

槽式太阳能直接蒸汽发电技术研究现状

王学军, 严 飞, 张银龙, 王 堃

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: DSG(槽式直接蒸汽发电技术)因更高的效率、更小的环境压力和更低的投资,是太阳能热发电技术中最有希望的一种,但 DSG 集热系统却面临集热管周向非均匀热流、气液两相流和太阳辐射不稳定三个制约因素。本研究描述了由这三个因素和热力系统本身的特性共同引起的截面温度梯度、两相流流型、对流换热、运行模式、流动不稳定性、热能储存以及控制七个方面研究现状、相互制约关联以及 DSG 系统未来发展趋势,并指出 DSG 系统的控制系统和蓄热储能系统的改善会显著地促进 DSG 系统发展。

关 键 词: 直接蒸汽发电; 非均匀热流; 气液两相流; 不稳定性; 研究现状

中图分类号: TK519 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.03.002

引 言

槽式太阳能集热发电是太阳辐射直射到槽式抛物反射镜上,再聚焦到位于抛物面焦线的真空集热管,被真空集热管吸收再传递给工质,通过换热设备产生蒸汽,驱动汽轮发电机组发电,是一种可大规模应用的清洁能源利用方式,在世界上引发一股新的研究、投资和建设热潮^[1]。其中最成熟的是基于导热油的太阳能槽式集热发电技术,美国加州的项目已成功运营 20 余年。

为克服导热油的 400 °C 温度极限,最新的 DSG 系统,以水替换导热油作为传热介质,直接在集热管中被加热成蒸汽,省去换热设备,具有更高的效率、更小的环境压力和更低的投资^[2];自上世纪 80 年代以来,相关研究项目和计划就已开始^[3]。中国作为一个油气资源缺乏的能耗大国,开发相对丰富的太阳能有重要的战略意义。文献 [1] 从中国现在的集热发电水平和商业化水平等角度出发,详细阐述了中国热发电技术的可行性和成本;文献 [4] 也阐述了中国沙漠地区修建 DSG 系统的可行性,指出在集热系统价格降到 1 020 元/m²时,太阳能热电可与风

电相媲美。

DSG 系统虽有十分广阔的前景,却也面临着许多严峻挑战^[3]。首先,利用太阳能面临的一个共性问题,由于太阳辐射的间歇性和周期性,使得系统的热能储存和控制问题十分复杂;其次,槽式太阳能集热管的向镜侧和背镜侧的辐射强度差异导致集热管周向非均匀热流,进而引起集热管横截面温度梯度;最后,工质由水替代导热油,故存在两相流,系统产生流型、集热器管内对流换热、运行模式和水动力不稳定性等问题。非均匀热流和太阳能的不稳定性是槽式太阳能热电系统面临共同的问题,但是又因 DSG 系统特有的以水为工质,使这类问题和传统的槽式太阳能热电系统又有所不同。本研究主要针对上述问题,回顾整理以往的研究成果,归纳当前国内外的研究现状,为后续的研究提供一定的帮助。

1 两相流流型

在水平流动下,工质受重力场作用,呈显著的相分布不均匀性,会出现多种不同的流型。不同的流型意味着不同的交界面形状,反应了不同的水力特性,因而意味着不同的动量传递模式和热传递模式,而这是 DSG 系统面临最突出的问题。经 PRODISS 和 DISS 项目验证,在 DSG 系统中主要分为层流、波状流和环状流^[5],不同的工况下呈现不同的流型,这将直接影响到集热管横截面温度梯度、传热特性和水动力特性。从传热和集热管安全运行考虑,环状流是一种理想流型,文献 [6] 使用一个最小流量来维持环状流,其与工作压力和热流密度有关,而与管道直径没有直接关联,在仿真研究则主要用弗劳德数来区别层流和环状流。

2 横截面温度梯度

真空集热管是 DSG 系统最重要的部件,也是

收稿日期: 2015 - 03 - 05; 修订日期: 2015 - 04 - 01

作者简介: 王学军(1989 -),男,四川遂宁人,重庆大学硕士研究生。

DSG系统的核心技术。文献[7]详细的描述了集热管传热机理和过程,集热管表面热流密度沿周向分布非均匀,近似高斯分布^[8],如图1所示。这使集热管横截面存在温度梯度,而截面温度梯度是影响DSG系统安全运行最重要的参数之一。文献[9]利用光学追踪和有限容积法,结合太阳的宏观尺寸计算出的太阳辐射密度理论分布,建立集热管三维传热数学模型,并利用交叉线法详细的计算出集热管真空辐射传热。DSG槽式集热管主要的问题是在波状流区域内,集热管顶部会发生间断性湿润和干涸,产生集热管温度疲劳,但这不会出现在以导热油等为工质的集热系统中。文献[10]人已对集热管在两相段的流型为层流时进行相关的实验研究,证明钢管弯曲的主要原因是瞬态的温度梯度;文献[11]计算出了不同流型下集热管截面温度分布。

