

DOI: 10.19666/j.rlfed.202206111

应用于蒸汽供热的蓄热技术研究

张怡, 李毅, 韦珑坤, 高飒, 周秦
(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610056)

[摘要] 电蓄热技术在电网深度调峰、提高新能源利用率、改善环境方面前景广阔, 是促进电能替代的重要手段。为探究蓄热技术在蒸汽供热方面的适应性, 结合具体工程, 对熔盐蓄热系统与固体蓄热系统进行了设计研究、对比, 提出了熔盐蓄热系统设计的优化方案, 并从系统性能、经济性和可靠性方面做了对比。结果表明: 所提出的优化方案有利于节省投资、节约占地、简化系统; 对于存在边蓄热边放热工况的电蓄能供热站, 推荐采用熔盐蓄热方式, 更有利于蒸汽发生的稳定; 熔盐蓄热系统虽较复杂, 总投资也略高, 但其换热效率较高, 耗电量较省, 运行成本较低, 收益更高。若可以进一步降低总投资, 熔盐蓄热技术将成为传热蓄热方面最具竞争优势的清洁供热方式。

[关键词] 熔盐蓄热; 固体蓄热; 蒸汽

[引用本文格式] 张怡, 李毅, 韦珑坤, 等. 应用于蒸汽供热的蓄热技术研究[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 73-78. ZHANG Yi, LI Yi, WEI Longshen, et al. Research on heat storage technology used for steam heating[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 73-78.

Research on heat storage technology used for steam heating

ZHANG Yi, LI Yi, WEI Longshen, GAO Sa, ZHOU Qin

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610056, China)

Abstract: Electric heat storage technology is an important approach to promote the utilization of electric energy, which has a broad prospect in the aspects of deep peak shaving, improving the utilization rate of new energy and protecting environment. In order to explore the adaptability of heat storage in steam heating, molten salt heat storage system and solid heat storage system are designed and compared based on specific engineering project. An optimal design scheme of molten salt heat storage system is put forward, and comparison is conducted from the aspects of system performance, economy and reliability. The result shows that, the proposed optimization scheme is beneficial to save investment, save space and simplify the system. For the electric energy storage heat supply station with simultaneous heat storage and heat discharge working conditions, the molten salt heat storage mode it is recommended, which is more stable for steam generation. Although the molten salt heat storage system is more complex and the total investment is slightly higher, it has higher heat exchange efficiency, lower power consumption, lower operating cost and higher income. If the total investment can be further reduced, molten salt heat storage technology will become the most competitive clean heating method in heat storage.

Key words: molten salt heat storage; solid heat storage; steam

随着新能源发电快速发展, 风光电外送和消纳问题日益突出, 因此, 各省市出台了系列“新能源+储能”政策。政策要求必须多策并举, 充分挖掘现有系统的调峰能力, 增强系统灵活性、适应性, 破解新能源消纳难题^[1]。多地纷纷出台的《电力辅助服务市场专项改革试点方案》中, 也指出需引入储能设备等手段深度参与调峰, 保障电网安全运

行; 同时可建设大型电储能供热站, 将弃风弃光电、谷电等电能转换成热能储存起来^[2], 在需要的时候释放。这样不仅可以实现削峰, 平滑新能源发电的输出功率, 提升新能源发电的消纳能力, 还能促进电能替代、防治大气污染^[3]。

根据热用户性质不同, 可采用不同的蓄热技术。目前, 对于有蒸汽需求的热用户, 可采用显热

收稿日期: 2022-06-22 网络首发日期: 2022-07-14

第一作者简介: 张怡(1987), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为储能与分布式能源, 303574371@qq.com。

蓄热技术或中高温相变蓄热技术。显热蓄热技术包括熔盐蓄热技术、固体砖蓄热技术和电锅炉水蓄热技术。中高温相变蓄热技术中金属材料、结晶水合盐材料实用温度范围较窄^[4]；熔盐类虽然应用较广，但由于在相变过程中无法保持稳定的形状，使蓄热系统结构复杂且要求高，实际使用难度大^[5]。显热蓄热技术中，电锅炉水蓄热系统通过电加热水至高温高压，通过闪蒸产生蒸汽，但闪蒸的过程有一部分蒸汽会在容器中凝结，产生能量损失，且蒸汽负荷不宜调节。因此，本文主要对固体蓄热技术和熔盐蓄热技术进行了设计研究和对比。

