

# 新型热管技术开发及应用

陈彦泽, 信伟, 喻建良, 周一卉

(大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116012)

**摘要:**介绍了制冷热管(RHP)、热管发电引擎(TSR)等新型热管技术的原理和近年来的研究发展情况。新型热管技术,特别是热管和透平相结合的 TSR 技术,提出了一种能源利用和回收的新思路,具有广泛而特殊的工程应用背景。对 TSR 技术的改进和深入研究将有助于提高该技术能源的转化效率。

**关键词:**热管;热虹吸管;Rankine 引擎;制冷热管

中图分类号:TK172.4

文献标识码:A

## 1 引言

热管的原理首先是由美国俄亥俄州通用发动机公司(The General Motors Corporation, Ohio, U. S. A)的 R. S. Gaugler 于 1944 年在美国专利中提出的<sup>[1]</sup>。1963 年美国 Los Alamos 国家实验室的 G. M. Grover 重新独立发明了类似于 Gaugler 提出的传热元件,并进行了性能测试实验,在美国《Applied Physics》杂志上公开发表了第一篇论文,正式将此传热元件命名为热管(Heat Pipe),并指出它的热导率已远远超过任何一种已知的金属,给出了以钠为工作液体,不锈钢为壳体,内部装有丝网吸液芯的热管的实验结果。美国 Los Alamos 国家实验室

在热管理论以及热管在空间技术方面的应用研究一直处于领先地位。1965 年 Cotter 首次提出了较完整的热管理论,为以后的热管理论的研究工作奠定了基础。1967 年 1 根不锈钢-水热管首次被送入地球卫星轨道并运行成功。从此吸引了很多科学技术工作人员从事热管研究。20 世纪 70 年代以来,热管在节约能源和新能源开发方面的研究在国外得到了充分的重视。我国的热管研究在 20 世纪 80 年代初将重点转向节能及能源的合理利用,相继开发了热管气-气换热器、热管余热锅炉、高温热管蒸汽发生器 and 高温热管热风炉等各类热管产品。随着科学技术水平的不断提高,热管研究和应用的领域也将不断拓宽。新能源的开发,电子装置芯片冷却、笔记本电脑 CPU 冷却以及大功率晶体管、可控硅元件、电路控制板等的冷却,化工、动力、冶金、玻璃、轻工和陶瓷等领域的高效传热传质设备的开发,都促进了热管技术的进一步发展<sup>[2~3]</sup>。

## 2 新型热管技术的开发与应用

自从热管问世以来,对新型热管的开发和应用一直是热门的

研究课题。据笔者对美国专利局(USPTO)公布的结果查询表明,自热管问世以来,1944~2002 年近 60 年中,共有 3 690 项和热管相关的专利得到了批准。而仅 1996~2002 年 6 年中所公布的和热管相关的专利就达到 1 481 项,占总数的 40.1%,2001~2002 年又提出和热管相关的新专利申请 399 项,分别涉及热管的研制、开发、技术改进和应用等,几乎涵盖了所有和热能相关的技术领域。关于热管研制、开发及应用等内容的国内外文献更是数不胜数。在热能工程中,热管的新技术和新应用一直是极为活跃的开发和研究领域。采用热管和其它相关技术巧妙结合的方法具有极大的发展潜力。在这方面,国内外研究人员进行了大量探索并已取得许多可喜的成就<sup>[4~9]</sup>。限于篇幅,笔者这里仅重点介绍近几年国内外热管技术发展的一些情况。

### 2.1 制冷热管

S. B. Riffat 等<sup>[7]</sup>提出的新型太阳能/燃气联合式制冷热管形式见图 1,这种制冷热管巧妙地将热管、制冷蒸发器和 1 个喷射器组合在一起,基本结构有管壳、管芯、制冷剂(工质)、冷却器、翅片和热管内部的喷射器等。其基

本工作原理简述如下: 热管蒸汽发生区通过吸收燃气炉烟气或太阳能等的热量  $Q_c$  使热管中制冷剂(工质) 吸热汽化, 气相制冷剂蒸汽高速通过喷射装置进入冷凝区; 由于喷管高速蒸汽的作用, 将与热管相连的蒸发器中的制冷剂蒸汽抽出混合后进入冷凝区, 使得蒸发器中一直保持比热管压力低的真空度, 在冷凝段的制冷剂蒸汽放出热量  $Q_c$  后冷凝, 冷凝的制冷剂液流一部分通过吸液芯返回热管的蒸汽发生段重新吸热汽化, 另一部分液流则通过膨胀阀回到蒸发器。进入蒸发器中的制冷剂由于压力降低而蒸发, 这个过程吸收的热量为  $Q_e$ , 蒸发后的蒸汽再次在喷射装置的作用下进入冷凝区放热, 从而完成一个制冷循环。

