

文章编号:1006-9941(2023)07-0699-08

## 环氧丙烷/空气混合物气-液两相燃爆特性

蒋八运<sup>1,2</sup>,程扬帆<sup>1,2</sup>,李世周<sup>1,3</sup>,钱家祺<sup>1,2</sup>,韦箫<sup>1,2</sup>,薛茹君<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 化学工程学院,安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 安徽省爆破器材与技术工程实验室,安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 安全科学与工程学院,安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为了探究环氧丙烷云雾燃爆特性,采用20 L球形液体燃料爆炸测试系统,研究了点火延迟时间和质量浓度对环氧丙烷/空气混合物爆炸特性参数的影响,同时采用高速相机拍摄火焰传播过程,并利用比色测温技术重构了火焰温度场动态云图,探讨了环氧丙烷质量浓度对火焰温度的影响规律。结果表明:随着点火延迟时间的增加,最大爆炸超压和最大超压上升速率均呈先增大后减小的变化趋势,燃烧持续时间与之相反,最佳点火延迟时间为100 ms,此时最大爆炸超压达到最大值0.89 MPa;随着环氧丙烷质量浓度的增加,最大爆炸超压、最大超压上升速率和火焰最大平均温度均先增加后减少,在环氧丙烷质量浓度为 $498 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,最大爆炸超压和最大超压上升速率均最大,分别为1.02 MPa和 $60.91 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但最大平均温度对应的质量浓度明显比最大爆炸超压低,在质量浓度为 $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时火焰平均温度峰值达到最大值1937 K。研究成果可为燃料空气炸药爆轰性能优化和毁伤效能评估提供参考。

**关键词:** 环氧丙烷;爆炸超压;火焰温度;比色测温;特性实验

**中图分类号:** TJ55; O38

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2023077

## 0 引言

在军事应用领域,低沸点、高热值的液体燃料(如环氧丙烷、环氧乙烷、乙醚等)经常用于制备云爆武器<sup>[1-4]</sup>。燃料空气炸药(FAE)作为一种典型的云爆武器,具有超压衰减速度慢、作用时间长、产生窒息效应等特点,对隐蔽目标和软目标的毁伤效果好<sup>[5]</sup>,主要用于火箭弹、航空炸弹和导弹战斗部。系统研究气液两相云的爆炸超压特性和火焰特性,对于云爆武器的毁伤性能评估具有重要意义。国内外学者对FAE的爆炸毁伤性能进行了广泛的研究,并重点关注其冲击波毁伤和热毁伤效应。在冲击波毁伤性能方面,饶国宁

等<sup>[6]</sup>通过实验研究了液固云爆药剂在爆轰区外的冲击波超压变化规律,结果表明:与一次云爆药剂相比,二次云爆药剂空中和地面的平均梯恩梯(TNT)当量分别提高了60%和69%,具有更强的爆炸威力。Bai等<sup>[7]</sup>探讨了初始环境压力、温度对乙醚、环氧丙烷和正戊烷爆炸特性的影响,发现乙醚、环氧丙烷和正戊烷-空气混合物的爆炸压力随初始环境压力的降低呈线性下降,而随初始环境温度的降低呈先增大后减小的趋势。Li等<sup>[8]</sup>研究了挂式四氢双环戊二烯(JP-10)云雾/空气混合物爆燃转爆轰(DDT)过程中传播距离对压力波的影响,发现随着传播距离的增加,爆燃波前速度和压力迅速增加。

除冲击波压力外,爆炸温度同样是衡量FAE毁伤性能的重要指标。在爆炸温度测量方面,测温方法主要分为接触式和非接触式两大类。在接触式测温方面,Liu等<sup>[9]</sup>利用接触式温度传感器测定了气液两相JP-10/空气混合物的爆炸温度,研究发现:随着浓度的增加,爆炸温度呈先增加后减少的趋势;在相同浓度下,索特平均直径越小峰值温度越高。叶辉等<sup>[10]</sup>利用多通道辐射光纤高温计对硝基甲烷液体炸药的爆轰温

收稿日期:2023-04-15;修回日期:2023-05-21

网络出版日期:2023-06-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12272001;11972046);安徽省自然科学基金优秀项目(2108085Y02);安徽理工大学研究生创新基金(2022CX2109)

作者简介:蒋八运(1996-),男,在读硕士研究生,主要从事云爆武器爆炸效应研究。e-mail:jiang\_bug@qq.com

通信联系人:程扬帆(1987-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事爆炸力学和爆炸安全研究。e-mail:yfcheng208@163.com

引用本文:蒋八运,程扬帆,李世周,等. 环氧丙烷/空气混合物气-液两相燃爆特性[J]. 含能材料,2023,31(7):699-706.

JIANG Ba-yun, CHENG Yang-fan, LI Shi-zhou, et al. Vapor-Liquid Two-Phase Combustion and Explosion Characteristics of Propylene Oxide/Air Mixtures[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(7):699-706.

