

文章编号:1006-9941(2022)12-1266-06

枪弹底火瞬态火焰温度测试及其图像

李文哲¹,王高¹,魏志芳²,赵聪聪²,张骏虎³,聂鹏³

(1. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051; 3. 山西江淮重工有限责任公司, 山西 晋城 048000)

摘要: 为了评估某类枪弹底火的输出特性,针对底火输出火焰温度难以测量的特点,提出了在开放式爆发器内进行枪弹底火击发实验,并利用高速中波红外热像仪捕获底火击发全过程。利用落锤仪赋予枪弹底火相应的初始击发能量,同时触发红外热像仪采集火焰信息。对常温(25℃)、高温(50℃)、低温(-49℃)3种工况的枪弹底火实验数据和红外图像进行处理,结果表明:此类枪弹底火的输出火焰温度最高可达1204℃,火焰持续时间为3~4ms;火焰随时间的变化过程可分为击发、扩散、成型、消散4个阶段,成型火焰的焰头和焰尾为高温区域。结合公式计算和软件校正,实验测量误差不超过6.6%,证明了该方法的可靠性,为评估枪弹底火的输出能量特性提供了新思路。

关键词: 枪弹底火;红外热像仪;红外图像;测量误差

中图分类号: TJ45+1.2; TN219

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022120

0 引言

底火是用于输出火焰引燃发射装药且位于枪弹底部的火工品,是将枪炮发射机构所产生的电能或机械能转化成引燃发射装药能量的重要元件,对底火输出能量的检测是判定贮存弹药质量是否合格的重要依据之一^[1-2]。目前主要的检测方法有压力测量、光学测量、声学测量、机械能量输出测量以及温度测量^[3],其中,底火药剂的最高燃烧温度和火焰持续时间是评判底火点火能力的2个重要因素。不过由于底火输出火焰具有温度高^[4]、持续时间短、体积小等特点,温度测量工作十分困难,再加上测温设备、技术等方面的原因,底火温度测试一直没有得到重视。

近几年国外的相关研究有:Otón-Martínez R A^[5]

建立三维数值模型表征了底火药剂燃烧过程中的传热特性,Rybak W^[6]用热重分析和差示扫描量热法(TGA/DSC)测量了底火药剂的点火温度。目前国内在这方面的研究有:陈明华^[7]用热电偶在距离底火15mm处测得其最高燃烧温度平均值为473.71℃;柳维旗^[8]利用双通道比色温度传感器测得底火燃烧温度平均值为1964.79℃。不过热电偶响应速度低,无法反映几个毫秒量级的信号变化,且只能测得其结点温度,无法得知底火燃烧过程中的最高温度;比色温度传感器工作波段的选择对温度精度影响较大,且只有温度信息而无图像信息,测试的准确性和稳定性较差。

针对这些问题,本研究提出了基于高速中波红外热像仪的非接触式测温法^[9-11],在开放式爆发器内进行实验,通过捕获底火击发的全过程,计算底火火焰持续时间、分析不同阶段底火输出火焰的温度特点,探究不同工况下底火输出火焰温度之间的规律,为底火等引燃类火工品的输出能量特性评估提供新思路。

1 测温原理

红外热像仪是一种非接触式、响应速度快、灵敏度高、抗干扰能力强的集成化设备。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

收稿日期:2022-05-06;修回日期:2022-06-16

网络出版日期:2022-09-20

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

作者简介:李文哲(1998-),男,硕士研究生,主要从事非接触式测温方面的研究。e-mail:liwenzhe_1998@163.com

通信联系人:王高(1973-),男,教授,主要从事兵器、航空等领域温度测试方面的研究。e-mail:917978149@qq.com

引用本文:李文哲,王高,魏志芳,等.枪弹底火瞬态火焰温度测试及其图像[J].含能材料,2022,30(12):1266-1271.

LI Wen-zhe, WANG Gao, WEI Zhi-fang, et al. Ignition Cap Transient Flame Temperature Test and Images[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2022, 30(12):1266-1271.

