

SRT 项目名称：国产航空煤油着火与燃烧特性研究

学年学期：2018-2019-1

批次：1

项目编号：1911T0212

立项人：钟北京

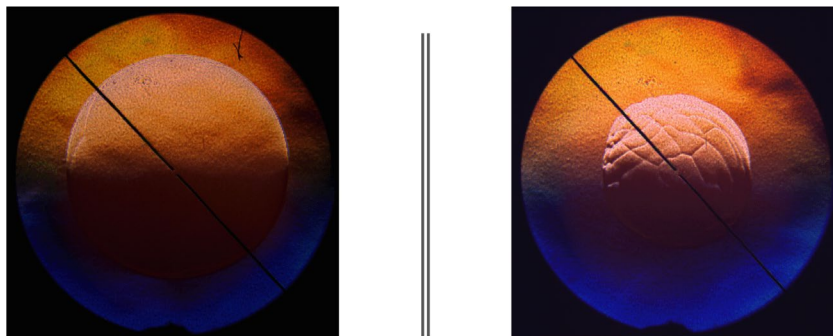
指导人：钟北京 教授；彭惠生 博士研究生

报告人：沈扬 航天航空学院 2017011726

目录

- 一 . 项目背景
- 二 . 进度安排情况
- 三 . 实验情况
- 四 . 层流火焰传播速度的获得
- 五 . 稀释对火焰传播速度的影响研究
- 六 . 不稳定性的分析
- 七 . 结论
- 八 . 项目成果
- 九 . 个人感想
- 十 . 致谢
- 十一 . 参考文献

一、项目背景



稳定传播的层流火焰（图左）出现细胞状不稳定性的火焰（图右）

层流火焰传播过程可以反映出燃料的许多重要特性, 是对燃料进行实际应用与基础研究时关注的重点, 在火焰传播过程中, 许多重要的参数被提出以便于更好的理解层流火焰的传播特性, 马赫斯坦长度、反应火焰不稳定性的参数如热膨胀系数、刘易斯数等。而稀释剂的加入会显著改变层流火焰的传播特性, 如降低反应的绝热火焰温度, 降低火焰的传播速率、改变输运性质等等, 为了更好地理解层流火焰的传播特性, 许多研究者曾分析了不同稀释剂对层流火焰传播特性的影响, Vu 等[1]研究了 N_2 , CO_2 , He 稀释对合成气/空气预混火焰胞状不稳定性的影响, 发现 He 的稀释会使得合成气/空气火焰有效刘易斯数增加, 马赫斯坦长度几乎不变, 而 N_2 、 CO_2 稀释会使有效刘易斯数和马赫斯坦长度减小; Huang 等[2]研究了 N_2 稀释对于丙烷/空气预混层流火焰传播特性的影响, 研究结果表明火焰的热膨胀系数随 N_2 稀释率的增大而减小, 火焰厚度随稀释率的增大而增大, 表明氮气的稀释可以抑制火焰传播过程中的流体力学不稳定性; Li 等[3]研究了 CO_2 对正庚烷/空气层流预混火焰的影响, 其发现 CO_2 的稀释对于正庚烷层流火焰速度的影响是非线性的, 且随着 CO_2 浓度的增加, 火焰热扩散不稳定性略微增加, 而流体力学不稳定性被抑制。

尽管关于不同稀释气的稀释对于不同燃料的层流火焰传播特性的影响已有较多的研究, 然而作为一种典型的稀有气体, 氩气作为稀释剂的研究却相对较少, 由于氩气和氮气具有相似的热物性, 而氮气作为一种主要的反应物, 会很大地影响反应路径从而改变火焰的传播特性, 而氩气对反应路径的影响则相对较少。因此, 对氩气稀释的影响研究, 也有助于理解纯稀释作用对火焰传播特性的改变。同时, 以往的研究也主要关注于气体等小分子燃料, 对于液体燃料的关注也相对较少。正庚烷作为一种典型的液体燃料, 同时作为汽油、航空煤油等替代模型中的代表性组分, 选择其作为对象研究稀释剂对于液体燃料的影响具有一定的代表性。

二、进度安排情况

2018.10-2018.12: 完成前期文献调研, 熟悉定容燃烧弹实验系统和测量方法;
2018.12-2019.3: 分析总结前人的工作, 掌握对火焰不稳定性的分析方法;
2019.3-2019.5: 完成火焰传播速度测量的实验研究, 并完成火焰不稳定性的分析;
2019.5-2019.7: 完成论文总结, 结题报告。

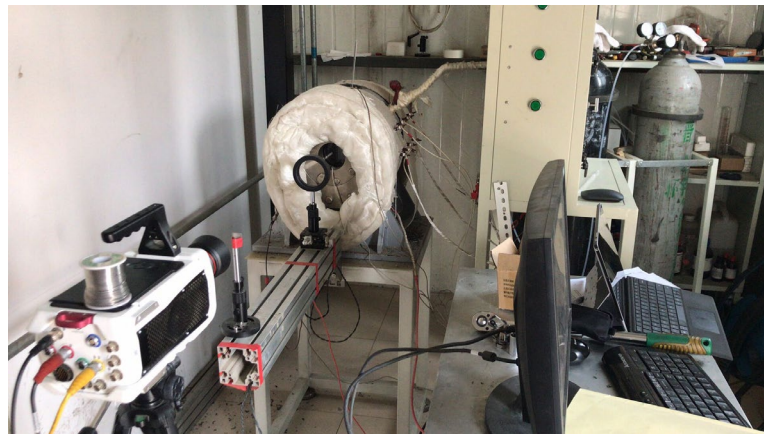
三、实验情况

本实验的定容燃烧弹实验系统主要包括定容燃烧弹弹体、压力传感器、供排气系统(包括储气罐)、可控温电加热系统、点火系统、高速纹影系统与数据采集系统。实验初始压力为 0.2 MPa, 初始温度 420 K, 高速数字摄影机拍摄速度 8000 帧/秒。详细的实验装置及实验方法见参考文献[4]。

