

# 微重力流体管理在航天工程中的应用

康琦<sup>①</sup> 侯瑞<sup>②</sup>

①研究员,②博士生,中国科学院力学研究所国家微重力实验室,北京 100080

关键词 空间探索 微重力流体管理 工程应用

本文详细解释了微重力以及微重力流体管理的概念,阐明了微重力流体管理在推进系统、热控制系统、环境控制与生命保障系统、电源系统中的工程应用,指出了微重力流体管理面临的新挑战。

## 1 人类航天活动与微重力环境

航天工程是庞大、复杂的系统工程,涉及到了诸多学科知识和工程技术领域。本文所主要阐述的微重力流体管理来源于航天工程需求,是航天工程关键的工程技术之一,在航天器多个分系统中有广泛应用。

人类的航天活动主要包括了三大领域<sup>[1]</sup>:卫星应用、载人航天和深空探测。为了满足航天飞行目的,人们设计制造了通信卫星、气象卫星、载人飞船、航天飞机、火星探测器等各式各样的空间飞行器,这些飞行器都不可避免地要面对一种与在地球上截然不同的受力环境——微重力环境。

微重力代表一种受力环境即在该环境中的有效重力水平极低<sup>[2]</sup>。按照英文 Microgravity 的原意,微重力应该指该环境中的同一物体的重力水平为地面重力的 $10^{-6}$ 倍。目前许多广义的理解也把微重力理解为微小重力,有时也有低重力之称。但是,微重力不等于重力水平严格为零。微重力通常有以下3种典型的表现形式:①在一个小星球引力场的环境中,物体静止或低速运动,例如月球、火星表面是一种低重力环境,其重力水平约分别是地球重力水平的1/6和1/3;②在地球(或星球)引力场的环境中,物体仅在在重力方向运动,运动加速度接近重力加速度,例如在地球重力场中,自由落体舱内;③在地球(或星球)引力场的环境中,物体绕地球(或星球)做圆周运动,物体在垂直重力方向作近似匀速运动,例如人造地球卫星内部。也有这三种运动的组合形式。在以上三种情况下,其共同的特点是如果用实际的弹簧测力计称量物体的重量时,其显示的数值(表观重力)小于该物体静止在地球表面时直接称量的数值。根据牛顿第二定律, $G_{引} - F_{弹} = ma$ ,其中 $G_{引}$ 是物体受到的重力(或引力), $F_{弹}$ 是弹簧测力的拉力, $m$ 是

物体的质量, $a$ 是物体运动的加速度。因此表观重力 $F_{表} = G_{引} - ma$ 。从物理学的理论来讲,第一种情况形成微重力的原因是由于万有引力的直接降低(即 $a$ 近似为零,而 $G_{引}$ 有极大的减小);第二和第三种情况形成微重力的主要原因是由于物体在引力方向以引力加速度运动(即 $a$ 近似等于 $G_{引}/m$ ;在地面 $G_{引} = mg_0$ , $g_0$ 就是我们常说的地球重力加速度,它的数值等于 $9.8\text{m/s}^2$ )。例如在地球上空1000 km高的轨道上飞行的卫星,其受到的地球引力仍有地面引力的3/4,引力的减小远没有使卫星达到微重力状态;然而,卫星圆周轨道运动的向心加速度方向就在引力方向,向心加速度的大小近似等于引力加速度,这使卫星环境中微重力水平可以达到 $10^{-3}g_0$ 以上。在物理学中,“ $-ma$ ”被称为“惯性力”。物体做圆周运动时,该惯性力被称为“惯性离心力”。因此,若重力 $G_{引}$ 与该环境运动加速度 $a$ 引起的“惯性力”或“惯性力离心力( $-ma$ )”相抵消,而达到表观重力(弹簧秤的示数)减小,物体就处于微重力状态。一旦环境的加速度发生变化,则微重力水平也将发生变化。当人们把空间飞行器发射到地球近地空间,并绕地球作周期运动时,飞行器中的“失重”环境就是这种情况。事实上,由于各种次级力的作用,绝对的“失重”环境是很难获得的。这里我们应该清楚了,“失重”是指物体失去重量,而不是失去重力。重量是物体对其周围相接触的物体或介质所表现出来的作用力;重力则是地球(或其他天体)对物体的引力。重量与重力(引力)有联系,又有区别。重量消失,不等于重力或引力消失。

判断物体是否“失重”(即是否处于微重力状态)一个最重要的标志是,物体内部各部分、各质点之间没有相互作用力,即没有拉、压、剪切等任何应力。平衡是我们最常见的物体的一种运动状态。但是,力的平衡与“失重”完全是两回事。例如,人站在地上,躺在床上,乘坐飞机等速飞行等,都是处于力的平衡状态,但并不“失

