

蜂窝流道热沉强化传热数值模拟

张磊, 刘然, 刘敏

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 热沉是模拟太空深冷环境的核心部件。为提高空间深冷环境的模拟效果,更好地满足型号试验需求,设计了一种蜂窝流道热沉。利用流体力学理论和有限元方法对蜂窝热沉内部流体的流动和强化传热进行数值模拟,分析流道结构参数对流体流动和换热的影响,确定最优的流道结构参数。结果表明,同等条件下蜂窝热沉表面温度低于管板式热沉5 K左右,温度均匀性可达到 ± 2 K;流道深度和间距是影响流体在热沉中流动与传热的重要因素,合理选择流道结构参数可以提高热沉的换热性能;需要综合考虑传热和阻力问题来确定最优的流道结构参数,最优的蜂窝热沉流道间距为75 mm,深度为10 mm。

关键词: 热沉; 强化换热; 蜂窝结构; 优化

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.029

中图分类号: V416.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)04-0121-05

Numerical Simulation of Heat Transfer Enhancement in Honeycomb Shroud

ZHANG Lei, LIU Ran, LIU Min

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Shroud is an important part of space environment simulator. A new type of shroud with honeycomb flow passages was designed for improving the simulation of cold black space environment and satisfying the needs of spacecraft tests. A numerical simulation of inside flow and heat transfer of honeycomb shroud was done by using the theory of hydrodynamics and finite-element method, for analyzing the effect on fluid flow and heat transfer when changing the design value of flow passage to confirm the best design value. Test results showed that the surface temperature of honeycomb flow passage thermal shroud is 5 K lower than finned pipe thermal shroud and the temperature evenness is ± 2 K; the deepness and space length of flow passage are important factors effecting the fluid flow and heat transfer in thermal shroud; the best design value of honeycomb flow passage thermal shroud is that space length 75 mm and deepness 10 mm by considering the heat transfer and resistance pressure.

Key words: shroud; heat exchange enhancement; honeycomb structure; optimization

热沉是空间环境模拟设备中模拟空间深冷环境的核心部件,向热沉中通入冷介质来获得冷背景^[1]。因此,热沉换热性能直接影响型号试验的模拟效果。提高热沉性能的关键是强化冷介质与热沉之间

收稿日期: 2013-02-21

基金项目: 中国空间技术研究院自主研发项目(YY-BZ(WM)-2012-04)

作者简介: 张磊(1983—),男,河北邯郸人,博士,工程师,主要研究方向为高效能热沉换热特性和真空热环境模拟技术。

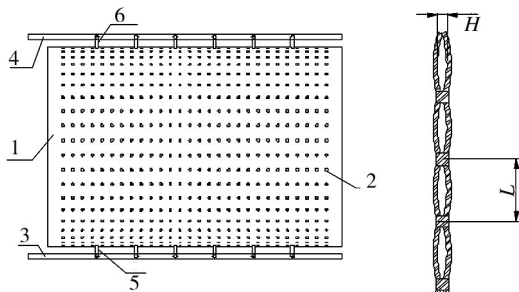
的换热。传热学原理表明,增强换热的途径主要有提高换热系数、增大换热面积和加大传热温差^[2-3]。若选择加大传热温差,会导致能耗的大幅度增加;热沉一般布置在真空容器内,其尺寸受到外部容器的限制,换热面积无法增大^[4-6]。选取低温性能良好的不锈钢作为热沉材料,设计了一种内部布置扰流柱的蜂窝结构热沉。该热沉内部的扰流柱可以增强流体扰动,减薄或破坏了热边界层的连续发展,使换热加强。同时,蜂窝流道热沉使得传热介质与热沉表面直接接触,所有换热表面均为直接参与换热的一次表面,承受热负荷的能力较强。

影响热沉换热性能的因素有很多,文献[7]研究了流速及进出液口形式对热沉换热的影响,但没有考虑热沉结构影响。蜂窝流道热沉的主要参数是流道结构尺寸,通过对8种不同结构蜂窝流道热沉的换热性能进行仿真计算,得到其壁面温度分布情况、流动和换热性能曲线,确定最优的流道结构参数。此外,将蜂窝流道热沉计算结果与传统管板式热沉进行比较,结果表明蜂窝流道热沉换热性能明显优于管板式热沉。

