



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——• 中文核心期刊 中国科技核心期刊

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

何鸿辉 龚洁 周盈 杨雪 金玮安

Simulation of the effect of structural parameters on flow and heat transfer of stainless steel plate heat sink

HE Honghui, GONG Jie, ZHOU Ying, YANG Xue, JIN Weian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

何鸿辉¹, 龚洁^{2*}, 周盈², 杨雪², 金玮安²

(1. 中国空间技术研究院; 2. 北京卫星环境工程研究所; 北京 100094)

摘要: 为研究不锈钢板式热沉的结构参数对其流动传热性能的影响, 进一步提升其换热效率, 利用 ANSYS 软件建立了与真实结构较为一致而流道高度、焊点直径及焊点排布方式各不相同的热沉几何模型, 并利用 Fluent 软件进行数值模拟。结果表明: 在流速相等的条件下, 较大的流道高度 H 和较小的焊点直径 D 会使热沉的流阻下降, 温度均匀性提升, 从而改善热沉的传热性能; 当供液压力足够时, 对于焊点排布方式分别为矩形和菱形的热沉, 尽管后者的流阻相对更大, 但同时也拥有更高的温度均匀性。以上研究结果可为不锈钢板式热沉结构的设计与优化提供参考。

关键词: 板式热沉; 结构参数; 流动传热; 焊点排布; 数值模拟

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2023)04-0374-06

DOI: [10.12126/see.2023023](https://doi.org/10.12126/see.2023023)

Simulation of the effect of structural parameters on flow and heat transfer of stainless steel plate heat sink

HE Honghui¹, GONG Jie^{2*}, ZHOU Ying², YANG Xue², JIN Weian²

(1. China Academy of Space Technology; 2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering; Beijing 100094, China)

Abstract: In order to study the effect of structural parameters of the stainless steel plate heat sink on its flow and heat transfer performance to improve the heat exchange efficiency, the software ANSYS was used to establish a geometric model of the heat sink that was consistent with the real structure but with different flow path height, solder joint diameter and solder joint arrangement. The software Fluent was used to conduct the numerical simulation. The results show that, under the equal flow velocity, larger flow path height H and smaller solder joint diameter D would reduce the flow resistance of the heat sink and improve the temperature uniformity, thereby improving the heat transfer of the heat sink. When the liquid supply pressure is sufficient, for the heat sinks whose solder joint arrangements are rectangular and rhombic, although the latter's flow resistance is relatively larger, it had higher temperature uniformity. The research may provide a reference for the structural design and optimization of the stainless steel plate heat sink.

Keywords: plate heat sink; structural parameters; flow and heat transfer; solder joint arrangement; numerical simulation

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-07-17

引用格式: 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

0 引言

热沉是空间热环境模拟设备的核心部件,用于模拟冷黑环境,其换热性能的优劣直接影响地面环境模拟试验的效果^[1]。板式热沉是将2层不锈钢板边界进行激光焊接,然后按一定规律在板间点焊,最后经充压胀形等工序使不锈钢板片胀起并在焊点处形成蜂窝状凹面构造出工质流道,从而实现热沉表面直接与工质的换热^[2-5]。蜂窝结构不仅改变了热沉流道截面积,也兼具扰流作用,有效提升了热沉的换热效率和承受热负荷的能力^[6-7]。

张磊等^[4,6]研究了工质流速对板式热沉换热的影响,发现增加流速使热沉换热效率提高的同时也将增大流体压力损失;同时发现等流量下热沉的流道深度与焊点间距是影响其换热性能的重要因素,需选择合理的流道结构设计参数。孙华强^[8]和单巍巍等^[9]对比分析了液氮在传统管板式热沉与不锈钢板式热沉流道中的传热效果和阻力特性,发现后者的换热效率及温度均匀性皆优于前者。冯宁等^[10]对板式调温热沉壁面温度分布情况进行模拟,发现循环氮气入口速度越大,热沉温度分布越均匀。然而影响板式热沉流动传热性能的因素较多,上述文献均未考虑等流速条件下热沉流道高度、焊点直径与焊点排布方式的影响。

为更全面地了解不锈钢板式热沉传热性能的影响因素,本文建立了与真实结构接近而结构参数不同的多个不锈钢板式热沉几何模型,并利用Fluent软件对热沉内工质的流动传热进行数值模拟,比较不同流道高度、焊点直径以及焊点排布方式下热沉传热性能的优劣,以期对热沉结构的优化设计提供参考。

