

应用于空间燃料电池的氢技术研究进展

唐林江，张宝林，陈滔，张彬彬，万成安

(北京卫星制造厂，北京100094)

摘要：对燃料电池的工作原理和分类、氢气的制备、存贮技术进行了分析。通过研究储氢相关技术国内外研究现状、趋势和应用情况，结合当前空间应用的各种条件，认为可充分结合水电解技术、固态储氢、电化学泵和氢压缩机等技术开展可再生燃料电池的研究，形成与航天器太阳能电池组联动、互补的系统，进一步延长供电寿命，为未来长寿命航天器的发展提供技术储备。

0引言

中国空间探测及载人航天计划中对空间电源技术提出了更高的性能需求。燃料电池技术作为一项非常重要的空间电源技术，可直接将燃料和氧化剂中所蕴含的化学能以电化学方式转化为电能。氢氧燃料电池使用纯氢和纯氧为反应物，其产物只有水和热能，其可与航天器、登陆器、巡视器及舱外活动装备中的电力系统、生命保障系统、推进剂系统及原位资源利用系统等有效兼容，在空间工程中具有很好的应用前景^[1-3]。

燃料电池的最常用的燃料为氢气，氢气既可通过化学方法对化合物进行重整、分解、光解或水解等方式获得，也可利用产氢微生物进行发酵或光合作用来制得氢气。目前，主要的大规模产氢方式仍是化学制氢，其优势为成本低、可行性强；再就是利用电解水进行制氢，这是一种完全清洁的制氢方式，但耗能较大。如果将其与可再生资源发电技术相结合（如光伏发电、水力发电和风力发电），电解水可作为大规模制氢技术具有良好的应用前景，在航天上可结合可再生燃料电池进行很好的发展^[4-6]。

1燃料电池

1.1燃料电池的分类

燃料电池可将贮存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化为电能。它的燃料和氧化剂贮存在电池外部的贮罐中。迄今已研发出多种类型的燃料电池。按电池所用的电解质分类有质子交换膜燃料电池（PEMFC）、直接甲醇燃料电池（DMFC）、碱性燃料电池（AFC）、熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）、磷酸盐型燃料电池（PAFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）。表1列出了各种燃料电池的技术特点。

表1 燃料电池的特点和性能

Table 1 The characteristics and properties of fuel cells

燃料电池类型	AFC 碱性 燃料电池	PAFC 磷酸燃 料电池	MCFC 熔融碳 酸盐燃料电池	SOFC 固体氧化 物燃料电池	PEMFC 质子交 换膜燃料电池
燃料	纯氢	甲醇、天然 气、氢	甲醇、天然 煤气、氢	甲醇、天然 煤气、氢	氢
氧化剂	纯 O ₂	氧气、空气	氧气、空气	氧气、空气	氧气、空气
电解质	KOH(水溶液)	H ₃ PO ₄ (溶液)	Li/Na ₂ CO ₃	固体氧化物	质子交换膜
工作温度/°C	80	200	650	1000	85
比功率	35 ~ 105	120 ~ 180	30 ~ 40	15 ~ 20	340 ~ 1500
应用方向	短期飞船、 航天飞机	洁净电站	洁净电站	洁净电站	军用潜艇、 卫星、飞船

1.2燃料电池的空间应用

空间领域中的电源系统需要具备较长时间高功率输出、响应速度快、安全性好等新特点。由于受重量、体积及可靠性等方面的限制，目前的卫星用太阳电池-蓄电池电源系统有一定的局限性。而燃料电池可与其他系统有效兼容，其应用范围会非常广泛。目前，航天高技术发展规划已初步确定，载人飞船、空间站、探月飞船、天地往返系统、太阳

能无人飞机、空间对抗平台等[5]各类新型航天航空飞行器已经被提到了议事日程上来。

燃料电池在20世纪60年代被应用，美国的“双子座”载人飞船、“阿波罗”登月飞船和航天飞机，以及俄罗斯的月球轨道器和“暴风雪”号航天飞机上就将燃料电池作为航天器的主电源，见表2。

表2 燃料电池在航天上的应用

Table 2 The example of application of fuel cell in space

燃料电池性能	双子座载人飞船	阿波罗登月飞船	航天飞机
外形			
类型	质子交换膜电池	碱性燃料电池	碱性燃料电池
任务时间/h	360	400	5000
最大输出功率/kW	1.000	2.295	16.000

燃料电池在航天中的应用已经比较成熟，但依然存在着维护和购置成本高、寿命短、安全性差等缺陷。为满足新一代航天器的发展需求，美国国家航空航天局（NASA）专门制定了针对可重复使用运载器和火星登陆器、空间站等航天器使用的10~20kW可再生燃料电池发展计划，改进了质子交换膜燃料电池，通过亲水膜的毛细作用实现对生成物的气/水分离，完全省去了循环使用所需的管路。这种革命性的设计极大地提高了整个燃料电池系统的比能量、可靠性、反应效率和使用寿命，并降低了自耗和使用费用。该系统见图1。

