

基于积分分析方法对聚变堆启动氚量 与所需氚增殖比的评估

王 俊, 张 龙, 李茹烟

核工业西南物理研究院, 四川 成都 610225

摘要:托卡马克聚变堆的主要发展方式包括混合堆、纯聚变堆。关于托卡马克聚变堆氚自持的研究,国内外主要采用平均滞留时间方法进行研究,并且针对聚变功率较低的混合堆的氚自持研究较少。本工作采用更符合实际的积分分析方法分析了混合堆、纯聚变堆氚自持的启动氚量、氚增殖比(TBR)要求。研究结果表明:启动氚量、备用氚量与聚变功率具有线性关系,所需 TBR 与聚变功率呈反比例关系;混合堆聚变功率较低,所需 TBR 较高,工程实现所需 TBR 挑战较大,需要通过限制长期氚滞留量以降低所需 TBR 要求;纯聚变堆聚变功率高,所需 TBR 较低,工程实现所需 TBR 挑战较小,但备用氚需求达数十千克,应考虑氚系统的冗余设计或提高氚系统的可靠性、可维护性,以降低备用氚的使用规模;运行因子是聚变堆的一个重要设计指标,在此着重分析了运行因子对所需 TBR 的影响,并重新定义了一个聚变堆氚自持的关系式,以突出运行因子对氚自持的重要影响。

关键词:聚变堆;积分分析方法;启动氚量;所需氚增殖比

中图分类号:TL62 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2024)02-0118-07

doi:10.7538/hhx.2024.YX.2023058

Assessment of Startup Inventory and Required Tritium Breeding Ratio for Fusion Reactor Based on Integrated Analytical Scheme

WANG Jun, ZHANG Long, LI Ru-yan

Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China

Abstract: The development of Tokamak fusion reactors encompasses hybrid and pure fusion reactor designs. In the study of tritium self-sustainability, the average retention time method is predominantly employed for Tokamak fusion reactors, with less emphasis on hybrid reactors. To enhance research in this area, this paper employs a more realistic integral analysis method to examine the requirements for startup tritium inventory and tritium breeding ratio(TBR) necessary to achieve tritium self-sustainability in both hybrid and pure fusion reactors. The findings demonstrate a linear relationship between startup tritium inventory, backup tritium inventory, and fusion power, while the required TBR is inversely proportional to the fusion power. Notably, the reserve tritium inventory plays a significant role in determining startup requirements for hybrid reactors. Within the range of 50-450 MW fusion

power, a TBR above 1.15 is needed; particularly below 100 MW fusion power level where it reaches 1.4-posing substantial engineering challenges. The impact of initial levels of startup tritium on required TBR in hybrid reactors is negligible; however, reducing long-term tritium retention can help lower TBR requirements. For pure fusion reactors as well, it is observed that reserve tritium constitutes most of the startup inventory with tens of kilograms being necessary; therefore, considering redundant design or improving maintainability and reliability should be explored to reduce reserve tritium. Furthermore, achieving a required TBR below 1.15 appears more feasible within a range of 1-5 GW fusion power for pure fusion reactors. This paper further examines the impact of operational factors on the required TBR, and the study demonstrates that operational factors are an essential prerequisite for achieving tritium self-sustainability. To emphasize the influence of operational factors on tritium self-sustainability, this paper proposes a redefined relational equation for assessing tritium self-sustainability in fusion reactors.

Key words: fusion reactor; integrated analytical scheme; startup inventory; required TBR

由于氘燃料资源的稀缺,氘氘聚变反应堆除一定的启动氘供给外,其他的氘燃料需要通过自身增殖获得。在聚变堆中,面向热核等离子体周布含锂包层部件,氘氘聚变中子入射包层与其中的锂核素反应产氘,以弥补氘燃料以及衰变损失、滞留与渗透等损失,实现氘燃料的自给自足——氘自持。从而,启动氘量与包层氘增殖能力是聚变堆氘自持设计的两个关键因素。氘增殖比(TBR)表征包层系统的氘增殖能力,是指一个聚变中子入射到包层中所增殖的氘原子平均个数;而所需氘增殖比(Δ_r)为聚变堆氘自持目标所要求的最小氘增殖比。氘自持要求聚变堆包层工程上可实现的氘增殖比(Δ_a)应大于所需 TBR(Δ_r),即 $\Delta_a > \Delta_r$ ^[1]。关于聚变堆所需 TBR 以及启动氘量需求的研究一直备受关注。Abdou 等^[1]率先采用平均滞留时间方法,发展了表述聚变堆氘燃料动态循环的一阶线性微分方程组模型,以解析解的方式详细描述了聚变堆实现氘自持的启动氘量、所需 TBR 要求。邓柏权等^[2]采用平均滞留时间方法,通过数值计算描述了氘自持的相关条件。陈红丽等^[3-4]借鉴国际热核聚变实验堆(ITER)的氘燃料循环回路,采用改进的平均滞留时间模型对中国聚变工程实验堆(CFETR)的氘自持条件进行了参数敏感性分析。王俊等^[5]采用平均滞留时间模型分析了聚变功率、燃烧率、运行因子等对 CFETR 的氘平衡以及启动氘量的影响。冉光明等^[6]采用平均滞留时间模型对 CFETR 氘自持验证策略进行了分析。由于平均滞留时间模型不能描述真实的氘系统运行工况,譬如氘系统的分批