1 蜂窝流道热沉设计

1.1 几何结构设计

蜂窝流道热沉由进液总管、出液总管、进液支管、出液支管、不锈钢换热板、圆柱形扰流柱组成。蜂窝流道热沉几何结构单元如图1所示,两块不锈钢换热板中间为具有一定高度的夹层;圆柱形扰流



1.不锈钢换热板; 2.圆柱形扰流柱; 3.进液总管; 4.出液总管;
5.进液支管; 6.出液支管

图1 蜂窝流道热沉结构单元

Fig. 1 Structural diagram of the honeycomb shroud

柱按照一定间距均匀布置在两块不锈钢换热板中间,形成蜂窝型流道;进出液支管与进出液总管连接后密封焊接在不锈钢换热板上。蜂窝流道热沉三维结构如图2所示。

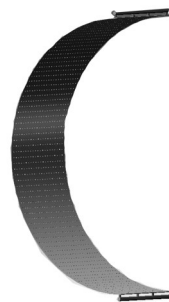


图2 蜂窝流道热沉三维结构

Fig. 2 Three-dimensional graph of the honeycomb shroud

1.2 几何参数指标

在蜂窝流道热沉结构参数中,对热沉性能影响较大的主要是流道深度 H 和通道间距 L ,如图1所示。为研究蜂窝结构参数对热沉性能的影响,选取不同深度和间距下的几何参数,见表1。

表1 蜂窝流道热沉几何参数

Table 1 Geometric parameters of the honeycomb shroud

mm

参数	间距固定				深度固定			
深度	5	10	15	20	10			
间距	75				35	50	75	105

2 换热性能分析

蜂窝流道热沉结构形式与传统的管板式热沉差异显著,传统的换热性能分析方法无法用于蜂窝流道热沉的计算,需要研究全新的计算方法。利用流体力学理论和有限元方法对热沉的换热及压降特性进行数值模拟,得到了不同结构参数下热沉壁面温度分布、平均努塞尔数和压力损失值。

2.1 计算工况及仿真计算

使用Gambit软件对几何模型进行网格划分并设定边界条件类型,将Gambit生成的文件导入Fluent

软件进行仿真计算。在进行模拟时,冷却介质选择液氮,采用速度入口和自由出口流动边界条件,入口速度根据研究需要设定,温度为83 K;内壁面边界条件设为无滑移速度边界条件 $u=0$,温度分布服从恒热流条件,热流强度为 500 W/m^2 ;外壁面边界条件设为无滑移速度边界条件 $u=0$,温度分布服从恒热流边界条件,热流强度为 40 W/m^2 。计算湍流模型采用RNG模型的 $k-\varepsilon$ 方程,压力-速度耦合采用Simple算法,各参数的离散均采用二阶精度的迎风格式,解收敛的判断标准为相对残差 $R \leq 1 \times 10^{-5}$ 。经过多次迭代后计算收敛,完成仿真计算过程。