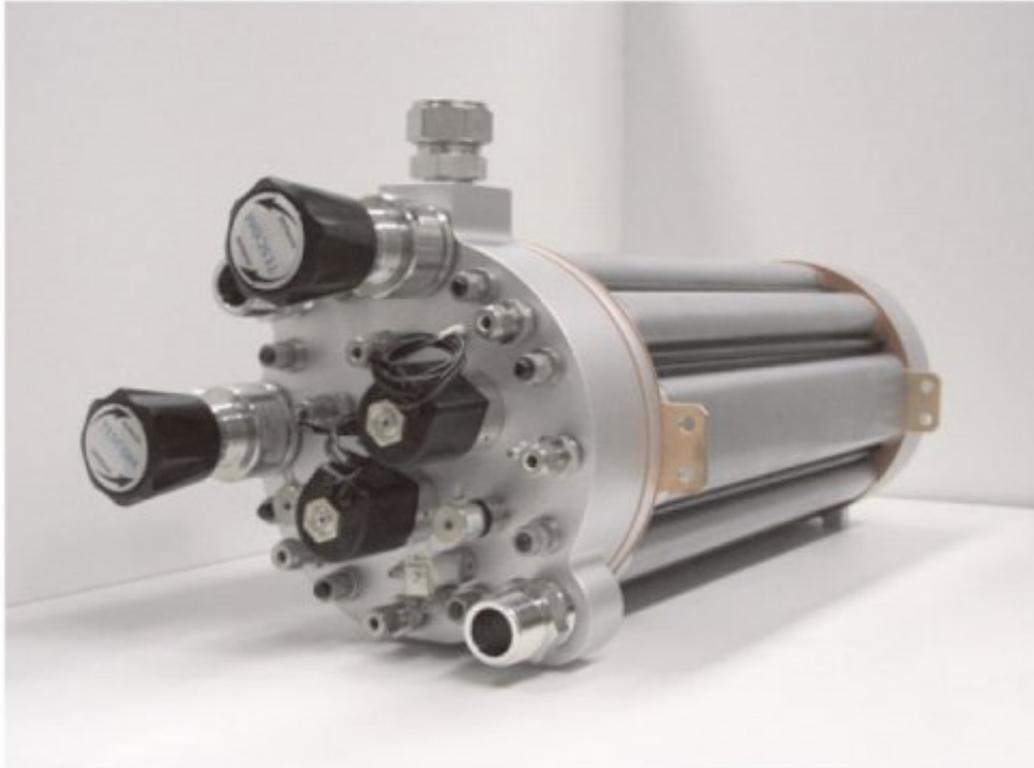


图 1 NASA 研制的新型质子交换膜燃料电池系统

Fig. 1 A new type of 3KW fuel cell system (NASA)

美国已先后研制出利用可再生燃料电池发电的电解水制氧系统、废水回收利用系统及二氧化碳回收处理系统，并分步投入空间站测试使用，实现了空间站水及二氧化碳的处理率超过85%^[7-9]。再生燃料电池（ Regenerative Fuel Cell，RFC）是在普通燃料电池基础上发展起来的氢气-氧气产生、储存和利用的电化学装置，它是将水电解技术和氢氧燃料电池技术相结合的一种新型氢能源发电装置。燃料电池的唯一反应产物水经收集后，又可通过电解水产生氢气和氧气供燃料电池发电使用，实现“再生”^[10-13]。

2 氢气制备技术

氢气可通过化学方法对化合物进行重整、分解、光解或水解等方式获得，也可通过电解水制氢，或是利用产氢微生物进行发酵或光合作用来制得氢气。生物制氢法采用有机废物为原料，通过光合作用或细菌发酵进行产氢。其关键技术是培养高效率、高选择性的生物菌种。但目前对这种方法的产氢机理了解尚不深入，在菌种培育、细菌代谢路径、

[14] 其中，电解水制氢是一种完全清洁的制氢方式，可与燃料电池相结合构成再生式燃料电池，用于无人驾驶飞机、潜艇、空间站等场所^[15]。

2.1 电解水技术

电解水制氢是目前获得纯氢最简单的方法，按电解质性质的不同，电解水制氢技术主要有3种：碱液、固体氧化物水电解器和质子交换膜（ Proton Ex-change Membrane，PEM）技术。采用碱液作为电解质的碱式电解器是历史最久、技术最成熟、成本最低的电解水制氢技术，目前使用也最广。其缺点是效率较低、工作电流密度较低，一般不高于0.6A/cm²；固体氧化物电解器一般采用氧化钇稳定的氧化锆作为电解质，工作温度在600 ~ 1000 。高温降低了电解反应的电

压损失，同时加剧了电解器的腐蚀速度，增大了冷热膨胀量，给材料的选择、密封和运行控制带来困难，从而制约其部分应用；以PEM作为电解质的水电解器能在 $1 \sim 3\text{A}/\text{cm}^2$ 的高电流密度下工作，体积小、效率高，生成的氢气纯度可高达99.999%，被认为是最有前景的水电解技术^[15]。

