

CFETR 核聚变发电厂储热技术对比

罗浩东¹ 林 燕¹ 李 斌¹ 向 魁¹ 朱光涛¹ 曾 涛²

1(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 广州 510663)

2(中国科学院广州能源研究所 广州 510610)

摘要 为解决核聚变发电功率输出不稳定性和汽轮发电机组平稳运行之间的矛盾,中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)核聚变发电厂可运用储热技术对核聚变堆的功率输出进行削峰平谷。储热技术有多种类型,各类储热技术对于核聚变发电厂的适用性亟须进行对比。本文选取核聚变反应堆氦冷陶瓷增殖包层的参数作为储热技术边界条件,通过对储热技术适用温度范围进行评估,初步分析出有潜力运用于 CFETR 核聚变发电厂的三种储热技术,并对其进行成本初步预测。三大类储热技术均可选出适用 CFETR 核聚变发电厂氦冷增殖包层温度参数的储热介质。但化学储热由于其吸热和放热存在温差,不利于系统的稳定性及造成能量的损耗,显热储热技术和相变储热技术吸热温度和放热温度温差较小,具有应用于 CFETR 核聚变发电厂的潜力。初步经济性分析结果显示:相变储热成本最低,其次为熔融盐储热,再次为固相显热储热技术中利用硅砖作为储热介质,固相显热储热技术中利用铸钢作为储热介质成本最高。储热技术中,熔融盐储热技术、相变储热技术、固相显热储热具有应用于核聚变发电厂氦冷增殖包层的先决条件。熔融盐储热技术成熟度较高,有大量工程应用,造价在相变储热和固相显热储热之间,运用潜力较大。相变储热的成本最低,参数适用于核聚变发电,但其技术成熟度较低,有望成为未来研究的重点。

关键词 核聚变, 中国聚变工程实验堆, 发电技术, 储能, 储热, 经济性分析

中图分类号 TM756.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.050014

Comparison of CFETR nuclear fusion power plant thermal storage technology

LUO Haodong¹ LIN Yan¹ LI Bin¹ XIANG Kui¹ ZHU Guangtao¹ ZENG Tao²

1(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

2(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract [Background] Due to its pollution-free nature and non consumption of fossil fuels, nuclear fusion is the most ideal future energy source. China is preparing to build a China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR) with independent intellectual property rights, and plans to build a commercial thermonuclear fusion power plant that can generate electricity externally by the mid-20th century. However, there is contradiction between the instability of nuclear fusion heating power output and the smooth operation of steam turbine generators, hence thermal storage technology is used for peak shaving and valley smoothing of power output in nuclear fusion reactors. [Purpose] This study aims to compare heat storage technologies applied to CFETR nuclear fusion power plants to reduce its the peak

中国能建“揭板挂帅”项目“热核聚变发电岛概念设计研究”(No.CEEC2021-ZDYF-08)、国家自然科学基金面上项目(No.52176091)、中国科学院先导专项(No.XDA0400102)资助

第一作者: 罗浩东, 男, 1991 年出生, 2017 于山东大学获硕士学位, 工程师, 主要从事发电厂设计及相关研究工作

通信作者: 曾涛, E-mail: zengtao@ms.giec.ac.cn

收稿日期: 2024-04-29, 修回日期: 2024-05-07

Supported by China Energy Engineering Corporation Limited "Announce the list and take charge" Project (No.CEEC2021-ZDYF-08), National Natural Science Foundation of China (No.52176091), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA0400102)

First author: LUO Haodong, male, born in 1991, graduated from Shandong University with a master's degree in 2017, engineer, focusing on power plant design and related research work

Corresponding author: ZENG Tao, E-mail: zengtao@ms.giec.ac.cn

Received date: 2024-04-29, revised date: 2024-05-07

and valley power output. **[Methods]** The parameters of helium cooled ceramic breeder cladding in nuclear fusion reactors was selected as the boundary conditions for thermal storage technology. By evaluated the applicable temperature range of thermal storage technology, three potential thermal storage technologies, i. e., chemical heat storage, sensible heat storage technology and phase change heat storage, for CFETR nuclear fusion power plants were preliminarily analyzed, and their costs were preliminarily predicted. **[Results]** The three major types of heat storage technologies can all select heat storage media suitable for the temperature parameters of the helium cooled breeder blanket in CFETR nuclear fusion power plants. However, chemical heat storage has the potential to be applied in CFETR nuclear fusion power plants due to the temperature difference between its heat absorption and release, which is not conducive to the stability of the system and causes energy loss. Sensible heat storage technology and phase change heat storage technology have smaller temperature differences between their heat absorption and release. The preliminary economic analysis results show that the cost of phase change heat storage is the lowest, followed by molten salt heat storage, and the use of silicon bricks as the heat storage medium in solid-phase sensible heat storage technology. The use of cast steel as the heat storage medium in solid-phase sensible heat storage technology has the highest cost. **[Conclusion]** In thermal storage technology, molten salt thermal storage technology has a high degree of maturity and has a large number of engineering applications, with a cost between phase change thermal storage and solid-phase sensible thermal storage, and has great potential for application. The cost of phase change heat storage is the lowest, and the parameters are suitable for nuclear fusion power generation. However, its technological maturity is relatively low, and it is expected to become a focus of future research.