2.2 计算结果

2.2.1 不同流道深度热沉计算结果

不同深度热沉壁面温度场分布如图3所示。换热系数(Nu)与压降 ΔP 随 H 的变化曲线分别如图4和图5所示。

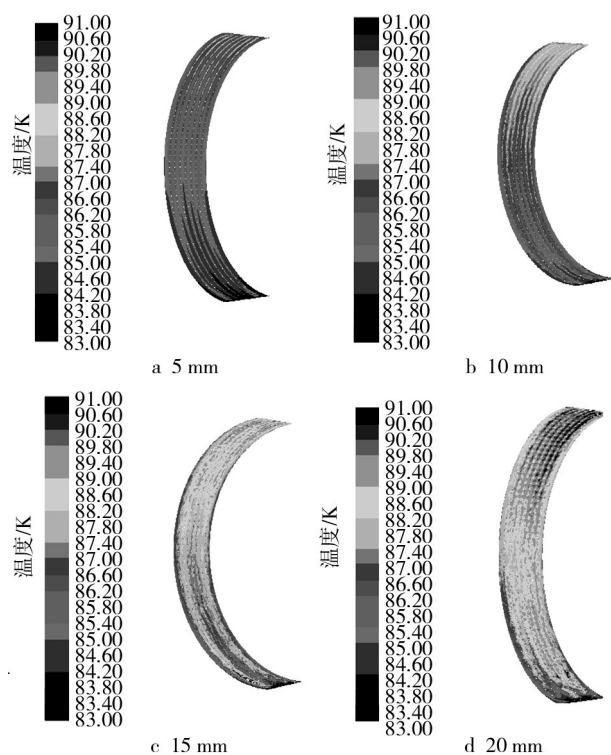


图3 不同流道深度热沉温度场分布

Fig. 3 Heat sink temperature distribution of different depth

2.2.2 不同流道间距热沉计算结果

不同间距热沉壁面温度场分布如图6所示。 Nu 与 ΔP 随 L 的变化曲线分别如图7和图8所示。

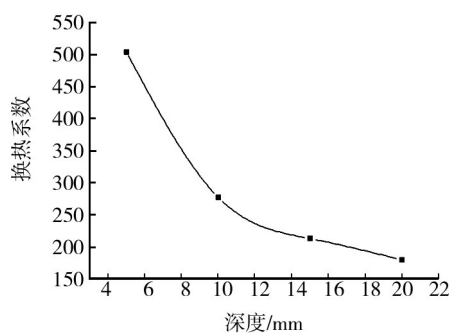


图4 不同流道深度换热系数曲线

Fig. 4 The curve of heat-transfer coefficient with the flow channel depth

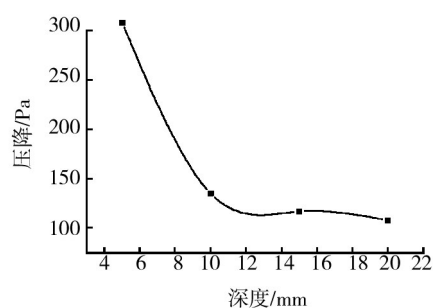


图5 不同流道深度压降曲线

Fig. 5 The curve of pressure with the flow channel depth

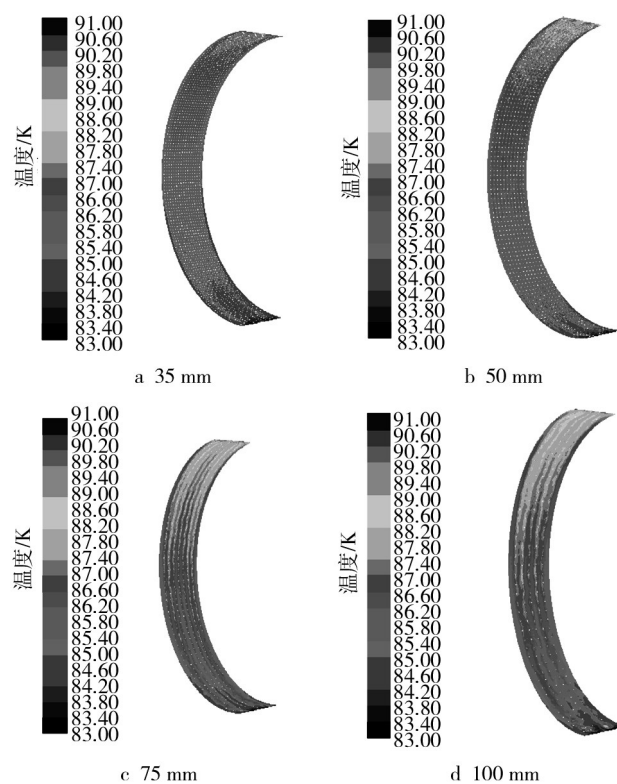


图6 不同流道间距热沉温度场分布

Fig. 6 Heat sink temperature distribution of different spacing

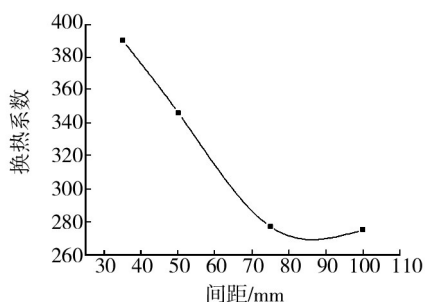


图7 不同流道间距换热系数曲线

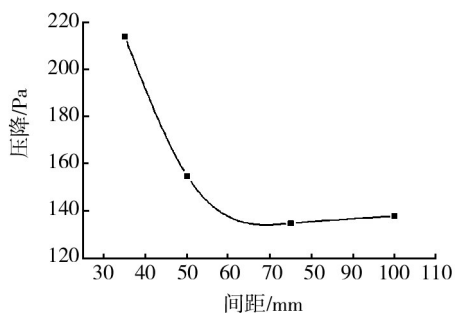
Fig. 7 The curve of Nu with the flow channel spacing L 

图8 不同流道间距压降曲线

Fig. 8 The curve of ΔP with the flow channel spacing L

2.3 分析讨论

2.3.1 流道深度对热沉换热性能的影响

从图3可以看出,当深度为5 mm和10 mm时,热沉温度均匀性均为 ± 2 K;当深度为15 mm和20 mm时,热沉温度均匀性均为 ± 3 K。流道深度对热沉壁面温度均匀性影响不显著。由于流体与热沉表面直接接触,所有换热表面均为直接参与换热的一次表面,并且热沉内部分布有多个能够起到扰流作用的小圆柱,因此热沉温度均匀性较好。不同深度热沉的小圆柱数目一样,因此温度均匀性相差不大。

