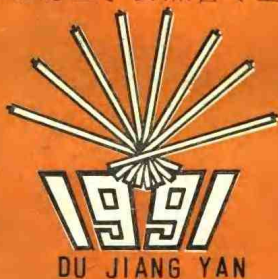


热管研究与应用进展

第三届全国热管会议论文集

中国工程热物理学会热管专业组编



重庆大学出版社

内容简介

近年来,热管技术在能源工程、电子与微电子设备、航空航天、化工、低温、生物、医疗、环保等领域用于余热利用、加热、冷却、均温控制等方面取得了显著的经济效益。本书为第三届全国热管会议论文集,刊载论文 57 篇,包括特邀讲演、基础研究、传输性能、分离式热管、新工质及相容性、热管换热器设计、各种工程应用、研究动态等八部分。本书对于以上相关领域的工程技术人员、研究人员和高校师生是了解国内热管与应用现状,从事生产、研究和教学的一本内容丰富的参考书籍。

热管研究与应用进展

中国工程热物理学会热管专业组

责任编辑 辛明道、陈岗

*

重庆大学出版社出版发行

重庆大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:20.25 字数:400 千

1991 年 7 月第 1 版 1991 年 7 月第 1 次印刷

印数:500

标准书号: ISBN 7-5624-0436-4 定价:16 元
TK·6

序

自全国第一届热管会(1983年,哈尔滨)、第二届热管会(1988年,湖南大庸)以来,国内外热管研究有了新的发展。目前热管技术已经在能源、热回收、电子与微电子设备、航空航天、石油、化工、机械、轻工、电机电器、低温、制冷、生物、医疗……等领域得到成功的应用。尤其是重力热管换热器用于余热回收方面,国内已大面积推广使用,取得了十分显著的经济效益,为节约能源、合理利用能源资源做出了杰出的贡献。热管这项新技术变成了生产力,促进了我国国民经济的向前发展。为了进一步开展国内的学术研究与应用成果交流,迎接第八届国际热管会议(1992年9月14-18日,北京)在我国召开,中国工程热物理学会热管专业组决定,1991年8月19日-22日在四川都江堰市举行全国第三届热管会议。经过对征收论文的严格评审,会议录用了来自全国各工厂、高等院校和研究机构的学术论文10篇,其中57篇具有较好的学术意义和应用价值,在本论文集刊出。

《热管研究与应用进展》论文集分为邀请讲演,基础研究,热管传输性能与实验,分离式重力热管,新工质与相容性,热管换热器设计,热管应用和研究动态等八个部分。总体说来,属于重力热管在余热利用方面的论文较多,这也反映了我国热管技术发展应用的实际情况。同国外热管技术发展比较起来,在功率电子元件散热、微电子设备冷却、均温控制、高温和低温领域的应用研究、推广与经济成效上显得薄弱一些,然而论文集中涉及工程应用的面还是较为广泛,倘若都象余热回收那样得到推广、卓有成效,热管技术的更大活力便能显示出来。这些工作尚待今后的努力。

可以说,热管技术的生命力在于应用,应当紧紧围绕国民经济发展的需要开展工作,尤其是需要生产部门的技术领导给予配合,亲自参与热管工程项目,问题就好办多了。这次会议的特点是应用性论文较多,除了本文集的24篇应用性论文之外,尚有17篇宣读论文,也主要是工程应用方面的,他们都取得了很好的经济效益。为便于交流,这些宣读论文的作者、题目一并列入书末。

本届会议能够顺利召开和正式出版论文集,除了受到学会领导的重视、关心之外,重庆大学、四川天府热管公司生产经营部——都江堰电力修造厂分别承担了会议的学术性组织工作和会务工作。借此谨向他们表示衷心感谢。特别是出版工作特别繁重经费开支较大,得到以下单位的部分资助:

都江堰电力修造厂;

上海局南昌铁路科技开发部;

柳州铁路局科技研究所;

上海铁路局上饶机务段;