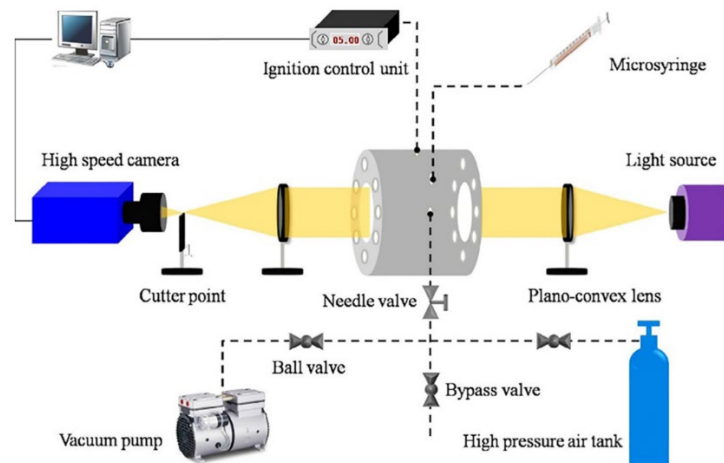
本实验中的稀释率定义为氩气占总混合物的体积比, 即

$$\Phi_r = \frac{V_{\text{diluent}}}{V_{\text{fuel}} + V_{\text{air}} + V_{\text{diluent}}} \quad (1)$$

其中 V_{fuel} 、 V_{air} 、 V_{diluent} 分别为气态正庚烷、空气、稀释气的体积。根据分压定律可知，混合气中各气体所占分压之比即为物质的体积之比，各分压之和等于实验的初始压力 0.2 MPa，由此可计算出不同当量比以及不同稀释率下各气体组分的分压。实验前首先利用加热器将腔内温度加热到 420 K，并根据当量比与稀释率计算加入所需要的正庚烷液体体积。通过查表可以确定，在该温度下加入的正庚烷会完全蒸发。然后分别通入实验所需的空气与氩气。混合气通入后关闭各阀门静置 3~5 分钟以保证气体充分混合，之后点火并利用高速摄像机拍摄球形火焰点火及传播的过程。每组实验结束用高压空气冲走腔内残留废气至少三次，以对内腔进行彻底清扫。



定容燃烧弹实验设备



定容燃烧弹系统原理图

四、层流火焰传播速度的获得

高速摄影仪透过石英观察窗拍摄记录有球形火焰的传播过程的照片，通过 MATLAB 运行图片处理程序，获得火焰半径随时间变化的曲线，进而利用公式

$$S_b = \frac{dR_f}{dt} \quad (2)$$

即可得到该点的球型火焰面传播速度 S_b 。

理想的层流火焰是无拉伸的平面火焰，然而实际中大多数层流火焰都受到拉伸作用，这种作用可以用层流火焰的拉伸率 K 来表征，其定义为火焰面积 A 关于时间的相对变化率：

$$K = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{2}{R_f} \frac{dR_f}{dt} = \frac{2S_b}{R_f} \quad (3)$$

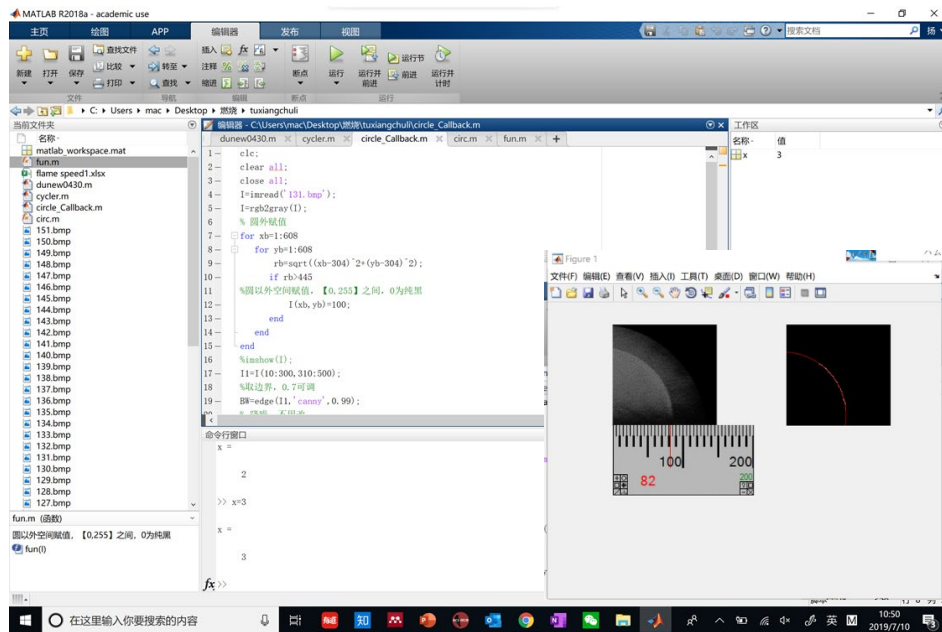
根据 Markstein 长度理论, 通过非线性拟合, 得到无拉伸的火焰面传播速度 S_b^0 以及 Markstein 长度 L_b :

$$(S_b/S_b^0)^2 \ln(S_b/S_b^0)^2 = -2L_b \cdot K/S_b^0 \quad (4)$$

最终由质量守恒定律, 得到层流火焰传播速度 S_u^0 :

$$S_u^0 = S_b^0 \frac{\rho_b}{\rho_u} \quad (5)$$

其中 ρ_b 和 ρ_u 分别是已燃和未燃气体的密度。



利用 mat lab 程序得到层流火焰传播速度

五、稀释对火焰传播速度的影响研究

利用上节所述实验系统, 拍摄了稀释率在 0% (空气)、10%、20%、30% 和 40% 的情况下不同当量比正庚烷/空气火焰的传播情况, 并通过数据处理得到了对应工况下混合气体的层流火焰传播速度 S_u^0 。