重”。因为在这些情况下,人体内部各部分之间都存在相互的作用力。航天员在地面浸沉在水池中做“模拟失重”试验。这种水下试验,其实并不能真正模拟失重。因为人在水中,是重力与浮力作用而保持平衡。只是平时人们所受到的支撑力只作用在人体很小的表面,例如,站立时,脚底受力;躺着时,半个身体表面受力;沉浸在水中时,整个身体表面都受力,但是头、躯干、四肢以及身体的内脏、器官等都是重量的,它们相互之间存在挤压或拉牵等作用力。真正的失重模拟,应使人体各部分特别是体内器官重量消失。在这种情况下,人的前庭器官中的耳石由于失重,不再与周围的神经细胞接触向中枢神经传输信号,从而丧失定向功能。前庭器官与人体主管呼吸、消化、循环、排泄、发汗等功能的植物神经系统有密切关系。所以,一旦前庭器官不起作用,身体内脏之间正常的相互作用力消失,就会引起航天员产生头晕、恶心、呕吐等所谓“运动病”的症状。航天员在地面水池中做模拟试验时,是不会出现这种“运动病”症状的。倒是人们在乘电梯开始下降的瞬间,或是在乘飞机飞行中,由于气流扰动使飞机突然下沉时,敏感的乘客往往会有心慌、头晕、恶心等不舒服的感觉。这就是瞬间的“失重”引起的。人们开展科学研究时,通常用以下5种方法获得微重力环境:

第一种是落塔(或落井)。在高塔的顶端将实验设备自由下落,并采取措施,尽量减少空气阻力,使落体的加速度接近于地面重力加速度 $g_0$ 。一般这种设备的微重力水平可以达到 $10^{-4} \sim 10^{-6} g_0$ ,微重力时间由自由落体的高度决定,通常是2~10秒。

第二种是高空热气球。热气球上升到一定高度后,将携带的舱体释放,使实验设备自由下落,可获得十几秒到几十秒的微重力时间。一般这种设备的微重力水平可以达到 $10^{-3} \sim 10^{-4} g_0$ 。

第三种方法是飞机作抛物线飞行。飞机以 $45^\circ$ 角快速爬高,关闭发动机以后,飞机继续升高到最高点后以 $45^\circ$ 角缓慢下降,这样飞机的轨迹就构成了抛物线。当飞机沿抛物线飞行时,可产生大约15~30s的微重力时间。一般这种设备的微重力水平较低,仅有 $10^{-2} \sim 10^{-3} g_0$ 。

第四种方法是利用探空火箭。火箭在空间关机后,试验级与推进级分离,试验级通常以抛物线轨道在大气层外滑行。从试验级分离到再入大气层之前,可获得几分钟到十几分钟微重力时间。一般这种设备的微重力水平可以优于 $10^{-4} g_0$ 。

第五种方法是轨道航天器。轨道航天器有卫星、飞船、航天飞机和空间站等。在航天器空间飞行期间,可

以提供长时间的微重力环境。一般这种设备的微重力水平可以达到 $10^{-3} \sim 10^{-6} g_0$ 。

微重力环境下重力水平极低甚至达到可以忽略的地步,重力作用基本消失,液体表面张力、内聚力等次级力占主要地位,所以处在微重力环境中的物体行为表现就会与地面上明显不同,尤其是流体物质(液体和气体)。人和物体会处于悬浮状态,与舱壁很小的作用力就能把人弹得很远(如图1,见彩插1)。在地球上用以计算浮力大小的阿基米德定律将不在适用,固体介质不论密度大小均能在液体内部任意地方悬浮(如图2,见彩插1)。液体在表面张力作用下缩为球形,并且气泡可以在水泡中悬浮而不排出(如图3,见彩插1),这种情形只能在微重力环境中发生。在微重力下,烧水不再是一件容易的事情。如图4(参见彩插1)所示,在地面上烧水时,容器下底面生成的气泡会上浮自然排出,底部液体受热温度升高密度减小形成密度差,下层液体向上运动形成浮力对流,传热更快、加热更均匀。微重力环境下,会发生两个特殊现象:①液体自身的浮力对流消失而不能把气泡带到上部,②气泡几乎不再受到液体的浮力,因此也不会因浮力作用下上浮排出,反而会因气泡表面张力不均匀发生气泡由液体冷端向热端移动的热毛细迁移现象。在上述二点的共同影响下气泡会长时间停留在温度较高的加热端并逐渐合并为大气泡,造成热量传输不畅,上部的液体就很难被烧开。从以上的几个例子,可以清楚地看到:微重力中的流体行为特征与常重力中的有显著差异,常重力环境中的部分科学规律不再适用于微重力环境。要控制微重力中流动的行为,满足人类不断发展的空间探索活动需求,就必须对微重力中流体的特征(比如液态燃料、水、气等)进行系统研究,掌握其流动规律。在此应用背景需求下,一个新的科学技术分支应运而生——微重力流体管理。

## 2 微重力流体管理的定义解释

通常说的微重力流体都是指处在空间环境中的流体,所以微重力流体管理(Microgravity Fluid Management)也称作空间流体管理(Space Fluid Management),两种说法含义相同,即:对微重力下的流体(液体、气体或两相流)进行储存、控制和传输,从而使某系统能够运行并完成特定的功能。比如推进剂的补给、废水的回收处理等。