近年来，固体蓄热与熔盐蓄热相关研究主要侧重于蓄热材料的性能、蓄放热传热过程等。孟凡星^[6]采用分子动力学方法对多种组分的熔融盐热物性进行了相关模拟，可有效预测熔盐相关特性。于强等^[7]通过数值模拟的方法研究了蓄热过程中熔盐自然对流传热规律，对熔盐蓄热装置设计提供了理论依据。冯耀华^[8]对固体蓄热机组进行了数值模拟，并结合实验研究了机组在不同调节模式下的蓄放热特性。关于固体蓄热系统，虽然部分文章在工程应用方面有所介绍，但较多研究集中在采暖应用方面^[9-10]。熔盐蓄热方面，佟政富^[11]对熔盐槽型式的蓄热系统运行中出现的问题进行了分析，并优化了工艺。李洪涛等^[12]研究了采用单罐式储能换热系统为纺织企业供热风的可行性。综上，应用于蒸汽供热的蓄热系统研究较少。

本文对蒸汽供热需求的热用户进行蓄热系统设计，着重针对双罐熔盐储热系统中熔盐量、电加热系统、蒸汽发生系统进行了设计优化，并且对比了熔盐蓄热系统与固体蓄热系统的优缺点，为后续工程提供借鉴。

1 熔盐蓄热技术

熔盐储能供电供热技术已成功地应用在太阳能光热发电电站中，熔盐蓄热是一种显热蓄热技术，利用介质在升温或降温过程中的温差而实现热能存储，在整个工作温度范围内，蓄热材料始终保持液态^[13]。熔盐蓄热供热系统主要包括熔盐、熔盐储罐、熔盐泵、熔盐电加热器、熔盐/水换热器等。

1.1 系统方案配置

某工程利用夜间谷电 8 h 加热熔盐蓄热，再通过高温熔盐与给水换热产生 0.75 MPa 的饱和蒸汽 10 t/h，需满足企业 1 天 24 h 的供汽量。方案主要

包括蓄热系统和蒸汽发生系统。由于 0.75 MPa 对应饱和蒸汽温度约为 170 °C，暂采用某低温盐（凝固点为 115 °C，熔盐使用上限为 570 °C）为储热介质，储热时长 8 h，储热量为 25 MW/200 MW·h。蓄热系统熔盐罐采用双罐配置，即一台冷盐罐和一台热盐罐，冷盐罐中配置 3×50%冷盐泵，热盐罐中配置 2×100%热盐泵。熔盐电加热装置采用 2×50%方案，一台电加热器功率 13 MW。蒸汽发生系统采用 1×100%容量组合式换热器，同时设置给水启动电加热器。

1.2 系统优化配置

1.2.1 熔盐量

储能供热项目中，熔盐的投资约占全系统的 15%。熔盐量的优化不仅可以减少材料成本，还可以减小储罐容积、节约占地。因此，降低蓄热系统中熔盐的用量，对降低热力站的建设成本发挥积极作用。电加热熔盐储能热力站中所需的熔盐量由式(1)计算。

$$M = \frac{Q(1+K)}{C(T_1 - T_2)} \quad (1)$$

式中： M 为熔盐量； Q 为储热量； C 为熔盐的比热容； T_1 为热盐温度； T_2 为冷盐温度； K 为熔盐附加裕量，一般取 0.2。

Q 一般根据用户侧热负荷需求确定：

$$Q = \Delta H \times t / \eta \quad (2)$$

式中： ΔH 为补充水加热至用户所需蒸汽参数所需要的热量； t 为供热时间； η 为系统全过程换热效率，一般为 0.9^[14]。

本项目中， Q 为定值。为了降低熔盐量，则需要增大温差。由于用户需求蒸汽参数为 0.75 MPa、170 °C，若采用常规的二元盐，其凝固点较高；而三元盐中由于含有亚硝酸钠，分解温度较低，所用温差较小。因此，用户蒸汽参数较低时，可采用新型的低温熔点熔盐（凝固点可达 115 °C，气化温度约为 570 °C），以增大储热温差，减少熔盐用量。

