

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.004

# 温压药剂爆炸火球温度测量研究<sup>\*</sup>

仲 倩<sup>①②</sup> 刘大斌<sup>①</sup> 秋珊珊<sup>②</sup> 王红松<sup>③</sup> 高 贫<sup>②</sup>

①南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

②国家民用爆破器材质量监督检验中心(江苏南京,210094)

③常州进出口工业及消费品安全检测中心(江苏常州,213022)

[摘 要] 温压药剂热毁伤效应评估中火球温度至关重要。为了精确测量火球温度,应用红外热成像技术测试并分析了温压药剂爆炸时火球的温度随时间的变化规律。结果表明,相对于算术平均值等方法获得的温度值,基于等效热辐射强度的温度平均值( $T_{\text{AVE}}$ )更适用于温压药剂爆炸火球热辐射的计算。在等效热辐射强度的温度平均值基础上,提出了爆炸火球表面单位面积平均热辐射量的概念。在忽略热对流及热传导的前提下,该火球表征参量可作为温压药剂热毁伤效应评估的基准。

[关键词] 温压药剂;热辐射;平均温度;热毁伤

[分类号] TQ564

## Temperature Measurement Study on Blasting Fireball of Thermobaric Explosives

ZHONG Qian<sup>①②</sup>, LIU Dabin<sup>①</sup>, QIU Shanshan<sup>②</sup>, WANG Hongsong<sup>③</sup>, GAO Pin<sup>②</sup>

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②China National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials (Jiangsu Nanjing, 210094)

③Changzhou Safety Testing Center for Entry-Exit Industrial and Consumable Products (Jiangsu Changzhou, 213022)

[ABSTRACT] Surface temperature of thermobaric explosives plays a crucial role in evaluation of thermal damage. In order to accurately measure the temperature of fireball, infrared thermal imaging technology was applied to test and analyze the surface temperature history of thermobaric explosive fireball at different time. Compared with the average temperature got from other methods, the temperature obtained from equivalent heat radiation intensity ( $T_{\text{AVE}}$ ) are more suitable for calculation of thermal radiation of thermobaric explosive fireball. In term of  $T_{\text{AVE}}$ , the concept of average heat radiation of fireball surface unit area was proposed, which could be characteristics of thermal damage for thermobaric explosive neglecting heat convection and heat conduction.

[KEYWORDS] thermobaric explosive; thermal radiation; average temperature; thermal damage

## 引言

目前,在探讨高能炸药的毁伤作用时,重点研究冲击波对目标的毁伤程度,而关于炸药爆炸时的热毁伤作用的研究成果很少。随着温压炸药技术的发展、火球温度测试方法的多样化和测试精度的显著提高,爆炸热毁伤效应的研究受到了广泛关注,研究重点为爆炸火球的表面温度及尺寸的精确测量;由于炸药爆炸的特殊性质,火球温度的测量是其中的难点。

以往,一般应用理论知识<sup>[1-2]</sup>计算得到火球温度,如应用炸药的爆热和反应产物的比热计算,但该结果无法得到火球温度的精确值。直到 20 世纪中叶,才有文献记载炸药爆温的实测值。但早期测温方法只能测试获得爆炸火球的一个点或几个点的温度,如激光吸收光谱技术、双色高温测量、傅里叶红外光谱仪的火焰温度测量及多波长法测量火焰温度<sup>[3-5]</sup>;或者测试反应过程中火球瞬态火焰温度随时间的变化曲线,如光谱法测量<sup>[6-8]</sup>;许学忠等<sup>[9]</sup>建立的原子特征谱线法实现了在线连续测温,但无法如实反映具有云团爆炸性质的温压药剂的爆炸温度场

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-05-31

基金项目:江苏省博士后基金(1501051B)

