

聚焦式太阳能热发电中的蓄热技术及系统

尹辉斌¹, 丁 静², 杨晓西¹

(1. 东莞理工学院 广东省分布式能源系统重点实验室, 广东 东莞 523808; 2. 中山大学 工学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 结合聚焦式太阳能热发电(CSP)工程应用实例, 系统性地介绍了其中的关键单元技术—高温蓄热技术及系统, 其主要发展思路是开发高蓄热密度、高使用温度、高蓄/放热速率、低成本、环境友好的蓄热介质材料, 发展过程可控的蓄热方式, 研究高效能工质的传输及蓄热机理。从蓄热介质、方式和装置等角度出发, 介绍了应用于 CSP 中的蓄热技术及系统, 并指出熔融盐高温蓄热将是未来太阳能高温热利用的发展重点。

关 键 词: 聚焦式太阳能热发电; 蓄热; 系统

中图分类号: TK513.5 文献标识码: A

引 言

按照太阳能集热方式的不同, 太阳能热发电系统主要有两大类, 即聚焦式和非聚焦式。其中非聚焦式系统主要有太阳能热气流发电和太阳能池热发电两种, 而聚焦式太阳能热发电(CSP)根据聚光形式的不同通常分为槽式聚焦、塔式定日镜和碟式聚焦等 3 种, 其主要原理是通过聚光器捕获并聚集太阳辐射能, 发送至接收器产生热空气或热蒸汽, 然后利用传统的热力循环使热能驱动发电机产生电能^[1]。聚焦式太阳能热发电(CSP)具有技术相对成熟、发电成本低及对电网冲击小等优点, 最有可能与风力发电、水力发电及化石燃料发电相竞争, 被认为是可再生能源发电中最有前途的发电方式之一; 同时, CSP 热电转换部分与常规火力发电机组相同, 有成熟的技术加以利用, 因此特别适宜于大规模化使用。

由于太阳能具有能流密度低、昼夜间歇性、白天随地球自转辐射强度不断变化的基本特性, 经聚光设备聚集的太阳能具有非连续、非稳态的特点, 而热发电系统需要稳定运行。为了解决这一矛盾, 目前主要有两种解决方案: (1) 在系统中配置蓄能系统,

将收集到的太阳能储存起来, 以便为电站在夜间或者气候条件较差时提供热能, 保证连续发电; (2) 将太阳能与其它能源组成互补发电系统, 在太阳能供应不足的情况下, 由其它能源供应能量, 从而保证系统的连续稳定运行。其中第一种方案更具有吸引力和应用前景, 在配置蓄热子系统后, 可实现容量缓冲、可调度性和时间平移、提高年利用率、电力输出更平稳、高效满负荷运行等作用, 因此蓄热技术将是实现太阳能高效利用的核心性、通用性的关键技术。以塔式太阳能热发电系统为例, 若无蓄热装置, 年利用率只有 25%, 增设蓄热装置则能提高到 65%, 且不需要燃料作为后备能源^[2]。图 1 所示为一个典型的以熔融盐作为传热蓄热工质的塔式太阳能热发电系统流程图, 主要包括聚光集热、热量蓄存与传递、热功转换等过程。要降低太阳能热发电成本必须进一步提高各个能量转换环节的效率, 本研究将主要针对其中的热量蓄存过程与技术进行研究分析。蓄热技术的性能和成本, 取决于传热蓄热介质材料性能以及蓄热/放热过程设计和控制两方面。

1 传热蓄热介质

太阳能热发电系统中, 传热蓄热介质主要使用在吸热器、蓄热器与传热管路内, 直接影响系统的吸热、传热与蓄热性能, 因此高效传热蓄热介质的开发和选择一直是太阳能热利用需要解决的关键问题。太阳能热发电技术从 20 世纪 80 年代发展至今, 传热蓄热介质经历了“水—水蒸气—空气—液态金属—导热油—熔融盐”的变化过程^[3]。其中空气作为吸热与传热介质具有不污染环境、无相变、高工作温度(可达 1 300 ℃)、维护简便、无须附加保温及冷启动加热系统等优点, 但其传热性能差且比热容小, 不

收稿日期: 2012-06-13; 修订日期: 2012-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106187); 国家 973 计划基金资助项目(2010CB227103)