本项目企业 1 天工作 24 h，蒸汽量需求为 10 t/h。需要注意的是，夜间（8 h）为一边蓄热一边放热过程，部分熔盐冷却后又回到冷罐。若 $t=24$ h，采用用户实际耗热量计算熔盐储量，8 h 蓄热放热过程结束后，约 1/3 熔盐回到了冷罐，2/3 热熔盐在热罐中储存，为企业白天工作的 16 h 供出蒸汽。虽然计算结果完全满足负荷需求，但是熔盐量较大，储罐体积也较大。从储能的角度考虑，8 h 蓄热结束

后,热罐中的实际熔盐储热量为 16 h 企业用汽热量。若配置 $t=16\text{h}$ 的熔盐量,并考虑一定裕量,在加大冷盐泵出力的情况下,也可以实现放热 24 h 的要求。因为,边蓄热边放热的过程中,冷盐泵出力加大,将回到冷罐的部分熔盐再次泵入加热器,加热至高温后储存于热罐中。相关计算式为:

$$G_{\text{low}} = \frac{\beta \times Q}{C \times \Delta t \times \tau_g} + G_{\text{high}} \quad (3)$$

式中: G_{low} 、 G_{high} 分别为低、高温熔盐泵流量; C 为熔盐比热容; Δt 为熔盐加热前后温差; τ_g 为谷段时长或弃风弃光时长; β 为富余系数,可取 1.05。

根据式(3)进行冷盐泵选型,部分熔盐在一次储热过程中得到了 2 次利用,这样可以大大减少熔盐量,节约成本。

1.2.2 熔盐电加热器

熔盐电加热器是蓄热系统的核心部件,一般由于材料限制,接入电源采用 690 V,需配置较多 10 kV 变压到 690 V 的变压器。国内产品单模块最大可做到 5 MW,国外产品单模块最大可做到 15 MW。通过占地面积、投资对比,本项目采用国产熔盐电加热器,2×50%配置,每台加热器总功率为 13 MW。当 1 台加热器出现故障,系统还可保证部分供热需求。

1.2.3 蒸汽发生系统

常规的蒸汽发生系统一般包含汽包、蒸汽发生器(蒸发器)、预热器、排污扩容器、取样器等。采

用此系统配置时,一般需要将这几个设备分层布置,存在占地面积较大、设备分散、管道及伴热量较多的问题。同时,由于无法将所有设备都放置于熔盐罐平台之上,在 0 m 层还需要设置疏盐装置。本方案中熔盐/水换热器为组合式换热器,其中包含给水预热段、蒸发段和过热段。正常运行时,采用饱和蒸汽加热给水,将给水预热到接近饱和温度后直接进入蒸发器底部,蒸汽冷凝汇集后排入蒸发器底部。蒸发段产生的饱和蒸汽经换热器出口段过热盘管加热至微过热。按此设计,与熔盐相关设备如电加热器、蒸发器均可放置于熔盐罐平台之上,不再设疏盐装置。同时,换热设备的减少,一方面使流程简化,控制方便;另一方面相关管道用量减少,节省投资,还可降低相关热损。给水启动加热器仅在机组未产生蒸汽时启用,将水加热至高于熔盐凝固点 30 °C 左右,再接入熔盐/水换热器;正常运行时,启动加热器停运,节省电耗。

电蓄能供热站区域布置如图 1 所示。由图 1 可见:主要设备及管道均布置于 13.0 m 层(熔盐罐顶之上),下方空间则可以充分利用放置相关电气、热控设备;8.0 m 层主要布置熔盐电加热器的调功柜及相应的变压器;5.0 m 层主要为电缆夹层;0 m 层主要布置 10 kV 配电室、控制室、电子设备间,以及化水处理设备、水箱、水泵等。因此,系统简化后,平台空间得到充分利用,无需其他占地,使整个电蓄能供热站更紧凑。

