

# 液体正庚烷在微细直管燃烧器中的燃烧特性研究

赵俊英, 李军伟, 黄景怀, 王宁飞  
(北京理工大学 宇航学院 北京 100081)

**摘 要:** 为了解液体燃料在微小空间中的熄火和火焰传播特性, 采用不同的外套管和多孔介质, 在微细直管中对庚烷扩散火焰进行了实验研究。研究表明: 随着庚烷流量的增加, 火焰稳定位置逐渐向直管燃烧器出口移动, 可燃极限先迅速增大又趋于不变。增加外套管可以有效扩展可燃极限, 外套管的结构对火焰稳定性和可燃极限有很大影响。外套管层数越多, 燃烧器散热量越小, 火焰稳定性越好。此外, 多孔介质的位置对火焰稳定性也有很大影响。庚烷喷嘴放置在多孔介质上游及多孔介质中时, 液体庚烷的蒸发以及混合效果最好, 可以得到更好的富燃极限。

**关 键 词:** 微细直管; 正庚烷; 燃烧; 火焰稳定性; 多孔介质

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 引 言

微尺度燃烧器是微动力系统的核心部件, 广泛用于便携式电子产品的电源微动力系统中, 它并不是简单的对传统燃烧器在尺度上按比例缩小, 因此会面临热损失大、燃烧不稳定的等问题。国内外研究者采取了各种各样的措施来增加微尺度下燃烧稳定性<sup>[1-3]</sup>, 这些措施的效果已获得实验和理论的验证。

但是以往针对微型燃烧器的研究都是针对气体燃料开展的, 对液体燃料的研究很少。因为液体燃料能量密度大, 易于储存和运输, 且安全性良好, 具有很强的实用价值, 因此非常适合作为便携式移动设备的燃料。相对于气体燃料, 液体燃料在使用过程中还要面对另外一些困难和挑战, 一是受燃料挥发性影响, 液体燃料燃烧过程中易积碳; 二是液体燃料燃烧是个扩散燃烧过程, 必须考虑液滴破碎、雾化和蒸发过程; 三是对于液体燃料, 时间尺度缩短, 会使燃油不完全汽化更加严重, 导致贫燃燃烧, 降低燃料利用率甚至熄火。为解决液体燃料微尺度燃烧困难, 国内外很多学者已经开展了这方面的研究。

Marbach 和 Agrawa 等人设计了一种回热燃烧器<sup>[4]</sup>, 预热反应物温度高于 600 K, 减少了热损失。刘宏升等人通过实验证实了液体燃料在热多孔介质内汽化及自维持燃烧的可行性<sup>[5]</sup>。Yueh - Heng Li 等人研究了液态油膜燃烧器利用金属多孔介质<sup>[6]</sup>, 对于液体燃料蒸发和火焰稳定性, 这是一个用来增加接触面和传导传热的有效方法。

在前人研究的基础上, 为解决液体燃料在微尺度下蒸发混合困难、火焰不稳定等问题, 本研究设计了一种带回热结构和多孔介质的微小型燃烧器。从内管外壁温度、废气温度和火焰位置形状等方面考察了液体正庚烷在回热式直管内的燃烧特性, 实验研究了燃烧器结构、空燃比和燃料流量等因素的影响。定义空燃比 ( $A/F$ ) 为可燃混合气中空气质量流量与燃料质量流量之比。

## 1 实验方案

### 1.1 实验系统

实验在微燃烧实验台上进行, 实验系统如图 1 所示。空气的流量采用型号为 D0727A/ZM 的质量流量控制器来调节, 量程为 0 ~ 5 SLM, 测量误差小于满量程的 1%。液体正庚烷由 20 mL 的注射器来注入燃烧室, 流量采用型号为 LSP01 - 1A 的注射泵来控制。燃烧器的壁面温度和尾气温度选用外径 0.5 mm 的 K 型铠装热电偶来测量, 热电偶误差极限  $\pm 0.75\%$  (400 ~ 1 300℃); 型号为 FLIR - A40 红外热像仪用来记录套管外壁面温度场。另外, 选用 CANON HF200 来记录火焰位置及形状。同时, 利用 LABVIEW 软件开发的数据采集软件来实时采集气体流量、温度等数据。

实验中, 氧化剂为空气。测量的主要参数包括: 空气和正庚烷的体积流量; 空燃比 ( $A/F$ ); 内管外壁面温度和尾气温度; 火焰位置和形状。

收稿日期: 2012 - 08 - 24; 修订日期: 2012 - 09 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 50906004)

