

月球氦23与未来的新能源

^3He on the Moon and Future New Energy

邓柏权¹ 彭利林¹ 王 龙²

(核工业西南物理研究院¹, 成都 432 信箱 610041; 中科院物理所² 北京 603 信箱)

一、一种更安全、更高效率的聚变能源

当前,世界范围内聚变研究主要集中在氘-氚反应,因为它比较容易点火,然而这种反应释放能量的80%是由中子携带,因而将导致反应堆的结构部件严重损伤,同时诱发结构材料产生大量放射性,给环境安全、维修、更换部件带来一定困难。

于是,人们开始探索所谓先进燃料聚变,研究得比较多的是 D^3He 反应。它基本上不产生中子,仅仅由于 DD 副反应产生大约 1%~5% (与燃料混合比有关) 的中子功率,可以大大减轻材料的辐射损伤和降低感生放射性的水平,不会产生高放射性水平的核废料。由于中子壁负载降低到 $0.1\text{MW}/\text{m}^2$,聚变堆中最容易损坏的部件第一壁的寿命可以大大延长,甚至于无需更换。

这种反应释放的 18.3MeV 能量全部由反应产物高能带电粒子携带,可利用反静电加速器的原理直接转换为电能,效率可高达 70%~80%;也可以用固体整流天线将回旋辐射功率直接转换成电能,效率可以高达 80%。

由于不必用包层来生产氚及慢化聚变中子取能,低的感生放射性和后热使得包层冷却系统和屏蔽大大简化,安装、维修、拆换部件更容易,可接近性好。另外由于包层变薄、磁体可以更靠近等离子体、耦合性能好,因此产生与原来同样的磁场而耗电量却少得多。

这种堆芯的重要特点是它的固有安全性,不会有放射性泄漏问题。因为聚变反应燃料 ^3He 和 D 都是惰性气体或稳定同位素,不像氚具有 β^- 放射性;而且氚容易渗透不锈钢等金属堆结构材料,造成环境安全问题。正是由于它的安全性好、低放射性、包

有相当进展。美国的黑光功率公司对分数氢进行了更为全面的开发,在大量工作的基础上,对其前景提出了极为乐观的看法。在 2000 年 11 月 26~28 日召开的全球变暖和能源政策的国际会议上,米尔斯代表公司所作报告中,披露了公司开发出一种新型氢化学过程来产生功率、等离子体和新的化合物;开发了高功率密度、高温的氢相干装置;正致力于在较低温度下产生光和等离子体用于光的应用和直接转化为电能。这种装置的功率密度与大多数发电厂设备相当,可以避免再用汽轮机等热机;可以用于从手提式家用电器到替代动力厂的发电装置。专家们认为,通过化学过程来产生能量,可以把氢原子的电子降到更低的能级轨道上,释放出更多的能量,比普通氢燃烧放出的能量大许多倍。这一技术有很多优点。从能量平衡角度看,可以允许从水中电解出氢作为燃料源,向大气排放氧气;可以避免用化石燃料等产生的污染,不产生温室气体和有害废物;设计的商用运行成本要比其它能源的低。当然,上述优点须得到实践的证实,才会得到广泛认可。

在进行了长期的多种探索的基础上,我们认为以分数氢的转变为基础的新型氢能源,是传统氢能源和氢热核聚变能源间较为容易实现的、能释放较大能量的新型氢能源,符合联合国对新能源经常提出的可获得性、可用性和可接受性的要求。我国也应及早研究,大力扶植和开发这项可持续发展的新型能源。

参 考 文 献

- [1] Mills R. L., The Grand Unified Theory of Classical Quantum Mechanics, January, (2000), BlackLight Power, Inc., Cranbury, New Jersey, Distributed by Amazon.com
- [2] Haus H. A., On the radiation from Point Charges, American Journal of Physics, 54, (1986), pp. 1126-1129
- [3] Labov S. E., Bowyer S., Spectral Observations of the Extreme Ultraviolet Background, The Astrophysical Journal, 371, (1991), pp. 810-819
- [4] Mills R. L., Good W., Fractional Quantum Energy Level of Hydrogen, Fusion Technology, Vol. 28, No. 4, November, (1995), pp. 169-171