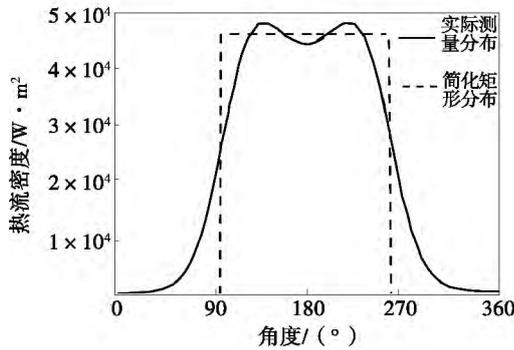


图1 周向热流密度

Fig. 1 Heat flux density along the circumferential direction

集热管横截面温度梯度沿集热管轴向也存在不同。对整个系统而言,因过热蒸汽的导热系数相对水较小,导致其管壁周向和轴向的温度梯度变化都非常大,产生热应力变化较大,对吸热管外表面选择性涂层的影响也较大。沿轴向横截面最大温差如图2所示^[12],故静态温度梯度对系统主要挑战在过热段,为此文献[8]利用有限体积法开发了详细的仿真模型和实验验证,研究集热管在过热段的截面温度分布。实验虽表明倾斜管有利于减少截面温度梯度,但同时也证明稳态时水平管能保证足够冷却,也就是说现在集热管的技术已经能够承受将近40 K的横截面温差^[11],并且横截面温差随太阳辐射变大而变大,随流量变大而变小^[12],但文献[7]指出当两相为环流且速度过大时,其截面温差可能增加,甚至在出现集热管内壁被液膜全覆盖的情况下,因为从

壁管传到液体的热量并非常数,可能取决于液膜的厚度。

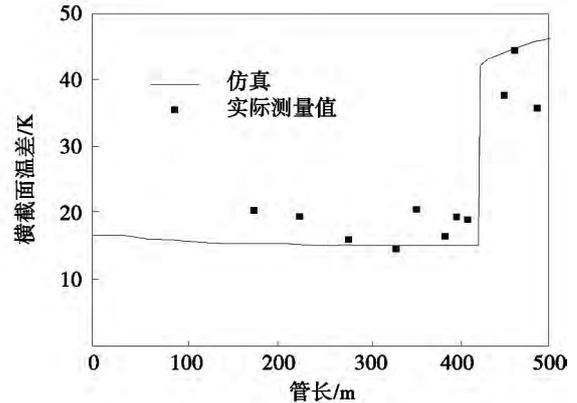


图2 沿轴向横截面最大温差

Fig. 2 Maximum temperature difference in the cross section along the axial direction

当集热器是南北布置时,早晚热流密度中心并不在集热管的底部,会增大两相段截面温差。再循环模式可以通过提高流速使其流型为环流,从而减少截面温度梯度的影响,但依然无法完全消除瞬间工况扰动产生的截面温度梯度。集热器不仅承受截面温度梯度引起的热应力,同时也要承受管内压力,随着管壁厚度的增加,其承受的总应力变小,但同时这将增加管壁热阻,但现在并没有关于同时考虑应力和热阻的最优管径研究成果发表。

3 管内对流换热

集热管的非均匀热流和两相流流型对管内对流换热有着直接影响,但现阶段大多数研究都将集热系统简化为一维问题,把热流密度假设成周向均匀一致,并假设流型只为环状流或是层流,进而使用传统经验公式计算传热系数。对于单相区,习惯采用Dittus-boelter公式,两相饱和状态时,当为层流时采用shah公式;环形时,采用表示核态沸腾传热和强制对流换热相叠加的chan公式^[13]。利用文献[13]的数据,计算直通式集热器的传热系数、传热效率如图3所示。

同时文献[13~14]分别给出了不同的热损模型,这将降低仿真难度;文献[15]对集热器效率进行了研究,指出管径为60 mm左右时,集热器较为合适,对集热效率的影响程度依次是太阳能辐射强度、工质流量和环境风速。

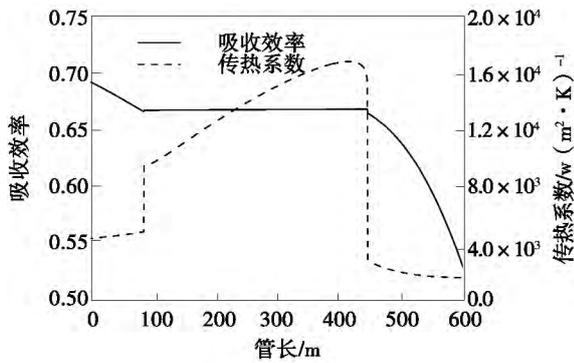


图 3 传热系数和传热效率沿轴向的变化
Fig. 3 Changes in the heat transfer coefficient and efficiency along the axial direction

