

The Summary of Silicon CPV with Liquid Immersion Cooling*

Chenyang Miao¹, Wei Xu¹, Ziyi Zhang¹, Jingyun Shen¹, Fan Yang^{2,3,4#}

¹School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing

²Solar Energy Research Center, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing

³Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing

⁴Division of Heat and Power Technology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden

Email: mcyVeronica@gmail.com, jimitiantang@gmail.com, 459978173@qq.com, 724181747@qq.com, #yang_fan@seu.edu.cn

Received: Mar. 20th, 2013; revised: Apr. 15th, 2013; accepted: Apr. 28th, 2013

Copyright © 2013 Chenyang Miao et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This article briefly describes the concentrating photovoltaic power generation technology and discusses composition and power generation efficiency of its system. The issues of cooling and heat dissipation, the key of the concentrating photovoltaic, are discussed in this article. The discussion focuses on the liquid immersion cooling technology which is one of the emerging concentrating photovoltaic heat radiation technologies in recent years. The basic principles and the application of the components of silicon concentrating photovoltaic solar cells are expounded. It investigates the nature and affecting factors of some common insulating cooling substances and summarizes the research achievements of silicon concentrating photovoltaic with liquid immersion cooling.

Keywords: CPV; Efficiency; Cooling & Heat Radiation; Liquid Immersion Cooling

液浸式冷却硅基聚光光伏研究综述*

缪晨阳¹, 徐伟¹, 张紫仪¹, 沈景云¹, 杨帆^{2,3,4#}

¹东南大学能源与环境学院, 南京

²太阳能技术研究中心, 东南大学能源与环境学院, 南京

³能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 东南大学能源与环境学院, 南京

⁴热电技术中心, 瑞典皇家理工大学, 斯德哥尔摩, 瑞典

Email: mcyVeronica@gmail.com, jimitiantang@gmail.com, 459978173@qq.com, 724181747@qq.com, #yang_fan@seu.edu.cn

收稿日期: 2013年3月20日; 修回日期: 2013年4月15日; 录用日期: 2013年4月28日

摘要: 本文简要介绍了聚光光伏发电技术, 讨论了其系统构成和发电效率。针对聚光光伏关键的冷却与散热问题进行了讨论。重点讨论了近年来新出现的聚光光伏散热技术——液浸式冷却技术, 对其基本原理和在硅基聚光电池组件的应用进行了阐述, 分析了常见绝缘冷却介质的性质及其影响因素, 并对目前液浸式冷却硅基聚光光伏的研究成果进行了综述。

关键词: 聚光光伏技术; 效率; 冷却与散热; 液浸式冷却

*东南大学大学生科研创新实验项目液浸式冷却硅基聚光光伏组件研究项目(No. 13032055); 教育部博士点新教师基金(2009009, 2120008)。

#通讯作者。

1. 引言

聚光光伏发电技术使用价格相对低廉的聚光反射玻璃或透镜来大幅减少昂贵的太阳电池的使用面积,充分利用光伏电池的光电转换能力,降低光伏发电的成本,从而被视为一种有效降低太阳能发电成本的重要途径。但是,聚光光伏发电技术的发电效率仍未达到较高水平,冷却与散热仍是其中的一大技术难题。太阳电池在高聚光大电流下,其工作温度的升高将导致效率的下降,因此,需要有效的散热设备。

2. 聚光光伏技术简介

一般来说,太阳电池可以分为常规太阳电池和聚光太阳电池。聚光光伏技术是采用廉价的聚光器将太阳光汇聚到面积很小的聚光太阳电池上进行光伏发电的一种技术^[1]。从1993年起Prog.Photovolt:Res.Appl.开始每半年公布一次光伏电池及其组件的最高效率,包括地面聚光光伏电池及其组件。大量实验数据表明:聚光电池的最高效率普遍高于非聚光太阳电池^[1-6]。

聚光光伏系统通常由聚光系统、光伏转换系统、系统平衡部分(BOS)、逆变器等几部分组成^[1]。聚光光伏系统利用聚光器将太阳光汇聚到小面积的聚光电池上,用低廉的聚光器取代了昂贵的光伏电池,同时聚光太阳电池的高效率可大大减少昂贵硅材料的使用,因此可以在很大程度上降低光伏发电成本。

