

CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析

梁展鹏^{1,✉}, 向魁¹, 李华², 朱光涛¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: [目的] 中国聚变工程实验堆 (CFETR) 具有功率周期性输出特性, 无法直接满足常规发电设备的稳定连续输入需求, CFETR 聚变发电厂需要在核岛和常规岛之间配置针对性的工艺系统。[方法] 通过调研光热发电工程应用以及聚变发电相关研究, 基于 CFETR 聚变堆初步预期性能, 从储能与补能对比、储能技术类型、储热介质、储热系统方案等方面进行分析讨论。[结果] 对于采用水冷包层、氦冷包层的聚变堆, 分别推荐配置以氢化三联苯型导热油、Solar salt 熔融盐为储热介质的间接式双罐显热储热系统, 以保证发电侧系统的稳定连续运行。[结论] 上述储能技术方案具备规模化商业应用条件, 可为 CFETR 聚变发电厂的整体设计提供支撑。

关键词: 核聚变发电; 储能; 中国聚变工程实验堆; 文献调研; 电站设计

中图分类号: TL4; TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0053-10

开放科学(资源服务)二维码:



Applicability Analysis of Energy Storage Techniques for CFETR Fusion Power Plant

LIANG Zhanpeng^{1,✉}, XIANG Kui¹, LI Hua², ZHU Guangtao¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] The power output of China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR) is periodic, which can not directly meet the stable and continuous input requirements of conventional power generation equipment. CFETR fusion power plant needs to integrate a specific process system between nuclear island and conventional island. [Method] By investigating the application of concentrating solar power plants and the literature research of fusion power plants, this paper presented a discussion based on the preliminary performance of CFETR about the comparison between energy storage and energy supplement, energy storage techniques, thermal storage mediums and thermal storage system schemes. [Result] For fusion reactors with water-cooled blanket and helium cooled blanket, it is proposed to integrate an indirect double-tanks sensible thermal storage system with hydrogenated triphenyl heat transfer oil and solar salt molten salt as thermal storage medium respectively, so as to ensure the stable and continuous operation of the power generation system. [Conclusion] The proposed energy storage scheme meets the conditions of large-scale commercial applications and supports the overall design of CFETR fusion power plant.

Key words: nuclear fusion power; energy storage; CFETR; research review; power plant design

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

如今全球正处于广泛的低碳、零碳能源转型浪

潮之中, 我国作出了力争在 2030 年前实现碳达峰、努力争取 2060 年前实现碳中和的庄严承诺, 在能源领域的主要实施路径就是“一次能源零碳化, 二次能

源电力化”^[1]。在已发现的一次零碳能源中,核能受资源禀赋限制最少、可靠性最强,特别是核聚变能原料在地球储量丰富且较易获取,可谓取之不尽、用之不竭的“长寿能源”。在此背景下,核聚变能发电将是未来最理想的发电形式。

磁约束与惯性约束是现阶段核聚变研究的两个主要方向,而在各种类型的磁约束聚变装置中,托卡马克(Tokamak)发展最快。目前正在实施的国际热核聚变实验堆(ITER)是当今世界在建的最大的托卡马克实验装置,其计划建造一个可自持燃烧的托卡马克核聚变实验堆并为商用聚变示范堆(DEMO)的建造奠定可靠的科学和工程技术基础^[2]。我国在积极参与 ITER 计划的同时,开展中国聚变工程实验堆(CFETR)的相关工作,与 ITER 在工程和技术上实现互补,为我国进一步独立自主地开发和利用聚变能奠定坚实的科学技术与工程基础,促使我国率先利用聚变能发电、实现能源的跨越式发展成为可能^[3]。

聚变堆用于商业发电需要具备长时间连续运行的能力。托卡马克装置由于线圈磁体伏秒数的限制,只能进行脉冲模式运行,虽然随着技术的进步,等离子体放电脉冲长度将延长至分钟量级且脉冲间隙时间大幅缩短,但仍需配置合适的能量调节系统以满足商业发电的需求^[4]。

地面接收到的太阳能同样是一种不连续的能量。为利用太阳能转换为稳定连续的电能,太阳能光热发电行业进行了大量技术方案的设想与尝试,并已顺利实现大规模光热电站的商业化运营。光热发电技术的研究及应用历程,对设计聚变发电能量调节系统方案有重要参考价值。但对于光热发电和聚变发电而言,一次能源的输出周期以及系统工质运行温度范围有着明显差异,因此聚变发电研究在借鉴光热发电方案时,需要进行针对性调整。

1 CFETR 关键参数及能量调节策略

1.1 CFETR 聚变发电厂整体设想及关键参数

现有的聚变发电概念设计及相关研究主要选择聚变堆结合成熟、经典的朗肯循环作为发电技术路线^[5-11],CFETR 聚变发电厂亦计划沿用此技术路线,即利用核岛回路工质将聚变装置所释放的热能传递给发电回路的水,产生水蒸气推动汽轮机发电机组产出电力。因此,聚变装置热功率输出及其持续时

间、核岛回路工质的温度及压力将是影响发电性能的关键参数。

根据 CFETR 聚变堆初步预期及规划,本文将 CFETR 热功率输出特性简化为稳定输出 1.25 GW 持续 2 h(输出期)后停止输出 20 min(间歇期)的周期性运行。输出期间功率有小幅波动,输出启停切换需较短时间实现,均暂忽略不计。

