

低压低速流动环境中固体材料的着火特性

张凯^{1,2} 朱凤² 王双峰^{1,2}

1(中国科学院力学研究所 微重力重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 工程科学学院 北京 100049)

摘要 固体材料的着火特性显著受到环境压力、气流速度的影响，微重力、低压、低速流动条件下的固体材料着火特性对于载人航天器材料筛选和火灾预防具有重要意义。利用窄通道实验系统和变压力实验舱，对微重力下聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)平板的着火特性进行模拟实验研究，主要实验参数为环境压力和气流速度。实验发现，压力和气流速度的乘积可作为组合参数，共同影响着火延迟特性，当二者乘积小于临界值时，着火延迟时间随其增加而减小，反之增加。低速流动环境条件，环境压力对材料着火的影响可以分为两个区域：材料表面对流热损失控制区和气相化学反应控制区。在对流热损失控制区，降低压力会使着火延迟时间和临界热解速率增加，在气相化学反应控制区，变化规律与前者相反。将压力的影响等效为环境氧气浓度变化，建立了不同环境条件下的临界热解速率和着火延迟时间预测模型，该模型测结果与实验结果误差小于±20%。

关键词 着火，临界质量流量，低速流动，低压，微重力，窄通道

中图分类号 TK16

Ignition Characteristics of Solid Materials in Sub-atmospheric Environments with Low-Velocity Flow

ZHANG Kai^{1,2} ZHU Feng¹ WANG Shuangfeng^{1,2}

1 (Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2 (School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

The ignition characteristics of solid materials are significantly influenced by ambient pressure and airflow velocity. Understanding the ignition characteristics of solid materials under microgravity, low-pressure, and low-velocity flow conditions is of great significance for material selection and fire prevention in manned spacecraft. Using a narrow-channel experimental system and a variable-pressure test chamber, simulated experimental studies were conducted on the ignition characteristics of polymethyl methacrylate (PMMA) plates under microgravity conditions, with ambient pressure and airflow velocity as the primary experimental parameters. It was observed that, under low-pressure and low-flow-velocity conditions, prolonged flash occurred above the material surface prior to ignition; the lower the pressure or flow velocity, the longer the flash lasted, ultimately preventing stable ignition. The experiments revealed that the product of pressure and airflow velocity can serve as a combined parameter that jointly

influences ignition delay characteristics. When this product is below a critical value, the ignition delay time decreases as the product increases; conversely, it increases as the product rises. Under low-velocity flow conditions, the effect of ambient pressure on material ignition can be divided into two regions: the convective heat loss control zone at the material surface and the gas-phase chemical reaction control zone. In the convective heat loss control zone, lowering the pressure increases the ignition delay time and the critical pyrolysis rate; in the gas-phase chemical reaction control zone, the trend is the opposite of the former. By equating the effect of pressure to changes in ambient oxygen concentration, a predictive model for the critical pyrolysis rate under different environmental conditions was established using the transfer number theory. Furthermore, using the predicted critical pyrolysis rate as the ignition criterion, a one-dimensional ignition delay time prediction model was developed. This model only needs to consider simple solid-phase heat transfer and pyrolysis, and the discrepancy between its results and experimental data is less than $\pm 20\%$.

Key words Ignition, Critical mass flux, Low-velocity flow, Sub-atmosphere, Microgravity, Narrow-channel apparatus

0. 引言

固体材料的着火特性受到多种环境因素的影响,如氧气浓度、气流速度、环境压力和重力水平等。载人航天器内部的环境与地面条件显著不同,微重力下固体材料的着火特性一直是防火安全关注的重点^[1]。为了降低舱体应力疲劳,同时减少航天员舱外活动的减压病风险和出舱准备时间,未来航天器内的气压将设计成低于标准大气压力,例如美国国家航空航天局(NASA)在新一代的航天器中采用的压力范围是 55~70 kPa^[2],在中国的载人探月工程中,建议月球着陆停留阶段保持 58 ± 4 kPa,登月服优先选用 40 kPa 的纯氧环境^[3]。此外,由于重力的缺失,航天器内部没有或只有极弱的自然对流,舱内的气流主要是由通风系统引发的低速强迫流动,气流速度在 10 cm/s 左右,远低于常重力环境中的自然对流速度(~ 20 cm/s)。这种低压、低流速的气体环境一方面会减小材料表面的散热效率,有利于材料升温到热解温度,另一方面,较低的压力可能会限制燃烧化学反应速率,这两种作用相互竞争,显著影响材料的着火特性,其详细的作用机理值得探究。