第一作者:仲倩(1981-),女,博士后,主要从事安全热分析研究。E-mail:zhxwgjd@126.com

分布特征。而红外热成像测温技术<sup>[10-12]</sup> 可以获取所测温度场的三维时空分布图像, 适合于测量温压药剂爆炸中的温度场分布。

本文中, 主要采用红外热成像仪, 获取温压药剂爆炸产物的温度分布形态, 根据测试数据和红外辐射测温的原理, 提出了基于等效热辐射强度的温度平均值 ( $T_{AVE}$ ) 概念及计算方法。在基于  $T_{AVE}$  计算结果的基础上, 对爆炸火球的热辐射伤害效果进行对比分析, 为温压药剂的热毁伤综合效应评估提供了更加可靠的数据支撑。

1 实验

1.1 实验仪器

实验采用 Mikronscan7200V 型红外热成像仪, 利用  $320 \times 240$  微热辐射计 UFPA 探测器接收爆炸火球所释放的辐射能量, 并将之转换成电信号, 运用微机、模拟信号调理、数字信号与图像处理技术, 对爆炸火球的温度分布区域进行处理, 获取温压药剂爆炸后的时空温度分布。

1.2 实验条件

本次实验红外热成像仪的参数设定为: 分幅率 30 幅/s; 记录时间 10 s。实验准备阶段, 需检测当时的环境温度、湿度和试验距离, 并将记录的参数录入电脑控制器, 从而进行环境补偿。

试验靶场选择在空阔的野外场地, 试验炸高为 1.5 m, 以装填温压药剂的模拟战斗部在地面上的垂

直投影点为爆心, 在距爆心 130 m 处安放红外热成像测试仪。温压药剂模拟战斗部装药质量为 2.5 kg (简称 WY-2.5), 测试 3 组平行试样。

1.3 实验结果分析

红外热成像测试系统完整地记录了温压药剂的爆炸火球温度场时空分布, 图 1 为 WY-2.5 爆炸后一段时间内的典型红外图像。

图 2 则为 WY-2.5 爆炸后 260 ms 时温度场的时空分布特点, 图 2(a) 为爆炸温度场图像, 图 2(b) 为相应的三维温度分布图, 图 2(c) 是图 2(a) 对应的两条直线上温度的变化曲线。

从图 1 可以看出, 火球的形状随着时间的增加而变化, 且火球表面温度不均匀。从图 2 可以看出, 在  $t = 260$  ms 时, 火球表面的最高温度大于  $1\,800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 但高温区域所占的比例很小, 大部分区域均小于  $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。火球表面温度场时空分布不均, 主要原因是因为温压药剂模拟战斗部爆炸过程中, 各个空间区域反应不同而引起的燃料抛撒及壳体破裂不对称导致的。

2 火球表面平均热辐射量

根据波尔兹曼定律, 黑体的单位面积上的辐射强度 (即功率) 为  $W_0$ , 则有

$$W_0 = \sigma \times T^4. \tag{1}$$

式中:  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , 为波尔兹曼常数;  $T$  为物体的实际温度, K。