作者简介: 赵俊英( 1988 - ) , 女, 天津人, 北京理工大学硕士研究生。

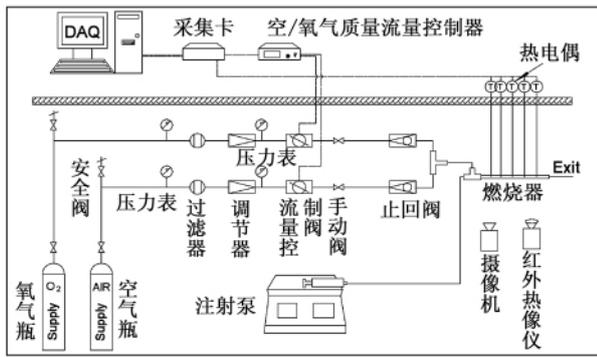


图 1 实验系统图

Fig. 1 Diagram of the test system

### 1.2 燃烧器模型

燃烧器是长 100 mm、内径 4 mm、外径 6 mm 的石英管,水平放置。在石英管内部从空气进气端伸入一根外径为 0.4 mm、内径为 0.24 mm 的毛细不锈钢管,它与注射器针头相连接。利用注射泵把液体燃料注入内管中,毛细管尾端即庚烷喷嘴出口距内管出口 50.5 mm。同时将空气从左端口通入燃烧器中。实验中,选择聚丙烯腈基碳毡作为多孔介质,其孔隙率大约为 87%。这种材料的孔径较小,阻止了火焰进入多孔介质内。另外,为了回收部分废气热量来预热低温的进口反应物,进而增加燃烧稳定性,本研究设计了两种外套管结构。第一种套管是长 83 mm、内径 10 mm、外径 12 mm,平底的石英直管。第二种套管,长 83 mm、内径 10 mm、外径 22 mm、圆形底部,如图 2 所示,它由双层石英管组成,石英管夹层被抽成真空,可以有效减小对流换热造成的热损失。

模型 1 如图 2 所示,布置了 4 路热电偶(TC1、TC3、TC4 和 TC5)测量内管壁面温度,TC6 测量燃烧尾气温度。模型 2 在模型 1 的基础上,在内管中放置了一段碳毡,把燃料喷嘴出口放置在多孔介质中。碳毡长为 10.6 mm,外径 4 mm。热电偶 TC2 沿内管轴线伸入多孔介质测量碳毡内部温度。

模型 3 在模型 1 的基础上增加了外套管,同时在内管中放置了碳毡作为多孔介质。模型 3(a)、(b)、(c)中碳毡所放置的位置不同,(a)中碳毡放置在燃料喷嘴右侧,距离内管出口 23 mm;(b)中碳毡放置在燃料喷嘴左侧,距内管出口 58.5 mm;(c)中燃料喷嘴出口置于碳毡内部,此时碳毡距内管出口 44.5 mm。模型 4 在模型 3(c)的基础上,用带真空层的回热套管代替了直管回热套管。另外,模型 3(c)和模型 4 中增加一路热电偶 TC7,用来测量套管

外壁面温度,修正红外热像仪。

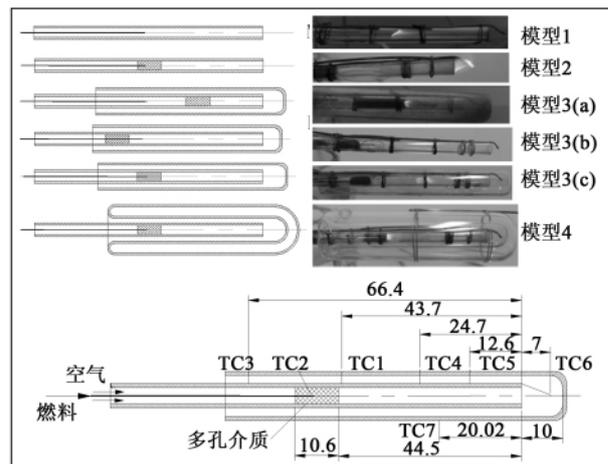


图 2 实验中所用燃烧器模型和照片

Fig. 2 Model and photos of the burner used during the test

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 可燃极限

为了研究庚烷流量变化时的不同燃烧器可燃极限的变化趋势,采用模型 2、3、4 进行了一系列实验。实验结果如图 3 所示,横坐标表示庚烷质量流量,左侧纵坐标表示燃料空燃比,右侧纵坐标表示燃烧器功率。

在实验中发现,当庚烷流量更小达到 0.11 mg/s 时,无论如何调整空燃比都无法维持稳定燃烧。这是因为此时放热量很少,只有不到 5 W,燃料燃烧产生的能量不足以补偿庚烷蒸发和热损失带走的能量,因而无法维持反应进行。当庚烷流量达到 0.23 mg/s 时,模型 3(c)只能在空燃比为 16.15 ~ 24.22 这一范围内稳定燃烧。这是因为这时参与反应的燃料很少,放热也很少,最大只有 11 W。这种情况下,很难维持燃烧的正常进行,燃烧器可稳定工作的范围很窄。当庚烷流量由 0.23 mg/s 增加到 0.46 mg/s 的过程中,稳定工作范围有大幅度的增加。随着庚烷流量的增加,参与反应的燃料增多,反应放热增加,空气在一定程度的过量或者不足时依然可以维持稳定燃烧。当庚烷流量超过 0.46 mg/s 后,如图 3 所示,模型 2、模型 3(c)和模型 4 所得到的可燃极限差异较大。模型 3(c)中随着庚烷流量的增加,富燃极限值先小幅度降低,当庚烷流量增加到 0.96 mg/s 时达到一个最低点,然后又再随着庚烷流量的