在自然对流条件下,对木材开展的自燃实验结果表明,与标准大气压力下的木材着火相比,低压下木材自燃的延迟时间大幅缩短^[4]。对有值班点火的情况下,对 PMMA 开展的实验结果表明,低压和高氧气浓度均会使得着火延迟时间减少^[5]。对航空航天材料进行的进一步实验确定了材料的可燃极限压力边界,即在氧气浓度为 99.8%的环境中,着火后火焰自熄灭的极限压力在 2.7-6.2 kPa 之间^[6],导致这些变化趋势的控制机制目前尚不清晰。在有值班点火的情况下,材料的着火特性与材料表面的热解气体的质量流量有关^[7],已有研究认为随着压力的降低,着火延迟时间缩短主要由于两个方面的原因:一是对流传热系数减小,导致固体材料表面向环境的热损失降低,从而加快了固体材料的加热过程;二是燃料表面产生可燃混合物所需的质量流量减少,从而在点火器附近更容易形成可燃混合物^[8,9]。Fereses 等^[10]对低压环境下的 PMMA 着火实验研究结果证实了上述猜测,并且指出由于氧气浓度降低,边界层厚度增加,燃料组分分布变厚,在低压条件下,达到着火极限所需的热解气体的质量流量更低。McAllister 等^[9]的研究表明在存在强迫对流的环境下,随着压力的降低,材料的

着火延迟时间先减小,达到最小值,然后增加,直至不能着火,并将材料着火随压力的变化划分为三种控制机制:(1)传输控制区域,着火延迟由对流热损失的变化以及着火所需的临界质量通量控制;(2)化学动力学控制区域,着火延迟由气相化学动力学所控制;以及(3)二者的重叠区域,在该区域中,传输效应和化学效应同时出现。对常压条件下微重力低速流动环境中的固体材料着火特性的研究表明,随着气流速度的降低,着火延迟时间呈现非单调的变化,即着火延迟时间先减小,达到最小值,然后增加,直至不能着火。由于难以获得长时间的微重力环境,微重力对材料着火特性的影响还没有被充分地研究,常压条件下抛物线飞机实验的结果表明微重力环境中固体材料的着火延迟时间缩短^[11]。Zhang 等^[12]的数值模拟结果表明,微重力环境下随着气流速度减小,着火延迟实验先减少后增加,在靠近着火极限条件时,热解气体与氧化剂的混合过程对着火起主导作用。与常压低速流动环境相比,低压低速环境中,对流热损失更低,固体材料热解获得的热量增加,热解速率增加,但是较弱的对流也使得热解气体与氧化剂的混合速率更低,二者的竞争作用使得固体材料的着火过程变得复杂。目前地面条件下压力影响的研究集中在浮力对流环境以及浮力对流和较高的气流速度($\geq 30 \text{ cm/s}$)共同作用下的着火特性,对于低速条件下压力的影响规律尚不明确,而这种条件下的着火特性直接关系载人航天器防火和材料的筛选。

本文利用窄通道实验系统抑制浮力流动,利用密封实验舱提供低压环境,二者结合对低压低速流动中的固体材料着火特性开展研究,实验参数为气流速度和环境压力,考察着火延迟时间、着火临界热解速率等着火关键参数随压力的变化规律,建立低压低速流动环境固体材料着火特性预测模型,分析低压低速流动环境固体材料的着火特性。需要指出的是,窄通道作为模拟微重力燃烧的实验方法,已被不同研究者用于固体材料燃烧特性的研究^[13-19]。

1. 实验设置

固体材料着火实验在一个密封的实验舱内进行,实验舱的结构和组成见文献^[20-22],为了论文的完整性,此处做简要介绍。实验舱为圆柱形,内部直径 600 mm,长 920 mm,容积约 260 L,在圆柱形舱体的一侧底面配备有气体与电气信号接口,以实现舱内外的气体与信号的交换,侧面安装有 SiO_2 玻璃窗口用于观察,窗口直径为 100 mm。实验舱内的压力在 7 kPa-100 kPa 之间变化,并通过压力传感器进行监测。在本文的研究中,使用空气作为环境气体。

在密封舱内按照强迫流动点火与传播测试 (Forced-flow Ignition and Spread Test, FIST) 方法来进行低强迫流动速度下的着火实验^[23]。实验装置的结构如图 1 所示,该装置在流动方向有一个长 460 mm,宽 200 mm 通道,使用空气压缩机为通道供应气体,在通道的上游设有纱布、蜂窝板,以保证实验段气流均匀。实验段长 164 mm,通道高度为 10 mm,以抑制浮力对流。通道上方放置辐射加热器,产生 $0\sim 12 \text{ kW/m}^2$ 的辐射热流密度用以加热试样。在试样下游 10 mm 处放置电热丝点火器(镍铬合金),当试样表面温度接近热解温度时,电热丝加电进行引导点火,所有实验中的电热丝温度均保持在为 800°C 左右。

实验初始阶段,先将舱体内的气体抽出至压力降低到设定的压力值。实验中通过密封舱的气体接口为通道提供气体流动,通道内的气体流动速度由质量流量计控制。由于实验过程中持续向密封舱内输入气体,为了保证舱内压力的稳定,使用压力传感器来实时监测舱内的压力,利用可编程逻辑控制器(PLC)控制舱体排气通道的电磁阀门的关闭和开启,当密封

舱内压力比实验设定的压力值大 0.3 kPa 时，自动打开排气电磁阀排出舱内气体。

本研究使用的试样为黑色 PMMA 方形平板，宽度为 50 mm，厚度为 12.7 mm。试样放置在由防火隔热材料制成的试样架中，并且上表面与通道的下表面齐平。试样架放置在电子天平（Sartorius SQP，分辨率 1 mg）上，以测量实验过程中材料的质量。

