

## 塔式太阳能热发电接收器的研究进展

许佩佩, 刘建忠, 周俊虎, 岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 太阳能接收器是塔式太阳能热发电集热系统的重要组成部分。文中介绍了目前国内外已有的间接外露式、间接管状、直接无压式、直接有压式、复合型和多级型 6 种主要类型的塔式接收器的工作原理及研究现状。综合研究的现状及结果表明: 间接式接收器技术风险低, 易实现大容量蓄热, 可连续、稳定发电, 但热力损失大、效率低。直接式接收器换热效率高, 可达 80%, 但蓄热技术尚不成熟, 难以实现连续发电。复合型和多级型发电成本可降至 0.082 美元/度, 具有巨大的商业应用前景。

**关 键 词:** 太阳能; 热发电; 接收器

中图分类号: TK513.3 文献标识码: A

## 引 言

20 世纪 80 年代以来, 塔式太阳能热发电技术得到了迅速的发展。这种电站的运行参数和高温高压的常规电站基本相同, 因此不仅拥有比较高的发电效率, 而且容易获得相关的配套设备<sup>[1]</sup>。国内外多年的研究表明, 塔式太阳能热发电技术是最有可能实现大功率发电、引起能源革命, 并最终替代常规能源最经济的手段之一, 拥有广阔的商业应用前景<sup>[2-6]</sup>。

塔式太阳能热发电系统主要由聚光子系统、集热子系统、蓄热子系统和发电子系统部分组成。它是在很大面积的场地上装有许多台定日镜, 每台都各自配有跟踪结构, 准确地将太阳辐射反射集中到一个高塔顶部的接收器上。接收器上的聚光比可超过 1000, 把吸收的太阳辐射能转换成热能, 再将热能传给工质, 经过蓄热环节, 再输入热动力机, 膨胀做功, 带动发电机, 最后以电能的形式输出。

## 1 塔式太阳能接收器

在塔式太阳能热发电系统中, 太阳能接收器是

塔式太阳能热发电集热系统的重要组成部分, 是光热转换的关键部分。塔式太阳能接收器, 按工作介质的吸热方式, 主要可分为间接式和直接式两大类。

## 1.1 间接式太阳能接收器

间接式太阳能接收器的工作特点主要是接收器中工质的吸热过程不直接发生在太阳照射面上, 而是通过将入射聚焦的辐射太阳能先加热受热面, 受热面受热升温后再穿过壁面将热量传递给另一侧的工质<sup>[7]</sup>。典型的管状接收器就属于这一类, 通过在管内流动的工作介质, 吸收圆管外表面的辐射太阳能。管状接收器又可分为外露式管状太阳能接收器和腔式管状太阳能接收器。

## 1.1.1 外露式管状太阳能接收器

外露式管状太阳能接收器, 可采用水—蒸汽、熔盐、空气等多种工质。应用的代表是美国的塔式热发电电站—太阳能 1 号和太阳能 2 号。图 1 为太阳能 2 号电站的系统示意图, 接收器中的熔盐介质被加热到 565 °C 时, 输送到高温储罐储存, 需用时将高温熔盐泵入蒸汽发生器内, 加热给水, 产生 500 °C 以上的蒸汽, 推动汽轮机发电。高温熔盐在蒸汽发生器中经热交换后, 温度降至 288 °C, 被泵入低温储罐中存储, 需用时, 再泵入塔顶上的接收器内进行加热<sup>[8]</sup>。太阳能 2 号电站采用外圆柱面形管板式接收器。

如图 2 和图 3 所示, 在 24 块面板上一共安装了 768 根内径 2.6 cm、壁厚 0.12 cm 的不锈钢管, 整个接收器的直径为 5.1 m、高 6.2 m。较之太阳能 1 号电站中的工作介质采用水—蒸汽, 太阳能 2 号电站的工作介质改为熔盐, 熔盐系统采用无压运行, 对吸热管强度要求低, 因此能承受更高的辐照量, 吸热器可做得更紧凑。吸热管外表面上涂有坚固的 Pyromark(有机硅耐高温涂料) 涂层, 则可实时吸收 95% 的辐射太阳能。太阳能 2 号电站运行测得数据表

收稿日期: 2013-09-15; 修订日期: 2013-12-16

作者简介: 许佩佩(1989-), 女, 江苏镇江人, 浙江大学硕士研究生。

明 在平均太阳辐射能流密度  $430 \text{ kw/m}^2$  的条件下，接收器的额定功率达  $42.2 \text{ MW}^{[9]}$ 。工质流出接收器时能够达到设计的温度值<sup>[11]</sup>。

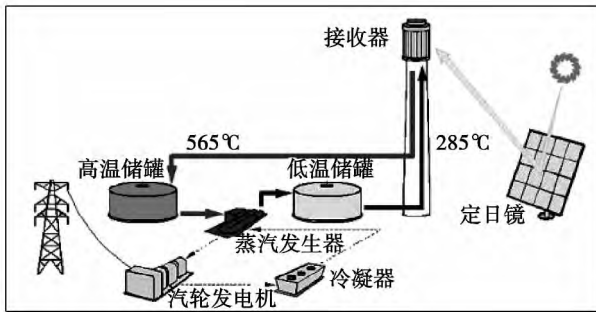


图 1 “太阳能 2 号”塔式太阳能热发电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of a “Solar Two” tower type power generation system

