

空间环境模拟设备板式-导热油热沉的设计与验证

冯大伟¹, 刘伟成^{1,2*}, 李向阳¹, 马跃兰^{1,2},
曹斌¹, 范志剑^{1,2}, 颜昌林^{1,2}, 闫格^{1,2}

(1.兰州真空设备有限责任公司华宇分公司, 兰州 730050; 2.兰州空间技术物理研究所, 兰州 730050)

摘要: **目的** 研究板式-导热油热沉中, 导热油入口流速、热沉夹层厚度以及板材焊点矩阵间距对热沉温度均匀性和进出口压损的影响。**方法** 通过理论计算、借助 CAE 仿真软件, 设计单因素仿真试验, 对热沉表面温度均匀性以及进出口压损进行分析, 根据单因素仿真试验结果确认最优参数。**结果** 在寻求热沉表面温差 ≤ 1.55 K, 且压损尽量小的过程中, 能够达到该热沉最优性能的参数组合为导热油入口流速 2 m/s、夹层厚度 8 mm、板材焊点矩阵间距 60 mm。根据仿真结果制作实物热沉并测试, 测试显示热沉表面温差为 1.28 K, 仿真值与其之间的误差为 4.13%; 压力损失为 22 943.7 Pa, 仿真值与其之间的误差为 4.05%。**结论** 该模型仿真结果与实测之间的误差在 5%以内, 说明仿真模型可靠, 可以作为板式-导热油热沉的设计依据。

关键词: 环模设备; 板式热沉; 导热油; 温度均匀性; 压力损失; 有限元仿真

中图分类号: TJ04 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)03-0044-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.006

Design and Verification of Plate-heat Transfer Oil Heat Sink for Space Environment Simulation Equipment

FENG Dawei¹, LIU Weicheng^{1,2*}, LI Xiangyang¹, MA Yuelan^{1,2}, CAO Bin¹,
FAN Zhijian^{1,2}, YAN Changlin^{1,2}, YAN Ge^{1,2}

(1. Huayu Branch, Lanzhou Vacuum Equipment Co., Ltd., Lanzhou 730050, China;

2. Lanzhou Institute of Physics, CAST, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of inlet flow rate of heat transfer oil, thickness of heat sink interlayer and matrix spacing of plate solder joints on temperature uniformity and pressure loss of heat sink. Through theoretical calculation and CAE simulation software, a single factor simulation test was designed to analyze the temperature uniformity of the heat sink surface and the pressure loss of the inlet and outlet. The optimal parameters were confirmed according to the results of the single factor simulation test. In the process of seeking the surface temperature difference of a heat sink not more than 1.55 K and a pressure loss as

收稿日期: 2024-11-25; 修订日期: 2024-12-24

Received: 2024-11-25; Revised: 2024-12-24

基金项目: 2024 年甘肃省科技厅中央引导项目 (24ZYQA032); 甘肃省重点研发计划 (ZSYFGA084)

Fund: 2024 Central Guiding Project of Gansu Provincial Science and Technology Department(24ZYQA032); Key Research and Development Plant of Gansu Province(ZSYFGA084)

引文格式: 冯大伟, 刘伟成, 李向阳, 等. 空间环境模拟设备板式-导热油热沉的设计与验证[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 44-52.

FENG Dawei, LIU Weicheng, LI Xiangyang, et al. Design and Verification of Plate-heat Transfer Oil Heat Sink for Space Environment Simulation Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 44-52.

*通信作者 (Corresponding author)

small as possible, the parameter combination that could achieve the optimal performance of the heat sink was: the inlet flow rate of the heat transfer oil was 2 m/s, the thickness of the interlayer was 8 mm, and the spacing of the plate solder joint matrix was 60 mm. According to the simulation results, the physical heat sink was made and tested. The test showed that the surface temperature difference of the heat sink was 1.28 K, and its error with the simulation value was 4.13%. The pressure loss was 22 943.7 Pa, and its error with the simulation value was 4.05%. The error between the simulation results and the measured results is less than 5%, which indicates that the simulation model is reliable and can be used as a design basis of plate-heat transfer oil heat sink.

KEY WORDS: environment simulation device; plate heat sink; thermal conductive silicone oil; temperature uniformity; pressure loss; finite element simulation

空间环境模拟设备(简称“环模设备”)可以在地面近似地模拟航天器在太空中所受的冷黑、真空、空间辐射等特殊环境。热沉是空间环境模拟设备中用来模拟太空冷黑背景的核心构件,目前国内外主流的热沉主要分为管翅式和障板式^[1-3]。管翅式热沉由不锈钢支管焊接在铜翅片上制作而成^[4-7],因铜翅片与不锈钢之间存在热传导的换热方式,所以其具有传热阻力大、温度均匀性差等特点,主要运用于大型环模设备上。障板式热沉又称为夹层式热沉或板式热沉^[8],是将一层水滴型不锈钢板材的凹面与另一层普通不锈钢板通过点焊而成,另外一种制作方法是 2 层不锈钢板以特定的矩阵进行激光焊接,再通过整体成形和充压胀形。这 2 种方法形成的板式热沉因传热介质直接与热沉表面换热,所以具有换热效率高、温度均匀性好等特点,多用于小型环模设备^[9]。