2.1.1 PEM水电解技术原理

PEM水电解的系统主要包括PEM电解器、稳压电源、水供应系统、水循环泵、氢气和氧气的气水分离器、热交换器、安全措施的控制系统等。PEM电解器是整个水电解系统的核心，基本工作原理如图2所示。电解工作开始后，水由储水罐通过管道输送到电解器阳极，水在电场和阳极催化剂的作用下，分解成氢离子和氧气，氧气通过管道输送到储氧罐或排空；氢离子由阳极穿过质子交换膜迁移到阴极，在阴极催化剂表面与外电路输送过来的电子结合生成氢气，氢气通过氢气管道输送到储氢罐。

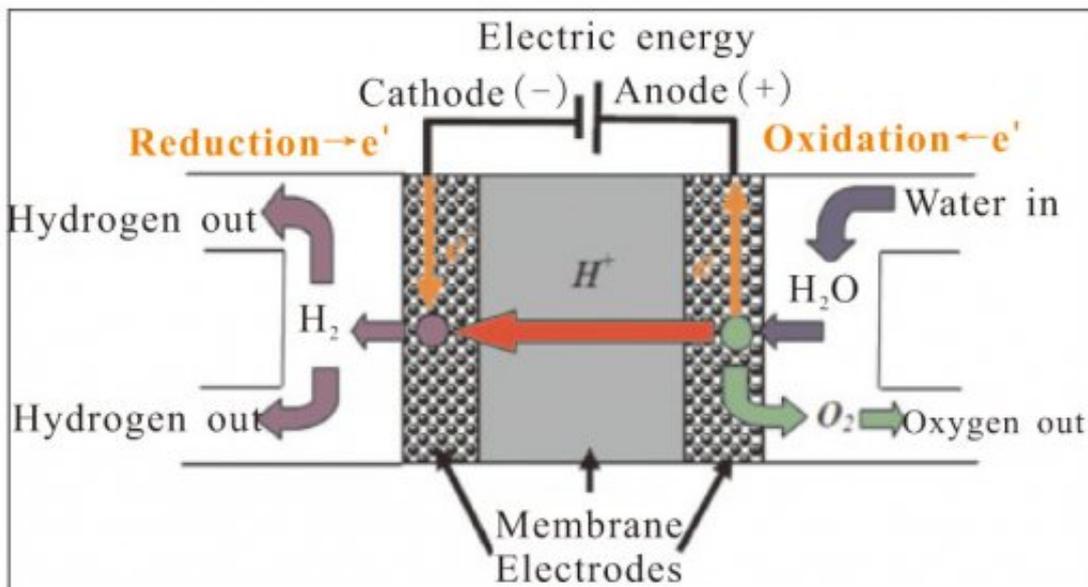


图2 PEM水电解器工作原理示意图

Fig.2 The schematic diagram of PEM water electrolyzer

2.1.2 PEM水电解技术现状

1966

年，美国通用

电器公司开发出PEM水电解

器。20世纪70年代中期大多数PEM电解器的活性面积约

在 50cm^2

，没有实际应用价值。后来在催化剂和膜电极制备技术进步的推动下，PEM水电解技术取得了较大进展。20世纪80年代研制的电解器装有2个

单体电池，活性面积达 1600cm^2 ，该电解器在80

、 0.5MPa 、 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 电流密度下工作时电解电压为 1.7V ，氢气和氧气的纯度分别为99.999%和99.88%。

近年来，加拿大的Hydrogenics公司、美国的Hamilton Sundstrand公司、Proton Energy Systems公司、Giner Electrochemical Systems公司、Lynntec公司、俄国的库加托夫研究所、德国H-Tec公司、瑞典Brown Boveri公司等都在PEM水电解器的研究与制造方面开展了较多工作。20世纪90年代中期，日本将该方面技术的研究纳入了其氢能开发计划，技术进步迅速。现在商业化出售PEM水电解器产

气量大多在 $1 \sim 10\text{m}^3/\text{h}$ ，压力为 $0 \sim 3\text{MPa}$ ，功率从一千瓦到数十千瓦，典型产品有Proton Energy Systems公司推

出的HOGEN系列电解制氢系

统，其HOGEN-S和HOGEN-

H型电解器的产气量从0.5 ~ 6m³/h，氢气纯度可达99.9995%，不用压缩机气体压力达1.5MPa。

对空间和军事用途的PEM水电解器而言，提高电解效率、降低质量、增大气体压力、延长使用寿命成为关键研究目标。Giner电化学系统公司研制的空间应用水电解槽结构紧凑、质量轻，产氢量为4m³/h的电解器质量不足9kg，体积不到4L，而且水电解器产生的气体压力相当高，可直接储存到储罐中。库加托夫研究所所有近20年的PEM水电解技术研究经验^[16-17]，该所研制的产氢量2m³/h电解器运行时间已经超过10000h，产生的氢气纯度为99.98%，压力达3MPa，电解功耗为3.9 ~ 4.1kWh/m³。