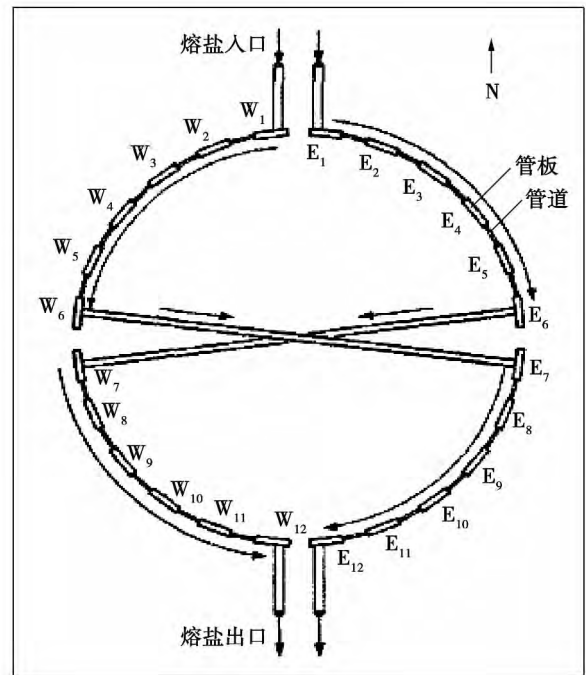


图 3 “太阳能 2 号”管状接收器剖面图

Fig.3 Section view of a “Solar Two” tubular receiver

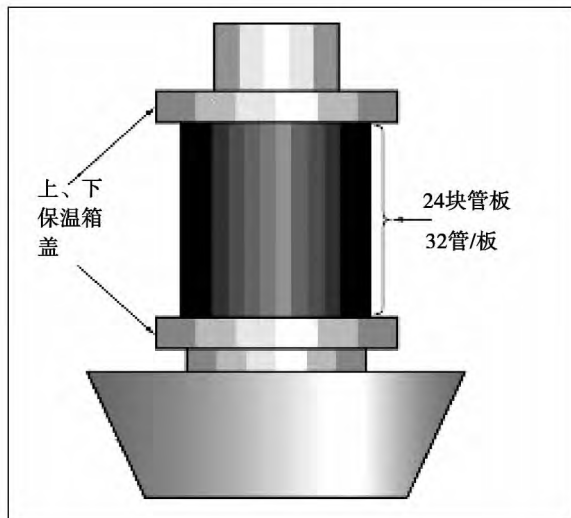


图 2 “太阳能 2 号”管状接收器

Fig.2 A “Solar Two” tubular receiver

系统正常工作时,工质熔盐分两路从正北方向进入接收器。如图 3 所示,一路工质向西流动,通过管板  $W_1$  至  $W_6$  后,横跨到东侧的管板  $E_7$ ,然后沿着东南侧的各管板,一直流到正南侧,最后经管板  $E_{12}$  流出接收器。另一路工质向东流动,通过管板  $E_1$  至  $E_6$  后,横跨到西侧的管板  $W_7$ ,然后沿着西南侧的各管板,一直流到正南侧,最后经管板  $W_{12}$  流出接收器。如图 4 所示,在同一回路中,相邻两管板间的流动,其按 U 形方向流动<sup>[10]</sup>。这样东西交叉的回路设计,既可以保持两路载热流体吸热量的基本平衡,又可以使熔盐工质在接收器内充分吸热,以确保熔盐

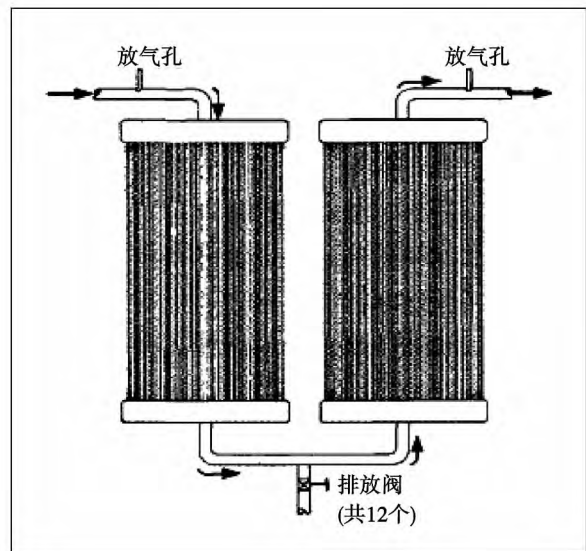


图 4 相邻管板间流向图

Fig.4 Chart showing the flow direction between any two adjacent tube sheets

外露式管状太阳能接收器构造简单、成本低,而且它可以接收来自塔体四周  $360^\circ$  范围内,通过定日镜反射、聚焦的辐射太阳能,这样有利于定日镜场的布局设计,促进太阳能的大规模利用。然而由于吸

热圆管直接暴露在外部环境中,多风天气时,辐射、对流热损失较大,因此外露式管状太阳能接收器的热效率相对较低。

### 1.1.2 腔式管状太阳能接收器

腔式管状太阳能接收器中,吸热管都布置在腔体内,并设有一个窗口接受辐射太阳能。腔式窗口以一定的倾斜角,面向定日镜方向,太阳能辐射经窗口进入腔内,与接收器的工作介质在腔体内发生热交换。我国首座兆瓦级的塔式电站——大汉电站,2006年在北京延庆地区开始建设。电站整体系统示意图如图5所示<sup>[12]</sup>。