作者简介: 尹辉斌(1980-) 男, 湖南衡阳人, 东莞理工学院助理研究员, 博士。

能作为蓄热介质,而且如何利用空气将高能量密度的热量传输给终端设备(如汽轮机)仍是一个技术难题;以水作为吸热器与蓄热器的传热介质具有其它工质难以替代的优点,例如水的热导率高、无毒、无腐蚀、易于运输、水/水蒸气作为蓄热介质比热容大等,缺点是水/水蒸气在高温时存在高压问题,从而对热传输系统的耐压提出了非常高的要求,增加了设备投资与运行成本^[4];液态金属能应用于较高的温度,且金属材料密度大、导热率高、整体温度分布均匀,具有良好的吸热和放热性能,但是金属的比热容小,热负荷高时温度波动大,而且高温下与空气接触易燃易爆;美国 Solar One 太阳能电站采用了导热油作为传热介质,导热油既可用于蓄热又可用于传热介质,一般适用于 400 °C 以下的场合,但是油类在高温时的蒸汽压力非常大(400 °C 时大于 1 MPa),使用其作为蓄热介质需要特殊的压力阀等设备,而且价格昂贵、存在安全隐患^[5]。

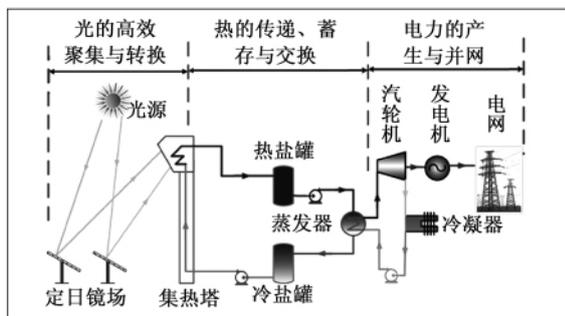


图 1 典型太阳能热发电站系统示意图

Fig. 1 Schematic drawing of a typical solar energy thermal power plant system

由于熔融盐具有高使用温度、高热稳定性、高比热容、高对流传热系数、低粘度、低饱和蒸汽压、低价格等四高三低的优势,兼具蓄热与传热功能,因而熔融盐传热蓄热技术将是太阳能高温热利用的发展重点,近些年一直受到国内外学者的关注,开展了熔融盐的制备及热力学性质研究,涉及氯化盐、碳酸盐、硝酸盐等^[6]。目前,熔融盐作为传热蓄热介质已在一部分太阳能热发电站中得到成功应用。1981 年欧共体在意大利西西里的 Adrano 附近建成了 Eureka 塔式电站,该电站采用 Hitec 盐(7wt% NaNO₃ + 53wt% KNO₃ + 40wt% NaNO₂) 作为蓄热材料。1983 年西班牙的 CESA-1 电站运行并发电,该电站同样采用 Hitec 盐作为蓄热介质。1984 年在美国新墨西哥州 Albuquerque 建立了 750 kW 的熔盐发电试验装置(MESS),采用硝酸盐作为传热和蓄热介质。

1996 年在吸收以往熔盐实验的基础上, Solar Two 太阳能试验电站在美国加利福尼亚的 Mojave 建成^[7], Solar Two 采用熔盐 Solar Salt (60wt% NaNO₃ + 40wt% KNO₃) 作为传热和蓄热介质,此熔盐在 220 °C 时开始熔化,在 600 °C 以下热性能稳定^[8]。2001 年意大利启动了 ENEA 聚光太阳能热发电计划^[9], 建成了 28 MW 的太阳能槽式热发电系统,采用熔融盐作为传热蓄热介质。2003 年意大利建成了太阳能槽式集热器熔融盐循环测试系统 PCS,主要对 Solar Salt 熔盐进行循环试验,测量其传热流动等性能^[10]。2006 年西班牙设计建造了 50 MW 的槽式聚光太阳能热发电系统 Andasol 1,该电站已于 2008 年投入运行使用,其后又加建了相同容量的 Andasol 2 和 Andasol 3,三者均采用 Solar Salt 熔盐作为蓄热介质^[11]。位于西班牙南部城市 Ecija 的正在建设当中的 Gemosolar 电站,同样采用硝酸盐作为传热蓄热介质,蓄热能力达到了 15 h^[12]。美国能源部于 2008 年 9 月资助了 15 个关于太阳能热发电的传热和蓄热研究项目,其中 7 个项目涉及熔融盐,由此可见熔融盐作为传热蓄热介质的优越性。最近,研究又发现一种新的蓄热介质—离子性液体,这是一种低熔点的盐,可在 400 °C 以下作为传热蓄热介质,具有很好的应用前景,但目前成本较高,未有实际应用^[13]。