度进行了测量,实验得出爆轰温度的平均值为 3552 K,与理论计算值一致。然而,接触式测温在测量温度时传感器需要与被测物体接触,不仅影响温度场的分布,而且响应速度不能满足瞬态高温测量要求<sup>[11]</sup>。与接触式测温相比,非接触式测温能够检测物体的表面温度,测温范围宽,响应速度快,适合瞬态高温测量<sup>[12]</sup>。宋先钊等<sup>[13]</sup>采用红外热成像仪测量了不同燃料云雾的爆炸火球表面温度,分析发现热辐射损伤半径大小关系为:环氧丙烷>仲丁醇>正丁醇>聚甲氧基二丁基醚>聚甲氧基二甲醚。然而,采用红外热成像类的非接触式测温方法时,需要获取被测物体的发射率,且易受环境辐射的影响,直接影响测温精度<sup>[14]</sup>。近年来,比色测温方法在炸药测温领域开始得到应用,该方法具有响应速度快、测量精度高、抗干扰能力强等特点,且无需获取被测物体的发射率大小,具有红外热成像测温方法无可比拟的优势。课题组前期对比色测温方法进行了大量的研究<sup>[15-16]</sup>,为FAE热毁伤效能评估提供了技术保障。

本研究利用 20 L 球形液体燃料爆炸测试系统,详细研究了 60, 80, 100, 120, 140, 160 ms 6 种点火延迟时间和 166, 249, 332, 415, 498, 581 g·m<sup>-3</sup> 6 种环氧丙烷质量浓度条件下,环氧丙烷云雾爆炸特性参数和火焰传播特征;同时,采用比色测温技术重构了环氧丙烷火焰温度场动态云图,探讨了质量浓度对火焰温度特征的影响规律。研究成果可为FAE的性能优化和毁伤效能评估提供理论和技术参考。

## 1 实验部分

### 1.1 原料与仪器

原料:环氧丙烷,纯度为 99.5%,上海麦克林生化科技股份有限公司;空气,纯度为 99.9%,合肥恒隆电气有限公司。

仪器:20 L 球形液体燃料爆炸测试装置(适用标准:GB/T 16426),吉林市宏源科学仪器有限公司;高速相机 Memrecam HX-3,日本 NAC 公司;可编程逻辑控制器(PLC),佛山市敏控科技有限公司;113B24 型 PCB 压力传感器,美国 PCB 公司;钨丝灯(BRL 12 V-50 W),日本 USHIO 公司;UTP1306S 型直流稳压电源,优利德科技(中国)股份有限公司。

### 1.2 实验

#### 1.2.1 比色测温标定

在进行正式的温度测量之前,首先需要先对温度

进行标定(实验在室内无光照条件下进行)。比色测温标定系统包括:20 L 球罐、高速相机、衰减片、钨丝灯、直流稳压电源、电压表、电流表、Python 标定程序。实验选用钨丝灯进行温度标定(钨是世界上熔点最高的金属,其熔点高达 3695 K<sup>[17]</sup>),标定实验装置如图 1 所示。其中,钨丝灯的温度  $T$  与电阻值  $R(T)$  的函数关系为<sup>[17]</sup>:

$$\frac{R(T)}{R_0} = -0.524 + 0.00466 T + 2.84 \times 10^{-7} T^2 \quad (1)$$

式中, $T$ 为温度,K; $R_0$ 是钨丝灯本身的电阻, $\Omega$ 。经测量,实验所用的钨丝灯  $R_0=0.25 \Omega$ 。

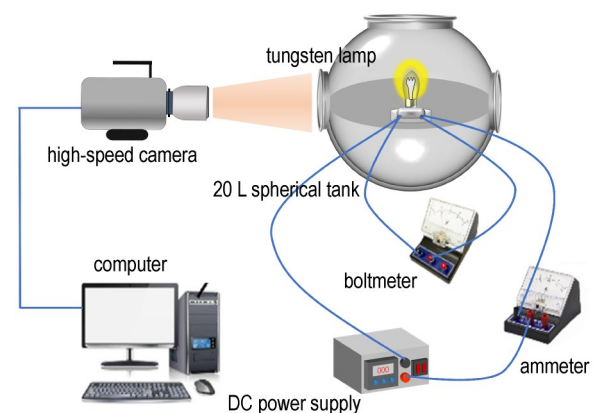


图 1 钨丝灯标定实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of tungsten lamp calibration experimental set-up

通过测量在不同温度下钨丝灯对应的电流值和电压值,计算得到钨丝灯的电阻  $R(T)$ ,再经式(1)即可计算出钨丝灯在不同电压、电流时的实际温度值  $T$ 。任何电路在实际情况下都会存在内阻,将钨丝灯灯座短路,经小电流测试得到标定电路内阻为  $0.04 \Omega$ ,因此钨丝灯的实际电阻  $R(T)$  计算方法为:

$$R(T) = \frac{U}{I} - 0.04 \quad (2)$$

式中, $U$ 为电压,V; $I$ 为电流,A。

通过 Python 程序将拍摄的钨丝灯灰度图(如图 2 所示)进行插值运算,构建出彩色图像,再计算得出彩色图中钨丝所在区域像素点的  $R/G$  值,计算结果如表 1 所示。然后将计算出的  $R/G$  值与实际温度值  $T$  进行拟合,得到的线性拟合曲线如图 3 所示(相关系数为 0.99698,拟合效果较好),具体的映射函数关系式为:

$$T = 1610.441 \frac{R}{G} + 195.707 \quad (3)$$

式中, $T$ 为温度,K; $R$ 、 $G$ 分别为像素点的红、绿分量亮度值。

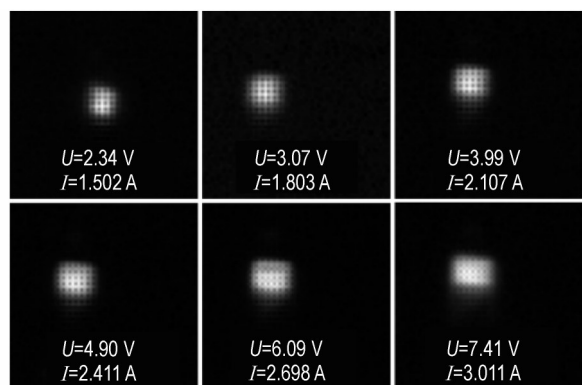


图2 不同电压、电流下钨丝的灰度图

Fig.2 Grayscale maps of tungsten wire with different voltages and currents

表1 不同温度下钨丝灯 R/G 值计算结果

Table 1 The R/G values of tungsten filament lamp with different temperatures

U / V	I / A	R(T) / Ω	T / K	R/G
2.34	1.502	1.518	1415.384	0.767
3.07	1.803	1.663	1539.672	0.829
3.99	2.107	1.854	1703.594	0.925
4.90	2.411	1.992	1822.620	1.020
6.09	2.698	2.217	2015.646	1.130
7.41	3.011	2.421	2190.538	1.239

Note: U is voltage; I is current; R(T) is resistance; T is temperature; R/G is a ratio.

### 1.2.2 液体燃料爆炸测试

液体燃料爆炸测试系统主要由 20 L 球形爆炸罐体、燃料分散系统、点火系统、同步控制系统和数据采集系统组成,如图 4 所示。罐体带有一对直径为 14 cm 的圆形透明观察窗,便于高速相机拍摄火焰形态。燃料

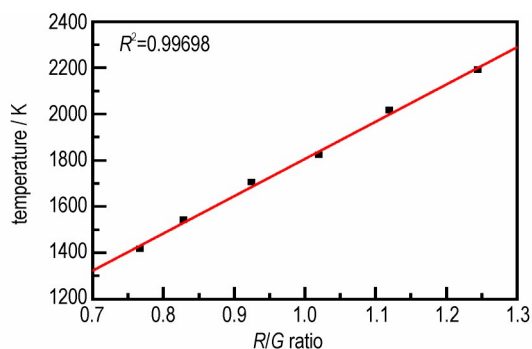


图3 温度与 R/G 值拟合曲线

Fig.3 Temperature-(R/G) fitting curve

分散系统主要由 2 个分散喷嘴、2 个 70 mL 的燃料储存罐、2 个电磁阀、2 个 1.5 L 的储气罐和高压气瓶组成;点火系统是由 2 个间隙为 1.5 mm 的钨电极和 1 个电火花发生器组成;同步控制系统包含一个可编程逻辑控制器,用于控制电磁阀的开启时间、燃料喷洒时间以及点火延迟时间;爆炸超压由安装在容器壁上的 PCB 压力传感器测量,并由数据采集系统记录。实验是在室温环境下(25 °C)进行的,球罐内初始环境压力为 0.1 MPa。点火前,两侧的储气罐中均配有 0.8 MPa 的空气,电磁阀开启时间设置为 50 ms,可保证气流将液体燃料充分吹入到爆炸球罐中<sup>[18-19]</sup>。在爆炸罐体中心位置点火,采用高压脉冲点火方式,点火能量为 60 J,同一工况至少重复 3 次实验。实验中,电磁阀开启时间始终保持 50 ms,这保证了所有实验的喷雾时间相同<sup>[7, 20]</sup>。

实验以点火延迟时间和环氧丙烷质量浓度为影响因素,研究了 6 个不同点火延迟时间(60, 80, 100, 120, 140, 160 ms)下质量浓度为 332 g·m<sup>-3</sup> 的环氧丙

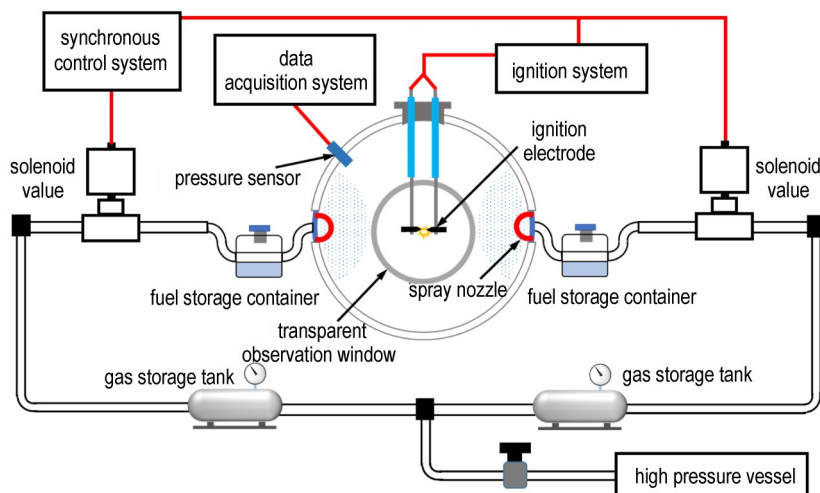


图4 20 L 球形液体燃料爆炸测试系统

Fig.4 20 L spherical liquid fuel explosion test system

烷云雾爆炸特性参数,即最大爆炸超压、最大超压上升速率以及燃烧持续时间(从点火时刻到最大爆炸超压对应时刻之间的时间间隔<sup>[19]</sup>),以及研究了质量浓度为166,249,332,415,498 g·m<sup>-3</sup>和581 g·m<sup>-3</sup>的环氧丙烷云雾燃爆特性、火焰传播过程和温度变化规律。