(责任编辑 王宏章)

层简单、效率高等,使得它很适合用于空间核动力推进器。另外,由于工程阶段大大简化,因而从实现点火后到进入商用化阶段所需的时间大大缩短。

既然这种聚变反应有那么多优点,为何过去 40 多年来人们没有更多地去探索它呢?道理很简单,因为地球上 ^3He 的储量很少,留在地球内原生的 ^3He 资源更少,包括从核武器中的氚衰变所产生的 ^3He ,总共也只不过百公斤量级。例如在天然气,特别是深海气井和火山气中,从氚的 β^+ 衰变中全世界每年仅可得到 10~20kg,而氚本身也并不是天然地存在。

简单的计算可知:燃烧每公斤 ^3He 可得到 19 兆瓦年的能量。因此每年要烧掉 100 吨的 ^3He 才能提供世界上每年总耗电量的可观份额。可见,光靠地球上的 ^3He 不可能为人类提供一种实际的能源,所以关键问题是需要找到一种经济可行的办法解决 ^3He 的来源问题。

庆幸的是航天技术和空间开发研究的长足进展给人类这个多年来的美好想法重新点燃了希望之火。月球上有极其丰富的 ^3He 资源尚待人类开发利用。月球的形成距今大约有 40 亿年,从它诞生的那一刻开始,便作为太阳风粒子的收集器一直在收藏 ^3He 。所谓太阳风是从太阳向外喷射的高速带电粒子流,其中氦的通量为每秒每平方米 60 亿个原子。 ^3He 与 ^4He 之比为 0.048%。它是在太阳内强大的重力作用下,由太阳内部的氦和质子发生核反应产生的。太阳风的速度约为每秒 400~500 公里,总的带电粒子密度为 500 万~1 000 万/ m^3 左右,因此带电粒子通量为每秒每平方米 2 000 亿~5 000 亿。从月球的年龄和它的表面积可以估算出大约共有 2~5 亿吨 ^3He 粒子打在 5~10 米深的月球表层土(regolith)内。这是由于月球本身没有磁场,所以 ^3He 粒子可以深入到表层土中。而地球有磁场, ^3He 粒子会沿着地球磁力线慢慢扩散并从大气层逃出。1986 年 9 月美国 Wisconsin 大学核工程系 L. J. Wittenberg 等人^[1]在分析月球表层土样品数据后指出,在月球表面土层中存在大量 ^3He 。计算表明约 100 万吨 ^3He 仍然很疏松地嵌附在月球表层内。很容易通过把月球表面丰富的太阳能转换成微波,再对月球土加热到 600e 而得到。实验表明在这个温度下,月球表层土中 90% 的氦将释放出来。月球上真空度极高,大约 10^{-10}Pa ,不需要运行高真空系统。月球上的有万引力仅为地球上的 1/6,所以很容易挖掘开采月球土。月球上昼夜之间温差很大,可以充分利用。白天月球上环境温度高达 130e,可进行对月球土加热升温的赶气作业;但夜间月球上环境温度下降到-183e,可以就地进行 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 低温同位素分离。研究表明如果/超漏分离器(superleak separator)进一步改进,在月球上分离得到 1 公斤

^3He 只需要 281MJ 能量。运用与目前的航天飞机载重大小相当的不载人运输飞船来回往返月球与地球之间进行运输 ^3He 作业,一次可装载 30 吨 ^3He 燃料返回地球,供给 D^3He 反应聚变电站。运输 ^3He 消耗的能量代价为每公斤 1 000MJ;从月球上开采 1 公斤 ^3He 总共要消耗 2.2@10⁹ MJ 能量,而燃烧 1 公斤 ^3He 可得到 600@10⁹ MJ 能量。能量回报因子为 270 倍,经济上是合算的。它远远高于地球上开采 ^{235}U 供核电站发电的能量偿还比 20,更高于开采煤发电的能量偿还比 16^[1]。单从经济价值来说,每克 ^3He 为 25 000 美元,也是很可观的。