Key words Nuclear fusion, CFETR, Power generation technology, Energy storage, Heat storage, Economic analysis

托卡马克是一种“甜甜圈”形状的核聚变磁约束装置,依靠磁场对高能粒子进行约束,是目前世界上最有前途的核聚变反应堆类型^[1-2]。国际合作方面,我国参与建设了世界上最先进的托卡马克核聚变反应堆——国际热核实验反应堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER),并共享其所有的知识成果^[3-4]。ITER仍处在建设阶段,计划耗资200亿欧元,预计将产生约500 MW的聚变功率,目标增益因子约为10,实现工程可行性的论证^[5-7]。国内方面,我国的托卡马克核聚变技术一直走在世界的前列,2023年8月25日,中核集团核工业西南物理研究院设计和建造的HL-3托卡马克装置首次实现了等离子体电流为1 MA的高约束模式(H-模式)运行^[8]。中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所研制的EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)托卡马克装置创造了多项新的世界纪录:2021年底成功实现1 056 s长脉冲高参数等离子体运行^[9];2023年4月12日首次实现了403 s可重复的稳态长脉冲高约束模式等离子体运行^[10]。在吸取了EAST和HL-3等国内托卡马克装置建设经验,以及结合ITER项目的最新研究进展,我国规划了中国核聚变工程试验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)的建设:CFETR计划分三个阶段运行。在第一阶段,目标是实现100~200 MW的聚变发电,在此阶段将探索稳态运行和氦自给自足,作为ITER增益因子达

到10之后运行的补充;第二阶段计划于2040年前完成,核聚变功率为1 GW;第三阶段聚变发电厂计划在2060年前建成^[11-12]。中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司对CFETR聚变发电厂开展了概念设计工作^[13],并提出核聚变发电厂需要运用储能技术将聚变堆间断性的输出变为稳定的功率输出,以便于解决核聚变发电不稳定性与汽轮发电机组平稳运行的^[14-15]需求之间的矛盾。

现有的储能形式主要分为机械储能、电化学储能、储热及电磁储能。在各类储能形式中,飞轮储能、电化学储能、电磁储能这些储能方式常用于对多余电能的储存。抽水储能、压缩空气储能将多余的能量以势能的形式储存,但由于其储存介质为水和空气,因此无法直接加热蒸汽从而解决核聚变发电不稳定性与汽轮发电机组平稳运行的需求之间的矛盾,频繁地启停汽轮发电机组会对机组寿命产生极大的影响。储热技术可在核聚变堆功率输出时存储一定的热量而在无功率输出时放出热量从而对聚变堆输出功率起到削峰平谷的作用,保障汽轮机平稳运行。储热技术根据储热原理分为化学储热、显热储热和潜热储热三大类,各个分类中又存在多种储热介质,其对于CFETR聚变发电厂的适用性亟须进行对比和分析。

1 储热技术对比

储热技术根据所有利用的储热原理分为显热储

热、潜热储热和化学储热这三大类。显热储热不涉及相变和化学反应,利用储热材料吸收热量温度升高这一个特性进行储热;相变储热则是利用材料的相变过程中的潜热进行储热的一种方式;化学储热则是利用化学反应吸收和放出热量。

1.1 CFETR核聚变储热参数

核聚变产生热量由聚变堆的包层内的流体带出,用于发电厂发电。CFETR的包层方案有以下三种:1)氦冷陶瓷增殖包层(Helium-cooled Ceramic Breeder, HCCB)^[16-18];2)水冷陶瓷增殖包层(Water-Cooled Ceramic Breeder, WCCB)^[19-21];3)超临界二氧化碳锂铅双冷包层^[22-23]。三种包层方案的进出口压力及温度均不同,其中超临界二氧化碳锂铅双冷包层由中国科学院最新提出,仍处于研究阶段,并未成熟,暂不做考虑。其他两种包层方案的聚变堆介质进出口参数见表1。对比上述两种包层方案,氦冷包层进出口温差较大,换热温度较高。汽轮机组发电机蒸汽循环可近似为朗肯循环,提高蒸汽的温度则平均吸热温度随之提高,循环温差增大,循环热效率随之提高。选取对汽轮机组效率更有利的氦冷包层方案作为研究对象,开展对比工作。

