**同步蜡烛实验报告**

1. **实验目的**  
    当几支蜡烛同时燃烧时，可以观察到火焰在振荡，且互相耦合，在蜡烛之间距离不同的情况下，出现同相和反相两种情况，研究距离和现象出现的关系。  
   **二、实验原理**  
    前提是单独一组蜡烛的振荡是由于内部因素引起的，才有以下假设。通过纹影法和热像仪观察得到热空气上升，会分叉旋转，紧接着分叉点下移，碰到火焰后振荡。在振荡时，火焰上方有两个高温区域夹着一个低温区域，低温区往下移动，与下端高温部分火焰接触后受热膨胀而振荡，即振荡周期和外部因素无关，只和自身因素，比如蜡烛的比热，有关。  
    有三种假设：  
    1、这种耦合现象可由传导，对流，辐射三种可能，和间距和蜡烛火焰振荡周期相比，气体扩散系数较低，很难造成这种现象。观察等温线，对流不应有条理性很大的等温线，故热辐射最有可能是作用原因。若假设有不限量氧气供应，氧气提供速率恒定，燃烧 原理是蜡油气化后与氧气混合，再燃烧，使用的是无限远处的氧气，不会对附近氧气分布造成影响，热量则是通过对流转移，不影响结果，对单组蜡烛有以下公式【1】：  
    由热量产生等于燃烧产生热量-气体流动对流减少的热量-辐射减少的热量:

 (1)  
 氧气的增加量等于气体对流带来氧气-燃烧耗氧:

 (2)  
若加上两组蜡烛之间耦合，则公式变为：

 (3)

 (4)  
 2、峰值交叠模型【2】：  
 振荡同相，两组火焰同时达到最大值，对应的耦合部分是S1，同一时刻最小值对应耦合区域S3。若振荡反相，左侧火焰达到最小值而同时右侧火焰达到最大对应着S2。同样得，左侧火焰达到最大值而右侧火焰对应最小，那么区域对应着S2’。当两组蜡烛相间小的距离则S1> S2=S2’>S3>0。若两组火焰振荡同相耦合可用S1+S3表示。与之相反，反相的总耦合就是S2+S2’。当(S1+S3)>(S2+S2’)成立就表现为同相振荡。两组蜡烛火焰距离适当增大，使得S1> S2=S2’>0=S3。其中，火焰同相振荡的耦合对应S1+S3=S1，那么反相振荡总耦合对应S2+S2’。因(S1+S3)<(S2+S2’)成立，结果就是反相振荡。当两组火焰间距还在增大，S2和S2’为0，只剩下S1，产生的耦合作用无法使两组蜡烛产生耦合现象。  
 3、通过前人实验可以发现，经过计算和分析，可以改变粘度系数，其他不变而实现同相和反相的转换，影响的是内部剪切层，使用雷诺系数为判断依据ReA，公式如下：  
 (5) **三、实验器材**  
六支直径一厘米蜡烛，一把卷尺（最小刻度为1毫米），两个手机（用来拍摄慢动作视频），一台带显卡的笔记本，2019版本pyrosim软件。  
**四、实验步骤**  
 1、在水平的桌子上，铺一张或多张足够大的白纸，使用卷尺量出60厘米的长度，以桌沿为零刻度处，做好标记，并在尺边缘画直线，将卷尺0刻度的一头挂在桌沿，60厘米刻度线对准所做的刻度处，压住，注意在实验中不要碰到卷尺，每次记录实验数据前都要核对60厘米刻度线是否和记号相重合。  
 2、分为两组蜡烛，每组三支，分别以等边三角形接触放置，以5厘米刻度线为放置第一组蜡烛，接下来根据所做的表格1改变第二组蜡烛放置的刻度，点燃三支蜡烛，待火焰稳定，两人尽量同时拍摄三支蜡烛点燃时的慢动作视频，可拍摄完成再观察六支两组蜡烛同一段时间的振幅和频率，并在临界处减少间隔为1厘米，自定义表格，找出正相和反相转化临界距离等。  
 3、重复2三次实验，记录数据。  
 4、在带显卡的笔记本安装2019版pyrosim软件，并加载好证书，在软件中模拟出三根蜡烛的燃烧状态，同样改变蜡烛间的距离，研究蜡烛燃烧的耦合情况和距离之间关系。

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **蜡烛所在刻度cm** | **10** | **15** | **20** | **25** | **30** | **35** | **40** |
| 关系 |  |  |  |  |  |  |  |
| **蜡烛所在刻度cm** | **46** | **47** | **48** | **49** | **50** |
| 关系 |  |  |  |  |  |

表格1

**五、实验结果记录和分析**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **蜡烛所在刻度cm** | **10** | **15** | **20** | **25** | **30** | **35** | **40** |
| 关系 | 正相 | 正相 | 正相 | 正相 | 无法确定 | 反相 | 反相 |
| **蜡烛所在刻度cm** | **45** | **50** | **55** | **60** | **65** |
| 关系 | 反相 | 无关 | 无关 | 无关 | 无关 |

表格1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **蜡烛所在刻度cm** | **46** | **47** | **48** | **49** | **50** |
| 关系 | 是 | 无法确定 | 无关 | 无关 | 无关 |

表格2

当蜡烛间距大于48厘米，两组蜡烛并不同步，并没有正相或反相的关系，小于46厘米但大于30厘米，两者火焰基本呈现反相，小于等于30厘米，两组则是基本同相。在两个临界点，即30厘米和47厘米刻度处，两组蜡烛火焰要么是同相，要么是反相，要么并不稳定，两种状态会切换。  
 使用pyrosim软件模拟同相振荡，火焰内侧是线性剪切层，且表现出向内侧弯曲的倾向，而反相振荡正好相反。  
**六、思考与讨论**  
 1、模拟可以得到单组火焰振荡频率和重力加速度，容器的尺寸关系，定性来说，增加重力加速度，或者减小尺寸，振荡频率均会增加。可以继续分析几个物理量之间的解析式。  
 2、可以进一步通过实验得到临界雷诺系数，使其作为判断转化为同相或者反相的依据。  
 3、在此次实验中只有三根蜡烛作为一组，有两种过渡方式未解释，根据已有理论，分别是振荡消失和相位翻转交叉两种【3】。  
 4、还未实验每组蜡烛的数目对此种现象的影响，这是实验的不严密支出。  
 5、本实验所研究的现象虽然常见，需要器材廉价，但其中的物流学理论却高深莫测，值得我们去研究实验。

**参考文献：**

[1] 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, TheJournal of Physical Chemistry A 113(29) (2009) 8164-8168.

[2] T. Chen, X. Guo, J. Jia, J. Xiao,Frequency and Phase Characteristics of Candle Flame Oscillation, Sci. Rep. 9(1)(2019) 1-13.  
[3] K. Manoj, S.A. Pawar, R. Sujith,Experimental evidence of amplitude death and phase-flip bifurcation betweenin-phase and anti-phase synchronization, Sci. Rep. 8(1) (2018) 1-7.