4 运行模式

DSG 槽式热发电系统可分为直通式、再循环式和注入式 3 种基本类型^[16]，如图 4 所示。文献 [11] 通过比较各自优缺点，并相互权重，得出再循环式最佳。

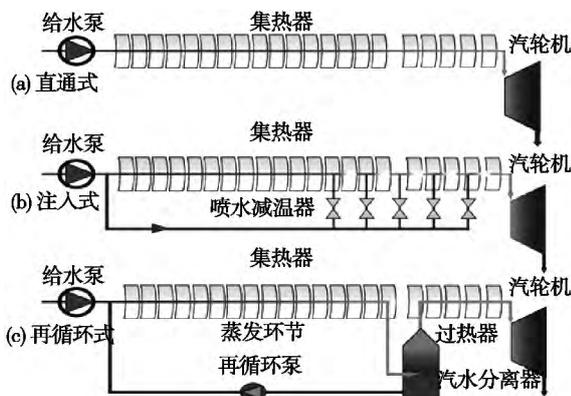


图 4 DSG 集热系统的 3 种类型

Fig. 4 Three types of DSG solar collector system

直通式 DSG 如同传统的直流锅炉一样，给水进入集热管后经预热、蒸发和过热后，蒸汽直接进入汽轮机发电，主要的技术问题：由于太阳辐射瞬态特性，集热器回路出口过热蒸汽参数不宜控制，且两相段与过热段分界面的变动，形成较高的温度梯度，容易产生温度疲劳，使集热管断裂^[17]，并通常产生一定的脉动现象。

注入式 DSG 由多个集热单元组成，每个集热单元由一根集热器和一个喷水减温器构成，各单元出

口参数均可用喷水减温器来调节，避免集热管内出现汽水分层和过大的温度梯度，因此它对出口蒸汽参数具有良好的可控性。但目前尚无可用的测量技术用于测定集热管中工质的蒸汽含量，也就无法确定不同位置处相应合适的注入水量^[11]。

再循环式 DSG 由汽水分离器分为两部分，从汽水分离器分离出的饱和蒸汽流经过热器加热后进入汽轮机，而分离出的饱和水经再循环泵与给水混合后进入蒸发环节，其优点是集热管内汽液两相流较稳定，可控性好，但系统复杂和投资成本大以及增加了再循环泵的功耗，且饱和水在再循环管道中流动，压力降低，易产生汽蚀^[17]。再循环比率是再循环式最重要的运行参数，高的循环比率能保证两相段充分冷却，却会增加压降和系统的功耗，但通过研究发现，稳态时，不同的循环比率对两相段的集热管温差没有产生明显影响，通常选用 $R = 0.25$ ^[12,18]，但并没有动态分析结果公开发表。再循环式大规模运行中存在并联管，因分离器和并联管的布置不同又分两种类型，如图 5 所示。文献 [19] 通过动态仿真结果阐述了两种的差别，并指出分离器分散布置的集热系统具有更好的动态特性。

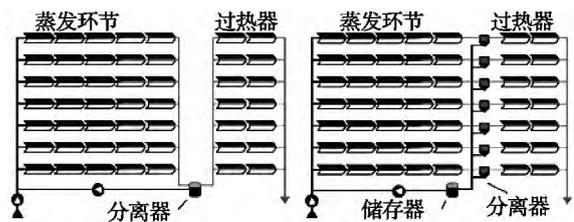


图 5 再循环模式的两种类型

Fig. 5 Two types of recirculation mode

同时，文献 [20] 指出：相比于过热蒸汽发电，虽饱和蒸汽发电的初期投资、维护成本略高，但可使电站的年净发电量提高 4%，且发电系统内的汽水分离器内储存的热能可以克服短时间内多云天气的影响，并且只需要简单的集热器配置就能在 260 ~ 300 °C 范围内高效的运行。

5 流动不稳定性

DSG 系统因存在两相流，使系统的工作压力和压降变的十分重要，它不仅涉及到系统功耗和两相流的流型而影响到传热特性，也存在流动不稳定性。

仿真中,单相段的压降通常选用 blasius 公式,对于两相段,DISS 项目证明 Friedle 模型最为精确^[6], Martinelli - Nelson 模型也得到运用^[21~22]。