表1 核聚变包层方案对比 Table 1 Comparison of nuclear fusion cladding schemes				
名称 Items	冷却介质 Cooling medium	进口温度 Inlet temperature / °C	出口温度 Outlet temperature / °C	运行压力 Operating pressure / MPa
水冷包层 WCCB	水 Water	~290	~325	~15.5
氦冷包层 HCCB	氦气 Helium	~300	~600	~12

在输出功率方面,根据CFETR的初步规划,核聚变装置平均输出功率约为1 GW^[24],其中由于核聚变堆功率输出的间歇性,可以将功率输出特性简化等效为1.25 GW输出2 h后停机20 min,以此规律反复循环^[15]。

1.2 显热储热适用性分析

显热储热装机成本低,装机规模大,响应时间为分钟至小时级别,与工程背景工况较为契合。

利用熔盐作为储存介质的双罐显热储存系统实现了集热式的太阳能发电厂系统(Concentrated Solar Power, CSP)已有大量工程项目落地。为了提高CSP系统的效率,使其发电成本与传统化石燃料发电厂相当,进行了大量的研究工作,表2、3为熔融盐在CSP系统应用中的各项参数以及各类熔盐材料的特性参数对比^[24-25]。

表2 CSP系统参数 Table 2 CSP system parameters	
名称 Items	参数 Parameter
成熟度 Technical maturity	商业化 Commercialization
容量 Capacity / MW	50~100
工作温度 Operation temperature / °C	290~565
主蒸汽参数 Main steam parameters	温度 Temperature 540 °C; 压力 Pressure 10~16 MPa
导热工质 Thermal conductive medium	熔融盐 Fuse salt
储存系统 Storage system	直接双罐熔盐储存 (290~565 °C) Dual tank molten salt storage

表3 高温熔盐材料参数 Table 3 High temperature molten salt material parameters		
名称 Items	熔点 Melting point / °C	分解温度 Decomposition temperature / °C
Solar Salt	240	565
Hitec	142	450
Hitec XL	130	450
LiNaKNO ₃	118	550
LiNaKCaNO ₃	93	450
LiNaKNO ₃ NO ₂	97	450
KMgCl	430	>700
NaKMgCl	383	>700
NaMgCaCl	407	650
NaKZnCl	204	>700
KMgZnCl	356	>700
LiNaKF	454	>700
NaBF	385	>700
KBF	460	>700
KZrF	420	>700
LiNaKCO ₃	397	670

从表2、3可知,高温熔融盐工作温度可达600 °C以上,工作压力可达16 MPa,完全适用于工程背景所提到的工况条件:300 °C(入口)/600 °C(出口)/12 MPa。而同为液态显热储热的水和导热油由于工作温度较低,不适用于该工程背景。故以熔融盐为介质的显热储热技术参数范围可覆盖CFETR核聚变发电厂的参数范围。

对于利用固体储热材料的比热容进行储热的技术称为固体储热技术,目前已经得到研究应用的固态显热储热材料有鹅卵石+导热油、水泥、铸铁等,其主要物性参数见表4。

从工程背景出发将选用工作温度可达600 °C的固体储热材料进行分析计算,结合表5给出的数据,其中铸钢(Cast steel: 200~700 °C)、硅砖(Silica fire

表4 固态显热储热材料参数
Table 4 Solid state sensible heat storage material parameters

名称 Items	工作温度 Operation temperature / °C	密度 Density / kg·m ⁻³	导热系数 Thermal conductivity coefficient / W·(m·K) ⁻¹	比热容 Specific heat capacity / kJ·(kg·K) ⁻¹
砂岩矿物油 Sandstone mineral oil	200~300	1 700	1.0	1.3
钢筋混凝土 Concrete	200~400	2 200	1.5	0.85
固体 NaCl Solid NaCl	200~500	2 160	7.0	0.85
铸铁 Cast iron	200~400	7 200	37.0	0.56
铸钢 Cast steel	200~700	7 800	40.0	0.6
硅石耐火砖 Silica brick	200~700	1 820	1.5	1.0
镁质耐火砖 Magnesia brick	200~1 200	3 000	5.0	1.15

brick: 200~700 °C)、镁质耐火砖 (Magnesia fire brick: 200~1 200 °C) 均符合本工程应用温度范围。

1.3 相变储热技术适用性分析

相变储热 (Latent Heat Storage, LHS) 是一种不涉及化学反应就具有较高储热能力的方法。该技术利用相变材料发生相变时吸收或放出热量来实现能量的储存, 具有单位质量 (体积) 蓄热量大、温度波动小 (储、放热过程近似等温)、化学稳定性好和安全性好等特点。LHS 已经成功地应用于太阳能热利用、工业余热回收、建筑节能、电子冷却等领域^[26-27]。但在 600 °C 左右的高参数应用还没有工程先例。

