

## 低重力下典型固体燃料的火焰特征及燃烧速率

张小乐<sup>1,2</sup>, 胡隆华<sup>1</sup>, 霍然<sup>1</sup>, 杨立中<sup>1</sup>, 王双峰<sup>3</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027; 2. 清华大学工程热物理系公共完全研究院, 北京 100084; 3. 中国科学院力学研究所微重力重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 利用实验时间为 2.2 s, 低重力水平为  $10^{-2}g_0$  简易实验系统, 对易升华典型固体燃料试样从常重力到低重力环境过渡的瞬态燃烧过程进行了实验研究, 考察了火焰形态、火焰亮度和温度以及燃料试样燃烧速率受重力水平影响的变化趋势。结果表明, 随着重力水平的变化, 火焰从常重力环境中的湍流扩散火焰, 过渡为低重力环境中的层流火焰, 火焰高度、亮度和温度以及燃烧速率都随重力水平的下降而降低。由于进入低重力状态后, 常重力燃烧诱导的空气流动并没有完全消失, 观察到了逆风侧火焰温度、火焰平均亮度, 以及燃烧速率因气流作用而回升的现象, 这种现象会使低重力环境中的火灾复杂性和危害性增强。

**关键词:** 低重力; 扩散火焰; 火焰形态; 火焰温度; 燃烧速率

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2011)03-0262-06

## Flame Characteristics and Burning Rate of Typical Solid Fuel Under Reduced Gravity

ZHANG Xiao-le<sup>1,2</sup>, HU Long-hua<sup>1</sup>, HUO Ran<sup>1</sup>, YANG Li-zhong<sup>1</sup>, WANG Shuang-feng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;  
2. Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
3. Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Experiments were carried out in a simplified drop system, which can provide a simulated reduced gravity period of about 2.2 s and a residual gravity of  $10^{-2}g_0$ . The transitional behaviors of flame shape, average flame luminance, flame temperature and combustion rate of fuel sample under normal to reduced gravity condition have been investigated. The results show that flame transforms from diffusive turbulent flame under normal gravity to laminar flame under reduced gravity. Flame height, average flame luminance, flame temperature and combustion rate of fuel decrease under reduced gravity. Because of the residual air movement induced by combustion under normal gravity, the rise in upwind flame temperature, luminance and combustion rate has been observed, which may make the fires under reduced gravity more complicated and hazardous.

**Keywords:** reduced gravity; diffusive flame; flame shape; flame temperature; combustion rate

随着载人航天器以及空间站的快速发展和应用, 低重力环境中的火灾安全问题越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>, 国外很多研究机构已经开展了各种形式的低重力环境中燃烧特性的研究工作<sup>[2-3]</sup>, 国内的相关研究

工作也陆续展开, 我国开展的研究工作主要以地基实验<sup>[4]</sup>和数值模拟为主<sup>[5-6]</sup>, 2006 年国内学者利用“实践八号”科学实验卫星完成了我国首批两项微重力燃烧空间实验<sup>[7-8]</sup>, 对多孔材料闷烧过程和导线着火前期

收稿日期: 2010-10-12.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-09-0914); 中国科学院微重力重点实验室开放课题资助项目.

作者简介: 张小乐(1987—), 男, 博士研究生, xiaole@mail.ustc.edu.cn.

通讯作者: 胡隆华, hlh@ustc.edu.cn.

特性进行了研究,取得了具有实际意义和科学价值的成果.在低重力环境中,浮力所诱导的对流流动基本消失,使得低重力燃烧与常重力燃烧存在显著差异,研究和认识低重力环境中的燃烧现象和行为,是进行航天器火灾安全系统设计的基础.