核岛回路工质的温度及压力由包层方案决定。聚变包层承担氚增殖、能量转换和辐射屏蔽的作用,是最为重要的核部件,CFETR 的主要包层方案水冷固态包层和氦冷固态包层两种^[12]。对于水冷包层方案,采用水作为包层冷却介质也即核岛回路工质,工质运行压力为 15.5 MPa,聚变堆进、出口温度分别为 290 °C、325 °C。对于氦冷包层方案,采用氦作为包层冷却介质,工质运行压力为 12 MPa,聚变堆进、出口温度分别为 300 °C、600 °C。

1.2 能量调节策略

如图 1 所示,按是否利用到聚变堆外部的能量,可以将能量调节策略分为两类,即储能策划与补能策略。类似的策略在光热发电中已有广泛应用。

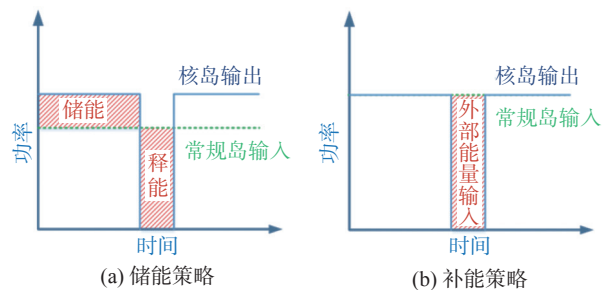


图 1 储能策略和补能策略示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of energy storage scheme and energy replenishment scheme

1) 储能策略: 配置储能系统,将聚变堆输出期的部分能量储存起来,以便为间歇期或能量输出不足时提供能量,保证整个系统的连续稳定运行。

2) 补能策略: 与外部能源组成互补发电系统,在聚变堆间歇期或能量输出不足的情况下,由外部能源供应能量,保证整个系统的连续稳定运行。

无论在聚变发电研究还是光热发电实际应用中,补能策略均以热能形式补入整体发电系统,外部能源的选择通常包括电能和化石燃料。

电能转换为热能在电力、采暖行业中的代表性

设备是电极锅炉。电极锅炉具有效率高、无噪声、无污染、占地面积小、起动速度快、可在低负荷下长期运行等特点,在核电厂中作为辅助汽源已得到广泛应用。聚变发电厂可以利用电极锅炉产生的蒸汽加热核岛回路的工质,或者直接将蒸汽补入发电回路推动汽轮机,甚至将电加热装置作为蒸汽发生器的一部分。

化石能源转换为热能的方式就是燃烧,可以加设燃煤锅炉、燃油锅炉和燃气锅炉等辅助锅炉,也可以在蒸汽发生器装置中增加一套补燃装置。与电极锅炉类似,辅助锅炉或者补燃装置可以加热核岛回路的工质,或者产生蒸汽进入汽轮机做功。在光热电站中应用最多的补能燃料是天然气^[13],有部分研究也在探讨应用燃气锅炉改善聚变发电系统的性能^[5-6]。

由于电能的能源品质远高于热能,长期运行电极锅炉作为补能将存在很大的浪费,从能源利用和经济成本的角度来看并不经济。而使用化石能源必须配备一整套燃料储存和处理系统,需要一定的设备投资、燃料成本和占地空间;燃料都是易燃物,同时燃烧后有大量的污染物排放和碳排放,增加了电站的运行风险和环境风险。从光热电站的发展历程来看,补能策略在已建成的电站系统中应用比较普遍,但近年来随着储热技术的进步、燃料价格的上升,在建和规划中的电站更多选择采用储能策略,而补能策略的应用比例在下降^[13]。由于补能策略存在上述缺点,同时参考光热发电的行业发展,对于 CFETR 聚变发电厂推荐采用储能策略,以增强发电稳定性。

按照 CFETR 热功率输出特性,为维持发电循环如图 1 储能策略所示的连续稳定运行,经初步估算需要约 360 MWh 的储能容量。

2 CFETR 聚变发电厂储能技术方案

2.1 储能技术类型

储能技术有着非常丰富的研究成果和广泛的应用,各类储能技术的常规储放时间和储能功率范围展示于图 2^[14]。

电池储能、飞轮储能、电容储能等储能技术的储放功率有限,远远不能满足 CFETR 聚变发电厂 100 MW ~ 1 GW 量级的储能需求。大规模储能技术中的压缩空气储能、液态空气储能、抽水蓄能等技术,或者由于涉及的工艺系统较为复杂,又或者由于

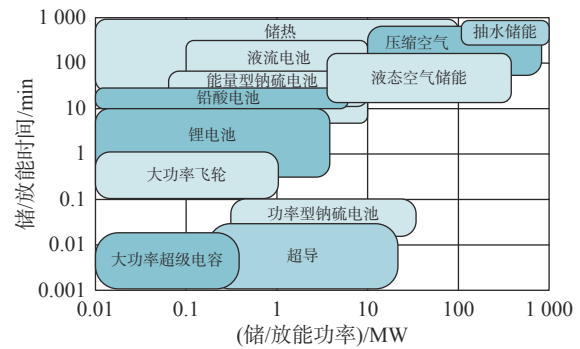


图 2 各类储能技术的储/放能时间及功率范围

Fig. 2 Storage / discharge time and power range of various energy storage technologies

需要厂址所在地有特定的地理环境条件支持(如盐穴、水库等),难以应用于聚变发电工程。而储热技术应用成熟、成本较低,储能周期和储能功率范围匹配 CFETR 聚变堆功率输出特性,而且拟采用的朗肯发电循环技术也是对热能的利用,可以很好地结合储热技术保证主设备蒸汽轮机的稳定连续运行,同时避免不同形式能量转换间带来不可忽视的能量损失。

