0254-6124/2008/28(1)-022-06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wang Shuangfeng, Yin Yongli. Microgravity smoldering combustion experiments aboard the china recoverable satellite SJ-8. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(1): 22~27

卫星搭载聚氨酯泡沫闷烧实验*

王双峰[1] 尹永利[2]

[1](中国科学院力学研究所 国家微重力实验室 北京 100080)

[2](北京航天医学工程研究所)

摘 要 SJ-8 卫星搭载闷烧实验，利用长时间微重力条件，对等压条件下聚氨酯泡沫试样中的闷烧点燃和双向传播过程进行了研究，两种气流氧气浓度分别为 21% 和 35%，气流速度为 3.1 mm/s. 实验结果表明，氧气浓度较小时，逆向闷烧在传播到试样末端之前将自行熄灭，同向闷烧可以自维持传播至试样末端. 气流氧气浓度为 35% 时，逆向闷烧和同向闷烧都可自维持传播；当逆向闷烧传播至试样末端区域时反应急剧加速，导致局部发生闷烧向有焰燃烧转变；有焰燃烧进一步点燃闷烧反应留下的剩余碳，使其发生剧烈的二次氧化反应，并向下游传播直到剩余碳耗尽. 实验结果为研究闷烧机理提供了基础数据，对载人航天器舱内的火灾安全具有实际意义.

关键词 闷烧；微重力；聚氨酯泡沫；卫星火灾安全

中图法分类号 V524

Microgravity Smoldering Combustion Experiments Aboard the China Recoverable Satellite SJ-8

WANG Shuangfeng[1] YIN Yongli[2]

[1](*National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100080)

[2](*Beijing Institute of Space Medico-Engineering*)

Abstract The present space experiments have been conducted aboard the China recoverable satellite SJ-8 to investigate the smoldering characteristics of flexible polyurethane foam with a forced oxidizer flow velocity of 3.1 mm/s. They are unique in that a combination of mixed flow opposed and forward smolder was investigated at specific ambient pressure. The results show that in the 21% O_2 case, the microgravity opposed flow smolder reaction is not strong enough to progress through the foam sample and eventually extinguishes, whereas the forward smolder propagates along the entire sample length. In the 35% O_2 case, both two types of smolder reaction exhibit a self-sustained propagation. Particular important is the discovery that, there is a transition from smoldering to flaming near the sample end in the opposed smolder, and it seems to be caused by the strong acceleration of smoldering reaction. This transition serves to initiate a vigorous, forward-propagating, oxidation reaction in the char left behind by the smolder reaction. The secondary char oxidation reaction propagates through the sample and consumes most of the remaining char.

Key words Smoldering combustion, Microgravity, Polyurethane foam, Fire safety

* 中国科学院知识创新工程重要交叉方向项目资助 (KACX2-SW-02)

2007-08-22 收到原稿， 2007-11-01 收到修定稿

1 引言

闷烧是一种主要在多孔可燃材料内部发生的无焰燃烧现象，涉及多孔介质传热传质、燃料吸热裂解、气固界面放热反应等复杂机理，以及闷烧点燃、传播、熄灭和表面反应向气相反应转化等众多过程[1],[2]. 多孔材料闷烧是载人航天器舱内和地面设施发生火灾的重要形式和原因之一，其危害主要表现在：可能在材料内部长时间慢速传播，难以检测和扑灭；释放的有毒气体量远高于有焰燃烧；一定条件下闷烧可向有焰燃烧转变，为不能直接引起火焰的微弱热源引发火灾提供了途径. 闷烧的特征速度很小，浮力效应对闷烧点燃、传播和演化过程的影响十分显著，利用微重力环境抑制浮力流动的干扰可将闷烧过程中的传热和化学反应机制孤立出来，简化对复杂现象的研究，有利于认识闷烧的发生和发展规律，为制定载人航天器和地面上的火灾安全措施提供科学依据.