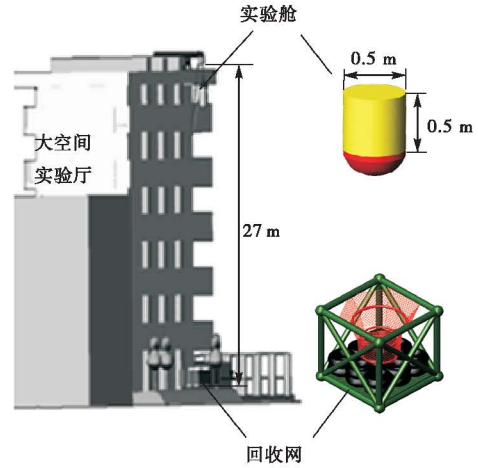
温度是表征燃烧的一个重要参数,邓名华和范维澄等<sup>[9]</sup>对一个采样点火焰温度随重力的变化进行了研究,得到了从超重到微重段一个采样点燃烧温度随重力变化的数据,研究表明重力水平对燃烧温度有着显著的影响,当处于重力加速度小于  $0.4 g_0$  的低重力环境时,由于自然对流的减弱,燃烧温度显著下降.杜文峰等<sup>[10]</sup>对微重力环境中蜡烛火焰的温度进行了测量,研究表明微重力环境中的火焰温度低,低于生成炭黑(soot)的阈值温度,证实了蜡烛火焰出现暗蓝色无烟现象是由于火焰温度较低的推论. Jiang 等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法对微重力环境中的火蔓延问题进行了深入研究,解释了微重力环境中逆风火焰支比顺风火焰支蔓延速度更快的原因.

对低重力环境固体燃料燃烧的现有研究相对较少,本文对一种易升华固体燃料试样从常重力到低重力环境过渡的瞬态燃烧过程进行研究,考察这一过程中火焰形态、火焰亮度和温度的变化,并采用 Canny 边界探测方法<sup>[11]</sup>,精确提取燃料轮廓,捕捉到了燃料试样燃烧速率的变化,最后讨论以上各种变化的相互联系,并就空气流动对低重力燃烧的影响进行分析.

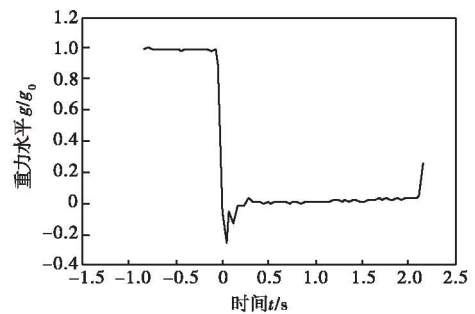
### 1 实验设计

利用高度为 27 m 火灾科学国家重点实验室大空间火灾实验厅,搭建了低重力时间为 2.2 s,失重水平为  $10^{-2} g_0$  的简易落体实验系统.整个系统由落体实验舱、释放系统以及减速回收系统 3 部分组成,见图 1(a).实验系统的重力水平曲线见图 1(b),实验阶段的重力水平在  $10^{-2} g_0$  量级,  $g_0$  为当地重力加速度.

实验过程中,点火、数据采集等关键操作通过无线控制器进行控制.采用电热丝点火方式,使用离线式数据采集器进行数据采集与存储.实验中使用 4 根直径为 0.5 mm 的热电偶对火焰温度进行了测量,考虑到失重后火焰的范围,在燃料试样上方 8 mm 和下方 3 mm 处分别布置了两根热电偶,并且使两根热电偶近似关于试样中心线对称,使其互为参照,以获得较为准确的温度的变化趋势,具体的热电偶布置情况如图 2(b)所示,温度采样频率可在 5 ~ 25 Hz 之间调节,分辨率为  $0.25\text{ }^\circ\text{C}$ ,使用加速度传感器对失重水