2.2 储热技术

一般根据储热系统的工作温度区间不同,200 ℃以下的储热技术称之为中低温储热技术,温度更高的储热技术称之为中高温储热技术。中高温储热技术主要是为了解决大量具有分散性和不稳定性特点的热源热能或工业过程余热的利用问题,目前广泛应用于太阳能光热电站、空间太阳能热动力系统、建筑节能、航天技术和水下潜器等领域。根据聚变堆包层冷却工质的的工作温度区间,其适用的储热技术属于中高温储热技术。

按照蓄热方式的不同,中高温储热技术可以分为导热油/熔融盐/液态金属/混凝土等为代表的显热储热、金属相变与熔融盐相变为代表的潜热储热,以及以可逆化学反应为代表的热化学储热^[15]。显热储热技术成熟度很高,在大规模商业系统已获得广泛应用。潜热储热技术亦整体趋于成熟,处于从实验室示范到商业示范的过渡期。虽然在特定的适用温区下热化学储热的储能密度表现非常优秀,但其成熟度最低,尚处于实验室验证阶段。可以考虑应用于 CFETR 聚变发电厂的储热技术主要是显热储热技术,以及个别成熟的潜热储热技术。

2.3 储热介质

显热储热技术是利用显热储热介质本身温度的

变化来进行热量的储存和释放,储热介质可以分为固态储热和液态储热两大类。气体介质由于其密度小、比热容小,不适宜用于显热储热。

在固态显热储热介质中,高温混凝土和浇铸陶瓷材料因具有成本低和来源广的特点而被较多地研究和采用。但固态显热储热介质往往热导率不高,热稳定性有待改进,还具有储热密度低、放热过程很难实现恒温和设备提及庞大等其他缺点^[14]。液态显热储热介质包括水、导热油、液态金属、熔融盐等物质,有时也可作为换热流体,同时实现热量的储存与运输。理想的液态储热介质需要具备低熔点、高沸点、高热稳定性、低蒸汽压、低腐蚀性、低粘度、高热导率和高热容等技术特征,同时为考虑投资成本,价格不能太高。

在发电行业,光热电站储能系统配置的统计数据^[16]表明,个别试验电厂采用了固体储热,但进入商业化应用阶段的仍然只有水、导热油和熔融盐三类工质的相关储热技术。导热油显热储热早在20世纪80年代就在商业运行的光热电站使用,2007年左右熔融盐显热储热和利用水汽化潜热的蒸汽蓄热器也开始出现在光热发电中,特别是熔融盐储热更是成为近年来的主流方案。

2.3.1 水

水是最为常见的液体,具有比热大、热导率高、无毒、无腐蚀、易于运输和获取等优点,在城市采暖等温度不高的中低温储热场合应用非常普遍。但水的饱和压力随温度上升而迅速上升,而大容积的压力容器制造成本迅速上升,限制了水作为储热材料在实际工程的应用范围。在温度较高的场合,通常利用蒸汽蓄热器中的饱和水/饱和水蒸气相变实现热能的储存和释放,这在钢铁、石化等行业已获得广泛应用,但储热参数基本在3 MPa、235 °C以下。采用水作为储热介质的代表性商业运行光热电站有西班牙的Planta Solar 10(PS10)和Planta Solar 20(PS20)电站,两者于2007年和2009年相继投入运营,其中PS10配置了储热参数为275 °C、20 MWh的蒸汽蓄热器^[17-18]。国内的八达岭太阳能热发电实验电站于2012年运行发电,其配置了224 °C、8 MWh的蒸汽蓄热器^[19]。

对于CFETR聚变发电厂而言,水冷包层和氦冷包层能提供的热源温度均远高于常规的水储热运行

温度。如果储能系统采用与包层温度匹配的水储热方案,则需要大容量的高压容器储存饱和水和饱和蒸汽,投资昂贵且运行维护难度大。以水冷包层方案为例,假定储热温度为300 °C,对应的饱和蒸汽压为8.6 MPa(a),同时考虑到蒸汽蓄热器仅能在50%~90%的容积区间内运行^[17],按1.2节所述储能容量进行估算,蓄热器容积达数千立方米。因此不推荐CFETR聚变发电厂采用水作为储热介质。

2.3.2 导热油

导热油属于有机热载体,按成分可分为矿物油型导热油和合成油型导热油两大类型,广泛应用于200~400 °C的工业加热和-80~0 °C的工业冷却等场合。矿物油型导热油是以石油为原料,经过蒸馏和精制加工制成,是多种烷烃的混合物,价格低廉,但是其热稳定性和抗氧化安定性受组分天然缺陷的影响,使用温度一般不超过300 °C;合成油型导热油则是由基础化工原料合成得到的组分相对纯净的化学功能液,因此会具备稳定性好、使用寿命长、适应温度范围宽等特点,但其价格较高^[20]。合成油型导热油主要是苯基芳烃类合成导热油,可细分为联苯—联苯醚型、氢化三联苯型、苄基甲苯型、烷基苯型等,各种合成油的特性见表1^[20-21]。一般来说,导热油与常规金属材料的相容性非常好,不需要额外考虑其腐蚀问题,只需要注意运行中避免导热油过热、氧化或化学污染对系统造成影响。

表1 各种合成油的特性

Tab. 1 Characteristics of various synthetic oils

类型	特性	代表性产品
联苯— 联苯醚型	一般使用温度范围12~400 °C,结晶温度为12 °C;热稳定性好,渗透性强,气味难闻,具有神经毒性及致癌性等	陶氏化学公司的Dowtherm A, 首诺公司的Therminol VP-1
氢化三 联苯型	一般使用温度上限为340~345 °C,下限为0 °C以下,倾点可达-32 °C;高温稳定性好,蒸气压低,毒性相对较低,未观察到致癌性等	首诺公司的Therminol 66, 中石化燕山院的YD-350D
苄基甲 苯型	其中二苄基甲苯使用温度可达350 °C,倾点可达-32 °C;倾点为-32 °C;中石化燕山院的YD-350L 低温性能优异,渗透性强,气味难闻和水体毒性很强等	350L
烷基苯型	一般使用温度上限为300~320 °C,下限为-20 °C以下,倾点可达-60 °C;低温性能优异,具有一定生理毒性但水体毒性较低等	首诺公司的Therminol 55, 中石化燕山院的SH320