2 CSP 中的蓄热系统

高温传热蓄热过程是提高光-热-电系统效率的关键技术之一。太阳能蓄热系统主要有单罐式和双罐式。熔融盐双罐蓄热方法是太阳能蓄热技术的主要形式^[14],西班牙 CESA-1 和美国 Solar Two 电站即使用了双罐熔融盐蓄能,这种方式具有高/低温罐分别控制、放热速度快、换热环节少、效率高的优点,但由于蓄热罐材料与熔融盐使用量大、高温维持等因素导致单位造价与运行成本相对较高。在欧洲的槽式电站中也在尝试使用高温混凝土蓄热,其优点是成本非常低,缺点是储放热速度慢。太阳能蓄热的发展趋势是基于熔融盐工质的斜温层蓄热、熔融盐潜热蓄热、低成本混凝土蓄热以及陶瓷蓄热^[15]。

美国 LUZ 公司在加利福尼亚的 Daggett 建成第一个商业化电站—SEGS-1,电站流程如图 2 所示。SEGS-1 电站为槽式太阳能热电站,采用 Caloria 矿物油作为传热和蓄热介质,该矿物油在常压、温度低

于 315℃ 的条件下为液态。蓄热工作时,冷油罐内的合成油经泵输送到太阳能收集场中,经吸热器加热后进入热油罐;放热时,热油罐内的高温油则流过蒸汽发生器加热冷却水生成饱和蒸汽,温度降低后流回冷油罐,两个储油罐的容量可为 3 个小时透平全负荷提供足够的能量储存^[16]。

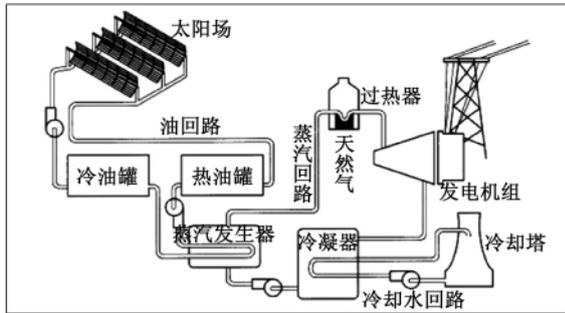


图 2 SEGS-I 电站流程图

Fig. 2 Chart showing the flow path of a SEGS-I power plant

站工作流程如图 3 所示,系统采用双罐蓄热方式,以熔融盐为蓄热介质,蒸汽产生回路的传热介质为合成油或熔融盐,如图 3(a)、(b)所示。

与显热蓄热相比,相变蓄热可以显著降低蓄热系统的尺寸,其关键技术在于具有适合温度段相变材料的选择以及换热方式和换热器结构的优化设计。美国 LUZ 公司提出了用于 SEGS 电站的级联相变蓄热设计方案^[17],如图 4 所示。

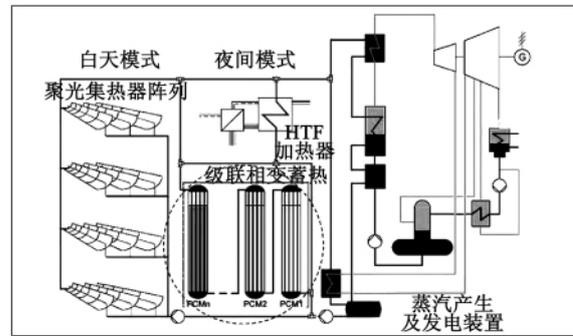
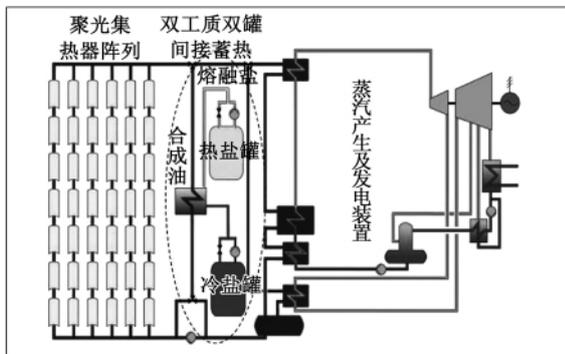
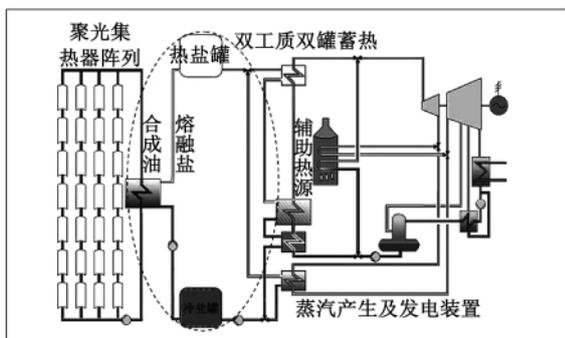