2.1. 聚光光伏系统的效率

太阳能分频利用系统可以大大提高系统聚光光伏发电技术使用价格相对低廉的聚光反射玻璃或透镜来大幅减少昂贵的太阳电池的使用面积,充分利用光伏电池的光电转换能力,降低光伏发电的成本,从而被视为一种有效降低太阳能发电成本的重要途径。但是,聚光光伏发电技术的发电效率仍未达到较高水平,冷却与散热仍是其中的一大技术难题。太阳电池在高聚光大电流下,其工作温度的升高将导致效率的下降,因此,需要有效的散热设备。

一般来说,太阳电池可以分为常规太阳电池和聚光太阳电池。聚光光伏技术是采用廉价的聚光器将太阳光汇聚到面积很小的聚光太阳电池上进行光伏发电的一种技术^[1]。从1993年起Prog.Photovolt:Res.Appl.

开始每半年公布一次光伏电池及其组件的最高效率,包括地面聚光光伏电池及其组件。大量实验数据表明:聚光电池的最高效率普遍高于非聚光太阳电池^[1-6]。

聚光光伏系统通常由聚光系统、光伏转换系统、系统平衡部分(BOS)、逆变器等几部分组成^[1]。聚光光伏系统利用聚光器将太阳光汇聚到小面积的聚光电池上,用低廉的聚光器取代了昂贵的光伏电池,同时聚光太阳电池的高效率可大大减少昂贵硅材料的使用,因此可以在很大程度上降低光伏发电成本。

利用光伏电池建模及其输出特性仿真实验可以直观地看出:聚光光伏系统的效率受环境因素的限制^[4]。太阳能光伏电池是一个非线性电源,其将光能转换成电能的效率与多个变量均密切相关,例如,太阳辐射强度和环境温度^[7]等。

跟踪系统的可靠性和精度是影响聚光光伏系统输出效率的一个重要因素^[8]。通常来说,跟踪的可靠性、实时跟踪的精度越高,聚光率越高,太阳电池正常工作的时间越长,系统输出效率就越高。

其次,为增大输出功率,可将若干块太阳电池进行串、并连接,以组成太阳电池阵列^[9]。

聚光器材料与太阳能材料、聚光面聚光形式的不同选择也会影响聚光光伏系统的输出效率。

效率^[9]。分光板用限频反射法把太阳辐射分频为两部分:适合太阳电池发电的频段,被分频器反射导向到太阳电池板进行发电;其余部分透过分频器导向到热接收器转化为中温热能,供发电或制冷用。

目前聚光硅太阳电池的实验室最高效率为27.6%,而即使电池在实际系统中有这样高的转换效率,仍然有近60%左右的能量转化为热量,而且这种热量会随着聚光比的增加而增加。由于聚光光伏电池工作温度一般较高,如果电池上的热量不能及时散掉,电池的温度就会逐渐升高,温度的升高会使电池发电效率降低 $(-0.2\% \sim -0.4\% / ^\circ\text{C})$ ^[10],长时间的高温还会缩短电池的使用寿命。如何提高散热与冷却效率,控制太阳电池的工作温度,是影响目前光伏系统效率提高最主要的因素。

2.2. 聚光光伏系统的散热与冷却

光伏电池工作于高光强和大电流下温度会很快升高,入射到太阳电池上的太阳光能只有小部分转化

成电能(电池效率一般为 20%)^[11], 其余大部分转换为热能导致光伏电池的工作温度升高、电池短路电流的少量增加, 同时导致太阳电池电压的急剧降低以及转换效率的下降, 在短期内会影响电池的发电效率及输出功率, 长期在高温下工作由于构成电池组件的不同材料具有不同的热膨胀系数, 长期热应力的作用会使组件结构永久破坏, 引起太阳电池迅速老化并严重缩短其使用寿命^[12]。采用聚光方式^[13]后电池表面受到的辐射强度大大加强, 只有采用适当的散热措施疏导这些热能, 才让聚光条件下电池保持较低的工作温度, 确保光电转换效率维持在较高的水平。

太阳电池组件其工作温度随聚光率的增加而升高, 但下降幅度会随着聚光比的增加而降低^[10], 电池效率和输出功率随聚光率的增加先增后降, 并且存在一个最大的输出功率。一般而言, 太阳电池可在 -65°C ~ 125°C 之间正常工作。但在给定光强下, 太阳电池的输出功率会随温度的升高而降低, 呈线性递减关系, 使用寿命也随之降低。超过 90°C 后, 效率与温度呈非线性变化, 效率急剧下降。当太阳电池工作温度高达 200°C 时, 太阳电池只能工作 30 分钟^[14]。