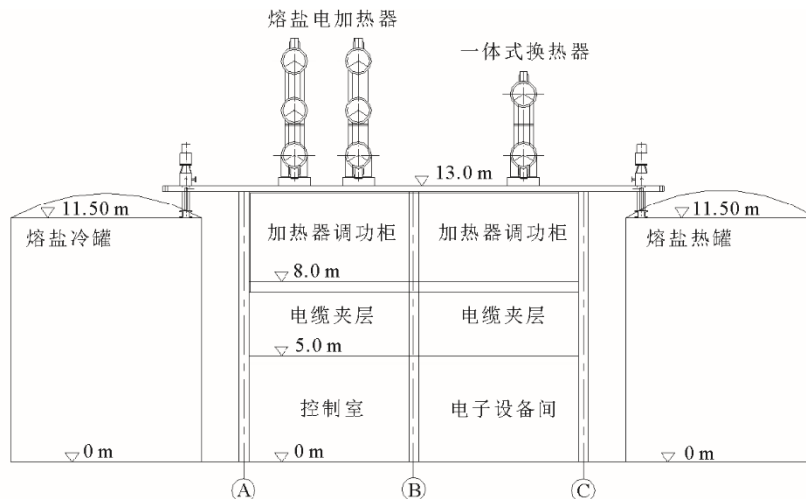


图 1 电蓄能供热站区域布置

Fig.1 Area layout of electric energy storage and heating station

1.3 经济性

本项目所在地区夜间低谷电价 0.16 元/(kW·h),熔盐电加热器运行功率约为 25 MW。若年运行

300 天,那么系统电耗量为 60 000 MW·h/a。水费为 3.5 元/t,考虑蒸汽不回收,耗水量为 10 t/h。蒸汽售价若按照 210 元/t 考虑,对外供汽 10 t/h,1 天运

行 24 h。按照系统运行 25 年测算,得到熔盐蓄热系统财务评价结果见表 1。由表 1 可以看出:熔盐蓄热总投资约 5 000 万元;在谷电价格较低、弃光弃风地区,工程的项目投资财务内部收益率较好,为 7.8%;投资回收期约 11.3 年,经济性较优。

表 1 熔盐蓄热系统财务评价一览

Tab.1 List of financial evaluation of molten salt heat storage system

项目	数值
设备购置费/万元	约 4 000
安装费/万元	约 400
建筑费/万元	约 600
总投资/万元	约 5 000
经营成本费/(万元·a ⁻¹)	985
营业额/(万元·a ⁻¹)	1 512
投资回收期/a	11.3
项目投资财务内部收益率/%	7.8

2 固体蓄热技术

固体蓄热中较为成熟的是采用蓄热砖蓄热技术。其主要组成部分有蓄热材料、电加热管、结构件和保温材料等。利用电加热管将电能转化成热能

存储在蓄热材料中,温度最高可达 800 °C^[15]。放热过程利用引风机将空气引入蓄热体内,变成高温热风输送出来。热风经过气水换热器将热量传递给补水,提供蒸汽给用户。

该类蓄热装置因其初投资较低、产出多样化,广泛应用于实际工程项目中。但该类蓄热装置仅适合输出低品质的能源,其产生的蒸汽温度不高于 200 °C。该类蓄热装置的输入电源既可以是低压(380 V),也可以是高压(10 kV,甚至 35、66 kV)。

2.1 系统方案配置

目前蓄热砖蓄热装置采用模块化设计,单模块最大可做到 6 MW 左右。由于固体储能从蓄热到放热效率较熔盐蓄热更低,约 85%^[16],因此对于本项目,若采用固体砖蓄热,电加热运行功率有所增加,约 27 MW,蓄热量为 216 MW·h。经计算,需配置 4 台蓄热装置,每台装置重约 600 t。总体占地面积与优化后熔盐蓄热占地面积相当。