文献 [21 ~ 24] 分析了稳态下集热器入口参数和太阳辐射对系统压降的影响。根据文献 [21] 模拟集热管水动力特性曲线如图 6 所示。系统压降随着质量流量的变化会出现一段下降段即 BC 段,压降随质量流量的变大而减小,这种不稳定性称为流量漂移,其特征是受扰动的流体流动偏离原来的平衡工况,在新的流量值重新稳定运行。它可能对系统造成致命伤害,比如集热管烧毁。

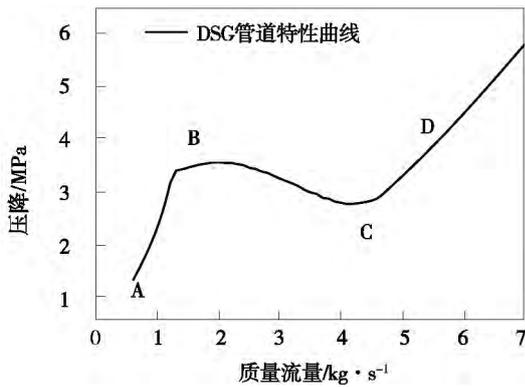


图 6 集热管压降特性
Fig. 6 Pressure drop characteristics of a solar absorber tube

商业电站中最主要的难题并不是热惯性,而是并联集热管的流量分布^[17],受系统压降、流量和太阳辐射影响,并带有一定随机性^[25~28]。图 7 和图 8 分别给出了受相同辐射时,并联管流量分布和压降随质量流量的变化,其分流比可能出现 1 种、3 种甚至 5 种情况,在某一压降下,质量流量可能出现 6 种情况^[25]。

并联管的流量分布和变化由其水动力特性曲线决定,文献 [28] 建立模型和实验研究了蒸发并联管的稳态流量分布和瞬变流量变化。当稳态系统出现一点扰动,流量分布会出现随机性变化,但是变化的趋势确定后,其重新稳定的状态是可预知的^[29]。

增加进口温度能改善系统的不稳定性,在并联管进口增加阀门,也能改善管道特性,但是这样会增加额外的压降,从而影响到系统的功耗。如果不加阀门或是阀门额外的压降并没有消除流量漂移的影响,为此流量增大,不仅能保证冷却而且其压降也在

变小,为此文献 [27] 设计一个控制策略,调节每一个集热管前的调节阀,控制分离器的进口干度,这种方法能保证系统稳定性,并且对系统的功耗影响也较小。不稳定性和工作压力、进口温度有着明显关系,特别是启动时,系统的稳定性变的十分脆弱,现在还没有明确提出一种有效的控制策略来改善系统的启动特性。

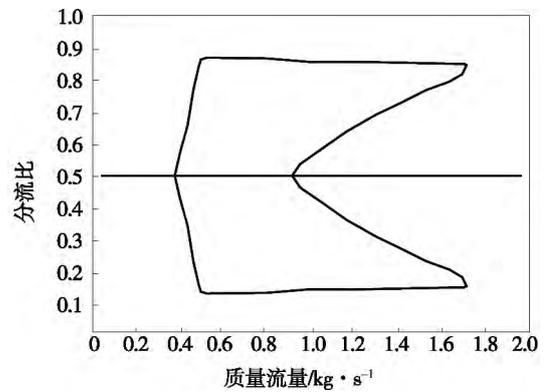


图 7 质量流量与分流比的关系
Fig. 7 Mass flow rate Flow vs. splitting ratio

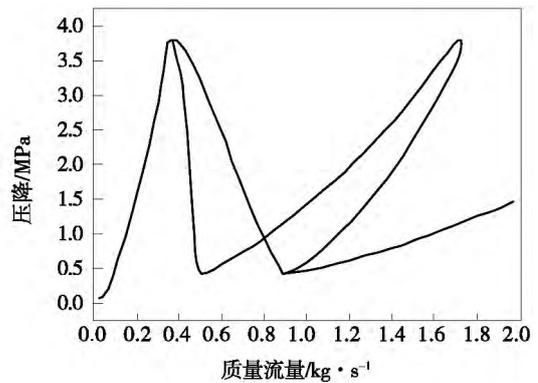


图 8 质量流量与压降的关系
Fig. 8 Mass flow rate vs. pressure drop

6 热能存储

因太阳辐射的周期性和间歇性,要求系统具备一定的储热能力,以保证系统的稳定性,同时储热系统能保证机组能更多的时间处于高负荷状态运行,使系统的发电量增加和提高机组效率。

