

Will fusion always be the energy source of the future?

核聚变将最终成为未来的能源吗?

陈永静*, 葛智刚, 刘丽乐

中国原子能科学研究院, 核数据重点实验室, 北京 102413

* 联系人, E-mail: cyj@ciae.ac.cn

2015-12-28 收稿, 2016-01-05 修回, 2016-01-06 接受, 2016-02-03 网络版发表

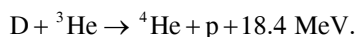
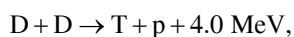
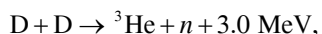
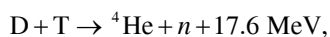
国家自然科学基金(U1430114)资助

摘要 由于地球上的聚变燃料储量丰富, 人们寄希望于可控核聚变能够最终成为人类未来能源的终极供应者, 但经过几十年的发展, 人类仍未完全掌控可控核聚变技术. 本文介绍了核聚变基础知识及可控核聚变技术的发展现状, 力图对这一技术有更加清楚和全面的了解.

关键词 核裂变, 核聚变, 磁约束, 惯性约束, 聚变能

众所周知, 核能主要有裂变能和聚变能两种. 裂变能是重元素(如铀、钚、钍等)的原子核在分裂成质量较轻的原子核过程中所释放的能量. 人类已经掌握了可以控制这个分裂过程的技术, 因此目前世界上所有核电站都是利用可控裂变过程产生的裂变能进行发电的. 其优点是少量原料就可产生巨大的电能、环境污染少且不存在对石化燃料的依赖. 缺点是总是存在发生核事故的风险, 所产生的核废料有放射性, 处置不当对环境会造成污染; 同时铀、钚等资源有限. 目前全球已建成以原子核裂变能量发电的核电站达到400多座, 核电发电量已占电力总发电量的近20%, 同时, 许多核电厂仍正在或计划建设中.

核聚变是指由质量小的原子核, 主要是指氘(D)、氚(T)和氦-3(^3He)等, 在一定条件下(如超高温和高压)发生原子核相互聚合作用, 生成新的质量更重的原子核, 并伴随着巨大的能量释放的一种核反应形式. 常见的聚变反应有如下几个:



相比核裂变, 核聚变有两大优点: (1) 不会产生长寿命和高放射性的核废料, 也不产生温室气体, 因此基本不污染环境; (2) 地球上蕴藏的核聚变能远比核裂变能丰富得多. 据估算, 每升海水中含有0.03 g 氘, 所以地球上仅在海水中就有45万亿吨氘. 1 L海水中所含的氘, 经过核聚变可提供相当于300 L汽油燃烧后释放出的能量. 按目前世界能量的消耗率估计, 地球上蕴藏的核聚变能可用100亿年以上. 因此从原理上讲, 聚变能可以成为人类取之不尽、用之不竭的能源. 但目前人类还没有掌握控制聚变过程的技术, 正因为如此, 世界发达国家不断投入大量的人力、物力和财力进行核聚变能研究和开发. 然而, 可控核聚变的实现在工程上是非常困难的事情. 可控聚变反应和可控裂变反应的研究都是从20世纪50年代初开始的, 时至今日, 核裂变反应堆或发电厂早已普及, 而可控核聚变的和平利用却无一实现. 由欧盟、中国、美国、日本、韩国、俄罗斯和印度7方共同参与的, 为期30年, 耗资100亿欧元的国际热核聚变实验堆(international thermonuclear experimental reactor, ITER)计划(<https://www.iter.org/>), 至今尚未取得获取聚变能的实质性成果.

引用格式: 陈永静, 葛智刚, 刘丽乐. 核聚变将最终成为未来的能源吗? 科学通报, 2016, 61: 1066–1068

Chen Y J, Ge Z G, Liu L L. Will fusion always be the energy source of the future? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1066–1068, doi: 10.1360/N972015-01438

图1显示的是几个聚变反应的反应几率(以截面为单位)随入射粒子能量(以千电子伏特为单位)的关系。可以看出, 氘-氚聚变是最容易实现的, 也是以目前的技术水平来说最现实的选择。即便这样, 要实现聚变过程, 也需要把氘-氚混合气体(等离子体)的温度加热到上亿度, 并维持一定的等离子体密度足够的时间。但要维持这样高的温度, 靠普通的容器约束是无法进行的, 因此必须采用新方法。几十年来对核聚变的研究, 主要沿着磁约束^[1-3]和惯性约束^[4]两大途径进行。

磁约束是利用强磁场对高温等离子体进行约束, 通过构造特殊的磁容器, 将聚变材料加热至数亿摄氏度并维持一定的等离子体密度, 实现聚变。这一技术方向的聚变能研究已经取得了重大进展, 其中以托克马克类型的磁约束研究为典型代表, 达到了建立像ITER这样的实验堆的阶段。

惯性约束与磁约束不同。惯性约束实际上对等离子体不加约束, 而是利用粒子的惯性, 在它们来不及散开之前就发生聚变反应, 以取得足够的能量。国际上包括美国、法国、中国等在内的国家都在这方面开展了许多工作。但是美国的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)^[5]目前没有达到预期的点火目标, 一定程度上影响了人们对这一途径的信心, 而离