1 数值模拟模型

1.1 几何模型

本文研究的不锈钢板式热沉几何结构参数主要包括流道高度 H 、焊点直径 D 和焊点排布方式,如图1所示。

板式热沉的结构比较复杂,目前已有的数值模拟研究对其几何模型均有不同程度的简化。为了得到与板式热沉实际结构较为一致的几何模型,本文利用ANSYS软件进行建模,根据热沉的成形特点将胀形过程视为准静态过程,同时考虑材料回弹,

并忽略胀形速度、加速度及进出口位置等对不锈钢板应力分布的影响,主要设置包括:

1)本构关系模型采用考虑弹性问题冷加工的线性强化模型;

2)屈服准则采用考虑中间主应力影响的Von-Mises准则;

3)有限元计算方法采用静力隐式算法,模型求解采用Newton-Raphson迭代法;

4)对板件内表面施加垂直向外方向的均匀压力,开启大变形开关。

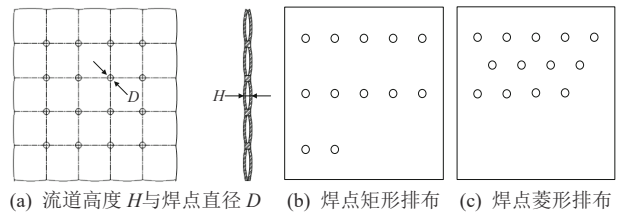


图1 板式热沉的几何结构参数

Fig. 1 Geometric structural parameters of the plate heat sink

通过上述建模步骤得到的板式热沉几何结构单元如图2所示;同时,以流道高度7 mm、焊点间距75 mm、焊点直径14 mm的热沉实物为例,对其两相邻焊点间的胀起高度进行多次测量,得到实物与仿真结果的胀起高度对比(见图3),可以看到三维仿真模型与实物结构有着较高的相合性。

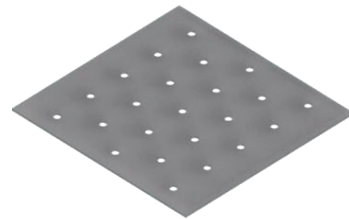


图2 板式热沉的几何结构单元

Fig. 2 Geometric structural unit of the plate heat sink

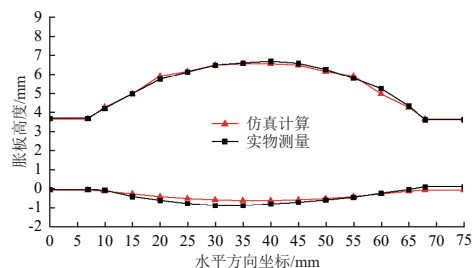


图3 热沉实物与模型的胀起高度对比

Fig. 3 Comparison of bulge height between the heat sink and its model

板式热沉模型的平面示意图如图4,长1200 mm、宽400 mm,流体自左侧流入、右侧流出。为研究热沉充分发展段的流动换热规律,避免进出口结构的影响,选择在长度方向上多建立几排焊点,以区分

进出口对焊点的影响段与充分发展段,同时在最后一排焊点后设置 400 mm 的无焊点延长段。

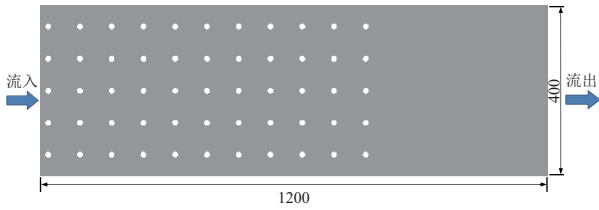


图4 模型平面示意图

Fig. 4 Plane diagram of the model

1.2 数学模型

流体流动所遵循的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程^[11]。

质量守恒方程为

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

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

动量守恒方程为

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

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

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \text{div}(\rho T \mathbf{u}) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T, \quad (3)$$

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

1.3 边界条件与数值求解方法

根据板式热沉的结构特点,对几何模型进行非结构化网格划分和网格无关性验证后,将网格文件导入 Fluent 软件进行仿真计算。计算边界条件设置如下:

- 1) 入口边界条件采用速度入口,入口温度设为 300 K,入口流体速度为 1 m/s;
- 2) 出口边界条件采用压力出口,环境压力设为标准大气压;
- 3) 上、下壁面和焊点周围及侧边焊缝均设为无

滑移边界条件,下壁面温度分布服从恒热流条件,热流密度设为 6000 W/m^2 ,其他壁面绝热。

热沉内工质选择水,湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[12],近壁面处理选用增强壁面函数,压力-速度耦合选用 Coupled 算法,各参数的离散均为二阶精度迎风格式,解收敛判断标准是相对残差不大于 1×10^{-5} 。