文献 [30] 认为当太阳辐射发生瞬变时,要求蓄热系统有较快的反应时间和释放蒸汽速率,这就使得蒸汽存储器成为一种可能,其使用压力容器将蒸

汽压缩成高压热水储存,但是这种方法随着时间的推移其蒸汽压力和释放速度都会降低,故不适用长期存储和释放热能。

由于 DSG 系统两相段的存在,蒸发段需要恒温,使得通过物质的相变恒温释放潜热成为一种可行的技术方案^[31-32],文献[33]用 NaNO_3 作为潜热介质,但也指出潜热系统会使蒸汽的压力有明显的下降,蓄热系统位于镜场和动力装置之间,潜热储能系统加热工质,出口压力明显小于进口压力,进口压力 11 MPa 时,出口压力降至 8 MPa,同时意味着机组负荷降低 20% 左右。文献[31]将潜热和显热结合起来利用相变潜热给蒸发段加热,混凝土显热给预热段和过热段加热,出口蒸气温度可以达到 500 °C,分为 3 部分,取得了良好效果。

面对太阳能的不稳定性,和其它化石资源联合发电也是一种选择^[34]。

7 控制问题

由于太阳辐射的间歇性、低密度和周期性,加之热力系统本身特性,使得 DSG 系统具有大滞后、大惯性、参数时变等特点。控制的主要目的是镜场出口蒸汽温度和压力保持稳定,当太阳辐射和进口温度变化时只影响到出口蒸汽流量的大小,而不是影响到蒸汽品质^[35]。为了设计和优化控制器,文献[22-36]分别探讨了各类扰动对直通式和再循环式出口蒸汽参数的动态响应,文献[18]、[37]研究了局部集热管太阳辐射阶跃变化后,出口参数的动态响应。而文献[38]对蒸发环节和过热器所受到的太阳辐射强度分别进行阶跃扰动,探讨了主蒸汽的稳定性。

文献[39-40]分别详细的描述了 DISS 项目中直通式和再循环式的控制策略,采用传统的抗积分 PI 控制,验证了直接产生高温高压蒸汽的可能性。但对太阳辐射的瞬间变化,传统的 PI 控制能保证再循环式的安全运行,但是对直通式却较为困难^[39]。文献[35]详细研究了直通式的特性,设计基于 PI 的前馈控制与串级控制相结合的控制策略,能保证短时的瞬变,直通式不出现层流而引起的截面温度梯度过大,但是长时间依然不行。PI 控制只能在气象条件较好的情况下正常运行,并且随着压力的下降

控制难度反而升高,因为在低压下水和蒸汽的热力性质差距更大^[40]。现代控制和智能控制已经广泛用于分布式太阳能系统,但是在 DSG 系统里面相关研究并不多。文献[41]提出一种多模型切换受限增量广义预测控制策略,取得一定效果。

8 结 论

DSG 系统与传统的导热油槽式热电相比,存在两相流是最大的不同,槽式太阳能热发电系统最开始以导热油为工质,就是因为对集热管中两相流的认识不够,害怕出现过大的截面温度梯度、水动力不稳定性现象以及流量分布不均^[28]。但是 DSG 系统依旧是一个朗肯循环,这将决定槽式热发电技术必将追求高参数,并辅以新的结构,新结构面临新的安全性、经济性问题,和太阳辐射自身的特点以及热工对象自身的特性,决定 DSG 系统的复杂性。本研究将这些问题划分为 3 个大类、7 个小类,并将其研究现状和发展趋势进行分类整理,但是依然还有许多问题有待亟需研究,比如水蒸气腐蚀问题等。为提高商业化槽式太阳能直接蒸汽发电的经济竞争力和稳定性,电站的运行模式、热能存储和控制问题将是下一阶段的重点,国内研究现在主要集中在仿真、控制策略,但是对电站的运行模式和热能存储很少涉足。

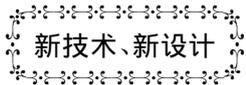
参考文献:

- [1] 李德贵,龚思源,田丰,等. 中国太阳能集热发电的可行性及政策研究报告[R]. 北京: 中国科学院清洁能源技术发展中心, 2009.
LI De-gui, GONG Si-yuan, TIAN Feng, et al. Report on the study of the feasibility of and policies for the solar energy heat accumulation power generation in China [R]. Beijing: Clean Energy Technology Development Center, China Academy of Sciences, 2009.
- [2] Hank Price, Eckhard Lüpfert, David Kearney, et al. Advances in parabolic trough solar power technology [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(2): 109-125.
- [3] Zarza E. Overview on direct steam generation (DSG) and experience at the Plataforma Solar de Almería (PSA) [R]. Spain, CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, 2007.
- [4] 李献偶,李勇,王如竹. 槽式太阳能热发电在浑善达克沙地的应用可行性分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 92-98.
LI Xiao-ou, LI Yong, WANG Ru-zhu. Analysis of the feasibility of