美国是最早进行高压水电解制氧/制氢技术研究和应用的国家，代表了现在国际水电解技术研究和应用的最高水平。早在1982年，美国GE（通用电气）公司为美国海军研制了一台为海狼号核潜艇乘员供氧的水电解制氧原型机。这台原型机在潜艇上累计工作了10000h，工作压力为2 ~ 20MPa。

美国Hamilton Standard（HS）已经代替了GE公司，进行NASA和美国军方高压SPE水电解器的研制工作，包括NASA和美国空军的再生式动力系统试验中的高压水电解器（如Helios无人飞机动力系统试验），空间站环控生保系统的水电解制氧系统和海军潜艇用水电解制氧系统。

美国AvalenceLLC公司最新研制的Hydrofiller制氢系统原型机氢气产量为0.42 ~ 5m³/h，工作压力最高可达68.9MPa，但氢气纯度比较低，仅为99.6%。由于该系统工作在非常高的压力下，因此系统的体积和重量都很庞大，只能适合于地面或对体积、重量不敏感的应用领域。该产品尚处于原理验证阶段，还不能实现应用。

美国Proton Energy System公司研制两种型号的水电解器：HOGEN-S和HOGEN-H。HOGEN-S水电解器的输出气体压力为1.38MPa，氢气产量为0.53 ~ 1.05Nm³/h；HOGEN-H水电解器更大一些，产氢量为2 ~ 6Nm³/h，工作压力为1.5MPa。该水电解器产生的氢气纯度非常高，可达99.9995%。该公司的HOGEN-S40水电解器已经在NASA的格林中心准备进行试验。

美国Giner Electrochemical Systems公司负责研制Helios无人机用的15kW级高压水电解器，工作压力是2.75MPa，产氢量近4000SL/h。该水电解器的工作电流密度为1A/cm²，单片电压为1.72V，电解电压效率86%^[22]。Treadwell公司研制的电解槽，可以制氢速率为10.2cm³/h制氢，压力为1100psi（76bar）。Treadwell公司电解槽单元如图3所示^[18]。



图 3 PEM Treadwell 公司的 PEM 水电解系统

Fig.3 PEM Electrolyzer Unit of Treadwell Corporation

2.2水电解技术空间应用

水电解技术将水分解成氢气和氧气，其中电解制氧技术是目前公认的最具合理性的空间站氧气补给技术，是物化再生环境控制和生命保障系统的核心技术之一，是实现中长期载人航天飞行的关键技术。

俄罗斯在和平号空间站建造初期进行了电解制氧装置的飞行验证，然后将装站作为主份供氧设备。在国际空间站建造初期，使用了俄罗斯的电解制氧装置作为主份供氧设备；

美国研制的国际空间站电解制氧装置经过在轨飞行验证后，在后期正式投入使用，满足了国际空间站常驻乘组增加到6人的供氧需求。电解制氧装置的使用，大大减少了生保物资的地面后勤补给量。

中国在天宫一号中利用电解制氧飞行试验装置是以固体聚合物电解制氧和静态水气分离为技术特征，完成了空间微重力条件下电解芯体的适应性、水电解技术的工程化、微重力条件下的水气分离等关键技术攻关，建立了适于空间微重力的系统流程，圆满完成了在轨飞行试验任务。飞行试验结果表明，该总体技术方案能够适应空间微重力环境的应用要求，为空间站电解制氧技术攻关和工程研制奠定了良好的基础。TG-1电解制氧飞行试验装置如图4所示^[19]。