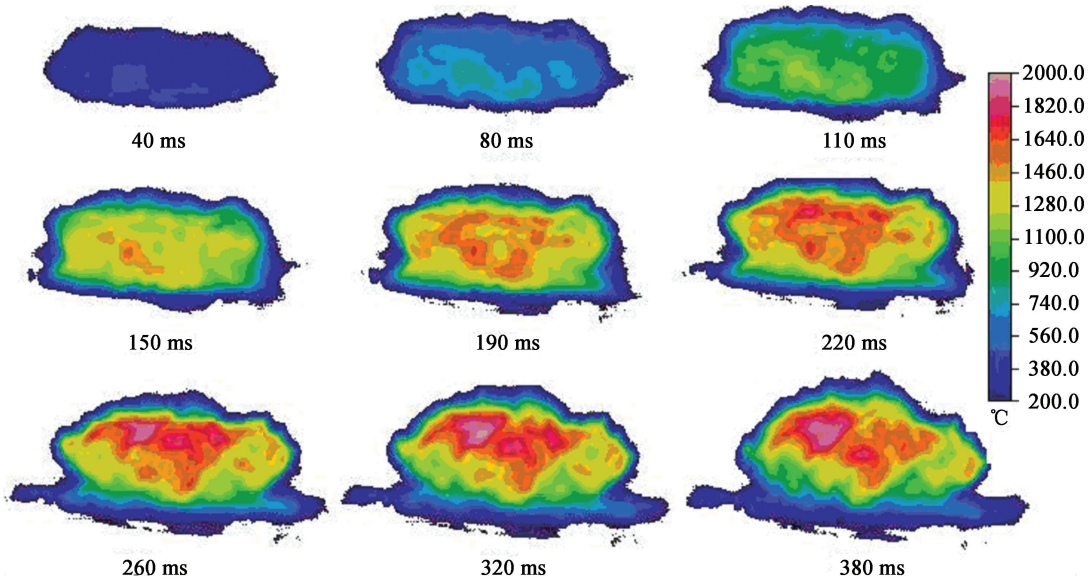


图 1 WY-2.5 爆炸后一段时间的红外图像 (部分图像)

Fig. 1 Partial infrared images of WY-2.5 at some time after explosion

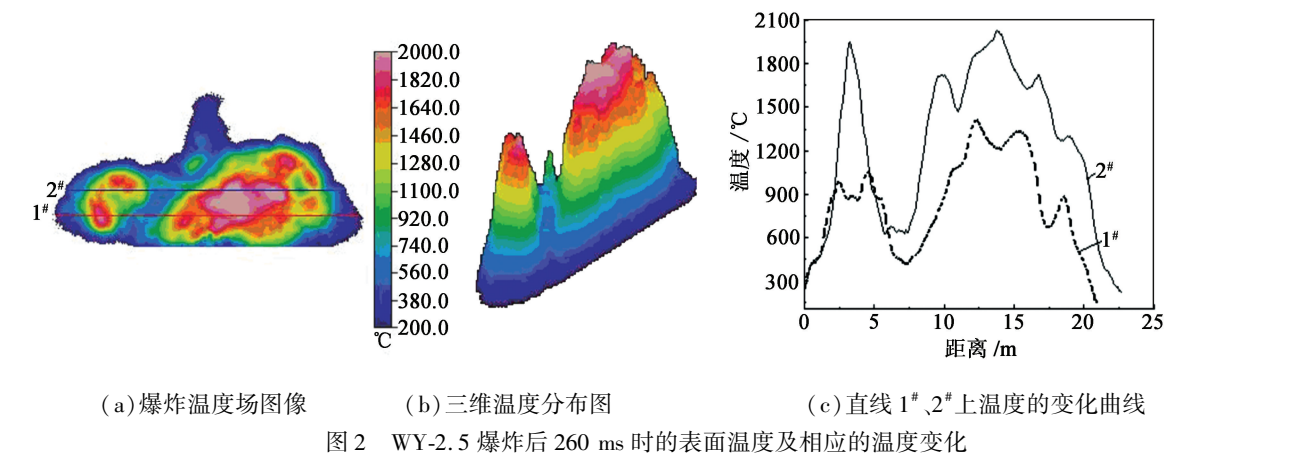


Fig. 2 Surface temperature distribution of WY-2.5 at 260ms after explosion and corresponding temperature changes

由于所测物体非理想黑体,可近似为灰体,故它的辐射功率是关于温度( $T$ )及比辐射率( $\varepsilon$ )的函数,即

$$W_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_0^4 \tag{2}$$

式中: $T_0$  为测试仪的读数,K; $\varepsilon$  为灰体表面的比辐射率。

将热辐射功率在时间( $t$ ) 范围内积分,获得温压药剂引爆后从火球可见光出现到消失的火球表面单位面积的热辐射量  $q$ ,即

$$q = \int \varepsilon \sigma T_0^4 dt \tag{3}$$

根据试验结果分析可知,温压药剂的爆炸火球温度场时空分布特别不均匀,火球的形状不断变化。因此很难求出  $q$  值。为了深入研究温压药剂爆炸后火球对目标的热辐射伤害,提出爆炸火球表面单位面积上的平均热辐射量  $q_{AVE}$ ,其计算公式为

$$q_{AVE} = \int \varepsilon \sigma T_{AVE}^4 dt \tag{4}$$

式中: $T_{AVE}$  是指某一时间点火球表面的平均温度,K。

2.1 理论计算公式

现有的试验结果分析中,由红外热成像测试系统所获取的数据仅表示不同时间点的火球表面温度的算术平均值( $\bar{T}$ ),该数据计算过程不符合辐射测温原理。因此,引入了一个火球表面平均温度参数。

