



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107202651 A

(43)申请公布日 2017.09.26

(21)申请号 201710543078.1

(22)申请日 2017.07.05

(71)申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

(72)发明人 韦学勇 王馨晨 赵玉龙 张国栋  
赵云 蒋庄德 任炜 李慧 张蕊  
张芳

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任  
公司 61200

代理人 王萌

(51)Int.Cl.

G01K 11/12(2006.01)

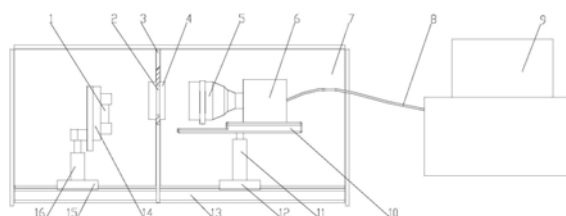
权利要求书1页 说明书7页 附图1页

### (54)发明名称

一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置及其测温方法

### (57)摘要

一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置及其测温方法,包括图像采集光路系统,机械安装装置,计算机及软件。图像采集光路系统包括中性密度滤光片、成像镜头、高速摄影机;机械安装装置包括避光安装箱,窗口固定环,导轨,滑块,支撑杆,夹具,摄影机安装平台等;计算机及软件包括计算机,数据传输线,测温处理软件等。其中中性密度滤光片在400-700nm波段内均匀滤光,可以提高测温上限,防止光强太大无法测量。成像镜头和高速摄影机用来采集图像信号,避光安装箱可以防止环境杂光的影响,导轨,滑块,支撑杆,夹具,摄影机安装平台等可以固定各元器件,保证测量对准;计算机及软件可以在标定和测量的时候对图像进行处理。



1. 一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:对摄像机进行标定,确定物体温度与三基色值关系中的参数,采集火工品燃烧时的三基色值,根据该三基色值与物体温度之间关系确定物体的温度。

2. 根据权利要求1所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:所述三基色值与物体温度之间满足关系: $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R \cdot B}{G^2} + b$ ,其中,T为绝对温度,k和b为三基色值与物体温度曲线的两个参数,R、G、B为三基色的值。

3. 根据权利要求2所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:对摄像机进行标定,确定物体温度与三基色值关系中的参数按照以下方法:

在不同温度下,采集火工品燃烧的图像,提取燃烧图像的RGB三基色值,再求取每一温度下的三基色值的平均值,并根据 $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R \cdot B}{G^2} + b$ 计算参数k和b。

4. 一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置,其特征在于:包括成像镜头(5)、与成像镜头(5)连接的摄像机(6)、与摄像机(6)连接的计算机(9),所述摄像机(6)放置在安装平台(10)上,安装平台被支撑杆(11)支撑,火工品(1)被夹具夹持后,放置在成像镜头(5)的前面,当火工品燃烧后,其燃烧的图像或视频通过成像镜头(5)被摄像机(6)捕捉,在火工品(1)和成像镜头(5)之间设置有隔离板(3)。

5. 根据权利要求4所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置,其特征在于:所述隔离板上开设有贯穿孔,用于安装窗口固定环(4),该窗口固定环(4)上安装有滤光片,对火工品产生的光强进行衰减。

6. 根据权利要求4所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置,其特征在于:所述支撑杆包括套筒和光杆,其中,光杆安装在套筒中,通过光杆调节安装平台的高度。

7. 根据权利要求4所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:所述的支撑杆下部通过滑块安装在导轨上,用来调整成像镜头与火工品之间的距离。

8. 根据权利要求4所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:所述的夹具被第二支撑杆(16)支撑用以调节火工品的高度,该第二支撑杆的下端通过第二滑块安装在导轨上。

9. 根据权利要求4至9中任一项所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:成像镜头的光学放大倍数为0.22,分辨率为 $64 \times 64$ 。

10. 根据权利要求4至9中任一项所述的一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,其特征在于:除计算机外的所有部件均密封在避光安装箱(7)内,所述隔离板安装在该避光安装箱内。

## 一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置及其测温方法

### 【技术领域】

[0001] 本发明属于测温技术领域,具体涉及一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置及其测温方法。

