

## 载人航天器火灾安全研究进展\*

张 夏<sup>†</sup>

中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080

**摘 要** 理论上和实际上, 载人航天器都有发生火灾的可能, 载人航天器的火灾安全问题是微重力燃烧研究的重要内容. 氧气浓度和气流速度对给定固体材料的可燃性具有显著影响, 在固体表面的逆向和同向传播火焰中, 都存在由氧气浓度和气流速度决定的可燃极限, 即气流速度较高时的吹熄和气流速度较低时的冷熄. 极限氧气浓度和极限气流速度两个极限参数, 是衡量材料可燃性的关键指标. 在微重力条件下, 当低速气流存在时, 固体材料发生有焰燃烧和闷烧的可能性都大大增强. 因此, 剔除材料中的潜在燃料是航天器防火的主要措施. 但是, 在航天器使用的材料中, 仅有很少一部分是阻燃的, 为了保证火灾安全, 还必须采取火灾检测和灭火措施. 当前美国和俄罗斯采取的火灾安全方案, 既有相似性, 也有各自的特点. 在载人航天器的火灾安全问题中, 尚有很多问题和方案有待研究或检验. 考虑到我国的实际情况, 作者认为, 通过实验对照和数值模拟的方法, 开展材料在微重力条件下的燃烧特性的常重力模拟, 对于我国载人航天器的火灾安全具有现实意义.

**关键词** 载人航天器, 微重力燃烧, 火焰传播, 火灾安全, 火灾预防, 火灾检测, 灭火措施

## 1 引 言

空间飞行活动需要冒各种风险. 尽管短期飞行中发生火灾的概率不大, 但是航天器内氧气再生系统产生的高浓度氧气环境 (最高氧气浓度可达 30% ~ 40%、广泛应用的非金属材料 (种类可达 400 ~ 500 种, 负荷率可达 10 kg/m<sup>3</sup>) 和大量存在的电气设备使得发生火灾成为可能<sup>[1]</sup>. 而航天器空间狭小、距离遥远、逃逸和营救不便, 封闭的环境又会使得增长期间的放热速度<sup>[2]</sup>显著增大, 因此对长期运行的载人航天器而言火灾安全仍然值得特别重视. 历史上也确实发生过载人航天器火灾事故, 例如: 1961 年, 在苏联载人航天的地面训练中, 高浓度氧气舱内随手扔在电热器上的酒精棉球引起大火, 航天员被严重烧伤, 经抢救无效死亡<sup>[3]</sup>; 1967 年, 美国 Apollo 1 号在发射台上进行登月飞船的地面试验时, 充满纯氧的指令舱, 因导线短路产生的电火花引燃了舱内在正常空气中不易燃烧的塑料制品, 并起火爆炸, 三名航天员遇难<sup>[4]</sup>; 1970 年, 美国 Apollo 13 号进行登月飞行时, 服务舱贮氧箱因电路过载和短路引起爆炸, 导致

舱内许多设备损坏, 指令舱电力、照明、水和氧气的正常供应不能满足, 航天员不得不转移到登月舱, 最终死里逃生<sup>[5]</sup>; 1997 年, 俄罗斯和平号空间站因氧气发生器破裂引起火灾, 火焰长度达到 0.5m, 在大约 1.5 min 后被航天员使用灭火器扑灭<sup>[1,6,7]</sup>; 美国航天飞机的 100 多次飞行任务中, 出现过至少 6 次火灾危险事故<sup>[8]</sup>.

为载人航天器提供火灾安全保障, 一直是推动微重力燃烧研究的主要动力之一<sup>[9]</sup>. 微重力燃烧的研究始于 1956 年<sup>[10]</sup>. 在早期为数不多的微重力燃烧研究中, 1966 年美国利用 KC-135 飞机进行的固体材料的可燃性试验<sup>[11]</sup>, 是最早以航天器火灾安全为背景的研究. Apollo 1 号和 13 号飞船发生火灾事故后, 飞船的火灾安全问题受到重视, 沿热薄燃料表面的火焰传播<sup>[12]</sup>和绝缘电线的燃烧<sup>[13]</sup>等研究相继开展. 1973 年, NASA 组织大量科学家全面评估了在空间进行燃烧实验的物理基础和科学价值, 与航天器火灾安全有关的问题受到重视<sup>[14]</sup>. 次年美国在天空实验室 (Skylab) 中进行的第一个燃烧实验, 就是微重力条件下材料的可燃性及灭火问题<sup>[15]</sup>. 20 世

收稿日期: 2004-05-11, 修回日期: 2004-09-28

\* 中国科学院知识创新工程重要方向 (KJ951-A1-01) 资助项目

<sup>†</sup> E-mail: zhangxia@imech.ac.cn

纪 70 年代末, NASA 组织科学家对 5 个燃烧项目进行了空间实验背景调查、可行性论证和概念设计, 多孔材料闷烧是其中一个<sup>[16]</sup>。欧洲最早的微重力燃烧研究, 也是燃料表面的火焰传播<sup>[17]</sup>。1990 年, 固体表面燃烧实验成为 Skylab 之后的第一个空间燃烧实验<sup>[18]</sup>。这方面的研究还受到俄罗斯<sup>[19]</sup>、日本<sup>[20]</sup>等国家的重视。我国微重力燃烧的研究直到 90 年代才开始起步<sup>[21]</sup>、首先开展的是火灾的数值模拟<sup>[22]</sup>。新建成的中国科学院国家微重力实验室及其 3.5s 落塔, 进一步促进了微重力燃烧与载人航天火灾安全的研究<sup>[23]</sup>。最近我国成功发射并安全返回了神州五号载人飞船, 对火灾安全的研究提出了全新的挑战。

载人航天器的火灾隐患包括电和热的过载、意外泄漏、高能实验失败和垃圾点燃<sup>[24]</sup>。载人航天器的火灾安全方针与地面上的类似, 仍然是预防为主, 消防结合。完整的火灾安全措施包括预防、检测和灭火, 这些措施必须考虑微重力 (mg) 条件下火灾产生、火焰外观、可燃性、传播速度、检测信号等不同于常重力 (ng) 条件下的特点<sup>[25]</sup>, 而理解火焰传播、闷烧及其向明火燃烧转化的机理是火灾安全的基础, 也是预防、检测和控制火灾的前提<sup>[26]</sup>。

本文将首先综述 mg 条件下燃料表面火焰的传播和闷烧, 然后介绍载人航天器的火灾预防、检测和控制措施, 并对照美国和俄罗斯两国的火灾安全方案, 最后对今后需要关注的问题提出一些看法。可以参考火焰传播与闷烧<sup>[27]</sup>、俄罗斯<sup>[1,7]</sup> 和美国<sup>[25,28,29]</sup> 载人航天器火灾安全、微重力燃烧<sup>[30~35]</sup> 方面的综述以及 NASA 提供的最新研究机会<sup>[36]</sup>, 以获得对本领域更全面的了解。

## 2 沿固体表面传播的火焰

与液滴燃烧相似, 沿燃料表面传播的火焰需要加热燃料使其在热解或蒸发后与空气混合燃烧, 因此也是一种扩散火焰, 但因其具有传播性又与静止的气体扩散火焰不同。根据传播方向与空气流动方向是否相同, 火焰传播可以分为逆向传播与同向传播两大类<sup>[37]</sup>。在 ng 下, 伴随燃烧总会出现浮力诱导的流动, 不可能存在真正的静止环境, 由于自然对流总是向上, 因此向上传播的火焰属于同向传播火焰, 而向下传播的火焰属于逆向传播火焰。在静止的 mg 环境中, 由于火焰传播方向指向未反应空气一侧, 因此属于逆向传播火焰在强迫对流速度为零时的极限情况, 在下文中与 mg 做比较的 ng 火焰, 如无明确说明, 均指向下传播火焰。如果不考虑辐射作用, 在同向传播火焰中, 对流和扩散传热与火焰传播方向一致, 这可能会导致被加热的固体面积越来越大, 因此

会产生加速燃烧而非稳态情况<sup>[38]</sup>; 但在逆向传播火焰中, 对流与火焰传播方向相反, 传热机制主要是扩散, 因此火焰传播可能达到稳定状态。在研究中, 纸和有机玻璃 (PMMA) 通常被用作热薄燃料和热厚燃料。

热传递对火焰传播极其重要。对于逆流传播的火焰, 向未燃燃料提供热量的主要机理有气相热传导、固相热传导和气相热辐射, 固相吸收的热量用于表面辐射热损失、向内部传热和增大热焓。根据火焰前缘的简单能量平衡关系, 可以将逆向传播的火焰分为 3 种, 即气相热传导、固相热传导和热辐射控制的火焰。决定火焰传播主要驱动力的标准是气相 - 固相导热比  $C$  和辐射效应的显著程度<sup>[39]</sup>。

$$C = \frac{\lambda_g(T_f - T_v)}{\lambda_s(T_v - T_\infty)} \quad (1)$$

其中  $\lambda_g$  为气相导热系数,  $\lambda_s$  为固相导热系数,  $T_f$  为火焰温度,  $T_v$  为热解温度,  $T_\infty$  为环境温度。

在一般流动条件下, 对于  $C$  较高的材料如纤维素, 气相热传导是火焰传播的主要驱动力。当燃料厚度  $\tau < L_g/C$  时, 燃料为热薄燃料, 内部热传导可以忽略, 火焰传播速度为<sup>[40,41]</sup>

$$V_f = \frac{\pi}{4} \frac{\lambda_g}{\rho_s C_{p,s} \tau} \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \quad (2)$$

其中  $L_g$  为气相特征长度,  $L_g = \alpha_g/V_r$ ,  $\alpha_g$  为气相热扩散率,  $V_r$  为参考速度,  $V_r = V_f + V_g$ ,  $V_f$  为火焰传播速度,  $V_g$  为气流速度,  $\rho_s$  为固相密度,  $C_{p,s}$  为固相比热容。

当燃料厚度  $\tau > L_g/C$  时, 燃料为热厚燃料, 内部热传导不能忽略, 火焰传播速度为<sup>[40]</sup>

$$V_f = \frac{\rho_g C_{p,g} \lambda_g V_r}{\rho_s C_{p,s} \lambda_s} \left( \frac{T_f - T_v}{T_v - T_\infty} \right)^2 \quad (3)$$

其中  $\rho_g$  为气相密度,  $C_{p,g}$  为气相比热容。

对于  $C$  较低的材料如 PMMA, 当  $\tau < CL_s$  时, 材料为热薄燃料, 火焰传播依然受气相控制, 传播速度同式 (2)。当  $\tau > CL_s$  时, 材料为热厚燃料, 火焰传播主要受固相热传导控制, 火焰传播速度为

$$V_f = \frac{\alpha_s}{V_r t_{ch}} \quad (4)$$

其中  $L_s$  为固相特征长度,  $\alpha_s$  为固相热扩散率,  $t_{ch}$  为气相反应时间。这里  $C$  的大小强烈地依赖于环境条件, 因此火焰传播的控制机理不仅仅取决于材料类型。当逆流速度很低时, 辐射在火焰传播中的作用开始变得显著, 这种现象只能在 mg 条件下实现。

### 2.1 静止环境中沿固体表面传播的火焰

一般认为, 燃料在 mg 下的可燃性不高于其在 ng 下的可燃性. 在静止环境中, 对于热薄燃料, 早期的落塔 [12,42,43] 和空间 [15] 实验都表明, 当氧气浓度较低时, mg 下的火焰传播速度低于 ng 下的 (这与预混气体火焰传播的特点不同), 而且降低程度随燃料厚度的增加而增大, 这是因为在近极限区域有限化学反应速度比较重要 [44]; 但是, 当氧气浓度较高时, 火焰传播速度不受重力水平影响, 这与建立在无限快速化学反应速度基础上的热薄燃料火焰传播的热传递理论给出的结果一致, 即式 (2).