处理运行等,也不能表述氘系统的长期氘滞留。因此有必要采用更接近真实运行工况的模型来精确表征氘自持的关键影响因素。Kuan 等^[7]发展了一种积分模型来精确评估聚变堆的启动氘量与所需 TBR,该方法通过直接计算子系统氘滞留量以代替平均滞留时间方法,并且根据实际情况将聚变堆氘循环子回路的氘滞留量区分为长期滞留氘量、动态滞留氘量,滞留氘量则可通过部件或系统级的氘分析软件评估获得。Kuan 等^[7]采用该模型分析了纯聚变堆的氘自持需求。托卡马克聚变堆的发展方式包括混合堆、纯聚变堆两种重要的方向。国内外主要采用平均滞留时间方法对托卡马克纯聚变堆进行分析,而托卡马克混合堆的氘自持问题研究较少。在此,本工作采用 Kuan 等^[7]所发展的积分分析方法对混合堆、纯聚变堆的氘自持需求进行比较分析,系统地探索托卡马克聚变堆氘自持关键影响因素的作用规律。

1 氘自持积分分析方法

在聚变堆中,由于氘氘燃烧率较低,向堆芯加料的氘燃料仅有约百分之几发生氘氘聚变反应,大部分的氘燃料从等离子体输运移出,经由排灰气处理线路进行循环,回流到燃料储存系统。滞留在第一壁的氘燃料,通过壁处理也经由排灰气处理线路进行收集,回流到燃料储存系统。在等离子体启动和稳态运行过程中,通过储存系统向堆芯等离子体加料,该部分称为加料线路。包层中增殖的氘经提取后送入氢同位素分离系统实现氘的富集和分离,该部分称为氘增殖线路。氘增

殖线路与排灰气处理线路在氢同位素分离系统处连接。堆芯包层等部件的冷却剂回路中有来自等离子体驱动渗透的氦与气体压力驱动渗透的氦,该部分称为冷却剂线路。另外,等离子体排灰气中含氦杂质成分的处理子系统部分称为杂质处理线路。加料、排灰气处理线路直接影响等离子体的持续运行,归类为关键线路,而氦增殖线路、冷却剂线路、杂质处理线路为非关键线路。并且将氦循环系统中的氦分为短期(动态)滞留氦和长期滞留氦。整堆的氦燃料循环作为一个控制体考虑时,包层增殖的氦视作直接弥补聚变反应燃耗的氦,则可将氦分为净产氦和初始启动氦,并考虑氦燃料的衰变、长期滞留、含氦放射性废物以及向环境释放的损失。基于此,采用 Kuan 等^[7]建立的整堆氦燃料循环模型,分析从起始时刻到任意时刻时间段内的积分氦平衡模型(式(1))。

$$\int_0^{t_f} F_{\text{net}} dt + \int_0^{t_f} \left(\frac{dI_{i,0}}{dt} \right) dt - \sum_i^{\text{longterm}} I_i - I_{\text{waste}} \Big|_0^{t_f} = I_{\text{req}} \quad (1)$$

式(1)左侧第一项描述聚变堆净产氦量; I_{req} 为向其他反应堆提供启动氦的产氦需求。其中: t_f 为所关心的运行时间点, F_{net} 为单位时间的净产氦速率, I_i 为各子系统氦盘存量, $I_{i,0}$ 为各子系统的初始启动氦量, I_{waste} 为放射性废物中的氦盘存量。