3. 聚光光伏散热技术

为了使得太阳电池可以在聚光条件下工作, 必须降低太阳电池温度。降低太阳电池温度主要通过两种途径: 一是减少入射电池的热量; 二是增强电池散热^[9]。前者是将散热系统设计为直接滤过可转换为电能的有效太阳能, 从而有效降低太阳电池温度, 并对剩余太阳能进行再利用, 但此种方法目前可行性较低。一般聚光光伏系统主要采用第二种散热技术。

聚光光伏散热系统的设计应考虑到太阳电池温度、太阳电池组温度的均匀性、散热系统的可靠性、废热的利用、散热系统的实用性等因素。太阳能散热系统根据太阳电池的排列、聚光比、能耗等因素, 有不同的分类^[15]。根据主流的分类方法, 目前聚光光伏散热系统, 分为主动式散热和被动式散热两种。被动式散热系统耗能为零, 散热温度有限, 主要应用于聚光比较低的光伏发电系统。主动式散热系统散热量大, 可以更好地降低太阳电池的温度, 主要应用于高倍聚光太阳电池的散热^[16]。

太阳电池的常用冷却方法有空气冷却和水冷却方式^[17]。前者, 在太阳电池背面通过空气, 通过自然

或强制对流带走热量, 从而达到降温目的^[14]; 水冷却方式可分为自然循环冷却和强制循环冷却, 其设计关键是保证太阳电池与换热器表面间良好的热传导和电绝缘。

除此之外, 一些新型冷却技术^[18]也被研究开发应用到聚光光伏的散射系统中:

1) 热管冷却技术

热管是一种高效传热元件, 同时具有很好的均温性能, 非常适用于聚光条件下的电池冷却, 用于聚光光伏发电系统的散热时, 可缓解由于电池组件表面入射光不均匀导致电池效率降低的问题。

2) 微通道冷却技术

微通道冷却技术在电子冷却领域应用较为广泛。微通道冷却技术的优点主要有: 换热系数大, 散热效果好; 冷却器的体积小; 成本低; 材料选择范围宽。

3) 液体射流冲击冷却技术

该技术是指从微孔中喷出液体工质到被冷却表面, 工质与表面之间换热系数因液体强烈扰动而保持在很高的水平上。

4) 相变冷却技术

是指利用工质发生相变时可以大量吸收热量的特性对高温件进行冷却, 通常包括容积沸腾和流动沸腾。

综上所述, 目前常见的聚光光伏散热设计采用的均为主动式或被动式散热, 但在密集电池排布的大型聚光光伏系统中仍然存在一定的问题。因此, 近年来, 研究者们提出了一种新的冷却方式: 液浸式冷却, 即将太阳电池直接置于绝缘液体中^[17], 由流动的冷却液体将电池表面产生的大量热量带走, 消除了传统的间壁热阻, 使电池表面的温度分布更均匀, 可以高效的冷却电池, 并且容易组成聚光应用的热电联用系统。

4. 冷却液浸没式电池冷却系统

4.1. 液浸光伏技术简介

液浸光伏技术, 即将太阳电池或光伏板直接浸没于绝缘冷却介质中使用, 由流动的冷却液体将电池表面的热量带走, 可消除现有主动冷却方式中的间壁热阻。相比于其他散热系统, 该系统的设计理念是将太阳电池直接浸没在自循环的冷却液中, 从而使太阳电

池热量可从太阳电池的两个表面共同散失,冷却液同时作为光学过滤器,将较低辐射能或不能被太阳电池转换为电的光在到达太阳电池前吸收。通过冷却液和系统压力的选取,可以使太阳电池有很好的温度均匀性和很高的换热系数,使光伏发电系统在最佳工作温度工作,达到最高效地运行^[19]。2003年到2007年间,Tanaka先后申请了三篇专利指出液浸液体可以起到聚光的作用增加电池的输出^[20-22]。Ugumori和IKeya将太阳电池浸没在某些有机液体里,发现电池的电流随着选用液体分子间永久偶极矩的增加而增加^[23]。但是,冷却液浸没式电池冷却系统仍存在不少弊端。冷却液在滤去无用太阳辐射的同时,也会被视为类镜面介质将一部分可用能反射出去,进而降低光辐射强度。其次,该系统的冷却液选择、太阳电池性能等因素需严格控制才能达到最佳效果。