根据红外热成像辐射测温的原理,提出了基于等效热辐射强度的温度平均值( $T_{AVE}$ )的概念,即

$$T_{AVE} = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^n T_i^4}{n}} \tag{5}$$

式中: $T_{AVE}$  为某时间点基于等效热辐射强度的温度平均值,K; $T_i$  为相应时间点火球区域内各点的温度,K。

2.2 实验结果分析

对红外热成像测试系统的试验数据,同时进行

算术平均和基于等效热辐射强度的平均处理,计算结果如图 3 所示,并给出火球表面最高温度( $T_{MAX}$ ) 随时间变化的曲线。

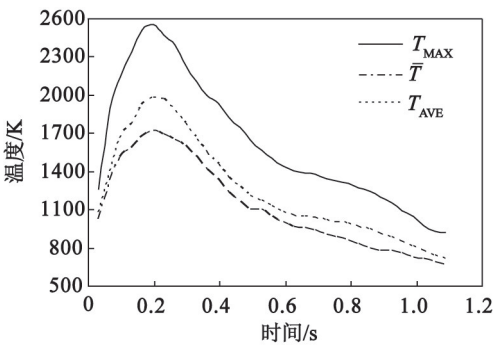


图 3 爆炸火球温度曲线

Fig. 3 Temperature curves of blasting fireball

从图 3 的温度随时间变化曲线可以看出,温压药剂引爆后:在 0 ~ 130 ms 时间段爆炸火球的表面温度升高较快;在 130 ~ 200 ms 时间段,温度达到最大,为 2 400 ~ 2 600 K;200 ms 以后,温度又出现下降趋势,但由于后燃反应,下降速度相对缓慢。 $T_{AVE}$  曲线与 $\bar{T}$ 曲线相比,较为平坦,且与  $T_{MAX}$  曲线趋势相对吻合。

根据不同时间点的 $\bar{T}$ 和  $T_{AVE}$ 的数据,利用 Matlab 中多项式拟合工具对其数据进行拟合。

1)  $\bar{T}$ 拟合公式:

$$\bar{T} = \begin{cases} 600 + 1.525 \times 10^5 t - 6.875 \times 10^5 t^2 + 2.651 \times 10^4 t^3 - 4.024 \times 10^4 t^4 & (0 < t \leq 0.2); \\ 2708.6 - 4785t + 2979t^2 + 1302.9t^3 - 1479.4t^4 & (0.2 < t < 1.1)。 \end{cases} \tag{6}$$

拟合精度分别为 98.76% 和 99.43%。

2)  $T_{AVE}$  拟合公式:

$$T_{AVE} = \begin{cases} 800 + 5\,500t + 1.015 \times 10^5 t^2 - 9.863 \times \\ 10^5 t^3 + 2.466 \times 10^6 t^4 & (0 < t \leq 0.2); \\ 3\,033.4 - 4\,805.1t - 195.3t^2 + 7\,531.2t^3 - \\ 4\,754.6t^4 & (0.2 < t < 1.1)。 \end{cases}$$

(7)

拟合精度分别为 99.37% 和 99.07%。

3 火球热辐射毁伤效应对比

为了评估爆炸火球热辐射毁伤效应,表 1<sup>[11]</sup> 给出了热剂量对人员的毁伤阈值。

表 1 热剂量准则的毁伤阈值

Tab.1 Damage threshold of thermal dose criterion

热剂量/(kJ/m <sup>2</sup> )	伤害效应
1030	木材被引燃
592	人员死亡
392	人员重伤
375	人员三度烧伤
250	人员二度烧伤
172	人员受轻伤
125	人员一度烧伤
65	皮肤疼痛

将上述拟合结果分别代入式(4),得到了热辐射量  $q_{AVE}$  (基于  $T_{AVE}$  的计算结果)和 $\bar{q}$  (基于 $\bar{T}$ 的计算结果)。为了更好地对比分析  $q_{AVE}$  的合理性,表 2 中引入了  $q_{MAX}$  的值, $q_{MAX}$  是将火球表面的最高温度随时间变化的规律带入式(4)得到的,根据计算数值并结合表 1 的毁伤标准,确定了热辐射对人员目标的伤害效应。