在所有实验中，使用的辐射热流密度为 10 kW/m^2 。在两个固定的低强迫流动速度下开展了实验，分别是 5 cm/s 和 10 cm/s，实验中压力范围是从常压（101 kPa）开始，逐渐降低直到不能发生着火的压力。点火延迟时间定义为施加辐射热流量开始直至材料着火所需的时间。在同一实验条件下，实验重复进行 3~5 次。

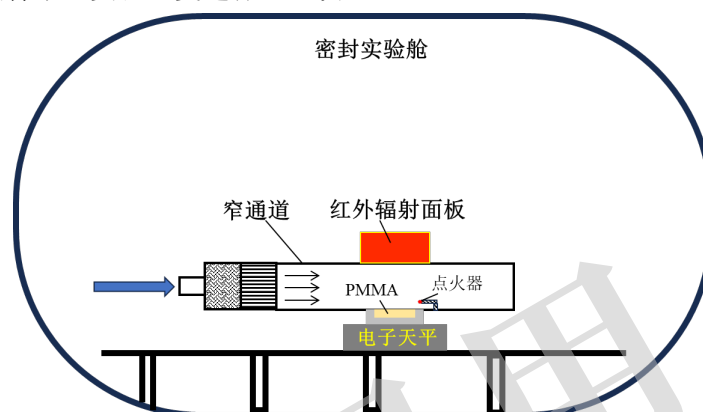


图 1 实验装置示意图

Figure 1: Schematic diagram of the experimental setup

2. 结果分析与讨论

2.1 低压环境中的固体材料着火

随着环境压力的降低，着火后的火焰特征发生显著变化。图 2 展示了强迫气流速度为 10 cm/s 条件不同压力时的火焰图像。可以看到，随着压力的降低，火焰蓝色部分增加，黄色部分减少，火焰驻离距离增加。低压下的火焰与微重力环境中的火焰^[24]类似，这可能是由于环境压力降低减小了浮力对流。需要指出的是，在 10 cm/s 的气流速度下，当环境压力低于 65 kPa 时，着火过程中火焰出现持续的闪燃现象，并且随着压力的降低，闪燃时间增加。在 $V_g = 5 \text{ cm/s}$ 时，实验的所有压力范围内，均出现火焰闪烁现象。火焰闪烁现象是靠近极限条件时出现的一种特殊的现象，在微重力低速流动环境^[11,12]、具有高速流动的低压环境^[9]中均观察到火焰的闪烁现象。在 $V_g = 10 \text{ cm/s}$ 和 5 cm/s 条件下，对应的着火极限压力分别为 55 kPa 和 85 kPa。

图 3 给出了强迫气流速度 10 cm/s 下不同压力实验中试样质量损失随时间的变化。在加热过程中，不同压力下试样的质量损失曲线没有显著差异，直到试样上方发生燃烧反应后，由于热释放速率的不同，质量损失曲线才体现出差异，着火前的质量损失受到压力的影响，在环境压力为 55 kPa 时材料的质量损失大约是 75 kPa 下的 10 倍。

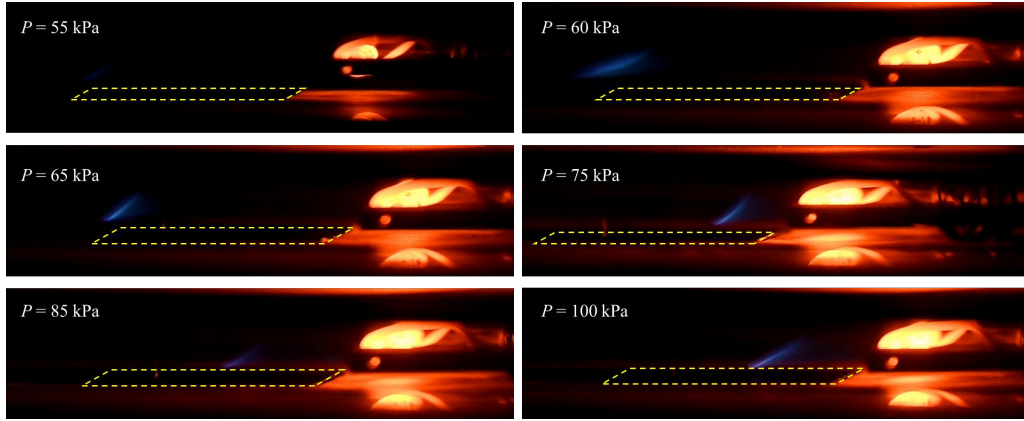


图 2 不同环境压力下着火时刻的火焰 ($V_g = 10 \text{ cm/s}$)

Figure 2: Flames at the moment of ignition under different ambient pressures ($V_g = 10 \text{ cm/s}$)