目前国外对于液态金属和纳米金属材料作为传热介质的热耦合研究较多^[10-12],液态金属和纳米金属材料具有熔点低、沸点高等特点,适合高于室温的高温系统。国内已有许多学者对以上 2 种热沉进行了不同程度的研究,其中以液氮和气氮为传热介质的居多^[13-18],氮流程可以达到 100 K 的低温环境。魏龙涛等^[19]通过对板式-气氮热沉的仿真与分析,研究了氮气压力、氮气入口流速以及流道深度对热沉均匀性和进出口压损的影响。张磊等^[20]通过板式-液氮热沉的仿真与分析,研究了液氮流速、流道深度和间隙以及进出口方式对热沉换热性能的影响。王龙龙等^[21]通过对管翅式-气氮热沉的仿真与分析,研究了支管间距、氮气进口速度以及出口方向对热沉流场均匀性的影响。袁修干等^[22]对管翅式-液氮热沉中液氮的流动进行了理论分析,并建立了基本方程,对以后大型管翅式-液氮热沉的设计和工程上的实现提供了方法和依据。本文所研究的热沉控温环境为 200~400 K,所以选择导热油作为传热介质。

本研究通过理论计算和 Ansys Fluent 软件,以导热油作为板式热沉的传热介质,对达到稳态时热沉表面的温度场进行仿真分析,研究了导热油进口流速、板式热沉夹层厚度以及焊点矩阵间距对于热沉温度均匀性和压损的影响,以期对板式-导热油热沉的设计以及结构优化提供一定参考。

1 热沉结构确定

此热沉来源于某项目 KM1 空间环境模拟设备,相关技术参数:真空容器内径为 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$,直段长为 1 200 mm;热沉温度范围为 $-70\sim 125\ ^\circ\text{C}$ 。考虑到热沉的尺寸和控温范围,热沉形式采用不锈钢板式结构,选择导热油作为传热介质。

将 2 块不锈钢板焊接在一起,热沉板中间采用模压形成凹坑再实施激光点焊的方法,形成导热油流动的通道筒体热沉内径 $\phi 1\ 000\ \text{mm}$,长 1 200 mm。这种结构的热沉不锈钢板可直接接受热辐射,并将热量传递给导热油,换热效率高,导热油流动畅通。同时,采用该结构可以有效降低热沉自身的热负荷,提高热沉的温度均匀性。

2 数值模拟模型

2.1 几何模型与网格划分

利用三维建模软件按照热沉实体尺寸进行建模,热沉几何模型如图 1 所示。

在分析中,将使用 ANSYS Mesh(CFD 物理模块)对模型进行网格划分,整体采用四面体结构。四面体网格排列有序,节点分明,计算效率高。由于管道内壁对流体边界层存在扰动,因此在边界层区建立比较紧密的网格,设置膨胀层(如图 2 所示),并以 1.2 倍速率增长至中间区域网格尺寸,和中间区域的网格连接,以捕捉流体在边界层区流动和传热的特性。夹层中间区域由于流体流动比较稳定,因此生成比较规则的四面体网格。

2.2 数学模型

查阅文献[23]可知,任何流体的流动都必须满足三大定律,同时遵循其各自的控制方程。

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s 。

2) 动量守恒方程:

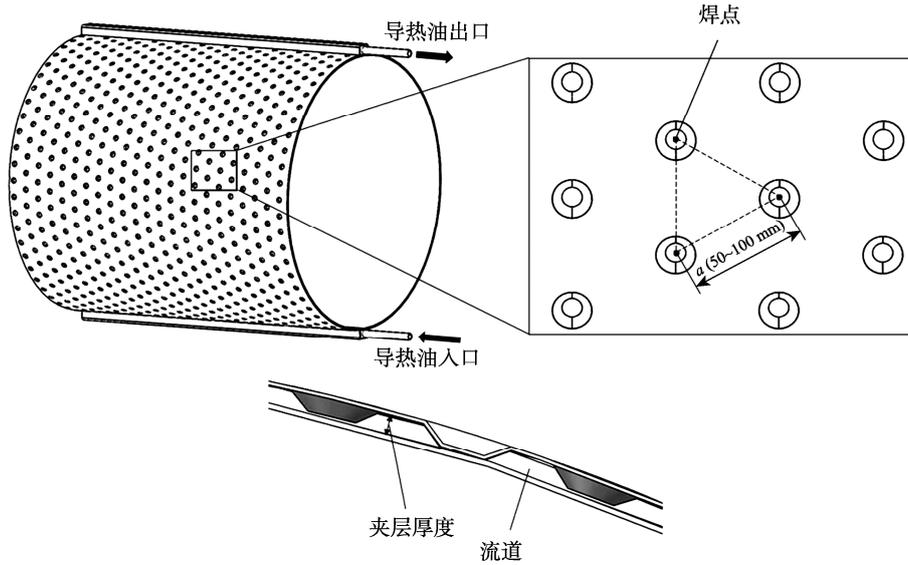


图1 热沉几何模型

Fig.1 Geometry model of heat sink

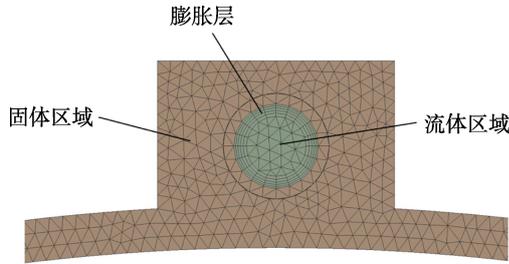


图2 流道膨胀层与部分网格划分

Fig.2 Flow expansion layer and partial grid division

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_u \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_v \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中： p 为流体静压，Pa； u 、 v 、 w 分别为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量，m/s； μ 为流体分子黏度， m^2/s ； S_u 、 S_v 、 S_w 为 3 个动量方程的广义源项。