增加而小幅升高。但总体来看比较稳定,几乎都维持在 5.16 ~ 7.63 范围内;贫燃极限则在 33 ~ 37 范围内围绕 35 波动。模型 2 中,贫、富燃极限随庚烷流量的变化规律与模型 3(c) 相似。只是各庚烷流量下,其富燃极限比模型 3(c) 稍好一些,维持在 4.04 ~ 5.83 范围内;而其贫燃极限值则比模型 3(c) 小很多,停留在 13 ~ 20 范围内。模型 4 中,富燃极限随庚烷流量的变化规律同样与模型 2、3(c) 相似,稳定在 4.93 ~ 7.18 范围内。然而,其贫燃极限值随着庚烷质量流量的增加而大幅降低,与模型 2、3(c) 存在很大差别。这是由于模型 4 的外套管底部是圆形的,使火焰较容易被吹熄。可见燃烧器的结构对燃料贫燃极限的影响很大,对富燃极限的影响相对比较小。

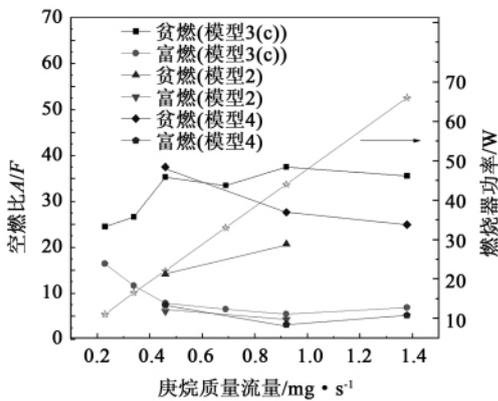


图 3 不同庚烷流量下的可燃极限以及燃烧器功率

Fig. 3 Flammable limits and power of the burner at various heptane flow rates

### 2.2 套管的影响

为了探讨回热套管对可燃极限的影响,对比了模型 2、模型 3(c) 和模型 4 的实验数据。如图 3 所示,没有回热结构时(模型 2 中)可燃极限非常窄,且当庚烷流量较大时液滴无法及时汽化,会在燃烧管中大量堆积。增加了回热套管(模型 3(c) 和模型 4)后,实验过程中没有出现庚烷堆积的现象,可燃极限(尤其是贫燃极限)都有很明显的增加。这正是由于回热套管收集了尾气的热量,利用废气热量来预热低温的进口反应物,加速庚烷液滴的蒸发。

另外,为了进一步探讨回热套管的结构对可燃极限的影响,下面针对实验数据进行更细致的分析。

#### 2.2.1 对富燃极限的影响

对于富燃极限,图 3 显示模型 4 在数值上小于

模型 3(c),也就是说采用双层真空回热套管可以获得更宽的富燃极限。这是因为富燃时,空气流量较小,内管中雷诺数较低,火焰将稳定在很靠近多孔介质的位置燃烧。

图 4(a) 是庚烷流量为 0.46 mg/s ( $A/F$  为 13.46) 时,模型 3(c) 和模型 4 中内管和套管外壁面温度分布。这里以内管中心轴为  $X$  轴,以内管出口为横坐标原点。图中  $x = 7$  mm 的各点显示的是排气温度,其余都是壁面温度。观察图 4(a) 可以发现,两种模型中内管和套管外壁面温度的分布规律相同。内管最高壁面温度出现在坐标  $X = -24$  mm 附近,套管最高壁面温度出现在坐标  $X = -30$  mm 附近。由图 4(b)、(c) 也可见,两模型中的火焰都稳定在坐标  $X = -20$  mm 至  $-30$  mm 区间内。对于  $X$  在  $-74$  mm 至  $-55$  mm 这段区间,由于这段套管位于燃料喷嘴出口的上游,传到这里的热量已经很少,故模型 4 和模型 3(c) 套管外壁面温度几乎相同,都从 340 K 上升至 370 K。 $X$  在  $-55$  mm 至 10 mm 这段区间内,模型 3(c) 中套管壁面温度都高于模型 4,且在火焰稳定位置附近,两套管外壁面温差最大。图 4(a) 显示,模型 4 中套管最高壁面温度为 475 K,比模型 3(c) 低 128 K。同时,模型 4 中内管最高壁面温度为 873 K,比模型 3(c) 高 40 K。这表示模型 4 中热损失更少,能更有效的利用排气热量预热未燃混合气。

