

WANG Kai, XIA Wei, WANG Baorui, KONG Wenjun. Fire initiation characteristics of wire insulation in representative weakly buoyancy environment (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 501-507. DOI:10.11728/cjss2016.04.501

典型弱浮力环境下导线绝缘层的着火先期特性^{*}

汪 凯^{1,2} 夏 伟^{1,2} 王宝瑞¹ 孔文俊¹

1(中国科学院工程热物理研究所 中国科学院轻型动力重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 根据实践十号 (SJ-10) 科学卫星导线特性箱有效载荷的地面低压模拟实验, 通过搭建低压微重力模拟实验台, 研究了典型低压弱浮力 (3 kPa) 环境下不同绝缘层种类、厚度和过载电流对导线绝缘层着火先期特性的影响. 实验获得了导线绝缘层着火先期的温升特性和烟气析出特性, 并根据对比常压 (1 atm) 下绝缘层着火先期特性的结果, 初步预测了微重力条件下卫星在轨飞行绝缘层的着火先期特性, 低压实验结果为 SJ-10 卫星空间实验工况优选提供了重要依据.

关键词 微重力, 弱浮力, 绝缘层, 着火先期特性

中图分类号 V 524

Fire Initiation Characteristics of Wire Insulation in Representative Weakly Buoyancy Environment

WANG Kai^{1,2} XIA Wei^{1,2} WANG Baorui¹ KONG Wenjun¹

1(Key Laboratory of Light-duty Gas-turbine, Institute of Engineering Thermophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract This paper introduce the ground-based low pressure simulation tests of the Wire Insulation characteristic box that will aboard on SJ-10 scientific satellite (SJ-10). An experimental system with reduced pressure is established to simulate the microgravity environment. The effects of insulation type, insulation thickness and amplitude of the overloaded current on fire initiation characteristics of wire insulation have been investigated at the representative 3 kPa environmental pressure. The temperature rise trend and the smoke emission characteristics of wire insulation during fire initiation are obtained. Compared with the results obtained at the normal pressure (1 atm), the fire initiation features of wire insulation as the satellite fly in orbit, namely it is at 3 kPa pressure, is predicted. The results provide important references for the choice of space experimental conditions in SJ-10 satellite.

Key words Microgravity, Weakly buoyancy, Wire insulation, Fire initiation characteristics

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目资助 (XDA04020202-08, XDA04020408)

2015-11-10 收到原稿, 2016-04-22 收到修定稿

E-mail: wjkong@iet.cn

0 引言

飞行器防火是载人航天技术与外层空间领域研究中必须妥善解决的最重要问题之一。以往的火灾事故表明^[1-5], 空间飞行器飞行时处于微重力状态, 自然对流基本消失, 散热状况恶化的电气元件更易成为潜在火源。美国 Apollo 1 号和 13 号飞船发生火灾事故后, 逐步开展了微重力下导线绝缘层典型非金属材料的可燃性实验^[6-10]。这些实验均是利用过载电流预热导线绝缘层后切断电流, 再采用外界点火源方式点燃绝缘层, 以此研究绝缘层表面的火焰传播特征, 其与实际火灾中导线绝缘层由于自身电流过载引起的过热或着火是完全不同的。同时, 研究微重力下过载电流时材料的着火先期特性, 对于载人航天器火灾的早期监测和报警十分重要。

中国率先开展了以电流过载为内热源的研究, 利用实践八号卫星研究了导线绝缘层在过载电流作用下的着火先期温升特性, 并利用地面弱浮力环境开展了着火先期特性的初步研究^[11-16]。结果表明, 在低压弱浮力环境中, 导线绝缘层在适度过载电流下稳态平衡温度比正常重力环境下高很多, 因此其失火可能性更高。日本学者利用落塔实验研究了高过载电流下导线绝缘层的可燃性, 结果表明微重力下电流过载时绝缘层更容易引发火灾^[17-18]。但导线本身的过载、升温到着火一般需要几分钟, 甚至更长时间, 所以难以在落塔中开展着火先期特性的研究。