### 【背景技术】

[0002] 在日常生活和工业生产过程中,经常需要测量各种物体的温度。温度在许多技术领域都是一个非常重要的指标参数,在工业、医疗、军事和生活等许多领域,都需要用到测温装置来监测温度。温度的自动监测已经成为各行各业进行安全生产和减少损失采取的重要措施之一。特定场合下由于监测点比较分散、偏远,采用传统的温度测量方式周期长、成本高,而且测量员必须到现场进行测量,因此工作效率非常低。

[0003] 测温技术分接触式测温和非接触式测温两大类。接触式测温需要将传感器紧贴被测物体表面,同时测量电路和传感器之间有线路相连接。常用的接触式测温技术有热电偶测温、热敏电阻测温、半导体测温、光纤测温等方法。非接触式测温目前主要采用红外测温技术,测量电路与被测物体表面相分离,适合于远距离测量或者一些特殊场合。

[0004] 有一些场合既不能采用常用的接触式测温技术,也不能采用非接触测温方式。例如火工品燃烧的温度测量,由于火工品在燃烧过程中会产生破坏性的瞬间高温,一般的接触式测温方法在温度达到最高温度之前传感器就已经被破坏,同时快速的响应时间也使得接触式测温无法有很高的时间分辨率,所以无法使用接触式测温方法。对于符合普朗克辐射定律的物体,当其自身的温度超过600℃以上的高温后,就会发出肉眼可见颜色的光线,随着温度的升高,色彩会由暗红色向黄色,再向赤白色变化,根据物体自身因高温发光所表现出来的颜色,有经验的工人可以估计物体的大致温度。

[0005] 现有对高温温度的测量,通常采用非接触式的辐射测温技术,其测温技术的共同缺陷是物体辐射率模型会存在主观选择的误差,或者需要提前测量物体的发射率,对专业测量人员而言也会产生较大误差,对非专业人士将会更加的困难。微尺度温度场的测量本身对测量的空间分辨率有着较高的要求,一般来说,微尺度火工品装药的直径在0.5mm—5mm之间。为了测量火工品燃烧时的温度场分布,需要在设计中考虑实际测量对象的空间分辨率。另外,微尺度火工品燃烧速度非常快,在测量其发射率的时候存在着非常大的困难。不同火工品发射率与温度之间存在不确定的函数关系,加上燃烧温度在短时间内剧烈变化,所以发射率也在极快的变化,且很难用现有的方法准确的测得不同温度下的发射率。目前,准确的测量火工品燃烧过程的发射率还是业内尚未完全解决的问题。

[0006] 公开号为CN 1190185的中国专利提出了一种非接触式的温度测量方法,其在测量前用黑体炉对相机成像传感器的参数进行标定,然后选择了一种物体发射率模型,在测量中通过三基色强度的计算公式对发射率模型中的参数和温度进行计算,从而得到物体的温度。但是,这种温度的测量有一定的局限性,首先物体的发射率模型要选择准确,因为微尺度火工品的发射率与现有的发射率模型是否匹配未知;其次,因为三基色只有三个通道,所以物体的发射率最高只能选取有两个位置参数的模型,否则无法解出物体的温度;另外该

方法在测量中使用了分布色系函数,在实际的响应中,传感器强度随光强变化并非理想的线性曲线,所以,这些都增加了传感器的测量误差。

### 【发明内容】

[0007] 针对上述现有测温方法所存在的技术缺陷,本发明提供了一种基于三基色原理的微尺度火工品高温高速测量装置及其测温方法,能够对于符合普朗克辐射定律的高温火工品,根据它燃烧时的发光颜色,采用计算机自动计算微小尺度火工品快速燃烧的温度场,并且无需借助火工品的发射率模型。

[0008] 一种微尺度火工品燃烧温度场测量方法,对摄像机进行标定,确定物体温度与三基色值关系中的参数,采集火工品燃烧时的三基色值,根据该三基色值与物体温度之间关系确定物体的温度。

[0009] 所述三基色值与物体温度之间满足关系: $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R+B}{G^2} + b$ ,其中,T为绝对温度,k和b为三基色值与物体温度曲线的两个参数,R、G、B为三基色的值。

[0010] 对摄像机进行标定,确定物体温度与三基色值关系中的参数按照以下方法:

[0011] 在不同温度下,采集火工品燃烧的图像,从中提取RGB三基色的值,再求取温度下的三基色值的平均值,最后根据 $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R+B}{G^2} + b$ 计算参数k和b。