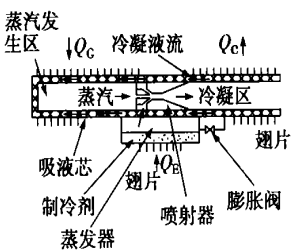


图 1 蒸汽喷射制冷热管

H. F. Smirnov 等<sup>[8]</sup> 提出了一种吸收-扩散式制冷的热管。吸收扩散制冷热管的基本制冷原理类似于吸收-扩散式制冷机的工作原理。制冷剂采用水-氨水溶液, 氨的质量浓度为 0.35, 平衡气体采用氨或氢气。实验研究表明, 这种制冷热管可以获得  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冷源, 蒸发段最低温度可以达到  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这种热管不需采用膨胀阀等机构, 运转平稳、无噪音和振动, 无泄漏、寿命长及成本低, 适合于小型制冷需要, 也可用于缺少电源的地区使用。

刘震炎、卢允庄<sup>[9]</sup> 发明的冷

管型太阳能制冷系统由吸附床段、冷凝段以及下端的蒸发器等组成。制冷原理为: 吸附剂对制冷剂的吸附能力随温度、压力的不同而变化很敏感, 温度越高其吸附能力越弱, 因此利用昼夜温度变换周期性地实现间歇式制冷。白天为脱附循环阶段, 吸附床吸收太阳能而温度升高, 制冷剂蒸汽从吸附床中被脱附出来, 系统内压力上升, 达到与冷凝温度对应的饱和压力时, 制冷剂蒸汽在冷凝器中凝结为液体进入蒸发器, 冷凝所产生的热量由冷却水带走。夜间为吸附循环阶段, 吸附床温度降低后, 吸附蒸发器中的制冷剂蒸汽, 系统内压力降低, 由于制冷剂的蒸发使蒸发器向制冷箱吸收热量, 从而产生制冷效果。

制冷热管一般具有运行费用低、无旋转机械、制冷系数高(如 Riffat 的喷射式制冷热管的制冷系数 C.O.P 可高达 0.7)、绿色环保、方便可靠、结构紧凑并可灵活采用不同热源提供动力等特点, 应用前景十分广阔。

### 2.2 热管发电技术

T. Nguyen 和 A. Akbarzadeh 等提出的热管和透平相结合的热虹吸管式发电装置(Themosyphon Rankine Engine - TSR)是一种新型的发电引擎<sup>[10-11]</sup>, 结构形式和原理见图 2。基本原理是利用工质蒸发产生蒸汽通过涡轮或蒸汽喷管带动发电机, 将动能转变为电能。这类发电机的特点是: 可以利用低品位的热能(如太阳能、地热水、余热烟气等)发电, 特别是地热资源的利用, 具有特殊的优势; 可以根据具体要求对工质进行选择, 使之适用于一些特殊场合发电或充当动力引擎。由于工质在封闭的热管内循环, 不

会对环境造成污染, 结构十分紧凑。目前, TSR 技术存在的主要问题是, 由于热管 Rankine 循环和工业应用的 Rankine 循环相比, 管内工质为饱和蒸汽而不是过饱和蒸汽, 其效率比较低, 这一点有待在现有研究的基础上进一步提高。但是考虑到热能和电能综合利用, 冷凝段放出的热量仍可用于热量回收, 则 TSR 系统的回收余热的总效率可以达到 30%~50% 以上。

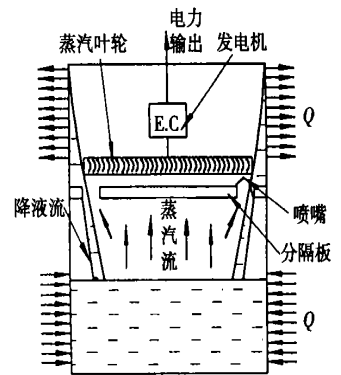


图 2 热管式 Rankine 引擎原理

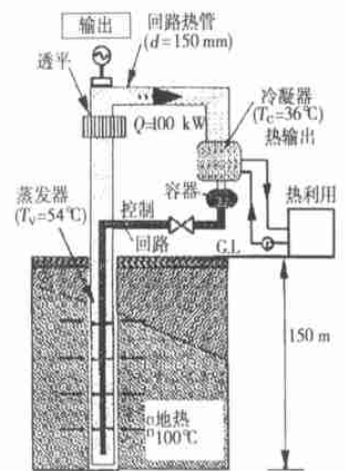


图 3 TSR 技术在日本九州的应用实例

Nguyen<sup>[11]</sup> 介绍的 TSR 第五代原型机基本设计参数为: 蒸发段热输入为 100 kW 的  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  地下水, 冷凝段温度  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。初步设计

