

# 热光伏发电系统水冷散热特性研究

杨 涛 韩玉阁 谭 洪 宣益民

(南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 设计了一套水冷散热器以控制光伏电池运行温度, 研究了不同水流量下电池温度及散热器压力损失的变化规律和对应的光伏电池输出特性。实验表明: 辐射器温度 1 373 K、冷却水流量为 25 mL/s 时, 电池温度为 302 K, 所设计的散热器可以有效控制光伏电池的温度; 利用 Fluent 软件分析了导流片高度、导流片数目、冷却水进出口管径等结构参数对其性能的影响, 计算表明: 增大冷却水进出口管径可以有效的降低压力损失而不影响散热效果; 数值模拟结果和实验结果比较吻合, 验证了数值模拟方法的正确性。

**关 键 词:** 热光伏发电系统; 水冷散热器; 电池温度; 压力损失

中图分类号: TK513 文献标识码: A

## 引 言

热光伏发电技术(TPV)是将高温热源中的红外辐射能通过光伏电池直接转换成电能的技术。随着低禁带(0.50~0.74eV)的 III-V 族化合物的开发成功, 电池转换效率有了明显的改善, 使得热光伏系统效率有了很大的提升, 并且热光伏发电技术可利用的热源非常广泛如燃气、核能、工业废热等<sup>[1]</sup>。热光伏技术还具有理论效率较高、噪音低、无移动部件、可便携、可将热能利用和发电联合开发等优点<sup>[2~4]</sup>, 从而热光伏系统的研究受到研究者的关注<sup>[5~8]</sup>。

光伏电池的光电转换效率是决定整个系统效率的重要因素之一, 光伏电池属于电子元件, 温度对其工作效率有明显影响。Murray 等生产并测试了 In-PAs/InGaAs/InPAs/InP 电池, 结果表明, 在辐射源温度不变条件下, 随着电池温度的升高, 电池效率明显下降。

热光伏系统中辐射器辐射到光伏电池上的辐射能量密度超过 5 W/cm<sup>2</sup>, 如果电池散热或散热不佳,

电池温度可高达上百摄氏度, 将大大降低电池的效率, 因此散热器便成为热光伏系统不可缺少的组成部分。本结合以液化石油气燃烧为热源的热光伏系统, 针对美国 JX Crystals 公司生产的 GaSb 电池, 设计了水冷散热系统并进行了试验研究, 研究了不同冷却工况对光伏电池的冷却效果, 并且通过 Fluent 数值模拟分析了导流片高度、导流片数目及肋片对散热器散热和阻力特性的影响。

## 1 散热器性能实验

### 1.1 散热器结构及试验系统

热光伏发电装置如图 1 所示, 装置主要由燃烧器、过滤器、光伏电池、冷却装置等组成。燃烧器发出的红外辐射经过过滤器后被光伏电池接收, 光伏电池将一部分辐射转化为电能, 一部分辐射能未被电池转化为成为废热, 散热器将废热带走以控制电池温度。

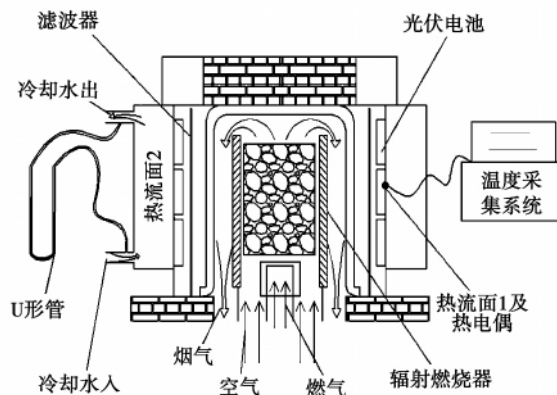


图 1 实验系统

水冷散热器如图 2 所示, 散热器由内核与外壳

组成,内核外侧的导流片和肋片构成水流槽道,内侧加工成相等的 8 个平面,平面上装配光伏电池。通过内核、外壳、上盖板和下盖板的密封配合形成螺旋向上的水流通道,冷却水经入口管进入散热器,沿着水流通道螺旋向上流动,最后从出口管流出。电池固定架用来固定光伏电池和滤波片。散热器尺寸:导流片根部外径为 90 mm,导流片高 12 mm,厚 4 mm,共 5 片,间距 12 mm;肋片高 10 mm,厚 2 mm,共 4 片,间距 12 mm;内核中 8 个相等平面高 76 mm,8 个平面所围成的柱体轴向截面为等 8 边形,其内切圆直径为  $\phi 74$  mm。

