

# 《燃烧学》实验指导书

## 旋流火焰结构与动态特性实验



上海交通大学

机械与动力工程学院

基础实验与创新实践教学中心

二〇二四年四月

## 实验系统与基本参数

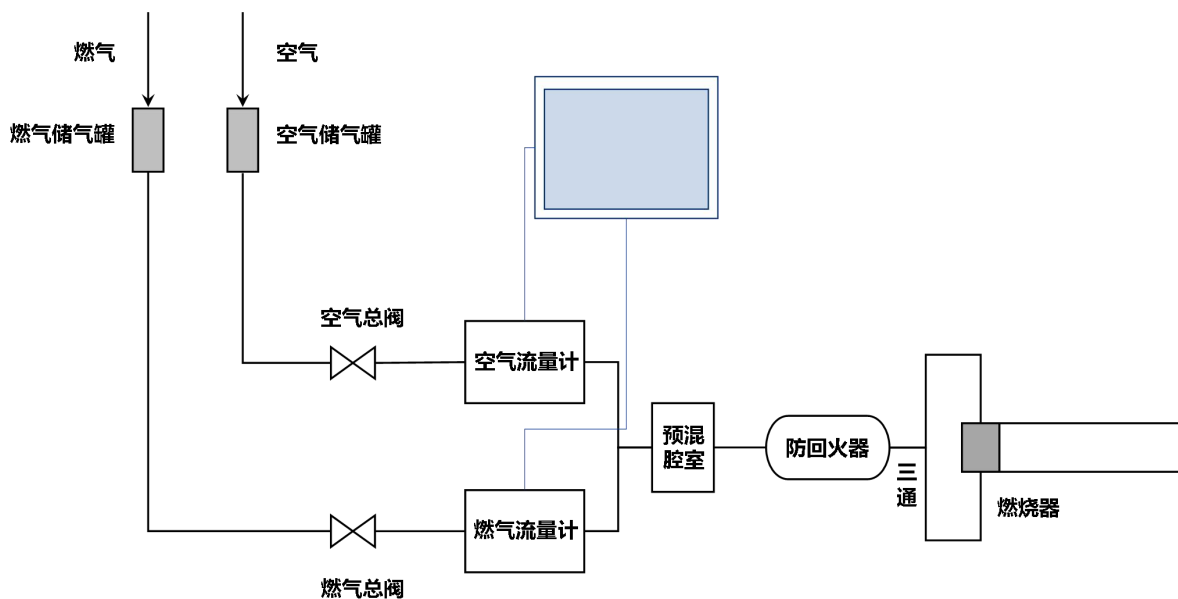


图1 旋流燃烧特性实验系统图

### 试验用仪器仪表型号规格

名称	型号规格	名称	型号规格
燃料质量流量计(燃气)	CS200A-10SLPM	麦克风	NCSE-150
控制质量流量计(空气)	CS200A-50SLPM	扬声器	M3N
回火防止器	H2-1/4NPT	功率放大器	HY-2001

### 燃气的物理化学性质

燃料	主要成分	相对分子质量	液态密度 (kg/L)	沸点 (°C)	理论空气量	
					kg/kg	kmol/kg
甲烷	CH <sub>4</sub>	16	0.42	-161.5	17.2	0.593
自燃温度 (°C)	闪点 (°C)	燃料低热值 (MJ/kg)	汽化潜热 (kJ/kg)		辛烷值	
538	-188	50.16	511		RON	MON
					105-115	140

### 燃烧学实验注意事项

1. 实验台上的玻璃管须轻拿轻放，用完后竖放在实验台里侧，以防坠落。
2. 燃烧火焰的温度很高，切勿用手或身体接触火焰及有关器件。
3. 燃烧完后的喷嘴口、水平石英管的温度仍很高，勿碰触，以防烫伤。
4. 在更换燃烧管时，使用防烫劳保手套，手应握在上端，并远离身体躯干和他人。
5. 使用流量控制器调节空气和燃料流量时，应严格按照当量比计算表格中的设置数值进行条件，设置前必须确认数据输入无误。

## 内容一：旋流预混火焰的基本燃烧特性

### 一、目的

1. 了解旋流预混火焰的基本结构和旋流火焰的稳定机制
2. 在一定范围内，观察甲烷/空气预混气体流量和当量比对旋流预混火焰结构和燃烧特性的影响

### 二、原理

预混火焰相对于扩散火焰具有混合特性好，温度均匀性高、污染排放低等优点。旋流器和钝体可以形成回流区使火焰在更低当量比下实现稳定燃烧，从而可以实现更低的NO<sub>x</sub>排放量。燃料与空气预混当量比决定了火焰传播速度、燃烧温度以及火焰自发光强度等重要参数，是实际燃烧过程中最重要的工况参数之一，改变流量和当量比的大小将对旋流预混火焰的结构和燃烧特性产生显著影响。