本文基于常重力低压功能模拟方法^[11-14], 研究了典型弱浮力环境中绝缘层种类、厚度和过载电流对导线绝缘层着火先期特性的影响, 进而通过与常压实验结果的对比, 预测了微重力下的结果, 并优选确定了 SJ-10 卫星在轨实验工况。

1 实验装置和实验工况

根据低压功能模拟^[11-14], 在地面搭建低压弱浮力实验台(见图 1)。实验中通过真空泵调节舱内压力, 通过恒流电源调节过载电流。另外, 密封舱采用可视化设计, 壁面安装了石英玻璃观察窗。采用激光衰减法^[19-20]获得实验过程中烟气的析出特性和烟气在密闭空间的分布特征。测量光路原理如图 2 所示。图 2 中燃烧室即为图 1 的低压弱浮力实验台。

由图 2 可知, 激光器发出的激光通过空间滤波器和衰减片后经过扩束、准直, 进入实验测试段, 再通过滤光片、光阑由 CCD 相机接收。最后, 衰减后的激光信号由图像采集装置输入计算机。

图 3 给出了绝缘层周围热电偶测点布置, 可以看出导线周围布置了 5 个热电偶测点, 水平间距 10 mm, 竖直间距 5 mm。选用镍铬 (Ni80Cr20) 线

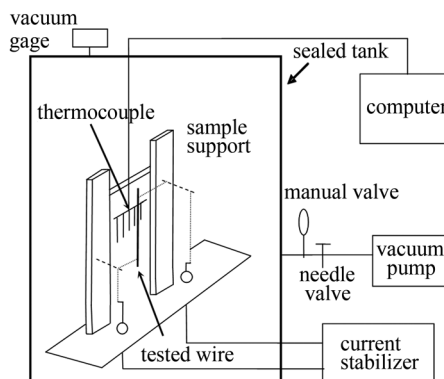


图 1 低压弱浮力实验台

Fig. 1 Experimental setup at low pressure and weakly-buoyancy

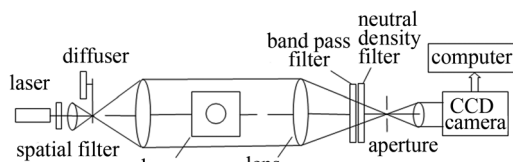


图 2 激光衰减法光路

Fig. 2 Light path of laser extinction method

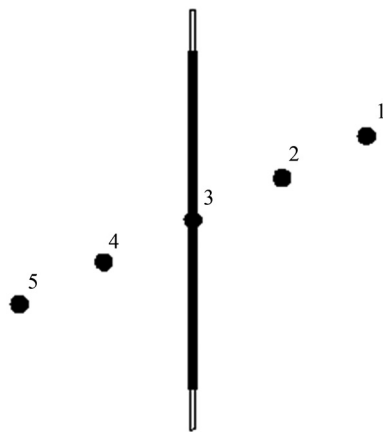


图 3 绝缘层周围热电偶测点布置

Fig. 3 Arrangement of thermocouples

芯和导线绝缘层作为实验样品. 线芯直径 0.5 mm, 长度 70 mm, 绝缘层长度为 40 mm.

根据低压功能模拟原理^[11-14], 3 kPa 可模拟 $10^{-3}g$ 微重力环境 (g 为地面常重力加速度). 因此本文在研究不同导线绝缘层种类、厚度和电流大小对绝缘层着火先期特性的影响时, 选取 3 kPa 作为典型弱浮力环境, 具体实验工况列于表 1.

2 实验结果和分析

2.1 典型弱浮力下绝缘层着火先期的温升特性

为分析绝缘层着火先期温升特性, 确定 3.2 A, 3.9 A 和 4.5 A 过载电流工况. 这些工况下绝缘层在加热过程中不会被瞬间烧毁, 而是存在一个缓慢破坏过程, 可捕捉其着火先期特性. 图 4 给出了测点 3 绝缘层表面的温度温升特性.