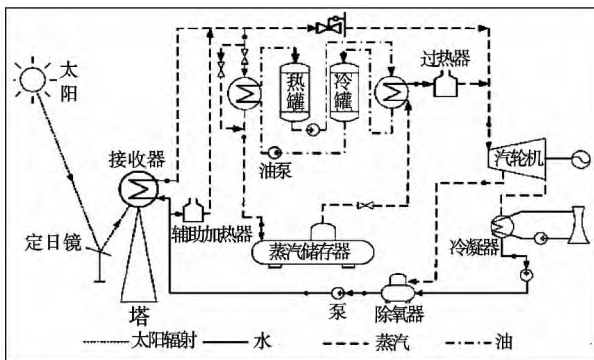


图5 大汉电站系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DAHAN power plant system

电站由太阳能聚焦装置和蒸汽发生子系统、热能储存子系统和发电子系统组成。接收器内产生过热蒸汽,直接推动汽轮机发电,冷凝水经除氧器除氧,又送入接收器内循环使用。当接收器内产生的蒸汽量大于汽轮机发电所需汽量时,剩余的蒸汽进入热能储存子系统,与蓄热介质油进行热交换,储存热能。当接收器不能产生足够的蒸汽时,储存的热能将被释放。另外,该电站设有以天然气为燃料的辅助加热装置,保证系统的稳定运行。

电站中采用的腔式管状接收器,如图6所示。该接收器采用强迫循环技术,呈六棱柱型。接收器中,辐射能流密度的分布规律为:后墙最强;右后墙和左后墙次之;底部、右前墙和左前墙最弱,即能流密度在后墙、右后墙和左后墙的中心附近处最强,往四周方向依次减弱<sup>[13]</sup>。根据辐射能流密度的分布规律,在接收器腔体内侧的后墙及左右后墙处,布置由七组受热面并联而成的蒸发面,在左右前墙处,布置有四组过热装置。接收器内工作介质为水—蒸汽,产生的高压蒸汽直接推动汽轮机做功发电。水

具有热导率高,无毒、无腐蚀,易于运输等优点。不过水—蒸汽作为工作介质也会有技术难点:高温时会产生高压问题,对管路系统要求高,吸热过程中存在两相流问题,控制系统复杂。因此实际使用过程中,系统的温度和压力均不能太高。2012年8月9日,大汉太阳能热发电实验电站全系统贯通,首次太阳能发电实验获得成功,蒸汽参数达到蒸汽温度为400℃,蒸汽压力为4 MPa。

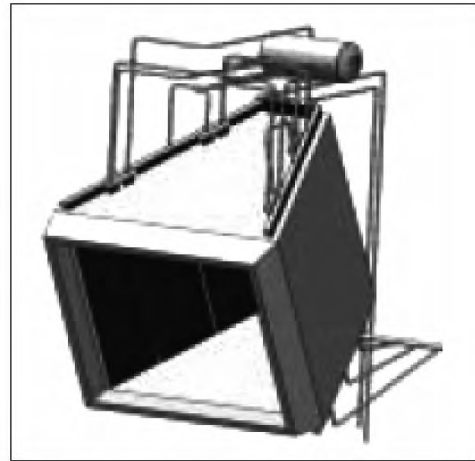


图6 腔式管状接收器示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a cavity type tubular receiver

腔式管状接收器内的圆管还有螺旋型布置方式,其制造及安装方便,通常可作为多级串联接收器的第一级或者预热装置使用,以降低成本。螺旋型结构如图7所示,工作气体从入口处进入,沿螺旋管盘旋流动,吸收太阳能辐射热量,吸热管为铬镍铁合金600,可承受800℃的运行温度。为了能达到更高的运行温度,西班牙阿尔梅里亚太阳能测试平台(Plataforma Solar de Almeria,简称为PSA)已采用短纤维增强碳化硅陶瓷材料制作螺旋型腔式管状接收器,运行温度最高可达到1000℃<sup>[14]</sup>。

腔式管状接收器相比于外露式,吸热管布置于腔体内,辐射、对流热损失都较小,拥有更高的热效率。但聚焦太阳辐射只能从单面采光口进入,定日镜场只能在约120°范围内布置,限制了太阳能大规模使用。

## 1.2 直接式太阳能接收器

直接式太阳能接收器的工作特点是利用太阳能辐射加热受热面再由接收器向工质的传热过程,发生在同一表面。如图8所示,含有多孔结构的吸热

体吸收辐射太阳能,空气被强制通过吸热体,与多孔结构发生对流换热后升至高温。直接式太阳能接收器又可分为无压式直接照射太阳能接收器和有压式直接照射太阳能接收器两类。表 1 中列出了目前国际上主要直接式接收器的典型特性<sup>[15-18]</sup>。

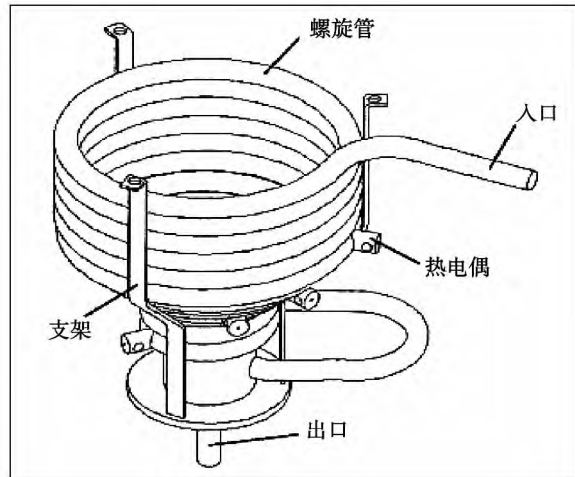


图 7 螺旋型腔式管状接收器示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a spiral cavity type tubular receiver

