

专题综述

文章编号: 1001-2060(2011)01-0001-06

太阳能高温热发电蓄热技术研究进展

杨小平¹, 杨晓西², 丁 静³, 杨敏林²

(1. 华南理工大学 强化传热与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 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; 3. 中山大学 工学院, 广东 广州 5100062)

摘 要: 对应用于太阳能高温热发电的各种蓄热原理、蓄热介质和蓄热过程进行了详细的分析和比较。以混凝土或铸造陶瓷为介质的蓄热方法投资成本低, 多用于槽式发电系统中; 以熔盐作为介质的双罐蓄热系统技术风险低、可实现连续、稳定发电, 较适用于塔式系统; 斜温层单罐蓄热系统技术风险相对较高, 但其投资成本可以降低; 直接蒸汽发电系统对传输系统的耐压提出了非常高的要求。高温相变蓄热和化学反应蓄热技术还处于实验研究阶段, 需要寻找更合适的相变材料、热化学反应和装置。

关 键 词: 太阳能; 热发电; 蓄热

中图分类号: TK513

文献标识码: A

引 言

太阳能热发电通过镜面反射将太阳能聚集起来产生高温流体, 高温流体通过管道传递到位于地面的蒸汽发生器, 产生高压过热蒸汽, 推动传统汽轮机发电。一般的太阳能热发电系统包括日光反射系统、高温吸热传热系统和传统的蒸汽发电系统。太阳能热发电站的形式主要有塔式发电系统、槽式发电系统和碟式发电系统。

简单的太阳能热发电系统存在在太阳能发电周期和用电需求周期的突然变化导致系统热应力的剧烈变化等问题。为了提高发电效率、减少发电成本、提高太阳能热发电系统的稳定性和连续性, 则需要对太阳能热发电系统增加蓄热装置, 以使系统在没有太阳辐射能量的时候能继续满足发电需要^[1]。蓄热系统已成为衡量热发电系统效率的重要因素, 但目前的大型热发电系统中, 只有很少的系统增加了蓄热装置, 蓄热技术也需要继续的研究和完善。本研究讨论了目前研究和已经商业化的主要蓄热技术与方法。

1 显热蓄热

对蓄热介质加热, 使其温度升高, 内能增加, 从而将热能蓄存起来。显热式蓄热原理比较简单, 成本低, 使用最为普遍。显热蓄热时, 蓄热材料在储存和释放热能时, 材料的温度会发生连续变化。一个完整的蓄能过程包括蓄热过程、保温过程和放热过程。

显然蓄热材料主要分为固体和液体介质, 需要考虑密度、比热、热导系数、热膨胀系数、成本

和操作温度等参数。固体蓄热介质主要有高温混凝土、铸造陶瓷和花岗岩等。液体蓄热介质包括水、熔盐、矿物油和合成油等。

1.1 固体显热蓄热

德国航天航空研究中心 (DLR) 的 Doerte Laing 等人在研究沙石混凝土和玄武岩混凝土的基础上^[2], 研究开发耐高温混凝土和铸造陶瓷等固体蓄热材料, 耐高温混凝土的骨料主要是氧化铁, 水泥为黏结剂; 铸造陶瓷骨料也主要是氧化铁, 黏结剂包括氧化铝等, 其物理性质如表 1 所示。

表 1 两种固体蓄能材料的性质 (DLR)

	材料/350 °C	
	铸造陶瓷	高温混凝土
密度 /kg·m ⁻³	3 500	2 750
比热 /J·(kg·K) ⁻¹	866	916
热导系数 /W·(m·K) ⁻¹	1.35	1.0
热膨胀系数 /K(×10 ⁻⁶)	11.8	9.3
材料强度	低	中
裂纹	几乎没有	很少

蓄热系统包括蓄热材料、高温传热流体和嵌入固体材料的圆管式换热管组成。在蓄热阶段,

收稿日期: 2010-05-17; 修订日期: 2010-06-27

基金项目: 国家 863 探索导向基金资助项目 (2009AA05Z417); 国家 973 计划基金资助项目 (2010CB227306); 国家自然科学基金重点基金资助项目 (50930007)