此外, 利用 Chemkin Pro 软件中 Premixed Laminar Flame-speed Calculation 模型[14]对相应工况下的层流火焰传播速度进行了计算。由于文献中氩气稀释下正庚烷/空气混合物的层流火焰速度实验数据相对较少, 因此, 采用了两种不同的燃烧机理分别计算, 并相互对比。两种机理分别为爱尔兰高威大学 (NUI Galway) Curran 教授课题组于 2016 年提出的正庚烷燃烧机理^[7] (图 1 中简要记作 sim1), 以及美国劳伦斯实验室在 2011 年提出的 version 3.1 反应机理^[8] (图 1 中简要记作 sim2)。图 1 给出了初始压力 0.2 MPa, 初始温度 420 K 的条件下, 本实验系统测量得到的正庚烷/空气混合物在氩气稀释下的层流火焰传播速度与机理计算结果的比较。从图中可以看出, 两种机理计算的结果在较低当量比时高于实验测量的结果, 但整体具有较好的一致性。从图中也可以看出, 随着氩气稀释量的增加, 正庚烷/空气层流火焰传播速度显著下降。

图 2 是实验测得的不同当量比下混合气层流火焰传播速度随氩气稀释率的变化曲线, 可以看出, 在较大的稀释率区间, 不同当量比的层流火焰速度随着稀释率的增加呈线性地减

少。为了更进一步地说明氩气稀释对混合气层流火焰传播速度的影响，用无量纲火焰传播速度，即某一当量比下不同稀释率的速度与该当量比下无稀释的火焰传播速度的比，来分析不同当量比下氩气稀释的影响，并对无量纲化后的速度与稀释率进行线性拟合(如图 3 所示)。可以看出，虽然每一当量比下混合气层流火焰速度随稀释率基本都是线性变化的，但是其斜率却各不相同，这说明氩气对不同当量比下正庚烷/空气层流火焰传播速度的影响并不相同。