通过分析图 4 可以看出, 对于同一种类、相同厚度的绝缘层 (PE, 0.4 mm), 随着电流增大, 绝缘层的初期温升速率 (通电 50 s 内) 逐步增大, 绝缘层分解速率加快, 对应的最终温度也增大. 例如在 2, 4, 5 三种工况下, 最终的稳态平衡温度分别为 195, 380 和 443°C. 可见, 电流越大则绝缘层的内热源越大, 相同外界散热条件下绝缘层越易过热, 更易成为航天器中的潜在着火源.

对于同种绝缘层, 在相同的过载电流下 (PE, 3.2 A), 随着绝缘层厚度的增加, 绝缘层的初期温升速率逐步减小, 最终的稳态平衡温度逐步降低. 这是由于绝缘层的厚度会影响其自身的散热状况. 当绝

缘层与外界发生换热时, 如果绝缘层外径小于临界热绝缘直径, 随着绝缘层厚度的增加, 其散热量反而增大, 散热效果增加^[21]. 本文实验样品的绝缘层外径均小于其临界热绝缘直径, 所以随着绝缘层厚度增加, 其初期温升速率降低, 后期绝缘层表面的稳态平衡温度下降.

在相同过载电流下 (4.5 A), 随着绝缘层种类的变化, 其初期的温升速率基本一致, 但之后的温度变化差异较大. 例如, 在图 4 的 5, 6, 7 三种工况中, 工况 5 的绝缘层温度达到 270°C 时突然增加, 然后一直维持三者中的最高值; 而工况 6 的温升速率则变得最低. 此外, 工况 5 和工况 7 的温度在 100 s 后基本达到稳态, 数值不再变化, 而工况 6 的温度还在缓慢上升, 在 400 s 时其温度开始超过工况 7 的温度. 这是由三种绝缘层材料的热稳定性决定的. PE 绝缘层最易分解, 其开始分解的温度最低, PVC 绝缘层的热稳定性次之, 而 F4 绝缘层最稳定^[22]. 因此当温度超过 270°C 时, 三者的温升特性显著不同. 这表明航天器中需要选用热稳定性良好的绝缘层材料, 以提高其防火能力.

2.2 典型弱浮力下绝缘层的烟气析出特性

2.2.1 绝缘层的破裂状况或烟气分布形态

为了分析绝缘层着火早期的烟气析出特性, 图 5 给出了利用激光衰减法捕获的 8 种实验工况下, 绝缘层无烟析出时的破裂状况或析烟时的烟气分布形态. 由图 5 可知, 各工况下通电后, 绝缘层被破坏的方式

表 1 着火先期特性的实验工况

Table 1 Experimental conditions of prior fire performance

工况	绝缘层种类	厚度/mm	电流/A	压力
1	聚乙烯 (PE)	0.2	3.2	3 kPa
2	聚乙烯 (PE)	0.4	3.2	3 kPa
3	聚乙烯 (PE)	0.5	3.2	3 kPa
4	聚乙烯 (PE)	0.4	3.9	3 kPa
5	聚乙烯 (PE)	0.4	4.5	3 kPa
6	聚四氟乙烯 (F4)	0.15	4.5	3 kPa
7	聚氯乙烯 (PVC)	0.4	4.5	3 kPa
8	聚乙烯 (PE)	0.4	4.5	1 atm

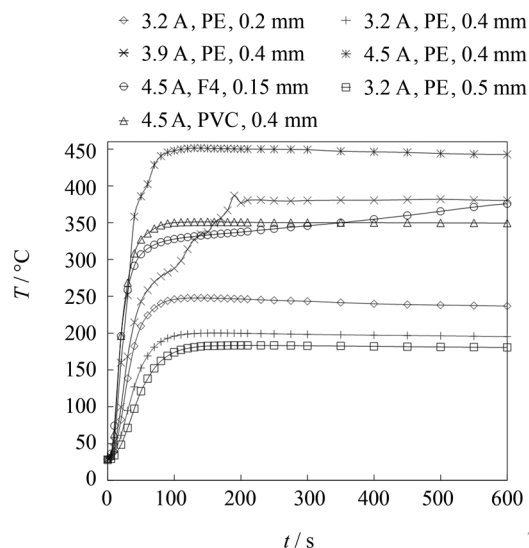


图 4 绝缘层的着火先期温升特性 (3 kPa, 100%O₂)