对中倍聚光条件下太阳电池液浸散热特性进行模拟实验研究中表明采用液浸冷却方式能够从模拟片表面带走大量的热负荷,同时能够将模拟片的温度冷却,介质中掺杂气泡后能够强化模拟片与介质间对流换热^[24]。

4.2. 液浸冷却液体的选取

Abrahamyan等发现甘油可以将太阳电池的效率提高40%~60%^[25]。2010年印度的Maiti等试图选择合适的液体来吸收红外和紫外区的光进而从根源上解决电池在聚光条件下的散热问题,通过分析最终选择了混合溶剂(乙二醇:丙二醇:甘油 = 1:1:3, 4 ppm的荧光增白剂)作为候选液体^[26]。朱丽等人经过实验发现去离子水也具有较好的冷却与散热效果^[27]。

基于聚光光伏系统的工作特点及期望实现高效冷却聚光太阳电池的目的,理想液浸冷却液体需具备的性质包括^[12]: 1) 液浸液体的光谱透过率与聚光太阳电池的响应光谱要匹配,即在聚光电池可以产生电能的波段透过率要高,而在电池不能利用转换成电能的波段吸收可尽量高; 2) 折射率尽量和太阳电池的匹配,这样可以减少光的反射损失; 3) 由于和聚光太阳电池直接接触,所以要求有良好的电绝缘性; 4) 优异的流动和传热性能,即粘度低,传热性能好; 5) 沸点不要过低,以避免受热后气泡的形成(气泡可导致光的散射); 6) 物化性质稳定,受紫外光的影响小,不和

所接触的材料反应; 7) 无毒,环保,价廉易得。

液体的光谱透过率是冷却液体选取的重要指标。在对四种电绝缘性很好,折射率匹配(介于空气($n_0 = 1.000$)和电池减反射层二氧化硅($n_{\text{SiO}_2} = 1.460$)之间)可以起到减反射膜的作用的候选冷却液:去离子水,异丙醇,乙酸乙酯和二甲基硅油(其中去离子水的散热能力要比其它三种液体强)^[28]的研究实验中发现:液浸液体层的存在的确实会改变入射到太阳电池表面的光强与光谱分布。不过四种候选液体在硅太阳电池的响应光谱段300~1200 nm范围内透过率都很高,而在长波段会有不同程度的吸收,尤其是去离子水。这样液浸液体同时可以充当低能量光子的过滤器,而对太阳电池有用的那部分光几乎完全透过,非常有利于太阳电池的散热,并且容易组成电热联用系统。和传统封装太阳电池材料EVA或硅胶的光谱透过率相比,这四种液体的光谱透过率要高,同样光照下会获得更多的输出功率。基于太阳电池的归一化光电流密度 J_{mp} 的计算结果可知,这四种候选液体浸没硅太阳电池时对其产电量的影响不大但仍有一定影响,二甲基硅油浸没硅太阳电池导致的功率损失最小,而去离子水引起的损失最大。去离子水浸没产生的功率损失要比二甲基硅油多5%左右。但是,这四种候选液体浸没多结太阳电池(300~1800 nm)时对其产电量的影响比较大,尤其对于去离子水和异丙醇。是因为这几种液体在近红外波段的透过率不是很高。所以四种液体均不太适合作为浸没冷却采用多结电池的聚光光伏系统^[29]。

为了保证光伏冷却系统的可靠运行,需要考察冷却介质的环境耐受性,而高温和强紫外线是两个主要环境影响因素。考虑高温和紫外线对冷却液的影响时发现,经过高温实验和耦合实验后,丙三醇的分子结构没有发生明显变化,但是紫外实验后丙三醇中产生了极微量的羰基,证明紫外线能够使丙三醇发生氧化,只是由于实验时间比较短,变化不是很明显;并且,紫外和高温都对丙三醇的透过率产生影响;另外,醇类液体均含有OH官能团,所以初步实验表明,醇类液体不适于用作在强紫外条件下工作的聚光光伏系统的液浸液体^[30]。

