

文章编号: 1007-4627(2007)04-0328-05

核爆氙-氙聚变能电站*

——聚变能和平利用的一种可能的途径

刘成安

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 简要地分析了利用核爆氙-氙聚变能发电的可行性及优点, 按 10 kt TNT 核爆氙-氙聚变的规模, 估算了热载体钠的储能作用及用量, 核爆冲击波对爆室壁的作用强度及爆室壁的承受能力。

关键词: 核爆氙-氙聚变; 热载体; 爆室; 冲击波

中图分类号: TL64⁺1 **文献标识码:** A

1 引言

1952年11月1日美国首次以液态氙作燃料在地面上进行了氙-氙聚变的核爆炸, 释放出 4.19×10^{16} J 的能量, 相当于 10 000 kt TNT 当量炸药的能量, 用这些能量以 35% 的效率转化为电能, 相当于 1 GWe 标准电站运行半年。然而这样多的能量却是在百万分之几秒的时间内放出的, 这样的放能系统作为武器可具有无可比拟的威力和破坏作用。要想用于和平目的, 特别是发电, 就必须采取特殊的措施加以控制。

1955年在日内瓦召开了第1次和平利用原子能的国际会议, 科学家乐观地预言, 可控的聚变反应也许 20 年内就可能实现。到目前为止人类已经为此奋斗了半个世纪, 这个预言到今天还远未变成现实。无论是磁约束聚变(MCF)还是惯性约束聚变(ICF)作为能源仍有相当远的距离。

MCF 是用磁力线约束带电粒子, 将其维持在高温状态, 使其发生具有一定规模的聚变反应。为维持聚变的持续进行, 可用 α 粒子携带的能量和将聚变产生的部分能量转换为电能或微波能以加热等离子体。根据英国物理学家 J. D. Lawson(劳逊)1957年导出的判据(劳逊判据), 要使聚变反应系统输出的能量等于加热等离子体, 并维持高温状态所需的能量, 那么等离子体密度 n 、温度 T 及约束时间 τ 的乘积必须达到一定的值。例如, 对氙-氙反应, 要

求 $n\tau T = 10^{21}(\text{s} \cdot \text{keV})/\text{m}^3$ 量级; 对氙-氙反应, $n\tau T = 10^{23}(\text{s} \cdot \text{keV})/\text{m}^3$ 量级。目前磁约束氙-氙反应的聚变虽已接近劳逊判据的水平, 但距聚变系统具有纯能量输出, 还有相当的距离。

ICF 是利用驱动器输出的高功率脉冲(如激光)能量压缩聚变材料(氙-氙)靶丸, 使丸内氙-氙混合物达到高密度和热核点火温度, 在惯性约束状态下发生自持的热核反应。高功率脉冲的能量也是由聚变产生的能量转化而来, 当释放的能量超过系统消耗的能量时, 就获得了能量增益。近些年通过富有成果的研究, 已获得了很大进展。从美国地下核试验数据可以推测, 如果能提供 10^7 J 能量的激光, 就可使 5—10 mg 的氙-氙达到 100 倍的增益^[1], 即每次微爆炸可产生 10^9 J 的能量, 但是 ICF 反应系统, 可作为能源也同样还有相当大的距离。

在 MCF 和 ICF 的方案中, 是通过控制聚变反应的规模和速度来控制聚变放能的速度, 以实现聚变能的和平利用。下边我们要研究的方法是以核爆压缩的方式。使数百克氙达到很高的密度和温度, 发生大规模、高速度自持的聚变反应。将此瞬时产生的大量能量储存于热载体(如液态钠或钠钾混合物)中, 而后以可以接受的、较为缓慢的速度将热载体中储存的能量传输出来, 用于发电。

核爆氙能发电方式, 超出了传统的尽量减慢放

* 收稿日期: 2007-04-26; 修改日期: 2007-08-17

* 基金项目: 中国工程物理研究院专项课题基金资助项目(2004Z0206)

作者简介: 刘成安(1936-), 男(汉族), 河南息县人, 研究员, 从事核工程和核军备控制核查技术研究;