作者简介: 杨小平 (1979-), 男, 内蒙古丰镇人, 华南理工大学博士研究生, 现工作在东莞理工学院助理研究员。

热流体沿着换热管流动把高温热能传递到蓄热材料中。在放热阶段,冷流体沿着相反方向流动把蓄热材料中的热能吸收到流体中用来发电。这种传热流体与蓄热材料之间有换热器的布置方式称为间接蓄热,发电系统如图 1 所示。

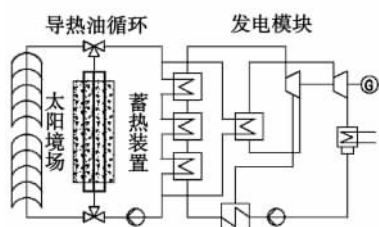


图 1 太阳能热发电与固体蓄热装置联合的系统图

在西班牙的阿尔梅里亚太阳能实验基地(PSA)的 WESPE 项目中,Laing 等人对高温混凝土和铸造陶瓷作为蓄热介质进行了测试^[3],其蓄热最高温度为 400 °C,蓄热能力为 350 kWh。每个换热单元由 36 根单管组成,其中管外径为 25 mm,内径为 21 mm,管间距为 80 mm。在对蓄热单元的截面分析中发现蓄热介质的材料分布均匀,孔隙率低,同时,在高温下换热管壁与蓄热材料接触良好。研究发现两种蓄热材料都非常适合于固体显热蓄热系统,高温混凝土更具有低成本、高强度和易于操作的特性。经过大约 60 个循环后,换热管和蓄热材料间传热性能没有降低,可以达到较高的发电功率。预计商业化后的固体蓄热能力投资可以达到 20 €/kWh,发电成本可以小于 0.01 €/kWh,使用寿命达到 30 a。

Tamme 等人利用 TRNSYS 软件和 StorageTechThermo 模块对固体蓄热系统进行了模拟研

究,对影响蓄热性能的不同参数进行了分析^[4]。结果表明,蓄热材料的热导率和体积热容对整个系统的蓄热能力影响不是非常明显。换热管的管间距太大,会造成蓄热材料间的温度梯度,从而降低蓄热能力;间距太小会增加换热管的用量成本,因为换热管的造价会达到总投资的 65% ~ 75%。为了提高蓄放热能力,需要增加蓄放热时蓄热材料的温度差值,为此提出了模块化蓄热的设计方式,在蓄热阶段把蓄热管沿长度方向由串联模式改为并联模式,从而增加了材料的平均温度;在放热阶段通过把材料的不同温度段与水蒸汽的预热、蒸发和过热段相匹配的换热从而降低了材料的平均温度。通过模块化的优化设计,其发电功率可以增加到原来的 3 倍。

不过,制造混凝土蓄热器的技术难度较高。这是因为混凝土蓄热器里的金属管道和混凝土的热膨胀系数不同会导致混凝土产生裂纹,从而减少使用寿命和换热性能。通过在金属管道上裹一层石墨,让金属管道和混凝土可以相互独立地热胀冷缩,这样还可以进一步改善管道和水泥块之间的热传递效果。由于混凝土的热导率低,须寻找高效低成本的强化传热方法,掺入高导热系数的石墨提高混凝土的热导率是比较合适的手段。目前,这方面的研究已经取得很大进展。由于最高工作温度限制,混凝土蓄热方法较适用于槽式和温度较低的太阳能热发电系统。

和其它蓄热方法相比,混凝土蓄热装置利用的是具有良好蓄热性能的混凝土,因此造价很低,且操作简便易行,适合推广。混凝土蓄热器还有另外一个优点,

即可以根据发电机组装机容量的大小进行灵活配置。在终年阳光明媚的地区,如我国新疆的塔克拉玛干沙漠,内蒙古的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠等地,这种混凝土蓄热器非常值得广泛开发利用。而且混凝土的主要原料是沙子和砾石,在沙漠地带几乎免费就可获取,为实现全天候发电进行热量储存。