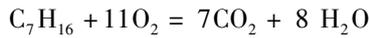
为进一步了解模型 3(c) 和模型 4 中外套管散热量,进行了散热量计算<sup>[6]</sup>。

经计算,模型 3(c) 的散热量是 9.69 W,而模型 4 的散热量是 3.94 W,远小于模型 3(c),因此有更多的热量用来预热未燃区,模型 4 中火焰更容易稳定。

#### 2.2.2 对贫燃极限的影响

对于贫燃极限,图 3 显示当庚烷流量 0.46 mg/s 时,模型 4 所得极限值大于模型 3(c)。但随着庚烷流量的增加,模型 4 极限范围反而变窄,且极限值都小于模型 3(c)。这是因为贫燃时,空气流量较大,火焰将被吹出内管,并稳定在内管与套管底部形成的空间,而且庚烷流量越大,火焰越容易被吹至此处。这部分空间中的流场会对火焰的稳定产生很大的影响。

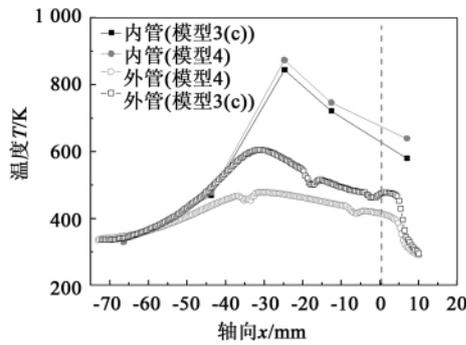
为了能够模拟两种套管的流场结构,本研究采用二维层流流动方程组和单步化学反应模型,对庚烷/空气混合气在实验模型中的流动和燃烧过程进行了模拟。基本反应方程为:



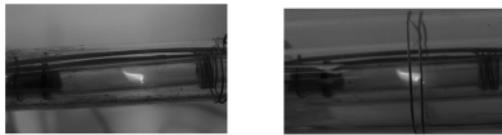
化学反应速率遵循阿伦尼乌斯方程, 即得:

$$\omega = AC_F^a C_O^b \exp(-E_a/R_a T)$$

其中  $E_a = 125.6 \text{ kJ/mole}$ ,  $A = 1.4 \times 10^6 \text{ m}^3 (\text{mole} - \text{s})$ 。



(a) 内管和套管壁面温度分布



(b) 模型3的火焰照片

(c) 模型4的火焰照片

图 4 庚烷流量为  $0.46 \text{ mg/s}$ ,  $A/F$  为  $13.46$  时, (a) 模型 3(c) 和模型 4 中内管和套管壁面温度分布, (b) 为模型 3(c) 火焰照片, (c) 为模型 4 火焰照片  
Fig. 4 When the heptane flow rate is  $0.46 \text{ mg/s}$  and  $A/F = 13.46$ , (a) Wall surface temperature distribution of internally-mounted tube and the sleeve of the model No. 3(c) and model No. 4, (b) Photos of the flame of model No. 3, (c) Photos of the flame of model No. 4

边界条件如下, 入口边界选择质量流量入口, 出口边界条件为压力出口, 定义出口压力为静压。内壁面为速度无滑移边界条件, 燃气与固体壁面为耦合传热。外壁面为综合换热表面, 考虑对流和辐射换热, 对流换热系数根据外壁温度计算, 管壁发射率取  $0.72$ 。

图 5 反映的是两种燃烧器回热套管底部流场结构, 模型 4 中外套管底部流动区域的面积比模型 3(c) 中的小, 气流遇到圆形底部后逆向流动, 回流区域更小, 火焰更容易被吹灭。从两个模型的流线也可以看出, 模型 3(c) 中, 气流遇到平底套管后逆向流动, 逆向流动的流线在内管出口受到管壁的挤压, 向轴线收缩的较大, 部分高温尾气会再次流入主流进行混合和燃烧。而模型 4 中逆向流线向轴线收缩地较小, 这样高温尾气完全从内管外侧通道流出。

因此对于贫燃极限, 当庚烷流量较大时, 模型 4 中火焰较难维持稳定燃烧, 所得可燃极限就更窄。

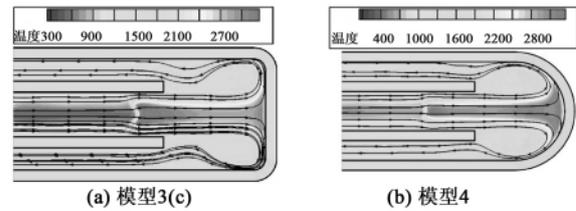


图 5 两种燃烧器中回热套管底部流场结构  
Fig. 5 Configuration of the flow field at the bottom of the recuperator sleeve of the two types of the burner