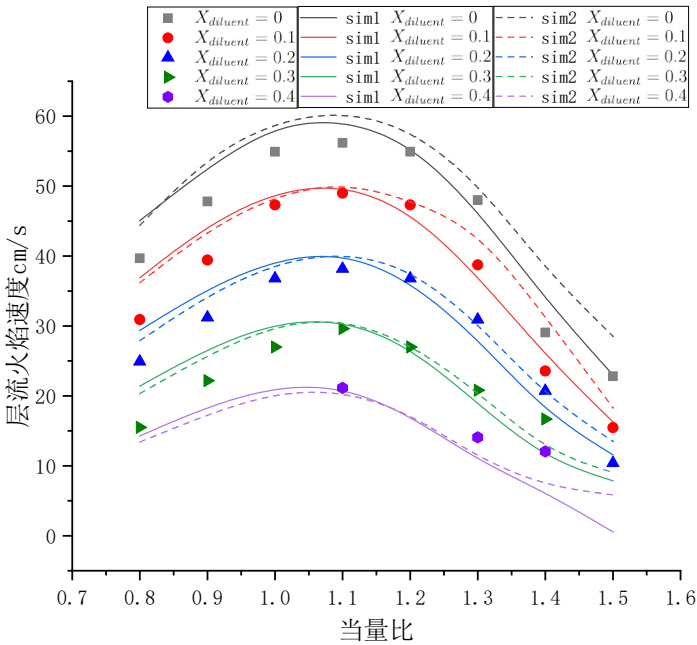


图 1 正庚烷/空气层流火焰传播速度随当量比的变化

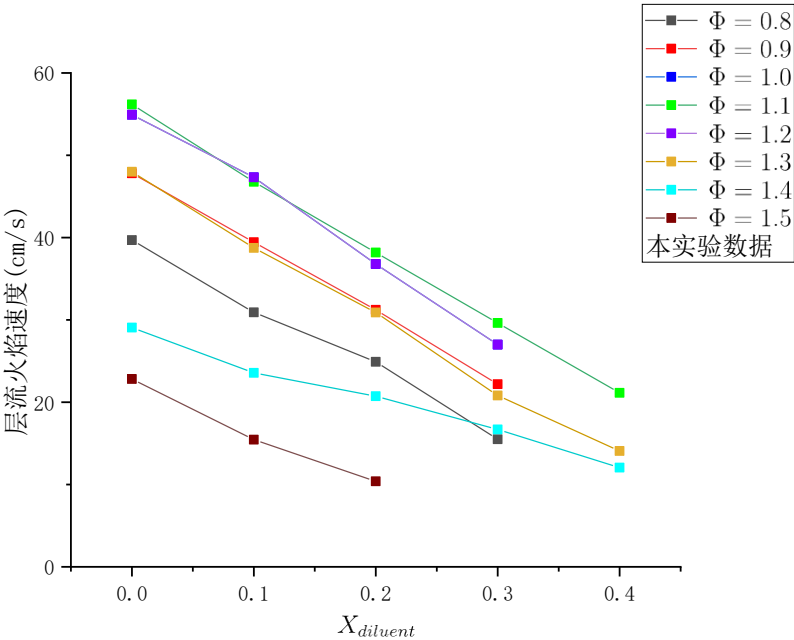


图 2 正庚烷/空气层流火焰传播速度随稀释率的变化

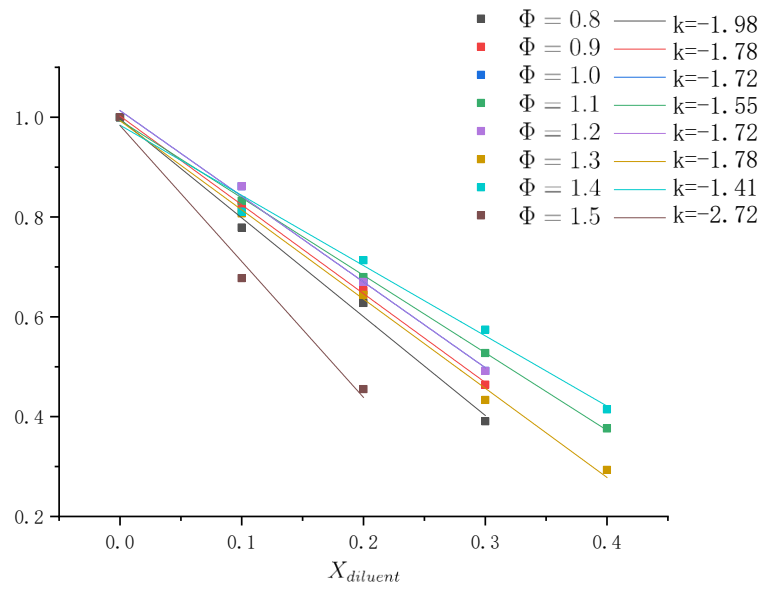
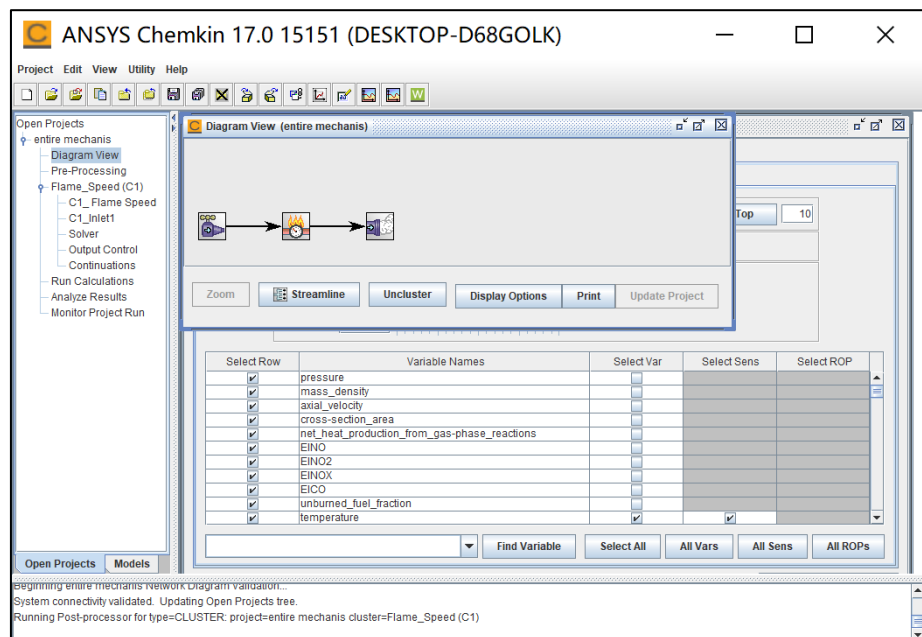


图 3 无量纲后的层流火焰传播速度随稀释率的变化

六、不稳定性的分析



(在 chemkin 中进行参数分析)

名称	A(T)	B(T)	C(T)	D(T)	E(T)	F(T)	G(T)	H(T)	I(T)	J(T)	K(T)	L(T)	M(T)	N(T)	O(T)	P(T)	Q(T)	R(T)	S(T)	T(T)
长名称	质量系数	层流火焰速度	活化能/度	Ze	A	Le _{exc}	L _{def}	稀释率	当量比	Le _{eff}	λ	λ _{真正}	ρ _u	ρ _u	C _p	C _{p真正}	α	D _{exc}	Def _{eff}	R
单位		cm/s	J/mol								g/cm ³									
注释																				
F(x)=	1	1.25	21.62	0.28	21.64	1762	11.79789	2.94947	1.00000	2.94944	0	0.9	2.32209	3416.787	0.00174	1.00000	0.17959	0.00223	8.31446	8.31446
1	1.111	2274.142	29682.00362	10.69882	2.18757	1.00806	2.88335	0	0.9	2.29504	3414.76	0.00174	1.00000	0.17943	0.179	0.00223	8.31446			
2	1	2296.959	42429.83458	14.79758	1	0.99948	2.88335	0	1	1.93125	3412.745	0.00175	1.00000	0.1774	0.1775	0.00196	8.31446			
3	1.1	2296.924	27038.51523	12.74854	2.2918	2.84254	0.98176	0	1.1	1.9443	3416.745	0.00176	1.00000	0.17942	0.17948	0.00199	8.31446			
4	1.2	2296.331	27038.54463	9.61458	2.92292	2.82463	0.98391	0	1.2	1.40208	3406.759	0.00177	1.00000	0.17777	1.11189	0.1785	0.00143	0.17633	8.31446	
5	1.3	2222.216	21370.92331	11.4487	4.43463	2.80565	0.97024	0	1.3	1.31287	3405.514	0.00177	1.11897	1.11897	1.11897	0.17101	0.00117	0.17579	8.31446	

名称	A(T)	B(T)	C(T)	D(T)	E(T)	F(T)	G(T)	H(T)	I(T)	J(T)	K(T)	L(T)	M(T)	N(T)	O(T)
长名称	稀释率	稀释率	初始温度	未燃密度	层流火焰速度	质量燃烧速度	绝热火焰温度	活化能/度	压力	活化能/度	压力	M	R	斜率	
单位			g/cm ³	g/cm ³	cm/s	g/cm ² /s	K								
注释															
F(x)=															
1	1.0	450	1751.79481	0.00175	38.73998	4.24308E-4	0.1029	-2.27399	2357	42439.83458	202650	30.187	8.31446	-21219.91729	
2	1.0	440	1672.16777	0.00167	63.66959	4.22347E-4	0.10647	-2.22993	2366.6	42439.83458	202650	30.187	8.31446	-21219.91729	
3	1.0	460	1599.46482	0.0016	66.99036	4.20822E-4	0.11035	-2.20412	2376.3	42439.83458	202650	30.187	8.31446	-21219.91729	
4	1.0	480	1532.82046	0.00153	74.686	4.19129E-4	0.11448	-2.16735	2385.9	42439.83458	202650	30.187	8.31446	-21219.91729	
5	1.0	500	1471.50764	0.00147	80.44458	4.17467E-4	0.11837	-2.1339	2395.4	42439.83458	202650	30.187	8.31446	-21219.91729	