表 2 热辐射对人员目标的伤害效应

Tab.2 Damage effect of thermal radiation to personnel target

热辐射量表述	$q_{AVE}$	$\bar{q}$	$q_{MAX}$
热辐射量值/ (kJ·m <sup>-2</sup> )	145.95	78.91	569.79
热辐射伤害	一度烧伤	皮肤疼痛	重伤

根据 1.3 节实验结果分析可知,爆炸火球表面大部分区域的温度都远小于该时刻的最高温度,因此  $q_{MAX}$  是不可能达到的,而爆炸火球之外的区域,所能接收到的热辐射剂量也必定远小于  $q_{MAX}$ 。因此,在温压药剂的热辐射伤害效应研究中,应以火球表面平均温度作为伤害评估的参考数据。

由表 2 数据可知, $q_{AVE}$  的值显著大于 $\bar{q}$ ,则相对

于 $\bar{q}$ , $q_{AVE}$  毁伤效应严重。由  $q_{AVE}$  的计算过程可知,基于  $T_{AVE}$  的计算更符合灰体辐射的特点,因此在忽略热对流及热传导的前提下,将  $q_{AVE}$  作为温压药剂热辐射毁伤效应的数据。

4 结论

应用红外热成像测试系统记录并分析了温压药剂模拟战斗部爆炸火球的表面温度随时间的变化规律,得到了以下结论:

1) 基于灰体辐射理论,提出了基于等效热辐射强度的温度平均值  $T_{AVE}$  的概念及计算方法;而且通过对  $T_{AVE}$ 、 $\bar{T}$  和  $T_{MAX}$  3 条温度曲线的对比可知, $T_{AVE}$  曲线相对更加符合火球表面温度的变化特性。因此,在火球热辐射的计算分析中,应用  $T_{AVE}$  数值,结果更符合实际。

2) 通过对火球表面温度变化过程的分析,提出了爆炸火球表面单位面积平均热辐射量  $q_{AVE}$  的概念,在忽略热对流及热传导的前提下,该火球表征参量可作为温压药剂热毁伤效应评估的基准。

3) 对比分析了  $q_{AVE}$ 、 $\bar{q}$  及  $q_{MAX}$  3 个热辐射量值,认为在火球热辐射毁伤效应评估中,应以  $q_{AVE}$  的计算作为评价温压药剂热辐射毁伤的依据。

热辐射毁伤作用只是温压药剂热伤害的一个方面,温压药剂的热伤害效应还应包括致盲、灼伤等毁伤方式。因此,关于温压药剂热辐射对目标的伤害综合效应方法亟待于解决。

参 考 文 献

[1] 王泽溥,王志利. 一种火炸药爆炸火球计算方法[J]. 安全与环境学报,2004,4(增刊):132-133.

[2] 何志光. FAE 爆炸火球热辐射效应研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.

[3] ROMERO C. On-line flame measurements for improved combustion[J]. Lehigh Energy Update,2003,21(1):1-2.

[4] 刘志明,高闽光,刘文清,等. 傅里叶变换红外光谱仪扫描成像系统被动遥测火焰红外图像[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(11):2520-2522.

LIU Z M, GAO M G, LIU W Q, et al. Passive remote measurement of flame infrared image by a FTIR scanning imaging system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(11):2520-2522.

(下转第 31 页)



& Design, 2014, 14: 6154-6160.

[7] OXLEY J C, FURMAN D, BROWN A C, et al. Thermal decomposition of erythritol tetranitrate: a joint experimental and computational study [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121: 16145-16157.

[8] 杨晓伟, 吴燕, 吕惠敏, 等. 赤藓糖醇发酵工艺研究[J]. 生物技术, 2005, 15(4): 63-65.

YANG X W, WU Y, LÜ H M, et al. Study on fermentation process of erythritol [J]. Biotechnology, 2005, 15(4): 63-65.