无灰擦拭纸 (15 cm × 3 cm × 0.0076 cm) 的落塔燃烧实验结果 [45] 与这种定性结论一致. 如图 1 所示, 对于相同厚度的燃料, mg 下的极限氧气浓度 (能

够维持燃烧的最低氧气浓度) 较 ng 下的高; 在 ng 和 mg 下, 极限氧气浓度均随燃料厚度的增加而增加, 但总的来说, ng 下极限氧气浓度对燃料厚度变化的敏感程度较低, 而 mg 下敏感程度较高. 这是因为在 ng 下, 与火焰传播速度相比, 浮力诱导的对流占主导地位, 因此对于不同厚度的燃料, 火焰的特征相对速度 (火焰传播速度与气流速度的相对值) 差别不大; 而在静止的 mg 环境中, 特征相对速度仅取决于火焰传播速度, 因此对燃料厚度的变化比较敏感. 对无灰滤纸 (11 cm × 3 cm × 0.0165 cm) 的空间实验 [18,46,47] 表明, 燃料在点燃后, 尽管火焰形状发展较慢, 但传播速度几乎立即就达到稳定状态, 这表明控制传播速度的因素为火焰前缘, 而且特征时间较短, 落塔给出的火焰传播速度受非定常的影响不大.

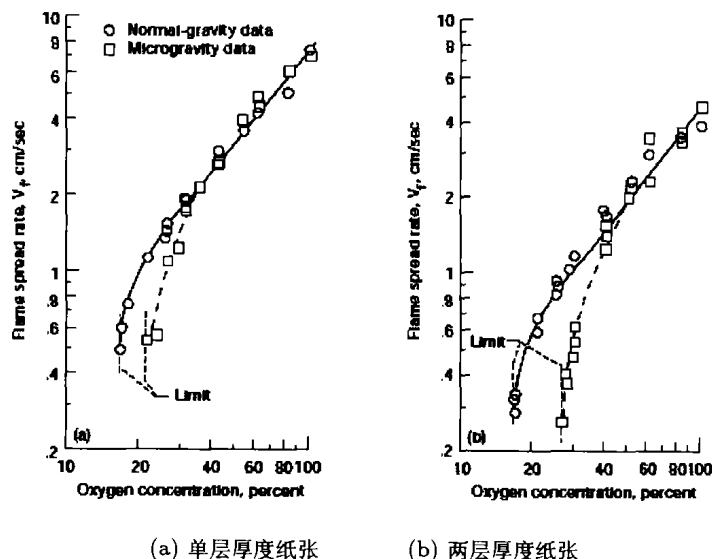


图 1 ng 和 mg 下静止环境中热薄燃料表面火焰传播速度随氧气浓度的变化关系 [45]

空间实验 [48,49] 表明, PMMA 热厚燃料 (59.9/25.4 mm × 6.35 mm × 3.18 mm) (其中燃料长度为 59.9 mm 或 25.4 mm) 在 50%O<sub>2</sub>-50%N<sub>2</sub> 和 70%O<sub>2</sub>-30%N<sub>2</sub> 的静止环境中, 可以产生持续数分钟但传播速度不断减小最终熄灭的非稳态火焰, 这可能是因为过程受扩散控制, 而辐射热损失使得本来与氧气扩散长度相当的温度扩散长度变小, 这两个尺度之间的不匹配随时间扩大, 直到氧气扩散速度不能维持火焰的传播, 最终引起火焰熄灭. 包括气体和燃料表面辐射的二维数值模拟表明 [49], 在 101.3 kPa 的静止环境中, 对于直到纯氧的所有浓度的 O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 混合物, 点燃的 PMMA 都会自己熄灭. 理论分析也表明, 在静止的 mg 环境中, 由于有限化学反应速度和辐射热损失, 当燃料厚度高于某个临界值时火焰将不能稳定传播, 这样便会存在如图 2 所示的随燃料厚度变化的极限氧气浓度 [50].

这些研究还表明, 与 ng 下的相应值相比, 热薄和热厚燃料在静止的 mg 环境中燃烧时, 燃料质量损失率较小, 火焰温度和热释放较低, 碳黑生成较少,

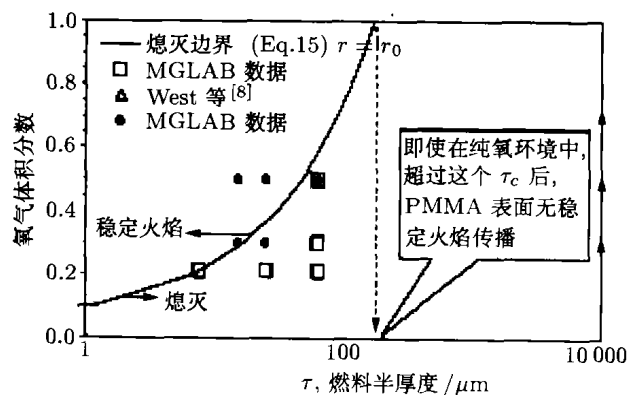


图 2 静止的 mg 环境中 PMMA 燃烧的氧气浓度极限 [50] (实心和空心符号分别代表稳定传播和熄灭)

火焰呈弱蓝光或不发光。值得注意的是,这一结论只对静止环境有效。实际上,载人航天器内总是存在一定程度的空气流动,这会使得 mg 下因为缺乏自然对流而相对较弱的燃烧反应增强。

## 2.2 氧气浓度及气流速度对固体表面火焰传播的影响

对于热薄燃料,如图 1 所示,落塔实验<sup>[45]</sup>表明,随氧气浓度的增加,纸张(15 cm × 3 cm × 0.0076 cm)在静止的 mg 环境中的火焰传播速度显著增大,并与 ng 下向下传播的火焰速度逐渐接近直到相等。不同压强下纸张(11 cm × 3 cm × 0.0165 cm)燃烧的空间实验<sup>[18]</sup>也给出相似的结果,当氧气浓度从 35% 增加到 50% 时,火焰传播速度增大(2~3)倍,燃烧过程中炭黑生成增多,火焰颜色变亮。对于热厚燃料,尽管在静止的 mg 环境中,氧气浓度增大时,火焰仍然不能达到均匀传播状态,但在燃烧的各个阶段,70% 的氧气环境中火焰传播仍然比 50% 的氧气环境中快得多<sup>[48]</sup>。

在热薄燃料的逆向传播火焰中存在可燃极限,图 3 为纸张燃烧时极限氧气浓度与火焰特征相对速度之间的关系<sup>[45]</sup>,同其它类型的 mg 燃烧相似,也存在两种熄灭机理:气流速度较高时的吹熄和气流速度较低时的辐射冷熄。两支熄灭极限的交点对应的氧气浓度为极限氧气浓度,当氧气浓度低于此值时,无论气流速度大小,燃烧都不会发生。低速辐射冷熄极限对应的气流速度为极限气流速度,当气流速度低于此值时,燃烧也不会发生。这两个极限参数不仅具有重要的科学价值,而且对火灾安全具有现实意义,是衡量材料可燃性的关键指标。自然对流对火焰传播的影响与强制对流相似<sup>[51]</sup>。改变重力加速度,可以改变自然对流速度,因此,也存在类似于图 3 的由氧气浓度和重力加速度决定的火焰传播极限:即重力加速度较低时的冷熄极限和重力加速度较高时的吹熄极限<sup>[52~54]</sup>。

从材料性质上看,一般在 mg 下燃烧时可以熔化或无固体残渣产生的材料极限气流速度较低,而有固体残渣产生的材料极限气流速度较高。极限气流速度和气流降低到极限气流速度后燃烧自动熄灭的时间,强烈地依赖于气流的氧气浓度,当氧气浓度从 21% 增大到 40% 时,不同材料的极限气流速度将减小到原来的(5.3%~18%),燃烧自动熄灭的时间也将增加数倍。另外,极限气流速度与 ng 下的极限氧气浓度之间具有一定关联:ng 下极限氧气浓度较低(14%~17%)的材料,极限气流速度也较低(气流含 21%~25% O<sub>2</sub> 时, 0.5~5 cm/s); ng 下极限氧气浓度较高(17%~21%)的材料,极限气流速度也较高

(气流含 21%~25% O<sub>2</sub> 时, 10~28 cm)<sup>[7]</sup>。从火灾安全角度看,希望氧气含量较低;但从航天效率上看,希望氧气含量较高。从火灾特征看,希望航天器舱内无气流,但从载人航天的要求看,必需保持气流通畅。因此,现实的选择是防火与航天要求之间的折衷,其中应该存在最佳选择。

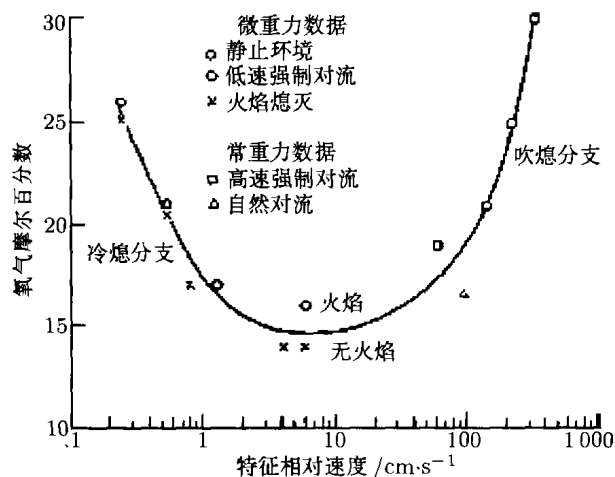


图 3 热薄燃料表面逆向传播火焰的可燃极限<sup>[45]</sup>

值得注意的是,极限氧气浓度对应的气流速度即最容易引起燃烧的速度,大致在 6~10 cm/s 左右,在载人航天器通常使用的气流速度范围内(6~20 cm/s)<sup>[29]</sup>,小于 ng 下浮力诱导的气流速度。也就是说,当低速流动存在时,燃料在 mg 下的燃烧速度可以超过 ng 下向下的燃烧速度。而且,低速流动存在时,mg 下的火焰传播要求的氧气浓度较 ng 下的低,因此 mg 下由极限氧气浓度定义的可燃极限范围较 ng 下的宽。实验表明,当气流速度超过(15~20) cm/s 时,燃料在 mg 下的燃烧强度与 ng 下的相同,而在载人航天器中的设备区,典型的气流速度通常较大,这使得设备引起火灾的风险增大<sup>[6]</sup>。因此,如果没有安全措施,任何材料的燃烧都可能引发火灾。

将氧气浓度扩展后,可以给出如图 4 所示的火焰传播速度随特征相对速度变化的结果<sup>[55]</sup>,在氧气浓度较低时,火焰传播速度随特征相对速度的变化关系分为两个区:低速近冷熄区和高速近吹熄区。在低速近冷熄区,当气流速度增大时,辐射热损失减小,火焰传播速度增大<sup>[56]</sup>;而在高速近吹熄区,当气流速度增大时,火焰传播速度减小,数值模拟的结果与此一致<sup>[57]</sup>。氧气浓度降低达到极限氧气浓度时,火焰传播速度曲线将收缩成一点。而在氧气浓度较高时,在低速近冷熄区和高速近吹熄区之间,还存在中速热控制区,在这个区域火焰温度较高,无限快速化学反应假设成立,火焰传播速度与气流速度无关。显然,低速近冷熄区只能在 mg 下观察到。根据早期 ng 的研究结果,两个无量纲参数:即描述气相动力学效应的

Domkohler 数  $D$  (定义为停留时间与化学反应时间之比), 和描述维持火焰传播的热传递过程的无量纲火焰传播速度  $U$  (即实测传播速度与式 (2) 的比值, 其物理意义为火焰前方固体的焓流与火焰传递给燃料的热流之比) 之间可以成功地关联: 当  $D \leq D_{\min}$  时, 火焰吹熄; 随着  $D$  增大,  $U$  逐渐增大, 直到  $U=1$ <sup>[37]</sup>. 但是, 低速近冷熄区的存在表明, 当  $D$  增大到一定程度时,  $U$  开始减小, 直到  $D > D_{\max}$  时, 火焰熄灭. 可见, 将  $U$  仅仅与  $D$  关联起来是不够的, 因为当  $D \rightarrow \infty$  时, 这种关联总是给出  $U=1$  的结果.