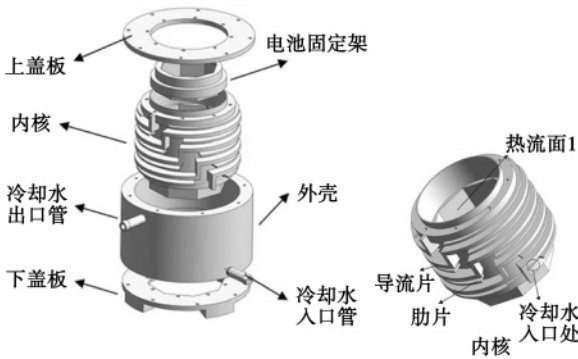


图 2 散热器装配

散热器内壁由 8 个相等面构成热流面,散热器内壁温度通过在热流面 1(距冷却水入口最远的面,如图 2)和热流面 2(距冷却水入口最近的面,正对热流面 1)分别布置热电偶来测量。在热流面 1 上贴一片大小为  $1.13 \times 1.65 \text{ mm}^2$  的 GaSb 电池,电池温度为热流面 1 布置热电偶测量,电池输出开路电压和短路电流通过 MS8268 万用表测量。辐射器温度通过调节燃气流量和空气流量来控制,在其表面布置热电偶来测量。所有热电偶均是 K 型,并且接到 HP 数据采集仪上。散热器冷却水进出口布置一水银 U 形管来测量进出口压差。

### 1.2 实验结果与分析

图 3 示出了辐射器温度为  $T_{\text{radiator}}$  为 1 373 K,冷却水进口温度  $T_0$  为 279.7 K 时,热流面 1 温度测点  $T_{\text{expl}}$  和水流压力损失  $\Delta P_{\text{exp}}$  随水流量的变化。随水流量的增加,  $T_{\text{expl}}$  不断降低,从冷却水流量为 5 mL/s 时的 337 K 降低到冷却水流量为 25 mL/s 时的 302 K,此时降低趋势逐渐变缓,当冷却水流量大于 25 mL/s 时,继续增大水流量,  $T_{\text{expl}}$  变化很小,这是因为水流量增大,对流换热系数不断增大,但增大的趋势逐渐减小。另外从图 3 中可以发现水流压力损失随

冷却水流量增大而增大,并且增大的趋势逐渐明显。压力损失与水流速的二次方成正比,所以压力损失随速度的增加趋势会不断增强。通过增大水流量降低热流面温度的同时也增加了压力损失,要用尽可能小的压力损失使热流面温度控制在合理范围内,应该更多的从优化散热器结构方面考虑,在一定水流量下,最大限度提高水与散热器的换热量。