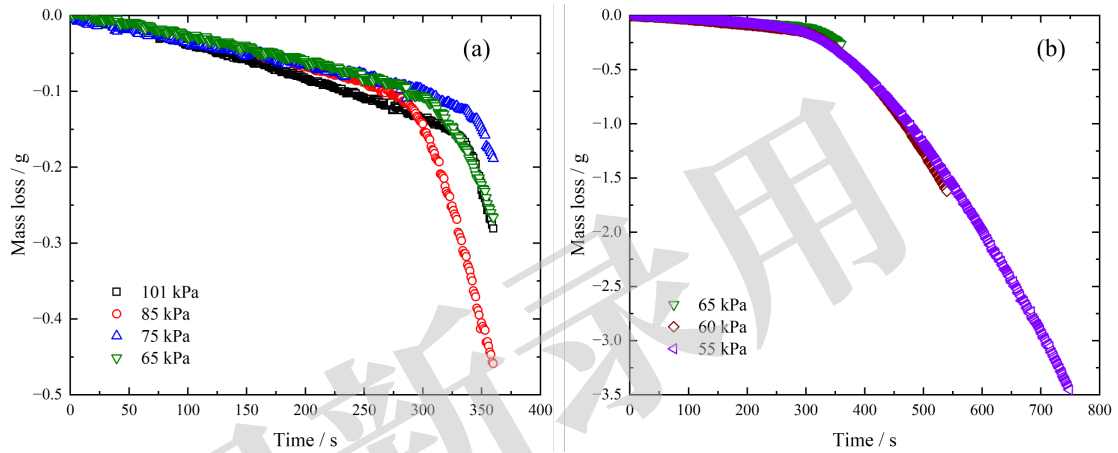


图 3 不同环境压力下的质量损失随时间的变化 ($V_g = 10 \text{ cm/s}$)

Figure 3: Changes in mass loss over time under different ambient pressures ($V_g = 10 \text{ cm/s}$)

2.2 着火延迟时间

根据每次实验中着火过程的记录图像,可以准确获得辐射热流量施加到材料着火的过程,进而计算材料的着火延迟时间。对于所有的实验,均定义火焰锚定在材料表面的时刻为着火时刻。图 4 是两种强迫流动速度条件下着火延迟时间随压力的变化,为多次实验的算数平均结果。在本文研究的压力范围内,气流速度减小时,着火延迟时间随着压力变化的曲线整体上移,即在同一压力下着火延迟时间增加。在 $V_g = 10 \text{ cm/s}$ 时,着火延迟时间随着压力的增加先迅速减少,压力大于 65 kPa 后,继续增加环境压力,着火延迟时间随压力的升高几乎保持不变。 $V_g = 5 \text{ cm/s}$ 时,降低压力总是引起着火延迟时间的增加。

在实验所涵盖的气体条件范围内,在强迫流动速度为 5 cm/s 的全部压力条件下,以及在强迫流动速度为 10 cm/s 的实验系列中环境压力低于 65 kPa 的工况下,均观测到试样着火前存在长时间的火焰闪燃现象,且环境压力越低,闪烁现象的持续时间越长。需要指出的是,在着火边界附近,闪燃现象的出现呈现出一定的随机性。在接近火焰熄灭极限时,由于热损失和反应性等因素的复杂相互作用,火焰熄灭机制和不稳定的火焰动力学表现出随机行为^[25]。如图 4 所示,在强迫流动速度为 10 cm/s、环境压力为 65 kPa 的工况下,图中给出了两个数据点,其原因在于该条件下三次重复实验中着火过程存在差异,试样并非在所有实验中均在着火前经历闪燃阶段。因此,根据是否存在闪燃现象对实验结果进行了分类绘制。此外,

在存在闪燃过程的工况中，相同实验条件下着火延迟时间也存在显著差异，表明在低强迫流动速度和低压环境下，着火过程表现出极强的随机性。在环境压力为 55 kPa 时，工况已接近着火极限，该条件下共开展了 5 次点火实验，仅观察到一次成功着火，其余四次在持续 800 s 的时间内未着火。

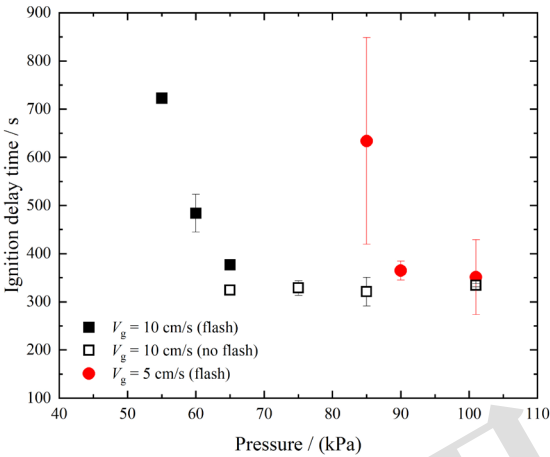


图 4 着火延迟时间随压力的变化

Figure 4: Variation in ignition delay time with pressure

2.3 着火临界条件

临界热解速率是材料在着火时刻的热解速率，是材料着火的判据之一。根据实验中测量的固体材料的质量随时间的变化，计算得到着火时刻的临界热解速率，不同压力下的临界热解速度随压力的变化如图 5 所示。临界热解速率对压力的依赖关系与着火延迟时间基本一致，略有不同的是，在 10 cm/s 的流速下，当压力大于 65 kPa 时，减小压力会导致临界热解速率轻微地下降。