热薄燃料表面温度的变化表明, 在低速近冷熄区, 燃料的预热长度仅仅反映了火焰传播速度 (预热长度随传播速度增大), 而不是逆向气流速度的直接函数. 这与热传导控制的火焰传播不同, 后者的预热长度与逆向气流速度成反比, 但传播速度保持不变. 但是, 燃料的热解长度却随逆向气流速度的减小而增大, 这可能是由于流速降低时氧化性热解变弱引起的<sup>[55]</sup>. 在氧气含量和气流速度极低的情况下, 由于反应较弱、距离较远, 火焰前缘加热燃料的作用受到限制, 燃料开始热解的温度可以低到 525 K, 其他情况下热解发生在 (600 ~ 675) K 之间, 氧气浓度减小时, 热解温度略微升高, 而燃尽温度则一致为 750 K, 但是, 对于氧气浓度和气流速度过低的极弱火焰, 燃料不能燃尽, 存在明显的残留可燃物, 当产物扩散离开、氧气扩散到燃料表面时, 残留物可以发生表面反应<sup>[47,55]</sup>.

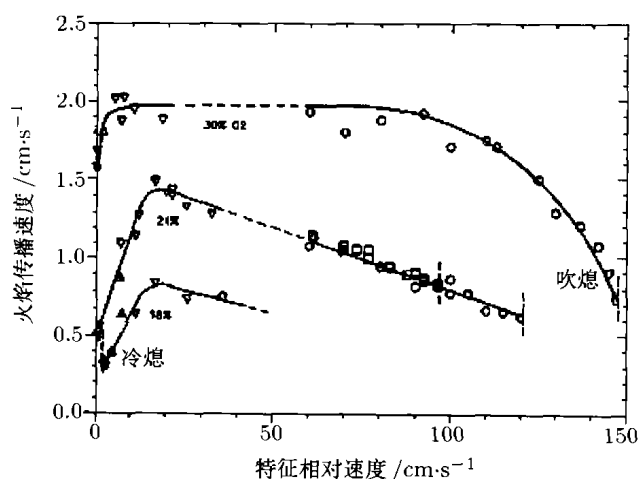


图 4 不同氧气浓度下热薄燃料表面火焰传播速度随特征相对速度的变化<sup>[55]</sup>

与逆向传播火焰相比, 同向传播火焰的研究较少. 在擦拭纸 (10 cm × 4.9 cm, 2.00 mg/cm<sup>2</sup>) 的落塔燃烧实验 (气流速度 < 5.29 cm/s, 氧气浓度 < 30%) 中, 由于微重力时间过短没有观察到稳定传播的同向火焰<sup>[58]</sup>. 无灰滤纸的小型空间实验 (实验段尺寸为 7 cm × 10 cm × 17 cm, 流速 1 ~ 8 cm/s) 表明, 只有

在流速很低 (< 2 ~ 3 cm/s) 时才能观察到稳定传播的火焰 (1 ~ 3 cm/s 的流速下火焰长度达到稳定需要 13 ~ 15 s 时间). 流速更高时, 火焰长度持续增大, 最大达到 8 cm, 由于实验段尺寸有限, 很难判断结果是否达到稳定状态<sup>[59]</sup>. 低速同向传播火焰的一个显著特点是, 它能够达到稳定的火焰传播速度和火焰极限长度. 火焰的极限长度, 可能是由辐射热损失或侧面热量与动量损失所致<sup>[60,61]</sup>. 达到极限长度后, 上游的燃尽速度控制了火焰传播速度, 这与不断长大的非稳态同向传播火焰和稳态逆向传播火焰不同. 实际上, 对热薄燃料的数值模拟<sup>[62~64]</sup> 发现, 在同向传播的火焰中, 也存在类似于逆向传播火焰的高速吹熄和低速冷熄极限. 但是, 除了极低流速外, 同向传播火焰的极限氧气浓度较逆向的低<sup>[65]</sup>. 而且, 在较高流速下, 火焰传播的动态特性与 ng 下的定性相似; 在较低流速下, 冷熄前火焰会经历从快速火焰传播到慢速固体燃烧的转变<sup>[64]</sup>. 对聚甲醛树脂 (Delrin)、有机玻璃和高密度聚乙烯柱 (直径 4.5 mm) 等热厚燃料的空间燃烧实验给出如下结果: 在 (0 ~ 8.5) cm/s 的同向气流 (氧气浓度 23.6% ~ 25.4%) 中, 每一种材料也都存在能够支持燃烧的极限气流速度 (0.3 ~ 0.5 cm/s). 当气流速度减小时, 火焰传播速度减小 (当气流速度从 8.5 cm 减小到 0.3 ~ 0.5 cm/s 时, 火焰传播速度从 0.5 ~ 0.75 mm/s 减小到 0.05 ~ 0.01 mm/s), 火焰变弱、变大, 这增大了点燃临近物品的概率<sup>[6]</sup>. 鉴于同向传播火焰的研究结果较少, 除非特别说明, 以下的讨论仍然限于逆向传播火焰.

### 2.3 固体表面火焰传播中辐射的作用与稀释剂效应

静止 mg 环境下, 无灰滤纸 (11 cm × 3 cm × 0.0165 cm) 表面传播的火焰中, 既存在气相向固相的传导和辐射传热, 又存在固体表面向环境的辐射传热, 气相向固体表面传递的净热流呈现双峰分布, 这与 ng 和强制逆向对流情况下的单峰分布不同<sup>[47,66]</sup>. 没有辐射效应时, 进入固体推动火焰传播的热流从气相传导而来. 在低速逆流环境中, 气相辐射具有两种效应: 向固体表面反馈热量以增大到固体表面的热流; 向环境辐射热量以降低火焰温度和传导热流. 固体表面在接受气相传导和辐射热量的同时, 又向环境辐射热量, 其作用相当于热汇. 只有同时考虑气相和表面辐射, 才能给出与实验一致的模拟结果. 辐射的总效应是火焰温度降低、尺寸减小、传播速度变慢. 达到一定程度时, 产生冷熄极限<sup>[56,57,67~70]</sup>.

固体表面和气相热辐射与气相热传导之比分别为<sup>[39,67]</sup>

$$R_s = \frac{\varepsilon\sigma(T_v^4 - T_\infty^4)L_g}{\lambda_g(T_f - T_v)} \quad (5)$$

$$R_g = \frac{4a_p\sigma(T_f^4 - T_\infty^4)L_g^2}{\lambda_g(T_f - T_v)} \quad (6)$$

其中,  $\varepsilon$ - 固体表面黑度,  $\sigma$ -Stefan-Boltzmann 常数,  $a_p$ -Planck 平均吸收系数. 当  $R_s$  和  $R_g$  较大时, 固体表面和气相的辐射作用不能忽略. 考虑固体表面辐射时, 火焰传播速度与不考虑时的关系为<sup>[69]</sup>

$$\frac{V_f}{V_{f,\varepsilon=0}} = 1 - R_s \quad (7)$$

当环境压力增大时, 热传导的长度尺度  $L_g$  和  $R_s$  减小, 固体表面辐射的重要性下降, 但是, Planck 平均吸收系数  $a_p$  增大, 很难直接确定  $R_g$  的变化. 数值模拟表明,  $L_g$  的减小作用较  $a_p$  的增大作用显著, 即火焰传播速度随压强增加而增大<sup>[71]</sup>. 空间静止环境的实验<sup>[18,46,47]</sup> 给出的结果与此一致: 在氧气浓度保持 50% 不变的情况下, 当压强从 101.33 kPa 增加到 152.0 kPa 和 202.6 kPa 时, 火焰传播速度从 3.6 mm/s 增加到 4.5 mm/s 和 5.5 mm/s. 而数值模拟<sup>[68]</sup> 给出的绝热火焰传播速度为 12 mm/s, 比最高压强下传播速度的 2 倍还大. 可见, 即便在最高压强下辐射热损失也依然重要. 而且, 不同厚度的燃料, 辐射熄灭的主导机理在气相和表面辐射之间变化, 这会引起火焰传播速度随厚度变化的不同趋势<sup>[72]</sup>.

在以上的研究中,  $O_2$  的平衡气是  $N_2$ , 这两种气体都不产生热辐射, 只有产物中的  $CO_2$  和  $H_2O$  具有较明显的辐射效应, 但其 Planck 平均吸收长度的量级为米 (m), 远大于火焰厚度, 因此辐射过程可以当做光疏介质处理. 当环境中含有辐射性较强的组份时, 一方面会使 Planck 平均吸收长度变短, 辐射再吸收效应增强; 另一方面会引起火焰热量的再分配, 从而改变火焰传播速度. mg 实验<sup>[73]</sup> 表明, 利用辐射性较强的  $CO_2$  和  $SF_6$  做平衡气时, 与 ng 下向下传播的火焰相比, mg 下静止环境中的火焰传播速度更高, 而极限氧气浓度更低; 利用  $N_2$ 、He、Ar 做平衡气时情况正好相反. 其中, 在  $O_2$ - $SF_6$  气氛中, mg 下的火焰传播速度较 ng 下任何方向传播的火焰都快.  $CO_2$  引起传播速度增大的现象也得到类似实验的支持<sup>[74~76]</sup>. 这就是说, 在低速情况下  $CO_2$  并不是好的灭火剂, 这对载人航天的火灾安全非常重要. 正如对预混火焰的预报一样, 应该使用详细的谱模型以评价辐射效应, 而早期使用的辐射模型都是将 Planck 平均吸收系数处理为常量<sup>[18,46,71]</sup> 或变量<sup>[63]</sup> 的光疏模型, 直到最近才出现了一些使用谱辐射模型的一维火焰计算<sup>[68,77,78]</sup>. 值得注意的是, 当环境气体具有较强的辐射再吸收效应时, 存在一个临界压强, 当系统压强小于临界压强时, 随着压强的增大, 氧气向火焰的扩散加强, 因此火焰传播速度增大; 但超过临界

压强后, 继续增大压强时, 辐射再吸收将使火焰对燃料表面的辐射减弱, 因此火焰传播速度减小<sup>[23]</sup>.

## 2.4 几何形状对固体表面火焰传播的影响

几何形状发生变化后, 燃料的燃烧特性也会发生变化. 抛物线飞行实验<sup>[79,80]</sup> 和理论研究<sup>[81,82]</sup> 都表明, 在  $O_2$  含量较高的低速逆流环境中燃烧的柱形 PMMA, 在相同的重力水平下, 火焰传播速度明显高于平面燃料; 而重力水平降低时, 由于非平面火焰的几何结构提高热通量的效应, 其火焰传播速度增大, 这与平面燃料的趋势不同. 在纯氧中, 铁丝在 mg 下的燃烧速度可以达到 ng 下的 (2 ~ 3) 倍, 熔化的金属形成圆球附着在未燃燃料处, 而 ng 下很难点燃的铜、镍以及不锈钢等在 mg 下也完全可以燃烧<sup>[83]</sup>. 在绝缘导线中, 金属丝既可以做为热源又可以做为热汇, 情况进一步复杂. 简单的空间实验<sup>[84]</sup> 表明, 在 10 cm/s 同向或逆向流动的空气中, 外包聚乙烯的镍铬导线燃烧时, 熔化的燃料会形成导线直径 (2 ~ 3) 倍大的准球形泡并随火焰一起移动, 这与地面上的熔化燃料很容易滴落完全不同, 使得两种重力环境中的燃烧不具有可比性, 但是, 当通风停止后火焰很快熄灭, 这表明低速流动对 mg 下的火焰传播极其重要. 在 JAMIC 落塔上进行的实验<sup>[74,75]</sup>, 系统地研究了静止环境中氧气浓度、预热温度、导线直径、压强以及稀释气体, 对导线 (直径 (0.32 ~ 0.51) mm 铜芯包覆厚度 0.15 mm 的 ETFE 绝缘层) 火焰传播的影响, 如图 5 所示, 与 ng 下向下传播的火焰速度