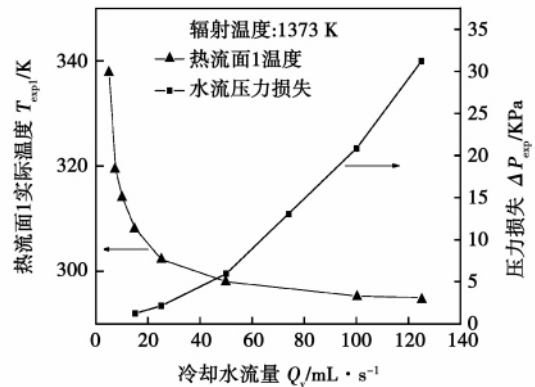


图 3 不同水流量下热流面温度及散热器压力损失变化曲线

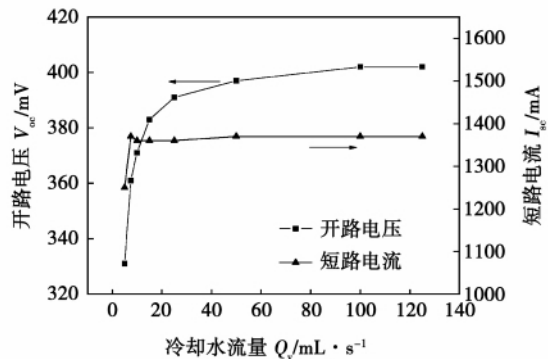


图 4 不同水流量下电池开路电压和短路电流的变化曲线

图 4 给出了辐射器温度为 1 373 K 时,电池开路电压  $V_{oc}$  和短路电流  $I_{sc}$  随冷却水流量的变化曲线,开路电压随水流量增加呈上升趋势,但上升幅度逐渐减小,这与图 3 中热流面温度的变化趋势一致,水流量从 5 mL/s 增加到 25 mL/s,热流面 1 温度下降较快,引起开路电压上升较快,相反当水流量从 25 mL/s 继续增加到 125 mL/s 时,由于热流面温度变化不大,所以电池的开路电压也没有多大提高。当水流量不低于 7.5 mL/s 时,对应温度不超过 319.5 K,电池短路电流变化很小,基本维持在 1 360 mA。当水流量从 7.5 mL/s 降低到 5 mL/s,对应热

流面温度从 319.5 K 增加到 337.7 K 时,短路电流从 1 360 mA 降低为 1 250 mA。试验结果说明,对比电池的短路电流,电池运行温度对光伏电池的开路电压影响较大,总体而言,在合适的冷却水流量下,本水冷散热器能够保证光伏电池正常稳定的运行。

## 2 散热器结构对散热器性能影响

为了研究散热器结构对散热器性能的影响,利用 Fluent 软件分析了导流片高度、导流片数目等结构参数对其性能的影响。

### 2.1 计算方法

#### 2.1.1 计算模型及边界条件

为了简化模型,不模拟辐射器、滤波器及光电池,计算区域仅包括散热器自身的固体部分和水流通道,通过在散热器内表面设置均匀热流密度边界条件来替代辐射器辐射到散热器上的热量。如图 2 中将内核、上盖板、下盖板及进出口水管装配起来的固体区和其内部形成的流体区(水流通通道)。两个区域中均采用 Tet/Hybrid/Tgrid 网格划分方法,流体区网格间距设为 1.5 mm,固体区设为 2 mm。

当流量小于等于 25 mL/s 时,选择计算模型为层流模型;大于 25 mL/s 时,选择  $k-\varepsilon$  湍流模型,设置湍流强度为 10%。设置操作压力为 101 325 Pa,同时设置  $y$  方向的重力加速度为  $-9.81 \text{ m/s}^2$ ,操作温度为 279.7 K;固体区设置为金属铜,流体区设置为液态水。流体区冷却水入口面设置为速度入口,入口水温为 279.7 K,速度通过水流量计算,水利直径为 6 mm(冷却水入口管内径)。流体区冷却水出口面设置为压力出口,静压设为 0 Pa,回流温度设为 300 K,回流水利直径为 6 mm(冷却水出口管内径)。固体区里面的 8 个相等的平面设置为恒定热流密度,热流密度大小通过辐射器温度来计算,本研究以辐射器温度为 1 373 K 为计算工况,热流密度大小为  $74\ 582.2 \text{ W/m}^2$ 。固体区中除过 8 个热流面,其它未和流体区接触的面均设为绝热边界条件。剩下的面设置为流固耦合边界条件,采用 Simple 算法,利用 Fluent 求解器求解。

#### 2.1.2 计算方法的验证

图 5 和图 6 分别给出了在辐射器温度为 1 373 K、不同水流量下,热流面温度、散热器压力损失计算结果和实验结果的对比曲线。任一水流量下,实验所得的热流面 1 温度  $T_{\text{expl}}$  比计算值  $T_{\text{cal1}}$  高 2.6 ~ 6.9 K,随水流量的增大两者之间的误差