图 4 采用级联相变蓄热的太阳能热发电系统

Fig. 4 A solar energy thermal power plant using the cascade phase - change heat storage



(a) 操作模式一



(b) 操作模式二

图 3 配置双罐蓄热系统的 SEGS 电站示意图
Fig. 3 Schematic diagram of a SEGS power plant provided with a dual-tank heat storage system

在之后的 SEGS 系列电站中,为满足更高电站运行温度的要求,使用了 Therminol VP-1 合成油作为集热介质,其使用温度可以达到 400℃ 左右。电

由于采用单工质蓄热,即同一种工质兼当传热和蓄热的作用,可以有效解决双工质蓄热存在的换热环节多、效率低等问题,研究人员对其进行了一系列探索性的研究工作。其中最具有代表性的即为 Solar Two 太阳能试验电站,其流程如图 5 所示。Solar Two 采用 Solar Salt 复合熔盐作为传热和蓄热介质,蓄热系统由一个直径为 11.6 m、高为 7.8 m 的冷盐罐和一个直径为 11.6 m、高为 8.4 m 的热盐罐组成,两个盐罐可存放熔盐 1 500 t,蓄热能力为 105 MW · h,可供汽轮机满负荷运行 3 个小时。系统工作时,冷盐罐内的熔盐经熔盐泵被输送到高塔上的吸热器内,吸热升温后进入热盐罐;同时,高温熔盐从热盐罐流经蒸汽发生器,加热冷却水产生蒸汽,驱动汽轮机运行,而熔盐温度降低后则流回冷盐罐。Solar Two 塔式试验电站蓄热系统从 1996 年一直运行到 1999 年结束,是目前运行最成功的熔盐蓄热系统^[18]。Solar Two 电站是美国太阳能热发电计划中最令人瞩目的一个项目,但仍是试验电站,是推进塔式系统商业化进程的先导工程,该电站在运行 3 年之后进行了评估,其发电实践不仅证明了熔融盐蓄热技术的可行性,而且促进了 30 ~ 200 MW 塔式系统的商业化进程。Solar Tres 是借鉴了 Solar One 和 Solar Two 的成功运行经验基础上设计兴建的,为一

座塔式聚焦太阳能热发电站,沿袭了 Solar Two 双罐直接蓄热的方式,以熔融盐作为传热蓄热介质,设计蓄热能力为 588 MW·h,提供的热能可实现汽轮机满负荷运行达 16 h^[19]。

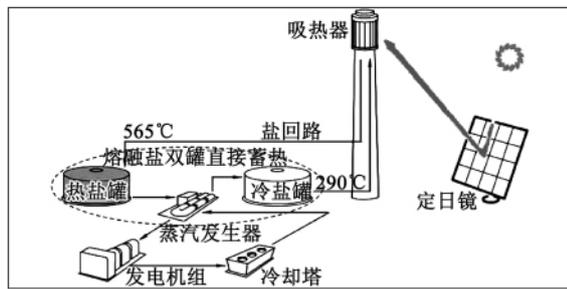


图 5 Solar Two 塔式太阳能热发电系统示意图
Fig. 5 Schematic drawing of a Solar Two tower type solar energy thermal power generation system

文献 [20] 提出了一种新型的太阳能塔式热发电系统,采用双级蓄热技术,将收集到的太阳能根据能量品位的高低进行分级存储,从而实现了热能利用中的“温度对口、梯级利用”原则。如图 6 所示,高位能量由高温蓄热器(热罐)蓄存,低位能量由低温蓄热器(冷罐)蓄存。蓄存能量在释放时,低、高温蓄热器分别用于蒸汽的发生、过热过程,两者相互独立又互相补充。