同,将红外辐射能量密度分布转换为可见光显示出来。如图1所示,具体的测量原理为:①物体发出的红外辐射进入光学系统,红外探测器将接收的红外辐射转换为电信号;②对模拟电信号进行调理放大等一系列处理,再将电信号转换为可见红外图像。

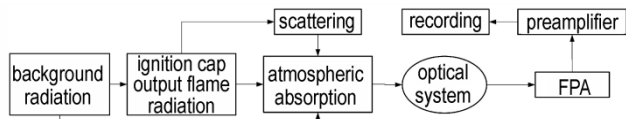


图1 红外热像仪测温原理

Fig.1 Temperature measurement principle of the infrared thermal imager

实际测量中,红外热像仪所接收的热辐射分为3个部分:目标物辐射、背景辐射和大气辐射。热像仪测温的基本公式^[12]为:

$$f(T'_0) = \tau_\alpha [\varepsilon f(T_0) + (1 - \alpha)f(T_u)] + \varepsilon_\alpha f(T_\alpha) \quad (1)$$

式中, T'_0 表示热像仪显示的温度,℃; τ_α 为大气透射率; ε 为底火输出火焰发射率; T_0 为底火输出火焰表面真实温度,℃; α 为火焰表面吸收率; T_u 为环境温度,℃; ε_α 为大气发射率; T_α 为大气温度,℃。

红外热像仪在其温度曲线量程范围内可将黑体的响应曲线按照幂函数形式进行拟合,即:

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

式中, C 是与红外热像仪工作波段相关的常数,可通过黑体炉温度标定获得数值; n 是与探测器工作材料和波段相关的常数。对于本次实验所用3~5 μm波段范围的HgCdTe探测器, n 值为5.33, C 值为 2.9259×10^{-12} ,将式(2)代入式(1)可获得目标的真实温度的表达式为:

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau_\alpha} T_0'^n - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\varepsilon_\alpha}{\tau_\alpha} T_\alpha^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

由于枪弹底火输出火焰与有动力飞行器尾焰在生产方式和高温气体成分上相似,本研究采用波长范围4.3~4.55 μm、发射率0.5的有动力飞行器尾焰^[13]模型对底火输出火焰进行研究,以获得温度计算公式的重要参数。因此, $\varepsilon = \alpha$,结合本次实验室内近距离测温的条件,可认为 $\tau_\alpha = 1$,则式(3)变为

$$T_0 = \{(1/\varepsilon) [T_0'^n - (1 - \varepsilon) T_u^n]\}^{1/n} \quad (4)$$

枪弹底火输出火焰的理论值在1000℃以上,因此 T_u/T_0 很小,式(4)可进一步简化为

$$T_0 = T_0' / \sqrt[n]{\varepsilon} = T_0' / \sqrt[5.33]{0.5} \quad (5)$$

利用式(5)来计算本次实验底火输出火焰表面真

实温度。

2 实验部分

2.1 实验对象

实验所用底火分为3类:第一类常温底火,放置于室内(25℃)的环境中,第二、三类底火分别置于50℃、-49℃的双温区实验箱内,并贮藏10h以上。将底火分3种工况进行实验是为了探究不同环境温度下输出火焰的最高温度差异。

2.2 测试仪器

击发装置:

落锤仪^[14]:用于放置工装、架设落锤;落锤:规格选用250g、500g两种,用于撞击击针;击针:用于击发底火;开放式爆发器^[15]:用于放置底火药剂、观测火焰。

测温装置:

高速中波红外热像仪^[16]:集红外图像、温度信息、数据修正于一体的仪器,拥有极快的响应速度($\leq 14 \mu s$)和极高的测温精度($\pm 0.5\%$),能够测得毫秒量级的温度变化,像素分辨率高、热灵敏度高、成像质量好;光电传感器:工作波段880nm,用于控制热像仪工作。

误差分析装置:

BF-1000型激光测距仪:测量范围0.05~200m,误差 ± 1 mm,用于测量火焰中心与相机镜头之间的距离;VC261型高精度温湿度计:温度测量误差 ± 0.5 ℃,湿度测量误差 ± 3 RH,用于测量实验现场温湿度;SR-20腔式黑体辐射源:发射率 ε 为(0.99 \pm 0.01),孔径 φ 为100mm;CK-20温度控制仪:用于控制腔式黑体温度。