3) 能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \theta) + \text{div}(\rho \theta u) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{C_p} \text{grad} \theta\right) + S_T \quad (3)$$

式中： θ 为流体温度， $^{\circ}\text{C}$ ； λ 为流体导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； C_p 为流体比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； S_T 为黏性耗散项。

2.3 边界条件与求解方法

仿真计算时的边界条件：入口边界为速度入口，温度设置为 200 K ($-73\text{ }^{\circ}\text{C}$)，流体速度为 $0.5\sim 3\text{ m/s}$ 。出口边界为压力出口，即压力设置为 0 Pa ，表示出口排空。热沉的热负荷，由于模拟太空的真空环境，所

以真空容器内由残存气体引起的对流换热对整个系统的传热影响可以忽略不计。因此，在仿真过程中，热沉的热负荷有 2 种，一种是容器内壁与热沉外壁之间的辐射换热；另一种是被试件与热沉内壁的辐射换热。

1) 真空容器罐壁对热沉的热负荷：

$$Q_1 = \frac{A_1 C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4)$$

式中： Q_1 为容器内壁对热沉的辐射热，W； C_0 为黑体辐射常数， $C_0=5.67\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ； A_1 为热沉外表面积， $A_1=3.77\text{ m}^2$ ； A_2 为容器内表面积， $A_2=9.2\text{ m}^2$ ； T_1 为热沉温度， $T_1=200\text{ K}$ ； T_2 为容器内表面温度， $T_2=298.15\text{ K}$ ； ε_1 为热沉对容器的发射率，内表面喷涂航天黑漆取 0.9 ； ε_2 为容器内壁发射率，不锈钢抛光面取 0.1 。代入数据得 $Q_1=280.6\text{ W}$ ，所以作用在热沉外表面的热通量为 $Q_1/A_1=74.4\text{ W}/\text{m}^2$ 。

2) 被试件热源对热沉的热负荷：

$$Q_2 = Q_s + cm\Delta T \quad (5)$$

式中： Q_2 为被试件对热沉内壁的热负荷，W； Q_s 为被试件的功率，W； c 为被试件的比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； m 为被试件的质量，kg； ΔT 为温度差，K。文中被试样件是一种工作状态下可发热的器件，材料为铝合金，其比热容为 $900\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，质量为 41.44 kg ，功率为 450 W ，代入式 (5) 得 $Q_2=1\ 071.6\text{ W}$ ，因此被试样件对热沉得热负荷为 $Q_2/A_1=284.2\text{ W}/\text{m}^2$ 。

热沉内工质为导热油，选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值模拟，其与 $k-\varepsilon$ 相比，在流动中有更好的精度和鲁棒性^[24]。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型可写成式 (6)、(7)。

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = -\frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = & - \left[\left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} + \frac{2}{3} C_{\mu} C_{\eta} \frac{k \partial u_k}{\varepsilon \partial x_k} \right) \rho \varepsilon \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \right] + \\ & \rho \frac{\varepsilon}{k} \left[(C_{\varepsilon 1} - C_{\eta}) G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中, 模型常数分别为: $C_{\varepsilon 1}=1.42$, $C_{\varepsilon 2}=1.68$, $C_{\varepsilon 3} = [-1+2C_{\varepsilon 1}-3ml(n-1)+(-1)^{\delta} \sqrt{6}C_{\mu}C_{\eta}]/3$, $\beta=0.0015$, $\eta = \frac{S_k}{\varepsilon}$, $C_u=0.0085$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}}\eta_0 = 4.28$, $C_{\eta} = \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$ 。

近壁区域的流动模型选用增强壁面函数, 各参数的离散均设置为精度较高的二阶迎风格式, 对压力-速度耦合运用 Coupled 算法求解。

3 试验与结果讨论

3.1 仿真分析

3.1.1 评价指标

1) 温度均匀性: 以热沉表面最大温差为参考, 温差越小, 代表温度均匀性越好。

2) 热沉进出口压损: 压损越小, 代表系统的能量损失越小, 越不容易出现堵塞现象。

3.1.2 优化指标

在进行单因素仿真试验研究的过程中, 为了寻求各个因素水平下的最优指标点, 设定其最优判据为, 温差不大于 1.55 K, 且压损尽量小, 其约束函数为:

$$\begin{cases} \Delta T \leq 1.55 \text{ K} \\ \min \Delta P \\ 0.5 \leq v \leq 3 \\ 6 \leq \delta \leq 12 \\ 50 \leq a \leq 100 \end{cases} \quad (8)$$

3.1.3 单因素试验

为了探究热沉进口导热油流速、不锈钢夹板之间的距离以及板材焊点矩阵间距对温度均匀性和压损的影响, 首先进行单因素仿真试验。

根据国内外现有对于板式热沉的研究^[25], 热沉入口导热油流速为 0.1~3 m/s, 考虑到导热油的经济流速, 确定热沉导热油入口流速为 0.5~3 m/s; 夹板之间的距离为 6~12 mm; 板材焊点矩阵间距为 50~

100 mm。每组试验固定其中 2 个因素水平, 探究单个因素对于试验指标的影响, 单因素试验水平见表 1。

表 1 单因素试验及水平
Tab.1 Factors and levels of singles factor test

水平	导热油入口流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	夹板间距 δ/mm	焊点矩阵间距 a/mm
1	0.5	6	50
2	1	8	60
3	1.5	10	70
4	2	12	80
5	2.5		90
6	3		100