4.3. 冷却液温度及流动方式的探究

冷却液温度对聚光硅电池组件的冷却效率也有

一定影响。对中倍聚光条件下太阳能电池液浸散热特性进行模拟实验研究中, 选用功率损失最小的二甲基硅油为冷却介质, 采用长弧氩灯模拟聚光条件, 选择模拟材料制作太阳能电池模拟片来探究温度对电池组件的冷却效率的影响, 研究表明: 通过改变盘管换热器中冷却水流量改变进口温度 t 和介质在玻璃容器中的雷诺准数 Re 时, 当 $17^{\circ}\text{C} < t < 46^{\circ}\text{C}$, $2000 < Re < 18,269$ 时, 采用液浸冷却方式能够从模拟片表面带走 72.2 kw/时 的热负荷, 同时能够将模拟片的温度冷却到 70°C , 但冷却液温度的改变对对流换热温差 Δt 和对流传热系数 a 影响较小。由此得出结论: 一定聚光比时, 电池组件的温差随雷诺准数 Re 增大而变小, 证明增大 Re 能够使电池组件获得更均匀的温度分布; 而流动状况一定时, 电池组件表面温度随着冷却液温度和聚光比的升高近似线性增加^[24]。因此, 通过减小冷却液进口温度 t 和增大 Re , 能够取得较好的冷却效果。

不同聚光比下流动状况对模拟片散热特性也有一定影响。一般来说, 液浸液流动速度越快, 散热效率越高, 组件温度分布也越均匀^[31]。当管道中流体的流量超过 20 耐/h , 流体在循环流回介质容器时对容器中原有流体的冲击非常剧烈, 将液面上方的空气裹挟进液体中, 掺杂气泡的液体通过离心泵入口管路进入循环管道中, 实验过程中可以观察到管道中的流体中不再是单相流, 而是气液混合的两相流, 可见气泡的存在强化了模拟片与介质间的对流换热^[24]。

为了提高光伏板的工作效率降低光伏发电成本, 近几年人们也开始把液浸技术引入光伏板中, 即让水流过光伏板的上表面或是把整个光伏板浸没在水中。Rosa-Clot 等^[32]和 Lanzafame^[33]等将单晶硅光伏板浸没在浅水中发现系统输出提高 $10\% \sim 15\%$ 左右。Krauter^[34]则发现让水仅流过光伏板的上表面也能使系统效率提高 $8\% \sim 9\%$ 。Odeh 和 Behnia^[35]的报道指出仅利用水冷光伏板的上表面也提高了光伏水泵的性能。

4.4. 液膜厚度对电池转换效率的影响

早在 1976 年, Chappell 和 White^[36]就表征了硅电池上覆有水层时的性能。他们的结果表明当硅电池上覆有 10 mm 厚的水层时, 16.3% 的入射光会被水吸收, 这样会稍微降低电池的输出功率, 即从 13.8% 降为

13.1% 。后来, Muaddi 和 Jamal^[37]也分析了硅电池在水面下的光谱响应和效率, 发现当硅电池位于水面下时其获得的总能量和光谱宽度会降低, 降低的程度取决于水的深度。实验^[12]也发现, 在一定聚光条件下, 有液膜时聚光硅太阳能电池的导电性能以及转换效率都要高于无液膜时的值。而且在去离子水^[27], 异丙醇, 乙酸乙酯和二甲基硅油^[38]中均是如此。下表是聚光硅太阳能电池在有、无 1.5 mm 液膜时的转换效率百分比。其中, #1、#2、#3、#4 分别代表去离子水, 异丙醇, 乙酸乙酯和二甲基硅油; 测量的相关物理量有电池的开路电压 V_{oc} , 短路电流密度 J_{sc} , 转换效率 η 以及反向饱和电流密度 J_0 。

由表 1 中可以看出, 液浸在异丙醇中的聚光硅太阳能电池#2 的效率变化最大, 为 15.2% ; 其次为液浸在二甲基硅油中的电池#4, 它的变化百分比为 10.2% ; 最小的是液浸在去离子水中的电池#1, 但是也高达 8.5% 。由此可见, 薄液膜(1.5 mm)可以提高聚光硅太阳能电池的导电性能, 且不同种类的液体提高效果不同, 在上述四种液体中, 异丙醇的提升效果最好, 达到 15.2% , 去离子水的效果最差, 为 8.5% ^[12]。

Table 1. V_{oc} , J_{sc} , η and J_0 of silicon CPV cells with and without 1.5 mm liquid immersion at $30X$ and 25°C , with the optical effect and electrical effect of the liquid immersion contributing to the changing percentage of cell efficiency

表 1. 聚光硅太阳能电池在有、无 1.5 mm 液膜时的 V_{oc} , J_{sc} , η 和 J_0 ($30X$, 25°C), 及液膜光学效应和电学效应引起效率变化的百分比^[12]

