

# 温压炸药爆炸瞬态高温测试技术研究

马旭静<sup>1</sup>, 孙鹏<sup>1</sup>, 张骏虎<sup>2</sup>, 刘睿辰<sup>1</sup>, 王高<sup>1</sup>

(1. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 太原 030051;  
2. 山西江淮重工有限责任公司, 山西 晋城 048026)

**摘要:** 为评估温压炸药的热毁伤性能, 针对其爆炸瞬间产生高温高压场温度变化剧烈、持续时间短、测量难度大且难以测到爆炸瞬间火球温度分布的问题, 提出了一种接触式与非接触式测温混合测试方法, 搭建了红外热像仪和热电偶测温系统, 对洞内外两发温压炸药的爆炸过程进行测试; 使用两台红外热像仪分别以高低帧频拍摄, 同时在距离爆心一定距离处布置钨铼热电偶, 从不同时间不同位置获取了火球不同维度的信息, 实现了爆炸温度变化全过程的高帧频、高分辨率完整记录; 对温压爆炸过程中温度变化进行了精细化研究; 其中, 洞内爆炸最高温度可达 1 800 °C 以上, 火球最大直径约为 8.3 m, 洞外爆炸最高温度可达 1 700 °C 以上, 火球最大直径约为 7.7 m, 山洞的限制作用使得火球最高温度更高, 1 800 °C 以上持续时间为 14 ms, 热毁伤效果更强; 洞内外温压弹爆炸最高温度测试结果的最大偏差分别为 5.1% 和 5.8%, 平均偏差为 5.45%, 处于一定合理的范围内, 可以满足爆炸场测试需求。

**关键词:** 温压炸药; 红外热像仪; 热电偶; 热毁伤; 瞬态温度

## Research on Transient High Temperature Testing Technology for Explosion of Thermostatic Explosives

MA Xujing<sup>1</sup>, SUN Peng<sup>1</sup>, ZHANG Junhu<sup>2</sup>, LIU Ruichen<sup>1</sup>, WANG Gao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Shanxi Jianghuai Heavy Industry Co., Ltd., Jincheng 048026, China)

**Abstract:** In order to evaluate the thermal damage performance of thermal pressure explosives and address the issues of intense temperature changes, short duration, high measurement difficulty, and difficulty in measuring the temperature distribution of the fireball at the moment of explosion, a mixed testing method for contact and non-contact temperature measurement was proposed. The infrared thermal imager and thermocouple temperature measurement system were built to test the explosion process of two thermal pressure explosives inside and outside the tunnel. Two infrared thermal imagers were used to shoot at high and low frame rates respectively, and tungsten rhenium thermocouples were placed at a certain distance from the explosion center. The information from different dimensions of the fireball was obtained at different times and locations, completely recording the entire process of explosion temperature changes with the high frame rate and resolution, which studied the temperature changes during the temperature pressure explosion process in detail. Among them, the maximum temperature of the explosion inside the cave can reach by over 1 800 °C, the maximum diameter of the fireball by about 8.3 m, the maximum temperature of the explosion outside the cave by over 1 700 °C, and the maximum diameter of the fireball by about 7.7 m. The cave makes the maximum temperature of the fireball higher, with a duration of 14 ms and temperature of over 1 800 °C, and the thermal damage effect is stronger. Test results for the temperature and pressure bombs inside and outside the tunnel show that the maximum deviation of the highest temperature is 5.1% and 5.8%, respectively, with an average deviation of 5.45%, which is within a reasonable range and can meet the requirements of explosion field testing.

**Keywords:** thermobaric explosives; infrared thermal imager; thermocouple; heat damage; transient temperature

## 0 引言

温压炸药是一种混合燃料炸药, 基于燃烧和爆炸两种释能方式产生高强度的热和长时间的压力, 在结构复杂的地下坑道和设施中具有独特的杀伤机制和优势<sup>[1]</sup>, 特别是对隐藏在地下、洞穴和建筑物内的敌人, 使其因缺氧窒息而死, 爆炸形成的高温火球和爆炸波可以沿廊道传播并绕

过角落进入到破片不能到达的地方, 对敌人有生力量、轻型装备等有效毁伤。温压炸药的爆炸过程主要分为 3 个阶段: 第一阶段是燃料抛撒过程, 战斗部燃料粒子抛撒, 释放出一部分能量和富含燃料的产物, 持续时间为几个微秒。第二阶段是绝热膨胀过程, 燃料粒子 (Al 粉等) 和爆轰产物 (CO、NO、H<sub>2</sub>O 等) 的无氧燃烧反应, 持续时间为几

收稿日期: 2023-10-13; 修回日期: 2023-11-10。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62105305); 山西省基础研究计划资助项目 (20210302123068); 基础加强计划重点基础研究项目 (2019-JCJQ-ZD-138-00)。

作者简介: 马旭静 (1997-), 女, 硕士研究生。

引用格式: 马旭静, 孙鹏, 张骏虎, 等. 温压炸药爆炸瞬态高温测试技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 204-210, 217.

