

细水雾灭火技术在载人航天器上应用前景

杨立军 廖圣洁 富庆飞 蔡国飙

(北京航空航天大学宇航学院)

摘要 为进一步探索未来大型载人航天器安全、可靠的灭火方法,对现有国内外载人航天器的灭火剂和灭火方法进行综述,并从微重力条件下火灾燃烧特点、细水雾灭火机理和国外微重力条件下细水雾灭火研究状况三方面进行初步分析和总结。分析结果表明,细水雾是一种安全、高效、环保的灭火技术,在载人航天器上具有较好的应用前景。

关键词 航天器 微重力 细水雾 灭火

未来长期载人航天器飞行、月球和火星探险等活动都将需要极可靠而有效的灭火方法来为航天员提供基本的安全保障。因此灭火技术是载人航天器安全设计中的一项重要内容,特别是对于空间站等大型载人航天器,由于其具有类似地面的大气环境,仪器设备多、功率大,甚至采用高电压体制等技术特点,存在着火的三个基本要素,即具有用作绝缘、隔热、密封、装饰及个人生活用品等各种可燃材料;有供航天员呼吸的氧气以及电器设备可能出现的过载、接触不良、短路等引起的局部超热、火花和电弧等形成的点火源。因此从整体上讲,目前的载人航天器内均存在着火的可能性。据国外资料报道^[1],1983~1992年期间,美国航天飞机舱内曾发生过5起火情事件。在载人航天的历史上曾出现过两起较大的、较特殊的火灾事故^[2]:1964年美国的“阿波罗”飞船在发射台上进行地面模拟试验时,发生火灾,3名航天员遇难。另一场大火是1997年俄罗斯“和平”号空间站内发生火灾,燃烧14min后全部可燃物耗尽而自动熄灭。

“神舟”系列载人飞船的成功发射和返回,标志着我国跨入了航天大国之列,未来将会有更多的宇航员在飞船或空间站中进行更长时间的工作,飞船或空间站的防火及灭火研究工作也会成为研究的重点。

载人航天器座舱内的特殊环境和条件,使舱内的灭火问题变得相当困难和复杂:首先,载人航天器座舱是一个密闭而狭小的空间,舱内的各种机电设

备层叠密布,航天员的操作活动空间甚小,通畅性较差,个人逃逸受到限制,可利用的灭火资源也往往是有限的。其次,是载人航天器在轨运行阶段的微重力环境条件。最后,是灭火介质对航天员的安全性、与舱内环境的相容性以及灭火后灭火介质去除问题。以上这三个特点使得针对载人航天器灭火保护技术更具特殊性,同时也提出了更高的技术要求。

1 目前载人航天器的灭火方案

载人航天器是人机共存、相互依赖的十分复杂的大系统。所以关系到系统安全大局的灭火方案的选择,必须从系统整体出发,重点考虑以下的主要原则^[3]:航天员生命安全第一,在发生火灾的情况下,必须遵循航天员生命安全第一的原则,灭火方案应不危及航天员的健康与安全,应不影响航天员继续完成必需的操作;灭火迅速高效,灭火应迅速高效,不使小火蔓延成大火,尽量减少火灾引起的破坏和损失,并能有效地防止死灰复燃。具有较好的系统相容性,灭火方案在灭火过程中或灭火后,应尽可能不损害或影响其它系统或设备的正常工作。特别要与环境控制和生命保障系统的净化系统具有良好的相容性,要有利于用该系统进行灭火时产生的有害有毒气体的排除。实际上,航天器中一直都安装灭火器,从配置灭火器的种类看主要有以下四种^[4]:

(1) 水枪灭火

最初,美国在载人航天器中使用的灭火器就是航天员喝水用的饮水枪(见图1)。

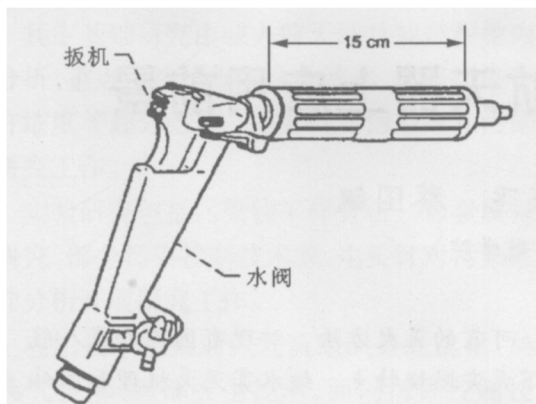


图 1 “阿波罗”飞船灭火器

当舱内发生火灾时，航天员就用饮水枪对准火焰根部或者阴燃处喷射，以达到灭火的目的。这是一种简单原始的灭火方法，虽然可以有效地灭火，但是主要问题是灭火用水量较大，大量的残留水容易对电子设备造成危害。

