

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0477

# 比色测温技术在瞬态爆炸温度场测量中的应用研究\*

张启威<sup>1</sup>, 程扬帆<sup>1,2</sup>, 夏煜<sup>1</sup>, 王中华<sup>1</sup>, 汪泉<sup>1</sup>, 沈兆武<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 中国科学技术大学工程科学学院, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 为了研究瞬态爆炸温度场分布规律, 基于高速相机、黑体辐射理论、图像传感器的拜尔阵列和自编 python 代码, 构建了依据比色测温原理的高速二维温度测试系统, 并对添加不同含量  $\text{TiH}_2$  的乳化炸药、 $\text{TiH}_2$  粉尘以及  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的爆炸温度场进行了测量。实验结果表明:  $\text{TiH}_2$  的加入可以显著提高炸药的爆炸温度和火球持续时间, 当乳化炸药中的  $\text{TiH}_2$  质量分数为 6% 时, 爆炸平均温度最大值为 3048 K, 相比纯乳化炸药提高了 41.5%; 此外,  $\text{TiH}_2$  粉尘云火焰平均温度呈现先增大, 再稳定, 最后减小的趋势, 浓度为  $500 \text{ g/m}^3$  的粉尘云火焰平均温度高于浓度为  $833 \text{ g/m}^3$  的平均温度, 其最高平均温度分别为 2231 和 2192 K; 10% $\text{C}_2\text{H}_2$ /90% 空气预混气体(即体积分数为 10% 的  $\text{C}_2\text{H}_2$  和 90% 空气组成)的早期火焰温度均匀, 内部略低于边缘温度, 随着火焰膨胀, 火焰边缘温度逐渐升高, 火焰平均温度开始降低。与传统爆炸测温手段相比, 比色测温方法可以准确测量某区域的瞬态爆炸温度, 获得温度分布云图, 为研究瞬态爆炸温度规律及影响因素提供了一种新的技术手段。

**关键词:** 比色测温; 爆炸温度场; 粉尘爆炸; 乳化炸药; 气体爆炸

中图分类号: O389; TJ06; J450.6

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Application of colorimetric pyrometer in the measurement of transient explosion temperature

ZHANG Qiwei<sup>1</sup>, CHENG Yangfan<sup>1,2</sup>, XIA Yu<sup>1</sup>, WANG Zhonghua<sup>1</sup>, WANG Quan<sup>1</sup>, SHEN Zhaowu<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

**Abstract:** To study the distribution law of transient explosion temperature field, a high-speed two-dimensional temperature measuring system according to the colorimetric temperature measurement principle was constructed using a high-speed camera, the gray-body radiation principle, Bayer array of the image sensor, and a self-compiled python code. The relationship between the gray value of high-speed camera image and explosion temperature was deduced. And the Bayer filter of the image sensor was used to obtain the intensity information of red, green, and blue light on each pixel, which was calculated through Python code with the edge adaptive interpolation algorithm. A tungsten filament lamp was selected as the temperature source for calibration. The explosion temperature fields of emulsion explosives with different  $\text{TiH}_2$  powder contents,  $\text{TiH}_2$  dust, and  $\text{C}_2\text{H}_2$  gas were measured by the system. The experimental results show that the addition of  $\text{TiH}_2$  powders could significantly increase the explosion temperature and fireball duration of emulsion explosives. When the mass content of  $\text{TiH}_2$  powders in emulsion explosive is 6%, the maximum average temperature of the explosion is 3048 K, a 41.5% increase than that of pure emulsion explosive. In addition, the average flame temperature of the  $\text{TiH}_2$  dust cloud increases first, then stabilizes, and finally

\* 收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(11972046); 安徽省自然科学基金(2108085Y02); 安徽省高校骨干领军人才项目(ZY7092102); 安徽省高校自然科学基金(KJ2020ZD30); 科研育人示范项目(KYX202119); 安徽理工大学研究生创新基金(2021CX2026, 2021CX2092)

第一作者: 张启威(1997—), 男, 硕士研究生, 944357044@qq.com

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

decreases. The mean flame temperature of the 500 g/m<sup>3</sup> dust is higher than that of 833 g/m<sup>3</sup> dust, with the corresponding maximum mean temperatures of 2231 and 2192 K, respectively. The early flame temperature distribution of the premixed 10% C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/90% air was uniform, with the internal temperature slightly lower than the edge temperature. As the flame expands, the flame edge temperature gradually increases, while the average flame temperature begins to decrease, and the maximum average temperature is 2523 K. Compared with the traditional explosion temperature measurement method, the colorimetric pyrometer method can accurately measure the transient explosion temperature in a certain region and obtain the temperature distribution cloud map, which provided a new technical means for studying transient detonation temperature and its influencing factors.

**Keywords:** colorimetric pyrometer; explosion temperature field; dust explosion; emulsion explosive; gas explosion

温度是评估爆炸输出特性的重要指标,能够反映其热毁伤性能和能量释放规律,对炸药、粉尘和气体的爆炸温度展开研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。然而,由于爆炸过程具有快速性、复杂性和危险性,目前对爆炸温度场的准确测量仍然非常困难。为了获得较准确的爆炸温度,研究人员在爆炸温度测量领域展开了积极的探索。目前测量瞬态爆轰温度的方法主要有接触式和非接触式两种测温方法。在接触法测温研究方面,Frost等<sup>[3]</sup>利用热电偶对金属化炸药爆炸火球的温度进行测量,研究发现铝颗粒存在时,爆炸火球中的气体和燃烧粒子的温度分别高达1800和2700K。Lebel等<sup>[4]</sup>研制了一种接触式光纤探头,测量了Detasheet-C炸药爆炸火球内部温度。然而,通过热电偶和光纤探头等接触式测温方法测量爆炸温度时需要与被测物体接触,测量准确度较差,且温度响应速度不能满足瞬态高温的测量要求。与接触式测温方法相比,非接触式测温方法能够检测物体的表面温度,且测温范围宽、响应速度快,更适合爆炸瞬态高温的测量。Lewis等<sup>[5]</sup>利用原子光谱法测量了含有硝酸钡的RDX爆炸火球温度,时间平均发射光谱表明爆炸火球表面温度为3000K,与理论预测一致。Aduv等<sup>[6]</sup>采用光谱测温法描述了含有铁纳米颗粒的PETN炸药爆炸的热性质,并测得其爆炸温度在3300~3500K。Olokun等<sup>[7]</sup>利用热成像相机测量了聚合物包覆的HMX颗粒在冲击载荷下的温度分布情况,测量结果表明聚合物包覆的HMX颗粒的温度分布与其粒度密切相关。Wang等<sup>[8]</sup>提出了一种红外热成像测温的补偿方法,并对红外热成像仪测量HMX混合物的爆炸火球温度进行了补偿和校正,结果发现利用补偿方法修正后的温度更接近其爆轰温度。然而,利用光谱法和红外热成像类的非接触式测温方法时,通常会因为光谱辐射强度收集不全,物体的发射率和环境辐射的影响,严重影响测温精度。