( $\frac{T_{\text{expl}} - T_{\text{cal1}}}{T_{\text{expl}}}$ ) 也逐渐增大,流量为 5 mL/s 时,误差为 0.8%,当水流量增大 50 mL/s 时,误差为 2.35%。热流面 2 温度的试验值  $T_{\text{exp2}}$  和计算值  $T_{\text{cal2}}$  和热流面 1 温度变化近似。实验所得压力损失  $\Delta P_{\text{exp}}$  低于计算值  $\Delta P_{\text{cal}}$ ,并且随水流量的增大误差( $\frac{\Delta P_{\text{cal}} - \Delta P_{\text{exp}}}{\Delta P_{\text{exp}}}$ ) 随之增大,水流量从 15 mL/s 上升到 125 mL/s 时,误差从 3.9% 增大到 10.4%。分析认为,产生这种现象的主要原因是实际散热器的内核外部的导流片和外壳密封不够好,部分冷却水会直接从导流片和外壳之间的缝隙流过,减小了水流通通道中水的流速,降低了换热系数同时也减小了压力损失,水流量越大,散热器内部压力越大,这种状况更容易发生,所以实验值和计算值的偏差越大。另外,产生误差的原因还有模拟假设误差、计算误差及测量误差。图 7 中还可以发现实验和数值计算所得的热流面 1 和热流面 2 温度差值相差很小,计算结果和实验结果基本相符。

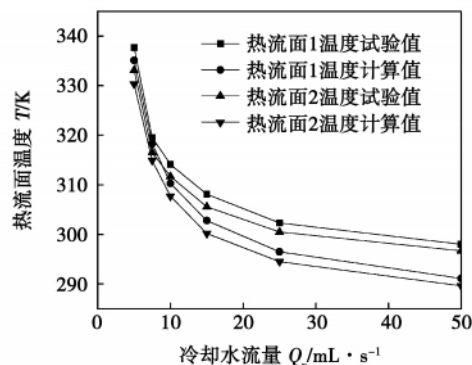


图 5 不同水流量热流面温度的计算值和实验结果对比曲线

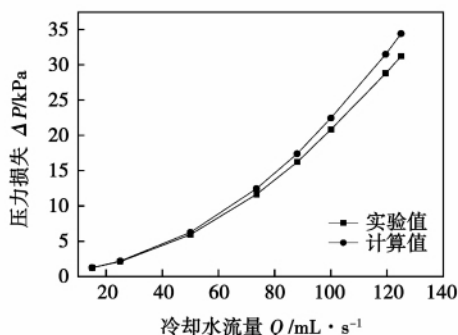


图 6 不同水流量压力损失的计算值和实验结果对比曲线

### 2.2 计算结果分析

采用前文所述的数值模拟方法讨论导流片高度  $H$ 、导流片数目  $N$  及是否添加肋片对散热器传热阻力性能的影响,计算工况为:水流量 15 mL/s,入口水温 279.7 K,辐射器温度 1 373 K。为了反映结构对散热器阻力特性得影响,计算所得压力损失去除了散热器进出口液位差所引起的部分。