E-mail: liu_chengan@iapcm.ac.cn

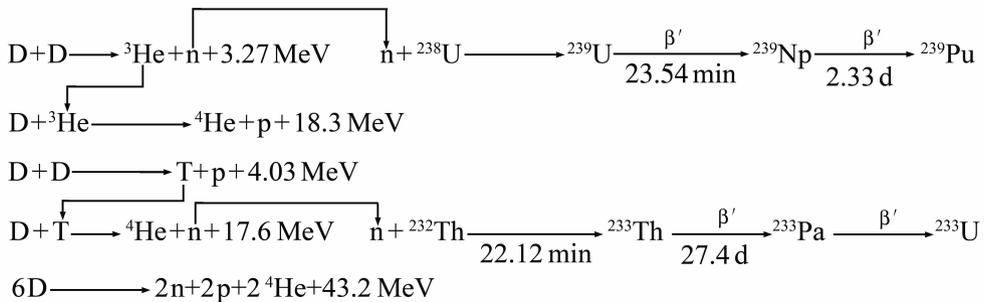
能速度和规模的思维模式,以爆炸式、大规模、高效率、高速度的放能,将瞬时产生的能量储存于热载体物质中,而后以缓慢传出的方式,实现聚变能的和平利用,它可以用现有已被证实的技术实现聚变能的和平利用。

在20世纪70年代开始,美国和前苏联已开展了这方面的研究,我国在中国工程物理研究院彭先觉院士领导下,进一步开展了核爆氘-氦聚变电站的概念性研究。

我们认为核爆氘-氦聚变能发电可能是一种大规模和平利用氘-氦聚变能,一劳永逸地满足人类对能源需求的途径之一,值得重视和开发研究。

2 核爆氘-氦聚变装置

已如前述 MCF 和 ICF 的大部分能量,不能直接用于加热等离子体,须将聚变产生的部分能量转化为微波能或激光能以维持聚变的持续进行,而核爆聚变可以自行维持聚变反应,达到很深的燃耗。早在20世纪50年代初美国进行了高威力的氘-氦



相对于裂变反应而言,氘-氦聚变反应是多中子反应系统。一次裂变放出200 MeV能量和不到2个中子(因裂变本身要吸收1个中子),而氘-氦聚变反应每放出43.2 MeV,即产生2个中子。相同释放大能量产生的中子数是裂变反应的5倍,这对于生产易裂变材料或氦是极为有利的。部分能量被中子带出核爆装置之外,对于减小爆炸波的破坏作用也是极为有利的。

3 氘-氦聚变能的载体^[2]

核爆氘-氦聚变在桔子大小的空间和 μs 量级的时间内放出10 kt TNT当量的能量,温度在 10^8 K 以上,这就需要有一种能量载体将其储存起来。对能

聚变装置的爆炸试验,现在世界上包括中国在内的5个核国家都已比较熟练地掌握了设计干净聚变核装置和地下核爆试验技术。有可能将核爆聚变发展为聚变能源系统。

聚变核爆炸装置由初级和次级组成,初级就是一枚小型的原子弹,以裂变放能为主,需用少量的浓缩铀或 ^{239}Pu 或 ^{233}U 等易裂变燃料。次级就是干净的小氢弹,主要以氘作燃料加少量氦。利用初级小原子弹爆炸提供的光辐射压缩次级,使次级弹芯达到高温、高密度,实现高温、高密度下的氘-氦自持聚变反应。设想初级的放能为 $4 \times 10^{12} \text{ J}$ (1 kt TNT当量),次级的为 $3.6 \times 10^{13} \text{ J}$ (9 kt TNT),即每次放能 $4 \times 10^{13} \text{ J}$,比惯性约束的微爆炸放能大数十万倍。

初级用的易裂变材料 ^{239}Pu 或 ^{233}U 可由聚变放出的中子与 ^{238}U 或 ^{232}Th 作用产生,次级用的少量的氦由氘-氦聚变反应产生^[1]。产出量多于系统本身消耗的量。还可为其它能源系统提供燃料。

反应过程如下:

量载体材料的要求是:(1)熔点低和热容量大,使系统工作温度不至于太高,以免影响结构材料的强度;(2)腐蚀性小;(3)易于获得,不太昂贵;(4)在中子的作用下不至于产生过多的额外放射性。经分析,钠或钠钾混合物比较满足这种要求。

在爆炸的瞬间,将液态钠按一定的分布形式喷进爆室,在爆炸点周围形成包围层,一方面起到减弱爆炸冲击波强度的作用。同时吸收、储存爆炸产生的能量(包括动能、辐射能、内能)将其转化为钠的热能,以一种可以接受的速度,将所携带的能量传输给第2回路,用于发电。