2.3 方案设计

2.3.1 底火测试方案

整体实验布局如图2所示,落锤仪放置于室内昏暗的角落,底火药剂置于开放式爆发器内,顶部放置击针,将落锤固定在区间100~240mm的高度做自由落体运动,以不同的初始能量撞击击针。

高速红外热像仪与开放式爆发器保持在同一光轴,相距115cm,针对本次底火输出火焰温度高、持续时间短的特点,改变了高速红外相机的部分参数设定,最大程度缩短了采样时间间隔,具体参数设置如表1所示。光电传感器置于击针上方,连接高速红外相机并持续输出5V高电平,当落锤遮挡光路时刻产生下降沿信号,触发相机工作。

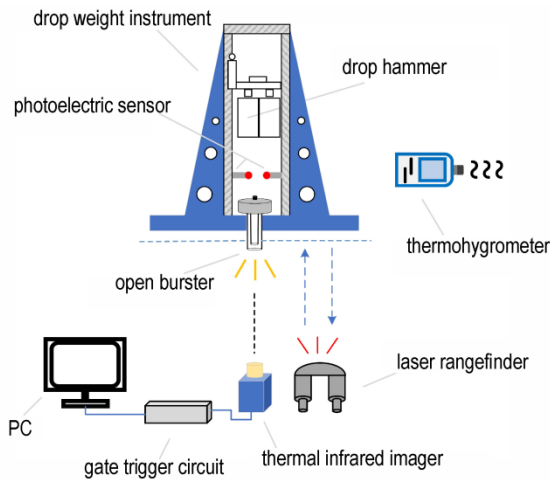


图2 底火实验布局图

Fig.2 Layout of the ignition cap test

表1 红外热像仪参数

Table 1 Parameters for the infrared thermal camera

resolution	frame rate / Hz	spectral range / μm	temperature measurement range / $^{\circ}\text{C}$	lens focal length / mm
136×440	975	3-5.1	175-2251	100

因为底火击发过程快,不能保证每次击发都能捕获到最佳状态,因此每个组别进行了10次重复实验,取画面和温度数值比较理想的几次的平均值。对红外热像仪所采集的图像温度信息进行处理,利用设备自带的软件设置参数,如表2所示,对图像像素显示温度数据进行修正。

表2 软件参数设置

Table 2 Parameters for the software

air temperature / $^{\circ}\text{C}$	relative humidity / %	CO ₂ concentration / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	environment temperature / $^{\circ}\text{C}$	target distance / m	target emissivity
25.00	65	900	27.00	1.15	0.5

2.3.2 误差测试方案

根据式(1)可知,红外热像仪的测量误差主要来源于3个方面:目标发射率、大气透过率、反射的环境辐射。此外,还与测试距离、拍摄角度、环境温湿度等因素有关。本次实验全程在室内进行,且相机镜头与被测火焰之间的距离很近,气体分子转动状态的能量差很小,转动吸收光谱主要在远红外波段,对底火输出火焰辐射能量的吸收作用非常小,因此可认为大气透过率 $T_a = 1$;热像仪设置的FPA帧大小与底火输出火焰的形态很吻合,目标背景没有过多的留白,整个实验

环境中没有其他高温物体,因此可忽略环境温度辐射带来的干扰。经过多次测试发现,距离是影响此次实验精度的主要因素。

在室外测试过程中,往往距离越长,热像仪所捕获的视场面积越大,被测目标只占据视场的一小部分,输出信号中背景辐射的部分增加,导致测量误差^[17]。但在实验过程中发现,室内环境下,热像仪对某一温度已知的静态物体测量数据也存在小范围波动,推测是热像仪自身存在稳定性方面的差异而造成温度漂移^[18],因此在实验室中尽可能地复原当时现场测试的环境,就这一方面做了实验研究,实验步骤如下:

(1)对目标黑体进行加热,设定目标温度 $T_{bb}, ^{\circ}\text{C}$;

(2)连接红外热像仪,调节焦距,设定发射率 $\varepsilon=0.99$;