2 仿真结果与讨论

2.1 流道高度的影响

对流道高度为 4 mm、7 mm、10 mm,焊点间距为 75 mm,焊点直径为 14 mm,焊点排布方式为矩形的不锈钢板式热沉进行模拟计算,并从每排焊点圆心所在截面,绘制不同流道高度下截面平均压力随截面位置变化的曲线(图 5),同时得到热沉的温度分布云图(图 6)及不同截面平均压力分布云图(图 7)。

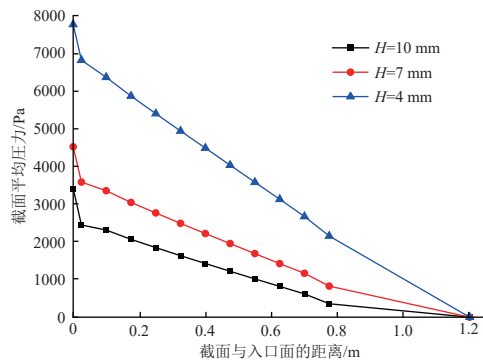
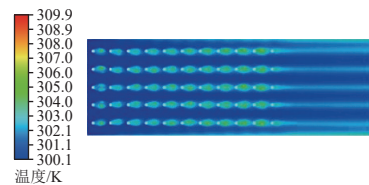
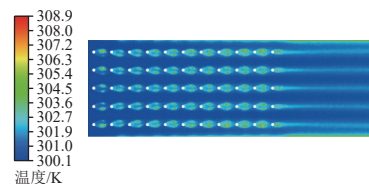


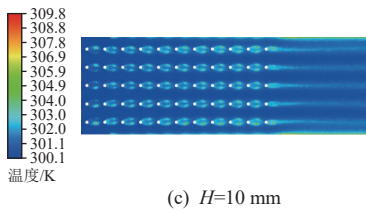
图5 不同流道高度下截面平均压力随截面位置的变化
Fig. 5 Variation of average pressure of the cross-section with its position of the cross-section for different flow path heights



(a) $H=4 \text{ mm}$

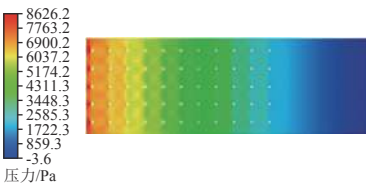


(b) $H=7 \text{ mm}$

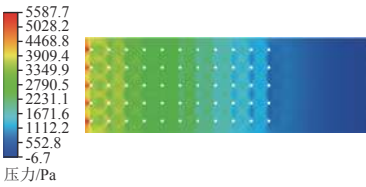


(c) $H=10\text{ mm}$

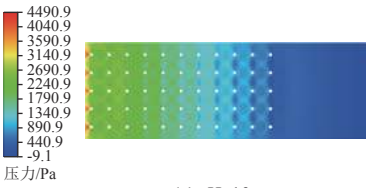
图 6 不同流道高度下的热沉温度分布云图
Fig. 6 Heat sink temperature distribution contour for different flow path heights



(a) $H=4\text{ mm}$



(b) $H=7\text{ mm}$



(c) $H=10\text{ mm}$

图 7 不同流道高度下的热沉压力分布云图
Fig. 7 Heat sink pressure distribution contour for different flow path heights

由图 5 可知, 工质经过前 2 排焊点后进入充分发展阶段, 且由焊点段过渡到无焊点段时的压力变化并不均匀, 对比焊点段和无焊点段可以明显看出焊点会造成更大的压降(流阻)。由图 6 和图 7 可知: 焊点附近的温度与压力梯度变化均十分明显; 在相同流速下, 当流道高度 H 处于 4~10 mm 之间, H 越大则压降越小, 且换热面温差也将减小, 表明此时热沉表面整体结构的温度均匀性较好。这是由于 H 的增大使得流道尺寸相应增加, 焊点对工质流动的阻碍作用减弱, 同时工质与热沉内表面的接触面积变大, 从而降低了流阻并使换热更为充分。因此在实际泵驱冷却循环过程中, 应尽量选用 H 较大的胀板结构, 通过较低压降实现更大的循环流量和温度均匀性, 以改善热沉的流动传热性能。

2.2 焊点直径的影响

对焊点直径为 6 mm、10 mm、14 mm, 流道高度为 10 mm, 焊点间距为 75 mm, 焊点排布方式为矩形的不锈钢板式热沉结构进行模拟计算, 绘制不同焊点直径下截面平均压力随截面位置变化的曲线(图 8), 同时得到热沉温度分布云图(图 9)及不同截面平均压力分布云图(图 10)。