名称	A(Y)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)	G(Y)	H(Y)	I(Y)	J(Y)	K(X1)	L(X2)	M(Y2)
长名称	C _p	C _{p真正}	thermal co	thermal co	温度	压力	M	密度	密度真正	层流火焰速度	当量比	稀释率	thickness
单位	Erg	J/g/k	erg/cm ² /s	J/cm ² /s	K	pa		g/cm ³	g/cm ³	cm/s			cm
注释													
F(x)=													
1	1.34015E7	1.34015	8711.707	8.71171E-4	420	202650	29.924	1736.62858	0.00174	39.68688	0.8	0	0.00943
2	1.23273E7	1.23273	8287.637	8.28764E-4	420	202650	30.926	1794.77929	0.00179	30.91136	0.8	0.1	0.01212
3	1.13173E7	1.13173	7771.125	7.77113E-4	420	202650	31.929	1852.98803	0.00185	24.91199	0.8	0.2	0.01487
4	1.03599E7	1.03598	7366.497	7.3665E-4	420	202650	32.931	1911.13874	0.00191	15.50218	0.8	0.3	0.024
5	9467070	0.94671	6999.311	6.99931E-4	420	202650	33.933	1969.28945	0.00197		0.8	0.4	---

(不稳定性计算与分析)

胞状不稳定性是层流火焰传播中的一个重要的问题。当火焰面出现胞状不稳定性时，火焰的传播速度会显著增加，球形火焰由层流的稳定传播逐渐发展为细胞状的不稳定火焰，也就无法通过传统的方法获得层流火焰传播速度，故在本文中所有的数据均采用出现胞状结构之前的火焰纹影图得到。而层流火焰传播过程中主要受到两种不稳定性的影响：扩散不稳定性、流体动力学不稳定性与浮力不稳定性^[9]。

扩散不稳定性主要由质量扩散与热扩散的竞争引起，表现为在火焰面上出现不均匀的尺度较大的细胞与裂痕，其影响程度可以用有效刘易斯数 Le_{eff} 来进行定性分析与说明。一般来说， Le_{eff} 的值越大，则扩散不稳定性越小^[10,11]，刘易斯数是物质的热扩散系数与质量扩散系数之比： $Le=\alpha/D$ (α 为热扩散系数， D 为质量扩散系数)，而有效刘易斯数由燃料及氧化剂的刘易斯数共同定义：

$$Le_{eff} = 1 + \frac{(Le_{exc} - 1) + (Le_{def} - 1)A_1}{1 + A_1} \quad (6)$$

其中 Le_{exc} 和 Le_{def} 分别为过量和不足的反应物的刘易斯数，参数 A_1 反映了反应的强度性质，定义为

$$A_1 = 1 + Ze(\Phi - 1) \quad (7)$$

其中 Φ 为预混反应物中过量反应物与不足反应物的质量比，当 $\phi \leq 1$ (贫燃) 时， $\Phi = 1/\phi$ ； $\phi > 1$ (富燃) 时， $\Phi = \phi$ 。

反应的活化能大小用泽里多维奇数， Ze ，来衡量：

$$Ze = E_a(T_{ad} - T_u)/R^0 T_{ad}^2 \quad (8)$$

其中 R_0 为通用气体常数， E_a 为反应的活化能，在本文中通过 chemkin 进行参数分析，用如下的公式来求得：

$$E_a = -2R^0 [\partial \ln(\rho_u S_u^0) / \partial (1/T_{ad})] \quad (9)$$

其中 T_{ad} 为绝热火焰温度， ρ_u 为未燃混合气体的密度， S_u^0 为层流火焰传播速度。

流体力学不稳定性表现为在细胞表面出现的均匀分布的尺度较小的胞状结构^[12]，其主要由火焰面两侧的已燃气体与未燃气体的密度梯度造成^[13]。当流体力学不稳定性出现时，火焰的传播速度会迅速增大。流体力学不稳定性可以用热膨胀系数 $\sigma = \rho_u/\rho_b$ 以及火焰厚度 $\delta = \lambda/(C_p \rho_u S_u^0)$ 两个参数来定性说明，其中 ρ_b 和 ρ_u 分别为已燃气体与未燃气体的密度； λ 与 C_p 分别为由未燃与已燃气体混合气的平均温度计算的导热系数与比热容。显然，热膨胀系数越大，火焰面两侧的梯度越大，流体力学不稳定性越显著；随者火焰厚度的增长，密度梯度的影响会被减弱，流体力学不稳定性会被抑制。

在火焰传播的初始阶段，由于火焰的拉伸率较大，火焰面扩张的速度高于细胞生成的速

度，因此胞状的不稳定性被显著的抑制。随者火焰的逐渐发展，火焰的拉伸率减小，火焰面的拉伸不再能抑制胞状的不稳定产生。在 2atm 下时，随者当量比的逐渐增大，火焰表面细胞状的不稳定性逐渐变得显著。从图 4 中火焰纹影照片可以看到，在 $R=20\text{ mm}$ ，（ R 为球状火焰的半径）当量比为 1.3 时，火焰表面的细胞状结构开始出现裂痕，而随着当量比的进一步增大，球型火焰面逐渐被胞状裂纹所覆盖。通过计算不同当量比下有效刘易斯数也可以发现，随者当量比的增高，正庚烷/空气混合物火焰的有效刘易斯数逐渐减小（如图 6 所示），扩散不稳定性逐渐增强。