[9] 肖素荣, 李京东. 赤藓糖醇的特性及应用[J]. 中国食物与营养, 2008(5): 26-28.

[10] 李树东, 宋微, 魏春红, 等. 发酵法生产赤藓糖醇的研究综述[J]. 农产品加工·创新版, 2009(12): 50-52.

LI S D, SONG W, WEI C H, et al. Summarization on research for erythritol production by fermentation [J]. Innovational Edition of Farm Products Processing, 2009(12): 50-52.

[11] 吕春绪. N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 绿色硝化研究及其进展[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 611-617.

LÜ C X. Clean nitrating agent dinitrogen pentoxide and its application in nitration [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(6): 611-617.

[12] 钱华, 吕春绪, 叶志文. 绿色硝化剂五氧化二氮及其在硝化反应中的应用[J]. 精细化工, 2006, 23(6): 620-624.

QIAN H, LÜ C X, YE Z W. Clean nitrating agent dinitrogen pentoxide and its application in nitration [J]. Fine Chemicals, 2006, 23(6): 620-624.

[13] 何志勇, 罗军, 吕春绪. 绿色硝化剂 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 的制备方法及其应用进展[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 1-5.

HE Z Y, LUO J, LÜ C X. Progress of preparation method and application of clean nitrating agent of dinitrogen pentoxide [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(1): 1-5.

[14] 胡小玲, 吴秋洁, 钱华. N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/HNO<sub>3</sub> 硝解 TAIW 合成 CL-20 [J]. 火炸药学报, 2015, 38(2): 35-38.

HU X L, WU Q J, QIAN H. Synthesis of CL-20 by nitrolysis of TAIW with N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/HNO<sub>3</sub> [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2015, 38(2): 35-38.

[15] 胡衍甜, 吕早生, 孙昱, 等. N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/HNO<sub>3</sub>/有机溶剂混合体系硝解 DPT 制备 HMX [J]. 火炸药学报, 2016, 39(2): 50-53, 58.

HU Y T, LÜ Z S, SUN Y, et al. Preparation of HMX by nitrolysis of DPT in N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/HNO<sub>3</sub>/organic solvent mixed systems [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(2): 50-53, 58.

[16] MILLAR R W, COLCLO M E, DESAI H. Novel syntheses of energetic materials using dinitrogen pentoxide [M]. UK: British Crown, 1996.

ation of fuel-air mixtures with single-event ignition [J]. Initiators & Pyrotechnics, 1999(4): 14-17.

[10] 仲倩. 燃料空气炸药爆炸参数测量及毁伤效应评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.

ZHONG Q. Research on measurement of explosion parameters and evaluation of damage effect of fuel air explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.

[11] 李秀丽. 基于燃烧和爆炸效应的温压药剂相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

LI X L. Study on correlative techniques of thermobaric explosive based on combustion and explosion effect [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

[12] 阚金玲. 液固复合云爆剂的爆炸和毁伤特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

KAN J L. Study on the performances of blast and damage of liquid-solid composite fuel-air-explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

(上接第 26 页)

[5] DOCQUIER N, CANDEL S. Combustion control and sensors: a review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2002, 28(2): 107-150.

[6] 刘大斌, 杨栋, 高耀林, 等. 改进型钠谱线翻转法测量塑料导爆管输出产物的温度[J]. 爆破器材, 2002, 31(5): 6-9.

LIU D B, YANG D, GAO Y L, et al. Determination of the temperature of output flame of nonel tube with modified sodium line reversal method [J]. Explosive Materials, 2002, 31(5): 6-9.

[7] 李明彬. 光谱法火焰检测技术研究[J]. 应用能源技术, 2018(5): 8-12.

JL M B. Research on spectrometry flame detection technology [J]. Applied Energy Technology, 2018(5): 8-12.

[8] FILE T, JENTSCH H J, LENKHEIT K. A new synthesis method for signals for testing of flame-detection algorithms [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(2): 151-164.

[9] 许学忠, 卫海鹰, 肖昌炎, 等. 一次起爆燃料云雾爆轰的热辐射[J]. 火工品, 1999(4): 14-17.

XU X Z, WEI H Y, XIAO C Y, et al. The thermal radi-