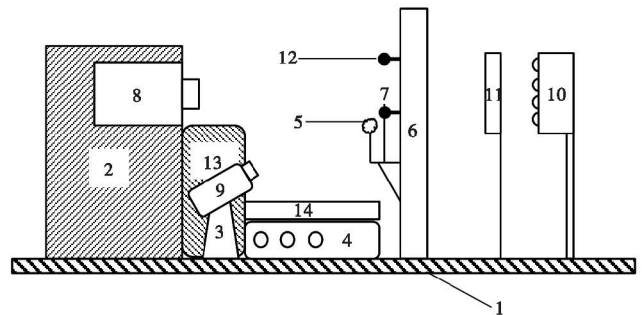


(a) 落体实验系统示意

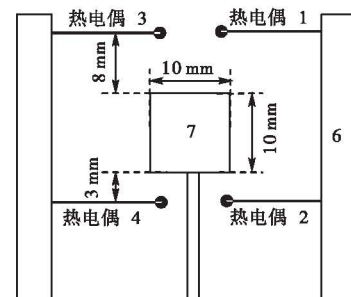


(b) 重力水平曲线

图 1 落体实验系统



(a) 实验基板布局示意



(b) 热电偶布局示意

1—实验基板; 2—海绵填充物; 3—摄像头支架; 4—无线控制器; 5—电热丝线圈; 6—实验支架; 7—固体燃料; 8—摄像机; 9—无线摄像头; 10—背景光源; 11—泡沫薄片; 12—热电偶; 13—数据采集板; 14—电源控制板

图 2 实验基板设备布置情况示意

平进行测量,采样频率为 25 Hz. 使用 30 帧/s 的摄像机对实验过程进行记录,并使用无线监控器对实验过程进行实时监测,实验设备布置情况如图 2 所示. 摄像机焦距为 7.27 mm,采用近景模式,对焦范围 14 cm,快门 1 ~ 1/8 000 s,图像像素为 1 280 × 720,在图像中添加标尺,计算相应的比例尺,在实验区域内,比例尺基本为常数,实验中取像素对应长度为  $9.24 \times 10^{-2}$  mm. 采用六次甲基四胺 ( $C_6H_{12}N_4$ ) 为燃料,制作块状试样进行实验,试样为边长约 10 mm 的立方体. 试样燃烧时,升华并分解,但不熔融,分解产物为甲烷等可燃气. 为了获得燃料试样的燃烧速率,采用 Canny 边界探测方法对图像进行处理,精确提取燃料块轮廓,如图 3 所示,求得试样投影面积的变化,通过最小二乘法拟合获得燃料燃烧速率.



图 3 Canny 边界探测算法处理结果

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 火焰形态的变化

图 4 为低重力环境中,火焰形态的典型照片(以低重力开始的时间作为 0 时刻). 定义两个描述火焰形态的参考量——火焰高度  $H$  和火焰宽度  $W$ . 火焰高度定义为发光可见火焰的最大高度,火焰宽度定义为火焰根部稳定燃烧区的最大宽度,如图 5 (a) 所示.

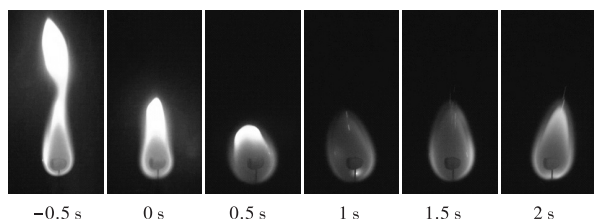


图 4 低重力环境中的火焰形态

随着重力水平的下降,火焰从常重力环境中的湍流火焰,过渡到了低重力条件下平稳的层流燃烧,火焰高度和宽度的变化趋势如图 5 (b) 所示,二者有着不同的变化趋势,但变化过程都存在一个极值点,这种变化过程与两种因素有关,一种是重力水平的变化,另一种是常重力燃烧诱导的空气流动.

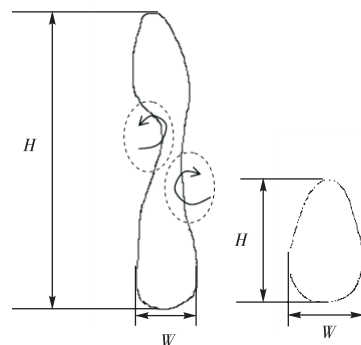
由于空气阻力的存在,实验过程中的残余重力水

平不断增加,火焰高度和宽度与重力水平的关系见图 6 (a),拟合直线为

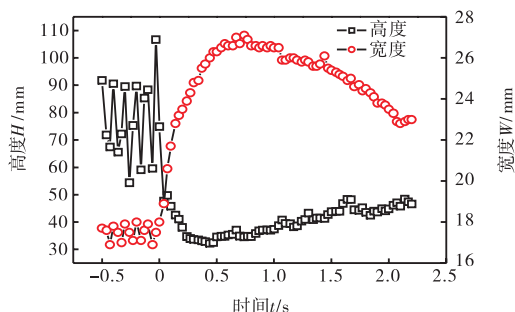
$$H = 34.1 + 414.9g_r / g_0 \quad (0 \leq g_r \leq 0.04g_0) \quad (1)$$

$$W = 26.9 - 88.4g_r / g_0 \quad (0 \leq g_r \leq 0.04g_0) \quad (2)$$

式中:  $H$  为火焰高度, mm;  $W$  为火焰宽度, mm;