1.2 液体显热蓄热

目前,比较常用的液体蓄热介质包括各种熔盐、矿物油、合成油、液体金属和水等。

熔盐被认为是一种较好的蓄热材料,具有较好的蓄热传热性能,工作温度与高温高压的蒸汽轮机相匹配,在常压下是液态,不易燃烧、没有毒性,而且成本较低。熔盐不仅在太阳能热发电中用作蓄热传热介质,同时在化学和金属等非太阳能应用工业中也常作为传热流体。现在应用较广的熔盐主要有二元熔盐 Solar Salt 和三元熔盐 Hitec。二元熔盐由 60% NaNO₃ 和 40% KNO₃ 组成,凝固点为 220 °C。三元熔盐由 53% KNO₃、7% NaNO₃ 和 40% NaNO₂ 组成,凝固点为 142 °C。硝酸熔盐的高温稳定性是其在使用过程中的重要指标。三元熔盐的凝固点低,有利于减少系统停机后的保温能耗和重新启动时的加热能耗,但最高工作温度偏低,不利于提高系统的发电效率。Sandia 国家实验室正在研制一种新的混合熔盐,使其凝固点低于 100 °C。熔盐的缺点有高温分解和腐蚀问题,相关材料必须耐高温、耐腐蚀,使系统成本增加、可靠性降低;熔盐的低温凝固问题,必须对相关设备进行保温、预热和伴热等,使系统的能耗增加。

选用合成油作为蓄热传热材

料时,不存在冻结问题,但由于矿物油的温度不能高于 400 °C(否则易分解,导致发电效率比较低,同时容易引发火灾),而且价格昂贵。因此,目前主要用作槽式太阳能热发电的吸热传热介质。液态金属钠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。

1.2.1 双罐蓄热系统

双罐蓄热系统是指太阳能热发电系统包含两个蓄热罐,一个为高温蓄热罐,一个为低温蓄热罐。其按照蓄热方式可分为直接蓄热系统和间接蓄热系统。间接蓄热系统的传热介质和蓄热介质采用不同的物质,需要换热装置来传递热量。间接蓄热系统常采用不存在冻结问题的合成油作为传热介质,熔融盐液作为显热蓄热介质,传热介质与蓄热介质之间有油-盐换热器,系统的工作温度不能超过 400 °C。其缺点是传热介质与蓄热介质两者之间通过换热器进行换热,由此带来不良换热。直接蓄热系统中传热流体既作为传热介质,又作为蓄热介质,蓄热过程不需要换热装置。直接蓄热系统常采用熔融盐既作为传热和蓄热介质,不存在油-盐换热器,适用于 400 ~ 500 °C 的高温工况,从而使朗肯循环的发电效率达到 40%。对于槽式太阳能热发电系统,管道多为平面布置,需要使用隔热和伴随加热的方法来防止熔融盐液传热介质的冻结。塔式太阳能热发电系统的管网绝大部分是竖直接布置在塔内,管内的传热介质容易排出,解决了防冻问题,且其工作温度比

槽式系统高,因此双罐蓄热系统对塔式系统是比较好的选择。

双罐蓄热系统中冷罐和热罐分别单独放置,技术风险低,是目前比较常用的大规模太阳能热发电蓄热方法。但是双罐系统存在需要较多的传热蓄热介质和高维护费用等缺点。

1996 年 Solar Two 在 Solar One 的基础上在美国的加利福尼亚州建成^[5],其发电功率为 10 MW,系统采用双罐直接蓄热系统,其系统示意图如图 2 所示。传热蓄热介质为二元熔盐,工作温度范围为 290 ~ 565 °C,总的蓄热能力达到 105 MWh,在没有太阳辐射能情况下可继续供汽轮机满负荷运行 3 h。太阳能转化为电能的平均效率为 19%。蓄热罐为圆柱形罐体,冷罐由碳钢制作,直径为 11.4 m。热罐由不锈钢制作,直径也为 11.4 m,两个熔盐罐可存放 150 万 t 熔盐。系统工作时,冷罐内的熔盐经熔盐泵被输送到高塔上的吸热器内接收来自太阳的辐射能,熔盐吸热升温后进入热罐,热罐熔盐流经蒸汽发生器,加热冷却水产生蒸汽,驱动传统汽轮机发电,换热降温后的熔盐流回冷罐,完成一个循环。由于熔盐同时作为传热介质和蓄热介质,中间没有热交换器,大大节省了投资费用。