### 1.2.1 无压式直接照射太阳能接收器

无压式直接照射太阳能接收器通常要求吸热体具有较高的吸热性、优良的导热性和渗透性,并且具有较强的耐热性和较大的比表面积。早期的直接照射太阳能接收器多采用金属密网作为吸热体,空气作为工作介质,如此具有环境友好、无腐蚀性、不易

燃及结构简单等优点。1986 年以来,PSA 一直致力于直接照射太阳能接收器的研究,2001 年西班牙能源、环境和技术研究中心(CIEMAT-PSA)又设计了一个新型接收器(SIREC)<sup>[19]</sup>。该接收器的有效直径为 760 mm,深 190 mm,并设有冷空气回流系统。测试结果表明,平均入射能流密度为 300 kW/m<sup>2</sup>时,空气的平均出口温度可达到 710 °C,并且热效率为 48%,冷空气回流率在 42%到 45%之间。此类接收器受到不稳定的太阳能照射时,容易使吸收体局部温度剧烈变化从而产生热应力,因此该类接收器所能承受的太阳能热流密度一般不超过 500 kW/m<sup>2</sup>。并且吸热体为金属密网,工作温度不能超过 800 °C。无压式直接照射太阳能接收器一般用于如图 9 形式的塔式电站中。在接收器中被加热的热空气,输往蒸汽发生器或者进入储热罐,与储热介质进行热交换,储存热能,保证电站的连续运行。

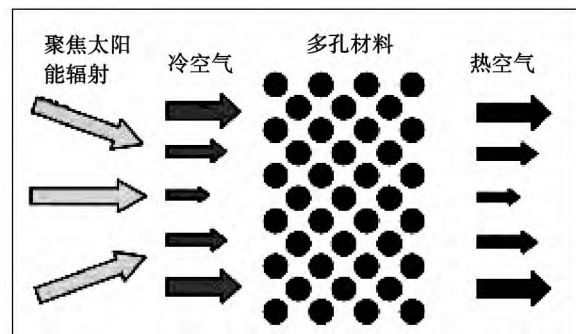


图 8 直接照射太阳能接收器原理

Fig. 8 Principles of a direct irradiation solar energy receiver

表 1 直接式接收器的典型特性

Tab. 1 Typical characteristics of a direct type receiver

接收器名称	年份	类型	吸收体材料	平均辐射太阳能 /kW·m <sup>-2</sup>	平均出口空 气温度/°C	效率	空气回流 率/%	测试 地点	功率 /kW
Mk-I	1985	无压	AlSi310	1000	-	70-90	-	Swiss Alps	3
SulzerI	1987	无压	AlSi310	265	780	68	-	PSA	200
TSA	1993	无压	Inconel601	300	700	79	60	PSA	2500
SIREC	2001	无压	Alloy230	300	710	48	45	PSA	250
Sandia Foam	1987	无压	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	410	550	54	30	PSA	200
Ceram Tec	1990	无压	SiSiC	330	500	59	-	PSA	200
HiTRec-I	1995	无压	re-SiC	600	800	68	-	PSA	200
PLVCR-5	1989	有压	SIRCON	300	-	71	-	Sandia	5
DIAPR multistage	1996	有压	Alumina-silica	3600	-	71	-	WIS	50
REFOS	1996	有压	Inconel600	350	800	67	-	PSA	350
SOLGATE	2001	有压	Inconel600 and SiC	550	800	70	-	PSA	400

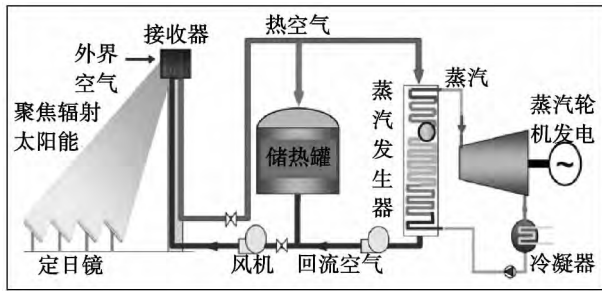


图 9 塔式电站示意图

Fig. 9 Schematic diagram of a tower type power plant

为解决金属密网耐高温性能差等问题, 现已多使用陶瓷等材料替代金属密网, 具有耐高温、耐腐蚀、使用寿命长等优点。如图 10 所示, 为高温接收器中使用的陶瓷接收器示意图。接收器由 37 个模块组成, 每个模块由一个六边形接收器结构和一个 SiSiC 杯组成, 水平直径长 120 mm, 孔口面积为 0.49 m<sup>2</sup>, 采用模块化结构, 可以方便地组成任意大小和形状接收器<sup>[20]</sup>。

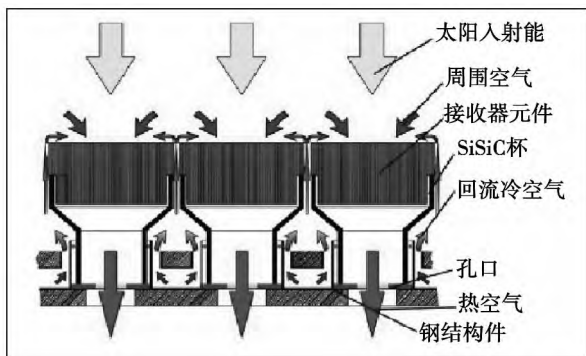


图 10 HiTRec I 接收器示意图

Fig. 10 Schematic diagram of a HiTRec receiver

该接收器的实验结果显示和设计值有很好的—致性。当出口空气温度为 800 °C 时, 测量得热效率在 75 - 80% 之间, 而理论值为 79%。当热效率为 68% 时, 空气出口的最高温度可达 980 °C。所有接收器模块间的温差小于 150 °C 并且没有产生热斑。这种结构的接收器启动时间短, 运作简单。采用 SiC、发泡陶瓷或陶瓷纤维作为吸热体材料, 可承受更高的热流密度, 获得更高的空气出口温度。

