

# 热管式真空集热管及其太阳集热器的研究与应用\*

丁祥, 林文贤, 许玲, 高文峰, 刘滔

(云南师范大学 太阳能研究所, 教育部可再生能源材料先进技术与制备重点实验室, 云南 昆明 650092)

**摘要:** 详细介绍了我国现有热管式真空集热管及其太阳集热器的基本结构及研究状况, 特别介绍了 CPC 型热管真空管太阳集热器。对热管真空管型太阳集热器在各种场合的应用做了分类介绍。最后指出热管真空管型太阳集热器及与建筑结合的太阳集热系统是未来太阳能热水利用发展的重要方向。

**关键词:** 热管; 真空集热管; 太阳集热器; CPC

**中国分类号:** TK519

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9793(2011)04-0041-09

环境污染和能源危机是我国及人类社会可持续发展的两大制约因素, 发展太阳能等可再生能源是解决问题的有效措施之一, 其中太阳热水器技术的发展和用是最为广泛的。我国太阳热水器品种主要有真空管型太阳热水器、平板型太阳热水器和闷晒型太阳热水器三大类, 其中真空管型太阳热水器具有良好的防冻抗冻性能和低的热损系数等优点, 在太阳能热利用领域受到广泛关注和用, 具有巨大的发展前景和空间。

作为太阳热水器核心部件的集热器, 热管真空管型太阳集热器被认为是继闷晒式、平板式、全玻璃真空管集热器后的第四代太阳能集热产品, 在太阳能领域得到了广泛的用。北京太阳能研究所自 1986 年起开始研制热管真空管型太阳集热器, 先后经历了实验室研究、中试研究、中试生产、规模化生产、开拓国内外市场等几个阶段<sup>[1]</sup>。热管真空管型太阳集热器以其优良的结构性能和安全的运行模式, 正在替代其它类型太阳集热器产品, 逐渐成为太阳热水器市场的主流。但我国研制并工业化生产的热管真空管型太阳集热

器与国外一些先进产品相比还存在性能差异和质量不足。

## 1 热管式真空集热管的基本结构

按照国家标准 GB/T 19775-2005《玻璃-金属封接式热管真空太阳集热管》<sup>[2]</sup>的规定, 热管式真空集热管属于金属吸热体真空集热管的一种。目前, 我国热管真空管型太阳集热器主要由三种类型的热管式真空管构成, 如图 1 所示。他们的组成大致相同, 都是由热管、金属吸热板或传热介质(导热油)、玻璃管、金属封盖、弹簧支架、蒸散型消气剂和非蒸散型消气剂等部分构成。

这三种热管式真空集热管的区别在于, 第一种是将带平面翼片吸热板的热管封装在单层玻璃的真空管内, 采用抗冻的铜-水热管作为高效的传热元件, 玻璃-金属之间的封接采用先进的热压封接技术; 第二种是将带圆筒形翼片吸热板的热管插入全玻璃真空集热管内, 翼片紧贴真空管内表面, 热能通过玻璃内管或管内热空气向翼片

\* 收稿日期: 2011-05-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50879074, 11072211); 高等学校博士学科点专项科研基金(20105303110001); 西部高原地区太阳能有效利用及可持续开发研究教育部创新团队发展计划资助项目。

**作者简介:** 丁祥(1986-), 男, 云南省祥云县人, 硕士研究生, 从事太阳能热利用及计算流体力学方向研究。

**通讯作者:** 林文贤(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事太阳能热利用及计算流体力学方向研究。E-mail: linwenxian@ynnu.edu.cn

传热,继而向热管传热。这种热管式真空集热管是目前市场上最主要的热管式真空集热管;第三种是将热管插入全玻璃真空集热管内,用连接套管密封连接,在全玻璃真空集热管内腔与热管外壁之间注有高沸点的液态传热介质(导热油)<sup>[3]</sup>。

热管式真空集热管的工作原理是,太阳辐射经过玻璃外管透射,被金属吸热板或导热油接收,吸热板或导热油将太阳辐射能转化成热能,再传递给热管,使热管蒸发段内的工质迅速气化,工质蒸汽上升到热管冷凝段,在较冷的内表面上凝结,释放出蒸发潜热,冷凝后的液态工质依靠自身重力回流到热管蒸发段,继而再重复上述过程。