相变储热材料众多, 表 5 列举了 600 °C 左右的高温相变储热材料。从表 5 可以看出, 很多材料均可适用于 600 °C 左右的参数范围。用于核聚变发电厂储能系统。

表5 高温相变材料参数
Table 5 High temperature phase change material parameters

名称 Items	熔点 Melting point / °C	潜热 Latent heat / kJ·kg ⁻¹	价格 Price / \$·t ⁻¹
NaCl-NiCl ₂	573	558	2 957
LiCl	610	416	8 250
LiF-NaF-CaF ₂ -MgF ₂ ^[28]	593~595	510~515	58 616
LiF-NaF-CaF ₂	615	640	104 330
KBr-KF	576	315	1 631
LiCl-MgF ₂	573	131	11 371
KCl-KF	605	407	1 019
KBr-K ₂ MoO ₄	625	90.5	4 522

1.4 热化学储热技术适用性分析

热化学储热作为储热技术的一种, 其温度跨度

在 50~1 000 °C 之间, 且相比于显热储热技术, 其储热密度高, 是一种具有发展潜力的储热手段^[29]。表 6 统计了核聚变发电厂氦冷陶瓷增殖包层参数附近的多种化学储热工质对。从表 6 可以看出, 多种化学反应的储热温度在此区间内。但是, 由于化学反应的特性, 可逆反应中, 放热反应的反应温度会低于吸热反应的反应温度且温差大, 这种特性将导致利用化学储热会使得介质的温度参数降低。这将不利于汽轮发电机组的稳定性以及导致发电效率的降低。因此, 化学储热不适用于核聚变发电厂储能系统。

表6 化学储热工质对参数
Table 6 Chemical thermal storage working fluid pair parameters

反应方程式 Reaction equation	吸热温度 Heat storage temperature / °C	储热密度 Heat storage density / kJ·kg ⁻¹
CaO+H ₂ O⇌Ca(OH) ₂ ^[30]	400~600	1 402
Ba(OH) ₂ ⇌BaO+H ₂ O ^[30]	500~700	875
Sr(OH) ₂ ⇌SrO+H ₂ O ^[30]	500~600	1 118
CaCO ₃ ⇌CaO+CO ₂ ^[30]	650~900	1 778
BaO ₂ ⇌BaO+1/2O ₂ ^[30]	600~900	474
Co ₃ O ₄ ⇌3CoO+1/2O ₂ ^[30]	600~1 000	844
6Mn ₂ O ₃ ⇌4Mn ₃ O ₄ +O ₂ ^[30]	500~1 000	202

2 储热技术经济性分析

运用储能技术目的是汽轮发电机组稳定运行。根据核聚变发电站等效模型: 1.25 GW 输出 2 h 后停机 20 min 计算, 需要配置的储能净量达到 357 MW·h 以上才能稳定聚变堆热功率的输出。以此作为计算依据, 分析各种储热技术的储能成本。

2.1 熔融盐储热经济分析

储能系统的总成本包括罐体成本、储能介质成本、基础平台成本、保温材料成本、安装成本及间接成本。换热器、再热器双罐熔盐储热系统的总成本计算可以按照其储热量来大概估算,储能成本为 $26.40 \$ \cdot \text{kWh}^{-1}$ ^[30]。按照聚变堆储能系统357 MWh可以计算出系统总成本为\$9 424 800。其中储能介质成本占比约为23.9%,即\$2 252 527.2;罐体成本约占43.5%,为\$4 099 788。

2.2 固相显热储热经济分析

从工程背景出发将选用工作温度可达600 °C的固体储热材料进行分析计算,结合表5给出的数据,其中铸钢(Cast steel: 200~700 °C)、硅砖(Silica fire brick: 200~700 °C)、镁质耐火砖(Magnesia fire brick: 200~1 200 °C)均符合本工程应用温度范围,选用温度更为接近的铸钢和硅砖进行对比分析计算。

固相显热储热工程成本分为材料成本、保温成本、基础成本、管道成本、安装及间接成本。基于文献[31]报道同为固相储热技术的混凝土储热装置成本进行估算,参数400 °C 1 256 kg的混凝土储热装置的成本为:保温成本为\$835.87、基础成本为\$221.12、管道成本为\$377.46、安装及间接成本为\$499.21^[31]。