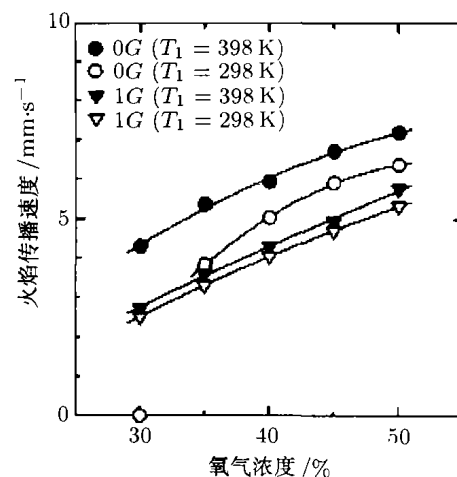


图 5 mg 和 ng 下导线火焰传播速度与氧气浓度和预热温度的关系<sup>[74]</sup>

相比, 无预热时, mg 下的速度可能更高 ( $O_2$  浓度较高时) 或更低 ( $O_2$  浓度较低时); 而有预热时, mg 下的速度一直都更高. 这些现象是铜丝的加热、冷却功能和燃料气化后产生 Stefan 流等因素的共同结果<sup>[85]</sup>. 在低速逆流环境中, 当流速从零增大时, 如图 6 所示, 导线燃烧会依次出现机理不同的 3 个区:

氧气传递控制区、几何效应区和热传递控制区,在前两者之间会出现最大火焰传播速度,而几何效应区是曲面燃料火焰传播的特征<sup>[86]</sup>。

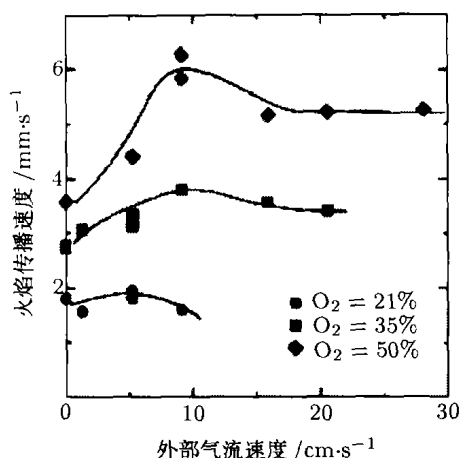


图6 mg下导线火焰传播速度与气流速度的关系<sup>[86]</sup>

## 2.5 点燃过程与三维效应

当点燃发生在燃料中间时,可能形成部分同向、部分逆向传播的火焰。空间和落塔实验<sup>[87]</sup>发现,在0~10 cm/s的低速流动空气(含21% O<sub>2</sub>, 35% O<sub>2</sub>, 50% O<sub>2</sub>)中,无灰滤纸在mg下比ng下更容易辐射点燃,数值模拟结果与此一致<sup>[88]</sup>。对PMMA(40 mm × 40 mm × 12.7 mm)的抛物飞行点燃实验<sup>[89]</sup>和数值模拟<sup>[90]</sup>也发现类似的结果。这是因为蒸发或热解的热燃料气,在ng下无论是水平还是竖直方向都可以在浮力的作用下很快扩散,而在mg下则停留在点火点附近最终被点燃。用Mach-Zehnder干涉仪对滤纸点燃的定量测量也表明,辐射点燃的主要机理是气相反应<sup>[91]</sup>。点燃延迟除了与点火能有关外,还随气流速度的减小和氧含量的增大而减小<sup>[87]</sup>。

点燃向火焰过渡的二维和三维数值模拟<sup>[92,93]</sup>的对照表明,在一定的宽度范围内三维火焰比二维更容易发展,因为在三维情况下会有氧气从侧面扩散进来,这相当于增加了气流速度,缺氧的近极限火焰会更强烈。对于逆向传播火焰,这种有限宽度效应在低速气流条件下更加显著,因为这时热膨胀诱导的速度使得流入反应区的有效氧气质量流量减小,当流速增大后,这种影响减弱。同样,在低速气流条件下,由于侧面氧气的扩散效应,窄试样的火焰传播速度更高<sup>[93]</sup>。对同向传播火焰的模拟发现,存在两种不同类型的三维效应:气流速度和氧气浓度较高时,火焰远离熄灭极限,其行为与ng下的相似,这时三维效应受火焰的热损失支配,宽试样的火焰传播速度更快;相反情况下,火焰接近熄灭极限,其行为受氧气供应速度控制,侧面氧气的扩散成为三维效应的主要机理,窄试样的火焰传播速度更快,可燃极

限更宽<sup>[94,95]</sup>。在mg下的低氧环境中,燃料从中间点燃后,气流速度较低时,最初火焰以扇形方式向上游传播,上游燃尽后火焰开始在下游传播;气流速度增大时,最初火焰在向上游传播的同时从两侧面向下游传播,上游燃尽后火焰开始在下游以连续的形式传播<sup>[87,96~98]</sup>;气流速度继续增大时,最初火焰向上游传播,稍后,在上游燃尽前,火焰同时向上游和下游传播,其中向上游传播的火焰为颜色明亮的强火焰,向下游传播的火焰为蓝色的弱火焰<sup>[99]</sup>。这些现象是由上游火焰对来流中氧气的不同消耗程度和侧面氧气的扩散引起的。如图7所示,在低速流动范围内,上游的逆向火焰传播更快,这与ng下流动主要促进下游的同向火焰传播正好相反。

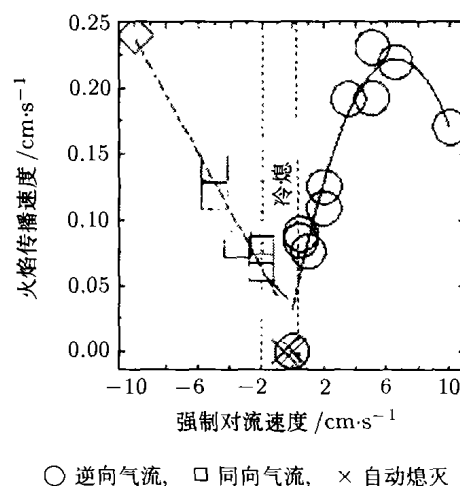


图7 火焰在mg下的空气中向上游和下游传播的速度(符号表示误差范围)<sup>[87]</sup>

## 3 闷烧

闷烧是主要发生在被加热的多孔可燃介质中的无焰燃烧过程,以微弱的(传播速度的量级为0.1 mm/s)低温(400 °C)表面放热反应和少量发烟为特征,达到一定条件时可能向快速有焰燃烧转化。闷烧通常会产生相当多的有毒气体,而且还是引发火灾的一种常见方式,但在短时间内难以觉察,因此具有极大的危害。包括热、电绝缘材料在内的很多材料都能维持闷烧<sup>[27]</sup>。

对于热厚燃料,早期的落塔和抛物飞行实验表明,重力对闷烧具有显著的影响<sup>[100,101]</sup>,但地面mg设施很难满足闷烧实验对时间的要求,因此下面提到的都是空间实验结果,实验材料也均为聚亚安酯。在小型闷烧实验中,由于试样尺寸(直径5 cm,长度8 cm)过小和点火器功率不足,在各工况下闷烧最终都自动熄灭,但观察到的闷烧传播程度较ng下的大<sup>[102]</sup>。

对更大尺寸(直径12 cm,长度14 cm)的实验



(21%~40% 氧气浓度的空气)<sup>[103]</sup> 表明: 在 mg 的静止环境中闷烧不能自行维持, 而 ng 向下的闷烧则可以进行; 当 1 mm/s、2 mm/s 的极弱逆向对流存在时, mg 下的闷烧速度 (0.10 mm/s、0.16 mm/s)、温度 (385 °C、410 °C)、有毒气体产物和反应程度均介于 ng 下相同条件时向上和向下闷烧的相应值之间. 研究者利用实验数据优化得到的闷烧反应热表征化学动力学因素, 并将实验得到的两个闷烧传播速度与基于热传递的简单模型  $V_s \sim V_g^{[104]}$  ( $V_s$ 、 $V_g$  分别为闷烧速度和气流速度) 作了比较, 认为该模型能够成功地描述这个区域的闷烧. 当逆向对流扩展到 3 mm/s 时, 闷烧反应温度进一步升高 (421 °C), 但传播速度仅略微增大 (0.17 mm/s), 并不呈现随气流正比例增加的趋势. 同时考虑强制对流、自然对流和氧气扩散后, 闷烧传播速度随氧气总通量的变化情况表明, 微重力下能够维持闷烧的氧气总通量显著低于常重力下, 这可能与浮力诱导的热损失对压力的依赖小于浮力诱导的质量流动有关<sup>[105]</sup>, 这对载人航天器火灾安全具有重要意义.

在空气中进行的同向闷烧实验<sup>[106]</sup> 给出的结果为: 在 3 mm/s 的工况中, mg 下的闷烧可以进行, 但不能全部完成, 而 ng 下的闷烧可以自动传播; 当流速增加到 5 mm/s 时, mg 和 ng 下的闷烧都可以持续进行. 研究者也将其数据与已有模型<sup>[107]</sup> 做了比较.

这些现象是热损失、浮力效应、供氧量和氧气经历路径等原因的共同结果: mg 下的热损失较小, 但静止环境中的氧气供应不足, 因此闷烧不能进行; 当有足够的逆向流动的空气时, 闷烧就能够进行; 但同向流动的空气要经结焦区到达闷烧反应区, 当供氧量被结焦区耗尽时, 闷烧便不能维持, 增大供氧量闷烧才能进行. 而 ng 下的热损失较大, 对于向下的闷烧, 逆流时浮力增强了强制对流的供氧量, 这使得闷烧能够顺利进行; 顺流时浮力削弱了强制对流的供氧量, 而空气先经过结焦区会使得供氧量减小, 这些都使得闷烧不能顺利进行. ng 下向上的闷烧, 逆流时浮力效应削弱了强制对流, 使得闷烧不能顺利进行; 顺流时浮力效应增强了强制对流, 但强制对流中的氧气先经过结焦区而被消耗, 这两者的作用互相削弱.

在热薄燃料的闷烧实验<sup>[108]</sup> 中, 在 (0.5 ~ 6.5) cm/s 的气流速度下, 从中间点燃的外涂醋酸钾的无灰滤纸, 在 ng 下的闷烧呈现光滑的闷烧前沿, 而 mg 下的闷烧除了具有与点燃向火焰过渡过程中出现的相似情况外, 还呈现出复杂的手指形, 每个指尖都有一个发光的闷烧传播前沿而且分叉频繁, 研究者认为是由于低速流动下供氧不足而形成局部反应斑. 但这不能解释为什么热传导没有抹平这些手

指, 其它研究者则给出如下解释<sup>[109]</sup>: 热传递可以通过气相和固相进行, 表面的辐射热损失可以抑制气相的热传递, 而氧气仅能通过气相扩散, 在高速流动环境中有效  $Le$  仍然接近 1, 但在低速流动环境中有效  $Le$  会远小于 1, 这引起了与预混<sup>[110,111]</sup> 和扩散火焰<sup>[112,113]</sup> 中小  $Le$  时扩散 - 热不稳定性产生的蜂窝状火焰稳定性相似的现象. ng 下传导热损失较多的水平窄通道内热薄燃料的燃烧<sup>[114]</sup> 也存在相似的现象, 进一步的研究正在进行之中<sup>[115]</sup>.

## 4 防火措施

最基本的防火方法是消除引起火灾的火源、氧气和燃料三要素中的一种或几种. 火源方面, 航天器的设计和运行必须满足消除点火能的标准, 具体包括电路焊接与接地、电与热的过载保护、工作电压保险设置以及相似的安全程序等<sup>[29]</sup>.