我国早期热管式真空集热管产品的玻璃管直径为 65mm,长度为 150 0mm。其后,逐步生产出直径为 100mm,长度为 200 0mm 等多种产品。

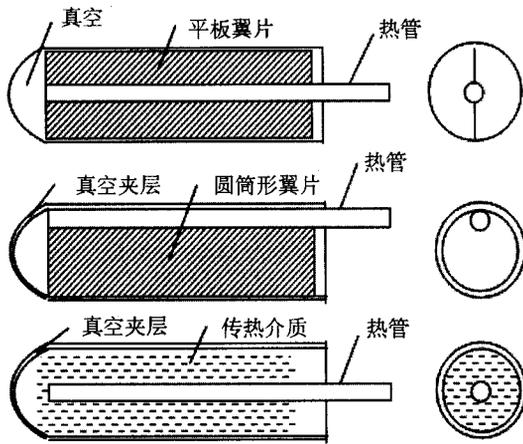


图 1 三种热管式真空集热管

Fig. 1 Three kinds of heat-pipe-type evacuated tubes

热管式真空集热管的好坏,有五个关键的因素:

(1)热管

热管是一种利用气化潜热高效传递热能的强化传热原件。由于它具有超强的热传导能力,其导热系数为铜的数千倍,而且几乎没有热损耗,因此它被称作为传热超导体。但热管的传输能力受到“音速限”和“携带限”的限制,意思是当工作温度过高时,由于流通截面是固定的,蒸发段的蒸汽流量达到一定程度就不能继续增大了,会出现阻塞现象,甚至会造成蒸发段过热甚至烧毁的事故,另外当热管中的蒸汽流量增大时,蒸汽会夹带冷

凝段的回流液,会出现冷凝段干涸,影响热管的传热。热管构造简单,无运动部件,十分经济可靠。在太阳集热器上应用的热管一般为重力热管,也称为热虹吸管,它是热管中构造最为简单的一种。重力热管的蒸发段在热管的下部,凝结段在上部,内部没有吸液芯,工作液依靠凝结液的自身重力从冷凝段回流到蒸发段。它通过工作液的不断蒸发、凝结,把热管下半部热源的能量传递到热管上半部的冷源中去。重力热管对其倾斜角度有一定限制,既不能水平安置,也不能垂直安置,一般要求热管轴向与水平方向的倾角不小于 15°,最佳倾角为 30°~60°。

目前国内大都采用铜—水热管,因为在普通家用温度范围内,水与铜管壳有很好的相容性、饱和蒸汽压低、提纯容易并且水的气化潜热值较大。但用水作为热管工质也存在一些问题:水的凝固点为 0℃,在北方冬季容易结冰;水的温度在低于 50℃时,蒸汽密度较低、传热介质过少、传热性能较差,会导致集热器及热水器水箱中的水开始时升温较慢,在冬季尤甚;启动温度偏高、表面温度均匀性较差,在阴雨天太阳辐照不充足的情况下,热性能较差。针对以上问题,可考虑采用其他防冻、低启动温度的工质,例如醇类及醇—水混合物来代替纯水<sup>[4]</sup>。

国外也有使用有机或无机复合物作为热管工质的,但必须满足工质与热管壳体材料的相容性。重力热管的最佳充液量与工质的特性有关,采用水作工质时,一般可按热管空腔容积的 1/4 考虑,大型热管的充液量以空腔容积的 15% 为宜。热管式真空集热管一般采用直径 8mm~10mm,壁厚 0.6mm~0.75mm 范围内的铜质热管,这样可以满足管壁的强度要求<sup>[5]</sup>。

(2)吸热板

第一种热管式真空集热管的平面翼片吸热板与热管蒸发段紧密相连,其表面镀有选择性吸收涂层,可充分吸收太阳辐射转化成热能。此种吸热板构成的关键是要镀有好的选择性吸收涂层,并与热管有良好的结合。

第二种热管式真空集热管的圆筒形翼片吸热

板为圆柱形的弹性金属肋片,其上不镀膜,该肋片由弹性张力的作用紧贴双玻璃真空管镀膜内管的内壁,具有圆柱体吸热面对阳光准跟踪的优点,能尽可能多的吸收太阳辐射。这种热管式真空集热管适用于那些已确定了热需求量但安装面积受到限制的场所。如何使圆筒形翼片紧贴玻璃内管且传热良好是这种吸热板的关键技术。

据理论及试验分析,具有圆筒形翼片吸热板的热管真空管型太阳集热器的年平均热效率比具有平面翼片吸热板的热管真空管型太阳集热器要高出10%~14%<sup>[6]</sup>。北京市太阳能研究所葛洪川,何梓年等人<sup>[7,8]</sup>研究了玻璃罩管内平面吸热板、半圆柱吸热板和圆柱吸热板三种形状吸热体的能量收益因子随光线入射角变化的规律,结果表明,半圆柱吸热体真空集热管的年能量收益比平面吸热板高15.9%,而圆柱吸热体真空集热管的年能量收益比平面吸热板高26.2%。