按照流体介质即管理对象不同可以分为:常规流体管理和低温流体管理。常规流体包括常规液体燃料、水、冷却介质等,低温流体则指低温的液体燃料如液氧、

液氢。

从科学研究角度来看,微重力流体管理是多个学科知识的综合体,其中包含了多个微重力研究课题,比如微重力下流体界面行为、微重力气液两相流及传热研究、微重力下蒸发冷凝问题等重要的科学课题。

从工程应用角度出发,微重力流体管理广泛应用于空间飞行器的四大系统:推进系统、热控制系统、环境控制及生命保障系统、电源系统。主要体现在许多具体的工程技术问题上:推进系统中常规/低温液体燃料的存储、传输、获取、气液分离、晃动控制、质量监测、压力控制等如图5(参见彩插1)所示<sup>[3]</sup>;热控系统和电源系统中的气/液单相或两相流的传输、气液分离以及相关的传热技术等;环境控制及生命保障系统中空气循环流通、污染气体排放、宇航服冷却液的循环、生活用水的存储传输、废水的收集处理等。本文下面一节的内容将从工程应用的角度,介绍微重力流体管理在四个系统中的具体应用。

### 3 微重力流体管理在航天工程中的应用

航天工程涉及到了多个系统,其中涉及到微重力流体管理的主要有四大系统:推进系统、热控制系统、环境控制及生命保障系统、电源系统。需要说明的是根据飞行目的不同,每种类型的空间飞行器的系统组成不同,并不是都一定含有这四个系统,比如通信卫星或火星探测器上就没有环境控制及生命保障系统。

#### 3.1 推进系统

推进系统包括运载火箭的推进系统和空间飞行器的推进系统,前者主要负责把飞行器成功发射到预定轨道,后者主要负责飞行器在轨时的姿态控制、轨道的维持修正和变轨(加速、减速),两类推进系统是飞行器发射和空间飞行中的动力来源。不同之处在于空间飞行器的推进系统通常在微重力条件下工作,而运载火箭的推进系统大部分时间处在重力或有加速度的环境中。微重力流体管理主要应用在空间飞行器的推进系统中液体推进剂的管理。目前空间飞行器常用推进系统的组成部分包括:火箭发动机、液体推进剂贮箱、各种管路以及控制部分等。这和我们汽车的动力系统组成部分相似,但是流体的管理系统却截然不同。在地球上,流体管理系统需依赖于重力。例如,在汽车里,油路管道接到燃油箱的底部,重力作用将燃油置于油箱底部,燃油泵把它通过油管送到发动机。但是在微重力环境中,重力的作用几乎消失,液体的表面张力、内聚力和附着

力等分子间作用力起主导作用,液体的行为就变得难以预料了。液体推进剂不再处在储箱底部而是沿壁面分布在油箱内部的四周,气泡悬浮于液体内部而且位置是随机的。在这种情况下,有可能将气体通过油路送到火箭发动机,造成发动机工作不稳定影响飞行的安全,所以我们对推进剂贮箱进行特殊设计以保证推进剂的供应不夹带气体且满足推进系统的流量要求。

首先解释说明一个液体在微重力下的特殊现象,目前常用的推进剂贮箱就是基于此现象隐含的原理设计制造的。如图6(a)是常重力下方形横截面容器中液体的界面形貌,中间液面是平的,但在容器内角处的液面会弯曲上翘,这是与壁面浸润的液体在接触壁面由于表面张力作用产生的毛细现象<sup>[4]</sup>。把角的局部放大之后可以看到,液面的弯曲半径越靠近棱角越小。另外,物理常识可以知道,弯曲液面下的压强与平液面的压强是不同的。比如用细管吹肥皂泡后,必须把管口堵住,泡才能存在,否则就自动收缩了。这是因为肥皂泡是弯曲的液膜,液膜两边有压强差,泡内的压强大于泡外的,这个压强差( $\Delta P$ )称为附加压强。在流体力学或界面化学中有个基本公式——拉普拉斯公式,用来描述弯曲液面两侧压强差 $\Delta P$ 与液体表面张力及弯液面曲率半径 $R$ 的关系,当弯液面为球形面时,表达式可以写成 $\Delta P = 2/R$ 。凹液面时,气相压强大于液相;凸液面时,液相压强大于气相。由拉普拉斯公式可知附加压强使弯曲液面内外压强不等,曲率半径越小曲面两侧压力差越大,与液面曲率中心同侧的压强恒大于另一侧。因此,可以推知图6(a)中液体内压强 $P_1 > P_2 > P_3$ 即内角处弯液面内的液体存在向上的压强梯度。在常重力环境中,液体的静压力维持了液面平衡,但是当进入微重力环境后,液体静压力几乎消失,压强梯度就会驱动着液体沿内角爬升,如图6(b),形成微重力下的毛细力驱动流或叫做表面张力驱动流。在满足一定条件(即 Concus-Finn 条件,见参考文献5,这里不在详述)的情况下,液体在微重力环境中会沿内角无限地爬升,不存在稳定的界面构型。所以,内角就相当于提供了液体流动“管道”。正是基于上述的原理、利用这种“管道”,科学和工程师们设