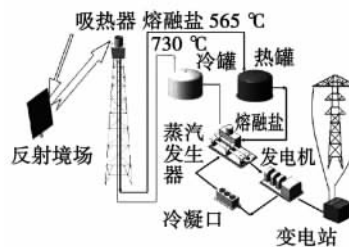


图 2 太阳能双罐直接蓄热发电系统示意图

Solar Tres 是 2008 年西班牙在 Solar one 和 Solar Two 的技术基础上建立的第一个商业化的塔式太阳能热发电系统^[6],其发电和蓄热原理与 Solar Two 相同。发电功率为 15 MW,熔盐罐的蓄热能力达到 600 MWh,可连续供汽轮机满负荷运行 15 h。

Andasol I 是西班牙建的槽式太阳能热发电系统,采用双罐间接蓄热系统,蓄热流体只沿着冷罐和热罐之间流动,不经过太阳能镜场。系统传热介质为过热水蒸气,蓄热介质为二元熔盐,通过换热器进行热量交换。蓄热冷罐熔盐温度为 291 °C,热罐熔盐温度为 384 °C,系统蓄热能力达到 1 010 MWh,可连续供汽轮机满负荷发电 7.5 h。太阳能转化为电能的平均效率为 14.7%。

1.2.2 单罐蓄热系统

单罐蓄热系统是指作为蓄热介质的冷流体和热流体都储存在一个单罐中,在蓄热或放热过程中,冷流体和热流体会相互接触,在接触区域形成一个温度斜温层,而当换热过程结束后,单罐中的流体温度维持相同,系统如图 3 所示。系统蓄放热过程时冷流体在罐的底部被低温泵抽出,经过外部换热器加热后由罐的顶部进入罐内或者热流体在罐的顶部被高温泵抽出,经过外部换热器冷却后由罐的底部进入罐内。换热过程中在罐的中间会存在一个温度梯度很大的自然分层,使得斜温层以上流体保持高温,斜温层以下的流体保持低温,随着换热过程的进行,斜温层会上下移动,抽出的流体能够保持恒温。

为了缩短斜温层的距离,防止冷热流体对流混合,增加蓄热量,一般会在罐内填充石英岩或石英砂等材料来增加斜温层的效

应^[7]。单罐蓄热系统的好处是投资费用比双罐蓄热系统节省了约35%，但注入和出料结构比较复杂，冷热流体的导热和对流作用使真正实现温度分层具有一定困难。同时，涉及到大温差斜温层的流动和换热特性规律，各种物性参数、结构参数与操作参数的匹配与优化是非常复杂的问题。

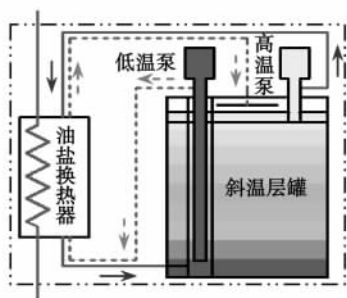


图3 斜温层单罐蓄热系统

1982年，美国能源部在加利福尼亚州建立的Solar One塔式太阳能电站采用单罐间接式蓄热系统，其中传热流体为高温蒸汽，蓄热流体为导热油，温度范围为218~302℃，蓄热能力为182MWh。罐内装有6170t砂石和906m³的Caloria型导热油。由于导热油最高温度的限制，发电循环的效率只有21%。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。

