

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0465

典型金属粉末对FAE冲击波效应和热毁伤性能的影响*

张蓓蓓¹, 程扬帆^{1,2}, 蒋八运¹, 沈兆武², 甘小红³

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

3. 淮南皖淮机电股份有限公司, 安徽 淮南 232001)

摘要: 为了探究典型金属粉末对燃料空气炸药(fuel air explosive, FAE)冲击波效应和热毁伤性能的影响, 采用20 L球形液体爆炸测试系统并结合比色测温方法, 深入研究了不同金属粉种类和含量下环氧丙烷(epoxypropane, PO)的燃爆特性、火焰结构及温度分布特征。实验结果表明: 纯环氧丙烷的最佳质量浓度为780 g/m³, 最大爆燃超压 $\Delta p_{\max} = 0.799$ MPa, 最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max} = 52.438$ MPa/s。添加Al粉、Ti粉和Mg粉的环氧丙烷最大燃爆超压、最大压力上升速率和最大火焰平均温度均随着金属粉末质量比(I)的增加而增大, 而最大压力上升时间的变化趋势则与之相反; 最大燃爆超压和最大火焰平均温度的变化规律一致, 从大到小依次为: Al/PO、Mg/PO、Ti/PO, 且当金属粉的质量比 $I = 40\%$ 时, 3种固-液混合燃料的 Δp_{\max} 值相较于纯环氧丙烷分别增加了12.00%、8.41%和11.54%; 此外, 最大压力上升速率和燃烧速率的变化规律一致, 从大到小依次为: Mg/PO、Al/PO、Ti/PO, 且当金属粉的质量比 $I = 40\%$ 时, 3种固-液混合燃料的 $(dp/dt)_{\max}$ 值相较于纯环氧丙烷分别增加了41.91%、39.60%和45.29%。研究表明, 不同高能金属粉末在改善环氧丙烷燃爆性能方面各有优势, 在FAE的配方设计时, 应根据毁伤性能指标合理选择金属粉末作为含能添加剂。

关键词: 燃料空气炸药; 环氧丙烷; 金属粉; 固-液混合燃料; 毁伤性能; 比色测温

中图分类号: O389; TF058 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Influence of typical metal powders on the shock wave effect and thermal damage performance of FAE

ZHANG Beibei¹, CHENG Yangfan^{1,2}, JIANG Bayun¹, SHEN Zhaowu², GAN Xiaohong³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology,

Huainan 232001, Anhui, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

3. Huainan Wanhuai Electromechanical Co., Ltd., Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract: To investigate the influence of typical metal powders on the shock wave effect and thermal damage performance of fuel air explosive (FAE), the explosion characteristics, flame structure and temperature distribution characteristics of epoxypropane (PO) with different types and contents of metal powders were experimentally studied using a 20 L spherical liquid explosion test system. The temperature field of explosion flame was reconstructed by the colorimetric temperature measurement method with a high-speed camera, which is based on the gray-body radiation theory and a self-written python code. The tungsten lamp was used to calibrate the measuring accuracy of the temperature mapping system, and the fitting

* 收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(12272001); 安徽省高校自然科学基金杰青项目(2023AH020026)

第一作者: 张蓓蓓(1998—), 女, 博士研究生, 664509656@qq.com

通信作者: 程扬帆(1987—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, cyf518@mail.ustc.edu.cn

relationship between the temperatures and the gray values of the high-speed images is derived to obtain the conversion coefficient. The experimental results show that the optimal mass concentration of pure PO was 780 g/m^3 , both the explosion overpressure (Δp_{\max}) and the explosion pressure rise rate ($(dp/dt)_{\max}$) reached the maximum, $\Delta p_{\max}=0.799 \text{ MPa}$ and $(dp/dt)_{\max}=52.438 \text{ MPa/s}$, respectively. The maximum explosion overpressure, maximum explosion pressure rise rate and maximum average temperature of PO added with Al, Ti and Mg powders all increase with the increase of mass ratios (I), while the trend of maximum pressure rise time is opposite. The variation rules of the maximum explosion overpressure and maximum average temperature are consistent, the order of their values is: Al/PO, Mg/PO, Ti/PO. When $I=40\%$, the maximum explosion overpressure value of the three solid-liquid mixed fuels increases by 12.00%, 8.41% and 11.54%, respectively, compared with pure PO. In addition, the variation rules of the maximum explosion pressure rise rate and the combustion rate are consistent, the order of their values is: Al/PO, Mg/PO, Ti/PO. When $I=40\%$, the maximum explosion pressure rise rate value of the three solid-liquid mixed fuels increases by 41.91%, 39.60% and 45.29%, respectively, compared with the pure PO. The results indicate that different high-energy metal powders have varied advantages in improving the explosion performance of PO, so metal powders should be appropriately selected as energetic additives according to the damage performance index in the formulation design of FAE.

Keywords: fuel air explosive; epoxypropane; metal powders; solid-liquid mixed fuels; damage performance; colorimetric temperature measurement

燃料空气炸药(又称云爆弹, fuel air explosive, FAE)装填的是云爆剂,可在大空间范围内形成可燃云雾,产生大体积爆轰,伴随冲击波、热辐射和窒息等效应,其爆炸产生的冲击波和高热无孔不入,具有大面积破坏军事目标的作用,特别适用于杀伤洞穴、地下工事、建筑物等封闭空间内的目标,近年来在军事应用领域得到了广泛的关注^[1-3]。云爆燃料是低沸点、高热值的液态燃料,如环氧丙烷、丙二烯、环氧乙烷、乙醚等碳氢类化合物,常用于制备云爆武器^[4-5],其中,环氧丙烷具有挥发性强、点火能低和可燃范围广等特点^[6],在云爆剂组分中应用最广泛。Bai等^[7]利用 20 L 球形爆炸容器研究了液体燃料在低初始环境压力和温度下的爆炸特性,发现初始压力和温度对环氧丙烷/空气混合燃料的影响最大。Zhang等^[8]在 5 L 圆柱形容器中研究了不同浓度环氧丙烷的燃爆特性,发现随环氧丙烷浓度的增加,其与空气混合物的爆炸压力和压力上升速率均呈先增大后减小的趋势。然而,液体燃料体积密度相对较低,为了提高其燃爆性能及燃料能量释放,向液体碳氢燃料中加入固体高能添加剂形成固-液混合燃料是目前研究的热点。谭汝媚等^[9]研究了铝粉/环氧丙烷/空气混合燃料的爆炸下限浓度,研究结果可用于评估其爆炸危险性。徐敏潇等^[10]将硼粉添加到燃料空气炸药中,发现随着硼含量的增加,其燃爆特性参数值均先增大后减小。Wang等^[11]为了提高FAE的能量,在乙醚/硝酸异丙酯混合液体燃料中加入铝粉,发现该固-液混合燃料的冲击波超压得到显著提高,说明高能金属粉末可以有效地提高FAE的爆炸性能。

除冲击波参数外,燃爆温度和火焰结构特征同样是衡量云爆武器毁伤性能的重要指标。在爆炸温度场温度分布测试方面,主要包含接触式测温和非接触式测温两类^[12]。在接触式测温方面,范彩玲^[13]采用钨铼热电偶进行了“同心圆”排布定点测温实验,得到了温压弹爆炸火焰温度场信息。Liu等^[14]利用接触式温度传感器测量了JP-10/空气混合物的爆炸温度,发现随着浓度的增加,爆炸温度呈先升高后降低的趋势。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,这不仅影响温度场的分布,而且其响应速度不能满足瞬态高温测量要求^[15]。与接触式测温相比,非接触式测温能够检测火焰的表面温度,测温范围宽、响应速度快,适合云爆武器弹药等爆炸瞬态高温测量^[3]。Wang等^[11]采用红外热成像仪捕捉并计算了燃料在扩散过程中的火球表面温度,发现添加铝粉和硼粉能够显著提高其燃爆温度。然而,采用红外热成像仪等非接触式测温方式,其响应速度和测温精度容易受被测物发射率和环境辐射等因素的影响^[16]。近年来,本课题组利用比色测温方法,在炸药、气体和粉尘爆炸温度测试方面开展了大量的研究工作^[17-21],该方法响应速度快、测量精度高、抗干扰能力强,具有传统非接触式测温方法无可比拟的优势,为云爆武器热毁伤效能评估提供了技术保障。