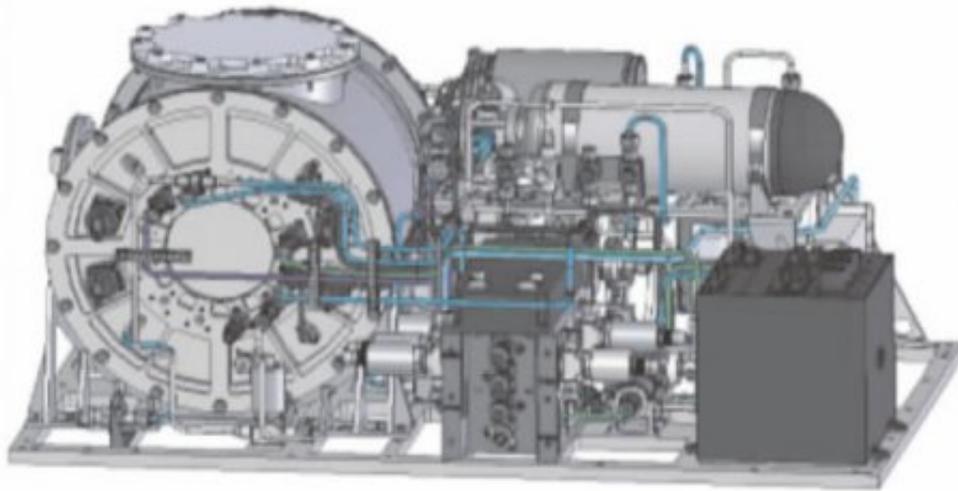


图 4 TG-1 电解制氧飞行试验装置

Fig. 4 Experimental device for electrolytic oxygen in TG-1

水电解技术可充分结合燃料电池技术，通过利用外太空太阳能资源开展可再生燃料电池的研究，形成于航天器太阳能电池组联动、互补的系统。

3 氢气的提纯及增压技术

氢气是一种高能清洁能源，但是氢气本身的密度低，氢能的利用最关键的环节就是氢能的储存。目前，储存方式为气态、液态、固态存储（金属氢化物）。

将氢气加压后储存在特制的钢瓶中，或是将氢气在低温下液化储存在杜瓦瓶中是最常用的方法，但由于高压容器储氢的质量储氢密度和体积储氢密度均不大，且存在安全隐患，加之液氢蒸发损失大。因此，金属氢化物凭借高的体积储氢密度和安全性，将成为储氢技术研究的热点。

固态存储（金属氢化物）的储氢材料是一类能在适当的温度和压力下可逆的吸收和释放氢气的金属基物质，包括单质、合金及金属间化合物。其储氢原理是基于氢气分子与金属原子发生化学反应生成金属氢化物将氢以原子形式储存

[20-21]。

除了氢的制备存储技术外，发展效率高、成本低、性能可靠及可形成规模生产的氢气分离、提纯及压缩技术将会成为发展氢能经济的关键。电化学氢泵（电化学氢压缩机）和氢压缩机（金属氢化物压缩机）是两种新型的氢气分离提纯技术。新型的压缩技术无振动、无污染、无噪音、安全性高，集氢净化和氢压缩于一体，具有部件紧凑，静音工作、无需动态密封、非常低的维修量、无需长期监控等优点[22-24]。

3.1 电化学氢泵

电化学氢泵或称为电化学氢压缩机是一种新型的氢气分离提纯设备。它的结构类似于质子交换膜燃料电池，但采用电解模式，可在阳极氧化氢气再在阴极还原氢气。电化学氢泵的最大优点是氢气的分离和压缩只需要一步就可完成，且由于功耗只作用于透过膜层的氢分子，它需要的能耗非常少。

3.1.1 电化学氢泵的基本结构和工作原理

基于质子交换膜的电化学氢泵最早出现在20世纪60年代，其结构类似于质子交换膜燃料电池，主要由阳极、阴极和质子交换膜组成，其中每一极都由气体扩散层及催化层构成。图5为电化学氢泵的工作原理图。