[0012] 一种微尺度火工品燃烧温度场测量装置,包括成像镜头、与成像镜头连接的摄像机、与摄像机连接的计算机,所述摄像机放置在安装平台上,安装平台被支撑杆支撑,火工品被夹具夹持后,放置在成像镜头的前面,当火工品燃烧后,其燃烧的图像或视频被成像镜头捕捉,在火工品和成像镜头之间设置有隔离板。

[0013] 所述隔离板上开设有贯穿孔,用于安装窗口固定环,该窗口固定环上安装有滤光片,对火工品产生的光强进行衰减。

[0014] 所述窗口固定环由两部分组成,一部分穿过贯穿孔安装在隔离板上,有外螺纹,另一部分有内螺纹,将前一部分固定在隔离板上。

[0015] 所述支撑杆包括套筒和光杆,其中,光杆安装在套筒中,通过光杆调节安装平台的高度。

[0016] 所述的支撑杆下部通过滑块安装在导轨上,用来调整成像镜头与火工品之间的距离。

[0017] 所述的夹具被第二支撑杆支撑用以调节火工品的高度,该第二支撑杆的下端通过第二滑块安装在导轨上。

[0018] 所述成像镜头的光学放大倍数为0.22,分辨率为 $64 \times 64$ 。

[0019] 除计算机外的所有部件均密封在避光安装箱内,所述隔离板安装在该避光安装箱内。

[0020] 与现有技术相比,本发明至少具有以下有益效果:本发明专利首先标定物体温度与三基色灰度值之间的关系,这样,采集到火工品燃烧的图像后,提取其三基色的值,最后通过三基色值与温度之间的关系确定待测温度的数值。这种方法无需发射率模型,因此,本发明方法更加简单高效,且由于不依赖发射率模型,测量准确度更高。

**【附图说明】**

[0021] 图1为本发明微尺度火工品高温高速测量装置系统图。

[0022] 图2为本发明微尺度火工品高温高速测量装置结构示意图。

[0023] 图3为微尺度火工品燃烧的火焰尺寸示意图。

[0024] 1——火工品 2——滤光片 3——隔离板 4——窗口固定环 5——成像镜头

[0025] 6——高速摄影机 7——避光安装箱 8——数据传输线 9——计算机 10——摄影机安装平台

[0026] 11——支撑杆 1,12——滑块 1,13——导轨 14——夹具 15——第二滑块, 16——第二支撑杆。

**【具体实施方式】**

[0027] 一种微尺度火工品高温高速测量装置,包括:

[0028] 高速摄影机6,该高速摄影机6与成像镜头5同轴设置,所述的成像镜头5设置在高速摄影机6的一侧,在高速摄影机的另一侧设置计算机9;成像镜头用于对微尺度火工品燃烧发出的光成像于摄影机传感器底片,计算机用于对采集到的图像进行处理,所述计算机连接有触发器,用于触发火工品药剂的燃烧。

[0029] 所述高速摄影机选择phantom品牌的摄影机,其有多个帧数和分辨率可供选择,根据火工品燃烧的实际情况和测量的要求,选择相机的帧数为58000帧,分辨率为 $64 \times 64$ 像素,像素尺寸为 $22\mu\text{m}$ ,可以得到图像传感器上靶面为边长为1.408mm的正方形。

[0030] 所述成像镜头选择远心成像镜头,根据被测对象的大小和需要的空间分辨率选择镜头,确定实际的视野为6.4mm的正方形,可得到镜头的光学放大倍率为0.22,分辨率为 $64 \times 64$ 。选择镜头为远心成像镜头GC0-230104。

[0031] 与高速摄影机6相连的安装平台10,用于固定高速摄影机6,高速摄影机6安装在安装平台10上;所述安装平台为铝制的上下两个部分,上部分通过云台螺钉与摄影机连接,下部通过螺钉与支撑杆11连接,上下两部分通过螺钉连接。

[0032] 支撑杆11,设置在安装平台10下方并通过紧固件与安装平台10固定连接,包括套筒和光杆,光杆可动地安装在套筒内,用于升降调节安装平台10的高度。

[0033] 滑块12,设置在支撑杆11的底部,并在导轨13上滑动,通过滑块12在导轨13上的移动调节摄影机6与药剂(或火工品)的距离;所述滑块12通过螺钉与支撑杆连接,可以调节位置后固定在导轨13上。