本文中通过 20 L 球形液体爆炸罐的分散系统模拟燃料云雾, 结合 PCB 传感器、高速相机、自编 Python 程序, 测试添加高能金属(Al、Ti、Mg)粉末固-液混合燃料的冲击波效应和热毁伤性能, 并与基体燃料环氧丙烷进行对比, 研究结果可为 FAE 的配方设计和毁伤性能鉴定提供技术和理论指导。

1 实验装置及方法

1.1 实验材料

环氧丙烷(epoxypropane, PO)纯度为 99.99%; 商业级铝粉、钛粉和镁粉的中位粒径 D_{50} 分别为 28.055、30.476 和 27.651 μm , 其粒度分布和微观结构表征如图 1 所示; 空气(20.98% O_2 +79.02% N_2)的纯度为 99.99%。

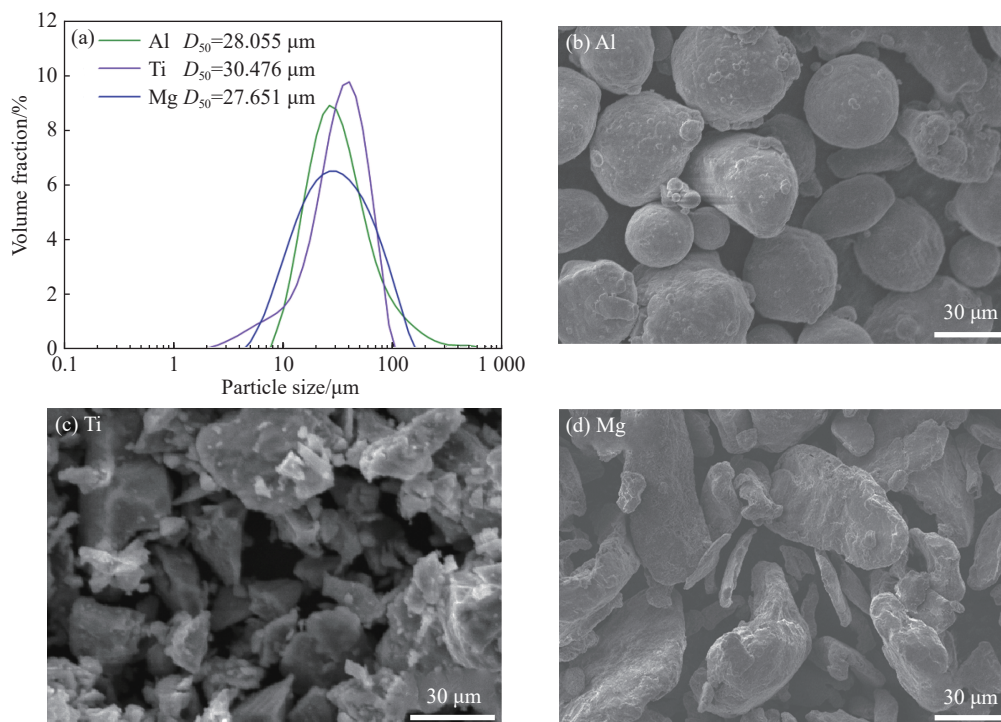


图 1 不同金属粉末的粒径分布图和扫描电镜图像

Fig. 1 Particle size distribution and SEM images of different metal powders

1.2 实验装置

实验所用的 20 L 球形液体爆炸测试系统主要由球形液体爆炸罐、燃料分散系统、点火系统和数据采集系统组成, 如图 2 所示。其中, 液体爆炸罐罐体体积为 20 L, 带有 2 个直径为 14 cm 的透明玻璃观察窗, 用于高速相机捕捉燃料云雾燃爆火焰传播形态; 燃料分散系统由高压气瓶、2 个 1.5 L 储气罐及 2 个压力表、2 个电磁阀、2 个 70 mL 燃料储罐(A、B 罐)和 2 个半球形分散伞组成, 可将燃料均匀分散在罐体内部; 点火系统由一个电火花发生器(点火能量 60 J/s)和 2 个钨电极针(电极间距为 1.5 mm)组成, 用于燃料云雾的点火; 数据采集系统由高速相机、示波器和传感器组成, 通过高速相机捕捉燃料燃爆火焰传播形态, 拍摄帧率为 2000 s^{-1} , 传感器用于采集燃料爆炸压力并通过示波器记录压力信号, 采样频率为 $1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$; 另外, 该系统包含一个可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC), 用于控制燃料分散时间、点火延迟时间以及点火时间。实验开始前, 先将云爆燃料放置在 2 个燃料储罐中, 并在 2 个储气罐中充入 0.8 MPa 的空气, 用于喷洒燃料, 电磁阀开启时间设置为 50 ms(即燃料喷洒时间为 50 ms), 保证能够将燃料充分喷洒入罐体内部; 在爆炸罐中心设置点火电极, 采用高压脉冲点火方式, 点火延迟时间设置为 130 ms(即燃料喷洒后, 在罐体内部静置的时间为 130 ms), 保证燃料在罐体内部达到稳定均匀

分散, 电极针点火时间设置为 1.5 s (即点火能量为 90 J)^[22]。实验在室温 (25 ℃) 环境下进行, 20 L 液体爆炸罐内初始压力为 101.5 kPa, 同一工况至少重复 3 次实验。