通常能够维持生命的气氛也能支持燃烧. 但是, 理论上也确实存在支持生命却抑制燃烧的气氛. 一种方法是利用人对氧气的要求是最低分压, 而燃烧对氧气的要求是最低浓度<sup>[116]</sup>, 因此加入大量氮气提高总压就可以达到目的, 151 kPa 总压下氧含量为 14% 的气氛便是这样一种典型<sup>[117]</sup>, 但是这种压强高于航天器的结构极限<sup>[25]</sup>. 另一种方法则是在保持总压不变的前提下将氧气浓度降低至能够维持生命的最小值, 例如 101 kPa 总压下含氧 15.6% 的气氛<sup>[118]</sup>, 实际上这是偏离正常环境的最小允许值, 但对有些材料可能仍然不能阻燃. 第三种办法是用其它稀释剂部分或全部代替氮气<sup>[30,119]</sup>, 但这些稀释剂对人体健康的副作用以及气体压强和储存方面的变化对结构的影响尚需研究<sup>[120]</sup>. 国际空间站的基准气氛是 101 kPa、20.9% O<sub>2</sub> 的空气, 而 O<sub>2</sub> 的容许上限是 24.1%, 准备出舱活动或紧急情况下可以到 30%<sup>[29]</sup>. 我国神州飞船采用 91±10 kPa 总压、(20 ~ 26) kPa 氧气分压的气氛<sup>[121]</sup>.

航天器防火中的主要措施还是剔除材料中的潜在燃料, 其评价依据为材料的可燃性, 关键指标是支持材料燃烧的极限氧气浓度和极限气流速度. 美国对航天材料的可燃性评价<sup>[122]</sup> 主要有 6 种实验方法, 其中应用最广泛的是火焰向上传播实验, 标准为竖直安装的长 30 cm、宽 5 cm 的试样, 从底部化学点火后在燃烧距离达到 15 cm 前能够自动熄灭. 实验在最苛刻的条件下进行, 即最薄的材料 (0.025 cm)、最易支持燃烧的气氛 (101 kPa-24.1% O<sub>2</sub> 或者 70.3 kPa-30% O<sub>2</sub>) 和比任何电器故障都剧烈的点火能 (1 100 °C、25 s、3.1 kJ). 几乎所有的材料在燃烧中都会打火或滴落燃烧的颗粒, 因此, 除了满足自熄灭标准外,



还不能点燃水平安装在其下方 20 cm 处的纸张. 这种方法对环境温度点火延迟超过 25 s 的材料并不合适 [123], 而且也只是一种定性的评价方法, 不过已经发现放热速度和火焰传播速度与传播距离之间具有线性关联 [124,125]. 欧洲对航天材料的评价与美国的相似, 不过增加了极限氧气指数实验 (测量向下传播的火焰) [126]. 对于不能满足可燃性标准的材料, 例如纸张、胶卷、棉衣、毛巾等, 采取的措施包括限制用量和间距、消除火焰传播路径、以及存放在不能燃烧的容器中或盖子下面 [29]. 显然, 在 ng 下进行的实验不能很好的模拟 mg 燃烧的对流环境, 但两种环境下可燃性之间的联系或者标定工作尚未见报道, 而前文已经提到, 尽管一般材料可燃性在静止的 mg 环境中较 ng 下低, 这似乎说明 ng 下的可燃性评价为 mg 下的安全留有足够余地, 但值得注意的是, mg 下材料的可燃性对环境成分和流速变化非常敏感, 而且有些材料在 mg 下的可燃性更高, 有些材料在 mg 下更容易点燃.

俄罗斯的调查表明, 在氧气浓度较高的环境中, 仅有很少一部分材料是阻燃的 (对于载人航天比较重要的氧气浓度范围 (21% ~ 40%), 阻燃材料所占比例不超过 (20% ~ 25%), 因此仅通过利用阻燃材料来解决载人航天器的火灾安全问题通常是不可能的 [1]. 在载人航天器的火灾中出现的危险要素主要包括空气污染和温度升高, 考虑到航天员会配备适当的个人防护措施, 环境温度升高就成为应该解决的主要问题了. 总的来说, 目前俄罗斯航天器通过一系列措施防止火灾发生, 例如: 优先选择地面实验中极限氧气浓度和氧气指数更高的结构材料; 电路系统的工作部件使用不可燃材料; 在航天器的发射阶段, 维持较低的氧气浓度; 减小可能成为潜在火源的电器元件附近的通风速度; 通过电流保护或利用不可燃仪器和电线包覆的办法消除结构材料中的潜在点火源; 防止火焰向富氧环境中可以燃烧的材料传播 [6]. 俄罗斯贯彻这些措施的具体步骤如图 8 所示 [1].

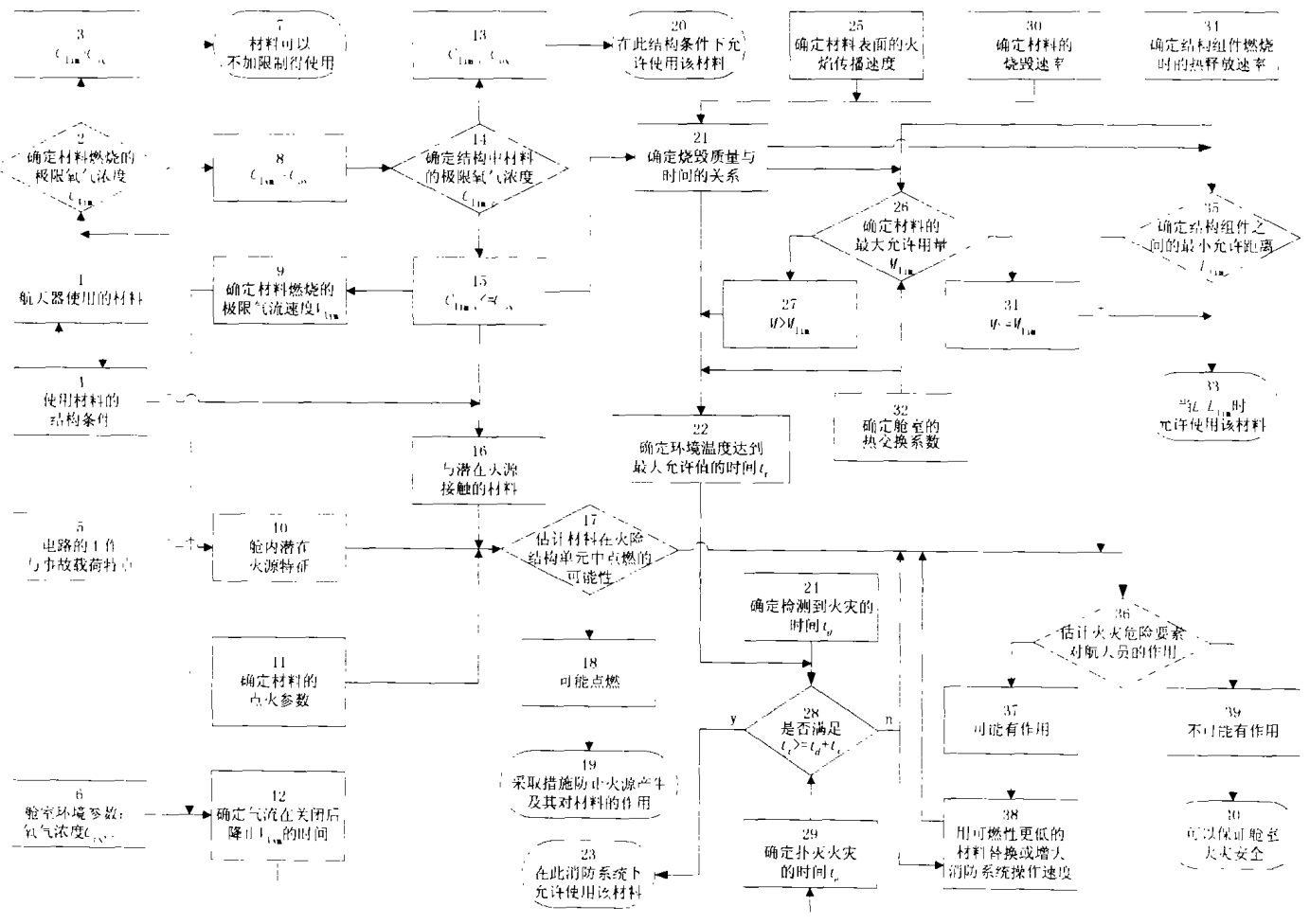


图 8 俄罗斯的载人航天器防火措施 [1]

## 5 火灾检测

预防措施从来都不是绝对的,因此火灾安全措施还应该包括早期警报和事故检测。可供检测的典型火灾信号包括温度与压强升高、气体产物、光及其它辐射、烟以及声波。美国的载人航天活动中,早期的舱室空间狭小,火灾预警完全依靠航天员的个人感觉。1974年 Skylab 第一次安装了紫外火灾探测器,这种探测器通过燃烧产物的紫外辐射来判断火灾,其缺点是只对已经开始的火灾产生反应。此后的载人航天中安装了感烟式探测器,通过电离电流中断和光电散射与衰减来判断颗粒的聚集,其优点是对火灾初始阶段、闷烧和裂解释放的烟雾都具有较高的敏感性<sup>[127]</sup>。

表 1 是目前实际应用的航天器火灾反应系统的总结,其中前四栏为感烟探测系统。和平号空间站在轨时使用消光型光电感烟探测器,目前美国的航天飞机和国际空间站的俄罗斯舱使用离子感烟探测器,而其它舱使用光电感烟探测器,这种不同与它们的不同设计要求和限制例如动力、体积、功能、服务期限和使用寿命等因素有关。

在国际空间站的早期设计中,也包括了火焰辐射探测器<sup>[128]</sup>。但为了减小重量和功耗,最终没有采用,不过这项技术仍在继续发展之中<sup>[129]</sup>。从环境中对痕量组份特别是 CO 的离散取样也可以对初期火灾和闷烧提供早期警报<sup>[130]</sup>,而连续分析系统也正在发展之中<sup>[131]</sup>。火灾的气相探测具有快速、灵敏、非局部的优点。如果重量和功耗允许,将来很有希望同时使用气体和感烟探测器<sup>[132]</sup>。

在地面上,浮力可以携带含颗粒的空气上升,因而探测器安装在天花板上。在航天飞机中,探测器安装在电子设备和驾驶舱的通风路径中。而在国际空间站中,探测器在安装后,其光路可以处于冷却空气回路内或普通循环空气中<sup>[29]</sup>。这些探测器的警报阈值标准试验和标定工作是在 ng 下完成的<sup>[133]</sup>,因此对 mg 下含烟较少、几乎看不见的火焰可能会反应较慢<sup>[30]</sup>、灵敏度较低<sup>[134]</sup>。实验表明,探测器对 ng 下的烟颗粒比较灵敏并不意味着在 mg 下对同一种材料的烟颗粒也同样灵敏,这可能是 mg 下烟颗粒较大的缘故<sup>[135]</sup>。在航天飞机的使用中,探测器的总可靠性还是比较高的,在 100 多次飞行中,只有不到 15 次错误警报<sup>[29]</sup>。

表 1 实际应用的航天器火灾反应系统<sup>[29]</sup>

	美国航天飞机	国际空间站	俄罗斯和平号空间站
探测器数目	电子设备舱内 6 个 飞行和中舱 (middeck) 内 3 个 空间实验室 (Spacelab) 内 6 个	美国舱内 (2 ~ 8) 个 俄罗斯舱内 10 个 空气冷却的支架内 1 个	核心舱 (core) 内 10 个 Kvant 和 Kristall 舱内 10 个 依靠中央监视系统和遥感
探测器类型	离子式 (带阻挡大颗粒的气动分离器)	美国舱和服务舱内光电散射式 俄罗斯舱内离子式	光衰减型光电式
警报标准	5s 内粒子浓度大于 $2 \text{ mg m}^{-3}$ , 或者 20s 内上升速度 $22 \mu\text{g m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 2 次警报或 1 次警报加上需要确认的短路	电压阈值相当于 $0^\circ$ 角散射时衰减 $3.1\%/m$	衰减大于 4% (没有提供距离), 核心舱内还有眼睛观察, Kvant 和 Kristall 舱内 2 个需要确认的探测器
敏感性	对大于 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒不敏感	对小于 $0.3 \mu\text{m}$ 的颗粒不敏感	未知
灭火器数目	3 个固定在电子设备舱, 3 个便携式	美国舱内 1 ~ 2 个, 俄罗斯舱内 2 ~ 3 个	每舱 2 个
灭火器类型	便携装置 + 固定系统 + 通风系统 (venting system)	便携装置 + 通风系统	便携装置
灭火剂	Halon 1301	二氧化碳	蒸馏水泡沫