氦的增殖、氦的燃耗、净产氦的衰变损失以及从燃料循环系统向环境释放的损失,综合为净产氦量(式(2))。

$$\int_0^{t_f} F_{\text{net}} dt = \left[(\Lambda - 1) a_p a_{\text{op}} \left(\frac{P_f}{Q_f} \right) + \overline{F_{\text{ext}}^{\text{in}}} - \overline{F_{\text{ext}}^{\text{out}}} - \overline{F_{\text{env}}} \right] \times \frac{(1 - e^{-\lambda t_f})}{\lambda} \quad (2)$$

其中: λ 为氦衰变时间常数, Λ 为氦增殖比, a_p 为脉冲运行燃烧时间占比, a_{op} 为运行因子, P_f 为聚变功率, Q_f 为一次聚变产生的能量, $\overline{F_{\text{ext}}^{\text{in}}}$ 为0— t_f 时间段内氦燃料循环系统由外部供给氦燃料量的平均值; $\overline{F_{\text{ext}}^{\text{out}}}$ 为0— t_f 时间段内向外部提供氦燃料量的平均值; $\overline{F_{\text{env}}}$ 为0— t_f 时间段内向环境释放的氦量平均值。

式(1)左侧第二项描述初始启动氦量 $I_{i,0}$ 的动态变化量,即初始启动氦的衰变损失量(式(3))。

$$\int_0^{t_f} \left(\frac{dI_{i,0}}{dt} \right) dt = -I_{i,0} (1 - e^{-\lambda t_f}) \quad (3)$$

聚变堆的长期氦滞留主要包括真空室面向等离子体部件辐照缺陷所导致的氦捕获、氦在第一

壁表面的共沉积、含氦粉尘、增殖包层氦增殖剂中的氦滞留以及冷却系统部件中的长期滞留;他们分别属于加料、排灰气处理线路、增殖线路、冷却剂线路。从而,全堆的长期滞留氦损失量、放废氦损失量分别表示如下。

$$\sum_i^{\text{longterm}} I_i = \sum_{\text{pl(c)}}^{\text{longterm}} I_i + \sum_{\text{bl}}^{\text{longterm}} I_i + \sum_{\text{cl}}^{\text{longterm}} I_i \quad (4)$$

$$I_{\text{waste}} \Big|_0^{t_f} = (1 - \epsilon_{\text{replace}}^{\text{waste}}) \epsilon_{\text{replace}} \sum_i^{\text{longterm}} I_i \nu_{\text{replace}} t_f \quad (5)$$

其中: $\sum_{\text{pl(c)}}^{\text{longterm}} I_i$ 表示加料、排灰气处理线路上的长期氦滞留量; $\sum_{\text{bl}}^{\text{longterm}} I_i$ 为氦增殖线路上的长期氦滞留量; $\sum_{\text{cl}}^{\text{longterm}} I_i$ 是冷却剂线路上的长期氦滞留量。

$\epsilon_{\text{replace}}$ 表示含氦杂质中氦的回收份额, $\epsilon_{\text{replace}}^{\text{waste}}$ 是从杂质回收的氦可返回燃料循环的比例, ν_{replace} 为周期性部件维护的平均频率。长期滞留氦不经过主动的氦移除措施作用,将长期滞留于系统部件中,而不能进入燃料循环,这样等效于增加了产氦需求。聚变示范堆的目标包括演示氦自持,其自身实现氦燃料的自给自足,而不需向其他聚变堆提供启动氦燃料。对于商业聚变堆,一般要实现多堆建设,首堆确保氦自持之余需要增殖氦燃料为下一个聚变堆提供氦燃料。从而定义产氦需求 I_{req} 如下:

$$I_{\text{req}} = (n - 1) I_{i,0}^{\text{opt}} \quad (6)$$

其中: n 为1时对应聚变示范堆, n 取2或更大值时对应商业聚变堆; $I_{i,0}^{\text{opt}}$ 为最优的启动氦量。

假设不考虑氦增殖线路的作用,当聚变堆启动后持续运行,由于氦燃耗较低,燃料储存系统中的氦作为动态滞留氦分布于各线路,燃料储存系统的氦量(启动氦量)快速降低,并随着氦燃耗、向外界氦释放等氦损失,燃料储存系统缓慢降低为零,最终加料停止而被迫停堆。当考虑氦增殖线路的作用时,当氦增殖线路的短期滞留氦实现平衡,其向燃料储存系统输送的氦量大于燃耗等损失的氦时,燃料储存系统的氦则开始触底上升。从反应堆开始运行到燃料储存系统氦燃料触底上升的时间段,称为“氦坑时间”。因此,可以通过氦增殖线路实现短期滞留氦平衡特征时间表征“氦坑时间”,如下:

$$\tau_{\text{dwell}} \approx \tau_{\text{bl}} = \frac{\sum_{\text{bl}}^{\text{shortterm}} I_i}{\Lambda a_p a_{\text{op}} \left(\frac{P_f}{Q_f} \right)} \quad (7)$$

