# 空间大功率热排放系统设计<sup>®</sup>

卢佳鑫<sup>1</sup>,孙贺涛<sup>1</sup>,栾秀春<sup>1</sup>,周 成<sup>2</sup>,王 戈<sup>2</sup>

(1.哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室,哈尔滨 150001;2.北京控制工程研究所,北京 100190)

摘 要:根据空间大功率热排放系统的要求,参考美国航天局提出的双翼热管式辐射散热器,提出了在结构上 改进的热管式辐射散热器。总体设计为四翼对称式辐射散热器,四翼均为相同独立工作。散热器由主回路管道、泡 沫碳换热器、热管和散热板四部分组成,主回路管道选取钠钾合金为工质,换热管选取水为流体工质。系统废热通 过钠钾合金冷却回路传递到泡沫碳换热器,泡沫碳换热器再传递给水热管辐射板,通过辐射换热释放到太空。对热 管散热器进行了结构设计以及初步热设计,为大功率深空探测器热排放系统提供了最优的设计结构及参数。

关键词:热排放系统;热管式散热器;钠钾合金
中图分类号: V444.3 文献标识码:A 文章编号:1674-7135(2021)02-0096-08
D O I:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.02.016

# Design of space high power thermal emission system

LU Jiaxin<sup>1</sup>, SUN Hetao<sup>1</sup>, LUAN Xiuchun<sup>1</sup>, ZHOU Cheng<sup>2</sup>, WANG Ge<sup>2</sup>

(1. Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory, Harbin Engineering

University, Harbin 150001, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: According to the requirement of space megawatt-level high power heat emission system, a new type of heat pipe radiating radiator is put forward by referring to the two-wing heat pipe radiating radiator proposed by NASA. The radiator is composed of four parts: main loop pipe, foam carbon heat exchanger, heat pipe and heat dissipation plate. The main loop selects sodium potassium alloy as the working medium, and the heat pipe selects water as the working medium. The difference with the American design lies in that this design is a symmetrical radiating radiator with four wings. All four wings work independently, and wast heat of the system is transferred to the carbon foam heat exchanger transfers the radiant plate of the water supply pipe, and heat of the system is transferred to the carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger through the sodium-potassium alloy cooling loop. The carbon foam heat exchanger. The structural design and preliminary thermal design of heat pipe radiator are carried out, which provides the optimal design structure and parameters for the heat discharge system of high-power deep space detector.

Key words: heat emission system; heat pipe radiator; potassium sodium alloy

# 0 引言

上世纪五十年代以来,空间技术发展迅猛,1957

年10月4日,苏联发射了世界上第一颗人造卫星, 标志着人类跨入航天时代。空间资源的开发依靠航

**基金项目**:100KWe 级空间大功率热排放系统设计及样机研制(编号:KY11500170057) 作者简介:卢佳鑫(1994—),硕士研究生。研究方向为核动力装置性能与设备。E-mail:jiaxin@hrbeu.edu.cn 通讯作者:栾秀春(1975—),副教授、博士。研究方向为核动力装置性能与设备。E-mail:luanxiuchun@hrbeu.edu.cn

① 收稿日期:2019-11-27;修回日期:2020-12-03。

天技术的发展,空间动力系统是空间技术发展快慢的重要因素,空间动力系统目前大多数采用核动力 系统。

大功率热排放系统是空间核电推进系统一个子 系统,其功能是将布雷顿热电转换产生的废热排出, 为其提供最终热阱。相比于其它能源电池,空间核 反应堆电源具有能量密度高、寿命长以及独立等优 点<sup>[1]</sup>。国外对热排放系统的研究,主要以美国普罗 米修斯计划中提出的热管式辐射散热器模型为主, 提出了大功率航天器热管式辐射散热器模型为主, 提出了大功率航天器热管式辐射散热器的结构设 计<sup>[2-4]</sup>。国内对此的研究近几年也逐渐深入,其中 张秀等人分别对热管式空间辐射散热器的翅片散热 效率和系统质量特性进行优化分析,获得最优设计 参数<sup>[5-8]</sup>。

本文采用空间散热系统中最常使用的热管式辐射散热器<sup>[9-10]</sup>,根据设计航天器的特点及要求,图1 为热管式辐射散热器示意图。本文依据目前对大功 率空间核反应堆功率的需求,提出大功率热管辐射 换热器。