1) 导热油入口流速对试验指标的影响。设定夹板间距为 10 mm, 板材焊点矩阵间距为 80 mm, 进行导热油入口流速的单因素水平仿真试验, 仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知, 最大温差随着介质入口速度的增大而减小, 但是压损表现出与之相反的状况。这是由于流体流速越大, 单位时间内的换热越充分, 热沉表面温度均匀性越好。介质流速与阻力损失呈现出线性逆相的关系, 导热油流速越大则热沉内部流体分子之间及流体与焊点之间的碰撞摩擦越激烈, 从而压损随速度的增加而增大。从仿真结果曲线以及优化判据约束函数可以看出, 最佳入口速度为 2 m/s。

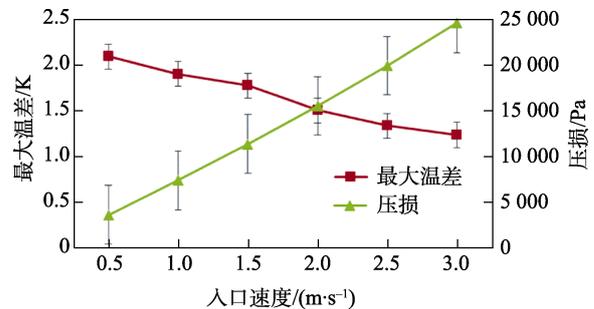


图 3 热沉导热油入口速度对试验指标的影响
Fig.3 Influence of thermal sink velocity on test index

当改变硅油入口速度时, 热沉板材焊点周围的流体扰流分布呈现出显著变化, 如图 4 所示。由于在低温 (70 K) 状态下, 导热硅油的流体黏度较大, 随着流速的增加, 靠近焊点附近形成的速度黏滞梯度区域增加, 越趋近于焊点位置, 流速呈现出递减的趋势, 入口流速的增大直接导致在焊点周围尤其是下游区域形成的尾流扰动范围显著扩张。这种扰流现象不仅有助于提升热沉的换热效率, 使得热沉表面温度分布更为均匀, 但与此同时, 也不可避免地加剧了热沉流道内部的压力损失。

2) 夹板间距对试验指标的影响。在固定流速 (1.5 m/s) 和板材焊点矩阵间距 (80 mm) 情况下, 通过改变板式热沉夹层厚度模拟导热硅油在热沉内部的流动和换热, 得到不同夹层厚度下的热沉最大温差及压力损失如图 5 所示可以看出, 热沉表面最大温

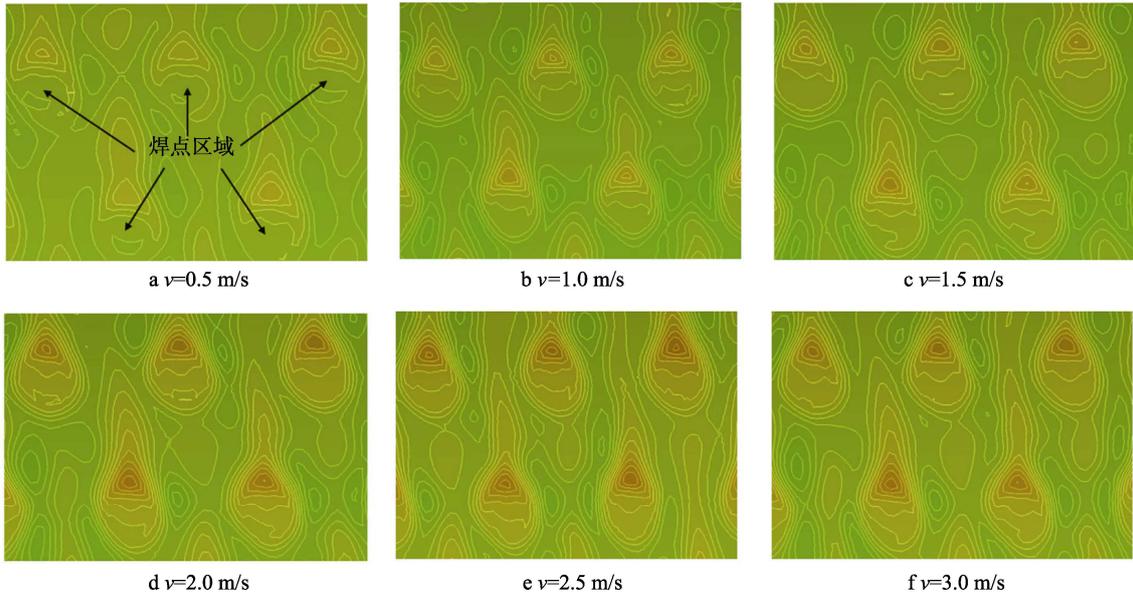


图4 不同流速下流体在焊点附近的扰流现象

Fig.4 Turbulence phenomenon of thermal oil near solder joint at different flow rates

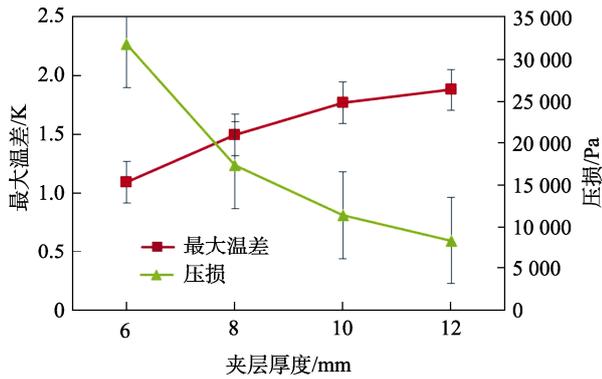


图5 热沉夹层厚度对试验指标的影响

Fig.5 Influence of heat sink sandwich thickness on test index

差夹层间距的增加逐渐减小, 压力损失夹层间距的增加而逐渐减小。由仿真结果趋势曲线和优化判据约束函数可以看出, 当热沉夹层在 8 mm 左右时, 得到最优的温差和压损指标, 即压损为 16 kPa 左右, 最大温差为 1.5 K 左右。

