



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115853675 B

(45) 授权公告日 2023.06.20

(21) 申请号 202211556757.X

G01M 15/10 (2006.01)

(22) 申请日 2022.12.06

F02K 9/72 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

审查员 靳文强

申请公布号 CN 115853675 A

(43) 申请公布日 2023.03.28

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 林鑫 罗家泉 张森豪 周功喜

张泽林 王泽众 李飞 余西龙

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 焦海峰

(51) Int. Cl.

F02K 9/96 (2006.01)

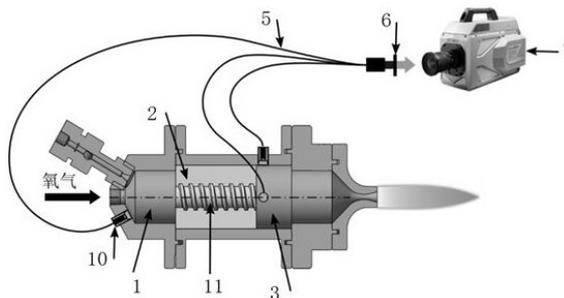
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

## (54) 发明名称

一种固液发动机燃烧机理的研究方法及系统

## (57) 摘要

本发明提供了一种固液发动机燃烧机理的研究方法及系统,方法为基于安装在前燃烧室和后燃烧室的合束成像光纤,多角度采集燃烧室内的火焰化学发光成像,针对火焰图像,提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息,以分析内燃场的流动和燃烧特性。基于该方法提供了一种系统,在前燃烧室和后燃烧室上打孔以安装保护工装和光纤镜头,光纤镜头由合束光纤连接到高速相机,通过高速相机采集主燃烧室内燃场的火焰化学发光成像。本发明提供的方法及系统,能够在高温高压、真实发动机条件下对固液火箭发动机药柱内部封闭空间的扩散燃烧火焰可视化,进而分析其内燃场流动、燃烧特性,以解决现有技术中无法记录固液发动机燃烧室内的完整燃烧过程的问题。



1. 一种固液发动机燃烧机理的研究方法,其特征在于,包括如下内容:

基于安装在前燃烧室和后燃烧室的合束成像光纤,多角度采集燃烧室内的火焰化学发光成像,根据采集的火焰图像,提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息,以分析内燃场的流动和燃烧特性;

在不影响固液发动机结构强度的前提下,在前燃烧室和后燃烧室的壁面上打孔,用于安装所述合束成像光纤的光纤镜头;

火焰图像采集过程中,同时采集发光组分,通过发光组分的采集,所得所述火焰图像能够指示火焰的锋面位置。

2. 根据权利要求1所述的一种固液发动机燃烧机理的研究方法,其特征在于,

所述研究方法还包括,使用图像切割方法和本征特征值分析方法分析所述火焰图像,以提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息。

3. 一种基于权利要求1-2任一项所述的一种固液发动机燃烧机理的研究方法的系统,其特征在于,

固液发动机的燃烧室包括前燃烧室(1)、主燃烧室(2)和后燃烧室(3),燃料药柱(11)位于所述主燃烧室(2)内,

在前燃烧室(1)和后燃烧室(3)的壁面上打孔以安装保护工装(10),所述保护工装(10)内安装有光纤镜头(4),所述光纤镜头(4)由合束光纤(5)连接到高速相机(7),通过所述高速相机(7)采集固液发动机的燃烧室内燃场的火焰化学发光成像,以研究固液发动机的燃烧机理;

在所述前燃烧室(1)的壁面上打孔安装有一个所述光纤镜头(4),所述前燃烧室(1)壁面上孔的中轴线与所述燃料药柱(11)的中轴线成30度角,该孔的中轴线与所述燃料药柱(11)的中轴线相交的位置为所述燃料药柱(11)的前端面,使得安装为该孔内的光纤镜头(4)能够捕捉到燃烧室边界层内火焰的动态特性;

在所述后燃烧室(3)的壁面上安装有两个所述光纤镜头(4),两个所述光纤镜头(4)互相垂直,以反演后燃烧室内火焰的结构。

4. 根据权利要求3所述的系统,其特征在于,

在前燃烧室(1)和后燃烧室(3)的壁面上打孔,每个孔的直径为5mm,每个光纤镜头的直径为2mm;