## 6 灭火措施

mg 下很弱的强制对流就能维持燃烧,在火灾的初始阶段如果氧气浓度较低,切断流动就可以显著降低燃烧速度、抑制火灾<sup>[6,25,136,137]</sup>,因此灭火的第一步就是关闭通风,但这只是必要步骤,而非充分措

施,因为在火焰传播过程中,燃烧气体的膨胀和颗粒的喷射会诱导出空气流动,而且易燃材料的极限流速极低,例如蜡烛可以在静止的 mg 环境中燃烧很久<sup>[138,139]</sup>,因此使用灭火器是必要措施。

实际上,航天器中一直都安装灭火器。美国早期的航天活动中使用的灭火器是饮食用水枪,后来使用

专门的泡沫灭火器<sup>[127]</sup>。如表 1 的后三栏所示, 目前美国航天飞机使用 Halon 1301 气体灭火器, 国际空间站的俄罗斯舱使用水基泡沫灭火器, 其它舱使用二氧化碳灭火器<sup>[29]</sup>, 而水雾灭火正在研究之中<sup>[140]</sup>。其中 Halon 1301 是一种高效、安全、洁净、低成本的化学灭火剂, 但使用时产生的有毒副产物很难清除, 另外, 因其对臭氧层的破坏作用, 已为国际公约所禁止<sup>[141]</sup>。二氧化碳灭火剂具有成本低、实用、可靠, 而且没有 Halon 灭火时的副产物出现等优点, 缺点是效率低, 浓度较高时有毒 (17% 以上可以在 1 min 致死, 而国际空间站推荐的灭火浓度为 50%), 灭火后很难去除<sup>[142,143]</sup>。氮气是另一种可能的灭火剂, 具有无毒的优点, 但效率甚至比二氧化碳还低<sup>[144]</sup>。水基泡沫灭火剂在冷却火焰的同时稀释氧气, 效率很高, 但残留的水雾很难清除<sup>[145]</sup>。关于这些灭火器在 mg 下的使用效果目前尚没有实践证明, 但落塔实验表明: 在 mg 下灭火对 Halon 1301 的需要量显著少于 ng 下的需要量<sup>[146]</sup>; mg 下二氧化碳对气氛的稀释可以减小燃烧速度, 不过由于辐射再吸收效应, 当 CO<sub>2</sub> 稀释剂存在时, mg 下的燃烧速度较 ng 下的略大<sup>[73]</sup>。对泡沫灭火剂的抛物飞行实验表明, mg 下泡沫的渗透行为与 ng 下不同, 但泡沫确实能够黏附在表面上并隔绝空气灭火<sup>[147]</sup>。

对于很难控制或无法接近的火灾, 国际空间站还提供了关闭舱口、对舱室泄压和放弃舱室等选择, 并推荐 10 min 内泄压到 30 kPa<sup>[148]</sup>。早期的研究认为, 泄压太快将使火焰在熄灭前增强, 泄压太慢将使火焰的熄灭延迟<sup>[15]</sup>。最近 mg 下的小型实验则表明, 熄火的压强极限是材料温度的函数, 温度越高熄火压强极限越低, 快速泄压时燃烧可能会暂时加强, 但随着压强降低, 气相温度和反应速度的增加会迅速消失, 因此快速泄压更加有利, 并推荐 10 kPa 作为目标总压<sup>[149]</sup>。

## 7 结论与建议

由于载人航天的安全需要, 火灾安全问题一直是微重力燃烧的重要研究内容。火灾安全的基础研究和各种预防、检测和灭火措施一起, 为降低火灾风险提供了支持。不过, 在目前的和未来的载人航天活动中, 可靠、高效的措施仍然需要仔细分析, 特别是在微重力条件下进行验证。

最近美国的微重力燃烧研究表现出一定程度的收缩<sup>[150]</sup>, 出现某种调整的趋势, 开始强调火星探测中有关问题的研究, 但在 NASA 资助的 50 项研究中, 火灾安全仍然属于受到重视的领域<sup>[36]</sup>。在最近的评估中, 火灾安全也被置于最优先的位置, 并提出

以下几个方向: 航天器中火灾动力学的计算机模拟, 航天材料的点燃、火焰传播和筛选, 氧气系统火灾安全, 闷烧<sup>[9]</sup>。理解火焰传播、闷烧及其向明火燃烧转化的机理是火灾安全的基础, 也是检测和控制火灾的前提<sup>[26]</sup>, 在全面开展火灾安全研究工作时, 应该受到优先重视。

总的来说, 由于实验条件所限, 目前 mg 条件下固体表面火焰传播的研究, 主要集中在热薄燃料的逆向传播火焰方面, 热薄燃料的同向传播火焰、热厚燃料的同向和逆向传播火焰的研究尚不多见。实际使用的材料一般都在热厚范围内, 因此, 在条件许可时, 积极开展这方面的研究具有实际意义。在低速气流条件下, 三维效应、气流速度分布等对火焰传播可能具有重要影响, 但这方面仅有少量数值模拟结果, 尚缺乏实验验证。类似的, 辐射作用的影响也仅有数值模拟和热流通量的初步测量, 关于气相辐射、固体表面辐射等都基本上作为研究参数出现的, 经过验证、可以实际应用的辐射模型尚不多见。火焰传播过程中, 碳黑的产生及其辐射模型几乎还是一个空白的领域。

与火焰传播相比, 目前微重力下闷烧的研究更少。总的来说, 这方面的研究尚处于观察实验现象, 验证已有简单模型, 发展复杂模型的阶段。已有的空间闷烧实验, 都是在密封燃烧室中进行的, 其中小型实验采用空气循环, 属于等压过程; 较大试样的实验均由高压储气罐向 21.7 L 的密封燃烧室供应气体, 压力的变化比较显著, 不属于等压过程。但关于压力对闷烧的影响仅有简单讨论 (微重力下,  $V_s \sim p^{1/3}$ )<sup>[105]</sup>, 尚没有系统的实验比较。有毒气体是闷烧的两个主要危害之一, 有毒气体和颗粒物的信息对火灾早期检测具有特别重要的意义, 但目前微重力闷烧研究中的有毒气体数据并非在线检测结果, 而是实验结束后对封闭燃烧室内气体的总包分析, 应该注意到两者之间可能存在差别。实际环境中的闷烧, 应该主要发生于外掠气流环境中, 而目前的模型化研究集中在一维内部流动条件下的同向和逆向传播的闷烧, 实际情况与理想情况之间的差别, 即外掠流动 (二维或三维问题) 和内部流动 (可能是一维问题) 对闷烧的不同影响, 也是一个尚未得到充分研究的问题。类似问题还有, 从中间点燃的闷烧的传播机理、不同几何形状的材料闷烧结果之间的比较等。在载人航天器中, 没有重力和浮力作用, 在这种条件下, 完全不供应氧气, 能否点燃闷烧 (供应 0.1 mm/s 的空气可以点燃); 低速外掠气流下闷烧是否传播, 这种传播特性对材料几何尺寸的依赖性; 是否存在由气流速度和氧气浓度决定的维持闷烧的极限 (低速极限必须在微重力下进行)。以上这些问题, 不仅具有重要的理论价值, 而且对地面

上和载人航天器中的火灾安全具有重要意义。

最近我国神州五号载人飞船成功发射和返回,以后会逐渐开展运行时间较长的载人航天活动,这要求微重力燃烧研究提供火灾安全方面的保障。但是,微重力实验成本较高,当前普遍在常重力条件下进行航天材料的可燃性实验,但其与微重力条件下可燃性的关联,尚未受到重视,应该积极开展材料尺寸、几何结构、三维效应、气氛组成、气流速度等因素对材料点燃、火焰传播及可燃极限等燃烧特性影响的研究,通过实验对照和数值模拟的方法建立不同重力环境下,材料可燃性之间的关联。此外,对于正常形状时不易燃烧、很难用落塔进行可燃性实验的材料,可以考虑选用易燃的形状进行实验,并通过数值模拟为实际应用的材料提供微重力条件下的可燃性数据。作者认为,这两方面的研究,对我国载人航天器的火灾安全具有现实意义。

**致谢** 感谢博士后合作导师胡文瑞院士对本文的建设性意见。

## 参 考 文 献

- Ivanov A V, Melikhov A S, Zaitsev S N. Proposals on developing a standardizing document on providing a fire-safety design and fire-safety use conditions for manned hermetic compartments of transporting spacecrafts and orbital space stations. Keldish Research Center, Report Contract No. KeRC-BISSE-1/01, 2002
- Nakamura Y, Kashiwagi T, McGrattan K B, et al. Enclosure effects on flame spread over solid fuels in microgravity. *Comb Flame*, 2002, 130(4): 307~321
- 刘庆贵. 载人飞船探秘. 北京: 作家出版社, 1999
- Apollo 204 Review Board. Report of Apollo 204 Review Board to the Administrator, National Aeronautics and Space Administration. Washington, 1967
- Leger L J, Bricker R W. Flammability testing conducted in support of Apollo 13. In: NASA. Manned Spacecraft Center MSC Cryog Symp Papers, 1971, 455~474
- Ivanov A V, Balashov Ye V, Andreeva T V, et al. Experimental Verification of Material Flammability in Space. NASA CR-1999-209405, 1999
- Ivanov A V, Melikhov A S, Zaitsev S N. The scientific foundations of the fire safety in pressurized compartments of the inhabited transport spacecraft (SC) and orbital stations (OS). Keldish Research Center, Report Contract No. KeRC-NML-1/01, OMJH/BI012109, 2002
- Task Group on Research on the International Space Station. Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council of the National Academies and National Academy of Public Administration. Factors Affecting the Utilization of the International Space Station for Research in the Biological and Physical Sciences. Washington D C: National Academies Press, 2003
- National Research Council of the National Academies. Division on Engineering and Physical Sciences, Space Studies Board, Committee on Microgravity Research. Assessment of Directions in Microgravity and Physical Sciences Research at NASA. Washington D C: The National Academies Press, 2003
- Kumagai S, Isoda H. Combustion of fuel droplets in a falling chamber. In: Sixth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1956. 726~731
- Kimzey J H. Flammability during Weightlessness. NASA TM X-58001, 1966
- Andracchio C R, Aydelott J C. Comparison of flame spreading over thin flat surfaces in normal gravity and weightlessness in an oxygen environment. NASA TM X-1992, 1970
- Andracchio C R, Cochran T H, Petrash D A, et al. Burning of teflon-insulated wires in supercritical oxygen at normal and zero gravities. NASA TM X-2174, 1971
- Berlad A L, Huggett C, Kaufman F, et al. Study of combustion experiments in space. NASA CR-134744, 1974
- Kimzey H. Skylab experiment M479 zero gravity flammability. In: Skylab Results. Proc of the 3rd Space Processing Symp. NASA TM X-70752, 1974. 115~130
- Cochran T H. Combustion Experiments in a Zero-Gravity Laboratory, Progress in Astronautics and Aeronautics, 73. New York: AIAA, 1981
- Kaldeich B. Combustion experiments during KC-135 parabolic flights. ESA SP-1113, 1989
- Ramachandra P A, Altenkirch R A, Bhattacharjee S, et al. The behavior of flames spreading over thin solids in microgravity. *Comb Flame*, 1995, 100(1-2): 71~84
- Egorov S D, Baleyev A Yu, Klimin L P, et al. Fire safety experiments on "MIR" orbital station. In: Ross H D, ed. Third Int Microgravity Comb Workshop, NASA CP-10174. 1995. 195~199
- Ito K, Fujita O. Research of ignition and flame spread of solid materials in Japan. In: Ross H D, ed. Third Int Microgravity Comb Workshop, NASA CP-10174. 1995. 201~206
- 张孝谦. 微重力燃烧基础研究概述. *力学进展*, 1990, 20(1): 83~92
- 姜羲, 范维澄. 微重力条件下气固两相界面耦合燃烧的数值模拟. *中国科技大学学报*, 1994, 24(4): 449~455
- 杜文峰, 胡文瑞. 微重力下环境压力和辐射再吸收对火焰沿薄燃料表面传播的影响. *中国科学 (E 辑)*, 2003, 33(5): 405~412
- Kaplan S. Safety risk assessment on the space station freedom. AIAA Paper 90-3771, 1990
- Friedman R, Urban D L. Progress in fire detection and suppression technology for future space missions. NASA TM-2000-210337, AIAA-2000-5251, 2000
- National Research Council, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, Space Studies Board, Committee on Microgravity Research. Microgravity Research in Support of Technologies for the Human Exploration and Development of Space and Planetary Bodies. Washington D C: National Academy Press, 2003
- T'ien J S, Shih H-Y, Jiang C-B, et al. Mechanisms of flame spread and smolder wave propagation. In: Ross H D, ed. Microgravity Combustion: Fire in Free Fall. San Diego: Academic Press, 2001. 299~418
- Friedman R, Sacksteder K R. Science and technology issues in spacecraft fire safety. NASA TM-88933, AIAA-87-0467, 1987
- Friedman R, Ross R D. Combustion technology and fire safety for human-crew space missions. In: Ross H D, ed. Microgravity Combustion: Fire in Free Fall. San Diego: Academic Press, 2001. 525~562
- Law C K, Faeth G M. Opportunities and challenges of combustion in microgravity. *Prog Energy Comb Sci*, 1994, 20(1): 65~113