### 三、实验系统

设备包括：小型空压机 流量控制器 旋流火焰实验装置 点火器

燃料：甲烷

### 四、实验步骤

1. 打开工控机（电脑）上的流量控制器控制软件，确定点火流量和点火当量比；
2. 开启空气总阀和燃气总阀；
3. 将黑色铝板置于火焰一侧，可将手机安装在手机支架上，用于拍摄火焰形态；
4. 在工控机流量控制软件界面设置空气流量至预定值（按照流量计百分比设定）；
5. 在旋流喷嘴出口处打开点火器；
6. 在工控机流量控制软件界面设置天然气流量至预定值（按照流量计百分比设定）；
7. 观察不同当量比下的火焰形状和燃烧稳定性变化。
8. 在不同总流量下，不断降低当量比大小，直至熄火，记录熄火时的当量比。
9. 燃烧室限制域的影响：分别在开放无石英罩和有石英罩的环境下点燃火焰，观察相同当量比工况下火焰结构的变化情况，对比石英罩对火焰形态的影响。
10. 停止实验：首先将燃气流量控制器流量设定值置零，然后将空气流量控制器流量设定值置零。
11. 关闭空气总阀和燃气总阀，整理试验现场。

### 五、数据记录

记录工况条件：混合物总流量，当量比，边界条件（开放或有限制域），拍摄火焰照片。建议拍摄不同工况的火焰时采用相同的相机参数（如曝光强度、光圈大小），火焰位置居中对称，对比

不同工况条件下的火焰形态。给出一定流量和当量比范围内的贫燃熄火边界。

## 六、思考题

- 1、旋流火焰的结构是什么样的？为什么为形成这种形状？
- 2、旋流火焰如何实现稳定燃烧？
- 3、燃烧工况如何影响旋流火焰的结构？
- 4、石英罩对火焰结构有何影响？

## 内容二：声波对旋流火焰形态和燃烧特性的影响

### 一、目的

1. 观察声波作用下的火焰动态行为
2. 在不同声波频率和振幅工况下，测量火焰放热率波动和燃烧噪声信号。

### 二、原理

在航空发动机、燃气轮机等能量密度高的旋流燃烧系统中，经常发生火焰放热速率波动与声场压力波动之间的相互作用。在燃烧系统中，火焰的非稳态燃烧会产生声学压力脉动，声学压力脉动在燃烧室内部传播会引发各类流动扰动，当流动扰动传播至火焰区域时对火焰放热过程产生扰动，导致火焰放热速率的波动。本实验使用扬声器产生主动声源，形成声波对火焰放热特性产生激励作用。

### 三、实验设备

**设 备：**小型空气压缩机、旋流燃烧系统、流量控制器、扬声器、功率放大器麦克风  
**燃 料：**甲烷

### 四、实验步骤

1. 打开工控机（电脑）上的流量控制器控制软件，确定点火流量和点火当量比；
2. 安装麦克风元件，使其测量部位对准火焰；
3. 安装扬声器线路，包括扬声器-功率放大器-信号发生器；
4. 开启空气总阀和燃气总阀；
5. 将黑色铝板置于火焰一侧，可将手机安装在手机支架上，用于拍摄火焰形态；
6. 在工控机流量控制软件界面设置空气流量至预定值（按照流量计百分比设定）；
7. 在旋流喷嘴出口处打开点火器；
8. 在工控机流量控制软件界面设置天然气流量至预定值（按照流量计百分比设定）；
9. 打开工控机电脑数据采集软件界面，开启在线监测状态；
10. 打开光电倍增管和麦克风电源开关，调节光电倍增管增益旋流，观察数据监测画面；
11. 打开扬声器功率放大器，调节至合适电压大小。
12. 打开调节信号发生器，在一定范围内调节频率和电压，观察火焰形态变化，同时观察数据监测画面，点击保存数据选项。
13. 停止实验：首先将燃气流量控制器流量设定值置零，然后将空气流量控制器流量设定值置零。
14. 关闭空气总阀和燃气总阀，整理试验现场。

### 五、数据处理

1. 获得相同电压、不同频率以及相同频率、不同电压下的火焰图像。
2. 获得不同电压和频率下的数据采集数据，使用快速傅里叶变换方法（FFT）处理麦克风信号数据，得到信号的频率和幅值。

## 六、思考题

1. 与稳定燃烧的火焰相比，收到声波激励频率的火焰，其燃烧状态发生何种变化？
2. 声波激励的频率和振幅对火焰燃烧特性产生何种影响？
3. 试分析火焰在声波激励下发生形态改变的原因。