- the applications of the trough type solar energy thermal power generation in Hunshandake sands [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(1): 92–98.
- [5] Eck M, Steinmann W D. Modelling and design of direct solar steam generating collector fields [J]. *Journal of Solar Energy Engineering* 2005, 127(3): 371–380.
- [6] Iván Martínez, Rafael Almanza. Experimental and theoretical analysis of annular two-phase flow regimen in direct steam generation for a low-power system [J]. *Solar Energy* 2007, 81(2): 216–226.
- [7] Forristall R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver [R]. DE-AC36–99–GO10337 National Renewable Energy Laboratory 2003.
- [8] Roldán M I, Valenzuela L, Zarza E. Thermal analysis of solar receiver pipes with superheated steam [J]. *Applied Energy* 2013, 103: 73–84.
- [9] Hachicha A A, Rodríguez I, Capdevila R, et al. Heat transfer analysis and numerical simulation of a parabolic trough solar collector [J]. *Applied Energy* 2013, 111: 581–592.
- [10] Almanza R, Jimenez G, Lentz A. DSG under two-phase and stratified flow in a steel receiver of a parabolic trough collector [J]. *Transactions of the ASME* 2002, 124(2): 140–144.
- [11] Eck M, Steinmann W D, Rheinländer J. Maximum temperature difference in horizontal and tilted absorber pipes with direct steam generation [J]. *Energy* 2004, 29(5): 665–676.
- [12] Eck M, Zarza E, Eickhoff M, et al. Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs [J]. *Solar Energy* 2003, 74(4): 341–351.
- [13] Odeh S D, Morrison G L, Behnia M. Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors [J]. *Solar Energy* 1998, 62(6): 395–406.
- [14] 崔映红, 杨勇平. 蒸汽直接冷却槽式太阳集热器的传热流动性能研究 [J]. *太阳能学报* 2009, 30(3): 304–310.
CUI Ying-hong, YANG Yong-ping. Study of the heat transfer and flow performance of a steam direct cooling trough type solar energy heat collector [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* 2009, 30(3): 304–310.
- [15] 高志超, 隋军, 刘启斌, 等. 30 m² 槽式太阳能集热器性能模拟研究 [J]. *工程热物理学报* 2010, 31(4): 541–544.
GAO Zhi-chao, SUI Jun, LIU Qi-bin, et al. Study on the simulation of the performance of a 30 m² trough type solar energy heat collector [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* 2010, 31(4): 541–544.
- [16] Zarza E, Valenzuela L, Leon J, et al. The DISS project: direct steam generation in parabolic trough systems. Operation and maintenance experience and update on project status [J]. *Journal of solar energy engineering* 2002, 124(2): 126–133.
- [17] Zarza E, Rojas M E, González L, et al. INDITEP: The first pre-commercial DSG solar power plant [J]. *Solar Energy* 2006, 80(10): 1270–1276.
- [18] Eck M, Steinmann W D. Direct steam generation in parabolic troughs: first results of the DISS project [J]. *Transactions of the ASME* 2002, 124(2): 134–139.
- [19] Hirsch T, Eck M. Design of a Phase Separation System for a Direct Steam Generation Parabolic Trough Collector Field [J]. *Journal of Solar Energy Engineering* 2008, 130(1): 011003.
- [20] Eck M, Zarza E. Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs [J]. *Solar Energy* 2006, 80(11): 1424–1433.
- [21] Odeh S D, Behnia M, Morrison G L. Hydrodynamic analysis of direct steam generation solar collectors [J]. *Transactions of the ASME* 2000, 122(1): 14–22.
- [22] 梁征, 孙利霞, 由长福. DSG 太阳能槽式集热器动态特性 [J]. *太阳能学报* 2009, 30(12): 1640–1646.
LIANG Zheng, SUN Li-xia, YOU Chang-fu. Dynamic characteristics of a DSG solar energy trough type heat collector [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* 2009, 30(12): 1640–1646.
- [23] 杨宾. 槽式太阳能直接蒸汽热发电系统性能分析与实验研究 [D]. 天津: 天津大学 2011.
YANG Bin. Performance analysis and experimental research of a trough type solar energy direct steam generation thermal power generation system [D]. Tianjin: Tianjin University 2011.
- [24] David H L, Valenzuela L. Impact of pressure losses in small-sized parabolic-trough collectors for direct steam generation [J]. *Energy* 2013, 61: 502–512.
- [25] Natan S, Barnea D, Taitel Y. Direct steam generation in parallel pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2003, 29(11): 1669–1683.
- [26] Minzer U, Barnea D, Taitel Y. Evaporation in parallel pipes – splitting characteristics [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2004, 30(8): 763–777.
- [27] Taitel Y, Minzer U, Dvora B. A control procedure for the elimination of mal flow rate distribution in evaporating flow in parallel pipes [J]. *Solar Energy* 2008, 82(4): 329–335.
- [28] Minzer U, Dvora B, Taitel Y. Flow rate distribution in evaporating parallel pipes—modeling and experimental [J]. *Chemical Engineering Science* 2006, 61(8): 7249–7259.
- [29] Taitel Y, Barnea D. Transient solution for flow of evaporating fluid in parallel pipes using analysis based on flow patterns [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2011, 37: 469–474.
- [30] Steinmann W D, Eck M. Buffer storage for direct steam generation [J]. *Solar Energy* 2006, 80(10): 1277–1282.