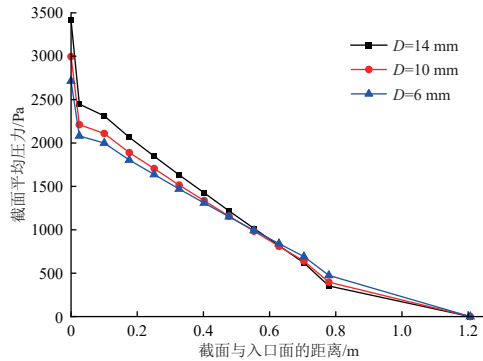
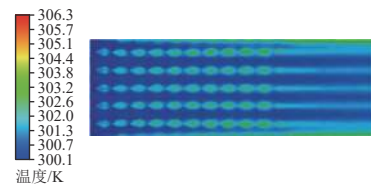
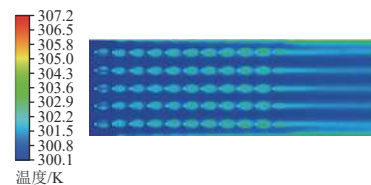


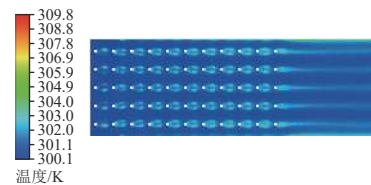
图 8 不同焊点直径下截面平均压力随截面位置的变化
Fig. 8 Variation of average pressure of the cross-section with its position for different solder joint diameters



(a) $D=6\text{ mm}$



(b) $D=10\text{ mm}$



(c) $D=14\text{ mm}$

图 9 不同焊点直径下的热沉温度分布云图
Fig. 9 Heat sink temperature distribution contour for different solder joint diameters



(a) $D=6\text{ mm}$

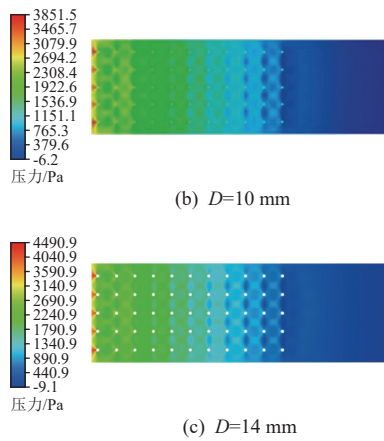


图 10 不同焊点直径下的热沉压力分布云图

Fig. 10 Heat sink pressure distribution contour for different solder joint diameters

由图 8~图 10 可知,工质经过前 3 排焊点后进入充分发展阶段,对比 3 种焊点直径下的压力变化可以发现,当焊点直径 D 处于 6~14 mm 之间, D 较大时,压降有所上升,且换热面温差增大,即此时热沉的温度均匀性较差。这是由于焊点尺寸增大将使热沉流道截面积缩小、扰流作用增强,工质流动时的压力损失增大;另一方面,焊点内部没有流体冷却,只能通过不锈钢导热,而不锈钢的导热性能相对较差,故使焊点位置局部温度较高。因此,实际加工时,应在结构强度允许的前提下,尽量选用焊点尺寸较小的胀板结构。

2.3 焊点排布方式的影响

对焊点排布方式分别为矩形和菱形,流道高度为 7 mm,焊点间距为 75 mm,焊点直径为 14 mm 的不锈钢板式热沉结构进行模拟计算,绘制不同焊点排布方式下截面平均压力随截面位置变化的曲线(图 11),同时得到热沉的温度分布云图(图 12)及不同截面平均压力分布云图(图 13)。

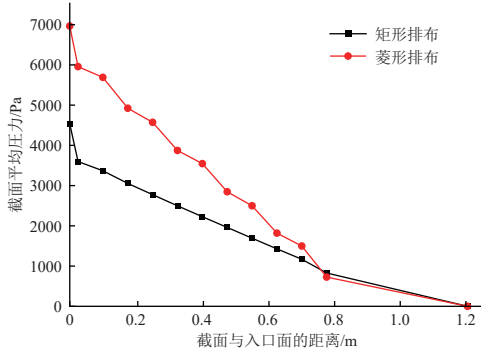


图 11 不同焊点排布方式下截面平均压力随截面位置的变化
 Fig. 11 Variation of average pressure of the cross-section with its position for different solder joint arrangements

