

《燃烧学》实验指导书

层流火焰燃烧特性测量实验



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

二〇二四年三月

实验内容

1. Bunsen 火焰及 Smithells 法火焰分离
2. 预混火焰稳定浓度界限测定
3. 静压法气体燃料火焰传播速度测定
4. 气体燃料的射流燃烧、火焰长度与燃气流量关系的测定

燃烧喷管及石英玻璃管说明

燃烧喷管共 3 根，分别标记为：

I号长喷管 — 细的长喷管(喷口内径7.18mm)

II号长喷管 — 粗的长喷管(相配的冷却器出口直径10.0mm)

I号短喷管 — 细的短喷管(喷口内径5.10mm)

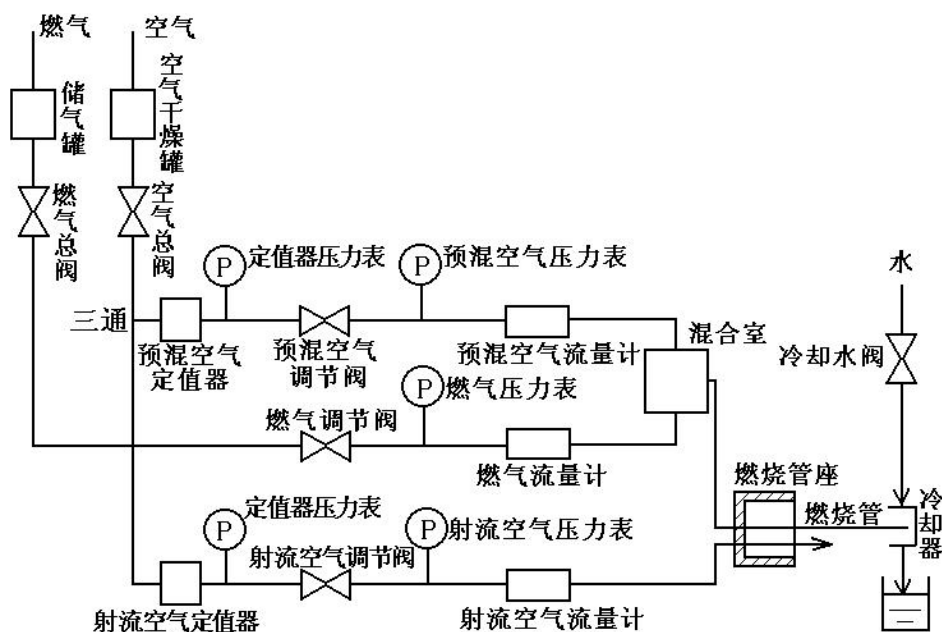
石英玻璃套管共 2 个，分别标记为：

I号玻璃管 — 最细的石英玻璃管(本生灯火焰内外锥分离用)

II号玻璃管 — 中间直径的石英玻璃管(观察Burke-Schumann火焰现象及测定射流火焰长度用)

燃烧学实验注意事项

1. 实验台上的玻璃管须轻拿轻放，用完后横放在实验台里侧，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，手应握在下端，尽量远离喷嘴口。



气体燃烧实验系统

试验用仪器仪表型号规格

名 称	型号规格	生产厂家
浮子式流量计(燃气)	LZB-4F	常州热工仪表总厂
浮子式流量计(空气)	LZJ-10	常州热工仪表总厂
空气稳压定值器	QGD-101	广东肇庆恒星仪表气动元件厂
空气压力表	膜合压力表(2.5级)	上海仪川仪表厂
空气压缩机	NCSE-150	上海龙海力霸通用机械有限公司
数字式温度计	XMT-1100	上海大华仪表厂
石英玻璃管	内径12.7mm	上海泰恒科学仪器有限公司
丙烷气瓶罐	40L	

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
丙烷	C ₃ H ₈	44	0.54	-42.1	15.8	0.541
自燃温度 (°C)	闪点 (°C)	燃料低热值 (MJ/kg)	汽化潜热 (kJ/kg)	混合气热值 (kJ/m ³)	辛烷值	
504	-73.3	46.39	426	3490	RON	MON
					96-111	89-96

一、目的：

1. 观察Bunsen火焰的圈顶效应、壁面淬熄效应及火焰外凸效应；燃料浓度对火焰颜色的影响；气流速度对火焰形状的影响等各种火焰现象；了解本生灯火焰内外锥分离的原理和方法。
2. 观测预混火焰的回火和吹脱现象，测定预混合火焰的稳定浓度界限。
3. 静压法（管子法）测定火焰传播速度（单位时间内在单位火焰面积上所燃烧的可燃混合物的体积）的方法。了解火焰传播速度 u_0 、火焰行进速度 u_p 和来流（供气）速度 u_s 相互之间的关系。
4. 比较射流扩散燃烧与预混合燃烧的异同；观察贝克-舒曼(Burke-Schumann)火焰现象；测定层流扩散火焰高度与燃料流速、雷诺数之间的关系。