- 31 King M K, Ross H D. Overview of the NASA microgravity Combustion program. *AIAA J*, 1998, 36(8): 1337~1345
- 32 The Microgravity Combustion Group. Microgravity combustion science: a program overview. NASA TM-101424, 1989
- 33 The Microgravity Combustion Group. Microgravity combustion science: progress, plans, and opportunities. NASA TM-105410, 1992
- 34 Ross H D, Gokoglu S A, Friedman R. Microgravity combustion science: 1995 program update. NASA TM-106858, 1995
- 35 Friedman R, Gokoglu S A, Urban D L. Microgravity combustion research: 1999 program and results. NASA TM-1999-209198, 1999
- 36 Office of Biological and Physical Research (OBPR). National Aeronautics and Space Administration. Research announcement research opportunities in physical sciences. NASA NRA 02-OBPR-03, 2002
- 37 Fernandez-Pello A C, Hirano T. Controlling mechanisms of flame spread. *Comb Sci Tech*, 1983, 32(1-4): 1~31
- 38 Williams F A. Mechanisms of fire spread. In: Sixteenth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1976. 1281~1294
- 39 Altenkirch R A, Bhattacharjee S. Opposed-flow flame spread with implications for combustion at microgravity. In: Koster J, Sani R, eds. *AIAA Progress in Aeronautics and Astronautics 130, Low-Gravity Fluid Dynamics and Transport Phenomena*. Washington DC: AIAA, 1990. 723~740
- 40 deRis J N. Spread of a laminar diffusion flame. In: Twelfth Symp (Int) on Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1968. 241~252
- 41 Delichatsios M A. Exact solution for the rate of creeping flame spread over thermally thin materials. *Comb Sci Tech*, 1986, 44: 257~267
- 42 Andracchio C R, Cochran T H. Burning of solids in oxygen-rich environments in normal and reduced gravity. NASA TM X-3055, 1974
- 43 Andracchio C R, Cochran T H. Gravity effects on flame spreading over solid surfaces. NASA TN D-8228, 1976
- 44 Frey Jr A E, T'ien J S. Near-limit flame spread over paper samples. *Comb Flame*, 1976, 26(2): 257~267
- 45 Olson S L, Ferkul P V, T'ien J S. Near-limit flame spread over a thin solid fuel in microgravity. In: Twenty-Second Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1988. 1213~1222
- 46 Bhattacharjee S, Altenkirch R A. A comparison of theoretical and experimental results in flame spread over thin condensed fuels in a quiescent, microgravity environment. In: Twenty-Fourth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1992. 1669~1676
- 47 Bhattacharjee S, Altenkirch R A, Sacksteder K. Implications of spread rate and temperature measurements in flame spread over a thin fuel in a quiescent, microgravity space-based environment. *Comb Sci Tech*, 1993, 91(4-6): 225~242
- 48 West J, Tang L, Altenkirch R A, et al. Quiescent flame spread over thick fuels in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1335~1343
- 49 Altenkirch R A, Tang L, Sacksteder K, et al. Inherently unsteady flame spread to extinction over thick fuels in microgravity. In: Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2515~2524
- 50 Bhattacharjee S, Wakai K, Takahashi S. Predictions of a critical fuel thickness for flame extinction in a quiescent microgravity environment. *Comb Flame*, 2003. 132(3): 523~532
- 51 West J, Bhattacharjee S, Altenkirch R A. A comparison of the roles played by natural and forced convection in opposed flow flame spreading. *Comb Sci Tech*, 1992, 83(4-6): 233~244
- 52 Chen C-H, Hou W-H. Diffusion flame stabilization and extinction under naturally convective flows. *Comb Flame*, 1991, 83(3-4): 309~324
- 53 Chen C-H, Cheng M-C. Gas-phase radiative effects on downward flame spread in low gravity. *Comb Sci Tech*, 1994, 97(1-3): 63~83
- 54 Sacksteder K R, T'ien J S. Buoyant downward diffusion flame spread and extinction in partial-gravity accelerations. In: Twenty-Fifth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1994. 1685~1692
- 55 Olson S L. Mechanisms of microgravity flame spread over a thin solid fuel - Oxygen and opposed flow effects. *Comb Sci Tech*, 1991, 76(4-6): 233~249
- 56 Takahashi S, Kondou M, Wakai K, et al. Effect of radiation loss on flame spread over a thin PMMA sheet in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2579~2586
- 57 杜文锋, 孔文俊, 张孝谦. 微重力环境中空气流动与辐射热损失对火焰传播的影响. *工程热物理学报*, 2000, 21(2): 257~260
- 58 Grayson G D, Sacksteder K R, Ferkul P, et al. Flame spreading over a thin solid in low-speed concurrent flow — drop tower experimental results and comparison with theory. *Microgravity Sci Tech*, 1994, 7(2): 187~195
- 59 Sacksteder K R, Greenberg P S, Pettegrew R D, et al. Forced flow flame spreading test: preliminary findings from the USMP—3 shuttle mission. In: Curreri P A, McCauley D, Walker C. eds. *Third United States Microgravity Payload: One Year Report*. NASA/TM-1998-207891, 1998. 85~103
- 60 Honda L K, Ronney P D. Mechanisms of concurrent-flow flame spread over solid fuel beds. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2793~2801
- 61 Feier I I, Shih H-Y, Sacksteder K R, et al. Upward flame spread over thin solids in partial gravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2569~2577
- 62 Ferkul P V, T'ien J S. A model of low-speed concurrent flow flame spread over a thin fuel. *Comb Sci Tech*, 1994, 99(4-6): 345~370
- 63 Jiang C B, Tien J S, Shih H Y. Model calculation of steady upward flame spread over a thin solid in reduced gravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1353~1360
- 64 Di Blasi C. Dynamics of concurrent flame spread over a thin charring solid in microgravity. *Fire Mater*, 1998, 22(3): 95~101
- 65 Kumar A, Shih H Y, T'ien J S. A comparison of extinction limits and spreading rates in opposed and concurrent spreading flames over thin solids. *Comb Flame*, 2003, 132(4): 667~677
- 66 Bhattacharjee S, Altenkirch R A, Olson S L. Heat transfer to a thin solid combustible in flame spreading at microgravity. *Trans ASME- J Heat Transfer*, 1991, 113(3): 670~676
- 67 Bhattacharjee S, Altenkirch R A. Radiation-controlled, opposed-flow flame spread in a microgravity environment. In: Twenty-Third Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1990. 1627~1633
- 68 Rhatigan J L, Bedir H, T'ien J S. Gas-phase radiative effects on the burning and extinction of a solid fuel. *Comb Flame*, 1998, 112(1-2): 231~241

- 69 Bhattacharjee S, Altenkirch R A. The effect of surface radiation on flame spread in a quiescent, microgravity environment. *Comb Flame*, 1991, 84(1-2): 160~169
- 70 Bhattacharjee S, Altenkirch R A, Srikantaiah N, et al. A theoretical description of flame spreading over solid combustibles in a quiescent environment at zero gravity. *Comb Sci Tech*, 1990, 69: 1~15
- 71 Bhattacharjee S, Altenkirch R A, Sacksteder K. Effect of ambient pressure on flame spread over thin cellulosic fuel in a quiescent, microgravity environment. *J Heat Trans-T ASME*, 1996, 118(1): 181~190
- 72 Di Blasi C. Predictions of wind-opposed flame spread rates and energy feedback analysis for charring solids in a microgravity environment. *Comb Flame*, 1995, 100(1-2): 332~340
- 73 Honda L K, Ronney P D. Effect of ambient atmosphere on flame spread at microgravity. *Comb Sci Tech*, 1998, 133(4-6): 267~291
- 74 Kikuchi M, Fujita O, Ito K, et al. Experimental study on flame spread over wire insulation in microgravity. Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2507~2514
- 75 Fujita O, Kikuchi M, Ito K, et al. Effective mechanisms to determine flame spread rate over ethylene-tetrafluoroethylene wire insulation: Discussion on dilution gas effect based on temperature measurements. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2905~2911
- 76 Son Y, Ronney P D. Radiation-driven flame spread over thermally thick fuels in quiescent microgravity environments. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2587~2594
- 77 Bedir H, T'ien J S, Lee H S. Comparison of different radiation treatments for a one-dimensional diffusion flame. *Comb Theory Modelling*, 1997, 1(4): 395~404
- 78 Bedir H, T'ien J S. A computational study of flame radiation in pmma diffusion flames including fuel vapor participation. In: Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2821~2828
- 79 Tarifa C S, Corchero G, Juste G L. An experimental programme on flame spreading at reduced gravity conditions. *Appl Microgravity Tech*, 1988, 1(4): 165~169
- 80 Salva J J, Juste G L. Gravitational effects on flame spreading over thin cylindrical fuel samples. *Microgravity Sci Tech*, 1991, 4(3): 191~198
- 81 Higuera F J, Linan A. Flame spread along a fuel rod in the absence of gravity. *Comb Theory Modelling*, 1999, 3(2): 259~265
- 82 Delichatsios M A, Altenkirch R A, Bundy M F, et al. Creeping flame spread along fuel cylinders in forced and natural flows and microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2835~2842
- 83 Steinberg T A, Wilson DB, Benz F. The burning of metals and alloys in microgravity. *Comb Flame*, 1992, 88(3-4): 309~320
- 84 Greenberg P S, Sacksteder K R, Kashiwagi T. The USML-1 wire insulation flammability glovebox experiment. In: Ross H D, ed. Third Int Microgravity Comb Workshop, NASA CP-10174. 1995. 25~30
- 85 Umemura A, Uchida M, Hirata T, et al. Physical model analysis of flame spreading along an electrical wire in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2535~2543
- 86 Fujita O, Nishizawa K, Ito K. Effect of low external flow on flame spread over polyethylene-insulated wire in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2545~2552
- 87 Olson S L, Kashiwagi T, Fujita O, et al. Experimental observations of spot radiative ignition and subsequent three-dimensional flame spread over thin cellulose fuels. *Comb Flame*, 2001, 125(1-2): 852~864
- 88 孔文俊, 吐尔逊·艾力江, 王伟刚, 等. 不同重力环境下辐射加热材料表面着火特性分析. *工程热物理学报*, 2002, 23(1): 111~114
- 89 Roslon M, Zhou Y Y, Walther D C, et al. Microgravity ignition delay of solid fuels in low-velocity flows. *AIAA J*, 2001, 39(12): 2336-2342
- 90 Zhou Y Y, Walther D C, Fernandez-Pello AC, et al. Theoretical prediction of piloted ignition of polymeric fuels in microgravity at low velocity flows. *Microgravity Sci Tech*, 2003, 14(1): 44~50
- 91 Fujita O, Takahashi J, Ito K. Experimental study on radiative ignition of a paper sheet in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2761~2767
- 92 Mell W E, Kashiwagi T. Dimensional effects on the transition from ignition to flame spread in microgravity. In: Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2635~2641
- 93 Mell W E, Kashiwagi T. Effects of finite sample width on transition and flame spread in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2785~2792
- 94 Shih H-Y, T'ien J S. Modeling concurrent flame spread over a thin solid in a low-speed flow tunnel. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2777~2784
- 95 Shih H-Y, T'ien J S. A three-dimensional model of steady flame spread over a thin solid in low-speed concurrent flows. *Comb Theory Modelling*, 2003, 7(4): 677~704
- 96 McGrattan K B, Kashiwagi T, Baum H R, et al. Effects of ignition and wind on the transition to flame spread in a microgravity environment. *Comb Flame*, 1996, 106(4): 377~391
- 97 Kashiwagi T, McGrattan K, Olson S L, et al. Effects of slow wind on localized radiative ignition and transition to flame spread in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1345~1352
- 98 Mell W E, Olson S L, Kashiwagi T. Flame spread along free edges of thermally thin samples in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2000, 28: 2843~2849
- 99 Prasad K, Nakamura Y, Olson S L, et al. Effect of wind velocity on flame spread in microgravity. *Proc Comb Inst*, 2002, 29: 2553~2560
- 100 Cantwell E R, Fernandez-Pello A C. Smoldering combustion under low gravity conditions. AIAA Paper 90-0648, 1990
- 101 Torero J L, Fernandez-Pello A C, Urban D. Experimental observation of the effect of gravity changes on smoldering combustion. *AIAA J*, 1994, 32(5): 991~996
- 102 Stocker D P, Olson S L, Urban D L, et al. Small-scale smoldering combustion experiment in microgravity. In: Twenty-Sixth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1996. 1361~1368
- 103 Walther D C, Fernandez-Pello A C, Urban D L. Space shuttle based microgravity smoldering combustion experiments. *Comb Flame*, 1999, 116(3): 398~414
- 104 Dosanjh S, Pagni P J, Fernandez-Pello A C. Forced cocurrent smoldering combustion. *Comb Flame*, 1987, 68(2): 131~142
- 105 Bar-Ilan A, Anthenien R A, Walther D C, et al. Microgravity smoldering combustion experiments in the space shuttle. AIAA Paper 2002-1077, 2002
- 106 Bar-Ilan A, Rein G, Fernandez-Pello A C, et al. Forced forward smoldering experiments in microgravity. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2004, 28(7): 743~751