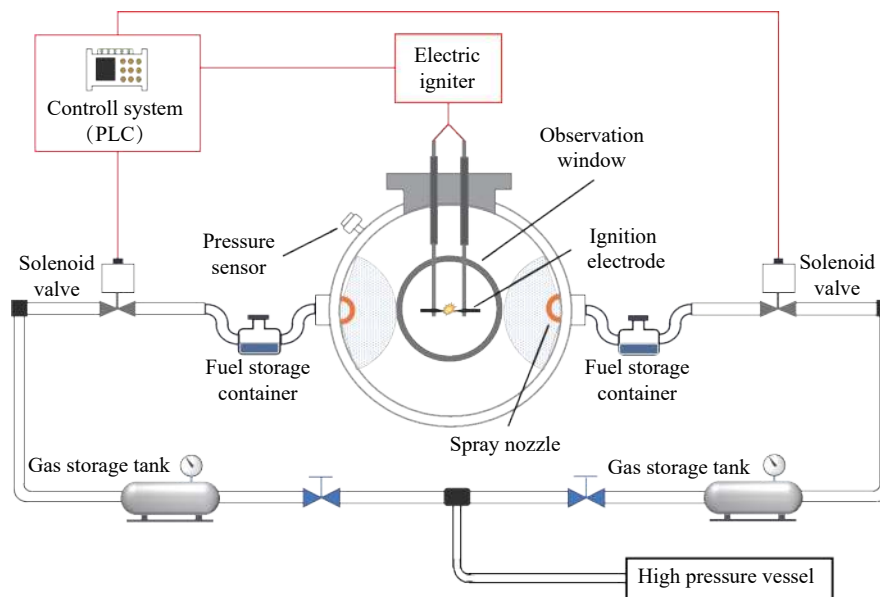


图 2 20 L 球形液体爆炸测试系统

Fig. 2 20 L spherical liquid explosion test system

1.3 比色测温系统标定

FAE 的燃爆火焰温度是研究其热毁伤效应的重要指标, 能够反映其热毁伤性能和能量释放规律^[20]。因此, 采用基于黑体辐射理论的比色测温方法对燃爆火焰进行温度场重构。首先, 需要对比色测温程序进行温度标定, 标定系统如图 3(a) 所示, 该系统由 20 L 液体爆炸罐、可调节电流的电源、钨丝灯、电流表、电压表、高速相机和 Python 标定程序代码组成。实验选用钨丝灯在 1 000~3 000 K 范围内对该测温系统的测试精度进行标定, 这主要是由于钨的熔点高达 3 695 K^[23], 实验时改变电源的电流, 记录电流表及电压表的相关数值, 计算其电阻, 并通过高速相机拍摄此时钨丝灯的图片, 采用 Python 程序将高速相机捕捉到的 8 bit 灰度图像通过插值算法处理, 计算得到每个像素点对应的 R/G 值。最后将钨丝灯的实际温度值 T 与计算得出的 R/G 值进行拟合 (图 3(b)), 从图中可以看出, 该系统拟合效果极佳, 相关系数 $R^2=0.996\ 98$, 具体映射函数关系式为^[20]:

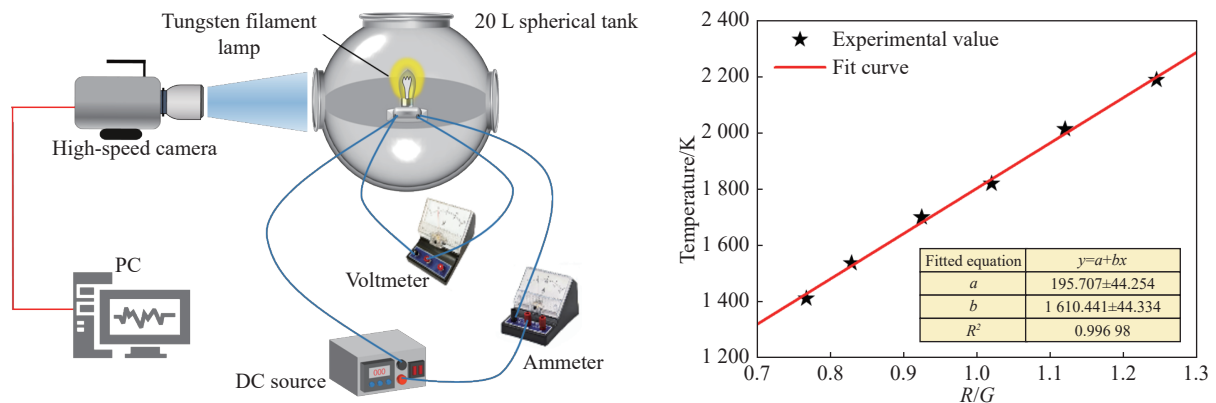


图 3 比色测温标定

Fig. 3 Colorimetric temperature calibration

$$T = 1\ 610.441(R/G) + 195.707 \quad (1)$$

式中: T 为温度, K; R 、 G 分别为像素点红色和绿色的分量值。

2 结果与讨论

2.1 纯环氧丙烷液体燃料的燃爆特性

首先采用 20 L 球形液体爆炸测试系统, 对不同浓度的纯环氧丙烷进行燃爆性能测试实验, 其质量浓度分别为 116、282、448、614、780、946 和 1 112 g/m^3 (考虑避免损耗), 对应的最大爆炸超压及压力上升速率如表 1 和图 4 所示。

表 1 不同质量浓度环氧丙烷的最大燃爆超压及最大压力上升速率实验结果

Table 1 Experimental results of maximum explosion overpressure and maximum pressure rise rate of epoxypropane with different mass concentrations

环氧丙烷质量浓度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	最大燃爆超压 $\Delta p_{\max}/\text{MPa}$	最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$
116	0.667	28.893
282	0.726	43.880
448	0.744	45.808
614	0.785	50.941
780	0.799	52.438
946	0.728	41.523
1 112	0.688	33.178

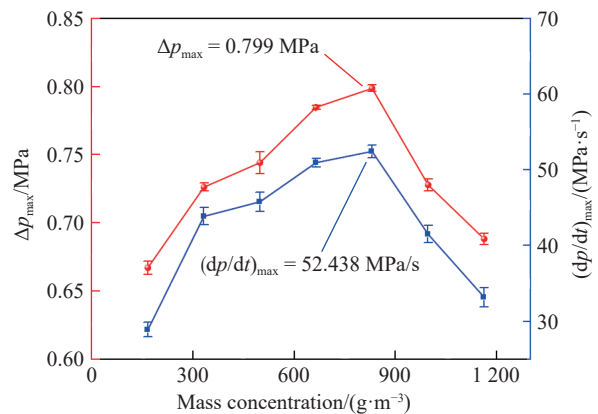


图 4 不同质量浓度的环氧丙烷最大燃爆超压及最大压力上升速率

Fig. 4 Maximum explosion overpressure and maximum pressure rise rate of epoxypropane with different mass concentrations

从图 4 可以看出, 随着环氧丙烷质量浓度的增大, 其最大燃爆超压和最大压力上升速率均呈现先增大后减小的趋势, 并都在质量浓度为 $780 \text{ g}/\text{m}^3$ 时达到最大, 最大值分别为 $\Delta p_{\max} = 0.799 \text{ MPa}$, $(dp/dt)_{\max} = 52.438 \text{ MPa}/\text{s}$ 。当环氧丙烷质量浓度低于 $780 \text{ g}/\text{m}^3$ 时, 液体爆炸容器内氧气含量相对充足, 环氧丙烷液体燃料能够反应完全, 其燃爆反应释放的热量随着质量浓度的增大而增大, 从而使得最大燃爆超压逐渐上升; 同时, 由于质量浓度增大导致燃料液滴间的传热距离减小, 液滴分子之间的燃烧速率增大, 使得最大压力上升速率也随之升高。然而, 当环氧丙烷质量浓度高于 $780 \text{ g}/\text{m}^3$ 时, 罐体内部燃料液滴过多, 液滴之间的距离缩短导致相互间的碰撞概率增加, 由于液滴的表面张力作用以及液滴与液滴之间的聚集效应, 极易汇聚成大液滴, 导致部分燃料液滴无法参与燃烧反应或燃烧不充分, 且未燃液滴会吸收爆炸容器内燃料燃烧时释放出来的热量, 造成最大燃爆超压和最大压力上升速率均减小。

2.2 典型金属粉末对环氧丙烷冲击波效应的影响

为了研究典型金属粉末对环氧丙烷冲击波效应的影响, 采用 20 L 球形液体爆炸测试系统, 研究了添加不同种类及质量比金属粉末的环氧丙烷燃爆过程。由 2.1 节可以看出, 纯环氧丙烷在质量浓度为 $780 \text{ g}/\text{m}^3$ 时达到最大燃爆压力 $\Delta p_{\max} = 0.799 \text{ MPa}$, 因此, 实验选用该质量浓度下的环氧丙烷作为基体燃料, 并将不同质量比 (I) 的金属 (Al、Ti、Mg) 粉末与其混合均匀, 然后测量该固-液混合燃料的冲击波特性。 I 的计算公式如下:

$$I = \frac{m_{\text{mp}}}{m_{\text{mp}} + m_{\text{PO}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_{mp} 为典型金属粉末的质量, m_{PO} 为环氧丙烷的质量。