由图4可知,随着流道深度的增加, Nu 减小,换热效果变差。在流量固定的条件下,流道深度的增加会使热沉内部流体的流速变小,从而导致换热效果变差。在热沉的实际工作中,流道深度越小,结垢的倾向越大。此外,流道深度越小,流动的压力损失越大,如图5所示。因此,合理的流道深度应该在10 mm左右。

2.3.2 流道间距对热沉换热性能的影响

从图6可以看出,不同间距热沉温度均匀性均

能达到 ± 2 K,流道间距对热沉壁面温度均匀性影响不显著。随着间距的增加,热沉内部小圆柱的数目减少,扰流作用减弱。不同流道间距下的小圆柱分布均匀,使得热沉壁面的整体温度分布并没有受到影响。

由图7和图8可以看出,流道间距由100 mm减小到75 mm, Nu 和 ΔP 均增加,但变化幅度不大;当流道间距由75 mm减小到35 mm, Nu 和 ΔP 均明显增加。随着流道间距减小,热沉内部的小圆柱数目增加,扰流作用增强,从而强化了流体与热沉之间的对流换热效率,流动阻力变大。当小圆柱数目增加到一定程度后,会产生二次回流,流体与壁面间的传热得到强化,但同时也增大了流动阻力。由以上分析可以看出,不能单独通过减小流道间距来提高热沉的换热效率,应综合考虑传热和阻力问题来确定最优的流道间距,这与文献[8]的研究结论相同。

2.3.3 与管板热沉换热性能比较

文献的计算结果表明^[9-10],当热沉表面热负荷为400 W/m²,进口液氮温度为83 K时,管板式热沉壁面最高温度为92.22 K。对于流道深度10 mm、间距75 mm的蜂窝流道热沉,在表面热负荷为500 W/m²,进口液氮温度为83 K时,热沉壁面最高温度为89.5 K,温度均匀性为 ± 2 K。可以看出,蜂窝流道热沉的换热性能显然优于传统的管板式热沉。

3 结论

蜂窝流道热沉采用强化对流换热的方法增强换热效果,提出了全新的热沉设计理念,为热沉的更新换代提供技术支持。数值计算结果表明,蜂窝流道热沉的换热效果明显优于管板式热沉;流道深度和间距是影响蜂窝流道热沉换热性能的重要因素,合理选择流道结构参数可以提高热沉的换热性能;需要综合考虑传热和阻力问题来确定最优的流道结构参数,文中最优的蜂窝流道热沉流道间距为75 mm,深度为10 mm。