从热沉内部硅油流场分布分析夹层厚度对温度均匀性及压力损失的影响。由热沉同一焊点位置处的速度分布 (如图 6 所示) 可以看出, 流速最大位置发生在两横向焊点中间, 夹层厚度增加即热沉流通截面增大, 从而导致导热硅油的流速越小, 流速降低致使硅油与热沉表面的换热量减小, 同时流速的减小会降低沿程阻力损失和局部阻力损。

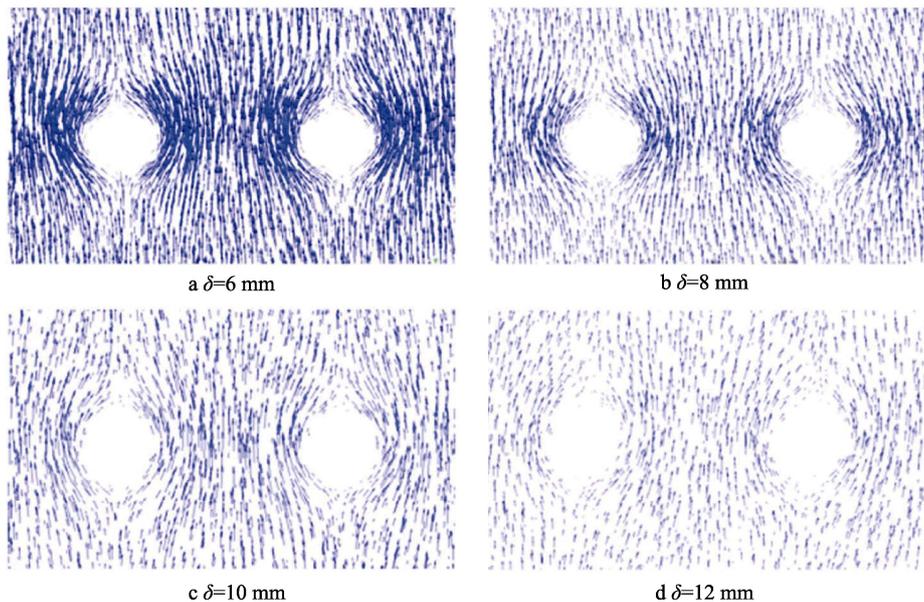


图6 不同夹层厚度时热沉流道速度分布

Fig.6 Velocity distribution of heat sink channel with different interlayer thickness

3) 板材焊点矩阵间距对试验指标的影响。设定入口流速为 1.5 m/s, 夹板间距为 10 mm, 进行板材焊点矩阵间距的单因素水平仿真试验, 仿真结果如图 7 所示。可以看出, 当流速和夹板间距一定时, 最大温差和压损因焊点间距的变化而表现出相反变化趋势, 在焊点矩阵间距较小 (≤ 70 mm) 时, 温差与压损随焊件矩阵间距变化剧烈。当焊点矩阵间距大于 80 mm 后, 随着间距的持续增加, 温差与压损的变化逐渐趋于平缓。由仿真结果和优化判据约束函数可以看出, 当焊点矩阵间距在 60 mm 左右时得到最优的温差和压损指标,

热沉内、外侧流场及温度场分布如图 8 所示。由于导热油在热沉是内部自下而上的流动, 在板材焊点后端形成旋涡区, 旋涡区域介质流动缓慢, 导致此处外部热源辐射到热沉表面上的温度难以被低温导热

油带走, 因此温度最高点发生在水滴形焊点与液体流动方向的背面。焊点之间的间隙处流速较大, 此处传热较快即温度均匀性也越好。

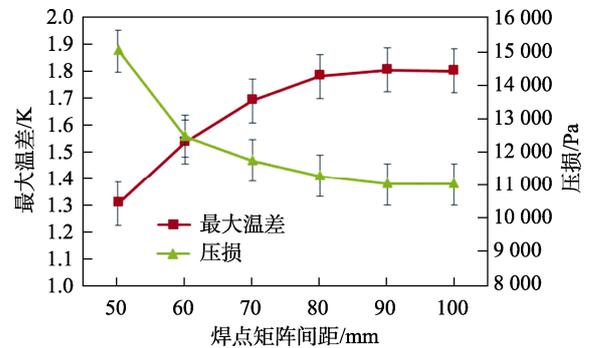


图 7 热沉焊点矩阵间距对试验指标的影响
Fig.7 Influence of heat sink solder joint matrix spacing on test index