[0034] 导轨13,所述滑块12在导轨13上滑动,导轨13用于保证光路在一条直线上;所述导轨标有刻度,可以在测量之前对测量距离进行调整。

[0035] 避光安装箱7,用于保护实验仪器,防止外界光线干扰,除了计算机之外的所有零部件均密封在该避光安装箱7内部。避光安装箱由铝板和型材组成,使整个测量装置处于密闭环境中。所述的导轨13安装在避光安装箱7的底部;所述避光安装箱7内部设置有隔离板3,隔离板3上开设有贯穿孔,用于安装窗口固定环4,该窗口固定环4上安装有滤光片,对火工品产生的光强进行衰减。所述窗口固定环4由两部分组成,一部分穿过贯穿孔安装在隔离板3上,有外螺纹,另一部分有内螺纹,将前一部分固定在隔离板3上。在所述窗口固定环4上

安装有中性密度滤光片,对火工品产生的较大的光强进行衰减。

[0036] 火工品1被夹具14夹持而固定,火工品1与成像镜头5同轴设置,火工品1与成像镜头5之间设置有所述的隔离板。

[0037] 夹具14一方面用于夹持火工品,另外一方面通过第二支撑杆16调节火工品的高度,该第二支撑杆16的结构与支撑杆的结构完全相同。夹具通过螺钉与第二支撑杆16连接,通过调整活动钳口来固定需要测量的火工品。

[0038] 第二支撑杆16的底部设置有第二滑块15,该第二滑块15安装在导轨13内,通过滑块在导轨内的滑动调节火工品1与成像镜头5之间的距离。

[0039] 与计算机连接的触发器通过计算机软件控制,因为高速摄影机的内存有限,所以需要在所需时间内将图像采集,所以使用软件先打开高速摄影机,然后设置时间间隔将火工品触发燃烧,这样就可以保证测量得到温度的图像。

[0040] 所述测温处理软件使用MATLAB开发,分为标定和测量两个软件,标定软件用于对黑体炉进行测量,可以对光路的光学性能进行标定,处理后得到标定的参数曲线;测量软件用于对火工品燃烧过程中,对燃烧的过程进行采集,利用标定得到的参数曲线,求解出温度场的图像。

[0041] 微尺度选择成像镜头的计算方法,包括如下:

[0042] 如图3所示,所测量的微尺度火工品燃烧的火焰尺寸不会超过 $6.4\text{mm} \times 6.4\text{mm}$ ,在摄影机选择的帧数和分辨率选择过程中,分辨率选择为 $64 \times 64$ ,在CMOS图像传感器上的靶面长度为 $22 \times 64 = 1408\mu\text{m} = 1.408\text{mm}$ ,可以得到镜头的光学放大倍数为 $1.408/6.4 = 0.22$ ,每个像素在空间中所代表的尺寸为 $22/0.22 = 100\mu\text{m} = 0.1\text{mm}$ ,满足了测量所需要的空间分辨率,所以根据此光学放大倍数和测量距离的要求选择远心成像镜头GC0-230104。

[0043] 上述微尺度火工品高温高速测量装置的使用方法,包括如下:

[0044] (1) 利用计算机控制摄影机触发程序,输出TTL控制高速摄影机开始拍摄,间隔一段时间之后,触发程序触发火工品开始燃烧。

[0045] (2) 火工品燃烧发出的光是在可见光波段连续的热辐射,需要根据非黑体辐射定律、光路传播的能量吸收特性、图像传感器的感光特性、电流转化三基色值的关系等计算出彩色视频的三基色值与物体温度之间的关系根据非黑体的普朗克公式:

$$[0046] \quad M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}$$

[0047] 式中: $M(\lambda, T)$ ——单色辐射出射度;

[0048]  $\varepsilon(\lambda, T)$ ——单色发射率;

[0049]  $C_1$ ——普朗克第一常数;

[0050]  $C_2$ ——普朗克第二常数;

[0051]  $T$ ——绝对温度;

[0052]  $\lambda$ ——波长;

[0053] 当温度低于3000K且波长 $\lambda < 0.8\mu\text{m}$ ,可近似用维恩定律代替普朗克公式:

$$[0054] \quad M_0(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

[0055] 式中各参数与普朗克公式中各参数相同;

[0056] 由于微尺度火工品的面积很小,可以近似为点光源,火工品燃烧的辐射亮度为:

[0057]  $L_0 = \frac{M_0}{\pi}$

[0058] 燃烧发出的光经过中性密度滤光片,成像镜头传到图像传感器处的照度:

[0059]  $E = \frac{\pi}{4} \left( \frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda$

[0060] 式中:a——入瞳半径;

[0061]  $f'$  ——像方焦距;

[0062]  $\lambda_1, \lambda_2$ ——光学系统可以透过的热辐射的波长上下限;

[0063]  $K_T(\lambda)$ ——光学系统的透过率

[0064]  $L_0(\lambda, T)$ ——辐射亮度

[0065] 图像传感器RGB三基色值理论公式分别为:

[0066]  $R = \frac{\pi}{4} \eta_{\mu_r} t \left( \frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_r(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda$

[0067]  $G = \frac{\pi}{4} \eta_{\mu_g} t \left( \frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_g(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda$

[0068]  $B = \frac{\pi}{4} \eta_{\mu_b} t \left( \frac{2a}{f'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_T(\lambda) Y_b(\lambda) L_0(\lambda, T) d\lambda$

[0069] 式中: $\eta$ ——电流与三基色值转换系数;

[0070]  $\mu_r, \mu_g, \mu_b$ ——光电转换系数;

[0071]  $t$ ——曝光时间;

[0072] (3) 在图像传感器RGB三基色值理论公式中,亮度始终受该被测物的发射率的影响,所以做如下假设,近似认为物体的发射率在光学系统可以透过的热辐射的波长上下限  $\lambda_1, \lambda_2$  内成线性变化,即

[0073]  $\varepsilon(\lambda_r, T) + \Delta \varepsilon(\lambda_r, T) = \varepsilon(\lambda_g, T) = \varepsilon(\lambda_b, T) - \Delta \varepsilon(\lambda_b, T)$

[0074] 可得到如下关系:

[0075]  $\varepsilon^2(\lambda_g, T) = \varepsilon(\lambda_r, T) \varepsilon(\lambda_b, T) - \varepsilon(\lambda_r, T) \Delta \varepsilon(\lambda_b, T) - \Delta \varepsilon(\lambda_r, T) \varepsilon(\lambda_b, T) + \Delta \varepsilon(\lambda_r, T) \Delta \varepsilon(\lambda_b, T)$

[0076] 图像传感器的光谱响应为理想冲击响应,则对上述公式使用拉格朗日中值定理化简为  $R = K_r L_0(\lambda_r, T)$ ;  $G = K_g L_0(\lambda_g, T)$ ;  $B = K_b L_0(\lambda_b, T)$

[0077] 式中: $K_r, K_g, K_b$ ——常数

[0078] 对图像传感器的三基色做如下处理:

[0079] 
$$\ln \frac{R \cdot B}{G^2} = \ln \frac{K_r \cdot K_b}{K_g^2} + \ln \frac{L_0(\lambda_r, T) \cdot L_0(\lambda_b, T)}{L_0^2(\lambda_g, T)}$$

$$= \ln \frac{K_r \cdot K_b}{K_g^2} + \ln \frac{\varepsilon(\lambda_r, T) \cdot \varepsilon(\lambda_b, T)}{\varepsilon^2(\lambda_g, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_r \cdot \lambda_b}{\lambda_g^2} + \left( \frac{2}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right) \frac{C_2}{T}$$

[0080] 因为发射率相差较小,所以略去一阶和二阶微量的影响,将式子化简可得

[0081] 
$$\frac{1}{T} = \frac{\ln \frac{R \cdot B}{G^2} + \ln \frac{K_r \cdot K_b}{K_g^2} - 5 \ln \frac{\lambda_g^2}{\lambda_r \cdot \lambda_b}}{C_2 \left( \frac{2}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} - \frac{1}{\lambda_b} \right)}$$

[0082] 在标定与测量时,将温度与三基色值的关系简化为 $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R \cdot B}{G^2} + b$ ,在标定时将温度的图像与对应的温度输入可以标定得到k和b的参数曲线,在测量过程中,将拍摄得到的图像的 $\ln \frac{R \cdot B}{G^2}$ 值求出即可得到对应的k和b,即可求出对应像素点的温度值。

[0083] 本发明的有益技术效果在于:

[0084] (1) 本发明测温装置通过高速摄影机进行图像采集,所以测温的时间响应取决于摄影机拍摄的帧数,在测量过程中,因为摄影机的成像质量在曝光时间越短的情况下越差,所以在燃烧速度较低的情况下需要选择长的曝光时间,可以提高测量的精度,对不同的测量对象应选择不同的测量帧数。