(2) 泡沫灭火器

泡沫灭火剂(见图 2)对火焰和表面燃烧都是有效的，泡沫喷洒后附着在燃烧表面，使燃烧和助燃剂隔离灭火，缺点是灭火后泡沫清除非常麻烦。

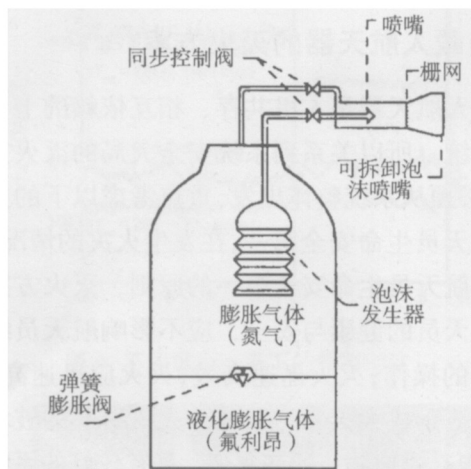
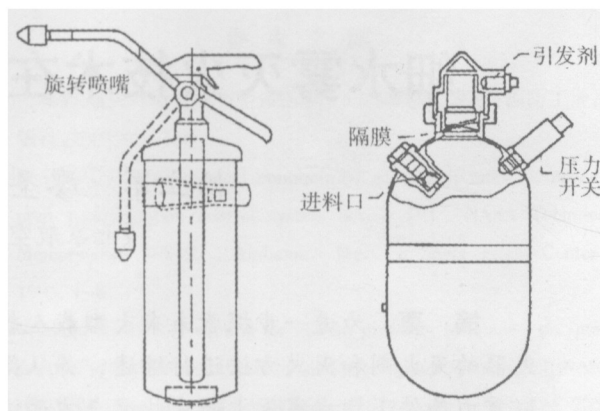


图 2 “天空实验室”泡沫灭火器

(3) 哈龙 1301 灭火

在未发现大气臭氧层的巨大破坏空洞之前，卤代烷(俗称哈龙, Halon)是最有效的灭火剂，在扑灭火灾中起着重要的作用。哈龙 1301 灭火剂在美国的载人航天器上服役几十年(见图 3)。

其灭火机理是溴化三氯甲烷破坏燃烧的链锁反应。我国载人飞船一期工程由于航天员较少、在轨时间短，发生火灾的可能性较小，对于飞船的灭火技术



(1) (2)

图 3 航天飞机哈龙 1301 灭火器

- (1) 便携式:携带哈龙 3kg;工作时间 30s
- (2) 固定式:携带哈龙 1.7kg;工作时间 1s

没有进行专门的研究，仅根据国外的有关经验采用卤代烷灭火器。哈龙灭火剂的优点是效率高，在空气中达到 5% 体积浓度即可。缺点是对阴燃火的扑灭效果不好，而阴燃很可能是微重力条件下火灾传播的主要方式，此外哈龙在灭火后还可能产生有毒的 HB 和 HF 等物质，危害航天员的健康。即使将火扑灭，由于其存在一定的毒性、污染空气等问题，航天员也可能需要尽快返回地面。哈龙灭火剂与氧气结合之后会对臭氧层产生极大的破坏，比氟利昂的破坏能力还要强出 10 倍以上，蒙特利尔协定将在 2010 年全球范围禁用卤代烷灭火剂。

(4) 二氧化碳灭火剂

二氧化碳灭火剂具有成本低、实用、可靠。而且没有哈龙灭火时的副产物的出现等优点，国际空间站美国舱段和俄罗斯舱段均采用了二氧化碳灭火系统。图 4、图 5 为国际空间站美国舱段二氧化碳灭火系统示意图。