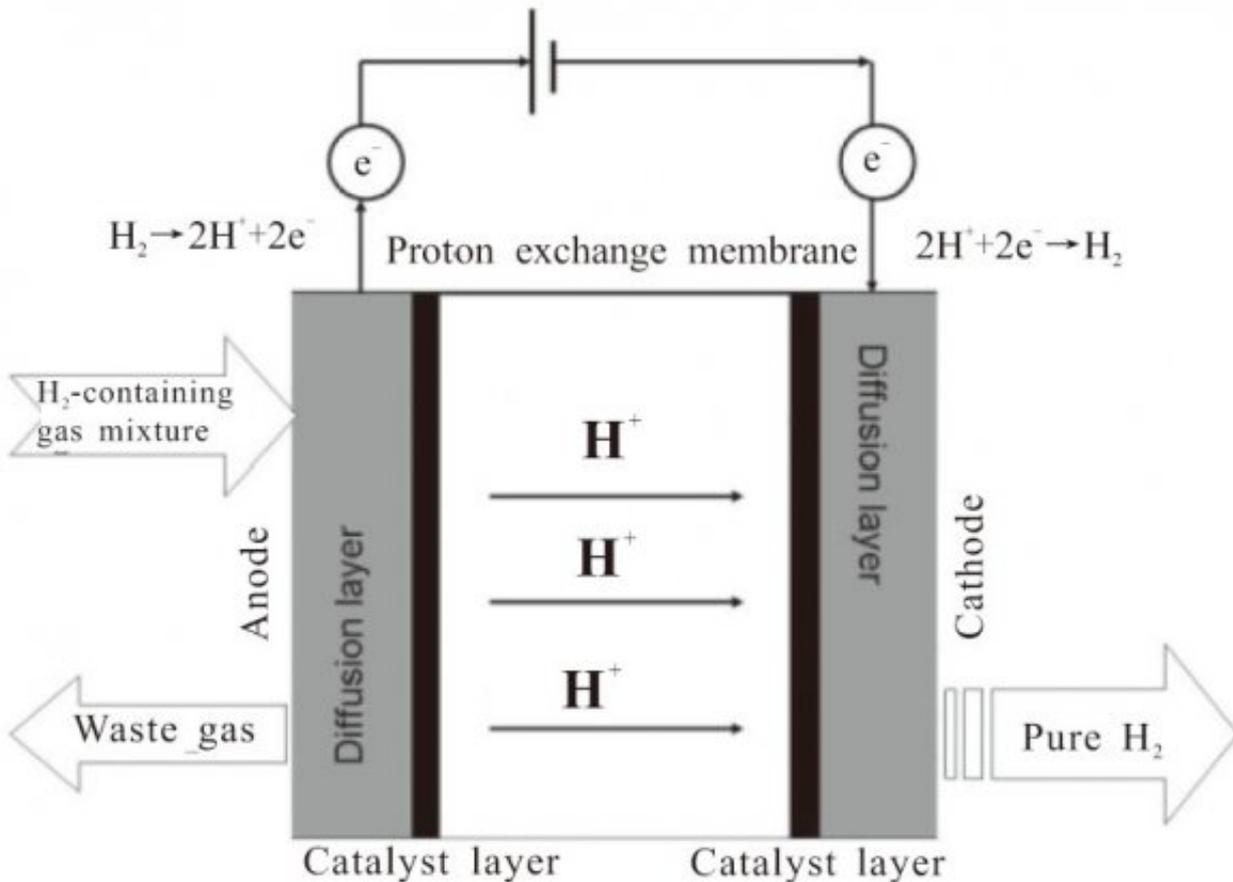


图 5 电化学氢泵的工作原理图

Fig. 5 The schematic diagram of electrochemical hydrogen pump

如图5所示，当含有氢气的混合气流进入电化学氢泵的阳极室后，氢气分子会经过气体扩散层到达催化层，在反应气体、催化剂和电解质膜的三相界面上发生氧化反应，使氢气分子氧化为质子和电子，随后质子在外加电压的作用下通过电解质膜往阴极传递，电子通过催化层和多孔扩散层及导电的双极板传导到外电路。在阴极室，由阳极通过电解质传递过来的质子及通过外电路传递过来的电子结合，重新组合变为氢分子。阴、阳极反应的净效果为氢分子从氢气含量较低的阳极气体中被抽到阴极，成为含氧量较高的阴极气体。在电化学氢泵中，分离推动力由电化学电势差提供。

3.1.2 电化学氢泵的优势

与传统膜分离过程相比，电化学氢泵分离过程只需要外加电势，不需要压力梯度和浓度梯度，而且选择性高、效率高。这是因为电化学分离方法中电势差只影响相应的放电组分，其他不放电组分不发生变化。与普通的燃料电池产生直流电不同，电化学氢泵的工作模式是电解模式，因此它需要外加电源来维持电化学反应的进行。因为氢的氧化还原反应很容易发生，而且它在电极上的反应接近能斯特反应，理论上来说，反应电压在0V左右（VSSHE）需要的能量非常少。传统分离方法的产氢速率多与操作压差大小或热量循环有关，而电化学氢泵的产氢速率取决于外加电流的大小。电化学氢泵阴极输出的氢气纯度较高，且可高压输出，无需机械压缩机，可直接装瓶储存，通过合适的电极结构，其输出压力可达到150bar^[25]。

3.2 金属氢化物压缩机

目前,工业中应用最多的是传统的往复式压缩机和隔膜式压缩机。往复式压缩机不但能耗高而且有磨损、振动、噪声等缺陷,而且由于润滑剂的污染和密封衬垫的泄漏问题,往复式压缩机不可能用来制取高纯氢。隔膜式压缩机是一种特殊结构的容积式压缩机,具有压缩比大、密封性好、压缩气体不受润滑油和其他固体杂质所污染的特点,但在制取超高纯氢方面还存在一定的局限性。

金属氢化物储氢材料是一类能在适当的温度和压力下可逆的吸收和释放氢气的金属基物质,包括单质、合金及金属间化合物。其储氢原理是基于氢气分子与金属原子发生化学反应生成金属氢化物将氢以原子形式储存于合金之中,通过控制相平衡反应的温度、压力和组成,来改变储氢量和放氢量,使反应可逆的进行吸氢和放氢循环。

金属氢化物反应的平衡分解压力,主要由该氢化物的温度决定,每一个温度对应一个平衡分解压力,平衡分解压力见图6。在特定温度 T_1 下,氢化物放氢压力随 H/M 比(合金中的氢的含量的比)下降而下降。但有一个平台区,在此区域内,可持续放出氢,但放氢压力保持不变,这个平台区就叫作金属氢化物在 T_1 温度下的平衡分解压力,简称平衡氢压。