### 2.3 多孔介质位置的影响

为了探讨多孔介质放置的位置对可燃极限的影响, 采用模型 1 和模型 3(a) ~ 模型 3(c), 针对庚烷流量  $0.92 \text{ mg/s}$  进行实验, 实验结果如表 1 所示。表 1 显示, 相对于模型 1, 模型 3(a) 可以得到更好的贫燃极限, 模型 3(c) 可以得到更好的富燃极限, 而模型 3(b) 很难实现稳定燃烧。

表 1 庚烷流量  $0.92 \text{ mg/s}$  时, 模型 1 和模型 3(a) (b) (c) 的可燃极限

Tab. 1 When the heptane flow rate is  $0.92 \text{ mg/s}$ , the flammable limits of the model No. 1 and model No. 3 (a) (b) and (c)

可燃极限	模型 1	模型 3(a)	模型 3(b)	模型 3(c)
贫燃	27.36	29.15	NA	37.23
富燃	4.49	4.04	NA	5.16

实验发现, 模型 3(b) 中由于燃料喷嘴被置于内管中心, 与管壁没有接触, 液体庚烷从喷嘴中流出后会形成液滴, 庚烷流量很小时, 液滴悬挂着毛细管喷嘴末端, 火焰会稳定在液滴附近。当庚烷流量增加后, 液滴不能悬挂在喷嘴末端, 庚烷液滴滴下时火焰立即熄灭。模型 3(b) 中碳毡置于庚烷出口的上游, 没有帮助扩大液体燃料的蒸发面积; 且由于毛细管置于内管中轴线上离管壁较远, 回热中用于预热液滴的热量很少, 这样就会有大量庚烷液体堆积, 如图 2 中所示。可见, 碳毡放置在这个位置并不能起到积极的作用。

模型 3(c) 中, 庚烷出口置于碳毡内部。燃料滴在多孔介质中, 碳毡孔隙增大了液体庚烷蒸发面积; 而碳毡的高辐射、高导热能力使下游火焰区的热量反馈回来, 加强了预热作用; 另外, 复杂的孔隙通道

对庚烷气体和空气的扰流作用,初步促进了两种气体的混合。因此,模型 3(c) 的可燃极限范围最宽。在模型 3(a) 中,碳毡置于庚烷出口下游,在上游庚烷已经初步气化并与空气混合,形成预混气体。这个位置上的碳毡,使燃气分布均匀,并对预混气体进行扰流和加强预热。火焰更容易在碳毡表面稳定,从而增加了火焰的稳定性。因此,模型 3(a) 的可燃极限范围也很宽。

表 2 显示当  $Re = 82.4$  (模型 3(c) 富燃极限,  $A/F = 5.16$ ) 时,模型 3(c) 中火焰已被吹离碳毡表面,稳定在距离碳毡表面下游约 20 mm 处;模型 3(a) 中火焰则稳定在碳毡表面。 $Re = 121.87$  ( $A/F = 7.63$ ) 时,模型 3(c) 中火焰被吹向内管出口,此时火焰呈长扁平状,表明部分空气与庚烷是一边混合一边燃烧的;而模型 3(a) 中,大部分火焰依然稳定在碳毡表面,但有部分进入碳毡内部。 $Re = 157.71$  ( $A/F = 9.87$ ) 时,模型(a)和(c)中火焰均稳定在靠近内管出口的位置。此时温度很高,火焰呈现出橙色。当  $Re > 358.43$  ( $A/F$  大于 22.43) 时,模型 3(a) 和模型 3(c) 中火焰都被吹出内管,稳定在内管与套管底部形成的空间中。图 6 是庚烷流量 0.92 mg/s 时,模型 3(a) 和(c) 中内管壁面温度分布。当  $Re > 322.6$  时,两模型中的火焰都已被吹出内管,这时模型 3(a) 中 TC6 温度比较稳定,而模型 3(c) 中 TC6 呈现下降趋势。这表示,模型 3(a) 中的火焰比模型 3(c) 中更加稳定。模型 3(a) 中 TC6 温度高于模型 3(c) 最大温差 170 K。这是由于火焰稳定的位置不同,如表 2 所示,模型 3(a) 中 TC6 离火焰外焰部分比较近,所以温度比较高。另一方面,两模型中 TC1 和 TC4 温度都比较稳定。当  $Re < 157.7$  时,火焰稳定在内管中。对于 TC4,两模型中都会出现一个峰值。从图 6 可以看出,模型 3(a) 中 TC4 温度峰值出现的比模型 3(c) 晚,并且最大温差为 60 K,远小于模型 3(c) 中的 230 K。这也说明了模型 3(a) 中火焰的稳定性更好。另一方面模型 3(c) 中 TC4 最高温度达到 764 K,比模型 3(a) 中高 370 K。说明模型 3(c) 中燃料燃烧更充分。

结合表 1 和表 2 和图 6 可知,庚烷出口处的碳毡更有利于促进液体庚烷的蒸发以及燃气的混合,从而提高燃烧效率。靠近管口处放置的碳毡,对已预混气体进行扰流,使工质进一步均匀混合,有助于提高火焰稳定性。

