

燃烧蜡烛同步振荡问题研究

程德胜¹, 浦文婧¹, 黄玲玲¹, 陶鹏宇¹, 邱国昊²

¹陆军炮兵防空兵学院基础部 安徽合肥

²陆军炮兵防空兵学院四大队 安徽合肥

【摘要】同步蜡烛,指的是当几支彼此邻近的蜡烛燃烧时,可以观察到振荡的火焰,两个这样的振荡可以相互耦合,导致同相或反相。本文采取控制变量法对单个蜡烛振子产生振荡的原因,以及不同的间隔距离的蜡烛产生的同相或反相振荡现象进行探究,发现蜡烛振荡耦合所表现出来的现象与蜡烛之间的距离有关,使用 FDS 软件对火焰的燃烧情况进行了模拟,同样得到了同相和反相振动的结果。考虑到空气的气体扩散系数比较低,蜡烛燃烧时等温线较平稳,产生振荡的原因最有可能是热辐射。

【关键词】同步蜡烛; 火焰振荡; 同相反相; FDS (Fire Dynamics Simulator)

【基金项目】安徽省质量工程项目(2022jyxm1549)和教指委(华东地区)高等学校教学研究立项项目(2023JZWH08)资助

【收稿日期】2023 年 7 月 25 日 **【出刊日期】**2023 年 9 月 10 日 **【DOI】**10.12208/j.pstr.20230006

Study on synchronous oscillation of burning candle

Desheng Cheng¹, Wenjing Pu¹, Lingling Huang¹, Pengyu Tao¹, Guohao Qiu²

¹Foundation Department, Academy of artillery air defense, Hefei, Anhui

²Four teams, Academy of artillery air defense, Hefei, Anhui

【Abstract】The so-called synchronous candle refers to the flame that can be observed to oscillate when several adjacent candles are burning. Two such oscillations can be coupled with each other, leading to in-phase or anti phase. In this paper, the control variable method is used to study the reason of the oscillation of a single oscillator and the phenomenon of in-phase or anti phase oscillation of candles with different separation distance. It is found that the phenomenon of the oscillation coupling of regular candles is related to the distance between candles. FDS software is used to simulate the combustion of flame, and the results of in-phase and anti-phase vibration are also obtained. Considering that the gas diffusion coefficient of the air is too low and the isotherm of the candle is relatively stable, the most likely cause of synchronization or inverse synchronization is thermal radiation.

【Keywords】Synchronous candle; Flame oscillation; In phase and anti phase; FDS (Fire Dynamics Simulator)

引言

火焰燃烧是物体在燃烧后的气化,蜡烛的主要成分是石蜡,石蜡是蒸发燃烧,产生气体,所以有火焰。2021 年国际青年物理学家锦标赛(IYPT)第 5 题“同步蜡烛”描述了生活中常见而又容易被忽略的火焰现象:当蜡烛被点燃之后,单个蜡烛的火

焰在无风的环境下会保持平稳的火焰,不会产生振荡,但是当几支燃烧的蜡烛彼此邻近时,可以观察到振荡的火焰。

两个这样的振荡的火焰可以相互耦合,导致同相或反相同步,它们的振荡取决于蜡烛之间的距离,解释并探究这种现象。笔者在主要检索库分别通过

*通讯作者:程德胜(1980-),安徽休宁,陆军炮兵防空兵学院基础部讲师,博士,大学物理实验教学研究。

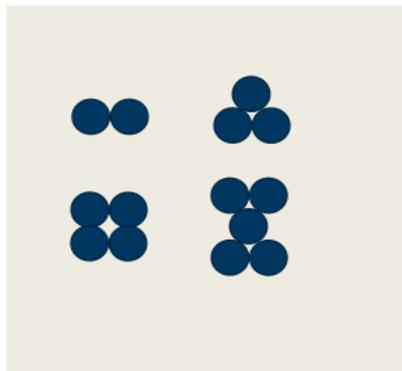
以关键词“同步蜡烛”和“Synchronised Candles”为题名, 进行检索, 只搜到关于火焰振荡问题研究的文献, 没有同步蜡烛问题的研究。本文将根据火焰振荡理论, 从实验, 理论分析与数值模拟三个方面相结合的方式, 探究同步蜡烛现象。