近年来,随着高速摄影技术的不断进步,基于普朗克黑体辐射理论的比色测温方法逐渐被应用到爆轰测温领域。与光谱测温法和红外热成像测温法相比,比色测温法具有响应速度快、测量精度高、抗干扰能力强等特点,且不需要确定火焰的光学特性,如透过率和发射率。在爆炸瞬态温度测量方面有着广阔的应用前景。Goroshin等<sup>[9]</sup>利用定性光谱辅助的三色光学高温测量法实验测定了炸药爆轰的火球温度在2000K左右,与平衡热力学代码的预测一致。Densmore等<sup>[10]</sup>利用高速相机采集TNT爆炸过程中的火焰图像,并采用二色比温方法获得了炸药爆炸过程中的温度分布。Chang等<sup>[11]</sup>通过一系列粉尘爆炸实验,比较了微纳米尺度铝粉粉尘爆炸的火焰结构,并利用二色比温方法测量了其火焰温度。采用比色测温方法测量爆轰温度时,被测对象内部需含有充当“黑体”的介质来反映温度的大小。然而,与固体和液体不同,气体爆炸过程中能够被视为“黑体”的物质几乎没有,因而简单的用比色测温方法难以测量。本文集成采用高速成像、时空图像数据重构、高精度温度转换萃取及添加辅助“黑体”介质等方法,开发出基于二色比温原理的瞬态超高温场动态测试与二维重构系统,并对添加不同含量TiH<sub>2</sub>的乳化炸药、TiH<sub>2</sub>粉尘和C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体的爆炸温度场进行测量,以期对爆炸瞬态温度分布规律和影响因素的精细研究提供了一种有效手段。

## 1 温度场动态测试与二维重构系统

拜耳阵列是实现CCD或CMOS传感器拍摄彩色图像的主要技术之一。它是一个4×4阵列,由8个绿色、4个蓝色和4个红色像素组成,在将灰度图形转换为彩色图片时会以2×2矩阵进行9次运算,最后

生成一幅彩色图形<sup>[11]</sup>。因为每个像素都可以被看作是一个独立的光电倍增管, 图像传感器通过拜尔滤波获得像素点上红色 (R)、绿色 (G) 和蓝色 (B) 光的强度信息, 再据此通过拜尔插值运算推算出像素点的色值, 从而得到高速相机灰度图像像素点输出的灰度比值和被测温物体温度之间的对应关系, 即可以通过灰度值描述被测温度 (比色测温)。

### 1.1 比色测温原理

由普朗克辐射定律, 物体表面光谱辐射亮度<sup>[12]</sup>为:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon(\lambda, T)$  为光谱发射率;  $C_1$  为普朗克第一常数,  $C_1 \approx 3.742 \times 10^{-16} \text{ m} \cdot \text{K}$ ;  $C_2$  为普朗克第二常数,  $C_2 \approx 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ;  $T$  为温度, K;  $\lambda$  为波长, m;  $L(\lambda, T)$  为光谱辐射亮度,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

在波长  $\lambda < 780 \text{ nm}$  的可见光范围内, 温度  $T < 3400 \text{ K}$  时, 普朗克辐射定律可以由维恩辐射定律代替:

$$M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda, T) C_1}{\lambda^5 e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} \quad (2)$$

式中:  $M(\lambda, T)$  为单色光谱出射度。

高速相机的 CMOS 传感器 R、G、B 三通道响应波长在  $380 \sim 780 \text{ nm}$ , 可采用维恩公式计算亮度。假设相机在  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]$  的可见光谱范围内响应函数是  $h(\lambda)$ , 则相机输出该点的灰度值为:

$$w = \frac{\pi}{4} A U t \left( \frac{2a}{f} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) E_r(\lambda) h(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中:  $A$  为光敏单元输出电流和图像灰度值之间转换系数;  $U$  为光电转换系数;  $t$  为曝光时间, s;  $f$  为镜头焦距;  $a$  为镜头的出射光瞳半径;  $K_T(\lambda)$  为镜头的光学透过率;  $h(\lambda)$  为光谱响应函数;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为互补金属氧化物半导体传感器感光的波长上下限;  $E_r(\lambda)$  为光谱的辐射能。

将红绿蓝 (R、G、B) 三种基色的波长  $\lambda_r$ 、 $\lambda_g$  和  $\lambda_b$  带入式 (3), 然后用三基色中的任意两色相比, 如 R、G 灰度相比可得出:

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln \frac{H_r}{H_g} - \ln \frac{K_r}{K_g} - \ln \frac{\varepsilon(\lambda_r, T)}{\varepsilon(\lambda_g, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_g}{\lambda_r}} \quad (4)$$

$K_r$ 、 $K_g$ 、 $K_b$  为 R、G、B 通道比例系数, 令  $K = \ln \frac{K_r}{K_g} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_r, T)}{\varepsilon(\lambda_g, T)}$ , 得:

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln \frac{H_r}{H_g} - 5 \ln \frac{\lambda_g}{\lambda_r} - K} \quad (5)$$

$K$  为一修正值, 它与相机参数、曝光时间、被测物体的光谱发射率有关, 当相机传感器确定之后, 其光谱响应特性也随之确定, 仅与传感器的感光特性有关, 可以用钨丝灯试验标定。从理论上说, 只要知道三通道灰度值  $H$ , 就可以计算出该点的温度值。

### 1.2 测温平台与流程

测温平台由高速相机、镜头、计算机及自编测温程序构成。高速相机采集数字图像信号, 计算机及自编 Python 测温程序对数字图像信号进行图像处理、温度场计算以及可视化显示。比色测温的流程如图 1 所示。在进行实验前, 保持整个实验室处于无光黑暗的环境下, 这样可以避免其他可见光对实验造成的干扰。组装好高速相机后, 调整好相机的角度和镜头的焦距, 使得被测物体清楚地出现在屏幕中。关闭相机白平衡和伽马校正, 将 pixel bit depth 设置为 12 bit, 为方便 python 代码处理数据, 选择长宽相等的照片像素大小, 关闭 low light 模式, 因为其在开启状态下摄像机会自动补光, 会影响实验的准确性。



图 1 比色测温流程

Fig. 1 Colorimetric temperature measurement process

拍摄得到灰度图通过使用基于边缘自适应插值算法<sup>[13]</sup>的 python 代码进行彩色图片重建。Bayer 域 R/G/B 分布模型如图 2 所示, 由于绿色像素点的数量是红色和蓝色像素数量的两倍, 其包含更多原始图像的边缘信息, 故先对绿色分量进行插值重建。首先计算水平和垂直两个方向由亮度信号的梯度和色度信号的二阶微分构成的边缘检测算子, 沿合适的方向进行绿色分量的重建。利用已经重建好的绿色分量, 采用红绿色差空间或蓝绿色差空间的线性插值来完成红色和蓝色分量的重建, 具体插值算法如下。

首先对红色和蓝色采样点处的绿色分量进行重建, 以图 2(a) 为例, 中心红色采样点  $R_{i,j}$  处水平方向和垂直方向检测算子计算如下:

$$\Delta H_{i,j} = |G_{i,j-1} - G_{i,j+1}| + |2R_{i,j} - R_{i,j-2} - R_{i,j+2}| \quad (6)$$

$$\Delta V_{i,j} = |G_{i-1,j} - G_{i+1,j}| + |2R_{i,j} - R_{i-2,j} - R_{i+2,j}| \quad (7)$$

式中:  $\Delta H$  为水平算子,  $\Delta V$  为垂直算子,  $G$  为绿色分量,  $R$  为红色分量。

当水平算子小于垂直算子时, 绿色分量的计算沿水平方向进行, 计算如下:

$$G_{i,j} = \frac{G_{i,j-1} + G_{i,j+1}}{2} + \frac{2R_{i,j} - R_{i,j-2} - R_{i,j+2}}{4} \quad (8)$$

当水平算子大于垂直算子时, 绿色分量的计算沿垂直方向进行, 计算如下:

$$G_{i,j} = \frac{G_{i-1,j} - G_{i+1,j}}{2} + \frac{2R_{i,j} - R_{i-2,j} - R_{i+2,j}}{4} \quad (9)$$

当水平和垂直的算子相等时, 则绿色分量为水平和垂直方向的平均值, 计算如下:

$$G_{i,j} = \frac{G_{i-1,j} + G_{i+1,j} + G_{i,j-1} + G_{i,j+1}}{4} + \frac{4R_{i,j} - R_{i-2,j} - R_{i+2,j} - R_{i,j-2} - R_{i,j+2}}{8} \quad (10)$$