是按澳大利亚的波特兰地下水情况设计的, 发电输出功率 3 kW。在日本九州 (Kyushu), 其中 150 m 的地下水温高达 100 °C 左右, 远高于波特兰的情况, 采用和波特兰相似的地热利用方案, 如图 3 所示。该方案为热电联供方式, 回收地热热量约为 100 kW, 发电输出为 5.5~7 kW。

以 TSR 技术为基础, 笔者设计了一种热管 Rankine 引擎实验原型机, 具体结构形式见图 4。采用的微透平和相应的喷嘴基本几何结构见图 5。

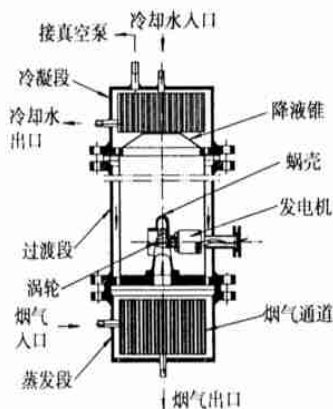


图 4 热管 Rankine 引擎实验原型机

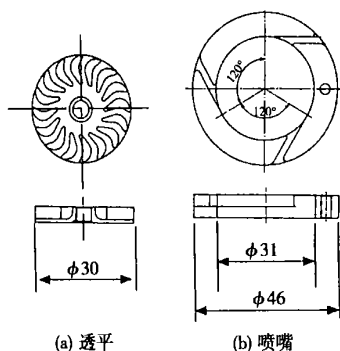


图 5 微透平几何尺寸

本 TSR 原型机实验装置主要有以下特点: (1)改轴流式为优化的径向涡轮做为能量转化的核心装置, 配合以增压蜗壳提供蒸汽流动的良好通道; (2)采用降液

锥和分离的降膜通道, 使上升蒸汽和降液膜各行其道, 同时提供足够所需冷凝工质回流液位; (3)在蒸发段、冷凝段采用内置式螺旋板换热装置, 大大提高了传热面积, 加大蒸发量和冷凝量; (4)结构上采用径向涡轮, 机械能由侧向引出, 避免涡轮轴过长, 便于密封并有利于冷凝器的安装; (5)采用法兰连接形式, 可以方便地根据需要改变热管蒸发段、过渡段和冷凝段的长度, 并可以改变涡轮在热管中的位置; (6)根据需要采用多种具有密度大、汽化潜热小的物质替代水作为工质, 降低实验装置的高度, 提高机械能转化效率。

目前, 国外有关 TSR 技术的研究工作尚在起步阶段。由于对 TSR 技术能够起到至关重要影响的关于热管内部流动和传热分布特性等因素至今仍然处于“黑箱”状态。要提高 TSR 技术的能量转化效率, 优化设计结构, 就必须进一步研究热管内部流动和传热的机理。

我国的地热资源、低品味余热资源等十分丰富, 相对国际先进水平, 余热的回收率还比较低, 为在我国开发类似于 TSR 的余热利用技术提供良好的工程背景。另外, TSR 技术还可以用于在航天领域、边远地区等特殊场合提供电力。

### 3 结 语

同国外热管的发展水平相比, 我国的热管研究还有较大差距, 存在一些迫切需要解决的问题。如热管的成本、质量和寿命问题、热管传热强化和效率问题等。迫切需要开拓新思路, 不断开发新型热管技术和新的应用领