1.2.2 有压式直接照射太阳能接收器

有压式直接照射太阳能接收器, 换热效率高, 是未来发展的主体。如图 12 所示, 有压式与无压式相比, 多加装了一个透明的抛物面状石英玻璃窗。太

阳能辐射通过石英玻璃窗口, 然后进入接收器内部, 这样可使接收器内部保持一定的压力, 且将反射损失减少到最小。增压使内部空气流动为湍流, 强化了空气与吸热体间的换热, 以此降低吸热体的热应力, 最高出口空气温度可达 1 300 °C<sup>[21]</sup>。



图 11 模块化接收器外形图<sup>[20]</sup>

Fig. 11 Outline drawing of a modularized receiver

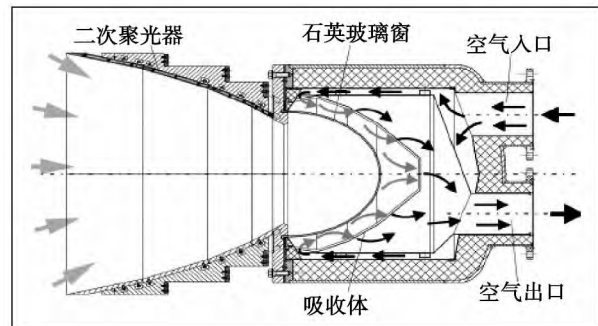


图 12 有压直接式接收器

Fig. 12 A pressurized direct type receiver

以色列一直致力于该项技术的研究, 并取得了较大的进展, 图 13 为其开发研制的有压式直接照射太阳能接收器示意图。接收器外径约 0.42 m, 长 0.35 m。针状接收器吸收聚焦辐射太阳能, 并转换为热量传递给工作介质。孔口紧靠圆锥形石英玻璃窗, 实验测试表明, 玻璃窗可以承受的压力超过 50bar, 并且对表面污染不敏感<sup>[22]</sup>。测试时, 绝大多数工作气体(空气)从主要入口流进接收器内, 获得较高流速后沿着玻璃窗一直流向接收器前部, 然后回流, 在针状吸热体间流动吸热。少量的工作气体也可直接通过二次入口进入接收器。

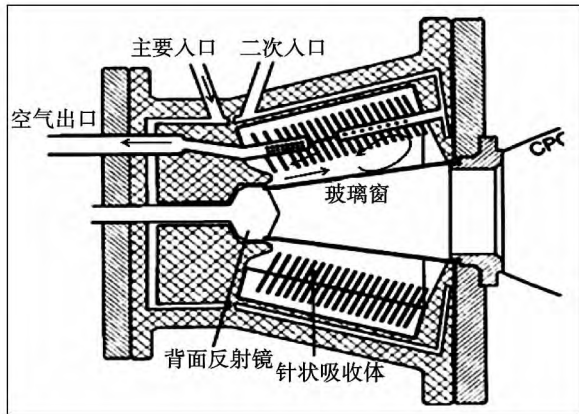


图 13 针状有压式接收器

Fig. 13 A needle-shaped pressurized type receiver

经过 250 小时的测试,结果显示,出口空气的平均温度可达 1 200 °C,工作压力在 17 - 20 bar 之间,入射太阳能辐射强度在 3 600 - 5 300 kW/m<sup>2</sup> 之间,总效率在 70 - 80% 之间。在此接收器的研究基础上,设计师在以色列南部的阿拉瓦( Arava) 沙漠建造了一座模块化混合式联合循环太阳能热力发电系统,该电站的集热塔外形似一朵郁金香,单个模块的发电容量为 100 kW<sub>e</sub><sup>[23]</sup>。模块间互不影响,又可相互连接组建成大规模的光热发电场。联合循环发电系统如图 14 所示。来自压缩机的空气在进入燃气轮机的燃烧室之前,在接收器内进行预热。该系统适用于 1 - 100 MW 级别的塔式电站,系统效率高,可减少定日镜场面积,因此降低了电站的投资。

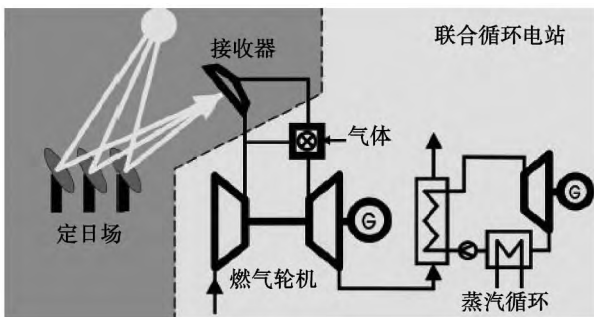


图 14 联合循环发电系统图

Fig. 14 Drawing of a combined cycle power generation system

### 1.3 复合型接收器

Reiner Buck 和 Christian Barth 等人提出了复合型接收器的概念<sup>[24]</sup>,结构如图 15 所示。在这种复合型接收器中,蒸汽在管式蒸发器中产生,空气接收