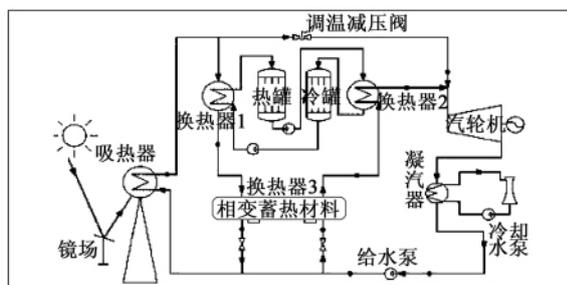


图 6 双级蓄热与双运行模式的塔式太阳能热发电系统

Fig. 6 Tower type solar energy thermal power generation system with heat storage in two stages operating in two modes

由于采用双罐蓄热方法时,蓄热容器与蓄热介质使用量大且高温维持困难,导致了单位造价及运行成本相对较高。美国于 1982 年在加利福尼亚州 Barstow 建立了 Solar One 塔式太阳能试验电站,如图 7 所示, Solar One 太阳能试验电站采用间接式蓄热,系统装置为一圆形储热罐,称之为斜温层罐,内装有 6 100 t 砂石和牌号为 Caloria HT-43 的导热

油。来自吸热器内的高温蒸汽与高温导热油换热以后,高温导热油进入斜温层罐,热油和冷油在罐中自然形成热油在上、冷油在下的分层,蓄热系统能量的释放是通过合成油逆循环流过蓄热罐至蒸汽发生器来实现的。

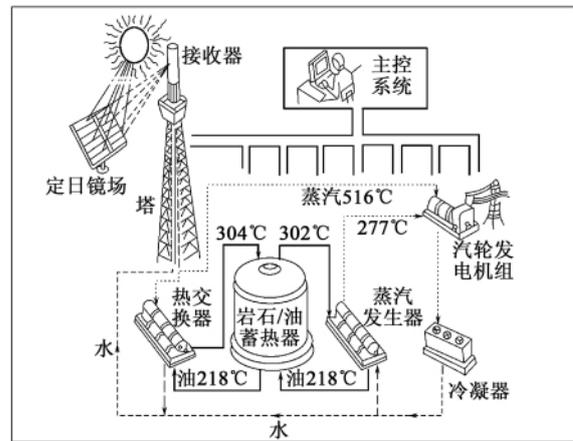


图 7 Solar One 塔式太阳能热发电系统示意图
Fig. 7 Schematic drawing of a Solar One tower type solar energy thermal power generation system

Solar One 第一电站蓄热系统具有两个特点:(1) 采用碎石和沙等价格低廉的填充材料代替昂贵的合成油,降低蓄热系统成本;(2) 与双罐式蓄热系统相比,采用斜温层罐蓄热,节省了一个罐的费用。斜温层罐根据冷、热流体温度不同而密度不同的原理在罐中建立温跃层,但由于流体的导热和对流作用,真正实现温度分层有一定困难。此外, Solar One 采用导热油作为蓄热材料,由于导热油的热稳定性限制,其蓄热温度一般不高于 380 °C,为了满足电站运行温度越来越高的要求,必须提高蓄热系统的工作温度,而熔盐由于成本低、使用温度高以及在高温时蒸汽压力非常低等优点,成为良好的高温蓄热材料^[18]。在 SEGS 电站中设计了基于熔融盐的斜温层蓄热,既提高了蓄热温度,又保持了蓄热系统的低成本,其工作原理如图 8 所示。

为了降低槽式系统中的双罐熔融盐间接蓄热装置的固定投资成本,美国 Sandia 国家实验室 Pacheco 等设计并测试一个 2.3 MW·h 的熔融盐斜温层单罐蓄热系统^[21]。这是一种液-固联合显热蓄热方式,有机地结合了液体良好的热传输性能与固体蓄热的低成本优点,如图 9 所示。斜温层单罐是利用密度与温度冷热的关系,当高温熔融盐液在罐的顶部被高温泵抽出,经过油盐换热器冷却后,由罐的底部进入罐内时,或者当低温熔融盐液在罐的底部被

低温泵抽出, 经过油盐换热器加热后, 由罐的顶部进入罐内时, 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, 使得斜温层以上熔融盐液保持高温, 斜温层以下熔融盐液保持低温, 随着熔融盐液的不不断抽出, 斜温层会上下移动, 抽出的熔融盐液能够保持恒温, 当斜温层到达罐的顶部或底部时, 抽出的熔融盐液的温度会发生显著变化。为了维持罐内温度梯度分层, 就必须严格控制熔融盐液的注入和出料过程, 在罐内合理填充固体蓄热介质以及配置合适的成层设备, 如浮动进口、环壳式换热器等。