无锡新苑集团公司化工设备厂;

保定市机电研究所。

这些单位为会议的成功作出了贡献,谨向这些单位的领导和同志们一并致谢。由于编辑工作仓促,论文集中的错误和不妥之处,请读者多加批评。

辛 明 道

1991年5月于重庆大学

目 录

邀请讲演

- HP9101 半开启式热管的原理与实用 屠传经 洪荣华 (1)
 HP9102 热管在中国航天器上的应用 侯增祺 (9)
 HP9103 分离式热管换热器的研究、应用与评价 陈远国 (17)
 HP9104 微热管及其在集成线路散热中的应用 辛明道 高明聪 (25)

热管基础

- HP9105 垂直加热管降膜再润湿过程的初步研究 蒋章焰 卫洪 马同泽 (33)
 HP9106 重力热管中的脉冲沸腾成因的研究
 周继珠 朱谨 姚职中 曹世俊 (39)
 HP9107 热虹吸管内加金属粉末的传热强化
 夏吉良 辛明道 胡忠日 罗强 (45)
 HP9108 两相闭式热虹吸管内液池膨胀高度的研究
 何家伦 马同泽 张正芳 (50)

热管传热性能

- HP9109 细长椭圆热虹吸管传热性能实验 谢威 陈远国 梁六华 (56)
 HP9110 闭式重力热虹吸管工作极限的理论研究
 郭烈锦 陈学俊 周芳德 (62)
 HP9111 小型热管的传热性能实验 高明聪 辛明道 郭美华 阙明辉 (71)
 HP9112 镍粉钎焊翅片管传热性能试验研究
 田永生 陈听宽 凌旭 韩正 (76)
 HP9113 热管式恒湿器的性能及分析 文耀普 项立成 (82)
 HP9114 套管型旋转热管的工作特性及均温性能试验
 谢欢锦 陈岗 辛明道 (88)
 HP9115 矩形截面小热管的实验研究 王秀莲 (94)
 HP9116 小型热管传热实验研究 李亭寒 曹黎明 (98)
 HP9117 扰流降低热管阻力的实验研究 何川 龙天渝 陈静 (103)

分离式热管

- HP9118 分离式热管蒸发段并联竖管内的流量及压力分布的研究
 牟槽 吉颀 (100)

- HP9119 分离式热虹吸管组换热特性的研究
..... 张正芳 孙全平 马同泽 曹鑫杰 (117)
- HP9120 分离式热管的凝结换热 丁旭 牟楷 (123)
- HP9121 分离型热管换热器的模型实验研究 吴克平 祝清人 (130)
- HP9122 炼油过程中流体的冷却与余热回收—分离式多流体
并联式热管空气冷却装置 牟楷 吴晃 赵秀凤 丁斌广 (135)

新工质与相容性

- HP9123 碳钢—萘热管的实验研究 孙全平 曹鑫杰 (140)
- HP9124 氧化法除氢钢水热管的研究 陈恩莹 陈丽英 王康梅 (146)
- HP9125 N—甲基吡咯烷酮两相顺流热虹吸管传热特性的实验研究
..... 童明伟 陈波 陈礼 (152)

热管换热器设计

- HP9126 大型热管空气预热器设计中热管外径选择的研究
..... 胡建根 吴存真 胡亚才 (157)
- HP9127 热管换热器热/冷段长度比的探讨 苏俊林 郝玉福 王奎玉 (163)
- HP9128 热管空气预热器优化设计方法探讨
..... 卫兴国 张平 刘骥 王国平 (166)
- HP9129 热管换热器变工况计算 李友荣 靳明聪 唐经文 (172)