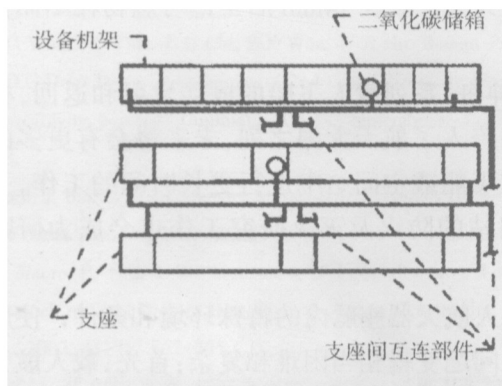


图 4 国际空间站美国舱段二氧化碳灭火系统

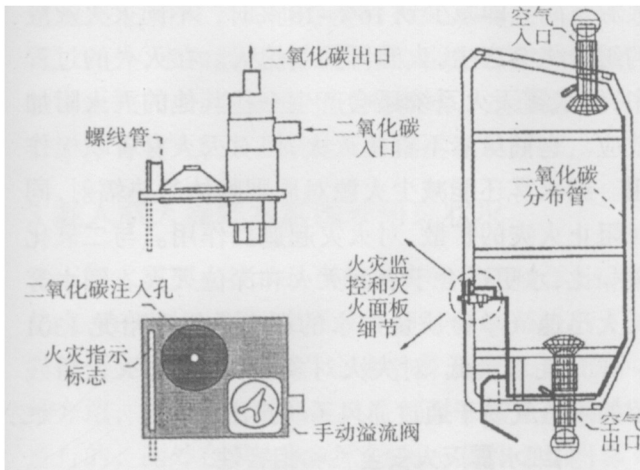


图 5 国际空间站美国舱段二氧化碳控制和分配示意图

二氧化碳的缺点是效率低, 浓度较高时有窒息作用(17%以上可以在 1min 致死, 而国际空间站所推荐的灭火浓度为 50%), 含有二氧化碳浓度这样高的气体对人是致命的, 用二氧化碳灭火后, 先将舱内部分气体排除舱外, 剩余的可利用环保系统的净化装置(涉及到排除装置的能力), 但是量太大很难去除。此外储存液态二氧化碳需要耐高压的沉重钢瓶, 携带起来很不方便, 因此应用于载人航天器并不是最佳选择。

惰性气体灭火也曾经被纳入人们的考虑范围, 但是这种灭火方案与二氧化碳灭火方案有着类似的缺点。

根据国内外的研究经验载人航天器中灭火方法可以分为两类, 一类是灭火剂灭火, 另一类是座舱减压灭火(见图 6)。

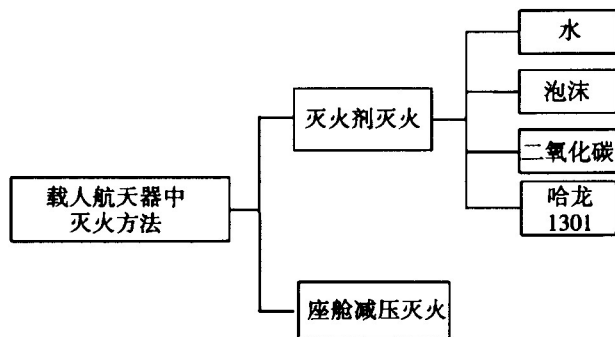


图 6 载人航天器灭火方法

座舱减压灭火是通过设在座舱舱壁上的排气泄压阀将舱内大气部分或全部排向太空, 使舱内迅速变成低压低氧而灭火。在灭火的同时, 还可将舱内烟雾微粒及有害气体排除。但这种方法存在诸多技术

问题, 是一种不得已的选择。至于灭火剂灭火, 根据前面的介绍, 但都不尽如人意。因此探索无毒、无污染灭火剂和有效的灭火方法并开展微重力条件下新型灭火技术的研究工作将为我国下一步的空间探索及空间站建设奠定基础, 具有重要的意义。

2 载人航天器水灭火技术的可行性

水是人类使用的最古老的灭火剂, 其灭火机理主要是依靠蒸发吸热和变成水蒸汽后的隔氧窒息作用。随着卤代烷替代的迫切要求, 雾化水—细水雾灭火技术成了消防行业的“宠儿”, 大量研究表明细水雾可以应用在传统认识不能使用水灭火的各种场所, 如通讯及计算机机房内的电器火灾、图书及档案馆的纸张火灾和各种闪点的油类火灾等等。细水雾按照形成方式和雾滴直径的不同也出现了各种各样的形式, 如高压、中低压、单相、两相流细水雾及超细水雾灭火系统^[9]。下面从微重力条件下的燃烧特点、细水雾的灭火机理和细水雾灭火安全性和相容性三方面来论证在载人航天器上细水雾灭火的可行性。