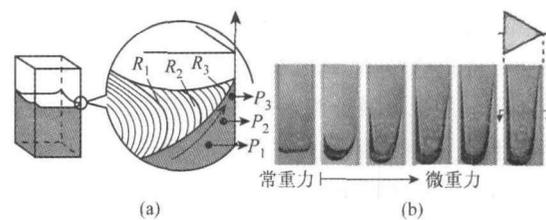


图6 微重力毛细爬升机理

计出了目前普遍用的板式表面张力贮箱。

板式表面张力贮箱是目前国际上主流飞行器采用的推进剂贮箱<sup>[6]</sup>,图7是表面张力贮箱的示意图。这种贮箱主要由导流板和蓄液器等板式构件构成。一般来说条状的导流板从贮箱一端延伸到液体出口,导流板靠近贮箱壁面并与之垂直形成夹角。导流板的主要作用是把液体“导向”到贮箱出口处,保证推进剂排空。蓄液器,由径向分布的金属片组成,金属片间形成夹角,能够蓄留一定量的液体,它能提供发动机瞬间点火所需要的推进剂,并具有在微重力环境下的重复填充能力。由于板式管理装置仅仅是由一些结构简单的板、槽构成,其结构非常简单,重量轻,可靠性高,长期相容性好,而且制造工艺简单,得到了广泛应用。还有一类是网式表面张力贮箱,它通过毛细网的蓄留能力实现对液体的管理,也可以二者结合得到新型的板网混合的推进剂管理装置<sup>[7]</sup>。另外还有囊式贮箱、金属膜盒式贮箱等适用于不同的飞行器。

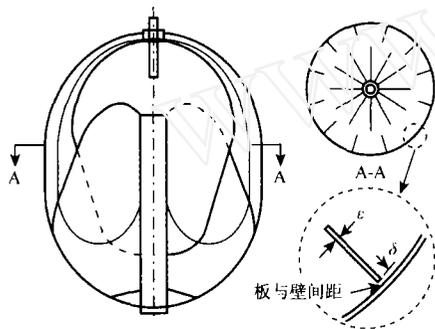


图7 板式表面张力贮箱简图

微重力下液体推进剂的管理还包含了燃料传输、压力控制、温度控制、质量检测、泄露监测等诸多重要的方面(见图5)。而且,低温推进剂管理要求更严格。举个例子,在给承担这次“嫦娥一号”发射任务的长征三号甲运载火箭加注燃料时,首先加注了常规燃料然后才进行了低温燃料的加注。低温燃料在常温下会迅速汽化,就需要一边加注一边泄压,把汽化的气体泄出来以后送到燃烧池里面燃烧,所以一边泄压一边补充加注,一直持续到发射前五分钟。另外,尽管贮箱进行了极高的保温设计但火箭周围的空气还是迅速地被冷凝成水汽,为了防止结冰,要不停地用氮气吹除,直至发射前的最后几秒。从这个例子就可以知道,低温的流体管理尤其重要,而且在空间微重力环境中的难度比地面上更大。

### 3.2 热控制系统

热控制系统是各类空间飞行器重要的组成部分,热管理技术也是航天工程中的关键技术之一。在热控制

系统中之所以要用到微重力流体管理,是因为热控制系统需要用流体(气体、液体、气液两相)作为热量传输的介质,对该系统中流体介质的精确控制和传输,是进行精确、高效率热控制的前提。

飞行器所处空间环境是一个真空、太阳辐射强、微重力的特殊环境,要保证舱内外的元器件能够正常稳定的运行、航天员能够生活工作,必须设计与之相适应的热控制系统。目前空间飞行器的热控制技术主要分为被动热控制和主动热控制两大类。被动热控制是依靠使用隔热材料、热控涂层以及合理的总体布局来控制飞行器的热交换和温度,该技术是卫星热控最基本最主要的热控技术。主动热控制主要可分为电加热恒温技术、百叶窗热控技术、热管技术以及主动流体循环冷却回路系统等技术方法。微重力流体管理主要应用于主动流体循环冷却系统。

图8所示的是一个简化的流体回路系统<sup>[8]</sup>,利用运动中的流体既可以吸热又可以散热的特点,通过管路系统将分散的热源和热沉(即散热器件)连接起来,并使得流体在管路内以相对稳定的速度流动,就组成了最简单的主动流体回路热控系统。就原理上来说,管内流动的工质可以是气体或液体,一般均采用液体为工质。而且采用闭式循环,不消耗工质,通过散热器件向空间排散废热。按照流体回路内工质的传热方式是单相还是气液两相的,可以分为单相液体循环冷却回路和气液两相循环冷却回路。气液两相循环回路中的毛细抽吸两相流体回路(CPL)应用前景广阔<sup>[9]</sup>,其原理结构如图9所示。其热源为一组相互并联的蒸发器,热沉为冷凝器,热源与冷源之间由蒸汽联管和液体联管相连接,此外,CPL的另外一个主要设备为储液器。作为其它辅助设备,CPL系统通常还设有隔离器、过冷器、气体捕集器。CPL回路的工作原理如下:蒸发器从外界吸收热量,使内部的工质汽化,产生的蒸汽经蒸汽联管进入冷凝器,并在冷凝器内凝结成液体,放出热量。凝结后的液体经液体联管重新回到蒸发器内,并以此种形式在回路内往复循环不已。这样,回路内的工质便以相变传热的形式不断的将热量自蒸发器传向冷凝器。其循环的动力来自蒸发器内毛细结构所产生的毛细抽吸力。CPL为两相回路,相变传热,传热性能高,内无任何运动部件,无需输入功率,应用前景广。微重力流体管理在流体循环冷却回路中的应用问题主要是:

单相流体回路:液体的循环传输,流速、流量的控制,管路的设计优化等等。

气液两相回路:微重力下气液两相流及传热问题研究,比如气液两相流型不同(如图10)直接导致传热效率

的变化,如何减小流阻、气液分离,微重力下沸腾相变、蒸发、冷凝等问题。

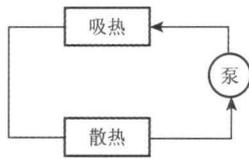


图8 简化的流体回路系统

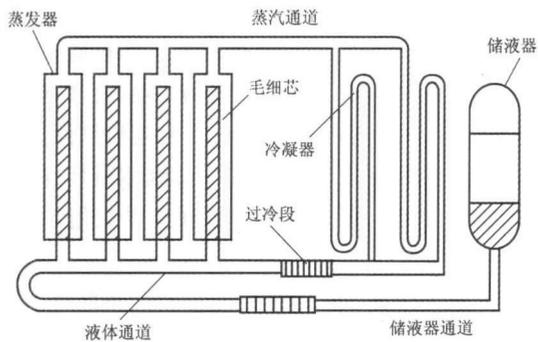


图9 CPL系统原理简图

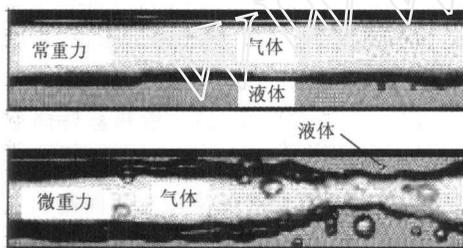


图10 微不同的气液两相流型

### 3.3 环境控制与生命保障系统

环境控制与生命保障系统是载人航天类飞行器特有的、最具载人航天特征的一个重要系统,是直接关系到航天员生命安全的保障环节,也是载人航天的关键技术之一。从大的方面划分,环境控制与生命保障系统有两大功能:环境控制功能和生命保障功能,为了这两大功能,该系统一般要具有如下9个分系统<sup>[10]</sup>:供气调压、气体成分控制通风净化、座舱温湿度控制、水管理、废物收集处理、航天服循环、烟火检测与灭火、食品管理、测量控制等9大分系统,每个分系统又要负责实现多个具体的功能。本文仅对应用了微重力流体管理技术的部分功能做简要的介绍。

**舱内通风净化功能:**在轨道飞行的微重力环境下,由于自然对流的消失,气体的热对流作用极大削弱,对舱内环境造成不良影响。比如航天员呼出的 $\text{CO}_2$ 气体就会停留在航天员头部周围,使其呼入的 $\text{CO}_2$ 浓度过高,影响正常生活。所以必须要在舱内安装通风设施来

保证舱内有一定的风场以利于污染气体排出和空气净化,并且通风设施要合理布局,以确保不留死角,特别要使航天员头部一般要有 $0.3\sim 0.8\text{ m/s}$ 的风速。

**舱内空气温度控制:**与前一节提到的热控制系统的方法相似。

**水管理系统:**这里主要指短期航天飞行要面对的饮用水管理和冷凝水管理。因为在微重力情况下,饮用水不能像地面上一样直接倒进杯子里面饮用,所以饮用水的贮存和供给方式要经过专门设计来保证水/气隔离和安全供水。常用的方法是采用增压式水箱。水箱中间用无毒的柔性隔膜分为上下两部分,一边当用增压泵增压时,挤推隔膜实现强迫供水,保证微重力下水的定向流动。冷凝水是由舱内大气中的水汽经过温湿控系统冷凝处理形成的。收集冷凝水时要用手动泵或电动泵将含气的冷凝水泵入冷凝水贮箱,箱内设有毛细吸水材料,实现微重力下的气液分离。水留在了水箱的吸水材料里,分离出的气体则通过盖上透气但不透水的膜排回舱内。

**废水收集处理:**长期的航天飞行面临的一个问题是航天员产生的生理水和卫生水的回收处理。生理水处理主要是指尿液的回收和处理。微重力下,采用气流导向和传送是尿液顺利回收的有效办法,使用前启动专用的抽风机将其送到尿液收集贮箱。和冷凝水贮箱相似,箱内是毛细吸收材料,液体留在箱内。图11(参见彩插1)所示的是太空专用厕所系统。太空中洗漱和淋浴产生大量的卫生废水,这类水可采用真空吸水器来汲取。因为卫生废水含有大量杂质,所以不能用毛细吸水材料进行气液分离,可采用旋涡式水分离器实现分离。生理废水和卫生废水随后经过特殊的蒸馏净化处理可再次使用。前不久,美国宇航局(NASA)就花了1900万美元从俄罗斯那里购买了国际空间站专用的太空厕所,用来提供航天员的洗漱和洗澡,以及废水的收集处理功能并且生成可供饮用的水。