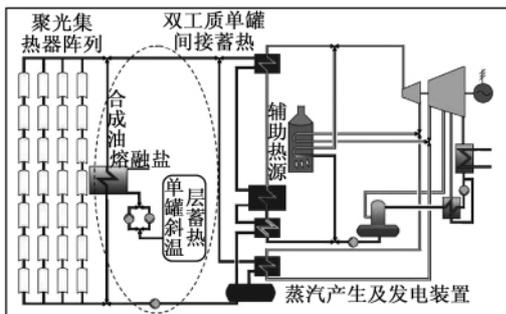


图 8 采用双工质单罐蓄热的 SEGS 电站示意图
Fig. 8 Schematic drawing of a SEGS power plant using the dual-medium heat storage in a single tank

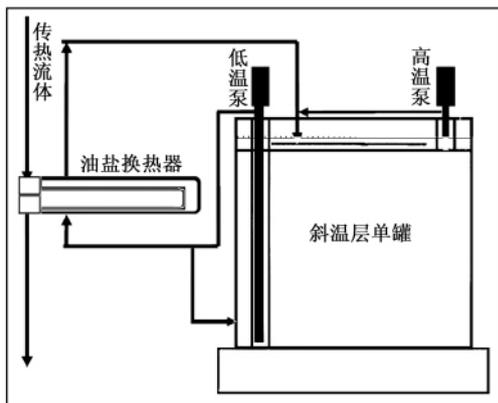


图 9 斜温层单罐蓄热系统
Fig. 9 Thermocline single-tank heat storage system

Brosseau 等人继续进行斜温层单罐间接蓄热系统试验^[22], 着重提高了等温试验与热循环试验的温度条件, 发现拥有合适多孔介质填料的斜温层单罐间接蓄热系统很有发展优势。左远志等人提出了一种相变蓄热和斜温层蓄热复合的新型混合蓄热系统^[4], 并建立了实验系统, 对其蓄放热性能进行了深入研究。在蓄热技术领域, 除了采用硅质砂、石英

石、铁矿石等天然的固态蓄热介质外, 合成制备的多孔功能材料由于可以有效地提高蓄/放热效率及蓄热容量, 受到了研究者的广泛关注, 如各种泡沫金属、蜂窝陶瓷等, 其中泡沫碳化硅具有优良的热性能及理化性能, 是一种具有发展潜力的固态蓄热介质^[23]。

Pacheco 等人采用 Schumann 模型建立斜温层单罐蓄热系统的一维理论模型, 预测了 688 MW·h 双罐系统与斜温层单罐系统的经济性比较, 蓄热系统的成本可降低 1/3^[21]。Doug Brosseau 针对 50 MW (6 h 蓄热) 的槽式太阳能热发电系统^[24], 在采用不同的蓄热介质(Therminol VP-1 导热油、熔融盐) 以及不同蓄热方式(双罐蓄热 2-T、单罐斜温层蓄热 Thermocline) 条件下, 进行了经济性对比分析, 如图 10 所示。结果表明, 以熔融盐作为传热蓄热介质, 提高了工作温度, 采用单罐斜温层方式进行高温蓄热, 发电成本可由原来的 138 美元/MW 降为 114 美元/MW, 较大程度地降低了成本, 从而显示出熔融盐单罐斜温层蓄热技术在太阳能高温热利用中的优越性及应用前景。

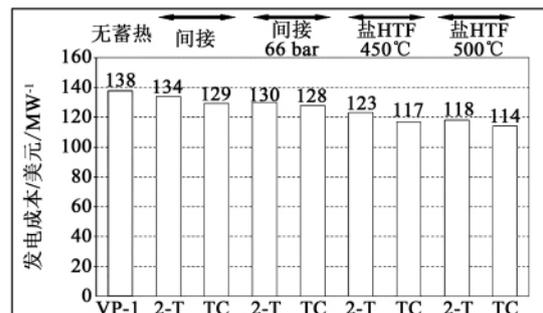


图 10 采用不同蓄热方式的发电成本比较
Fig. 10 Comparison of the costs for power generation by using various heat storage modes

3 结 语

规模化可再生能源是未来我国能源的发展重点, 其中太阳能利用技术更是全球发展最快的能源科技, 研究和利用太阳能已经成为共识。但由于太阳能具有能流密度低、间歇与动态方向性供应的基本特性, 经聚光设备聚集的太阳能具有非连续、非稳态的特点, 能源的供应和需求之间存在着数量上、形态上和空间上的差异, 为了克服或弥补这种差异, 必须发展高效蓄热技术。