(1) 微重力条件下的燃烧特点

人们很早认识到重力对燃烧过程的影响。微重力条件下的燃烧具有以下特点: 自然对流几乎消除, 可以观察到静止和低速流动的燃烧; 重力沉降几乎消除, 需要研究稳定的、自由悬浮液滴、颗粒、液雾和粉尘的燃烧; 浮力的消除, 使得燃烧的时间和长度尺度增大^[10]。国外对微重力下火的发生、发展、蔓延和燃烧特性已作了大量的分析和试验研究^[2,7,8,9,10]。地面条件下微重力模拟试验以及在太空中航天器上进行微重力试验表明: 在微重力的寂静环境里, 火焰接近球形, 火焰的扩散和传播速度较低; 低的热质传输, 低效和低温燃烧, 一般呈不发光或发光暗淡的阴燃; 可燃氧浓度的下限值较常重力高。

微重力条件下火焰的能见度降低, 静止环境中, 火焰在能见度大幅度降低以前, 经历一个蓝色火焰阶段, 这是由于浮力显著减少, 扩散成为主要传递机制, 使得停留时间增大、碳黑形成增强、氧化剂梯度减小、辐射热损失增强、化学动力学可能发生变化从而影响热释放。另外由于不存在浮力诱导的不稳定性, 微重力下的火焰非常稳定, 不出现常重力下经常可以看到的闪烁现象^[16]。火焰能见度低, 但火焰面温度仍可高达 880℃, 舱内的电缆线及其它可燃物完全

可能被引燃；在舱内存在通风系统的条件下，如果燃烧区风速达到 1cm/s 量级，蓝色火焰就可能转变为可见火焰，同时，一些在静止环境中不能燃烧可燃物，通风条件下却可以燃烧；不同材料在微重力条件下的燃烧特性不同，并直接导致各种探测器的响应方式不同。载人航天器座舱里的环境控制与生命保障系统，如气体净化和通风散热设备使舱内气体强迫流动，舱内并不是寂静环境。舱内气流的实际存在，使上述结果将会有明显的不同程度的变化，从而也影响灭火方案的选择。在微重力条件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速，抑制燃烧。

从火灾的燃烧特点来看，微重力条件下火灾较常重力条件下要弱，火灾更多体现为阴燃火灾，由于载人航天器电器较多，长时间的在轨飞行，电器阴燃火灾应该是灭火的重点。

(2) 细水雾灭火机理

细水雾的灭火机理主要是冷却效应和窒息效应(见图 7)。其冷却效应表现在：当水被分解成许多细小的水滴时，其结果产生了巨大的作用表面积，它将吸收火灾中的热量，它破坏燃料的热反馈冷却火焰表面，同时雾滴会穿透火焰，能够大大提高灭火效率。例如，将 1L 水从 20° 升至 100℃ 需要吸收 335kJ 的热量，再将其转换成水蒸气需要吸收 2257kJ 的热量。因此水是在灭火中吸收热量的最佳灭火介质。其窒息效应表现在细水雾通过蒸发，水的体积增加到 1680 倍。它稀释了火源附近空气中的氧气，在这个过程中灭火介质限制了火源向外的传输，细水雾的扩散不仅可进入火源区而且可防止氧的流入。在细水雾潜在的能量充分释放后，完整的火源被藏在蒸发的水中，以便火灾能在几秒钟内窒息。通常空气中氧的浓度约 21%，当氧的浓度从

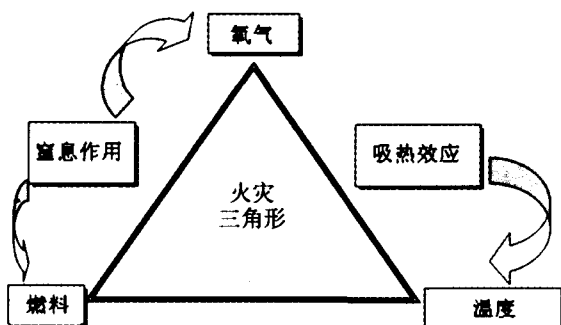


图 7 细水雾灭火机理

火源空间立即减少到 16%~18 % 时，不同灭火效应的组合将会产生，火源可抑制熄灭。在灭火的过程中，细水雾灭火系统还会产生一些其他的灭火附加效应。它们虽然不直接灭火，但对灭火有着积极作用。细水雾还能减少火源对周围物体的热辐射，同时阻止火灾的扩散，对火灾起遮挡作用。与二氧化碳相比，水更适合于表面灭火和深位灭火。细水雾灭火迅速（单位质量的水的灭火效果和哈龙 1301 一样）、耗水量低、对失火对象破坏性小，灭火后残留的水蒸气易于通过通风系统排出。