固体蓄热系统较为简单,装置内部设置换热器,将热风与补水换热,输出饱和蒸汽,其原理如图 2 所示。

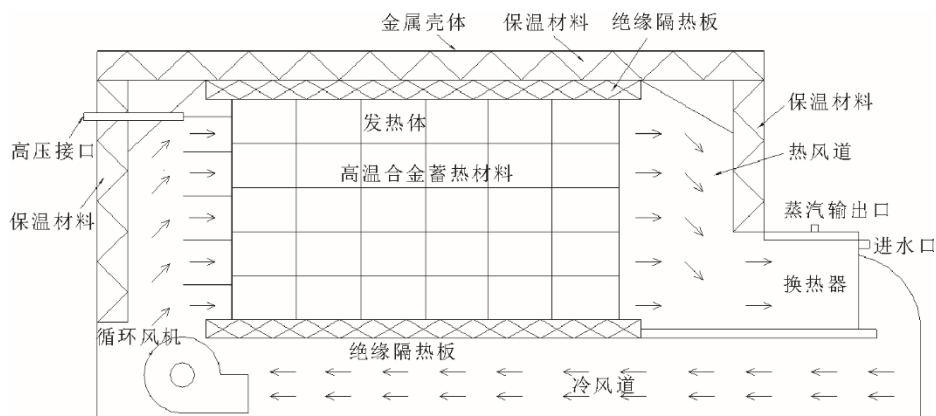


图 2 固体蓄热原理

Fig.2 Schematic diagram of solid heat storage

2.2 经济性

采用固体蓄热装置,电源可由高压 10 kV 接入,与熔盐蓄热相比可以节省变压器费用。并且固体蓄热将关键设备集成在蓄热装置中,系统间连接管道材料量更为节省。现场安装工作量也因其模块化配置,相应减少。

在土建结构方面,固体蓄热模块仅需要考虑模块区域基础。4 台蓄热装置,每台装置重约 600 t。而熔盐蓄热结构则分成熔盐储罐基础和蒸汽发生系统平台 2 个部分。单台熔盐储罐约 1 200 t (含熔

盐),本项目采用双罐配置。因此,比较后发现,固体蓄热系统的建筑费用也较省。

本项目外部条件如前所述,运行功率约为 27 MW,耗电量为 64 800 MW·h/a。蒸汽售价还是按照 210 元/t 考虑,对外供汽 10 t/h,1 天运行 24 h。按照系统运行 25 年测算,得出其财务评价结果见表 2。由表 2 可以看出:固体蓄热系统虽然总投资较省,约 4 000 万元;但全寿命周期上看经济性比熔盐蓄热系统略差;投资回收期为 11.7 年,项目投资财务内部收益率为 7.3%。

表2 固体蓄热系统财务评价一览
Tab.2 List of financial evaluation of solid heat storage system

项目	数值
设备购置费/万元	约 3 300
安装费/万元	约 300
建筑费/万元	约 400
总投资/万元	约 4 000
经营成本费/(万元·a ⁻¹)	1 037
营收额/(万元·a ⁻¹)	1 512
投资回收期/a	11.7
项目投资财务内部收益率/%	7.3

3 2 种蓄热方式的比较

3.1 系统性能

2 种蓄热方式在电加热模块中电热转化效率都很高,可以达到 99%。在后续热交换过程中,熔盐储能系统的高温熔盐经一体式蒸发器与水换热,得到蒸汽产品,经过一次流体与流体的换热。而固体储能系统中,高温蓄热砖与热风换热,热风再经换热器与水换热,经过了固体与气体换热、气体与流体的 2 次换热过程,其换热效率低于一次流体换热效率。因此,从整体热效率看熔盐储能系统更优。

从系统控制来看,由于高温熔盐温度几乎恒定,经换热器换热情况简单,易控制,蒸汽质量稳定。而固体蓄热系统,在放热过程中,随着热风的不断循环,固体蓄热装置温度慢慢降低,热风温度也随着降低,因此在放热后期还需调节热风量、水量,来保证蒸汽质量。