### (3) 导热油

有导热油的热管式真空集热管的集热过程为,太阳光线透过真空管外层玻璃,进入真空层,照射到内玻璃管表面的涂层上,然后光线再通过导热油将太阳辐射能转化为热能传递给热管的蒸发段。南京工业大学徐吉富,朱跃钊等人<sup>[9]</sup>采用改进的热管真空管型太阳集热器进行试验,结果表明导热油型热管式真空集热管从根本上提高了太阳能的利用效率,能很好的解决空气型热管式真空管加工困难的问题,同时也可获得300℃以上的高温,设计中只需预留一定的膨胀容积即可。槽式聚光的导热油热管真空管型太阳集热器的试验表明,其在1h内可将1.5L的普通水转化为170℃左右的蒸汽<sup>[10]</sup>。采用导热油的热管式真空集热管需要解决的关键技术是如何选择一种良好的导热油来完成传热,而且在高温情况下与热管及玻璃管能良好运行。

另外,河北省科学院能源研究所张成怀,刘自强等人<sup>[2]</sup>研制了一种太阳能用重力热管。它采用一种无机复合工质作为热管内部工质,这种工质在35℃~40℃就能启动,且与铜管有很好的相容性,耐高温,热传输性能好,无毒无污染,不易发生

腐蚀和化学反应。

### (4) 玻璃-金属封接

由于金属和玻璃的热膨胀系数差别很大,所以必定存在一个金属与玻璃之间如何实现气密封接的技术难题。

玻璃-金属封接技术大体可以分为两种:一种为熔封,也称为火封,它借助一种热膨胀系数介于金属和玻璃之间的过渡材料,利用火焰将玻璃熔化后封接在一起;另一种为热压封,也称为固态封接,它是利用一种塑形较好的金属如铅、铝等作为焊料,在加热加压的条件下将金属封盖和玻璃管之间封接在一起。目前国内大都采用热压封技术,与传统的熔封技术相比,它有封接温度低、封接速度快、封接材料匹配要求低等优点。但是,在太阳能槽式热发电和太阳能制冷空调等中高温应用领域中,温度过高会直接影响热压封的寿命,甚至出现漏气,所以热压封的产品只适合工作在200℃以下的场景<sup>[11,12]</sup>。东南大学王军、张耀明等在其专利CN200620165112.3<sup>[13]</sup>中提出了一种工艺结构简单并可在400℃高温下长期工作的熔封式热管式真空集热管。

### (5) 真空度与吸气剂

由于部分热管式真空集热管采用了金属吸热板,其内部真空排气工艺不同于全玻璃真空集热管。为保持长期良好的真空性能,热管式真空集热管内一般同时放置两种消气剂:蒸散型消气剂和非蒸散型消气剂<sup>[14]</sup>。蒸散型消气剂在高频激活后被蒸散在玻璃管的内表面上,像镜面一样,和普通全玻璃真空集热管类似,其主要作用是提高真空集热管的初始真空度,常用的有钡铝镍吸气剂;非蒸散型消气剂是一种常温激活的长效消气剂,其主要作用是在集热管运行时,吸收管内各部件工作中释放的残余气体,保持真空集热管的长期真空度,常用的有锆铝16、锆钒铁和锆石墨。

## 2 热管式真空集热管的技术要求

根据国标GB/T 19775-2005《玻璃-金属封接式热管真空太阳集热管》<sup>[2]</sup>的规定,现将热管式真空集热管的主要技术要求归纳如下:

(1)玻璃管太阳透射比 $\tau \geq 0.89$ (AM1.5);玻璃管应力的双折射光程差 $\delta \leq 120\text{nm/cm}$ .

(2)热管启动温度应不大于  $30^\circ\text{C}$ ;在热源温度为  $30^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$  的状况下,热管冷凝段温度  $T_c$  应不小于  $23^\circ\text{C}$ ;热管在温度为  $-25^\circ\text{C}$  的环境中无冻损现象。

(3)吸热板涂层太阳吸收比 $\alpha \geq 0.86$ (AM1.5);红外发射率 $\varepsilon \leq 0.10$ .

(4)金属与玻璃管封接处的漏率  $Q$  应小于  $1.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ .

(5)真空集热管内的气体压强  $P \leq 5.0 \times 10^{-2} \text{Pa}$ .