- 107 Dosanjh S S, Pagni P J. Forced concurrent smoldering combustion. In: Marto P J, Tanasawa I. eds. Second ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol 1. New York: ASME, 1987. 165~173
- 108 Olson S L, Baum H R, Kashiwagi T. Finger-like smoldering over thin cellulosic sheets in microgravity. In: Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: the Comb Inst, 1998. 2525~2533
- 109 Ronney P D. Combustion phenomena at microgravity. In: Moti R, ed. Physics of Fluids in Microgravity. London & New York: Taylor & Francis, 2001. 371~431
- 110 Ronney P D. Near-limit flame structures at low Lewis number. *Comb Flame*, 1990, 82(1): 1~14
- 111 Pearlman H G, Ronney P D. Near-limit behavior of high Lewis-number premixed flames in tubes at normal and low gravity. *Phys Fluids*, 1994, 6(12): 4009~4018
- 112 Chen R H, Mitchell G B, Ronney P D. Diffusive-thermal instability and flame extinction in non-premixed combustion. In: Twenty-Fourth Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1992, 213~221
- 113 Kim J S, Williams F A, Ronney P D. Diffusional-thermal instability of diffusion flames. *J Fluid Mech*, 1996, 327: 273~301
- 114 Zik O, Moses E. Fingering instability in solid fuel combustion: the characteristic scales of the developed state. In: Twenty-Seventh Symp (Int) Comb. Pittsburgh: The Comb Inst, 1998. 2815~2820
- 115 Wichman I S, Olson S L. Flamelet formation in Hele-Shaw flow. In: Sacksteder K, ed. Seventh Int Workshop on Microgravity Comb and Chem Reacting Systems. NASA CP-2003-212376-REV1, 2003
- 116 Carhart H W. Inerting and atmospheres. In: Margle J M, ed. Spacecraft Fire Safety. NASA CP-2476, 1986. 51~57
- 117 Law C K. Combustion in microgravity: opportunities, challenges, and progress. AIAA Paper 90-0120, 1990
- 118 Shvartz E. Advantages of a low-oxygen environment in space cabins. *Aviat Space Envir Md*, 1990, 61: 270~276
- 119 Huggett C. Habitable atmospheres which do not support combustion. *Comb Flame*, 1973, 20: 140~142
- 120 Knight D R. The medical hazards of flame-suppressant atmospheres. AD-A239618, 1991
- 121 戚发轫. 载人航天器技术. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2003
- 122 NASA Technical Standard. Flammability, odor, offgassing, and compatibility requirements and test procedures for materials in environments that support combustion. NASA STD-6001, 1998
- 123 Hshieh F-Y, Beeson H D. Evaluation of the controlled-atmosphere cone calorimeter for determining fire properties of materials according to NASA handbook 8060.1C test 2. NASA TM-104809, 1996
- 124 Hirsch D B, Beeson H D. Test method to determine flammability of aerospace materials. *J Test Eval*, 2002, 30(2): 156~159
- 125 Hshieh F-Y, Beeson H D. Cone calorimeter testing of epoxy/fiberglass and brominated epoxy/fiberglass composites in normal oxygen and oxygen-enriched environments. In: Proc of the Symp on Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres, Vol 7. Philadelphia: ASTM, 1995. 152~167
- 126 Materials and Processes Division. European space research and technology centre. flammability testing for the screening of space materials. ESA PSS-01-721, Issue 2, 1992
- 127 Wieland P O. Designing for human presence in space: an introduction to environmental control and life support systems. NASA RP-1324, 1994
- 128 Friedman R. Fire safety practices and needs in human crew spacecraft. *J Appl Fire Sci*, 1992-1993, 2(3): 243~259
- 129 Herber N, Müller R, Lucas J. Design and development status of the columbus orbital facility environmental control and life support s/s and equipment. SAE Tech Paper 981663, 1998
- 130 Jackson M A, Robins I. Gas sensing for fire detection: measurement of CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and smoke density in European standard tests. *Fire Safety J*, 1994, 22(2), 181~205
- 131 Limero T, Reese E, Peters R, et al. A Second generation volatile organic analyzer for the international space station. SAE Tech Paper 1999-01-2059
- 132 Milke J A. Monitoring multiple aspects of fire signatures for discriminating fire detection. *Fire Tech*, 1999, 35(3): 195~209
- 133 Steisslinger H R, Hoy D M, McLin J A, et al. Comparison testing of the space shuttle orbiter and space station freedom smoke detectors. SAE Tech. Paper 932291, 1993
- 134 Shipp M, Spearpoint M. Fires in microgravity. *Fire Safety Eng*, 1994, 1(4): 41~45
- 135 Urban D L, Griffin D W, Gard M Y. Comparative Soot Diagnostics: One Year Report. In: Curreri P A, McCauley D, Walker C, eds. Third United States Microgravity Payload: One Year Report. NASA TM-1998-207891, 1998. 133~155
- 136 Friedman R, Jackson B, Olson S. Testing and selection of fire-resistant materials for spacecraft use. NASA TM-2000-209773, 2000
- 137 Hirsch D B, Beeson H D, Friedman R. Microgravity effects on combustion of polymers. NASA TM-2000-209900, 2000
- 138 Dietrich D L, Ross H D, Shu Y, et al. Candle flames in non-buoyant atmospheres. *Comb Sci Tech*, 2000, 156(1-6): 1~24
- 139 Glushko G S, Kryukov I A. One possible mechanism to sustain combustion inside a closed region under zero gravity. *Cosmic Res*, 2001, 39(2): 192~200
- 140 Abbud-Madrid A, McKinnon J T, Amon F, et al. The water-mist fire suppression experiment (mist): preliminary results from the STS-107 mission. In: Sacksteder K, ed. Seventh Int Workshop on Microgravity Comb and Chem Reacting Systems. NASA CP-2003-212376-REV1, 2003. 281~284
- 141 Dierdorf D S, Tapscott R E, Stephanie S R, et al. Halocarbons as halon replacements: phase ii-laboratory testing of halon 1301 replacements. ESL-TR-90-38, Vol 4 of 5, 1993
- 142 Office of Air and Radiation Stratospheric Protection Division, U.S. Environmental Protection Agency. Carbon Dioxide as a Fire Suppressant: Examining the Risks. United States Environmental Protection Agency, Report EPA430-R-00-002, 2000
- 143 Huttenbach R C, Oram S D. Life Support- thoughts on the design of safety systems. SAE Tech Paper 901248, 1990
- 144 Martin C E, DaLee R C. Spacecraft fire detection and suppression (FDS) systems: an overview and recommendations for future flights. SAE Tech Paper 932166, 1993
- 145 McKinnie J M. Fire response aboard the international space station. SAE Tech Paper, 972334, 1997
- 146 Friedman R, Dietrich D L. Fire suppression in human-crew spacecraft. *J Appl Fire Sci*, 1991-1992, 1(3): 243~258
- 147 Rygh K. Fire safety research in microgravity: how to detect smoke and flames you cannot see. *Fire Tech*, 1995, 31(2): 175~185



- 148 Wieland P O. Living together in space: the design and operation of the life support systems on the international space station, Vol 1. NASA TM-1998-206956/Vol 1, 1998
- 147 Goldmeer J S, T'ien J S, Urban D L. Combustion and extinction of PMMA cylinders during depressurization in low-

- gravity. *Fire Safety J*, 1999, 32(1): 61~88
- 150 Office of Biological and Physical Research (OBPR). National aeronautics and space administration. research opportunities in physical sciences. NASA NRA 01-OBPR-08, 2001

## PROGRESS IN FIRE SAFETY RESEARCH FOR MANNED SPACECRAFT\*

ZHANG Xia<sup>†</sup>

National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** Theoretically and practically, fire is possible to break out aboard a manned spacecraft. Therefore, the fire safety for manned spacecraft is an important part of microgravity combustion research. The oxygen concentration and gas velocity have a significant effect on the flammability of solid materials. For both counter-flow and concurrent-flow flame spreading over solid materials, the flammability has a limit determined by oxygen concentration and gas velocity, i.e., it is a blow-off extinction at high gas velocity, but a quenching extinction at low gas velocity. The limit oxygen concentration and the limit gas velocity are critical index to evaluate the flammability of materials. Under microgravity, the possibility of occurring both flaming combustion and smoldering is increased in a low speed flow. Consequently, eliminating the potential fuel in materials used in spacecraft is the main measure for fire prevention. However, materials used for a spacecraft that can resist combustion are very few. To ensure fire safety, the fire detection and the fire fighting method are necessary. There are similarities and differences between the fire safety projects in America and Russia. At present, there are still many problems to be resolved for the fire safety for manned spacecraft. Considering the actual condition of our country, the present author thinks that the simulation under the normal condition of the microgravity combustion characteristics of materials using both experimental and numerical methods is practical and important for fire safety of our country's manned spacecraft.

**Keywords** manned spacecraft, microgravity combustion, flame spread, fire safety, fire prevention, fire detection, fire suppression

---

\* The project supported by the Knowledge Innovation Major Project of CAS (KJCX2-SW-LO5)

<sup>†</sup> E-mail: zhangxia@imech.ac.cn