二、原理

动力燃烧：预混合燃烧即动力燃烧，其机理是燃气与燃烧所需的部分空气进行预先混合，燃烧过程在动力区进行，形成的火焰称之为Bunsen火焰。当燃料和空气流量调节到化学当量比时，本实验台上即能出现稳定的Bunsen火焰，其内锥为蓝绿色的预混火焰，外锥为淡黄色的扩散火焰。同时能观察到火焰的顶部圆形效应、壁面淬熄效应（死区）及火焰外悬效应。

改变可燃气的混合比，可以观察到火焰颜色的变化。当空气浓度较低时，扩散火焰占主要部分，反应不完全炭颗粒被析出，火焰呈黄色；空气浓度增大后变成预混火焰，反应温度高，完全燃烧，火焰呈蓝色。富燃料的Bunsen火焰可以用Smithells分离法进行内外锥分离。Bunsen火焰及Smithells火焰分离现象如图1所示。在不同的空气/燃料比时，火焰会出现冒烟、回火和吹脱现象。本试验可以定量地测定燃料浓度对火焰传播稳定性的影响，从而绘制得到火焰稳定性曲线。参见图2。

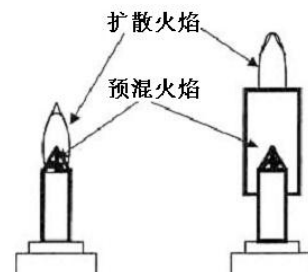
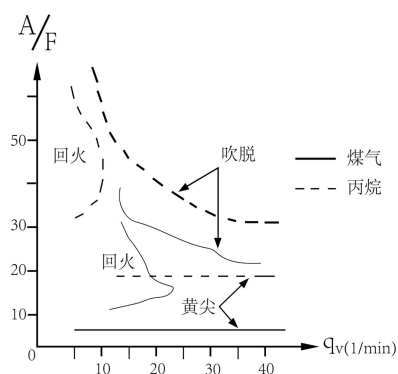


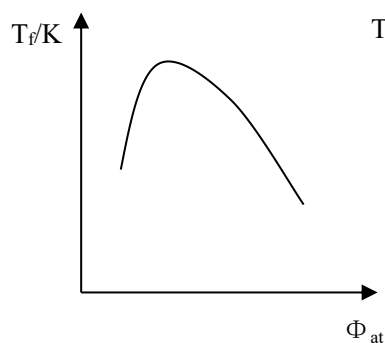
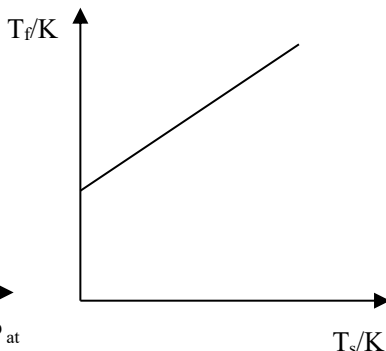
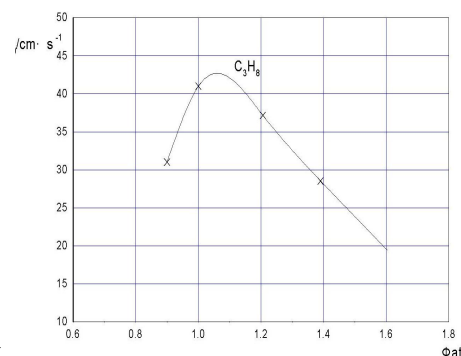
图1 Bunsen 火焰
及 Smithells 火焰分离现象

火焰传播速度：已燃区与未燃区之间形成了明显的分界线，化学反应发光区为火焰前沿（或称为火焰锋面）。火焰传播速度为火焰前锋沿其法线方向相对于未燃可燃混合气的推进速度，表征燃料燃烧的火焰锋面在法线方向上的移动速度。在一定的气流量、浓度、温度、压力和管壁散热情况下，当点燃一部分燃气—空气混合物时，在着火处形成一层极薄的燃烧火焰面。这层高温燃烧火焰面加热相邻的燃气—空气混合物，使其温度升高，当达到着火温度时，就开始着火形成新的焰面。这样，焰面就不断向未燃气体方向移动，使每层气体都相继经历加热、着火和燃烧过程，