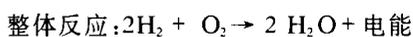
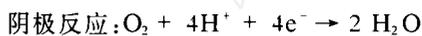
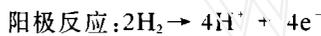
**航天服:**航天服分为舱内和舱外航天服。舱外航天服必须包含完整生命保障系统,从某种意义上来看,它相当于一个小型的航天器。它有独立的通风生保系统、废水收集系统、热控系统、电源系统等。由于功能复杂,舱外航天服的重量较重,可达100多公斤,但是由于空间中一切都处于失重状态,所以宇航员穿上他仍能够移动自如。

### 3.4 电源系统

电源系统是各类空间飞行器中不可缺少的重要组成部分。所有的电源系统都包括供电系统,其中供电系统包

含:电能源生成系统、贮能装置以及电源控制设备。电能源生成方法主要有3类:太阳能、化学能(燃料电池)、核能。其中核能不常用,90%是来自太阳能。贮能装置也有3类:镉镍电池、氢镍电池、以及再生燃料电池。航天器电源要根据飞行任务、航天器设计寿命和供电要求来选择。虽然目前长寿命地球轨道飞行的卫星一般选择太阳能阵列+镉镍蓄电池组的供电模式,但是镉镍电池能量密度(单位质量可贮存的能量)低、放电深度浅、性能易衰减,各国都在努力开发新型电源<sup>[11]</sup>。燃料电池因为其高能量密度、无自放电、不存在过充过放等优点在航天应用领域有很大吸引力<sup>[12]</sup>。再生燃料电池是由燃料电池与太阳能电池阵列结合使用而组成的,其能量密度要高很多,其重要应用前景是月球基地、近地轨道卫星、空间站等。

以氢气和氧气为燃料的质子交换膜燃料电池的工作原理如图12所示。工作时,氢气进入燃料电池到达阳极(电源负极),裂解成氢离子(质子)和电子。氢离子通过电解质渗透到阴极(电源正极),而电子通过外部负载流动,提供电力。氧气进入燃料电池的阴极,与电子和氢离子结合形成水。在电极上的这些反应如下:



从方程式可以看到,燃料电池最后的反应结果是氢气和氧气反应生成水,向外界输送电能,同时释放热量。在空间应用中,生成的水可以经过处理作为航天员的饮用水,热量用于飞行器的热管理。

再生燃料电池(RFC)是一种特殊的燃料电池,它结合了水电解和氢氧燃料电池技术,可代替蓄电池组贮存能量,工作示意图见图13<sup>[13]</sup>。太阳能电池阵列在日照

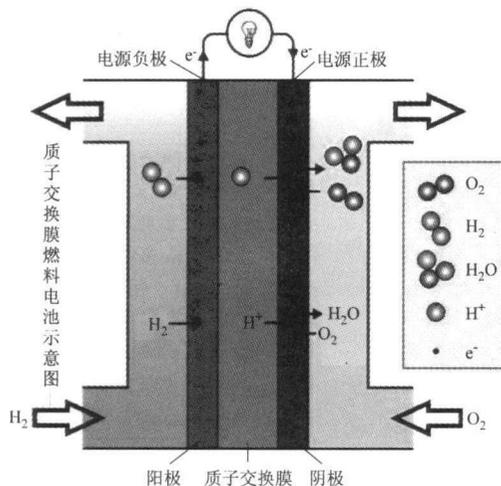


图12 PEMFC工作原理

区发电,一方面向航天器负载供电,一方面给燃料电池充电。充电即是把燃料电池工作的生成物水电解,生成氢气和氧气储存起来。在轨道阴影区,燃料电池中的燃料反应,向航天器负载提供电能,同时生成水。进入日照区,太阳能电池阵列供电,水再被电解,由此构成一个封闭系统,从而达到高效储能的效果。RFC的能量密度可达400~600 W·h/kg,远高于镉镍电池的能量密度25~40 W·h/kg以及能量密度为150 W·h/kg的锂离子电池。