1 实验探究

为了减少外界环境对实验测量的影响, 实验时门窗全部关闭, 拉上窗帘, 关闭灯光, 避免人员走动, 点燃单支蜡烛, 此时蜡烛的火焰平稳燃烧, 毫无波澜。根据“同步蜡烛”的描述, 当几支燃烧的蜡烛彼此邻近时, 可以观察到振荡现象的火焰, 两个这样的振荡火焰可以相互耦合, 导致同相或反相同步, 它们的振荡取决于蜡烛之间的距离。为了探究这个现象, 实验采取控制变量法对单个振子产生振荡的原因, 以及不同的间隔距离的蜡烛产生的同相或反相振荡现象进行探究。实验的重点主要涉及两个方面: 一是实验观察单个振子火焰振荡现象, 分析蜡烛燃烧产生振荡的原因; 二是实验观察相同振子在不同距离下振荡的现象, 分析蜡烛燃烧耦合振荡的原因。

1.1 单个振子火焰振动现象

实验采用的蜡烛直径为 1cm, 单个蜡烛燃烧时蜡烛火焰平稳燃烧, 并不产生振荡现象, 实验中改变蜡烛的数量, 摆放方式如图 1 (a) 所示, 分别对不同的振子 (2、3、4、5 根蜡烛) 火焰进行观察, 为了统一实验环境, 实验过程中忽略氧气含量对火焰温度产生的影响, 假设蜡烛中的石蜡充分反应, 燃烧的火焰中无石蜡残留, 石蜡有足够的量, 且能以恒定速率供应石蜡气体, 并且尽量减少非实验产生的气流对火焰的扰动, 排除偶然因素和蜡烛个体



(a) 单个振子蜡烛的排列方式

差异的影响, 可以发现组成振子的蜡烛火焰开始有规律的振荡, 并且单个振子蜡烛的数量会影响火焰的振荡频率, 蜡烛数量越多, 振荡频率越低。

1.2 不同振子距离火焰振动现象

为观察不同振子的相互影响, 采用 3+3 的模式探究两个振子的振荡现象, 如图 2 所示, 振子的距离选择 6 种不同的距离 (5, 10, 20, 30, 50, 60 mm), 在变换振子距离时, 尽量减少非实验产生的气流对火焰的扰动, 排除偶然因素和蜡烛个体差异的影响, 实验录制视频一次性连续完成, 减小不同时间段实验环境不同对实验结果产生影响, 从视频中截取具有典型特征的火焰, 火焰振荡现象如图 2 所示, 在振子不同距离时, 火焰振荡的现象不同。实验现象观察的结果统计如表 1 所示。

从表 1 的结果可以看出, 当两个振子距离小于 20mm 时会发生, 两个振子的蜡烛火焰出现同相振荡现象, 振子距离等于 30mm 时, 蜡烛火焰反相振荡与同相振荡随机出现, 当振子距离等于 50mm 时, 蜡烛火焰反相振荡, 而当距离大于 60mm 时, 蜡烛振荡情况与单个振子模型振荡情况相同, 相较于 10 mm 和 30mm 的模拟显示, 可以看出, 因为蜡烛之间距离的增加, 烛焰之间空气的温度并没有受到蜡烛燃烧的影响, 此时一对蜡烛振子之间不存在耦合现象。

2 理论分析

千百年来, 火是人类文明发展进步的一个重要工具, 人们已经可以利用火的特性为工业生产和生活提供各种便利。但是自然界中通过自然过程传播的火灾, 特别是雷击引起的森林火灾给世界带来巨大的灾难^[1,2]。



(b) 3 根蜡烛火焰振荡

图 1 单个振子的火焰振荡



图2 不同振子相距

表1 火焰振荡规律与振子距离之间的变化关系

振子距离 (mm)	5	10	20	30	50	60
振荡现象	同相振荡	同相振荡	同相振荡	反相振荡与同相振荡随机	反相振荡	无明显联系

而对于一些巨大的森林火灾人类的行动显得无能为力。英国的科学家 Derek Michael 认为这些火焰之所以难以扑灭是因为不同的火焰产生了临近效应^[3,4], 火焰燃烧反应过程中释放出大量的微小颗粒和能量, 反应产物的浓度随时间而变化, 从而引起烟尘量和辐射发射的振荡。这些振荡的火焰会快速点燃森林的树冠, 树冠的火焰在振荡过程又会点临近的森林, 从而使得燃烧更加的剧烈, 形成无法控制的树冠之火。而作为同步蜡烛燃烧的火焰产生的振荡现象同样也可以火焰的临近效应来解释。