2.2.1 材料成本

储热材料的成本可按式(1)计算,其中根据357 MWh的储热量及300 °C的进出口温差计算,结合铸钢和硅砖的比热容分别为 $0.6 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 和 $1.0 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$,市场调研得到两者单价为铸钢 $2.4 \$ \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硅砖 $1.4 \$ \cdot \text{kg}^{-1}$ 。则如表7所示,计算出铸钢材料成本为\$17 136 000,硅砖材料成本为\$5 997 600。

$$M_c = \frac{Q}{C \cdot \Delta t} \times P_m \quad (1)$$

式中: M_c 为材料成本价格; Q 为储热量; C 为材料比热容; Δt 为温差; P_m 为材料单价。

表7 固相显热储热材料成本计算参数及结果
Table 7 Cost calculation parameters and results of solid-phase sensible heat storage materials

名称 Items	Q / kJ	$C / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	$\Delta t / ^\circ\text{C}$	$P_m / \$ \cdot \text{kg}^{-1}$	$M_c / \$$
铸钢 Cast steel	1.29×10^9	0.6	300	2.4	1.7×10^7
硅砖 Silica brick	1.29×10^9	1.0	300	1.4	6.0×10^6

2.2.2 保温成本

保温的用量和材料表面积及介质温度有关。材料表面积越大,介质温度越高保温用量越大。

根据行业规范及工程经验,介质温度400 °C和600 °C,保温层厚度比约为1:1.8。

假设储能介质的形状是一样的,只是大小不同,则体积比和表面积比之间的关系按式(2)计算,储能系统的介质体积可按照式(3)计算。计算参数及结果见表8,已知硅砖密度为 $1 820 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,铸钢 $7 800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据工程实际利用固体材料作为储热介质需留有间隙便于传热导热,假设填充密度为0.75。则根据式(3)计算出硅砖体积约为 $3 138 \text{ m}^3$,铸钢体积约为 $1 220 \text{ m}^3$ 。

已知混凝土密度为 $2 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,假设填充密度同样为0.75,则根据式(3)可以计算出混凝土体积为 0.67 m^3 。硅砖体积为混凝土体积的4 684倍,铸钢体积为1 821倍。根据式(2)可以计算出,硅砖表面积为混凝土的约280倍,铸钢为149倍。加上温度不同带来的保温厚度的倍数(1.8倍),则硅砖的保温成本为混凝土的504倍,铸钢为268.2倍,即保温成本为硅砖\$421 278,铸钢\$224 180。

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt[3]{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2} \quad (2)$$

式中: A_1 和 A_2 为不同的两种介质的表面积; V_1 和 V_2 则为两种介质的体积。

$$V_g = \frac{Q}{a \cdot C \cdot \Delta t \cdot \rho} \quad (3)$$

式中: V_g 为材料体积; Q 为储热量; C 为材料比热容; Δt 为温差; a 为填充密度; ρ 为材料密度。

表8 固相显热储热保温成本计算参数及结果
Table 8 Calculation parameters and results of solid-phase sensible heat storage and insulation cost

名称 Items	密度 Density $/ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	填充密 度 Fill density	体积 Volume $/ \text{m}^3$	温度 Tempera- ture $/ ^\circ\text{C}$	保温成 本 Insu- lation cost $/ \$$
混凝土(参照) Concrete (reference)	2 500	0.75	0.67	400	835.87
硅砖 Silica brick	1 820	0.75	3 138	600	421 278
铸钢 Cast steel	7 800	0.75	1 220	600	224 180

2.2.3 基础成本

基础成本主要功能是为了承重,和储热材料重量有关,可按照储热材料质量等比例放大。储热材料的质量可以按照式(4)计算:

$$m = \frac{Q}{C \cdot \Delta t} \quad (4)$$

式中: m 为材料质量; Q 为储热量; C 为材料比热容; Δt 为温差。

通过式(4)计算出, 硅砖质量 4 284 t, 铸钢质量为 7 140 t。通过等比例放大计算, 基础成本为硅砖 \$754 202, 铸钢 \$1 257 004。

2.2.4 管道成本

管道成本为介质中通过的换热管及翅片的费用, 将文献[31]中所用的传热介质及储热材料和固态显热储热的传热介质和材料物性进行对比, 见表 9。从表 9 可以看出来, 氦气的导热系数接近于文献[31]中空气传热系数的两倍, 硅砖与文献中混凝土导热系数相仿, 铸钢的传热系数远高于其余材料。气体侧的传热较低, 可采用加快流速、增加紊流等方式提高传热面积。为保障储热功率, 储热系统所需的换热面积和传热介质及储热材料的导热系数负相关。