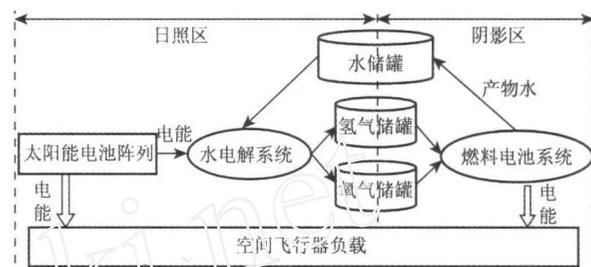


图13 再生燃料电池系统工作示意图

水是燃料电池阴极反应的产物,水管理对燃料电池性能好坏有重要的影响<sup>[14]</sup>。膜电极(简称MEA)是质子交换膜燃料电池(PEMFC)的核心部件之一,对PEMFC的输出功率、能量密度分布及工作寿命有着决定性的影响。提高膜电极性能的关键是在催化粒子的周围形成良好的质子、电子和气体通道,因此,膜应有一定的含水量,以保证膜良好的质子传导性,否则膜易脱水、皱缩甚至破裂,严重阻碍质子传导;同时水也不能太多,膜的含水量过多,水就会淹没电极,造成阴极淹没,显著增加传质阻力,同时水会堵塞多孔扩散层中的孔隙,严重阻碍O<sub>2</sub>传输,使阴极O<sub>2</sub>供应不足,浓差极化增大,从而导致电池性能大幅度下降。20世纪60年代,通用电器公司专门为NASA载人飞船设计了PEMFC,当时正是由于没能有效地解决水管理问题导致NASA没有在阿波罗登月飞船上使用PEMFC。NASA已经把微重力条件下的水管理作为应用于航天的PEMFC的关键技术。在微重力状态下,电池中带化学反应的气液两相流动、传热传质的规律与地面不同,而且在电解极上生成的H<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>要实现与液体分离并收集储存起来也是技术难点。

#### 4 空间探索计划对微重力流体管理提出新挑战

随着我国经济和科技实力的不断增强,我国的航天技术取得了重大突破,航天事业蓬勃发展,嫦娥一号的发射成功标志着我国空间探索进入了新的时代。包括

载人航天、太空行走、空间实验室(站)以及月球探测“绕、落、回”的三期目标在内的空间探索计划将为我们整体空间技术快速发展提供良好的机遇,但同时也对各个方面提出了新要求。同样,微重力流体管理也面临新的挑战。比如要实现月球探测器“回”的目标就需要高效的大推力火箭,探测器要携带更多燃料,这就需要研制大容量的推进剂贮箱和对液体燃料进行长期存储等。我国未来空间计划在以下几个方面对空间流体管理提出了新的工程需要:大容量推进剂贮箱研制、(低温)液体燃料长期存储、微重力下燃料的补给、能长期生活停留的生命保障系统、废水的收集处理、舱外宇航服的研制、再生燃料电池为主的长续航电源,以及适应月球表面的热控制系统等等。

应对挑战、满足工程需求的前提是必须掌握微重力环境中流体的界面特征和运动规律,所以要以工程需求为基础,开展微重力流体管理的科学研究,主要包括以下几大方面科学问题:微重力下大尺度的毛细力驱动流、微重力流体的界面现象(静态/动态接触角、接触线、容器尺寸和流体物性参数对平衡界面的影响、界面形貌特征、界面控制)、微重力气液两相流及传热问题(发展以毛细抽吸回路为代表的两相流体回路系统和再生燃料电池系统)、微重力下流体蒸发、冷凝的科学研究等。

总之,航天事业的蓬勃发展向微重力流体管理提出了挑战,同时也为其提供了发展机遇以及更多更好的实验机会和实验平台;相对应的,微重力流体管理的研究成果将为在航天工程中设计高可靠性、高效率的流体管理装置提供坚实的理论基础和创新的科学指导。

(2007年11月14日收到)

- 1 欧阳自远. 月球探测进展与我国的探月行动(上)[J]. 自然杂志, 2005, 27(4): 187-190.
- 2 胡文瑞, 徐硕昌. 微重力流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-23.
- 3 DAVID J C. Low gravity issues of deep space refueling[R]. NASA/TM-2005-213640.

- 4 WEISLOGEL M M. Capillary flow in an interior corner[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 373: 349-378.
- 5 CONCUS P, FINN R. On capillary free surfaces in the absence of gravity[J]. Acta Math, 1974, 132: 177-198.
- 6 李永, 赵春章, 潘海林, 等. 板式贮箱中蓄液器的初步设计及分析[J]. 控制工程(北京), 2006, 6: 6-13.
- 7 魏延明, 潘海林. 表面张力管理装置的微重力流体计算[J]. 控制工程(北京), 2004, 6: 18-27.
- 8 范剑锋, 黄祖蔚. 载人飞船工程概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 155-165.
- 9 张加迅, 侯增. CPL技术在空间飞行器上的应用[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 340-343.
- 10 戚发轫. 载人航天器技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 126-165.
- 11 王东, 张伟, 刘向. 质子交换膜燃料电池及其空间应用[J]. 上海航天, 2005, 2: 39-42.
- 12 吴峰, 叶芳, 郭航, 等. 燃料电池在航天中的应用[J]. 电池, 2007, 37(3): 238-240.
- 13 宋世栋, 张华民, 等. 可再生燃料电池的研究进展[J]. 电源技术, 2006, 30(3): 175-178.
- 14 律翠萍, 叶芳, 郭航, 等. 质子交换膜燃料电池的水热管理[J]. 节能, 2005, 8: 6-10.

## The Applications of Microgravity Fluid Management in the Aerospace Engineering

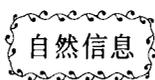
KANG Qi<sup>①</sup>, HOU Rui<sup>②</sup>

① Professor, ② Ph. D. Candidate, National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080

**Abstract** The concepts of microgravity and microgravity fluid management are explained in detail. The engineering applications of microgravity fluid management in propulsion systems, thermal control systems, environmental control and life support systems, power systems are elaborated. The new challenges faced by the microgravity fluid management are presented.