二、国际动态

从上世纪 80 年代中开始,国际上对先进燃料 D^3He 的聚变研究便积极开展起来。这是因为它基本上不产生中子,材料的辐射损伤和感生放射性水平降低约 100 倍^[2],不产生长寿命的强放射性核废料,冷却屏蔽简单,能量转换效率可高达 80% 以上,堆芯可防备冷却系统的流动失效(LOFA)、冷却剂失去(LOCA)等恶性事故,具有固有安全性,无氚的增殖、分离、储存、运输和环境泄漏等问题,所以这种聚变堆的环境安全性非常吸引人。分析认为这种核动力设施甚至可以建在大城市地区。 D^3He 聚变动力很有希望成为本世纪或下世纪很干净的核能源,一旦 D^3T 聚变动力成功后,人们很自然会进一步追求过渡到 D^3He 聚变能。直线位形的 D^3He 反应器有可能发展成为高比推力(10⁶s),且升空阶段无爆炸危险的新型空间核动力火箭,对国防力量的改善可能产生直接影响;也可用作高能质子束癌症治疗仪。

从 1986 年开始美国威斯康星大学核工程系与 NASA(美国国家宇航局)联合,重新考察了 Apollo10 和 12 号带回的月球土,运用苏联的探测设备证实月球表层存在大量 ^3He ^[1],最近日本以 100 倍于美国这方面的研究经费与俄罗斯大规模运载火箭承包商 Npo Energia 合资成立联合企业,两国科学家达成协议,进行月球飞行合作研究的事项。^[3]

关于 D^3He 聚变的国际会议及专题讨论会,每两年举行 1 次,设计中的国际热核聚变实验堆 ITER 也安排了 D^3He 燃烧。1989 年在欧洲联营的当今最大 Tokamak 装置 JET 上成功地产生了 140kW 的 D^3He 聚变功率^[10]。

三、我国的对策和现有的研究基础

我国基础科研的重点,应着眼于本世纪开发国际上有很强竞争力的高新技术,将其作为预研目标。鉴于我国人口稠密的特点,发展更干净、更安

全、高效率(排放三废少)的新能源尤显得十分必要。现有的以裂变为基础的核电站虽然工艺成熟,但核燃料有限,而且在人口稠密的我国更应考虑核电站所产生的核废料处置问题,一旦战争爆发这些核设施又容易首先成为敌人袭击的目标,故从核污染的角度讲,它们如同¹可以引爆的内置原子弹⁰,届时的核环境安全将变得非常严重。

随着我国航天技术的长足发展,2003年载人飞船计划正在准备,国内越来越多的科学界人士认识到对月球进行综合性科学考察具有深远的战略意义。开发丰富的月球表面³He资源可能成为几十年后的主要竞争目标之一,美国、日本、前苏联都相继制定了这方面的计划。笔者建议我国也应保持一支小规模队伍开展跟踪预研。国内核工业西南物理研究院从1991年起开展了4年多预研^[2,4~9],获得国家自然科学基金和核科学基金资助(可惜资金太少),并已被国外列为这个领域的研究机构之一。

这种综合类型的科研项目必须联合国内核工业总公司、科学院、航天工业总公司、地矿部、科技部、总装备部等进行。首次登月应对月球表面的阴暗区域(Maria区)和高原地带(Highlands)所占百分比进行勘查,并分别对表层土取样,带回地球进行分析、测试、计算,查实月球³He的蕴藏量。在月球上遥控开采³He的技术方案设计,应包括掘土、粉碎、筛选、加热、赶气、超漏预浓缩³He/⁴He、低温分馏³He/⁴He、³He液化、运回地球等步骤,每一步的预研均应为下一步工程设计奠定基础。应从能量学角度计算在月球上遥控开采³He运回地球发电的经济偿还因子,为国内组织大规模联合论证其可行性和经济意义,以及为最后实施这一使命作准备。