3.2 经济性

从总投资看,由于熔盐蓄热的工艺流程较固体蓄热工艺更为复杂,因而使项目从设备采购、安装、建筑方面投资都较高。

但在营收相当的情况下,熔盐蓄热放热的全系统流程换热效率较高,全寿命周期下熔盐蓄热的投资回收期与项目投资财务内部收益率略高。

3.3 可靠性

固体蓄热装置在实际运行中易出现电加热丝烧毁的现象,研究^[17]分析得出主要原因为蓄热体内部存在严重的温度不均。对此类问题,赵雪等^[18]对蓄热体内部的空气流动进行数值模拟,希望通过优化空气流动方式,来减小温差。邢作霞等^[19]采用流固耦合方法进行建模,分析了蓄热体内部温度变化与流体动力特点,对蓄热体内的通道结构、孔隙率及空气流动等参数提出了优化建议。本项目在夜间

存在一边蓄热一边放热的过程,是否会加大蓄热体内部的温度不均,还需进一步研究。而对于熔盐蓄热系统,其蓄热与放热过程是独立分开的,系统更易控制,蒸汽发生更稳定。

对于熔盐蓄热装置,仅需严格控制熔盐的安全使用温度,做好设备与管道的保温与伴热,使系统工作温度都高于其凝固点温度。对于偏远地区,供电不稳定时,还需增配柴油发电机组提供伴热需求的电负荷^[20]。

4 结论与展望

1) 对于蒸汽供热需求的热用户,推荐采用固体蓄热技术与熔盐蓄热技术。

2) 固体蓄热系统设计成熟^[21],但从已运行的工程来看,固体蓄热装置除了换热效率略低以外,还存在一些亟待解决的问题,如固体砖多次加热后分化开裂、内部传热不均导致电加热丝烧毁等。相比较,熔盐蓄热供汽系统虽较复杂,总投资也略高,但其换热效率较高,耗电量较省,运行成本较低,收益更高。在做好防凝措施的基础上,熔盐蓄热使用寿命长^[22]。针对边蓄热边放热的工况,熔盐蓄热技术运行更稳定可靠。

3) 若系统设备可以进一步优化,降低总投资造价,熔盐蓄热技术有望成为传热蓄热方面最具竞争优势的清洁供热方式。

[参考文献]

- [1] 赵辰昕. 新形势下电力需求侧管理工作需协同推进[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(6): 1-3.
ZHAO Chenxin. Power demand side management work should be promoted synergistically in the new situation[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 1-3.
- [2] 李丹东. 蓄热式电锅炉的风电消纳研究[J]. 有色设备, 2021, 35(5): 41-46.
LI Dandong. Research on accommodating wind power of heat accumulating type electric boiler[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2021, 35(5): 41-46.
- [3] 王琪媛, 潘方圆, 李芸霄, 等. 电锅炉参与我国电力辅助服务可行性分析[J]. 电力与能源, 2020, 41(1): 95-99.
WANG Qiyuan, PAN Fangyuan, LI Yunxiao, et al. Feasibility analysis of electric boiler participating in electric power auxiliary service in China[J]. Power & Energy, 2020, 41(1): 95-99.
- [4] 郭少鹏. 移动式余热利用系统蓄热器实验和模拟研究及经济性分析[D]. 天津: 天津大学, 2013: 14-16.
GUO Shaopeng. Experimental and numerical simulation study and economic analysis on the container of mobilized waster heat utilization system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 14-16.
- [5] 卢均坤. 高温相变复合储热材料的制备和性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 24-26.