器产生的高温气体对给水进行二次加热,并将蒸汽加热到过热状态,推动汽轮机做功发电。管式接收器内温度不超过 300 °C,相应的入射太阳能辐射强度不超过 350 kW/m<sup>2</sup>,与传统的蒸汽发生器参数接近,已有一定的运行经验。

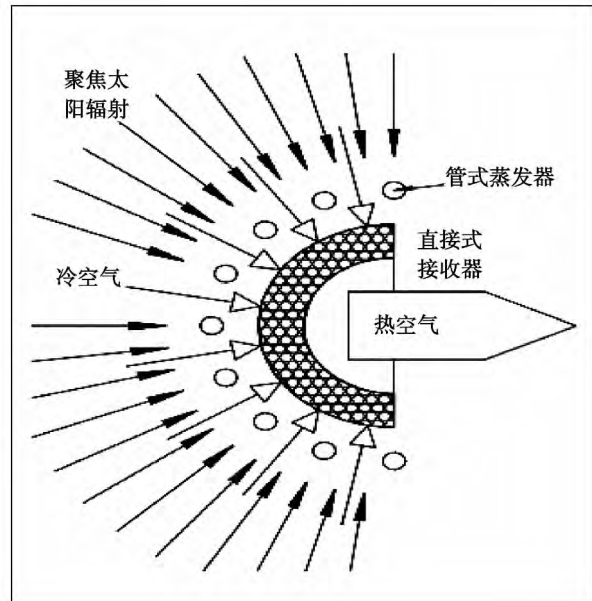


图 15 复合型接收器结构图

Fig. 15 Structure drawing of a complex type receiver

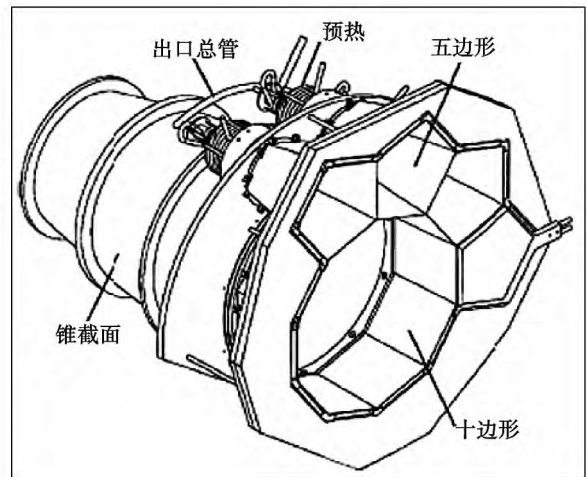


图 16 多级接收器示意图

Fig. 16 Schematic drawing of a multi-stage receiver

电站运行时测得,空气出口温度达 500 °C,可送入燃气轮机做功。该接收器热效率可达 87%,相对于高温接收器,复合型接收器的热力损失小。然而,该种接收器制造更加困难,蒸汽存储仍需研究发展。

1.4 多级接收器

Kribus A 等人提出了多级接收器的概念<sup>[25]</sup> 根据辐射强度分布情况将接收器分成不同的级别, 工作介质按顺序穿过辐射强度逐渐升高的各级接收器, 并被逐渐加热升温。魏茨曼( Weizmann) 科学研究所设计的塔式电站中, 采用了两级接收器。

高温级采用有压式直接照射太阳能接收器, 如图 13 的结构, 低温级采用了螺旋型腔式管状接收器, 如图 7 所示, 布置在高温级周围。空气出口温度达 1 000 °C, 其中在低温级内达到 750 °C。发电量

为 55 kWe。多级接收器对流等热损失小, 具有较高的效率, 发电成本可降至每度 0.082 美元<sup>[26]</sup>, 有良好的商业应用前景。

目前国际上已投运的典型塔式电站及其接收器类型见表 2<sup>[27-30]</sup>。由表 2 可知, 目前已投运的塔式电站中, 接收器以间接腔式为主, 工作介质多采用水-蒸汽。这主要是由于间接腔式较间接外露式效率高, 较直接式具有结构简单、造价低等优势, 水-蒸汽作为工作介质与传统电站的运行参数相近, 有一定的经验, 技术成熟、风险小。

表 2 典型塔式电站

Tab.2 A typical tower type power plant

项目名称	投运年份	接收器形式	载热工质	蓄热工质	工质出口参数	功率/MW
意大利 EURELIOS I	1980	间接腔式	水蒸汽	熔盐 + 水	510 °C	1
西班牙 SSPS	1981	间接腔式	液态钠	液态钠	500 °C ,10.2 MPa	0.5
日本 SUNSHINE	1981	间接腔式	水蒸汽	熔盐 + 水	187.1 °C	1
美国 Solar One	1982	间接外露式	水蒸汽	油 + 岩石	515 °C ,10.3 MPa	10
西班牙 CESA I	1982	间接腔式	水蒸汽	熔盐	500 °C ,10 MPa	1.2
美国 MSEE	1983	间接腔式	熔盐	熔盐	565 °C	1
法国 THEMIS	1983	间接腔式	盐类	盐类	430 °C ,4.1	2
西班牙 TSA	1993	直接无压式	空气	陶瓷	800 °C	1
美国 Solar Two	1996	间接外露式	熔盐	熔盐	565 °C	10
中国江宁示范电站	2005	直接有压式	空气	无	1 000 °C ,0.4 MPa	0.07
西班牙 PS10	2007	间接腔式	饱和蒸汽	饱和水	250 °C ,40 bar	10
以色列 SEDC	2008	间接腔式	过热蒸汽	水 + 蒸汽	550 °C	4-6
西班牙 PS20	2009	间接腔式	饱和蒸汽	饱和水	250 °C	20
西班牙 Gemasolar	2011	间接腔式	盐类	盐类	500 °C	17
中国大汉	2012	间接腔式	过热蒸汽	油 + 蒸汽	400 °C ,2.8 MPa	1.5
美国 ISEGS	在建	间接腔式	过热蒸汽		550 °C	392