所述保护工装(10)设有蓝宝石窗口(8),置于所述前燃烧室(1)和所述后燃烧室(3)壁面上的孔内用于隔离所述光纤镜头(4)和所述主燃烧室(2)内的高温气体。

5. 根据权利要求3所述的系统,其特征在于,

每个所述光纤镜头(4)采用自聚焦镜头,视场角为 $50^\circ$ ;

三个所述光纤镜头(4)由一合三的合束光纤(5)汇集连接到所述高速相机(7)。

6. 根据权利要求3所述的系统,其特征在于,

在所述高速相机(7)上设置有滤光片(6),所述合束光纤(5)通过所述滤光片(6)连接到所述高速相机(7);

其中,所述滤光片(6)的发光组分为 $\text{CH}^*$ 、 $\text{OH}^*$ 、 $\text{C}_2$ 中的一种。

7. 根据权利要求3-6任一项所述的系统,其特征在于,

所述高速相机(7)由固液发动机的点火信号同步触发。

## 一种固液发动机燃烧机理的研究方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明实施例涉及固液火箭发动机领域,尤其涉及一种固液发动机燃烧机理的研究方法及系统。

### 背景技术

[0002] 固液火箭发动机结合了固体火箭发动机和液体火箭发动机的特点,通常使用固体燃料和液体氧化剂的组合。固液火箭发动机的燃烧方式为封闭空间内的扩散燃烧,位于发动机主燃烧室,亦即药柱内部,是一个复杂的物理-化学耦合机制。

[0003] 工作时燃烧区火焰通过辐射、对流换热加热固体燃料,固体燃料表面在将热量传导至更远处的燃料之外受热热解、气化,然后在主燃烧室内与氧化剂掺混发生燃烧。

[0004] 这种封闭空间内的燃烧方式导致对固液火箭发动机的燃烧机理进行研究非常困难,首先是对火焰进行直接观测非常困难;另外高温高压的苛刻环境对诊断方法的隔热性能提出了很高的要求。目前的研究主要局限于两种方法:一种是在发动机后燃烧室开凿大面积光学窗口,但是由于火焰到了后燃烧室已经完全发展,因此这种方法往往无法体现出固液火箭发动机扩散燃烧的特点,且由于光学窗口直径通常大于50mm,与发动机后燃烧室的直径相当,这种大尺度光学窗口会改变发动机后燃烧室的形状,另外这种窗口由于尺寸太大,往往只能使用石英进行热防护,承压能力有限,也会对发动机结构强度造成影响。另一种是放弃真实发动机外型使用平板燃烧器,这种方法虽然可以部分反映发动机的燃烧特点,但是由于结构和实际有显著区别,无法体现真实发动机内部燃烧的三维效应。两种方法均不能得到燃烧室内完整的燃烧过程,进而无法反映发动机的燃烧特点。

### 发明内容

[0005] 本发明提供了一种固液发动机燃烧机理的研究方法及系统,以解决现有技术中无法记录固液发动机燃烧室内的完整燃烧过程的问题。

[0006] 在本发明的第一个方面,提供了一种固液发动机燃烧机理的研究方法,包括如下内容:

[0007] 基于安装在前燃烧室和后燃烧室的合束成像光纤,多角度采集燃烧室内的火焰化学发光成像,根据采集的火焰图像,提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息,以分析内燃场的流动和燃烧特性。

[0008] 进一步地,在不影响固液发动机结构强度的前提下,在前燃烧室和后燃烧室的壁面上打孔,用于安装所述合束成像光纤的光纤镜头。

[0009] 进一步地,火焰图像采集过程中,同时采集发光组分,通过发光组分的采集,所得所述火焰图像能够指示火焰的锋面位置。

[0010] 进一步地,所述研究方法还包括,使用图像切割方法和本征特征值分析方法分析所述火焰图像,以提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息。

[0011] 在本发明的第二个方面,提供一种上述方法的系统,

[0012] 固液发动机的燃烧室包括前燃烧室、主燃烧室和后燃烧室，燃料药柱位于所述主燃烧室内，

[0013] 在前燃烧室和后燃烧室的壁面上打孔以安装保护工装，所述保护工装内安装有光纤镜头，所述光纤镜头由合束光纤连接到高速相机，通过所述高速相机采集固液发动机的燃烧室内燃场的火焰化学发光成像，以研究固液发动机的燃烧机理。