百微秒。第三阶段是空气中的氧气与金属粒子, 燃料和未氧化完全的爆轰产物发生有氧燃烧反应, 持续时间可达几百毫秒到数秒<sup>[1]</sup>。目前, 随着大当量战斗部的研制不断深入, 针对爆炸场热毁伤效应的测量与评估越来越受到人们的重视<sup>[2]</sup>。

由于温压弹爆炸瞬间具有爆炸温度高、爆炸范围广、短时间温度剧烈变化等特点, 目前对爆炸场温度的测量采用传统的测温方式很难做到精确测量, 国内外关于温压炸药的热毁伤方面的研究相对较少。南京理工大学仲倩应用红外热成像技术分析了温压药剂爆炸火球温度随时间变化规律<sup>[3]</sup>, 许仁翰提出了基于高速成像的爆炸场温度测试方法, 建立高速相机图像灰度值和爆炸场温度之间的关系<sup>[4]</sup>; Frost 等人使用 K 型热电偶对添加金属铝颗粒炸药的火球温度进行了测量<sup>[5]</sup>; Goroshin 等使用集成光谱仪和三色高温计记录爆炸火球的瞬态可见辐射, 测得了添加不同金属粉末炸药爆炸产生的火球的瞬态温度<sup>[6]</sup>; Hongwei Hu 等使用比色温度计测量爆炸火球表面温度<sup>[7]</sup>。Lebel 等采用钢管保护的光纤探针测量爆炸火球温度<sup>[8]</sup>; Hobbs 等人使用压力传感器和自制红外辐射温度计对炸药爆炸早期火球膨胀温度进行了测量<sup>[9]</sup>。但是比色温度计、高温计、光谱仪只能测得温度, 无法获得整个爆炸过程的图像信息, 而且工作波段对实验结果精度较大。热电偶、光纤探针以及红外辐射温度计也只能获得单点的温度信息, 无法获得整个温度场的时空温度分布信息。而基于辐射原理的红外测温具有非接触性、动态范围大、可测得瞬态变化的物体、不改变温度场分布、可获得火球图像信息等优点, 但是一台热像仪受帧频限制, 所捕获的图像信息有限, 所以本文提出了两台不同帧频红外热像仪与自制钨铼热电偶相结合的测试方法, 对处在山洞内外的两发温压弹爆炸形成的火球温度场进行测试, 从不同时间不同位置获取了火球不同维度的信息, 得到了火球表面温度的时空分布, 从时间和空间两方面扩大测试范围<sup>[10]</sup>, 对温压弹的爆炸过程进行分时精细化研究, 从而对其热毁伤性能评估做出更全面判断。同时, 也对我国相关温压药剂毁伤能力测试以及爆炸反应机理研究具有重要意义。

## 1 测温原理

### 1.1 红外热像仪测温原理

自然界中, 任何高于绝对零度的物体都会向外辐射不同波长的电磁波, 其中波长处于 0.7~1 000 μm 范围的电磁波被定义为红外线, 物体本身温度越高, 其向外辐射红外线的能力越强。红外热像仪是利用被测目标与背景环境由于温度和发射率差异所产生的热对比度不同, 将红外辐射能量密度分布转换为可见光显示出来<sup>[11]</sup>。其内部红外探测器不断读取成像物镜上所接收的红外辐射能量, 经过电路运算放大将其转化为电信号, 再通过普朗克定律将能量转化为温度值, 最后通过显示器显示成为一幅描绘物体或场景变化的视觉图像。其测量原理如图 1 所示。

应用红外热像仪对温压炸药爆炸产生的火球进行测温

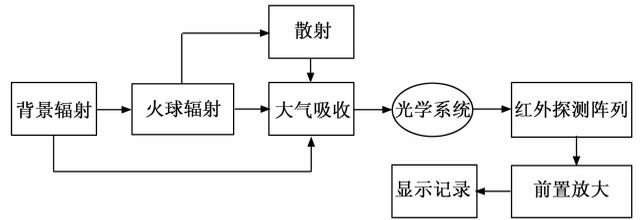


图1 红外热像仪辐射原理测量图

时, 其所接收到的有效辐射主要有三部分: 目标物体辐射、周围环境反射到物体的辐射以及大气辐射。其测温物理模型如图 2 所示, 测温基本公式为<sup>[12]</sup>:

$$f(T_o') = \tau_a \epsilon f(T_o) + \tau_a (1 - \alpha) f(T_u) + \epsilon_a f(T_a) \quad (1)$$

$T_o'$  表示热像仪显示的辐射温度, °C;  $\tau_a$  代表大气透射率;  $\epsilon$  表示所测目标物发射率;  $\alpha$  表示所测物吸收率;  $T_o$  为被测物表面真实温度, °C;  $T_u$  为环境温度, °C。

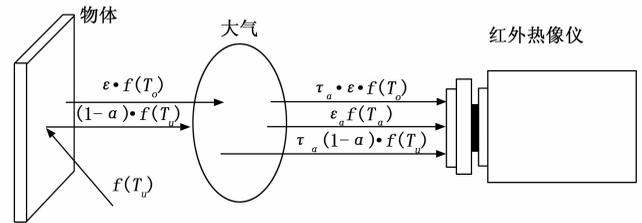


图2 红外热像仪测温物理模型

不同红外热像仪其内部的红外探测器的光谱响应度随波长的变化是不同的。根据其变化关系可将其按照以下函数进行拟合。

$$f(T) \approx CT^n \quad (2)$$

$C$  是与红外热像仪工作波段相关的常数, 为  $2.925 \times 10^{-12}$ ,  $n$  是与探测器材料和波段相关的常数, 本次所用 3~5 μm 的 HgCdTe 探测器,  $n$  为 5.33, 将式 (2) 代入式 (1) 可获得目标的真实温度的表达式为<sup>[11-12]</sup>

$$T_o = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[ \frac{1}{\tau_a} T_o'^n - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\epsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{1/n} \quad (3)$$