- [31] Laing D ,Bahl C ,Bauer T ,et. al. Thermal energy storage for direct steam generation [J]. Solar Energy 2011 85(4) : 627 -633.
- [32] Morisson V ,Rady M ,Palomo E ,et. al. Thermal energy storage systems for electricity production using solar energy direct steam generation technology [J]. Chemical Engineering and Processing , 2008 47(3) :499 -507.
- [33] Birnbaum J ,Eck M ,Fichtner M ,et. al. A direct steam generation solar power plant with integrated thermal storage [J]. Journal of Solar Energy Engineering 2010 132(3) 031014.
- [34] YANG Yong-ping ,CUI Ying-hong ,HOU Hong-juan ,et al. Research on solar aided coal-fired power generation system and performance analysis [J]. Science in China Series E: Technological Sciences 2008 51(8) 1211 -1221.
- [35] Valenzuela L ,Zarza E ,Berenguel M. Direct steam generation in solar boilers [J]. Control Systems IEEE 2004 24(2) : 15 -29.
- [36] 陈 红 ,韩 磊 ,王广军. DSG 槽式太阳能集热系统数学模型及动态特性 [J]. 中国电机工程学报 2013 33(29) :88 -94. CHEN Hong ,HAN Lei ,WANG Guang-jun. Mathematical model for and dynamic characteristics of a trough type solar energy heat accumulation system [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2013 33(29) :88 -94.
- [37] Eck M ,Hirsch T. Dynamics and control of parabolic trough collector loops with direct steam generation [J]. Solar Energy 2007 81(2) : 268 -279.
- [38] Birnbaum J ,Feldhoff J F ,Fichtner M ,et. al. Steam temperature stability in a direct steam generation solar power plant [J]. Solar Energy 2010 85(4) : 660 -668.
- [39] Valenzuela L ,Zarza E ,Berenguel M ,et. al. Control concepts for direct steam generation in parabolic troughs [J]. Solar Energy , 2005 78(2) : 301 -311.
- [40] Valenzuela L ,Zarza E ,Berenguel M ,et al. Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode [J]. Solar energy 2006 80(1) : 1 -17.
- [41] 郭 苏 ,刘德有 ,张耀明 等. 运行模式 DSG 槽式太阳能集热器出口蒸汽温度控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报 , 2012 32(20) :62 -68. GUO Su ,LIU De-you ,ZHANG Yao-ming ,et al. Research of the tactics for controlling the temperature of steam at the outlet of a DSG trough type solar energy heat collector in its operation mode [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering , , 2012 32(20) :62 -68.

(姜雪梅 编辑)



Temple 1 电站现在已开始商业运行

据《Gas Turbine World》2014 年 9 ~ 10 月刊报道 美国独立的电力生产者潘达电力基金公司最近正在启动在得克萨斯州奥斯汀市附近的 Temple(坦普尔) 1 联合循环电站。

该 758 MW 联合循环电站是:

- ◇在得克萨斯满足快速启动和负荷跃变需要的第一个 Flex-Plant。
- ◇在美国第一个使用“整形电力” ,允许在高的环境温度下提供 10% 更多的电力。
- ◇能够在不到 25 min 时间内交付 60% 满负荷。

该联合循环装置的动力岛包括 2 台 SGT6 - 5000F 燃气轮机(208 MW 功率 38.1% 效率) 、1 台 SST6 - 5000 汽轮机、2 台 SGen6 - 1000A 发电机、1 台 SGen6 - 2000H 发电机、2 台三压再热余热锅炉和一个 SPPA - T3000 测量控制系统。

2 × 1 联合循环装置的 SGT6 - 5000F 燃气轮机具有 13 级轴流压气机、管环式燃烧室和 4 级涡轮。

SST6 - 5000 汽轮机由一个联合的高压/中压部分和一个双流低压部分组成。

余热锅炉是具有再热的卧式、三压自然循环直流锅炉。该余热锅炉也能装有补燃 ,以便有助于优化装置的性能。

(吉桂明 摘译)