2 结 论

本文对国内外现有塔式太阳能热发电接收器不同结构和工作介质进行了分析研究, 结论如下:

(1) 腔式管状太阳能接收器较外露式管状太阳能接收器, 热损失小、效率高, 但结构复杂、造价高、定日镜布置受限。

(2) 直接照射太阳能接收器以空气作为工作介质, 存在局部热效应力问题, 技术风险大, 采用发泡陶瓷或陶瓷纤维作为吸热体材料的有压式直接照射太阳能接收器是未来的研究方向。

(3) 水-蒸汽作为工作介质时, 高温蒸汽可直

接推动汽轮机发电, 技术风险小, 结构相对简单, 但管路及容器等需承受高压, 因此实际使用时温度和压力受限。熔盐热容量大, 系统无压运行且能承受高热流密度。

(4) 复合型和多级型接收器具有高效率, 可减少定日镜场面积, 因此大大降低发电成本, 拥有巨大的商业应用前景, 但构造复杂、存储结构仍需研究。

本作者目前从事塔式太阳能腔式水-蒸汽工质接收器热性能的课题研究。在自行建立的太阳能腔式吸热器热性能实验台上, 研究了入口流量、热流密度等参数对腔式吸热器热性能的影响。同时也采用数值模拟的方法加以验证。

## 参考文献:

- [1] 陈静,刘建忠,沈望俊,等.太阳能热发电系统的研究现状综述[J].热力发电,2012(4):17-22.  
CHEN Jing, LIU Jian-zhong, SHEN Wang-jun, et al. Survey of the status quo of the research on solar energy thermal power generation systems [J]. Thermal Power Generation, 2012(4):17-22.
- [2] Price H, Carpenter S. The potential for low-cost concentrating solar power systems [C]. Vancouver: Intersociety Energy Conversion Engineering Conference National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1999:550-558.
- [3] Quaschnig V, Muriel M B. Solar power-photovoltaics or solar thermal power plants [J]. Vgb Powertech International Edition, 2002, 82:48-52.
- [4] Sanden B A, Azar C. Near-term technology policies for long-term climate targets-economy wide versus technology specific approaches [J]. Energy Policy, 2005, 33(12):1557-1576.
- [5] Neij L. Cost development of future technologies for power generation-A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments [J]. Energy policy, 2008, 36(6):2200-2211.
- [6] Romero M, Buck R, Pacheco J E. An update on solar central receiver systems, projects, and technologies [J]. Journal of solar energy engineering, 2002, 124(2):98-108.
- [7] 范志林,张耀明,刘德有,等.太阳能热发电系列文章(7)塔式太阳能热发电站接收器[J].太阳能,2007(1):12-14.  
FAN Zhi-lin, ZHANG Yao-ming, LIU De-you, et al. Serial papers concerning solar energy thermal power generation (7): Receivers for use in tower type solar energy thermal power plants [J]. Solar Energy, 2007(1):12-14.
- [8] 廖葵,龙新峰.塔式太阳能热力发电技术进展[J].广东电力,2007(4):6-11.  
LIAO Kui, LONG Xin-feng. Advances in tower type solar energy thermal power generation technologies [J]. Guangdong Electric Power, 2007(4):6-11.
- [9] 章国芳,朱天宇,王希晨.塔式太阳能热发电技术进展及在我国的应用前景[J].太阳能,2008(11):33-37.  
ZHANG Guo-fang, ZHU Tian-yu, WANG Xi-chen. Advances in tower type solar energy thermal power generation technologies and their application prospects in China [J]. Solar Energy, 2008(11):33-37.
- [10] 杨敏林,杨晓西,左远志.塔式太阳能热发电吸热器技术研究进展[J].科学技术与工程,2008,8(10):2632-2640.  
YANG Min-lin, YANG Xiao-xi, ZUO Yuan-zhi. Advances in the study of tower type solar energy thermal power generation heat receiver technologies [J]. Science, Technology and Engineering, 2008, 8(10):2632-2640.
- [11] Tyner C, Kolb G, Prairie M. Solar power tower development: recent experiences [R]. Sandia National Labs, Albuquerque, NM (United States), 1996.
- [12] Han W, Hongguang J, Jianfeng S, et al. Design of the First Chinese 1 MW Solar-Power Tower Demonstration Plant [J]. International Journal of Green Energy, 2009, 6(5):414-425.
- [13] 郭铁铮,刘国耀,刘德有,等.腔式太阳能水/蒸汽吸热器给水全程控制系统的设计[J].电力与能源,2012(1):77-80.  
GUO Tie-jing, LIU Guo-yao, LIU De-you, et al. Design of a whole feedwater process control system for cavity type solar energy wa-
- ter/steam heat receivers [J]. Electric Power and Energy Source, 2012(1):77-80.
- [14] Karni J, Kribus A, Doron P. The DIAPR: a high-pressure, high-temperature solar receiver [J]. Journal of solar energy engineering, 1997, 119(1):74-78.
- [15] Yogev A, Kribus A, Epstein M. Solar "tower reflector" systems: A new approach for high-temperature solar plants [J]. International journal of hydrogen energy, 1998, 23(4):239-245.
- [16] Karni J, Kribus A, Rubin R. The "porcupine": A novel high-flux absorber for volumetric solar receivers [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 1998, 120(2):85-95.
- [17] Kribus A, Doron P, Rubin R. Performance of the directly-irradiated annular pressurized receiver (DIAPR) operating at 20 bar and 1,200 degrees [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2001, 123(1):10-17.
- [18] Pitzpaal R, Hoffschmidt B, Bohmer M. Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation [J]. Solar Energy, 1997, 60(3-4):135-150.
- [19] Wu S Y, Xiao L, Cao Y. Convection heat loss from cavity receiver in parabolic dish solar thermal power system: A review [J]. Solar Energy, 2010, 84(8):1342-1355.
- [20] Behar, O., A. Khellaf and K. Mohammedi. A review of studies on central receiver solar thermal power plants [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(23):12-39.
- [21] Christos C, Athanasios G. Evaluation of porous silicon carbide monolithic honeycombs as volumetric receivers collectors of concentrated solar radiation [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(6):474-488.
- [22] Kribus A, Doron P. Performance of the Directly-Irradiated Annular Pressurized Receiver (DIAPR) operating at 20 bar and 1,200 degrees [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The ASME, 2001, 123(1):10-17.
- [23] Avila-Marin A L. Volumetric receivers in solar thermal power plants with central receiver system technology: a review [J]. Solar Energy, 2011, 85(5):891-910.
- [24] Buck R, Barth C, Eck M. Dual-receiver concept for solar towers [J]. Solar energy, 2006, 80(10):1249-1254.
- [25] Kribus A, Doron P, Rubin R. A Multistage Solar Receiver: The Route To High Temperature [J]. Solar Energy, 1999, 67(1):3-11.
- [26] Zhang, H L, et al. Concentrated solar power plants: Review and design methodology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(22):466-481.
- [27] Fend T, Pitz-Paal R, Reutter O. Two novel high-porosity materials as volumetric receivers for concentrated solar radiation [J]. Solar energy materials and solar cells, 2004, 84(1):291-304.
- [28] Chen G Q, Yang Q, Zhao Y H, et al. Nonrenewable energy cost and greenhouse gas emissions of a 1.5 MW solar power tower plant in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(4):1961-1967.
- [29] Ortega J I, Burgaleta J I, Tellez F M. Central receiver system solar power plant using molten salt as heat transfer fluid [J]. Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME, 2008, 130(2):117-123.
- [30] Kribus A, Zaibel R, Carey D. A solar-driven combined cycle power plant [J]. Solar Energy, 1998, 62(2):121-129.