导热油是光热电站最早应用的储热介质之一。1984年建成的美国SEGS I电站采用导热油同时作为传热介质和储热介质,储热容量为120 MWh,储热温度区间为240~307℃^[18]。国内的八达岭电站除蒸汽蓄热器外还配备了导热油储热系统,热罐温度为370℃^[22]。尽管导热油主要因为相对熔融盐更高的价格而退出的光热电站储能应用,当前的槽式光热电站仍普遍采用联苯—联苯醚型导热油作为传热介质。

对于水冷包层CFETR聚变发电厂,合成油型导热油是其储热介质可选项之一。联苯—联苯醚型导热油凝固点较高,所以管道、管件、贮罐、仪表等必须配套有防冻功能的伴热系统。同时联苯—联苯醚型导热油的饱和蒸气压比较高,以Therminol VP-1为例,在320℃时为340 kPa (a),需要以大型承压容器作为储热储罐,设计制造、运行维护的费用和技术难度较高。氢化三联苯型导热油在南方沿海厂址的环境温度下可完全正常使用,无须设置伴热或加热装置,而且饱和蒸气压比较低,以Therminol 66为例,在320℃时为47 kPa (a),常压运行即可。二苳基甲苯型导热油低温性能最优,但因为毒性较强,为控制安全风险不建议大规模使用。水冷包层核岛回路的工质运行温度超出了烷基苯型导热油的使用温度范围,如采用该类导热油,即便采用其他措施控制储热时的油温,仍然容易发生结焦积垢引起管系堵塞。此外,由于水冷包层对应的储热温度区间较窄、下限有限制,降低导热油的储热温度上限将显著增加其用量。因此在上述导热油中,氢化三联苯型导热油的技术性能最适合水冷包层CFETR聚变发电厂的储热需求,其最大缺点是价格较高,比光热电站常用的联苯—联苯醚型导热油高出约40%。

2.3.3 熔融盐

熔融盐是指无机盐在高温下熔化形成的液态盐,根据组成成分可分为硝酸盐、氯化盐、氟化盐、碳酸盐和混合熔融盐等。熔融盐是一种不含水的高温液体,其主要特征是熔化时解离为离子,正负离子靠库仑力相互作用,所以可用作高温下的传热蓄热介质。单一组分的熔融盐熔点较高、热稳定性较差,而将不同的盐混合形成混合熔融盐,特别是可形成共晶的混合熔融盐具备较低的熔点和较高的分解温度,较好地满足了各领域对高温传热蓄热的需求^[23]。本文聚焦于探讨在光热发电中最受关注的熔融盐,即通

常称之为solar salt、Hitec、Hitec XL的三种硝酸盐,其主要物性参数列于表2^[17]。

表2 常规混合熔融盐的物性参数
Tab. 2 Physical properties of general mixed molten salts

项目	Solar salt	Hitec	Hitec XL
组分(质量分数)	60% NaNO ₃ 40% KNO ₃	7% NaNO ₃ 53% KNO ₃ 40% NaNO ₂	7% NaNO ₃ 45% KNO ₃ 48% Ca(NO ₃) ₂
熔点/℃	220	142	120
最高工作温度/℃	585	450~538	480~505
300℃下比热容/(J·kg ⁻¹ ·℃)	1 495	1 560	1 447
300℃下密度/(kg·m ⁻³)	1 899	1 860	1 992
300℃下粘度/cp	3.26	3.16	6.37

Solar salt因其综合性能优异,特别是单位质量的价格可低至合成油型导热油的五分之一及以下,已成为大型商业光热电站储热系统的主流储热介质。通常认为工业用的Solar salt从565℃开始降解为气体和氧化物阴离子,会显著增加腐蚀,但一些实验室数据表明也允许高至600℃的工作温度^[24]。在国内的光热电站实际运行中,额定工况的温度上限设为565℃,下限设为约290℃,太阳辐射强度不足的部分负荷工况则允许运行到270℃左右。

Hitec和Hitec XL相对于Solar salt熔点明显降低,应用在光热电站可以提升系统运行的安全性,降低启动停机过程的能耗和运行维护成本。但这些低熔点熔融盐价格较高,在温度过高或与空气接触情况下易产生分解、沸腾、氧化等问题,目前尚未进入大规模商业化应用阶段。使用低熔点熔融盐的电站包括意大利Eurelios、西班牙CESA-1、法国的Themis等项目^[25]。

相对于水和导热油,熔融盐作为储热介质主要有熔点较高和对金属存在一定腐蚀性两个缺点。由于熔点远高于常规环境温度,必须采取电伴热和保温措施防止熔融盐在储热系统设备和管道内发生凝固,使得系统运行难度和维护成本提高。对于采用熔融盐储热系统的电站来说,还需要配备专门的化盐设备及其他辅助系统。硝酸盐的主要腐蚀机理为硝酸根离子发生还原反应释放氧离子,然后氧离子与从材料基体扩散出来的铁原子发生氧化反应。影响腐蚀的因素包括合金成分、熔融盐杂质、温度及热循环等,推荐光热电站运行温度在400℃以内时