[0085] (2) 本发明测温装置通过高速摄影机进行采集图像,在测量之前需要已知或者实测光路的传光性能以及图像传感器的感光性能,不同的高速摄影机和光路会有不同的性能,所以在测量不满足要求的情况下,可以选择不同的高速摄影机和光路,只需要对测量仪器的性能进行调整即可。

[0086] (3) 本发明是基于图像传感器感光原理的测温方法,无需像其他非接触测量方法需要物体的发射率,只需要直接测量物体的温度图像,对测量的对象要求较少,可以测量未知发射率的物体。

[0087] 本发明在进行软件处理时采用在MATLAB中对整个彩色图像的色彩矩阵进行处理的方式,避免了像素点逐个求解的效率低下,可以直接求出温度场。

[0088] 本发明专利按照以下步骤进行安装和测量:

[0089] (1) 标定:

[0090] a) 将成像镜头5安装在高速摄影机6上,通过云台螺钉将高速摄影机固定在摄影机安装平台上,摄影机安装平台与支撑杆11之间通过螺钉固定,将支撑杆11底部的螺柱拧到滑块12上的螺纹孔上,将滑块12安装到导轨上。

[0091] b) 把装有中性密度滤光片的窗口固定环安装在隔离板上,将隔离板安装到避光安装箱的最左端,移动第二滑块15将其移动至与隔离板的距离和测量时的距离相同的位置,将数据连接线的一段连接至高速摄影机上,另一端连接在计算机上。

[0092] c) 将隔离板3上安装在窗口固定环上的中性密度滤光片对准黑体炉,使得远心成像镜头与黑体炉之间的距离为镜头的工作距离,打开高速摄影机,将高速摄像机的参数进行设置,调整为与测量时相同的帧数,分辨率,光圈和曝光时间。

[0093] d) 将黑体炉的温度进行调节,将温度调节为500℃,待温度稳定后,对黑体炉的图像采集同一温度下的5张图像。

[0094] e) 将温度从500℃到3000℃,温度间隔为100℃的每一个温度点按照b中的方法进行采集。

[0095] f) 将采集到的图像导入到标定程序,生成参数曲线。

[0096] 参数曲线按照以下的过程生成:

[0097] a. 将采集到的黑体炉彩色图像导入MATLAB中,生成RGB三基色灰度值矩阵,并按照顺序定义各个变量。

[0098] b. 对同一温度的5张图像的R、G、B三基色值进行求平均,由于黑体炉是温度均匀分布的温度图像,所以对图像中目标进行图像识别之后对光斑内部的强度进行求平均,得到



标定时所需的变量。

[0099] c. 按公式  $\frac{1}{T} = k \ln \frac{R \cdot B}{G^2} + b$  对所标定的温度值和三基色值进行标定,生成离散的k和b的值。

[0100] d. 对k和b的值进行拟合,得到参数曲线。

[0101] (2) 测量:

[0102] a. 把装有中性密度滤光片的窗口固定环安装在隔离板上,将隔离板安装到避光安装箱的中部。

[0103] b. 将成像镜头安装在高速摄影机上,通过云台螺钉将高速摄影机固定在摄影机安装平台上,摄影机安装平台与支撑杆11之间通过螺钉固定,将支撑杆11底部的螺柱拧到滑块12上的螺纹孔上,将滑块12安装到导轨13上。

[0104] c. 用夹具14将火工品夹持,夹具14与第二支撑杆16之间通过螺钉固定,将第二支撑杆16底部的螺柱拧到第二滑块15上的螺纹孔上,将第二滑块15安装到导轨13上。

[0105] d. 移动滑块12与第二滑块15,使火工品与远心成像镜头之间的距离为镜头的工作距离,将数据连接线的一段连接至高速摄影机上,另一端连接在计算机上。

[0106] e. 将触发器与计算机连接好,打开高速摄影机,将高速摄像机的参数进行设置,调整为与测量时相同的帧数,分辨率,光圈和曝光时间。

[0107] f. 打开触发程序,使用触发程序触发高速摄影机开始拍摄,然后触发火工品燃烧,对火工品燃烧的图像进行采集。

[0108] g. 将采集到的视频导入测温处理软件,并将标定的参数曲线带入测温处理软件中就可以得到火工品燃烧的温度场分布。

[0109] 测温处理软件得到温度场分布的过程如下:

[0110] a. 将标定得到的参数曲线和采集到的火工品燃烧视频导入测温处理软件,将视频按每一帧分解为彩色图像,并依次定义各帧的图像变量。

[0111] b. 在彩色图像中读取对应位置的RGB三基色的值,计算出  $\frac{R \cdot B}{G^2}$  的值即可得到k和b的值,对每个像素点处的温度值进行计算,就可以得到温度场分布的图像。

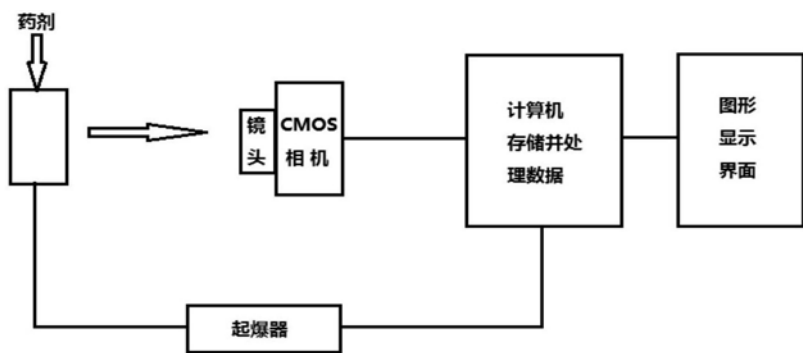


图1

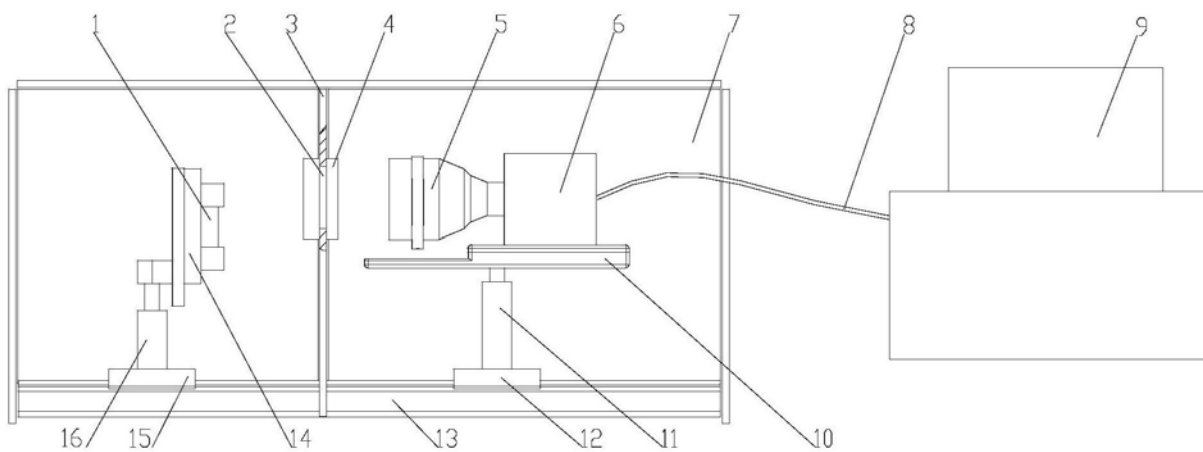


图2

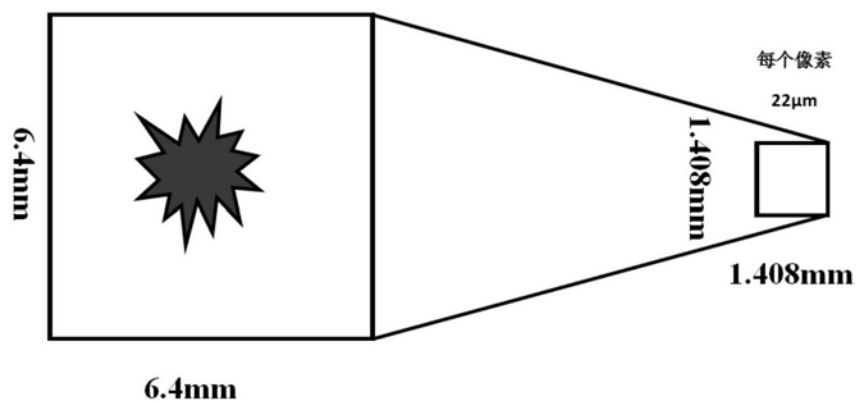


图3