建造能够发电的电厂则有更遥远的路要走。

以目前人类的技术水平, 只能实现基于氘-氚聚变的第一代聚变堆建设。虽然地球上的氘资源是“无限”的, 但是却没有氚资源, 因此氚是靠中子与锂-6 (${}^6\text{Li}$)反应生产出来的, 即 $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He}$, 这就涉及了锂资源的问题。此外, 产氚需要中子, 为了使聚变能够持续进行, 需要聚变堆在运行的同时, 不断地生产足够的氚, 用于补充反应掉的氚, 即需要一整套复杂的氚产生及在线处理系统。这不仅要求充分利用氘-氚反应产生的中子, 还需要对中子进行增殖, 以保证有足够的氚增殖系数。因此, 聚变堆也需要用到大量的中子增殖材料, 如铍、铅等, 但是这些资源并不是无限的。Bradshaw等人^[6]曾对这些因素进行过研究, 他们假设到2050年, 人类的用电量比2007年翻一番, 其中聚变堆发电量占30%, 则需要2760个1 GWe的聚变电站。这样每年需消耗806 t的锂-6, 初始装料至少需要9940 t, 已知的现有锂资源可维持3540年。对于铍的用量, 每年消耗524 t, 初始装料需331000 t, 而目前已知的铍储量只有约80000 t, 即现有的铍储量已经不够这么多电站的初始装料。如果用铅作为中子增殖剂, 则情况会好很多, 每年消耗约8560 t, 初始装料为11.3 Mt。目前的储量可以维持175000年。以上这些资源的估算只考虑聚变电站的使用, 没有考虑这些资源别的用途, 也没有考虑这些资源开采的难度和成本。

聚变能要成为人类可大规模利用的能源, 除了技术可行性和安全性之外, 还需要把成本控制得足够低才有竞争力。因此核聚变是否能成为人类能源需求的终极供应者, 目前似乎还无法给出肯定的答案。ITER自2010年开始建造以来, 由于各种技术、合同及资金问题, 该项目的进展一再推迟。现在ITER组织希望在2020年开始实验, 2027年开始注入氘和氚燃料, 而氘和氚燃料的实验需要进行约10年之久, 之后才有可能进行示范堆及商业堆的建造。因此人类掌握核聚变之路依然漫长。

值得关注的是, *Science*于2015年8月24日报道了位于美国加州的聚变能研究公司Tri Alpha最近取得了可控聚变的新突破(<http://news.sciencemag.org/physics/2015/08/secretive-fusion-company-makes-reactor-breakthrough>), 有望在ITER采用的大型托克马克装置之外为可控核聚变能利用找到更为经济的技术路线。他们使用的聚变燃料是氢-硼等离子体, 达到聚变的温

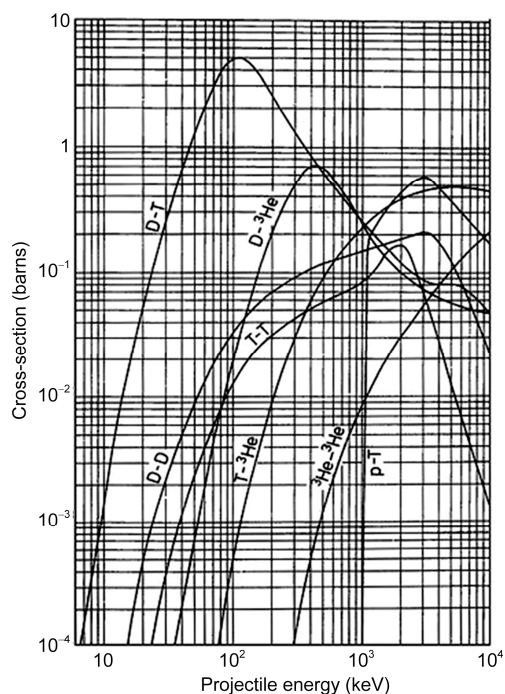


图1 常见的几个聚变反应截面

Figure 1 Fusion reaction cross sections commonly used

度需要30亿摄氏度,这意味着更加困难的技术挑战.之所以选择氢-硼作为聚变燃料是因为其聚变反应中不会释放中子,而只产生3个 α 粒子,更适用于聚变

能的商业利用,这也是公司命名为Tri Alpha的原因.虽然很多人对这一成果质疑,但依然获得了美国学术界及企业界的广泛关注.

致谢 本文得到了中国原子能科学研究院周祖英研究员和阮锡超研究员的帮助,在此表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Glasstone S, Lovberg R H. Controlled Thermonuclear Reactions. Princeton: D.van Nostrand Company, INC, 1960. 523
- 2 Goldston R J, Rutherford P H. Introduction to Plasma Physics. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1995
- 3 Miyamoto K. Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion. Tokyo: Iwanami Book Service Center, 1997
- 4 Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications. Nature, 1972, 239: 139–142
- 5 Paisner J A, Boyes J D, Kumpan S A. Conceptual design of the national ignition facility. Proc SPIE, 1995, 2633: 2–12
- 6 Bradshaw A M, Hamacher T, Fischer U. Is nuclear fusion a sustainable energy form? Fusion Eng Design, 2011, 86: 2770–2773

Will fusion always be the energy source of the future?

CHEN YongJing, GE ZhiGang & LIU LiLe

Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Due to earth's fusion fuel reserves are abundant, it hopes that controlled nuclear fusion can eventually become the ultimate providers of mankind's future energy source. But after decades of development, mankind has not yet been completely in control of controlled nuclear fusion technology. This paper introduces the basic knowledge of nuclear fusion and the development status of controlled nuclear fusion technology, trying to make us more clear and comprehensive understanding of this technology.

nuclearfission, nuclearfusion, magnetic confinement, inertial confinement, fusion energy

doi: 10.1360/N972015-01438



陈永静

理学博士,中国原子能科学研究院、中国核数据中心、核数据重点实验室研究员,粒子物理与原子核物理专业硕士生导师.自2006年以来主要从事核数据理论计算与评价以及核结构理论研究,主持和参与了多项国家自然科学基金项目,在国内外物理学期刊上发表了第一作者SCI收录文章20余篇.