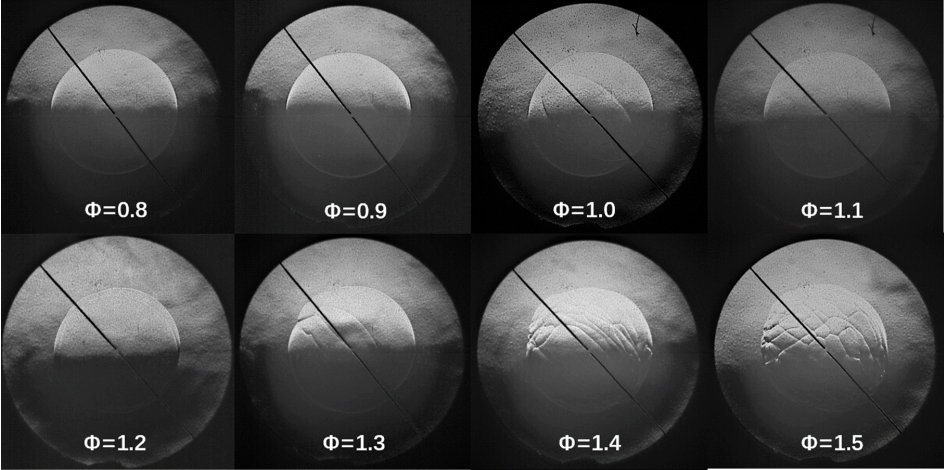


图 4 2atm 时，不稀释时不同当量比下球形火焰纹影照片（ $R=20\text{ mm}$ ）

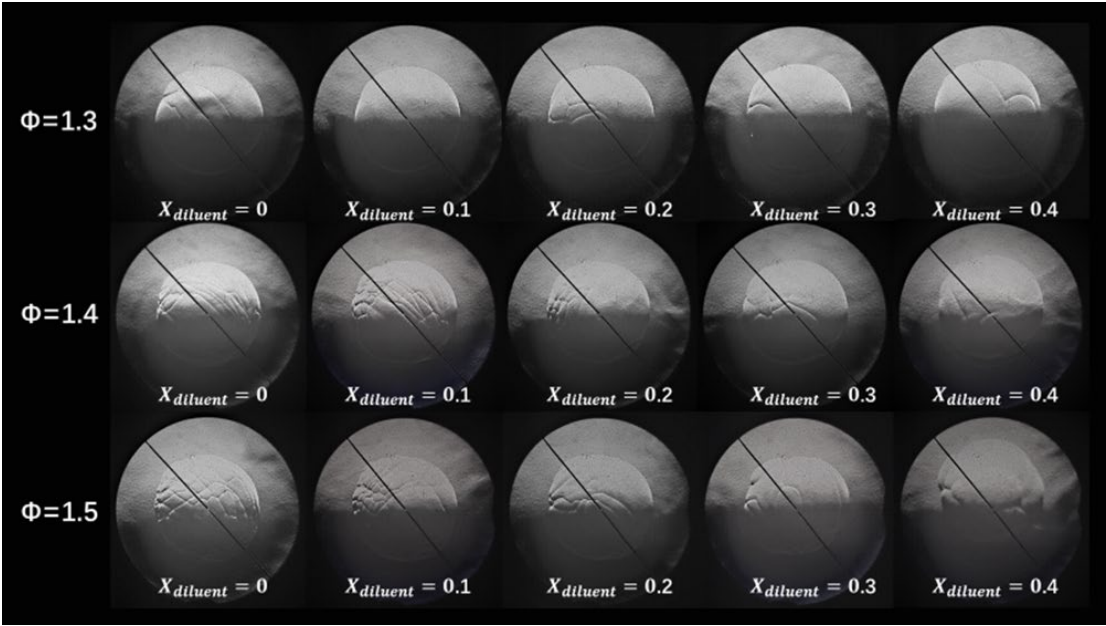


图 5 0.2Mpa 时，不同稀释率下球形火焰纹影照片（ $R=20\text{ mm}$ ）

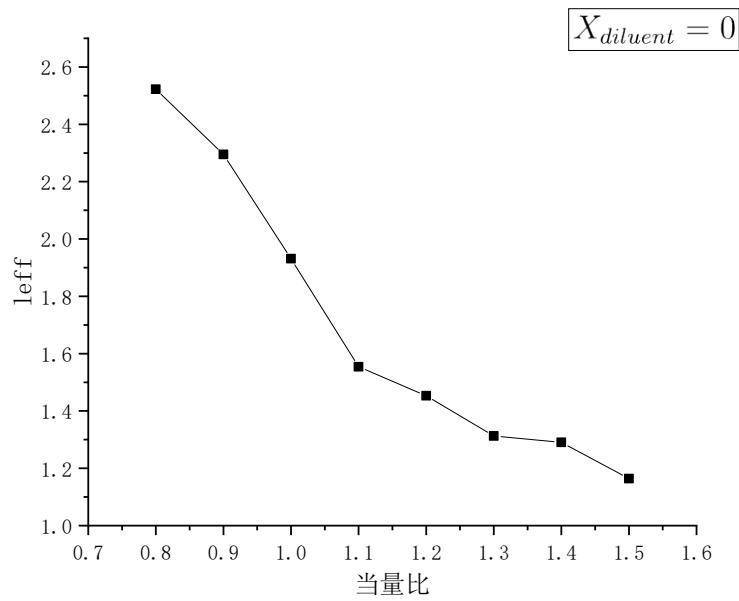


图 6 有效刘易斯数随当量比变化

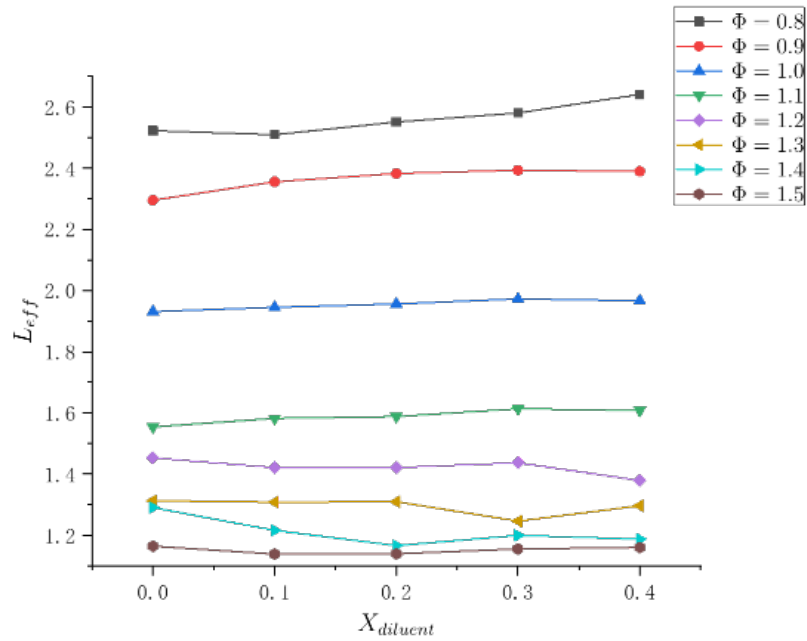


图 7 不同当量比下氩气稀释对有效刘易斯数的影响

图 7 给出了不同当量比下有效刘易斯数随稀释比的变化。由图 7 可以看出，氩气的稀释对正庚烷/空气混合物刘易斯数的影响很小，表明氩气对火焰热扩散不稳定性的影响也很小。这主要是由于氩气的比热容与热导率均较小，因此在其稀释作用下，燃烧过程的热扩散作用并没有被显著改变。结合图 5 火焰纹理图可以看到，在当量比 1.3-1.5 范围内，随着氩气的稀释，火焰表面尺度较大的胞状裂纹并没有明显地减少或者增多，在当量比为 1.3 时体现最为明显。同时，在当量比为 1.5 时，随着稀释率的增加，球形火焰有着明显的上浮现象，表明氩气的稀释使得正庚烷/空气火焰的浮力不稳定性有所增大。