## 2 结果与讨论

### 2.1 点火延迟时间对燃爆参数的影响

点火延迟时间是指电磁阀开启时刻与点火时刻之间的时间间隔<sup>[9, 19]</sup>。电磁阀开启后,储气罐中的空气将环氧丙烷液体从分散喷嘴吹入20 L球罐内,液态云雾在球罐内形成需要一定的时间,且云雾形成后仅能在一段时间内保持良好的悬浮效果。因此,为了确保环氧丙烷云雾有效燃烧,需要通过实验确定一个合适的点火延迟时间<sup>[21]</sup>。

采用20 L球形液体燃料爆炸测试系统,详细研究了点火延迟时间对环氧丙烷爆炸超压特性的影响,得到了6种不同点火延迟时间工况下环氧丙烷爆炸特性参数,结果如图5所示。由图5可以看出,随着点火延迟时间的增大,环氧丙烷的最大爆炸超压呈先增大后减小的趋势,并且在点火延迟时间为100 ms时达到最大值0.89 MPa。这主要是因为当点火延迟时间小于100 ms时,20 L球罐内初始湍流强度高<sup>[21]</sup>,且环氧丙烷云雾分散不够充分<sup>[18]</sup>,导致燃料未充分反应,使得爆炸超压偏低。当点火延迟时间大于100 ms时,由于点火时间间隔过长,环氧丙烷云雾在重力的作用下发生沉降,导致其中一部分燃料沉降于罐体底部并未参与反应,造成爆炸超压的下降,并且随着点火延迟时间的增加,重力的沉降作用越明显,导致爆炸超压下降的越多。另一方面,随着点火延迟时间的增加,最大超

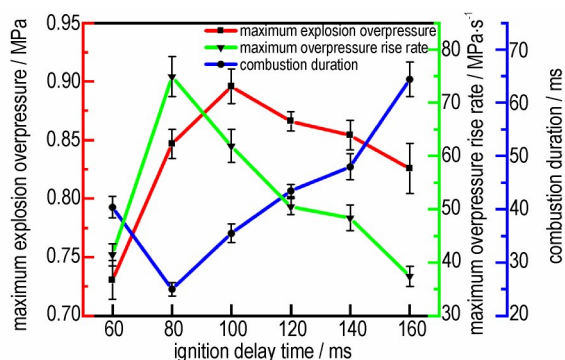


图5 不同点火延迟时间的环氧丙烷云雾爆炸特性参数  
Fig.5 Explosion characteristic parameters of propylene oxide mist with different ignition delay times

压上升速率同样呈先增大后减小的变化趋势,在80 ms的点火延迟时间下达到最大值74.92 MPa·s<sup>-1</sup>,而燃烧持续时间的变化趋势却正好相反,并且在点火延迟时间为80 ms时达到最小值25 ms。这是因为当点火延迟时间小于80 ms时,由于液滴群的聚集效应使得液滴的比表面积偏小<sup>[22]</sup>,燃料的燃烧速率偏慢,从而使得释放热量的速率变慢,造成燃烧持续时间偏大、最大超压上升速率偏低;而当点火延迟时间大于80 ms时,由于液滴发生沉降,随着时间的增加液滴沉降的越多<sup>[22]</sup>,参与反应的燃料越少,释放的热量越少,进一步导致液滴的蒸发速率降低,从而使得燃烧速率变慢,最终造成燃烧持续时间不断增加、最大超压上升速率不断降低。此外,从图5中可以明显看出最大爆炸超压与最大超压上升速率的峰值对应的点火延迟时间不同,这是由于当点火延迟时间为100 ms时,液滴分散最均匀,环氧丙烷燃烧释放出来的热量最大,因而产生的最大爆炸超压值最大;而当延迟时间为80 ms时,虽然此时的环氧丙烷液滴未达到最佳悬浮状态,但是由于初始湍流的存在,加速了环氧丙烷的燃烧过程<sup>[21]</sup>,因而此时的最大超压上升速率达到最大值。

### 2.2 质量浓度对燃爆参数的影响

为了研究质量浓度对环氧丙烷燃爆特性的影响,选择最佳点火延迟时间100 ms,得到了6种不同质量浓度的环氧丙烷云雾爆炸特性参数,结果如图6所示。

从图6可以看出,在一定浓度范围内,环氧丙烷的最大爆炸超压随着质量浓度的增加呈先增大后减小的趋势,并且在环氧丙烷质量浓度为415 g·m<sup>-3</sup>和498 g·m<sup>-3</sup>时达到最大,最大值约为1.02 MPa。当环氧丙烷浓度低于415 g·m<sup>-3</sup>时,密闭容器内的氧气含量相对充足,燃料能够充分反应。此时,随着质量浓度的增加,燃料反应释放的热量增加,使得最大爆炸超压

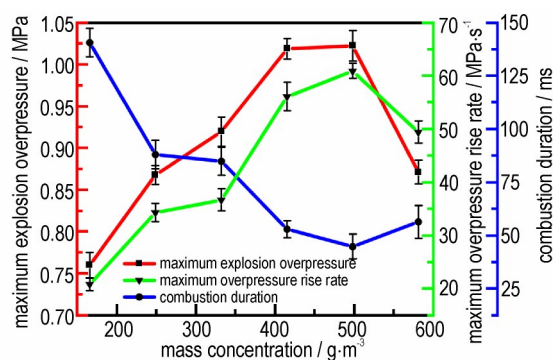


图6 不同质量浓度的环氧丙烷云雾爆炸特性参数  
Fig.6 Explosion characteristic parameters of propylene oxide mist with different mass concentrations