表 2 庚烷流量为 0.92 mg/s 时,模型 3(a) 和(c) 中火焰  
Tab. 2 When the heptane flow rate is 0.92 mg/s, the flame of model No. 3 (a) and (c)

A/F	模型 3(c)	模型 3(a)	雷诺数 $Re$
5.16			82.4
7.63			121.9
9.87			157.7
22.43			358.4

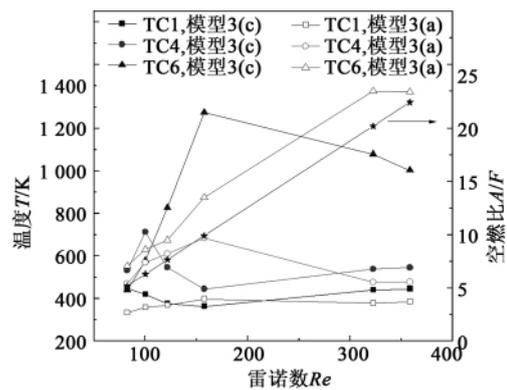


图 6 庚烷流量 0.92 mg/s 时,模型 3(a) 和(c) 中内管壁面温度

Fig. 6 When the heptane flow rate is 0.92 mg/s, the wall surface temperature of the internally mounted tube of model No. 3 (a) and (c)

### 2.4 燃料流量对火焰位置的影响

为了研究燃料流量与火焰位置的关系,采用模型 3(c) 进行了多种空燃比条件下的实验,获得的温度曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出,当  $Re < 107.5$  时,火焰位于 TC1 附近。随着空气流量的增加,火焰向下游移动。当  $Re = 107.5$  时,火焰移动到 TC4 附近。当  $Re = 143.4$  时,火焰移动到 TC5 附近。从直管壁面的温度分布可以看出,直管壁面温度先升高,出现峰值,然后下降出现最小值,随后壁面温度又逐渐升高。最低温度的出现是由于火焰从内管中移出后,火焰位于内管出口,距离内管上游较远。从图中可以看出,TC1,TC4 和 TC5 最低温度点对应的雷诺数都是 161.3。图 7(d) 是内管出口处燃气的温度分布,从图中可以看出随着庚烷流量的增加,可以稳定工作的空气流量范围变大,火焰可以在更高的空气流速

下稳定。此外 随着庚烷流量的增加 最高燃气温度也在升高 从 1 200 K 升高到 1 450 K。

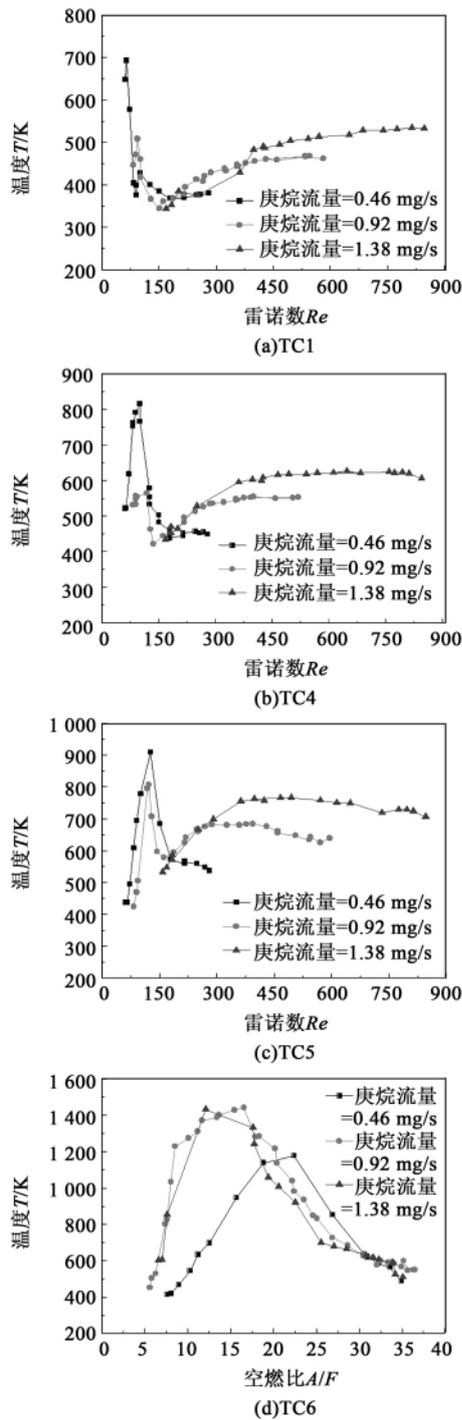


图 7 不同空气流量下,模型 3(c) 中壁面及尾气温度分布

Fig. 7 Wall surface and exhaust gas temperature distribution of model No. 3(c) at various air flow rates