(6)集热管的空晒性能参数  $Y = (t_s - t_a)/G \geq 195 \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{kW}$ (当太阳辐照度  $G \geq 800 \text{W}/\text{m}^2$ ,环境温度  $0^\circ\text{C} \leq t_a \leq 30^\circ\text{C}$ 时)。

(7)抗机械冲击:集热管应能承受直径为 30mm 的实心钢球从不低于 0.5m 的高处自由落下垂直撞击集热管中部而无损坏。

### 3 热管真空管型太阳集热器的基本结构

热管真空管型太阳集热器是使用热管式真空集热管来吸收太阳辐射能,继而加热联集管或水箱中水的一种新型太阳集热器。热管真空管型太阳集热器除了可以做成家用太阳热水器外,还可以做成承压式的中央热水系统,或分体式的与建筑结合的系统。

热管真空管型太阳集热器通常由热管式真空集热管、联集管、导热块、隔热材料、保温盒、套管、支架等几部分组成,如图 2 所示。集热器运行时,热管式真空集热管将太阳辐射能转换为热能,传递给玻璃管内热管,热管内的工质通过气化、凝结的无数次重复过程,通过导热块将热量传递给联集管内的传热工质(如水),使传热工质逐步升温,直至达到可利用的目的,再通过循环管路将热量传至贮热水箱。在不断加热的同时,热管式真空集热管及保温盒内的联集管,都会不可避免地经过各种途径向周围环境散失一部分热量。

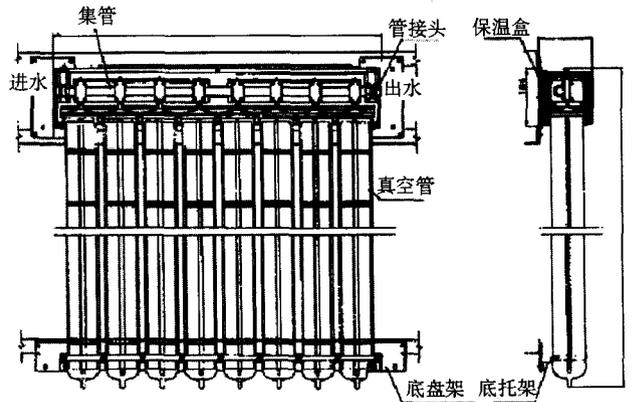


图 2 热管真空管型太阳集热器

Fig. 2 Heat-pipe-type evacuated-tube solar collectors

导热块的作用是使热管冷凝段的热量迅速有效地传递到联集管里的传热工质中。艾捷、石中坤等设计出半封闭式的铝制导热块<sup>[15]</sup>,内有两个相互垂直、不同内径的孔,大孔连接联集管,小孔插接热管的冷凝段,热量通过导热块从热管传递给联集管里的传热工质。

为了使集热器经受长时间高温烘烤,达到理想的使用效果,采用硅酸棉与聚氨脂复合保温、整体发泡的方式制作保温材料,用来填充保温盒,能有效地控制运行过程中的热量损失。保温盒以铝合金为主要材料,采用表面喷塑的结构。此种结构既起到防腐的作用,外形又美观大方。

### 4 CPC 型热管真空管太阳集热器

CPC(Compound Parabolic Concentrator)型热管真空管太阳集热器是一种新型的太阳能集热装置。它综合运用了聚光技术、真空技术和热管技术,具有热损小、热容量小、热二极管性及工作范围宽等优点。CPC 是一种根据边缘光线原理设计的非成像低聚焦度复合抛物面聚光器,可将给定接收角范围内的人射光线按理想的聚光比收集到接收器上。由于它的接收角较大,运行时不要求连续跟踪太阳,只须定期调整倾角就可以有效地工作。CPC 结构简单,工作温度高,对聚光面加工精度要求不高,将其应用在热管真空管型太阳集热器上,是一个值得研究的方向。

CPC型热管真空管太阳集热器可分为内聚光和外聚光两种形式。内聚光式集热器以热管作为CPC的接收器,其外表面镀有选择性吸收涂层,接收会聚光线;接收器和聚光器均固定封装在抽成真空的玻璃管内;内聚光热管式真空集热管的外形和常规全玻璃真空集热管相同,工作温度却比普通热管式真空集热管和全玻璃真空集热管有很大提高。外聚光式集热器结构简单,以不同类型的外聚光反射器为聚光器,以常规的热管式真空集热管为接收器;试验证明此种集热器的集热效率大幅度提高。外聚光式集热器在提高了集热效率的基础上降低了成本,内聚光式集热器提高了系统的工作温度,可见CPC技术与热管式真空集热管的结合,使太阳集热器产品的技术含量有了很大的提升<sup>[16]</sup>。

目前国内对CPC型热管真空管太阳集热器的研究力度在不断加大,但多数是针对外聚光式集热器的,对内聚光式的研究还不多。

南京工业大学许雪松,朱跃钊<sup>[17]</sup>通过传热分析和相关试验,给出了内聚光式CPC型热管真空管太阳集热器的总热损系数、效率的计算方法,并测定了它的效率曲线,试验结果与理论计算值符合很好。

南京工业大学赵玉兰,张红等人<sup>[18]</sup>针对现有的集热器容易形成焦斑、热损大等问题,开发了一种外聚光式CPC型热管真空管太阳集热器,并进行了传热分析和计算。结果表明,采用热管式真空集热管可以大幅度降低集热器的热损失,CPC型热管真空管太阳集热器在高温时的性能优于普通热管真空管型太阳集热器。