增大,且质量浓度越高,释放的热量越多,最大爆炸超压增加的越多。当环氧丙烷质量浓度高于  $498 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,氧气含量不足以使燃料充分反应,未参与反应的液滴燃料会吸收燃烧时释放出的热量,造成最大爆炸超压的减小。与之相对应的是,燃烧持续时间随着质量浓度的增加呈先减小后增大的趋势,并在质量浓度为  $498 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  时达到最小值  $44.8 \text{ ms}$ ;最大超压上升速率开始随着质量浓度增加而增大,在质量浓度为  $498 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  时达到最大值  $60.91 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,然后随之减小。这是因为在低燃料浓度范围内,氧气含量足够供给反应需要,随着质量浓度的增加,单位时间内分子间的有效碰撞增加<sup>[23]</sup>,使得燃料反应速率加快,释放热量的速率也加快,导致燃烧持续时间减小、最大超压上升速率增大。当燃料浓度超过一定程度时,由于液滴群的聚集效应,使得液滴的比表面积偏小,再加上容器内的氧含量不足,剩余很多未反应的液滴吸收大量的热量,严重阻碍燃烧反应的进行,造成燃烧持续时间增大、最大超压上升速率减小。

### 2.3 质量浓度对火焰传播过程和温度的影响

图7是高速相机以2000帧/s的频率拍摄的环氧丙烷云雾火焰传播过程,为了方便描述,将最初记录的火焰图片所对应的时刻记为0 ms。将拍摄的火焰图片经过自编Python程序处理,得到火焰温度场动态云图,结果如图8所示。由图7可以看出,火焰传播过程大致可以分成3个阶段:第1阶段,在0~3.5 ms时,环氧丙烷云雾被点燃之后,开始出现分散的零星火焰,然

后火焰向整个罐体传播,同时颜色由暗红色转变为黄色;第2阶段,在3.5~27.5 ms时,环氧丙烷剧烈燃烧,火焰呈现黄色-淡蓝色-黄色的变化过程,并能观察到明显的水滴产物,此时温度最高,能达到2000 K以上(如图8所示);第3阶段,在27.5 ms以后,火焰由黄色向暗红色转变,此时温度逐渐下降,并且暗红色区域从球罐上半部分向下方逐渐延伸,面积不断扩大。

同时,从图8中可以看到,在火焰传播后期,温度低于1400 K的区域也从球罐上半部分向下方延伸,在环氧丙烷雾化之后,由于液滴的沉降效应使得球罐下半部分的浓度逐渐升高,导致火焰传播后期球罐下半部分明显比上半部分燃烧更剧烈,释放的热量更多,因而下半部分的温度明显高于上半部分。

对于整个球罐而言,透明观察窗所占面积很小,采用平均温度就能反映出拍摄区域的温度变化<sup>[15]</sup>。通过自编Python程序对火焰温度场动态云图每个像素点的有效温度取平均值,得到6种质量浓度的环氧丙烷云雾火焰平均温度随时间变化的散点图,结果如图9所示。由图9可以看出,不同质量浓度下火焰平均温度的变化趋势基本一致,均是先上升后下降,且在质量浓度为  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  时火焰峰值温度最大,最大值为1937 K。环氧丙烷云雾被点燃后,由于早期燃烧区域面积较小,产生的热量大部分用来加热未燃烧区,因此火焰平均温度起初呈下降趋势,然后缓慢上升;在火焰传播到整个球罐之后,温度急剧上升;达到峰值之后,由于热量的损失高于燃烧释放的热量,温度逐渐下

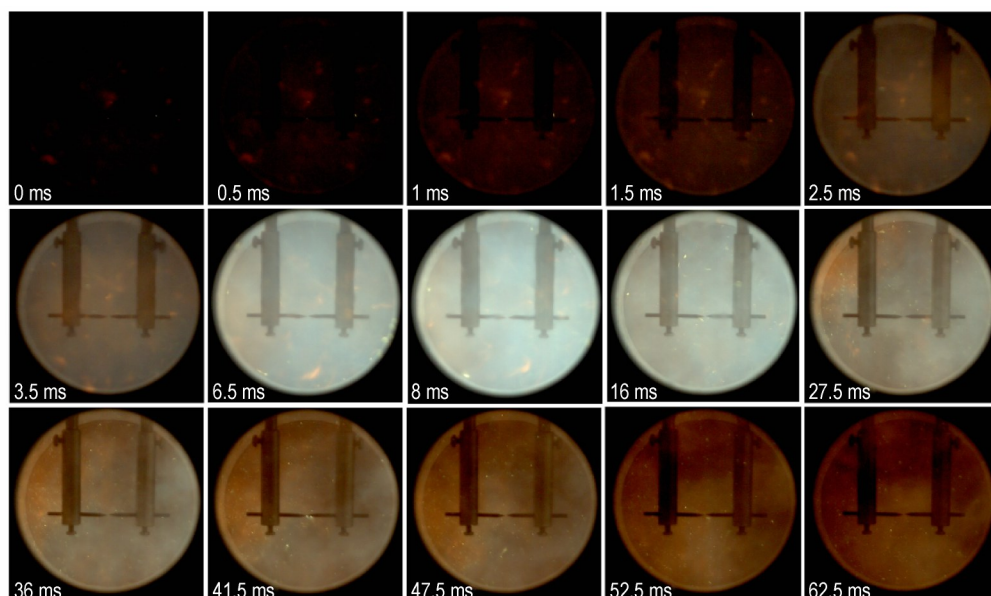


图7 质量浓度为  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的环氧丙烷云雾火焰传播过程

Fig.7 Flame propagation process in the  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  propylene oxide mist