电池 (1.5 mm)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (A/cm^2)	η (%)	J_0 (A/cm^2)	光学效 应(%)	电学效 应(%)
#1/无	707	0.97	17.9	$2.03\text{E}-14$		
#1/有	712	1.05	19.4	$5.66\text{E}-15$	6.9	1.6
变化百分比(%)	0.7	8.5	8.5	-72.16		
#2/无	733	0.97	18.7	$1.02\text{E}-13$		
#2/有	739	1.13	21.7	$3.76\text{E}-14$	7.2	8.0
变化百分比(%)	0.8	15.5	15.2	-63.03		
#3/无	717	0.99	18.2	$1.29\text{E}-12$		
#3/有	720	1.08	19.8	$7.05\text{E}-13$	7.2	1.5
变化百分比(%)	0.4	9.1	8.7	-45.29		
#4/无	732	0.96	17.6	$4.15\text{E}-14$		
#4/有	736	1.05	19.4	$2.35\text{E}-14$	7.3	2.9
变化百分比(%)	0.5	9.1	10.2	-43.34		

薄液膜浸没时电池转换效率提高主要原因包括：薄液膜引起聚光硅太阳电池表面菲涅尔反射降低的光学效应和液体分子的吸附引起电池表面复合速率降低的电学效应两个方面^[12]。所谓的光学效应就是由于液体的存在减少了电池表面的菲涅尔反射，使电池可以收集更多的光。由实验结果计算可知，液体的折射率与电池减反射层的折射率越接近，电池表面的菲涅尔反射就会越少。电学效应是指液体分子吸附在电池表面，改变了电池表面的电场分布，引起表面复合速率的变化，从而改变电池的效率。液体吸附对电池效率的影响过程主要取决于液体的性质，电池的结构以及电池减反射层的材料和厚度。由表中数据可知，极性液体(#1, #2)的效率要比非极性液体的大(#3, #4)。

然而，液体的吸收作用随着液膜厚度的增加开始增强，在厚液膜(9 mm)的条件下，电池的最大转换效率有所下降。但对于二甲基硅油，电池性能随着液膜厚度的增加变化不是很明显。同时，不同液浸液体在相同液膜厚度时的吸收也不同，其中去离子水在聚光硅太阳电池有用光谱段(300~1200 nm)的吸收最多，其次为异丙醇，吸收最少的为二甲基硅油^[12]。所以液膜厚度对聚光硅太阳电池的电性能影响很大，液体最优厚度的确定需要结合电池热性能的分析，而且不同种类液体在相同液膜厚度时对电池性能的影响也会不同。

4.5. 液浸没及长期浸没后对聚光硅太阳电池性能的影响

实验发现，液浸液体若选择低沸点介质来冷却太阳电池，可以减少寄生电耗，增加电池的功率输出。同时，液浸对电池光电流和暗电流也会产生影响，使得电池的电流随着选用液体分子间永久偶极矩的增加而增加，进而增大输出功率。此外经计算，冷却液流过光伏板的上表面能使系统效率提高 8%~9%。这些电池性能的提高主要是因为冷却液的浸没或流动可以减少电池组上表面的反射损失(冷却液的折射率介于空气和封装玻璃之间)，而且还可以有效地降低硅电池组的工作温度。分析硅电池在水面下的光谱响应和效率，结果表明，当硅电池组位于水面下时其获得的总能量和光谱宽度降低，降低的程度取决于冷却液的深度，不过当硅电池组置于少许冷却液中，其光谱的变化主要在长波区，包括可见区的短波部分几乎未

发生变化。即这种变化仅改变了电池上获得的辐照度，并不会影响光种类的吸收。因此，液浸可以减低电池温度，减少能量的消耗损失，提高聚光硅太阳电池的转换效率。

同时，考虑到聚光硅太阳电池长期浸没于液体内，其性能可能受到影响，需选择合适的冷却液确保液体在与聚光硅电池的长期接触中不影响正常工作，以期达到既能够冷却又不会损害电池电性能的效果。