[0014] 进一步地，在所述前燃烧室的壁面上打孔安装有一个所述光纤镜头，所述前燃烧室壁面上孔的中轴线与所述燃料药柱的中轴线成30度角，该孔的中轴线与所述燃料药柱的中轴线相交的位置为所述燃料药柱的前端面，使得安装为该孔内的光纤镜头能够捕捉到燃烧室边界层内火焰的动态特性；

[0015] 在所述后燃烧室的壁面上安装有两个所述光纤镜头，两个所述光纤镜头互相垂直，以反演后燃烧室内火焰的结构。

[0016] 进一步地，在前燃烧室和后燃烧室的壁面上打孔，每个孔的直径为5mm，每个光纤镜头的直径为2mm；

[0017] 所述保护工装设有蓝宝石窗口，置于所述前燃烧室和所述后燃烧室壁面上的孔内用于隔离所述光纤镜头和所述主燃烧室内的高温气体。

[0018] 进一步地，每个所述光纤镜头采用自聚焦镜头，视场角为50°；

[0019] 三个所述光纤镜头由一合三的合束光纤汇集连接到所述高速相机。

[0020] 进一步地，在所述高速相机上设置有滤光片，所述合束光纤通过所述滤光片连接到所述高速相机；

[0021] 其中，所述滤光片的发光组分为CH\*、OH\*、C<sub>2</sub>中的一种。

[0022] 进一步地，所述高速相机由固液发动机的点火信号同步触发。

[0023] 本发明和现有技术相比具有如下有益效果：

[0024] 1. 本发明提出了一种全新的固液火箭发动机燃烧机理的研究方法，基于安装在前燃烧室和后燃烧室的合束成像光纤，能够在高温高压、真实发动机条件下对固液火箭发动机药柱内部封闭空间的扩散燃烧火焰可视化，进而分析其内燃场流动、燃烧特性。

[0025] 2. 本发明还提供了一种基于固液火箭发动机燃烧机理的研究方法的系统，该系统通过在前、后燃烧室的壁面上打孔安装光纤镜头，直径小而且配合有保护工装，结合高速相机，可以多角度采集燃烧室内燃场的火焰化学发光成像，同时打孔结构的直径不会对发动机的结构强度造成显著影响。

## 附图说明

[0026] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案，下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地，下面描述中的附图仅仅是示例性的，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据提供的附图引申获得其它的实施附图。

[0027] 图1为本发明实施例中一种固液发动机燃烧机理的研究系统的结构示意图；

[0028] 图2为本发明实施例中保护工装的结构示意图；

[0029] 图3为使用本发明方法及系统的实施例得到的一组固液火箭发动机内燃场火焰图像；

[0030] 图4为使用本发明方法及系统的实施例得到的一组固液火箭发动机内燃场的本征特征值分解模态图；

[0031] 图中标号：

[0032] 1-前燃烧室,2-主燃烧室,3-后燃烧室,4-光纤镜头,5-合束光纤,6-滤光片,7-高速相机,8-蓝宝石窗口,9-壁面结构,10-保护工装,11-燃料药柱。

### 具体实施方式

[0033] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0034] 现有技术中一般在发动机后燃烧室开凿光学窗口,但是由于火焰到了后燃烧室已经完全发展,往往无法体现出固液火箭发动机扩散燃烧的特点。

[0035] 本发明提供了一种固液发动机燃烧机理的研究方法,包括:基于安装在前燃烧室和后燃烧室的合束成像光纤,采集燃烧室内的火焰化学发光成像,根据采集的火焰图像,提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息,以分析内燃场的流动和燃烧特性。

[0036] 本发明中,在不影响固液发动机结构强度的前提下,在前燃烧室和后燃烧室的壁面上打孔,用于安装合束成像光纤的光纤镜头,可以在不影响发动机结构强度的情况下,多角度地采集到发动机内部的火焰图像,同时能够采集发动机内部药柱的从前燃烧室至后燃烧室的全部燃烧过程的火焰图像。