其中: τ_{dwell} 为氦坑时间, τ_{bl} 为包层氦增殖特征时间, $\sum_{\text{bl}}^{\text{shortterm}} I_i$ 为氦增殖线路的短期氦滞留量。

在聚变堆启动初期,由于辐照产生缺陷的氦滞留量较小,可忽略该部分长期氦滞留量的影响。最小启动氦量的组成包括:加料、排灰气处理线路与杂质处理线路的短期氦滞留量($\sum_{\text{pl+il}}^{\text{shortterm}} I_i$),冷却剂线路的短期氦滞留量($\sum_{\text{cl}}^{\text{shortterm}} I_i$),氦坑时间内燃料氦量,系统向外界提供的氦量,外部向系统提供的氦量以及系统向外界环境的损失氦量,氦坑时间内的含氦废物的损失氦量($I_{\text{waste}}|_0^{\tau_{\text{bl}}}$)以及备份氦(I_r)以保持非关键子系统失效时氦燃料持续供给。如此,最小启动氦量为:

$$I_{i,0}^{\text{opt}} = \sum_{\text{pl+il}}^{\text{shortterm}} I_i + \sum_{\text{cl}}^{\text{shortterm}} I_i + \tau_{\text{bl}} \left[a_p a_{\text{op}} \left(\frac{P_f}{Q_f} \right) - \overline{F_{\text{ext}}^{\text{in}}} + \overline{F_{\text{ext}}^{\text{out}}} + \overline{F_{\text{env}}} \right] + I_{\text{waste}}|_0^{\tau_{\text{bl}}} + I_r \quad (8)$$

由于聚变堆启动运行可能与外部氦源准备完毕之间有一个延后,需要考虑该延后时间 t_i 内的氦衰变损失,从而外部氦源所需提供的氦量为 $I_r = I_{i,0}^{\text{opt}} e^{\lambda t_i}$ 。

当氦系统某个线路非关键部件或子系统发生单一故障,燃料储存系统具有备份氦量的冗余,可确保故障部件或子系统维修期间的持续供给氦燃料。由于聚变堆较低的氦燃烧率,使得加料、排灰气处理线路的氦处理量远大于氦增殖线路、杂质处理线路、冷却剂线路的氦处理量,从而将当加料、排灰气处理线路非关键部件或子系统发生单一故障时,保持氦持续供给所要求的氦量作为备份氦量,定义如下。

$$I_r = \left(\frac{t_r^{\text{pl}}}{f_b} \right) \left(\frac{a_p P_f}{Q_f} \right) + \sum_{\text{pl(nc)}}^{\text{shortterm}} I_i \quad (9)$$

其中: t_r^{pl} 为失效部件或子系统的维修时间, f_b 为燃烧率, $\sum_{\text{pl(nc)}}^{\text{shortterm}} I_i$ 为加料、排灰气处理线路非关键部件或子系统的短期氦滞留量。

将上述式(2)—(9)代入到式(1)之中,则可获得满足式(1)的氦增殖比,即为所需 TBR(Λ_r):

$$\Lambda_r = \lambda \frac{\Omega + \Phi}{2\zeta\psi} \quad (10)$$

该式中各符号定义如下:

$$\zeta = a_p a_{\text{op}} \left(\frac{P_f}{Q_f} \right) \quad (11)$$

$$\psi = 1 - e^{-\lambda t_i} \quad (12)$$

$$\Omega = (\chi + \psi) \left(\sum_{\text{pl+il}}^{\text{shortterm}} I_i + I_r \right) + \sum_i^{\text{longterm}} I_i + I_{\text{waste}} \Big|_0^{t_i} + \frac{\psi}{\lambda} (\zeta - \overline{F_{\text{ext}}^{\text{in}}} + \overline{F_{\text{ext}}^{\text{out}}} + \overline{F_{\text{env}}}) \quad (13)$$