James E. Pacheco等人对熔盐作为蓄热介质单罐槽式太阳能发电站进行了分析研究^[8]，对斜温层系统进行了理论模拟计算，其中单罐高为16m，直径为34.3m，蓄热能力为688MWh，对17种矿物质材料作为填充材料进行了比较分析，并且建立了一个2.3MWh蓄热能力的实验装置，结果表明熔盐斜温层单罐蓄热系统是

一个可行的蓄热方法。

东莞理工学院提出了一种新型熔融盐高温斜温层混合蓄热系统(>200℃)，与现有蓄热系统相比，提高了单位体积的蓄热容量，简化了熔融盐的注入和出料结构。研究了熔融盐、多孔介质孔隙结构以及工况参数对多孔介质中熔融盐传热与流动的影响规律，建立了熔融盐壳管式相变换热器的同心套管模型，分析了内管流体进口温度与相变材料的熔点等参数对液相率与熔化时间的影响。

1.2.3 蒸汽蓄热系统

在太阳能热发电系统中，太阳的辐射热量最终都是通过换热产生高温高压的水蒸气用来发电，如果用水直接作为传热和蓄热介质，那么就成为一种直接蒸汽发电系统。以水作为吸热器与蓄热器的传热介质，具有热导率高、无毒、无腐蚀、易于输运和比热容大等优点。由于没有中间换热器和中间介质，系统结构简单。但直接蒸汽发电系统中水/水蒸气在高温时有高压问题，水蒸气的临界压力为22.129MPa，临界温度为374.15℃，当水的温度高于临界温度时，都是过热蒸汽，高温下水蒸气通常处于超临界状态，压力特别高，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。为此，在系统中加入了蒸汽蓄热器，可以把多余的水蒸气变成体积热容较大的水来储存热量，同时还可以保持系统压力稳定在工作范围之内。

蒸汽蓄热器的工作原理是将多余的蒸汽通入到装有水的高压容器中，使水被加热后变成一定压力的饱和水；当重新需要蒸汽时，容器内的压力下降，饱和水变

成蒸汽。而容器中的水既是蒸汽和水进行热交换的传热介质，又是储存热能的载体。

直接蒸汽发电系统是最有希望减少成本的方法之一，而蒸汽蓄热器通过多余的能量储存为热发电系统的稳定运行提供了保证，避免了太阳辐射能量的波动而引起的系统瞬时热应力的巨大变化。蒸汽蓄热系统不仅具有较少的反应时间、较高的放热速率，同时还可以作为相分离器、换热器或者与其它显热及潜热材料相结合来储存热量。

在我国由国家发改委、科技部、中国科学院和北京市政府共同资助的863重点项目“1MW塔式太阳能热发电技术及系统示范”，也采用了塔式水/蒸汽方案，目前，该项目正在紧张进行中。

2 潜热蓄热

潜热蓄热主要是通过蓄热材料发生相变时吸收或放出热量来实现能量的储存与释放，现在应用较多的主要是固液相变进行蓄热的相变材料(PCM)。跟显热蓄热比较，潜热蓄热具有蓄热密度大，相变过程中接近恒温等特点，可显著降低蓄热系统的尺寸。但是选择合适的相变材料和换热器的设计都比较困难，因此太阳能热发电系统中的相变蓄热技术还处于试验研究或中试阶段。

理想的相变材料应具有相变温度适宜、相变潜热高、热导率高、比热容大、无腐蚀性和无过冷现象等特点。作为高温应用的潜热材料主要包括硝酸盐、碳酸盐、氯化物等各种无机盐类以及混合盐类、金属和合金等。相变材料主要有导热系数低、换热表面的

固相沉积和腐蚀等缺点。通过在相变材料中加入导热系数高的物质形成的复合相变蓄热材料,同时具有潜热和导热系数高的优点。

欧洲的 DISTOR 项目是为直接蒸汽发电槽式系统设计的相变蓄热系统,以二元熔盐 NaNO_3 和 KNO_3 的混合物作为主要的相变材料,相变温度范围在 $230 \sim 330$ $^{\circ}\text{C}$ 之间。