- LU Yunkun. Study on preparation technology and properties of high temperature phase change composite heat storage materials[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017: 24-26.
- [6] 孟凡星. 碳酸盐熔盐储热材料热物性模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 10-15.
MENG Fanxing. Simulation of the thermophysical properties of carbonate molten salts for thermal energy storage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 10-15.
- [7] 于强, 何聪, 智瑞平, 等. 储热过程竖排圆柱表面熔盐自然对流传热规律研究[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 54-61.
YU Qiang, HE Cong, ZHI Ruiping, et al. Research on natural convection heat transfer of molten salts on vertical cylinder surface during heat storage[J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 54-61.
- [8] 冯耀华. 改进型电加热固体储能供热机组蓄放热特性研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2020: 14-25.
FENG Yaohua. Study on heat storage and discharge characteristics of an improved electric heating solid heat storage unit[D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2020: 14-25.
- [9] 汉京晓, 穆世慧. 典型蓄热技术在供热领域的应用分析[J]. 能源与节能, 2019, 26(4): 54-57.
HAN Jingxiao, MU Shihui. Application analysis of typical thermal storage technology in heating field[J]. Energy and Energy Conservation, 2019, 26(4): 54-57.
- [10] 姚吉, 杜志强. 电热辅助型单罐熔盐蓄热集中供暖系统的应用[J]. 暖通空调, 2019, 49(7): 111-114.
YAO Ji, DU Zhiqiang. Application of electric heating assisted single tank molten salt heat storage central heating system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(7): 111-114.
- [11] 佟政富. 熔盐系统运行中存在的问题与对策[J]. 石油化工安全环保技术, 2015, 31(3): 31-37.
TONG Zhengfu. Problems existing in the operation of molten salt system and the countermeasures[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2015, 31(3): 31-37.
- [12] 李洪涛, 张帅, 李旭东, 等. 单罐式储能换热系统在热风无纺布工艺中的应用[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(7): 2250-2257.
LI Hongtao, ZHANG Shuai, LI Xudong, et al. Application of single tank energy storage and heat exchange system in hot air non-woven fabric process[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2250-2257.
- [13] 袁振国. 熔盐储能供蒸汽技术的应用前景分析[J]. 能源与节能, 2022, 3(4): 116-119.
YUAN Zhengu. Application prospect of molten salt energy storage technology for steam supply[J]. Energy and Energy Conservation, 2022, 3(4): 116-119.
- [14] 周宇涵. 熔盐蓄热供热技术研究与示范项目[J]. 区域供热, 2021, 3(4): 129-133.
ZHOU Yuhan. Research and demonstration project of molten salt heat storage and heating technology[J]. District Heating, 2021, 3(4): 129-133.
- [15] 朱卫东, 任志远, 向成兵, 等. 固体蓄热技术及应用[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(9): 77-79.
ZHU Weidong, REN Zhiyuan, XIANG Chengbing, et al. Solid heat storage technology and application[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(9): 77-79.
- [16] 吴娟, 毕月虹, 鲁一涵. 固体电蓄热技术研究现状及展望[J]. 电力需求侧管理, 2022, 25(2): 65-69.
WU Juan, BI Yuehong, LU Yihan. Research status and prospect of solid electric heat storage technology[J]. Power Demand Side Management, 2022, 25(2): 65-69.
- [17] 梁爽, 徐耀祖, 商向东, 等. 基于固体蓄热材料的蓄热过程分析[J]. 节能技术, 2019(6): 545-548.
LIANG Shuang, XU Yaozu, SHANG Xiangdong, et al. Analysis of heat storage process based on solid heat storage materials[J]. Energy Conservation Technology, 2019(6): 545-548.
- [18] 赵雪, 罗勇, 韩博远. 新型固体蓄热电加热锅炉的方案研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(4): 81-86.
ZHAO Xue, LUO Yong, HAN Boyuan. Study on the scheme of new type solid storage thermos-electric heating boiler[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2021, 34(4): 81-86.
- [19] 邢作霞, 赵海川, 陈雷, 等. 基于耦合传热的电制热固体蓄热结构优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5999-6006.
XING Zuoxia, ZHAO Haichuan, CHEN Lei, et al. Research on optimal design of electric heating and heat storage structure with coupled heat transfer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5999-6006.
- [20] 太阳能热发电厂蒸汽发生系统设计规范: DL/T 5605—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021: 1.
Code for design of steam generation system of solar thermal power plant: DL/T 5605—2021[S]. Beijing: Planning Press of China, 2021: 1.
- [21] 罗勇, 陈鹏, 苏驰. 固体蓄热电锅炉设计要点及性能评价指标初探[J]. 暖通空调, 2019, 49(5): 55-59.
LUO Yong, CHEN Peng, SU Chi. Discussion on key design points and performance evaluation indexes of solid heat storage electric boilers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(5): 55-59.
- [22] 胡叶广, 张成, 周超英, 等. 太阳能光热发电的集热技术现状及前景分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3421-3427.
HU Yegu, ZHANG Cheng, ZHOU Chaoying, et al. Current status and prospect analysis of heat collection technology of solar thermal power[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3421-3427.

(责任编辑 刘永强)