Fig. 1 Schematic diagram of heat pipe radiant radiator

## 1 总体结构与分析

参考美国提出的两翼热管式辐射换热器,为缩 小桁架展开长度,减小展开后机械振动以及与空间 微流星的碰撞概率,本文提出了"十"字形辐射换热 器,其四组辐射板组呈 90°垂直布置独立工作,如图 2 所示。不仅克服了两翼存在的上述问题,也消除 了其存在单点失效的致命弱点,任何一根辐射管道 的破裂均不会导致系统发生 LOCA<sup>[11]</sup>。



图 2 "十"字形散热器整体结构 Fig. 2 Integral structure of "ten" radiator

当此结构处于工作状态时,结构中板面 A 和板 面 B 由于角度遮盖的原因,在进行辐射换热计算时, 则需要考虑两个板面相互影响,具体见下节辐射换 热计算原理。

## 2 单翼管道结构

各管道结构如图 3 所示,由回路主管道、散热板 组分支管道、换热管三种类型的管道和泡沫碳换热 器组成。各部分结构和功能如图 3 所示。





连接主热交换器和电磁泵管路为热端引入管和 冷端回流管。板组之间短线段为主回路管段,作用 是将冷却工质通过分支管道输送到各片散热板对应 的泡沫炭换热器。本文对未插入泡沫碳内的管路当 做绝热处理,因为裸露在外太空中,辐射散热所占份 额较少可以不计。换热管是泡沫炭换热器的组成部 分,每个泡沫碳换热器中布置四根完全相同的换热 管。流经泡沫碳内部换热管的冷却工质携带的热 量,通过导热传递给泡沫碳、热管的蒸发段<sup>[12]</sup>。 空间热排放系统的设计计算所依据的指导思想 为流动力平衡和热平衡。总体思路为:

1)依据系统输入温度、系统输出温度,估算设定 热交换回路中在各换热管段的平均温度 t<sub>i</sub>,据此将 每一翼散热功能组的总传热量分配给各个散热板单 元,分别为 Q<sub>i</sub>。





Fig. 4 Schematic diagram of heat flow of heat exchanger

2)依据分配到的传热量和热沉温度,计算出各 散热板单元获得热量的温度  $t'_{i}$ 。热平衡时,应满足  $t_i = t'_{i}$ 。

3)根据 t<sub>i</sub>与 t'<sub>i</sub> 的偏差程度,修正 t<sub>i</sub>,重新分配每
 一翼散热功能组的传热量。重复上述计算过程,直
 到满足 t<sub>i</sub>-t'<sub>i</sub><ε 为止,式中 ε 为误差精度。</li>

4) 热交换回路系管网结构, 流动计算需满足压 降平衡。

5)在满足上述流动力平衡和热平衡,满足管道 承压强度校核,以及工业设计的相关标准等条件下, 获得结构设计参数和热工水力特性数据。

# 4 热工水力分析

## 4.1 回路循环管道

热交换循环管道,总体上设计为两类:绝热管、

换热管。绝热管的功能是将循环工质输运到联通管 道各个部位;换热管布置在泡沫炭换热器中,功能是 进行热交换。对循环路管网流动计算采用迭代算法 进行求解。管网的水力计算必须满足以下原则:

1) 流入结点的流量应等于流出结点的流量。

$$\sum q_v = 0 \tag{1}$$

2) 在任一环路中, 由某一结点沿两个方向到另 一个结点的能量损失应相等。

$$\sum h_f = 0 \tag{2}$$

3)各管道的沿程损失按达西-魏斯巴赫公式计 算,并可用体积流量表示为:

$$h_f = \left(\frac{8\lambda l}{\pi^2 g d^5}\right) q_v^2 = \zeta q_v^2 \tag{3}$$

对于很长的管道系统,局部损失可以忽略不计。 传热计算中,采用钠钾合金工质和水工质的热交换 回路,其工作都属于单相工质流动和换热,传热量依 据公式计算

$$\Phi = \frac{\lambda}{d} N u_f A \Delta t \tag{4}$$

其中: $\Phi$  为热流量;A 为传热面积; $\Delta t$  为温差; $\lambda$  为 流体的导热系数;D 为管道的内径; $Nu_f$ 为努塞尔特数。

1) 热交换回路分别采用钠钾合金工质和水工质 两个工质进行计算, 其中努塞尔特数 Nu<sub>f</sub>的计算采 用不同的实验关联式。

2) 热交换回路中的流动工质采用钠钾合金属于 液态金属,在满足恒热流边界条件的情况下,可采用 以下实验关联式进行换热计算<sup>[13]</sup>:

$$Nu_f = 4.82 + 0.0185Pe^{0.827}$$
(5)

式中,Pe----贝克莱姆数,

$$Pe = \frac{vd}{a} = \frac{vd}{\frac{\lambda}{\rho c_{p}}} = \frac{vd\rho C_{p}}{\lambda}$$
(6)