在采用合成油作为传热介质的槽式系统中,合成油传热介质的温度变化范围为 $250 \sim 400$ $^{\circ}\text{C}$,水/蒸汽传热介质的温度变化范围是为 $200 \sim 400$ $^{\circ}\text{C}$,这就要求相变蓄热介质在换热过程中,温度变化也比较大,此时单一相变材料是无法满足要求。于是,1989 年美国 LUZ 公司就提出了级联相变蓄热的设计方案,如图 4(a) 所示;2006 年 Horst Michels 等人用 3 个垂直的壳管式换热器串联进行了相变蓄热的实验和模拟研究^[9],串联蓄热尽可能利用了不同相变材料的蓄热能力,出口温度更加保持一致,证实了串联相变蓄热的可行性。但是由于固液相变后的热损失、相变材料的不稳定性、系统的复杂性和投资的增加等使串联相变蓄热系统需要更深入的研究。

1993 年,DLR 与 ZSW(德国太阳能及氢能研究中心)共同提出了相变蓄热介质-显热蓄热材料-相变蓄热介质混合蓄热方法,如图 4(b) 所示,系统蓄热能力为 200 MWh,蓄热和放热时间分别为 3 和 1 h。

近年来,许多研究人员对各种不同特性的高温蓄热材料的热物性及其测量进行了研究,同时对高温相变材料的封装和高温相变复合材料也进行了有意义的探

索,但高温相变蓄热技术的实际应用进展不大,主要是固液相变换热器的设计没有取得突破,复合相变材料与微封装技术可能提供了一种方法。PCM 的微封装具有很多优点,如增加传热面积、减少 PCM 与外部环境的反应及减少相变时带来的体积变化。微封装 PCM 在不同热控制领域的潜在应用将受到其成本的限制,对于太空应用,热控制性能远重于其成本,采用微封装技术是必然选择。高温相变蓄热器是空间太阳能热动力发电系统的关键部件之一。而对于大规模的太阳能高温热利用,还未进行深入研究。

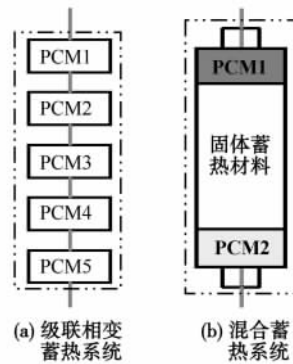


图 4 槽式系统中两种相变蓄热方法

3 化学反应蓄热

化学反应蓄热是利用可逆化学反应的热能与化学能的转换来进行蓄热的,具有蓄热密度高、反应物可在环境温度下存放、热能存储时间长、可以远距离传输等优点,而且成本有可能降到相对较低的水平。但存在技术复杂、一次性投资较大和整体效率不高等缺点,目前仍然处于实验室研究阶段。表 2 为应用化学反应进行蓄热的一些主要化学反应和方程式。

表 2 化学蓄热材料和反应

化合物	反应式	反应热
氨	$\text{NH}_3 \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{N}_2 + \frac{3}{2}\text{H}_2$	67 kJ/mol
甲烷/水	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	-
氢氧化钙	$\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	3 GJ/m ³
碳酸钙	$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$	4.4 GJ/m ³
碳酸铁	$\text{FeCO}_3 \rightleftharpoons \text{FeO} + \text{CO}_2$	2.6 GJ/m ³
甲醇	$\text{CH}_3\text{OH} \rightleftharpoons \text{CO} + 2\text{H}_2$	-
氧化镁/水	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg}(\text{OH})_2$	3.3 GJ/m ³

1991 年, Brown 等人采用 CaO 与 H_2O 的化学反应进行了理论和基础的蓄热试验研究^[10],认为系统约束条件苛刻,不能确定其反应是否适合太阳能热发电蓄热系统,也没有确定如何将蓄热反应与发电系统结合的方法。但是认为氢氧化物与氧化物之间的热化学反应将是化学反应蓄热的潜在对象。