浙江大学石玲<sup>[19]</sup>对外聚光式CPC型热管真空管太阳集热器进行了理论研究,得出了复合抛物面的系统方程,构建了复合抛物面对太阳辐射的吸收模型和热管式真空集热管的传热模型,并通过计算分析得出了集热器瞬时集热效率与流体温差的变化关系。所采用的热管为分离式热管,管内汽液两相同向流动,太阳选择性吸收涂层位于热管外表面和肋片表面,不同于以前涂在真空管内管表面的方式。

南京工业大学张维薇,朱跃钊等人<sup>[20]</sup>设计采用导热油的外聚光式CPC型热管真空管太阳集热器,经集热分析后,得出其瞬时效率方程;与传统肋片式CPC型热管真空管太阳集热器相比,此种新型集热器效率高,加工工艺简单,成本较低。

## 5 国内对热管式真空管及其太阳集热器的研究状况

国内对热管式真空集热管及其太阳集热器的研究始于由1986年北京太阳能研究所所开展。

北京太阳能研究所何梓年等人<sup>[21,22]</sup>在早期研究了热管式真空集热管的热性能测试方法,利用一套专门设计的“测量块”,可以通过测定传热阻两端的较大温差而获得集热管的输出功率,提高了测量精度。他们还在传热分析的基础上,提出了热管真空管型太阳集热器的总热损系数、效率因子和热转移因子的计算方法,通过试验测定了单根热管式真空管及集热器的瞬时效率曲线,与理论计算值符合较好。

沈阳农业大学赵冰与中科院王志峰等<sup>[23]</sup>的对比研究发现,热管真空管型太阳集热器的最高效率略低于平板型太阳集热器,但是随着集热温度升高,热管真空管型太阳集热器的集热效率波动较小,并稳定在较高的水平。

青海大学严军<sup>[24]</sup>理论分析了热管式真空集热管及其太阳集热器的原理、结构、传热特性和工作性能,对相应的太阳能热水系统也进行了分析,认为热管真空管型太阳集热器正在替代其他类型太阳集热器产品,逐渐成为太阳热水器市场的主流。

内蒙古工业大学闫素英,田瑞等人<sup>[25,26]</sup>在传热分析的基础上,提出了热管真空管型太阳集热器的总热损系数、效率因子、热转移因子、瞬时效率的表达式,其瞬时效率的理论计算值和试验测定值之间的误差小于8.6%;他们还通过试验发现,热管真空管型太阳集热器与全玻璃真空管型太阳集热器相比,具有日有用得热量高、平均热损

因数小、热容小、启动快、防冻抗冻能力强、能承受、稳定、安全运行、较好的高温效率特性和保温特性、瞬时效率高出 10%~15%左右、非稳态效率高出 15%左右的优点。

南京工业大学徐吉富,朱跃钊等人<sup>[9,27]</sup>针对热管式真空集热管的结构进行了分析,假定了合理的边界条件,建立了二维数学模型,并利用 FLUENT 软件模拟管内热量传递过程,揭示分析了其温度场和流场的分布规律和影响因素;模拟以水、导热油、空气三种介质为例,空气的温升速度最快,其次是导热油和水;证明了导热油的引入是热管式真空集热管未来发展的一个方向;由热损失分析发现,90%以上的系统热损失都集中在涂层上,因而选择吸收率更高、反射率低的涂层材料是提高集热效率的一个重要发展方向;他们还将改进的导热油型热管式真空集热管制作出单轴跟踪槽式聚光太阳集热器,分析了其热效率和火用效率,结果表明随着集热器聚光比和太阳光照强度的增加,集热效率和火用效率先是急剧增加,然后逐渐趋于平缓;随着的集热流体温度的增加,集热效率逐渐降低,聚光比和光照强度越大,降低的程度越缓慢。

北京桑达太阳能技术有限公司边久兴<sup>[28]</sup>对磁控溅射技术在热管式真空集热管的选择性吸收涂层上的应用及其生产质量控制体系进行了研究,认为做好磁控溅射工序的管理对于企业完成生产任务、提高产品质量至关重要。

北京太阳能研究有限公司艾捷,石中坤等人<sup>[15]</sup>采用普通平板翼片吸热板的热管式真空集热管,开发了 C4-S1×8、C4-S1×16 型热管真空管型太阳集热器,经测试,其热性能完全符合国家标准,并且安装方便,价格适中。