为了更直观地了解庚烷流量对内管壁面温度的影响,采用模型 3(c) 针对 2 种固定空燃比进行了实验。图 8 是当空燃比固定为 11.96 和 19.74 时,随

着庚烷流量的增加,内管外壁面温度的分布情况。图 8(a) 显示  $A/F = 11.96$ , 当庚烷流量为 0.34 和 0.46 mg/s 时,壁面最高温度点出现在  $X = -24.7$  mm 即 TC4 附近。随着庚烷流量的增加,内管最高壁面温度逐渐移向内管出口。当庚烷流量增加到 0.68 mg/s 时,壁面最高温度点出现在  $X = -12.6$  mm 即 TC5 附近。当庚烷质量流量大于 0.91 mg/s 时,排气温度远远高于各壁面温度,且保持在 1 100 K 左右。壁面温度分布规律也很稳定,不再发生变化。这是因为此时的火焰已经稳定在内管出口。 $A/F = 19.74$  条件下空气流速较大,火焰一开始便稳定在内管出口,故如图 8(b) 所示,随着庚烷流量的增加,内管外壁面温度都随之升高,但各点温度的分布规律很稳定,没有变化。

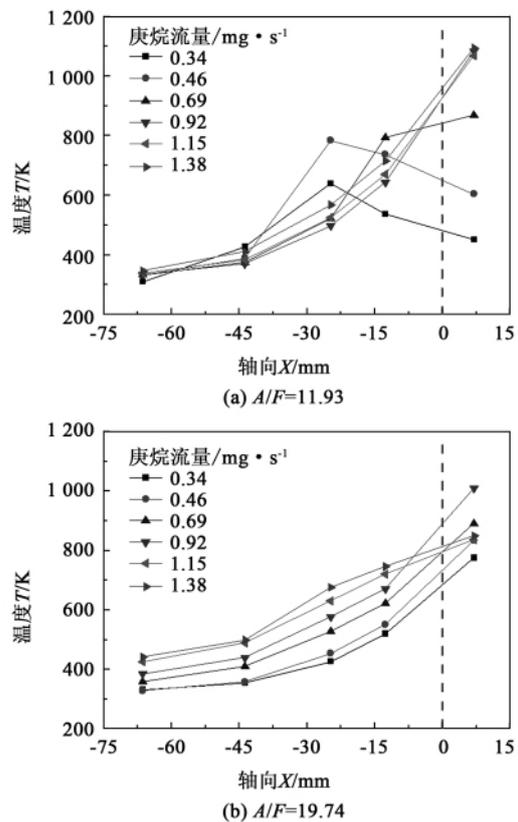


图 8 模型 3(c) 中,内管外壁面温度沿 x 轴分布  
Fig. 8 Extrenal wall surface temperature distribution of the internally mounted tube of model No. 3 (c) along the x axis direction

### 3 结 论

(1) 当庚烷流量小到 0.11 mg/s 时,燃烧器无法稳定工作。随着庚烷流量的增加,壁面及排气温度也随之增加,当庚烷流量为 1.38 mg/s 时,排气温

度可达 1 400 K。可燃极限先迅速增大接着又趋于平缓。

(2) 回热套管可以有效地扩展可燃极限。有回热套管的燃烧器,其可燃极限范围是无套管时的 2 倍左右。带真空层的回热套管,有效地减小了热损失。另外,回热通道的结构对可燃极限和火焰稳定有很大的影响,庚烷流量越大,影响越明显。目前,平底结构更为有利。

(3) 多孔介质的位置对可燃极限有较大影响。放置在下流,有利于庚烷蒸气与空气的混合,增加了火焰的稳定性;放置在庚烷出口,更有利于促进液体庚烷的蒸发以及燃气的混合;而置于上流则会不利于燃烧。

参考文献:

[1] Derek Dunn-Rankin ,Leal E M ,Walther D C. Personal power system[J]. Prog Energy Combust Sci 2005 31:422 - 465.

[2] ROWE M. Thermoelectrics an environmentally-friendly source of electrical power[J]. Renewable Energy ,1999 ,16: 1251 - 1256.

[3] Marbach T L ,Agrawal A K. Heat-recirculating combustor using porous inert media for mesoscale applications [J]. Journal of Propulsion and Power 2006 22: 145 - 150.

[4] 刘宏升 ,解茂昭. 多孔介质中液体喷雾燃烧的实验研究 [J]. 工程热物理学报 2009 30( 3) : 521 - 524.

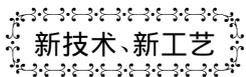
LIU Hong-sheng ,XIE Mao-zhao. Experimental study of the liquid atomization combustion in a porous medium [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2009 30( 3) : 521 - 524.

[5] Yueh-Heng Li ,Yei-Chin Chao ,Derek Dunn-Rankin. Combustion in a meso-scale liquid-fuel-film combustor with central-porous fuel inlet [J]. Combust Sci and Tech 2008 ,180 1900 - 1919.