红色和蓝色分量的重建过程以图 2(b) 为例, 中心点处的红色分量的重建使用上下两点  $R-G$  空间的线性插值, 蓝色分量的重建使用左右两点  $B-G$  空间的线性插值, 具体如下:

$$R_{i,j} = \frac{1}{2} (R_{i-1,j} + R_{i+1,j}) + \frac{1}{2} (2G_{i,j} - G_{i-1,j} - G_{i+1,j}) \quad (11)$$

$$B_{i,j} = \frac{1}{2} (B_{i,j-1} + B_{i,j+1}) + \frac{1}{2} (2G_{i,j} - G_{i,j-1} - G_{i,j+1}) \quad (12)$$

式中:  $B$  为蓝色分量。

最后进行红色 (蓝色) 采样点处的蓝色 (红色) 分量的重建, 以图 2(a) 为例。红色周围最近的蓝色像素点处于左上, 左下、右上、右下四个位置。为了更好地保存边缘信息, 与绿色分量的重建类似, 需要先计算沿  $45^\circ$  方向和  $135^\circ$  方向梯度算子, 再沿算子较小的方向插值。梯度算子计算如下:

$$\alpha(i,j) = |B_{i-1,j+1} - B_{i+1,j-1}| + |2G_{i,j} - G_{i-1,j+1} - G_{i+1,j-1}| \quad (13)$$

$$\beta(i,j) = |B_{i-1,j-1} - B_{i+1,j+1}| + |2G_{i,j} - G_{i-1,j-1} - G_{i+1,j+1}| \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  为  $45^\circ$  方向梯度算子,  $\beta$  为  $135^\circ$  方向梯度算子。

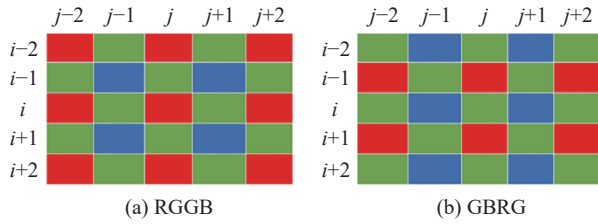


图 2 拜尔插值运算

Fig. 2 Bayer interpolation

当 45°方向的梯度算子小于 135°方向时, 红色分量的计算沿 45°方向水平方向进行:

$$R_{i,j} = \frac{B_{i-1,j+1} + B_{i+1,j-1}}{2} + \frac{2G_{i,j} - G_{i-1,j+1} - G_{i+1,j-1}}{2} \quad (15)$$

当 45°方向的梯度算子大于 135°方向时, 红色分量的计算沿 135°方向梯度方向进行:

$$R_{i,j} = \frac{B_{i-1,j-1} + B_{i+1,j+1}}{2} + \frac{2G_{i,j} - G_{i-1,j-1} - G_{i+1,j+1}}{2} \quad (16)$$

当 45°方向的梯度算子和 135°方向相等时, 则红色分量为两者的平均值, 计算如下:

$$R_{i,j} = \frac{B_{i-1,j+1} + B_{i+1,j-1} + B_{i-1,j-1} + B_{i+1,j+1}}{4} + \frac{4G_{i,j} - G_{i-1,j+1} - G_{i+1,j-1} - G_{i-1,j-1} - G_{i+1,j+1}}{4} \quad (17)$$

这种插值方法能够有效地防止图像的颜色失真, 更好地保留原始边缘信息, 增强色彩平滑度, 提高图像纹理和  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分量的准确度。

插值运算得到彩色图像后, 使用 python 程序进行计算。根据相关  $R$  和  $G$  像素值计算每个像素点的  $R/G$  的值, 代入式 (5), 得到对应像素点的温度, 随后选择合适的温度范围和刻度, 绘制出温度分布图<sup>[14]</sup>。

### 1.3 温度标定

在进行正式爆炸瞬态温度测量实验前, 应对系统的温度测量精度进行标定。由于钨是熔点最高的金属, 其熔点高达 3695 K, 钨丝在一定电压和电流条件下, 温度变化情况可循, 因此选用钨丝灯作为温度源进行标定。温度标定的步骤如下: 通过高速相机对发光钨丝灯进行拍摄, 标定出高速相机图像传感器  $R/G$  比值随温度的变化关系, 再采用曲线拟合方法对温度数值的变化规律进行拟合计算 (如图 3 所示), 得到测温系统的温度修正系数<sup>[15]</sup>。

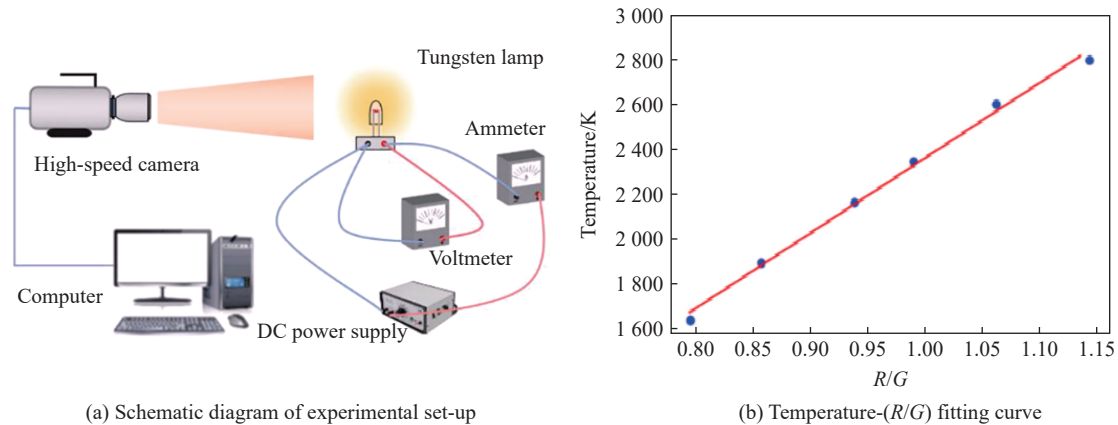


图 3 高温钨丝灯的标定实验

Fig. 3 Calibration using a high-temperature tungsten filament lamp

## 2 试验材料与装置

### 2.1 试验材料

玻璃微球 (GMs, 商业级, 美国 3M 公司), 商业级  $TiH_2$  (储氢质量占 3.85%, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司), 乳化基质 (密度  $1.31 \text{ g/cm}^3$ , 淮南舜泰化工有限公司), 其成分如表 1 所示,  $C_2H_2$  (体积纯度不低于 99.98%, 合肥恒隆电气有限公司), 空气 (20.98% (体积分数)  $O_2$ +79.02% (体积分数)  $N_2$ , 合肥恒隆电气有限公司)。

如图 4 所示, 利用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, Malvern, UK) 观测了 GMs、 $TiH_2$ 、钨粉的粒度分布情况。玻璃微球的粒径分布宽, 粒径范围在  $11.5 \sim 158.5 \mu\text{m}$ , 平均粒径  $D_{50}$  为  $55.6 \mu\text{m}$  (如

表 1 乳化基质的质量分数

Table 1 Mass fraction of emulsion matrix

$NH_4NO_3$	$NaNO_3$	$C_{18}H_{38}$	$C_{12}H_{26}$	$C_{24}H_{44}O_6$	$H_2O$
0.75	0.10	0.04	0.01	0.02	0.08

图 4(a) 所示)。TiH<sub>2</sub> 粒径分布较集中, 粒径范围在 0.2~34.7 μm, 平均粒径 D<sub>50</sub> 为 7.6 μm(如图 4(b) 所示)。钨粉的粒径范围在 0.8~100 μm, 平均粒径 D<sub>50</sub> 为 3.9 μm(如图 4(c) 所示)。

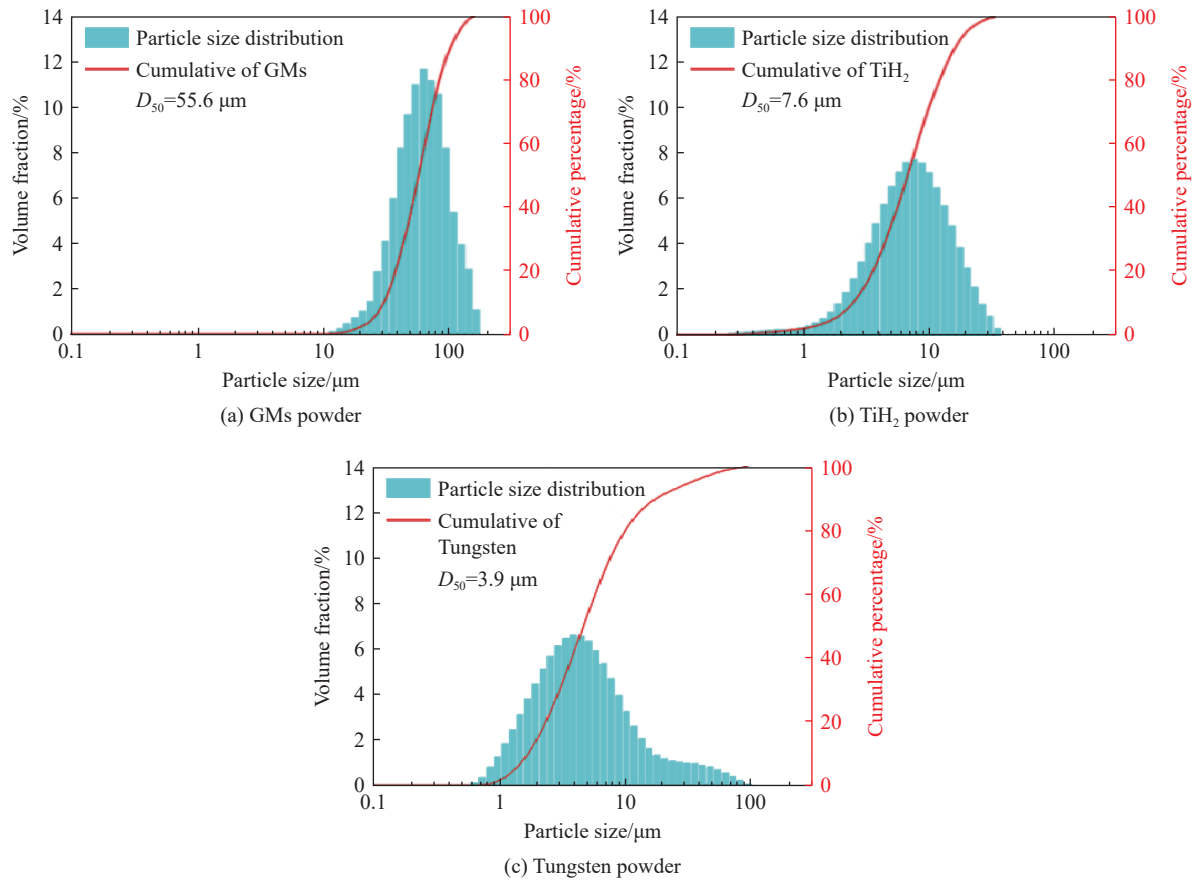


图 4 粉末的粒度分布

Fig. 4 The particle size distribution of powders

### 2.2 炸药爆炸实验

如图 5 所示, 采用二色比温方法对添加不同含量 TiH<sub>2</sub> 的乳化炸药的爆炸温度场进行测量。实验所用乳化炸药采用玻璃微球敏化, 玻璃微球添加量为 4%<sup>[16-17]</sup>, 具体配方如表 2 所示。每组乳化炸药样品的质量为 20 g, 并采用聚乙烯塑料膜包裹成球形药包。球形药包被固定在钢架上, 药包中心距地面为 0.5 m, 同时高速相机和防护装置被布置距离药包 20 m 处。炸药爆炸过程由高速相机 (Memrecam HX-3, 日本 NAC 公司) 记录, 拍摄时的帧率设置为 173 000 s<sup>-1</sup>, 曝光时间为 5.8 μs。为避免实验误差, 每组测试进行 3 次以上, 并取有效数据的平均值。

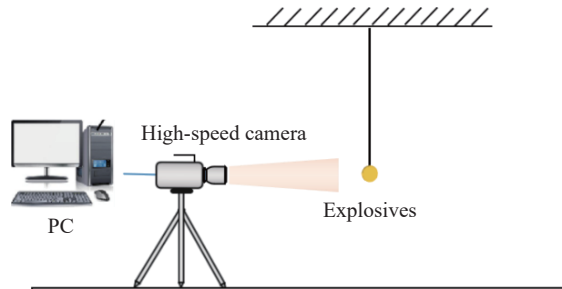


图 5 炸药爆炸及比色测温实验

Fig. 5 The explosive explosion and colorimetric temperature measurement experiment

表 2 乳化炸药样品的组成

Table 2 Composition of emulsion explosive samples

样品	质量分数/%		
	乳化基质	GMs	TiH <sub>2</sub>
A	96	4	0
B	90	4	6

### 2.3 粉尘爆炸实验

利用如图 6 所示的粉尘爆炸实验系统, 研究不同浓度 TiH<sub>2</sub> 粉尘的燃烧行为。主要由燃烧管 (移动管+固定管)、供气系统、分散系统、点火系统、高速摄影系统组成。各部件的动作顺序由时序控制器同步控制。实验首先利用 0.5 MPa 压缩空气分散 TiH<sub>2</sub> 颗粒 0.12 s, 形成粉尘云, 然后通过高压点火器进行点火, 点火电极的材质为钨, 放电间隙 4 mm, 持续放电 0.02 s。配有尼康 AF Micro-Nikkor 200mm f/4D IF-ED 微距镜头的高速相机 (Memrecam HX-3, 日本 NAC 公司), 通过时序控制器同步触发, 记录粉尘云火焰的传播。另外, 在点火前, 电磁铁控制将移动管向下移动, 形成开放空间, 使粉尘云火焰传播不受管壁的约束, 有利于观察火焰结构和传播行为。

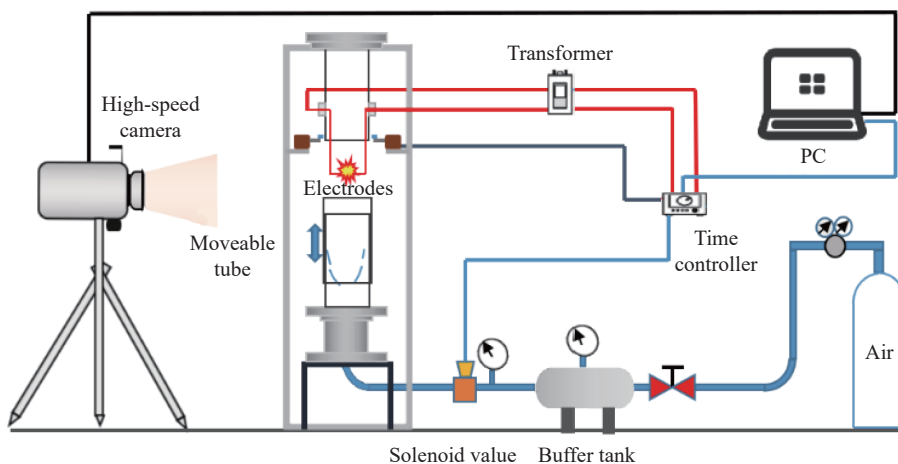


图 6 粉尘爆炸实验系统

Fig. 6 Dust explosion experimental system

### 2.4 气体爆炸实验

与固相燃烧不同的是, 气相燃烧中可视为灰体的物质很少。高速摄像机的成像传感器几乎不可能探测到用于温度计算的灰体辐射。因此, 并不能直接用比色测热法直接测定 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/空气混合气体的火焰温度。本研究利用辅助钨粉改进的比色测温技术测试了不同浓度的 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/空气混合气体的动态温度结构。选用钨粉作为辅助物质的原因如下: (1) 钨的着火点通常高于 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 火焰的温度, 这保证了钨粉不参与燃烧; (2) 钨粉具有优越的导热性; (3) 钨粉在气体燃烧过程中扮演灰体的角色, 为双色测热技术的应用提供了条件。

气体爆炸测试装置如图 7 所示, 主要由乳胶气球、储粉罐、储气罐、电磁阀、点火电极、

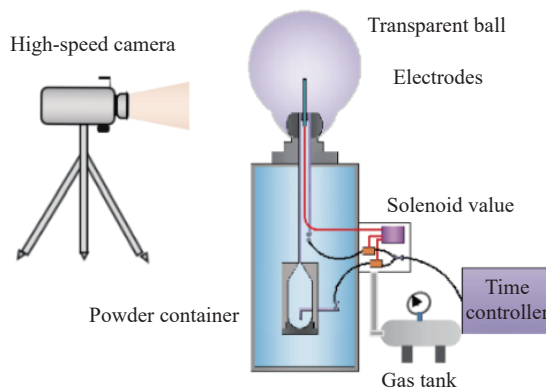


图 7 气体爆炸测试装置

Fig. 7 Gas explosion test system

时序控制器、高速摄像机等组成。实验开始时,将预混好的  $C_2H_2$ /空气混合气体 ( $C_2H_2$  体积分数为 10%) 充入乳胶气球,初始气体体积约 20 L。静置 5 min 后,电磁阀打开,高压气体将钨粉注射到乳胶气球(注射时间为 1.0 s),点火延迟时间是确定为 80 ms,高速摄像机同步进行拍摄。容器内钨粉质量为 0.2 g (粉尘质量浓度为  $8.9\text{ g/m}^3$ )。电磁阀、火焰点火器和高速摄像机均由时序控制器控制,高速摄像机记录火焰结构。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 炸药爆炸温度场的测试

利用比色测温方法对高速相机记录的炸药爆炸过程图像进行处理计算,得到了对应的爆炸温度云图和温度数据。为了研究添加  $TiH_2$  的乳化炸药的爆炸温度场的特点,对比分析了空白乳化炸药和加入质量分数为 6% 的  $TiH_2$  的乳化炸药爆炸过程的温度分布云图,如图 8 和图 9 所示。此外,为了方便研究炸药的爆炸温度场变化情况,实验中将最初记录的爆炸图片所对应的时刻记为  $0\ \mu\text{s}$ 。由于高速相机拍摄时设置的拍摄帧率为  $173\ 000\ \text{s}^{-1}$ ,可以确定相邻两张爆炸图片之间的时间间隔约为  $5.8\ \mu\text{s}$ 。如图 8 所示,空白乳化炸药爆炸时,在  $0\sim 17.4\ \mu\text{s}$  的时间内,尽管爆炸火球不断膨胀,但火球温度却逐渐降低。 $17.4\sim 40.6\ \mu\text{s}$  时,爆炸火球开始破裂并逐渐熄灭,火球温度不断降低。爆炸火球平均温度在  $0\ \mu\text{s}$  处得到最大值,其值为  $2\ 154\ \text{K}$ 。造成该现象的原因可以归结为以下三点:(1) 炸药在爆炸过程中压缩周围空气对外做功释放能量;(2) 炸药被引爆后以声、光、热和振动等形式释放能量;(3) 炸药爆炸产物在爆炸冲击波的驱动下向四周扩散,与周围的空气发生快速的热交换释放热量。由于以上三个原因,炸药在爆炸过程中的内能不断降低,表现为整个爆炸过程中爆炸火球的温度一直下降。此外,已有研究表明空白样乳化炸药的爆轰温度值在  $2\ 070\ \text{K}$  左右<sup>[18]</sup>,与比色测温实验结果一致。

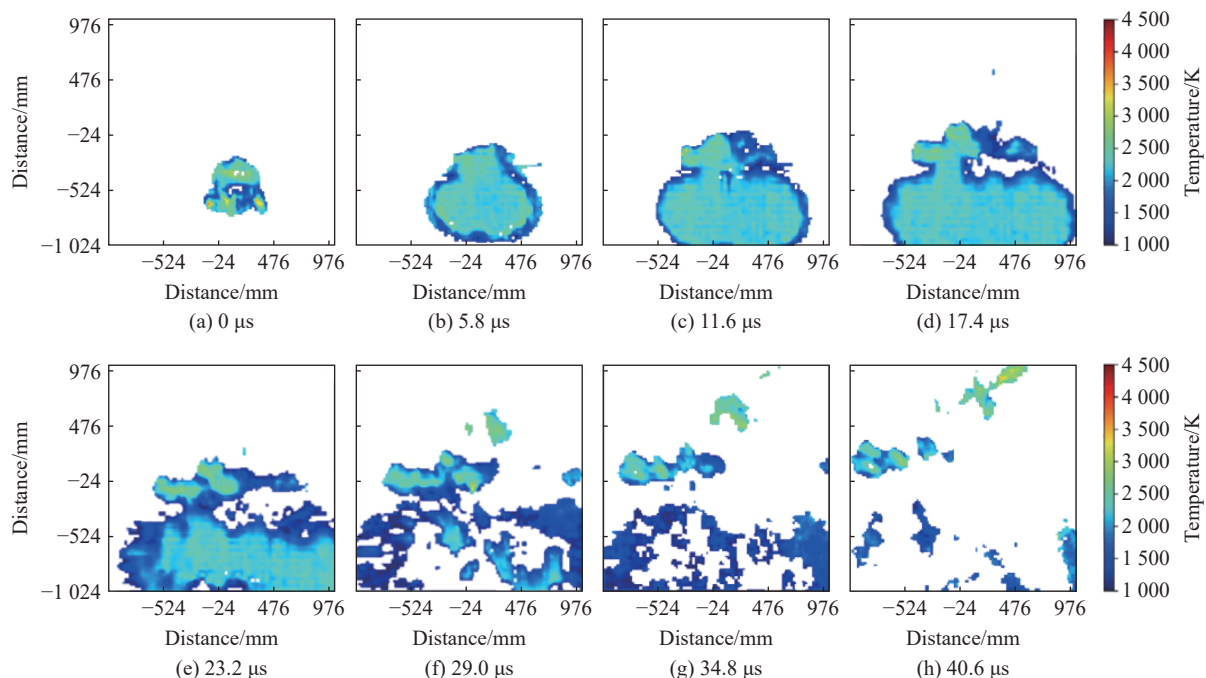


图 8 无  $TiH_2$  粉末乳化炸药不同时刻的爆炸温度

Fig. 8 The explosion temperature maps of emulsion explosive without  $TiH_2$  powders at different times

如图 9 所示,加入  $TiH_2$  的乳化炸药在爆炸时,在  $5.8\sim 23.2\ \mu\text{s}$  的时间内,爆炸火球体积不断增大,火球温度却逐渐上升。在  $23.2\sim 46.4\ \mu\text{s}$  的时间内,爆炸火球逐渐破裂,但火球温度继续上升,爆炸火球平



均温度在  $46.4 \mu\text{s}$  时刻达到最大值  $3\,048 \text{ K}$ 。之后, 爆炸火球开始熄灭且温度逐渐下降。与空白乳化炸药相比, 加入  $\text{TiH}_2$  的乳化炸药的爆炸火球温度呈先上升后下降趋势, 且火球的最高平均温度和持续作用时间分别提高了  $41.5\%$  和  $57.1\%$  左右。这主要是加入  $\text{TiH}_2$  的乳化炸药被引爆后, 部分  $\text{TiH}_2$  粉体作为高能燃料参与炸药的爆轰反应, 提高了炸药爆炸的输出能量; 部分  $\text{TiH}_2$  颗粒和爆轰产物在随冲击波向周围空间扩散时, 与空气中的氧气混合, 发生快速的燃烧反应, 释放大量的燃烧热能, 进而导致乳化炸药的爆炸温度在反应前期不仅没下降反而一直保持上升<sup>[19]</sup>。当炸药中高能组分燃烧反应结束以及爆炸产物的进一步扩散, 燃烧粒子和爆炸产物逐渐冷却, 表现为爆炸火球的温度开始下降。因此, 当  $\text{TiH}_2$  颗粒作为高能添加剂引入到乳化炸药中时, 可以显著提高炸药的爆炸火球温度和持续时间, 增强炸药的热毁伤效果。

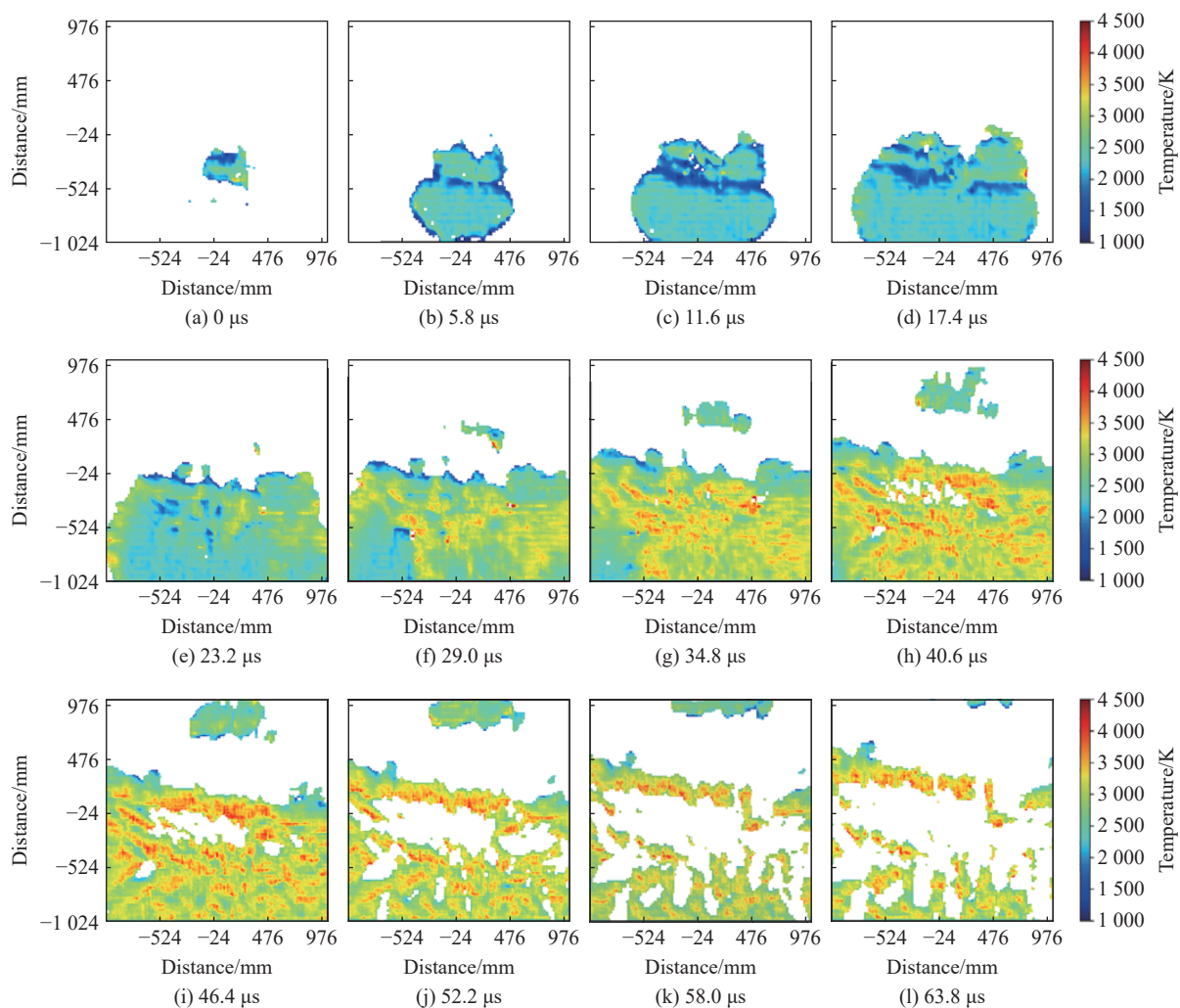


图 9 含  $6\% \text{TiH}_2$  粉末的乳化炸药在不同时间的爆炸温度

Fig. 9 Explosion temperature maps of the emulsion explosive with  $6\% \text{TiH}_2$  powder at different times

### 3.2 $\text{TiH}_2$ 粉尘云的火焰温度测试

图 10 和图 11 分别为浓度为  $500$  和  $833 \text{ g/m}^3$  的  $\text{TiH}_2$  粉尘云火焰传播过程的温度云图。为了便于说明, 将点火时刻记为  $0 \text{ ms}$ 。可以看出, 火焰发展初期呈现球形传播<sup>[20]</sup>, 随着火焰的发展, 火焰锋面逐渐扭曲, 这是由于管内的湍流环境和粉尘云的分布不均匀, 并且  $\text{TiH}_2$  粉尘在高温作用下释放的  $\text{H}_2$  对火焰形状起到扰动作用。火焰前锋温度最高, 而越往火焰中心, 温度逐渐降低。造成这种现象的原因是, 火焰

前锋为燃烧反应区,  $O_2$  浓度更高, 粉尘和氢气燃烧的更加充分, 释放的热量更多。此外, 根据两种浓度下  $TiH_2$  粉尘云火焰传播温度图可以看到, 火焰下方温度最高。火焰结构自上而下的不均匀性被认为是粒子密度不同的结果<sup>[11]</sup>。火焰红色边缘厚度大约为 3~5 mm, 由于粉尘分散的不均匀性, 导致边缘区域并不总是很清晰的, 有些部位较厚。

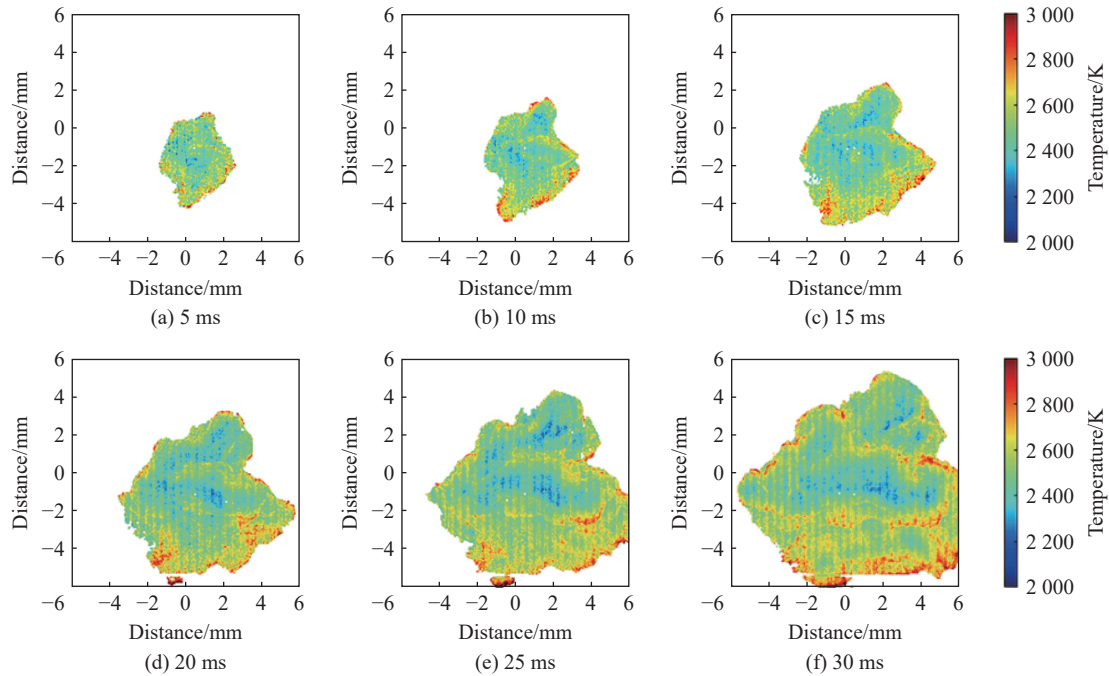


图 10 质量浓度为  $500 \text{ g/m}^3$  的  $TiH_2$  尘云中的火焰温度发展

Fig. 10 Flame temperature development in the  $500 \text{ g/m}^3$   $TiH_2$  dust clouds

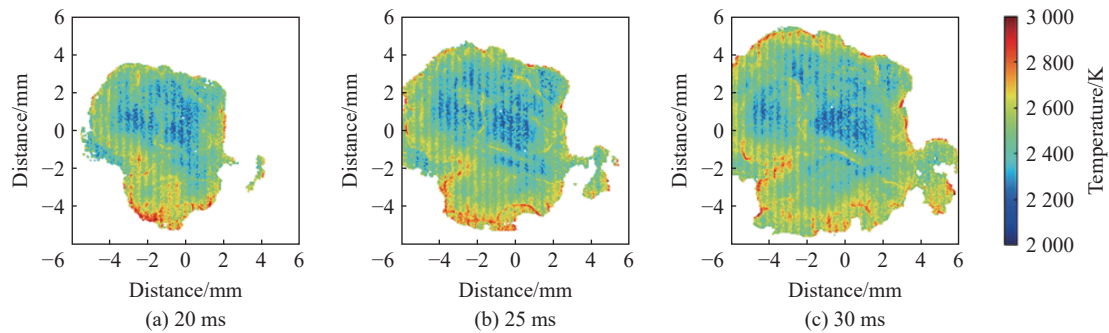
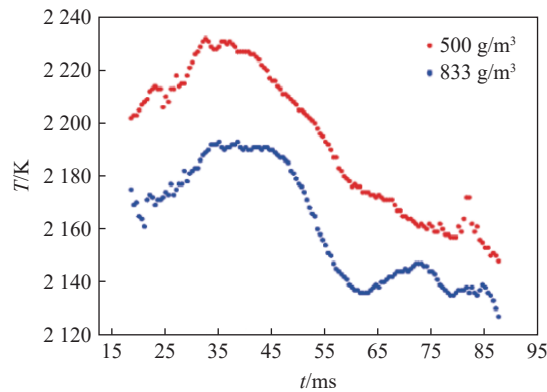


图 11 质量浓度为  $833 \text{ g/m}^3$  的  $TiH_2$  尘云中的火焰温度发展

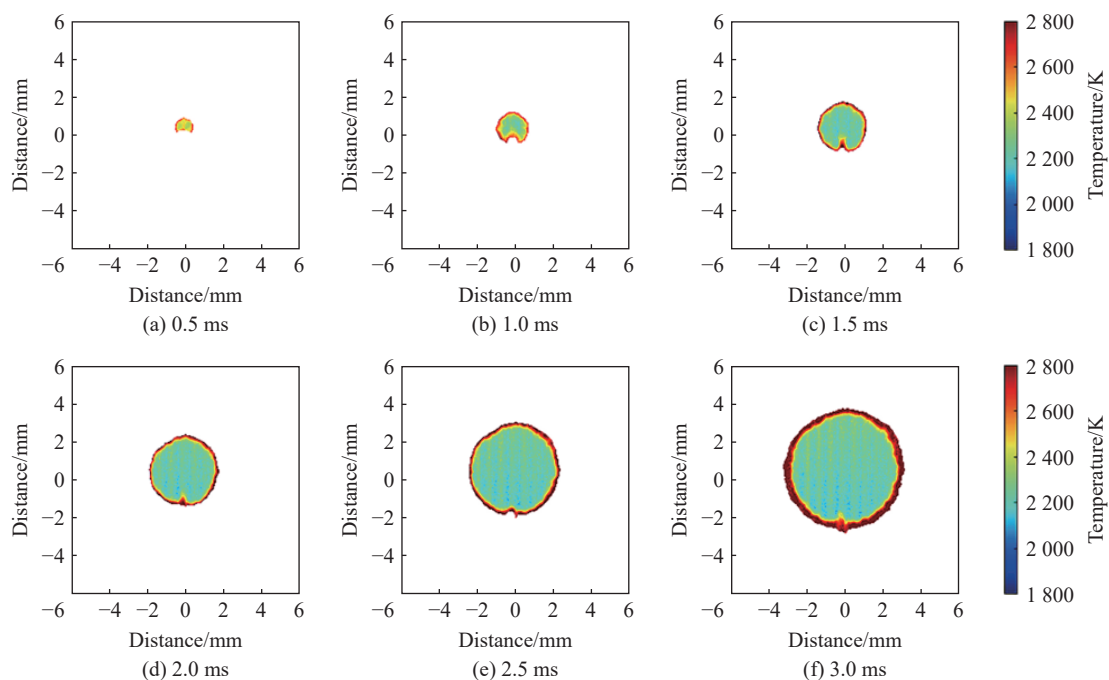
Fig. 11 Flame temperature development in the  $833 \text{ g/m}^3$   $TiH_2$  dust clouds

$TiH_2$  粉尘云火焰温度随时间的变化如图 12 所示, 忽略点火电极对初期火焰温度的影响, 粉尘云总体火焰平均温度呈现先增大后减小的趋势, 这是因为初始颗粒和  $H_2$  燃烧释放的热量, 使样品温度持续上升, 直至达到峰值。随着样品的消耗, 燃烧剧烈程度变小, 散热损失大于燃烧释放的热量, 温度开始下降。质量浓度为  $500 \text{ g/m}^3$  的粉尘火焰最高平均温度为  $2231 \text{ K}$ , 而  $833 \text{ g/m}^3$  最高平均温度为  $2192 \text{ K}$ 。这与 Young 等<sup>[21]</sup>采用宽带光辐射测温技术对  $TiH_2$  燃烧温度测试结果很好的吻合。质量浓度为  $500 \text{ g/m}^3$  的粉尘火焰平均温度高于  $833 \text{ g/m}^3$  的温度。产生该现象的原因可以归结为: 粉尘云浓度较高时, 单位体积内粉尘颗粒数量增多, 除燃烧颗粒外, 过剩的粉尘颗粒吸收了较多的热量, 火焰的温度反而会下降。

图 12 不同质量浓度的  $\text{TiH}_2$  粉尘云温度曲线Fig. 12 Temperature curves of  $\text{TiH}_2$  dust clouds with different concentrations

### 3.3 $\text{C}_2\text{H}_2$ 气体爆炸温度场的测试

采用二色比温方法研究了 10% $\text{C}_2\text{H}_2$ /90% 空气预混气体 ( $\text{C}_2\text{H}_2$  和空气的体积分数分别为 10% 和 90%) 火焰发展的温度分布。如图 13 所示。火焰传播初期温度分布均匀, 内部温度略低于边缘温度。随着火焰向外传播 (从点燃 1 ms 到点燃 3 ms), 边缘温度逐渐升高, 但平均温度开始降低, 内部温度降低幅度更大。造成这个结果的原因是火焰边缘相对内部有充足的  $\text{O}_2$ , 燃烧反应区可以对火焰封面进行不断的热量补充, 而内部大部分为燃烧产物, 且反应区热量对内部传递较困难。通过二色比温方法测得预混气体的最大平均温度值为 2523 K, 与文献 [22-24] 中提到的实验数据非常接近。