Fig. 4 Temperature histories of the wire insulation

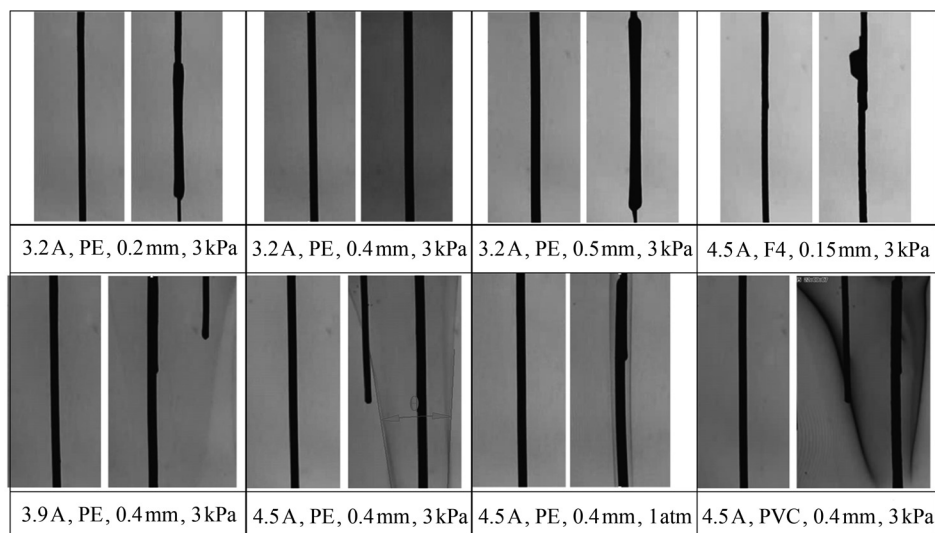


图 5 各工况下绝缘层的破裂状况或烟气分布形态

Fig. 5 Damage mode of wire insulation

差别较大.

在 3.2 A 电流作用下, 激光衰减法观测的烟气不明显, 只发现绝缘层的长度稍有缩短, 但实验中另一路直接录像的 CCD 相机发现绝缘层附近生成了少量的烟气, 同时绝缘层发生老化, 特别是 PE 绝缘层的颜色由初始的白色变为后期的黄色.

对于 0.4 mm 厚度的 PE 绝缘层, 随着电流增大, 绝缘层由部分变形变为直接析出烟气, 而且烟气越来越明显. 例如图 5 中 4.5 A 条件下可清晰观察到绝缘层表面析出的烟气. 另外, 图 5 中 4.5 A, PE, 0.4 mm, 3 kPa 工况下的烟气扩张角 (参见该工况中标示的 θ 角) 明显大于 4.5 A, PE, 0.4 mm, 1 atm 常压工况下的结果.

在 4.5 A 过载电流作用下, 不同绝缘层材料的烟气析出特性明显不同. PVC 绝缘层析出的烟气量最多 (从图 5 中的亮度可判断), PE 绝缘层的次之. 但 PVC 绝缘层析出的烟气比 PE 绝缘层的析出的烟气的分布均匀性差. F4 绝缘层没发现明显烟气, 只观测到 F4 绝缘层顶部出现少量破裂.

2.2.2 典型工况下绝缘层的烟气析出特性

由上述分析可知, 实验的 3.2 A 电流和 F4 绝缘层工况利用激光衰减法未捕捉到绝缘层析出的烟气. 为分析烟气析出特性, 这里仅讨论有明显烟气析出的工况, 结果如图 6 所示.

由图 6 可知, 对于同一种类、相同厚度的绝缘层,

随着电流的增加, 绝缘层析出烟气的速率明显加快, 绝缘层全部被破坏的时间也大大缩短. 例如对比图 6 中工况 4 和工况 5 可知, 对于 0.4 mm, PE 绝缘层表面出现明显烟气的时间由 3.9 A 的 40 s 缩短到 4.5 A 的 20 s, 出现峰值烟浓度的时间由 3.9 A 的 105 s 缩短到 4.5 A 的 30 s, 在 4.5 A 作用下 60 s 后, 绝缘层全部分解或脱落.