结合聚焦式太阳能热发电工程应用实例, 系统

地介绍了其中的关键单元技术——高温、高蓄/放热速率、低成本、环境友好的蓄热介质材料,发展过程可控的蓄热方式,研究高效能工质的传输及蓄热机理。

对比各种传热蓄热介质及蓄热方式可知,熔融盐具有优越的热物性,兼具蓄热与传热功能,熔融盐传热蓄热技术(双罐直接蓄热、斜温层蓄热单罐)将是太阳能高温热利用的发展重点。由于蓄热技术及系统具有容量缓冲、不需燃料作为后备能源等优势,符合“绿色、低碳”科技发展观的要求,并可提高能源的综合利用率,将是实现太阳能高效利用的核心性、通用性关键技术,并可广泛地应用于其它生产过程以及可再生能源和新能源利用领域,例如化工、冶金、热动、核工业等领域的热能储存与转化。

参考文献:

- [1] 杨敏林,杨晓西,林汝谋,等. 太阳能热发电技术与系统[J]. 热能动力工程 2008, 23(3): 221-228.
YANG Min-lin, YANG Xiao-xi, LIN Ru-mou, et al. Solar energy-based thermal power generation technologies and their systems [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2008, 23(3): 221-228.
- [2] 左远志,丁静,杨晓西. 蓄热技术在聚焦式太阳能热发电系统中的应用现状[J]. 化工进展 2006, 25(9): 995-1000.
ZUO Yuan-zhi, DING Jing, YANG Xiao-xi. Status of the application of the heat storage technologies in concentrating type solar energy thermal power generation systems [J]. Chemical Industry Progress 2006, 25(9): 995-1000.
- [3] Kearney D, Herrmann U, Nava P, et al. Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field [J]. Journal of Solar Energy Engineering 2003, 125: 170-176.
- [4] 左远志. 熔融盐高温斜温层混合蓄热的热过程特性[D]. 广州: 华南理工大学 2010.
ZUO Yuan-zhi. Thermal process characteristics of molten salt during a hybrid heat storage in a high-temperature thermozone [D]. Guangzhou: South China University of Sath China University of Technologe Technology 2010.
- [5] Moens L, Blake D M, Rudnicki D L, et al. Advanced thermal storage fluids for solar parabolic trough systems [J]. Journal of Solar Energy Engineering 2003, 125(1): 112-116.
- [6] 彭强. 多元熔盐传热蓄热材料的设计及性能调控[D]. 广州: 中山大学 2011.
PENG Qiang. Design and performance control of multi-element molten salt heat transfer and heat storage materials [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University 2011.
- [7] Herrmann U, Kearney D W. Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants [J]. Journal of Solar Energy Engineering 2002, 124(2): 145-152.
- [8] Sandia National Laboratories. Solar power tower design basis document [R]. SAND2001-2100 2001.
- [9] Vignolini M. ENEA research activities: solar collector assembly test loop and laboratory studies [EB/OL]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/enea_activities.pdf 2003.
- [10] Maccari A. The ENEA's way to concentrating solar power [EB/OL]. http://www.twanetwerk.nl/upl_documents/ENEAMaccari.pdf.
- [11] NREL Trough Technology Workshop. Andasol 1 & 2: 50 MW, 7 hrs molten salt heat storage [EB/OL]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/martin_andasol_pictures_storage.pdf.
- [12] NREL CSP Technology Workshop. Solar Tres: First commercial molten salt central receiver plant [EB/OL]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/2007/martin_solar_tres.pdf.
- [13] 吴玉庭,张丽娜,马重芳. 太阳能热发电高温蓄热技术[J]. 太阳能 2007, 3: 23-25.
WU Yu-ting, ZHANG Li-na, MA Chong-fang. Solar energy thermal power generation high-temperature heat storage technologies [J]. Solar Energy 2007(3): 23-25.
- [14] Herrmann U, Kelly B, Price H. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants [J]. Energy 2004, 29: 883-893.
- [15] 李鑫. 太阳能热发电技术中的热电转换技术[J]. 高科技与产业化 2008(11): 37-38.
LI Xin. Thermoelectric conversion technologies among the solar energy thermal power generation technologies [J]. High-tech & Industrialization 2008(11): 37-38.
- [16] Herrmann U, Geyer M, Kearney D. Overview on thermal storage systems [EB/OL]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/uh_storage_overview_ws030320.pdf 2002.
- [17] Luz International Ltd. Phase-change thermal energy storage [R]. SERI/STR-250-3516 1989.
- [18] 朱建坤. 太阳能高温熔盐传热蓄热系统设计及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学 2006.
ZHU Jian-kun. Design and experimental study of a solar energy high temperature molten salt heat transfer and heat storage system [D]. Beijing: Beijing University of Technology 2006.
- [19] Kelly B. Two tank direct thermal storage system: solar two and solar tres central receiver power plants [EB/OL]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdf/skelly_solar_two_experience.pdf.
- [20] 宿建峰,韩巍,林汝谋,等. 双级蓄热与双运行模式的塔式太阳能热发电系统[J]. 热能动力工程 2009, 24(1): 132-137.
SU Jian-feng, HAN Wei, LIN Ru-mou, et al. Tower type solar energy-based thermal power generation system with a two-stage heat storage and dual operating modes [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2009, 24(1): 132-137.
- [21] Pacheco J E, Showalter S K, Kolb W J. Development of a molten-salt thermozone thermal storage system for parabolic trough plants [J]. Journal of Solar Energy Engineering 2002, 124(2): 153-159.
- [22] Brosseau D, Kelton J W, Ray D, et al. Testing of thermozone filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough plants [J]. Journal of Solar Energy Engineering 2005, 127(1): 109-116.
- [23] Edouard D, Lacroix M, Pham C, et al. Experimental measurements and multiphase flow models in solid SiC foam beds [J]. AIChE Journal 2008, 54(11): 2823-2832.
- [24] Brosseau D. Inorganic Molten salt thermal storage R&D [EB/OL]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/brosseau_tes_rd_approach.pdf 2006.