虽然人们对闷烧问题开展了相当多的地面实验和理论研究工作[1],[2]，但是关于微重力条件下材料闷烧特性的认识十分有限. 在 1992 年美国首次进行的空间闷烧实验[3]中，由于聚氨酯泡沫试样尺寸过小和点火器功率不足，在静止和外部低速强迫对流条件下，闷烧反应最终因热损失而自动熄灭. 采用较大尺寸的试样，后续的空间实验[4],[5]表明，在静止微重力环境中闷烧不能维持，这与理论分析一致. 当有微弱的对流存在时，逆向闷烧 (闷烧锋面传播方向与气流方向相反) 传播速度、温度、有毒气体产物浓度和反应程度均介于常重力时向上和向下传播闷烧的相应值之间. 同时考虑强迫对流、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. 同向闷烧 (闷烧锋面传播方向与气流方向相同) 的空间实验[6]结果表明，在 3 mm/s 的气流条件下，微重力闷烧可以进行，但不能全部完成，当流速增加到 5 mm/s 时，同向闷烧可自维持传播. 产生这种现象的原因是，闷烧反应产生剩余碳的热损失是同向闷烧传播的控制因素.

本次空间搭载实验于 2006 年 9 月在 SJ-8 卫星留轨舱中完成，研究了等压条件下聚氨酯泡沫闷烧的点燃规律和传播特性. 此次实验有如下特性.

(1) 闷烧实验在等压条件下进行，突破了国外已有空间实验只能在封闭实验段内进行、不能获得等压条件的局限，实验结果更能反映实际情况.

(2) 采用在试样中间加热和点燃的方式，对双向传播 (闷烧传播方向与气流方向相同或相反) 的闷烧过程进行研究.

2 实验装置和方法

图 1 是卫星搭载实验装置 (安装面板前) 和实验段的照片. 实验装置包含两个独立的密封实验单元，每个单元主要由实验段 (燃烧室) 、气体控制子系统和测量子系统等三个部分组成，它们与实验装置的其他组成部分 (如测控电路) 一起安装在一个两层框架结构内. 两个实验单元的区别在于所使用的氧化气体不同，分别为 21% O_2 / 79% N_2 和 35% O_2 / 65% N_2，前者是载人航天器内通常使用的气氛条件，而 35% 的氧气浓度代表了航天器舱内可能遇到的最危险的闷烧火灾环境. 整个实验装置总质量约为 50.5 kg.

圆柱形铝合金实验段长 460 mm，内径 150 mm，进口与气流供应管路相连，出口与气体排放管路相连. 在实验段的中间部位，安装由电热丝和多孔陶

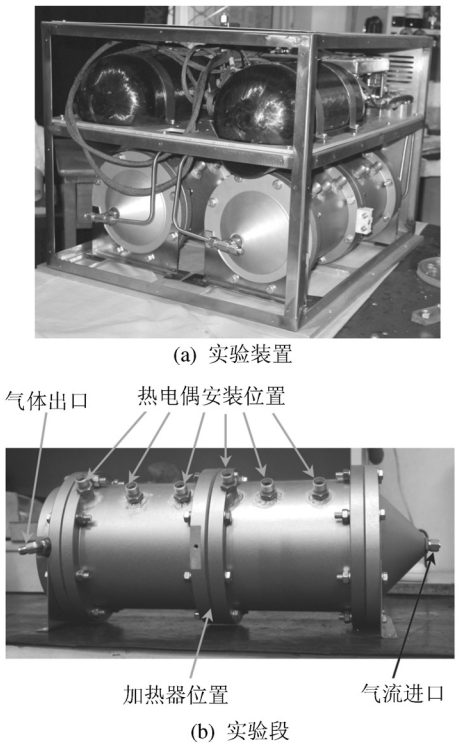


图 1 空间实验硬件照片

Fig.1 Photographs of the flight hardware

瓷板组成的加热器, 加热功率约 110 W; 在加热器的上游和下游, 分别安放一只聚氨酯泡沫试样, 试样长 180 mm, 原始直径 165 mm (比实验段内径大 10%), 密度 25 kg/m^3, 孔隙率 0.98. 当气流存在时, 在加热器上游形成逆向闷烧, 在下游形成同向闷烧.