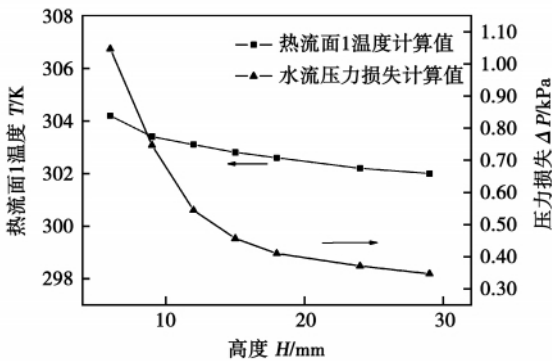


图 7 不同导流片高度下热流面 1 温度与压力损失变化曲线

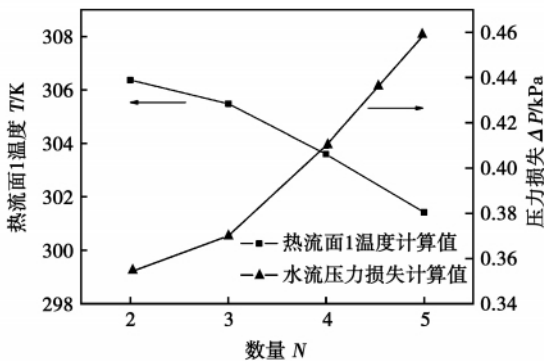


图 8 不同导流片数目下热流面 1 温度与压力损失变化曲线

图 7 示出了 4 片导流片下热流面 1 温度与水流压力损失  $\Delta P$  随导流片高度的变化规律。导流片高度增加,热流面温度和压力损失都有所下降,但热流面温度降低幅度较小,压力损失减小的幅度也逐渐变缓。增高导流片可以有效的减小压力损失,但同时意味着增大散热器体积,并且冷却水流速随导流片高度增加呈一次方减小,压力损失随水流速减小呈二次方减小,所以压力损失与导流片高度的负二次方成正比,即压力损失减小的幅度也变小。图 8 是在导流片高度 18 mm 时热流面 1 温度和散热器压力损失随导流片数目的变化曲线。导流片数目增加,热流面温度逐步下降,压力损失增大而且趋势也

越来越明显。导流片数目增加,导流片间距减小,水流速增大,有助于强化换热,但同时水流通道变长,增加了沿程阻力损失和局部阻力损失。因而,增加导流片数目可以降低热流面温度,但也增大了压力损失。另外,数值模拟结果显示:在导流片高度为 12 mm 数目为 4 根时,在导流片之间添加高 10 mm 的肋片时热流面温度仅下降了 1.7 K,但压力损失却增大了 88 Pa;将冷却水进出口管径从 6 mm 增大到 10 mm,热流面温度几乎不变,压力损失从 633 Pa 降低到 302 Pa。可见添加肋片并不能有效的加强换热,反而增大了压力损失,增大冷却水进出口管径可以有效的降低压力损失而不影响散热效果,因此在条件允许下应该尽可能的增大进出口管径。

### 3 结 论

通过对热光伏发电系统水冷散热系统的试验研究和数值分析,研究了不同水流量下电池温度及散热器压力损失的变化规律,分析了结构改变对散热器性能的影响,得到以下结论:

(1) 随着水流量的增大热流面温度不断降低但幅度逐渐减小,压力损失不断增大且趋势越来越强,电池输出开路电压呈上升趋势但幅度逐渐变缓,短路电流变化不大,试验结果显示水冷散热系统可以有效的控制电池温度。

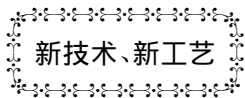
(2) 同等工况下,散热器热流面温度的实验结果高出数值计算结果 2.6 ~ 6.9 K,随水流量的增大,误差从 0.8% 增大到 2.35%;实验所得压力损失总是小于计算值,误差在 3.9% 到 10.4% 之间。数值计算结果与实验结果基本相符,说明了数值计算方法的正确性。

(3) 增加导流片高度可以有效减小压力损失,增加导流片数目可以降低热流面温度,同时也增大了压力损失;冷却水进出口管径从 6 mm 增大到 10 mm,压力损失从 633 Pa 降低到 302 Pa,在条件允许下应该尽可能的增大进出口管径。因此,优化散热器内部结构,使得散热器在低压降条件下具有较好的散热能力是未来的改进方向。

#### 参考文献:

[1] COUTTS T J. A review of progress in thermophotovoltaic generation of electricity [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1999, 3(3): 77 - 184.  
 [2] WOJTCZUK S, GAGNON E, GEOFFROY L. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As thermophotovoltaic cell performance vs. bandgap [J]. In Proc NREL