影响爆炸火球发射率的主要因素是未充分燃烧的碳颗粒(炭黑)和其添加的金属粉等燃烧产生的金属氧化物。在温压弹爆炸瞬间的高温条件下, 炭黑与金属氧化物可以近似为灰体<sup>[13]</sup>。结合文献 [5] 和文献 [12] 确定火球在 3~5 μm 波段的平均发射率为 0.5。

### 1.2 热电偶测温原理

热电偶的测温原理是基于材料的塞贝克效应(第一热电效应)实现的, 其测温原理如图 3 所示。两种不同导体 A 和 B 串联在一起构成闭合回路, 结合点 1 即为测试端(热端), 另一端 2 为参考端(冷端), 当热端放在温场中测量时, 两端存在温差, 就会在回路中产生温差电动势  $E_{AB}$ , 即

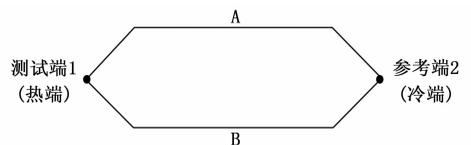


图3 热电偶测温原理图

$$E_{AB}(t_1, t_2) = E_{AB}(t_1) - E_{AB}(t_2) \quad (4)$$

电动势的大小是温差的函数<sup>[14]</sup>，温度测量测的是热端 1 的热电势， $E_{AB}(t_1, t_2)$  是热电偶的热电势。所以只要测出  $E_{AB}(t_1, t_2)$  和  $E_{AB}(t_2)$ ，便可得到测试端 1 的温度。

## 2 实验方案设计与测试方法

结合具体的靶场实际环境，实验采用两台红外热像仪和热电偶相结合的方式对温压炸药爆炸过程的温度信息进行采集，目的在于获取爆炸过程中火球不同维度下的时空分布信息以及外围一定距离处的温度场变化信息。为保证在爆炸瞬间采集到温度信息，红外热像仪和热电偶测温装置均通过同步触发装置控制信号采集，同步触发装置另一端通过触发线连接到爆炸弹体上。

### 2.1 实验仪器

测试手段分为两种，一种是接触式，使用自制的钨铼热电偶定点测温。另一种是非接触式，主要仪器设备包括两台高速红外热像仪，一台采用高帧频拍摄，目的在于捕获爆炸瞬间的小火球，另一台采用低帧频拍摄，捕获温压弹爆炸的全过程。两台红外热像仪参数设置如表 1 所示，钨铼热电偶参数如表 2 所示。

表 1 两台红外热像仪参数设置

	分辨率	帧频/Hz	积分时间/ $\mu$ s	焦距/mm	光谱范围/ $\mu$ m
高帧频红外热像仪	280 × 180	1 000	25	100	3~5.1
低帧频红外热像仪	640 × 512	200	25	100	3~5.1

表 2 钨铼热电偶参数

测试环境	洞内	洞外
测试距离/m	3	3
测试传感器/mm	$\varphi$ 0.25	$\varphi$ 0.25
	$\varphi$ 0.08	$\varphi$ 0.08

为提高温度采集的可靠性，每组热电偶测温装置均由偶丝直径为 0.25 mm、0.08 mm 的 2 个 D 型钨铼热电偶组成，并采用标准铂铑 30-铂铑 6 (B 型) 热电偶对其静态标定，最大误差为 5.2 °C。其中，偶丝被封装在刚玉管中并用热熔胶固定，再将刚玉管封装在铜制合金保护管内，以增强其抗冲击和震动的能力，保证在有限的试验次数下采集到更多更有效的温度数据。

### 2.2 现场布局

现场布局如图 4 所示，图 4 (a) 为洞内爆炸，图 4 (b) 为洞外爆炸。温压弹放置在木质弹架上，距地面高度为 1.5 m。两台红外热像仪按照布局图布置，钨铼热电偶固定在钢制基座上，调节基座使热电偶与爆心处在同一个水平高度，距离爆心 3 m，通过补偿导线与数据采集装置进行连接，最后传输到电脑端，实现数据的采集、传输和保存，数据采集装置采样频率设置为 1 kHz。