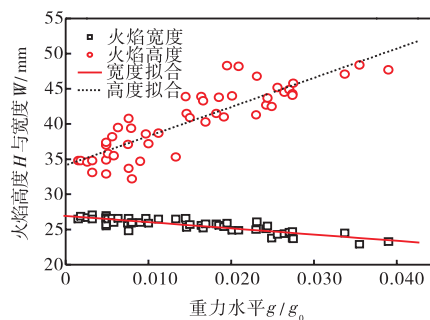


(a) 火焰高度和宽度的定义

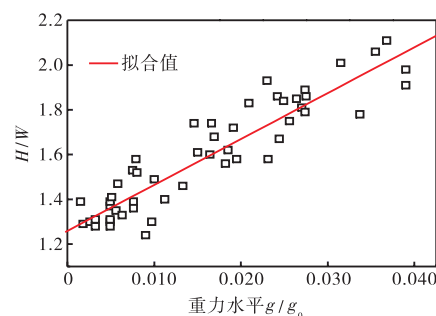


(b)  $H$  和  $W$  的变化

图 5 火焰高度与宽度的变化



(a) 火焰高度和宽度



(b) 火焰高度和宽度的比值

图 6 火焰形态与重力水平的关系

$g_r$  (residual gravity) 为残余重力水平; 火焰高度和宽度拟合结果的皮尔逊相关系数为:  $R_H = 0.871, R_W = -0.853$ . 外推至残余重力水平  $g_r = 0$  时, 火焰高度为 34.1 mm, 而火焰宽度为 26.9 mm, 二者并不相等. 在重力水平为零的理想环境中, 如果忽略固态燃料形状对燃烧的影响, 静止环境中的扩散火焰应该是各向同性的, 即火焰的高度与宽度应该是相当的, 这说明除重力水平变化的作用外, 常重力燃烧诱导空气流动的作用也是存在的. 以火焰高度与火焰根部宽度之比 ( $H/W$ ) 作为无量纲的特征参数进行分析, 无量纲参量  $H/W$  值与重力水平的关系拟合结果为

$$H/W = 1.26 + 20.5g_r/g_0 \quad (0 \leq g_r \leq 0.04g_0) \quad (3)$$

拟合结果的皮尔逊相关系数为  $R_{H/W} = 0.887$ , 当外推到残余重力完全消失时,  $H/W$  为 1.26, 这反映出在空气流动的作用下, 实验结果与理想情况的偏差, 可以作为空气流动对燃烧影响程度的度量, 这种流动是常重力燃烧时浮力驱动自然对流的残余运动, 所以主要以向上流动为主.

Chen 等<sup>[12]</sup>测量了自然对流火焰的特征速度为 0.8 m/s. 常重力状态下的湍流火焰卷吸周围的空气, 自然对流驱动流动的特征速度为

$$U = (g\beta L\Delta T)^{1/2} \quad (4)$$

式中:  $L$  是火焰的特征尺寸, 这里将火焰根部宽度  $W$  作为特征尺寸;  $g$  为重力加速度;  $\beta$  为火焰气体的热膨胀系数;  $\Delta T$  是相对于周围环境的特征火焰温度增量. 计算得到特征速度为 0.4 m/s, 所以, 在低重力实验过程中, 流场的特征速度量级为  $10^{-1}$  m/s. 为了进一步分析流场特征, 使用 FDS 进行了直接数值模拟, 由于重点关注流场特征, 主要参数如燃烧速率、重力水平等的设置采用实测数据. 结果表明, 常重力燃烧时, 火羽流中心线的流动速度最大, 大于估计的特征速度  $10^{-1}$  m/s 量级, 而火焰周围流场的速度一般小于 1 m/s, 符合之前的分析. 失重阶段开始后, 常重力燃烧时形成的涡旋开始扩散, 燃料试样上方的流场形成大的涡旋, 燃料试样附近流场较为稳定, 特征速度为  $10^{-1}$  m/s 量级, 燃料试样附近空气以向上流动为主, 与前人的研究和量纲分析结果相一致, 见图 7. 在残余自然对流流场和残余重力作用下, 火焰的形态偏离球状对称结构, 但已经从湍流火焰过渡到平稳的层流火焰.