为消除钠热载体与其结构材料的化学作用,可以在爆室内同时充以常压下的氦或氩(因温度高,常

压下的氩气密度约为室温下密度的 1/3, 即 0.6 kg/m³), 载热剂循环的温度在 120—600 °C 之间。

钠的熔化温度为 97.8 °C, 密度为 $\rho = 0.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 比热容约为 1.21 kJ/(kg · K)。由此可以算出, 储存 10 kt TNT 当量的能量约需 70 kt 以上的钠作热载体。

在爆室高温环境下, 有一部分聚变能量会消耗在钠、氩原子的激发上和钠的汽化上。钠的汽化温度为 883 °C。汽化热约为 4 MJ/kg, 爆炸能量的相当部分会转化为钠的汽化热, 成为“冻结”状态的能量。从而降低了载热介质的温度和工作压力。

对氘-氘聚变而言, 聚变产生的能量有 30% 以上由中子所携带, 这部分能量会很快随中子迁移到载热介质中, 变成弥散在介质中的热能。这就大大降低了定向动能份额, 降低了冲击波的强度, 减弱了冲击波对爆室外壁的伤害作用。

4 爆室及爆炸波对室壁的作用

4.1 爆室

爆室是进行核爆炸释放聚变能并用热载体钠储存、传输能量的地方, 工作在脉冲式高温、高压的环境下。世界上已设计了若干种类型的爆室, 都能经受数千次核爆炸。例如, 俄罗斯设计的爆炸燃烧锅炉 KBC25^[3], 其放能比容, 即每吨 TNT 当量核爆炸所需的爆室体积为 120 m³/(t · TNT) 按此放能比容, 10 kt TNT 级核爆炸的球形室半径应为 $R = 66 \text{ m}$ 。

4.2 10 kt TNT 核爆的爆轰波

氘-氘聚变爆炸能量有 30% 以上是中子携带的, 这部分能量会随中子的迁移, 弥散在爆室的热载体中, 变成热能。有 20% 的能量是辐射能和热能, 还有一部分转化为钠的汽化能, 估计爆炸产生的向外飞散的定向动能部分可能在 50% 以下。动量产生的压强

$$P \approx \frac{mv^2/R}{4\pi R^2} = \frac{2Q_{\text{动}}}{3V_{\text{爆室}}}, \quad (1)$$

其中, $Q_{\text{动}}$ 为爆炸产生的动能, $V_{\text{爆室}}$ 为爆室的体积。按爆炸能为 10 kt TNT, 动能占 50%, 球形爆室半径 $R = 66 \text{ m}$, 则有

$$P \approx \frac{2}{3} \times 0.5 \times 4.19 \times 10^3 \text{ (J)} / (H\pi/3) \\ \approx 1.16 \times 10^7 \text{ J/m} \approx 116(0.1 \text{ MPa}),$$

即相当于 116 atm。

核装置的质量和体积比爆室的体积小得多, 可以把核爆看作点爆, 在点爆理论近似下, 冲击波的波阵面压强 $P_{\text{波阵面}}$ 以速度 D 传播, 其大小依赖于 t 时波阵面到达的位置 r , 介质的密度 ρ 和爆炸能量 Q_{tot} 。

$$r = \left(\frac{Q_{\text{tot}}}{\rho_0} \right)^{1/5} t^{2/5}, \quad (2)$$

$$D = \frac{2}{5} \sqrt{\frac{Q_{\text{tot}}}{\rho r^3}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{波阵面}} = \frac{2}{\gamma + 1} \rho D^2 = \frac{8Q_{\text{tot}}}{25(\gamma + 1)} \frac{1}{r^3}, \quad (4)$$

其中 $\gamma = C_p/C_v \approx 1.67$, 于是有

$$P_{\text{波阵面}} \approx \frac{1}{(66)^3} \frac{8 \times 4.19 \times 10^{13} \text{ (J)}}{25(2.67)} \\ \approx 1.746 \times 10^7 \text{ J/m}^3 = 170(0.1 \text{ MPa}).$$

对氩与用 $Q_{\text{动}} \approx 0.5Q_{\text{tot}}$ 估计的结果在量级上是一致的。

在冲击波垂直入射和反射的条件下, 冲击波施加于爆室壁上的压强为

$$P_{\text{静}} = \left(2 + \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) P_{\text{波阵面}} \approx 6P_{\text{波阵面}} \\ = 1020(0.1 \text{ MPa}).$$