/九五0前期应继续研究¹²He聚变电站的特殊问题,开展¹²He先进燃料聚变及空间核动力火箭发展前景研究和遥控开采³He的技术细节设计预研,发展相应的工艺技术:(1)发展大规模集成电路的固体整流天线技术,将0.1~1mm波长(2500GHz)回旋辐射微波转换成电能;(2)提高超漏分离器的技术,关键是过滤筛,将初次浓缩³He/⁴He提高到7%水平;(3)太阳能)微波转换器及微波对土层加热驱赶氦气的试验;(4)低温分馏³He/⁴He设备的建立和试验;(5)以¹²He聚变为机理的高比推力、无爆炸危险的空间飞行推进器预研。

本世纪前10年内,应拟定为开发月球³He资源所必须的详细考察计划和技术细节,促进国家在适当时候下决心飞向月球进行综合科学考察。

在该领域我国已有一定的研究基础。工作积累上,我们对¹²He与¹²T燃料聚变已分别从物理要求、包层工艺技术、环境安全、材料试验、加料工艺等方面作了比较系统的研究^[4~5];聚变产物的快离子压强^[6],即时能谱展宽计算^[7],被动式各向异性反

射的回旋辐射电流驱动^[8],月球³He资源开发的经济、技术可行性研究^[9],³He胶囊式加料技术设计等,都已在国内外杂志上发表,有的多次被国外杂志、刊物引用。技术储备上,我们有较强的低温致冷技术和实验水平,近几年已研制和发展了微波加热技术和设备,适当增加必要的设备即可开展模拟月球上特殊环境下相应的工艺试验、³He/⁴He分离实验,尚需发展超漏技术和提高制冷水平或其它分离技术。

四、研究方法 with 阶段性进展计划

关键方法是充分利用月球上的特殊条件进行遥控开采,把开采设备运到月球上,并先在地球上模拟月球上开采³He过程的每步技术。月球约在40亿年前形成以来,一直受到太阳风的轰击,成为太阳风的收集器,太阳风中³He/⁴He之比高达480appm(原子百万分之一浓度)。月球无磁场,太阳风粒子不能扩散出月球。估计在月球表层土中已堆积起约260@10⁶吨³He。月球引力仅为地球的1/6,在月球上掘土、装运都要比地球表面容易得多。月球上太阳能丰富,大约为1.34kW/m²。月球上真空度高达10⁻¹⁰Pa,收集³He气体无需抽真空。可以巧妙地利用月球日夜温差大的特点。白天气温高达130e,选择白天对月球土加热驱赶³He气,容易加热到600e,将³He气从土壤中赶出来;夜晚气温低达-180e,容易进行低温分馏³He/⁴He,节省能源消耗。由于当温度T<T_k时,⁴He无粘性,而³He有粘性,故除了制冷外几乎不消耗什么能量(热能)便可用/超漏分离器⁰。可先将³He/⁴He预浓缩到7%以上,进一步低温分馏成99%³He,再液化后,即可用航天飞机1次运回30吨³He。

目前国家的经费投入只可供预先开展¹²He先进燃料聚变及空间核动力火箭发展前景研究和遥控开采³He技术细节设计的预研。今后,花钱较多的相应工艺技术试验可视预研进度逐步投入。可充分利用现有的低温设备和致冷技术,在已有的微波加热工艺技术支持下,增加必要的设备开展相应的工艺试验。拟阶段性完成:(1)2004年提出对月球进行考察、取样、分析要求的报告,计算月球³He蕴藏量与国外估算做比较;(2)2005~2007年完成在月球上遥控开采³He的技术方案设计(包括可在月球上行驶的全主动轮转向掘土车设计、月球土粉碎机、筛选设备、太阳能微波转换器、微波对月球土加热驱赶氦气模拟试验);(3)2008~2009年开展超漏技术预浓缩³He/⁴He、低温分馏³He/⁴He实验预研,进行射频有质动力分离³He/⁴He或电磁偏转分离、离心分离等实验预研;(4)2010年从能量学角度计算在月球上遥控开采³He运回地球发电的经济偿还因

城市污水地下回注: 水资源的再生与循环利用

Groundwater Recharge with Sewage Effluent: Regeneration and Circulating Utilization of Water Resources

朱书堂 赵 刚 马远乐 赵璇 彭珂珂 杨小晶
(清华大学核能技术设计研究院 北京 100084)

甘一萍
(高碑店污水处理厂 北京 100000)