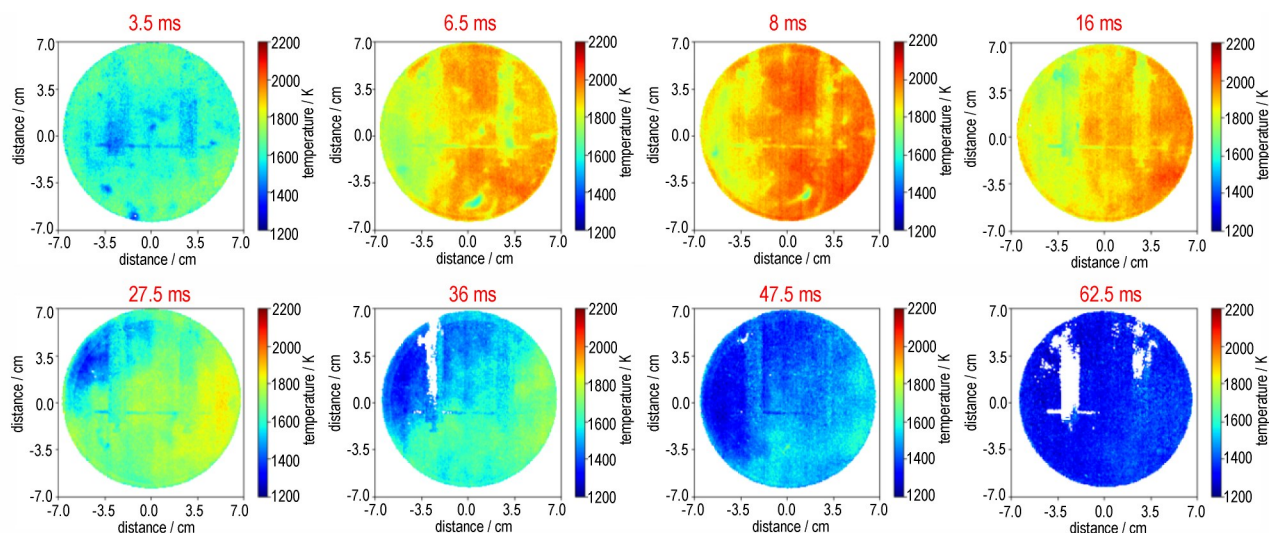


图8 质量浓度为  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  的环氧丙烷云雾火焰温度发展过程

Fig.8 Flame temperature development in the  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  propylene oxide mist

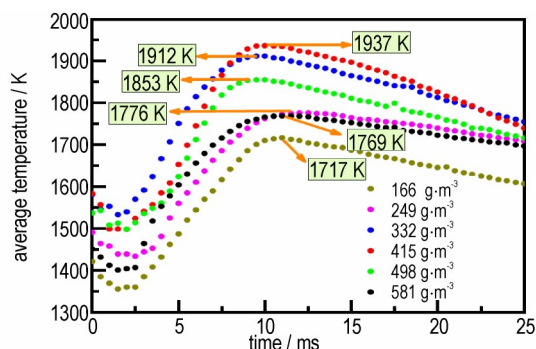


图9 不同质量浓度的环氧丙烷云雾火焰温度时程图

Fig.9 Flame temperature curves of propylene oxide mist with different mass concentrations

降。这与上述图7与图8中描述的火焰传播特性相符。

图10为最大爆炸超压和最大平均温度随质量浓度的变化趋势,可以看出,最大平均温度与最大爆炸超压均呈现先增大后减小的变化趋势,其拟合曲线呈倒“U”型。两者的变化趋势虽然一致但不同步,燃烧火焰的最大平均温度对应的环氧丙烷云雾质量浓度为  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,明显比最大爆炸超压对应的质量浓度低。这是因为环氧丙烷的云雾液相颗粒群主要以扩散形式进行燃烧<sup>[24]</sup>,最大平均温度出现在  $415 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  浓度,随着其浓度的增加,过量的环氧丙烷会吸收热量从而导致系统的最大平均温度下降;但是,过量的环氧丙烷也会因吸热而挥发成气体,增加系统内部的压力,这导致环氧丙烷在  $498 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  浓度取得最大爆炸超压。而纯气相燃料(如乙醚<sup>[25]</sup>和环氧丙烷<sup>[26]</sup>等完全气化的液体燃料)与空气混合物的爆炸超压和温度的变化趋势是

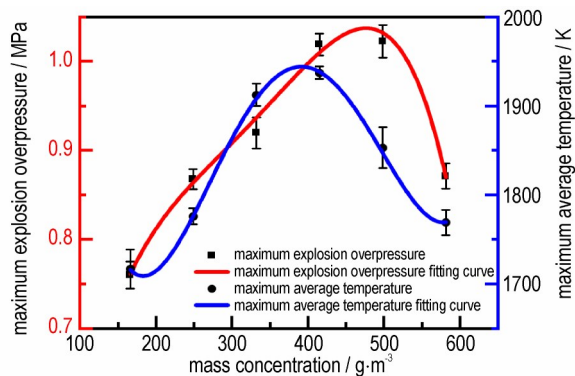


图10 最大爆炸超压和最大平均温度随质量浓度的变化趋势

Fig.10 Variation of maximum explosion overpressure and maximum mean temperature with mass concentration