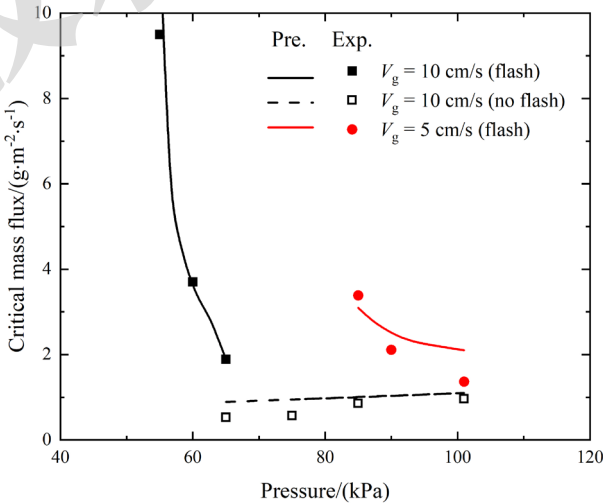


图 5 着火临界质量流量随压力的变化

Figure 5: Variation of the Critical Mass Flow Rate for Ignition with Pressure

Rich 等^[7]通过假设着火点对应一个临界温度，推导得到固体材料着火的临界热解速率的预测公式为：

$$\dot{m}'' = \frac{h}{c_p} \ln(1 + B) \quad (1)$$

其中, B 为传质数

$$B = \frac{Y_{O_2}^\infty (1 - \chi_r) (\Delta H_c / r) - c_p (T_s - T_\infty)}{(1 - \chi_r) \Delta H_c - \left(\frac{r c_p}{Y_{O_2}^\infty} \right) \left(T_s - T_\infty + \left(1 + \frac{Y_{O_2}^\infty}{r} \right) (T_f - T_\infty) \right)} \quad (2)$$

其中 h 为对流换热系数, c_p 为环境气体比热容, $Y_{O_2}^\infty$ 为环境氧气质量分数, χ_r 为辐射分数, r 为化学计量氧气与燃料质量比, ΔH_c 为燃烧热, T_f 、 T_s 和 T_∞ 分别为临界火焰温度、热解温度和初始固体表面温度。对于本文研究的气流速度, $h = (h_{c,n}^3 + h_{c,f}^3)^{1/3}$, 为强迫对流和自然对流的共同作用, 详细的计算方法可以参考文献。由式 (1) 可以看出, 压力与流动速度对临界热解速率的影响体现在对流换热系数 h 上, 无论是自然对流还是强迫流动, 它们对试样表面对流换热系数都可以表示为 $h \sim p^{\frac{1}{2}}$, 压力降低, h 变小, 临界热解速率降低, 也就是说着火时的临界热解速率减小, 这个分析在 $P > 65 \text{ kPa}$ 时适用, 即压力对着火延迟的影响受到对流传热的控制。当 $P < 65 \text{ kPa}$ 时, 着火时刻的临界速率反而增加, 这与 h 的变化出现相反的趋势, 可以推测, 在这个阶段, 存在其它机制控制了着火过程。

固体材料的着火意味着持续地发生燃烧反应, 因此氧气的供应至关重要, 分析发现, 压力、流动速度和氧气体积分数 X_{O_2} 的组合参数可以较好地反应氧气供应的影响。如图 6 所示, 图中还包含了 2 组常压下流动速度为 $0 \sim 40 \text{ cm/s}$ 的窄通道实验数据, 环境氧气体积分数分别为 25% 与 35%, 在 $P \times V_g \times X_{O_2}^2 \approx 0.37$ 的两侧, 着火延迟时间具有相反的变化趋势。在不同的氧气供应条件下, 材料临界热解速率改变^[7]。按照公式 (1) 的预测, 临界热解速率是氧气供应条件的非单调函数, 存在某个最低点, 使得临界热解速率和对应的着火延迟时间在其两侧有相反的变化趋势。

对于本研究的场景, 在氧气体积分数不变时, 可以看出, 当 $P \times V_g = 6.5 \text{ kPa} \cdot \text{m/s}$ 时, 着火延迟时间随压力的变化规律发生转变, 三种气流速度下的着火延迟时间的变化均符合该规律。考虑到在较低的压力下, 着火过程由氧化剂供应控制, 将环境氧气浓度修正为有效氧气浓度

$$Y_{O_2, \text{eff}} = Y_{O_2}^\infty \left(\frac{V_g P}{6.5} \right) \quad (3)$$