火焰的振子的燃烧是一个开放的系统^[5,6], 燃烧过程中反应物和产物通过分子扩散运动自由传播, 火焰的外部是环境空气, 它给火焰的燃烧提供氧气供应, 氧气不断传输到反应区域, 火焰反应区域中, 碳、氧和氢等物质相互混合并产生反应, 反应的产物扩散到周围环境中。由于火焰不同区域的温度不

一样, 我们看到的颜色也不相同, 从单个蜡烛燃烧时火焰的颜色可以看出蜡烛火焰的温度分布是有层次的, 火焰外围的温度与环境温度相近, 同时火焰燃烧产物向上扩散, 由此看出热传导和热对流不会成为火焰振荡的主要原因。

H. Kitahata 等人由此提出假设^[3]: ①蜡油气化后和氧气混合; ②蜡油供应充足, 但氧气供应速率恒定; ③氧气从无限远处输送给蜡烛, 燃烧反应生成的热量以对流的方式转移走。基于以上三点假设, 构建出如下方程:

$$C \frac{dT}{dt} = \omega_1 \left[h(T_0 - T) + \beta an \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right] - \sigma T^4 \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = \omega_2 \left[k(n_0 - n) - an \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right] \quad (2)$$

公式中 $T(t)$ 火焰的温度, $n(t)$ 空气的氧气浓度, C 为气体的比热容, R 为气体常数, E 为有功能量, T_0 为环境温度, n_0 为外部氧气浓度, h 为对流换热系数, K 氧气供给率, β 为单位体积石蜡燃烧产热量, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, ω_1 和 ω_2 是温度和氧浓度变化的特征时间常数。公式(1)中等式右端的三项分别表示的是气体对流流动导致的热量损失、燃烧产生的热量和辐射导致的热量损失。公式(2)中, 等式右端的两项分别表示的是气体流动带来的氧气和燃烧消耗的氧气。

当参数 a 比较小时, 单根蜡烛的燃烧火焰温度 $T(t)$ 没有变化, 而是保持一个恒定值。当 a 较大时, 对应于三支蜡烛的燃烧, 温度 $T(t)$ 的时间序列表现出振荡行为。因此通过改变公式(1)(2)中的参数 a , 就可以得到平稳燃烧和振荡燃烧两种模式, 进一步, 考虑两组蜡烛之间的耦合, 可以得到如下方程:

$$C \frac{dT_i}{dt} = \omega_1 \left[h(T_0 - T_i) + \beta a n_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) - \sigma \left(\frac{\mu}{L^2} T_j^4 - T_i^4\right) \right] \quad (3)$$

$$\frac{dn_i}{dt} = \omega_2 \left[k(n_0 - n_i) - a n_i \exp\left(-\frac{E}{RT_i}\right) \right] \quad (4)$$

公式中 L 为两个振荡器之间的距离, μ 为气体中的光吸收率, 辐射耦合表示为 $\sigma(\mu/L^2)(T_j^4 - T_i^4)$ 。

对于两个蜡烛振子, 公式中 i, j 分别为 1 和 2, 振荡器 1 的温度和氧浓度是 $T_1(t)$ 和 $n_1(t)$, 振荡器 2 的温度和氧浓度是 $T_2(t)$ 和 $n_2(t)$ 。理论公式可以得到火焰的温度和氧气的浓度变化规律, 对于单支蜡烛来说, 氧气的供应比较充足, 因此火焰保持平稳燃烧, 但是当两根蜡烛或三根蜡烛靠近点燃时, 蜡烛燃烧氧气供给不足, 无法维持恒定的燃烧, 气体的流动发生变化, 从而导致燃烧的振荡行为。但是对于多个火焰振子的同步振荡现象, 气流的流动主要作用主要是释放燃烧的热量和补充燃烧所需的氧气, 并且气流扩散的特征长度相对于振子之间的距离来说是可以忽略的, 所以气流的流动不是导致火焰振子的同相或者反相振荡的原因^[7,8]。

从实验中可以发现, 两个振子的耦合现象只与振子的距离有关系, 即只要改变两振子之间的距离, 就可以看到火焰的同相或反相振荡, 考虑到火焰振子的距离和振荡周期, 并且由于燃烧产物的气体扩