### 2.3 误差分析

#### 2.3.1 系统误差

热电偶的特性会随其成分、微观结构与残余应力的微

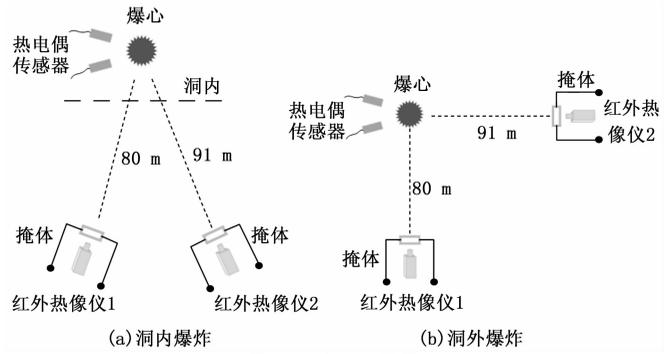


图 4 现场布局图

小变化，即使型号相同的热电偶，其 E-t 关系也不一致<sup>[15]</sup>。根据我国钨铼热电偶丝的国标 (GB/T 29823)，W-Re5/26 热电偶，当测温范围为 0~400 °C 时，其允差为 ±4.0 °C，当测温范围为 400~2 315 °C 时，其允差为 ±1.0% t<sup>[16]</sup>。当被测温度很高时，且热电偶长期在含碳氢化合物的气氛中使用时，其表面会因氧化作用而发生腐蚀，引起劣化，该现象会改变热电性能，使热电性能超过允差，甚至可能导致热电偶脆化<sup>[17]</sup>，导致测温结果不准确。由文献 [11] 可知，温压炸药爆炸瞬间时间极短，远小于传感器的使用寿命，因此，可以忽略由劣化现象引起的传感器测量误差。

#### 2.3.2 测试环境误差

温压炸药爆炸产生的火球发出的红外辐射在经过大气传输到达红外热像仪内部探测器的过程中，会发生大气衰减，使红外热像仪所探测到的能量小于温压炸药爆炸火球所辐射出的能量，从而引起误差。

大气中有很多不利于红外辐射传输的成分，吸收和散射是同时存在的，其中水汽吸收和二氧化碳吸收较为明显，其所导致的大气衰减都遵循朗伯-比尔定律<sup>[18]</sup>。因此，可以得到大气的光谱透过率为：

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda)\tau_s(\lambda) \quad (5)$$

其中： $\tau_a(\lambda)$  和  $\tau_s(\lambda)$  分别是与吸收和散射有关的透过率<sup>[19]</sup>。

因此，采用高精度温湿度计和激光测距仪对实验现场的温度、湿度、测试距离等信息进行采集，通过查询对应光谱范围的大气透过率表格来计算测试路径上的大气透过率，从而对红外热像仪采集到的温度进行校正处理，最终得出爆炸火球表面的实际温度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 红外热像仪观察到的火球演变过程

两台红外热像仪记录了山洞内外两发温压弹爆炸的全过程。图 5 和图 6 节选了洞内爆炸的火球演变过程，图 7 和图 8 节选了洞外爆炸的火球演变过程。

由图 5 和图 6 可知，高帧频相机捕获了温压炸药爆炸瞬间的小火球状态，可以看出初始小火球呈现球形，亮度分布较均匀，火球的体积先迅速变大后又缓慢变小，演变过程主要分为 3 个阶段。首先是迅速成长阶段，爆轰瞬间，战斗部内部装药能量释放，瞬间团聚在一起形成小火球，

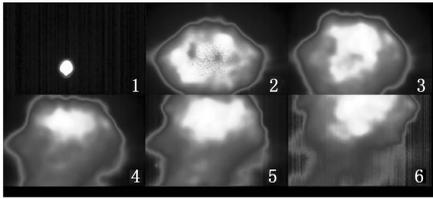


图5 洞内火球演变过程 (高帧频)

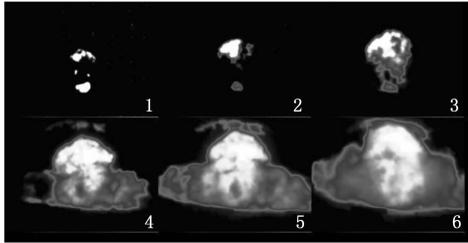


图6 洞内火球演变过程 (大视场)

从低帧频大视场拍摄的结果来看, 由于山洞的空间限制, 火球主要被分成了上下两部分, 随着药剂的抛撒以及与空气的混合, 进入高温阶段, 火球逐渐演化形成一个“草帽状”的高热云团, 其中温度最高区域位于“帽顶”位置, 此时火球体积达到最大, 亮度达到最高, 由于此阶段火球温度最高, 与环境对比明显, 火球具有较为明显的边界。从图5高帧频拍摄的4和5来看, 高亮区域变小后又变大, 说明其具有明显的后燃反应。而后火球体积逐渐变小, 四处分散, 中心高亮区域逐渐扩散至边缘, 亮度逐渐变暗, 最后形成大面积不规则的燃烧火焰, 消失在红外热像仪视野范围中。

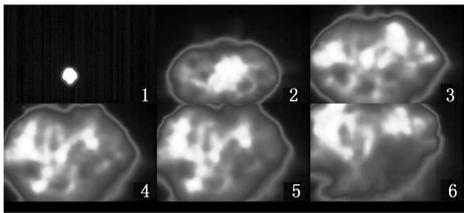


图7 洞外火球演变过程 (高帧频)

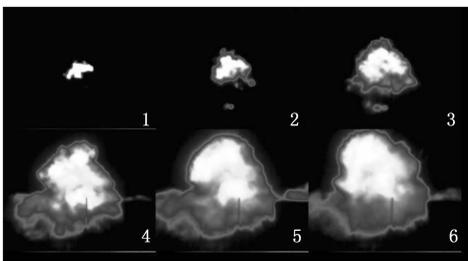


图8 洞外火球演变过程 (大视场)