### 2.2 火焰亮度及温度变化

为了便于分析火焰亮度变化情况, 这里采用火焰发光区域平均亮度作为火焰的特征亮度值, 通过图像处理来实现, 即火焰区域内对应像素点亮度之和与火

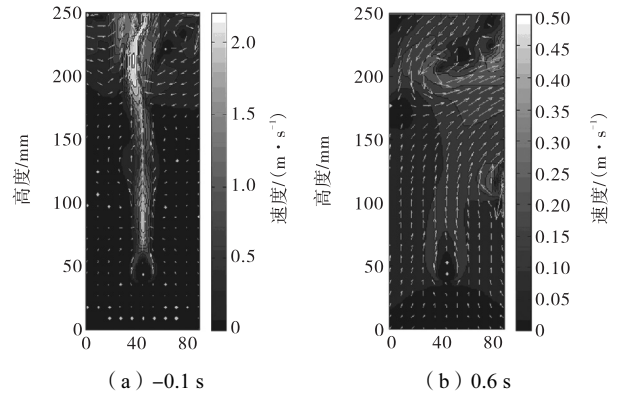


图 7 火焰周围流场模拟结果

焰区域总像素的比值. 具体形式为

$$\overline{Lu} = \frac{\iint Lu(x,y) dx dy}{S} \approx \frac{\sum_{i=1}^M Lu_i}{M} \quad (5)$$

式中:  $\overline{Lu}$  为火焰区域的平均亮度 (average luminance);  $Lu(x,y)$  为局部亮度;  $S$  为火焰区域的总面积;  $Lu_i$  为火焰图形中第  $i$  个像素点对应的亮度值;  $M$  为火焰区域的总像素. 选取特征亮度的最大值作为参考量, 将亮度值做归一化处理, 即

$$Lu_{norm}(t) = \frac{\overline{Lu}(t)}{\max(Lu(t))} \quad (6)$$

火焰亮度的变化如图 8 所示. 实验开始后, 重力水平急剧下降, 火焰的亮度值随重力水平的下降而降低, 整体的变化趋势与高度的变化相似. 同时, 从实验开始阶段的变化中, 可以看出火焰亮度与火焰高度相比, 对重力水平变化的响应要慢.

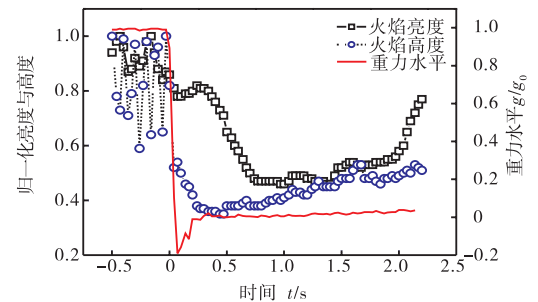


图 8 火焰归一化亮度与高度曲线

在燃料试样周围典型位置处 (具体参见图 2) 采用热电偶测得的火焰温度变化情况如图 9 所示, 可以看出对称位置上的测温点具有相似的变化趋势. 实验开始后, 上方两个测量点的温度并没有马上下降, 而是先出现了小幅上升的过程, 这是由于进入低重力状态后, 浮力作用减小, 热解的可燃气体未被卷掠到上方, 而是堆积在燃料试样周围继续反应, 进入低重力状态后, 输运方式以扩散作用为主, 随着燃气的消耗, 化学反应速率降低, 温度随之降低. 试样上方测