热管应用

- HP9130 热管余热锅炉的应用研究 顾胜和 曹鑫杰 孙全平 (177)
- HP9131 热管的安全使用及事故预防 庄骏 (182)
- HP9132 大功率品闸管高效风冷却热管的传热性能实验
..... 石程名 辛明道 习查明 (188)
- HP9133 多功能复合式热管换热器在钢坯加热炉上的应用
..... 郑振平 齐少康 杨运生 (194)
- HP9134 煤粉余热用低温热管的实验研究 孙曾润 杨武 徐礼华 (197)
- HP9135 倾斜管束对热管换热器积灰的影响 虞斌 庄骏 张有衡 (203)
- HP9136 热虹吸发动机初探 况健 陈远国 (213)
- HP9137 热管在低压蒸汽锅炉上的应用 朱友良 (219)
- HP9138 整体式热管平板换热器的实验研究 孙曾润 吴成亮 (222)
- HP9139 热管丰刀的研制 乔中复 刘建南 (227)
- HP9140 热管式余热锅炉的设计与应用 洪荣华 屠传经 (234)

HP9141	低温热管蓄热的应用研究	徐利军 王乃义 孙士海 王金忠 宁智 (239)
HP9142	热管及玻璃管空气预热器之比较	胡亚才 吴存真 屠传经 (243)
HP9143	型煤热管热水炉研制	赵荣第 韩春惠 刘德才 (246)
HP9144	热管技术在太阳能伞中的应用	张建成 袁竹林 刘明星 (252)
HP9145	热管空气加热器在罐头食品行业保温工艺中的应用	靳明聪 唐经文 李友荣 (255)
HP9146	电站煤粉锅炉高效热管空气预热器工业性应用研究及推广应用	倪德斌 陈大元 黄大钟 陈宗泽 龚宗华 (258)
HP9147	大型热管换热器应用于电站锅炉的几个典型用例	郭舜 侯增祺 邵兴国 孙成辉 米珉 (262)
HP9148	锅-水热管余热蒸汽锅炉的开发和应用	焦明远 王志明 (269)
HP9149	热管空预器在燃用劣质煤电站锅炉中的应用及设计中考虑的问题	李兵 (272)

热管研究动态

HP9150	热毛细对流现象对液膜流动稳定性的影响	卢政 童正明 孙维南 (278)
HP9151	热管制冷机	董玉冰 程尚模 (284)
HP9152	热管技术在高温烟气取样装置上的应用	袁竹林 (287)
HP9153	矩形虹吸管单相自然循环的传热研究	余其铮 (290)

热管信息	(293)
------	-------

宣读论文

HP9154	大型碳钢-水热管实验研究	曹鑫生 孙全平 朱国麟
HP9155	热管换热器在伏装锅炉上的可行性分析—作用和经济效益	姜炳庆
HP9156	热管换热器在浆纱机上应用的研究	姜炳庆
HP9157	在小氮肥厂吹风气回收技术中各种余热锅炉应用对比	王雪梅
HP9158	热管技术用于调整供热系统结构节能减污的探讨	宋金田
HP9159	热管技术的应用与推广	乔培汉
HP9160	二百安培自然硅整流元件热管散热器优化设计	郝玉福 苏俊林
HP9161	对空气预热器露点温度的探讨	薛瑞凤 高庆福 王晓波
HP9162	反焰式相变传热热管空气加热炉的研究	王明刚

- HP9163 双头热管特性研究 孙云凤 李淑英
 HP9164 热管在工业窑炉中的应用 董 军
 HP9165 热管余热锅炉的设计考虑 杨光绪
 HP9166 回收烟气余热的水器焓增率的计算方法及优化 赵玉珍

补 遗

- HP9167 分离型热管在冶炼高炉热风炉预热回收中的应用
 龚宗华 刘兴仁 黄大钟 陈宗泽 (296)
 HP9168 蒸汽机车热管给水预热装置系列的研制 李子君 (302)
 HP9169 热管在微压生活锅炉中的应用及前景 李向群 (305)
 HP9170 热管长距离输送热量的实验研究(一) 王岳人 郎 遑 (309)