从图 8 可以看到，在相同的当量比时，随着氩气稀释率的增加热膨胀系数逐渐降低，这

主要是在氩气的稀释显著降低了反应温度，使得反应后混合气的密度降低，从而减小了火焰面两侧的密度梯度，如图 9 所示，两者具有良好的一致性。同时，结合图 10 可见，随者氩气的稀释，火焰厚度明显增加。综合热膨胀系数与火焰厚度变化可以分析出，氩气的稀释会抑制正庚烷/空气火焰传播过程中的流体力学不稳定性，从而使得火焰表面均匀分布的较小胞状结构减少。

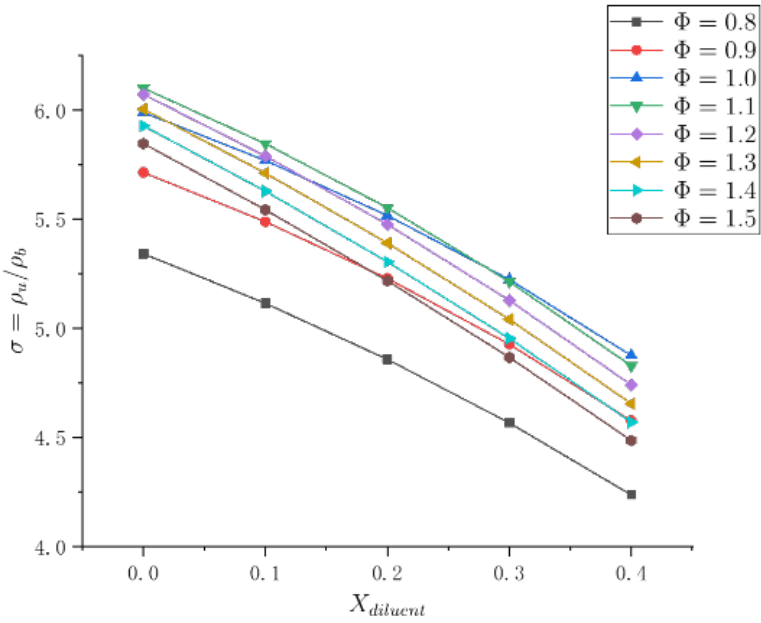


图 8 不同当量比下热膨胀系数随着稀释率的变化

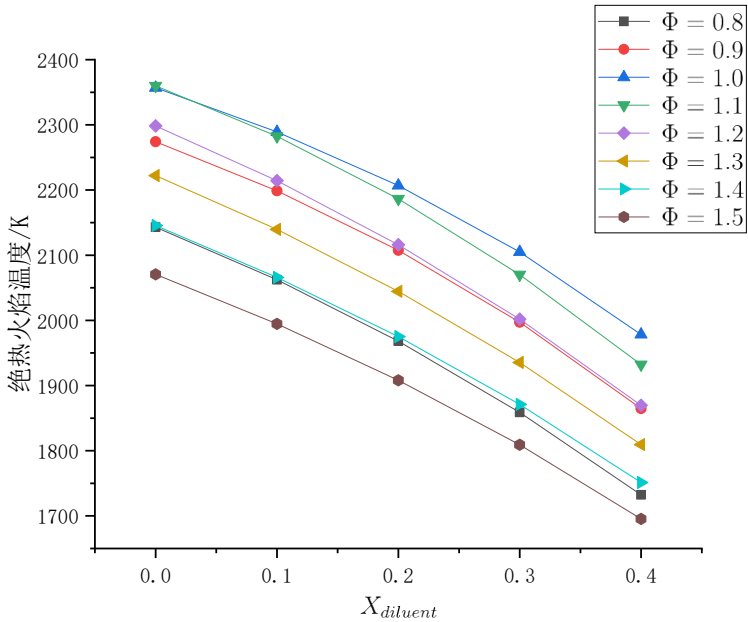


图 9 不同当量比下绝热火焰温度随稀释率的变化

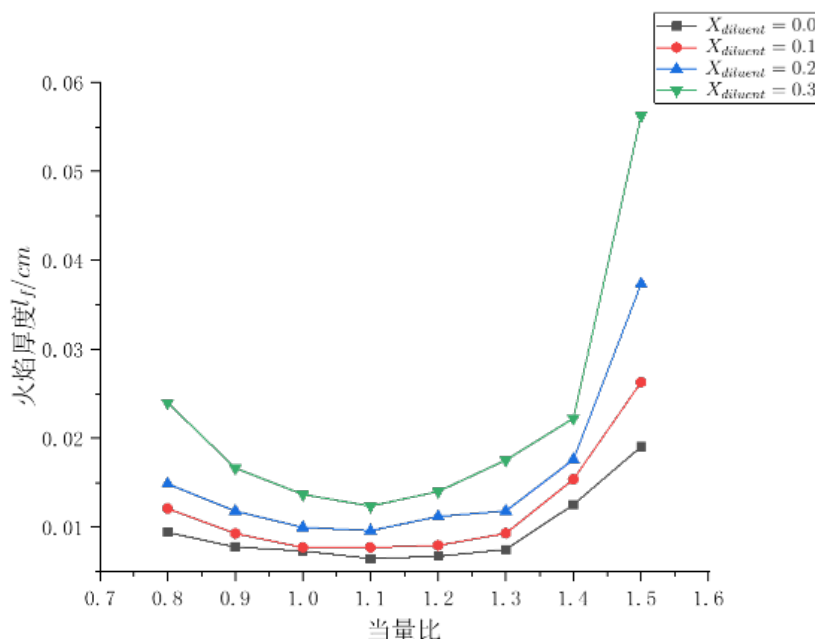


图 10 不同稀释率下火焰厚度随当量比的变化

七、结论

通过定容燃烧弹实验装置研究了初始压力为 0.2 MPa、初始温度 420 K 时正庚烷/空气混合物在氩气稀释下的层流火焰传播特性，测量得到稀释率为 0%、10%、20%、30%、40% 条件下不同当量比混合气的层流火焰传播速度。本文得到的主要结论如下：