由图7和图8可知, 爆炸初始瞬间, 小火球呈现椭球型, 由于在洞外开阔地带爆炸, 火球扩散没有受到空间限制, 形成一个大火球, 随着药剂充分混合, 火球呈现出“蘑菇云”状, 热像仪视野范围内出现多个高温区。一些区域先亮后暗又变亮, 说明温压炸药具有后燃反应, 高亮区

域基本处在爆炸火球的几何中心偏上位置, 随着火球的扩散, 其高亮区域逐渐增加, 但其占火球总面积逐渐降低, 最后形成大面积不规则燃烧区域, 消失在红外热像仪视野范围中。

### 3.2 接触式热电偶测温系统结果

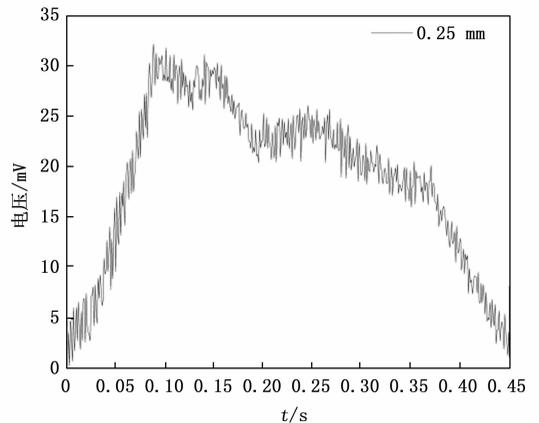
铎铍热电偶温度传感器共测得3组数据, 测试结果如表3所示。由于洞外的0.08 mm直径热电偶在爆炸过程中被撕裂, 没有输出完整信号。

表3 铎铍热电偶测试结果

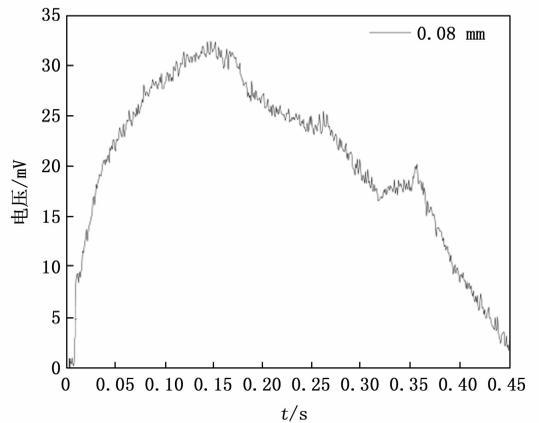
测试环境	传感器直径/mm	最高温度/℃	最高时刻/ms	持续时间/ms
洞内	0.25	1 760	88	315
	0.08	1 784	175	339
洞外	0.25	1 678	158	266
	0.08	—	—	—

#### 3.2.1 洞内爆炸温度场测试结果

偶丝直径为0.25 mm及0.08 mm的热电偶输出信号如图9(a)和图9(b)所示。通过对测试数据的处理和分析, 得出0.25 mm直径的热电偶在88 ms时刻达到最高温度, 为1 760 ℃, 1 000 ℃以上持续时间约为315 ms。0.08 mm直径的热电偶在175 ms时刻达到最高温度, 为1 784 ℃,



(a) 0.25 mm



(b) 0.08 mm

图9 两种不同直径热电偶测试结果

1 000 °C 以上持续时间约为 339 ms。

### 3.2.2 洞外爆炸温度场测试结果

偶丝直径为 0.25 mm 的热电偶输出信号如图 10 所示。通过对测试数据的处理和分析,得出 0.25 mm 直径的热电偶在 158 ms 时刻达到最高温度,为 1 678 °C,1 000 °C 以上持续时间约为 266 ms。

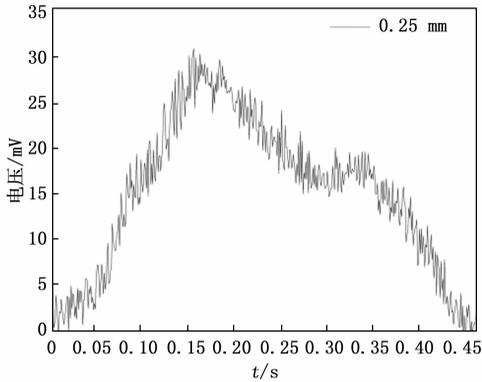


图 10 0.25 mm 直径热电偶测试结果

### 3.3 爆炸火球的热毁伤性能评估

温压弹爆炸产生的火球内部发生的传热主要是热传导和热对流两种模式,而热辐射主要发生在火球外部,对火球周围的目标有强烈的毁伤作用。火球直径尺寸的大小、燃烧持续时间、火球温度等是分析其热毁伤效应的特征参数。因此,对燃烧火球的特征参数的准确测试和分析,是建立可靠的燃烧热辐射毁伤理论的基础,也是评估燃烧毁伤效果的前提<sup>[20]</sup>。