$$\Phi = \sqrt{\Omega^2 + \frac{4(\chi + \psi)\zeta\psi}{\lambda} \left(1 - \frac{\overline{F_{\text{ext}}^{\text{out}}} - \overline{F_{\text{ext}}^{\text{in}}}}{\zeta} \right)} \quad (14)$$

$$\chi = (n - 1) e^{\lambda t_i} \quad (15)$$

设定氦燃料循环的参考值列于表 1。其中短期氦滞留量参照 ITER-FEAT 氦系统详细分析值,长期氦滞留量参照 ITER 氦系统详细分析值并累加最大不确定性以作保守考虑^[7]。由于系统的短期氦滞留量是关于聚变功率、燃烧率、脉冲运行燃烧时间占比的成正比例或反比例的函数,可根据表 1 给出的参考值进行变化。而长期氦滞留量与聚变堆的运行参数不相关,仅与聚变堆的材料属性、辐照缺陷相关,在此认为长期氦滞留量一定,且在倍增时间之内实现长期滞留量的稳态值。

表 1 氦循环参数

Table 1 Fuel cycle parameters

氦循环参数	参考值	氦循环参数	参考值
t_i	5 a	$\epsilon_{\text{waste-recycle}}$	0.9
t_r^{pl}	2 d	$\epsilon_{\text{replace}}$	0.9
P_f	1.5 GW	ν_{replace}	0.2/a
f_b	2%	$\sum_i^{\text{longterm}} I_i$	8 930 g(以 T 计,下同)
a_p	1	$\sum_{\text{pl+il}}^{\text{shortterm}} I_i$	1 965 g
a_{op}	1	$\sum_{\text{bl}}^{\text{longterm}} I_i$	75 g
t_i	0 a	$\overline{F_{\text{ext}}^{\text{out}}}$	0 kg/a
n	2	$\overline{F_{\text{ext}}^{\text{in}}}$	0 kg/a

2 混合堆与纯聚变堆的氦平衡分析

以核燃料增殖或者高放废物嬗变处理为目标的混合堆,其聚变功率在数十个兆瓦至百兆瓦之间(50~250 MW)^[8-10];而以商业发电为目标的纯聚变堆,其聚变功率一般为数百万千瓦(1~5 GW)^[11-13]。本工作将针对此两种聚变反应堆的聚变功率范围进行氦平衡分析。燃烧率、加料效率等对所需 TBR、启动氦量产生影响的参数,在文献[3-6]中采用滞留时间模型做出了详细分析,在此将不重复。本工作除作为分析参数的

变量外,其余变量将取表 1 中所对应的值。

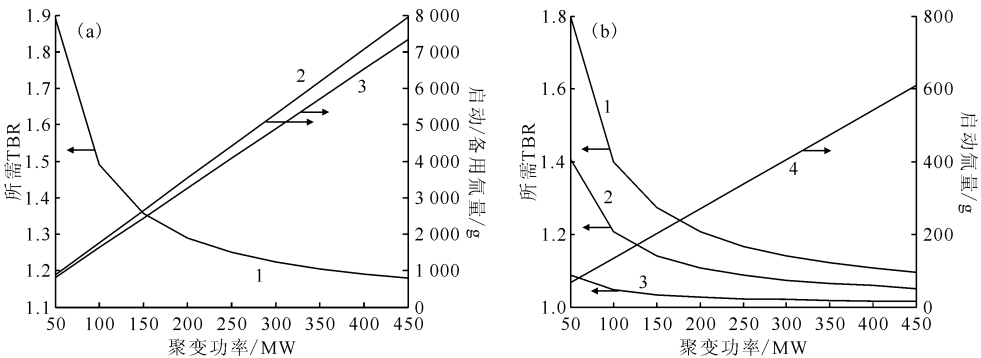
在上述积分分析方法中,在一定燃料倍增时间内,增殖的氚需要弥补燃耗、长期滞留氚损失、放废氚损失、向环境氚释放的氚损失,并获得启动氚量的倍增。在表 1 中,ITER-FEAT 长期氚滞留量为一个较大值,达到了约 8.9 kg,备用氚量需要维持较长时间的持续加料,其数量亦相当可观。可预期此两项变量将对所需 TBR 产生显著的影响。