实验用固-液混合燃料的配方如表 2 所示。量取 2 份等量的环氧丙烷 (10 mL) 分别注入 2 个烧杯中,

并称取 2 份等量金属粉末与其混合均匀, 随后将 2 个烧杯中的固-液混合燃料分别倒入 20 L 球形液体爆炸测试系统的 2 个储液罐(A 和 B)中。

密闭空间中可燃云雾的爆炸特性可以用相关的压力和时间参数来解释^[20]。图 5 为混合燃料燃爆压力及压力上升速率时程曲线, 从图中可以看出, 在压力上升最初阶段有一个“波动”, 对应的时间段与电磁阀开启的时间段吻合, 说明该现象出现的原因是由于固-液燃料喷洒过程中高压气体作用导致的; 随后, 燃爆压力开始上升前压力曲线有一平台区, 该平台对应的时间段与本实验的点火延迟时间一致, 因此, 将压力开始上升的时刻确定为点火时刻($t = t_0$)。根据固-液混合燃料燃爆反应过程中的热力学、动力学等相关性质, 可以将其燃爆反应分为 3 个阶段: 燃爆压力上升区、峰值区和衰减区^[24]。计算过程中, 最大燃爆超压(Δp_{max})值取曲线峰值压力与点火时刻压力的差值, 压升时间(Δt)取最大燃爆压力对应的时刻 t_1 与 t_0 的时间间隔^[25-26]。

图 6 为添加 3 种不同金属粉末固-液混合燃料的燃爆压力曲线、最大燃爆超压及最大压力上升速率, 可以看出, 3 种固-液混合燃料(Al/PO、Ti/PO、Mg/PO)的最大燃爆超压和最大压力上升速率均随金属粉末质量比的增加而增大, 并且均高于纯环氧丙烷燃料的最大爆炸超压及最大压力上升速率(图 4), 这是由于金属粉末加入液体燃料后增大了燃料的体积密度, 这不仅提高了固-液混合燃料分子间的碰撞概率, 而且还提高了固-液混合燃料系统的内能, 使得其燃爆超压上升。同时, 结合图 7(a) 中 3 种典型金属粉末添加剂的固-液混合燃料的燃爆超压柱状图可以看出, 添加不同金属粉末的固-液混合燃料燃爆压力从大到小依次为: Al/PO、Mg/PO、Ti/PO, 这是因为, 金属粉末的质量热从大到小依次为 Al、Mg、Ti(分别为 31.3、24.8 和 20.0 MJ/kg)^[27], 金属粉末的加入会提高固-液混合燃料的爆热, 受限空间内系统的爆热越高, 气体往外膨胀做功趋势越大, 从而在燃爆压力值上表现得越明显^[25]。

表 2 金属粉末/环氧丙烷-液混合燃料的配方
Table 2 Formulation of metal powders/epoxypropane solid-liquid mixed fuel

样品编号	液体燃料	典型金属粉末	
	质量浓度/(g·m ⁻³)	质量比/%	质量/g
1	780	10	1.84
2		20	4.00
3		30	7.12
4		40	11.06

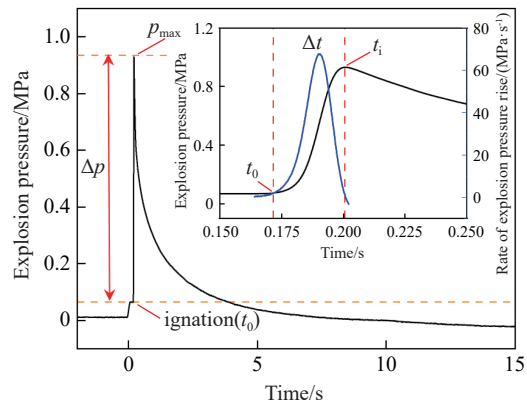
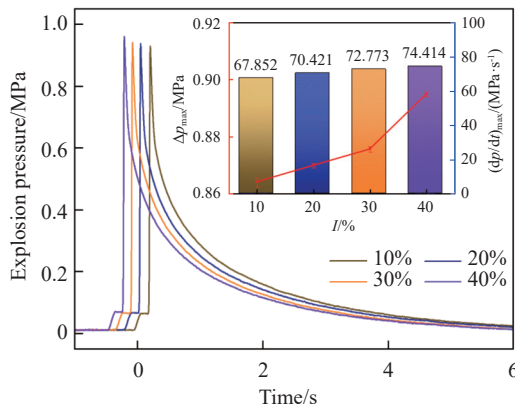
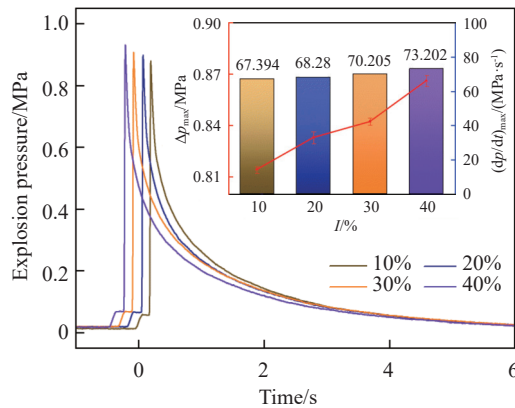


图 5 燃料的燃爆压力时程曲线及压力上升速率

Fig. 5 Explosion pressure time history curve and pressure rise rate of fuels



(a) Al/PO



(b) Ti/PO

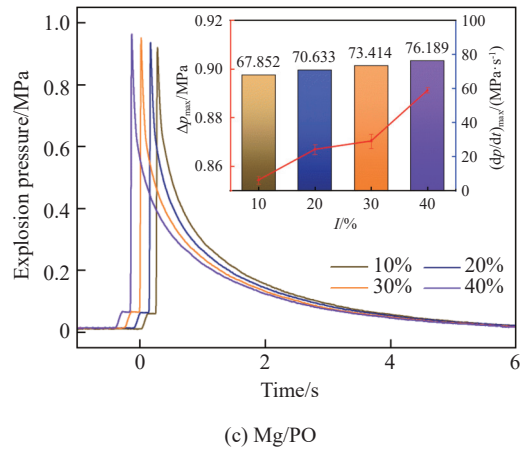


图 6 固-液混合燃料燃爆压力、最大燃爆超压及最大压力上升速率
Fig. 6 Explosion pressure, maximum explosion overpressure and maximum pressure rise rate of solid-liquid mixed fuels

图 7(b)~(c) 分别为添加 3 种典型金属粉末的固-液混合燃料的燃爆压力上升速率和压升时间变化柱状图。从图中可以看出, 随着 Al 粉、Ti 粉和 Mg 粉质量比的增大, 固-液混合燃料的压力上升速率呈现增大的趋势, 压升时间的变化趋势与之相反。不同质量比的固-液混合燃料会呈现出 4 种主要形态, 如图 8 所示, 当金属粉末的质量比 $I = 10\%$ 时, 固-液混合燃料处于过饱和流体状态, 金属粉末完全包裹在液