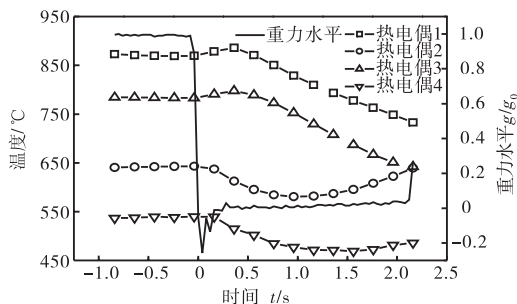


图 9 火焰温度变化曲线

温点处的温度开始下降,燃料试样下部测温点的温度在后期(1.5 s 以后)出现了回升现象,与火焰亮度的变化趋势相似. 这种现象同样与重力水平变化和实验舱内空气流动这两种作用有关. 实验过程中,重力水平并没有发生明显的突变,并且从失重过程开始阶段来看,火焰形态对重力水平的响应更快,但是在低重力的最后阶段,亮度和温度的变化却比火焰形态变化剧烈,所以重力水平的变化并不是使温度回升的主要因素,而空气流动应该在这种变化中起主导作用. 火焰附近流场的特征速度为  $10^{-1}$  m/s 量级,流动增强了火焰逆风侧的输运过程,使反应速率增大,火焰温度升高. Jiang 等<sup>[6]</sup>对弱受迫对流作用下的固体表面火蔓延进行了数值模拟研究,结果表明,在  $10^{-1}$  m/s 的弱受迫对流作用下,微重力环境中逆风火焰支比顺风火焰支蔓延速度更快,逆风侧气相中燃料和氧化剂的混合过程增强,火焰温度的升高是导致这一独特现象的重要原因.

亮度的增强表明火焰中炭黑(soot)生成量增大,火焰辐射增强. 通过以上分析可以看出,这种低速流场会影响低重力环境中的化学反应速率,进而对火焰温度和亮度等燃烧特性产生较大影响. 受迫对流普遍存在于各种载人航天器中,这就使低重力环境燃烧过程更为复杂,导致存在空气流动的低重力环境中的火灾危险性增强.

### 2.3 燃烧速率的变化

实验中采用易升华固体块状试样进行实验,其燃烧过程与液滴相似. 对于液滴燃烧,定义燃烧速率为

$$K = -\frac{d}{dt}(d^2) \quad (7)$$

由于燃料试样投影面积  $S \propto d^2$ , 这里采用投影面积的变化作为衡量燃烧速率的特征量,即

$$K = -\frac{dS}{dt} \quad (8)$$

为了排除支撑杆与燃料块接触处的影响,计算加入了接触部分固定长度的支撑杆投影面积. 实验开始前 2 s 开始计算试样的投影面积,低重力的计算从

失重 0.3 s 后的稳定阶段开始,计算结果如图 10 所示. 采用最小二乘法拟合计算试样的燃烧速率,常重力环境中燃烧的拟合结果为

$$S = 109.04 - 0.57t \quad (-2 \text{ s} \leq t \leq 0 \text{ s}) \quad (9)$$

低重力环境中燃烧的拟合结果为

$$S = 109.04 - 0.13t \quad (0.3 \text{ s} \leq t \leq 2.2 \text{ s}) \quad (10)$$

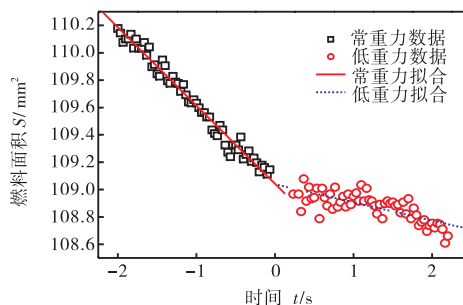


图 10 燃烧速率的变化

常重力和低重力拟合结果的皮尔逊相关系数分别为  $R_n = -0.99$ ,  $R_l = -0.75$ . 可以看出,低重力环境中的平均燃烧速率要低于常重力. 拟合结果的相关系数表明,在低重力阶段燃料试样投影面积的变化偏离了线性,由于燃烧速率  $K \propto Re^{1/2}$ , 试样燃烧速率的变化与舱内残余空气流动作用有密切关系. 从图 10 中也可以看出,燃烧速率有增大的趋势,在 1.5 ~ 2.2 s 时间段中的燃烧速率比较大,这是与温度和亮度的变化一致的.