混合堆中备用氚量、长期氚滞留量对所需 TBR 的影响示于图 1。由图 1 可知,启动氚量、备用氚量与聚变功率呈线性关系,所需 TBR 与聚变功率呈现反比例关系。通过进一步比较图 1(a)与图 1(b),发现备用氚占启动氚的绝大部分,使用备用氚则启动氚量将从数百克量级上升到千克量级,所需 TBR 有小幅提高但不显著。混合堆在 50~450 MW 范围内,所需 TBR 均在 1.15 以上,特别是在聚变功率低于 100 MW 时,所需 TBR 大于 1.4。对于采用铍、铅中子倍增剂的产氚增殖包层,其包层可获得的氚增殖比为 1.15,且具有 10%的不确定性^[13];而对于混合堆包层,其氚增殖比一般在 1.4 以下^[14]。因此对于混合堆,如何降低所需氚增殖比是一个重要的挑战。启动氚量对所需 TBR 的影响不显著,进一步分析长期氚滞留量对混合堆所需 TBR 的影响。在图 1(b)中,当不使用备用氚时,通过调节长期氚滞留量,分析其对所需 TBR 的影响:当长期氚滞

留量设定为 ITER-FEAT 滞留量的 50%时,混合堆在 50~450 MW 范围内所需 TBR 均在 1.4 以下;进一步将长期氚滞留量设定为 ITER-FEAT 滞留量的 10%时,所需 TBR 将在 1.15 以下。聚变堆瞬时净产氚能力与聚变功率、TBR 成正比。混合堆聚变功率较低,所需 TBR 较高,特别是在 100 MW 聚变功率以下尤为突出,需要严格限制反应堆的长期氚滞留量以降低所需 TBR 要求。

纯聚变堆备用氚、长期滞留氚量的影响示于图 2。如图 2 所示,同样发现备用氚量占启动氚量的绝大部分,但所需 TBR 在 1~5 GW 范围内均小于 1.15,具有较高的工程可行性。通过图 2(a)与图 2(b)对比分析,发现由于其高达数百万千瓦的聚变功率,单位时间内燃料循环系统吞吐量较大,备用氚需求达数十千克,其将是纯聚变堆的一个重要挑战。在纯聚变堆中,应考虑氚系统的冗余设计或者提高氚系统的可靠性、可维护性,以降低备用氚的使用规模。在图 2(b)中,在不采用备用氚的情况下,将长期氚滞留量设定为 ITER-FEAT 长期氚滞留量的 50%进行对比,发现长期氚滞留量对所需 TBR 的影响并不显著。

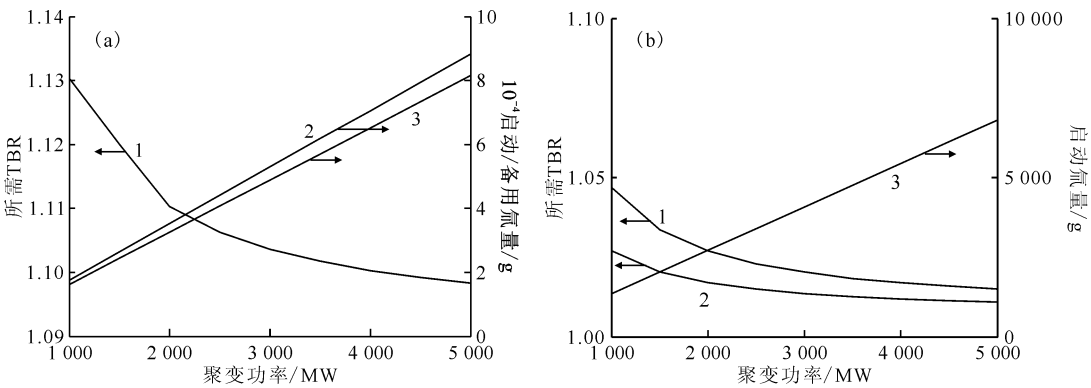
运行因子是影响反应堆所需 TBR 的另一个重要影响因素。在不同运行因子情况下混合堆和纯聚变堆所需 TBR 随聚变功率的变化示于图 3。如图 3 所示,当氚燃料倍增目标确定,运行因子降低,所需 TBR 将随之提高,呈现反比例特征关系。与此同时,分析图3数据发现:当聚变功率固定,



(a): 1——所需 TBR, 2——启动氚量, 3——备用氚量; (b): 1——长期氚滞留量为 8 930 g 时的所需 TBR, 2——长期氚滞留量为 4 465 g 时的所需 TBR, 3——长期氚滞留量为 893 g 时的所需 TBR, 4——启动氚量