其中: $C_p$  为液态金属的定压比热; $\lambda$  为液态金属的导 热系数; $\rho$  为液体金属的密度;D 为管道的内径;v 为 工质的平均流动速度。定性温度为流体平均温度, 实验验证范围 3.6×10<sup>3</sup> < Re < 9.05×10<sup>5</sup>, 10<sup>2</sup> < Pe < 10<sup>4</sup>。

3) 热交换回路中的流动工质水,采用 Gielinski 公式进行换热计算:

$$Nu_{f} = \frac{(f/8) (Re - 1000) Pr_{f}}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr_{f}^{2/3} - 1))} \left[ 1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{2/3} \right] c_{i}$$
(7)

对液体

$$c_{t} = \left(\frac{Pr_{f}}{Pr_{w}}\right)^{0.01}, \frac{Pr_{f}}{Pr_{w}} = 0.05 \sim 20$$
(8)

其中:*l*为管长;*f*为管内湍流流动的 Darcy 阻力系数,按照佛罗年科(Filonenko)公式计算<sup>[13]</sup>。

$$f = (1.85 \times \lg Re - 1.64)^{-2}$$
(9)

Gielinski 公式的实验验证范围为  $Re_f = 2300 \sim 10^6$ ,  $Pr_f = 0.6 \sim 10^5$ 。循环工质采用钠钾合金和水的交换回路中, 回路主管道各管段热工水力特性数据如图 5。



Fig. 5 Main loop temperature distribution

通过计算两种不同工质的管路温度,可以得出 水工质和碱金属工质在主回路管道温度梯度相同。 计算管道温度以满足整体换热要求,从温度分布来 看,钠钾合金温度排布比水工质的更加合理。

#### 4.2 泡沫碳换热器设计

泡沫碳的密度低、导热系数高,它还具有耐高 温、耐腐蚀、强度高、抗冲击、易加工等特点以及良 好的导电导热性能<sup>[14]</sup>。这些优异的性能使泡沫炭 在电子散热、化工、航空航天等诸多技术领域内极 具应用潜力,非常适合被制成换热器中的填充导热 材料。

本文中,泡沫碳换热器满足以下三种边界条件:

1) 热管内壁面满足恒定温度边界条件,设定温 度为 480 K;

2)钾管道内壁面流动液态金属间的传热满足第 三类边界条件;

3)由于泡沫炭换热器长期处于宇宙空间中,热 辐射换热效率极低,换热量极少,故外表面作绝热边 界条件处理。

图6是泡沫碳换热器热流密度分布云图,在泡

沫碳换热器中部、热管周围热流密度很大,最大的位置位于顶部热管与底部热管的两侧。由于换热器外边界与真空辐射换热量极少,故在钠钾合金管道之间以及外侧部分热流密度很小。所以,在减小泡沫碳填充的重量上。全部填充的泡沫碳换热器,具有很大的优化潜力。在考虑重量和地面加工的因素上,对泡沫碳进行了结构上的优化<sup>[13]</sup>。



通过参考其它文献得到的泡沫碳结构具有可 优化特性,对泡沫碳换热器进行改进。既满足换热 要求,又减少换热器整体的重量。根据单位质量的 传热效率高,同时考虑加工便捷,来确定泡沫碳的 形式。



#### 4.3 热管设计

如图 3 所示,热管布置在辐射散热板中,每一块 辐射散热板中布置的 14 根热管具有相同的热工水 力特性,热管的传热存在着一系列的传热极限,这些 传热极限与热管尺寸、形状、工作介质、吸液芯结构、 工作温度等有关,限制热管传热量的类型是由该热 管在某工作温度下各传热极限的最小值所决定的。 通过计算极限得到的最小的传热极限为毛细极 限<sup>[15]</sup>,热管位于蒸发段热源和冷凝段热阱之间,热 管在传递热量的过程中,自身各部分的热阻组成了 一个等效热阻网络,其示意如图 8 所示。



Fig. 8 Equivalent thermal resistance network

*R*<sub>2</sub> 与 *R*<sub>8</sub> 分别为蒸发段与冷凝段的热管壁径向 热阻,*R*<sub>3</sub> 与 *R*<sub>7</sub> 分别为蒸发段与冷凝段的吸液芯径 向热阻,运用柱状热阻进行计算:

$$R_{m} = \frac{\ln(d_{0}/d_{i})}{2\pi k_{n} l_{e}}$$
(10)