域。同时应加强国际间学术交流, 学习国外的先进技术和经验, 建立起我国能源的自主开发、合理利用及具有可持续发展战略的完整工程技术和研究体系。

### 参考文献:

- [1] GAUGIER R S. Heat transfer device [ J ]. US: US 2350348, 1944-06.
- [2] 庄 骏, 张 红. 热管技术及其工程应用 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] FAGHRI A, TARLOR, FRANCIS. Heat pipe science and technology [ M ]. Bristol: Taylor & Francis, 1995.
- [4] 赵孝保, 袁竹林, 章名耀. 一种新型可变速热管传热与控制温度机理分析与实验 [ J ]. 热能动力工程, 1998, 13(5): 328-330.
- [5] 王怀彬, 杜 军, 张洪军, 等. 介质热管锅炉供热技术 [ J ]. 热能动力工程, 1998, 13(3): 226-228.
- [6] 曾向东, 韩立忠, 牛文科. 蒸发-凝结整体分离式相变换热装置 [ J ]. 热能动力工程, 1996, 11(增刊): 60-62.
- [7] RIFFAT S B, HOLT A. A novel heat pipe/ejector cooler [ J ]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18(3-4): 98-101.
- [8] SMIRNOV H F, KOSOY B V. Refrigerating heat pipes [ J ]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(6): 631-641.
- [9] 刘震炎, 卢允庄. 冷管型太阳能制冷系统 [ J ]. 热能动力工程, 2000, 15(6): 587-598.
- [10] NGUYEN T, JOHANSON P, AKBARZADEH A. Design, manufacture and testing of a closed cycle thermosyphon rankine engine [ J ]. Heat Recovery System & CHP, 1995, 15(4): 333-346.
- [11] AKBARZADEH A, JOHANSON P, NGUYEN T. Formulation and analysis of the heat pipe turbine for production of power from renewable sources [ J ]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(15): 1551-1563.

(何静芳 编辑)

新型热管技术开发及应用 = **Development and Application of Innovative Heat Pipe Technology** [刊, 汉] / CHEN Yan-ze, DING Xin-wei, YU Jian-liang, et al (Institute of Chemical Engineering under the Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 1~3

The theory of innovative heat pipe technology, such as refrigeration heat pipes (RHP) and thermosyphon Rankine (TSR) engines as well as current study results are described with an emphasis on the TSR technology, which integrates the technology of heat pipes with that of turbines. The TSR technology represents a new approach to energy utilization and recovery, and offers wide prospects for engineering applications. The refinement and in-depth research of the TSR technology can be conducive to enhancing the conversion efficiency of heat energy to mechanical power. **Key words:** heat pipe, thermosyphon, Rankine engine, refrigerating heat-pipe

微小通道内流动沸腾压降特性实验研究 = **Experimental Investigation of Pressure Drop Characteristics of Flow Boiling in Mini-channels** [刊, 汉] / WANG Xu, CHEN Hong, KUANG Bo, et al (Institute of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 4~9

In the wake of experimental tests of flow boiling in rectangular mini-channels discussions are held concerning the steady and dynamic characteristics of pressure drop in the channels and a method for stable domain discrimination. After a frequency domain analysis of pressure-drop time series under various experimental operating conditions it is found that the emergence of pressure-drop oscillations in mini-channels can mainly be attributed to vapor generation, transmission and the coupling of mini-channels with inlet compressible or flexible space. Moreover, based on an autoregression model of time-series analysis a model for testing pressure drop oscillations along a test section has been set up. The test results indicate that during a relatively great flow rate the pressure-drop oscillations in the presence of a restricted and deformed steam-bubble flow and an annular flow was found to be relatively stable. However, in the case of a small flow rate the unstable condition of the pressure drop is rather complicated, tending to set up an unstable zone. **Key words:** mini-channel, flow boiling, pressure drop, pressure drop oscillation

射流泵内部流动的实验研究 = **Experimental Study of Flows in a Jet Pump** [刊, 汉] / HE Pei-jie, LONG Xin-ping, LIANG Ai-guo (Institute of Power & Mechanical Engineering under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072), LIU Hou-lin (Research Institute of Fluid Machinery under the Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu Province, China, Post Code: 212014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 10~13

For carrying out the experimental study of the turbulent mixing between water jets in a jet-pump confined space and its surrounding low-velocity water-flow streams, static pressure taps were arranged at 11 axial locations. The pressure taps assume the following layout: one tap at the inlet of a converging conical throat, 6 taps in the throat, and the remaining 4 in a diffuser pipe. Wall-surface static pressure was measured at 11 pressure measuring points by using a U-type tube. Measurements were taken of the water jets in a confined space at the jet pump throat inlet and inside the throat by using a particle image velocimetry device. As a result, the distribution of velocity vector and axial velocity on the symmetrical flow field was obtained under four flow-rate ratios. The measurement results may provide a reliable basis for the analysis of internal flows of a jet pump. **Key words:** particle image velocimetry, jet pump, flow velocity measurement

气液两相流横掠错列圆柱形成旋涡脱落诱发管束振动的试验研究 = **Experimental Investigation of Tube Bundle Vibrations Induced by a Vortex Shedding Generated by Gas-liquid Two-phase Flows Sweeping Across Staggered Tube Arrays** [刊, 汉] / SU Xin-jun, ZHANG Xiu-gang, WANG Dong, et al (Institute of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 14~16, 51