气体控制子系统具有两个功能, 即按照指定要求向实验段内供应氧化气体, 以及在实验过程中维持实验段内压力不变, 它们分别由子系统的上游段 (供气段) 和下游段 (排气段) 来实现. 氧化气体储存在 4.2 L 高压气瓶内, 卫星发射前瓶内充压至 10 MPa. 气瓶下游管路经减压阀后分成两支, 每个支路均包括一个电磁阀和一个经过标定的节流阀, 实验开始前和结束时气体被电磁阀截止, 实验过程中, 通过控制电磁阀打开, 气体经节流阀进入燃烧室, 以确定的流量向实验段供应氧化气体. 两个节流阀分别向实验段提供 1.0 mm/s 和 3.1 mm/s (实验段断面平均流速) 的气流速度, 小流量的气流用于试样加热过程, 当试样的闷烧点燃完成后, 气流速度切换到 3.1 mm/s, 闷烧反应在此气流条件的支持下继续进行. 子系统下游段 (排气段) 的起始端为实验段出口, 终止端与卫星舱内管路相连, 其核心部分是一个安全阀. 实验过程中, 当燃烧室内压力大于设定值时, 安全阀自动打开, 向卫星舱外排出部分气体, 当燃烧室内压力低于设定值时, 安全阀自动关闭, 以维持实验段内的绝对压力约在 97 kPa. 为了检验实验过程中的气流和压力条件, 利用压力传感器分别对高压气瓶内的相对压力和实验段内的绝对压力进行了测量, 结果表明, 流量变化可忽略, 压力变化为 ±5 kPa.

闷烧实验过程中, 试样中心温度随时间的变化由 12 路 K 型热电偶测量, 每路温度数据的采集频率为 0.5 Hz. 表 1 中给出了这些热电偶沿试样轴向的排列情况. 根据试样中不同位置的温度历史曲线, 可对闷烧点燃和传播过程的主要特性进行分析.

实验装置中的测控电路为内部执行电路, 在卫星留轨舱中微重力实验系统主控制器的支持下, 实现对空间实验过程的控制、科学数据和遥测参数的测量, 而遥控指令接收、程控指令发布和数据采集与记录等功能由微重力实验系统主控制器完成. 在轨实验程序控制模式如下: 实验装置加电后, 首先对实验单元 A (供应 21% 氧气浓度的气流) 进行实验, 开始采集记录热电偶和压力传感器的数据; 然后, 打开相应气流支路上的电磁阀, 向实验段供应小气流量 (速度 1.0 mm/s); 再稍后, 给加热器加电, 当热电偶 TF1 的测量温度达到 340°C 时, 闷烧反应已在试样中建立起来, 加热器断电, 关闭电磁阀, 同时打开另一个气流支路上的电磁阀, 向实验段供应大气流量 (速度 3.1 mm/s); 加热器断电后, 经过 90 min, 关闭电磁阀, 对第一个单元的实验结束, 同时切换到单元 B (供应 35% 氧气浓度的气流), 接着进行实验, 过程同上.

表 1 试样中心热电偶的位置分布

Table 1 Positions of thermocouplesin samples

逆向闷烧		同向闷烧	
热电偶编号	与加热器的距离 /mm	热电偶编号	与加热器的距离 /mm
TO1	15	TF1	10
TO2	30	TF2	25
TO3	60	TF3	55
TO4	90	TF4	85
TO5	120	TF5	115
TO6	150	TF6	145

3 实验结果和讨论

在实验所研究的双向传播闷烧过程中, 加热器上游发生的反应过程 (闷烧传播方向与气流方向相反) 不受加热器下游闷烧 (闷烧传播方向与气流方向相同) 的影响, 为典型的逆向闷烧过程; 而对于同向闷烧, 反应区所能获得的氧气量由上游逆向闷烧的氧气消耗决定, 逆向闷烧释放的热量随气流向下游传递, 还将对试样有预热作用, 因而对同向闷烧过程的认识需要联系逆向闷烧过程进行考虑.