(3) 细水雾灭火安全性和相容性

人们对水灭火存在一个最大的疑问就是水的导电性问题，细水雾已不是传统意义上的水，它是分散的小水滴，这些小水滴并不连接在一起，不存在导电问题，国内外的大量实验已证明了这一点。国内天津消防所针对水喷雾系统灭电气火灾进行了一系列试验^[10]，试验条件为水电阻率 2500Ωcm，室温 28~30℃，湿度 85%，气压 0.1Mpa，电绝缘性能试验数据如表 1 所示。试验结果表明水喷雾灭电气火灾是安全的。并且水雾喷头工作压力愈高，水雾滴直径愈小，泄漏电流也愈小。

表 1 微安表测得的电流数值

喷头种类 \ 水压	0.2MPa		0.35MPa		0.45MPa		0.6MPa	
	总电流	泄漏电流	总电流	泄漏电流	总电流	泄漏电流	总电流	泄漏电流
ZSTWA-80	227	80	208	61	197	50	190	43
ZSTWA-50	183	59	176	52	173	49	173	49
ZSTWA-30	133	18	125	10	120	5	172	2
ZSTWB-80	173	53	164	44	148	28	146	26

对于担心导电问题，可采用的另一个方案是采用去离子水作为灭火剂，去离子是不导电的，可以保证电器和航天员安全。

另外，据统计，在重大火灾事故中，70% 的死亡人员不是被烧死而是被烟气呛死，因而烟气是对人身安全最为严重的威胁。细水雾灭火系统在灭火过程中，具有独特的烟气刷洗作用，无数的细水雾雾滴与烟尘和有毒气体微粒结合，沉积或吸附到壁表面，可大幅度降低烟气对人的危害，保护人身安全——

这也是它相对于其他类型的灭火系统最显著的优点。此外,水和载人航天器生保系统良好的相容性,使得水在灭火后的处理也变得简单,这也是国外看好水作为载人航天器最佳灭火剂的主要原因。

3 载人航天器细水雾国外研究状况

细水雾灭火技术是当前火灾和消防科学的研究热点,在工业、民用、交通和军事等领域都进行了大量的研究工作,文献资料也非常多,这里不再进行详细介绍,但是所有的研究几乎都是在常重力条件下进行的,国外在载人航天器微重力条件下细水雾灭火研究也是刚刚开始起步。

美国科罗拉多 Mines 学院对细水雾用于在各种假定的火灾环境以及微重力环境下灭火的试验以及数值研究进行了可行性研究^[11],微重力试验在美国国家航空航天局(NASA)KC-135 飞行器上进行。在试验中将测量温度、气流、气体成分、烟和细水雾浓度。评估了细水雾对在太空船上经常发生的各种类型的火灾的发展和扑灭的作用。结果将与在国际空间站上目前使用的二氧化碳的灭火特性进行比较,试验目前仍在进行中。

Abbud-Madrid 等人在无重力情况下对预调混和火焰传播的作用进行了初步研究^[12]。研究了在各种等比情况下的丙烷-空气混和物着火后,细水雾对火焰蔓延的抑制作用。液滴尺寸和水的浓度对层流火焰速度和火焰形状的作用效果,被当作衡量火焰抑制功效的标准。微重力试验中的测量和定性观测清楚地表明了细水雾对减缓火焰速度和扭曲火焰形状以及改变火源点辐射的效果。