对于同样过载电流作用, 相同厚度但不同种类的绝缘层, 其烟气析出过程有明显不同. 例如对比图 6 中工况 5 和工况 7 可知, PVC 绝缘层的烟气析出更快, 而且绝缘层向一侧大量喷射出烟气 (图中为绝缘层的左侧), 这就造成其烟气分布对称性比 PE 绝缘层的差; 另外, 经过快速的烟气释放阶段后 (约 30 s), PVC 绝缘层已完全碳化, 不再释放烟气, 直到加热结束一直稳定地覆盖在线芯表面. 相比之下, PE 绝缘层析出烟气过程缓和, 烟气沿着绝缘层分布更加均匀、对称, 并且随着加热进行, 绝缘层不断释放烟气, 直到最后绝缘层消失.

2.3 压力对导线绝缘层着火先期特性的影响

为评价本文的低压弱浮力环境是否可以预测微重力下绝缘层着火先期特性, 对比分析 4.5 A, PE, 0.4 mm 条件下 1 atm 和 3 kPa 的结果.

2.3.1 绝缘层的温升特性

为了分析绝缘层的温升特性, 将图 3 中测点 3 的热电偶温度记为 T_3 , 该点温度表征绝缘层的表面温

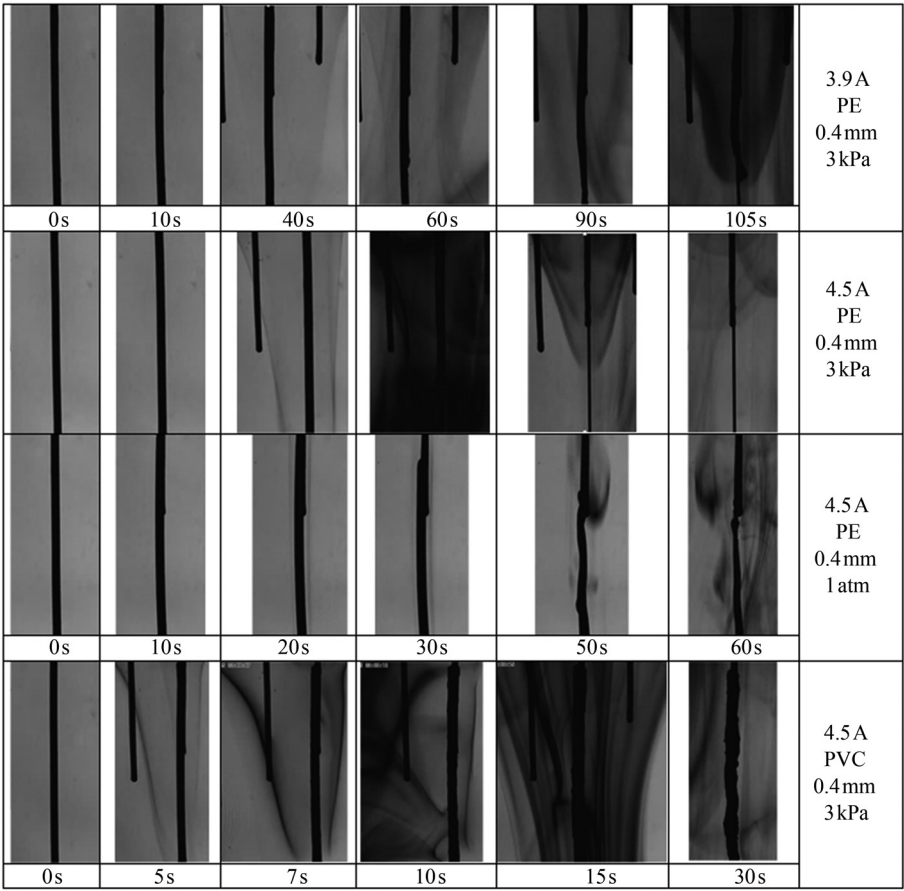


图 6 典型工况下绝缘层的烟气析出过程
Fig. 6 Smoke emission process of wire insulation

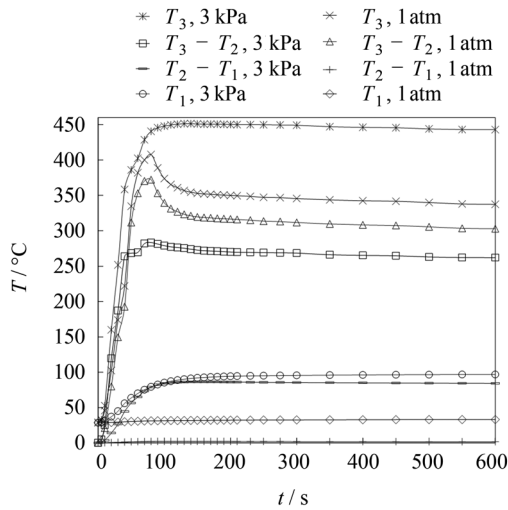


图 7 不同压力下绝缘层的温升特性
Fig. 7 Temperature rise characteristics of the wire insulation with various pressure

度. 将测点 1 和测点 5 获得的热电偶温度进行算术平均, 作为距离绝缘层表面 (测点 3) 20 mm 处同一水平轴向上测点 1 的温度, 记为 T_1 ; 将测点 2 和测点 4 的热电偶温度进行算术平均, 作为距离绝缘层表面 (测点 3) 10 mm 处同一水平轴向上测点 2 的温度, 记为 T_2 . 用绝缘层上述测点的温差 $T_3 - T_2$ 及 $T_2 - T_1$ 来表征绝缘层附近的温升特性, 如图 7 所示.