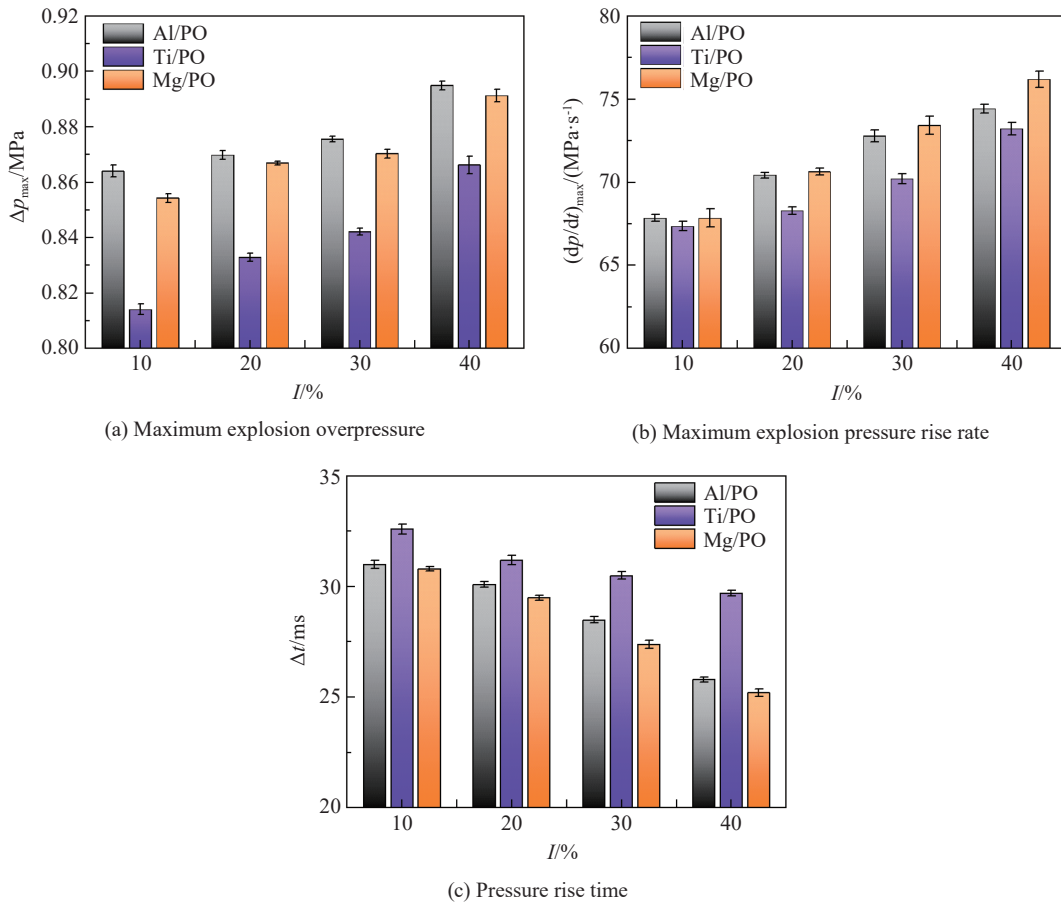


图 7 Al/PO、Ti/PO 和 Mg/PO 固-液混合燃料爆炸参数柱状图
Fig. 7 Al/PO, Ti/PO and Mg/PO solid-liquid mixed fuels explosion parameters histogram

体燃料中并随着过饱和悬浮液流动, 该质量比下, 包裹在金属粉末外部的液体燃料先发生燃爆反应。当 $I = 10\%$ 时, 3 种固-液混合燃料的 $(dp/dt)_{\max}$ 值近似相等, 说明此质量比下金属粉对 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响较小 (见图 7(b))。当 $I = 20\%$ 时, 液体燃料与固体颗粒紧密结合, 但固-液混合燃料仍保持流体形态, 3 种固-液混合燃料的燃爆压力上升速率较 $I = 10\%$ 时增加, 且不同金属粉对 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响开始表现出差异 (见图 7(b))。当 $I = 30\%$ 时, 固-液混合燃料的状态不再是流体, 颗粒与颗粒之间直接伴随有液体燃料的液桥力作用, 使得金属颗粒凝聚在一起, 形成包裹液体燃料的絮状团簇, 不同金属粉对 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响差异开始加大 (见图 7(b))。随着固-液混合燃料中金属粉质量比增大到 $I = 40\%$, 部分金属粉末无法被润湿且聚集现象加剧^[22], 直接影响固-液混合燃料的分散特性和燃爆特性^[25], 不同金属粉对 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响差异减小 (见图 7(b)), 此时 Al/PO、Ti/PO、Mg/PO 固-液混合燃料的 $(dp/dt)_{\max}$ 值相较于纯环氧丙烷分别增大了 41.91%、39.60% 和 45.29%。当 $I \geq 20\%$ 时, 与爆炸超压变化规律不同, 3 种固-液混合燃料的压力上升速率从大到小依次为: Mg/PO、Al/PO、Ti/PO, 这主要是由于金属粉燃点的从大到小依次为: Ti 粉、Al 粉、Mg 粉, 燃点越低, 金属粉越容易被点燃^[28]; 此外, Al 粉、Ti 粉和 Mg 粉的密度分别为 2.70、4.51 和 1.74 g/cm³, 在相同的质量比下, 金属粉的密度越小, 颗粒数越多, 从而使系统中金属颗粒间的间隙越小、传热速率加快^[25], 使得最大压力上升速率出现上述变化规律。

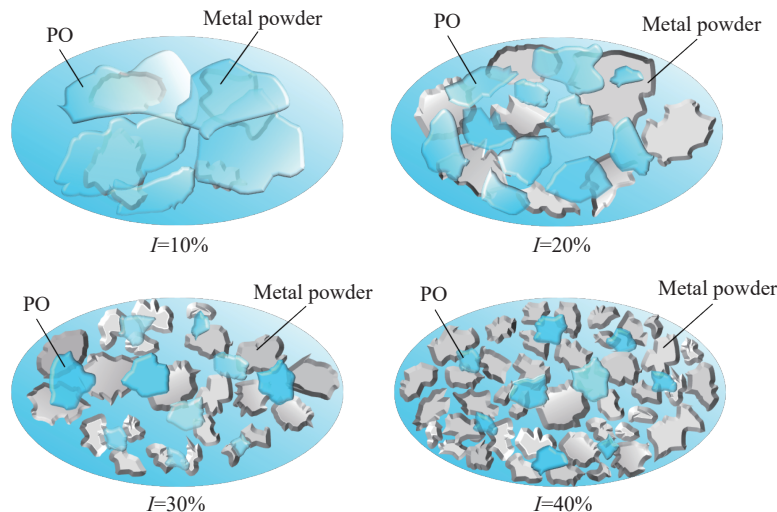


图 8 不同质量比固-液混合燃料的混合形态

Fig. 8 Mixed forms of solid-liquid mixed fuels with different mass ratios

2.3 典型金属粉末对环氧丙烷热毁伤性能的影响

实验将电极开始点火时刻记为零时刻, 高速相机拍摄帧率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$, 相邻图像的时间间隔为 0.5 ms 。图 9 为质量比 $I = 20\%$ 的 Al/PO 固-液混合燃料燃爆火焰传播过程图像, 从图中可以看出, $t = 0 \sim 15\text{ ms}$ 时, 混合燃料被点火电极引燃后, 以点火电极为中心, 燃烧火焰以近似球形缓慢向四周逐步扩散, 直至铺满整个燃烧罐。 $t = 15 \sim 32\text{ ms}$ 时, 混合燃料燃爆火焰由黄色转变为黄绿色, 同时伴随着火焰向罐体中心传播, 这是由于在 $0 \sim 15\text{ ms}$ 时间段内, 环氧丙烷被蒸发燃烧。 $15 \sim 32\text{ ms}$ 时, 金属粉末表面包裹着的环氧丙烷液体燃料燃烧反应完全, 使得铝粉颗粒完全暴露在球形罐体内部, 此时燃烧释放的热量以热传导和火焰热辐射的方式传递给未燃烧的悬浮铝颗粒, 传播到外部的火焰迅速向内部收缩。 $t = 32\text{ ms}$ 时金属粉末完全燃烧形成亮白色爆轰火焰。 $t = 32\text{ ms}$ 之后, 随着燃烧反应的进行, 火焰亮度逐渐变暗, 并且由于固-液混合燃料沉降的原因, 可以清楚地观察到罐体下部伴有零星状火焰直至熄灭。因此, 固-液混合燃料的燃爆过程大致可以分为 3 个阶段: 环氧丙烷蒸汽燃烧阶段、固-液燃料混合燃烧阶段和燃烬阶段。