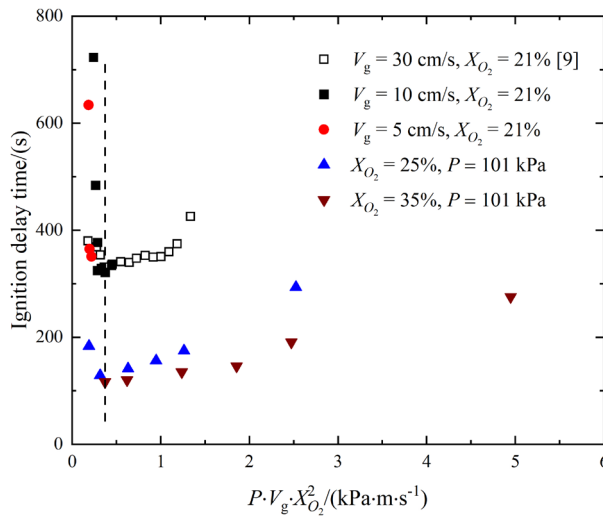


图 6 着火延迟时间随 $P V_g X_{O_2}^2$ 的变化

Figure 6: Ignition delay time as a function of $PVgX_{O_2}^2$

此外，在定量地分析临界质量流量时，必须充分考虑闪烁过程的意义。是否经历闪烁将着火过程分为了两种类型，即，在点火器附近建立火焰和在试样前端建立火焰。对于有闪烁过程的情况，闪烁火焰维持的必要条件是，试样能够为前端的火焰提供足够的质量流量 $\dot{m}_{f,cr}''$ ，见图 7。出于简化考虑，认为扩散的热解气体的轮廓近似圆弧，且边界上的质量流量均匀，那么试样的临界热解速率与火焰燃烧速率的关系为

$$\dot{m}_{p,cr}'' L_p = \dot{m}_{f,cr}'' \pi \left(\frac{L_p}{2} + L_s \right) \quad (4)$$

其中， L_p 是热解表面的长度， L_s 是火焰相对热解区域的前端的距离，与驻离距离相似，可以认为 $L_s \sim \frac{1}{v_g}$ 。式（3）修正过的氧气浓度代入式(1)和（4），计算了不同实验条件下的临界热

解速率并在图 5 中与实验结果进行了比较，使用的参数值在表 1 中。已有研究表明，火焰温度受到流动速度的影响，在气流速度小于 30 cm/s 时，火焰温度随着气流速度的增加而增加^[18, 26]，Rich 等^[7]选取了 1300℃作为特征火焰温度，考虑火焰温度的合理性以及分析结果的连续性，在 10 cm/s 的气流速度下，选取 $T_f = 1300^\circ\text{C}$ ， $\chi_r = 0.29$ ；在 5 cm/s 的气流速度下，选取 $T_f = 900^\circ\text{C}$ ， $\chi_r = 0.26$ 。同时，考虑到闪烁过程会延长试样被加热的时间，增高表面温度，在有闪烁出现的情况下，以 260℃作为特征表面温度，在无闪烁的情况下，以 220℃作为特征表面温度。计算的临界热解速率如图 5 所示，与实验结果具有很好的一致性。

表 1 用于质量流量预测的热物性参数

Table 1: Thermal properties used for mass flow prediction

参数	参数值	单位
c_p	1100	J/kg/K
T_∞	293	K
$Y_{O_2}^\infty$	0.233	
ΔH_c	25.2	MJ/kg
r	1.92	

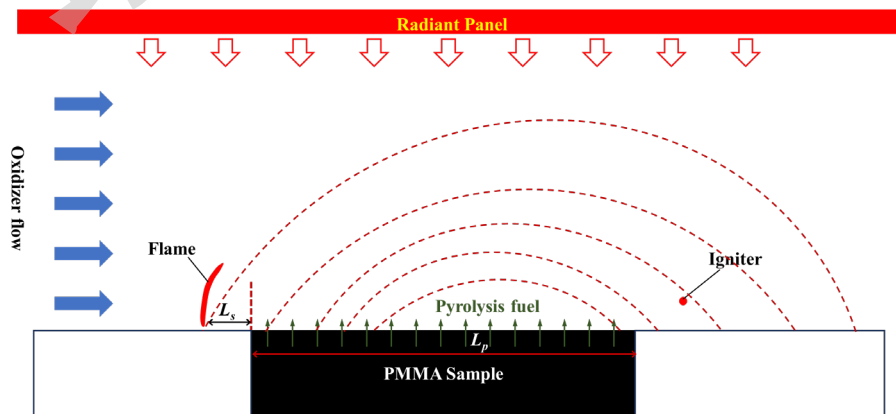


图 7 当具有闪烁过程时，材料热解速率与火焰燃烧速率关系示意

Figure 7: Schematic illustration of the relationship between the pyrolysis rate of a material and the flame combustion rate when a flashing process occurs

以预测的临界热解速率作为着火判据，建立了考虑固体材料内部热传导的一维瞬态着火模型，用于预测材料的着火延迟时间。该模型参考了 Zhou 等^[27]的数值模型，其控制方程是一维的热传导方程