即燃烧火焰锋面与新的可燃混合气及燃烧产物之间进行着热量交换和质量交换。层流火焰传播速度的大小由可燃混合物的物理化学特性所决定，所以它是一个物理化学常数。

过量空气系数（即空气消耗系数）对火焰燃烧温度的影响见图3所示，预热空气温度对火焰燃烧温度影响见图4所示，过量空气系数对火焰传播速度的影响见图5所示。

图3 Φ_{at} 对 T_f 的影响图4 T_s 对 T_f 的影响图5 Φ_{at} 对 u_0 的影响

射流燃烧：气体燃料的射流燃烧是一种常见的燃烧方式，燃料和氧化剂都是气相的扩散火焰。与预混火焰不同的是：射流扩散火焰燃料和氧化剂不预先混合，而是边混合边燃烧（扩散），因而燃烧速度取决于燃料和氧化剂的混合速度，它是扩散控制的燃烧现象。一般说扩散火焰颜色发黄，比预混火焰更明亮，更长。没有管内回火，燃料较富时易产生碳烟。当燃料低速从喷嘴口流出，在管口点燃，可以得到层流扩散火焰。层流扩散火焰长度 h 与燃气体积流量正相关。

贝克-舒曼 (Burke-Schumann) 火焰：对同轴套管式的Bunsen火焰进行了研究，气体燃料从内管中喷出，而空气从外管喷出，根据燃料和空气的喷出速度不同，燃料射流燃烧会有卷吸涡旋的现象；当二者流速相同时，就会产生无涡旋的射流火焰，称为贝克-舒曼火焰，它是一种燃料流动受氧化剂流动限制的受限射流火焰。

三、试验设备与燃料

小型空压机、稳压筒，火焰试验系统，I号长喷管，II号长喷管，I号短喷管，I号玻璃管，II号石英玻璃套管，冷却水系统，有机玻璃挡风罩，点火器。

燃料：丙烷。

四、试验步骤和数据记录

1. 按试验原理系统图，检查并连接好各管路，装上I号长喷管，并套上I号玻璃管。开启空气总阀和燃气总阀。打开预混空气调节阀，使空气流量为一合适值（200L/h），然后打开燃气调节阀至合适流量后（5-10L/h），用点火器

图2 气体燃料燃烧稳定曲线

在喷管出口处点火，点燃后，再调节空气和燃气流量，使管口形成稳定的Bunsen火焰。记录形成稳定的Bunsen火焰时的燃气和空气的压力、流量值。观察Bunsen火焰的各种现象、火焰颜色及火焰形状的变化。观察不同空燃比下的火焰颜色、形状及稳定性变化。

2. 火焰内外锥分离：调节预混空气流量，使预混空气稍显不足时，托起支撑环架，使玻璃外管升高，当外管口超过内管口时，火焰便移到外管口上；外管再升到一定距离，外锥仍留在外管口处，而内锥移至内管口燃烧，从而实现了火焰分离；玻璃外管继续升高，外锥被吹脱。记录Smithells法火焰分离时的燃气和空气的压力、流量值。关闭燃气和预混空气调节阀。

3. 取下I号长喷管，I号玻璃管；装上II号长喷管及冷却器(出口直径10.0mm)，罩上有机玻璃挡风罩，打开冷却水阀，打开预混空气调节阀，使预混空气流量为一合适值(200L/h)，然后打开燃气调节阀至合适流量后(5-10L/h)，用点火器在喷管出口处点火，点燃后，再调节空气和燃气流量，使管口形成稳定的Bunsen火焰。保持燃气流量不变，缓慢调节预混空气流量，测定火焰回火、圆锥、吹脱和发烟时的燃气和空气压力、流量值。关闭燃气和预混空气调节阀。

回火的贫富燃料线以管口形成平面火焰为界，发烟线以内锥刚刚出现黄尖为界，稳定燃烧以内焰为蓝绿色圆锥火焰为准，吹脱以火焰刚飘起来的瞬间为准。将出现上述现象时的燃气和空气的压力及流量记录于表二中。改变燃气流量，重复上面的测量，做3-5组数据。(回火测量1-3组数据)。