Abbud-Madrid 等人在常重力状态下对细水雾扑灭飞船中电火的效果进行了初步研究^[13]。细水雾灭火试验包括将一根很热的金属丝放入箱子中,用来模拟航天飞机中部上锁的甲板。使用不同液滴的分布率和分布状态的细水雾,来进行直接和间接的灭火。研究表明,细水雾灭火效率直接受液滴尺寸的影响,对在障碍后面燃烧的火焰来说需要延长喷射时间和使用更大的水量。熄灭时间和水量随着液滴尺寸分布的减小而减少。对于高速、大液滴尺寸的喷射想要绕过障碍并扑灭障碍后面的火焰是无效的。目前实验的努力方向转移到低速、良好雾化细水雾技术的研究,这种技术能够覆盖整个被确认的空间

并且能够有效地灭火,即使是火焰在十分复杂几何结构的空在许多障碍后面燃烧。最初研究结果表明,用良好雾化的细水雾能够对燃烧金属丝灭火,并可以大量减少灭火的时间和用水量。这些可靠的结果提供了细水雾在飞船上可能遇到的火焰类型进行灭火的实用性。对细水雾灭火技术可行性的实验和数值研究将在下一个项目中继续。

为了研究微重力条件下细水雾灭火的机理,NASA 在“哥伦比亚”号航天飞机上进行的 STS-107 细水雾灭火试验任务^[14,15],搭载装置见图 8、图 9。

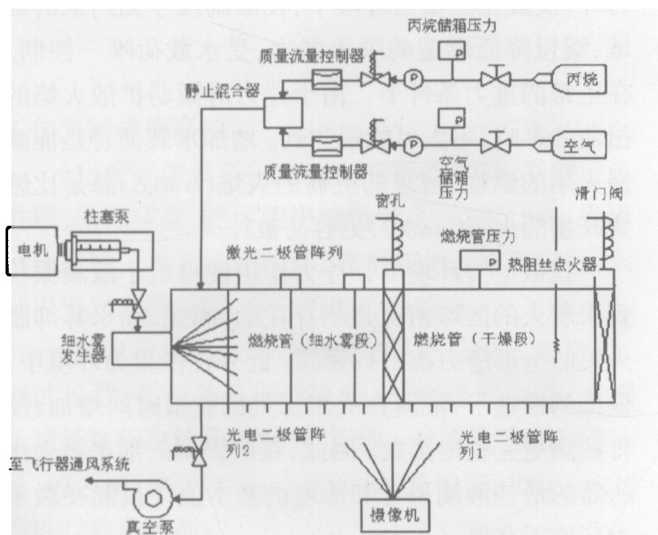


图 8 STS-107 试验设备框图

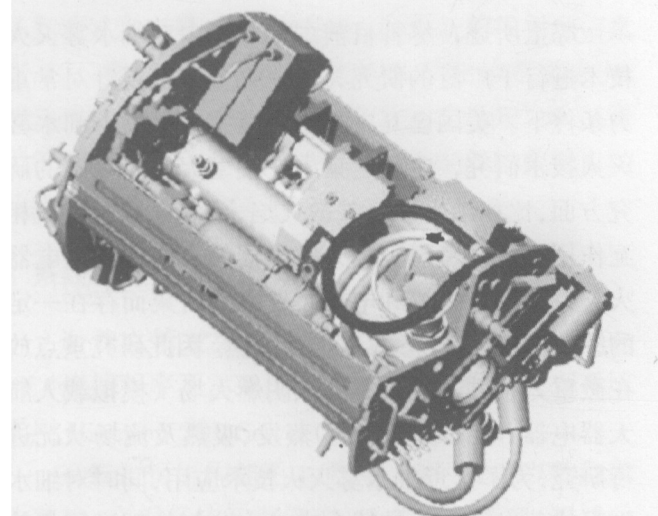


图 9 STS-107 细水雾灭火试验

搭载实验研究了液滴尺寸分布及水的浓度对在扩散中的丙烷-空气预混的燃烧速度的影响。利用薄片状火焰的速度和形状的变化来衡量(细水雾)灭

火的功效。在四种不同的燃料-空气等价比(0.6,0.7,1.0,1.3),两种液滴尺寸分布(算术中间直径 $20\mu\text{m}$ 和 $30\mu\text{m}$)以及水载荷范围为 0.0~0.1(测量的水的质量分数)的情况下,进行了 32 次试验。在微重力环境下,喷注产生的细水雾形成了均匀分布的静态液滴云团。在细水雾作用下,具有抛物形火焰锋的贫火的扩散单调地减缓,形成稳定的燃烧速度。在燃速最低时,由于液滴逐渐减小,小的液滴尺寸分布总是比大液滴尺寸分布能更有效地抑制贫火的扩散。实验观测到,在燃速更小时液滴尺寸也变小。另外,发现在微重力环境下,在液滴尺寸无约束的区域,缓慢降低燃速的灭火能力,受水载荷唯一控制,在正常的重力条件下,由于浮力对微弱扩散火焰的扭曲的影响,不太可能观测到。增加水载荷总是能减慢火焰的燃烧,贫乏的更弱的火焰($\varphi=0.6$)总是比燃烧旺盛的火焰($\varphi=0.7$)更容易被扑灭。

在微重力环境下,浮力作用使得最小液滴漂移到未着火区域情况是不存在的,因此,细水雾抑制火灾的全部潜力都得到发挥。此外在微重力环境中,极低的燃速下,液滴在火焰锋处的驻留时间增加,使得液滴更完整地蒸发。因此,在所提到的细水雾灭火所需的最佳液滴尺寸和浓度的基本值,只能在微重力环境下获得。

4 结束语

综上所述,尽管目前国际和国内对细水雾灭火技术进行了广泛的研究,但研究方向主要针对常重力条件下。美国已开展的一些微重力条件下细水雾灭火技术研究,主要是集中在模型火焰更基础的研究方面,比如细水雾与扩散火焰、预混火焰等模型相互作用研究。考虑到载人航天器的火灾主要是电器火灾,大部分电缆和电器布置都是密集而存在一定的缝隙,而且火灾形式主要为阴燃。因此研究重点放在微重力条件下细水雾喷入阴燃火场(模拟载人航天器电器、电缆场所布置)蒸发、吸热及流场状况进行研究,为了接近细水雾灭火技术应用,同时对细水雾吸热蒸发灭火后的残余水及水蒸气处理进行相关

研究工作,以望在我国的载人航天计划二期及更远的月球和火星探测计划中得到应用。◇

参 考 文 献

- [1] Robert Friedman and Kurt R Sacksteder. Fire behavior and risk analysis in spacecraft[R]. NASA-TM-100944, N89-10111
- [2] Spacecraft fire safety[R]. NASA, CP-2476
- [3] 沈学夫. 载人航天器的防火与灭火技术[J]. 中国空间科学技术, 1994 第 1 期
- [4] Fire suppression in human-crew spacecraft [R]. NASA-TM-104334, N91-21182
- [5] 杨立军. 超细气水雾灭火机理研究. 消防科学与技术[J]. 2003 年第 1 期
- [6] Ivanov A V, et. al. Experimental Verification of Material Flammability in Space[R]. NASA CR- 1999-209-209405, 1999
- [7] Friedma R, Urban D L. Progress in fire detection and suppression technology for future space missions[J]. AIAA-2000-5251, 2000
- [8] Friedma R, Jackson B, Olson S. Testing and selection of fire-resistant material is for spacecraft use[R]. NASA TM-2000-209773, 2000
- [9] Hirsch D B, Beeson H D, Friedma R. Microgravity effects on combustion of polymers[R]. NASA-2000-209900, 2000
- [10] GB50219-95, 水喷雾灭火系统设计规范[S], 中华人民共和国公安部, 北京, 1995
- [11] Delplanque J P, Abbud-Madrid, A, et. Al. Feasibility study of water mist for spacecraft fire suppression [C]. Proceedings of the Halon options Technical Working Conference (HOTWC-04). The University of New Mexico, Albuquerque, NM, May 2004
- [12] Abbud-Madrid, et. Al. Effects of water mists on premixed flame propagation in a buoyancy-free environment [C]. Proceedings, Halon Options Technical Working, Conference, Albuquerque, NM, pp. 295-300, 1999
- [13] Abbud-Madrid A, et. Al. Study of water mist suppression of electrical fires for spacecraft applications: normal-gravity results [R]. NIST SP 984-3. Paper 09; HOTWC 2005
- [14] A Abbud-Madrid, J T Mckinnon, E P Riedel, The water-mist fire suppression experiment: from sts-107 to the combustion integrated rack[C]. AIAA-2001-5083
- [15] A Abbud-Madrid, F K Amon, J T Mckinnon, et. Al. The mist experiment on STS-107: fighting fire in microgravity [C]. AIAA 2004-288
- [16] 张夏. 微重力燃烧研究进展[J]. 力学进展, 2004, Vol.34, No.4