这是爆炸波对爆室壁的瞬时作用的最大压强, 是一般爆室结构材料可以忍受的压力(见表 1)。因其对爆室作用的时间极短, 对爆室的不利影响并无特别重大意义, 压强对时间的积分或传给室壁的机械冲量更为重要。

表 1 几种材料抗压强度特性

材 料	常温下的	高温下(700 °C)
	抗压强度 (0.1 MPa)	的抗压强度 (0.1 MPa)
花岗岩	1 500—2 000	1 500—2 000
水泥	700	
陶 瓷	3 000—6 000	3 000—6 000
316 不锈钢	6 000	3 200
常用钢	6 700	6 700

爆室壁受到的冲量和比冲量可以估计如下:

$$\text{冲量} \quad I(r) = \sqrt{2Q_{\text{动}} M}, \quad (5)$$

$$\text{比冲量} \quad i(r) = \frac{I(r)}{4\pi r^2}, \quad (6)$$

在 $Q_{\text{动}} \approx 0.5 \times 10 \text{ kt TNT}$, 室壁半径 $r = 66 \text{ m}$, 爆室中含钠 70 kt 的情况下

$$i = \frac{\sqrt{2 \times 0.5 \times 4.19 \times 10^{13} (\text{J}) \times 70 \times 10^{16}}}{4\pi \times 66^2} \\ \approx 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s} \approx \text{MPa} \cdot \text{s} = 10(0.1 \text{ MPa}) \cdot \text{s}。$$

这个比冲量值可通过几十 ms 传给爆室钢壁, 高压只存在几个 ms, 这时材料来不及位移, 所以钢壳强度是可以忍受的。

4.3 核爆内能产生的温度和压强^[4]

假设核爆产生的能量有 50% 直接转变为内能。理想气体内能对压强的贡献取决于分子的自由度 f , 对单原子 $f = 3$, 则 10 kt TNT 爆炸能量的内能为 $0.5 \times 4.19 \times 10^{13} \text{ J}$, 产生的压强为

$$P_{\text{静}} = \frac{2}{3} \frac{Q_{\text{内}}}{V} = \frac{2}{3} \frac{0.5 \times 4.19 \times 10^{13} (\text{J})}{\frac{4}{3}\pi(66)^3} \\ \approx 116(0.1 \text{ MPa}), \quad (7)$$

与 50% $Q_{\text{动}}$ 产生的压强恰好相等, 事实上由于钠吸收相当一部分汽化热对 $P_{\text{静}}$ 是没有贡献的, 使得算出的压强 $P_{\text{静}}$ 小于由单原子气体得出的压强^[4]。

4.4 爆室壁的强度极限

爆室可设计为近球形, 外壳为厚钢壁并镶嵌在山体岩石中。钢外壳在冲击波的作用下, 所获得的势能等于由爆炸波所获得的动能。尺寸为 l , 体积为 l^3 的体元最大可承受的势能等于其延伸量 $\Delta l/l = \sigma_{\text{允}}/E$, 与允许最大强度 $\sigma_{\text{允}}$ 之乘积, 即

$$q_{\text{势}} = \frac{\sigma_{\text{允}}^2}{2E} \quad \text{或} \quad q_{\text{势}} = \frac{\sigma_{\text{允}}^2}{2E\rho}, \quad (8)$$

其中, E 为钢的弹性模量, $q_{\text{势}}$ 为单位体积的极限势能, $q_{\text{势}}$ 为单位质量的极限势能。钢壳单位质量的动能为 $V_{\text{极限}}^2/2$, 钢壳保持强度为条件为

$$\frac{\sigma_{\text{允}}^2}{2E\rho} = \frac{V_{\text{极限}}^2}{2}。 \quad (9)$$

对钢而言, $\sigma_{\text{允}} = 2 \times 10^8 \text{ Pa}$, $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $\rho_{\text{钢}} = 7.87 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 于是有

$$V_{\text{极限}} \leq \frac{\sigma_{\text{允}}}{\sqrt{E\rho}} = \frac{2 \times 10^8}{\sqrt{2 \times 10^{11} \times 7.87 \times 10^3}}$$

$$= 5 \text{ m/s}。 \quad (10)$$

由此可以估出钢壳所需的总质量和厚度:

$$M_{\text{钢}} = \frac{I}{V_{\text{极限}}} = \frac{\sqrt{2Q_{\text{动}} M_{\text{氦}}}}{V_{\text{极限}}} \\ \approx \frac{\sqrt{2 \times 0.5 \times 4.19 \times 10^3 \times 7.2 \times 10^5}}{5} \\ \approx 1 \text{ Mt}。 \quad (11)$$