(丛敏编辑)

聚焦式太阳能热发电中的蓄热技术及系统 = **Heat Accumulation Technologies and Systems for Use in Concentration Type Solar Energy Thermal Power Generation** [刊, 汉] YIN Hui-bin, YANG Xiao-xi (Guangdong Provincial Key Laboratory on Distributed Energy Source System, Dongguan College of Science and Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808), DING Jing (Engineering College, Zhongshan University, Guangzhou, China, Post Code: 510006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(1). - 1 ~ 6

In combination with the practical applications of the concentration type solar energy in thermal power generation projects, the authors systematically described the key unit technology adopted—high temperature heat accumulation technologies and their systems, of which the main development thought is to develop a heat accumulation medium material with a high heat accumulation density, high operation temperature, high heat accumulation/release rate, low cost and environment friendship, develop a process controllable heat accumulation mode and study the mechanism governing the transmission of and heat accumulation in a working medium at a high efficiency. From such viewpoints as the heat accumulation medium, mode and device etc, the authors have introduced the heat accumulation technologies and systems used for the concentration type solar energy power generation and also pointed out that the melted salt high temperature heat accumulation will be the focal point for future development in solar energy high temperature heat utilization. **Key words:** concentration type solar energy thermal power generation, heat accumulation, system

辅助动力装置全环形燃烧室燃烧性能试验研究 = **Experimental Study of the Combustion Performance of a Wholly Annular Combustor of an Auxiliary Power Plant** [刊, 汉] CHEN Li-qiang, KONG Zu-kai (Jincheng Nanjing Research Center for Electromechanical and Hydraulic Engineering, Nanjing, China, Post Code: 211106), YAN Ying-wen, XU Rong (College of Energy Source and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(1). - 7 ~ 12

Experimentally studied was the whole-machine combustion performance of a wholly annular combustor of an auxiliary power plant. A temperature rake was used to measure the temperature distribution at the outlet of the combustor and investigate the whole-machine combustion performance of the combustor under discussion at various inlet temperatures and oil/gas ratios. The test results show that with an increase of the inlet temperature and oil/gas ratio, the temperature at the outlet of the combustor will increase accordingly, however, the temperature distribution law will basically keep unchanged. The outlet temperature distribution factor (OTDF) will be less than 0.2 and the radial temperature distribution factor (RTDF) will be basically less than 0.1 while the combustion efficiency and the pressure loss coefficient at both inlet and outlet of the combustor will increase. With an increase of the total temperature at the inlet, the oil/gas ratio at which a flame extinguishment will occur to the combustor due to a lack of oil, will decrease gradually (air excess coefficient will increase), however, all the air excess coefficients will be more than 13 when a flame extinguishment occurs to the combustor due to a lack of oil. **Key words:** auxiliary power plant, wholly annular combustor, combustion performance, temperature distribution