#### 3.3.1 红外热像仪测得的火球温度数据

在红外热像仪的软件中,设定实验环境温湿度、能见度、测试距离和火球表面发射率等参数,最终得到修正后火球表面的温度值。如图 11 和图 12 为两发弹爆炸产生的火球表面最高温度—时间曲线图。表 4 和表 5 为两发弹两个机位的最高温度统计结果。

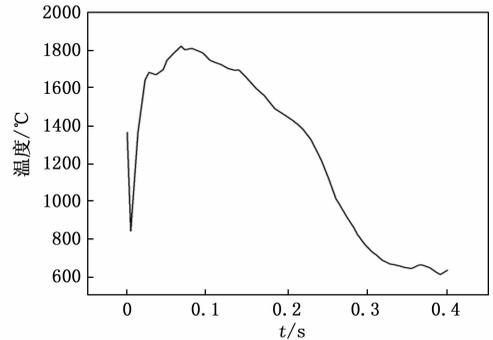
表 4 洞内爆炸最高温度结果

	初始峰值/°C	二次峰值/°C
低帧频机位	1 362	1 817
高帧频机位	1 578	1 851

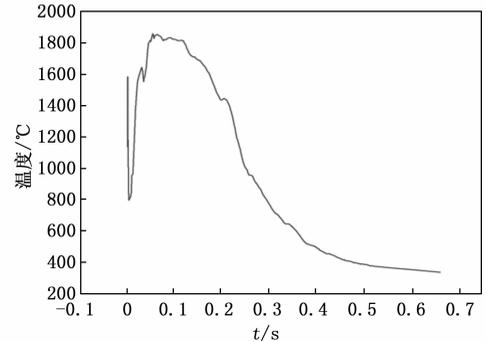
表 5 洞外爆炸最高温度结果

	初始峰值/°C	二次峰值/°C
低帧频机位	—	1 762
高帧频机位	1 291	1 776

由图 11 (a) 和图 11 (b) 可知,洞内爆炸产生的火球表面最高温度随时间变化曲线大致呈倒“U”型,在爆炸瞬间表面温度极高,首先达到初始峰值,而后又有一个短暂的回落过程,由于二次燃烧,温度再次升高,达到全程最高温。结合温压弹爆炸的释能规律,爆炸瞬间爆轰产物体积迅速膨胀,火球温度达到第一次峰值,随着爆轰产物与

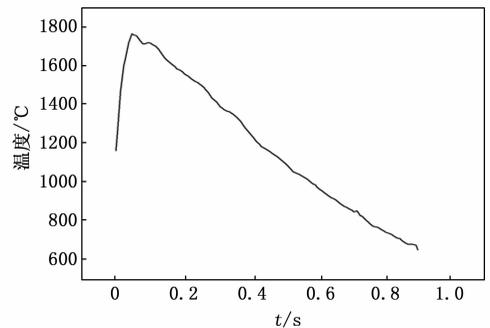


(a) 低帧频机位

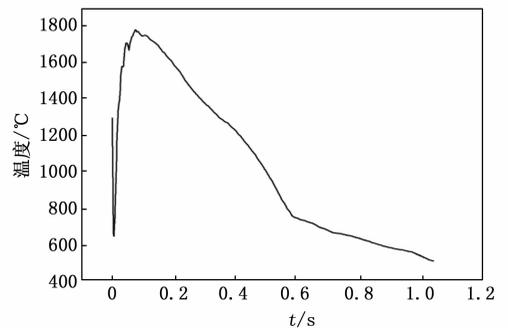


(b) 高帧频机位

图 11 火球表面最高温度—时间图



(a) 低帧频机位



(b) 高帧频机位

图 12 火球表面最高温度—时间图

空气中氧气的反应,其内部所添加的高热值金属粉在热作用下活性增加,继续燃烧释放出大量的热,使得温度再次升高,达到爆炸全程最高温。且由于山洞的空间限制,爆炸产物反应更加完全,使得热效应向洞内扩散。另一方面,冲击波会在山洞内壁反射向洞内传播,大大增加了温场的持续时间和作用区域,对隐藏在洞内的敌人和轻型装备具

有更强烈的毁伤效应。

洞外爆炸也具有同样的变化过程, 如图 12 (a) 和图 12 (b) 所示。与洞内爆炸不同的是, 洞外爆炸产生的火球表面最高温度随时间变化曲线大致呈倒“V”型, 其火球表面温度达到最大值之后下降相对较快, 且通过对比以上 4 个图, 不难看出, 洞外爆炸的火球表面最高温度低于洞内爆炸的火球表面最高温度。这是由于洞外爆炸在开阔地带, 爆轰产物迅速膨胀, 与空气混合后导致温度下降, 降低了后燃反应的效率。

### 3.3.2 温度场分布

为了更准确地对火球的热毁伤性能进行评估, 直观地观察到爆炸火球温度场的分布情况, 通过 Matlab 软件进行图像分析处理得到了洞内外两发温压弹爆炸瞬间小火球(高帧频机位捕获)和爆炸火球直径最大(低帧频机位捕获)时温度梯度分布的二维等温线和三维温度分布图,