一、我国北方水资源现状

近 20 年来, 随着我国经济的高速发展和城市规模、人口的扩张, 工农业及城市生活对水资源的需求急剧增加。我国北方大部分地区已面临严重的水资源短缺, 有将近 300 个城市缺水, 年供水不足量达到 600 亿 m^3 ; 传统上干旱、半干旱的西北地区水资源状况更加严峻; 历史上并不缺水的华北地区、黄淮海平原甚至华东一些沿海城市也加入水资源短缺的行列。水资源供应不足已成为影响我国可持续发展的主要因素之一。

总体上, 我国可再生淡水量相当可观: 平均年降水量 600mm, 总水量接近 6 000 km^3 。但是, 我国淡水总量中能够形成淡水资源的水量有限, 约为 2 800 km^3 , 仅占全球淡水资源总量的 6.75%, 居世界第六位; 其中现实可利用量只有 1 100 km^3 左右。并且水资源分布极端不均衡, 地域分布和季节分布相

差悬殊。地域分布上: 南部地区集中了我国水资源量的 80% 以上; 北方地区人口占全国总人口的 44%, 可耕地占总量的 59%, 而水资源拥有量仅为 14% 强。季节分布上: 华北地区降雨量又主要集中在夏季(6~8 月), 其它季节降雨极少。在降雨集中的季节, 很大一部分水量形成地表径流流失; 其它季节则相对干旱。这些特性决定了华北地区水资源需求相当大程度上依赖于地下水。北方城市以取用地下水作为主要水源, 华北和西北城市用水中地下水比例高达 72% 和 66%。

地下水系统实质上是一个看不见的地下水库, 它的作用是将地表降水渗入地下的部分滞、蓄在土壤(砂石)孔隙体中, 其本身并不能增加水资源总量。地下水的开采应该形成一个动态平衡, 一个循环期内被开采的水量应该得到补充、恢复(一般在丰水季通过降雨渗流补充)。如果地下水被长期开采而得不到补充, 就被认为是过度开采。过度开采

子, 为下一步工程设计奠定基础。/ 九五 0 期间完成每一步的计算和设计报告。到 2010~2020 年完成为下一步遥控开采工程设计计算提供依据和一切必要的数据、资料、工艺技术。

初步框算, / 九五 0 期间每年投入 16 人开展工作, 以每人年 10 万计算, 包括建立试验设备等, 整个 / 九五 0 计划期间内至少需经费约 800 万元。在此, 我们呼吁我国有关部门和专家学者在发展空间技术的同时, 对此给予一定的重视, 并联合起来采取相应的对策, 积极开展工作。

参考文献

- [1] L. J. Wittenberg, et al. Fusion technology, 10(1986) 167
- [2] 冯开明, 邓柏权. D^2He 聚变商用堆 Mooncity 的放射性及废物处置计算. 核科学与工程 1993, 13(2): 164
- [3] 谁将开采月球. 美国 5 纽约时报 6, 1992 1219
- [4] 邓柏权. G. A. Emmert, D^2He 聚变动力可行性研究.

核聚变与等离子物理, 1989, 9(4): 213

- [5] 邓柏权. D^2He 商用堆工作物理参数的空间分析. 核聚变与等离子物理, 1993, 13(2): 8
- [6] 邓柏权. G. A. Emmert, 聚变等离子体中的快离子压强. 核聚变与等离子物理, 1989, 9(3): 136
- [7] 彭利林, 邓柏权. G. A. Emmert, 高温 D^2He 等离子体聚变产物的即时能谱展宽计算. 核科学与工程, 1995, 15(1): 45
- [8] Deng Ba2Quan, Feng Ka2Ming, Peng Li2Lin et al. Feasibility studies of D^2He fusion power in China, Nuclear Science and Techniques, Vol. 8, No. 3 (1997) 174
- [9] 邓柏权. 月球 He 资源开发的经济、技术可行性研究. 核科学与工程, 1995, 15(3): 279
- [10] J. Jacquinot, et al. D^2He Fusion in the Joint European Torus Tokamak Recent Experimental Results, Fusion Technology. 21(4) (1992) 2254

(责任编辑 王宏章)