- Thermophotovoltaic Gen Electricity Conf , 1995 , 32 ( 1 ) : 177 - 187.
- [3] DEMICHELIS F , MINETTI D , AGNELLO E , et al. Evaluation of thermophotovoltaic conversion efficiency [J]. J Appl Phys , 1982 , 53( 12 ) : 9098 - 9104.
- [4] BARNHAM K , DUGGAN G. A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells [J]. J Appl. Phys , 1990 , 67: 3490 - 3493.
- [5] LI J , CHOU S K , LI Z W. A potential heat source for the micro-thermophotovoltaic ( TPV ) system [J]. Chemical Engineering Science , 2009 , 64( 14 ) : 3282 - 3289.
- [6] LEI M , YE H. Thermal modeling for thermophotovoltaic systems - adopting the radiation network method [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells 2009 , 93( 10 ) : 1705 - 1713.
- [7] WANG Y , CHEN N F , ZHANG X W , et al. Evaluation of thermal radiation dependent performance of GaSb thermophotovoltaic cell based on an analytical absorption coefficient model [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells 2010 , 94( 10 ) : 1704 - 1710.
- [8] CHOU S K , YANG W M , LI J , et al. Porous media combustion for micro thermophotovoltaic system applications [J]. Applied Energy , 2010 , 87( 9 ) : 2862 - 2867.
- [9] MURRAY S , MURRAY C , NEWMAN F , SIERGIEJ R. Thermophotovoltaic Energy System Conversion for Use in space power applications manufacturing 20% efficient cells. In proceeding of space technology and applications international forum( STAIF-03 ) edited by EI-Genk M S // AIP Conference Proceedings 654 Melville [C]. New York: AIP-Press 2003 , 1105 - 1112.



新技术、新工艺

## 燃气轮机发电装置用作风力发电站和调峰机组的备用装置

据《Gas Turbine World》2010年9-10月报道,美国托皮卡的 Westar Energy 能源公司拥有并营运总装机容量约 300 MW 的 4 个风力场,并计划在下一个十年建造或购买另一个 500 MW 风力场。

两年前,根据可预见的增加负荷和风力容量的需求,Emporia Energy Center 电站公司完成了以天然气作为燃料的 665 MW 简单循环燃气轮机电站,用于全年调峰和再生能源电网。

该燃气轮机备用电站计划于 2012 年年末至少能提供夏季调峰电力需求的 10% , 2020 年至少达到 20% 。

该电站的额定输出功率和投资如下:

**320 MW:** 第一阶段安装 4 台 GE LM6000PC Sprint 机组(即同时向高压压气机入口和低压压气机入口喷水以便加大输出功率的 LM6000 燃气轮机一译者),每台额定净输出功率为 37 MW; 一台 GE Fr 7FA 燃气轮机,夏季额定输出功率为 172。这些机组已在 2008 年 6 月开始投入使用。

**345 MW:** 第二阶段另装 2 台 Frame 7FA 燃气轮机装置,每台夏季额定输出功率为 172 MW,用于全年调峰发电,已于 2009 年 2 月投入运行。

费用:如电站公司所报道,Emporia 燃气轮机电站的初投资完全在预算之内,约为 3.08 亿美元,比原计划费用约少 1000 万美元,并且工程比计划提前两个月完工。

(吉桂明 摘译)

bustion test system with a riser having a diameter of 100 mm and a height of 3000 mm. The test results show that when the average oxygen concentration is 34.4% or the local oxygen concentration is 75.3%, a stable combustion without any superheating can be accomplished. The  $\text{NO}_x$  contained in the flue gas of the Longkou-originated coal accounts for 89.3% ~ 90.3 of the total  $\text{NO}_x$  emissions while that of the Shuozhou-originated coal occupies only 30.0%. By optimizing the air distribution, the concentration of CO,  $\text{NO}_2$  and  $\text{NO}_x$  in the flue gas can be reduced to 45%, 94% and 89% respectively. **Key words:** fluidized bed,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ , combustion at a high oxygen concentration, pulverized coal

基于制取流体冰的液-液雾化液滴粒径分布研究 = **Study of the Liquid Drop Diameter Distribution of a Liquid-liquid Atomization Based on Preparation of Slurry Ice** [刊, 汉] LIANG Kun-feng, GAO Chun-yan, WANG Lin (Henan University of Science and Technology, Luoyang, China, Post Code: 471003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 457 ~ 460