图 13 10% $\text{C}_2\text{H}_2$ /70% 空气火焰发展的温度分布图Fig. 13 Evolution of the flame temperature distribution of the 10%- $\text{C}_2\text{H}_2$ /70%-air mixture

## 4 结 论

(1) 由比色测温结果可知,  $\text{TiH}_2$  的引入会提高乳化炸药的爆炸温度并延缓爆炸火球温度的衰减。当  $\text{TiH}_2$  含量在 6% 时, 爆炸平均温度最大值为 3048 K, 相比空白乳化炸药提高了 41.5%。

(2)  $\text{TiH}_2$  粉尘云火焰在初期锋面较为光滑, 随着火焰的发展, 火焰锋面逐渐变的扭曲, 火焰温度由粉尘云中心向外逐渐升高, 并在火焰锋面处达到最大值。此外,  $\text{TiH}_2$  粉尘云的火焰平均温度整体呈现先增大后减小的趋势,  $500 \text{ g/m}^3$  的粉尘火焰平均温度高于  $833 \text{ g/m}^3$  的温度, 其最高平均温度分别为  $2231$  和  $2192 \text{ K}$ 。

(3)  $10\% \text{ C}_2\text{H}_2/90\%$  预混合空气爆炸早期火焰温度分布均匀, 内部略低于火焰边缘温度。随着火焰向外传播, 火焰边缘温度逐渐升高, 但平均温度开始降低, 内部温度降低幅度更大, 比色测温获得的最大平均温度值为  $2523 \text{ K}$ 。

(4) 利用比色测温技术, 可以有效获取气、固相爆炸的温度分布信息, 为爆炸瞬态温度场分布规律和影响因素的精细化研究提供了技术支持。

## 参考文献:

- [1] KAMLET M J, JACOBS S J. Chemistry of detonations: I: a simple method for calculating detonation properties of C-H-N-O explosives [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1968, 48(1): 23–35. DOI: 10.1063/1.1667908.
- [2] BASSETT W P, DLOTT D D. High dynamic range emission measurements of shocked energetic materials: octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX) [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(22): 225103. DOI: 10.1063/1.4953353.
- [3] FROST D L, CLEMENSON J M, GOROSHIN S, et al. Thermocouple temperature measurements in metalized explosive fireballs [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, 46(6): 899–911. DOI: 10.1002/prop.202000328.
- [4] LEBEL L S, BROUSSEAU P, ERHARDT L, et al. Measurements of the temperature inside an explosive fireball [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2013, 80(3): 031702. DOI: 10.1115/1.4023561.
- [5] LEWIS W K, RUMCHIK C G. Measurement of apparent temperature in post-detonation fireballs using atomic emission spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(5): 056104. DOI: 10.1063/1.3089251.
- [6] ADUEV B P, NURMUKHAMETOV D R, LISKOV I Y, et al. Measuring the temperature of PETN explosion products with iron inclusions [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2017, 53(3): 349–352. DOI: 10.1134/S0010508217030133.
- [7] OLOKUN A, LI B, PRAKASH C, et al. Examination of local microscale-microsecond temperature rise in HMX-HTPB energetic material under impact loading [J]. *JOM*, 2019, 71(10): 3531–3535. DOI: 10.1007/s11837-019-03709-z.
- [8] WANG L Y, DU H M, XU H. Compensation method for infrared temperature measurement of explosive fireball [J]. *Thermochimica Acta*, 2019, 680: 178342. DOI: 10.1016/j.tca.2019.178342.
- [9] GOROSHIN S, FROST D L, LEVINE J, et al. Optical pyrometry of fireballs of metalized explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(3): 169–181. DOI: 10.1002/prop.200600024.
- [10] DENSMORE J M, HOMAN B E, BISS M M, et al. High-speed two-camera imaging pyrometer for mapping fireball temperatures [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(33): 6267–6271. DOI: 10.1364/AO.50.006267.
- [11] CHANG P J, MOGI T, DOBASHI R. An investigation on the dust explosion of micron and nano scale aluminium particles [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 70: 104437. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104437.
- [12] KEYVAN S, ROSSOW R, ROMERO C. Blackbody-based calibration for temperature calculations in the visible and near-IR spectral ranges using a spectrometer [J]. *Fuel*, 2006, 85(5/6): 796–802. DOI: 10.1016/j.fuel.2005.08.033.
- [13] ADAMS JR J E, HAMILTON JR J F. Adaptive color plane interpolation in single sensor color electronic camera: US5652621A [P]. 1997-07-29.
- [14] 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.
- [15] YAO Y L, CHENG Y F, ZHANG Q W, et al. Explosion temperature mapping of emulsion explosives containing  $\text{TiH}_2$  powders with the two-color pyrometer technique [J/OL]. *Defence Technology*, (2021-10-12)[2021-11-15]. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.09.020>. DOI: 10.1016/j.dt.2021.09.020.
- [16] CHENG Y F, MA H H, SHEN Z W. Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by  $\text{MgH}_2$  [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, 49(5): 614–619. DOI: 10.1134/S0010508213050134.
- [17] 程扬帆, 方华, 刘文近, 等. 乳化炸药中空功能微囊的制备方法及其性能表征 [J]. *含能材料*, 2019, 27(9): 792–800. DOI:

- 10.11943/CJEM2019039.
- CHENG Y F, FANG H, LIU W J, et al. Preparation and application of functional hollow microcapsules in emulsion explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(9): 792–800. DOI: 10.11943/CJEM2019039.
- [18] SILVESTROV V V, BORDZILOVSKII S A, KARAKHANOV S M. Detonation temperature measurement of the emulsion explosive [J]. *Doklady Physics*, 2014, 59(9): 398–400. DOI: 10.1134/S1028335814070131.
- [19] CHENG Y F, MENG X R, FENG C T, et al. The effect of the hydrogen containing material  $\text{TiH}_2$  on the detonation characteristics of emulsion explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(6): 585–591. DOI: 10.1002/prop.201700045.
- [20] 刘文近, 程扬帆, 陆松来, 等. PVAc 弹性微球包覆的高能化学点火具的点火性能 [J]. *含能材料*, 2018, 26(6): 530–536. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.06.011.
- LIU W J, CHENG Y F, LU S L, et al. Ignition performance of the high energy chemical igniter coated with a PVAc elastic microsphere [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(6): 530–536. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.06.011.
- [21] YOUNG G, JIAN G Q, JACOB R, et al. Decomposition and ignition characteristics of titanium hydride at high heating rates [J]. *Combustion Science and Technology*, 2015, 187(8): 1182–1194. DOI: 10.1080/00102202.2015.1019619.
- [22] 王文涛, 程扬帆, 姚雨乐, 等. 当量比对乙炔/空气爆炸特性和火焰速度的影响 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2022, 53(2): 433–442.
- WANG W T, CHENG Y F, YAO Y L, et al. Effects of equivalence ratios on explosion characteristics and flame speeds of acetylene/air mixture [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(2): 433–442. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.02.008
- [23] 高志崇. 烃燃烧反应机理探讨 [J]. *辽宁大学学报 (自然科学版)*, 2002, 29(3): 266–271. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5846.2002.03.017.
- GAO Z C. Mechanism of hydrocarbon combustion reaction [J]. *Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 29(3): 266–271. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5846.2002.03.017.
- [24] CHINTERSINGH K L, NGUYEN Q, SCHOENITZ M, et al. Combustion of boron particles in products of an air–acetylene flame [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 172: 194–205. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.07.014.

(责任编辑 王小飞)