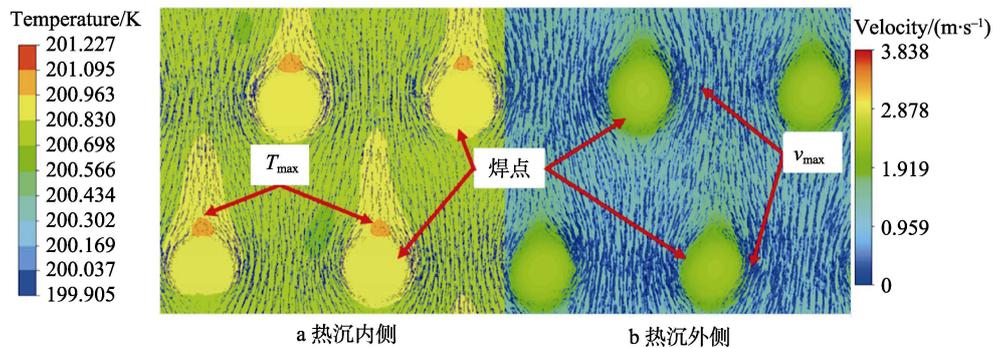


图 8 热沉内外侧焊点周围稳定温度-速度分布云图

Fig.8 Stable temperature-velocity distribution contour around inner and outer solder joints of heat sink

由于硅油在焊点后端容易形成旋涡区, 焊点矩阵间距太小会加速介质摩擦, 进而导致局部阻力损失增大。随着热沉焊点矩阵间距的增加, 整个热沉的焊点数量减少, 热沉内部流场分布受焊点间距的影响变小, 因此由焊点分布引起的局部阻力损失对整个流体压力损失的影响也随之减小。当焊件矩阵间距增大到一定程度后, 压力损失和温度均匀性基本不会因焊点间距的影响而发生较大变化。

3.2 最优参数组合仿真

根据 3 组单因素试验选择了当前认为最优的 3 个热沉参数, 进一步进行仿真试验, 并按照此参数 1:1 制作同样大小的热沉。由上述 3 组单因素仿真试验可知, 在寻求温差不大于 1.55 K, 且压损尽量小的情况下, 最优的仿真试验因素水平: 入口流速为 2 m/s, 夹层厚度为 8 mm, 焊点矩阵间距为 60mm。用以上参数为试验对象, 分别进行仿真试验与实物测试, 探究仿真试验的真实性与可靠性。

仿真结果表明, 热沉表面温度分布均匀, 最大温差为 1.227 K, 热沉温度分布云图如图 9 所示。热沉进出口压力损失为 22 014.6 Pa, 流体压力分布云图如图 10 所示。对热沉进出口的硅油流速进行分析, 由

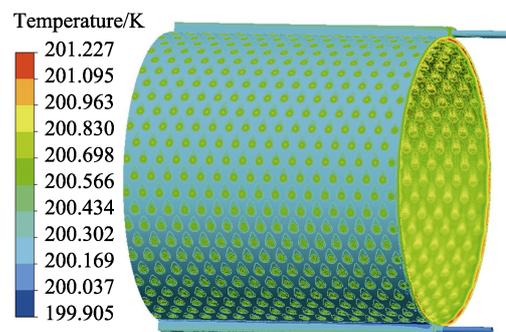


图 9 热沉温度分布云图

Fig.9 Distribution contour of heat sink temperature

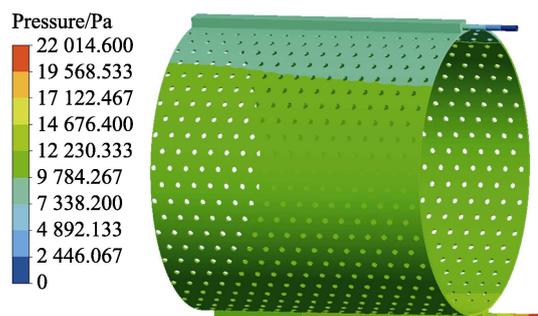


图 10 热沉流体压力分布云图

Fig.10 Distribution contour of heat sink fluid pressure

于硅油本身的黏性，导致管内硅油存在速度梯度，近壁面的流体处于静止状态，速度云图如图 11 所示。

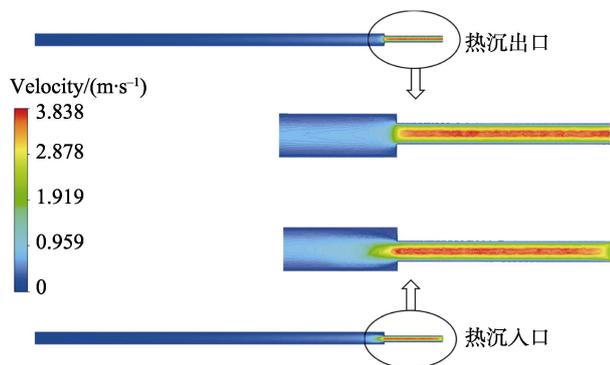


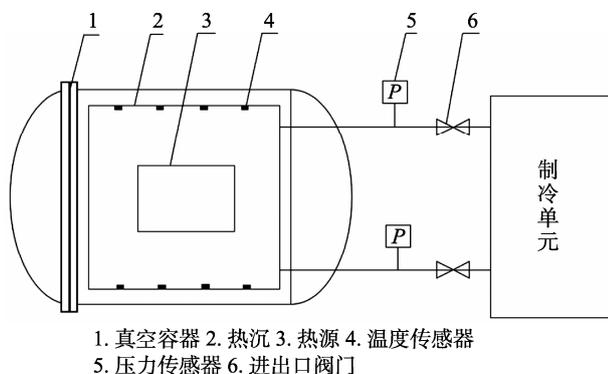
图 11 热沉进出口流体速度云图

Fig.11 Distribution contour of fluid velocity at heat sink inlet and outlet

4 实物测试

4.1 测试原理

为保证热沉内部各个空间都能充满介质，采用下进上出，制冷单元的出口对应热沉的进口。导热油进入热沉后与热源进行辐射换热，结束后回流到制冷单元，如此形成一个循环，直至达到稳态，如图 12 所示。