由于重力的改变,火焰周围空气的流动状态改变,火焰形态结构随之发生了变化,随着重力水平的降低,火焰面内侧燃料试样热解出的可燃气体和外侧氧化剂的输运混合过程主要依赖扩散作用,氧化剂向反应区的输运强度减弱,导致燃料试样附近火焰面向外移动,火焰形态的变化使得火焰内部的浓度和温度梯度有所降低,并且低重力环境中燃烧产物在反应区停留时间增加,使得反应速率减小,温度下降,火焰亮度减弱,最终导致了燃烧速率的降低. 但是由于常重力燃烧诱导空气流动的存在,增强了空气向反应区的输运过程,使温度和燃烧速率都有所增加,可见在低重力环境中的燃烧过程对流场的影响比较敏感.

## 3 结 论

(1) 随着重力水平的下降,火焰从湍流火焰过渡为层流火焰,火焰高度迅速下降,火焰根部宽度增大. 残余重力水平的增大会使火焰高度增加、根部宽度减小,低重力环境中火焰形态易受空气流动影响.

(2) 低重力环境中的火焰温度、燃烧速率比较低,由于炭黑的生成量减少,火焰的亮度明显降低. 空气流动对低重力环境中火焰的温度有显著影响,使逆风侧温度迅速升高,平均亮度增大,由于燃烧速率  $K \propto Re^{1/2}$ ,同时也使燃烧速率有所增加.

(3) 实验中流场的特征速度为  $10^{-1}$  m/s 量级,低重力环境中的流场会影响逆风侧燃料与氧化剂的混合过程,进而对火焰温度、亮度及燃烧速率等燃烧特性产生较大影响,受迫对流普遍存在于各种载人航天器中,可能会导致低重力环境中的火灾危险性和破坏性增强.

#### 参考文献:

- [1] 张夏. 载人航天器火灾安全研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 100-115.  
Zhang Xia. Research on microgravity combustion[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(1): 100-115(in Chinese).
- [2] Law C K, Faeth G M. Opportunities and challenges of combustion in microgravity[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1994, 20(1): 65-113.
- [3] Okai K, Tsue M, Kono M, et al. An experimental study of microgravity combustion of a droplet near a wall[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133: 169-172.
- [4] Wang S F, Zhang H, Jarosinski J, et al. Laminar burning velocities and Markstein lengths of premixed methane/air flames near the lean flammability limit in microgravity[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(4): 667-675.
- [5] Kong Wenjun, Liu Fengshan. Numerical study of the effects of gravity on soot formation in laminar coflow methane/air diffusion flames under different air stream velocities[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2009, 13(6): 993-1023.
- [6] Jiang Xi, Fan Weicheng. Numerical prediction of flame spread over solid combustibles in a microgravity environment [J]. *Fire Safety Journal*, 1995, 24(3): 279-298.
- [7] 孔文俊, 王宝瑞, 劳世奇, 等. 卫星搭载导线着火前期特性实验研究[J]. 空间科学学报, 2008, 28(1): 28-32.  
Kong Wenjun, Wang Baorui, Lao Shiqi, et al. Study on fire initiation of wire insulation on board the satellite[J]. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(1): 28-32(in Chinese).
- [8] 王双峰, 尹永利. 卫星搭载聚氨酯泡沫闷烧实验[J]. 空间科学学报, 2008, 28(1): 22-27.  
Wang Shuangfeng, Yin Yongli. Microgravity smoldering combustion experiments aboard the China recoverable satellite SJ-8[J]. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(1): 22-27(in Chinese).
- [9] 邓名华, 范维澄, 廖光焯, 等. 微重力下燃烧温度随重力变化实验数据处理的一种方法[J]. 火灾科学, 2000, 9(4): 66-70.  
Deng Minghua, Fan Weicheng, Liao Guangxuan, et al. A method to process the experimental data of combustion temperature versus gravity in microgravity[J]. *Fire Safety Science*, 2000, 9(4): 66-70(in Chinese).
- [10] 杜文峰, 华泳. 差分干涉法测量微重力环境蜡烛火焰的温度[J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(2): 129-132.  
Du Wenfeng, Hua Yong. Candle flame temperature measurement in microgravity by differential interferometry[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2000, 6(2): 129-132(in Chinese).
- [11] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [12] Chen L D, Seaba J P, Roquemore W M, et al. Buoyant diffusion flames[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1989, 22(1): 677-684.