1999 年澳大利亚国立大学设计了一种太阳能碟式热发电氨化学反应蓄热系统^[11],其中碟式镜面的面积为 20 m^2 ,输入系统的太阳能功率为 1 kW。在高温热反应器中氨吸热热量后分解成氢与氮,当需要热量的时候,氮合成反应器中热量被回收,完成放热过程。系统没有其它副反应产生,反应器容易控制,反应温度与太阳能集热器温度相适应,系统具有为兆瓦级大规模热发电进行蓄热的潜力。

尽管化学反应蓄热的技术不成熟,但利用太阳能热化学反应循环制氢便是一种间接蓄能技术,这方面的应用发展很快。太阳能热化学反应循环制氢技术就是利用太阳能热发电系统提供的高温环境与热化学反应装置联合,采用金属氧化物作中间物,输入系统的原料是水,产物是氢和氧,不产生 CO 和 CO_2 。可用于太阳能热化学反应循环制氢的金

属氧化物有 ZnO、FeO、CoO 等，反应温度在 1 000 K 左右，大大低于直接分解水的效率，且效率可以达到 30%，是很有潜力的制氢技术。

由于化学反应蓄热方式的应用技术和工艺太复杂，存在许多不确定性，在大规模的应用之前，还有许多问题需要解决。

4 其它方法

德国 DLR 正在研制一种单罐蓄热新方法^[12]，其原理为利用可活动的机械壁面把一个罐分为两部分，分别储存高温熔盐和低温熔盐。在蓄热过程中，经过换热器或者吸热器升温后的熔盐进入单罐的高温部分，使得高温熔盐体积增加，推动分隔壁面移动使低温熔盐流出蓄热罐，使得低温熔盐的体积减少，但整个蓄热单罐的熔盐体积保持不变，放热过程与蓄热过程原理相同。此方法的好处是减少了一个单罐的投资费用，由于单罐间采用了分隔界面使得冷热熔盐的热损失比斜温层单罐蓄热要减少，同时其结构和控制过程都比斜温层单罐蓄热简单，但其实际应用可行性需要得到更深入的研究。

DLR 还应用流化床的概念研制了一种蓄热方法，其原理为来自塔式吸热器的高温空气与流动沙子进行充分的换热，高温空气中的大部分热量可以传递给沙子，升温后的沙子可以储存在热罐中，需要时候与水进行换热产生高温水蒸气用来发电，降温后的沙子回到冷罐完成一个循环。

5 结 论

太阳能高温热发电在未来能源领域将发挥越来越重要的作

用，无论对于塔式热发电、槽式热发电或者碟式热发电系统，高温蓄热都是一种重要的技术，它对于提高系统发电效率、降低发电成本、提高系统发电稳定性和可靠性具有重要意义。实际应用中应根据不同的热发电方式、不同的温度、不同的蓄热容量和经济要求等选择不同的蓄热方法。不管选择何种蓄热方法，都要从技术可行性和经济成本两方面考虑。以混凝土或铸造陶瓷为介质的固体蓄热材料由于投资成本低、操作简单而日益受到重视，有望大规模应用于沙漠地区的槽式太阳能热发电系统中。以熔盐作为介质的双罐蓄热系统技术风险低、易于实现大容量蓄热，可实现连续、稳定发电，较适用于塔式太阳能热发电系统。斜温层单罐蓄热系统技术风险相对较高，但其投资成本可以降低，也是未来重点研究的方向。直接蒸汽发电系统也是最有希望减少投资成本的一种方法，但其对热传输系统的耐压提出了非常高的要求。蒸汽蓄热器技术需要进一步研究使其能长时间进行蓄热。高温相变蓄热和化学反应蓄热技术还处于实验研究或中试阶段，需要寻找更合适的相变材料、热化学反应和装置。每一种蓄热方法并不是独立存在的，有时候可以根据设计需要在系统中将不同的蓄热方法结合形成混合蓄热系统。

东莞理工学院自然科学基金资助项目(2010ZQ08)

参考文献:

[1] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14:

56 – 72.

[2] LAING D, STEINMANN W D, TAMME R, et al. Solid media thermal storage for parabolic trough power plants [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(10): 1283 – 1289.