图 1 混合堆使用备用氚时所需 TBR 与启动氚量、备用氚量随聚变功率的变化(a), 混合堆不使用备用氚时不同长期氚滞留量水平下所需 TBR、启动氚量随聚变功率的变化(b)

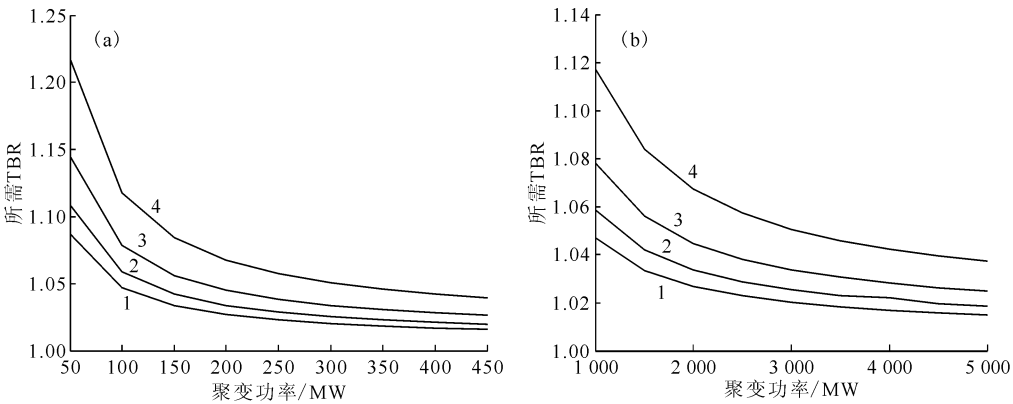
Fig. 1 Variation of required TBR and startup/reserve tritium inventory compared with the fusion power in hybrid reactor, assuming the reserve tritium inventory is considered(a); and the variation of the required TBR and startup inventory compared with the fusion power for various long term tritium inventory in hybrid reactor, assuming the reserve tritium inventory is not taken(b)



(a): 1——所需 TBR, 2——启动氚量, 3——备用氚量; (b): 1——长期氚滞留量为 8 930 g 时的所需 TBR, 2——长期氚滞留量为 4 465 g 时的所需 TBR, 3——启动氚量

图 2 纯聚变堆使用备用氚时, 所需 TBR 与启动氚量、备用氚量随聚变功率的变化(a); 纯聚变堆不使用备用氚时, 不同长期氚滞留量水平下所需 TBR、启动氚量随聚变功率的变化(b)

Fig. 2 Variation of required TBR and startup/reserve tritium inventory compared with the fusion power in pure fusion reactor, assuming the reserve tritium inventory is considered(a); and the variation of the required TBR and startup inventory compared with the fusion power for various long term tritium inventory in pure fusion reactor, assuming the reserve tritium inventory is not taken(b)



运行因子: 1——100%, 2——80%, 3——60%, 4——40%
(a)——长期氚滞留量为 893 g, (b)——长期氚滞留量为 8 930 g

图 3 混合堆(a)和纯聚变堆(b)在不同运行因子情况下所需 TBR 随聚变功率的变化

Fig. 3 Variation of required TBR compared with fusion power for various availabilities in hybrid reactor(a) and pure fusion reactor(b)

所需净 TBR ($\Delta_{\text{req}} - 1$) 与运行因子的乘积为一 定值。这说明在某一聚变功率下, 启动氚量或倍增 氚量目标一定时, 对所需净产氚能力、聚变堆运行 时间提出要求。所需 TBR、运行因子是影响聚变 堆产氚的两个方面, TBR 决定单位时间的产氚 量, 运行因子表征年产氚时间, 两者乘积综合确定 年产氚量。聚变堆的氚自持不仅是瞬时的增殖氚 大于氚燃料燃耗及其他损耗, 而是长时间内具有 氚燃料平衡或净增益。运行因子是聚变堆设计 的一个重要指标, 其也是氚自持目标实现的一个不 可或缺要求。由于氚自然衰变、不可避免的长时

间滞留损失、渗透损失等特性, 忽视运行因子将不 能有效地表述聚变堆实际长时间内的产氚效果。 为突出运行因子、等离子体放电脉冲因子对聚变 堆氚自持设计的重要意义, 在此本工作根据前述 图 3 数据分析的结论, 提出时间平均所需净 TBR 概念以重新定义聚变堆氚自持或氚燃料倍增目 标实现的条件: 所需净 TBR 为所需 TBR 减去 1, 1 代表氚燃料, 表述单位时间的所需净产氚速率; 所需净 TBR 与运行因子、等离子体脉冲因子此两 个时间因子的乘积定义为时间平均所需净 TBR ($(\Delta_{\text{req}} - 1) a_p a_{op}$)。从而, 聚变堆氚自持目标实现