由 $\Delta R = M_{\text{钢}}/4\pi R^2 \rho_{\text{钢}}$ 可估出爆室壁的厚度:

$$\Delta R \approx \frac{M_{\text{钢}}}{4\pi(66)^2 \times 7.87 \times 10^3} \approx 2.3 \text{ m}。$$

将爆室镶嵌在岩石中, 可以进一步减少钢外壳的安全厚度。

5 简单结论

核爆氦能发电超出了传统的控制聚变放能规模和速度的思维模式, 而利用爆炸式大规模、高速度、高效率的聚变放能, 以大量的热载体(钠)物质储能的方式来实现聚变能的和平利用。

其特点是: (1) 已掌握了大规模、高速度的聚变放能的技术; (2) 聚变放能主要核燃料是氦, 氦存在于海水中, 每升海水中氦的含能量相当于 300 L 石油, 海水中氦可供能源利用数百亿年; (3) 跨越了氦-氘聚变反应发展阶段(劳逊判据 $n\tau T = 10^{21} (\text{s} \cdot \text{keV})/\text{m}^3$), 直接实现氦-氘聚变能的发电(劳逊判据 $n\tau T = 10^{23} (\text{s} \cdot \text{keV})/\text{m}^3$); (4) 爆室镶嵌在岩石中, 以扩大爆室容积的方式减小爆炸波对爆室壁的损伤, 不存在原则上的困难; (5) 每天进行 6—7 次放能 $4 \times 10^{13} \text{ J}$ 爆炸, 可产生 1 GWe 电功率标准电站所需的热功率; (6) 氦-氘聚变是富中子系统(裂变放能系统, 每释放 100 MeV 能量, 伴随产生 1 个中子, 氦-氘聚变系统, 每释放 20 MeV, 伴随产生 1 个中子), 中子可用来造裂变材料 ^{239}Pu 或 ^{233}U 。氦-氘反应生产的 ^{239}Pu , ^{233}U 和氦除本身消耗外, 还有剩余可供它用; (7) 干净, 它产生的放射性, 远小于裂变能源系统。

虽然爆炸氦能能源的技术可行性、经济性还有待进一步研究, 但由初步的研究分析可知, 爆炸氦能能源装置的实现是可能的。我们应重视这一实现氦-氘聚变能源的新途径, 将军用成果变为人类可永久使用的充足新能源。

参考文献 (References):

- [1] Bai Yun, Pen Xianjue. Chinese Journal of Computational Physics, 2006, **23**(5): 589 (in Chinese).
(白云, 彭先觉. 计算物理, 2006, **23**(5): 589.)
- [2] Pen Xianjue, Zhu JianShi, Zhang Xinwei. Physics, 1997, **26**(8): 481 (in Chinese).
(彭先觉, 朱建士, 张信威. 物理, 1997, **26**(8): 481.)
- [3] Hua Xinsheng, Mo Bojin (Translator). Nuclear Explosion Deuterium Energetics. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1998, 56—69 (in Chinese).
(译者: 华欣生, 莫伯锦. 核爆氘能源学. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1998, 56—69.)
- [4] Hao Baotian. Underground Nuclear Blast and Its Application. Beijing: National Defence Industry Press, 2002, 42 (in Chinese).
(郝保田. 地下核爆炸及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2002, 42.)

Nuclear Explosion Deuterium-deuterium Fusion Power^{*}

——A Possible Way to Peaceful Use of Fusion Energy

LIU Cheng-an¹⁾

(*Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

Abstract: In this paper the feasibility and advantage of nuclear explosion deuterium-deuterium fusion to generate electricity are analyzed briefly. According to scale of 10 kt TNT nuclear explosion deuterium-deuterium fusion, the function of heat carrier on keeping energy and its amount, the action intensity of shock wave of nuclear explosion on chamber wall and bearing capacity of explosion chamber wall are estimated.

Key words: nuclear explosion deuterium-deuterium fusion; heat carrier; explosion chamber; shockwave

* Received date: 26 Apr. 2007; Revised date: 26 Aug. 2007

* Foundation item: Development Foundation of Science and Technology of China Academy of Engineering Physics (2004Z0206)

1) E-mail: liu_chengan@iapcm.ac.cn