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{m}'''(x) L_v, \quad (5)$$

其中 ρ_s , c_{ps} 和 k_s 分别表示固体材料的密度、比热容和热导率; $\dot{m}'''$ 是单位体积的热解速率; L_v 表示热解潜热。本文在 Zhou 等^[26]的模型基础上, 修改了材料上表面的边界条件, 以应对闪烁火焰带来的额外火焰加热。加热表面($x = 0$)上边界条件为

$$-k_s \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q_e'' - q_{conv}'' - q_{rad}'' + q_f'' \quad (6)$$

q_e'' 为外部辐射热流密度, q_{conv}'' 是对流热损失, q_{rad}'' 是表面的辐射损失, 闪烁火焰的加热 q_f'' , 是时间平均的持续热流, 近似为

$$q_f'' = k_g \frac{T_f - T_s}{\delta_f} \quad (7)$$

k_g 为气体热传导系数, T_f 和 T_s 分别是火焰温度和环境温度, δ_f 是火焰片高度, 近似为层流边界层厚度

$$\delta_f = \frac{5y}{\sqrt{Re_l}} Pr^{-\frac{1}{3}} \quad (8)$$

其中 l 是流动方向的样品长度, Re_l 雷诺数, Pr 是普朗特数。

图 8 给出了实验测量的着火延迟时间和模型预测的着火延迟时间的比较, 同时, 图中给出了数值模拟得到的高热流密度 (16 kW/m^2 和 25 kW/m^2) 下的着火延迟时间和模型的预测结果, 可以看出, 与实验和数值模拟结果相比, 由模型计算出的着火延迟时间与实验非常接近的结果差小于 $\pm 20\%$ 。

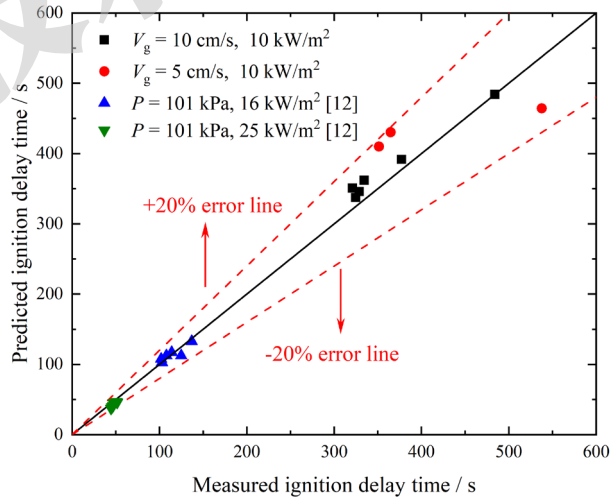


图 8 着火延迟时间的预测值与实验测量值的比较

Figure 8: Comparison of Predicted and Experimentally Measured Ignition Delay Times

3. 结论

针对低压低速强迫流动环境中固体材料的着火特性开展研究, 分析了环境压力对着火延迟时间和着火临界质量流量的影响规律, 并建立着火特性预测模型。主要结论如下:

(1) 低速流动环境中, 随着环境压力的降低, 着火延迟时间先略微减小, 继续降低压力, 着火延迟时间显著增加, 着火临界质量流量随压力的变化与着火延迟时间表现出相同的规律。在固定的气流速度下, 存在着火的极限压力, 在气流速度分别为 10 cm/s 和 5 cm/s 条件下, 对应的着火的极限压力分别为 55 kPa 和 85 kPa。

(2) 压力和气流速度的乘积可作为组合参数, 共同影响着火延迟特性, 当二者乘积小于临界值时, 着火延迟时间随其增加而减小, 反之增加。在本文研究的压力范围内, 环境压力对固体材料着火的影响可以分为两个区域: 材料表面对流热损失控制区和气相化学反应控制区。在对流热损失控制区, 着火延迟时间和临界热解速率均随压力的增加而增加, 在气相化学反应控制区, 二者随压力的增加显著减小。气流速度的大小影响这两个控制区域的范围。

(3) 提出将压力的影响等效为环境氧气浓度的影响, 可对不同压力影响区域的临界热解速率进行预测, 进一步, 以此作为着火临界条件, 考虑闪燃过程对固体加热的影响, 建立了着火延迟时间预测模型, 预测的着火延迟时间与实验测量结果和数值模拟结果误差小于±20%。

参考文献

- [1] ROSS H D. Microgravity Combustion: Fire in Free Fall[M]. San Diego: Academic Press, 2001
- [2] RUFF G, BROOKER J, URBAN D. Fire safety technology development for exploration spacecraft and habitats[C]//40th International Conference on Environmental Systems. Barcelona: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010
- [3] LIU WB, LIU ZX, CHEN JD, PENG YK. Selection of Spacecraft Atmospheric Pressure Regime for Manned Lunar Exploration Mission [J]. Manned Spaceflight. 2016, 22(6): 687-693.
- [4] DAI J K, YANG L Z, ZHOU X D, *et al.* Experimental and modeling study of atmospheric pressure effects on ignition of pine wood at different altitudes[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(1): 609-615
- [5] ZARZECKI M, QUINTIERE J G, LYON R E, *et al.* The effect of pressure and oxygen concentration on the combustion of PMMA[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(8): 1519-1530
- [6] HIRSCH D, WILLIAMS J, HARPER S, *et al.* Pressure flammability thresholds of selected aerospace materials[C]//40th International Conference on Environmental Systems. Barcelona: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010
- [7] RICH D, LAUTENBERGER C, TORERO J L, *et al.* Mass flux of combustible solids at piloted ignition[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 2653-2660
- [8] MCALLISTER S, FERNANDEZ-PELLO C, URBAN D, *et al.* Piloted ignition delay of PMMA in space exploration atmospheres[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2453-2459
- [9] MCALLISTER S, FERNANDEZ-PELLO C, URBAN D, *et al.* The combined effect of pressure and oxygen concentration on piloted ignition of a solid combustible[J]. *Combustion and*