(陈滨 编辑)



塔式太阳能热发电接收器的研究进展 = **Advances in the Study of Tower Type Solar Energy Thermal Power Generation Receivers** [刊, 汉] XU Pei-pei, LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu, CEN Ke-fa (National Key Laboratory on Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 223 - 229

Solar energy receivers are an important part of a tower type solar energy thermal power generation heat accumulation system. The authors described the working principle of tower type receivers currently available both in domestic and abroad and their research status, mainly including the following six types: indirectly and externally exposed type, indirect tube-shaped, direct pressure-free type, direct pressure type, complex type and multi-stage type. The research status and results show that the indirect type receivers boast a low technical risk and are easy in realizing heat accumulation in a large capacity, capable of producing power continuously and stably but causing a big thermal loss and low efficiency. The direct type receivers can achieve a high thermal efficiency, being up to 80%, however, the heat accumulation technology has not yet been proven and difficult to realize power generation in a continuous way. The complex and multi-stage type receivers have a power generation cost as low as US \$ 0.082 per kilowatt hour, thus enjoying huge application prospects in commerce. **Key words:** solar energy, thermal power generation, receiver

表面粗糙影响平板气膜冷却换热效果的数值研究 = **Numerical Study of the Influence of the Surface Roughness on the Air Film Cooling and Heat Exchange Effectiveness of a Flat Plate** [刊, 汉] WANG Jian-fei, JI Yong-bin, ZANG Shu-sheng (Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(3). - 230 - 237

With a flat plate test piece having round jet holes at an angle of 35 degrees serving as the object of study, calculated were the air film cooling effective degrees and heat exchange coefficients under the following operating conditions: the surface roughness  $k_s = 0.254, 0.423$  and  $0.8$  mm, Reynolds number of the main stream being  $5 \times 10^5, 8 \times 10^5, 10^6$  and  $2 \times 10^6$  and the air blowing ratio being  $0.5, 1.0$  and  $1.5$  respectively. Through a comparison of the calculation results with the test data, it has been verified that Viegas-Jayatilleke model can be applied in calculation of the boundary layer of a diverging turbulent flow with a jet and blowing. The calculation results show that the surface roughness can enhance the average air film cooling effective degree in the lateral direction in the majority of the area with the influencing extent not exceeding 10%. However, the roughness has a very big influence on the heat exchange coefficient, enhancing the heat exchange coefficient by 50% at the most outside. The presence of the roughness can also intensify the influence of the Reynolds number of the main stream and air blowing ratio on the air film cooling effectiveness. **Key words:** turbine part of a gas turbine, surface roughness, air film effective degree, heat exchange coefficient, air blowing ratio