1. 真空容器 2. 热沉 3. 热源 4. 温度传感器
5. 压力传感器 6. 进出口阀门

图 12 测试原理

Fig.12 Schematic diagram of test

4.2 测试方法

按照《热真空试验设备校准规范》^[26]在热沉内外壁分别均匀安装 16 个 PT100 温度传感器（北京赛亿凌，标检），进出口管路上安装 STP 管道压力传感器（北京赛亿凌，标检），中间放置一个可以持续发热的热源，通过辐射换热使热沉带走热量，所有传感器都通信至电脑。开启制冷机组，等导热油流动并全部充满热沉，达到控温状态下稳定 30 min，开始采集所有数据，第 1 次测试完成。按上述方法连续测试 3 次，每次测试前保证前一次测试不会影响到下一次，确保每次测试都是独立完成的，测试现场如图 13 所示。



图 13 现场测试

Fig.13 Site test

4.3 测试结果

根据上述测试方法，进行了 3 组测试。测试结果显示，热沉表面最大温差平均值为 1.28 K，热沉进出口压损平均值为 22 943.7 Pa，见表 2。

表 2 测试结果

Tab.2 Result of test

项目	ΔT		ΔP	
	测试值/K	与仿真值误差/%	测试值/Pa	与仿真值误差/%
测试 1	1.27	3.4	22 951.8	4.08
测试 2	1.29	4.9	23 014.1	4.34
测试 3	1.28	4.1	22 865.3	3.72
平均值	1.28	4.13	22 943.7	4.05

5 结论

1) 本文利用软件仿真的方式对板式-导热油热沉进行数值模拟计算，通过单因素水平试验确定了每个参数对于试验指标影响的最佳点，分别是入口流速为 2 m/s，夹层厚度为 8 mm，焊点矩阵间距为 60 mm。

2) 用以上参数重新进行试验，仿真试验结果表明，热沉表面最大温差为 1.227 K、进出口压损为 22 014.6 Pa。为了得到较好的温度均匀性，增大了系统的压力损失，这将会影响到机组供油泵的使用，使其能耗增高。

3) 根据模拟仿真结果制作实物热沉，测试结果显示，热沉表面最大温差为 1.28 K，与仿真结果之间误差为 4.13%；进出口压损为 22 943.7Pa，与仿真结果之间的误差为 4.05%。说明该仿真模型可靠，仿真结果对生产制造的指导有效，可以作为板式-导热油热沉的设计依据。