同步的。造成这种差异的原因可能是气液两相燃料/空气混合物中液滴的蒸发和扩散燃烧会影响温度<sup>[25]</sup>,而纯气相燃料则没有这些机制的影响。在低质量浓度范围内,氧含量能够保证燃料充分反应,随着环氧丙烷质量浓度的增加,释放的总热量也随之增加,从而使得燃烧火焰的最大平均温度逐渐升高。当质量浓度达到一定程度后,由于氧含量不足,剩余未反应的液滴蒸发会吸收热量,造成最大平均温度下降,并且随着质量浓度的增加这种现象越明显。

### 3 结论

本研究通过 20 L 球形液体燃料爆炸测试系统,在室温  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,初始环境压力为  $0.1 \text{ MPa}$  的条件下研究了点火延迟时间和质量浓度对环氧丙烷云雾燃爆特性的影响,采用高速相机拍摄火焰传播过程,并利用比色测

温方法构建了火焰瞬时温度云图。主要结论如下:

(1)在点火延迟时间为60~160 ms范围内,环氧丙烷云雾最大爆炸超压、最大超压上升速率随着点火延迟时间的增加呈先增大后减小的变化趋势,而燃烧持续时间正好相反,最佳点火延迟时间为100 ms,此时最大爆炸超压达到最大值0.89 MPa。

(2)在质量浓度为166~581 g·m<sup>-3</sup>范围内,环氧丙烷云雾最大爆炸超压、最大超压上升速率均呈现先增加后减少的变化趋势,而燃烧持续时间刚好相反。最佳质量浓度为498 g·m<sup>-3</sup>,此时最大爆炸超压和最大超压上升速率均最大,分别为1.02 MPa和60.91 MPa·s<sup>-1</sup>,并且燃烧持续时间最短为44.8 ms。

(3)环氧丙烷云雾火焰的平均温度与质量浓度有关。在一定浓度范围内,平均温度随着火焰的传播呈现先升高后下降的趋势,在质量浓度为415 g·m<sup>-3</sup>时火焰平均温度峰值最大,最大值为1937 K。此外,最大平均温度随着质量浓度的增加而先增大后减小,且最大平均温度时质量浓度明显低于最大爆炸超压时质量浓度。

#### 参考文献:

- [1] LIU G, HOU F, CAO B, et al. Experimental study of fuel-air explosive [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008(44): 213-217.
- [2] ZHANG C, BAI C, REN J, et al. The promotion of nitromethane on solid-liquid fuel/air mixtures explosion characteristics under different ambient conditions [J]. *Fuel*, 2022 (322): 124190.
- [3] 于思龙, 张林军, 王琼, 等. 新型云爆剂的加速热老化行为及寿命预估[J]. 火炸药学报, 2017, 40(3): 85-89.  
YU Si-long, ZHANG Lin-jun, WANG Qiong, et al. Accelerated thermal aging behavior and life prediction of new-type FAE [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(3): 85-89.
- [4] 尤祖明, 王永旭, 张莹, 等. JP-10 燃料燃爆特性及无约束爆炸状态场参数试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(3): 49-52.  
YOU Zu-ming, WANG Yong-xu, ZHANG Ying, et al. Experimental study on explosion characteristics and unconfined blast parameters of JP-10 fuel [J]. *Explosive Materials*, 2020, 49(3): 49-52.
- [5] 刘文杰, 白春华, 刘庆明, 等. 高挥发性液体传质速率机理和实验研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(6): 1123-1130.  
LIU Wen-jie, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming, et al. Mechanism and experimental study of high volatile liquid mass transfer rate [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(6): 1123-1130.
- [6] 饶国宁, 周莉, 宋述忠, 等. 云爆剂爆炸超压测试及威力评价[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 579-585.  
RAO Guo-ning, ZHOU Li, SONG Shu-zhong, et al. Explosion overpressure measurement and power evaluation of FAE [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 579-585.
- [7] BAI C, LIU W, YAO J, et al. Explosion characteristics of liquid fuels at low initial ambient pressures and temperatures [J]. *Fuel*, 2020(265): 116951.
- [8] LI S, LIU Q, CHEN X, et al. Deflagration to detonation transition in JP-10 mist/air mixtures in a large-scale tube [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017(339): 100-113.
- [9] LIU X, WANG Y, ZHANG Q. A study of the explosion parameters of vapor-liquid two-phase JP-10/air mixtures [J]. *Fuel*, 2016(165): 279-288.
- [10] 叶辉, 贾路川, 王翔, 等. 硝基甲烷的爆轰温度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2014, 35(5): 124-127.  
YE Hui, JIA Lu-chuan, WANG Xiang, et al. Study on the detonation temperature of nitromethane [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2014, 35(5): 124-127.
- [11] 张启威, 程扬帆, 夏煜, 等. 比色测温技术在瞬态爆炸温度场测量中的应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 105-117.  
ZHANG Qi-wei, CHENG Yang-fan, XIA Yu, et al. Application of colorimetric pyrometer in the measurement of transient explosion temperature [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(11): 105-117.
- [12] 程扬帆, 王中华, 胡芳芳, 等. TiH<sub>2</sub> 粉尘火焰传播速度及温度分布的高速二维测量[J]. 兵工学报, 2023, 44(4): 1181-1192.  
CHENG Yang-fan, WANG Zhong-hua, HU Fang-fang, et al. High-speed two-dimensional measurements of flame propagation velocity and temperature distribution of TiH<sub>2</sub> dust flame [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(4): 1181-1192.
- [13] 宋先钊, 江军, 安高军, 等. 新型云爆剂液相组分配方设计及毁伤威力[J]. 含能材料, 2021, 29(5): 434-443.  
SONG Xian-zhao, JIANG Jun, AN Gao-jun, et al. Design of new liquid component of fuel air explosive and its damage power [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5): 434-443.
- [14] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3): 1-7.  
DAI Jing-min. Survey of radiation thermometry [J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2004, 23(3): 1-7.
- [15] HU F F, CHENG Y F, ZHANG B B, et al. Flame propagation and temperature distribution characteristics of magnesium dust clouds in an open space [J]. *Powder Technology*, 2022(404): 117513.
- [16] WANG Z H, CHENG Y F, MOGI T, et al. Flame structures and particle-combustion mechanisms in nano and micron titanium dust explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022(80): 104876.
- [17] DE IZARRA C, GITTON J M. Calibration and temperature profile of a tungsten filament lamp [J]. *European Journal of Physics*, 2010, 31(4): 933-942.
- [18] 张成均, 白春华. 基于20 L球罐的多相混合物扩散模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(4): 52-58.  
ZHANG Cheng-jun, BAI Chun-hua. Diffusion simulation of multiphase mixture based on 20 L spherical vessel [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(4): 52-58.
- [19] LIU W, BAI C, LIU Q, et al. Effect of low-concentration RDX dust on solid-liquid mixed fuel characteristics [J]. *Combustion and Flame*, 2021(225): 31-38.
- [20] ZHANG C, BAI C, YAO J. Liquid component effect on the dispersion and explosion characteristics of solid-liquid mixed fuel [J]. *Fuel*, 2022(319): 123806.
- [21] 王悦. 可燃液体燃料云雾形成和爆炸问题研究[D]. 北京: 北京