选用碳钢做为管道和储罐的结构材料, 500 °C 以上时则需要选用不锈钢和镍基合金^[26]。

现有聚变发电研究涉及的储热介质主要是熔融盐^[7-11], 例如氦冷包层 EU DEMO 电厂概念性设计最早考虑采用 solar salt, 在后续升版方案中改为采用 Hitec^[9]。对于 CFETR 聚变发电厂, Hitec 与 Hitec XL 仍然具有较高的熔点, 并不能免除伴热、化盐等辅助系统和设备, 同时它们尚未经过大规模、成熟的商业运营验证, 可靠性有待进一步证明; 另外, CFETR 氦冷包层方案的聚变堆出口温度超出 Hitec、Hitec XL 的最高工作温度达 60 °C 以上, 为保证介质长期稳定工作, 只能大幅度降低储热温度进而降低发电蒸汽温度, 将严重影响发电效率。故此在上述三种熔融盐中, 建议 CFETR 聚变发电厂选用 solar salt。由于 solar salt 的最高工作温度略低于氦冷包层聚变堆出口温度, 需要注意控制监测好储热回路的运行温度, 避免发生熔融盐超温分解等状况加剧管道及设备的腐蚀。

2.3.4 CFETR 聚变发电厂储热介质比选

从运行温度的匹配性来看, 氦冷包层 CFETR 搭配的储热系统应选用 solar salt 为储热介质, 而水冷包层 CFETR 则可以选择氢化三联苯型导热油或者 solar salt。两种工质的代表性商业产品分别为首诺公司的 Therminol 66 和 SQM 公司的 solar salt, 由相关厂商资料整理的主要参数整理列于表 3。对于工作温度在 300 °C 附近的系统, 在相同的储热热量和储热温差的条件下, 如采用氢化三联苯型导热油作为储热介质, 所需用量将只有 Solar salt 熔融盐的约 60%, 介质购置成本则需要约 4.5 倍。

价格优势是光热发电项目中熔融盐取代导热油成为主流储热介质的主要原因。储热系统成本在光热电站建设总成本中的具体份额与储热容量以及光热岛技术密切相关, 一般来说较为重要, 在早期采用导热油储热的项目中甚至达到了 42%^[18], 近年随着各项技术进步以及采用廉价的熔融盐后占比仍在 10% ~ 15% 的水平^[27]。但对于 CFETR 发电厂而言, 由于核岛建造成本是非常高的, 初步估算按最成熟的间接式双罐储热方案, 储热系统在总成本中占比将低于 5%, 储热介质的选择可以更侧重于可靠、便利等方面的考虑。

在大部分环境的气温条件下, 氢化三联苯型导

表 3 氢化三联苯型导热油与 solar salt 熔融盐的对比
Tab. 3 Comparisons between hydrogenated triphenyl heat transfer oil and solar salt molten salt

项目	氢化三联苯型导热油	Solar salt 熔融盐
使用温度范围/°C	-3 ~ 345	260 ~ 不低于 580
倾点或凝固点/°C	-32(倾点)	221(固化)/ 238(晶体化)
闪点(ASTM D-92)/°C	184	—
300 °C 下比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·°C)	2.57	1.50
300 °C 下密度/(kg·m ⁻³)	809	1 899
300 °C 下粘度/cp	0.41	3.26
300 °C 下导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C)	0.095	0.5
300 °C 下饱和蒸气压/kPa (a)	30.7	3.1
国内市场价格/(元/t)	38 000	5 000
优点	流动性好, 不易凝固堵塞, 无腐蚀性	价格低, 不可燃, 毒性低
缺点	价格高, 一定的可燃性和毒性	一定的金属腐蚀性和氧化性, 易凝固堵塞, 流动性较差,

热油仍保持一定的流动性, 不会发生凝固及堵塞管道与设备, 可以省却相当数量的辅助设备配置和运行操作, 是相对 solar salt 作为储热介质的最大优点。同时, 在 300 °C 左右的运行温度下氢化三联苯型导热油的粘度仅约为 solar salt 的八分之一, 优异的流动性可以更好地适应 CFETR 的频繁、迅速切换的运行特性。

Solar salt 对金属的腐蚀性有可能会在聚变发电的应用中表现得更为强烈。金属管道及设备内熔融盐冷热变化交替循环(即热循环), 会导致材料表面氧化膜出现内应力, 引起氧化膜脱落或附着性降低, 加剧材料腐蚀^[26]。CFETR 的热功率输出变化频率远高于光热岛, 部分设备管道如核岛回路与储热回路之间的换热器承受的热循环频率也就相应更高, 热循环带来的腐蚀影响必须给予重视。

Solar salt 本身不是可燃物, 但由于硝酸盐具有一定氧化性, 可以引燃有机物。光热电站中发生过几次熔盐罐过热或熔融盐引燃所接触有机物的火灾事故, 但在设计合理的回路中已经有多年的使用经验, 通常可以较好地保证运行安全性^[28]。氢化三联苯型导热油具备一定的可燃性, 需要更为严格消防措施确保运行安全, 国内早已有上千吨级导热油的

化工应用项目^[29], 可以提供一定的参考借鉴。

综上所述, 在运行温度允许的情况下, 即对于水冷包层 CFETR 聚变发电厂, 储热介质建议优先采用氢化三联苯型导热油。

2.4 储热系统方案

储热系统有以下经典的分类方式^[13, 17]: 根据系统储能、放能过程中储热介质是否静止分为主动式储热和被动式储热两大类, 主动式储热(储热介质通常为固体)尚未有商业化光热电站应用。被动式储热系统中, 根据传热流体和储热流体是否同一种介质, 可分为直接式储热和间接式储热。直接式储热系统的传热流体同时作为储热流体, 只需要容器将其储存, 无需换热器, 而间接式储热系统的传热流体和储热流体是两种工质, 必须设置换热器。储热系统还可根据储热前后的低温工质和高温工质是否存放在同一个设备内, 分为单罐系统和双罐系统。