表 9 导热系数对比
Table 9 Thermal conductivity comparison

名称 Item	导热系数 Thermal conductivity coefficient / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$
空气(文献值) Air (literature value)	0.121
氦气 Helium	0.238 6
混凝土(文献值) Concrete (literature value)	1.5~2
硅砖 Silica brick	1, 5
铸钢 Cast steel	40

文献[31]中所用的储热材料为混凝土, 储热材料导热系数越小, 越需要更多的换热管及翅片增加传热面积。当然, 管道的换热和换热器形状、流体状态、两侧物质的导热系数、所需的功率等密切相关, 需要进一步模拟研究才可得出较为准确的数值。由于文献[31]中混凝土和硅砖的导热系数相近, 可按照文献[31]中混凝土等比例放大进行初步预估, 则硅砖管道成本为 \$1 768 477。铸钢由于其导热系数远大于硅砖及气体的导热系数, 无须增加翅片, 流体通道可在铸钢上开孔, 因此无须增加管道及翅片。

2.2.5 安装及间接成本

间接成本可按照介质成本、管道成本、基础成本、保温成本之和的 10% 计算。安装成本按照材料成本和间接成本总和的 20% 计算。

2.2.6 固态显热储热成本

经过上述计算, 表 10 统计了固态显热储热成本。结果显示, 硅砖的成本为 11 214 064, 小于铸钢的 24 278 446, 更具有经济性。其中固态显热储热

中的材料成本占比较高, 达到 50% 以上。

表 10 固态显热储热成本(\$)
Table 10 Solid state sensible heat storage cost (\$)

成本类型 Cost type	硅砖(占比) Silica brick	铸钢(占比) Cast steel
材料成本 Material cost	5 997 600(53.5%)	17 136 000(70.6%)
保温成本 Insulation cost	421 278(3.8%)	224 180(0.9%)
基础成本 Foundation cost	7 542 029(6.7%)	1 257 004(5.2%)
管道成本 Pipeline cost	1 768 477(25.8%)	0(0%)
安装成本 Installation cost	1 378 351(12.3%)	3 799 544(15.6%)
间接成本 Indirect costs	894 156(8.0%)	1 861 718(7.7%)
总计 Sum	11 214 064(100%)	24 278 446(100%)

2.3 相变储热经济分析

文献[31]中所述的高温相变储热介质温度为 600 °C, 相变材料为高温相变材料(Phase Change Materials-high temperature, PCM-H), 相变温度为 550 °C, 与核聚变氦冷陶瓷增殖包层储热温度参数基本相当, 储能成本核算为 20.83 \$·kWh⁻¹, 按照聚变堆储能系统 357 MWh 的储热量计算, 可以得出储能系统总成本为 \$7 436 310。

2.4 储热经济性对比

各种储热技术的储热成本见图 1, 从图 1 可以看出, 相变储热的储热成本最低, 其次是熔融盐储热, 固态显热储热技术中的铸钢的储热总成本最高。

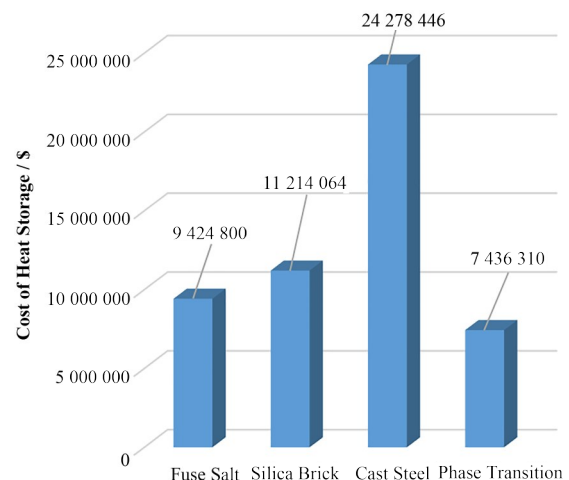


图 1 储热成本对比
Fig.1 Comparison chart of heat storage costs

3 结语

针对 CFETR 核聚变堆的功率输出特性,对各个储热技术进行了初步对比,可以得出以下结论:

1)显热储热、热化学储热、相变储热技术其适用温度均可覆盖 CFETR 核聚变发电厂氦气冷增殖包层的储热温度。其中由于吸热和放热温度接近,显热储热、相变储热应用潜力较大。

2)根据初步经济性测算,相变储热的成本最低,其次是熔融盐储热技术,固相显热储热技术中的硅砖储热技术、铸钢储热技术成本较高。

下一步的研究设想:1)将开展对每种储热方式 CFETR 核聚变发电厂储热工况的详细模拟研究;2)将开展采用氦冷增殖包层和水冷增殖包层的综合优势的对比。

作者贡献声明 罗浩东数据处理和论文撰写;林燕负责整体框架的搭建;李斌负责数据收集;向魁负责和聚变堆相关研究院的配合及沟通;朱光涛负责方案的评审并提出宝贵建议;曾涛负责提供技术指导,参与结果讨论。