(1) 氩气稀释能显著降低正庚烷/空气混合物层流火焰传播速度，且随着稀释率的增加，层流火焰传播速度线性地减小，但不同当量比下，氩气对于混合气层流火焰速度的影响并不相同。

(2) 随着氩气稀释程度的增加，正庚烷/空气混合物火焰传播过程中热膨胀系数减少，火焰厚度增加，但混合物的刘易斯数几乎不变，说明氩气的稀释可以降低正庚烷/空气混合物火焰传播过程中的流体力学不稳定性，但对于热扩散不稳定性的影响很小。

八、项目成果

国内会议 2019 年中国工程热物理学会燃烧学学术年会 墙报交流 第一作者

九、个人感想

在这个 SRT 项目中，我增长了自己的科研经验，从第一次阅读文献开始，到方案规划，进行实验，处理数据，对比分析到最终写成论文，完整进行了一次研究的流程，如何整理自己阅读的文献，如何利用 ppt 在组会上发表自己的观点，如何画出一幅漂亮的图...最大的收获就是消除了对科研活动的陌生感和畏惧感，对今后的科研活动打下了了的基础，最直观的感受就是因为有了这一次 SRT 的经验，暑假在东北大流体研究所实习时的工作开展很顺利。

但是由于这是第一次接触科研，所以实际上整个研究创新点不足，基本上是仿照前人已有的工作去进行的；同时，由于知识储备的不足，无法从机理上仔细分析清楚稀释作用究竟是如何从机理上影响火焰传播规律的；且实验工况的设计存在问题，为了更好地证实实验结果的可靠性，所选择的工况应该存在一定的文献数据，来与本实验得到的火焰传播速度进行比对，但是发现时已经做完实验了...；同时，由于时间的原因，只做

了一个工况的氩气，实际上结论的得出并不严谨；在文章书写上，受到了一位审稿人强烈的批评，提出了十余条问题，我检查之后发现的确如此，存在很多细节问题，会对阅读的人产生误导，看罢十分惭愧，希望以后可以做出真正好的科研。

十、致谢

谢谢钟北京老师和彭惠生师兄的耐心指导，你们的帮助和鼓励使我受益匪浅！

十一、参考文献

- [1] Vu T M, Park J, Kwon O B, et al. Effects of diluents on cellular instabilities in outwardly propagating spherical syngas-air premixed flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8): 3868–d3880.
- [2] Chenglong T, Zuohua H, Jiajia H, et al. Effects of N₂ dilution on laminar burning characteristics of propane-air premixed flames[J]. *Energy and Fuels*, 2009, 23(1): 151–156.
- [3] Li G, Zhou M, Zhang Z, et al. Experimental and kinetic studies of the effect of CO₂ dilution on laminar premixed n-heptane/air flames[J]. *Fuel*, 2018, 227(January): 355–366.
- [4] Zhong B-J, Peng H-S. Measurement of Laminar Flame Speed and Chemical Kinetic Model of 1-Pentene/Air Mixtures[J]. *Combustion Science and Technology*, Taylor & Francis, 2017, 189(10): 1698–1712.
- [5] Kelley A P, Law C K. Nonlinear effects in the extraction of laminar flame speeds from expanding spherical flames[J]. *Combustion and Flame*, The Combustion Institute., 2009, 156(9): 1844–1851.
- [6] Chen Z. On the accuracy of laminar flame speeds measured from outwardly propagating spherical flames: Methane/air at normal temperature and pressure[J]. *Combustion and Flame*, The Combustion Institute, 2015, 162(6): 2442–2453.
- [7] Zhang K, Banyon C, Bugler J, et al. An updated experimental and kinetic modeling study of n-heptane oxidation[J]. *Combustion and Flame*, Elsevier Inc., 2016, 172: 116–135.
- [8] Mehl M, Pitz W J, Westbrook C K, et al. Kinetic modeling of gasoline surrogate components and mixtures under engine conditions[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, Elsevier Inc., 2011, 33(1): 193–200.
- [9] Law C K. *Combustion physics*[M]. Cambridge university press, 2010.
- [10] Chen R H, Chaos M, Kothawala A. Lewis number effects in laminar diffusion flames near and away from extinction[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31 I(1): 1231–1237.
- [11] Lapalme D, Lemaire R, Seers P. Assessment of the method for calculating the Lewis number of H₂/CO/CH₄ mixtures and comparison with experimental results[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier Ltd, 2017, 42(12): 8314–8328.
- [12] Hu E, Huang Z, He J, et al. Experimental and numerical study on laminar burning velocities and flame instabilities of hydrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, Elsevier Ltd, 2009, 34(20): 8741–8755.
- [13] Kwon O C, Rozenchan G, Law C K. Cellular instabilities and self-acceleration of outwardly propagating spherical flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 1775–1783.
- [14] Tse S D, Zhu D L, Law C K. Morphology and burning rates of expanding spherical flames in H₂/O₂/inert mixtures up to 60 atmospheres[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(2): 1793–1800.
- [15] Okafor E C, Nagano Y, Kitagawa T. Experimental and theoretical analysis of cellular instability in lean H₂-CH₄-air flames at elevated pressures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(15): 6581–6592.
- [16] Lapalme D, Halter F, Mounaïm-Rousselle C, et al. Characterization of thermodiffusive and

hydrodynamic mechanisms on the cellular instability of syngas fuel blended with CH₄ or CO₂[J]. Combustion and Flame, Elsevier Inc., 2018, 193: 481–490.

- [17] Yang S, Saha A, Wu F, et al. Morphology and self-acceleration of expanding laminar flames with flame-front cellular instabilities[J]. Combustion and Flame, Elsevier Inc., 2016, 171: 112–118.