分析图 7 中绝缘层及附近点的温升情况. 测点 3 处, T_3 , 3 kPa 工况其初始温升速率 (通电 30 s 内) 大于 T_3 , 1 atm 工况的初始温升速率, 并且最终的温度值 443°C 远高于 T_3 , 1 atm 工况的温度值 337°C. 这表明低压 3 kPa 时, 绝缘层的外界散热恶化, 自然对流换热被明显削弱. 距离绝缘层 20 mm 处的测点 1 处, 在 T_1 , 3 kPa 工况下, 通电加热后其温度从初始的 28°C 逐步上升到 97°C; 而在 T_1 , 1 atm 工况下测点 1 温度则基本不变. 因此, 3 kPa 工况下绝缘层

释放的热量可以加热距离绝缘层 20 mm 处的测点; 而 1 atm 工况下该点则基本不被加热. 所以低压环境确实削弱了自然对流换热的影响, 使得绝缘层水平方向上附近区域温度有明显上升.

分析图 7 中绝缘层附近温度分布的均匀性, 可以看出测点 3 与测点 2 的温差, $T_3 - T_2$, 3 kPa 工况的初始温升速率 (通电 30 s 内) 要大于 $T_3 - T_2$, 1 atm 工况的初始温升速率; 通电 40 s 之后, $T_3 - T_2$, 3 kPa 工况的温差增长速度开始明显降低, 而 $T_3 - T_2$, 1 atm 工况的温差还继续保持原来的增长速率; 50 s 之后, $T_3 - T_2$, 3 kPa 工况的温差开始小于 $T_3 - T_2$, 1 atm 的温差; 后期 $T_3 - T_2$, 3 kPa 的温差 (262°C) 小于 $T_3 - T_2$, 1 atm 的温差 (303°C). 因此 3 kPa 下绝缘层表面和距离表面 10 mm 测点之间的温差变小.

测点 2 与测点 1 的温差, 通电后 $T_2 - T_1$, 3 kPa 的温差逐步上升, 当通电 100 s 时, 该温差值达到 86°C, 此后一直维持不变. 而 $T_2 - T_1$, 1 atm 工况的温差在整个通电过程基本不变, 只略微上升 2°C. 因此, 1 atm 下距离绝缘层 10 mm 测点和 20 mm 测点之间的温度一致, 基本没有被加热, 而 3 kPa 下这两点均被加热, 且温度有明显上升.