参考光热发电的应用情况^[13, 17], 以下介绍间接式双罐储热、直接式双罐储热、间接式单罐储热和直接式单罐储热等系统方案, 并分析这些方案对 CFETR 聚变发电厂的适用性。

1) 间接式双罐储热系统可再细分为两种。若托卡马克产生的热量全部经由储热介质传递至蒸汽发生器, 系统如图 3(a) 所示; 若托卡马克产生的热量一部分由核岛回路工质直接传递至蒸汽发生器, 其余部分经储热介质间接传递, 系统如图 3(b) 所示。当托卡马克输出热功率时, 储热介质通过换热器被加热储存在高温罐内; 当托卡马克停止输出时, 高温罐内储热介质释放出热量, 维持发电回路的稳定运行。

间接式双罐储热系统运行控制简单明确, 是聚变发电研究中的主流储热方案^[7-11], 同时槽式光热发电项目广泛应用了类似的系统, 成熟可靠。但聚变发电研究更多地关注于图 3(a) 的方案, 而光热发电工程主要应用图 3(b) 的方案。这两种方案的性能与热源的输出波动情况、工作温度范围、储热工质物性等因素有关, 需要针对具体参数进行进一步详细分析。

2) 直接式双罐储热系统如图 3(c) 所示。当托卡马克输出热功率时, 核岛回路的介质进入高温罐的流量大于流出的流量, 因而部分热量储存在高温罐中; 同时核岛回路的介质进入低温罐的流量小于流

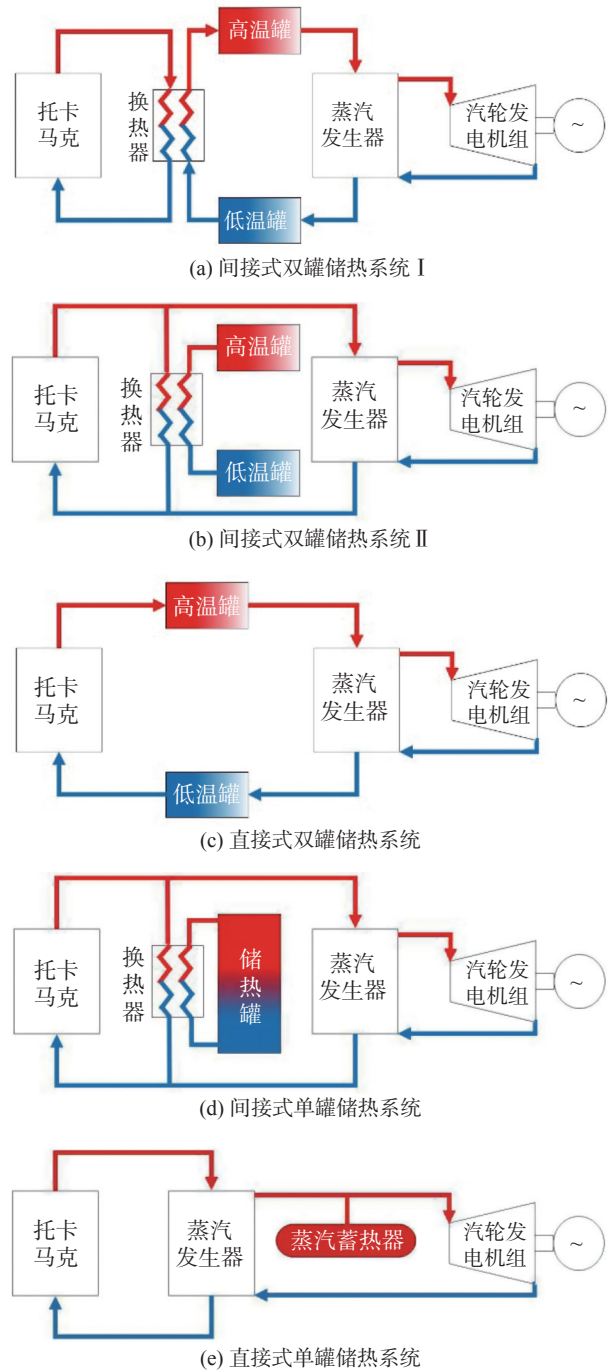


图 3 四种储热系统方案示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of four types of thermal storage systems

出的流量, 维持了托卡马克进出口的流量平衡。当托卡马克停止输出时, 高温罐不再接受核岛介质流入, 上一阶段积累的高温介质继续流出, 维持发电回路的稳定运行并返回至低温储罐, 待下一个循环重新使用。

直接式双罐储热系统也是一种成熟可靠的方案,在许多塔式光热发电项目中得到应用。但是对于聚变发电来说,该方案需要增加核岛回路的工质量。以水冷包层的 CFETR 为例,按 1.2 节所述储能容量进行估算,工质量需增加 6 500 t,对应储罐有效容积达 9 700 m³。由于核岛回路的工作压力在 10 MPa 以上,储罐的承压能力也必须匹配,这类大容量的高压储罐制造难度与成本都十分高,因此直接式双罐储热系统不适合 CFETR 聚变发电厂。