(3)移动热像仪使黑体图像充满视场,利用激光测距仪测距,并记录在测量距离分别为0.15、0.45、0.75、1.05、1.15 m和1.35 m处的目标温度 $T_d, ^{\circ}\text{C}$,计算不同距离下的平均误差 η 。

3 结果与讨论

3.1 底火火焰最高温度与测试误差

不同设定温度下的实测数据如表3所示。对图像像素显示温度数据进行修正,修正后的实验数据如图3所示。

表3 距离对红外热像仪测温精度影响

Table 3 The influence of distance on temperature measurement accuracy of the infrared thermal camera

$T_{bb} / ^{\circ}\text{C}$	$T_d / ^{\circ}\text{C}$					
	15 cm	45 cm	75 cm	105 cm	115 cm	135 cm
100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
300	300.0	299.8	299.5	299.1	299.1	298.9
500	500.0	499.9	499.6	499.2	498.8	498.7
700	700.0	699.7	699.4	699.1	698.7	698.5
900	900.0	899.8	899.3	898.4	897.7	897.3
1000	1000.0	999.9	999.2	998.7	998.2	997.8
η	0.00	0.15	0.50	0.92	1.25	1.47

Note: T_{bb} is the temperature of black body cavity; T_d is the temperature displayed by the infrared thermal imager; η is measurement error.

由表3可知,热像仪与目标黑体的测试距离越大,造成的温度波动就越大,高温目标相比低温目标有更大的温度漂移幅度。在火焰发射率0.5且大气透过率为100%的前提下,当目标距离为115 cm时,此次枪

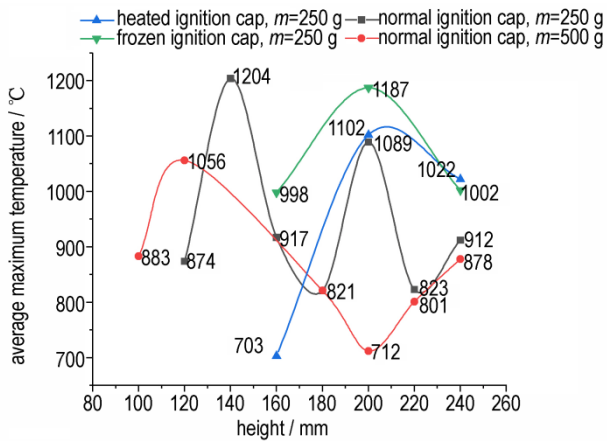


图3 不同工况下底火火焰平均最高温度
Fig.3 Average maximum temperature of ignition cap flame under different test conditions

弹底火实验平均测量误差小于1.25℃。

由图3可知,此类底火的输出火焰最大温度可达1204℃,3种工况下的底火输出火焰平均最高温度均可维持在700~1200℃,此次实验用于击发底火的能量与火焰最高温度并无明显关系,不同工况下的火焰最高温度差异并不明显。将未校正的热像仪显示最高温度数值代入式(5),计算所得的数值加上因温度漂移损失的示数,与热像仪软件校正所得温度相比,即可得到温度数据的误差,如式6所示:

$$\delta = [T' - (T_0 + 1.25)] / T' \quad (6)$$

式中, δ 为误差; T' 为热像仪软件校正的示数,℃。经过计算,此次底火实验的误差不超过6.6%,能够有效反映底火火焰温度数据的可靠性。

3.2 火焰持续时间与特征分析

实验利用高速红外热像仪所摄画面进行持续时间、图像分析。图4为底火火焰温度与时间曲线,由图4可知,经过多次重复实验,底火输出火焰的持续时间为3~4ms,火焰从刚开始击发到上升到最高温全过程约为1ms。爆炸约8ms后的温度有二次升高的现象,推测是底火药剂颗粒击发后火焰辐射经地面反射造成温度回升所致。

图5为底火输出火焰的发火过程,是由高速红外热像仪拍摄且校正后得到,如图5所示,底火输出火焰的发火过程可按照时间划分为4个阶段:

(1)火焰击发,焰长约为20~25mm,占整个火焰焰长的1/3,火焰呈现椭球形,最高温度范围650~740℃;