上述分析表明, 3 kPa 低压弱浮力环境可以有效抑制自然对流, 削弱绝缘层的散热, 促使温升加快, 同时促使水平方向绝缘层附近的温度上升更快. 这种温升变化特性符合微重力下的绝缘层温升特性^[14,16]. 因此, 可采用低压功能模拟方法来优选 SJ-10 卫星中导线特性箱有效载荷的空间实验工况.

2.3.2 绝缘层的烟气析出特性

讨论压力对绝缘层析出的烟气分布形态的影响. 由图 5 可以看出, 工况 8 的烟气生成后便基本沿着绝缘层壁面向上流动, 呈现狭长形分布, 而工况 5 的烟气在水平方向有一定的扩展, 没有贴壁流动, 总体呈现扇形分布形态. 图 5 还显示, 工况 5 的烟气扩张角 θ 约为 12°, 而工况 8 的扩张角 θ 则只有 2°. 这表明 3 kPa 低压可有效抑制自然对流作用, 使得烟气在初始喷射速度作用下在水平方向具有一定的扩散运动, 在一定程度上模拟了微重力下烟气在绝缘层表面的扩散特征^[17].

分析压力对烟气析出过程的影响. 由图 6 中工况 5 和工况 8 的烟气析出过程可以看出, 3 kPa 下绝缘层的烟气析出速度更快, 而且析出后的烟气大量地包裹在绝缘层表面, 同时烟气流动仍处于层流状态,

有序地沿着绝缘层表面移动; 而 1 atm 下生成的烟气在重力作用下快速沿绝缘层壁面上移, 并且生成的烟气流动很快从层流状态转变到湍流状态, 杂乱无章地运动. 对比微重力实验中绝缘层烟气流动规律^[17-18]可知, 与 1 atm 下的结果相比, 3 kPa 所捕获的烟气析出特性更接近微重力下烟气沿着绝缘层表面均匀扩散的特征.

综上所述, 3 kPa 低压可有效抑制浮力引起的自然对流作用, 使得烟气在水平方向有一定的扩散, 一定程度上预测了微重力下烟气的扩散特征.

3 结论

采用低压功能模拟研究了弱浮力下绝缘层厚度、种类及电流大小对着火先期特性的影响, 并讨论了压力对该特性的影响, 主要结论如下.

(1) 对于同种同厚度的绝缘层, 随着电流增大, 绝缘层的初期温升速率增大, 烟气析出更剧烈, 更易发生着火情况.

(2) 在相同过载电流作用下, 对于同种绝缘层, 随着绝缘层厚度的增加 (仍小于临界直径), 绝缘层的初期温升速率逐步减小, 最终的换热稳态温度逐步降低, 从而有利于防止绝缘层过热.

(3) 在相同过载电流作用下, 对于同厚度的绝缘层, 随着绝缘层种类的变化, 初期温升速率基本一致, 但可燃性差别显著, 其后期的温升特性和烟气析出特性差别较大, 所以为预防火灾, 航天器中需要选用抗阻燃性良好的绝缘层.

采用低压功能模拟方法获得了近似微重力下的着火先期特性. 实验结果表明, 3 kPa 的低压功能模拟能够有效地抑制浮力引起的自然对流作用, 并预测了微重力下绝缘层着火先期的温升特性和烟气析出特性, 为今后空间实验工况的选择提供了重要的参考.

参考文献

- [1] FRIEDMAN R. Testing and Selection of Fire-resistant Materials for Spacecraft Use [R]. Washington: NASA TM-209773, 2000
- [2] FRIEDMAN R. Risks and Issues in Fire Safety on the Space Station [R]. Washington: NASA TM-106430, 1994
- [3] FRIEDMAN R. Fire Safety in Extraterrestrial Environments [R]. Washington: NASA TM-207417, 1998