散系数太低, 引起火焰振荡最大可能的是热辐射^[9]。Ting Chen 等人根据分析的结论提出了一种基于红外温度分布的“重叠峰模型”^[10], 该模型成功地解释火焰振子在不同数量情况下的实验观察到的现象, 也发现了一些实验没有观察到的火焰振子演化规律, 揭示火焰振子同相或反相与火焰振子间距之间的关系与实验现象基本吻合, 证明了重叠峰模型在解释振荡器间距与火焰振子同步振荡的适用性。

3 数值模拟

为了更直观地研究火焰振荡特征, 本文使用 Fire Dynamics Simulator 模拟软件对蜡烛的振荡和同步耦合问题进行模拟, 模型将计算区域设置在 $0.1m \times 0.1m \times 0.1m$ 的计算区域内, 将 TWFIN 设置为 10s, 网格尺寸为 $200 \times 100 \times 120$, 设置燃烧反应测材料为 paraffin wax(石蜡), 默认 INERT(惰性表面), 环境温度设置为 $22^\circ C$, 初始风速默认为 0, 将 SURF 相关参数设置为棉质物体燃烧, VENT 和 model 相关参数依据蜡烛和燃烧火焰实际大小, 设置 SLICES 界面参数为 Temperature 和 Velocity, 蜡烛的数量与规格与实验一致。对于单个火焰振子, 模拟得到如图 3 所示的气体流动和温度分布图。

图 3 中可以看出, 由于石蜡蒸汽的燃烧释放出大量的热量, 使得周围的空气温度分布不均匀, 振荡的火焰气流分成两部分, 一部分是热空气扰动形成的湍流, 一部分是燃烧过程中需要补充氧气形成的空气的层流。因为是三根蜡烛合在一起燃烧时, 上层的湍流快速扩散, 部分气流向下旋转接触到下层的火焰, 使得火焰产生分叉形成振荡。模拟的结果来看, 火焰产生振荡的原因可能来自两个方面的原因: 一是多个蜡烛组合排列时, 蜡烛的内部氧气供应不足, 中心区域形成低压区, 周围的冷空气朝低压区域流动, 对火焰造成了挤压; 二是石蜡燃烧后的主要产物是水和二氧化碳, 且燃烧后的气流含氧量比较低, 当这部分热流向下旋转接触火焰时也可以造成火焰的分叉。

图 4 所示的是振子在不同距离下的温度分布和火焰形状图, 从火焰的形状来看, 振子在不同距离的情况下是不同的, 图中火焰振子在 5mm、10mm、20mm 的情况下火焰的振荡形状基本上是对称的, 而在 30mm 时, 火焰的振荡出现了两种情况, 如图 4(d) 所示, 火焰振子出现了同步振荡, 而图 4(e)

则出现了火焰振子反相振荡的情况, 两种情况都会出现, 图 4 (f) 显示的是振子在 50mm 时, 火焰振子出现的反相振荡火焰, 图 4 (g) 显示的是当振子距离为 60mm 时, 火焰的振荡没有出现耦合现象, 从 FDS 的模拟图像来看, 能够得到与实验现象吻合的模拟结果, 验证了实验和理论分析的可靠性, 但是从模拟得到的温度分布图来看, 热辐射造成的重叠现象不是很明显。

图 5 显示的是气体流动速度矢量图, 从图中可以看出, 在振子距离比较近的时候, 火焰振子的气流速度总体上要比距离远的时候大, 距离近时, 火

焰气流的湍流层也更加剧烈, 从火焰气体的流动速度变化的不连续性也可以看出火焰在燃烧过程中产生了振荡。气流流动的速度方向反应了空气流动的方向, 可以看出在火焰振荡时气流明显的有分叉补充的现象。

4 结论

本文根据 IYPT 题目“同步蜡烛”描述的物理现象, 设计实验方案开展实验, 得到与题目描述相吻合的物理现象, 先从理论上对这种现象进行了理论探讨, 并用 FDS 数值模拟的结果进行了验证, 从中可以得到以下结论:

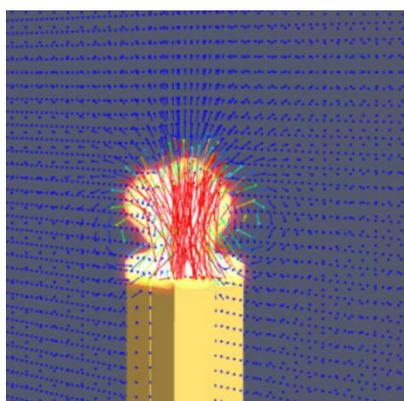


图 3 单个火焰振子的气体流动和温度分布图

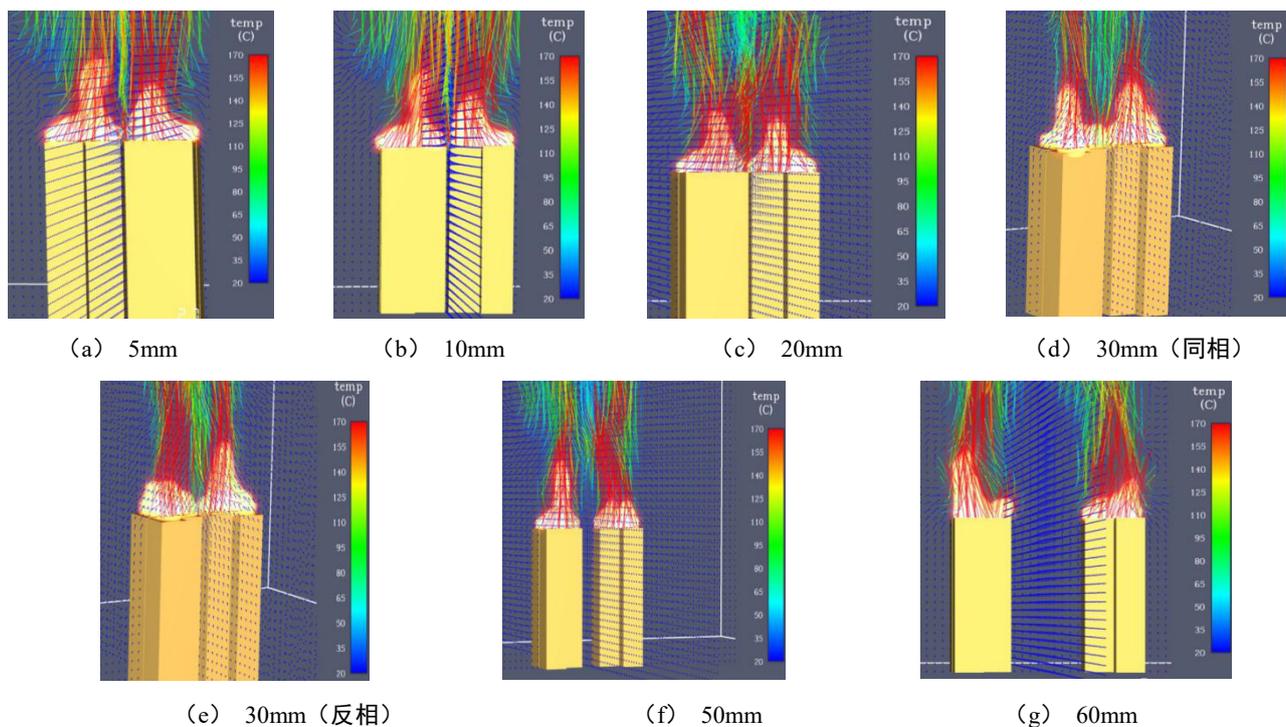


图 4 振子不同距离的时火焰温度分布和火焰形状

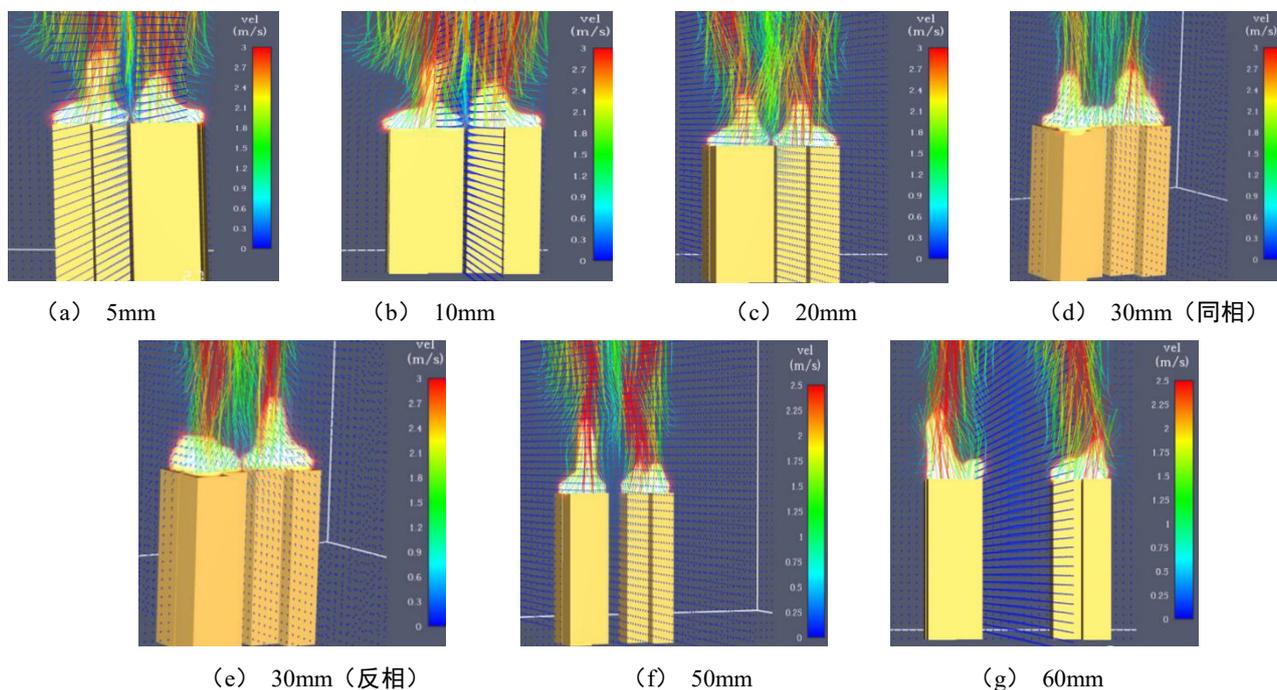


图5 振子不同距离时气流速度分布矢量图

(1) 燃烧火焰振子产生振荡的原因主要是燃烧气体产生的气旋对火焰的冲击, 以及燃烧所需氧气补充的不均衡造成空气流动的挤压;

(2) 单个振子蜡烛的数量会影响火焰的振荡频率, 蜡烛数量越多, 振荡频率越低。

(3) 对于多个火焰振子的同步振荡现象, 火焰振子的同相或者反相振荡的影响因素主要是振子之间的距离。

气流扩散的特征长度相对于振子之间的距离来说是可以忽略的, 所以气流的流动不是导致火焰振子的同相或者反相振荡的原因, 考虑到火焰振子的距离和振荡周期, 并且由于燃烧产物的气体扩散系数太低, 引起火焰振荡最大可能的是热辐射。

参考文献

- [1] 刘涛, 纪军, 齐怡等. 我国燃烧领域的基础研究进展[J]. 中国科学基金, 2012, 26(06): 325-329.
- [2] 范武亭. 基于多图像的炉膛火焰燃烧稳定性研究[D]. 合肥工业大学, 2013.
- [3] H. Kitahata, J. Taguchi, M. Nagayama, T. Sakurai, Y. Ikura, A. Osa, Y. Sumino, M. Tanaka, E. Yokoyama, H. Miike, Oscillation and synchronization in the combustion of candles, *The Journal of Physical Chemistry A* 113(29) (2009) 8164-8168.