4. 取下II号长喷管及冷却器，有机玻璃挡风罩，关闭冷却水阀。装I号短喷管，用软管连接I号短喷管管口和横向石英玻璃管。稍开预混空气调节阀及燃气调节阀，使石英玻璃管内充满一定浓度的燃气—空气可燃混合物。用点火枪在石英玻璃管出口端点燃可燃混合气(注意点火枪不能直接对着玻璃管中心，防止流动的可燃混合气对点火的吹熄)；观察石英玻璃管口的火焰形态。交替调节预混空气调节阀和燃气调节阀，使火焰稳定在管口燃烧，呈预混合火焰的特征。微调预混空气阀和燃气阀，使可燃混合气流量微量减小，致使石英玻璃管口火焰锋面朝着可燃混合气一侧缓慢移动。当火焰锋面基本置于石英玻璃管中间段位置时，微量调节空气流量阀门，使可燃混合气流量微量增大。当燃烧速度等于可燃气体的来流(供气)速度时，火焰行进速度等于零，此时，火焰锋面在玻璃管中驻定静止不动。仔细观察火焰锋面的颜色形状等。如果供气速度调节过大，会造成火焰脱火；反之，会造成回火而吹熄；此时重复前面操作，直至燃烧火焰锋面在石英玻璃管中间段驻定。记录燃气、空气流量及压力，环境温度及当地大气压。关闭燃气和预混空气调节阀。

5. 取下软管，打开预混空气调节阀和燃气调节阀，输入燃气和预混空气，在喷口点燃，获得稳定的预混火焰。打开射流空气调节阀，使射流空气流量为1000L/h左右，罩上II号玻璃套管，缓慢关小预混空气调节阀，同时继续打开射流空气调节阀，直至预混空气全部关闭，射流空气的流量达到2500-3000L/h。实现从预混燃烧到扩散燃烧的转变，观察火焰现象的变

化。将燃气调节阀稳定在某一位置 (**5-10L/h**)，调节射流空气流量，观察并比较空气不足和空气过量的火焰现象。过量：火焰明亮，成锥形，长度短；不足：火焰暗红，变长，冒烟，最后成碗形。调节燃气流量 (**5-10L/h**)，射流空气流量保持不变或稍作微调，以保证火焰的外形，用直尺测量不同燃气流量时的火焰高度。将结果记录在表三中。关闭燃气和射流空气阀门，关闭空气和燃气**总阀**，整理试验现场后恢复到实验开始前。

五、数据处理

表一

燃料： 丙烷 室温： 当地大气压：

单位：压力—kPa 流量—L/h

根据理想气体状态方程式(等温)，将燃气和空气测量流量换算成(当地大气压下)石英玻璃管口的流量值，然后计算出混合气的总流量，求出可燃混合气在管内的流速 u_s (石英玻璃管内径12.7mm)。由于火焰锋面驻定时 $u_p=0$ ，可以近似认为火焰传播速度 u_0 等于来流速度 u_s 。

火焰	燃气		预混空气	
	压力	流量	压力	流量
Bunsen火焰				
火焰分离				
火焰驻定1				
火焰驻定2				

表二 层流火焰稳定性的测定

根据理想气体状态方程式(等温)，将燃气和空气的测量流量换算成相同压力(如0.1MPa)下的流量值。根据换算流量值计算各种情况下的空气/燃料质量比。以空/燃比为纵坐标，输入燃气量为横坐标，绘制火焰稳定性曲线(稳定燃烧线、回火线、吹脱线及发烟线)。

序号	黄尖				回火 (<5L/h)			
	燃气		空气		燃气		空气	
	压力	流量	压力	流量	压力	流量	压力	流量
1						3.5		
2						4		
3						4.5		
4						5		
5						5.5		

序号	圆锥				吹脱			
	燃气		空气		燃气		空气	
	压力	流量	压力	流量	压力	流量	压力	流量
1								
2								
3								
4								
5								

表三 扩散火焰长度 h 与燃气流速的关系

根据理想气体状态方程式(等温)，将燃气测量流量换算成喷管出口处压力(当地大气压)下的流量值。并计算喷口处的燃气流速和雷诺数。(简要说明计算过程)

项目 \ 工况 数值	I 号 短 喷 嘴 (内径5.1mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
燃气流量L/h										
燃气压力 Kpa										
火焰高度cm										
喷口燃气流速										
雷诺数										

六、思考题

1. 计算丙烷燃烧的理论化学当量比；并计算实验中Bunsen火焰及Smithells法火焰分离时的空燃比。
2. 本生灯火焰的内外锥各是什么火焰？为什么？在什么情况下外锥比较明显？
3. 火焰的回火与吹脱现象是怎样发生的？有什么危害？怎样防止这种现象发生？
4. 静压法（管子法）观察到的火焰锋面有哪些特征？解释形成该火焰锋面形状的原因。
5. 影响火焰传播速度的因素有哪些？并分析说明影响规律。
6. 倘若石英玻璃管无限长且管内充满了可燃混合气，一端闭口，一端开口；在开口端点火，产生行进火焰，请描述将可能出现怎么样的燃烧现象？
7. 根据实验观察，分析射流扩散火焰主要特征，与预混火焰有哪些主要区别？