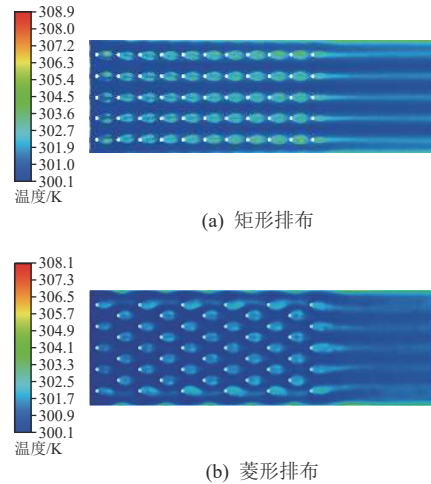


图 12 不同焊点排布方式下的热沉温度分布云图

Fig. 12 Heat sink temperature distribution contour for different solder joint arrangements

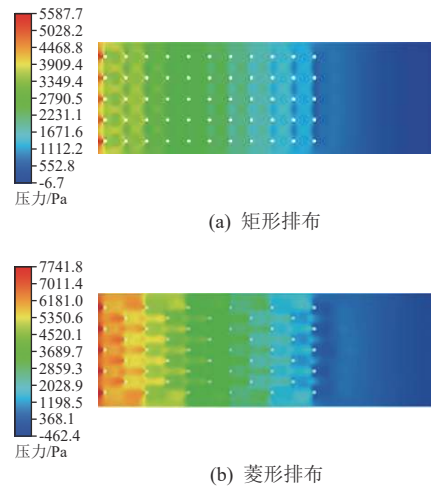


图 13 不同焊点排布方式下的热沉压力分布云图

Fig. 13 Heat sink pressure distribution contour for different solder joint arrangements

由图 11~图 13 可知,在相同流速下,相比焊点矩形排布,菱形排布会造成更大的压力损失,但换热面温差也更小,即焊点菱形排布可以改善热沉的传热性能,提升热沉表面的温度均匀性。这是由于菱形交错排列的焊点使工质流动的速度大小和方向改变得更为明显,增强了其扰动程度,减少了流动死区,增大压力损失的同时亦强化了传热。因此,在系统供液压力足够的前提下,可尽量选用菱形焊点排布结构以提高板式热沉的温度均匀性。

3 结束语

本文利用 ANSYS 软件建立了与不锈钢板式热沉实际结构相近的三维模型,并使用 Fluent 软件进行数值模拟,分析了等流速时流道高度 H 、焊点直

径 D 以及焊点排布方式这 3 种结构参数对热沉流动传热性能的影响。结果发现: 在结构强度允许的前提下, 应尽量选用 H 较大、 D 较小的胀板结构来降低热沉工质流阻, 提升热沉表面的温度均匀性; 在系统供液压力足够的前提下, 选用焊点为菱形排布的胀板结构可改善热沉的传热性能。以上研究结果可为不锈钢板式热沉结构的设计与优化提供理论参考。

参考文献 (References)

- [1] 黄本诚, 童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 124-127
- [2] 黄本诚, 刘波涛, 李志胜. 空间模拟器设计技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017: 154-155
- [3] 葛佩红, 罗清海, 涂敏, 等. 蜂窝换热板研究进展[J]. 制冷与空调, 2019, 19(12): 5-10
GE P H, LUO Q H, TU M, et al. Research advance of honeycomb heat exchange plate[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(12): 5-10
- [4] 张磊, 刘敏, 刘波涛. 流速及进出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
- [5] 蒋志广, 许贞龙, 张立建. 不锈钢板式热沉液压胀形工艺参数仿真分析[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(1): 33-39
JIANG Z G, XU Z L, ZHANG L J. Simulation of hydro-bulging process of stainless-steel plate heat sink[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(1): 33-39
- [6] 张磊, 刘然, 刘敏. 蜂窝流道热沉强化传热数值模拟[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 121-125
ZHANG L, LIU R, LIU M. Numerical simulation of heat transfer enhancement in honeycomb shroud[J]. Equipment Environment Engineering, 2013, 10(4): 121-125
- [7] 金玮安, 张磊. 大热流背景下蜂窝板结构参数的多目标优化[J]. 航天器环境工程, 2023, 40(2): 128-133
JIN W A, ZHANG L. Multi-objective optimization of structural parameters of honeycomb plate under large heat flow[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(2): 128-133
- [8] 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: 59-70
- [9] 单巍巍, 丁文静, 王紫娟, 等. 不锈钢胀板式热沉性能分析及其数值模拟[C]//第十届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2011 年度学术交流会论文集, 2011: 557-561
- [10] 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
- [11] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 34-38
- [12] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. Journal of Scientific Computation, 1996(1): 3-11

(编辑: 冯露漪)

一作简介: 何鸿辉, 高级工程师, 主要从事空间环境模拟设备研制等工作。

*通信作者: 龚 浩, 研究员, 主要从事空间环境模拟技术的研究。