[0037] 火焰图像采集过程中,同时采集发光组分,通过发光组分的采集,所得火焰图像能够指示火焰的锋面位置,如发光组分可以为 $CH^*$ ,透过发光组分 $CH^*$ ,可以指示火焰的锋面位置。火焰的锋面位置可指示燃烧的反应剧烈程度,代表火焰的真实形态,为火焰动力学的研究提供关键的信息。

[0038] 研究方法还包括,使用图像切割方法和本征特征值分析方法分析火焰图像,以提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息。

[0039] 本发明中基于合束成像光纤,光纤镜头位于发动机前燃烧室和后燃烧室的壁面内,以期对发动机燃烧室内的火焰进行可视化,通过透过发光组分 $CH^*$ 来指示火焰锋面,采集火焰图像后,使用图像切割方法和本征特征值分析方法分析火焰图像,以提炼燃烧室内燃场的火焰模态分布及动态信息,开展对固液火箭发动机燃烧机理的研究。

[0040] 本发明提出了一种全新的固液火箭发动机燃烧机理研究方法,能够在高温高压、真实发动机条件下对固液火箭发动机药柱内部封闭空间从前燃烧室至后燃烧室内药柱整体的扩散燃烧火焰可视化,进而分析其内燃场流动、燃烧特性。

[0041] 本发明还提供了一种基于上述固液火箭发动机燃烧机理的研究方法的系统,如图1所示,固液发动机包括前燃烧室1、主燃烧室2和后燃烧室3,燃料药柱11位于主燃烧室2内,在前燃烧室1和后燃烧室3的壁面上打孔以安装保护工装10,保护工装10内安装有光纤镜头4,光纤镜头4由合束光纤5连接到高速相机7,通过高速相机7采集固液发动机的燃烧室内燃场的火焰化学发光成像,以研究固液发动机的燃烧机理。

[0042] 本发明中,药柱安装在主燃烧室2内,燃料药柱11的基体由3D打印技术一体成型,

选用材料为常规的3D打印材料例如ABS、铝合金、陶瓷等,即可参与燃烧也可不参与燃烧。燃料介质为石蜡基燃料、PE等固液火箭发动机常规燃料。

[0043] 在一个具体实施例中,在前燃烧室1的壁面上打孔安装有一个光纤镜头4,前燃烧室1壁面上孔的中轴线与燃料药柱11的中轴线成30度角,该孔的中轴线与燃料药柱11的中轴线相交的位置为燃料药柱11的前端面,使得安装为该孔内的光纤镜头4能够捕捉到燃烧室边界层内火焰的动态特性。在后燃烧室3的壁面上安装有两个光纤镜头4,两个光纤镜头4互相垂直,以反演后燃烧室内火焰的结构。

[0044] 打孔过程中,孔的中轴线与药柱中轴线成30度角,可以倾斜地观测燃烧室,增大观测角度,从而更清晰的拍摄到边界层内的火焰层;此外,要求孔的中轴线与药柱的中轴线的交点位于药柱的前端面上,可以使得光纤镜头的视角尽可能地覆盖主燃烧室内的火焰。

[0045] 此外,本实施例中,在前燃烧室1和后燃烧室3的壁面上打孔,每个孔的直径为5mm,每个光纤镜头的直径为2mm;保护工装10设有蓝宝石窗口8,置于前燃烧室1和后燃烧室3壁面上的孔内用于隔离光纤镜头4和主燃烧室2内的高温气体。

[0046] 通常固液火箭发动机的后燃烧室直径为60mm,现有技术中使用的光学窗口直径一般大于50mm,本实施例中打孔的直径为5mm,不会对发动机结构强度造成影响,还可以配合安装保护工装和光纤镜头。此外,由于光学窗口尺寸太大,只能使用石英,因此承压能力有限,而本实施例中的保护工装使用的是蓝宝石窗口8,承压能力较之石英更强。

[0047] 保护工装10还包括壁面结构9,连接蓝宝石窗口8,位于燃烧室的壁面内,光纤镜头4安装在保护工装10内,通过蓝宝石窗口8可以隔离光纤镜头4和燃烧室内的高温气体,壁面结构9位于发动机壁面内部,对壁面内部的光纤同样起到隔温的效果,保护工装10可以同时保护光纤镜头4和壁面内的光纤。

[0048] 合束成像光纤包括光纤镜头4和合束光纤5,本系统通过使用合束成像光纤和高速相机7,在不对发动机结构强度造成影响的情况下,实现了固液火箭发动机主燃烧室2内部的火焰结构可视化,以实现分析发动机内燃场的流动、燃烧特性。