**Key words** space exploration, microgravity fluid management, engineering application

(责任编辑:方守狮)



### 关系性别偏转的一个遗传开关

据2007年8月9日的《Nature》杂志报导,哈佛大学的C. Dulac领导的研究小组,惊人地发现缺失了Trpc2基因的遗传工程雌性小鼠,无一例外地表现出雄性小鼠的某些特征,如相对强壮的骨盆,雄性的特有叫声和攀爬其他小鼠等。这一发现暗示在雌性小鼠的大脑中,有一条“雄性”性状路线,该路线可通过触

动一种简单遗传“开关”而激活。已知Trpc2蛋白是小鼠犁鼻器官的功能成分,该器官是小鼠鼻子的一部分,负责“感觉”外激素。

新的研究结果促使人们对大脑按性别调控性行为的传统观点进行重新考虑,不过目前对这一结果尚有争议。实验条件和被检小鼠的类型也许会影响到最终结果。正如Dulac所说,小鼠的某些行为,也许受到了实验条件的限制。于是他们在更接近自然的条件下,对同一突变体小鼠进行了为时一月的实验,结果Trpc2基因被敲除了的雌性小鼠,仍

表现雌性行为。

用于实验的小鼠分三类:一是源于宠物库的典型的实验小鼠;二是由野生型小鼠衍生的实验鼠株;三是野生型小鼠。野生型鼠株和实验鼠株的行为截然不同。Dulac的小组,对典型的两个实验鼠株C57BL和129/SV进行混养,并对其后代进行了检查。据分析认为,可能存有Trpc2基因的补偿效应。于是,他的小组如今正在加紧实验,把野生型小鼠和带有Trpc2的突变体鼠株进行混养,以便进一步确认这一基因。

[范宗理据 Nature, 2007-08-09]



图1 微重力悬浮状态

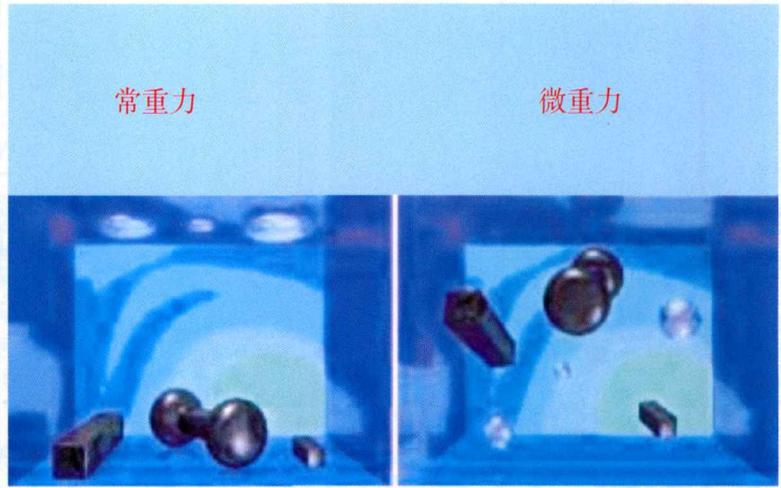


图2 浮力作用消失



图3 微重力下，气泡在水泡中



图4 常重力和微重力下的不同沸腾现象

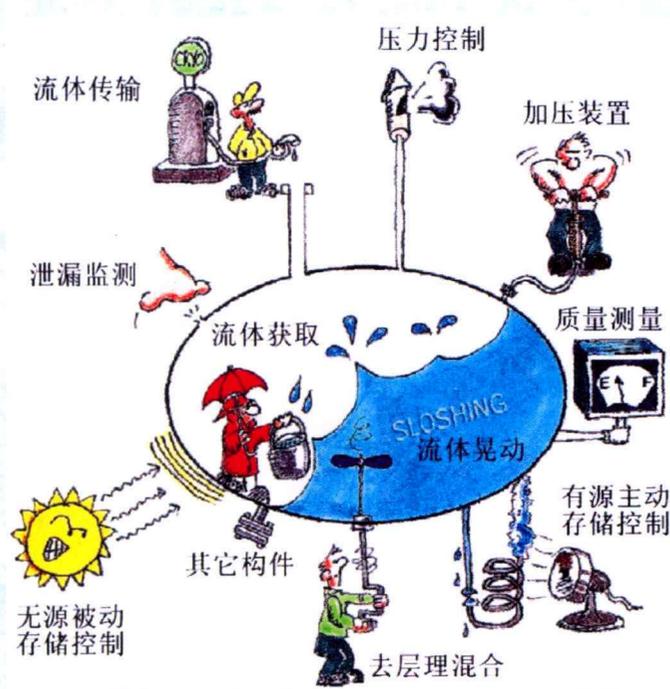


图5 低温流体管理示意图



图11 太空厕所系统

参见本期“微重力流体管理在航天工程中的应用”一文