如图 13 所示。

由图 13 可知, 高帧频捕捉到的两发弹第一帧的小火球温度梯度分布都很均匀, 都是中心温度高, 周围温度低, 基本成等差数列分布, 爆炸瞬间的中心温度均可达 1 000 °C 以上。火球直径最大时, 温度分布没有爆炸瞬间小火球的温度分布均匀, 但中心温度较高, 洞内爆炸温度可达 1 700 °C 以上, 洞外爆炸温度达 1 600 °C 以上。

### 3.3.3 火球的毁伤直径、燃烧持续时间

爆炸前, 通过对靶场爆炸现场的几何标定, 得出实际视场与红外热像仪视场中像素点个数的比例关系, 并利用软件处理采集到的火球数据, 得到了洞内和洞外爆炸火球表面温度  $\geq 1\,000\text{ °C}$  的直径变化曲线, 如图 14 所示。表 6 给出了两发弹爆炸形成的火球表面不同温度范围的温度场持续时间, 以进一步对温压炸药的热毁伤效果进行评估。

温压弹爆炸瞬间形成温度梯度分布较均匀的小火球,

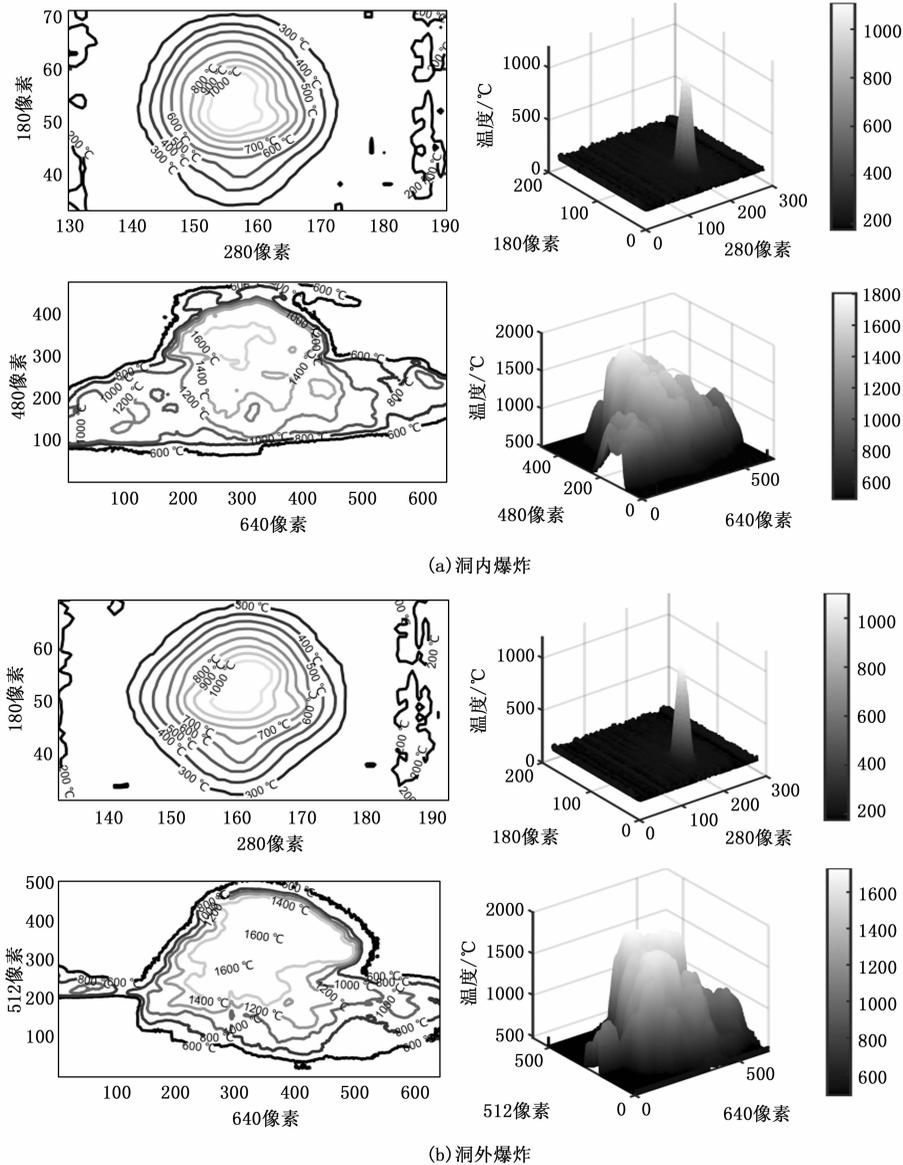


图 13 火球温度分布图

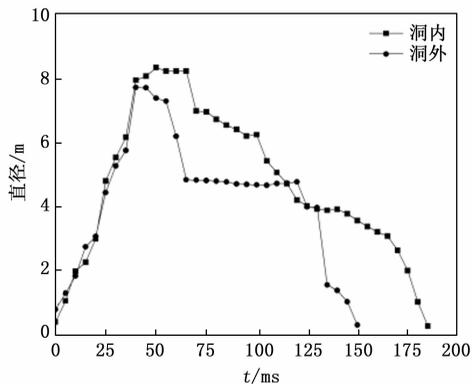


图 14 火球直径变化曲线

火球直径较小，随着爆轰产物与周围空气中的氧气充分混合，直径呈线性增大。其中，洞内爆炸在大约 50 ms 后火球直径达到最大值，约为 8.3 m，洞外爆炸在大约 40 ms 后火球直径达到最大值，约为 7.7 m。当火球直径最大时，其表面温度并没有达到最大值，结合温压弹的爆炸机理，爆炸瞬间不消耗空气中的氧气，随着爆轰产物的扩散燃烧，以及战斗部添加的金属粉末在一定温度下燃烧释放大热量，使得火球发生二次燃烧，温度值达到最大。