3) 间接式单罐储热系统如图 3(d) 所示。该系统只利用一个储热罐完成高温和低温储热介质的换热转换,高温储热介质位于储热罐的上部,低温储热介质在罐的下部。在罐的中间会存在一个温度梯度很大的自然分层,即斜温层,它像隔离层一样,使得上下两部分的介质保持温度相对稳定。当托卡马克输出热功率时,低温储热介质在罐的底部被抽出,经过换热器加热后,由罐的顶部返回罐内,斜温层逐渐下移。当托卡马克停止输出时,高温储热介质在罐的顶部被抽出,经过换热器对核岛回路释放热量、维持稳定发电,由罐的底部返回罐内,斜温层逐渐上移。

间接式单罐储热系统相对于双罐储热节省了一个储罐,有可能具备占地和成本方面的优势。但实际运行中存在各种复杂的调控问题,如动态保持斜温层稳定困难等^[14],该类方案仅在少数几个光热示范项目中进行试验和研究,尚未进入商业化应用阶段,因此现阶段不予推荐。

4) 直接式单罐储热系统如图 3(e) 所示。当托卡马克输出热功率时,从蒸汽发生器出来的部分饱和或过热蒸汽可以直接存储在高压的蒸汽蓄热器内,蒸汽会在高压容器内液化成饱和水。当托卡马克停止输出时,蒸汽蓄热器可以提供高压饱和蒸汽,维持汽轮发电机组的运转。

直接式单罐储热系统启动迅速,放热速度快,而且不需要额外的导热流体和换热器,但是作为高压容器的蒸汽蓄热器价格昂贵,一般储热容量有限,只作为短时间缓冲使用。按 2.3.1 节的初步估算与分析,直接式单罐储热系统不适合 CFETR 聚变发电厂。

综合以上分析,本文建议间接式双罐储热系统作为 CFETR 聚变发电厂的配套储热方案。

3 结论

由于 CFETR 热功率输出存在不连续性,需要在

核岛回路与发电回路之间配置合适的能量调节系统,以实现聚变发电厂的正常连续运行。本文在调研光热发电工程应用以及聚变发电研究的基础上,介绍了不同的能量调节策略、储能技术、储热介质和储热系统方案,并结合 CFETR 的技术特点与经济特点展开对比分析。对于核岛回路运行温度在 290~325 °C 之间的水冷包层 CFETR,推荐配置以氢化三联苯型导热油为储热介质的间接式双罐显热储热系统;对于核岛回路运行温度在 300~600 °C 之间的氦冷包层 CFETR,推荐配置以 Solar salt 熔融盐为储热介质的间接式双罐显热储热系统。

本文首次针对 CFETR 较全面地进行储能技术适用性分析,可以为 CFETR 聚变发电厂前期概念设计提供一定的技术支撑。CFETR 聚变发电厂配套储能系统的相关研究期待可以在未来继续深化和提升,一方面是关注储能技术如新型熔融盐、新型相变储热介质等方面的发展,思考是否存在更经济可靠的技术可服务于聚变发电;另一方面是结合 CFETR 的项目推进情况,获取更多聚变堆的细节信息,对储能系统的稳态性能和动态性能进行深入评估。

参考文献:

- [1] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [2] 高翔, 万元熙, 丁宁, 等. 可控核聚变科学技术前沿问题和进展 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 25-31. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2018.03.004.
GAO X, WAN Y X, DING N, et al. Frontier issues and progress of controlled nuclear fusion science and technology [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 25-31. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2018.03.004.
- [3] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展 [J]. 物理, 2016, 45(2): 88-97. DOI: 10.7693/wl20160203.
LI J G. The status and progress of tokamak research [J]. Physics, 2016, 45(2): 88-97. DOI: 10.7693/wl20160203.
- [4] 万宝年, 徐国盛. EAST 全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2019, 49(4): 47-59. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00233.
WAN B N, XU G S. Advances in experimental research towards high confinement and steady state operation on the experimental advanced superconducting tokamak [J]. Scientia Sinica (Physica,