(2)火焰扩散,焰长约为35~40mm,占整个火焰焰长的2/3,火焰近似棱锥状,最高温度范围1087~

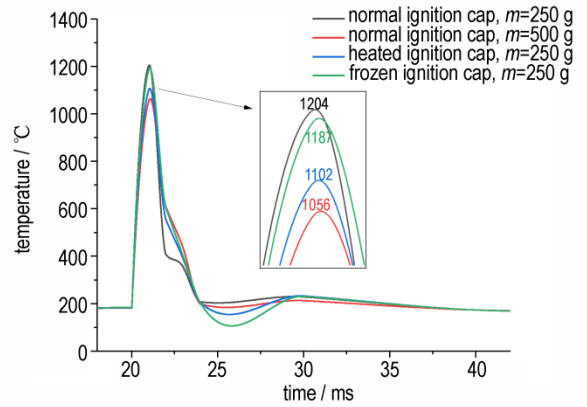


图4 底火火焰温度—时间曲线
Fig.4 The flame temperature versus time curves for the ignition cap

1204℃,是整个发火过程中的最高温;

(3)火焰成型,焰长约为60~70mm,是底火的完全形态,火焰近似柱状,最高温度范围840~960℃;

(4)火焰消散,近似椭球形,最高温度范围240~340℃。

由于常温底火的组别和实验次数最多,红外图像更加完整,以常温底火为例,从火焰的形态来看,焰头与焰尾均有高亮圆形区域,是火焰全程中的高温区。利用MATLAB^[19]处理第三阶段成型火焰红外图像得到温度场分布图,结果如图6所示。由图6可知,焰头、焰尾区域温度梯度可达800℃以上,证实了高温区的存在;焰头面积明显小于焰尾面积,且两区域相对独立,相连接部分温度较低。根据此类底火药剂反应机理,产生此类现象的原因是底火击发后产生大量金属氧化物及CO₂、H₂O、CO高温气体,高速向下蔓延与

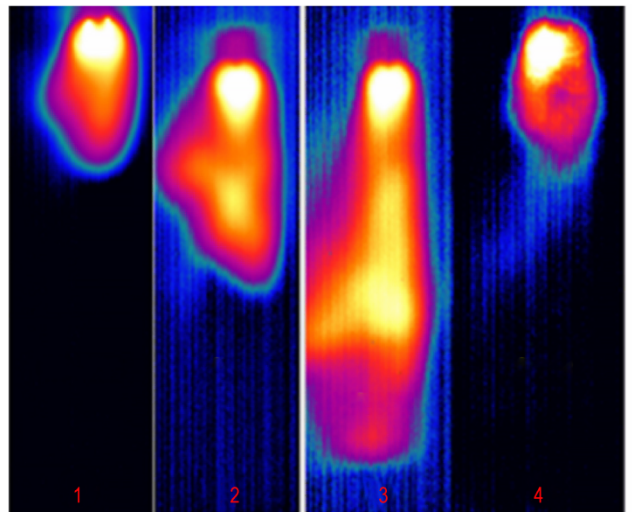


图5 4个阶段的火焰图像
Fig.5 The infrared thermal images for the four stages

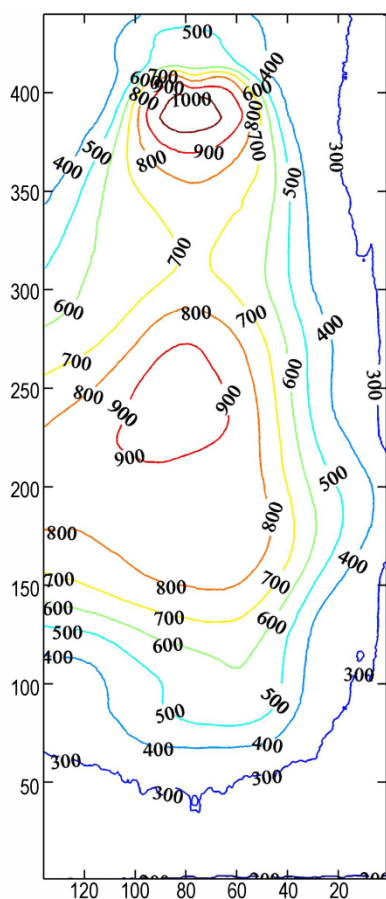


图6 第三阶段温度分布图像

Fig.6 The temperature distribution image for the 3rd stage

氧气结合助燃造成二次燃爆,从而形成焰尾面积较大的高温区^[20],而焰头区域处于无氧爆炸阶段,主要由高压环境下的金属粒子流形成高温区。

4 结论

通过搭建温度测试装置,对此类枪弹底火的输出火焰进行测试。实验表明:

(1) 此类枪弹底火的输出火焰最高温度可达1204℃,结合公式计算与软件校正,实验数据的误差不超过6.6%,本次实验未能发现底火击发能量与火焰最高温度之间的关系;

(2) 通过高速红外热像仪所捕获的火焰燃烧过程可知,底火火焰持续时间为3~4 ms,火焰随时间的变化特点可分为:击发、扩散、成型、消散4个阶段,不同阶段的温度差异很大;

(3) 利用MATLAB软件处理红外图像得到温度分布图,证实了成型火焰焰头、焰尾区域温度梯度可达800℃以上。

参考文献:

- [1] 张海洋. 某转管炮药筒破裂故障原因分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(3): 84-89.
ZHANG Hai-yang. Failure analysis of cartridge burst of a certain gatling gun[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2019, 40(3): 84-89.
- [2] 汪正胜, 沈勇. 关于提高枪弹发火感度的研究[J]. 中国军转民, 2019(11): 57-60.
WANG Zheng-sheng, SHEN Yong. Study on improving the fire sensitivity of guns[J]. *Conversion of Chinese Army to Civilian*, 2019(11): 57-60.
- [3] 黄红凯, 蔡瑞娇, 柳维旗, 等. 底火输出能量的几种测量方法[J]. 火工品, 2004(3): 47-49.
HUANG Hong-kai, CAI Rui-jiao, LIU Wei-qi, et al. Several output energy measurement methods of primer[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(3): 47-49.
- [4] 刘承, 陶如意, 薛绍, 等. 基于多孔介质模型的点火火焰在发射药颗粒床中的传播特性[J]. 含能材料, 2020, 28(10): 969-974.
LIU Cheng, TAO Ru-yi, XUE Shao, et al. Propagation characteristics of ignition flame in propellant particle bed based on porous medium model[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(10): 969-974.
- [5] Otón-Martínez R A, Velasco F J S, Nicolás-Pérez F, et al. Three-dimensional numerical modeling of internal ballistics for solid propellant combinations[J]. *Mathematics*, 2021, 9(21): 2714.
- [6] Rybak W, Morón W, Wach J. Ignition studies on high-vitrinite and high-inertinite coals using TGA/DSC, DTIF, EFR, and 20 L dust explosive chamber[J]. *Energies*, 2021, 14(12): 3601.
- [7] 陈明华, 马桂海, 柳维旗, 等. 底-6乙底火药剂的燃烧温度测定与计算[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 129-131.
CHEN Ming-hua, MA Gui-hai, LIU Wei-qi, et al. Measurement and calculation of combustion temperature of di-6 B base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 129-131.
- [8] 柳维旗, 蔡瑞娇, 温玉全, 等. 底火输出压力-温度测试系统[J]. 测试技术学报, 2007(5): 377-381.
LIU Wei-qi, CAI Rui-jiao, WEN Yu-quan, et al. Primer output pressure temperature test system[J]. *Journal of Testing Technology*, 2007(5): 377-381.
- [9] 刘永贵, 唐志平, 崔世堂. 冲击载荷下瞬态温度的实时测量方法[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 471-475.
LIU Yong-gui, TANG Zhi-ping, CUI Shi-tang. Real time measurement method of transient temperature under impact load [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(4): 471-475.
- [10] 田培培, 张猛, 王高, 等. 基于红外热像仪的温压弹爆炸温度场测试[J]. 红外技术, 2016, 38(3): 260-265.
TIAN Pei-pei, ZHANG Meng, Wang Gao, et al. Temperature field test of thermobaric explosion based on infrared thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(3): 260-265.
- [11] 李秀丽, 惠君明, 解立峰. 红外热成像技术在云团爆炸测温中的应用[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 344-348.
LI Xiu-li, HUI Jun-ming, XIE Li-feng. Application of infrared thermal imaging technology in cloud explosion temperature measurement[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(3): 344-348.
- [12] 石东平, 吴超, 李孜军, 等. 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2321-