对上述四种液体进行实验发现，乙酸乙酯、二甲基硅油在和聚光硅电池长期常温接触(6 个月)中不会影响电池的电性能，而聚光硅电池组件在去离子水、异丙醇中长期浸没后电性能会发生衰减。对于异丙醇，其衰减主要是由冷却液与聚光硅电池周围的密封胶硅胶发生反应造成的。由于部分冷却液容易透过聚光硅电池周围的密封胶硅胶挥发出去，所以其对应的样品出现很多气泡，进而使其短路电流密度和转换效率随着浸没时间出现逐渐下降的趋势^[39]。消除此影响后重复实验发现，乙酸乙酯、二甲基硅油以及异丙醇对聚光硅电池长期接触没有影响。而去离子水中的电池组连接点处会发生电化腐蚀，锡铅焊连接电池上黑色锡铅氧化物和环氧树脂连接电池上红色沉积物的出现经分析说明连接有铜片电极的电池在去离子水中发生了电偶腐蚀。这些结果说明了聚光硅电池本身经过长期的去离子水浸没后并没有被损坏，只是连接电池的材料在去离子水中发生了电偶腐蚀并最终导致连接有铜片电极的电池不可测^[12]。因此，若想采用去离子水作为冷却液，必须采取一定的措施来消除电池在去离子水中发生的电偶腐蚀。

5. 总结

开发新能源和可再生清洁能源是全世界面临的共同课题。在新能源中，光伏发电倍受瞩目^[40]，但由于过高的成本，目前还未能充分进入市场。聚光光伏发电技术是用比较便宜的聚光器来部分代替昂贵的太阳电池，以减少给定功率所需的电池面积来降低成本，而跟踪技术的使用使得聚光光伏系统一天内的发电时间延长。然而采用聚光的方法，使太阳电池在凡倍乃至凡十倍的光强下工作，太阳电池温度急剧上升，使得太阳电池发电效率大大下降。因此，太阳电池冷却技术的研究是必要的，也是必须的。