参考文献

- Palmero M S, Caldas I L. Confining and escaping magnetic field lines in tokamaks: analysis via symplectic maps[J]. *Fundamental Plasma Physics*, 2023, **8**: 100027. DOI: 10.1016/j.fpp.2023.100027.
- Sadik-Zada E R, Gatto A, Weißnicht Y. Back to the future: Revisiting the perspectives on nuclear fusion and juxtaposition to existing energy sources[J]. *Energy*, 2024, **290**: 129150. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129150.
- Lerede D, Nicoli M, Savoldi L, *et al.* Analysis of the possible contribution of different nuclear fusion technologies to the global energy transition[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, **49**: 101144. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101144.
- 宋执权. 中国与国际热核聚变实验堆组织合作建设世界最大“人造太阳”[J]. *南方能源建设*, 2022, **9**(2): 25. SONG Zhiquan. China cooperates with the International Thermonuclear Experimental Reactor Organization to build the world's largest "artificial Sun"[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, **9**(2): 25.
- Morse E C. Nuclear fusion[M]//*Encyclopedia of Nuclear Energy*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 92 - 100. DOI: 10.1016/b978-0-12-409548-9.12177-3.
- Wang Z Y. Current status of research on magnetic confinement fusion and superconducting tokamak devices [J]. *Procedia Computer Science*, 2023, **228**(C): 163 - 170. DOI: 10.1016/j.procs.2023.11.020.
- 胡星光, 宋执权, 高格, 等. ITER 聚变装置及其电源系统 [J]. *南方能源建设*, 2022, **9**(2): 19 - 25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002. HU Xingguang, SONG Zhiquan, GAO Ge, *et al.* ITER fusion device and its power supply system[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, **9**(2): 19 - 25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002.
- Zhong W L. China's HL-3 tokamak achieves H-mode operation with 1 MA plasma current[J]. *The Innovation*, 2024, **5**(1): 100555. DOI: 10.1016/j.xinn.2023.100555.
- 王腾. 超导磁体技术与磁约束核聚变[J]. *南方能源建设*, 2022, **9**(4): 108 - 117. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.014. WANG Teng. Superconducting magnet technology and magnetically confined fusion[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, **9**(4): 108 - 117. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.014.
- 高翔, 万元熙. 磁约束聚变能源的发展机遇与挑战[J]. *科技导报*, 2023, **41**(19): 59 - 65. GAO Xiang, WAN Yuanxi. Opportunities and challenges for the development of magnetic confinement fusion energy[J]. *Science & Technology Review*, 2023, **41**(19): 59 - 65.
- Zheng J X, Qin J G, Lu K, *et al.* Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration[J]. *Innovation (Cambridge (Mass))*, 2022, **3**(4): 100269. DOI: 10.1016/j.xinn.2022.100269.
- 高翔, 万宝年, 宋云涛, 等. CFETR 物理与工程研究进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, **49**(4): 7 - 14. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00235. GAO Xiang, WAN Baonian, SONG Yuntao, *et al.* Progress on CFETR physics and engineering[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, **49**(4): 7 - 14. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00235.
- 熊雄. 核聚变发电厂常规岛主厂房土建设计研究[J]. *南方能源建设*, 2022, **9**(2): 90 - 94. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.012. XIONG Xiong. Research on civil structure design of main building for fusion power plant conventional island[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, **9**(2): 90 - 94. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.012.
- 向魁, 梁展鹏, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂概念设计技