图 10 选取了 4 种不同质量比的固-液混合燃料在 $t = 15\text{ ms}$ 时的火焰图像, 随着金属粉质量比 I 的增大, 固-液混合燃料的燃烧机制从液体燃料燃烧反应主导依次向固-液燃料燃烧反应主导和固体燃料燃烧

反应主导转变^[22]。从图 10 中 Al/PO 混合燃料火焰可以看出, 随着 Al 粉质量比 I 的增大, 其火焰颜色也依次从暗黄色转变为亮黄色和黄绿色, 其他两种固-液混合燃料火焰颜色也呈现出相同的规律。此外, 从图 10 中还可以看出, 添加不同金属粉的固-液混合燃料燃烧机制转变速率从大到小依次为: Mg/PO、Al/PO、Ti/PO, 导致该现象的原因与 2.2 节中压力上升速率变化规律的影响因素一致, 均是由于金属粉颗粒的体积密度(质量比 I 相同时, 低密度金属粉颗粒数量多)和燃点(低燃点金属粉尘更容易点火)不同导致的。

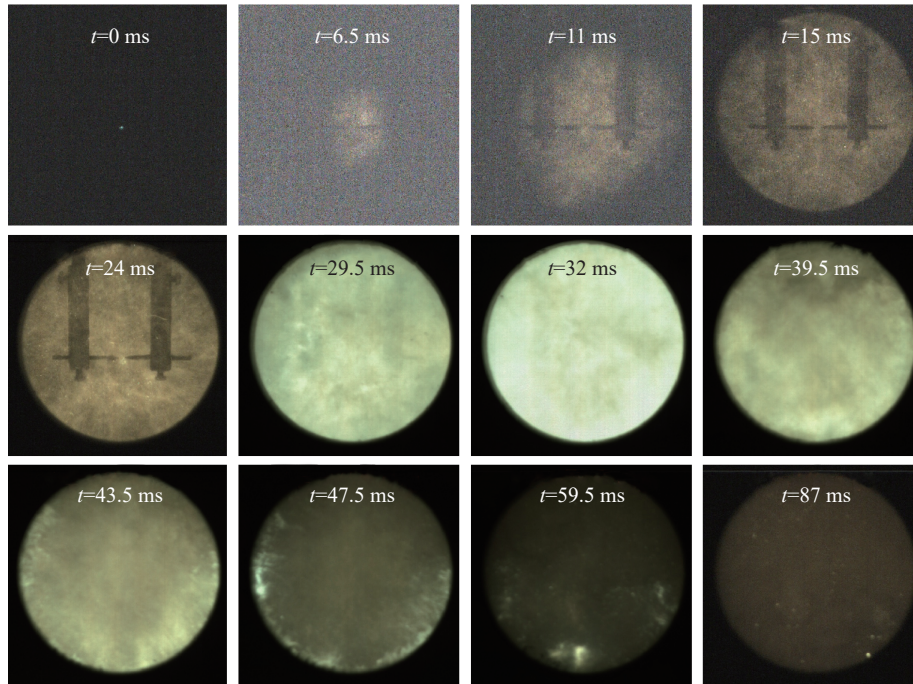


图 9 $I = 20\%$ 时 Al/PO 固-液混合燃料燃爆火焰传播过程

Fig. 9 Flame propagation process of Al/PO solid-liquid mixed fuel when $I = 20\%$

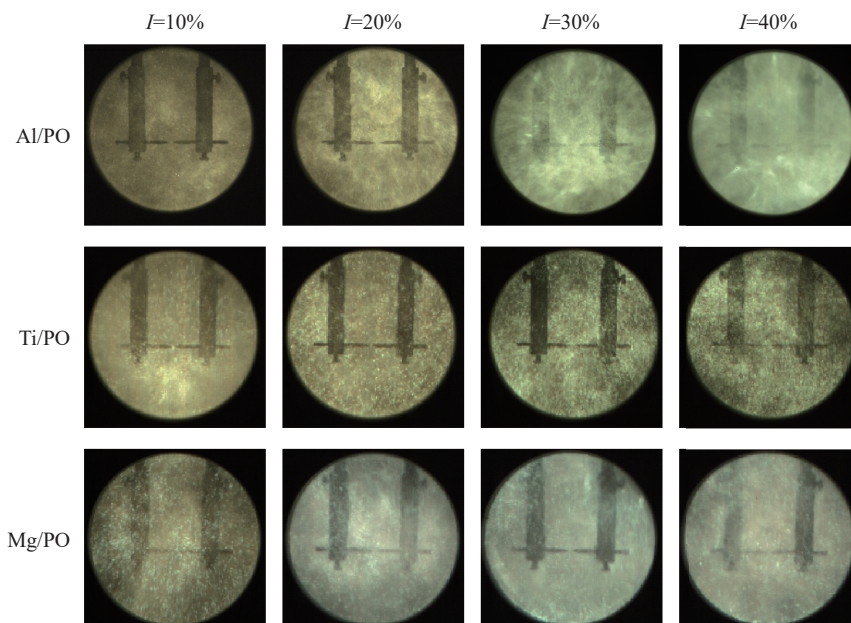


图 10 4 种不同质量比的 Al/PO、Ti/PO、Mg/PO 固-液混合燃料在 $t = 15$ ms 时刻的火焰图像

Fig. 10 Al/PO, Ti/PO and Mg/PO solid-liquid mixed fuels flame images with four different mass ratios when $t = 15$ ms

实验采用基于黑体辐射理论的比色测温方法, 结合 Python 程序处理高速相机拍摄得到的火焰传播图像, 研究了 3 种固-液混合燃料在不同质量比 I 和不同时刻的温度分布特征。图 11 和图 12 分别是 Al/PO 固-液混合燃料在质量比 $I = 20\%$ 时的燃爆火焰温度场分布图和不同质量比 I 时的燃爆火焰平均温度时程曲线。从图中可以看出, 在 $t = 0 \sim 15$ ms 时, 混合燃料燃爆火焰温度分布图中含有部分噪点, 这主要是因为该阶段受到点火电极的影响以及燃烧火焰亮度不够(图 10), 使得比色测温方法捕捉像素点时存在一定误差; 在 $t = 15 \sim 32$ ms 时, 火焰温度骤升, 并在该时间段内燃料燃烧火焰最亮, 温度达到最高, 此时固-液混合燃料燃烧机制由固-液混合燃料燃烧反应主导, 燃烧反应最充分, 释放的热量最大; $t = 32$ ms 之后, 由于热量的损失高于燃料燃烧释放的热量, 火焰温度逐渐下降, 然而, 由于固体颗粒的沉降作用, 使得其燃烧火焰在下部呈现零星状, 导致罐体下部燃烧火焰温度偏高, 因而平均温度在燃烧后期出现微小的上下波动情况。