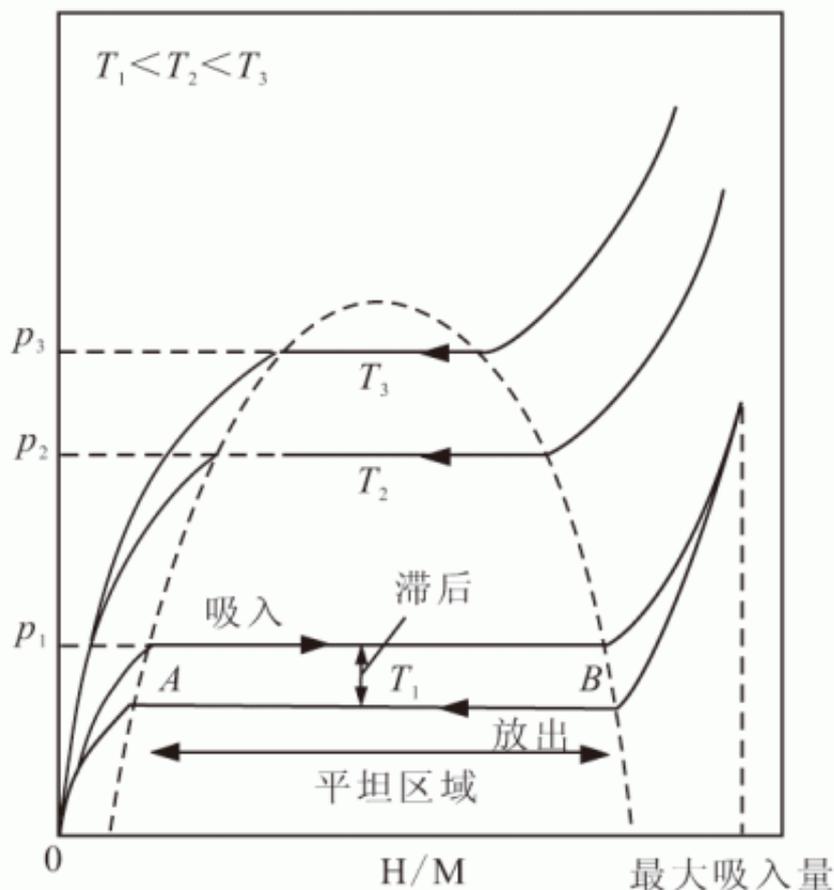


图 6 金属氢化物分解压力-组成-等温线 (P-C-T 曲线)

Fig. 6 Decomposing pressure-component-isotherms for hydrogen storage alloys

压缩的基本原理是根据不同温度时储氢材料具有不同平衡氢压。如图7所示,合金在较低的温度下吸氢,吸氢同时放出热量(过程A-B)。然后通过加热提高储氢合金的温度,从而储氢材料的压力平台升高(过程C-D),金属材料

[26-27]。图8为美国Ergenicsgongs公司开发的氢化物压缩机装置,该装置具有部件紧凑,静音工作,无需动态密封[28]。

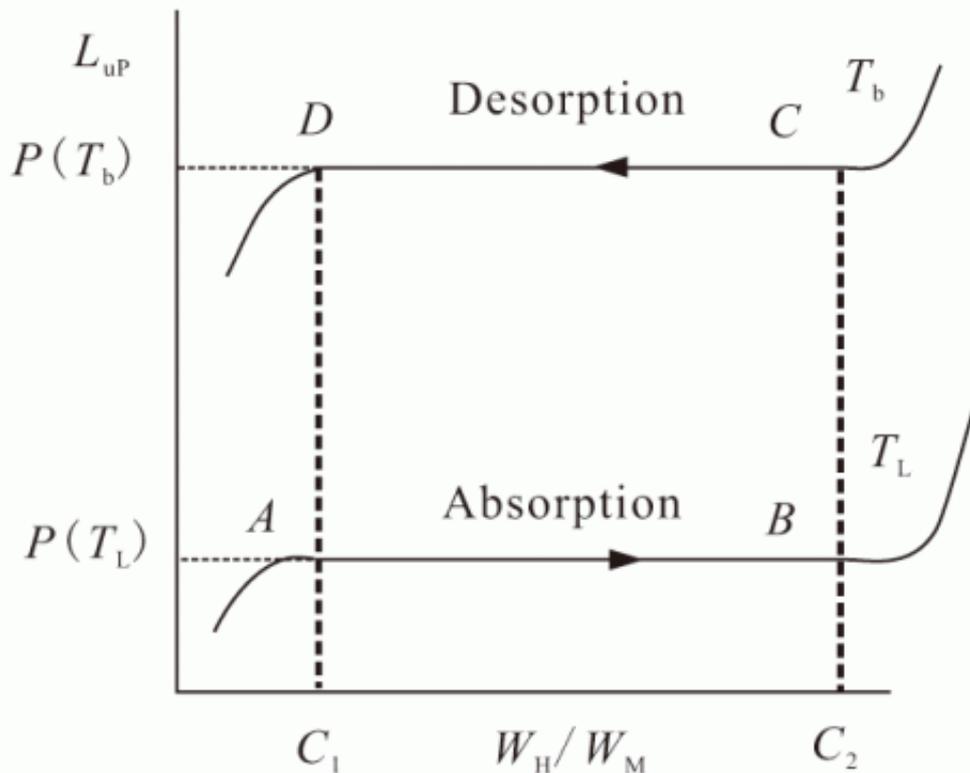


图 7 储氢合金实现氢气压缩原理图

Fig. 7 The schematic diagram of metal hydride thermal compressor



图 8 Ergenicgongs 公司开发的氢化物压缩机装置

Fig. 8 Metal hydride thermal compressor of Ergenicgongs

利用金属氢化物把热能变换为机械能，利用低品热源的化学压缩机的动力变换技术成为一种崭新的技术，由于这种压缩技术无振动、无污染、无噪音、安全性高，金属氢化物氢压缩机集氢净化和氢压缩于一体，具有部件紧凑，静音工作、无需动态密封、非常低的维修量、无需长期监控等优点。