- [4] FRIEDMAN R, GOKOGLU S A, URBAN D L. Microgravity Combustion Research: 1999 Program and Results: NASA TM-209198 [R]. Washington: NASA, 1999
- [5] ZHANG Xiaoqian, HU Wenrui. Fire safety concerns in spacecraft [J]. *Manned Spacef.*, 2009, **2**: 22-28 (张孝谦, 胡文瑞. 载人航天器的安全防火 [J]. 载人航天, 2009, **2**: 22-28)
- [6] 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 [R]. Washington: NASA, 1971
- [7] GREENBERG P S, SACKSTEDER K R, KASHIWAGI T. Wire insulation flammability experiment: USML-1 one year post mission summary [C]//Proceedings of the Joint Launch Plus One Year Science Review of USML-1 and USMP-1 with the Microgravity Measurement Group. Huntsville: USA, 1993: 631-655
- [8] GREENBERG P S, SACKSTEDER K R, KASHIWAGI T. The USML-1 wire Insulation flammability glove box experiment [C]//3rd International Microgravity Combustion Workshop. Cleveland: USA, 1995: 25-30
- [9] KIKUCHI M, FUJITA O, ITO K, *et al.* Experimental study on flame spread over wire insulation in microgravity [J]. *Symp. Combust.*, 1998, **27** (2): 2507-2514
- [10] KIKUCHI M, FUJITA O, ITO K, *et al.* Flame spread over polymeric wire insulation in microgravity [J]. *Space Forum*, 2000, **6**: 245-251
- [11] KONG Wenjun, LAO Shiqi, ZHANG Peiyuan, *et al.* Study on wire insulation flammability at microgravity by functional simulation method [J]. *J. Combust. Sci. Tech.*, 2006, **12**(1): 1-4 (孔文俊, 劳世奇, 张培元等. 功能模拟微重力下导线的可燃性 [J]. 燃烧科学与技术, 2006, **12** (1): 1-4)
- [12] KONG Wenjun, WANG Baorui, LAO Shiqi. Study on fire precursor of wire insulation in low-pressure environments [J]. *J. Eng. Thermophys.*, 2007, **28**(6): 1047-1049 (孔文俊, 王宝瑞, 劳世奇. 低压下导线绝缘层着火先期征兆研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, **28**(6): 1047-1049)
- [13] WANG Kai, AI Yuhua, WANG Baorui, KONG Wenjun. Study on pre-fire characteristics of wire insulation by overload in weakly buoyant environment [J]. *J. Eng. Thermophys.*, 2012, **33**(4): 689-693 (汪凯, 艾育华, 王宝瑞, 孔文俊. 弱浮力下导线绝缘层着火先期特性的研究 [J]. 工程热物理学报, 2012, **33**(4): 689-693)
- [14] WANG Kai, WANG Baorui, KONG Wenjun. Study on the pre-ignition temperature variations of wire insulation under overload conditions in microgravity by the functional simulation method [J]. *J. Fire Sci.*, 2014, **32**: 257-280
- [15] WANG Kai, WANG Baorui, AI Yuhua, KONG Wenjun. Study on the pre-ignition characteristics of wire insulation in the narrow channel setup [J]. *Sci. China Tech. Sci.*, 2012, **55**: 2132-2139
- [16] KONG Wenjun, WANG Baorui, ZHANG Weikuo. Study on prefire phenomena of wire insulation in microgravity [J]. *Microgravity Sci. Tech.*, 2008, **20**: 107-113
- [17] FUJITA O, KYONO T, KIDO Y, *et al.* Ignition of electrical wire insulation with short-term excess electric current in microgravity [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2011, **33**(2): 2617-2623
- [18] TAKANO Y, FUJITA O, SHIGETA N, *et al.* Ignition limits of short-term overloaded electric wires in microgravity [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2013, **34**(2): 2665-2673
- [19] CONSTANTINE M M, DEVON W G, BOGDAN K. Soot-field structure in laminar soot-emitting microgravity non-premixed flames [J]. *Symp. Combust.*, 1996, **26**(1): 1291-1299
- [20] AI Lijiang. Tuerxun. Investigation on Soot Formation of Laminar Co-Flow Diffusion Flames [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2002: 16-28 (艾力江. 扩散火焰烟黑生成特性研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002: 16-28)
- [21] YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer. [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998 (杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1998)
- [22] ALLEN N S. Degradation and stable performance of polyolefine [M]. Beijing: Hydrocarbon Processing Press, 1988 (艾伦. 聚烯烃的降解与稳定 [M]. 北京: 烃加工出版社, 1988)