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(6): 37—41.
- [2] WEBB R L. Principle of Enhanced Heat Transfer[M]. New

- York: John Wiley & Sons, 1994: 56—84.
- [3] 李丽霞. 插入扰流元件换热器换热特性数值模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009: 6—7.
- [4] WATSON R N, PROULX G F. A New Thermal Vacuum Facility for Hughes Space and Communications at El Segundo California[C]// The 20th Space Simulation Conference of the Changing Testing Paradigm. 1998: 113—130. (余不详)
- [5] GOVINDAN P, SATYANARAYANA M, DEVIPRASAD Karnik, et al. Design and Performance of Φ 0.6 m Thermal Vacuum Chamber[C]// Proceedings of the 18th International Cryogenic Engineering Conference. 2000: 679—682. (余不详)
- [6] 杨建斌, 张文瑞, 柏树, 等. ZM4300 光学传感器空间环境模拟试验设备新技术[J]. 真空与低温, 2010, 16(1): 25—29.
- [7] 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.
- [8] 姬长发, 王跃勇, 刘晓兵. 酒窝状换热板强化换热效果分析[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(3): 330—335.
- [9] 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.
- [10] 丁文静, 单巍巍, 刘敏, 等. 大型空间环境模拟设备热沉管网系统仿真计算[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 584—586.

(上接第89页)

1) FGB传感器中心波长随应变增加而增加, 其拟合结果见式(2)。

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha \varepsilon = 1562.415 + 2.497 \times 10^{-4} \varepsilon \quad (2)$$

式中: λ_0 为初始中心波长, nm。

2) FGB传感器测量范围超过 5000 $\mu\varepsilon$ 。

3) FGB传感器在其测量范围内, 线性度很好, 标准偏差 $S=0.005\ 56$, 复相关系数 $R=0.999\ 95$ 。

4 结语

通过设计大应变试验加载平台, 并通过FBG传感器对大应变试验加载平台标定, 求得了平台的载荷与应变之间的比例系数 K , 最终等比加载实现了对FBG传感器超过 5000 $\mu\varepsilon$ 的大应变标定。通过设计、有限元分析、试验分析, 得到以下结论。

1) 文中设计的大应变试验加载平台可有效产生线性大应变。

2) 通过试验、标定, FGB传感器测量范围可达到 5000 $\mu\varepsilon$, 且线性度较好。

3) 文中设计的试验、标定方法合理、可行。

4) 由于文中大应变试验加载平台的加载方式与飞机实际使用时的加载方式相似, 因此FBG传感器由钢管封装、等强度梁加载所引起的误差^[7]可有效地补偿抵消。

参考文献:

- [1] 常飞, 韩庆, 尚柏林. 光纤技术在军用飞机结构健康监测中的研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(10): 2641—2646.
- [2] 尚柏林, 宋笔锋, 万方义. 光纤传感器在飞行器结构健康监测中的应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008(3): 7—10.
- [3] 张泰峰, 孙文胜, 杨晓华, 等. 飞机结构单机寿命监控的几个关键问题的研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(6): 6—9.
- [4] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 56—64.
- [5] 高绍武. 一种新型位移传感器的研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001(3): 264—268.
- [6] 刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤 Bragg 光栅传感原理及增敏技术[J]. 光电子技术与信息, 2006, 19(3): 18—22.
- [7] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 72—76.

(上接第116页)

- [K]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 18—21.
- [4] 高峰, 杨宝宁, 马海全, 等. 航天器复合材料结构的渐进损伤分析[J]. 航天器工程, 2009, 5: 12.
- [5] 赵伶丰, 白光明. 复合材料胶接接头分析研究[J]. 航空器

环境工程, 2007, 24(6): 393—396.

- [6] 王宝忠. 飞机设计手册: 结构设计 第10册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 1028—1030.
- [7] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1—4.