3.1 35% 氧气浓度条件下的闷烧特性

逆向闷烧试样中不同位置处闷烧温度随时间的变化如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 闷烧随时间的演化过程分成两个不同的阶段. 第一阶段大约持续到 1300 s, 为向上游方向传播的闷烧反应, 在试样末端附近发生闷烧向有焰燃烧的转变; 第二阶段表现为向下游方向传播的二次反应.

在试样中的不同区域, 第一阶段的反应具有不同特性, 可分三个区域进行说明, 即加热器区、中部区和末端区. 加热器区长约 60 mm, 闷烧反应明显受到加热过程的影响; 中部区长约 60 mm, 加热过程对闷烧反应的影响较小, 试样末端效应也没有开始显

现；在末端区，外部环境的影响有突出表现. 如图 2 所示，加热器断电后热电偶 1 和 2 测得的温度继续升高，标志着试样开始了自维持的闷烧反应，反应释放的热量向前传递，使那里的试样温度上升到足够高的水平从而引起闷烧反应. 在试样中部，闷烧发生在自行传播和没有外界因素影响的条件下，是典型的逆向闷烧过程，但是就目前实验条件来说，反应的最高温度几乎与加热器区相等，约在 425°C. 当闷烧反应接近试样末端时，热电偶 5 和 6 显示了一种新的现象的发生，热电偶 6 测得的温度出现快速、大幅度增加，该位置的最高温度 (超过热电偶的 700° C 最大量程) 不可能是由剧烈闷烧反应引起的，可能的解释是在这里出现了闷烧向有焰燃烧的转变. 有焰燃烧的突然出现，大量消耗气流中的氧气，使下游闷烧反应受到抑制，因此热电偶 5 的温度曲线上没有出现峰值.

利用图 2 中的温度曲线可确定闷烧传播速度. 虽然温度曲线上的峰值标志着闷烧反应区出现，但在大部分闷烧实验中峰值的位置并不能准确地加以确定. 为此，采用文献 [7] 建议的方法进行闷烧速度计算，结果如图 3 所示. 在加热器影响区，闷烧速度较低，而在试样中段基本保持不变 (0.42 mm/s)，当到达试样末端区时，闷烧传播速度快速增加. 值得注意的是，在试样中段闷烧速度比前人使用空气作为氧化气体的微重力实验结果 [4],[5] 大得多，而闷烧温度没有明显不同. 这说明，氧气浓度的增加对闷烧化学反应动力学影响不大，但提高了反应速率.

闷烧向有焰燃烧转变是气相可燃物点燃的过程，异相的闷烧反应起着提供燃料和点火温度的作用 [8]~[10]. 到目前为止，向有焰燃烧转变被认为只是同向闷烧的特性 [8],[10]，在逆向闷烧中没有发现，但是关于逆向闷烧的研究全部以空气作为氧化气体，没有考虑氧气浓度对闷烧过程的影响. 闷烧向有焰燃烧转变需要有可燃气体混合物和足够高温度的点火热源；在微重力条件下，浮力对流的消失使热损失减少，有利于形成局部的高温区；在目前实验中氧气可充分地供应给逆向闷烧的反应区，闷烧反应的加速十分明显. 因此，当闷烧接近试样末端时，可产生足够的可燃气体和热量，氧气也是充足的，具备气相可燃物点燃所需的条件. 逆向闷烧向有焰燃烧转变的这一机制与同向闷烧是不同的.

闷烧在试样末端转变为有焰燃烧，结束了反应演化过程的第一阶段，同时引发第二阶段，即同向传播的剩余碳氧化反应，反应温度明显高于闷烧反应. 聚氨酯泡沫闷烧时，反应锋面过后将留下一种类似碳的物质，与聚氨酯泡沫相比剩余碳不易发生氧化反应，但是如果发生氧化反应其放热量要大得多 [1],[9],[12]，反应热可比闷烧大 10 倍 [10]. 这种反应通常称为碳的二次氧化反应. 图 2 表明，碳的氧化反应由试样末端的高温有焰燃烧引起，向下游传播通过整个试样，在温度曲线上表现为温度快速增加和接下来的温度下降. 在碳氧化反应传播过程中，最高温度沿试样线性降低，变化范围从 650°C 到 570°C，显著超过闷烧反应的温度. 约到 1950 s 时，碳的二次氧化反应结束，此时大部分剩余碳已被反应消耗.