 $R_{10}$ 与 $R_{11}$ 分别为热管壁与吸液芯轴向热阻, $R_5$ 为水蒸气气空间轴向热阻,运用一维导热热阻进行 计算。 $R_4$ 与 $R_6$ 分别为蒸发段与冷凝段气液交界面 的热阻,利用相关资料给出的公式:

$$R_{4} = \frac{R_{g} T^{2} (2\pi R_{g} T)^{\frac{1}{2}}}{l^{2} P \pi d_{v} l_{e}}$$

$$R_{6} = \frac{R_{g} T^{2} (2\pi R_{g} T)^{\frac{1}{2}}}{(l^{2} P \pi d_{v} l_{e})}$$
(11)

以主回路采用钠钾合金工质计算的结果为初始 条件,依据 Cotter 理论进行计算,获得各热管的蒸发 端和冷凝端温度<sup>[16]</sup>,计算过程如图 9 所示。

如图 10 所示,钠钾合金工质中,热管的热端温 度高于水工质的热管。但是由于热管中都只采用水 为工质。由于热管的等温性,各热管的温度梯度是 相同的。



Fig. 9 Heat pipe design and calculation flow chart



#### 4.4 辐射散热板设计

4.4.1 辐射散热板结构设计

采用长方形平板结构,使用高导热性能的材料 石墨烯作为板面材料;热管等间距布置在散热面上, 沿高度方向贯穿,长度方向间距100 mm;未布置热 管的板面厚2 mm,布置热管的位置,沿管外壁板面 材料厚1 mm,两侧对称布置。结构图如图11 所示。



Fig. 11 Cooling plate composition

## 4.4.2 传热计算模型

各块辐射散热板向宇宙空间散热,构成了一个 多表面系统的辐射传热问题。传热计算依据下列准则:

1)由于辐射散热板中内嵌的热管具有很好的等 温特性,板面采用高导热系数的石墨烯材料,故认为 每块辐射散热板具有单一的温度;

2)辐射散热板表面满足漫灰表面的物理特性, 镶嵌处的突起的几何尺度相对于整个辐射散热板的 几何尺度可以忽略不计,认为板面是平面。

## 4.4.3 辐射角系数计算

目前常用的计算辐射角系数的方法有两大类, 分别是分析计算法和数值计算法,本课题采用蒙特 卡罗法计算辐射角系数<sup>[17]</sup>。蒙特卡洛的基本思路 为:将一个表面 A 发射的辐射能当做由很多能束组 成,每个能束具有一定的能量,它们的发射位置和发 射方向是随机的,逐个跟踪每个能束的行程,当光线 的数量足够多时,就能得到具有一定统计意义的结 果。



图 12 角系数计算流程



通过蒙特卡洛方法计算角系数,重要就是如何 引入随机数来模拟能束随机性。在这里引入随机数 *R*<sub>1</sub> 和 *R*<sub>2</sub> 来表示能束入射目的面积时的方向随机 性。通过半球入射关系可以导出,方向角和随机数 之间的关系<sup>[17]</sup>。

$$in\theta = \sqrt{R_1}, \phi = 2\pi R_2 \tag{12}$$

其中 *R*<sub>1</sub>*R*<sub>2</sub> 为区间[0,1]内均匀分布的随机数。 4.4.4 多表面系统的有效辐射

应用辐射网络法,建立 n 个表面间的辐射换热 方程组可以得多表面系统的辐射传热问题中的有效 辐射

$$J_i - (1 - \varepsilon_i) \sum_{i=1}^n J_j X_{i,j} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \qquad (13)$$

由于4个辐射散热板组的结构参数完全一样, 而且是垂直对称分布的。因此选择相邻两个辐射散 热板组相对的两个面和宇宙空间作为研究对象,建 立辐射散热方程组。

$$J_i - (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^{57} J_j X_{i,j} = \varepsilon_i \sigma T_i^4, i = 1, 2 \cdots 57$$
(14)

由于宇宙空间可以看成是203 K的黑体,那么

$$J_{57} = E_{b57} = \sigma T_{57}^4 \tag{15}$$

也可以写成以下形式:

$$\mathbf{AJ} = \mathbf{b} \tag{16}$$

其中 A 是系数矩阵,可以将矩阵 A 分为 28×28 的 4 个分块矩阵,将矩阵 b 可分为 28×1 的 2 个分块 矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} & \mathbf{Y} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{W} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}$$
(17)

又已知散热量与有效辐射的关系为

$$\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i}} \tag{18}$$

因此,(11)式可表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{Y} \\ -\mathbf{E} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} (19)$$

$$\mathbf{H}$$

$$T = Y^{-1}H + H + Y^{-1}U$$
(20)

由于1块散热板2面都有辐射散热,在已知板 散热量Q求散热板平均温度的情况下,将Q除以2 后作为Φ再带入计算。经过计算,得到循环工质采 用钠钾合金和水的热交换回路对应的辐射散热板组 中各散热板的对太空角系数、有效辐射、散热量,如 图 13 所示。





Fig. 14 Each cooling plate dissipates heat

通过使用蒙特卡洛法计算散热板间的辐射换热 角系数<sup>[18-19]</sup>。然后建立散热板间的辐射换热网络, 列出各节点方程,然后通过推导出散热板组中散热 板间的辐射换热方程组的通用表达式列出方程组。 根据设计要求的散热量求解出每块散热板的平均温 度,并计算出了整个系统的散热量。

## 5 结论

本文参考其他空间散热器设计,针对兆瓦级大 功率散热要求设计了一种新型四翼热管式辐射散热 器。并对辐射换热器进行了数值计算,得到了散热 器各主回路以及散热板的温度分布。对辐射散热器 的四部分热力和水力计算结果显示,基本满足工程 设计要求。论文主要完成以下工作:

1) 对热管式辐射散热器进行结构上改变,从双 翼变为四翼,达到缩小长度,减小机械振动的效果;

2) 对泡沫碳换热器进行结构设计,通过仿真模 拟得到在满足换热要求下,整体质量最小的结构布 置;

3) 对辐射散热板完全打开时,进行了辐射散热 计算,并得到各个板面的散热量。 由于处于系统设计的初级阶段,在后续工作中, 将进一步对系统的各部分进行系统优化。

# 参考文献:

- [1] LEVINE B. Space Nuclear Power Plant Pre-Conceptual Design Report, For Information [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 50(4):303-310.
- [2] EL-GENK M S. Space nuclear reactor power system concepts with static and dynamic energy conversion [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(3):402-411.
- [3] SIAMIDIS J , SERVER N T R . Heat Rejection Concepts for Brayton Power Conversion Systems [J]. Aiaa Journal, 2005,06(4):15-35.
- [4] 陈世森,倪淑燕,廖育荣.微小卫星综合电子系统综述[J].空间电子技术,2020,17(5):82-87.
- [5] 许焕宾,韩修柱,陈燕,等.空间大型载荷平台在轨构建 技术探讨[J].空间电子技术,2018,15(2):42-48.
- [6] 张秀,张昊春,刘秀婷,等.空间核电源热管式辐射散热
   器热分析与参数优化[J]. 宇航学报,2019,40(4):452-458.
- [7] 张文文,陈静,田文喜,等. TOPAZ-II空间电源系统辐射器改进研究[J].原子能科学技术,2016,50(8): 1402-1409.
- [8] 苏哲,凌菲,张茁,等.北斗空间信号质量监测与载荷工 作状态评估技术研究[J].空间电子技术,2018,15
   (4):17-22.
- [9] 高欢,马亚锋,孙树峰.一种大功率电源模块的低功耗 供电线路设计[J].空间电子技术,2020,17(1):88-92.
- [10] REAY D, MCGLEN R, KEW P. Heat pipes: theory, design and applications [ M ]. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [11] MARTIN B W . Heat Transfer: J. P. Holman [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1982, 3(1):51-52.
- [12] 王军辉,颜建国,郭鹏程,等.水平小通道内高温熔盐
   对流传热特性实验研究[J].水动力学研究与进展(A
   辑),2019,34(1):21-27.
- [13] 石佳子.空间热排放系统泡沫炭换热器的设计与优化 [C]//第十五届全国反应堆热工流体学术会议, 2017:118-1194.
- [14] 肖正浩.泡沫炭及其复合材料的制备研究[D].大连: 大连理工大学,2008.
- [15] 吕军,黄锐,郑明嘉.热管技术在塑料加工中的应用及 展望[J].中国塑料,2003(3):6-11.
- [16] DUNN P D, REAY D A. The heat pipe [J]. Physics in Technology, 1973, 4(3):187.
- [17] HUANG Y , XIA XL , TAN HP . Influences of thermal

radiation on the heat transfer of a laminar flow semitransparent fluid in a cylindrical tube[J]. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2001, 21(11):29-33.

[18] BADAL A, KYPRIANOU I, BANH D P, et al. PenMesh-Monte Carlo Radiation Transport Simulation in a Triangle Mesh Geometry [J]. IEEE Trans Med Imaging, 2009, 28 (12):1894-1901.

[19] CORRE B L, COLLIN A, SOUDRE-BAU L, et al. Glasssagging simulation with improved calculation of radiative heat transfer by the optimized reciprocity Monte Carlo method[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 70(2):215-223.