4结论

目前，燃料电池虽然由于成本昂贵、技术尚未完全成熟而无法得以广泛应用，但以其具清洁、高效、无污染等优点，必将拥有广泛的应用前景，尤其是质子交换膜燃料电池（PEMFC）具有高功率、低温运行、快速启动、无噪声等特点，使其在航天军事领域以及电动汽车等民用领域有着极其重要的应用。可充分结合水电解技术、固态储氢、电化学泵和氢压缩机等技术开展可再生燃料电池的研究，形成于航天器太阳能电池组联动、互补的系统，进一步延长供电寿命，为未来长寿命航天器的发展提供技术储备。

参考文献：

- [1] Pei P, Chen H. Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review [J]. Applied Energy, 2015;125:60-75.
- [2] Dincer I, Colpan CO. Preface to the special issue on hydrogen and Fuel Cell Systems for Clean Energy Applications? [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015;40:7423.
- [3] Gabbasa M, Sopian K, Fudholi A, et al. A review of unitized regenerative fuel cell stack: Material, design and research achievements [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2014, 39: 17765.
- [4] 李俊荣, 周抗寒, 王飞, 等. 高压质子交换膜水电解技术研究 [J]. 载人航天, 2015, 21 (2) :121-124.

- [5] Shunichi O. Aerospace fuel cell rapid prototyping power system concept [C] //12th International Energy Conversion Engineering Conference. 2014.
- [6] 刘园, 郑舒. SPE 水电解高性 Pd/C 催化剂及最佳使用条件的研究 [J]. 电源技术, 2016:1215.
- [7] 陈宋, 孙凤焕, 张明, 等. 可再生燃料电池系统在空间电源中的应用研究 [J]. 航天器工程, 2014, 23(6):128-134.
- [8] M Mrcjalrc. Energy storage technology development for space exploration [C] //American Institute for Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2010.
- [9] Grigoriev S A, Millet P b, Poremsky V I, et al. Development and preliminary testing of a unitized regenerative fuel cell based on PEM technology [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2011;36:4164-4168.
- [10] 张扬健, 毛宗强, 谢晓峰, 等. 再生燃料电池的研究与应用 [J]. 化学进展, 2006, 18(5): 635-640.
- [11] Pettersson J, Ramsey B, Harrison D. A review of the latest developments in electrodes for unitised regenerative polymer electrolyte fuel cells [J]. Journal of Power Sources 2006;157:28-34.
- [12] 李斯琳. 一体式可再生燃料电池膜电极研究和初步系统设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [13] 吴川, 张华民, 衣宝廉. 化学制氢技术研究进展 [J]. 化学进展 2005, 17(3):423-429.
- [14] 王国强. 甲醇水蒸气重整制氢过程强化特性研究 [D]. 重庆大学, 2014.
- [15] 张军, 任丽彬, 李勇辉, 等. 质子交换膜水电解器技术进展 [J]. 电源技术 2008, 32(4): 261-265.
- [16] 林才顺. 质子交换膜水电解技术研究现状 [J]. 湿法冶金 2010, 29(2):75-78.
- [17] 周抗寒, 王飞, 李俊荣, 等. 高效、高压质子交换膜水电解技术的研究 [C] //第三届高分辨率对地观测学术年会. 中国北京, 2014.
- [18] Colozza A PK. Hydrogen ceneration through renewable energy sources at the NASA glenn research center. E-15832; NASA CR-2007-214682 [R]. NASA, 2007.
- [19] 李俊荣, 尹永利, 周抗寒, 等. 空间站电解制氧技术研究进展 [J]. 航天医学与医学工程 2013, 26(3):215.
- [20] 刘光. 新型大容量镁基复合储氢材料的制备及性能研究 [D]. 南开大学, 2013.
- [21] 杨明, 王圣平, 张运丰, 等. 储氢材料的研究现状与发展趋势 [J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(7):1053-1060.
- [22] Jaggi V, Jayanti S. A conceptual model of a high-efficiency, stand-alone power unit based on a fuel cell stack with an integrated auto-thermal ethanol reformer [J]. Applied

Energy 2013;110:295.

- [23] van Biert L, Godjevac M, Visser K, et al. A review of fuel cell systems for maritime applications [J]. Journal of Power Sources 2016;327:345-364.
- [24] Lototskyy M V, Yartys V A, Pollet B G, et al. Metal hydride hydrogen compressors: a review [J]. International Journal of Hydrogen Energy 2014, 39 (11) :5818-5851.
- [25] 杨洋. 基于质子交换膜的电化学氢泵的研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- [26] 阳明. 35 MPa 金属氢化物氢气热压缩机研究 [D]. 上海交通大学, 2009.
- [27] 李慧. 用于氢化物复合储氢器 and 高压氢化物压缩器的储氢合金研究 [D]. 浙江大学, 2010.
- [28] 张益浩. 氢化物氢压缩机用储氢合金研究 [D]. 南京理工大学, 2009.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/161644.html>