- [4] D.M. Forrester, Arrays of coupled chemical oscillators, *Sci. Rep.* 5 (2015) 16994.
- [5] K. Yokoyama, Y. Yamamoto, Three people can synchronize as coupled oscillators during sports activities, *PLoS Comput Biol* 7(10) (2011) e1002181.
- [6] 郑凯. 基于热辐射反演的火焰纵向温度测量的研究[D]. 华北电力大学, 2016.
- [7] 何建东. 基于图像检测的火焰温度场测量及三维重建的研究[D]. 浙江理工大学, 2013.
- [8] T. Yang, X. Xia, P. Zhang, Vortex-dynamical interpretation of anti-phase and in-phase flickering of dual buoyant diffusion flames, *Physical Review Fluids* 4(5) (2019) 053202.
- [9] 张向宇, 郑树, 周怀春等. 基于热辐射成像建模求解的管式炉炉管温度检测[J]. 化工学报, 2015(3): 965-971.
- [10] T. Chen, X. Guo, J. Jia, J. Xiao, Frequency and Phase Characteristics of Candle Flame Oscillation, *Sci. Rep.* 9(1) (2019) 1-13.
- [11] 夏守之, 朱新旺, 姚琦琦. 热辐射率对火焰温度测量精度影响的研究[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(5): 72-75.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS