

Pulsating Heat Pipe Solar Technology Application in Building Energy Efficiency

Fumin Shang¹, Jianhong Liu¹, Dengying Liu²

1. School of Energy and Power Changchun Institute of Technology, acronyms acceptable, Changchun, China

2. Institute of Engineering Thermo Physics Chinese Academy of Sciences, acronyms acceptable, Beijing, China

1. shangfumin68@163.com, 2.dengyingliu@sina.com.cn

Abstract: According to the use of solar energy for building energy efficiency trends, described the working principle of pulsating heat pipe(PHP), characteristics and the current theory and practical application of the status quo. Comparison of the construction sector at present the traditional solar collector technology, to combine the latest research results and their areas of research work on building an efficient use of pulsating heat pipe solar collector technology and policy analysis and feasibility study, that the pulsation The actual application of heat pipe and the promotion of key issues to be addressed in order for the pulsating heat pipe collector technology provide the practical application of useful experience and demonstration projects.

Keywords: pulsating heat pipe(PHP); building energy efficiency; solar energy

脉动热管太阳能集热技术在建筑节能中的应用研究

商福民¹, 刘建红¹, 刘登瀛²

1. 长春工程学院能源动力工程学院, 长春, 中国, 130012

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京, 中国, 100149

1. shangfumin68@163.com, 2. dengyingliu@sina.com.cn

摘要: 针对建筑节能对太阳能利用的发展趋势, 阐述了脉动热管的工作原理、特性以及目前理论研究与应用现状。对比建筑领域目前传统的太阳能集热技术, 结合国内外最新研究成果及自己的科研工作对建筑领域中利用脉动热管的高效太阳能集热技术及政策方面的可行性进行了分析和研究, 指出了脉动热管的实际工程应用和推广需解决的关键问题, 以期对脉动热管集热技术的实际应用提供可借鉴的经验和工程示范。

关键词: 脉动热管; 建筑节能; 太阳能

1 引言

建筑节能是我国三大重点节能领域之一。据国务院发展研究中心 2003 年的资料显示: 在我国已有的 $4 \times 10^{10} \text{m}^2$ 建筑中, 有 99% 属于高耗能建筑。即使是新建建筑, 仍有 95% 以上为高耗能建筑, 我国单位建筑耗能比同等气候条件下的发达国家高 2~3 倍。当前我国的建筑用能已占整个社会能源消费的 30%。为此, 建设部提出到 2010 年, 全国城镇建筑总能耗要基本实现节能 50%。到 2020 年, 北方和沿海经济发达地区和超大城市, 要实现建筑节能 65%。到那时, 每年建筑

节能可达到 3.35×10^8 吨标准煤, 相当于 4.5 个三峡电站的发电量^[1]。因此, 建筑节能是我国“节能、减排”工作重要组成部分, 开展建筑节能具有重要的现实意义和长远意义。

开展建筑节能, 除了开发节能的建筑材料外, 很重要的一个方面是要大力开发利用可再生能源。太阳能是在建筑节能中可以发挥显著作用的可再生能源。按建设部要求, 到 2010 年, 所有新建建筑对不可再生能源的总消费要下降 10 个百分点; 到 2020 年, 再下降 20 个百分点, 逐步增加对可再生能源的利用。我国地处阳光充沛的亚热带地区, 地域辽阔, 太阳能年辐射总量超过 5MJ/m^2 , 年日照超过 2200 小时的地区占国土面积的 2/3, 属太阳能资源丰富的国家之一^[2]。

资助信息: 教育部科学技术研究重点项目资助 (No: 210050)

脉动热管 PHP (Pulsating Heat Pipe) 又可称为自激振荡流热管 SEMOHP (Self-Exciting Mode Oscillating-Flow Heat Pipe)、振荡热管 OHP (Oscillating Heat Pipe) 或振荡流热管 OFHP (Oscillating-Flow Heat Pipe), 是日本学者 H.Akachi 于 1994 年发明的^[3]。实验研究表明, 脉动热管的传热能力是常规热管的几倍甚至几十倍^[4]。由于脉动热管特殊的结构、优良的热传输性能以及巨大的应用潜力而日益受到国际传热学界的高度重视。

本文是在对脉动热管前期实验研究以及脉动热管太阳能集热技术研究工作的基础上, 针对建筑领域的节能问题, 围绕新型高效的脉动热管传热元件在建筑节能中应用的可行性及技术进行分析和研究, 以期脉动热管的实际应用提供可借鉴的经验和工程示范。

2 脉动热管的工作原理及特性

脉动热管按其循环系统的不同, 可分为首尾连成闭合回路的回路型 (Looped) 和首尾端不相连的非回路型 (Un looped) 两种^[4], 如图 1 所示。

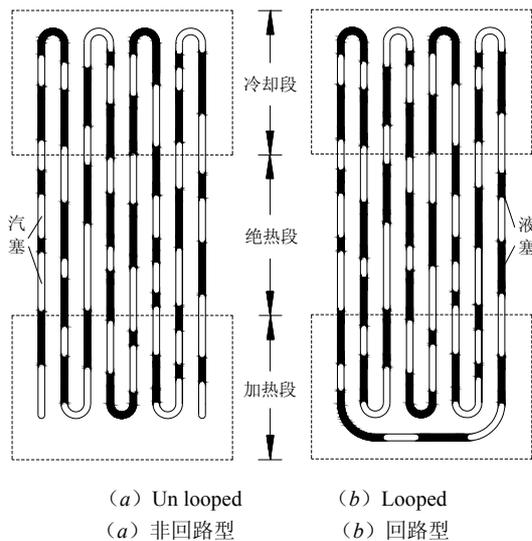


Figure 1. Work principle of PHP
图 1. 脉动热管工作原理示意图

其基本原理是: 当热管管径足够小时, 真空条件下封装在管内一定量工作介质 (如蒸馏水、乙醇或丙酮等) 将在管内形成液、汽相间的柱塞。在加热段, 汽泡或汽柱与管壁之间的液膜因受热而不断蒸发, 导致汽泡膨胀, 并推动汽-液柱塞流向冷凝端冷凝收缩, 从而在冷、热端之间形成较大的压差。当热管本身结

构、内部工质以及外部热负荷等合适的条件下, 交错分布的汽-液柱塞, 就会在管内产生强烈的循环或往复振荡运动, 其振荡频率远远高于传统热管内的汽-液循环频率, 工作介质与热管壁面间的对流换热过程也受到剧烈脉动流的作用而大大强化。图 2 为大功率加热条件下, 脉动热管加热段和冷却段壁温变化情况^[5]。另外, 脉动热管还具有结构简单, 不需要毛细芯, 有利于降低成本, 加热位置和加热方式不受限制 (常用的重力热管必须底部加热); 可以随意弯曲, 适用范围广; 以及管径小, 重量轻, 易于实现微型化和启动迅速等突出优点。

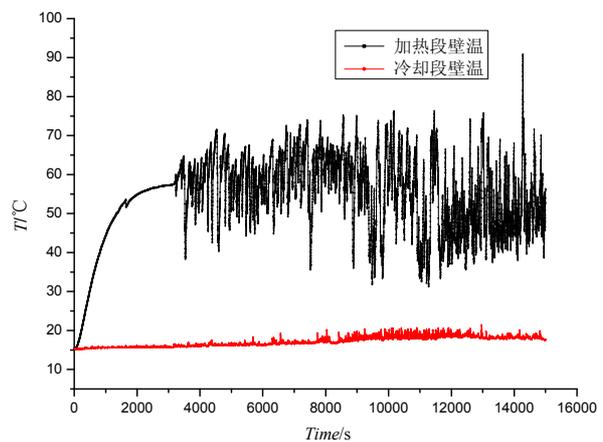


Figure 2. Oscillating characteristic of wall temperature PHP
图 2. 脉动热管壁面温度振荡情况

脉动热管虽然从结构和工作过程来看比较简单, 但这种管内流体与管壁间的传热, 实质是带有非稳态相变过程的两相流体与壁面间非常复杂的传热过程。目前, 国内外传热学者从不同的角度、采用不同的方法建立了多种关于脉动热管内部流动及传热的理论和数学模型, 但这些还不能全方面来从本质上清楚地解释其内部的流动及传热机理。尽管脉动热管在电子元器件的散热、低温余热回收、太阳能的利用上已有相应尝试性的研究和应用, 但这些都是基于实验研究、实验观察与测试的基础上进行的, 距离以脉动热管内流动及传热理论为依据进行应用设计、开发、优化的阶段还相距甚远。

3 脉动热管太阳能建筑一体化的应用技术

3.1 传统太阳能集热方式一体化存在的问题

目前, 我国已经成为世界上生产和使用太阳能热水器最多的国家, 太阳能热水器在我国已经发展成一

个比较成熟的行业。太阳能集热装置从原来的平板式发展到了今天的玻璃真空管式乃至热管式。用户由原来的村镇以及城市住宅的个别用户，发展到了小区的多数用户。但现有建筑对太阳能热水器单一、分散的利用，远远没有体现出真正意义上的建筑节能，而且还影响了建筑物的美观。由于多数热水器属于“事后安装”且品种规格各异，因此造成杂乱无章的无序状态，极大地影响了原建筑的整体外观形象，甚至会影响到整个城市的建筑风貌。加之，用户对太阳能热水器的利用具有滞后的特点，后期的安装会对原有建筑结构造成一定的损坏^[6]。

因此，要想解决以上矛盾，就必须将太阳能热利用系统与建筑结构有效地结合起来，但目前我国太阳能集热产品中，占绝对主导地位的全玻璃真空管集热器，在与建筑物的结合方面却存在一系列问题^[7]：

(1) 运行安全问题 玻璃管直接与被加热流体接触，由于玻璃易碎易裂，容易造成系统瘫痪，夏季大量热水突然外泄，更是容易造成人员伤害。

(2) 密封可靠问题 玻璃管与金属容器的密封只能靠硅胶圈，其寿命及密封可靠性不能满足建筑行业需要。

(3) 结垢清理问题 由于玻璃管是盲管形式，流体在玻璃管中的加热温度又恰恰在钙、镁离子易于氧化析出的范围，水垢沉积清理问题很难彻底解决。

(4) 承压运行问题 硅胶密封及玻璃的脆性都决定了系统不能承压运行，限制了承压式热水器及大型系统的应用。

(5) 集热器寿命问题 玻璃管的绝热性能依赖真空夹层，真空度保持年限无法达到建筑行业要求。

3.2 集屋顶及遮阳结构于一体的应用技术

建筑物屋顶结构是随着防水技术和结构技术的进步而演变的。最初的屋顶建筑材料多是天然的木材，考虑到木材的强度，但又要兼顾房屋的跨度、排水快捷以及防止屋顶渗漏等因素，所以当时的屋顶多为“坡屋顶”。但随着屋面瓦防水技术的发展，坡屋顶的坡度逐渐变缓。而现代工业生产的石油防水材料、钢结构和钢筋混凝土结构成为建材主体后，使得防水和跨度问题不复存在，“平屋顶”成了屋顶建筑的主流形式。近些年来，随着人们生活质量的提高和建筑节能的发展，加之屋顶不仅起着丰富建筑造型的作用，同时也有其独特的使用功能，因此，坡屋顶住宅在住宅

建设中的比例会越来越大，而且朝着屋顶造型多样化的趋势发展。对于遮阳装置来说，尤其是夏季在南方采用的比较多，它除了防止阳光过度直射进室内，更重要的是降低夏季室内环境温度，减少空调的能耗。

由于坡屋顶和遮阳装置的这种特殊位置和结构，所以很容易也很适合成为布置太阳能集热装置的平台，并能获得较好的集热效果。目前，在国内个别小区和一些示范工程上已有应用的例子。但由于传统的集热装置存在上述的问题，使其很难和建筑结构融为一体。尤其是整体的太阳能集热装置，即使是分体的集热装置还要考虑水箱的安装高度或外加强制循环动力。而将脉动热管用作太阳能集热装置，不仅集热效率比目前的平板或真空玻璃管以及传统热管太阳能集热装置高以外，更重要的是将其融入建筑结构方面与传统集热装置相比还有下列独特的优点：

(1) 重量轻、易于满足各种建筑屋面的承重要求。不仅集热板很轻，而且集热装置本身不携带被加热的循环水。这样就为屋面布置脉动热管集热装置提供了很大的方便条件，而且不会破坏建筑物的原有结构。

(2) 循环水箱可置于集热装置的下端，而不像传统太阳能热水器的水箱必须放在顶部，这样不仅减少了安装困难，也改善了集热装置的外观，使之能和屋顶结构融为一体，如图3所示。

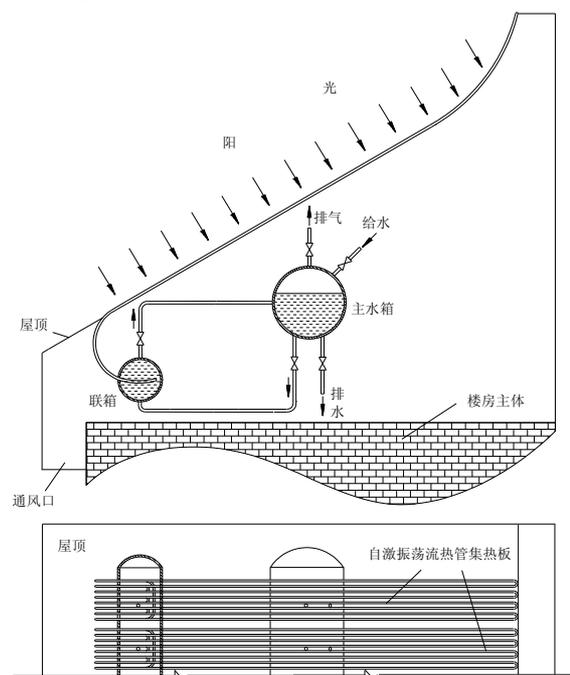


Figure 3. Roof PHP solar heating device
图3. 脉动热管屋顶太阳能集热装置示意图

(3) 由于集热装置不盛水，因而冬季不怕冰冻，脉动热管内的工质充液率通常都低于 70%，且其在管内不断振荡因而热管本身不易破裂，运行相当可靠。

(4) 脉动热管可按建筑外观的要求随意弯曲，可根据屋顶结构制成各种不同的造型，如图 4 所示。图 5 为脉动热管遮阳装置示意图，遮阳装置可以根据需要做成不同的形状，并可以根据冬季和夏季阳光入射角度的不同，调整集热板的位置。夏季调低集热板位置，使其多吸收太阳能，从而起到遮阳的作用；而冬季则调高集热板的位置，这样在集热板吸收更多的太阳能的同时，也使阳光尽量多地进入室内。



Figure 4. Structure of roof PHP
图 4. 屋顶脉动热管结构

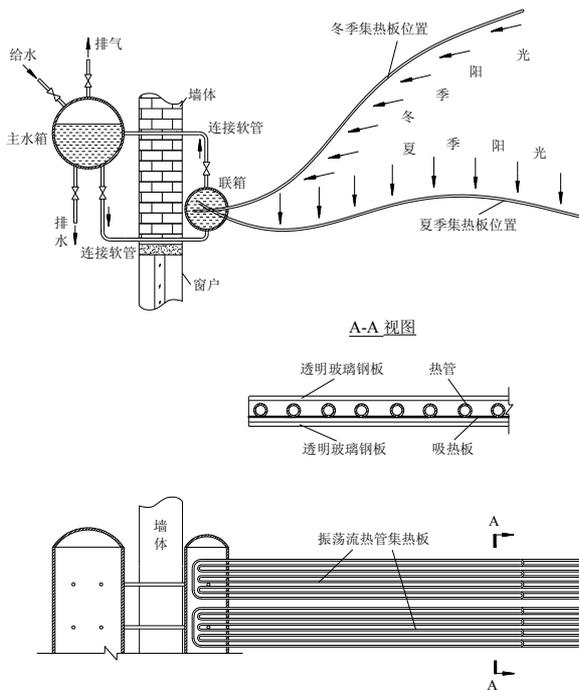


Figure 5. Sunshade PHP solar-thermal device
图 5. 脉动热管遮阳太阳能集热装置示意图

3.3 集墙壁及阳台结构于一体的应用技术

随着城市建设的发展，中高层和高层住宅的数量逐年增加。这样，从长远角度来看，太阳能集热装置装设在墙壁面上以及阳台壁面（拦板）上的方式将成为重要的发展趋势。目前，在一些示范小区的建筑住宅传统的太阳能集热装置同样已有应用的例子。但传统的太阳能集热装置由于其内部盛有循环水，导致装置的重量要远远大于脉动热管的集热装置，不光给原有建筑结构带来一定的负担和安全隐患，而且集热装置和水箱位置的特殊要求，还会使得原有局部建筑结构发生改变，这些都无疑会增加资金的投入。而脉动热管集热装置不但可以提高集热效果，而且可以减轻甚至避免上述情况的发生，使其能更好地融入到建筑结构当中。

总之，要想使太阳能集热系统与建筑结构完美结合在一起，应做到：

(1) 现有建筑物安装，尽量不破坏原建筑的表面及整体形象。

(2) 太阳能集热系统与建筑有机结合，使之成为建筑的一部分。

(3) 太阳能集热系统部件与建筑构件结合设计，使之成为建筑构件的一部分。

(4) 集热器及其部件标准化、模数化，便于维修更新。

从建筑节能和改善城市景观的角度看，城市楼房屋顶“平改坡”是今后的发展趋势。如何使太阳能技术的应用与建筑设计有机地结合，就成为太阳能集热器推广应用的重要课题。为此，研究开发一种将太阳能利用与建筑节能相结合，既能通过降低屋顶温度，以减少建筑空调能耗，又能有效利用太阳能以降低生活用水和采暖能耗；同时又符合建筑美观和人居舒适要求的新型太阳能集热系统就具有很重要的学术意义和实用价值。

4 脉动热管在工程中广泛应用需解决的问题

4.1 技术环节方面需解决的问题

影响脉动热管工作特性的因素很多，既有热管结构方面的，又有热管本身物理特性方面的，还有运行情况等方面的。综合起来，主要有：热管本身结构方面：包括热管的长度、管径、断面形状以及弯头数量等；热管的加热段、绝热段、冷却段的长度。热管物

理特性方面：包括热管内工质的充液率、工质的种类以及物性等。热管运行状况方面：热管为回路型或非回路型；冷、热源的种类、形式以及布置情况等；热管的放置角度^[8]。

以上所有方面的因素都会对脉动热管的工作特性产生直接或间接的影响，而且这些影响因素又相互作用，这样就决定了脉动热管内部的物理过程十分复杂，当各项性能参数配置比较合理时，热管就能产生比较理想的振荡效果，热传输性能比较好；当各项性能参数配置不合理时，热管就不能产生比较理想的振荡效果，热传输性能就比较差。

4.2 工程环节方面需解决的问题

目前，出现对传统太阳能热水器单一、分散利用的原因是多方面的，这其中既有建设部门、设计部门、生产部门之间协调方面的原因，也有政府及管理部门的决策等多方面原因。同样，脉动热管太阳能热水系统的工程应用也同样会面临上述问题。

这样就要求：从建设角度，开发建设单位应从产品策划与规划设计及设计施工同步进行；从设计角度，给排水专业人员进行太阳能热水系统的设计时，应让建筑师参与进行结构安全方面的计算，并建立各专业相关的通用设计图集和应用技术规范；从产品角度，应形成能够满足与建筑结合的太阳能热水产品和服务；从施工角度，应建立、健全能够指导安装设计与施工的规范；从评价角度，应综合评价包括建筑结合、结构安全、使用功能等，尤其建立节能与减排相关的激励指标体系。

5 结束语

太阳能的节能环保特性是毋庸置疑的，以太阳能作为热源符合住宅可持续发展的要求。我国在太阳能热利用方面并没有实施国际上通行采用的政府补贴、无息贷款、减少税收等优惠政策，完全依靠居民的自觉使用，却培育了国际上最大的使用市场，这说明了

人们对可再生清洁太阳能的认可。相信随着社会的进步和人们节能、环保意识的提高，振荡热管在建筑节能领域会有着巨大的发展空间。

致 谢

本文为科技项目“太阳能脉动热管集热系统实现高效传热的关键技术研究”的相关研究内容，该项目得到了教育部科学技术研究重点项目资助（No: 210050），在此表示感谢！

References (参考文献)

- [1] Jiao Qingtai. Review of the Development of Global Solar Water Systems[J]. Energy-Saving Strategies & Policies, 2007, 35(198): 59-62
焦青太. 当今世界太阳能热水器的发展状况[J]. 节能战略与政策, 2007, 35(198): 59-62
- [2] Wang Pan. A Study for the Application of Solar Water Heater on the Existing Residence Building[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003
王磐. 太阳能热水器在既有住宅中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2003
- [3] H Akachi. Looped Capillary Tube Heat Pipe[A]. Proceedings of 71th General Meeting Conference of JSME[C], Tokyo, Japan, 1994
- [4] H Akachi, F Polasek, P Stulc. Pulsating Heat Pipe[A]. Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium[C], Melbourne, Australia, 1996, 208-217
- [5] Shang Fumin, Liu Dengying, Xian Haizhen, Yang Yong, Du Xiaoze, Chen Guohua. Enhanced heat transfer by using self-exciting mode oscillating-flow heat pipes of non-uniform structure[J]. Power Engineering, 2008, 28(1): 100-103
商福民, 刘登瀛, 洗海珍, 杨勇平, 杜小泽, 陈国华. 采用不等径结构自激振荡流热管实现强化传热[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 100-103
- [6] He Zinian. Application of Solar Heater for Residential Houses[J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(1): 50-52
何梓年. 我国太阳能热水器及其在住宅建筑中的应用[J]. 给水排水, 2001, 27(1): 50-52
- [7] Du Haiyan, Guo Hang. Application of heat pipes in solar water heaters[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(3): 390-394
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
- [8] Kim J S, Im Y B, Kim Y S, et al. Development of the under-floor heating system using oscillating capillary tube heat pipe[J]. Journal of the Japan Association for Heat Pipes, 2003, 21: 1-8