同向闷烧试样中不同位置处闷烧温度随时间的变化如图 4 所示. 闷烧随时间的演化过程也可以分

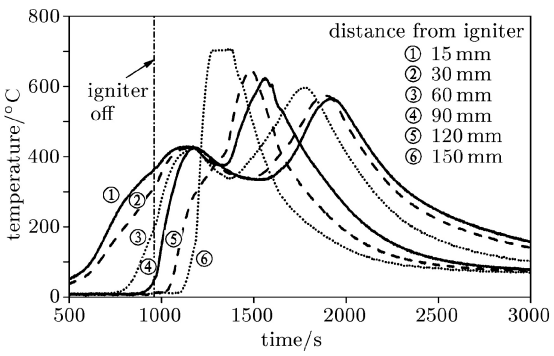


图 2 逆向闷烧试样中不同位置处闷烧温度-时间曲线
(气流氧气浓度 35%)

Fig.2 Temperature histories at several locations along the foam sample for opposed flow smolder (Oxygen concentration 35%)

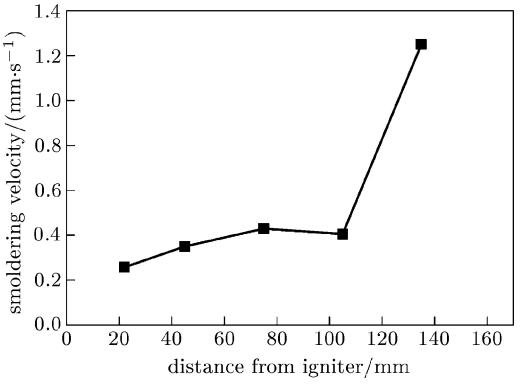


图 3 逆向闷烧传播速度沿试样的变化
(气流氧气浓度 35%)

Fig.3 Variation of the opposed smolder velocity along the foam sample (Oxygen concentration 35%)

成两个阶段. 第一阶段持续到大约 1950 s, 即加热器上游试样中的反应结束. 在该阶段, 泡沫试样所处的气体环境由逆向闷烧的产物决定, 因为气流中的氧气被逆向闷烧耗尽, 虽然点火器影响区 (热电偶 1 和 2) 的温度被提升到足够高的水平 (约 350°C), 放热氧化反应 (闷烧) 不能建立, 试样中的反应为吸热热解 [9],[12]. 在试样的其他区域 (热电偶 3~6) 温度较低, 没有明显的化学反应, 总体来说, 温度过程由多孔材料内部的热量传递控制, 传热的形式包括传导、辐射和对流. 对流传热对泡沫试样的加热作用可从温度曲线上的 60°C 温度平台看出, 与闷烧反应温度相比这一预热温度显得很低, 表明对流加热的作用较小. 当第一阶段到达终点时, 试样温度从 242°C (热电偶 1) 到 115°C(热电偶 6) 之间变化, 试样的性质也不均匀, 加热器附近为不完全热解的泡沫, 靠近末端为温度得到提高、但还没有发生化学反应的泡沫.

加热器上游试样中的反应结束后, 新鲜的氧化气体进入同向闷烧试样, 反应演化过程的第二个阶段开始. 此阶段中, 温度曲线展示了一个自维持的同向闷烧传播过程, 闷烧反应从试样的加热器区开始, 向下游传播贯穿整个试样. 最高反应温度在 347°C 到 305°C 之间变化, 低于逆向闷烧的典型温度 (425°C), 也比前人在微重力同向闷烧实验 [6] 和常重力实验 [13] 中得到的特征温度低.

在逆向闷烧过程中, 观察到了剧烈的碳的二次氧化反应, 而在同向闷烧中尽管出现了演化过程的第二个阶段, 剩余碳可优先接触到氧气, 这种反应

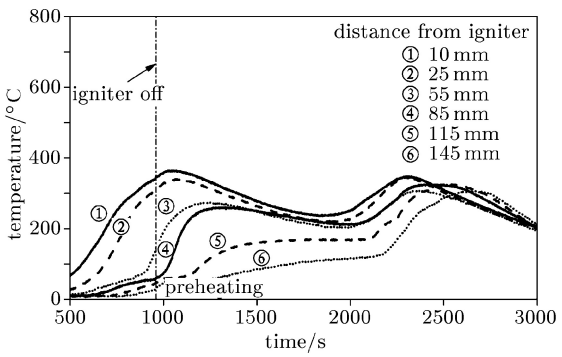


图 4 同向闷烧试样中不同位置处闷烧温度-时间曲线 (气流氧气浓度 35%)

Fig.4 Temperature histories at several locations along the foam sample for forward flow smolder (Oxygen concentration 35%)

却没有发生. 对此的解释是, 碳二次氧化反应不仅需要足够的氧气, 还需要温度足够高的热源来引发, 对聚氨酯泡沫试样进行的热重分析 (TGA) 表明, 碳氧化反应发生的温度比闷烧高, 最大反应率约出现在 570°C. 在逆向闷烧中, 当发生向有焰燃烧转变时这两个条件都可得到满足, 在同向闷烧的第二阶段, 虽然剩余碳中有足够的氧气, 碳的温度很低, 不足以引起氧化反应.

3.2 21% 氧气浓度条件下的闷烧特性

本次实验的科学数据全部依靠卫星数传系统下传, 由地面接收系统得到. 由于数传系统故障, 单元 A 的实验数据缺少了实验开始阶段的一部分, 其中对分析实验现象有影响的长约 8 min. 数据的部分缺失影响了对 21% 氧气浓度条件下闷烧点燃过程的分析, 但是所获得的实验数据仍清楚地反映了闷烧演化的过程和主要特性. 单元 A 的闷烧特性明显区别于单元 B, 同时两者也有诸多相似之处, 为避免重复, 下面将对分析结论作概括说明.

逆向闷烧试样中不同位置处闷烧温度随时间的变化如图 5 所示. 可以看到, 逆向闷烧被顺利点燃, 并在试样中传播, 但在传播到试样末端之前将自行熄灭, 其特征与 35% 氧气浓度条件下的情况是完全不同的.

同向闷烧试样中不同位置处闷烧温度随时间的变化如图 6 所示. 闷烧可自维持传播直到试样末端, 过程与氧气浓度为 35% 时基本相同, 也可以分成两个阶段, 每一阶段的控制机制如前所述. 随着闷烧的传播, 特征温度明显降低, 最高温度从 415°C 减小到 290°C.

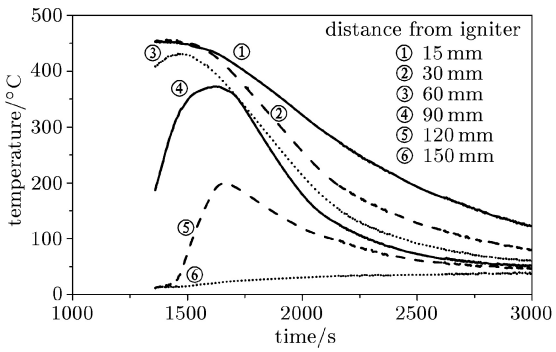


图 5 逆向闷烧试样中不同位置处闷烧温度-时间曲线 (气流氧气浓度 21%)

Fig.5 Temperature histories at several locations along the foam sample for opposed flow smolder (Oxygen concentration 21%)