[0049] 所以,本实施例中,三个光纤镜头4由一合三的合束光纤5汇集连接到高速相机7,每个光纤镜头4采用自聚焦镜头,视场角为 $50^\circ$ 。三个光纤镜头4的配合安装,以期对固液发动机的燃烧室的边界层内的火焰进行清晰的可视化。

[0050] 高速相机7由固液发动机的点火信号同步触发,高速相机7的采集频率为1kHz,曝光时间为1ms。

[0051] 此外,高速相机7上设置有滤光片6,合束光纤5通过滤光片6连接到高速相机7;其中,滤光片6的发光组分为 $\text{CH}^*$ 、 $\text{OH}^*$ 、 $\text{C}_2$ 中的一种,用于透过发光组分以在火焰图像上指示火焰的锋面位置。这些发光组分代表了燃烧的反应剧烈区,通过这些组分的位置可以在火焰图像上指示火焰区强度变化及分布。

[0052] 以发光组分 $\text{CH}^*$ 为例,滤光片6中心波长430nm,带宽10nm,直径25.4mm,滤光片6可以夹持在高速相机7中。

[0053] 本实施例中,三个光纤镜头4及其安装角度的设置,可以从发动机头部进行大视场角观测,监控到从前燃烧室至后燃烧室内整个药柱完整的燃烧过程,分别对发动机主燃烧室2和后燃烧室3内的火焰进行可视化成像,可以得到固液火箭发动机内瞬态和平均的火焰图像。

[0054] 平均图像为一个时间周期内多张瞬时图像的像素值的平均(以测量频率1kHz为例,意味着1秒能够采集1000张图片,可根据实验需求,对于0.1s中的100张进行平均,进而得到1s内10张平均的火焰图像,这种处理方式既可以提高信噪比,同时能够反应在一段时间的整体变化趋势,虽然因为多次平均丢掉一些细节信息,但是宏观变化特性会更加清楚),可反映火焰在一段时间范围内的整体变化趋势,如图3所示。

[0055] 对固液火箭发动机燃烧室内的火焰图像进行本征特征值分解,使用特征模态来反映火焰的燃烧特性,可以得到如图4所示的火焰脉动特征模态。

[0056] 本发明的具体过程:定制一种具有大视场角的石英成像光纤,设计一套蓝宝石保护工装,保护光纤镜头不被燃烧室内高温气体破坏,合束光纤的末端通过滤波片之后连接到高速相机上,实现对发光组分CH\*的采集,所得原始图像可以指示火焰的锋面位置。该方法及系统,突破了传统的诊断方法只能局限在平板燃烧器和发动机后燃烧室内的局限,能够直接对发动机燃烧室内的火焰进行成像分析,更加直观地反映固液火箭发动机的燃烧机理,此外由于使用了小尺寸合束光纤,不会对发动机结构强度产生影响,提高了诊断方法的安全性,最后通过对原始图像进行分析,可以对固液火箭发动机燃烧机理进行有效的研究。