即需要满足如下条件(式(16))。

$$(\Lambda_a - 1)a_p^{\text{real}}a_{\text{op}}^{\text{real}} \geq (\Lambda_{\text{req}} - 1)a_p a_{\text{op}} \quad (16)$$

其中: Λ_a 为聚变堆包层系统可工程实现的 TBR, $a_{\text{op}}^{\text{real}}$ 为实际的运行因子, a_p^{real} 为实际的等离子体脉冲因子。当运行因子、等离子体脉冲因子为 1 时, 则与文献[1]定义的工程 TBR 大于等于所需 TBR 要求相同。如此, 在某一个聚变功率下, 氚自持目标实现有多种所需氚增殖比、运行因子、等离子体脉冲因子的组合可能, 更为符合实际情况。

3 结 论

本工作利用积分分析方法开展了混合堆、纯聚变堆聚变功率范围内的氚自持评估, 得到以下结论。

(1) 对于混合堆, 其聚变功率为数十兆瓦至数百兆瓦, 长期氚滞留量是影响其所需 TBR 的关键因素, 而备用氚量对所需 TBR 的影响并不显著。混合堆有所需 TBR 较高的特征, 特别是在 100 MW 聚变功率以下尤为突出, 需要严格限制反应堆的长期氚滞留量以降低所需 TBR 要求。

(2) 对于纯聚变堆, 其聚变功率为数 GW, 所需 TBR 在 1~5 GW 范围内均小于 1.15, 具有较高的工程实现的可能性; 但所要求的备用氚规模达数十千克, 应考虑氚系统的冗余设计或者提高氚系统的可靠性、可维护性, 以降低备用氚的使用规模。

(3) 所需 TBR、运行因子是聚变堆氚自持的关键影响因素, 在此研究了所需 TBR 与运行因子的相关性, 提出了时间平均所需净 TBR 的概念, 并重新定义了聚变堆氚自持条件, 为聚变堆的设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] Abdou M A, Vold E L, Gung C Y, et al. Deuterium-tritium fuel self-sufficiency in fusion reactors[J]. Fusion Technol, 1986, 9(2): 250-285.
- [2] Deng B, Huang J. Mean residence time method of

tritium inventory calculation[J]. Fusion Eng Design, 2001, 55(4): 359-364.

- [3] Pan L, Chen H, Zeng Q. Sensitivity analysis of tritium breeding ratio and startup inventory for CFETR[J]. Fusion Eng Design, 2016, 112: 311-316.
- [4] Chen H, Pan L, Lv Z, et al. Tritium fuel cycle modeling and tritium breeding analysis for CFETR[J]. Fusion Eng Design, 2016, 106: 17-20.
- [5] 王俊, 王晓宇. 中国聚变工程实验堆启动氚投料量与氚平衡分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2020, 40(1): 37-42.
- [6] 冉光明, 肖成建, 王和义, 等. CFETR 氚自持分析评估与验证策略[J]. 核化学与放射化学, 2021, 43(3): 257-262.
- [7] Kuan W, Abdou M A. A new approach for assessing the required tritium breeding ratio and startup inventory in future fusion reactors[J]. Fusion Technol, 1999, 35(3): 309-353.
- [8] 邓柏权, 黄锦华. 聚变实验增殖堆氚系统 designs 研究[J]. 中国核科技报告, 2003(2): 102-119.
- [9] 邱励俭, 栾贵时, 徐强. 合肥聚变-裂变实验混合堆概念设计[J]. 中国核科技报告, 1992(1): 14-15.
- [10] 马纪敏, 刘永康. 次临界能源堆物理性能初步分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(4): 437-441.
- [11] Raffray A R, El-Guebaly L, Malang S, et al. Advanced power core system for the ARIES-AT power plant[J]. Fusion Eng Design, 2006, 80(1-4): 79-98.
- [12] Fischer U, Boccaccini L V, Cismondi F, et al. Required, achievable and target TBR for the European DEMO[J]. Fusion Eng Design, 2020, 155: 111553.
- [13] Abdou M, Morley N B, Smolentsev S, et al. Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO[J]. Fusion Eng Design, 2015, 100: 2-43.
- [14] 彭先觉, 刘成安, 师学明. 核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 97-99.