[6] 黄 勇 ,燃烧与燃烧室 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 2009.

HUANG Yong. Combustion and combustor [M]. Beijing: Beijing Aeronautics and Astronautics University Press 2009.

( 辉 编辑)



### 能快速投运可移动的 FT8 Mobile Pacs 发电机组成套设备

据《Gas Turbine World》2012 年 9 - 10 月刊报道,在去年日本东海岸大地震和海啸后,作为峰值负荷的保障,Pratt & Whitney Power Systems 的 FT8 Mobile Pacs 能快速投运可移动的发电机组成套设备加入了 Tepco (东京电网),提供超过 130 MW 的电力。

众所周知,FT8 Mobile Pacs 被设计、制造成专门用于这种对突发事件作出快速响应的电力生产:

• 交付

装在 2 个公路拖车上的 25 MW 电站可以被空运(使用 ANTONOV 大型运输机)用于快速的全球部署。

• 安装

在已准备好的现场,在不需要混凝土底座的情况下,成立电站可以在一天时间内被安装和发电。

• 运行

整套承包的工程项目包括所有的电气、燃料和辅助的相互连接和全部时间的电站运行和维护。

为了减少 NO<sub>x</sub> 排放具有喷入水,用天然气作为燃料,在 15℃ 海平面 ISO 条件下,Mobile Pac 的设计性能:

设计参数	50 Hz 额定值	60 Hz 额定值
基本负荷输出功率/kW	24 220	26 140
热耗率/kJ · (kW · h) <sup>-1</sup>	10 339	9 973
效率/%	34.8	36.1
压比	19.3:1	19.3:1
涡轮转速/r · min <sup>-1</sup>	3 000	3 600
排气流量/kg · s <sup>-1</sup>	85.4	85.0
排气温度/℃	454	461
NO <sub>x</sub> 排放/mg · m <sup>-3</sup>	50	25

( 吉桂明 摘译)

tration of the primary air ranges from 44.3% to 55.3% and that of the secondary air is between 43.2% and 60.2%. Under the condition of different air distributions, the conversion rate of the nitrogen in the coal to  $N_2O$  is in a range from 4.2% to 6.2% while that of the nitrogen to  $NO_x$  ranges from 4.2% to 8.3% and that of the sulfur in the coal to  $S_2O$  is between 48% and 62%. When the oxygen concentration of the primary air is 50.4%, that of the secondary air is 50.5% and the flow proportion of the secondary air is 40%, such a case is regarded as the optimum operating condition for lignite, under which the combustion efficiency will be 94.09%, the conversion rate of nitrogen in the coal to  $N_2O$  5.4% and that to  $NO_x$  4.2%. **Key words:** fluidized bed,  $O_2/CO_2$ , combustion,  $N_2O$ ,  $NO_x$

液体正庚烷在微细直管燃烧器中的燃烧特性研究 = **Study of the Combustion Characteristics of Liquid N-heptane in a Tiny Straight Tube Type Burner** [刊, 汉] ZHAO Jun-ying, LI Jun-wei, HUANG Jin-huai, et al (College of Astronautics, Beijing University of Science and Technology, Beijing, China, Post Code: 100081) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(2). - 164 ~ 170

To learn the flame extinction and diffusion characteristics of liquid fuel in a micro space, various sleeve tubes and porous media were used. In a tiny straight tube, the diffused flame of heptane was experimentally studied. The research results show that with an increase of the flow rate of heptane, the stable location of the flame will gradually move to the outlet of the straight tube type burner, the flammable limits will first become wide at a high speed and then tend to be constant. To increase the number of the sleeve tubes can effectively expand the flammable limits and the structure of the sleeve tubes has a big influence on the flame stability and flammable limits. The more the number of the sleeve tubes, the smaller the heat quantity released from the burner. In addition, the location of the porous medium influences greatly the flame stability. When the nozzle of heptane is placed at the upper reaches of the porous medium or in it, the evaporation and mixing effectiveness of liquid heptane will be the best, thus obtaining a better oxygen-enriched combustion limit. **Key words:** tiny straight tube, n-heptane, combustion, flame stability, porous medium

“煤拔头”工艺快速热解产物分布的实验研究 = **Experimental Study of the Distribution of Products Quickly Pyrolyzed in the “Coal-topping” Process** [刊, 汉] JIN Qi-long, WANG Wen-yu, WU Shao-hua (Combustion Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LUAN Ji-yi (Mechanical Engineering College, Jiamusi University, Jiamusi, China, Post Code: 154007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(2). - 171 ~ 176

On a small coal topping test stand, simulated was the coal topping process and experimentally studied was the distribution of products quickly pyrolyzed from the following three types of typical coal, namely, Grade No. 6 coal, coal fed into a furnace for coal gas production and oil shale rock originated from Yilan County of Heilongjiang Province. The