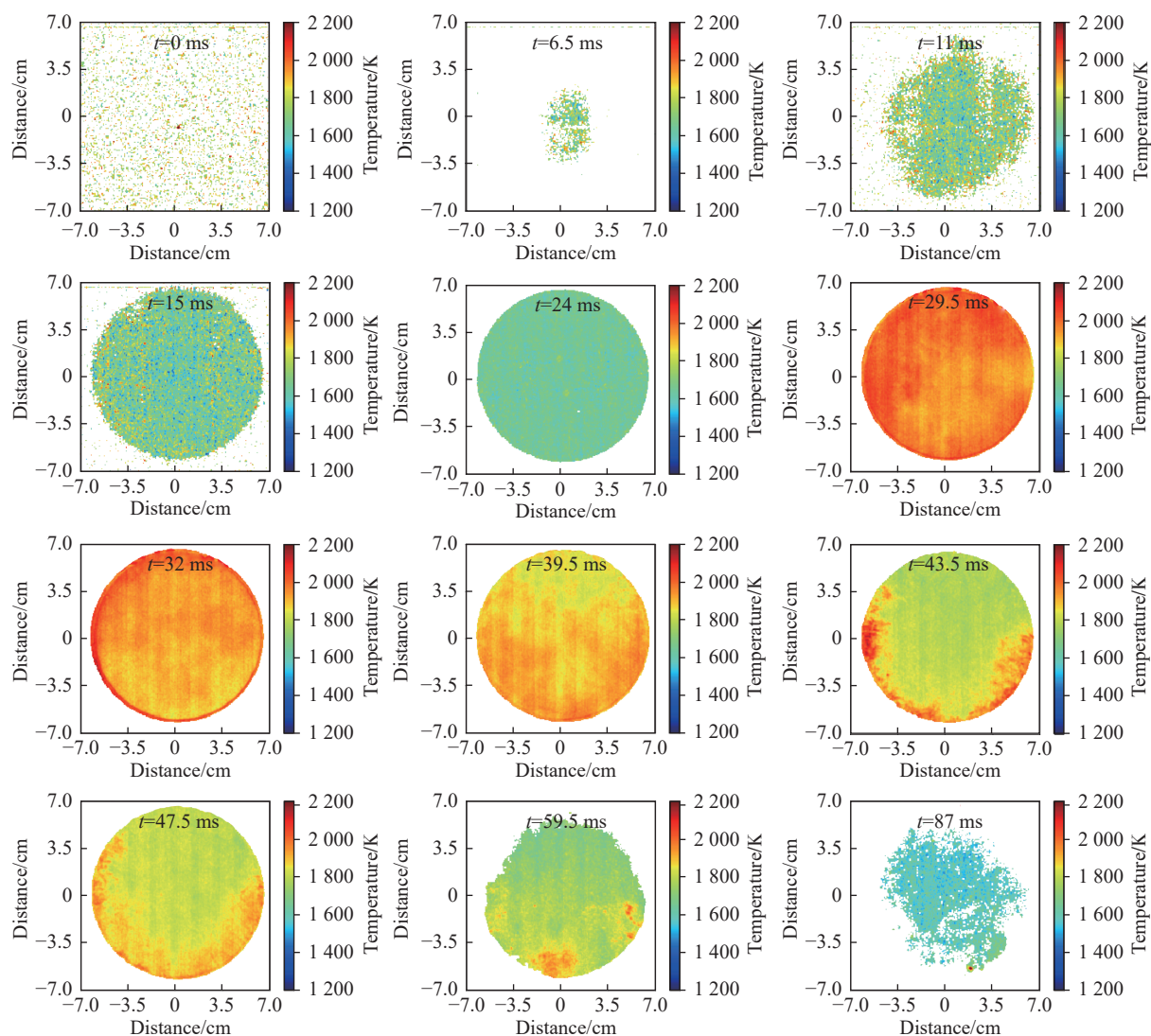


图 11 $I = 20\%$ 时 Al/PO 固-液混合燃料火焰温度分布云图

Fig. 11 Temperature distribution of Al/PO solid-liquid mixed fuel when $I = 20\%$

图 13 为 3 种固-液混合燃料燃爆火焰的最大平均温度变化曲线, 从图中可以看出, 3 种固-液混合燃料的燃爆平均温度均随着质量比 I 的增大而升高。这主要是由于金属粉末作为固体高能添加剂释放了大量的热量, 从而促进了环氧丙烷云雾的燃爆^[29], 使得固-液混合燃料燃爆火焰的最大平均温度升高。

$I = 10\%$ 时, Al/PO 和 Ti/PO 混合燃料燃爆火焰的最大平均温度为 1920 和 1918 K, Mg/PO 混合燃料燃爆火焰的最大平均温度为 1930 K, 均低于纯环氧丙烷燃烧火焰的最大平均温度(纯环氧丙烷在质量浓度为 780 g/m^3 时, 燃爆最大平均温度为 1937 K), 这是因为, 该质量比时, 液体燃料基本完全覆盖住金属粉末, 燃爆过程需要将表面的环氧丙烷燃烧完全后, 火焰才能传递到金属粉表面, 而包覆在液体燃料内的金属粉(无氧环境)在燃烧前还会吸收热量, 从而导致 $I = 10\%$ 时的固-液混合燃料温度低于纯环氧丙烷。当质量比 $I \geq 20\%$ 时, 液体燃料无法完全包覆金属粉末, 且金属粉末与空气燃烧反应释放出来的热量大大高于纯环氧丙烷, 此时固-液混合燃料的燃爆火焰最大平均温度与金属粉的燃烧热密切相关, 如图 13 所示, 相同金属粉质量比 I 下, 固-液混合燃料燃爆火焰的最大平均温度从大到小依次为: Al/PO、Mg/PO、Ti/PO, 与固-液混合燃料爆炸超压的变化趋势一致。

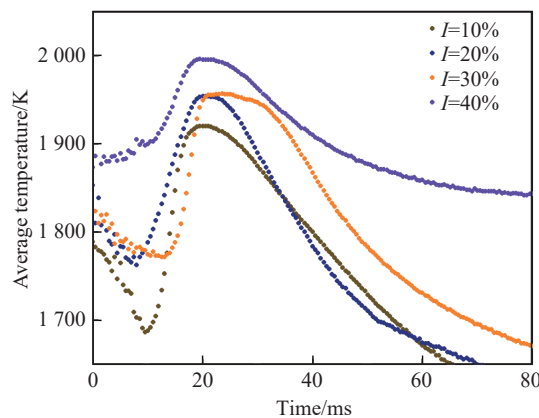


图 12 不同质量比下 Al/PO 固液混合燃料的平均火焰温度-时间曲线

Fig. 12 Average flame temperature-time curves of Al/PO solid-liquid mixed fuels with different mass ratios

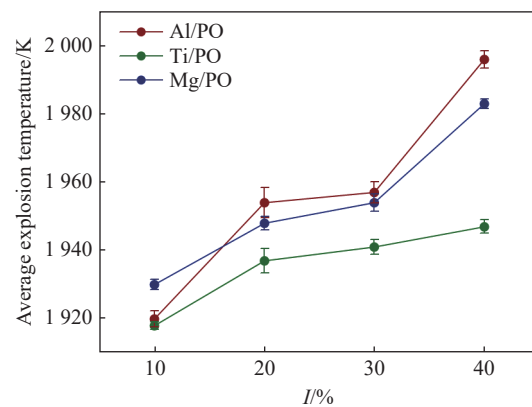


图 13 不同质量比的 Al/PO、Ti/PO、Mg/PO 固-液混合燃料燃爆火焰的最大平均温度

Fig. 13 Maximum average flame temperature of Al/PO, Ti/PO, Mg/PO solid-liquid mixed fuels with different mass ratios

3 结 论

(1) 纯环氧丙烷的最佳质量浓度为 780 g/m^3 , 此时最大燃爆超压和最大压力上升速率分别为 $\Delta p_{\max} = 0.799 \text{ MPa}$, $(dp/dt)_{\max} = 52.438 \text{ MPa/s}$ 。添加相同质量比金属粉末(Al、Ti、Mg)的固-液混合燃料的最大燃爆超压从大到小依次为: Al/PO、Mg/PO、Ti/PO, 最大压力上升速率从大到小依次为: Mg/PO、Al/PO、Ti/PO。

(2) 当质量比 $I = 40\%$ 时, 添加金属粉末(Al、Ti、Mg)固-液混合燃料的 Δp_{\max} 值相较于纯环氧丙烷分别增加了 12.00%、8.41% 和 11.54%, $(dp/dt)_{\max}$ 值分别增加了 41.91%、39.60% 和 45.29%, 金属粉末的种类对固-液混合燃料的最大燃爆超压和最大压力上升速率影响效果不同。

(3) Al/PO、Ti/PO、Mg/PO 固-液混合燃料的燃爆火焰最大平均温度均随金属粉质量比(I)的增大呈不断升高的趋势, 当金属粉质量比 $I \geq 20\%$ 时, 固-液混合燃料在相同 I 下的燃爆火焰最大平均温度从大到小依次为: Al/PO、Mg/PO、Ti/PO, 与固-液混合燃料燃爆超压的变化趋势一致。

参考文献:

- [1] 笱文涛, 洪滔, 董贺飞. 铝粉尘云团爆轰温压效应的数值模拟 [J]. 兵工学报, 2018, 39(1): 101-110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.011.
ZAN W T, HONG T, DONG H F. Numerical simulation of detonation temperature and pressure effects of aluminum powder cloud [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(1): 101-110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.011.
- [2] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.06.008.