- Mechanica & Astronomica*, 2019, 49(4): 47-59. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00233.
- [5] SZOGRADI M, NORRMAN S, BUBELIS E. Dynamic modelling of the helium-cooled DEMO fusion power plant with an auxiliary boiler in Apros [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 160: 111970. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111970.
- [6] MALINOWSKI L, LEWANDOWSKA M, BUBELIS E, et al. Design and analysis of the secondary circuit of the DEMO fusion power plant for the HCPB BB option without the energy storage system and with the auxiliary boiler [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 160: 112003.1-112003.5. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112003.
- [7] BUBELIS E, HERING W, PEREZ-MARTIN S. Conceptual designs of PHTS, ESS and PCS for DEMO BoP with helium cooled BB concept [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2018, 136: 367-371. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.02.040.
- [8] WARMER F, BUBELIS E. First considerations on the balance of plant for a HELIAS fusion power plant [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 146: 2259-2263. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.167.
- [9] BUBELIS E, HERING W, PEREZ-MARTIN S. Industry supported improved design of DEMO BoP for HCPB BB concept with energy storage system [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 146: 2334-2337. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.183.
- [10] BARUCCA L, BUBELIS E, CIATTAGLIA S, et al. Pre-conceptual design of EU DEMO balance of plant systems: objectives and challenges [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 169: 112504. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112504.
- [11] MALINOWSKI L, LEWANDOWSKA M, GIANNETTI F. Design and optimization of the secondary circuit for the WCLL BB option of the EU-DEMO power plant [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 169: 112642. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112642.
- [12] 戴涛,曹良志,贺清明,等.中国聚变工程试验堆包层的核热耦合效应研究[J].*原子能科学技术*,2022,56(1):136-145. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0519.
- DAIT, CAO L Z, HE Q M, et al. Research on neutronics/thermal-hydraulics coupling effect of CFETR blanket [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(1): 136-145. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0519.
- [13] PELAY U, LUO L A, FAN Y L, et al. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 82-100. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.139.
- [14] 丁玉龙,来小康,陈海生.储能技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2018.
- DING Y L, LAI X K, CHEN H S. Energy storage technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [15] 汪翔,陈海生,徐玉杰,等.储热技术研究进展与趋势[J].*科学通报*,2017,62(15):1602-1610. DOI: 10.1360/N972016-00663.
- WANG X, CHEN H S, XU Y J, et al. Advances and prospects in thermal energy storage: a critical review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(15): 1602-1610. DOI: 10.1360/N972016-00663.
- [16] PELAY U, LUO L, FAN Y, et al. Technical data for concentrated solar power plants in operation, under construction and in project [J]. *Data in Brief*, 2017, 13: 597-599. DOI: 10.1016/j.dib.2017.06.030.
- [17] GONZALEZ-ROUBAUD E, PEREZ-OSORIO D, PRIETO C. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: steam vs. molten salts [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 133-148. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.084.
- [18] 汉京晓,杨勇平,侯宏娟.太阳能热发电的显热蓄热技术进展[J].*可再生能源*,2014,32(7):901-905.
- HAN J X, YANG Y P, HOU H J. Review on sensible heat thermal energy storage in solar thermal generation [J]. *Renewable Energy Resources*, 2014, 32(7): 901-905.
- [19] 徐二树,高维,徐蕙,等.八达岭塔式太阳能热发电蒸汽蓄热器动态特性仿真[J].*中国电机工程学报*,2012,32(8):112-117.
- XU E S, GAO W, XU H, et al. Simulation of dynamic characteristics of steam accumulators in the badaling solar power tower plant [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(8): 112-117.
- [20] 赵玉贞,赵小艳.合成导热油的发展及应用[J].*合成润滑材料*,2010,37(4):19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4364.2010.04.007.
- ZHAO Y Z, ZHAO X Y. Development and application of synthetic heat transfer fluids [J]. *Synthetic Lubricants*, 2010, 37(4): 19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4364.2010.04.007.
- [21] Eastman Chemical Company. Heat transfer fluids [EB/OL]. (2022-3-20) [2022-3-20]. <https://www.eastman.com/Products/Pages/ProductList.aspx?categoryName=Heat+Transfer+Fluids>.
- [22] 王志峰.兆瓦级塔式太阳能热发电实验电站[J].*现代物理知识*,2013(2):6.
- WANG Z F. Megawatt tower solar-thermal experimental power station [J]. *Modern Physics*, 2013(2): 6.
- [23] 吴玉庭,任楠,马重芳.熔融盐显热蓄热技术的研究与应用进展[J].*储能科学与技术*,2013,2(6):586-592. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004.
- WU Y T, REN N, MA C F. Research and application of molten salts for sensible heat storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2013, 2(6): 586-592. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2013.06.004.
- [24] FERNANDEZ A G, GOMEZ-VIDAL J, ORO E, et al. Mainstreaming commercial CSP systems: a technology review [J]. *Renewable Energy*, 2019, 140: 152-176. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.049.
- [25] 王鹏,罗尘丁,巨星.光热电站熔盐传热储热技术应用[J].*电力勘测设计*,2017(2):67-71.
- WANG P, LUO C D, JU X. Application of molten salts for heat transfer and storage technique for molten salts in concentrating solar power plant [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2017(2): 67-71.

- [26] 孙华, 张鹏, 王建强. 传热储热用熔融硝酸盐及其腐蚀问题 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(5): 567-574. DOI: 10.11903/1002.6495.2016.258.
SUN H, ZHANG P, WANG J Q. Corrosion problems related with molten nitrate salts for heat transfer and thermal storage [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29(5): 567-574. DOI: 10.11903/1002.6495.2016.258.
- [27] International Renewable Energy Agency. Renewable technology innovation indicators: mapping progress in costs, patents and standards [EB/OL]. (2022-3-7) [2022-3-20]. <https://irena.org/publications/2022/Mar/Renewable-Technology-Innovation-Indicators>.
- [28] 郭晓娟, 丁旂, 秦贯丰, 等. 高温熔融盐蓄热系统的若干工程问题 [J]. 储能科学与技术, 2015, 4(1): 32-43. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.01.003.
GUO X J, DING Z, QIN G F, et al. A literature review on some engineering issues of high temperature molten salt thermal energy storage systems [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2015, 4(1): 32-43. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4239.2015.01.003.
- [29] 陈南岭. 导热油在工业换热过程中的应用 [J]. 流程工业, 2005(5): 30-33.
CHEN N L. Applications of heat transfer oil in industrial heat exchange process [J]. *Process Industry*, 2005(5): 30-33.

作者简介:



梁展鹏

梁展鹏 (第一作者, 通信作者)

1983-, 男, 广东佛山人, 高级工程师, 清华大学热能工程博士, 主要从事能源经济研究与发电厂热机设计(e-mail)37653169@qq.com。

向魁

1984-, 男, 湖北武汉人, 热机主任工程师, 华中科技大学热能工程硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作(e-mail)xiangkui@gedi.com.cn。

李华

1984-, 男, 湖北黄冈人, 助理研究员, 工学博士, 主要从事高压电源、电磁兼容与大功率直流开关技术研究(e-mail)lihua@ipp.ac.cn。

朱光涛

1971-, 男, 吉林长春人, 副总工程师, 正高级工程师, 东北电力学院电厂热能动力工程专业硕士, 主要从事发电厂设计研究和技术监督工作(e-mail)zhuguangtao@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