现有的散热与冷却技术已有了一定的发展。冷却

效果较优的液浸光伏技术的研究大部分集中在常规硅太阳电池或光伏板方面,将电池浸在绝缘循环冷却剂中,可获得均匀的电池表面温度和较高的传热系数,但同时,如何选择最为合适的冷却介质使得系统保持更稳定的工作温度、减少对太阳辐射能的降低,及长期使用对太阳电池性能的影响,仍有待进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 田玮, 王一平, 韩立君, 刘永辉, 张金利. 聚光光伏系统的技术进展[J]. 太阳能学报, 2005, 26(4): 597-604.
- [2] 王一平, 文波, 朱丽, 韩新月, 方振雷. 聚光光伏电池及系统的研究现状[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 433-438.
- [3] 尹淞. 太阳能光伏发电主要技术与进展[J]. 电力技术, 2009, 10: 2-6, 14.
- [4] 王琴, 姜丰, 钟清瑶. 光伏电池建模及其输出特性仿真[J]. 低压电器, 2011, 10: 10-12.
- [5] 郁济敏, 付文莉. 美国聚光太阳电池技术进展[J]. 电源技术, 2009, 133(9): 828-830.
- [6] M. A. Green, K. Emery, D. L. King, et al. Solar cell efficiency tables (version 22). Research and Application, 2003, 11(5): 347-352.
- [7] 杜斌, 张耀明, 孙利国. 低倍聚光光伏系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(11): 1328-1332.
- [8] 陈磊. 太阳能发电系统的原理及发电效率的提高[J]. 宁夏机械, 2009, 4: 47-48.
- [9] 王宇辰, 金以明, 杜张李, 张坤, 钱之龙, 杨帆. 聚光光伏散热系统综述[J]. 太阳能技术与产品, 2011, 11: 16-55.
- [10] S. Yoon, V. Garboushian. Reduced temperature dependence of high-concentration photovoltaic solar cell open-circuit voltage (Voc) at high concentration levels. 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Waikoloa, 5-9 December 1994: 1500-1504.
- [11] 孙健. 聚光光伏电池的热平衡与冷却[J]. 电力与能源, 2011, 32(2): 158-161.
- [12] 韩新月. 液浸冷却线性聚光光伏系统中聚光硅太阳电池的性能研究[D]. 天津大学, 2011.
- [13] 吴玉庭, 朱宏晔, 任建勋, 梁新刚. 聚光与冷却条件下常规太阳电池的特性[J]. 清华大学学报, 2003, 43(8): 1052-1055.
- [14] 张晓霞, 侯竞伟, 殷盼盼, 张国. 太阳能光伏电池在聚光条件下冷却方式的研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2008, 24(6): 1091-1098.
- [15] A. Royne, C. J. Dey and D. R. Mills. Cooling of Photovoltaic cells under concentrated: A critical review. Solar Energy Materials & Solar Cell, 2005, 86(1): 451-483.
- [16] 刘立平, 包建强. 聚光型太阳能电池的冷却方法[J]. 上海市制冷学会 2009 年学术年会论文集, 2009, 12: 143-145.
- [17] 朱丽, 王一平, 孙勇, 方振雷, 尹兆江. 利用直接接触换热强化聚光光伏电池的热量散失[J]. 化学工程, 2010, 38(3): 22-25.
- [18] 翁政军, 杨洪海. 应用于聚光型太阳能电池的几种冷却技术[J]. 能源技术, 2008, 29(1): 16-18.
- [19] T. Ugumori, M. Ikeya. Efficiency increase of solar cells operated in dielectric liquid. Proceedings of the 2nd Photovoltaic Science and Engineering Conference, Tokyo, 2-4 December 1981: 77-80
- [20] K. Tanaka. Solar energy converter using optical concentration through a liquid. USA: US 2003/0029497 A1, 2003.
- [21] K. Tanaka. Solar energy converter using a solar cell in a shallow liquid layer. USA: US 6583349 B2, 2003.
- [22] K. Tanaka. Solar energy converter using a solar cell in a shallow liquid-gel layer. USA: US 7244888 B1, 2007.
- [23] T. Ugumori, M. Ikeya. Efficiency increase of solar cells operated in dielectric liquid. Japanese Journal of Applied Physics, 1981, 20(2): 77-80.
- [24] 孔建国, 朱丽, 王一平, 孙勇, 黄群武. 中倍聚光太阳电池液浸散热特性的模拟实验[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1592-1596.
- [25] Y. Abrahamyan, V. Serago, V. Aroutiounian, et al. The efficiency of solar cells immersed in liquid dielectrics. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 73(4): 367-375.
- [26] S. Maiti, K. Vyas and P. K. Ghosh. Performance of a silicon photovoltaic module under enhanced illumination and selective filtration of incoming radiation with simultaneous cooling. Solar Energy, 2010, 84(8): 1439-1444.
- [27] L. Zhu, R. Boehm, Y. P. Wang, et al. Water immersion cooling of PV cells in a high concentration system. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(2): 538-545.
- [28] X. Y. Han, Y. P. Wang and L. Zhu. Electrical and thermal performance of silicon concentrator solar cells immersed in dielectric liquids. Applied Energy, 2011, 88: 4481-4489.
- [29] Y. P. Wang, Z. L. Fang, L. Zhu, Q. W. Huang, Y. Zhang and Z. Y. Zhang. The performance of silicon solar cells operated in liquids. Applied Energy, 2009, 86: 1037-1042.
- [30] 朱丽, 王一平, 张志英, 黄群武, 张妍. 液浸冷却系统中丙三醇液体的耐受性分析[J]. 化学通报, 2009, 12: 1122-1128.
- [31] L. Liu, L. Zhu, Y. P. Wang, et al. Heat dissipation performance of silicon solar cells by direct dielectric liquid immersion under intensified illuminations. Solar Energy, 2011, 85(5): 922-930.
- [32] M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, et al. Submerged photovoltaic solar panel: SP2. Renewable Energy, 2010, 35(8): 1862-1865.
- [33] R. Lanzafame, S. Nachtmann, M. Rosa-Clot, et al. Field experience with performances evaluation of a single-crystalline photovoltaic panel in an underwater environment. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2492-2498.
- [34] S. Krauter. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2004, 82(1-2): 131-137.
- [35] S. Odeh, M. Behnia. Improving photovoltaic module efficiency using water cooling. Heat Transfer Engineering, 2010, 30(6): 499-505
- [36] T. I. Chappell, R. M. White. Characteristics of a water absorber in front of a silicon solar cell. Applied Physics Letters, 1976, 28(8): 422-423.
- [37] J. Muaddi, M. Jamal. Spectral response and efficiency of a silicon solar cell below water surface. Solar Energy, 1992, 49(1): 29-33.
- [38] G. Carcangiu, M. Sardo, I. Carcangiu and R. Sardo. Photovoltaic panel and solar-panel unit made using photovoltaic panels of the same sort. USA: US2008/0092876A1, 2008.
- [39] X. Y. Han, Y. P. Wang, L. Zhu, H. J. Xiang and H. Zhang. Mechanism study of the electrical performance change of silicon concentrator solar cells immersed in de-ionized water. Energy Conversion and Management, 2012, 53: 1-10.
- [40] 张海波. 太阳能电池输出特性的分析及检测[J]. 中国航海学会航标专业委员会沿海、内河航标学组联合年会学术交流论文集, 2003, 11: 225-227.