- LIU W J, BAI C H, LIU Q M, et al. Mechanism and experimental study of high volatile liquid mass transfer rate [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(6): 1123–1130. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.06.008.
- [3] 程扬帆, 王中华, 胡芳芳, 等. TiH₂ 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. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0842.
- CHENG Y F, WANG Z H, HU F F, et al. High-speed two-dimensional measurements of flame propagation velocity and temperature distribution of TiH₂ dust flame [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(4): 1181–1192. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0842.
- [4] LIU G, HOU F, CAO B, et al. Experimental study of fuel-air explosive [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44(2): 213–217. DOI: 10.1007/s10573-008-0028-7.
- [5] ZHANG C, BAI C H, REN J F, et al. The promotion of nitromethane on solid-liquid fuel/air mixtures explosion characteristics under different ambient conditions [J]. *Fuel*, 2022, 322: 124190. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124190.
- [6] WAN H W, WEN Y Q, ZHANG Q. Explosion behaviors of vapor-liquid propylene oxide/air mixture under high-temperature source ignition [J]. *Fuel*, 2023, 331: 125815. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125815.
- [7] BAI C H, LIU W J, YAO J, et al. Explosion characteristics of liquid fuels at low initial ambient pressures and temperatures [J]. *Fuel*, 2020, 265: 116951. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116951.
- [8] ZHANG Q, LI W, TAN R M, et al. Combustion parameters of gaseous epoxypropane/air in a confined vessel [J]. *Fuel*, 2013, 105: 512–517. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.10.017.
- [9] 谭汝媚, 张奇. 环氧丙烷蒸气-铝粉-空气杂混合物的爆炸特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2014, 28(1): 48–54. DOI: 10.11858/gywlb.2014.01.008.
- TAN R M, ZHANG Q. Research on the explosibility of gaseous epoxypropane-aluminum dust-air hybrid mixtures [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(1): 48–54. DOI: 10.11858/gywlb.2014.01.008.
- [10] 徐敏潇, 刘大斌, 徐森. 硼含量对燃料空气炸药爆炸性能影响的试验研究 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(5): 886–891. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.007.
- XU M X, LIU D B, XU S. Experimental study of influence of boron content on explosion performance of fuel-air explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(5): 886–891. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.007.
- [11] WANG Y X, LIU Y, XU Q M, et al. Effect of metal powders on explosion of fuel-air explosives with delayed secondary igniters [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(3): 785–791. DOI: 10.1016/j.dt.2020.05.010.
- [12] CHENG Y F, YAO Y L, WANG Z H, et al. An improved two-colour pyrometer based method for measuring dynamic temperature mapping of hydrogen-air combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(69): 34463–34468. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.224.
- [13] 范彩玲. 温压弹爆炸热毁伤效应研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000903.
- FAN C L. Research on thermal damage effect of thermobaric bomb explosive [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000903.
- [14] LIU X L, 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. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.10.081.
- [15] 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): 114101. DOI: 10.11883/bzyej-2021-0477.
- ZHANG Q W, CHENG Y F, XIA Y, et al. Application of colorimetric pyrometer in the measurement of transient explosion temperature [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(11): 114101. DOI: 10.11883/bzyej-2021-0477.
- [16] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7241.2004.03.001.
- DAI J M. Survey of radiation thermometry [J]. *Techniques of Automations & Applications*, 2004, 23(3): 1–7. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7241.2004.03.001.
- [17] WANG H, CHENG Y F, ZHU S J, et al. Effects of content and particle size of TiH₂ powders on the energy output rules of RDX composite explosives [J]. *Defence Technology*, 2023. DOI: 10.1016/j.dt.2023.05.002.
- [18] 夏煜, 程扬帆, 李世周, 等. 无约束条件下甲烷/空气预混气体燃爆特性研究 [J]. *实验力学*, 2023, 38(2): 243–253. DOI: 10.7520/1001-4888-22-119.
- XIA Y, CHENG Y F, LI S Z, et al. Combustion and explosion characteristics of methane/air premixed gas under unconstrained condition [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(2): 243–253. DOI: 10.7520/1001-4888-22-119.

- [19] LI S Z, CHENG Y F, WANG R, et al. Suppression effects and mechanisms of three typical solid suppressants on titanium hydride dust explosions [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 177: 688–698. DOI: 10.1016/j.psep.2023.07.039.
- [20] 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. DOI: 10.11943/CJEM2023077.
JIANG B Y, CHENG Y F, LI S Z, et al. Vapor-liquid two-phase combustion and explosion characteristics of propylene oxide/air mixtures [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2023, 31(7): 699–706. DOI: 10.11943/CJEM2023077.
- [21] 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. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104876.
- [22] ZHANG C, BAI C H, YAO J. Liquid component effect on the dispersion and explosion characteristics of solid-liquid mixed fuel [J]. *Fuel*, 2022, 319: 123806. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123806.
- [23] 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. DOI: 10.1088/0143-0807/31/4/022.
- [24] 李文霞, 林柏泉, 魏吴晋, 等. 纳米级别铝粉粉尘爆炸的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(4): 475–479.
LI W X, LIN B Q, WEI W J, et al. Experimental study on the explosive characteristics of nano-aluminum powder [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(4): 475–479.
- [25] LIU W J, BAI C H, LIU Q M, et al. Effect of metal dust fuel at a low concentration on explosive/air explosion characteristics [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 221: 41–49. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.025.
- [26] 林柏泉, 梅晓凝, 王可, 等. 基于 20 L 球形爆炸装置的微米级铝粉爆炸特性实验 [J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(7): 661–667. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.07.001.
LIN B Q, MEI X N, WANG K, et al. Explosion characteristics of micro-aluminum powders in 20 L spherical vessels [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(7): 661–667. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.07.001.
- [27] 王学锐. 铝热反应热效应机制与工程应用 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000740.
WANG X R. Thermal effect mechanism and engineering application of aluminum thermal reaction [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000740.
- [28] 郝海霞, 姚二岗, 王宝兴, 等. 含纳米金属粉 AP/HTPB 复合固体推进剂的激光点火特性 [J]. *含能材料*, 2015, 23(9): 908–914. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.09.014.
HAO H X, YAO E G, WANG B X, et al. Laser ignition characteristics of AP /HTPB composite solid propellants containing metal nanopowders [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(9): 908–914. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.09.014.
- [29] 方伟, 赵省向, 张奇, 等. 含微/纳米铝粉燃料空气炸药爆炸特性 [J]. *含能材料*, 2021, 29(10): 971–976. DOI: 10.11943/CJEM2021080.
FANG W, ZHAO S X, ZHANG Q, et al. Explosion characteristic of fuel-air explosion containing micro/nano-aluminum powder [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(10): 971–976. DOI: 10.11943/CJEM2021080.

(责任编辑 曾月蓉)