The process to form liquid drops through a liquid-liquid atomization is regarded as a dynamic and random phenomenon. The sizes of the liquid drops thus formed are uncertain and under the condition of a great many tests, however, the liquid drop diameters assume a statistical regularity. To study the diameter distribution regularity under different test conditions, the mathematical statistic method was used to conduct an analysis. It has been found that under different test conditions, the particle diameters of the atomized liquid drops assume a certain distribution form and with an increase of the jet flow rate, the change in the medium diameter of the particle diameter distribution as a whole shows a descending tendency. Through a Pearson  $\chi^2$  fitting dominancy test, when the liquid drop particle diameter distribution is supposed to perform the Rosin-Rammler distribution function, the significance level under all the test conditions will invariably attain 0.01. The mass fraction at four particle diameters under different test conditions were calculated based on the Rosin-Rammler density distribution function. When the jet flow rate was 50 mL/min, the liquid drop particle diameters were centralized in a range of 0.7 ~ 1.0 mm. **Key words:** slurry ice, liquid-liquid atomization, particle diameter distribution, Pearson  $\chi^2$  fitting dominancy test, distribution function

热光伏发电系统水冷散热特性研究 = **Study of the Characteristics of a Water-cooled Heat Dissipating Device in a Thermophotovoltaic Power Generation System** [刊, 汉] YANG Tao, HAN Yu-ge, TAN Hong, XUAN Yi-min (College of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 461 ~ 465

Designed was a set of water-cooled heat dissipating device to control the operating temperature of photovoltaic cells. On this basis, the variation law governing the cell temperature and the pressure loss of the heat dissipating device at

different water flow rates and the corresponding output characteristics of the photovoltaic cells were studied. The test results show that when the temperature of the heat dissipating device is 1373 K , the cooling water flow rate reaches 25 mL/s and the cell temperature hits 302 K , the heat dissipating device thus designed can effectively control the temperature of the photovoltaic cells. By using the software Fluent , the influence of such structural parameters as the height and number of guide baffles , and the diameters of the cooling water inlet and outlet tubes etc. on the performance of the device was analyzed. The calculation results show that to increase the diameters of the cooling water inlet and outlet tubes can effectively reduce the pressure loss but not affect the heat dissipating effectiveness. The numerical simulation results are in a relatively good agreement with the test ones , thus verifying the correctness of the numerical simulation method. **Key words:** thermophotovoltaic power generation system , water-cooled heat dissipating device , cell temperature , pressure loss

注入模式下 DSG 槽式系统滑模温度控制器设计 = **Design of a Sliding Mode Temperature Controller in a DSG ( Direct Steam Generation) Trough Type System Under an Injection Mode** [刊, 汉] PAN Xiao-di , WANG Gui-rong ( College of Electromechanical Engineering , China Metering College , Hangzhou , China , Post Code: 310018 ) , JI Yun-feng ( Hangzhou Hollysys Automation Co. Ltd. , Hangzhou , China , Post Code: 310018 ) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26( 4) . - 466 ~ 470

With a solar energy array in a DSG ( direct steam generation) trough type solar energy power generation system under an injection mode serving as an object of study , designed was a temperature controller by creatively employing a sliding mode control and combining the PI ( proportional and integral) control algorithm with the cascade one. Moreover , the steam temperature control was studied by using a method integrating the theoretical analysis with the simulation investigation. Under the condition that the sunshine illumination intensity is allowed and the feedwater has been heated and stabilized at 200 °C , the steam temperature at the outlet of the solar energy array was controlled to stably and accurately attain 320 °C by adjusting the feedwater flow rate of the feedwater valve and the steam temperature at the outlet of various stages of the heat accumulator was controlled and stabilized at a value above the expected one , thus preliminarily solving the problem in controlling the stability and accuracy of the steam temperature at the outlet of the solar energy array. It has been found that to use the sliding mode algorithm to control the steam temperature of a solar energy array is fully feasible and the stability , accuracy and disturbance-resistant control performance are relatively good. **Key words:** DSG ( direct steam generation) , solar energy array , injection mode , nonlinear equation , outlet temperature , cascade control , sliding mode algorithm

严寒地区太阳能-土壤源热泵运行经济性分析 = **Analysis of the Operation Cost-effectiveness of a Solar Energy-Soil Source Heat Pump in Frigid Regions** [刊, 汉] LIU Yi , LI Bing-xi , FU Zhong-bin ( College of Energy