- 理工大学, 2016.
- WANG Yue. Research on generation of mists and explosion characteristics for flammable liquid fuels[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [22] 左学超. 液体燃料燃爆和雾化特性实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- ZUO Xue-chao. Experimental study on the deflagration and atomization characteristics of liquid fuel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [23] WAN H, WEN Y, ZHANG Q. Flame behaviors and explosion characteristics of two-phase propylene oxide/air mixture under different ambient pressures[J]. *Process Safety Progress*, 2023, 42(1): 126-140.
- [24] 王悦, 白春华. 乙醚云雾场燃爆参数实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(4): 497-502.
- WANG Yue, BAI Chun-hua. Experimental research on explosion parameters of diethyl ether mist[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(4): 497-502.
- [25] BAI C, WANG Y. Study of the explosion parameters of vapor-liquid diethyl ether/air mixtures[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015(38): 139-147.
- [26] ZHANG Q, LI W, TAN R, et al. Combustion parameters of gaseous epoxypropane/air in a confined vessel[J]. *Fuel*, 2013 (105): 512-517.

## Vapor-Liquid Two-Phase Combustion and Explosion Characteristics of Propylene Oxide/Air Mixtures

JIANG Ba-yun<sup>1,2</sup>, CHENG Yang-fan<sup>1,2</sup>, LI Shi-zhou<sup>1,3</sup>, QIAN Jia-qi<sup>1,2</sup>, WEI Xiao<sup>1,2</sup>, XUE Ru-jun<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Engineering Laboratory of Explosive Materials and Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** To explore the explosion characteristics of propylene oxide mist, a 20 L spherical liquid fuel explosion test system was used to study the effects of ignition delay time and mass concentration on the explosion characteristics of propylene oxide/air mixture. At the same time, high-speed cameras were used to photograph the flame propagation process, the dynamic distribution images of flame temperature field was reconstructed by colorimetric pyrometer technology and the effect of mass concentration of propylene oxide on the flame temperature was discussed. The experimental results showed that with the increase of ignition delay time, the maximum explosion overpressure and the rise rate of maximum overpressure increased first and then decreased, while the combustion duration was on the contrary. The optimal ignition delay time was 100 ms with the maximum explosion overpressure reached 0.89 MPa. With the increase of the mass concentration of propylene oxide, the maximum explosion overpressure, maximum overpressure rise rate and maximum average flame temperature were all initially increased and then decreased. When the mass concentration was 498 g·m<sup>-3</sup>, the maximum explosion overpressure and maximum overpressure rise rate were both the highest, which were 1.02 MPa and 60.91 MPa·s<sup>-1</sup>, respectively. But the mass concentration corresponding to maximum average flame temperature was significantly lower than that of maximum explosion overpressure. When the mass concentration was 415 g·m<sup>-3</sup>, the flame average temperature reached the maximum value of 1937 K. The research results can provide reference for optimization of detonation performance and evaluation of damage efficiency of the fuel air explosive.

**Key words:** propylene oxide; explosion overpressure; flame temperature; colorimetric pyrometer; characteristic experiment

**CLC number:** TJ55; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023077

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 12272001, 11972046); Outstanding Youth Project of Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 2108085Y02); Anhui University of Science and Technology Postgraduate Innovation Fund(No. 2022CX2109)

(责编: 高毅)