由热管真空管型太阳集热器所构成的太阳热水器及太阳热水系统,在国内也有不少研究,其应用主要由一些商业公司所推广,取得了不错的成绩。

洛阳大学谢光海,王长昕等人<sup>[29]</sup>对热管真空管型太阳热水器进行了设计研究,所采用的重力热管表面带有选择性吸收涂层,外玻璃管和热管

之间抽真空,经过试验与全玻璃真空管型太阳热水器相比,日效率提高了 7.4%。

北京欧科能太阳能技术公司周晓波,孙伟<sup>[30]</sup>分析比较了分别由平板、全玻璃真空管、U形管、热管真空管型太阳集热器所组成的太阳中央热水系统,重点介绍了热管真空管型太阳集热器的工作原理及性能特点,通过一些工程实例的介绍推广了热管真空管型太阳集热器的发展。

青岛理工大学周恩泽,董华等人<sup>[31]</sup>设计建立了以热管真空管型太阳热水器和水源热泵机组为热源、以地板辐射采暖系统为末端设备的太阳能—热泵地板辐射采暖供暖系统试验台,测试结果表明太阳热水器效率高且稳定,热泵机组制热系数达到设计要求。

内蒙古工业大学韩俊峰,田瑞等人<sup>[32]</sup>通过试验,发现热管真空管型太阳能热水系统的效率曲线斜率小于全玻璃真空管型太阳能热水系统,说明两种热水系统在运行温度相同时,前者热损失较小,瞬时效率较高,有较好的高温特性和保温特性,且能稳定在较高水平。

厦门恒有源科技有限公司杨文标<sup>[33]</sup>对热管真空管型太阳集热器与空气源热泵结合的太阳能热水系统进行了设计研究与投资经济分析,表明该系统具有集热效率高、供热性能系数高、形式多样、布置灵活等优点,能较好地解决“太阳能建筑一体化”和“全天候”等问题,这是实现建筑节能的一个有效途径,有广阔的发展前景。

## 6 国内热管式真空管及其太阳集热器的应用

### 6.1 太阳能热水系统

由热管真空管型太阳集热器构成的太阳能热水系统,是热管式真空管及其太阳集热器在实际应用中推广最为广泛的。在实际工程应用中,可以根据不同的气候条件、系统用途和用户要求,综合考虑集热器的阵列组合、热量的储存、系统的防冻、辅助能源的选择,组成不同的太阳能热水系统,比如太阳能中央热水系统、太阳能供热供暖系

统、太阳能游泳池热水系统,可广泛用于民用住宅、宾馆、饭店、学校、部队、工厂、医院等生活社会场所,还可以用于工业生产作业热水、开水预热等。热管真空管型太阳能热水系统也可以分为直接循环和间接循环两种,两者相比,直接循环系统只能以单一方式提供热水,系统简单,而间接循环系统则可以提供不同温度的热源以及提供不同用途的生活和工业热水等,具有承压性,系统稍显复杂<sup>[30]</sup>。

## 6.2 太阳能热发电

在已经建成的槽式聚光太阳能热发电站中,接收器一般采用直通式全玻璃真空集热管,与其相比,热管式真空集热管在承压能力方面有一定优势。在直接用水作吸热介质的单回路槽式聚光太阳能热发电系统,即 DSG(Direct Steam Generation)系统中采用热管式真空集热管,可有效解决承压问题。它还相当于“二次换热”,换热介质只与热管冷凝段发生换热,热管启动快、相变传热的方式使其具有高效率。

东南大学王军,张耀明等人<sup>[13]</sup>已经分别设计出几种适合于槽式及碟式聚光系统的热管式真空集热管。

南京工业大学战栋栋,刘赟等人<sup>[34,35]</sup>开发了一种新型中温(250℃~400℃)热管式真空集热管接收器,并将其应用于太阳能热发电的槽式聚光热管真空管型太阳集热器上,其效率远高于普通 CPC 型热管真空管太阳集热器,可广泛用于太阳能中温热利用。

## 6.3 太阳能制冷与空调

太阳能制冷与空调系统需要较大的太阳集热面积和较高的热源,因此需要合理布置太阳集热器阵列,这种系统与太阳能热水系统相似。热管真空管型太阳集热器阵列承压能力强、流动阻力小,是一种适合大规模工程化的集热器<sup>[36]</sup>。将热管真空管型太阳集热器、热泵和空调结合在一起使用可以同时满足冬季供暖和夏季制冷两种要求,还可以满足日常生活用热水的需要,克服了单纯利用太阳能供暖时,寒冷天气和阴雨天热量不足的缺点,能够进一步提高整个系统的性能<sup>[4]</sup>。

对于双效和三效溴化锂-水吸收式制冷系统,它们需要 150℃以上的高温水,可通过热管真空管型太阳集热器来获取高温热源,采用 CPC 聚光的方式效果更佳<sup>[37]</sup>。另外,热管真空管型太阳集热器也可以满足太阳能固体吸附式制冷驱动热源的要求,其所选工质的解析温度一般不高于 100℃,所以闷晒或者聚光形式均可达到要求。

## 6.4 太阳能海水淡化

将太阳能与膜蒸馏技术相结合进行淡化水处理,是太阳能热利用的一个重要领域。热管真空管型太阳集热器可以提供较高的温度,能为膜蒸馏热端加热系统提供热水,实现海水、苦咸水的淡化<sup>[25]</sup>。传统的太阳能海水淡化所需要的供热温度在 70℃~100℃,可以和太阳能制冷系统相结合,传热介质先流经太阳能制冷系统,再为太阳能海水淡化提供热源,提高了太阳能热利用的效率。

## 7 结束语

我国于 2006 年 1 月 1 日开始实施《中华人民共和国可再生能源法》,极大地推动了国内太阳能行业的发展,提高了人们节约能源的意识。各地太阳能热水工程数量不断增长,国内太阳能厂家也积极开发太阳集热器产品,以满足市场的需求。作为第四代太阳热水器核心部件的热管真空管型太阳集热器在近些年发展最为迅速,但要进一步完善技术,降低成本。

如果将集热器的工作温度提高到 100℃以上,使低品位的太阳能应用在中、高温领域,将使太阳能的利用更为广泛,因此新的 CPC 型热管真空管太阳集热器市场潜力很大。但此项工作目前还只是处于试验研究阶段,在聚光器材料的选用和加工工艺的改进等方面还有待进一步完善和提高,产品真正走入市场还有一定距离,但我们应看到此项技术的重要性,应投入更大的财力、物力、人力进行研究。

把太阳热水器与建筑结合在一起是太阳热水器产业发展的必然趋势,把集热器做成系统集中式更是节约能源的良方,因此把热水系统和建筑结合起来是未来太阳能热水利用发展的重要方

向。目前,我国太阳热水器产品绝大多数为自然循环全玻璃真空管直插式整体太阳热水器,采用一次循环、非承压的结构,其最大问题是水箱只能和集热器一起放置在屋顶上,不易实现与建筑外观的融合。分体承压二次循环的热管真空管型太阳集热器产品是解决这个问题的很好方法,未来将在我国市场上占有越来越多的份额。

虽然我国拥有全球最大的太阳热水器生产能力,也有全球最大的太阳热水器消费市场,但我国的太阳热水器普及率并不高,远远落后于塞浦路斯、以色列、希腊和奥地利等国家。根据我国可再生能源发展规划,2010年和2020年太阳热水器安装量将达到1.5亿 $m^2$ 和3亿 $m^2$ ,每千人拥有量为109 $m^2$ 和203 $m^2$ ,但仍远远落后于发达国家的现有水平<sup>[38]</sup>。随着传统能源价格的不断上涨、生活热水需求的大幅提高、社会环保意识的增强,特别是太阳热水器产品的升级换代以及太阳热水器与建筑结合技术的日益完善和发展,太阳热水器将继续保持快速的发展势头,拥有良好的发展前景。

### 参 考 文 献:

- [1] 何梓年. 热管式真空管集热器在我国的发展历程[J]. 太阳能,2009,(Z1):17-19.
- [2] 国家技术监督局. GB/T 19775-2005 玻璃-金属封接式热管真空太阳集热管[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [3] 文玉良,浦绍选,唐润生. 热管在太阳能热利用技术中的应用[J]. 可再生能源,2005,(2):28-30.
- [4] 杜海燕,郭航. 热管在太阳能热水器中的应用[J]. 化工进展,2008,27(3):390-394.
- [5] 张成怀,刘自强,庄向东. 热管式真空管太阳集热器所用重力热管的研制[J]. 河北省科学院学报,2004,21(1):39-41.
- [6] 何梓年. 太阳能热利用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [7] 何梓年,葛洪川,蒋富林,等. 真空集热管内不同形状吸热体表面相对太阳辐照强度的实验研究[J]. 太阳能学报,1995,16(4):361-367.
- [8] 葛洪川,何梓年,蒋富林,等. 真空集热管内不同形状吸热体能量收益的研究[J]. 太阳能学报,1996,17(1):15-21.
- [9] 徐吉富,朱跃钊,蒋金柱. 太阳能真空管热管式集热管温度场及流场分析[J]. 流体机械,2009,37(2):61-64.
- [10] 朱跃钊,蒋金柱. 槽式聚光型热管式太阳能锅炉装置[P]. 中国专利:200610040139.4,2007-11-14.
- [11] 代彦军,王如竹. 太阳能空调制冷技术最新研究进展[J]. 化工学报,2008,59(S2):1-8.
- [12] 黄鑫炎,侯鹏,郝梦龙,等. 槽式太阳能热发电真空集热管技术[J]. 太阳能,2009,(4):28-34.
- [13] 王军,张耀明,孙利国,等. 熔封式热管真空集热管[P]. 中国专利:200620165112.3,2008-01-09.
- [14] 谷伟,张耀明,余雷,等. 热管式真空集热管的研制与应用[J]. 太阳能,2009,(9):21-24.
- [15] 艾捷,石中坤,刘广生. 新型热管式真空管太阳能集热器[J]. 太阳能,2009,(10):35-38.
- [16] 刘芳,邢永杰. CPC在太阳能集热器中的应用[J]. 太阳能学报,2001,(2):18-19.
- [17] 许雪松,朱跃钊. CPC型热管式真空管集热器的热性能研究[J]. 南京工业大学学报,2004,26(6):53-56.
- [18] 赵玉兰,张红,战栋栋,等. CPC热管式真空管集热器开发及其传热分析[J]. 石油化工设备,2006,35(4):28-35.
- [19] 石玲. CPC热管式真空管集热器传热模型的分析[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [20] 张维薇,朱跃钊,蒋金柱,等. 新型CPC热管式真空管集热器设计与性能分析[J]. 热力发电,2009,38(6):119-123.
- [21] 何梓年,郑维杰,林渡明. 热管式真空集热管的热性能测定方法[J]. 太阳能学报,1990,11(1):108-112.
- [22] 何梓年,蒋富林,葛洪川,等. 热管式真空管集热器的热性能研究[J]. 太阳能学报,1994,15(1):73-82.
- [23] 赵冰,王志峰,刘荣厚,等. 两种太阳集热器的热性能对比分析[J]. 可再生能源,2006,(3):59-62.
- [24] 严军. 热管真空管集热器及太阳能热水系统[J]. 可再生能源,2008,26(5):68-71.
- [25] 闫素英,田瑞,后尚. 玻璃真空管内插热管式集热器非稳态效率分析[J]. 工程热物理学报,2008,29(2):323-326.

- [26] 闫素英,田瑞,于文艳,等. 玻璃真空管内插热管式太阳热水系统热性能研究[J]. 太阳能学报,2009,30(8):1037-1042.
- [27] 徐吉富,朱跃钊,蒋金柱. 新型槽式真空热管集热器的热效率及火用效率分析[J]. 真空,2009,46(2):74-77.
- [28] 边久兴. 浅谈热管式真空管磁控溅射涂层及其质量控制[J]. 太阳能,2009,(2):61-62.
- [29] 谢光海,王长昕,李玉萍. 热管式真空管太阳能热水器的设计研究[J]. 洛阳大学学报,2003,18(4):101-104.
- [30] 周晓波,孙伟. 热管真空管太阳中央热水系统[J]. 太阳能,2005(1):27-29.
- [31] 周恩泽,董华,涂爱民,等. 太阳能热泵地板辐射供暖系统的实验研究[J]. 流体机械,2006,(4):57-62.
- [32] 韩俊峰,田瑞,阎素英. 两种太阳能集热器的瞬时效率对比分析[J]. 能源工程,2009,(2):25-27.
- [33] 杨文标. 热管式真空管太阳能一直热式热泵热水系统设计研究与经济分析[J]. 福建建筑,2009,8(134):145-148.
- [34] 战栋栋,张红,刘赞,等. 中温太阳能热管接收器的开发与传热分析[J]. 太阳能学报,2009,30(5):602-606.
- [35] 刘赞,张红,陈兴元,等. 用于槽式太阳能电站的热管式集热器开发及传热分析[J]. 华北电力大学学报,2009,36(3):92-97.
- [36] 代彦军,王如竹. 太阳能空调制冷技术最新研究进展[J]. 化工学报,2008,59(S2):1-8.
- [37] 王军,张耀明,刘德有,等. CPC在太阳能热利用中的应用[J]. 太阳能,2007,(8):23-26.
- [38] 胡润青,李俊峰. 全球太阳能热水器产业与技术发展状况及启示[J]. 太阳能,2007,(2):8-11.

## The Research and Applications of Heat-Pipe-Type Evacuated Tubes and Solar Collectors

DING Xiang, LIN Wen-xian, XU Ling, GAO Wen-feng, LIU Tao

(Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Key Laboratory of Advanced Technique & Preparation for Renewable Energy Materials of the Ministry of Education of China, Kunming 650092, China)

**Abstract:** This review paper gives a detailed introduction to the basic structure and research progress of the heat-pipe-type evacuated tubes and solar collectors in China, in particular the CPC heat-pipe-type evacuated tubes solar collectors. The paper also makes a classification of the applications of heat-pipe-type evacuated tubes solar collectors under various conditions. Finally, the paper identifies that heat-pipe-type evacuated tubes solar collectors and the solar heat-collecting systems that are combined with buildings will be the important development direction for the utilization of solar water heating systems in the future.

**Key words:** heat pipe; evacuated tube; solar collectors; CPC