- 术研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 45 - 52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006.
- XIANG Kui, LIANG Zhanpeng, LI Hua, *et al.* Conceptual design technology research of CFETR fusion power plant[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(2): 45 - 52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006.
- 15 梁展鹏, 向魁, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析[J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 53 - 62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007.
 - LIANG Zhanpeng, XIANG Kui, LI Hua, *et al.* Applicability analysis of energy storage techniques for CFETR fusion power plant[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(2): 53 - 62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007.
 - 16 周冰, 王晓宇, 王艳灵, 等. 中国聚变工程试验堆氦冷包层安全分析研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(S2): 29 - 32. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.S2.0029.
 - ZHOU Bing, WANG Xiaoyu, WANG Yanling, *et al.* Safety analysis of helium cold cladding in China fusion engineering test reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(S2): 29 - 32. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.S2.0029.
 - 17 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.
 - DAI Tao, CAO Liangzhi, HE Qingming, *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.
 - 18 李茹烟, 王晓宇, 王俊, 等. CFETR 氦冷固态包层及其辅助系统动态氚输运分析[J]. 核化学与放射化学, 2021, 43(3): 212 - 222. DOI: 10.7538/hhx.2021.43.03.0212.
 - LI Ruyan, WANG Xiaoyu, WANG Jun, *et al.* Tritium dynamic transport analysis for CFETR helium cooled ceramic breeder blanket and auxiliary system[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2021, 43(3): 212 - 222. DOI: 10.7538/hhx.2021.43.03.0212.
 - 19 李杰. CFETR 固态水冷包层中子学设计及氚增殖影响因素研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2022.002280.
 - LI Jie. Neutronics design of water cooled ceramic blanket for CFETR and study on influencing factors of tritium breeding[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2022.002280.
 - 20 凌启鑫, 马学斌, 刘松林. CFETR 水冷包层模块热工水力学分析与优化[J]. 核聚变与等离子体物理, 2022, 42(3): 301 - 307. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202203006.
 - LING Qixin, MA Xuebin, LIU Songlin. Thermo-hydraulics analysis and optimization for the module of CFETR WCCB[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2022, 42(3): 301 - 307. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202203006.
 - 21 李远杰. CFETR 水冷固态包层第一壁优化及其增殖球床性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000949.
 - LI Yuanjie. Optimization of the first wall of WCCB for the CFETR and research on the performance of the breeding pebble bed[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2022.000949.
 - 22 余毅, 马学斌, 蒋科成, 等. CFETR 超临界 CO₂ 锂铅双冷包层第一壁热工水力学分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2023, 43(4): 386 - 391. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202304003.
 - YU Yi, MA Xuebin, JIANG Kecheng, *et al.* Thermal-hydraulic analysis of the first wall of the supercritical CO₂ cooled lithium lead blanket for CFETR[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2023, 43(4): 386 - 391. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202304003.
 - 23 蒋科成, 余毅, 马学斌, 等. CFETR COOL 包层热-机械性能研究[J]. 核动力工程, 2023, 44(S1): 101 - 107. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.S1.0101.
 - JIANG Kecheng, YU Yi, MA Xuebin, *et al.* Study on thermal-mechanical properties of CFETR COOL cladding [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(S1): 101 - 107. DOI: 10.13832/j.jnpe.2023.S1.0101.
 - 24 Liu M, Steven Tay N H, Bell S, *et al.* Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1411 - 1432. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.026.
 - 25 Mostafavi Tehrani S S, Taylor R A, Nithyanandam K, *et al.* Annual comparative performance and cost analysis of high temperature, sensible thermal energy storage systems integrated with a concentrated solar power plant[J]. Solar Energy, 2017, 153: 153 - 172. DOI: 10.1016/j.solener.2017.05.044.
 - 26 夏军宝, 李毅, 孙冠宇, 等. 储热用相变材料特性研究概述[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(3): 21 - 24. DOI: 10.

- 19981/j.CN23-1581/G3.2024.03.006.
XIA Junbao, LI Yi, SUN Guanyu, *et al.* Overview of research on properties of phase change materials for heat storage[J]. Technology Innovation and Application, 2024, **14**(3): 21 - 24. DOI: 10.19981/j. CN23-1581/G3.2024.03.006.
- 27 凌宇. 高温相变储热技术在供热领域的生产效益分析[J]. 能源与节能, 2023(6): 46 - 50. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.06.047.
LING Yu. Production benefit of high temperature phase change heat storage technology in heating field[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(6): 46 - 50. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2023.06.047.
- 28 Li C, Li Q, Ge R H. A review of heat transfer performance enhancement and applications of inorganic salt based shape-stabilized composite phase change materials for medium and high temperature thermal energy storage[J]. Energy Reports, 2022, **8**: 12740 - 12764. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.09.073.
- 29 王智辉, 湊田光宏, 杨希贤, 等. 热化学蓄热系统研究进展[J]. 新能源进展, 2015, **3**(4): 289 - 298. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.04.008.
WANG Zhihui, Kubota Mitsuhiro, YANG Xixian, *et al.* Research progress on thermochemical heat storage system [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, **3**(4): 289 - 298. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.04.008.
- 30 Mastronardo E, Coronado J M. High temperature chemical reactions for thermal energy storage[J]. Encyclopedia of Energy Storage, 2022, **1**: 559 - 572. DOI: 10.1016/B978-0-12-819723-3.00002-0.
- 31 刘春雨. 太阳能光热电站储能系统热性能研究及技术经济分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000016.
LIU Chunyu. Research on thermal performance and techno-economic analysis of thermal energy storage system in concentrated solar power plants[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000016.