表 6 不同温度范围的持续时间

	≥1 000 °C / ms	≥1 500 °C / ms	≥1 700 °C / ms	≥1 800 °C / ms
洞内爆炸	311	162	81	14
洞外爆炸	282	158	70	—

由表 6 可知，洞内爆炸火球表面最高温度大于 1 800 °C 的持续时间为 14 ms，而洞外爆炸火球表面最高温度大于 1 800 °C 的持续时间为 0 ms，洞内爆炸火球表面最高温度大于 1 000 °C 的持续时间约为洞外爆炸的 1.1 倍，洞内爆炸由于受到山洞内壁的限制，壁面反射回的冲击波加剧了湍流燃烧程度，产物中未被氧化的金属粉末在高温下又与空气中的氧气反应，从而加剧了后燃效应，使得高温时间持续时间长，二次峰值大，火球直径衰减速度比洞外爆炸慢。而洞外爆炸由于爆轰产物体积迅速膨胀，距离爆心位置越远，对周围环境和空气做功越多，温度下降越快，火球直径的衰减速度也就越快。

### 3.3.4 爆炸温度测量结果对比

表 7 给出了接触式和非接触式测得的火球最高温度。其中，洞内爆炸最大偏差为 5.1%，洞外爆炸最大偏差为 5.8%。由于温压炸药爆炸温度上升快，热电偶距离爆心有一定距离，测得的温度较红外热像仪测得的低一些。并且，洞外爆炸最高温度低于洞内爆炸。

表 7 爆炸温度测量数据对比

	红外热像仪 (低帧频)/°C	红外热像仪 (高帧频)/°C	φ0.25mm 热电偶/°C	φ0.08mm 热电偶/°C	最大测 量偏差/%
洞内	1 817	1 851	1 760	1 784	5.1
洞外	1 762	1 776	1 678	—	5.8

## 4 结束语

针对温压炸药爆炸场温度变化剧烈、持续时间短、测量难度大、且难以测到爆炸瞬间火球温度分布的问题，提出了一种接触式与非接触式测温混合测试方法。两台红外热像仪采用高低帧频结合拍摄，分别从不同位置获取了火球不同时间不同维度的信息，从时间和空间两方面扩大了测试范围，对温压炸药爆炸过程进行了精细化研究，实现了爆炸温度变化全过程的高帧频、高分辨率完整记录，弥补了在爆炸场温度测试中分辨率和帧频相互制约的缺陷。

1) 研究了山洞内外两发温压弹爆炸的温度场分布以及热效应相关参数，利用 MATLAB 绘制了二维等温线图和三维温度分布图，并绘制了火球直径变化曲线。洞内爆炸形成的火球，最高温度可达 1 800 °C 以上，火球最大直径约为 8.3 m，1 000 °C 以上持续时间大于 310 ms；洞外爆炸最高温度可达 1 700 °C 以上，火球最大直径约为 7.7 m，1 000 °C 以上持续时间大于 260 ms。

2) 洞内外温压弹爆炸最高温度测试结果的最大偏差分别为 5.1% 和 5.8%，平均偏差为 5.45%，处于一定合理的范围内，可以满足爆炸场测试需求。

### 参考文献:

- [1] 胡宏伟, 宋 浦, 邓国强, 等. 温压炸药的特性及发展现状 [J]. 力学进展, 2022, 52 (1): 53-78.
- [2] 姜 韬, 孔德仁, 郭雨岩. 基于红外探测的新型热流密度传感器设计 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36 (11): 38-42.
- [3] 仲 倩, 刘大斌, 秋珊珊, 等. 温压药剂爆炸火球温度测量研究 [J]. 爆破器材, 2019, 48 (1): 23-26.
- [4] 许仁翰, 周钊捷, 狄长安. 基于高速成像的爆炸温度场测试方法 [J]. 兵工学报, 2021, 42 (3): 640-647.
- [5] FROST D L, GOROSHIN S, CAIRNS M, et al. Temperature measurements in a multiphase fireball [C] //22nd International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 2009.
- [6] GOROSHIN S, FROST D L, LEVINE J, et al. Optical pyrometry of fireballs of metalized explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials, 2006, 31 (3): 169-181.
- [7] HU H, PU S, FENG H, et al. Surface temperature of blast fireball measured by colorimetric thermometer [C] //1st International Conference on Mechatronic System and Measurement Technology Conference Location Nanjing, PEOPLES R CHINA. SCIENCE PRESS USA INC Location MONMOUTH JUNCTION, 2012: 267-271.
- [8] 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.
- [9] HOBBS M J, BARR A, WOOLFORD S, et al. High-Speed Infrared Radiation Thermometer for the Investigation of Early Stage Explosive Development and Fireball Expansion [J]. Sensors, 2022, 22 (16): 6143.

(下转第 217 页)