参考文献：

[1] 于涛, 刘敏, 邹定忠. 航天器空间环境模拟器热沉热均

- 匀性分析[J]. 中国空间科学技术, 2006, 26(6): 37-41.
YU T, LIU M, ZOU D Z. Thermal Uniformity Analysis for Heat Sink of Space Simulator[J]. Chinese Space Science and Technology, 2006, 26(6): 37-41.
- [2] 张英明, 石芳录, 张京翔, 等. 空间环境模拟设备夹层式热沉结构的可靠性设计及工艺探讨[J]. 真空与低温, 2019, 25(5): 342-347.
ZHANG Y M, SHI F L, ZHANG J X, et al. The Reliability Design and Process Discussion of Sandwich Plate-Style Thermal Shroud Used for Space Environment Simulator[J]. Vacuum and Cryogenics, 2019, 25(5): 342-347.
- [3] 刘伟成, 马跃兰, 闫格, 等. 空间环境控温热沉结构优化试验[J]. 价值工程, 2024, 43(9): 81-84.
LIU W C, MA Y L, YAN G, et al. Optimization Experiment of Temperature Control and Heat Sink Structure in Space Environment[J]. Value Engineering, 2024, 43(9): 81-84.
- [4] 李罡. 航天器真空热环境试验设备热沉翅片结构焊接加工方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
LI G. Research on Welding Processing Method of Heat Sink Fin Structure of Spacecraft Vacuum Thermal Environment Test Equipment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [5] YANAGIHARA K, MURAKOSHI S, TAKEZAWA A. Fin Angles Optimization of Water-Cooled Plate-Fin Heat Sink Based on Anisotropic Darcy-Forchheimer Theory[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 236: 126325.
- [6] SARVAR S, KABIRZADEH P, MILJKOVIC N. Combining Pin-Fins and Superhydrophobic Surfaces to Enhance the Performance of Microchannel Heat Sinks[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2025, 160: 108351.
- [7] MARKAL B, EVCIMEN A. Investigation of Flow Boiling Phenomenon in Micro-Pin-Fin Heat Sinks Adapted to Actively Direction-Changing Moving Systems[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108310.
- [8] 何鸿辉, 龚洁, 周盈, 等. 结构参数对不锈钢板式热沉流动传热性能影响的仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(4): 374-379.
HE H H, GONG J, ZHOU Y, et al. Simulation of the Effect of Structural Parameters on Flow and Heat Transfer of Stainless Steel Plate Heat Sink[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(4): 374-379.
- [9] 孙华强. 小型热真空环境模拟装置热沉的热力学分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
SUN H Q. Thermodynamic Analysis of Heat Sink in Small Thermal Vacuum Environment Simulation Device[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [10] RAHMAN M, GARI A. Conjugate Heat Transfer Analysis for Fin Filled with Liquid Metal[C]//2nd International Energy Conversion Engineering Conference. Providence, Rhode Island. AIAA, 2004: AIAA2004-5513.
- [11] MUHAMMAD A, ALLAUDDIN U, IRANZO A. Investigation of Laminar Flow and Heat Transfer Performance of Gallium Alloy Based Nanofluids in Minichannel Heat Sink[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 56: 103000.
- [12] AL-OMARI S A B, QASEM M, QURESHI Z A, et al. Effect of Source-Sink Misalignment and Sink Cavity Aspect Ratio on the Thermal Performance of Gallium Heat Sinks[J]. International Journal of Thermofluids, 2024, 24: 100952.
- [13] 张世一, 宋辰辰, 祁松松, 等. 直管型不锈钢板式热沉流动与传热数值模拟[J]. 真空与低温, 2025, 31(1): 104-111.
ZHANG S Y, SONG C C, QI S S, et al. Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer in Stainless Steel Plate Heat Sink with Straight Tube[J]. Vacuum and Cryogenics, 2025, 31(1): 104-111.
- [14] 冯宁, 刘智勇, 颜昌林, 等. 流速对鱼骨式与板式调温热沉性能的影响[J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41(5): 115-122.
FENG N, LIU Z Y, YAN C L, et al. Effect of Flow Velocity on the Performance of Fishbone Type and Plate Type Temperature Regulating Heat Sink[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2022, 41(5): 115-122.
- [15] 祁雪琴, 刘智勇, 杨建斌, 等. 空间环模器热沉温度均匀性研究[J]. 真空与低温, 2020, 26(6): 449-454.
QI X Q, LIU Z Y, YANG J B, et al. Studies on Thermal Uniformity of Gas Nitrogen Heat Sink in Space Environment Simulator[J]. Vacuum and Cryogenics, 2020, 26(6): 449-454.
- [16] 赵晶辉, 杨建斌, 刘伟成, 等. 板式热沉温度均匀性仿真研究[J]. 真空与低温, 2018, 24(5): 321-326.
ZHAO J H, YANG J B, LIU W C, et al. Simulation Study on Temperature Uniformity of Plate-Style Heat Sink[J]. Vacuum and Cryogenics, 2018, 24(5): 321-326.
- [17] 胡继成, 刘智勇, 颜昌林, 等. 流速对管板式热沉速度场均匀性的影响[J]. 甘肃科技, 2018, 34(12): 50-52.
HU J C, LIU Z Y, YAN C L, et al. Effects of Velocities on the Uniformity of Velocity Field of Tube-Sheet Heat Sink[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34(12): 50-52.
- [18] 王瑞, 孙华强, 王晓冬, 等. 不锈钢板式热沉流动与传热的数值模拟[J]. 真空, 2015, 52(1): 72-74.
WANG R, SUN H Q, WANG X D, et al. Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer of Stainless Steel Plate Heat Sink[J]. Vacuum, 2015, 52(1): 72-74.
- [19] 魏龙涛, 杨建斌, 闫格. 不锈钢-气氮板式热沉仿真研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 95-100.
WEI L T, YANG J B, YAN G. Simulation Study of Stainless Steel-Gas Nitrogen Plate Heat Sink[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 95-100.
- [20] 张磊, 刘敏, 刘波涛. 流速及进出液口形式对板式热沉换热性能影响[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(5): 566-570.
ZHANG L, LIU M, LIU B T. Effects of Velocities and Inlet-Outlet Forms on Heat Transfer of Plate-Style Heat

- Sink[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(5): 566-570.
- [21] 王龙龙, 杨建斌, 刘玉魁, 等. 气氮热沉流场均匀性模拟研究[J]. *真空与低温*, 2015, 21(3): 169-172.
WANG L L, YANG J B, LIU Y K, et al. Simulation Study on Flow Field Uniformity of Nitrogen Gas Heat Sink[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2015, 21(3): 169-172.
- [22] 袁修干, 刘国青, 刘敏, 等. 大型液氮热沉中流动与传热均匀性数学模拟与分析[J]. *低温工程*, 2008(2): 18-21.
YUAN X G, LIU G Q, LIU M, et al. Simulation and Analysis of Flow and Heat Transfer Uniformity in Large Liquid Nitrogen Heat Sink[J]. *Cryogenics*, 2008(2): 18-21.
- [23] KHEIRI M, PAÏDOUSSIS M P. On the Use of Generalized Hamilton's Principle for the Derivation of the Equation of Motion of a Pipe Conveying Fluid[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, 50: 18-24.
- [24] 陈庆光, 徐忠, 张永建. RNG κ - ε 模式在工程湍流数值计算中的应用[J]. *力学季刊*, 2003, 24(1): 88-95.
CHEN Q G, XU Z, ZHANG Y J. Application of RNG κ - ε Models in Numerical Simulations of Engineering Turbulent Flows[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2003, 24(1): 88-95.
- [25] 尹大勇, 龚洁, 周盈, 等. 不锈钢板式热沉传热特性的实验与模拟研究[J]. *装备环境工程*, 2024, 21(1): 52-58.
YIN D Y, GONG J, ZHOU Y, et al. Experiment and Simulation Research on Heat Transfer Performance of Stainless Steel Plate Heat Sink[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2024, 21(1): 52-58.
- [26] 国家国防科技工业局. 热真空试验设备校准规范: JJF(军工)328—2022[S]. 北京: 中国计量出版社, 2022.
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence. Calibration Specification for Thermal Vacuum Testing Equipment: JJF(War Industry) 328-2022[S]. Beijing: Chinese Metrology Press, 2022.