[3] LAING D, LEHMANN D. Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2009, 131: 041007(6 pages).

[4] TAMME R, LAING D, STEINMANN W D. Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough [J]. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2004, 126: 794 – 800.

[5] REILLY H E, KOLB W J. Evaluation of molten salt power tower technology based on the experience of solar two [R]. SANDIA Report SAND2001 – 3674, 2001.

[6] Planta Solar de Almeria. Annual Report 2006, 2007 [R].

[7] BROSSEAU D, KELTON J W. Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2004, 127(1): 109 – 117.

[8] JAMES E P, STEVEN K S, KOLB W J, et al. Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, 124: 153 – 159.

[9] MICHELS H, PITZ PAAL R. Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants [J]. *Solar Energy*, 2007, 81: 829 – 37.

[10] BROWN D, LAMARCHE J, SPANNER G, et al. Chemical energy storage system for SEGS solar power plant [R]. Pacific Northwest Laboratory, PNL-7709, 1991.

[11] LOVEGROVE K, LUZZI A, SOLDANI I, et al. Developing ammonia based thermochemical energy storage for dish power plants [J]. *Solar Energy*, 2004, 76: 331 – 337.

[12] STEINFELD A. Solar hydrogen production via a two-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27: 611 – 619.

(编辑 伟)

太阳能高温热发电蓄热技术研究进展 = **Recent Advances in the Study of Solar Energy High-temperature Heat Power Generation and Accumulation Technologies** [刊, 汉] YANG Xiao-ping (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy-saving, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), YANG Xiao-xi, YANG Min-lin (Guangdong Provincial Key Laboratory on Distributed Energy Source Systems, Dongguan University of Science and Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808), DING Jing (Polytechnic College, Zhongshan University, Guangzhou, China, Post Code: 510062) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 1 ~ 6

An analysis and comparison in detail of various heat accumulation theories, media and processes used in solar energy high-temperature heat power generation was conducted. The heat accumulation methods using concrete or cast ceramics as a medium have a low investment cost, thus mostly used in trough type power generation systems. The dual tank heat accumulation system using melted salt as its medium has a low technical risk and can realize a continuous and stable power generation, therefore relatively applicable for a tower type system. The slanting temperature layer single tank heat accumulation system has a relatively high technical risk, but its investment cost can be reduced. The direct steam power generation system sets a very high standard for the pressure endured by its transmission system. The high-temperature phase change heat accumulation and chemical reaction heat accumulation technologies are still in the stage for experimental study, needing to find a more appropriate phase change material, thermal chemical reaction and device. **Key words:** solar energy, thermal power generation, heat accumulation

涡轮平面叶栅变几何试验研究 = **Variable Geometry Experimental Study of a Turbine Plane Cascade** [刊, 汉] CHEN Sheng, QIU Chao, SONG Hua-fen (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 7 ~ 12

Through the setting-up of a variable geometry plane cascade test rig, measured were the blade surface static pressure distribution, outlet total pressure distribution and outlet gas flow angles of a plane cascade at different installation angles. Furthermore, the regularity governing the change of various aerodynamic parameters with blade installation angles was analyzed in detail. The change of various losses of the cascade with deflection angles, which were measured during the test, was compared with the results predicted by using three loss models. The research results show that in the range of the deflection angles being measured, the blade surface diffusion section will increase conspicuously with an increase of the installation angle and the outlet gas flow angle of the cascade will also increase. Moreover, the total loss of the cascade will constantly decrease. Among them, the blade profile loss will first decrease and then increase, and both the secondary flow loss at the two ends and blade tip clearance loss will invariably drop. **Key words:** plane cascade, variable geometry, installation angle, loss, outlet gas flow angle

室外翅片管换热器的设计对空气源燃气机热泵系统性能的影响 = **Influence of the Design of an Outdoor Finned Tube Heat Exchanger on the Performance of Its Air Source Gas Engine Heat-pump System** [刊, 汉] CHEN Yi-guang, YANG Zhao (Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(1) . - 13 ~ 19