半开启式重力热管的原理与实用

浙江大学 屠传经

常规的重力热管又称闭式两相热虹吸管(CTPT),已在国内外得到了广泛的应用。本文论述半开启式重力热管,又称半开启式两相热虹吸管(SOTPT),它与开启式两相热虹吸管或开启式重力热管(OTPT)既有联系又不完全相同,本文论述其原理及实际应用。

一、OTPT的发展历史

OTPT的示意图如图1,最早由Holzwarth在1938年提出[1],由Schmidt等[2]在1940-1945年第二次世界大战期间进行了研究,它用于燃气轮机叶片的冷却,在叶片通道内吸收的热流量为 Q_{in} ,工质为水,在自由表面通过压力调节产生沸腾,散失的热流量为 Q_{out} 。但是,它并没有得到工业性的应用。

由于OTPT的工作原理在多种场合下有其明确的应用背景,如从地下热源中产生蒸汽,核反应堆在失水事故(LOCA)下热表面的冷却等,因此有关OTPT流动及换热特性的研究工作一直没有中止,不断地有新的文章发表[3][4][5]。

Kryostik牌深冷探针[6],这是一种小型的手持式深冷外科器械,它采用一根OTPT,借助毛细吸液芯使液氮从贮液罐向流入探针的内腔,到达镀金的探针铜尖,并在该处蒸发吸热,液氮吸收气化潜热后成为氮气,通过尼龙螺帽自动排出。

OTPT在旋入式硅整流元件的散热中曾进行过试验研究[7],它以水为工质,硅整流元件的热量传给蒸发室(加热段),再由凝结盘管(放热段),将热量散给大气,在凝结盘管出口处,设有一根垂直管使工质与大气相通。

OTPT的结构简单,工作可靠;有不少应用背景,但作为热管式换热器应用于余热回收有一定的困难。近年来,在OTPT的基础上提出了SOTPT,可以应用于余热回收。

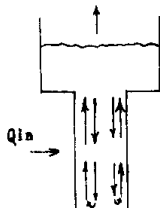


图1 OTPT示意图

二、SOTPT的发展现状

在OTPT的上端设置一个带有小孔的端盖,这一端盖将热管内部与外界隔开,但是,通过端盖的小孔及其上的水封层仍与外界相通,所以称其为半开启式重

力热管或半开启式两相热虹吸管(SOTPT)，其示意图见图2。

苏联乌克兰科学院技术热物理研究提出了如图2所示的半开启式重力热管换热器[8]，具有加热段及放热段。SOTPT的特点为结构简单，制造方便，成本低、工作安全可靠、性能良好(可以自动排除不凝性气体)。等等，但是，由于通过小孔及水封层热管内部与外界相通，热管内部的工作温度不高，当以水作为工质时，其工作温度即为100℃左右，SOTPT放热段外被加热的介质通常为水，加热后水的出口温度约为50~60℃左右。

为了提高热管的工作温度，可以采用提高水封层压力的方法或采用高沸点工质，一般认为，以采用水作为工质提高水封层的压力为宜。

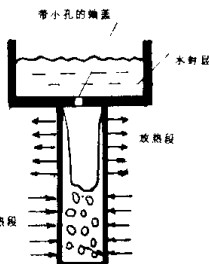


图2 SOTPT示意图

浙江大学热管教研组近五年来对SOTPT及其组成的换热器进行了系统的研究与开发，并不断进行改进，其主要特色为：

(1)当被加热介质与热管工质(即水封层介质)相同(均为水)时，可以将被加热介质与水封层合一[9]，这样一方面可以进一步简化结构，同时可以提高水封层的压力使其与被加热介质的压力一致。当被加热介质与热管工质(即水封层介质)不相同，仍采用水封层与被加热介质分离的结构。水封层与被加热介质合一的示意图见图3。

(2)采用可排污的SOTPT结构形式[10]。当水封层与被加热介质合一时，热管内部的工质与外界被加热介质相通。为了保证热管内部工质的洁净，下端没有排污管，可以进行定期排污。详见图4所示，定期排污放出的热水也可以利用。

(3)采用有进水孔的SOTPT结构形式[11]。当水封层与被加热介质合一时，如果热管的传输功率较高，将有一部分蒸汽经过小孔从热管中流出，此时推荐采用有进水孔的SOTPT结构形式。可以通过小孔，使水流回热管加热段，避免产生干涸现象，详见图5所示。

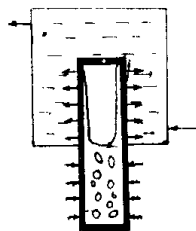


图3 水封层与被加热介质合一的SOTPT

(4)SOTPT的被加热介质可以是水、空气或是其它介质。对被加热介质是水而言，加热后的水可以是热水、开水或是变成蒸汽。也可同时加热两种介质（如水与空气）。

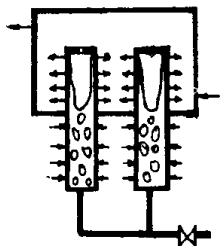


图4 可排污的SOTPT

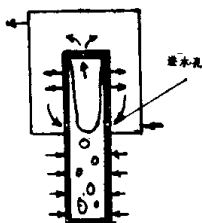


图5 有进水孔的SOTPT

(5)SOTPT可以与CTPT串联组合。根据具体情况加以合适的组合，如SOTPT用于加热水，而CTPT用于加热空气[12]等等，SOTPT也可单独应用。形色多种多样。

三、SOTPT的流动及换热特性

以图3所示的SOTPT作为研究对象

(1)两个转折点的概念

图6是SOTPT凝结段(即放热段)的工作状态图，由图中可见，在不同工况下，其凝结段工作长度是变化的，存在着三种工作状态[13][14]，

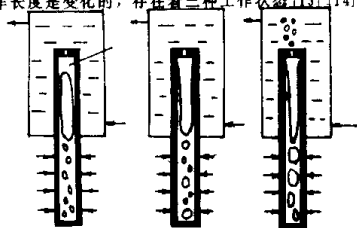


图6 SOTPT凝结段的工作状态图

a) 工作段长度小于凝结段长度。当低热负荷工作时，蒸汽段上部存在着一段水柱，水柱随着热负荷的提高而逐渐缩短，称为状态a)。

b) 工作段长度等于凝结段长度。在某一工况下，水柱刚好消失，热管的凝结段达到了全蒸汽工作状态，称为状态b)。

c) 在状态b)后继续增加热负荷，此时热管凝结段继续保持全蒸汽状态，但工作段长度超出凝结段长度，有汽泡从顶部小孔冒出，并在水封层中凝结消失，称为状态c)。

我们称状态b)为SOTPT达到了第一转折点，相应的热负荷为临界热负荷 q_{cr1} 。在状态c)后，如热管的热负荷继续提高并达到第二转折点时，此时沸腾段由核态沸腾转变为膜态沸腾，相应的热负荷为临界热负荷 q_{cr2} 。第一转折点及其附近是SOTPT的正常工作范围，而第二转折点则预示了STPT性能恶化的起点。

SOTPT的沸腾换热系数与CTPT时的沸腾换热系数的计算方法相同，由于SOTPT的工作压力较低，相应地其沸腾换热系数较低。

SOTPT的凝结换热系数与CTPT时的凝结换热系数的计算方法相比有很大的不同[15]，图7表示SOTPT以整个凝结段换热面积为基准的凝结换热系数与热负荷的关系，当SOTPT开始正常工作，但还未达到第一转折点时，凝结换热系数随着热负荷的提高而提高。当工况超过第一转折点后，由于部分蒸汽穿过顶盖小孔进行直接接触式凝结，凝结换热系数的提高幅度较第一转折点前大。

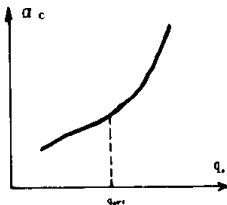


图7 凝结换热系数与加热段热负荷的关系

当工况达到并超过第二转折点时，沸腾换热系数剧烈下降，并引起连锁反应，导致凝结换热系数下降。

(3) 长度比、顶端小孔等对转折点的影响[15]，长度是指SOTPT中凝结段长度与沸腾段长度之比，我们在长度比为0.4~0.8的范围内进行了试验研究，得到的结果是，小长度比的SOTPT的两个转折点比大长度比的SOTPT更早到达。因而大长度比的SOTPT工作更为可靠。

当顶盖小孔直径小于3mm时，其直径大小对两个转折点的影响均可忽略。

(4) 热管总热阻[15]

我们用以加热段外表面积为基准的热管总热阻作为衡量SOTPT传热性能指标，以相同尺寸的CTPT作为对比对象，进行多种规格热管的对比得出了如下的结论，

a)对于大长度比的SOTPT, 其传热性能在低热负荷时与CTPT相比, 处于劣势, 但随着热负荷的提高, 由于凝结换热系数的增加, 使SOTPT的传热性能迅速改善, 最后接近并超过了CTPT。大长度比、高热负荷(以不超过第三转折点工况为前提)是具备良好传热性能的重要条件。

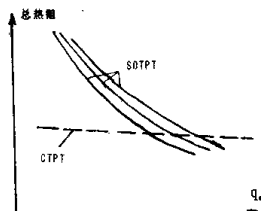


图8 大长度比SOTPT的传热性能

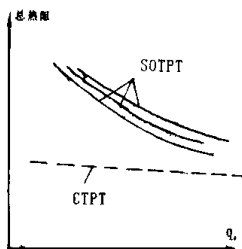


图9 小长度比SOTPT的传热性能

b)对于小长度比的SOTPT, 其传热性能随着热负荷的增大也逐渐与CTPT缩小了差距, 但最后并没有达到CTPT的传热水平。

(5)工作安全性 [15]

SOTPT工作安全性受第二转折点的影响, 当工况达到第二转折点时, 出现

了局部烧干，且随着热负荷提高而于涸面积迅速扩大，加热段壁温发生飞升。

我们提出了一个方案，就是在SOTPT凝结段下部开一组小孔，作为加热段缺陷时的一种回流补充手段。在第一转折点之前及附近，回流作用比较微弱，可听到轻微咝咝声。当工况接近第二转折点时，壁温趋向于上升，此时回流作用明显，发出间隔的“呜呜”呼啸声。开小孔后，第一、二转折点都略向后移。沸腾部位的加热段壁温在第二转折点时出现周期性波动而不是飞升，如图10所示。最易发生烧干的部位其壁温波动最明显，壁温波动周期与热负荷成反比。开回流小孔后，对换热效果并无影响。

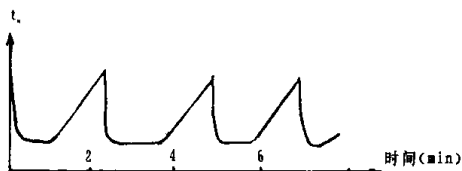


图10 加热段壁温波动

四、SOTPT的实际应用

SOTPT组成的热管式换热器已有一大批正在运行之中，下面叙述几个实例。

(1) 加热空气用的SOTPT换热器，采用图2所示的SOTPT形式，应用于浙江省德清县面砖厂陶瓷窑冷却带中，空气可加热到50℃左右。由于SOTPT换热器在停电导致空气不能送入冷却SOTPT的放热段时，不会引起热管内工作压力的剧烈升高，特别适用于乡镇企业窑炉的余热回收。在陶瓷窑冷却带中利用烧红面砖急冷时放出的辐射热通过热管加热空气，当无空气送入时，如采用CTPT，其工作压力将超过允许值可导致热管爆破。由于加热后的空气送入烘房应，所需温度不高于(50℃)；因此采用SOTPT是最适合的方案。

(2) 生产开水用的SOTPT换热器，采用图3所示的SOTPT形式，应用于浙江省湖州钢铁厂化铁炉烟气余热回收，由于该处烟气温度较高(500℃)，采用CTPT时如果发生断水事故，其工作压力将超过允许值导致热管爆破。采用SOTPT是合适的方案。该厂最初用的是CTPT换热器，热管损坏后才改用SOTPT换热器，效果良好。

(3)生产热水用的SOTPT换热器,采用图4所示的SOTPT形式,应用于浙江省富阳县新义造纸厂工业锅炉尾部烟气余热回收。由于水封层与被加热介质合一,而被加热的水直接来自河水,没有经过水处理,乡镇企业各方面的管理也不够完善,所以选用可排污的SOTPT换热器,效果良好。

(4)产生蒸汽用的SOTPT换热器,采用图5所示的SOTPT形式,应用上海第八钢铁厂轧钢加热炉尾部烟气余热回收,效果良好。

五、结 论

SOTPT换热器有很好的应用前景,特别适合于乡镇企业;工作安全可靠,不会因使用不当而引起爆炸;结构简单,制造成本低廉,性能良好。

参考文献

- [1] H. Holzwarth, Die Entwicklung der Holzwarth-Gasturbine, Holzwarth-Gasturbinen, Gmbh Mueltheim-Ruhr(1938)
- [2] E. Schmidt, Heat Transmission by Natural Convection at High Centrifugal Acceleration in water cooled Gasturbine Blades, Proc. Inst. Mech. Eng. ASME(London)Conf. Proc. 361—363(1951).
- [3] P. Griffith et al., Flooding and Burn out in Closed end vertical Tubes, Symp. Two-phase Flow, Proc. Inst. Mech. Eng. 33 39. (1962)
- [4] H. Kusuda and H. Imura, Boiling Heat Transfer in an Open Thermosyphon, Bulletin of the JSME vol 16, No 101, Nov. 1723—1740.(1973).
- [5] Z. Nejat, Effect of Density Ration on Critical Heat Flux in Closed End vertical Tube, Int. J. Multiphase Flow, vol. 7, 321—327.(1981)
- [6] [美]S.W.纪著,蒋章培译,热管理理论与实用,科学出版社, P28. (1986)
- [7] 重庆大学热管科研组,旋入式硅整流元件热管散热器试验,重庆大学科技, No.3, 26—32.(1975)
- [8] И.Л.Пиро, Котёл-утилизатор Нового Типа, Стекло и Керамика, no 11, (1981)
- [9] 中国专利87200256,可拆卸的散开型热管式换热器

- [10] 中国专利88201307.6, 可排污的敞开型热管式换热器
- [11] 中国专利88201185.5, 喷汽型热管式锅炉
- [12] 中国专利88217498.3, 组合型热管换热器
- [13] 汪金池, 开启式热虹吸管传热特性研究, 浙江大学硕士学位论文, 1988年
- [14] 蔡磊, 开启式热虹吸管流动特性研究, 浙江大学硕士学位论文, 1989年
- [15] 朱华, 敞开型热虹吸管传热特性的理论和实验研究, 浙江大学硕士学位论文, 1990年

热管在中国航天器上的应用

侯增祺

(航空航天部第五〇一设计部)

摘 要

本文介绍了为航天器热控制系统而研制的各种热管及其性能。并介绍了热管在我国航天器上应用的情况,包括热管在不同卫星上的应用方案、工作特点、试验性能及在轨道上运行的结果等。最后还介绍了适用于大型航天器的新技术——毛细泵两相环的进展。

一、引 言

为航天技术的需要,我国早于1970年开始了热管的研制工作,并于1976年首次在我国返回式卫星上试验应用,取得了成功。自1978年至今已在18颗卫星上应用了热管,不仅为我国航天器热控系统提供了有效的新技术,并为我国航天器热控技术赶上国际水平起到重要作用。

我国卫星上应用的热管主要是铝及铝合金轴向槽道热管,工质以氨为主。由于此种管芯的热管其最大传热能力、毛细限可以较为正确地预计,且热管弯曲后性能几乎不变,其传热能力及工作温度范围也适合于卫星应用的需要。所以,如今国外卫星上所用的热管也以铝合金轴向槽道热管为主。我国发展了不同尺寸和不同工质的低温铝合金轴向槽道热管,在制造工艺方面也不断改进,使热管的性能及可靠性不断提高,保证了热管在卫星上长期可靠地工作。在轨道上运行最长时期已达六年多,性能仍然不变。

热管在卫星上的应用研究仍在继续进行,目前已为新的卫星研制了镶嵌热管的蜂窝仪器板及辐射器。为跟踪国际高技术并为我国发展空间站热管理系统而进行了毛细抽吸两相环的研究。本文亦将简要介绍这些研究工作。

二、用于航天器的各种热管的性能

自1970年开始,根据我国航天器的需要并考虑今后的发展,研制了轴向槽道热管、高性能干线管芯热管以及可控热管等。

铝及铝合金轴向槽热管的各种截面形状示于图1。其尺寸及性能数据列于表1。热管的工质以氨为主，同时也研制了有氦及氦为工质的深低温热管和以丙酮为工质的热管，其工作温度自26K至380K。此类热管的理论计算方法及试验结果见文献[1]。

高性能干线热管是由管内壁面的周向螺纹细槽与隧道干线或平板干线组成的组合管芯。此组合管芯使蒸发及凝结表面与液体回流通道分开，从而较大地提高了热管的传热能力及传热系数。图2及表2表示了此种热管的性能。

图3及图4表示了可变导热热管的结构及试验特性。当采用或不采用电反馈控制时，试验性能表示，在加热功率自1.3W变化到26W以及冷端温度自 -50°C 变到 -20°C 的条件下，蒸发段温度均能维持在较好的范围内。特别是采用电反馈控制时，其控温精度可达到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

三、热管在航天器上的应用

我国在卫星上第一次应用热管是1976年12月7日，用于将仪器的热量加热温度偏低的仪器。在未装热管前两者温度分别为 16°C 及 3°C ，安装热管后使两者温度均为 7°C 。这是两次飞行数据的对比。作为第一次试验应用，热管装于返回卫星的回收舱，因此可以回收。此热管保存至今，性能仍然不变。试验成功后，即将21根热管组成一个系统，在效地组织了卫星内部各仪器之间的换热，提高了卫星的热控水平。例如，为保持星内能源部件的温度，原使用电加热方法，而且只能达到 5°C 。采用热管后省去了加热电源，并使部件温度达到 24°C ，处于理想工作温度。此外，热管还将卫星壳体温度拉平，造成一个较好的环境。该系统连续在七颗卫星上应用均取得成功。

热管于1984年4月又一次应用于我国的同步通讯卫星[2]。由于卫星是以每分钟50转的速度自旋的，虽然在轨道上处于微重力环境，但旋转引起的体积力给热管的工作加上不少限制。热管除了用于个别仪器的散热外，主要用于关键部件的散热。由于此部件(TWT)发热率较高，处于星内不易散热，为此利用热管将TWT的发热量传到处于星外的散热罩上，向空间排散。由于旋转产生离心力，所以要求热管自热端开始到冷端之处，沿途它与卫星轴线之间的距离 R 只能逐渐减小，不允许任何一处有局部的增加，如以热端开始沿热管的长度为 Z ，则 $dR(Z)/dZ \leq 0$ 。方案如图5所示，通过遥测部件TWT及散热罩的温度，当两者接近时，说明热管工作正常，两者之间的温差主要来源于热管与TWT之间以及热管与散热面之间安装所带来的接触热阻。图6表示了前三年的运行数据，以后的数据表示性能仍然很好，如1987年1月19日，TWT温度为 45.52°C ，散热罩温度为 41.83°C ，1988年3月23日它们的温度分别为 49.63°C 及 45.52°C 。直到1990年采集到的数据热管工作仍然