导孔型板壳式换热器的研究进展与展望 = **Research Development on Guide Groove Type Plate and Shell Heat Exchanger** [刊, 汉] LIU Jia-rui, ZHAO Wei, ZHANG Hua (School of Energy and Power Engineering of University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), HUANG Xiao-dong (Dongguan Aro Thermal Energy Technology Co. Ltd. Dongguan, Guangdong Province, China, Post Code: 523053) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -1-8

As one kind of new-pattern and high-efficiency heat transfer equipment, the plate and shell heat exchanger (PSHE) has the broad application prospects in industry. Taking the guide groove type PSHE as the object, based on the domestic and international research achievements, the paper discusses in detail the structure and the working principle of PSHE, the selection of process composition on plate side and shell side as well as the relevant theories of the heat transfer calculation and pressure drop calculation. The paper also presents the detailed steps and relevant formula on the thermodynamic calculation and points out the problems which shall be noted during the period of the design and calculation for PSHE, such as the plate model selection, the choice of the fouling factor value, the control of errors and so on. In addition, the paper describes the performance test method of PSHE as well as the solving method of the heat transfer criterion equation, summarizes the influences of plate structure parameters on flow and heat transfer and analyzes the phenomenon of the flow maldistribution at the inlet of the shell side. Finally, the paper forecasts the development prospects of PSHE and indicates the integrated design, complete-set assembly and central intellectual control will become the key development direction for PSHE. **Key words:** plate and shell heat exchanger (PSHE), plate structure, heat transfer criterion equation, flow distribution

槽式太阳能直接蒸汽发电技术研究现状 = **Research Status of Solar Parabolic Trough Direct Steam Generation Technology** [刊, 汉] WANG Xue-jun, YAN Fei, ZHANG Yin-long, WANG Kun (Chongqing University, Key Laboratory of Education Ministry on Low-grade Energy Utilization Technology and System, Shapingba District, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(3). -9-15

With its advantages of higher efficiency, more friendly environment and lower investment, the solar parabolic trough direct steam generation (DSG) technology has become the most promising concentrating solar power generation technology. But the DSG solar collecting system is restricted by such three factors as non-uniform heat flux on the absorber, gas-liquid two-phase flow and instability of solar radiation. The paper not only describes in detail the re-

search status and interaction in seven aspects of cross section temperature gradient ,two-phase flow patterns ,heat convection ,operation mode flow instability ,thermal storage and control which resulted from above three factors and thermodynamic system own characteristics ,but also forecasts the development tendency of DSG system. In addition , the paper points out the improvement of DSG control system and its heat storage system will promote remarkably the development of DSG system. **Key words:** direct steam generation (DSG) ,non-uniform heat flux ,gas-liquid two-phase flow ,instability

基于声学与光学相联合的温度场重建技术数值模拟研究 = **Study on Numerical Simulation for Temperature Field Reconstruction Technology Based on the Optical and Acoustical Combined Theory** [刊 ,汉] HUANG Fan ,LIU Shi ,SONG Wei (Energy & Power Engineering School of North China Electric Power University ,Beijing , China ,Post Code: 102206) ,LIU Bo-yang (Huaneng Yuhuan Power Plant ,Yuhuan ,Zhejiang Province ,China ,Post Code: 317600) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(3) . -16 -23

With the purpose of getting more accurate two-dimensional temperature field of furnace flame in order to realize the real-time monitoring of the furnace flame temperature ,the optical method and acoustical method are used respectively to model the temperature field reconstruction and deduct the simple matrix inversion formula ,meanwhile ,the singular value decomposition (SVD) algorithm is also adopted for the reconstruction of the two-dimensional temperature field in furnace. The numerical study shows that when the measuring errors are 0.05 and 0.1 ,the optical and acoustical measuring methods can obtain good reconstruction results separately in high-temperature region and in lower-temperature region. Hereby ,based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) ,the paper puts forward the optical and acoustical combined temperature field reconstruction technology for the two-dimensional reconstruction of furnace unimodal symmetric ,unimodal bias and bimodal symmetric temperature fields. The results show that the inversion accuracy can be increased by about 0.01 in comparison of optical method or acoustical method ,which proves the feasibility and accuracy of this combined method have the great significance on furnace temperature field inversion. **Key words:** two-dimensional temperature field of furnace flame ,exponential SVD algorithm ,analytic hierarchy process (AHP) ,optical and acoustical combined technology

热功复合驱动热泵循环的敏感性分析 = **Sensitivity Analysis on Heat Power Hybrid Driven Heat Pump Cycle** [刊 ,汉] ZHANG Na ,HAN Wei ,QI Hai-qing (Institute of Engineering Thermophysics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) ,WANG Kang (State Nuclear Electric Power Planning Design & Re-