[0057] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

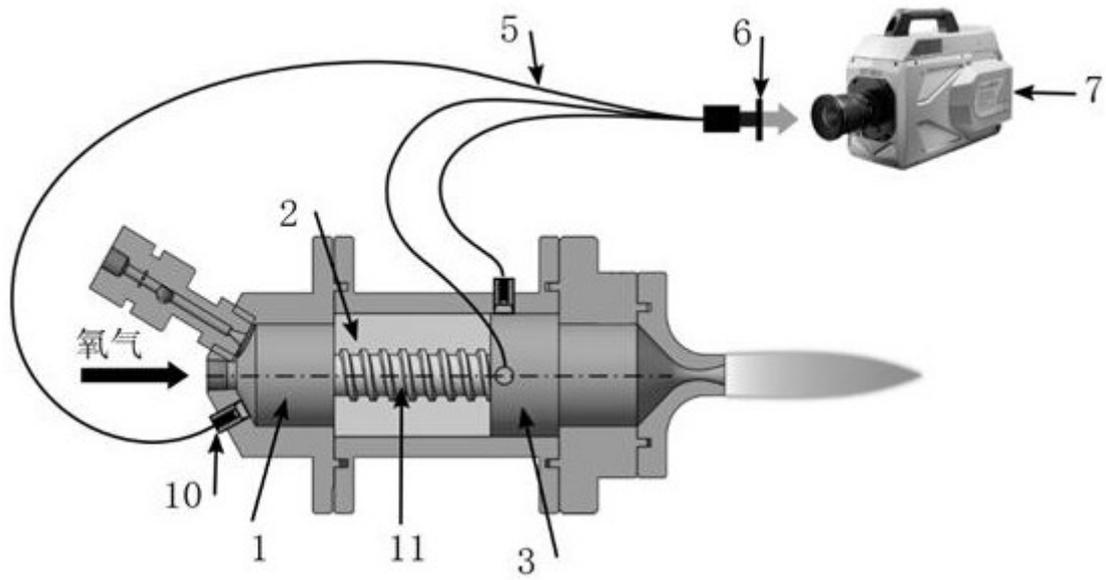


图1

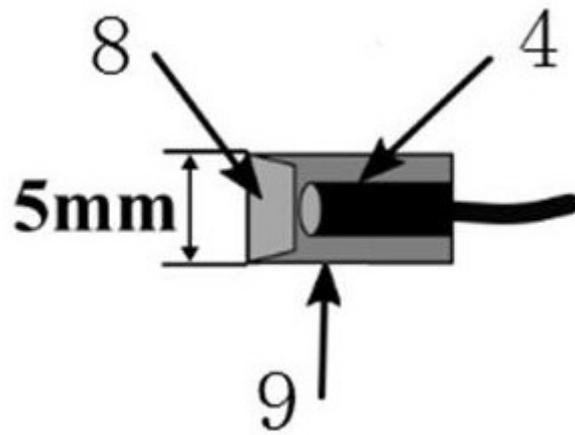


图2

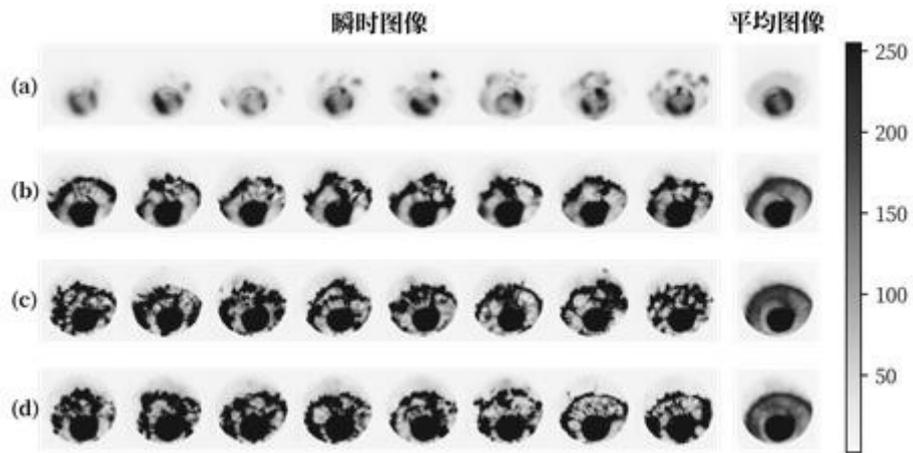


图3

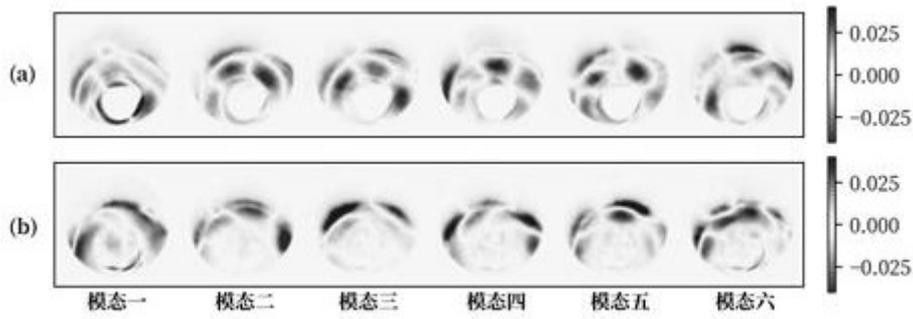


图4