2326.
SHI Dong-ping, WU Chao, LI Zi-jun, et al. Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incidence temperature compensation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2321-2326.
- [13] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 科学出版社, 2014.
ZHOU Shi-chun. Introduction to advanced infrared optoelectronic engineering[M]. Ke Xue Chu Ban She, 2014.
- [14] 李博, 庄弘炜, 张蕊. 一种撞击底火输出性能的实验平台[J]. 火工品, 2014(6): 44-46.
LI Bo, ZHUANG Hong-wei, ZHANG Rui. A test platform for the output performance of percussion primer [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(6): 44-46.
- [15] RAN X, DING L, ZHOU J, et al. Research on the energy release characteristics of six kinds of reactive materials [J]. *Materials (Basel)*, 2019, 12(23): 3940.
- [16] 陈津津, 苏君红, 金宁, 等. 基于中波制冷型碲镉汞探测器的远距离探测/识别连续变焦热像仪[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 90-97.
CHEN Jin-jin, SU Jun-hong, JIN Ning, et al. Long distance detection/recognition continuous zoom thermal imager based on medium wave cooled HgCdTe detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 90-97.
- [17] 苏佳伟, 石俊生, 汪炜稿. 距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 587-590.
SU Jia-wei, SHI Jun-sheng, WANG Wei-chen. Experimental study on the influence of distance on the temperature measurement accuracy of infrared thermal imager and its improvement [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 587-590.
- [18] 蔡李靖, 周凯来, 沈桂竹, 等. 红外热像仪高精度测温标定技术[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 202-209.
CAI Li-jing, ZHOU Kai-lai, SHEN Gui-zhu, et al. High precision temperature measurement calibration technology of infrared thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 202-209.
- [19] ZHANG Zhi-lin, SUN Wei-min, XING Jian, et al. The reconstruction research of 3D temperature field of flame of the optical fiber taper machine based on the multispectral radiation [C]// 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control (ICMIC). IEEE, 2013, 01: 5-8.
- [20] 袁治雷, 贺增弟, 刘林林, 等. 一种炮口火焰的测试方法研究[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 575-579.
YUAN Zhi-lei, HE Zeng-di, LIU Lin-lin, et al. Study on a test method of muzzle flame [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5): 575-579.

Ignition Cap Transient Flame Temperature Test and Images

LI Wen-zhe¹, WANG Gao¹, WEI Zhi-fang², ZHAO Cong-cong², ZHANG Jun-hu³, NIE Peng³

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 3. Shanxi Jianghuai Heavy Industry Co., Ltd, Jincheng 048000, China)

Abstract: In order to evaluate the output energy characteristics of the ignition cap, it was proposed to conduct the ignition cap firing test in an open burster container and use a high-speed mid-wave infrared thermal imager to capture the whole process of the ignition cap firing. Since it was difficult to measure the output flame temperature of ignition cap, the drop weight instrument was used to give the corresponding initial firing energy of ignition cap. At the same time, the infrared thermal imager was triggered to collect flame information. The experimental data and infrared images of ignition cap under three test conditions of normal (25 °C), heated (50 °C) and frozen (-49 °C) temperature were processed. The results show that the output flame maximum temperature can reach up to 1204 °C, and the flame duration is about 3-4 ms. The whole process of the flame with time can be divided into four stages: firing, diffusion, forming and dissipation, and the temperature in the top and bottom area of flame is much higher than in other areas. Through calculation and software correction, the measurement error of this test is below 6.6%, which can prove the reliability of the method and provide a new way for evaluating the output energy characteristics of ignition cap.

Key words: ignition cap; infrared thermal imager; infrared images; measurement error

CLC number: TJ45+1.2; TN219

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022120

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 62105305), Key Basic Research Projects of Basic Strengthening Plan (2019-JCJQ-ZD-138-00), Fundamental Research Program of Shanxi Province (No. 20210302123068)

(责编:王馨逸)