Flame, 2010, **157**(9): 1753-1759

[10] FERERES S, LAUTENBERGER C, FERNANDEZ-PELLO C, *et al.* Mass flux at ignition in reduced pressure environments[J]. *Combustion and Flame*, 2011, **158**(7): 1301-1306

[11] ROSLON M, OLENICK S, WALTHER D, *et al.* Microgravity ignition delay of solid fuels in low-velocity flows[J]. *AIAA Journal*, 2000, **39**(12): 2336-2342

[12] ZHANG K, ZHU F, WANG S F. Numerical study on pilot ignition of a thermally-thick solid fuel with low-velocity airflow in microgravity[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2024, **36**(1): 2

[13] IVANOV A V, BALASHOV Y V, ANDREEVA T V, *et al.* Experimental verification of material flammability in space[R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 1999.

[14] OLSON S L, MILLER F J, JAHANGIRIAN S, *et al.* Flame spread over thin fuels in actual and simulated microgravity conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2009, **156**(6): 1214-1226

[15] ZHANG X, YU Y. Experimental studies on the three-dimensional effects of opposed-flow flame spread over thin solid materials[J]. *Combustion and Flame*, 2011, **158**(6): 1193-1200

[16] ZHU F, WANG S F, LU Z B. A comparative study of near-limit flame spread over a thick solid in space- and ground-based experiments[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2018, **30**(6): 943-949

[17] ZHU F, LU Z B, WANG S F. Flame spread and extinction over a thick solid fuel in low-velocity opposed and concurrent flows[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2016, **28**(2): 87-94

[18] ZHU F, LI S, WANG S F, *et al.* Influence of inert-gas dilution on flame extinction and spread over solid fuel in low velocity oxidizer flows[J]. *Fire Safety Journal*, 2025, **158**: 104548

[19] HOSSAIN S, WICHMAN I S, MILLER F J, *et al.* Opposed flow flame spread over thermally thick solid fuels: Buoyant flow suppression, stretch rate theory, and the regressive burning regime[J]. *Combustion and Flame*, 2020, **219**: 57-69

[20] ZHU F, WANG S F, LU Z B, *et al.* Opposed flame spread over thick solid fuels under influence of sub-atmospheric pressure and low-velocity flow[J]. *Fire Safety Journal*, 2021, **125**: 103430

[21] WU C J, JIANG Y H, LI Y T, *et al.* *B* number for near-limit steady laminar diffusion flames over a solid surface[J]. *Fire Safety Journal*, 2026, **161**: 104647

[22] ZHU Feng, WANG Shuangfeng. Effects of ambient pressure on flame spread over thermally-thick solid material[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2019, **25**(5): 401-407 (朱凤, 王双峰. 环境压力对热厚固体材料表面火焰传播的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2019, **25**(5): 401-407)

[23] CORDOVA J L, WALTHER D C, TORERO J L, *et al.* Oxidizer flow effects on the flammability of solid combustibles[J]. *Combustion Science and Technology*, 2001, **164**(1):

253-278

[24] ZHU F, LU Z B, WANG S F, *et al.* Microgravity diffusion flame spread over a thick solid in step-changed low-velocity opposed flows[J]. *Combustion and Flame*, 2019, **205**: 55-67

[25] MARQUIS D M, NOHRA R, BATIOT B, *et al.* Burning and flame extinction patterns of PMMA under external heating and oxygen deficiency[J]. *Combustion and Flame*, 2024, **269**: 113664

[26] KONNO Y, HASHIMOTO N, FUJITA O. On the radiation extinction of opposed flame spread over curved solid surface in low flow velocity conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2023, **254**: 112836

[27] ZHOU Y Y, WALTHER D C, FERNANDEZ-PELLO A C, *et al.* Theoretical prediction of piloted ignition of polymeric fuels in microgravity at low velocity flows[J]. *Microgravity-Science and Technology*, 2003, **14**(1): 44-50

作者简介



王双峰（通信作者）男，1972 年 2 月出生于河南省郑州市，现为中国科学院力学研究所研究员，博士生导师，主要研究方向为燃烧基础与应用、微重力燃烧、载人航天器防火安全等。

E-mail: sfwang@imech.ac.cn



张凯，男，1998 年 11 月出生于安徽省合肥市，现为中国科学院力学研究所研究生，主要研究方向为微重力环境固体材料燃烧。

E-mail: zhangkai@imech.ac.cn