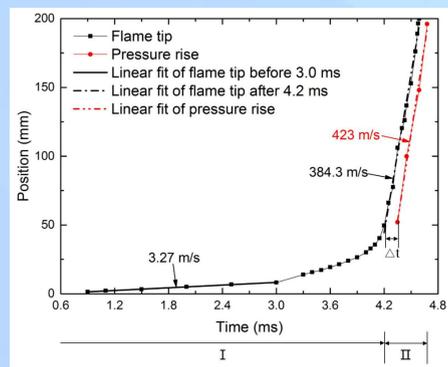


图5 50  $\mu\text{m}$ 宽裂缝燃烧压力曲线。

## 不同裂缝宽度实验结果对比

裂缝宽度/ $\mu\text{m}$	50	100	200
火焰传播速度 (阶段II) / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	384.3	467	479.1
压力波阵面传播速度 (阶段II) / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	423	469.3	477.8
$\Delta t$ (阶段II中火焰尖端和压力波阵面到达时间差) / $\mu\text{s}$	110	95	80
峰值压力 (阶段III) //MPa	253	210	183

## 阶段I: 靠近点火端裂缝中高温气体的早期对流传播 (压力: <5 MPa)

点火腔中黑火药燃烧产生的高温气体进入裂缝。由于狭窄裂缝中壁面的粘性阻力作用, 裂缝中的增压速率以及气体的对流传播速度都相对较慢。

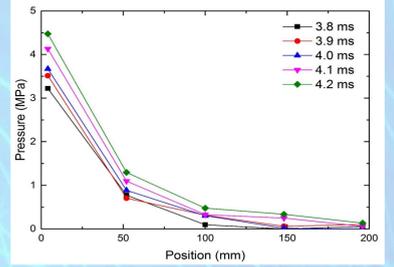


图6 阶段I中不同时刻沿裂缝的压力分布曲线

## 阶段II: 产物气体的稳定对流传播伴随裂缝表面沿长度方向点火燃烧 (5 MPa→30 MPa)

燃烧产物沿着裂缝以相对稳定的超声速度传播。经过一定的延迟时间之后裂缝表面沿着长度方向开始燃烧, 并逐渐将裂缝中的压力升高到30 MPa左右, 且在裂缝中部形成了一个压力平衡区域。

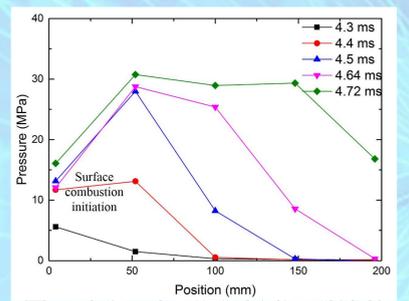


图7 阶段II中不同时刻沿裂缝的压力分布曲线。

## 阶段III: 裂缝中炸药剧烈燃烧伴随着约束壳体变形 (30 MPa→250 MPa)

压力达到特定值之后约束壳体开始变形, 导致裂缝宽度增加、炸药块体受压变形和破裂。火焰进入炸药块体内部新生成的裂纹以及炸药与壳体的结构间隙中, 导致燃烧进一步加剧, 裂缝内部压力急剧升高, 峰值压力甚至超过了250 MPa。

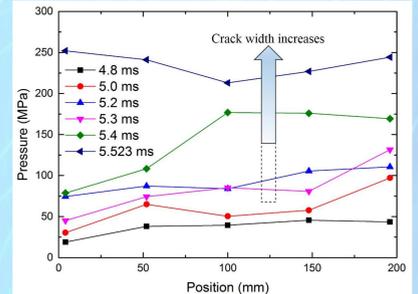


图8 阶段III中不同时刻沿裂缝的压力分布曲线。

## 阶段IV: 约束壳体破裂伴随着压力卸载 (250 MPa→0.1 MPa)

在燃烧造成的极端高压作用下, 约束壳体发生破裂, 裂缝中的压力也随之迅速下降, 最终与周围大气压力 (~0.1 MPa) 达到平衡。

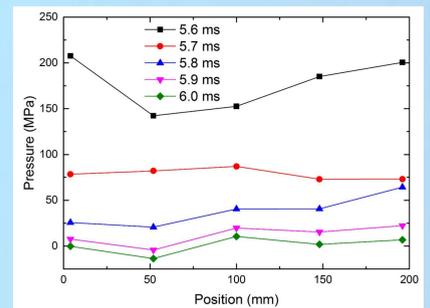


图9 阶段IV中不同时刻沿裂缝的压力分布曲线

## 炸药基体中燃烧驱动裂纹传播



图10 裂纹动态扩展过程

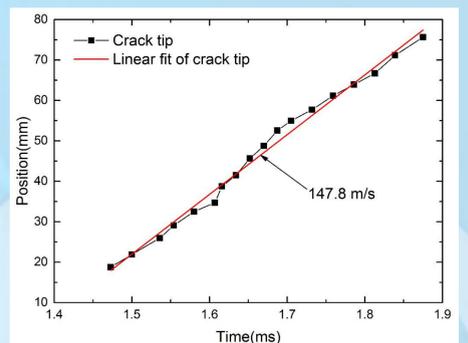


图11 不同时刻裂纹尖端的位置和传播速度

## 结论

炸药裂缝中的对流燃烧演化包含以下过程: 靠近点火端裂缝中高温气体的早期对流传播、产物气体的稳定对流传播伴随裂缝表面沿长度方向点火燃烧、裂缝中炸药剧烈燃烧伴随着约束壳体变形、极端高压下约束的解体泄压过程。