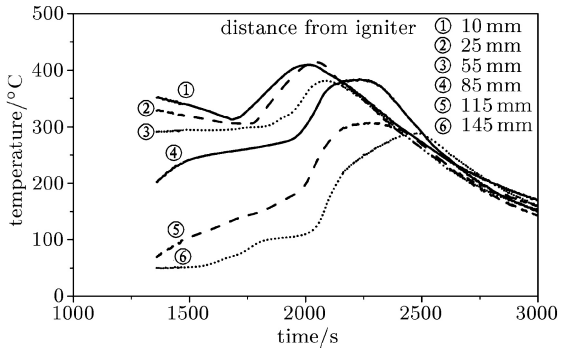


图 6 同向闷烧试样中不同位置处闷烧温度-时间曲线 (气流氧气浓度 21%)

Fig.6 Temperature histories at several locations along the foam sample for forward flow smolder (Oxygen concentration 21%)

3.3 实验结果对航天器火灾安全和闷烧理论研究的意义

实验研究结果为了解微重力条件下聚氨酯泡沫的闷烧特性提供了基础数据，以下初步认识对载人航天器舱内的火灾安全具有启示.

(1) 微重力环境中, 只需要较小的加热功率即可引发聚氨酯泡沫的闷烧，很小的气流速度即可支持闷烧的传播.

(2) 在常用气氛条件 (氧气浓度 21%) 下，材料闷烧的外观表现依赖于材料长度，如果长度较大，闷烧不能到达材料端部，此时，只能主要依靠高灵敏度的感烟探测器和气体探测器来发现，但闷烧过程释放的有毒产物的危害依然是十分严重的.

(3) 在正常气氛和高氧气浓度条件下, 闷烧也可以自维持传播直到材料末端，进而引燃临近的可燃材料，使火灾范围扩大.

(4) 在高氧气浓度 (如 35%) 条件下，闷烧可向有焰燃烧转变，反应温度大大增加，更容易引起火灾的蔓延，造成严重后果.

此外，微重力实验数据排除了浮力效应对闷烧点燃、传播和演化过程的影响，可为分析闷烧过程中的传热和化学反应机制，验证和发展闷烧理论模型提供理想的实验数据.

致谢 本实验任务进行过程中，得到了中国空间技术研究院、 SJ-8 搭载分系统总体、中国科学院光电技术研究院的大力支持和帮助.

参考文献

[1] Ohlemiller T J. Modeling of smoldering combustion propagation. *Prog. Energy Comb. Sci.*, 1986, **11**: 277~310

[2] Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics. England: John Wiley, 1999

[3] Stocker D P *et al.* Small-scale smoldering combustion experiments in microgravity. In: Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1996. 1361~1368

[4] Walther D C *et al.* Space shuttle based microgravity smoldering combustion experiments. *Comb. Flame*, 1999, **116**:398~414

[5] Bar-Ilan A *et al.* Microgravity smoldering combustion experiments in the space shuttle. In: AIAA Paper, 2002

[6] Bar-Ilan A *et al.* Forced forward smoldering experiments in microgravity. *Exp. Ther. Fluid Sci.*, 2004, **28**:743~751

[7] Torero J L *et al.* Opposed forced flow smoldering of polyurethane foam. *Comb. Sci. Tech.*, 1993, **91**:95~117

[8] Torero J L, Fernandez-Pello A C. Natural convection smolder of polyurethane foam, upward propagation. *Fire Safety J.*, 1995, **24**:35~52

[9] Tse S D *et al.* Controlling mechanisms in the transition from smoldering to flaming of flexible polyurethane foam. In: Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1996. 1505~1513

[10] Chao C Y H, Wang J H. Transition from smoldering to faming combustion of horizontal oriented flexible polyurethane foam with natural convection. *Comb. Flame*, 2001, **127**:2252~2264

[11] Leach S V *et al.* Kinetic and fuel property effects on forward smoldering combustion. *Comb. Flame*, 2000, **120**:346~358

[12] Ohlemiller T J, Lucca T A. An experimental comparison of forward and reverse smoldering combustion. *Comb. Flame*, 1983, **54**:131~147

[13] Torero J L, Fernandez-Pello A C. Forward smolder of polyurethane foam in a forced air flow. *Comb. Flame*, 1996, **106**:89~109